

**TERMAL ÇEVİRİMİN BAZALT-KARBON
INTRA-PLY HİBRİT ELYAF TAKVİYELİ
KARBON NANOTÜP VEYA GRAFEN DOLGULU
POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE
TERMAL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Farzin AZİMPOUR SHİSHEVAN

Doktora Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekanik Bilim Dalı

Prof. Dr. Hamit AKBULUT

2015

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**TERMAL ÇEVİRİMİN BAZALT-KARBON INTRA-PLY HİBRİT
ELYAF TAKVİYELİ KARBON NANOTÜP VEYA GRAFEN
DOLGULU POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE
TERMAL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Farzin AZİMPOUR SHİSHEVAN

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Mekanik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2015**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**TERMAL ÇEVİRİMİN BAZALT-KARBON INTRA-PLY HİBRİT ELYAF
TAKVİYELİ KARBON NANOTÜP VEYA GRAFEN DOLGULU POLİMER
KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİ**

Prof. Dr. Hamit AKBULUT danışmanlığında, Farzin AZİMPOUR SHİSHEVAN tarafından hazırlanan bu çalışma 27/08/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Mekanik Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak ~~oybirliği/oy-~~
~~çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.~~

Başkan: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

Üye: Prof. Dr. Adnan Özel

Üye: Prof. Dr. Murat DEMİR AYDIN

Üye: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

Üye: Prof. Dr. Mehmet ZOR

İmza:

İmza:

İmza:

İmza:

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 03.09.2015 tarih ve 35./1224 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

Bu çalışma. BAP ve Tübitak projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: BAP 2012/448, Tübitak 213M600

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Her düştüğümde elimden tutmaya hazır olan babama, şefkat ve sevgisini sabrının arkasında gizleyen anneme ve hep yanımda olan ablam ve kardeşime,

ÖZET

Doktora Tezi

TERMAL ÇEVİRİMİN BAZALT-KARBON INTRA-PLY HİBRİT ELYAF TAKVİYELİ KARBON NANOTÜP VEYA GRAFEN DOLGULU POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Farzin AZİMPOUR SHİSHEVAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

Bu tez çalışması kapsamında, periyodik değişken sıcaklık şartlarında çalışma kabiliyetine sahip, çekme kuvveti, eğilme momenti, kesme kuvveti gibi çeşitli mekanik yüklere karşı mukavemeti yüksek, ayrıca iyi kırılma ve darbe performansına sahip malzemelerin tasarlanması amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, yüksek mekanik özelliklere sahip karbon elyafı ve yüksek termal stablite ve darbe performansına sahip bazalt elyafı, epoksi reçine içinde intra-ply hibrit elyaf yapısı olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda, epoksinin termal genleşme katsayısını azaltmak ve elde edilen kompozitin termal ve mekanik davranışını iyileştirmek amacıyla, karbon-nanotüp (CNTs), graphene Nano Platelets (GNPs) gibi nanodolgu malzemeleri de reçine malzemesine eklenmiştir. Böylece, kompozitin tokluk ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Nanodolgu malzemelerin epoksiye eklenmesi, arayüzey bölgesinin iyileşmesine sebep olmuş ve elyaf ile reçine arasında daha kuvvetli bağ oluşmasına katkı sağlamıştır.

Bu çalışma kapsamında, pür (saf) karbon, pür bazalt, pür Bazalt-karbon intra-ply hibrit takviye elemanları, %0,1 veya %0,5 oranlarında CNT veya GNP dolgulu matris malzemeleri ile onbeş çeşit çok-ölçekli kompozit malzeme vakum torbalama yöntemi kullanılarak üretilmiştir.

Üretilen kompozitler, çalışma kapsamındaki deneylere tabi tutulmak amacıyla ASTM standartlarına göre farklı boyutlarda kesilerek deney numuneleri üretilmiştir. Numunelerin termal çevrimden önce ve sonraki mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme, eğilme, tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS), düşük hız darbe ve titreşim deneyleri yapılmıştır. Ayrıca malzemelerin termal karakterizasyonu için termogravimetrik Analizi (TGA), uygulanmıştır. Termal çevrim deneyleri, oda sıcaklığındaki numunelerin 20, 40, 60 ve 80 çevrimlerde -50° ile +120°C aralığında her sıcaklıkta 10 dakika bekletilerek gerçekleştirilmiştir.

Termal çevrimin kompozit malzemenin özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla, numunelerin termal çevrim öncesi ve sonrası elastisite modülü, çekme mukavemeti, eğilme modülü, eğilme mukavemeti, tabakalar arası kayma mukavemeti, doğal frekans, sönüm oranı, maksimum darbe kuvveti, enerjisi, çökme değerleri gibi mekanik ve termal stablite, termal özellikleri belirlenerek kıyaslamalar yapılmıştır.

Bu çalışmanın sonuç bölümü üç kısımdan oluşmaktadır; birinci kısımda, hibritleşmenin kompozit malzemenin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır, ikinci bölümde, nanodolgu malzemelerin reçineye eklenmesi ile kompozitin özelliklerindeki değişimler incelenmiştir ve son bölümde ise, termal çevrimin kompozitlerin özelliklerindeki etkileri araştırılmıştır.

2015, 465 sayfa

Anahtar Kelimeler: Termal Çevrim, Mekanik ve Termal Özellikler, İntra-ply Hibrit, Çok-Ölçekli kompozit, Karbon Elyaf, Bazalt Elyaf, Grafen, Karbon Nanotüp

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

THE EFFECT OF THERMAL CYCLING ON MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF GRAPHENE OR CARBON NANOTUBE DISPERSED INTRA-PLY BASALT-KARBON FIBER HYBRID POLYMER COMPOSITES

Farzin AZİMPOUR SHİSHEVAN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Mechanical Science

Supervisor: Prof. Dr. Hamit AKBULUT

In this thesis, design of materials that are able to work in periodic transient thermal conditions, have high strength under different loads such as tensile load, bending moment and shear force and have good impact and fracture performance has been aimed. For this purpose, the carbon fibers having high mechanical properties and basalt fibers having high thermal stability and impact performance were hybridized in epoxy resin in intra-ply structure.

Furthermore, for decreasing the coefficient of thermal expansion of epoxy and improving the thermal behavior of the obtained composite, nano particles such as Carbon Nanotube (CNTs) or graphene Nano Platelets (GNPs) are dispersed in matrix material. Thus, improvement of the toughness and mechanical properties of the composite has been targeted. The dispersing nanoparticles in the epoxy improve the interface region and also has been yielded stronger bonds between fibers and matrix. In the scope, using pure carbon, pure basalt, pure carbon-basalt intra-ply hybrid reinforcements with matrix materials with 0,1% or 0,5% CNT or GNP, multi-scale composites have been fabricated in fifteen types by vacuum bagging (VARTM) method. The manufactured composites were cut in different dimensions in order to use the tests according to ASTM standards. In order to determine the mechanical properties of samples tensile, bending, inter-laminar shear strength, mod-I fracture, low velocity impact and vibration tests have been carried out before and after thermal cycling. Also, for thermal characterization the materials, Thermo Gravimetric Analyze (TGA) has been determined. Thermal shock tests have been carried out for the samples in room temperature and exposed to -50°C and +120°C and keeping samples for 10 minutes at each temperature for 20, 40, 60, and 80 cycles

For the investigation of thermal shock effects on the properties of composite material, modulus of elasticity, tensile strength, flexural modulus, flexural strength, inter laminar shear strength (ILSS), natural frequency, damping ratio, fracture toughness, maximum impact force, impact energy and impact deformation, thermal properties such as thermal stability has been determined and compared for after and before thermal cycling.

The last chapter of this research includes three sections; in the first section, the effects of hybridization on thermal and mechanical properties of composites are examined, in the second section the effects of nano materials dispersing in matrix of composite are studied and in the last section effects of the thermal cycling on properties of composite material are investigated.

2015, 465 pages

Keywords: Thermal Cycling, Mechanical and Thermal Properties, Intra-ply Hybrid, Multi-Scale composite, Carbon Fiber, Basalt Fiber, Graphene, Carbon Nanotube

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Hamit AKBULUT'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Ders aşamasında ve tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tavsiyelerini paylaştan Sayın Prof. Dr. Adnan ÖZEL ve Sayın Prof. Dr. Murat DEMİR AYDIN'a ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışma kapsamındaki deneyler, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı, Makine Teorisi ve Dinamiği Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Bu kapsamda, Makina Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na ve doktora çalışmalarım süresince emeği geçen tüm hocalarıma, Mekanik Anabilim Dalı'nda görev yapmakta olan Sayın Arş. Gör. Volkan ACAR'a, teşekkürlerimi sunmak isterim. Katib Çelebi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümünden Sayın Doç. Dr. Özgür SEYDİBEYOĞLU ve Atatürk üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden Sayın Doç. Dr. Gürkan ŞAKAR'a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde, her konuda sınırsız manevi destekleri ile yanımda olduklarını hissettiren ve bu destekle başarılarımı temellendiren sevgili annem ve değerli babama, teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz, 2015

Farzin AZİMPOUR SHISHEVAN

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxxiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç	3
1.2. Kapsam.....	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1. Hibrit Kompozit Malzemeler	5
2.2. Çok-Ölçekli Polimer Kompozitler	22
2.3. Termal Yorulma	43
2.4. Kullanılan Malzemeler	65
2.4.1. Takviye malzemeleri	65
2.5. Sürekli Liflerin Dokuma Çeşitleri	77
2.6. Nano Teknoloji.....	85
2.7. Diğer Nanodolgu Türleri	98
2.8. Nano Kompozit Malzemeler	100
2.8.1. Karbon nanotüp dolgulu polimer kompozitler	100
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	105
3.1. Kullanılan Hipotezler	105
3.2. Üretim Aşamaları	108
3.2.1. Elyaf kumaş dokuma	108
3.2.2. Nano malzeme dolgulu epoksi reçinesinin hazırlanması	110
3.2.3. Kompozit üretimi	112
3.3. Çalışma kapsamında üretilen kompozitler	118
3.4. Numune Kesimi.....	119
3.5. Yapılan Deneyler.....	125

3.5.1. Tabakalı kompozit malzemelerin çekme özelliklerinin belirlenmesi.....	126
3.5.2. Tabakalı kompozit malzemenin eğilme özelliklerinin belirlenmesi	132
3.5.3. Kısa kiriş kayma testi (short beam sheering test) ve tabakalı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma özelliklerinin belirlenmesi.....	136
3.6. Kompozit Kirişler İçin Titreşim Deneyleri	139
3.6.1. Darbe deneyi.....	141
3.7. Kullanılan Cihazlar.....	144
3.7.1. Isıtma fırını (NÜVE, FN 032.055.120):	144
3.7.2. Derin dondurucu.....	144
3.7.3. Sıcaklık kalibrasyon cihazları	145
3.7.4. Çekme cihazı	149
3.7.5. Ultrasonik homojenizatör (karıştırıcı)	150
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	151
4.1. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Çekme Özelliklerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler	151
4.1.1. Bazalt-Karbon-pür	151
4.1.2. Bazalt-karbon-0,1 CNT	153
4.1.3. Bazalt-Karbon-0,5 CNT	155
4.1.4. Bazalt-Karbon-0,1 GNP	158
4.1.5. Bazalt-Karbon -0,5 GNP	160
4.2. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Eğilme Özelliklerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler	163
4.2.1. Bazalt-Karbon -pür	163
4.2.2. Bazalt-Karbon t-0,1 CNT	165
4.2.3. Bazalt-karbon-0,5 CNT	167
4.2.4. Bazalt-Karbon -0,1 GNP	170
4.2.5. Bazalt-Karbon -0,5 GNP	172
4.3. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin ILSS değerlerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler	174
4.3.1. Bazalt-Karbon-pür	174
4.3.2. Bazalt-Karbon-0,1 CNT	176
4.3.3. Bazalt-Karbon-0,5 CNT	177

4.3.4. Bazalt-Karbon-0,1 GNP	178
4.3.5. Bazalt-Karbon-0,5 GNP	179
4.4. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Ankastre-Serbest Titreşim Özellikleri ve Elastisite Modülünde Ortaya Çıkardığı Etkiler	181
4.4.1. Bazalt-karbon-pür.....	181
4.4.2. Bazalt-karbon-0,1 CNT	183
4.4.3. Bazalt-karbon-0,5 CNT	185
4.4.4. Bazalt-karbon-0,1 GNP	187
4.4.5. Bazalt-karbon-0,5 GNP	189
4.5. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Serbest-Serbest Titreşim Özellikleri ve Elastisite Modülünde Ortaya Çıkardığı Etkiler	191
4.5.1. Bazalt-karbon-pür.....	192
4.5.2. Bazalt-karbon-0,1 CNT	194
4.5.3. Bazalt-karbon-0,5 CNT	196
4.5.4. Bazalt-karbon-0,1 GNP	198
4.5.5. Bazalt-karbon-0,5 GNP	200
4.6. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışlarında Ortaya Çıkardığı Etkiler	202
4.6.1. Bazalt-karbon-pür.....	203
4.6.2. Bazalt-karbon-0,1 GNP	207
4.7. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzemesi Eklenmesinin Bu Malzemelerin Çekme Özelliklerinde Etkileri.....	212
4.7.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler.....	213
4.7.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler	219
4.7.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler.....	225
4.8. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzeme Eklenmesinin Eğilme Özelliklerine Etkileri	231
4.8.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler.....	231
4.8.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler	237
4.8.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler.....	243
4.9. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzemesi Eklenmesinin Bu Malzemelerin ILSS Değerlerinde Etkileri.....	249

4.9.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler.....	249
4.9.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler	252
4.9.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler.....	255
4.10. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzeme Eklenmesinin Ankastre- Serbest Titreşim Özelliklerinde Etkileri	258
4.10.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler.....	258
4.10.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler	263
4.10.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler.....	268
4.11. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzemesi Eklenmesinin Serbest- Serbest Titreşim Özelliklerinde Etkileri	273
4.11.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler.....	273
4.11.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler	278
4.11.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler.....	283
4.12. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzemesi Eklenmesinin Bu Malzemelerin Darbe Davranışlarında Etkileri	289
4.12.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler.....	289
4.12.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler	292
4.12.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli hibrit kompozitler	296
4.13. Termal Yorulma Olayının Kompozitlerin Çekme Özelliklerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler.....	299
4.13.1. Karbon pür.....	299
4.13.2. Karbon-0,1 CNT.....	302
4.13.3. Karbon-0,5 CNT	305
4.13.4. Karbon-0,1 GNP	307
4.13.5. Karbon-0,5 GNP	310
4.13.6. Bazalt pür	313
4.13.7. Bazalt-0,1 CNT	315
4.13.8. Bazalt-0,5 CNT	317
4.13.9. Bazalt-0,1 GNP	320
4.13.10. Bazalt-0,5 GNP	322
4.13.11. Bazalt-karbon pür	324
4.13.12. Bazalt-karbon-0,1 CNT	327

4.13.13. Bazalt-karbon - 0,5 CNT	330
4.13.14. Bazalt-karbon - 0,1 GNP	332
4.13.15. Bazalt-karbon-0,5 GNP	335
4.14. Termal yorulma olayının kompozitlerin eğilme özelliklerinde ortaya çıkardığı etkiler	337
4.14.1. Karbon pür	337
4.14.2. Karbon-0,1 CNT	340
4.14.3. Karbon-0,5 CNT	343
4.14.4. Karbon-0,1 GNP	346
4.14.5. Karbon-0,5 GNP	349
4.14.6. Bazalt pür	352
4.14.7. Bazalt-0,1 CNT	354
4.14.8. Bazalt-0,5 CNT	357
4.14.9. Bazalt-0,1 GNP	360
4.14.10. Bazalt-0,5 GNP	362
4.14.11. Bazalt-karbon pür	365
4.14.12. Bazalt-karbon-0,1 CNT	367
4.14.13. Bazalt-karbon-0,5 CNT	370
4.14.14. Bazalt-karbon-0,1 GNP	373
4.14.15. Bazalt-karbon-0,5 GNP	375
4.15. Termal Yorulma Olayının Kompozitlerin ILSS Değerlerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler	378
4.15.1. Karbon pür	378
4.15.2. Karbon-0,1 CNT	379
4.15.3. Karbon-0,5 CNT	381
4.15.4. Karbon-0,1 GNP	382
4.15.5. Karbon-0,5 GNP	384
4.15.6. Bazalt pür	385
4.15.7. Bazalt-0,1 CNT	386
4.15.8. Bazalt-0,5 CNT	388
4.15.9. Bazalt - 0,1 GNP	389
4.15.10. Bazalt-0,5 GNP	390

4.15.11. Bazalt-karbon pür	392
4.15.12. Bazalt-karbon-0,1 CNT	393
4.15.13. Bazalt-karbon-0,5 CNT	394
4.15.14. Bazalt-karbon-0,1 GNP	395
4.15.15. Bazalt-karbon-0,5 GNP	397
4.16. Termal Yorulma Olayının Kompozitlerin Darbe Davranışlarına Etkiler.....	398
4.16.1. Karbon-Pür	399
4.16.2. Karbon-0,1 GNP	405
4.16.3. Bazalt-Pür	412
4.16.4. Bazalt-0,1 GNP	418
4.16.5. Bazalt-karbon-Pür	425
4.16.6. Bazalt-Karbon-0,1 GNP	432
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	440
5.1. Sonuç ve Öneriler	447
5.2. Darbe Deneyi.....	448
5.3. Termal Yorulma Etkileri	449
KAYNAKLAR	450
ÖZGEÇMİŞ	466

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

1-D	Tek Boyutlu
2-D	İki Boyutlu
3-D	Üç Boyutlu
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Standartları
B	Bazalt Elyafı
C	Karbon Elyafı
CB	Bazalt-Karbon İntra-Ply Hibrit Kompozit
CNF	Karbon Nano Fiber
CNT	Karbon Nanotüp
CT	Çalışma Sıcaklığı
CTE	Termal Genleşme Katsayısı
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetri
FRP	Elyaf Takviyeli Kompozitler
GNP	Grafen Nano Levha
GNPO	Grafen Oksit Nano Levha
IFSS	Arayüzey Kayma Mukavemeti
ILSS	Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti
J	Joule
kN	Kilo-Newton
m	Metre
MMT	Montmorillonit
MPa	Mega Paskal
MWCNT	Çok Cıdarlı KarbonNanotube
RT	Oda Sıcaklığı
s	Saniye
SBS	Kısa Kiriş Kayma
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu

SWCNT	Tek Cidarlı Karbon Nanotube
Tan δ	Kayıp Modülü
T _c	Kristallenme sıcaklığı
T _g	Camsı geçiş sıcaklığı
TGA	Termogravimetrik analiz
T _m	Ergime sıcaklığı
TMA	Termal Mekanikal Analiz
VARTM	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tekyönlü bazalt kumaşı.....	7
Şekil 2.2. Bazalt tabakanın yerinin değişimi ile hibrit kompozitin elastisite modülünün değişimi	9
Şekil 2.3. Bazalt tabaklarda ortaya çıkan hasarlar (a) Çekme deneyinde kırılmış numune (b)B1-B6 delaminasyon mekanizması.....	9
Şekil 2.4. Cam ve bazalt elyafının gerilme-gerinme diyagramı	10
Şekil 2.5. E- Cam (soldaki) ve bazalt (sağdaki) örgülü kumaşları	11
Şekil 2.6. Bazalt/vinilester kompozit ile cam/vinilester kompozitlerin, a) tabakalar arası b) ortalama kayma mukavemeti (ILSS) ve eğilme dayanımının kıyaslanması	12
Şekil 2.7. Bazalt ve cam vinylester kompozitlerde ortalama eğilme modülü ve kuvvet–yer değiştirme diyagramı	12
Şekil 2.8. Farklı elyaf için gerilme gerinme diyagramı	14
Şekil 2.9. Bazalt elyafın üretim şeması.....	15
Şekil 2.10. Bazalt elyafı takviyeli kompozitlerin kullanım alanları	15
Şekil 2.11. Bazalt ve cam elyafta kimyasal çevreden etkilendikten sonra zamana göre ortaya çıkan kütle kaybı diyagramı	17
Şekil 2.12. Hibrit kompozitlerde kullanılan farklı hacim oranlı bazalt-naylon kumaş yapıları	19
Şekil 2.13. GNP levhalarının, ultrasonik karıştırıcı kullanılarak epoksi içerisinde dispersiyonunun şematik görünüşü	29
Şekil 2.14. Reçinesi GNP nanotaneçikler ilaveli ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin karakterizasyonu	40
Şekil 2.15. Depolama modülünün sıcaklığa göre değişimi.....	53
Şekil 2.16. Termal yorulmada depolama modülünün sıcaklığa göre değişimi.....	60
Şekil 2.17. Termal yorulmada kayıp modülünün sıcaklığa göre değişimi	60
Şekil 2.18. Termal yorulmada kayıp oranının sıcaklığa göre değişimi	61
Şekil 2.19. Lazer dalgaları kullanılarak malzemenin sıcaklığının artışı.....	63

Şekil 2.20. Termal çevrimin artmasıyla malzeme ağırlığında meydana gelen düşüşün iki farklı ortamda karşılaştırılması	64
Şekil 2.21. Malzemenin termal şoktan önce ve sonra maruz kaldığı çekme deneyindeki kuvvet-yer değiştirme grafiği	64
Şekil 2.22. Karbon fiber üretim akış şeması	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 2.23. Karbon fiber üretiminin şematik görüntüsü.....	71
Şekil 2.24. Karbon elyafı üretim şeması	71
Şekil 2.25. Sıcaklığın karbon elyafın çekme dayanımı ve elastik modülü üzerinde etkisi	72
Şekil 2.26. Karbon elyafın SEM görüntüleri	73
Şekil 2.27. Bazalt elyafın SEM görüntüleri (a) 100µm, (b) 50µm, (c), 20µm ve (d) 10µm.....	76
Şekil 2.27. Ticari dokuma türleri, a) düz, b) çapraz, c) saten, d) sepet.....	77
Şekil 2.28. İdeal bir reçine için gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı	80
Şekil 2.29. Kompozitlerin matris malzemelerine göre tasnifi	81
Şekil 2.30. Epoksi fonksiyonel grubu.....	81
Şekil 2.31. Epoksi reçinelerin üretimi	82
Şekil 2.32. Grafit hibritleşme, grafit yapısı ve kullanım örneği	92
Şekil 2.33. Elmas hibritleşme, elmas yapısı ve örneği	92
Şekil 2.34. İki boyutlu GNP levhasından oluşan 0 boyutlu fulleren, 1boyutlu karbon nanotüp ve 3 boyutlu grafit malzemesi	93
Şekil 2.35. (a) İki boyutlu GNP, (b) 3 boyutlu grafit yapısı	93
Şekil 2.36. Grafenle ilgili yayınlanan makalelerin yıllara göre dağılımı.....	98
Şekil 2.37. Grafitin kristal yapısı	99
Şekil 2.38. Nanokompozit yapısında nano dolgu malzemelerin dispersiyonu ve dağılım ihtimalleri	101
Şekil 2.39. Yaygın olarak ve bu çalışmada kullanılan nanodolgu malzemeleri	103
Şekil 3.1. Spinteks Tekstil A.Ş.‘inde kumaş dokuma atölyesi	109
Şekil 3.2. Gerekli boyutlarda kesilmiş kumaşlar	109
Şekil 3.3. Kullanılan UP 400 S ultrasonik karıştırıcı.....	110
Şekil 3.4. GNP veya CNT nano taneciklerin ultrasonik karıştırıcı ile disperse edilmesi.....	111

Şekil 3.5. Kullanıma hazır nano katkılı epoksi reçinesi.....	112
Şekil 3.6. Kesilmiş bazalt kumaşların ayırıcı tabaka üzerine serilmesi.....	113
Şekil 3.7. Kumaşlar üzerine reçine döküm aşaması	113
Şekil 3.8. Reçinenin el-yatırma ile kumaşlara emdirilmesi	114
Şekil 3.9. Peel-ply kumaşın uygun boyutlarda kesilmesi	114
Şekil 3.10. Kurulmuş spiral reçine hattının görüntüsü	115
Şekil 3.11. Vakum battaniyesinin peel-ply üzerine serilmesi.....	115
Şekil 3.12. Vakum ortamının hazırlanması (a) vakum torbasının serilmesi, (b) vakum torbasının yapıştırılması.....	116
Şekil 3.13. Reçine transfer hortumunun takılması.....	116
Şekil 3.14. Vakum pompasının çalıştırılması	117
Şekil 3.15. Reçine transferi.....	117
Şekil 3.16. Vakum-infüzyon cihazı	118
Şekil 3.17. Üretilmiş kompozit levha	118
Şekil 3.18. Üretilen plakların kesim aşaması.....	120
Şekil 3.19. Zamana bağlı olarak sıcaklık değişimi ve termal çevrim	123
Şekil 3.20. Numuneleri taşımak için kullanılan iskelet	123
Şekil 3.21. Termal çevrim için kullanılan numune taşıma iskeleti.....	124
Şekil 3.22. Çekme numunesine iki yönlü uzama ölçer yapıştırılması	129
Şekil 3.23. Çekme deney düzeneği, a) çekme cihazı, b) veri kayıt düzeneği	130
Şekil 3.24. Çekme numunelerinin görüntüleri.....	131
Şekil 3.25. Eğilme deney şemaları (a) üç nokta eğilme deneyi (b) dört nokta eğilme deneyi	132
Şekil 3.26. Üç nokta eğilme deneyinin prensibi: Numunedeki kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları	133
Şekil 3.27. Eğilme deneyi düzeneği.....	135
Şekil 3.28. Çalışmada kullanılan eğilme numunelerinin görüntüleri	136
Şekil 3.29. Eğilme deneyi düzeneği.....	138
Şekil 3.30. Çalışmada kullanılan eğilme numunelerinin görüntüleri	138
Şekil 3.31. Titreşim özellikleri ölçümü.....	140
Şekil 3.32. Titreşim deneyinde kullanılan numuneler	140
Şekil 3.33. Ağırlık düşürme deney düzeneği (Karadayı 2012).....	142

Şekil 3.34. Darbe deney düzeneği.....	142
Şekil 3.35. Çalışmada kullanılan darbe numunelerinin görüntüleri	143
Şekil 3.36. Nüve ısıtma fırınının görünümü	144
Şekil 3.37. Nüve derin dondurucunun görünümü.....	145
Şekil 3.38. İnfrared termometre	146
Şekil 3.39. Termal kamera	146
Şekil 3.40. 180°C’deki numunenin fırından çıkarıldıktan sonraki yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı.....	147
Şekil 3.41. 180°C sıcaklıkta numunenin fırından çıkarıldığında boyunda oluşan sıcaklık dağılımı	148
Şekil 3.42. 180°C sıcaklığında numunenin fırından çıkarıldığı an eninde ortaya çıkan sıcaklık dağılımı	148
Şekil 3.43. Shimadzu universal çekme cihazı.....	150
Şekil 3.44. UP 400 S ultrasonik karıştırıcı (a) Cihaz, (b) karıştırıcı bölümü.....	150
Şekil 4.1. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin elastisite modüllerinin kıyaslanması.....	152
Şekil 4.2. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin çekme mukavemetlerinin kıyaslanması	153
Şekil 4.3 Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	154
Şekil 4.4. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin çekme mukavemetinin kıyaslanması	155
Şekil 4.5. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	156
Şekil 4.6. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	157
Şekil 4.7. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	158
Şekil 4.8. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	159
Şekil 4.9 Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	160

Şekil 4.10. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması.....	161
Şekil 4.11. Çekme deneyi uygulanarak kırılmış olan örnek numunelerin görüntüleri	162
Şekil 4.12 Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin eğilme modül değerlerinin kıyaslanması	163
Şekil 4.13 Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	164
Şekil 4.14. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin eğilme modül değerlerinin kıyaslanması.....	166
Şekil 4.15. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	167
Şekil 4.16. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin eğilme modüllerinin kıyaslanması.....	168
Şekil 4.17 Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve Bazalt-Karbon-0,5 CNT malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	169
Şekil 4.18. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin eğilme modül değerlerinin kıyaslanması.....	170
Şekil 4.19. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	171
Şekil 4.20. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin eğilme Modül değerlerinin kıyaslanması	172
Şekil 4.21. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	173
Şekil 4.22. Üç-nokta eğilme deneyi uygulanarak kırılmış olan örnek numunelerin ön ve arka görüntüleri	174
Şekil 4.23. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin ILSS değerlerinin kıyaslanması.....	175
Şekil 4.24 Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve Bazalt-Karbon-0,1 CNT malzemelerinin ILSS değerlerinin kıyaslanması.....	176
Şekil 4.25. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT, Bazalt-Karbon-0,5 CNT malzemelerinin ILSS değerlerinin kıyaslanması.....	177

Şekil 4.26. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerin ILSS değerlerinin kıyaslanması.....	179
Şekil 4.27. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin ILSS değerlerinin kıyaslanması.....	180
Şekil 4.28. Doğal frekanstan elde edilen karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-pür malzemelerinin elastisite modüllerinin kıyaslanması	182
Şekil 4.29. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması	183
Şekil 4.30. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	184
Şekil 4.31. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve Bazalt-Karbon-0,1 CNT kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması	185
Şekil 4.32. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	186
Şekil 4.33. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	187
Şekil 4.34. Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP, bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	188
Şekil 4.35. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP, bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması	189
Şekil 4.36. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP kompozitlerin doğal frekanstan elde edilen elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	190
Şekil 4.37. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve Bazalt-Karbon-0,5 GNP malzemelerinin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	191
Şekil 4.38. Doğal frekanstan elde edilen karbon-pür, bazalt-pür ve karbon-bazalt-pür malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	193
Şekil 4.39. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması.....	194

Şekil 4.40. Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	195
Şekil 4.41. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	196
Şekil 4.42. Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	197
Şekil 4.43. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	198
Şekil 4.44 Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP, Bazalt-Karbon-0,1 GNP kompozitlerin elastisite modül değerleri kıyaslanması	199
Şekil 4.45. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	200
Şekil 4.46. Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	201
Şekil 4.47. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	202
Şekil 4.48. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinin kıyaslanması.....	203
Şekil 4.49. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinin kıyaslanması	204
Şekil 4.50. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinin kıyaslanması	205
Şekil 4.51. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin darbe sonucu maksimum temas sürelerinin kıyaslanması	206
Şekil 4.52. Vurucunun darbe deney sonucu karbon-pür, bazalt-pür karbon-bazalt-püre malzemelerine çarpma sonucu maksimum hız değerlerinin kıyaslanması.....	207

Şekil 4.53. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinin kıyaslanması	208
Şekil 4.54. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinin kıyaslanması.....	209
Şekil 4.55. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinin kıyaslanması	210
Şekil 4.56. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin darbe sonucu maksimum temas süre değerlerinin kıyaslanması	211
Şekil 4.57. Vurucunun darbe deneyinde karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerine çarpma sonucu maksimum hız değerlerinin kıyaslanması.....	212
Şekil 4.58. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerleri	214
Şekil 4.59. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerleri.....	215
Şekil 4.60. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerleri	216
Şekil 4.61. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerleri.....	217
Şekil 4.62. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	218
Şekil 4.63. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	218
Şekil 4.64. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	220
Şekil 4.65. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması.....	221

Şekil 4.66. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	222
Şekil 4.67. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması.....	223
Şekil 4.68. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	224
Şekil 4.69. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması.....	224
Şekil 4.70. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	226
Şekil 4.71. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	227
Şekil 4.72. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	228
Şekil 4.73. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	229
Şekil 4.74. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	230
Şekil 4.75. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	230
Şekil 4.76. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması	232
Şekil 4.77. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması	233
Şekil 4.78. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması	234
Şekil 4.79. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması	235
Şekil 4.80. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması	236
Şekil 4.81. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması	236

Şekil 4.82. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması	238
Şekil 4.83. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması	239
Şekil 4.84. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması	240
Şekil 4.85. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması	241
Şekil 4.86. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması	242
Şekil 4.87. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması	242
Şekil 4.88. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması	244
Şekil 4.89. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması.....	245
Şekil 4.90. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması	246
Şekil 4.91. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması.....	247
Şekil 4.92. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması	248
Şekil 4.93. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması	248
Şekil 4.94 Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin ILSS değerleri	250
Şekil 4.95. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin ILSS değerleri	251
Şekil 4.96. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması	252
Şekil 4.97. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması	253

Şekil 4.98. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması	254
Şekil 4.99. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması	255
Şekil 4.100. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu hibrit kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması.....	256
Şekil 4.101. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması.....	257
Şekil 4.102. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması	258
Şekil 4.103. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	259
Şekil 4.104. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması	260
Şekil 4.105. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modüllerinin kıyaslanması	261
Şekil 4.106. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması	261
Şekil 4.107. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	262
Şekil 4.108. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması	263
Şekil 4.109. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	264
Şekil 4.110. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oranların değerlerinin kıyaslanması	264
Şekil 4.111. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	265
Şekil 4.112. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	266
Şekil 4.113. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modüllerinin kıyaslanması	267

Şekil 4.114. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	267
Şekil 4.115. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	268
Şekil 4.116. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	269
Şekil 4.117. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	270
Şekil 4.118. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	271
Şekil 4.119. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	272
Şekil 4.120. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite mukavemetlerinin kıyaslanması	272
Şekil 4.121. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	274
Şekil 4.122. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	275
Şekil 4.123. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	276
Şekil 4.124. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	277
Şekil 4.125. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	277
Şekil 4.126. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	278
Şekil 4.127. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	279
Şekil 4.128. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	280
Şekil 4.129. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerin kıyaslanması	281

Şekil 4.130. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	282
Şekil 4.131. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modüllerinin kıyaslanması	282
Şekil 4.132. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	283
Şekil 4.133. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	284
Şekil 4.134. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	285
Şekil 4.135. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	286
Şekil 4.136. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	287
Şekil 4.137. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	287
Şekil 4.138. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	288
Şekil 4.139. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinde etkileri	289
Şekil 4.140. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinde etkileri	290
Şekil 4.141. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinde etkileri	290
Şekil 4.142. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu vurucunun maksimum hız değerlerinde etkileri	291
Şekil 4.143. Nano dolgu eklenmesinin darbe deneyinde maksimum temas süresine etkileri	292
Şekil 4.144. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinde etkileri	293
Şekil 4.145. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinde etkileri	293

Şekil 4.146. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinde etkileri	294
Şekil 4.147. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu vurucunun maksimum hız değerlerinde etkileri	295
Şekil 4.148. Nano dolgu eklenmesinin darbe deneyinde maksimum temas süresine etkileri	295
Şekil 4.149. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinde etkileri	296
Şekil 4.150. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinde etkileri	297
Şekil 4.151. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinde etkileri	298
Şekil 4.152. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu vurucunun maksimum hız değerlerinde etkileri	298
Şekil 4.153. Nano dolgu eklenmesinin darbe deneyinde maksimum temas süresine etkileri	299
Şekil 4.154. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri	300
Şekil 4.155. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri	301
Şekil 4.156. Karbon-0.1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki Çekme modül değerleri	303
Şekil 4.157. Karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri.....	304
Şekil 4.158. Karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki elastisite modül değerleri	305
Şekil 4.159. Karbon-0.5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri.....	306
Şekil 4.160. Karbon-0.1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri	308
Şekil 4.161. Karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri.....	309

Şekil 4.162. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki Çekme modül değerleri	311
Şekil 4.163. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri.....	312
Şekil 4.164. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri	313
Şekil 4.165. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri.....	314
Şekil 4.166. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki Çekme modül değerleri	315
Şekil 4.167. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri.....	316
Şekil 4.168. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri	318
Şekil 4.169. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri.....	319
Şekil 4.170. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri	320
Şekil 4.171. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri.....	321
Şekil 4.172. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri	323
Şekil 4.173. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri.....	324
Şekil 4.174. Bazalt-karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri	325
Şekil 4.175. Bazalt-karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri	326
Şekil 4.176. Bazalt-karbon-0.1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki elastisite modül değerleri	328
Şekil 4.177. Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri	329

Şekil 4.178. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri.....	330
Şekil 4.179. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri	331
Şekil 4.180. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki elastisite modül değerleri	333
Şekil 4.181. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri	334
Şekil 4.182. Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki elastisite modül değerleri	335
Şekil 4.183. Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri	336
Şekil 4.184. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modülü değerleri	338
Şekil 4.185. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemeti değerleri	339
Şekil 4.186. Karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	341
Şekil 4.187. Karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	342
Şekil 4.188. Karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	344
Şekil 4.189. Karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	345
Şekil 4.190. Karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	347
Şekil 4.191. Karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	348
Şekil 4.192. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	350
Şekil 4.193. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	351

Şekil 4.194. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modülü.....	352
Şekil 4.195. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	353
Şekil 4.196. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	355
Şekil 4.197. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	356
Şekil 4.198. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	358
Şekil 4.199. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	359
Şekil 4.200. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	360
Şekil 4.201. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	361
Şekil 4.202. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	363
Şekil 4.203. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	364
Şekil 4.204. Bazalt-karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	365
Şekil 4.205. Bazalt-karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	367
Şekil 4.206. Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	368
Şekil 4.207. Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	369
Şekil 4.208. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	371
Şekil 4.209. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	372

Şekil 4.210. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	373
Şekil 4.211. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	374
Şekil 4.212. Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri	376
Şekil 4.213. Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	377
Şekil 4.214. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	378
Şekil 4.215. Karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	380
Şekil 4.216. Karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	381
Şekil 4.217. Karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	383
Şekil 4.218. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri.....	384
Şekil 4.219. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	386
Şekil 4.220. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	387
Şekil 4.221. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	388
Şekil 4.222. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	390
Şekil 4.223. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	391
Şekil 4.224. Bazalt-karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	392
Şekil 4.225. Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri	393

Şekil 4.226. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonundaki ILSS değerleri	395
Şekil 4.227. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonundaki ILSS değerleri	396
Şekil 4.228. Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonundaki ILSS değerleri	397
Şekil 4.229. Karbon-pür kompozitin darbe enerji kalibrasyon diyagramı.....	399
Şekil 4.230. Darbe sonucu karbon-pür numunelerinde ortaya çıkan hasarlar	401
Şekil 4.231. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları	401
Şekil 4.232. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları.....	402
Şekil 4.233. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları	403
Şekil 4.234. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları	404
Şekil 4.235. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları.....	405
Şekil 4.236. Karbon-0,1 GNP kompozitin darbe enerji kalibrasyon diyagramı.....	406
Şekil 4.237. Darbe sonucu karbon-0,1 GNP numunelerinde ortaya çıkan hasarlar	408
Şekil 4.238. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları	408
Şekil 4.239. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları.....	409
Şekil 4.240. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları	409
Şekil 4.241. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları	410
Şekil 4.242. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları.....	411

Şekil 4.243. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin darbe enerji kalibrasyon diyagramı	412
Şekil 4.244. Darbe sonucu bazalt numunelerinde ortaya çıkan hasarlar	414
Şekil 4.245. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları	414
Şekil 4.246. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları.....	415
Şekil 4.247. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları	416
Şekil 4.248. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları.....	417
Şekil 4.249. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları.....	418
Şekil 4.250. Bazalt-0,1 GNP kompozitin darbe enerji kalibrasyon diyagramı.....	419
Şekil 4.251. Darbe sonucu bazalt-0,1 GNP numunelerinde ortaya çıkan hasarlar	421
Şekil 4.252. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları	421
Şekil 4.253. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları.....	422
Şekil 4.254. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları	423
Şekil 4.255. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları.....	424
Şekil 4.256. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları.....	425
Şekil 4.257. Bazalt-karbon-pür hibrit kompozitin darbe enerji kalibrasyon diyagramı	426
Şekil 4.259. Darbe sonucu bazalt-karbon-pür numunelerinde ortaya çıkan hasarlar.....	428
Şekil 4.260. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları	428

Şekil 4.261. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları.....	429
Şekil 4.262. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları	430
Şekil 4.263. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları	431
Şekil 4.264. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları.....	432
Şekil 4.265. Bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitin darbe enerji kalibrasyon diyagramı	433
Şekil 4.266. Darbe sonucu bazalt-karbon-0,1 GNP numunelerinde ortaya çıkan hasarlar	435
Şekil 4.267. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları	435
Şekil 4.268. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları.....	436
Şekil 4.269. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış Bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları	437
Şekil 4.270. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları.....	438
Şekil 4.271. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları.....	439
Şekil 5.1. Üretilmiş malzemelerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması	440
Şekil 5.2. Üretilmiş malzemelerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması	441
Şekil 5.3. Üretilmiş malzemelerin eğilme modül değerlerinin kıyaslanması	441
Şekil 5.4. Üretilmiş malzemelerin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması.....	442
Şekil 5.5. Üretilmiş malzemelerin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması.....	443
Şekil 5.6 Üretilmiş malzemelerin ankastre-serbest doğal frekans değerlerinin kıyaslanması	443
Şekil 5.7. Üretilmiş malzemelerin ankastre-serbest sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	444

Şekil 5.8. Üretilmiş malzemelerin ankastre-serbest deneyinden bulunan elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	445
Şekil 5.9. Üretilmiş malzemelerin serbest-serbest doğal frekans değerlerinin kıyaslanması	445
Şekil 5.10. Üretilmiş malzemelerin serbest-serbest sönüm oran değerlerinin kıyaslanması	446
Şekil 5.11. Üretilmiş malzemelerin serbest-serbest deneyinden bulunan elastisite modül değerlerinin kıyaslanması.....	447

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Cam ve bazalt elyafının özellikleri	7
Çizelge 2.2. Kullanılan hibrit tabakaların adlandırılması ve kalınlıkları.....	8
Çizelge 2.3. Kullanılan kompozit tabakaların elastisite modülleri ve çekme dayanımları	9
Çizelge 2.4. Bazalt fiberlerin mekanik özellikleri	16
Çizelge 2.5. Karbon elyafın özelliklerinin başka elyaf türleri ile kıyaslaması	68
Çizelge 2.6. Bazalt elyafın özellikleri ve fiyatlarının başka elyaf türleri ile kıyaslaması.....	75
Çizelge 2.7. Epoksi ve bazı yaygın matris malzemelerinin özellikleri.....	82
Çizelge 2.8. Bazı malzemelerin elastik modül değerleri	88
Çizelge 2.9. Karbon izomerlerine ait fiziksel özellikler	88
Çizelge 3.1. Çekme, eğilme ve ILSS deneyleri için üretilmiş kompozit plaklar ve kalınlıkları	119
Çizelge 3.2. Darbe ve mod I kırılma plakları ve kalınlıkları	119
Çizelge 3.3. Çekme, Eğilme ve ILSS testlerinde kullanılan numune sayıları	120
Çizelge 3.4. Darbe ve kırılma testleri için kesilmiş olan numune sayıları	121
Çizelge 3.5. Kesilmiş olan numunelerin kodları.....	121
Çizelge 4.1. Çok ölçekli kompozitler ve bileşenlerinin oranı.....	213

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler farklı sıcaklıklara ve yüklere maruz bırakıldıklarında, ilk önce matris yapısında mikro çatlaklar oluşur ve kompozitin yapısında hasarlar meydana gelir. Bu mikro çatlaklar, elyaf-matris arayüzeyinde delaminasyon (ayrışma) hasarlarının çekirdeğini teşkil etmektedirler. Delaminasyon mekanizması, kompozit malzemelerin en önemli zaaflarından sayılmaktadır. Bundan dolayı, birçok araştırmacı bu konu üzerinde çok sayıda çalışma yapmış bulunmaktadır ve çalışmalar halen yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Havacılık, denizcilik, otomotiv, robot, uzay gibi teknoloji alanlarında kullanılan ekipmanların hafif, yüksek mukavemetli, tokluğu yüksek, termal dayanımı ve stabilitesi yüksek olması istenmektedir. Ancak bütün bu üstün özellikleri aynı anda bir kompozitte oluşturmak oldukça zor bir durumdur. Bu amaca yönelik olarak, kompozit malzemelerin üretim teknolojilerinin sürekli bir şekilde geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Kompozitin üretimi hususunda, mamulün en az kalitesi kadar üretim maliyeti de önemlidir. Yüksek mukavemetli kompozit üretimi için karbon elyafı iyi bir tercih olmakla birlikte, maliyeti yüksek bir elyaf türü olduğu için üretilen kompozitin de maliyeti de artacaktır. Bu nedenle, yüksek mukavemet gerektiren yerlerde karbon elyafı, diğer kısımlarda ise düşük maliyetli elyaf türleri kullanılabilir. Buna ilaveten, hibrit (birden fazla) elyaf sistemi ile de hem daha mukavemetli ve aynı zamanda düşük maliyetli kompozit üretimi gerçekleştirilebilir. Düşük maliyetli ve düşük mukavemetli bununla birlikte yüksek sıcaklığa dayanımlı ve tokluğu yüksek olan bazalt elyafı, karbon elyafı ile çok iyi bir hibrit takviye yapısı oluşturmaktadırlar. Böyle bir yapıya sahip kompozitin üretim maliyeti saf (pür) karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeye göre daha düşük olacağı açıktır.

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin yüksek performans sergilemeleri, literatürdeki çeşitli çalışmalarda gösterilmiş ve ispat edilmiştir. Bununla birlikte, kompozitin performansında elyaf/matris oranları oldukça önem arz etmektedir. Eğer matris oranı artarsa, kompozitin performansı düşmekte ve eğer elyaf oranı artarsa, kompozitin performansı yükselmektedir.

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin özelliklerini geliştirmek için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır: Birinci yaklaşım optimizasyon yöntemidir. Bu yaklaşımda mekanik, termal, kimyasal, elektrik ve optik özellikleri en uygun olan lifler seçilerek hibrit bir yapı oluşturulmakta ve istenen çalışma şartlarına uygun optimum bir malzeme tasarlanabilmektedir (Sgriecia and Hawley, 2007). İkinci yaklaşımda, modülasyon teknikleri kullanılarak polimer malzemesinin tokluğu artırılmakta ve kompozitlerin kırılgenlıkları azaltılmaktadır (Park *et al.* 2007, Huang *et al.* 2008). Üçüncü yaklaşımda ise, elyaf ile reçine arasında gerilme transfer özelliklerini arttırmak amacıyla, arayüzey bağlantısı optimize edilmektedir (Boogh *et al.* 1992). Yukarıdaki yaklaşımlar genellikle nano ölçekli ve mikro ölçekli takviye fazlarını içermektedirler. Son zamanlarda yukarıdaki yaklaşımlar dikkate alınarak, farklı boyutlarda takviye fazı kullanılarak optimize edilmiş mikro yapıların tasarımı amacıyla çok-ölçekli kompozitler üzerinde araştırmalar yapılmıştır (Dean *et al.* 2006; Bekyarova *et al.* 2007; Kim *et al.* 2007c; Mathur *et al.* 2008).

Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerde, nanotaneciklerin dolgu olarak kullanımı, kompozitin mekanik ve termal özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu alandaki yapılan çalışmalarda, matris malzemesine kil, karbon nanotüp, flören ve grafen nano tabaka (GNP) gibi nanotanecik dolgu malzemesi eklenerek, matris malzemesinin tokluğu, mukavemeti, sertliği, termal stabalitesi, termal ve elektrik iletkenliği artırılmış, ancak termal genleşme katsayısı azalmıştır. Eklenen taneciklerin; tanecik türü, tanecik geometrisi, tanecik boyutları, yüzey özellikleri, dispersiyon derecesi gibi özellikleri, eklendiği matris malzemesinin özelliklerini de önemli oranda etkilemektedir.

Nanotanecik GNP malzemesi, çok büyük en/boy oranına sahip olduğundan dolayı, yüksek mukavemet ve sertlik, yüksek termal ve elektrik iletkenlik, yüksek termal stabilite ve ayrıca düşük termal genleşme katsayısına sahip olduğu için takviye elemanı olarak kullanılmaktadır (Chen *et al.* 2009).

Bu tez çalışması kapsamında, sürekli değişen sıcaklık ortamlarında çalışabilen, yüksek mekanik özelliklere sahip kompozitlerin tasarlanmasına çalışılmıştır. Bu amaca yönelik olarak, kompozit temel bileşenleri çalışma şartlarına uygun olarak seçilmiş, kompozitin mikro takviye fazını karbon ve bazalt elyafı oluştururken, matris fazı ise CNT veya GNP nanodolgu reçineden oluşmaktadır. Böylece, çok-ölçekli intra-ply hibrit kompozit malzemenin yapısı ortaya çıkmıştır.

1.1. Amaç

Bu tez çalışmasında, yüksek mekanik özelliklere ve iyi termal stabiliteye sahip kompozitlerin tasarlanması amaçlanmıştır. Buna yönelik olarak, tasarlanan malzemenin, hem sürekli değişen sıcaklık ortamlarında çalışabilmesi aynı zamanda yüksek darbe ve kırılma tokluğuna sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda, malzemenin hafif ve düşük maliyetli ile üretim olması da çok büyük önem arz etmektedir.

1.2. Kapsam

Bu tez kapsamında, intra-ply hibrit takviye fazı ve nano malzeme dolgulu matris fazından mürekkep saf ve çok-ölçekli kompozit malzemelerin mekanik, termal, darbe, kırılma tokluğu gibi özellikleri üzerinde çalışılmıştır.

Ayrıca, termal yorulma durumunda iyi bir performans sağlayan ve yüksek çekme, eğilme, ILSS mukavemeti, kırılma ve darbe tokluğuna sahip, hafif ve düşük maliyetli ve karbon ve bazalt malzemeleri ile takviye edilmiş, %0,1 ve %0,5 oranlarında CNT ve GNP dolgulu epoksi bileşenlerden oluşan kompozit malzemeler üretilmiş, çeşitli mekanik ve termal deneyler yapılmıştır.

Termal yorulmanın, tasarlanmış malzemelerin yapılarında ortaya çıkardığı değişimleri incelemek için, üretilmiş plakalardan kesilerek elde edilmiş farklı boyutlardaki numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin termal yorulmadan önceki özellikleri deneylerle belirlendikten sonra, farklı termal çevrim sayılarına maruz bırakılarak, malzeme özellikleri yeniden deneylerle belirlenerek mukayeseler yapılmış ve malzemelerin performansları incelenerek en iyi performans gösteren malzemeler belirlenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Hibrit Kompozit Malzemeler

Belirli şartlarda çalışmak için, en az iki, malzemenin, üstün özelliklerini bir araya getirerek, değişik özelliklerde yeni bir malzeme elde etmek amacıyla, makro seviyede birleştirilmesi ile elde edilen malzemeler kompozit malzeme olarak adlandırılır. Başka bir anlatıma göre, birbirlerinin zayıf yönlerini iyileştirerek üstün özellikler elde etmek amacıyla iki veya daha fazla malzemenin makro seviyede birleştirilmesi ile elde edilen yeni tür malzemelere kompozit malzemesi adı verilir (Akbulut 2011).

Tekyönlü fiberlerle takviye edilmiş kompozit plaklar, mekanik bakımından tek yönlü anizotropik davranış göstermektedir. Bu tür kompozitler bir yönde gerilmenin yüksek olduğu yerlerde kullanılmaktadırlar. Çift yönlü kompozitler çift yönlü anizotropik davranış gösterirler. Bununla birlikte rasgele takviyeli kompozitler veya tanecik takviyeli kompozitler izotropik malzeme olarak değerlendirilirler (Freilich *et al.* 2002).

Bazı durumlarda kompozit malzemelerde birden fazla elyaf kullanmak gerekebilir. Üretilen bu tür malzeme “hibrit kompozit malzeme” olarak adlandırılır. Bu tür malzemeler, sadece bir tür elyaf kullanımıyla, elde edilmesi imkânsız olan özelliklerin oluşturulması içi tercih edilebilir. Hibritleşme işlemi sayesinde, tasarımcı istediği malzeme özelliklerini büyük ölçüde elde edebilmektedir. Örnek olarak; tasarımcı uçakta kullanılacak bir malzeme tasarlamak isterse, bu malzeme değişik alanlarda, çeşitli şartlarda ve farklı yüklere maruz kalabilecek şekilde üretilebilir. Bu amaçla bütün kullanım şartları göz önüne alınarak uygun bir malzeme tasarlanmalıdır. Aksi halde kullanım esnasında malzemede yorulma, sürünme, aşınma, vs. gibi olaylardan dolayı plastik deformasyon, burkulma, kırılma gibi istenmeyen durumlar meydana gelebilir. Tasarımcılar hibrit kompozit malzeme üreterek, bunun gibi menfi durumları önlemektedirler. Hibrit malzeme üretiminin bir başka önemli amacı ise, daha düşük maliyetlerde malzeme üretimidir.

Chowdhury *et al.* (2007) elle yatırma yöntemi ile üretilen karbon takviyeli nanokil içeren epoksi matrisli tekstil levhasının termal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Nanokil katkısının epoksi ile kullanım amacı, malzemenin yüzey özelliklerinin iyileştirmesi olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada, nanokil partiküllerin etkisini malzemenin termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini denetlemek için, farklı oranlarda nanokil içeren numuneler üretilmiş ve deneylerden sonra bu numunelerde meydana gelen değişimlerin kıyaslanmıştır. Üç nokta eğilme testi ve Dinamik Mekanik Analizi, 3 tabakalı ve 8 tabakalı kompozitlerin denetlenmesinde kullanılmıştır. Eğilme testinin sonuçlarına göre, nanokil katkısının epoksiye eklenmesi, malzemenin mukavemetine ve elastisite modülüne önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Ayrıca DMA testi, malzemenin depolama (*storage*) modülünde ve termomekanik özelliklerinde artışın meydana geldiğini göstermiştir. Bununla birlikte camsı geçiş sıcaklığı değişmemiştir. Ayrıca malzemenin nanokil eklenmesinden dolayı mikro yapıda meydana gelen değişimleri Elektronik Mikroskop Tarama cihazıyla izlenmiştir.

Fiore *et al.* (2011) cam-bazalt fiberle takviye edilmiş epoksi hibrit kompozit malzemelerin denizcilik sektöründe kullanımını araştırmışlar. Bu amaçla, matris içerisine, rastgele oryantasyonda kırılmış cam elyafı içeren ve E-cam elyafının bazalt elyafı ile tek yönlü olarak bir arada kullanımıyla hibrit olarak takviye edilmiş kompozit malzeme vakum torbalama (*vacuum bagging*) tekniği ile üretildikten sonra 3-nokta eğilme test metodu ve çekme deneyine tabi tutulmuş ve malzeme yapısında kullanılan bazaltın tabaka sayısı ve yerleştirme etkisi incelenmiştir. Ayrıca, ANSYS yazılımı kullanılarak hibrit kompozit malzemesinin, aynen deneysel yöntemdeki gibi, bazalt tabaka sayısının ve tabakaların istifleme düzeninin etkisi araştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, bazaltın iki tabakalı olarak malzeme yapısında kullanımı, malzemenin mekanik özelliklerinde, GFRP kullanımına göre daha yüksek artışa neden olmuştur. Numerik analiz sonucunda ise, tek yönlü takviye edilmiş kompozit tabakaların, malzemede oluşturduğu etkiler incelenmiştir.

Deneyisel ve numerik sonuçlar arasındaki uyumluluk bu tür modellemenin doğru olduğunu ve elde edilen sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir. Tekyönlü bazalt kumaşı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Tekyönlü bazalt kumaşı (Fiore *et al.* 2011)

Bazalt tabii, zararsız ve çevre dostu bir malzeme olup, ham maddesi volkanik kayalardır. Bazalt malzemesinin üretiminde kullanılan teknoloji, cam elyafının üretiminin benzeridir. Cam elyafı daha karmaşık bir malzeme karışımından üretilir. Bununla birlikte, bazalt hiç bir malzeme eklemenden ve sadece bazalt kayaları öğütülerek ve ergitilerek çok düşük maliyetle (düşük miktarda enerji sarf edilerek) üretilir. Ayrıca bazalt elyafı, zehirsiz, yanmaz, yüksek sıcaklığa dayanımlı ve çok yüksek kimyasal dayanımı olduğundan dolayı kullanım alanı giderek artmaktadır. İlaveten bazaltın özgül mekanik özellikleri göz önüne alındığında, E-camından daha üstün özelliklere sahip olduğu görülebilmektedir. Cam ve bazalt elyafının özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Cam ve bazalt elyafının özellikleri (Fiore *et al.* 2011)

Özellik	E-camı	Bazalt
Yoğunluk [g/cm^3]	2,56	2,8
Elastisite modülü [GPa]	76	89
Çekme dayanımı [MPa]	1400-2500	2800
Kopma uzaması [%]	1,8-3,2	3,15
Özgül elastisite modülü [GPa/g/cm^3]	30	31,78
Özgül çekme dayanımı [GPa/g/cm^3]	500-1000	1000

Son yıllarda, bazalt elyafı çok yüksek darbe dayanımı ve hafifliğinden dolayı, doğal gaz (CNG) tüpleri gibi birçok alanlarda kullanılmaktadırlar. Bu tür gaz tüpleri önceden metalik veya karbon takviyeli polimer matrisli kompozitlerden üretilmekteydi. Metalik malzemelerin ağır ve karbon elyafı malzemelerin pahalı olmasından dolayı bazalt fiberlerin (cam elyafından daha dayanımlı ve maliyetinin düşük olmasından dolayı) hibrit olarak kullanılması yaygınlaşmıştır (Fiore *et al.* 2011).

Başka araştırmacıların çalışmalarına bakıldığında, bazalt elyafı takviye edilmiş kompozitlerin tuzlu su içerisinde, nem emmesine, termal ve nem yorulmasına bakılarak, mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklerinin olduğu ve çeşitli koşullarda kullanımları için oldukça dayanımlı oldukları anlaşılmıştır.

Son zamanlarda bazalt elyafın, doğal, çok hafif, dayanıklı ve daha uygun maliyetinden ve çalışma güvelliği bakımından dolayı tersanelerde de kullanımı tedricen artmaktadır.

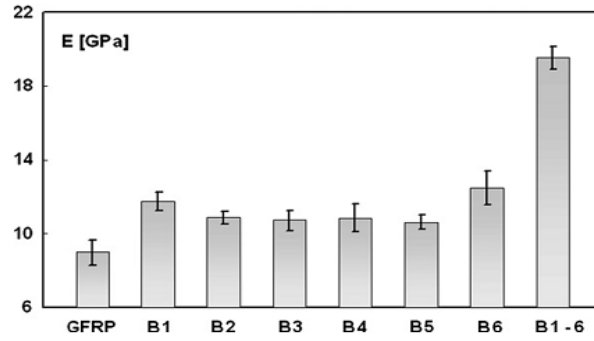
Tabakalı cam elyaf-epoksi matrisli kompozitte, tabakaların birisini bazalt-epoksi kompozit tabakasıyla değiştirildiğinde ve elde edilen hibrit kompozitin rijitliğini GFRP ile kıyaslandığında bu özelliğin arttığı görülmektedir. Numunenin her iki dış yüzeyinde cam-epoksi tabakanın yerine bazalt-epoksi tabaka kullanıldığında, numunede en iyi mekanik özellikler meydana gelmektedir. Numunede tabakaların değişimi ile hibrit kompozitin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Kullanılan hibrit tabakaların adlandırılması ve kalınlıkları (Fiore *et al.* 2011)

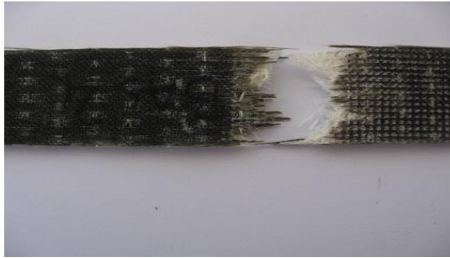
Numune	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B1-6
Bazalt tabakaların sayısı	1	1	1	1	1	1	2
Bazalt tabakanın yeri	Lamina1	Lamina1	Lamina1	Lamina1	Lamina1	Lamina1	Lamina1-6
Oryantasyonlar	0	0	0	0	0	0	0
Ortalama kalınlık [mm]	2,66	2,68	2,68	2,68	2,68	2,66	3,19

Çizelge 2.3. Kullanılan kompozit tabakaların elastisite modülleri ve çekme dayanımları (Fiore *et al.* 2011)

	GFRP	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B1-6
E[GPa]	8,28±0,34	9,82±0,28	9,6±0,75	10,2±0,62	10,7±0,96	10,1±0,55	10,4±0,46	14,1±0,81
Σ[MPa]	145,4±11,7	170,5±7,39	167,6±8,5	168,6±11,6	165,7±9,5	169,6±7,8	170,4±12,5	210,3±20,7



Şekil 2.2. Bazalt tabakanın yerinin değişimi ile hibrit kompozitin elastisite modülünün değişimi (Fiore *et al.* 2011)



(a)



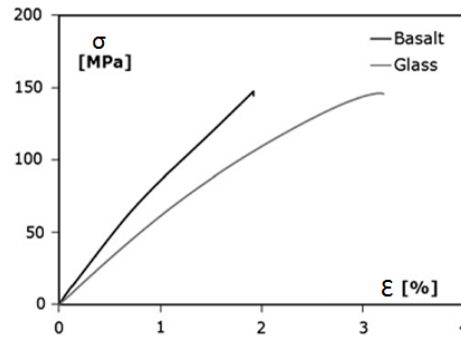
(b)

Şekil 2.3. Bazalt tabaklarda ortaya çıkan hasarlar (a) Çekme deneyinde kırılmış numune (b) B1-B6 delaminasyon mekanizması (Fiore *et al.* 2011)

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi B1–B6 numunelerde meydana gelen erken delaminasyon ara yüzey kısmında meydana gelmiştir. Tabakalar arası yüzeydeki hasardan dolayı oluşan delaminasyon olayı, kompozit malzemelerin kırılmasında yaygın olan en önemli nedenlerden sayılır. Araştırmalara göre bu tür hasarlar, ara yüzeydeki yapışma

probleminden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.3’de çekme deney sonucunda bazalt tabaklarda ortaya çıkan hasarlar görüntülenmiştir.

Genelde kompozit malzemelerde meydana gelen delaminasyon olayı, numunenin düzgün kesilmemiş kenarları, iyi takviye edilmemiş kısımları, malzeme kusurları ve gerilme yığılması olan noktalardan başlamaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, en yüksek dayanımı elde etme amacıyla numune dış yüzeyindeki epoksi cam elyafı tabakaların yerine bazalt-epoksi tabakası kullanmak gerekmektedir. Cam ve bazalt elyafın gerilme-gerinme diyagramı Şekil 2.4’te verilmiştir.

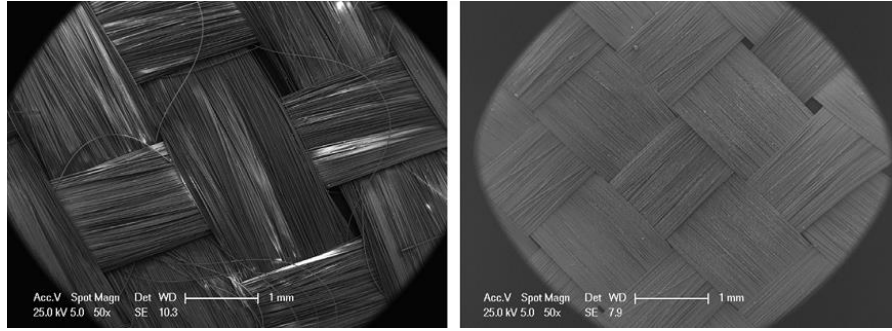


Şekil 2.4. Cam ve bazalt elyafının gerilme-gerinme diyagramı (Fiore *et al.* 2011)

Nasir *et al.* (2012) bazalt elyafının korozyon davranışını ve çatlak oluşumunu incelemişlerdir. Bu amaçla bazalt elyafının yüzeyinde, çeşitli noktalarda korozyon davranışını incelemek için SEM ve EDX metodu kullanılmıştır. Bazalt elyafının kırılma mekanizmasında, eksenel ve spiral çatlakların oluşumu için cam elyafına göre daha yüksek basma yükünün uygulanması gerektiği görülmüştür. Ayrıca, bazalt elyafın dayanımı incelenmiş olup, bu malzemede korozyondan dolayı mukavemetinin düşmesi, E-camıyla kıyaslandığında çok daha az olduğu ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı bazalt elyafının korozyonlu çevrelerde cam elyafına iyi bir alternatif olduğu düşünülebilir.

Carmisciano *et al.* (2011) bazalt elyafla takviye edilmiş vinylester örgülü kompozitin mekanik ve elektrik özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, örgülü bazalt tabakalı kompozitle, E-cam takviyeli tabakalı kompozitin mekanik ve elektrik özellikleri

karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, her iki malzemeden üretilen tabakalar, aynı tipte ve aynı oranda örülmüştür. Bu çalışmada da, bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin, birçok alanda E-cam elyafına iyi bir rakip olduğu görülmüştür. Son yıllarda, bilhassa çevreyi korumak amacıyla, bazalt elyafı çevreye zararsız olduğundan dolayı çok yüksek oranda kullanılmaya başlanmıştır. Düşük fiyat, düşük yoğunluk, özgül mukavemet, düşük alet aşınması, biyobozunurluk gibi avantajlarına rağmen, bazalt malzemesinin hidrofilik özelliği, mekanik özelliklerdeki dağılımı gibi özellikleri bakımından dezavantajlıdır (Carmisciano *et al.* 2011). Şekil 2.5'te E-Cam ve bazalt örgülü kumaşlarının görüntüleri verilmektedir.

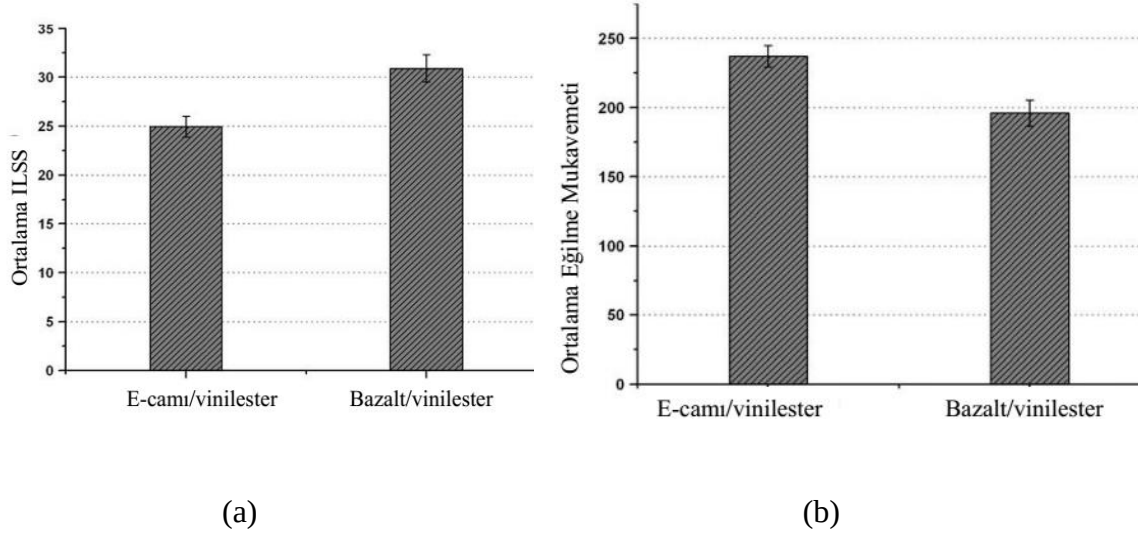


Şekil 2.5. E- Cam (soldaki) ve bazalt (sağdaki) örgülü kumaşları (Carmisciano *et al.* 2011)

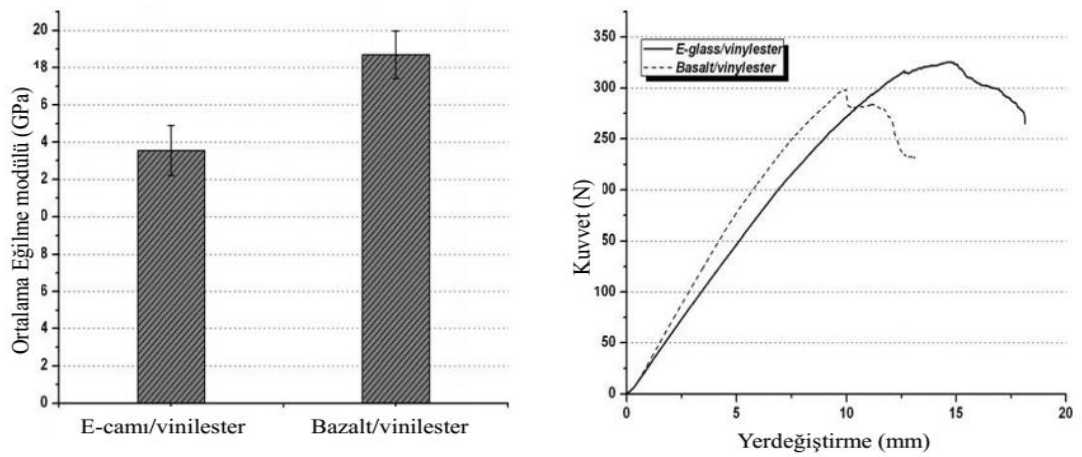
Bazalt elyafı, yüksek sıcaklıkta ve eriyik durumunda olan bazalt kayalarının ekstrüsyonu ile elde edilmektedir. Bu elyaf türü, yüksek rijitlik modülü, üstün sıcaklık direnci, ısı ve ses izolasyonu, kimyasal etkilere dayanım, düşük su emmesi gibi özelliklere sahip bir elyafır (Carmisciano *et al.* 2011).

Örgülü kumaşla takviye edilmiş kompozit malzemeler, fiyat uygunluğu, yüksek işlenebilirlik ve tekyönlü takviye edilmiş kompozitlerle kıyaslandığında, daha iyi yüzey ve mekanik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Bu malzemenin mekanik karakterizasyonunu belirlemek amacıyla, tabakalar arası kayma gerilme dayanımı ve 3-nokta eğilme deneyi gibi testler yapıldığında fiberin çekmeden dolayı kırılması ve basma sonucunda da burkulması gibi çeşitli karmaşık modlara rastlanılmıştır

(Carmisciano *et al.* 2011). Bazalt/vinilester kompozit ile cam/vinilester kompozitlerin mekanik özellikleri Şekil 2.6 ve 2.7’de kıyaslanmıştır.



Şekil 2.6. Bazalt/vinilester kompozit ile cam/vinilester kompozitlerin, a) tabakalar arası b) ortalama kayma mukavemeti (ILSS) ve eğilme dayanımının kıyaslanması (Carmisciano *et al.* 2011)



Şekil 2.7. Bazalt ve cam vinylester kompozitlerde ortalama eğilme modülü ve kuvvet–yer değıştirme diyagramı (Carmisciano *et al.* 2011)

Li *et al.* (2010) çalışmalarında, bazalt elyafını *geopolymeric* çimento malzemesine ekleyerek, deformasyon ve enerji absorbe etme kapasitesinin gelişmesini sağlamışlardır.

Bununla birlikte, bu durumun malzemenin dinamik basma mukavemetine dikkat çekici etkisi olmadığı görülmüştür.

Recman and Poláček (2007) epoksi matrisini kullanarak bu matrisi çeşitli elyaf (bazalt, karbon ve seramik elyaf) türleriyle kompozit malzeme üretmişler ve bu malzemelerde elyafla matrisin ara yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, matris malzemesi ile takviye fazının, altta verilen bağlarla bağlandıkları anlaşılmıştır:

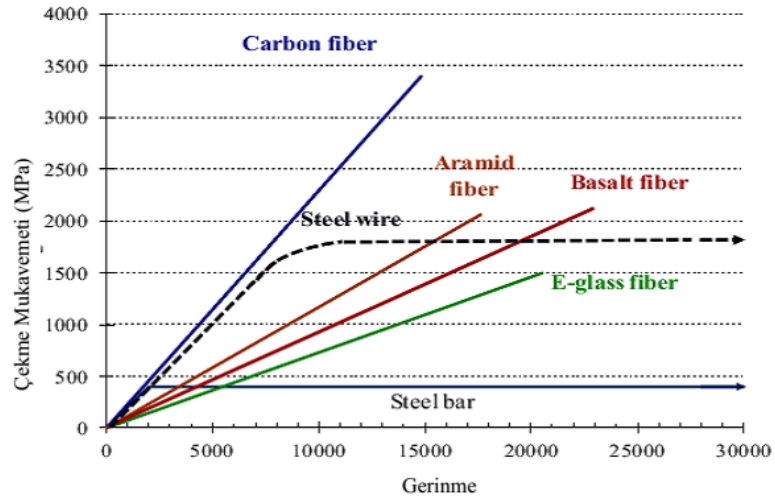
- 1- Mekanik bağlar
- 2- Difüzyon bağlar
- 3- Kimyasal bağlar

Epoksi reçinesi son derecede viskoz ve hidrofobik bir sıvı olduğu için, bu malzemenin ara yüzeyde takviye elyafla iyice yapışmasından kolaylıkla emin olmak zordur. Kompozit malzeme bir yüke maruz kaldığında, bu yük matris malzemesinden fiberle matris ara yüzeyine ve ara yüzeyden takviye elyafına iletilmektedir. Bundan dolayı ara yüzeyde bağların dayanıklı olması için çok iyi bir yapışmanın olması gerekmektedir. Malzeme yüke maruz kaldığı sürece, uygulanan yükten dolayı malzemede depolanan enerji artmaktadır. Bu enerji belli bir kritik seviyeye geldiğinde, farklı modlarda malzemede yayılmaya başlar. Bu yayılmadan aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkar:

- 1- Takviye fazının kırılması,
- 2- Elyafın sıyrılması,
- 3- Arayüzey ayrışması,
- 4- Takviye fazının uzaması.

Matrisle takviye fazın yapışması çok karışık bir durumdur ve birçok fiziksel ve kimyasal parametrelere bağlıdır. Ama aynı zamanda, homojenlik ve tekyönlü kompozitlerde takviye fazının oryantasyonuna, fiberin fibere temas etmesi gibi parametrelerden de etkilenebilmektedir.

Zhishen *et al.* (2012) bazalt elyafı takviye edilmiş kompozit malzemeler (BFRP) kullanarak, elde edilen gelişmiş yapıların, güvenlik ve sürdürülebilirliğini gözden geçirmişlerdir. Bu araştırmanın büyük bir kısmı, bazalt elyafın üretim tekniklerinin gelişimi ile ilgilidir. Ayrıca, bu çalışmada bazalt elyaf takviyeli kompozit malzemelerin, statik ve çevrimli yükleme, yüksek sıcaklık ve zorlu çevre etkisi altında çalışması incelenmiştir. Bu çalışmanın sonunda, CBF'in (Sürekli Bazalt Fiberler) bir tür inorganik fonksiyonel malzeme olduğu ve ayrıca özgün enerji tasarruf özelliği, çevre dostu olduğu ve doğal yeşil fiber olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı elyaf türlerin gerilme gerinme diyagramları Şekil 2.8'de verilmektedir.



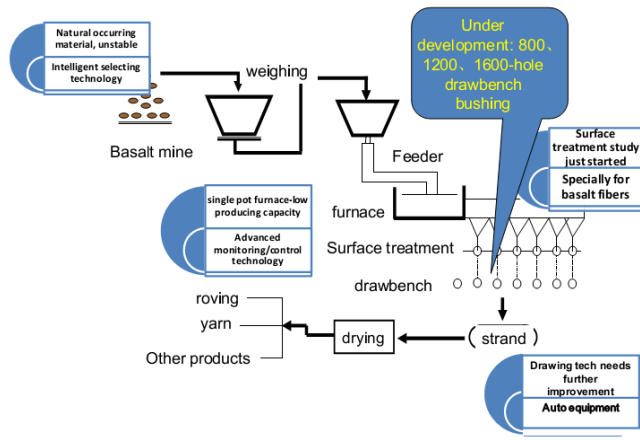
Şekil 2.8. Farklı elyaf için gerilme-gerinme diyagramı (Zhishen *et al.* 2012)

Bazalt fiberle takviye edilmiş polimer kompozitler (BFRP) iyi mekanik özelliklere sahip olduklarından ve karbon elyaf polimer (CFRP) ve cam elyaf polimer (GFRP) kompozitlere göre daha ucuz olduklarından dolayı büyük oranda kullanılmaktadırlar (Zhishen *et al.* 2012).

Bazalt elyafın bütün avantajlarına rağmen, hala bazı çözülmeyen problemler bulunmaktadır. Yeni bir elyaf malzemesi olması dolayısıyla, tecrübi olarak bu malzemenin uzun yıllar boyunca ve çeşitli alanlarda nasıl davranış göstereceği müphemdir. Bu malzemenin en büyük dezavantajlarından biri de, kararlılık (stabilite)

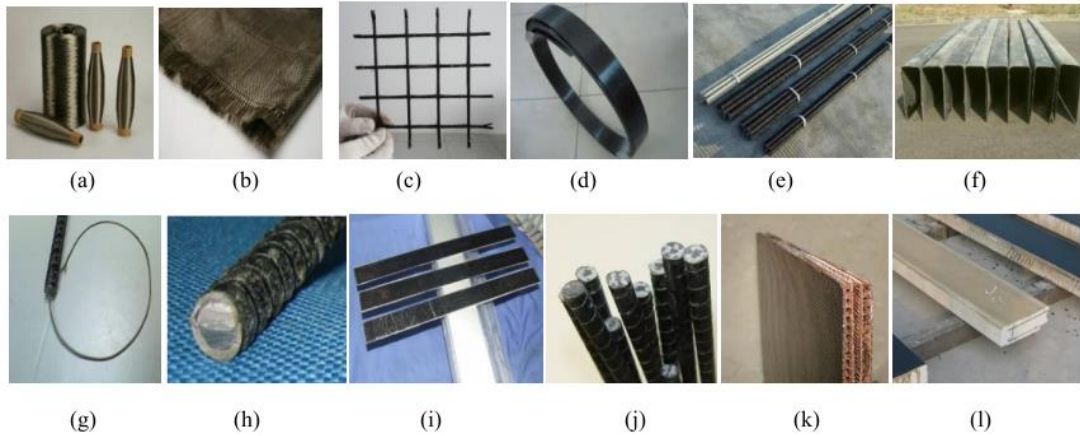
problemidir. Bu dezavantaj, malzeme mühendisliğinde ve çeşitli çevre şartlarında önem kazanmaktadır (Zhishen *et al.* 2012).

CBF sert kimyasal ve mineral bileşimi olup, madenlerden direk olarak istihraç edilmez ve üretimi için bir teknoloji gerekmektedir. Bazalt elyafın üretim şeması Şekil 2.9’da verilmiştir (Zhishen *et al.* 2012).



Şekil 2.9. Bazalt elyafın üretim şeması (Zhishen *et al.* 2012)

Bazalt elyafı ile takviye edilmiş kompozit (FRP) malzemelerden üretilen bazı mamuller Şekil 2.10’da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Bazalt elyafı takviyeli kompozitlerin kullanım alanları (Zhishen *et al.* 2012)

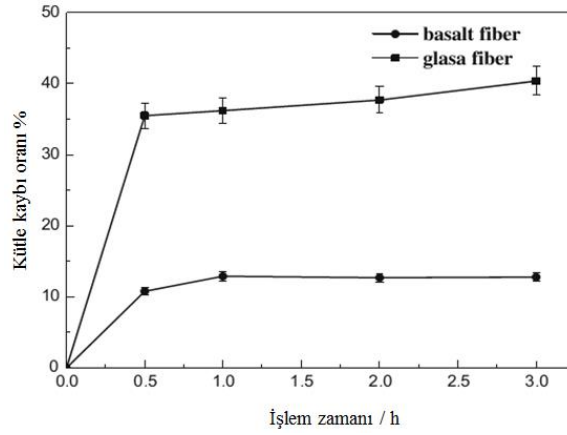
Wei *et al.* (2010) bazalt ve cam elyafın çekme davranışlarını, kimyasal çevre etkilerine maruz kaldıktan sonra incelemiştir. Bu araştırmayı gerçekleştirmek için, bazalt ve cam elyafını, farklı zaman peridolarında sodyum hidroksit ve asit hidroklorik etki alanına maruz bırakmışlardır. Fiberler, kimyasal alana maruz kaldıktan sonra, her iki tür elyafın kimyasal alan etkisinden dolayı kütle kaybı ve dayanım oranlarını incelemiştir. Fiberlerin yüzey morfolojileri, her iki tür elyaf için kimyasal alana maruz kalmadan önce ve sonra, elektron tarama mikroskobu ile incelenmiştir (Wei *et al.* 2010).

Bazalt elyafı, son yıllarda ortaya çıkan yeni bir elyaf türüdür. Bu elyaf türü, yüksek dayanım, çok iyi elyaf-reçine bağına, işlevsellik ve çok kolay kullanım alanına sahiptir. Ayrıca Bazalt elyafının üretim esnasında, hiçbir katkı kullanılmadığından dolayı üretim maliyeti düşüktür. Önceden de verilen bilgilere göre, bazalt elyafının çekme dayanımı E-camı elyafından daha yüksektir ve her iki elyafın kırılma uzaması karbon fiberin çekme uzamasından fazladır. Ayrıca her iki tür elyaf yüksek kimyasal kararlılığa ve iyi ses mekaniği özelliklerine sahiptirler. Söz konusu elyaf türleri zehirsiz ve yanmaz malzeme sayılırlar. Bütün bu nedenlerden dolayı bu elyaf türleri kimya sanayi gibi korozyon dayanımının gerekli olduğu alanlarda ve otomotive sanayisi gibi aşınma, sürtünme ve düşük hız darbesine dayanımının gerekli olduğu, yüksek sıcaklık yalıtım gereken alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bazalt fiberlerin mekanik özellikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir. Bazalt ve cam elyafta kimyasal çevreden etkilendikten sonra zamana göre ortaya çıkan kütle kaybı Şekil 2.11'de verilmektedir.

Çizelge 2.4. Bazalt fiberlerin mekanik özellikleri (Wei *et al.* 2010).

Özellik	Bazalt	E-camı
Çekme dayanımı	2600	2500
Filaman çapı	13	12
İplik inceliği	800	1200
Elastisite modülü	90	75
Kopma uzaması	3,1	4,7

İçerik boyutlandırma	0,1	0,2



Şekil 2.11. Bazalt ve cam elyafı kimyasal çevreden etkilendikten sonra zamana göre ortaya çıkan kütle kaybı diyagramı (Wei *et al.* 2010)

Dehkordi *et al.* (2010) homojen ve hibrit kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmada, bazalt-epoksi, naylon-epoksi ve bu iki elyafı hibrit olarak epoksi reçinesi ile birleştirerek kompozit deney numuneleri hazırlanmıştır. Hibrit kompozitler *intra-ply* sisteminde tasarlanmıştır. Farklı hacim oranlarıyla beş tür örgülü kumaş numune hazırlanmıştır. Numunelerin üretiminde elle yatırma (*hand lay-up*) yöntemi kullanılmıştır. Araştırmacıların bazalt-naylon hibrit kompozit kullanımından amaçları, bazalt elyafın üstün mekanik özelliklerini, naylon elyafın çok iyi darbe davranışıyla birleştirmektir. Ayrıca naylon-bazalt kompozitte, maksimum kuvvet, maksimum sapma, artık sapma, toplam absorbe edilen enerji, elastik enerji, hasarın türü ve boyutları, değişik düşük darbe hızı deneylerinden sonra incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, hibrit kompozitin *intra-ply* türünün, *inter-ply* türüne göre daha iyi sonuçlar gösterdiği belirtilmiştir.

Bazalt-boron elyafının epoksi malzemede hibrit olarak kullanım nedeni; boron elyafın, yüksek sıcaklıklardaki elastisite modülü, çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin iyi olmasıdır. Bununla birlikte, bu elyafın maliyetinin yüksek olduğundan dolayı, malzemenin hassas olmayan bölgelerinde bazalt gibi düşük maliyetli elyaf türleri kullanılabilir. Hibrit kompozit malzemelerin yapısal alanda iki farklı biçimde

kullanıldıkları görülmektedir; *inter-ply* ve *intra-ply* hibrit kompozitler. *İnter-ply* malzemelerde, farklı tabakalarda, aynı matriste farklı elyaf türü kullanılmaktadır. Örneğin bu çalışmada da, olduğu gibi bir tabakada boron elyafla epoksi matris ve bir sonrakinde bazaltla epoksi kullanılmıştır. *İntra-ply* yapılarda ise, farklı tabakalarda farklı elyaf türleri aynı zamanda kullanılmaktadır. Örneğin yine bu çalışmada kullanıldığı gibi boron elyafla bazalt elyafın aynı tabakada örülmesi gibi. Tabii ki *intra-ply* kompozitlerin üretimi ve incelenmesi *inter-ply* kompozitlere göre daha karmaşıktır.

Bazalt elyafı doğal bir malzeme olduğundan dolayı, çevre dostu sayılan bir malzemedir. Ayrıca, bu elyafın E-camı elyafı gibi diğer elyaf malzemelerine göre çekme dayanımı, elastisite modülü, termal ve kimyasal özelliklerinin daha iyi olması ve en önemlisi maliyetinin düşük olması son zamanlarda bu malzemenin elyaf olarak kullanılmasını daha da artırmıştır.

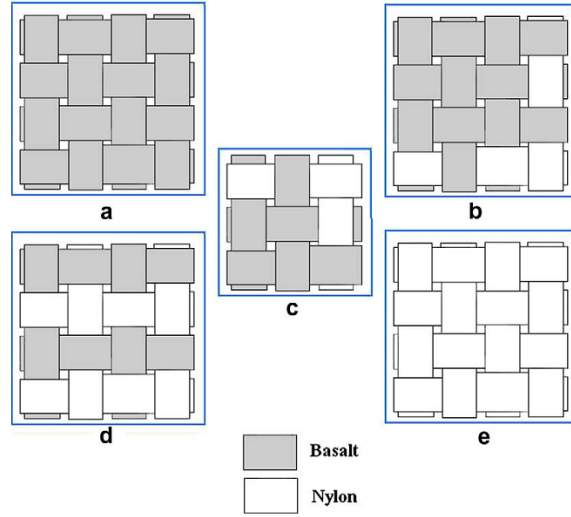
İnter-ply ve *intra-ply* hibrit kompozitler üzerinde yapılan deney sonuçlarına bakıldığında, *intra-ply* türünün süneklik endeksi, düşük çekme mukavemeti, atkı ve çözümleri yönlerinde yüksek enerji absorbe etmesi gibi özellikleri bakımından, *inter-ply* türünden daha iyi olduğunu görülmektedir.

Hibrit kompozit malzemesinin burkulma ve darbe davranışı, normal örgülü cam elyaf kompozit ile kıyaslandığında, hibrit kompozitlerin burkulmaya ve darbeye daha dayanıklı oldukları anlaşılmaktadır.

Dokunan ipliklerin sayısı, aşağıdaki denklem kullanılarak da belirlenebilmektedir (Dehkordi *et al.* 2010):

$$\frac{(\text{Tex})_{\text{Naylon}}}{(\text{Tex})_{\text{Bazalt}}} = \frac{\rho(\text{Naylon})}{\rho(\text{Bazalt})} \quad (2.1)$$

Bu denklemde, ρ ipliklerin yoğunluğunu göstermektedir. Bu denkleme göre, kullanılan her iki elyafın hacimleri eşittir. Ayrıca kullanılan naylon ipliklilerin hacim oranı aşağıdaki denklemden elde edilmektedir (Dehkordi *et al.* 2010).



Şekil 2.12. Hibrit kompozitlerde kullanılan farklı hacim oranlı bazalt-naylon kumaş yapıları (Dehkordi *et al.* 2010)

Zhang *et al.* (2011a) bazalt-karbon elyaflı hibrit kompozitlerin yoğunluğunu incelemişlerdir. Bu çalışmada, bazalt-karbonla takviye edilmiş hibrit kompozitin yoğunluk özelliklerinin daha uygun değerlerde olması için çalışmışlardır. Kıyaslama amacıyla, sadece karbon elyafla ve sadece bazalt elyafla takviye edilmiş tabakalı kompozit numuneler üretilmiştir. Numunelerin yoğunluğunu belirlemek amacıyla, açık delik teorisi kullanılmıştır. Bazalt elyafı takviyeli hibrit kompozitin test sonucuna göre, yoğunluğu sadece karbon elyafı takviyeli kompozite göre %46 arttığı görülmüştür. Böylece, hibrit kompozitin, karbon takviyeli kompozite göre daha düşük duyarlılık gösterdiği anlaşılmıştır. Bu, hibrit kompozitin, karbon takviyeli kompozite göre yoğunluğunun daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Zhang and Hu (2009) yaptıkları çalışmada, 3 boyutlu hibrit bazalt kompozitlerin yeni bir türünün mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitleri, RTM (Reçine transfer kalıplama) metodu ile üretilmişlerdir. Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi

için, çekme, 3-noktalı eğim ve darbe deneyi gibi deneyler yapılmış ve kuvvet–yer değiştirme, enerji–yer değiştirme diyagramları çizilerek sonuçlar kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Elde edilen sonuçlara göre intra-ply hibrit kompozitler darbe enerjisini absorbe etmek amacına daha uygun bulunmuşlardır.

Wang *et al.* (2008) 3 boyutlu örgülü bazalt-aramid hibrit kompozitte düşük hızlı darbe olayının etkilerini araştırmışlardır. Elyaf düzenlemesinin kompozitin düşük hızlı darbe etkisi altında, özelliklerindeki değişimleri incelemek amacıyla, epoksi reçinesi aramid (Kevlar 129) ve bazalt elyafı ile takviye edilerek, tabakalı interply hibrit kompozit malzemesi üretilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, *interply* hibrit kompozitler düşük darbeye maruz kaldığında, yüksek enerji absorbe etme kapasitesine sahip olduğu ve daha iyi performans sergilediği anlaşılmıştır.

Kim *et al.* (2007a), düşük sıcaklıklarda grafit/epoksi kompozitlerin çekme mukavemetinde meydana gelen etkileri araştırmışlardır. Bu çalışmada malzemenin çekme özelliklerini belirlemek için, T700/epoksi tek yönlü takviyeli kompozit numuneleri, düşük sıcaklıklarda termo-mekanik yüklemelere maruz bırakılmıştır. Çekme yüklemeleri sırasıyla oda sıcaklığından -50°C'ye, RT'den -100°C'ye ve RT'den -150°C'ye (CT) kadar uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, termo-mekanik çevrim az olduğunda, sıcaklık düşmesiyle çekme sertliğinin önemli oranda arttığı izlenmiştir. CT işleminden sonra malzemenin mukavemetinde azalma meydana gelmekte ve sıcaklık CT'nin altına düştüğünde çekme mukavemeti de azalmaktadır. Deney sonuçlarının analizi için tabakalı kompozit numunenin RT ve CT sıcaklıklarında termal genleşme katsayıları (CTEs) ölçülmüştür. Elyaf ve matris ara yüzeyi SEM görüntüleri ile gözlemlenmiştir. Ayrıca T700/epoksi tek yönlü kompozitlere termomekanik yükleme çevriminin etkilerini ve -150°C sıcaklığın altına düştüğü zaman sertlik ve dayanımdaki değişiklikler incelenmiştir. Şekil değiştirme sertliği, sıcaklığın azalması ile artma eğilimi göstermiştir ve üç sıcaklık döngüsünden sonra hassasiyet artmış buna karşılık mukavemet azalmıştır. Çekme deneyi sonucunda kırılan numunelerin fotomikrograflarına göre, T700/epoksi tek yönlü tabakaların sertlik ve mukavemet değerleri benzer sonuçlar vermektedir (Kim *et al.* 2007b)

Larsson and Svensson (2001) karbon ve organik liflerden elde edilen hibrit kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Çarpmanın olduğu yüzeyde karbon lifleri kullanmak şartıyla karbon/polietilen ve karbon/PBO liflerinin %100, 75/25, 50/50, 25/75 ve %100 oranında kullanıldığı kompozitler elde edilmiştir ve bu kompozitlerin darbe davranışları incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre 75/25 oranında quasi-isotropik karbon ve polietilen çapraz dokuma kumaş şeklindeki kompozitin bası mukavemetinde %20 düşüş ve balistik hız limitinde %82 artış görülmüştür.

Pegoretti *et al.* (2004) e-camı ve polivinil alkol elyaf malzemelerinden oluşan örgülü *interply* ve *intraply* hibrit kompozitlerin çekme ve darbe özellikleri konusunda araştırma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, her iki hibrit türünün çekme ve darbe davranışına, özellikle tabakaların istiflenme sırasına ve uygulanan yükün yönüne göre açıklanmıştır. Bu çalışmada e-camı/PVA hibrit kompoziti özel alanlarda daha üstün özelliklere sahip olması amacıyla tasarlanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, e-cam elyafıyla belirli bir amaca yönelik, PVA elyafının hibritleşme sonucunda, ortaya çıkan malzemenin darbe enerjini absorbe etme özelliğinde yüksek oranda gelişme olduğu görülmüştür.

Birden fazla elyaf türü ile takviye edilmiş kompozit malzemelere hibrit kompozit denilmektedir. Hibrit kompozit malzemeler sayesinde, tasarımcılar arzu ettikleri kullanım koşullarına uygun malzeme tasarlama şansına sahip olmaktadır. Bu kompozitlerin bir başka amacı, pahalı elyaf ile birlikte ucuz elyaf birlikte kullanılarak daha ucuz malzeme üretmektir. Hibrit kompozitlerde bileşenlerin oranına göre çeşitli kompozit türleri mevcuttur (Pegoretti *et al.* 2004):

- (i) **Interply hibrit kompozitler:** Bu tür kompozitlerde matris malzemesi aynı olmak şartıyla, tabakalarda farklı elyaf (sadece bir tür elyaf) kullanılır.
- (ii) **Intraply kompozitler:** Bu tür hibrit kompozitlerde, bütün tabakalar aynı olmak üzere her tabakada iki veya daha fazla elyaf türü kullanılır.
- (iii) **İç-İçe karışıklı hibrit kompozitler:** Bu tür kompozitlerde, kullanılan elyaf türünde, topaklanma gibi elyaf yığılma durumu olmaması ve elyaf dağılımı rastgele olması gerekir.

(iv) **Süper hibrit kompozitler:** Bu tür kompozitlerde, metal matris tabaka veya foil gibi ince metal elemanlar farklı tabakalarda kullanılmaktadır.

Hao and Yu (2010) bazalt ve cam elyafı üzerinde yaptıkları projeksiyon mikroskopik, SEM ve FTIR ile bu iki elyaf türünün yüzey yapısı ve kimyasal bileşenlerinin çok benzer olduğunu ve her ikisinin de aluminosilikat ve oksitlerden oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, termal analiz kullanarak her iki malzemenin termal davranışlarının aynı olduğu ispat edilmiş ve bazalt elyafın termal kararlılığının ve dayanımının cam elyafından daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, bazalttan üretilen malzemelerin yüksek sıcaklık yalıtımına sahip olduğu ve doğadaki kayalardan üretildikleri için maliyetlerinin düşük olduğu da vurgulanmıştır.

2.2. Çok-Ölçekli Polimer Kompozitler

Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler, havacılık, otomotiv, deniz, askeri, vs. gibi endüstri alanlarında çok başarılı bir şekilde kullanılmasına rağmen, ILSS değeri, bu malzemelerin tasarımlarında kısıtlayıcı bir karakter sayılmaktadır. Bu kısıtlamanın nedeni, normal şartlarda üretilen kompozit tabakaların, kalınlık yönünde uygulanan yüklere dayanımı için hiçbir önlem alınmamasından kaynaklanmaktadır (Rosselli and Santare 1997). Kompozit malzemelerin kalınlık yönünde dayanım karakterlerinin geliştirilmesi, bu malzemeler ortaya çıktığından beri, kullanıcılar için çok büyük bir problemdir. Bu amaca yönelik olarak, şu ana kadar, kompozitin ILSS karakterini artırmak için çok farklı yöntemler ve yaklaşımlar göz önüne alınmıştır. Bazı çalışmalarda tabakalar arası dayanımı artırmak için, kalınlık yönünde (z-yönü) dokuma gibi bazı metotlar kullanılmıştır (Partridge and Cartie 2005; Zhang *et al.* 2006; Byrd and Birman 2006). Ancak, bu yöntemlerin kullanılması çok yoğun emek ve ek üretim süreçlerini gerektirmekte ve böylece malzemenin üretim maliyetini yüksek oranda artırmaktadır (Abali *et al.* 2003). Bununla birlikte, bazı araştırmacılar, nano partikül eklenmesi gibi daha basit, üretim süreci ve maliyeti düşük yöntemleri göz önüne alarak ILSS karakteristiğini artırmayı başarmışlardır. Nanokompozitlerin elyaf takviyeli kompozitlere alternatif olarak kabul edilmesi, elyaf takviyeli kompozitlerin, son

zamanlarda çok geliştiği ve onların malzeme özelliklerinin hala eşsiz seviyede olduğundan dolayı, gerçekdışı olarak düşünülebilir. Buna rağmen, cam, karbon, bazalt ve kevlar gibi elyaf türleri ile takviye edilmiş klasik kompozit malzemelerin reçinelerini kil, karbon nanotüp, folluren, GNP gibi nano tanecikler ile takviye ederek, bu iki takviye fazını bir arada tutmak suretiyle, çok-ölçekli olarak bilinen yeni bir kompozit malzeme türünün ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Thostenson *et al.* 2001). Ayrıca yapısal bileşenlerde genellikle elyaf oryantasyonu tabaka düzlemine (x-y düzlemi) paralel olduğundan dolayı x-y düzlemi fiber ağırlıklı ve tabakaya dik yön (z yönü) matris ağırlıklı olmaktadır. Nanometrik boyutlu karbon nano-parçacıklar, küçük boyutlarından dolayı, mikro-ölçekli lifler arasına sızıntı yaparak yerleşmektedirler. Nano-parçacıkların kompozit malzemelerde takviye fazı olarak kullanılması, matris malzemesinin özelliklerinin gelişmesine, özellikle z yönünde ve en başta tabakalar arası kayma mukavemetinin artmasına neden olmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin termal genleşme katsayıları, metal malzemelere göre düşük olduğu için kompozitlerin termal deformasyonları düşük olmakta ve böylece, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında daha iyi boyutsal kararlılık göstermektedirler. Yapısal olarak karbon elyafı, amorf karbon ve grafitin karışımından oluşmaktadır. Grafit malzemesi karbon elyafının çekme modülünü artırmaktadır. Oluşan bu karbon atomlarının kristalografik yapısında paralel ve üst üste düzlemler meydana gelmektedir. Her bir düzlemde karbon atomları, altıgenin köşelerinde yerleşerek, karbon atomları arasında kovalent bağlar kurulmaktadır. Ayrıca düzlemler arasında vanderwals bağları da olduğu için ve karbon yapısındaki tabakalar arası kayma mukavemeti çok düşük olduğu için bu malzemeden üretilen elyaf yapısında çok yüksek anizotropik fiziksel ve mekanik özellikler ortaya çıkmaktadır. (Gojny *et al.* 2005).

Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler üstün mukavemet/ağırlık, sertlik/ağırlık oranı, hafiflik, korozyon, yorulma mukavemeti, yüksek servis sıcaklık dayanımı nedeniyle çok yaygın olarak havacılık, uzay, spor, askeri sanayi gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte, geleneksel mikro ölçekli karbon elyafı kompozit malzemelerin yapılarının geliştirilmesinde sınırlara ulaşılmıştır (Cho *et al.* 2007). Bu kompozitlerde en büyük problem, karbon elyafın polimer malzemesi ile bir

araya geldiğinde zayıf arayüzey etkileşiminin olmasıdır. Bu tür kompozitlerde bir başka problem ise, lif demetleri arasındaki matris dağılımının homojen olmaması veya boşlukların oluşmasıdır (Cho *et al.* 2007). Bu sorunlar yetersiz gerilme transferine, kolay çatlak oluşumuna ve yayılmasına yol açmakta ve böylece malzemenin kullanıldığı yapıda çok büyük hasarlara neden olabilmektedir. Bu sorunları çözmek için, bazı araştırmacılar karbon fiber yüzey işlemeline başvurmuşlardır. Bu amaca yönelik olarak, plazma işlemi de dâhil olmak üzere çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler, kompozitin içerisinde polimer ile karbon elyafı arasında güçlü etkileşimin meydana gelmesine ilaveten, mekanik özelliklerinin de iyileşmesine katkı sağlamaktadır. Diğer taraftan, kullanılan diğer bazı metotlar ile sağlam kimyasal işlemler ve birden fazla üretim adımı gerektirmektedir. Bu işlemlerine sonucunda, bazı bölgelerde matris zenginliği veya hacim boşluğu hala durmakta ve kusurlar da karbon elyafı yüzeyinde görünmeye devam etmektedir (Iwahori *et al.* 2005; Zhou *et al.* 2008).

Bilindiği gibi nanotanecik dolgulu polimer kompozitlerin mekanik özellikleri, büyük oranda taneciklerin arayüzey boyutlarının, taneciğin ağırlığına oranına ve taneciklerin şekline bağlıdır. Ayrıca tanecik boyutlarının küçülmesi çok büyük oranda kompozitin akma dayanımını ve sertliğini etkilemektedir (Yokozeki *et al.* 2007; Green *et al.* 2009; Godara *et al.* 2009). Bu anlamda, karbon elyaf ile takviye edilmiş polimer matris malzemesinin fulleren (Gojny *et al.* 2005; Qiu *et al.* 2007), kil (Bekyarova *et al.* 2007), karbon nanotüp (CNT) gibi nano ölçekli dolgular dâhil edilmesi, kompozitin mekanik özelliklerinin gelişmesi bakımından oldukça önemlidir. Bu yaklaşımın faydaları, geleneksel karbon elyaf tarafından sağlanan mikro ölçekli takviyeli, bir boyutlu (1-D) CNT, ikiboyutlu (2-D) grafen (GNP) ve üç boyutlu (3-D) grafit gibi nano boyutlarında tamamlayıcı takviye fazı gibi davranan ve üretilen kompozit malzemesini istenen kullanım şartlarına yaklaştıran malzemelerin elde edilebilmesidir (Rana *et al.* 2011).

Son zamanlarda, GNP nanopartiküller akademik ve mühendislik alanlarında önemli hale gelmiş bulunmaktadır (Chorro *et al.* 2013). Benzer katmanlı yapıya sahip GNP, kil ile karşılaştırıldığında daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Daha geniş bir yüzey alanına ve iki boyutlu kristal yapıya sahip GNP, bir boyutlu CNT

ile karşılaştırıldığında, benzer mekanik performanslara sahip oldukları görülmektedir. Ayrıca, tanecik takviyeli kompozitlerde gerilme ve ısı transferi, iki boyutta bir boyuttakine göre daha fazla olmaktadır. Böylece, GNP, kil yapısı gibi katmanlı yapıya ve CNT gibi gelişmiş mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı, bu iki nano taneciğe potansiyel bir alternatif olması beklenmektedir (Kalaitzidou *et al.* 2008).

Böylece, kil yapısı gibi katmanlı yapıya sahip GNP, aynı zamanda CNT gibi gelişmiş mekanik özelliklere de sahip olmasından dolayı, bu ikisine alternatif olması beklenmektedir (Kalaitzidou *et al.* 2008).

Wang *et al.* (2010), bazalt elyafla takviye edilmiş grafit ve nano SiO₂ dolgulu polimer kompozitlerin sürtünme ve aşınma davranışını araştırmışlardır. Bu çalışmada, bazalt elyafla takviye edilmiş fenolik reçineli kompozit numuneler, sadece grafit tanecik, sadece SiO₂ nano tanecik ve grafit-SiO₂ hibrit taneciklerini içeren üç farklı malzeme üretilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, sadece grafit içeren numuneler, diğer numunelere göre daha üstün aşınma ve sürtünme özellikleri göstermişlerdir. Ayrıca, tribolojik deney sonuçlarına göre, SiO₂ ve grafitle takviye edilmiş polimer numunelerin tribolojik özelliklerinde daha yüksek iyileşmeler ortaya çıkmıştır. Farklı kayma şartlarında yapılan tribolojik deneylerde, BFC/Gr/SiO₂ hibrit kompozitlerin, yüksek kesme hızı ve kesme yükleri altında kullanımlarının daha uygun olduğunu görülmüştür.

Mesaros *et al.* (2013), enjeksiyon kalıplama metoduyla üretilen polyamid-6 hibrit nanokompozit malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerinde araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada montmorillonite (MMT) dolgulu polyamid-6 reçine malzemesi, kırılmış bazalt elyaf ile makro boyutta takviye edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, üretilen çok-ölçekli nano kompozit malzeme, çekmede ve eğilmede mekanik özellikleri iyileşmiştir. Burada, reçine malzemesinin kırılmış bazalt elyaf ile takviye edilmesi, MMT taneciklerinin reçine içinde dispersiyonunun artmasına neden olmuştur.

Xu and Van Hoa (2008), kil taneciklerinin karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemesinin reçinesine eklenmesinden dolayı mekanik özelliklerindeki değişimleri araştırmışlardır. Elde edilen nanokompozit, ergime sıcaklığı altında otoklav fırını kullanılarak üretilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, 4 phr kil nanotaneceğinin, kompozitin reçinesine eklenmesiyle birlikte, tabakalar arası kırılma tokluğunda %85 oranında artışın olduğu görülmüştür. Ayrıca aynı malzemeye 2 phr nanokil eklenmesi durumunda, malzemenin eğilme mukavemetinde %38'lik bir artış görülmüştür.

Hajian *et al.* (2012), polyvinylbutyral/GNP nanokompozit malzemesini üretmişler ve karakterizasyon özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, üretilen nanokompozitlere GNP takviyesi ile malzemenin mekanik ve termal özelliklerinde büyük oranda gelişme meydana gelmiştir. Ayrıca, malzemenin tokluğu ve esnekliği de artmıştır.

Bekyarova *et al.* (2007), karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin reçine malzemesini, CNT nano tanecikler ile takviye ederek ürettikleri kompozit malzemenin mekanik özelliklerini mekanik testler yaparak incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre, kompozit malzemesinin kayma dayanımında %30'luk artış görülmüştür.

Meguid and Sun (2004), *single shear-lap* test metodunu kullanarak nanotüp takviyeli kompozitlerde arayüzeyin çekme ve kayma dayanımını incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre epoksi malzemesine %1 ve 5 aralığında karbon nanotüp eklenmesi ile, bu malzemede arayüzey çekme ve kayma mukavemetinin büyük oranda arttığı belirlenmiştir.

Zhu *et al.* (2003), epoksi matris malzemesine %1 ağırlığında florlu tek cidarlı karbon nanotüp (SWCNT) takviye etmişler ve elde edilen kompozitin elastisite modülünde %30 (2,03 den 2,63 GPa a kadar) ve çekme mukavemetinde de %14'lük (83,2 den 95,0 MPa a kadar bir artış meydana gelmiştir.

Che *et al.* (2009), siyanat ester matris malzemesine, %1 oranında SWNT nano tanecik ilave edilmesiyle, kompozitin elastisite modülü ve çekme mukavemetinde sırasıyla, %39 ve %18'lik artış olduğu ve %0,5 SWNT eklenmesi ile kompozitin aynı özelliklerinde sırasıyla %59 ve %29 oranında artışlar meydana geldiği görülmüştür.

Hsiao *et al.* (2003), grafit elyaf takviyeli polimer kompozit malzemesinde, epoksi/çokcidarlı karbon nanotüp (MWCNT) malzemesini kullanarak, grafit elyafın epoksi malzemesine iyice tutunmasını sağlamışlardır. Bu çalışmada, çeşitli oranlardaki MWCNT, epoksi içerisinde disperse edilerek, daha iyi bir sertleştirilmiş yapıştırıcı üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan numunelerde, tek bindirmeli (single lap joint) bağlantısı yapılmış ve burada ortalama kayma dayanımı deneysel olarak ölçülmüştür. CNT oranının artmasıyla birlikte, arayüzey bağlarının performansında yüksek oranda iyileşme meydana gelmiş ve böylece ILSS değeri artmıştır.

Dong *et al.* (2012), sonlu elemanlar metodunu kullanarak, karbon ve cam elyaf takviyeli hibrit kompozitin eğilme modülünü incelemişler ve ortaya çıkan nümerik sonuçları, deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. Bu çalışmaya göre, cam elyafın, hibrit kompozitin yapısında kullanım oranının artmasıyla birlikte, kompozitin eğilme modülünde düşüş meydana geldiği görülmüştür.

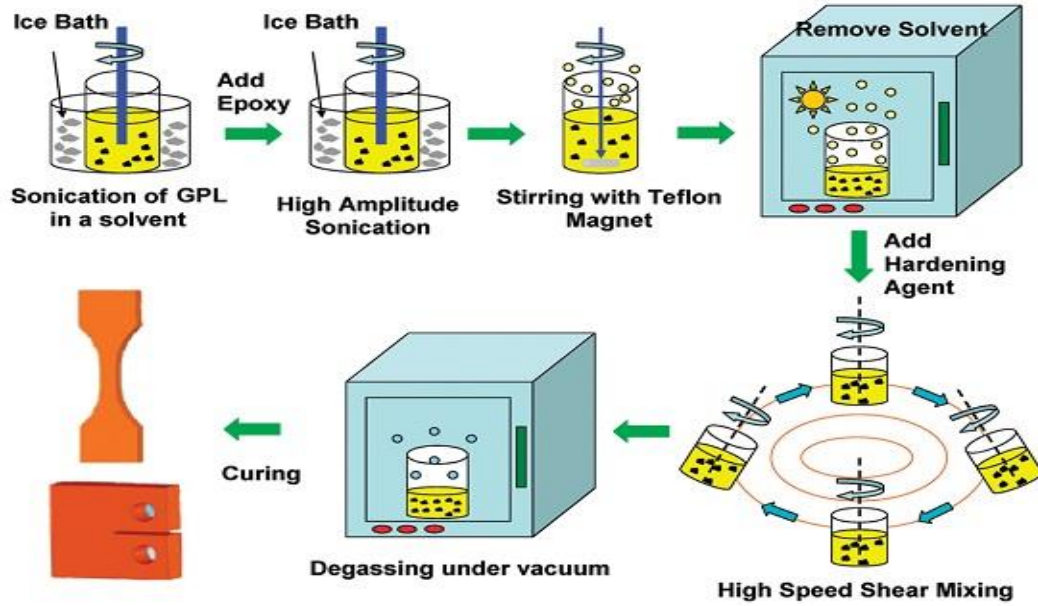
Artemenko (2003)'nün yaptığı araştırma sonuçlarına göre, karbon elyafının, bazalt elyafı ile hibritleşmesinden dolayı hafif ve dayanıklı bir malzemenin ortaya çıkmasından dolayı, bu tür elyafın plastik malzemelerde takviye fazı olarak kullanımı yüksek oranda artırmıştır.

Park and Jang (1999), Polietilen ve karbon elyafı ile takviye edilmiş hibrit epoksi kompozit malzemeleri hakkında araştırma yapmışlardır. Bu araştırma sonuçlarına göre bu iki elyaf türünün aynı zamanda malzemenin yapısında kullanımı elde edilen kompozit malzemelerin sertlik ve tokluğunun yüksek oranda artışına neden olmuştur.

Rafiee *et al.* (2009a), epoksi reçineli GNP, SWCNT, MWCNT dolgulu nanokompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, GNP dolgu malzemesi, CNT dolgu malzemelerine göre, kompozitin mekanik özelliklerini büyük oranda geliştirdiği görülmüştür. Epoksi matris malzemesine GNP'nin dâhil edilmesi ile, elde edilen nanokompozitin elastisite modülünde, katkısız epoksiye göre %31 ve SWCNT dolgulu nanokompozitlere göre %3 oranında artış olmuştur.

GNP esaslı nanokompozitin çekme mukavemetlerinde %40 ve MWCNT nanokompozitlerin bu özelliğinde %14 artış meydana gelmiştir. GNP levhalarının, ultrasonik karıştırıcı kullanılarak epoksi içerisinde dispersiyon aşamaları Şekil 2.31'de gösterilmiştir. Çalışmada, GNP'nin epoksiye eklenmesi ile üretilen nanokompozitlerin mod-I kırılma tokluğunda %53 artış görülmüştür. Hâlbuki bu artış MWCNT dolgulu nanokompozitlerde bu kırılma tokluğundaki artış %20 ile sınırlandırılmıştır.

Üretilen nanomalzemelerin yorulma dayanımında da, aynen mekanik özelliklerde olduğu gibi yorulma dayanımında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Mekanik özelliklerin geliştirmesinde, GNP taneciklerin, SWCNT ve MWCNT ye göre üstünlüğünün bu taneciklerin yüksek spesifik yüzeylerinden dolayı, yüksek arayüzey yapışmasına ve bu taneciklerin iki boyutlu düzlemsel geometriye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Mekanik özelliklerin iyileşmesinin nedeni, GNP taneciklerin, SWCNT ve MWCNT ye yüksek spesifik yüzeylere sahip olması, yüksek arayüzey yapışmasının olması ve bu taneciklerin iki boyutlu düzlemsel geometriye haiz olmalarındandır (Rafiee *et al.* 2009).



Şekil 2.31. GNP levhalarının, ultrasonik karıştırıcı kullanılarak epoksi içerisinde dispersiyonunun şematik görünüşü (Rafiee *et al.* 2009)

Kim *et al.* (2009), karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemesinin reçinesine, CNT dolgusu eklemişler ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, elde edilen çok ölçekli malzemenin çekme özelliklerinde pek fazla bir değişime olmamıştır. Bununla birlikte, deney sonuçlarına göre, sisteme sadece %0,3 oranında CNT eklendiğinde malzemenin eğilme modülünde %12 ve eğilme mukavemetinde %18'lik bir artış görülmüştür. Malzemenin özelliklerindeki bu gelişmeler, nano taneciklerin eklenmesi ile malzeme kusurlarında azalmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

GNP dolgulu epoksi nanokompozitlerin mekanik özellikleri, Wong ve arkadaşları tarafından (2011) incelenmiştir. Bu çalışmada, GNP'nin epoksi malzemesinin mekanik, termal ve elektrik özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla, katkısız ve %1-6 oranında GNP dolgulu kompozit numuneleri hazırlanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, hacimsel olarak %3,7 ve kütleli olarak %6 GNP'nin epoksiye eklenmesi ile malzemenin elastisite modülü 2,72 GPa'dan 3,36'ya yükselmiştir. Çalışmada ayrıca, nanotanecek eklendikten sonra malzemenin elastisite modülünün

teorik hesaplanması için Halpin-Tsai modeli kullanılmıştır (Wong *et al.* 2011; Kim *et al.* 2012).

Hossain *et al.* (2013), karbon nanofiberleri poliestere ekleyerek, e-camı ile takviye etmişler ve elde ettikleri malzemenin termal ve arayüzey kayma mukavemetindeki değişimleri araştırmışlardır. Yapılan DMA testlerinin sonuçlarına göre, nano fiberlerin eklenmesi ile malzemenin depolama modülünde %49,5 ve camsı geçiş sıcaklığında 3°C'lik bir artış meydana gelmiştir. TMA (Termal Mekanik Analiz) testlerinin sonuçlarına göre, nanofiberlerin eklenmesi ile kompozit malzemenin termal stabilitesinde artış olmuş, buna mukabil CTE (termal genleşme katsayısında) düşüş olmuştur. Ayrıca, nano-taneciklerin eklenmesi ile, fiber-matris arayüzey bağlarının mukavemetinde artış oluşmakla birlikte, ILSS (tabakalar arası kayma mukavemeti) değerinde de artışa neden olmuştur.

Gojny *et al.* (2005), geleneksel kompozitlerde, nano-modifikasyon işleminin, mekanik, termal ve elektrik özelliklerinin üzerinde oluşturduğu etkileri araştırmışlardır. Bu çalışmada, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin (FRP) matris malzemesi, reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi kullanılarak siyah karbon (CB) ve karbon nanotüp (CNT) ile nano boyutunda başarıyla modifiye edilmiş ve nanofiberlerde cam elyafından gelen filterasyon olayına rastlanmamıştır. Cam elyaf takviyeli CNT nanotanecik epoksi kompozitlerde (GFRP), tabakalar arası kayma mukavemeti gibi matris ağırlıklı özelliklerde çok yüksek miktarda iyileşme meydana gelmesine rağmen, nanotaneciklerin eklenmesi ile çekme özellikleri gibi fiber ağırlıklı özelliklerde ise pek fazla değişim olmamıştır.

Bazı eski çalışmalara göre (Qian *et al.* 2000; Gojny *et al.* 2004), CNT taneciklerin kompozitin reçine malzemesine eklenmesi, hem bu malzemelerin mekanik özelliklerinin gelişmesini, hem de çatlak yüzey alanları arasında köprü gibi davranarak, malzemenin çatlak dayanımının artmasına neden olmuştur.

Bhattacharyya *et al.* (2013), karbon elyaf takviyeli karbon nanofiber (CNF) dolgulu fenolik matrisli çok ölçekli kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, söz konusu olan çok ölçekli kompozit malzemesinin mekanik ve termal iletim özellikleri karakterize edilmiştir. Ayrıca malzemenin elastisite modülü ve termal iletkenliği, CNF dolgusuyla modifiye edildikten önce ve sonra tahmini hesaplar yapılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, ağırlıkça sadece %1,5 CNF dolgusunun kompozit reçinesine eklenmesi ile, karbon-fenolik kompozit malzemenin elastisite modülünde %10, çekme mukavemetinde %12 ve termal iletkenliğinde %36'lık artışlar görülmüştür. Kompozit malzemenin deneyden sonra kırılma yüzeyi incelenmiş ve CNF dolgulu numunelerde elyafla matris arayüzeyinde daha güçlü bağların oluştuğu belirlenmiştir.

Bhattacharyya *et al.* (2013), GNP esaslı nanokompozitlerin üstün spesifik sertlik ve yüksek mukavemetinden dolayı, mühendislik uygulamalarında, geleneksel kompozit malzemelere alternatif olabileceğini belirtmişlerdir. Son zamanlarda, GNP nano levhaların kullanımı, avantaj / maliyet ilişkisi nedeniyle daha fazla önem kazanmıştır.

Koo *et al.* (2011)'nin yaptıkları araştırma sonuçlarına göre, CNT ve GNP nano malzemelerinin elastisite modüllerinin yaklaşık 1,0 TPa olduğunu belirlemişler. Buna rağmen, GNP nanolevhaların üretim kaynağı sayılan genleşebilen grafitin fiyatı yaklaşık olarak 10.00 \$/pounddur. Hâlbuki SWCNT nano malzemeler bunun 20,000 katıdır.

Avila *et al.* (2010)'ın yaptıkları araştırma sonuçlarına göre, hibrit nano kompozit malzemeler, çok takviyeli ve tabakalı kompozit malzemeler olarak tanımlanabilirler. Bazı çok takviyeli kompozitler, üç sınıfa ayrılabilir; birincisi, nanopartiküllerin polimerik malzemede disperse edilmesinden dolayı ortaya çıkan ve nanoyapıdan oluşan nano takviye seviyesi, ikinci takviye seviyesi, nano yapı kümeler kullanılarak mikroskobik seviyedeki fiber ile matris arasında kurulan bağlardan oluşan seviye ve son olarak, fiberler kendi- kendine matrisin mukavemetini artırarak takviye fazı olarak tanımlanabilen seviyedir.

Yasmin *et al.* (2006)'ın yaptıkları çalışma sonuçlarına göre, karbon fiber/epoksi kompozitlerde, eğilmeyi etkileyen malzeme kusurları, elyaf ağırlıklı özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, bu kusurların malzemedeki dağılımı aynı olmalıdır. Ancak, test edilen numuneler incelendiğinde beklenmeyen bir davranış fark edilmiştir. Kontrol numunelerinde meydana gelen hasarlar çoğunlukla intra-laminardır. Hâlbuki hibrit kompozit malzemelerin üç takımında da “Zigzag” hasar modu izlenmiştir. Zigzag hasar modu inter-laminar ve intra-laminar hasar modlarının kombinasyonundan ortaya çıkmaktadır. Bu iki hasar modunun aynı anda ortaya çıkması ile, enerji dağılımı iyileşmiştir ki bu olay yük değerinin zirvede olmasına yol açmıştır. Arayüzeyde güçlü bağların oluşumuna neden olan, GNP kümelerinin lifler etrafında matris içinde dağılması bu tür davranış için muhtemel bir açıklama sayılabilir. Bu bağlar, liflerle zigzag etkisi arasında meydana gelen gerilme dağılımının müsebbibi olarak görülebilir.

Chou *et al.* (2010), CNT nano taneciklerin, tabakalı kompozitlere eklenmesinin etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada tabakalar arasında başlayan ve ilerleyen çatlakların hibrit mimarlık kavramıyla kapanması öne sürülmüştür.

Wang *et al.* (2009), GNP nanokompozitlerin termal genleşme katsayılarını araştırmışlardır. Bu çalışmada, GNP levhaları, grafit interkalasyon ve şarj bağlı eksfoliyasyon metotları kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen grafen oksit (GNPO) levhaları, polimer esaslı kompozitin matrisine eklendikten sonra, ortaya çıkan nanokompozit malzemenin CTE'si termo-mekanik analizör test cihazı kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, polimere GNP'nin dâhil edilmesi ile, malzemenin CTE değeri düşmüş ve dâhil edilen GNP taneciklerinin hacim oranı arttıkça CTE değeri yüksek oranda düşmeye devam etmiştir. Camsı geçiş sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda, %5 oranında GNP oksit taneciklerinin dâhil etmesi ile CTE değerinde %31,7'lik bir düşüş görülmüştür.

Kuilla *et al.* (2010), yaptıkları çalışmada, GNP'nin elastisite modülünü yaklaşık 1,0 TPa ve mukavemetini 130 GPa olarak bulmuşlardır. Bu yüksek mekanik özellikler, matris malzemesine eklenerek, kompozit malzemedeki, fiber-matris arayüzey sertliği ve

mukavemetinde de çok büyük bir artış sağlayabilecektir. Arayüzeyde mukavemetin artması, elyaf ile matris arasında gerilme transferinin artmasına ve böylece liflerin etrafındaki bölgelerde daha iyi gerilme dağılımına neden olmakta ve böylece malzemenin eğilme mukavemetinin artmasına yol açmaktadır. Çalışma sonuçlarına göre, dikkate alınması gereken önemli bir nokta, matris malzemesinin doygunluk sınırındır. Bu sınıra ulaştıktan sonra GNP'nin eklenmesi ile birlikte, çökeltme olayı ortaya çıkmakta (söz konusu çalışmada bu değer %0,5 oranındadır.) ve bu olay topaklanma oluşmasına neden olmaktadır. Topaklanma oluşumu, matris malzemesinde gerilme yığılmasını artırmakta ve bunun sonucu olarak, kompozit malzemenin eğilme mukavemetinde düşüş olmaktadır.

Avila *et al.* (2012), karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin reçinesini GNP kullanarak modifiye etmiş ve bu modifikasyonun etkilerini eğilme deneyleri yaparak araştırmışlardır. Karbon-epoksi tabakalı kompozit malzemesine GNP eklenmesi, elde edilen çok-ölçekli kompozit malzemesinin sertliğinin ve eğilme mukavemetinin artmasına neden olmuştur. %0, %0,5 ve %1,5 oranlarında GNP matris malzemesine eklenmesi ile, eğilme modülü $27,94 \pm 2,74$ GPa dan $76,87 \pm 4,03$ GPa'a kadar artmıştır. Kompozitin matris malzemesine %1,0 ve %1,5 GNP eklenmesi, numunelerin sertlik değerlerine hafif bir artışa neden olmuş ve sırasıyla $38,44 \pm 4,12$ GPa'lık ve $58,71 \pm 13,25$ GPa'lık eğilme rijitliği değerleri elde edilmiştir. Sertlik artışının düşük olmasının nedeni, GNP eklenmesinden dolayı matris malzemesinin doygunluk sınırına ulaşması ve böylece matris içerisinde topaklaşmanın oluşmasıyla birlikte gerilme yığılmasının artmasıdır. Eğilme mukavemeti, GNP'nin matris içerisinde disperse olmasına müteakiben, karbon elyaf etrafında yayılması ve epoksinin içerisinde topaklanmasından çok büyük oranda etkilenmiştir.

%0,5 oranında GNP eklenmiş numunede, eğilme mukavemeti 1355,94 MPa'a yükselerek zirve noktasına ulaşmıştır. Epoksi içerisinde GNP'nin disperse edilmesi ve oranının artmasıyla birlikte, GNP eklenmemiş durumdaki ortalama eğilme mukavemeti $623,01 \pm 70,15$ MPa iken, %0,5 oranında GNP eklendiğinde mukavemeti $1259,91 \pm 61,73$ MPa'a yükselmiştir. Ayrıca, %1,0 oranında GNP eklendiğinde mukavemeti

1143,72±72,39 MPa ve %1,5 eklendiğinde mukavemeti 1187,53±129,54 MPa'a kadar artırmaktadır. Eğilme mukavemetindeki bu yüksek artışın nedeni, hasar modunun intra-laminar durumundan, inter-laminar ve intra-laminar modlarının kombinasyon moduna yani zigzag moduna geçme olarak belirtilmiştir.

Li *et al.* (2013), CNT ve GNP taneciklerinin karışımından ortaya çıkan hibrit nano takviye fazının, epoksi reçineli kompozitlerin yapısında, yüksek performanslı çok fonksiyonlu takviye fazı olarak kullanımını araştırmışlardır. Bu çalışma sonucunda, elde edilen hibrit nanotakviye fazının, epoksi reçinesinde disperse edilmesi ile, ortaya çıkan nanokompozitin özelliklerinde makbul değerlerde gelişme ortaya çıkmıştır. Ayrıca, CNT-GNP hibrit takviye fazı ile karbon nanodolguların iyice disperse edilmesi halinde, nanodolgular ile reçine arayüzey yapışması daha yüksek oranda gerçekleşmekte ve böylece dolgularla reçine arasındaki gerilme transferi artmaktadır.

Rafiee *et al.* (2010), %0,1 GNP'nin reçineye eklenmesinden dolayı, kompozitin sertliğindeki ve mukavemetindeki artış oranının, %1 CNT eklenmesi ile elde edilen kompozitin değerleri ile aynı olduğunu göstermişlerdir ki, bu GNP'nin kullanılması açısından önemli bir sonuçtur. Yazarların bir başka çalışmalarında da, GNP eklenmesi ile kompozitin kritik burkulma yükünde %52'lik bir artış meydana geldiği belirtilmiştir, (Rafiee *et al.* 2009b). Ayrıca, GNP'nin kompozitin reçinesine eklenmesi ile malzemenin yorulmadan dolayı çatlak dayanımı iki kata kadar yükseldiği belirtilmiştir.

Bansal *et al.* (2013), GNP nano taneciklerle takviye edilmiş fenolik reçinesinin işlenmesini ve karakterizasyonunu incelemişlerdir. Bu çalışmada, fenolik matris malzemesi, GNP nanotanecikler ve buharla yetiştirilmiş karbon nanodolgu ile takviye edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, 60-80°C sıcaklık aralığında, nano matris malzemesine %1,5 oranında GNP'nin eklenmesi ile elde edilen nanokompozitin termal genleşme katsayısında %15,36 (73,83mm/m°C) ve aynı oranda buharla yetiştirilmiş karbon nanodolgu içeren kompozit malzemesinin bu özelliğinde ise %14,23 (74,81mm/m°C) düşüş ortaya çıkmıştır. Ayrıca, %0,5 oranında GNP nanotanecik eklenmesi ile elde edilen nanokompozitin eğilme mukavemetinde de %31,62 (48,57

MPa) ve eğilme modülünde %42,23 (2,9 GPa) oranında bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca, %1,5 oranında buharla yetiştirilmiş karbon nanodolgu içeren fenolik malzemesinin eğilme modülü ve eğilme mukavemetinde sırasıyla %14,3 ve %23,5 oranlarında artışlar olmuştur.

Son yıllarda yapılan araştırmalara göre, polimer nanokompozitlerin mekanik performansının gelişmesi, nano dolguların doğal özelliklerinden ziyade, arayüzey bölgesinde matris malzemesi ile nano dolguların arasında kurulan bağların yapısına bağlıdır (Ebrahimi *et al.* 2013).

GNP taneciklerin termoset reçinelere eklenmesi ile malzemenin tokluğunun artırılması, Zhang *et al.* (2011b) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada, termosetlerin mekanik özelliklerinin iyileştirme amacıyla yüksek çapraz bağ kurma gibi yöntemler kullanılmıştır. Bununla birlikte, burada kullanılan yöntemler malzemenin kırılma mukavemetinin düşmesine neden olmuştur. Genellikle termosetlerin sertleşmelerinin çok yüksek olması, bu malzemelerin kırılma özelliklerinin yüksek olması ve matris malzemesinin mekanik özelliklerinde de muhtemel olumsuz bir etki ortaya çıkmama anlamına gelmemektedir. Epoksi en önemli termoset reçinesi olarak sanayide kullanılmaktadır (Ebrahimi *et al.* 2013) ve yapılan araştırma sonuçlarına göre, sertliği ve tokluğu, GNP taneciklerinin eklenmesi ile artmaktadır (Du *et al.* 2012; Lu *et al.* 2013). Bu taneciklerin çok iyi bir disperse edilmesi ile, GNP ve epoksi arayüzeyindeki iyileşmelerden dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde de iyileşmelerin olduğu Zheng *et al.* (2012) tarafından araştırılmıştır.

Wichmann *et al.* (2006), cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik ve elektrik özelliklerini geliştirilmesi amacıyla, bu kompozitlerin reçinelerini nano dolgu malzemeler ekleyerek modifiye etmişlerdir. Bu çalışmada silika, siyah karbon, CNT gibi nano tanecikler kullanılarak kompozitin reçinesi takviye edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, sadece %0,3 oranında CNT tanecikleri kompozit reçinesine eklenerek, kompozitin ILSS değerinde %16'lık bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte, nano

taneciklerin eklenmesi, kompozit malzemenin kırılma mukavemetini (G_{Ic} ve G_{IIc}) çok fazla etkilememiştir.

Shen *et al.* (2009), CNT nano dolguların, örgülü cam elyaf takviyeli poliamid-6 kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile, bu malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinde meydana gelen gelişmeleri incelemiştir. Bu çalışmada kullanılan numuneler, çekme, eğilme, ısıl bozulma sıcaklığı (HDT) ölçümleri, termal iletkenlik ölçümü, konik kalorimetre testleri yapılarak ve Termal Gravimetrik Analizine (TGA) tabi tutularak karakterize edilmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, sadece %2 oranında CNT nano taneciklerin kompozitin reçinesine eklenmesi ile, kompozit tabakalarının eğilme mekanik özellikleri %36 oranında artmıştır.

Yuan *et al.* (2010), tek cidarlı karbon nanotüpler (SWNT)'in, siyanat ester/epoksi kompozitin reçinesini takviye etme amacıyla, dolgu malzemesi olarak kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, sadece %1 oranında SWNT'nin kompozitin reçinesine eklenmesi ile, kompozitin çekme modülünde, mukavemetinde ve tokluğunda sırasıyla, %80 ($4,70 \pm 0,24$ GPa a kadar), %70 ($142,3 \pm 6,9$ MPa a kadar) ve %58 ($4,1 \pm 0,4$ MJm⁻³ e kadar) oranında artış olmuştur. Hâlbuki katkısız reçinenin özellikleri $E=2,61 \pm 0,14$ GPa, $\sigma=83,7 \pm 3,3$ MPa ve $T=2,6$ ($0,2$ MJ m⁻³) şeklinde olarak ölçülmüştür.

Hossain *et al.* (2011), örgülü karbon elyafla takviye edilmiş epoksi matrisli kompozitlerin termal özelliklerini, malzemenin reçinesine nano kil eklemekten önce ve ekledikten sonra araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, kompozitin reçinesine nanokil taneciklerinin eklenmesi ile bu malzemelerin camsı geçiş sıcaklığında ve depolama modülünde iyileşme meydana geldiği görülmüştür.

Son zamanlarda, CNT taneciklerle modifiye edilmiş polimerlerin, geleneksel elyaf takviyeli kompozitlerin reçinesi olarak kullanımı, bu malzemelerin ILSS gibi matris ağırlıklı özelliklerinin iyileşmesine neden olmuştur (Kim *et al.* 2008).

Gojny *et al.* (2005), nanomodifikasyon işleminin, klasik kompozitlerin elektrik ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre, kompozit malzemesinin reçinesine %0,3 oranında MWCNT eklenmesi ile kompozitin ILSS' sinde %20'lik bir artış elde edilmiştir.

Kim *et al.* (2008), karbon elyaf takviyeli epoksi reçineli kompozitlerde, reçineye MWCNT ekleyerek düşük sıcaklıklarda, kompozit malzemede çatlak ilerleme dayanımını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, epoksi reçinesine MWCNT taneciklerinin eklenmesi ile, malzemenin kırılma sertliğinde artış ve düşük sıcaklıklarda ortaya çıkan çatlakların yoğunluğunda düşüş gözlenmiştir.

Zhang *et al.* (2005), karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin reçinesine CNT ekleyerek elde ettikleri çok ölçekli kompozitin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada önerilen hipoteze göre, düşük miktarda CNT'nin kompozitin reçinesine eklenmesi, malzeme reçinesinin kırılma sertliğini ve arayüzeyinde gerilme transferini artırarak, mekanik özelliklerinin dağılımını azaltmakta ve böylece mekanik özelliklerin iyileşmesine neden olmuştur. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, kompozitin reçinesine MWCNT eklenmesi, kompozitin ILSS değeri, çekme ve basma özelliklerinde belirgin bir iyileşmeye neden olmuştur.

Yavari *et al.* (2010), hiyerarşik GNP dolgulu kompozit malzemelerde, yorulma ömrünün artışını araştırmışlardır. Çalışmada, cam elyafı, doğrudan püskürtme kaplama yöntemi ile farklı oranlarda GNP nanotaneciklerle kaplanmıştır. Çalışmanın devamında, cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin sentezlenmesi ve yorulma karakterizasyonu incelenmiştir. Çalışmaya göre, kompozit reçinesine, sadece ~%0,2 GNP'nin eklenmesi ile kompozit malzemesinin eğilme modunun yorulma ömründe yaklaşık 1200 kata varan, çok önemli artışa rastlanmıştır. Ayrıca bu oranda GNP'nin artışıyla kompozitin tek yönlü yorulma ömründe 3-5 kat arasında artış gözlenmiştir. Elde edilen iyileşmeler, 2 kat CNT tanecikleri eklenmesi ile sağlanmaktadır. Ayrıca, üç fazlı hiyerarşik cam elyaf-epoksi-GNP kompozitlerin yorulma ömründe meydana gelen iyileşmeler, iki fazlı cam elyaf-epoksi kompozitlerin yorulma ömrüyle karşılaştırılmıştır. Çevrimli yorulma

sırasında, nanokompozitten çekilen insitu ultrason görüntülerine göre, kompozitin reçinesine eklenen GNP tanecikleri, cam elyaf takviyeli kompozit malzemesinin arayüzeyinin bağlarını artırarak, arayüzey mukavemetinin artmasına neden olmuş ve böylece cam elyafının burkulma dayanımını artarak, delaminasyonun önlenmesine neden olmuştur.

Zhou *et al.* (2006), CNF dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin üretim ve analizi konusunda araştırma yapmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, bu kompozitin reçinesine %2 oranında karbon nano fiberin eklenmesi ile, elde edilen malzemenin ILSS değeri %22,3 artmıştır.

Morales *et al.* (2010), enjeksiyon kalıplama yöntemini kullanarak üretilen iletken CNF dolgulu çok ölçekli kompozit malzeme üretmişlerdir. Bu çalışmada, karbon nano fiber dolgulu polyester reçinesi, hafif reçine transfer kalıplama yöntemi (LRTM) kullanılarak cam elyafıyla takviye edilmiştir. İşleme alınan üretim süreci, iki farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, kompozitin reçinesine sadece %0,5 oranında CNF eklenmesi ile bu nano taneciklerin cam elyafı ile reçine arasında daha güçlü bağlar oluşmasından dolayı, malzemenin eğilme ve çekme mukavemetinde çok büyük iyileşmeler meydana gelmiştir.

Hossain *et al.* (2011), E-camıyla takviye edilmiş CNF dolgulu polyester reçineli kompozitlerin eğilme ve çekme davranışını incelemişlerdir. Elyaf takviyeli polyester reçineli uniform bir CNF dispersiyonu içeren kompozitlerin özelliklerini geliştirmek amaçlanmıştır. Çalışmada, CNF tanecikleri, katalizörle birlikte ultrasonik sıvı işlemci metodu ile birlikte mekanik karıştırıcı kullanılarak kompozit reçinesine aşılanmıştır. Çalışmada üretilen malzemenin mekanik davranışını incelemek için eğilme ve yarı-statik testler yapılmıştır. Ayrıca, test edilen numunelerin kırılma yüzeyi, optik mikroskop (OM) ve SEM kullanılarak incelenmiştir. Katkısız klasik ve %0,2 oranında CNF katkılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere uygulanan eğilme testleri sonuçları karşılaştırılmış olup, reçinesi karbon nano fiberle takviye edilmiş kompozitlerin eğilme mukavemeti ve modülünde sırasıyla %49 ve %3'lik artışlar

meydana gelmiştir. Benzer sonuçlar, yarı-statik basma özelliklerinde de görülmüştür. SEM görüntülerinin incelenmesi sonucunda, test edilmiş nano takviyeli kompozitlerdeki elyaf kırılması, matris ile elyaf arasındaki delaminasyon hasarları, klasik kompozitlere göre daha az olmaktadır.

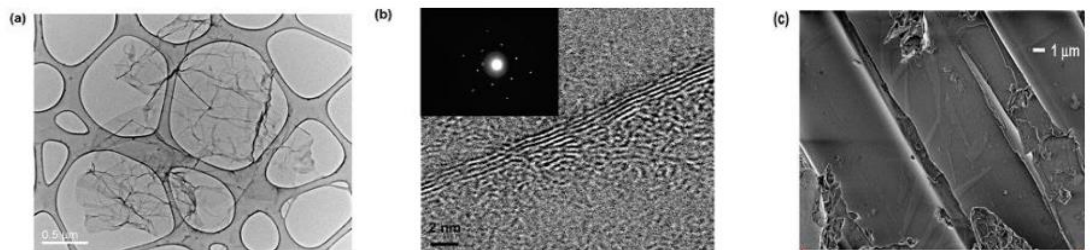
Iwahori *et al.* (2005), CNF nano taneciklerin, kompozit reçinesine dispersiyonu ile takviye edilmiş iki fazlı ve 3 fazlı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Mikro boyutta karbon elyaf ile takviye edilmiş iki fazlı ve reçinesi CNF dolgulu çok-ölçekli, üç fazlı kompozit türleri üretildikten sonra statik mukavemet testlerine maruz bırakılmışlardır. Bu tür çok-ölçekli kompozitler, CNF'nin karbon elyaf ile takviye edilmiş plakların reçinesine disperse edilmesi ve *hot press* yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, nano taneciklerin kompozitin reçinesine disperse edilmesi ile, malzemenin çekme modülü ve mukavemetinde sırasıyla %45 ve %17'den fazla artışlar meydana gelmiştir. Epoksi reçineli kompozitlerde AR10 ve AR50 CNF türlerinin, matris malzemesine %10 oranında eklenmesi ile kompozitin çatlak başlama ve ilerleme dayanımında büyük oranda artış meydana gelmiştir. CNF türlerinin reçineye eklenmesi ile birlikte, çatlak ilerleme dayanımında artış olmasının nedeni, bu taneciklerin çatlağın yüzeylerinde köprü gibi davranmasından ve böylece bu yüzeylerin ayrışmasını önlemesinden dolayı olduğu gözlenmiştir.

Sadeghian *et al.* (2006), CNF reçinesi ile sertleştirilmiş, cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin üretimi ve aynı zamanda bu malzemelerin mod-I delaminasyon mukavemetini artırmak amacıyla, vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, kompozitin polyester reçinesine sadece %1 oranında karbon nano fiber eklenmesi ile, malzemenin kırılma tokluğunda (G_{IC}) çok büyük oranda artış meydana gelmiştir. Klasik karbon elyafla takviye edilmiş polyester kompozitlerin ve reçinesi nano taneciklerle takviye edilmiş kompozitin kırılma yüzeyinin mikroskopik boyutta incelemesi sonucunda, reçinesi nano tanecikle takviye edilmiş kompozitin kırılma yüzeyinin çok daha kompleks bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.

Pervin *et al.* (2005), karbon elyaf takviyeli CNF parçacıklı epoksi kompozitler üretmişler ve parçacıkların kompozitin özelliklerine olan etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, %1-2 oranlarında dolgu içeren SC-15 epoksi reçineli kompozit malzemelere eklenen taneciklerin, malzemenin mekanik ve termal özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri, DMA, TGA ve çekme deneyleri yaparak araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, %2 oranında CNF içeren numuneler, klasik numunelere ve başka oranda nano tanecik içeren numunelere göre, çekme dayanımında en yüksek performansı sergilemişlerdir. Bu çalışmanın devamında, %2 oranında CNF içeren ve VARTM metodu ile karbon elyaf örgülü tabakalar üretilmiş ve tabakaların mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla, eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneylerin sonuçları, nanotanecik ile takviye edilmiş kompozitlerin eğilme mukavemetinde %22,3'lük bir artış meydana geldiği görülmüştür.

Son zamanlarda, çok-ölçekli nanokompozitler, elyaf takviyeli kompozitlerin çeşitli özelliklerini iyileştirme amacıyla kullanılmaktadırlar (Şekil 2.32). Bu kompozitlerin üretiminde iki farklı strateji takip edilmiştir (Bhattacharyya *et al.* 2013):

- 1- Nanotaneciklerin matris malzemesi içerisinde dispersiyonu (Dean *et al.* 2006; Rodgers *et al.* 2005)
- 2- Nanotaneciklerin geleneksel kompozitlerde biriktirme (depositing) ve ya aşılama (grafting) gibi metotlarla matris içerisinde kullanılmadan önce elyafın yüzey alanına kaplanması



Şekil 2.32. Reçinesi GNP nanotanecikler ilaveli ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin karakterizasyonu

(a) GNP plaklarının TEM görüntüsü (b) GNP plaklarının yüksek çözünürlüklü TEM görüntüsü (Yavari *et al.* 2010)

Kompozit malzemelerin matris ağırlıklı özellikleri, nanotaneceklerin matris içerisinde disperse edilmesinden dolayı, daha fazla etkilenmektedir. Nanotaneceklerin matris içinde homojen dispersiyonunu sağlamak ve birinci stratejiyi takip etmek, çok-ölçekli kompozit malzemelerin geliştirilmesinde çok büyük sorun olmaktadır. Bu sorun, özellikle CNF, CNT ve GNP gibi en-boy oranı çok yüksek olan nanotaneceklerde daha çok ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, bu nanotanecekler kompozit üretim sürecinde yeterli reçine akışına izin verilmezse, vakum destekli reçine infüzyon kalıplama durumunda olduğu gibi, işlem sırasında büyük oranda topaklanma gösterebilir (Bhattacharyya *et al.* 2013).

Yavari *et al.* (2010) yürüttükleri çalışmada, nanotaneceklerin eklenme sürecinde, optimum bir yapı elde etmek için, grafen taneciklerin en optimal eklenme noktası olarak, elyaf ile reçine malzemesinin arayüzeyi olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang *et al.* (2012), reçinesi GNPO nano tanecikler eklenmiş, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin arayüzey mikro yapısını ve özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, karbon elyafla epoksi arayüzey özelliklerini geliştirme amacıyla, GNPO nanotaneceklerini doğrudan münferit olarak karbon elyaf üzerine püskürtmüşler ve elde ettikleri deney sonuçlarına göre, GNPO ile modifiye edilmiş kompozitlerin arayüzey ve çekme özelliklerinde yüksek oranda artışın meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca, sadece %5 oranında GNPO katkısıyla elde edilen kompozitlerin arayüzey kayma mukavemeti (IFSS), tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) ve çekme özelliklerinde çok büyük iyileşmeler meydana gelmiştir.

Siddiqui *et al.* (2007), karbon elyafla takviye edilmiş polimer kompozitlerin reçinesine, nanokil ekleyerek kompozitin mod-I kırılma ve mekanik özelliklerinde ortaya çıkan davranışları incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, kompozitin reçinesine nanokil eklenmesi ile kompozitin çatlak ilerleme mukavemeti ve aynı zamanda kırılma tokluğunun arttığı görülmüştür. Ayrıca, organokil ile modifiye edilmiş epoksi reçinesinin kırılma tokluğu ve karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitlerin tabakalar arası mukavemeti arasında kuvvetli bir ilişki olduğu belirtilmiştir. Bu kapsamda, nano

dolguların topaklanmasının en aza indirilmesi amacıyla, prepreg gibi ürünler kullanarak, daha az reçine akışının olduğu kompozit üretim teknikleri kullanılmaktadır (Bhattacharyya *et al.* 2013).

Kim *et al.* (2008), karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin reçinesine MWCNT ekledikten sonra, düşük sıcaklıklarda çatlak ilerleme mukavemetini araştırmışlardır. Bu çalışmada, öncelikle, sertleştirilmiş epoksi reçinesinin etkileri, oda sıcaklığında ve -150°C 'de ve mod-I'de tabakalar arası kırılma tokluğu incelenmiştir. Daha sonra, epoksiye farklı oranlarda MWCNT eklenmiş, tek yönlü karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozitler üretilmiş ve farklı numunelerde mod-I kırılma tokluğu, düşük sıcaklıklarda ölçülüp karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, çatlak yoğunluğu çeşitli numunelerde ölçülerek, çatlak dayanımındaki MWCNT'nin etkileri, oda sıcaklığı ve -150°C aralığında altı adet termomekanik çevrim yapılarak incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, %0,2 ve 0,7 MWNT oranları kullanılarak üretilen kompozitler, daha yüksek kırılma tokluğu göstermişler ve bu numunelerde, termomekanik çevrimlerden dolayı ortaya çıkan çatlak yoğunluğun daha düşük olduğu görülmüştür.

Fan *et al.* (2008), cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin reçinesine MWCNT tanecikleri ekleyerek, ILSS'nin artışı üzerinde araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, kompozitin reçinesine enjeksiyon yöntemi kullanılarak MWCNT eklenmiş ve elde edilen kompozitin ILSS değerlerinde meydana gelen artış incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, MWCNT taneciklerin epoksiye eklenmesi, ILSS değerinde %33 oranında bir artışa sebep olmuştur. Ayrıca, ILSS değerinin nano tanecikler ile artış oranı, MWCNT taneciklerinin kalınlık doğrultusundaki oryantasyonundan etkilendiği görülmüştür.

Yokozeki *et al.* (2007), karbon elyaf takviyeli epoksi reçineli kompozitlerde, *cup-stacked* karbon nanotüp (CSCNT) taneciklerin reçineye eklenmesi ile malzemenin çatlak davranışında ortaya çıkan gelişmeleri incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, karbon elyaf takviyeli kompozitlere CSCNT taneciklerin eklenmesi, malzemedeki çatlak başlamasını geciktirdiği ve böylece olumlu etkiler ortaya çıkardığı belirlenmiştir.

Yang *et al.* (2013), çok ölçekli karbon fiber ve GNP nanotanecek esaslı, ileri termoplastik kompozitlerin geliştirilmesi amacıyla kolay ve etkili bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Bu araştırmada, çift vidalı ekstrüzyon metoduyla üretilen Poli Arilen Ethernitrile/KF/GN kompozitler, mükemmel mekanik özellikler sergilemişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre, PEN/KF/GN kompozitin eğilme modülü 18,6 GPa a kadar yükselerek, klasik PEN/KF, PEN/GN kompozitine ve takviyesiz PEN matrisine göre sırasıyla 1,7, 4,5 ve 6,4 kat daha büyük olduğu görülmüştür. SEM görüntülerinin incelemesine dayanarak, mikro ölçekli KF ve nano ölçekli GN taneciklerin sinerjik etkisini, PEN matrisinin mekanik özelliklerinde görmek mümkündür (bu etkiler, matris açısından zengin ve hacimde boşluk içeren bölgelerin azalmasından ve gelişmiş arayüzey etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır). Çalışma sonuçları, çok ölçekli KF ve GN takviye fazlarının, termoplastik kompozitlerin mekanik özellikleri ve termal kararlılıkları üzerinde belirgin bir sinerjik takviye etkisi ortaya çıkardığını göstermiş olup, bu malzemelerin tasarım ve üretimini kolaylaştıran metotlar ileri sürülmüştür.

Yokozeki *et al.* (2007), karbon elyaf takviyeli tabakalı epoksi kompozitlerin reçinesine *cup-stacked* karbon nanotüp (CSCNT) ekleyerek ürettikleri kompozitin çatlak dayanım davranışını araştırmışlar. Bu çalışmada, kullanılan tabakalar, *prepreg* kullanılarak üretilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, CSCNT taneciklerinin epoksida dispersiyonu, kompozitin kırılma sertliğinin iyileşmesine ve kalıcı termal şekil değiştirmelerin azalmasıyla matris malzemesinde çatlak oluşumunun önlemesine sebep olmuştur.

2.3. Termal Yorulma

Termal analiz, bir cismin kontrollü biçimde ısıtılması veya soğutulması sırasındaki fiziksel özellik değişimlerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmesi ve yorumlanmasıdır. Termal analiz esnasında, cismin ağırlık kaybı, dönüşüm sıcaklıkları ve enerjileri, boyut değişimleri, viskoelastiklik özellikleri gözlenir. Bu ölçümler, kimyasal tepkimelerin ve dinamik özelliklerin belirlenmesi, bileşim analizi, ürün kalite kontrolü açısından gereklidir (Tuğrul 1995).

Eselun *et al.* (1979), mikro çatlak oluşumunun etkilerini, kompozit reçinelerinin boyutsal stablitesinde araştırmışlardır. Bu çalışmada, termal çevrim olayının, yorulma ömrünü, çekme dayanımını ve tabakalar arası kayma dayanımını etkileleri göz önüne alınmıştır.

Cohen (1984), termal çevrim olayından dolayı, kompozit boruların reçine malzemesinde oluşan çatlakları ve sertliğinde ortaya çıkan değişiklikleri incelemiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, çatlakların belirli bir çevrim sayısı sonunda bir araya toplanması ve çevrim sayısı sınırı aşılmadan ilerlemenin olmadığını göstermektedir.

Herakovich and Hyer (1986), termal çevrime maruz kompozitlerin hasarını etkileyen faktörleri ve özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, termal çevrim sonucu ortaya çıkan çatlak yoğunluğu, kompozit tabakalarının kalınlığı ve tabakaların sayısından etkilendiği görülmüştür. Ayrıca, çalışmada çatlak oluşumu, delaminasyon gibi, termal çevrimden ortaya çıkan hasar türleri belirlenmiştir.

Adams *et al.* (1986), grafit/epoksi tabakalı kompozitlerde, termal yüklerden ortaya çıkan çapraz çatlaklar konusunu araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonuçları, uzay ortamının tabakalı kompozitlere etkilerini göstermektedir. Ayrıca, reçine açısından zengin olan bölgeler, çatlak ilerlemesinde bir baraj gibi davranarak çatlakın ilerlemesini engellemiştir.

Kellogg *et al.* (2003), nemli ve düşük sıcaklıklarda, termal çevrimin etkilerini, pulturizasyon yöntemi ile üretilmiş cam elyaf takviyeli kompozitlerin izod çentik sertlik deneyi ile araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, termal çevrime maruz kompozitin elastik özellikleri, bu olaydan çok az etkilenmiş olup, çapraz çekme dayanımı ve ILSS, termal çevrimden dolayı çok büyük miktarda düşüş göstermiştir.

Tang *et al.* (2005), termal yorulma olayı etkisi ile, kompozitin epoksi reçinesinde çatlak ilerlemesinden dolayı kırılan numuneleri incelemişler ve çatlak ilerlemesini karakterize edilmişlerdir.

Gurumurthy *et al.* (2001), polimer arayüzeyinde hidro-termal yorulma olayını araştırmış ve ortaya çıkan ve ilerleyen çatlak ölçümünde kullanılan deneysel bir yöntem önermişlerdir.

Nakamura *et al.* (2007), termal çevrim etkisinde, elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerde meydana gelen çatlakların oluşumunu ve ilerlemesini deneysel ve sayısal olarak tetkik etmişlerdir. Numunenin kırılma yüzeylerinin incelenmesi sonucunda, çatlakların çok karmaşık olarak ilerlediği gerçeğini ortaya çıkarmıştır.

Paillous and Pailler (1994), çok-tabakalı grafit-epoksi kompozitler uzay ortamına maruz kaldığında, yapılarında oluşan hasarları incelemiştir. Bu çalışmada, kompozit numuneler termal çevrime maruz bırakılmış ve yapılarında meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, uzay araçlarında vuku bulan termal çevrim sebebiyle, aracın yapısında kullanılan kompozitin reçinesinde zincir kesilmesi, çapraz ve mikro çatlak hasarlarının oluşumu, dolayısıyla kompozitin mekanik ve termal özelliklerinin azaldığı görülmüştür.

Lafarie-Frenot *et al.* (2006), karbon-epoksi kompozitlerde izotermal yaşlanmadan ve termal çevrimden dolayı ortaya çıkan hasarları incelemişler ve kıyaslamışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, oksidasyon olayından dolayı matriste meydana gelen büzülme, numune yüzeylerinde görülmüştür. Nötr bir ortamda test edilmiş numunelerde görünmeyen büzülme olayı, fiber-matris ayrışması ve matris çatlak başlangıcı için önemli bir neden olarak tanımlanmıştır. Bu durumda, oksidasyonun ve sıcaklığın sürekli değişimi neticesinde termo-mekanik gerilmelerin ortaya çıkması, malzemede oluşan hasar oranını daha da hızlandırmıştır.

Termal yorulma olayında, numune iki farklı sıcaklığa çevrimli olarak maruz bırakılır. Her çevrimde numune üzerinde termal denge oluncaya kadar devam ettirilir. Burada, ısıtma ve soğutma hızı, termal şok durumunu önlemek için yeterince düşük olmalıdır. Bundan dolayı, termal gardiyan numune üzerinde belirli bir seviyeden fazla artış göstermektedir. Kompozit malzemelerin heterojen olması ve termal genleşme

katsayısının bileşen malzemelerde çok farklı olması dolayısıyla termal yorulma olayı oldukça karmaşık bir problemdir (Hancox 1998).

Shindo ve arkadaşları, cam elyaf takviyeli polimer dokuma tabakaların çekme ve hasar davranışlarını deneysel ve analitik olarak azalan sıcaklıkta incelemişlerdir. Çekme testleri aşamalı olarak oda sıcaklığında, 77, 20 ve 4°K sıcaklıklarında numunelere uygulanmıştır. Hasar gelişimini belirlemek için çekme testi sırasında akustik-emisyon monitörü kullanılmıştır. İlerleyen hasarı analiz etmek için iki boyutlu sonlu eleman modeli kullanılmıştır. G-11 dokuma-kumaş cam/epoksi tabakaların çekme ve hasar davranışları oda sıcaklığı, 77, 20 ve 4°K sıcaklıklarında araştırılmıştır. Numunenin boy uzunluğu ile çekme özellikleri çok fazla etkilendiği görülmüştür. Numune yüzeyinin hasar davranışı da deneylerde gözlemlenmiştir. (Shindo *et al.* 2006). Uçaklarda polimer kompozitten üretilen kısımlar, uçuş esnasında çevre koşullarından etkilenmekte aynı zamanda bu malzemeler sürekli olarak neme ve termal yorulma olayına maruz kalmaktadırlar.

Termal yorulmanın, yüksek sıcaklı polimer kompozitlerde mikro çatlaklar oluşumuna ve bozulma direncine etkisi, Shimokawa *et al.* (2002) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada, kompozit malzemesini oluşturan bileşenlerin termal genleşme katsayısının farkından dolayı termal yorulmaya maruz kalan kompozit malzemedeki termal gerilmeler sürekli değişmektedir. Tekrarlı gerilmelerden dolayı matris malzemesinde mikro çatlaklar meydana gelmekte ve zamanla bu durum matrisle elyafın ayrışmasına neden olmaktadır.

Termal yorulma olayında, elyafla matris arasındaki etkileşim çok karışık, ama çok önemlidir. Bu etkileşim, çoğu zaman interfaz oluşumuna neden olabilir. Bu interfazın bileşenleri, mikro yapısı ve özellikleri muhtemelen matristen farklıdır. Amorf malzemelerde yapıştırıcı dayanımı, atomlar içi bağıntı bileşkesi ile kontrol edileceği kadar reaksiyon gerilmesi ile de kontrol edilebilir. Ara yüzey bağıntı dayanımı sınırlandırılmış kimyasal reaksiyonundan dolayı artmış olabilir. Elyaf ile matrisin ara yüzey temasının davranışı, termal yorulma olayından şiddetle etkilenmektedir. Epoksi

matrisli kompozitlerin termal yaşlanma davranışı bu malzemenin ilginç bir özelliği olduğundan dolayı, araba ve uçak gibi yapısal işlemlerde bu malzemenin çok geniş kullanımına neden olmuştur. Bu özellikten dolayı epoksi reçinesi yüksek sıcaklıklarda bile aynı normal şartlardaymış gibi davranış gösterebilmektedir. Bilindiği gibi, matris malzemenin tam tersi, fiberlerin termal genleşme katsayısı çok düşüktür. Elyaf malzemesi ile matris reçinesinin termal genleşme katsayılarının farklı olması, kompozitin ara yüzey bölgesinde termal artık gerilme oluşumuna neden olmaktadır. Bu gerilmeler termal şok etkilerinin meydana gelmesinin ilk etkisi olarak tanımlanabilmektedir. Polimer malzemelerde termal genleşme katsayısının çok yüksek olduğundan dolayı, aşırı sıcaklıklarda ara yüzeyde ayrışma olayı meydana gelmektedir. Ayrıca termal şoktan dolayı kompozitte çok yüksek termal gardiyanın meydana gelmesi ve sıcaklığın şiddetle yüksek değerlerden düşük değerlere kadar düşmesinden dolayı genellikle malzeme yüzeyinde çekme gerilmesi ve iç kısmında basma gerilmesi ortaya çıkmaktadır. Delaminasyon olayına alınganlık, tabakalı kompozit malzemelerin doğal zaafı sayılır. Ayrıca bu malzemeler çatlağın tabakalar arasında ve ara yüzeyden başlamasına ve farklı modlarda ilerlemesine çok hassastırlar. Elyafı matris ara yüzeyi, kompozit malzemesinin en önemli ve kritik bölgesi olarak tanımlanmaktadır ve bu bölgede söylenildiği gibi termal genleşme katsayısının farkından dolayı gerilme yığılması meydana gelebilmektedir. Ayrıca, ara yüzey, kimyasal reaksiyonların odağı sayılmaktadır. Kompozitteki matris malzemesi, polimer olduğundan dolayı, ısıtıldığında genişler ve bu genişleme elyaf malzemesinde bası ve matris malzemesini çeki durumunun ortaya çıkmasına neden olur. 3 boyutlu gerilme analizine göre, kompozit malzemesinde birleşenlerin termal genleşme katsayılarının farklı olması, malzemede meydana gelen artık gerilmelerin şiddetlenmesine neden olmaktadır. Artık gerilmeler cam-epoksi kompozit malzemelerin taşıyabileceği maksimum yükün miktarını şiddetle düşürür (Ray 2006).

Tang *et al.* (2005) Sonlu Elemanlar Metodunu ile çevresi epoksi ve ortası nikelli çelik olan halka şeklindeki yeni bir kırılma numunesi tasarlamışlar ve bu numune ile termal yorulma olayının hızlandırılması amaçlanmıştır. Deneyler için, numunenin epoksi kısmında radial bir çatlak oluşturulmuştur. Bu çatlağın ilerlemesi, enerji serbestlik oranı

(G)'na bağlıdır. G değerinin çatlağın boyuna, numune geometrisine ve elastisite modülüne bağlı olduğu Tang ve arkadaşları tarafından ispat edilmiştir. Bu çalışmanın sonunda, termal yorulmanın, çatlağın ilerlemesinde ve polimer malzemesinin kırılma mekanizmasında çok önemli bir rolü olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada esas olarak, termal yorulma deneyinin daha hızlı yapılabilmesi için yeni bir yöntem bulunması ve zaman kaybının azaltılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada kritik termal yük değerinin bulunması için termal burkulma analizi de kullanılmıştır.

Coban *et al.* (2010) termal yorulmanın etkilerini, tekyönlü takviye edilmiş polimer matrisli kompozitlerin üzerinde incelemişlerdir. Bu çalışmada, malzemenin viskoelastik özelliklerini termal yorulma etkisi altında ve elyafın farklı açılarda kullanılmasıyla değişimi, Dinamik Mekanik Termal Analiz ile incelenmiştir. Çalışmada, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) (*glass transition temperature*), depolama modülü (*storage module E'*) ve kayıp modülü (*loss module E''*) ve kayıp faktörü (*loss Factor $\tan\delta$*) termal yorulmanın etkenleri olarak farklı fiber açıları için kullanılmıştır. Farklı açılarla takviye edilen malzemelerin viskoelastik özelliklerinin termal yorulmayla yüksek oranda değiştiği bu çalışmanın en önemli sonuçlarından biridir.

Tartrattanakul and Jaroendee (2006) yaptıkları araştırmada, termal yöntemlerini kullanarak cam elyafı ve epoksi reçineli kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Çalışmada ilk olarak geleneksel termal yöntemler kullanılmıştır. Kullanılan yöntemde, numuneyi termal yüke maruz bırakmak için normal fırın ve ikinci deneyde numuneyi ısıtmak için mikrodalga fırın kullanılmıştır. Bu çalışmada, deney numunesinin mikrodalga fırınla ısıtmanın malzemenin mekanik özelliklerine ne kadar etkileyeceği araştırılmıştır. Bu iki yöntemden elde edilen sonuçlara göre, mikrodalga ısıtmanın, malzemenin mekanik özelliklerine daha fazla etkilediği vurgulanmıştır. Bu çalışmada, malzemenin deneylerden önce ve sonra özelliklerini belirlemek için 3-nokta eğilme test yöntemi kullanılmıştır.

Kontou and Kallimanis (2006) elyafı takviye edilmiş polimer matrisli kompozit malzemelerin termal-visko-plastik davranışlarını araştırmışlardır. Bu çalışmada,

sıcaklığın ve gerinme değerin, tek yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin çekme davranışlarını nasıl etkilediği incelenmiştir. Çalışmada, polimer kompozitlerin visko-pelstik davranışlarının teorik ve deneysel olarak incelenmiş ve Dinamik Mekanik Analizi ile, sabit frekans ve büyük bir sıcaklık değişimi esnasında camsı geçiş sıcaklık noktası (T_g) bulunmuştur.

Polimer kompozitlerin mekanik özellikleri yüksek sıcaklıklar ve büyük gerilmelere maruz kaldığından dolayı aşırı derecede etkilenmekte bu da malzemenin elastik olmayan davranışına sebep olmaktadır. Bu tür bir davranışın nedeni, mikro hasarların tabakalarda bir araya gelmesi ve matris malzemesinin elastik olmayan gerilme-gerinme davranışından kaynaklanmaktadır (Al-Haik *et al.* 2004).

Meric and Ruyter (2007) yaptıkları çalışmada, termal yorulmanın etkilerini, cam-silikon kompozitte, iki farklı boyutlu elyaf kullanılarak incelemişlerdir. Bu çalışmanın amacı, termal yorulmanın malzemenin mekanik özelliklerindeki etkilerinin incelemesidir. Çalışmada, malzemenin termal yorulmadan önce ve sonra mekanik özelliklerini belirlemek için 3-nokta eğilme test yöntemi kullanılmıştır. Her iki tür numunenin test sonrası kırılma alanı SEM ile incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, termal yorulma deneyinden önce ve sonra numunenin eğilme dayanımı arasında yüksek oranda fark ortaya çıktığı görülmüştür.

Polimerler soğutulduğunda, amorf bölgelerde hareketlilik azalır ve ilgili bölgelerde belli bir sıcaklığa kadar sertlik artar. Bu sıcaklık ikinci geçiş sıcaklığı veya camsı geçiş sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır. Bu sıcaklık, polimer malzemelerin önemli özelliklerinden biri sayılmaktadır. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda, yapıları amorf olan polimerler yumuşarlar ve esnekleşirler. T_g 'den daha düşük sıcaklıklarda ise, polimer daha rijit durumda bulunur. Tam geçiş sıcaklığındayken malzemenin fiziksel özellikleri hızlı olarak değişmektedir (Ravve 2000).

Lafarie-Frenot (2006), termal yorulmaya maruz karbon elyafı ile takviye edilmiş epoksi kompozitlerde oluşan hasarların belirlenmesi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada,

termal yorulma olayı, çeşitli (hava ve ya nitrojen gazı gibi oksidasyonun az olduğu) atmosferlerde ve oksijen gazlı, oksidasyon olayının çok olduğu atmosferlerde yapılmış ve atmosfer etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, termal yorulmada iki bozulma prosesinin arasında bir bağlantı belirlenmiştir. Bu bağlantı nedeniyle, oluşan hasarın çok hızlı bir şekilde yayıldığı gözlemlenmiştir.

Sürekli elyaf takviyeli kompozitler sıcaklık değişimine maruz kaldıklarında, elyafla matris arasında ısıl genleşme katsayısının farkından dolayı uyumsuzluk meydana gelmektedir. Bundan dolayı gerilmeler ortaya çıkmakta ve malzeme yapısında hasarlar meydana gelmektedir. Bu durumda, mekanik yorulmada olduğu gibi, malzeme içerisinde, enine çatlak, elyaf-matris ayrışması ve delaminasyon gibi çeşitli hasarlar ortaya çıkmaktadır. Eğer sıcaklığın değiştiği bölge oksidatif bir ortam ise, matris malzemesinin oksitleşmesi gibi durumlar da meydana gelebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ve oksidatif ortamlarda, epoksi polimerlerin izotermal yaşlanma deneyleri Madhukar *et al.* (1997) tarafından yapılmıştır.

Papanicolaou *et al.* (2009), termal yorulmanın selüloz esaslı polimer kompozitlerin üzerindeki etkilerini incelemişler. Bu çalışmada, numunelerin mekanik özellikleri, deney öncesi ve sonrası 3-nokta eğilme test yöntemi gibi statik test yöntemler kullanılmıştır.

Termal yorulma deneyi esnasında, numunede ortaya çıkan etkilere göre, 3 tür hasarın olduğu görülmektedir; büzülmeden dolayı matris üzerindeki kalıcı deformasyon, matris ile elyaf ayrışması ve matriste meydana gelen çatlaklar. Deney süresi artırıldığında, numunenin matris kısmında çok küçük mikro çatlakların olduğu görülmekte olup, bu mikro çatlaklar birleşerek tabaka kalınlığı boyunca büyük çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Termal yorulma çevrimlerin artmasıyla birlikte, bu çatlaklar numunenin iç ve dış tabakaları boyunca yayılmaktadır. Kompozit malzeme oksitleyici ortamda, termal yorulma veya izotermal yaşlanma olayına maruz kaldığında, sıcaklığın artmasıyla birlikte matris malzemesinde oksitleşme olayı meydana gelmektedir ki bu olaya Termo-oksidasyon denilmektedir. Bu olay, ilk önce

numunenin dış bölgelerini etkilemekte ve numunenin ağırlığının düşmesine neden olmaktadır. Zamanla kütle değerinin azalmasında artış olmakta ve bu artış malzemenin hasar oranının değerlendirilmesinde bir gösterge olmaktadır.

Hancox (1998) yaptığı araştırmada, termal yorulmanın kompozitler üzerindeki etkilerini aşağıdaki parametrelere bağlı olduğunu vurgulamıştır:

- 1- Kullanılan elyaf ve matris malzemelerinin özellikleri
- 2- Çevrim sayısı
- 3- İstifleme düzeni
- 4- Maksimum - minimum sıcaklık farkı
- 5- Makro ve mikro seviyedeki gerilme-gerinme ilişkisi
- 6- Matris ve elyaf arasındaki bağların kuvvetleri
- 7- Matris malzemesinin morfolojisi

Zhang *et al.* (2010) termal yorulmaya maruz karbon elyaf kompozitlerde, artık gerilmeleri teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, termal çevrim olayı sürecinde kompozitte bileşen malzemelerin genleşme katsayıları farklı olduğu için artık gerilmeler meydana gelmiştir. Çalışmada, karbon elyafın mukavemetini bulmak için tek bir fiberin mukavemeti ölçülmüş ve daha sonra, elyaf ısıtılarak fiberin uzama miktarı ölçülerek termal genleşme katsayısı belirlenmiştir. Bu uzama miktarına bağlı olarak da gerinme ve gerilme değerleri bulunmuştur. Çalışma sonunda teorik sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların arasındaki farkın çok az olduğu görülmüştür.

Papanicolaou *et al.* (2012) başka bir çalışmalarında termal çevrimin etkisini, zeytin çekirdeği tozu ile takviye edilmiş epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, farklı takviye fazı oranlarında çok sayıda deney numunesi üretilmiş ve numuneler termal yorulmaya maruz bırakıldıktan sonra mekanik davranışları gözlemlenmiştir. Deneylerden sonra numunelerdeki artık gerilmeler için RPM modeli ve MPM modeli kullanılmıştır. Tahmini değerlerle deney sonuçları

karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar arasında çok iyi bir uyumluluk olduğu görülmüştür.

E-LiAlSiO₄ ile takviye edilmiş bakır metal matrisli kompozitin termal yorulması Xue *et al.* (2011) tarafından yapılan çalışmada incelenmiştir. Metal matrisli kompozit, *hot press* yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bakırın yüksek termal genleşme katsayısının etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, termal çevrim sonunda, malzeme bileşenlerinin termal genleşme katsayılarının, iki çevrimden sonra kararlı hale geldiği görülmüştür.

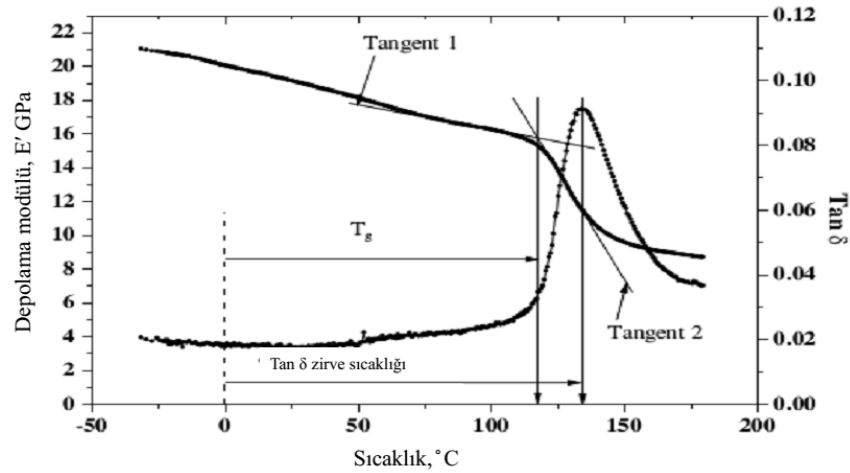
Vakum termal yorulmanın, tek yönlü yüksek performanslı karbon-bismalid kompozitlerin üzerindeki mekanik ve fiziksel etkileri Yu *et al.* (2011) tarafından incelenmiştir. Vakum termal yorulmaya maruz kalmış kompozitin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler dinamik-mekanik yöntemi kullanılarak karakterize edilmiştir. Bu çalışmada, çeşitli termal çevrimlere maruz kompozitin, kararlılığı Termogravimetrik Analiz (TGA) yöntemi ile analiz edilmiş ve doğrusal termal genleşme katsayısı, (CTE) elyaf yönüne paralel ve dik olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kompozitin *outgassing* davranışı ve kompozitin yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü de atomik mikroskop(AFM) kullanılarak gözlemlenmiştir.

Shin *et al.* (2000) yaptıkları araştırmada, termal yorulmanın, grafit-epoksi kompozit malzemesi üzerindeki etkileri araştırmaya çalışmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, termal yorulmadan dolayı, matris malzemesinin dominant olduğu enine eğilme mukavemeti ve enine çekme mukavemeti gibi malzemenin mekanik özelliklerinde yüksek oranda düşüş görülmüştür.

Rouquie *et al.* (2005) karbon-epoksi kompozit malzemelerin termal yorulma davranışlarını, oksidatif ve antioksidatif ortamlarda araştırmışlardır.

Bu çalışmaya göre, termal yorulma sebebiyle oluşan gerilmelerden dolayı, matris malzemesinde meydana gelen çatlakların hızında artış görülmüştür.

Towo and Ansell (2008), sisal elyaf takviyeli termoset kompozitlerin yorulma ve dinamik mekanik termal analizlerini yapmışlardır. Çalışmada, minimum sıcaklık, matris malzemesinin camsı geçiş sıcaklığının (T_g) oldukça altında, maksimum sıcaklık ise sisal elyafının bozulma sıcaklığına eşit seçilmiştir. Şekil 2.33'ten, teğet konstrüksiyon metodu kullanılarak, camsı geçiş sıcaklığı, depolama modülü (*storage modulus*)'nün sıcaklığa göre değişimini gösteren diyagramdan elde edilebileceğini göstermişlerdir. Bu diyagrama göre, kayıp modülünün ($\tan \delta$) zirve noktasına denk gelen sıcaklık camsı geçiş sıcaklığı olarak tanımlanmıştır. Epoksi matrisli kompozitlerin, polyester matrisli kompozitlere göre, daha uzun yorulma ömürlerinin olduğu görülmüştür. Kimyevi işlemler, epoksi esaslı kompozitlere, polyester matrisli kompozitlerin ömürlerine daha çok etkilemektedir.



Şekil 2.33. Depolama modülünün sıcaklığa göre değişimi (Towo 2008)

Meric and Ruyter (2008), termal yorulmanın, tek yönlü silika elyafla takviye edilmiş kompozit malzemesinin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, ıslak ve kuru numunelerin mekanik özellikleri, termal yorulma öncesi ve sonrası 3-noktalı eğilme testi ile bulunmuştur. Lineer termal genleşme katsayısı (LCTE), çeşitli yönlerde takviye edilmiş kompozit numuneler için termomekanik analizi kullanılarak elde edilmiştir.

Elyaf takviye açıları, hem malzemenin elastisite modülü ve mukavemeti gibi mekanik özelliklerini hem de termal genleşme katsayısı gibi fiziksel özellikleri etkilemektedir. Deneylerden önce ve sonra numunelerin lineer termal genleşme katsayılarını bulmak için termomekanik analiz metodu ve eğilme özelliklerini elde etmek için 3-nokta eğilme metodu kullanılmıştır. Bu çalışmada, eğilme mukavemet değerini elde etmek için 2.4 nolu denklem kullanılmıştır.

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (2.4)$$

Bu denklemde F uygulanan kuvvet (N), l numune uzunluğu (m), b numune genişliği(m), h numunenin kalınlığıdır,

E , elastisite modülü 2.5 denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$E = \frac{ml^3}{4bh^3} \quad (2.5)$$

bu denklemde m sehimdir.

Ramanujam *et al.* (2008), elyaf takviyeli, 24 tabakalı [0/90] kompozitlerde termal yorulmadan dolayı çatlak ilerleme hızını teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca, çalışmada çatlak ilerleme davranışı, değişik sıcaklık aralıklarında incelenmiştir. Delaminasyon başlangıç hızını artırmak amacıyla, numunelerin üretimi esnasında, ön çatlak oluşturulmuştur.

Kompozit malzemelerde tabakaların dizilişi çapraz tabakalı olduğundan dolayı, sıcaklığın değişimi çok büyük iç gerilmelere neden olabilmektedir. Ayrıca, nem gibi başka çevre koşulları, uyumsuz genleşmelere neden olabilir. Bundan dolayı, kompozitte

fazladan gerilmeler meydana gelebilir. Mikro görüntüler incelendiğinde, higrotermal gerilmelerin elyaf-matris malzemelerinin mekanik özelliklerinin uyumsuzluğundan da meydana geldiği anlaşılr. Çatlağın oluşumu, kompozitin termal yorulmaya maruz kaldığında delaminasyona sebep olabilir.

Kmita *et al.* (2012) yüksek termal gardiyana maruz, silika tanecik takviyeli epoksi kompozit malzemelerde meydana gelen hasarları araştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, epoksinin genleşme katsayısının metallere göre çok büyük olmasından dolayı, kompozit sıcaklığının artışı ve düşüşüyle birlikte, şekil değişimi uyumsuzluğundan dolayı, epoksi ile metalin ara yüzeyinde, gerilmelerin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Çalışmada FEM ve viskoelastik modelleme gibi metotlar kullanılmıştır. Çalışmadaki sıcaklık, katılama sıcaklığının altında tutulmaktadır. Bu da epoksi ile metalin genleşme katsayılarının farklı olmasından dolayı kompozitin dış yüzeyinde termal gerinme meydana gelmesine neden olmaktadır. Metalle reçinenin doğrudan temasta oldukları için ve serbestçe şekil değiştirme imkânı olmadığı için, termal gerinme potansiyel enerji oluşturmakta olup, bu enerji malzeme içerisinde depolanmaktadır. Malzemede depolanan bu enerji iki şekilde itlaf olmaktadır:

- 1- Çatlak oluşmasıyla veya sınır şartlarının müsait olması durumunda cismin serbest hareket etmesiyle,
- 2- Homojen olarak malzeme içerisinde dağılmasıyla.

SiC cinsinden olan ve *paksementasyon* yöntemini kullanarak bir tabakayla kaplanan karbon/karbon kompozitler ve onların termal yorulmaya maruz kaldıklarında gösteren davranışları, Fu *et al.* (2006) incelemişlerdir. Bu çalışmada, termal şok deneyleri kapsamında, kaplama tabakasının termal gerilme mukavemetini incelemek için, ilk aşamada numuneler 3 dakikalığına 1873K sıcaklığında olan fırına koyulmuştur. Bir sonraki aşamada, numuneler 373K sıcaklığındaki kaynar su kabına hızlı bir şekilde daldırılmıştır. 3 dakika sonra numuneler kaynar sudan çıkarılıp, 373 K sıcaklığında 30 dakikada kurutulmuştur. Sonra numuneler termal yorulmanın ikinci aşamasını uygulamak amacıyla, yeniden fırına koyulmuştur. Termal şok esnasında, numunelerin

ağırlığı oda sıcaklığında elektronik terazile (duyarlılığı $\pm 0,1$ mg) ölçülmüştür. Numunelerin deneyden önce ve sonra mekanik özelliklerini ölçmek için 3-nokta eğilme testi kullanılmıştır.

Figiel and Kaminski (2003) eğri tabakalı kompozelerde termal yorulma olayından dolayı ortaya çıkan delaminasyon konusunda araştırma yapmışlardır. Bu çalışma iki tabakalı kompozitte termal yorulma etkisiyle meydana gelen delaminasyondan dolayı, çatlağın ilerlemesindeki davranışı tahminin etmeye çalışmıştır. Yapılan analizlerde, modifiye edilmiş Paris-Erdoğan teorisi kullanılmıştır. Çalışma sonunda, boron/ epoksi–alüminyum kompozit malzemesi kullanılarak termal-çevrim sayısının grafiği, bileşenler arasındaki çeşitli sürtünme katsayısına göre çizilmiştir. Bu çalışmada, nümerik metot aşağıdaki aşamalarda kullanmıştır:

- 1- Çatlağın çevresindeki termal gerilmeler bulunarak
- 2- Enerji serbestlik oranı, ara yüzey çatlağın uzunluğunun fonksiyonu durumunda değerlendirerek
- 3- Yorulma çevrimlerinin malzeme kırılana kadar sayısını hesaplayarak
- 4- Termal alanının özellikleri ile termal çevrimlerin arasında bir iletişim tahmin edilerek.

Bu çalışmada nümerik analiz için, ANSYS yazılımı 8-noktalı termal *Solid PLANE 77*ni 9 entegrasyon noktasıyla ve 2-boyutlu kısıtlı temas (*CONTA171*) ve hedef (*TARGE169*) elemanları bölüm-bölüm temaslı alanlarda ve çatlağın alanlarını ayırmak için kullanmıştır.

Çalışma sonuçlarına göre, kompozit malzemesinin yüksek sıcaklıklardaki(+71°C) deformasyonu, delaminasyona neden olduğu çatlak yüzeyinin yeniden temas etmesine ve kapanmasına ve düşük sıcaklıklardaki(-54°C) deformasyonun, çatlak boyunda, çatlak yüzeylerinin açılmasına neden olmuştur.

Yorulma olayı çok karışık süreçlerden oluşmaktadır. Bu süreçlerin teorik analizi çok zordur, üstelik malzeme kompozit cinsinden olduğu zaman, (kaç değişik malzemeden oluştuğu için) bu iş daha zorlanır. Bu analizlerin zor olmasının nedeni, malzemelerin hâlâ gelişmekte olması ve elde edilen denklemlerin çoğunun deneysel sonuçlardan istihraç edildiğindendir. Yorulmadan dolayı delaminasyon ilerlemesi, lineer elastik kırılma mekaniğinin (LEFM) sonuçlarını kullanarak tahmin edilmiştir.

Ray (2006) termal şartlar altında, cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin davranışlarını araştırmıştır. Çalışmada, tabakalı kompozit malzemede tabakalar arası bağıntı direncini incelemek amacıyla kısa kiriş kayma (SBS) testi için kullanılmıştır. Malzeme oda sıcaklığından suyun donma sıcaklığına kadar soğutulduğunda, tabakalar arası kayma mukavemetinde önemli ölçüde düşüş meydana geldiği görülmüştür.

Elyaf ile matris malzemelerinin termal genişleme katsayılarının farklı olması, kompozit malzemede elyaf ile matris ara yüzeyinde artık termal gerilmelerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu gerilmeler, termal şokun meydana gelmesinin en önemli sebebi olabilir. Polimer malzemelerde termal genişleme katsayısı çok yüksek olduğundan dolayı, aşırı sıcaklıklarda ara yüzeyde ayrışma olayı ve ayrıca termal şoktan dolayı da kompozitte çok yüksek termal gardiyan meydana gelebilmektedir. Yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa indirildiğinden dolayı, genellikle malzeme yüzeyinde çekme gerilmesi ve iç kısmında basma gerilmesi olabilmektedir. Tabakalı kompozit malzemelerin delaminasyona karşı zaafı tabii bir durumdur. Bu malzemeler, ayrıca çatlağın tabakalar arasında ve ara yüzeyden başlamasına ve farklı modlarda ilerlemesine çok hassastırlar. Kompozit malzemede elyaf ile matris ara yüzeyi çok önemli olup, termal genişleme katsayıları farklı olduğu için, bu ara yüzeylerde gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Ayrıca, bu ara yüzeyler kimyasal reaksiyonların odağı durumundadır. Matris malzemesi soğutulup, sertleştirdikten sonra genişlediği için ortaya çıkan termal artık gerilmeler elyafta bası ve matris malzemesinde çeki gerilmeleri olarak ortaya çıkar. Üç boyutlu gerilme durumunda, kompozit malzeme birleşenlerinin termal genişleme katsayılarının farklı olması, artık gerilmelerin en önemli nedeni

sayılmaktadır. Artık gerilmeler, cam-epoksi kompozit malzemelerin yük taşıma kapasitelerini önemli ölçüde düşürmüştür (Ray 2006).

Termal yorulmada elyaf ile matris arasındaki etkileşim, çok karmaşık fakat oldukça önemlidir. Bu etkileşim, çoğu zaman interfaz oluşumuna neden olabilmektedir. İnterfazın bileşenleri, mikro yapıları ve özellikleri matris malzemesinden farklıdır. Amorf malzemelerdeki ara yüzey mukavemeti, atomlar arası bağlar ve reaksiyon gerilmeleri ile de kontrol edilmektedir. Ara yüzey mukavemeti, sınırlı kimyasal reaksiyonlardan dolayı artabilmektedir. Bununla birlikte, oluşan bir reaksiyon, ürünün ara yüzeyinde gevrekleşmeye sebep olabilir. Elyaf ile matrisin ara yüzey temas davranışı, termal yorulmadan büyük oranda etkilenebilir. Epoksi matrisli kompozitlerin termal yaşlanma davranışı, bu malzemenin ilginç bir özelliğidir ki, otomobil, havacılık gibi sektörlerde geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Epoksi matrisli kompozitler bu özelliklerinden dolayı, yüksek sıcaklıklarda bile normal şartlardaki gibi davranış gösterebilmektedirler. Termal şokun etkilerinden biri ayrışmadır ki bu tabakalar arası kayma direncinin düşmesinden meydana gelmektedir. Malzemenin termal şok koşullarında, kısa süre tutulması, malzemenin sertleşme derecesinin düşmesine neden olabilmektedir. Zamanla tabakalar arası kayma mukavemetinin artması, yüksek mertebeli polimerizasyonun daha da artmasından dolayı meydana gelmektedir, (Ray 2006).

Termal yorulmaya maruz, tekyönlü karbon elyaf takviyeli *polyetherimide* kompozitlerin darbe yorulması, Sinmazcelik *et al.* (2008) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada, termal yorulma esnasında numuneler 100°C sıcaklığındaki kaynar suya daldırıldıktan hemen sonra 0°C sıcaklığındaki suya daldırılmıştır. Bu olay 50, 200 ve 500 kere tekrar edilmiştir. Kaynar su tankının sıcaklığı 100°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) ve buzlu su tankının sıcaklığı 0°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) da sabit tutulmaya çalışılmıştır. Malzemenin viskoelastik özelliklerinde meydana gelen değişimler, dinamik mekanik termal analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, termal yorulmaya maruz kalan numuneler, mütemadiyen farklı enerjili darbe yüklerine maruz bırakılmıştır. Darbe deneyinin sonuçları, yük, enerji, deney esnasındaki deformasyona göre açıklanmışlardır. Bir

sonraki aşamada ise, kırılmış numunelerin kesit alanları, kırılan numunelerin morfolojisini belirlemek için, elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

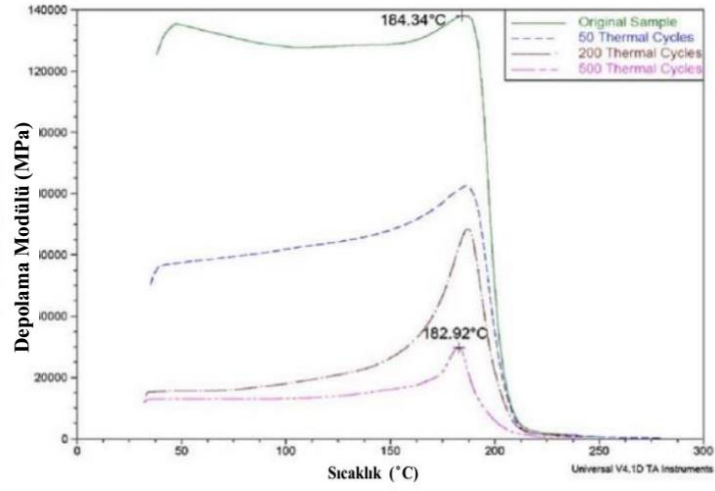
Sinmazcelik *et al.* (2006) tekyönlü karbon elyaf takviyeli polyetherimide matrisli kompozitin termal yorulmasını ve hidrofobik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmaya göre, termal yorulmaya maruz kalan numunelerde, tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) ve darbe dayanımı, termal yorulma çevrim sayısına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Ayrıca termal yorulma, fiber-matris ara yüzeyinin dayanımının düşmesine de neden olmuştur. Bu durum, kırılma morfolojisinde dikkat çekici değişiklikler meydana getirmiştir. Kırılan kesit alanlar incelenmiş ve malzemenin kırılma morfolojisinin sünek durumundan gevrek duruma geçtiği görülmüştür.

Termal yorulmaya maruz kalmış numunelerin viskoelastisitesini incelemek için dinamik mekanik termal analizi (DMTA) kullanılmıştır. DMTA deney sonuçları 3 parametreye göre açıklanmaktadır:

- 1- Depolama modülü (*Storage module*)
- 2- Kayıp modülü (*Loss module*)
- 3- Kayıp oranı ($Tan \delta$)

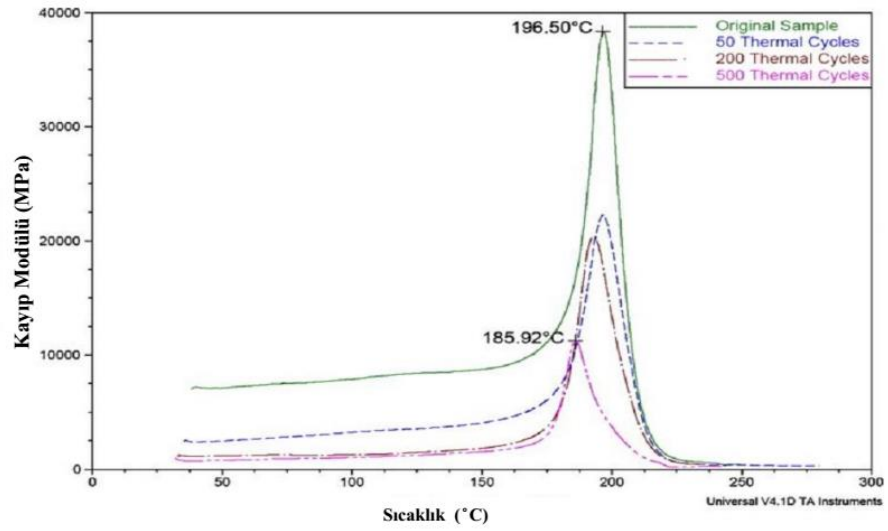
Depolama modülü viskoelastik malzemenin elastiklik modülüne, **kayıp modülü** viskozite modülüne ve **kayıp oranı** ise depolama modülünün kayıp modülüne oranına eşittir.

Kayıp modülünün sıcaklığa göre değişimini gösteren grafikte, zirve noktasındaki sıcaklığın değeri, camı geçiş sıcaklığını göstermektedir, (Şekil 2.35). Bu noktanın özellikle elyaf ile matris ara yüzey ve polimer matris malzemesinin mikro yapısal değişiminde çok büyük önemi vardır. Yüksek çevrim sayılarında, termal yorulma, numunelerde zirve noktasının sıcaklığı daha düşük olmaktadır (Sinmazcelik *et al.* 2006).

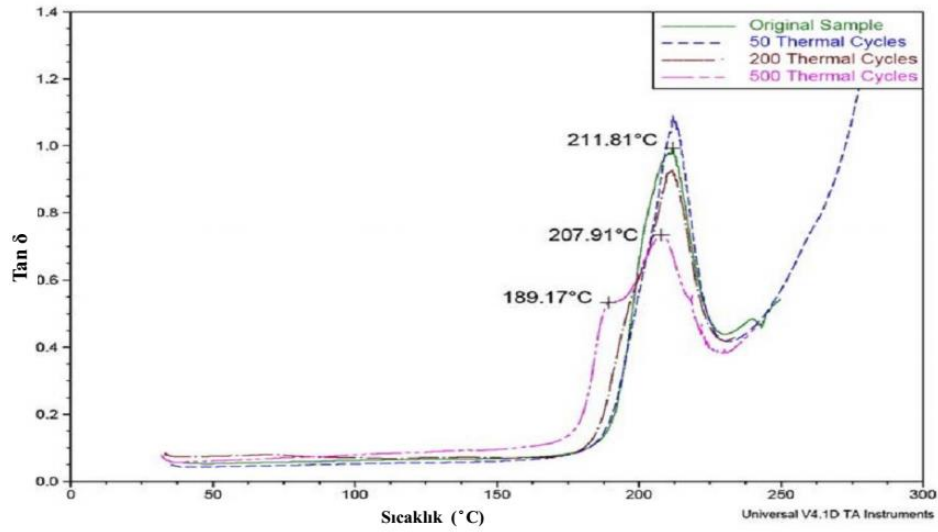


Şekil 2.34. Termal yorulmada kayıp modülünün sıcaklığa göre değişimi (Sinmazcelik *et al.* 2006)

Termal yorulma olayında kayıp modülü ve kayıp faktörünün sıcaklığa göre değişimi sırasıyla Şekil 2.34, 2.35 ve 2.36’da gösterilmiştir.



Şekil 2.35. Termal yorulmada kayıp modülünün sıcaklığa göre değişimi (Sinmazcelik *et al.* 2006)



Şekil 2.36. Termal yorulmada kayıp oranının sıcaklığa göre değişimi (Sinmazcelik *et al.* 2006)

Termal yorulmaya maruz kalmış ve oda sıcaklığında bulunan numunelerin DMTA test sonuçları, malzemenin mekanik özellikleri hakkında çok önemli bilgiler vermektedir. Termal yorulma deneyi esnasında, matris malzemesinde ve elyafıta lineer termal genleşme katsayısına bağlı, sıkışma ve ya genleşme meydana gelebilmektedir. Bileşenlerin, kompozit içerisinde kısıtlı olmasından dolayı sıcaklık değişimi ile ara yüzeyde gerilme yığılması meydana gelmektedir. Bu gerilmeden dolayı, matris malzemesi sünek olduğu için, plastik deformasyon olmakta ve bu deformasyon matrisle elyafın ara yüzeyinde hasara neden olmaktadır. Termal yorulmanın çevrim sayısının artması, matris ve elyaf ara yüzeyinin bozulmasından dolayı, depolama modülünün azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, termal çevrimler, polimer matriste önemli ölçüde mikro yapı değişimine neden olmaktadır. Bu değişimler malzemenin camsı geçiş sıcaklığında büyük düşüşe sebep olmaktadır (Parlevliet *et al.* 2006).

Termal yorulmanın, yüksek modüllü karbon elyaf takviyeli magnezyum alaşımlı matristen oluşan kompozitlerdeki etkisi, Russell-Stevens *et al.* (2005) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmaya göre, matristeki mikro boşluklar ve ara yüzey çatlakları, kompozit malzemesinin mekanik özelliklerinin değişimine ve hasarına neden olmuştur.

Ray (2004), termal şok olayının ara yüzey yapışmasına olan etkilerini, cam elyaf-epoksi matrisli kompozit malzemeler üzerinde araştırmıştır. Çalışmada, *upthermal* şok çevrimlerinde (sıcaklık negatiften pozitive değişmekte olan) ve *downtermal* şok çevrimlerinde (sıcaklık pozitiften negatife değişmekte olan) termal gerilme yığılmalarının meydana geldiği görülmüştür. Artık gerilmelerin, elyaf ve matris malzemelerinin termal genleşme katsayılarının farklı olmasından dolayı meydana geldiği ve bunun sonucunda matris-elyaf ara-yüzeyinde ayrışmalar olduğu belirtilmiştir. Artık gerilmelerin başka bir nedeni, malzemenin termal şoka maruz kaldığında, ani soğutulması ve birleşen malzemelerin termal sıkışma oranlarının farklı olması olarak gösterilmiştir.

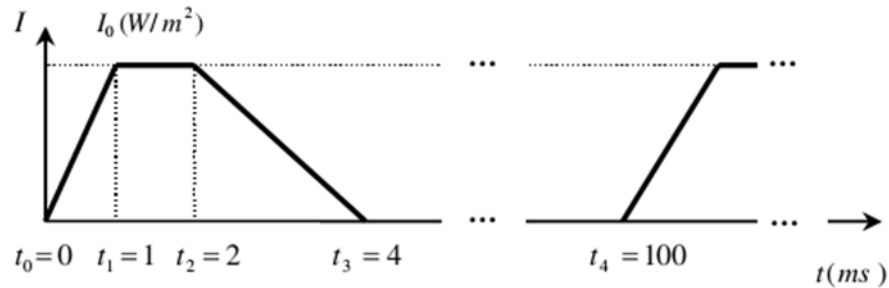
Tabakalı yüksek sıcaklıklı CFRP-AS4/PEEK kompozit malzemesinin termal yorulma etkisi altında mikroskobik hasarı, Kobayashi *et al.* (2001) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilmiş sonuçlara göre, matristeki çatlaklar 0° ve 90° oryantasyonlu tabakalarda başlamıştır ve çatlakların sayısı çevrim sayısının artmasıyla çoğalmıştır. Çalışmada, matristeki çatlak yoğunluk parametresi, çatlağın matris malzemesinin bir birim uzunluğundaki sayısı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca soft X-Ray radyografi cihazı ile mikroskobik hasar ilerlemesi incelemiştir.

Shiino *et al.* (2012) termal yorulmanın, karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, sıcaklığın değişmesinden dolayı tabakalarda ortaya çıkan termal gerilmeler nedeni ile malzemede meydana gelen hasarın *C-scan* yöntemi ile incelenmiştir. Bu çalışma esnasında, karbon elyafla epoksi reçinesinden üretilen örgülü tabakalar istiflenerek üretilmiş kompozit numuneler, 10 dakikalık süreyle -60 ile +80°C sıcaklık aralığında 1000, 2000, 3000 ve 4000 kere termal çevrime maruz bırakılmıştır. 1000 kez çevrimden sonra, malzeme *C-scan* ile taranmış ve elde edilen sonuçlara göre, malzemenin özelliklerinde değişimin çok az olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sıcaklıklar aralığında 3000 çevrime kadar değişen özelliklerin çok düşük olduğu görülmüştür. Buna göre, kompozitte hasarın meydana gelmesi için, bu sıcaklıklarda daha yüksek termal değişim veya çevrimlerin olması

gerektiği görülmüştür. Ortaya çıkan bu sonuçların, teorik analiz sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Sever *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada, jüt elyaf takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kompozitlerde, ısı çevrimin tabakalar arası kayma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, ısı çevrimin, alkali ve siloksan yüzey işlemi uygulanmış jüt elyaf takviyeli YYPE kompozitlerin tabakalar arası kayma dayanımı üzerine etkisini incelemişlerdir.

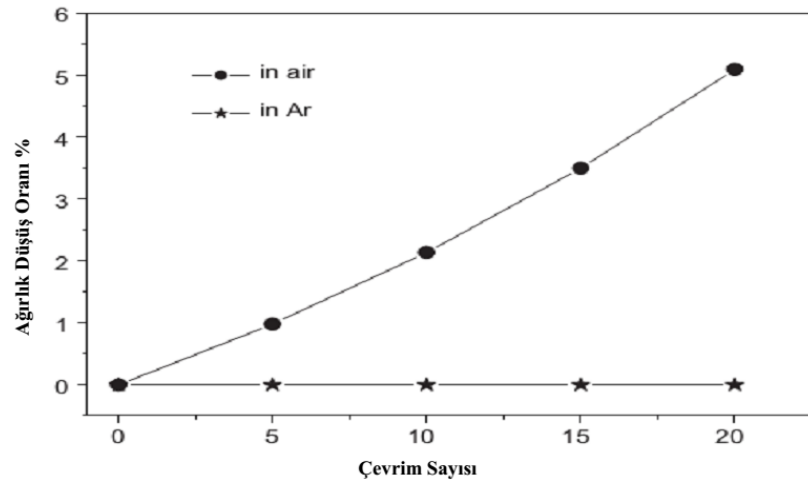
Tanecik takviyeli metal matris kompozit malzemelerin termal yorulması, Long and Zhou (2005) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada, malzemenin sıcaklığa maruz kalması için, lazer palsları kullanılmıştır. Ayrıca, malzeme termal yorulmayla birlikte mekanik yüke de maruz bırakılmıştır. Isıtma prosesinde kullanılan lazer dalgaların artışı Şekil 2.37’de gösterilmiştir.



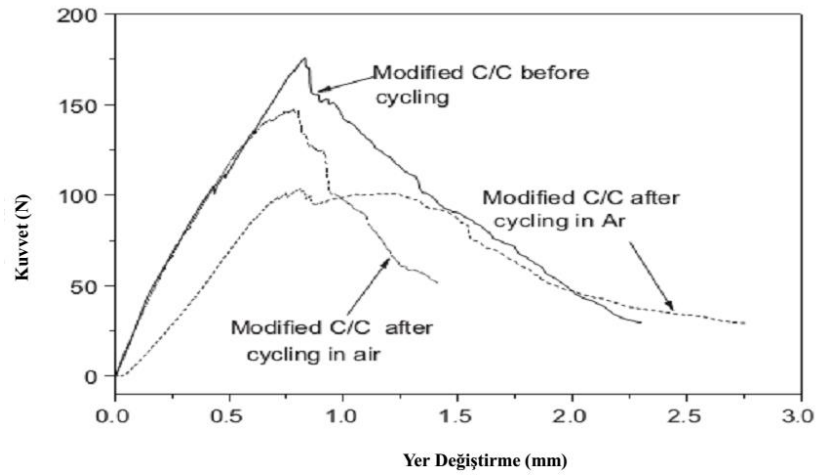
Şekil 2.37. Lazer dalgaları kullanılarak malzeme sıcaklığının artışı (Long and Zhou 2005)

Chu *et al.* (2011) C/C (karbon/karbon) kompozit malzemesinin SiC–MoSi₂–CrSi₂ tabakasıyla kaplanmış numunesini ürettikten sonra oda sıcaklığıyla 1773K aralığındaki farklı ortamda, termal şoka maruz bırakmışlar. Bu ortamlardan birisi, hava ve diğeri etkisiz Ar gazından oluşan alanlardır. Numunelerin ağırlığı, testten önce ve sonra ağırlığın değişimini incelemek amacıyla $\pm 0,1$ mg hassasiyete sahip teraziyle ölçülmüştür. Bu çalışmada, termal şokun meydana gelmesi amacıyla numunede meydana gelen sıcaklık değişimi çok hızlı yapılmıştır. Numunede meydana gelen

oksidiyondan dolayı, ağırlıktaki düşüşü incelemek için termal şok olayı iki periyodda yapılmıştır. Ayrıca, her tür numuneyi daha dikkatli incelemek için, her türden 5 tane numune kullanılmıştır. Şekil 2.38 ve 2.39’da termal çevrimin artmasıyla malzeme ağırlığında meydana gelen düşüşün iki farklı ortamda karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.38. Termal çevrimin artmasıyla malzeme ağırlığında meydana gelen düşüşün iki farklı ortamda karşılaştırılması (Chu *et al.* 2011)



Şekil 2.39. Malzemenin termal şoktan önce ve sonra maruz kaldığı çekme deneyindeki kuvvet-yer değiştirme grafiği (Chu *et al.* 2011)

2.4. Kullanılan Malzemeler

2.4.1. Takviye malzemeleri

Takviye malzemelerinin kompozit malzeme içerisindeki esas görevi, kompozite mukavemet kazandırmaktır. Bu nedenle kullanılan takviyenin türü ve cinsi, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Takviye elemanları tanecik, sürekli ve süreksiz elyaf olmak üzere üç şekilde olabilmektedir. Kompozit malzemelerin üretiminde, genellikle sürekli elyaf türleri kullanılmaktadır. Yaygın olarak tek yönlü, çapraz, örgülü takviyeli gibi şeklinde olmaktadır. Süreksiz takviyeler, genelde kırılmış elyaftan oluşmaktadır. Sürekli ve süreksiz takviye fazları genelde mikro boyutlarda olup, farklı yöntemlerle kompozit reçinesinin takviyesinde kullanılmaktadırlar. Bazı durumlarda kompozit malzemesinde elyafla matris arayüzeyinde daha güçlü bağların ortaya çıkması amacıyla sürekli ve süreksiz elyaf türleri mikro ölekte aynı kompozitte kullanılabilirler.

Elyaf kırıntılarından oluşan süreksiz elyaflar, preslenerek keçeleştirilmiş takviye elyaf yapısı oluşturmaktadır. Bu yapının belli bir standardı yok olup, maliyeti sürekli elyaf içeren kumaşlara göre daha düşüktür ve yüksek dayanım gerektirmeyen, ağırlığın çok önemli olmadığı yerlerde tercih edilmektedirler.

Kompozit malzeme imalatında en yaygın olarak kullanılan takviye elemanı sürekli elyaflardır. Sürekli elyaflar tek başlarına ya da kumaş oluşturacak şekilde dokunarak takviye elemanı olarak kullanılırlar.

Tanecik faz ile takviye edilmiş kompozitler yapısal olarak süreksiz elyaf takviye kompozitlerine benzemektedirler. Ancak, bu tür takviye elemanları genelde mikro ve nano boyutlara kadar çok küçük boyutlara sahip olduklarından, büyük oranda reçine malzemesi ile temas oluşarak iyi bir bağ kurabilmektedirler. Temas alanının artmasıyla birlikte, takviye fazıyla matris malzemesi arasında kurulan bağların sayısı yüksek

oranda artmakta ve böylece elde edilen kompozit üstün mekanik özelliklere sahip olmaktadır.

Bu tez kapsamında tasarlanıp üretilen nanohibrit kompozit malzemeleri, elyaf, matris ve nano takviye fazı olarak üç farklı fazdan oluşmaktadır. Bu malzemelerin yapılarında, karbon ve bazalt elyaf malzemeleri, twill örgü tipinde örülerek malzemenin asıl takviye fazını oluşturmuştur. Ayrıca, malzemenin matris fazını takviye etmek amacıyla karbon nanotüp ve grafen olarak iki farklı nano malzemedan yararlanılmıştır.

(i) Karbon elyafı:

Karbon kelimesi Latince 'de kömür anlamında olan charcoal kelimesinden alınmıştır ve günümüzde kömürden çok daha fazlasını ifade etmektedir. Karbon, yoğunluğu $2,268 \text{ g/cm}^3$ olan kristal yapıda bir elementtir. Gezegendeki yaşam için ana madde sayılan ve bütün organik kimyanın temelini oluşturan karbon atomu periyodik Çizelgedeki en çok ilgi çeken elementlerden biridir. Atom numarası 6 olan karbonun elektron düzenlemesi $1s^2 2s^2 2p^2$ şeklindedir. $1s^2$ orbitalı güçlü bağlanmış iki elektron içerir. Bu elektronlara iç elektronlar denir. $2s^2 2p^2$ orbitallerindeki dört elektron zayıf bağlı elektronlardır ve bunlara “değerlik elektronları” denir.

Karbon atomları kovalent bağ kurarak bağlanırlar ve bu bağlanma doğada bulunan en güçlü kimyasal bağ olarak tanımlanmaktadır. Bu gösterimler aynı zamanda bağlanma geometrisini de temsil eder. sp olarak tanımlanan hibritleşmede, karbon atomları birbiri ile iki bağ kurar ve doğrusal bir geometri oluşturur. sp^2 ile tanımlanan hibritleşmede, karbon atomları birbirleri ile üçgen bir geometri oluşturur ve her atomda üç bağ kurar (grafende olduğu gibi). sp^3 olarak tanımlanan hibritleşmede karbon atomları birbirleri ile piramit bir geometri oluşturur ve her atomda dört bağ ortaya çıkar (elmas kristalinde olduğu gibi). Buradaki her bir farklı geometrik şekil farklı bir malzeme anlamına gelmektedir. Karbon elementi her üç hibritleşme geometrisini gösterebilen tek elementtir (Bayat 2010).

Karbon, çok değişik kristal yapılarında bulunabilmektedir. Karbon fiber 1800’lü yılların sonlarına kadar uzanır. Karbon elyafı, ilk olarak, karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir (Çelik ve Karaşin 2014).

Siyah renkli karbon elyafı, organik olarak karbon bakımından zengin malzemelerin kontrollü yanması ve karbonizasyonu sonucunda elde edilir. Farklı sıcaklıklarda uygulanan ısıl işlemler sonucunda, farklı mekanik özelliklere sahip çeşitli karbon elyafı üretilmektedir. Maliyeti diğer elyafa göre oldukça yüksek olan karbon elyafı, çok yüksek çekme dayanımına ve elastisite modülüne sahiptir. Karbon elyafının çekme dayanımı 2000 MPa ile 5500 MPa arasında, elastisite modülü ise 160 GPa ile 440 GPa arasında değişmektedir. Bu elyaf türü ayrıca korozyon ve yorulma bakımından da diğer elyaflardan üstündür. Fakat karbon elyafın darbe dayanımı cam ve aramid elyaflarına göre daha düşüktür (Ömercikoğlu 2009).

Cam elyafının metale göre sertliğinin çok düşük olmasından dolayı, sertliğinin 3-5 kat artırılması gerekmektedir. Karbon elyafı, çok yüksek ısıl işlem uygulandığında karbonlaşır ve yeni bir elyaf elde edilir. Bu elyaf tipine grafit elyafı denir. Ancak, günümüzde bu fark ortadan kalkmıştır. Artık karbon ve grafit elyafı aynı malzemeyi tanımlamaktadır (Demirel 2007).

Takviye amaçlı kullanılan karbon elyafı, hegzegonal yapıda olan grafit kristalleri halindedir. Karbon ve grafit elyafları aynı malzemeden üretilmektedirler. Uygulamada 6 ile 10 µm arasında değişen çaptaki liflerin 1000-1500 adetlik demetlerinden oluşan fitil ve dokumalar kullanılmaktadır. Üstün özelliklerinin yanı sıra son derece pahalı olan karbon elyafı, özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır (Aran 1990).

Karbon elyafının üretimi için üç tür hammadde kullanılmaktadır. Kullanılan ilk madde rayondur. Bu hammadde etkisiz bir atmosferde 1000-3000°C civarına kadar ısıtılır ve ekstrüze edilir. Bu işlem elyafın mukavemet ve tokluğunun artmasına neden olur. Ancak yüksek maliyet nedeniyle, rayon elyaf iyi bir seçenek değildir. Rayon elyafının yüksek maliyetinden dolayı, rayon yerine poliakrilonitril kullanılmaktadır (Arıkan

2001). PAN bazlı elyaflar 2413 ile 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri daha düşüktür. Bu parametre, bu elyafın çok önemli bir avantajıdır. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyaf ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptir. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyaf kadar iyi değildir. Fakat üretim maliyeti daha düşüktür.

Karbon, gelişmiş polimer matrisli kompozitlerde kullanılan yüksek performanslı bir elyaf malzemesi olup, Çizelge 2.5'te karbon elyafın özellikleri başka elyaf türleri ile karşılaştırılmıştır(Zor 2008).

Çizelge 2.5. Karbon elyafın özelliklerinin başka elyaf türleri ile kıyaslaması (Zor 2008)

Özellik	E-Camı	S-Camı	Bor	Karbon	Kevlar49
Yoğunluk(gr/cm ³)	2.54	2.49	2.68	1.85	1.44
Çekme Muk.(MPa)	2000	4750	3450	2900	3750
Çekme Mod.(GPa)	80	89	414	525	136
Lif çapı (µm)	3-200	3-13	100-1000	5-13	12
Isıl G.K(°C ⁻¹ .10 ⁻⁶)	5	2.9	3	-1	-2
Kopma Uz. (%)	2.75	-	0.7	0.5-1.3	2.5

Karbon elyafının en önemli özelliği düşük yoğunluğunun yanı sıra, yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyafı nemden etkilenmez ve sürünme mukavemeti çok yüksektir. Ayrıca, aşınma ve yorulma mukavemeti oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Karbon elyafı çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinesi ile kullanılır. Ayrıca karbon elyafı alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılmaktadır.

Karbon elyafın avantajları (Zor 2008):

- Yüksek elastisite modülü
- Yüksek mukavemet
- Yüksek tokluk
- Çok Yüksek sertlik

- Düşük yoğunluk (hafiflik)
- Yüksek sıcaklık dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Yüksek yorulma mukavemeti
- Yüksek sürünme mukavemeti
- İyi aşınma dayanımı
- Nemden etkilenmemek (hidrofobluk)
- Bütün reçinelerle kompozit oluşturabilme kabiliyeti
- Yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme modülü ve yüksek mukavemetlerini korurlar
- Oda sıcaklığında nem veya çok çeşitli çözücüler, asitler ve bazlardan etkilenmezler

Dezavantajları:

- Üretimi Pahalıdır
- Matris malzemesi ile iyi bir bağ kurma sağlaması zordur.

Karbon elyafı organik maddelerden üretilmesi nedeni ile organik fiber olarak da tanımlanmaktadır. Ham madde olarak Poliakrilonitril (polyacrylonitrile-PAN), Selüloz (Rayon) ve Zift (Pitch) kullanılır. PAN, tekstil kaynaklı bir polimer elyafıdır. Zift elyafı arıtılmış petrolden veya katran şeklindeki kömür ziftinden eğritilerek elde edilmektedir. Karbon elyaf üretiminde günümüzde daha çok PAN-esaslı malzemelerden yararlanılmaktadır. Zift-esaslı fiberler daha direngen ve gevrek bir karaktere sahiptirler. Ham lifleri karbon elyaf haline getirmek için birkaç basamaklı bir işlem uygulanır. Birinci aşamada, yüksek sıcaklıklarda oksitlenme işlemine tabi tutulmaktadırlar. Daha sonra, karbürleme (carbonization) ve grafitleme (graphitization) prosedurlerine tabi tutulurlar. Karbon elyafı üretim aşamaları ve şeması Şekil 2.40' ile 2.42' şekiller aralığında görülmüştür.

Karbon elyafın üretim aşamaları:

1.aşama:

Bu aşama ısıtıl işlem aşamasıdır. Bu aşamada elyaf gerilmeye maruz bırakılıp, en fazla 400°C'ye kadar ısıtılır. Bu işlem karbon zincirlerinin birbirleriyle kesişmesini sağlayarak daha sonraki ısıtıl işlemlerde ergimemesini sağlar.

2.aşama

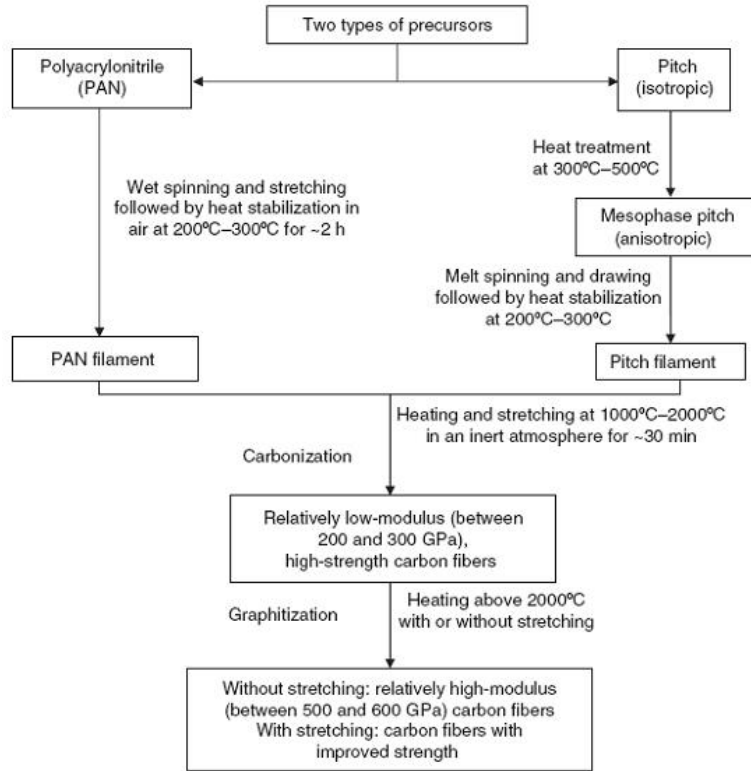
Bu aşama Karbonizasyon aşamasıdır. Bu aşamada elyaf oksijensiz ortamda en fazla 800°C'ye kadar ısıtılır. Bu işlem karbon olmayan safsızlıkları giderir.

3.aşama

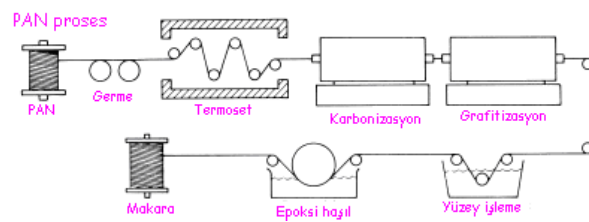
Bu aşama Grafitizasyon aşamasıdır. Bu aşamada elyaf %50 ila %100 uzayacak şekilde çekme gerilmesine maruz bırakılır ve 1100°C ila 3000°C arasında ısıtılır. Gerilme, istenilen kristal yapısını mümkün ederek istenilen elastisite modülü değerinin (300-600 Gpa) elde edilmesini sağlar.

4.aşama

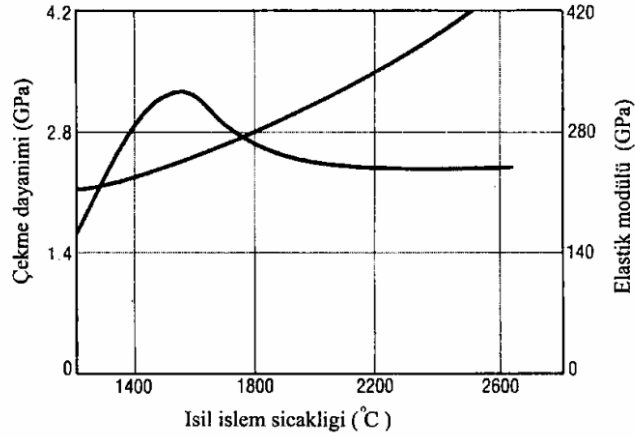
Bu aşama yüzey işlem aşamasıdır. Bu aşamada epoksi boyutlandırması ve yüzey işleme aşamaları, karbon fiber-epoksi arası bağ kuvvetlerini güçlendirmek amacıyla yapılmaktadır. Bu son iki aşama yerine daha değişik yöntemlerde kullanılabilir.



Şekil 2.41. Karbon fiber üretiminin şematik görüntüsü (Akbulut 2011)

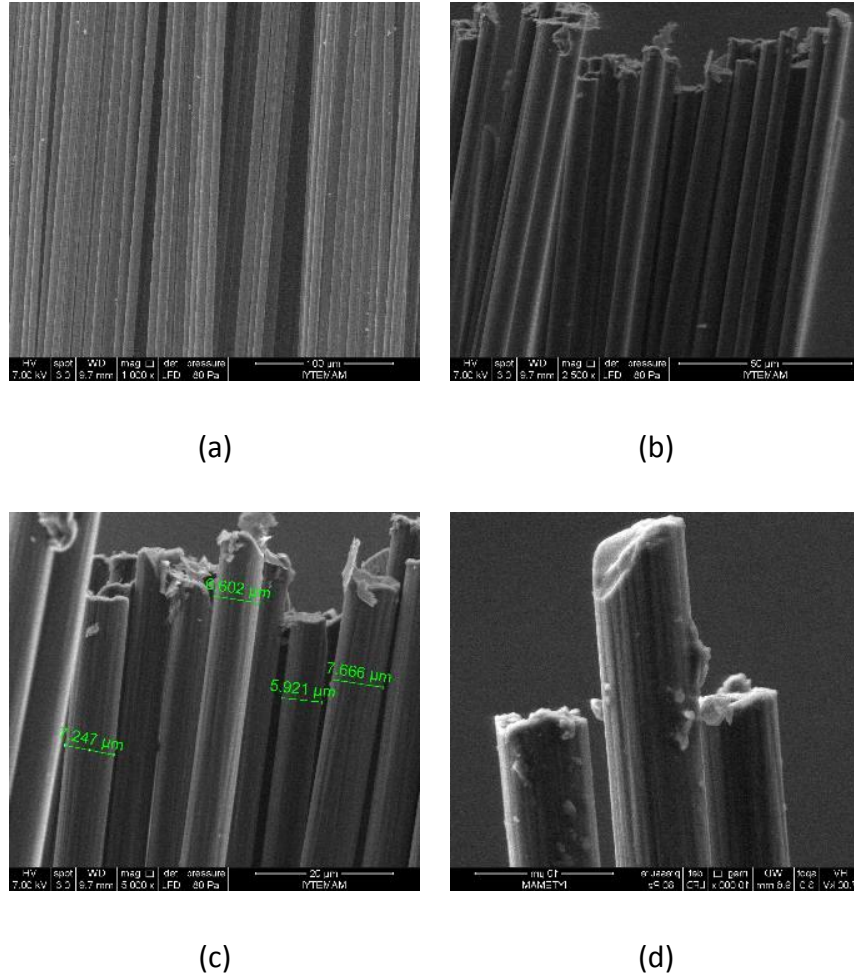


Şekil 2.42. Karbon elyafı üretim şeması (Akbulut 2011)



Şekil 2.43. Sıcaklığın karbon elyafın çekme dayanımı ve elastik modülü üzerinde etkisi (Şahin 2000)

Wonderly *et al.* (2005) yaptıkları çalışmada karbon elyaf/vinil ester kompozit ve cam elyaf vinilester kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılmasını yapmışlardır. Cam ve karbon elyaf takviyeli tabakalar, iki eksenli cam ve karbon elyaf ile vinilesterin vakum infüzyonu ile üretilmişlerdir. Cam ve karbon elyaf numunelerin mukavemetlerini belirlemek amacıyla; çekme, sıkıştırma, enine çekme, çentik ve balistik çarpma testleri yapılmıştır. Karbon elyaf takviyeli çentikli tabakalar, elyafın baskın olduğu noktalarda, çeki yükleme şartları altında mekanik olarak yüksek bulunmuştur. Eşit kalınlıktaki karbon elyaf ve cam elyaf tabakaların mukavemet değerleri birbirine yakın bulunmuştur. Karbon elyaf numunelerde hasar genel olarak belirli bir bölgede meydana gelmektedir. Buna rağmen, cam elyaf takviyeli numunelerde hasar bölgeleri daha fazla dağılım göstermektedir. Çalışmada kullanılan karbon elyafın SEM görüntüsü Şekil 2.44’de verilmiştir.



Şekil 2.44. Karbon elyafın SEM görüntüleri (a) 100µm, (b) 50µm, (c), 20µm ve (d) 10µm

(ii) Bazalt Elyaf

Bazalt fiberler, yüksek mekanik özellikleri ve nispeten düşük maliyeti ile E-camı fiberlere alternatif olarak geliştirilmiş ve son 5 yılda çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Volkanik kayaçların ergitilmesi ve içine katkı maddesi katılmadan fiber olarak üretilmektedirler (Czigány *et al.* 2005; Kumar 2011).

Bazalt fiberlerin mekanik özellikleri, E-camı ve S-camı özelliklerinin arasında yer almaktadır (Jiří Militký *et al.* 2008). E-camına kıyasla 280°C daha yüksek operasyon sıcaklığında çalışabilmektedir. E-camı fiberlere göre ise daha yüksek elastik modülüne sahiptirler ve şekil değiştirmeleri daha düşüktür. (Bin Wei *et al.* 2010).

Bazalt fiberlerin kimyasal direnç performansları E-camı fiberlerden daha yüksektir (Mazumdar 2001; Sim J *et al.* 2010). Özellikle asit ortamında mükemmel korozyon direncine sahiptirler, ancak, su ve alkali ortamında ise E-camı fiberlere göre performansları daha düşüktür (Sokolinskaya *et al.* 1991).

Bazalt fiberler genel anlamda mükemmel mekanik özellikleri ile kompozit malzemeler için takviye malzemesi olarak kullanılırlar. Alev almama ve yüksek sıcaklıkta özelliklerini kaybetmeme kabiliyetleri ile itfaiyecilikte, ısı ve ses yalıtımı özellikleri ile izolatör malzemesi olarak ve mükemmel kimyasal direnç göstermeleri nedeniyle koroziv ortam uygulamalarında kullanılmaktadır. Tüm bu özellikler bir araya geldiğinde bazalt fiberler; kompozit, otomotiv, inşaat, ulaşım endüstrileri, depolama tankları, kimyasal transfer sistemleri, makine imalatı, spor ve eğlence malzemeleri üretiminde alternatif bir ham maddedir (Swink 2002; Bashtannik *et al.* 2003).

Bazalt fiberlerin kompozit malzemeler için takviye amaçlı kullanılmasını araştıran Lopresto *et al.* (2011), e-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozit malzemeleri karşılaştırmış olup, e-camı takviyeli numunelerin daha yüksek çekme yükü taşıdığını, buna rağmen, bazalt fiber takviyeli numunelerin eğme ve basma yüklemelerine karşı daha yüksek mukavemet gösterdiğini bulmuşlardır. Ayrıca, çekme-basma ve eğilme yüklerine maruz numunelerde, bazalt fiber takviyeli kompozit numunelerin elastik modüllerinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Son zamanlarda, bazalt fiberlerin üretimi ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ile ilgili bazı çalışmalar olmakla birlikte, gerek mekanik özellikleri gerekse de kompozit uygulamalarındaki performansları bakımından literatürde az sayıda araştırma yer almaktadır (Gümlüçine *et al.* 2013).

Gümlüçine *et al.* (2013) izoftalik polyester matrisli sürekli e-camı ve bazalt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, termoset bir malzeme olan izoftalik polyester reçine, iki çeşit sürekli E-camı fiber ve iki çeşit sürekli bazalt fiberle takviye edilmiştir. Üretilen kompozit

malzemelere fiziksel ve mekanik testler uygulanarak malzeme özellikleri belirlenmiş ve kullanılan fiberlerin birbirine göre üstünlükleri tespit edilmiştir. Çalışmada, bazaltın E-camı elyafına alternatif olup olmayacağının, deneysel yöntemlerle bulunması ve bazalt fiber takviyeli kompozit malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak bazalt fiber çeşitlerinin E-camı fiber çeşitlerine göre daha iyi özellikler gösterdiği görülmüştür. Çizelge 2.6’da bazalt elyafın bazı özellikleri ve fiyatları diğer elyaf türleri ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.6. Bazalt elyafın özellikleri ve fiyatlarının başka elyaf türleri ile kıyaslaması (Cousin and Robert 2015)

Properties	Basalt	E-glass	S-glass	Carbon
Tensile strength (MPa)	4840	3400	4580	3500-4000
Elastic modulus (GPa)	89	72	85	240-650
Elongation at break (%)	3.1	4.7	5.6	1.5-2.0
Diameter of filament (μm)	06-21	06-21	06-21	0.5-1.25
Density (g/cm^3)	2.8	2.6	2.5	1.75-1.95
Price (year 2013) (USD/kg)	30	1-10	70	90-350

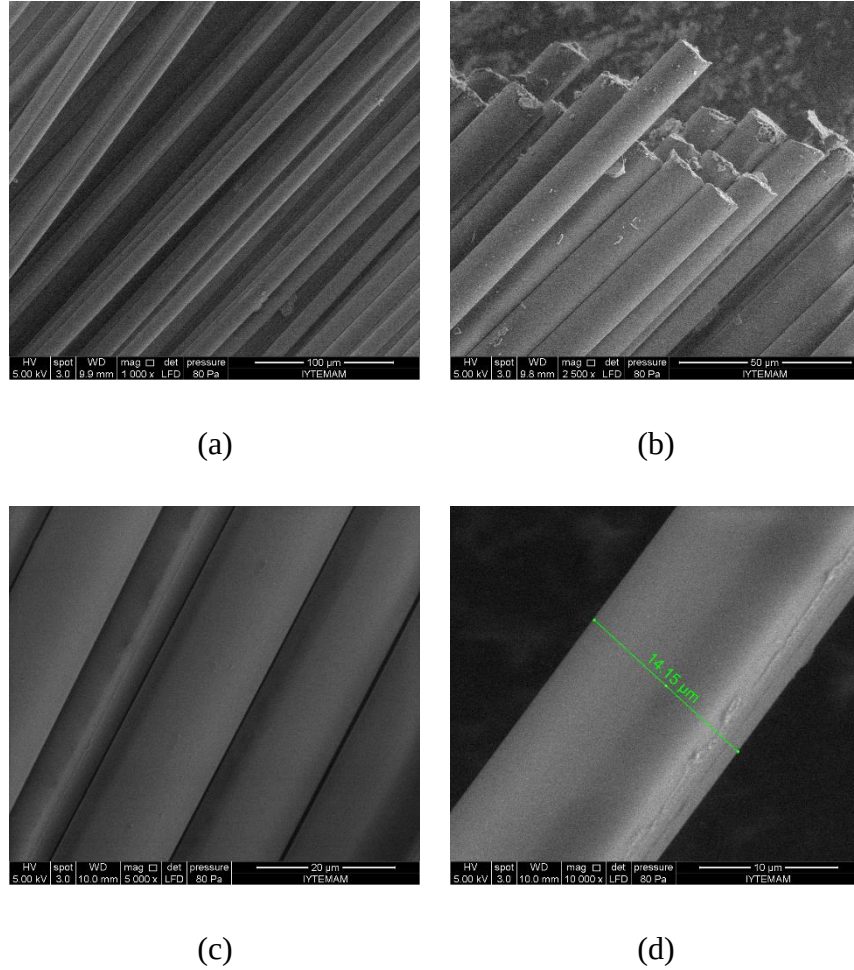
Bazalt elyafın avantajları:

- Yüksek elastisite modülü
- Yüksek çekme mukavemeti
- Yüksek darbe dayanımı
- Düşük yoğunluk
- Yüksek sıcaklık dayanımı
- Yüksek kimyasal dayanım
- Düşük çekme uzaması
- Sulu ve alkali alanlara dayanım
- Yüksek alev dayanma direnci
- Yüksek korozyon direnci
- Ses yalıtımı
- Çevre dostu
- Düşük maliyet

Bazalt elyaf üretim aşamaları:

1. Katı bazalt taşları ısıtılarak eğritilir ve sıvı bazalt haline getirir.
2. Sıvı bazalt hemojenize edilir ve üretime hazır hale getirilir.
3. Sıvı bazalt platinyum cinsinden bir kovanın üzerine serilir.
4. Elde edilen bazalt elyaf ekstrüze edilerek, yağlanır ve bobinlere sarılır.

Çalışmada kullanılan bazalt elyafın SEM görüntüleri Şekil 2.45’de verilmektedir.

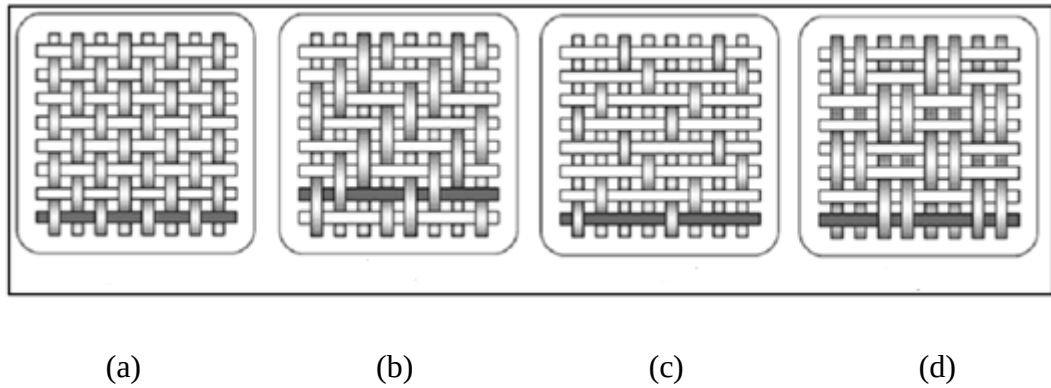


Şekil 2.45. Bazalt elyafın SEM görüntüleri (a) 100µm, (b) 50µm, (c), 20µm ve (d) 10µm

2.5. Sürekli Liflerin Dokuma Çeşitleri

Sürekli karbon, bazalt, cam ve aramid liflerin düz bir yüzey oluşturacak şekilde birbirlerine bağlanmasıyla veya birleştirilmesiyle elyaf kumaşlar elde edilmektedir. Elyaf lar birbirlerine, elyaf lifler ya da ufak iplikler kullanılarak bağlanırlar. Elyaf ların küçük iplikler kullanılarak bağlanması ile elde edilen kumaşlar tek yönlü olarak tanımlanır ve sadece elyaf yönünde yük taşırlar. Tek yönlü kumaşlar, kuvvetin daha çok bir yönden geldiği yerlerde, ağırlığı ve maliyeti azaltmak amacıyla tercih edilmektedirler (Sevgi 2007).

Birçok kompozit malzeme imalatında kullanılan elyaf ların örülmesiyle üretilen dokuma kumaşlar, yatay ve dikey yönlü liflerin birbirlerine farklı şekillerde dokunmasıyla elde edilirler. Bu kumaşlar dokuma şekillerine göre farklı özelliklere sahiptirler ve değişik kullanım alanları vardır. Ticari olarak sıkça kullanılan dokuma çeşitlerinin resimleri Şekil 2.46'de gösterilmiştir (Sevgi 2007).



Şekil 2.46. Ticari dokuma türleri, a) düz, b) çapraz, c) saten, d) sepet (Sevgi 2007)

Düz (Plain)

Bu dokuma çeşidinde, yatay yönlü lifler, dikey yönlü liflerin bir altından bir üstünden geçirilerek dokunurlar (Şekil 2.46-a). Düz şekilde dokunmuş olan kumaşlar simetrik ve

kararlıdırlar. Fakat düz dokunmuş kumaşların kıvrılması ve katlanması oldukça zordur. Kavisli yüzeylerde kullanılması durumunda, diğer dokuma çeşitlerine göre daha düşük mekanik özellikler gösterirler. Genellikle ince liflerin dokunmasında tercih edilmektedirler (Sevgi 2007).

Çapraz (Twill)

Çapraz dokuma tipinde, yatay yönlü lifler, her defasında çapraz şekilde birden fazla dikey yönlü elyafı atlayarak dokunmaktadır (Şekil 2.46-b). Bu dokuma şekli, görsel olarak bakıldığında $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ yönelimli dokunmuş hissi yaratmaktadır ve kumaş üzerinde çapraz çizgiler görülmektedir. Kıvrılabilme ve reçineyi emme bakımından düz dokuma çeşidine göre daha üstündür. Kararlılığı düz dokuma stilinden bir miktar düşük olsa da, mekanik özellikleri daha iyidir (Sevgi 2007).

Saten (Satin)

Saten dokuma aslında çapraz dokumanın bir başka türü olup, bu dokumada yatay ve dikey lifler birbirleriyle daha az kesişmektedirler (Şekil 2.46-c). Yatay lifler genellikle 3 elyafı bir, çapraz şekilde bir miktar kayarak dikey liflerin altından ve üstünden geçerler. Saten dokumadaki kumaşlar oldukça düzdürler, reçineyi kolay bir şekilde emerler ve kolayca kıvrılabilirler. Saten dokumadaki kumaşlar asimetrikler ve kararlılıkları çok iyi değildir. Asimetrik olmalarından dolayı, bir yüzeyde yatay lifler baskınken diğer yüzeyde dikey lifler baskındır (Sevgi 2007).

Sepet (Basket)

Sepet dokuma genel olarak düz dokumanın bir çeşididir. Sepet dokunmasında 2 veya daha fazla yatay yönlü elyaf, 2 veya daha fazla dikey yönlü elyafın altından ve üstünden geçerler (2.46-d). 2 yatay yönlü elyafın, 2 dikey yönlü elyafın altından ve üstünden geçmesi durumunda, dokuma Sepet 2×2 olarak adlandırılır. 8×2 veya 5×4 gibi asimetrik sepet dokumaları da kullanılmaktadır. Sepet dokuması düz dokumaya göre daha

dayanıklı olmasına rağmen kararlılığı ve kıvrılabilirliği daha kötüdür. Genellikle ağırlığı ve kalınlığı fazla olan liflerin dokumasında tercih edilmektedirler (Sevgi 2007).

(iii) Epoksi Matris Malzemesi

Kompozit malzemelerin yapılarında genel olarak üç ana eleman bulunmaktadır. Bunlardan matris malzemesi, takviye elamanını sararak bir arada tutan, yükleri aktaran, donatıyı dış etkilere koruyan sürekli fazı oluşturmaktadır. Matris malzemesi, bu işlevlerin yanı sıra, kompozit bünyesindeki gerilmelerin bir kısmını karşılayarak taşımaya yardımcı olmakta ve liflerde meydana gelen çatlama ve kopmaları tolere ederek kompozitin tokluğunu artırmaktadır. Ayrıca, matris malzemesi plastik deformasyona geçişte, oluşabilecek çatlak ilerlemelerin önleyici bir rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasına geciktirici etki yapmaktadır (Saçak 2002). Ancak, yük taşımaya ikinci malzeme olarak katılma durumu basınç halinde değişmekte ve kompozitin basınç mukavemeti büyük ölçüde matrisin mukavemetine bağlı olmaktadır.

Bir kompozitin kullanım sıcaklığı matrisin kullanım sıcaklığı ile sınırlıdır. Matris malzemeleri sıvı halde oldukları için, kompozit üretiminde viskozite önemlidir. Erime noktası, kür zamanı, sıcaklık gibi fiziksel özellikler de matrislerin diğer önemli noktalarıdır (Olçay *et al.* 2002).

Matris malzemesinin bir kompozitteki görevleri:

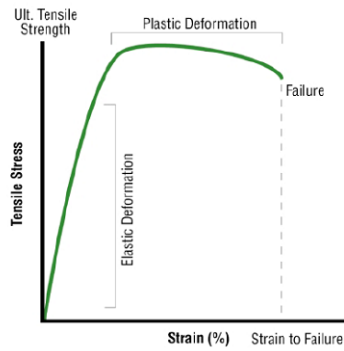
- 1- Matris fiberleri bir arada tutarak fiberlere yük aktarımında köprü görevi görür.
- 2- Matris malzemesi kompozitin şekillenmesini sağlar ve rijitliğini artırır.
- 3- Matris malzemesi fiberleri birbirinden izole ederek, fiberlerin birbirlerinden bir yönü ile bağımsız davranmalarını sağlar. Bu durum, örneğin, çatlak ilerlemesini durdurur ve yavaşlatır.
- 4- Matris malzemesi kompozite iyi yüzey kalitesi sağlar.
- 5- Matris, aşınma gibi mekanik hasarlara ve çeşitli kimyasal etkilere karşı fiberleri korur.

- 6- Matris malzemesi kompozitin tokluğunun yükseltir.
- 7- Matris malzemesi kompozitin darbe direncini artırır.
- 8- Matrisin özellikleri ve fiberle uyumluluğu, meydana gelen hasar modlarını önemli ölçüde etkiler.

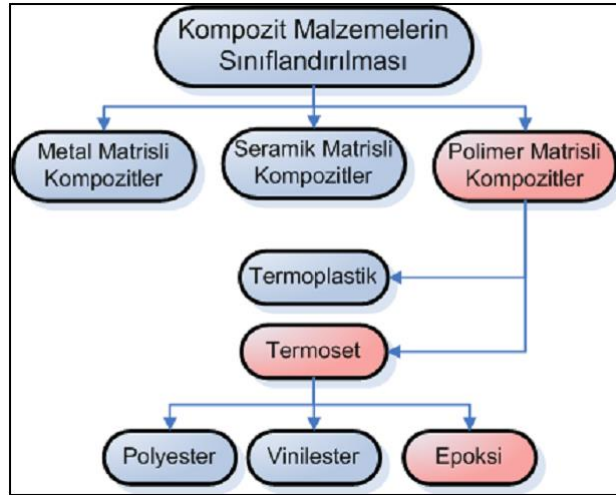
Kompozit malzeme üretiminde kullanılan bir reçineden beklenen özellikler:

- 1. İyi mekanik özellikler
- 2. İyi yapışma kabiliyeti
- 3. İyi tokluk özellikleri
- 4. Çevresel etkilere direnç

Şekil 2.47’de ideal bir reçine malzemesi için gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı görülmektedir. Burada, reçine malzemesi plastik deformasyon davranışı göstermekte, dolayısıyla oluşan hasar sünek bir davranıştır. Kompozit malzemedan beklenen en iyi performans için, matris malzemenin en az fiber malzemesi kadar elastik deformasyon kabiliyetine sahip olması gerekir.



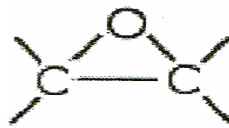
Şekil 2.47. İdeal bir reçine için gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı (Ömercikoğlu 2009)



Şekil 2.48. Kompozitlerin matris malzemelerine göre tasnifi (Ömercikoğlu 2009)

Epoksi reçinesi ilk olarak 1930 yılında S.O. (Amerika) ve P. Greenlee (İsviçre) bilim adamları tarafından sentezlenmiş ve birçok endüstriyel uygulamalar için kullanılmıştır.

Epoksi reçineleri, adını yapısında bulunan epoksi fonksiyonel gruplarından almıştır (Şekil 2.49). Epoksi reçinelerinin her bir molekülünde bir veya daha fazla epoksi grubu vardır. Epoksi reçineleri Şekil 2.49’da görüldüğü gibi oksijen bağlarına sahip olup, eteri yapısında bulundurulur. Ticari epoksi reçineleri alifatik, sikloalifatik veya aromatik arka bağlar içerir ve gelişmiş kompozitlerde genellikle tercih edilen ve her tür elyaf ile kullanılabilen bir reçinedir. Epoksi reçineler, reçine türüne ve son kullanım yerine göre sıvı veya katı olarak temin edilebilir. Epoksi grubunun polimerizasyonuyla elde edilir. Bu reçineler çeşitli ajanlar varlığında, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kür edilerek termoset son ürün haline dönüştürülür. Epoksi reçineleri gerçekte polieter yapısındadırlar ve polieterlerin önemli bir grubunu oluştururlar (Saçak 2002).

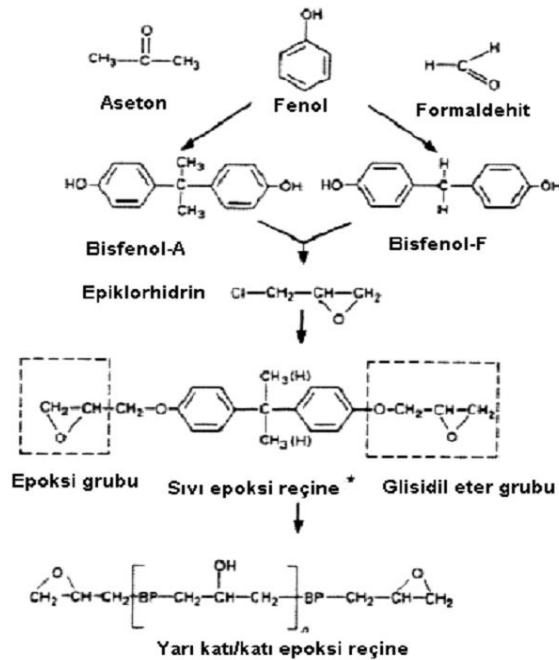


Şekil 2.49. Epoksi fonksiyonel grubu (Saçak 2002)

Çizelge 2.7. Epoksi ve bazı yaygın matris malzemelerinin özellikleri (Saçak 2002)

Özellikler	Epoksi Oda Sıc. Kürlenmiş	Epoksi Yük. Sıc. Kürlenmiş	Epoksi	Polyster	Fenolik
Özgül ağırlık (g/cm ³)	1.1-1.3	1.2-1.4	1.3	1.2	1.2-1.3
Elastik modül (GPa)	2-3	2.5-3.0	3.5	2-3	5-11
Çekme muk. (MPa)	50-70	70-90	60	50-60	50-60
Kop. Uzaması (%)	2-6	2-5	2	2-3	1.2
Maks. işlem sıcaklığı (°C)	70-100	100-180	180	60-80	100-125

Epoksiler, iki ya da daha fazla epoksit içeren bileşenlerden oluşup, Polifenolün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilirler. Viskoz ve açık renkli bir sıvı halindedirler. Saydam ve yapışkan hal epoksi gibi amorf polimerlerin karakteristiklerindendir. Tüm polimerler, düşük sıcaklıkta saydamlaşmakta ve yüksek sıcaklıkta da kauçuklaşırlar. Epoksi reçinelerin üretimi Şekil 2.50’de gösterilmiştir.

**Şekil 2.50.** Epoksi reçinelerin üretimi (Hurley 2002)

Sıcaklık değişimi ve geçişin meydana geldiği sıcaklık aralığına "camsı geçiş sıcaklığı" denir (T_g). Camsı geçiş sıcaklığı, maksimum çalışabilirlik sıcaklığının bir ölçüsüdür.

Epoksi reçineler kolayca ve hızlı bir şekilde kullanılan sertleştiricilerin özelliklerine bağlı olarak 5°C - 150°C aralığında kürleşebilirler (curing). Epoxy reçinelerin en büyük avantajlarından biri kürleşme/katılaşma sırasında gösterdikleri düşük çekme (büzüşme) oranlarıdır. Yüksek yapışma kabiliyeti, yüksek mekanik özellikler, yüksek elektrik izolasyonu ve iyi kimyasal direnç özelliği diğer avantajları arasında sayılabilir. Ayrıca, epoksi reçineler endüstride; yapıştırma, döküm, sızdırmazlık, boya, vernikleme gibi amaçlarla da kullanılırlar. Epoksi reçineler vinilesterlerde olduğu gibi her iki ucunda reaktif bölgeler (reactive sites) bulunan uzun molekül zincirlerinden oluşmaktadırlar. Fakat epoksiler de bu reaktif bölgelerde ester grupları yerine epoksi grupları vardır. Ester gruplarının olmaması, epoksi reçineleri suya karşı dirençli hale getirmektedir. Bir epoksi molekülü merkezinde mekanik ve termal gerilmeleri lineer gruplara oranla daha iyi absorbe eden iki halkalı gruplar (two ring groups) içerir. Bu da onlara çok iyi direngenlik, tokluk ve ısı direnci katmaktadır.

Epoksilerin çapraz bağlanma sırasında uçucu madde oluşmaz, çapraz bağlanma sonrası büzülme oranları, %1-5 civarındadır. Ancak, fiyatları yüksek ve kürleşme zamanları uzundur. Kürleşme zamanını azaltmak amacıyla hızlandırıcılar kullanılarak çapraz bağlanma tepkimeleri hızlandırılır. Kullanım sıcaklıkları polimer özelliklerine bağlı olarak 150°C 'ye kadar çıkar (Velde 1992; Saçak 2002). Epoksi reçinelerde kullanılan başlıca sertleştiriciler; lewis bazları, inorganik bazlar, birincil ve ikincil aminler ve amitlerdir. Ayrıca, karboksilik asit anhidritler, dibazik organik asitler, fenoller ve lewis asitleri de asit sertleştiriciler olarak epoksi sistemlerde kullanılmaktadır (Arıkan 2001).

Epoksi (PMK) malzemesi, kürleşmemiş reçinenin iki ucunda birer epoksi grubu bulunan polimer molekülleri zincirlerinin bağlanmasından meydana gelmektedir. Zincir uzunluğunu değiştirmekle pişmemiş reçine düşük viskoziteli bir sıvıdan yüksek ergime noktalı katıya kadar çeşitli kıvamlarda elde edilir. Epoksi grupları çok reaktiftirler ve sertleştirici ile değişik yapıya girerler. Sertleştiricinin cinsini ve reçine zincirinin

uzunluğunu değiştirmekle epoksi reçinesinin de özellikleri değişir. Epoksi reçineler ile; metaller, cam, porselen, lastik, doğal organik maddeler, plastikler gibi biręok malzeme kolayca yapıştırılabilir. Kompozit malzeme üretiminde bu reçineler yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Takviye edilmiş epoksi reçineler polyesterlerin uygulama alanlarında kullanılmakla birlikte bu malzemeler yüksek elektrik yalıtım özelliklerine ve ark direncine sahip olduklarından, elektrik endüstrisinde kullanılmaktadırlar. Bu malzemelerin mukavemeti polyesterlere göre daha yüksek olup, daha pahalıdırlar (Tekeli 2007).

Günümüzde mevcut polimer reçineler arasında en yüksek performansa sahip olan reçineler epoksi malzemeleridir. Mekanik performansları ve çevresel etkilere karşı dirençleri diğerlerinden daha yüksektir. Yapışma kabiliyetlerinin ve su dirençlerinin (su etkisi ile bozunma) yüksek olması nedeni ile de özellikle yat, tekne gibi deniz araçlarında kullanılabilecek en ideal reğinelerdir.

Epoksi reçinesinin avantajları:

- Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu azdır.
- Çeşitli formüasyonlara sahiptirler.
- Çok yönlü işlenebilirliğe sahiptirler
- Sürtünmeye ve aşınmaya karşı dayanıklı yüzeyler oluşturur.
- Kolay temizlenir
- Hijyeniktir ve estetikdir
- Uçucu değildir
- Solvent içmez
- Düşük viskozite ve yüksek akış hızına sahiptirler
- Kimyasal dirençleri yüksektir
- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler
- İyi termal özelliklere sahiptir
- Yağ ve Kimyasallara karşı dayanıklıdır
- Suyu, aside ve alkaliye karşı direnci çok iyidir ve zamanla bu direnci kaybolmaz

- Mekanik özellikleri iyidir
- Çekme ve darbe dayanımları oldukça yüksektir
- Yüksek sıcaklıkta iyi mekanik ve fiziksel performans sergiler
- Islakken 140°C, kuruyken 220°C'ye kadar ısıl dayanıma sahiptir
- Birçok elyaf ile iyi bir bağ oluşturur
- Oda sıcaklığında katılaşabilirler
- Hangi düzgünlük ve dokuda olursa olsun, herhangi bir yüzey yapıştırabilir
- Cam ve karbon elyafı ile mükemmel mekanik özelliklere sahip kompozit elde edilebilir
- Epoksi matris içeren kompozitler bu nedenlerden dolayı uzay, havacılık ve denizcilik sektörü gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Tanecik ilave edilerek sürtünme direnci artırılır ve kayma direnci artar

Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerle kullanılabilir olmalarından dolayı, özellikle uçak gövdelerinde kullanılan tabakalı kompozit yapılarda yaygın bir şekilde kullanılırlar.

Epoksi reçinesinin dezavantajları (Akbulut 2011)

- Maliyetleri yüksektir
- Cilde zararlıdır
- Doğru karışım son derece önemlidir.

2.6. Nano Teknoloji

Ünlü Fizik bilim adamı Richard Feynman 1959 yılında “There is plenty of room at bottom” (aşağıda daha çok yer var) başlıklı bir seminer sunmuştur. Nano teknoloji biliminde çok meşhur olan ve nanobilim ve nanoteknoloji biliminin başlangıç noktası kabul edilen bu seminerde, Feynman’ın bakış açısına göre, atom ve molekül boyutlarında imalat yapılabilirse, çok sayıda yeni buluşun ortaya çıkmasına sebep olabileceği öngörülmektedir. Feynman’a göre, nano alanında gelişimin ortaya çıkması

için ilk önce nano boyutlara kadar inilmesi ve ölçüm yapabilen enstrümanların ortaya çıkması ve ayrıca böyle nanomalzemelerin üretimi için pratik yöntemlerin bulunmasının şart olduğunu öne sürmüştür. Feynman'ın beyanatından sonra, Dünyanın dört bir tarafından bilim adamları araştırmalarını bu konu üzerine odaklamışlardır. (Hajian *et al.* 2012). Nanobilim ve nanoteknolojinin gelişimi kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1959: Richard Feynman'ın vermiş olduğu seminer,
- 1974: Aviram ve Seiden tarafından ilk moleküler elektronik aygıtının icadı,
- 1981: Binnig ve Rohrer tarafından atomların tek tek görüntüleyebilmek için STM'in icat edilmesi,
- 1985: Curl, Kroto, Smalley tarafından fullerenlerin bulunması,
- 1987: İletkenliğin kuantum özelliğinin ilk defa gözlemlenmesi,
- 1988: Grado ve ekibi tarafından ilk suni proteinin üretimi,
- 1991: Irijima tarafından çok cidarlı nannotüplerin bulunması,
- 1993: Irijima ve Bethune tarafından tek duvarlı karbon nanotüplerin icadı,
- 1993: Rice Üniversitesinde ilk nanoteknoloji laboratuvarının kurulması,
- 1997: Seeman tarafından ilk DNA molekülü kullanarak nanomekanik aygıtının imalatı,
- 1997: Nanotüp kullanarak ilk elektrik akım ölçümünün yapılması,
- 1998: Dekker ve arkadaşlarının tubefit üretimini gerçekleştirmesi,
- 1999: Reed ve Tour ilk olarak tek organik molekül kullanarak elektronik anahtar yapmayı başarması,
- 2000: ABD'de nanoteknoloji araştırmaları için 422 milyon dolarlık bir bütçenin tahsisi,
- 2001: İlk kez nanotüp kullanılarak transistör ve mantık devrelerinin üretilmesi,
- 2001: ZnO nanotel kullanılarak lazer üretimi,
- 2002: Süperörgü nanotellerin üretilmesi,
- 2005: İlk dört tekerlekli nano araba modelinin yapılması.

Nanometre (nm), 1 metrenin milyarda birini ifade eder. 1 nm'nin günlük yaşamdaki boyutunu karşılaştırmak istersek, onu bir saç telinin 100.000'de biri olarak tanımlayabiliriz. Bir başka deyişle, 1 nm içinde yan yana zorlukla 2-3 atom dizilebilir; yaklaşık 100-1000 atom bir araya gelerek nano ölçeklerde bir nesneyi oluşturur (Örs

2009). Kompozit yapısında kullanılan her hangi bir malzemenin en az bir boyutunun miktarı 100 nm'den küçük oldursa kompozit yapılar nanokompozit olarak adlandırılır (Hsiao *et al.* 2003).

Karbon elementinin allotroplarına günlük yaşamda ve doğada hiç farkında olmadan ve bol bir şekilde rastlamak mümkündür. Bu element doğada en çok bulunan dördüncü element olarak tanımlanmaktadır. Bu element yaşam için en temel elementlerden biridir. Bu element; çok değerli, çok değişik ve üstün performans gösteren elmas malzemesinde ve aynı zamanda düşük değere sahip maden kömürünün temel yapıtaşıdır. Karbon elementinden oluşan ve diğer bazı malzemelerin elastisite modülleri Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Bazı malzemelerin elastik modül değerleri (Popov 2004)

Malzeme	Elastik Modül (G Pa)
Elmas	1000
Silikon	107
Demir	196
Düşük Alaşımlı Çelik	200-207
Naylon	3-3.4
Silikon Karbür (SiC)	450
Karbon Nanotüpler	1000(SWKNT)-1250(MWKNT)

Çizelgeden de görüldüğü karbon esaslı malzemeler çok yüksek özelliklere sahiptir. Karbonun bu üstün özellikleri, karbon atomlarının kendi aralarında bağlanma geometrisinden kaynaklanmaktadır. Karbon atomları sp , sp^2 ve sp^3 bağlarını yapma kabiliyetine sahiptir ve karbonun yaptığı bağ türleri ortaya çıkan maddenin boyutlarını belirlemektedir. Bu özelliklerden dolayı, karbon elementinin periyodik Çizelgedeki elementler içerisinde sıfır boyuttan üç boyuta kadar izomerleri olan tek elementtir. Karbonun izomerlerinin boyutları ve bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.9’da verilmiştir (Saito 1998).

Çizelge 2.9. Karbon izomerlerine ait fiziksel özellikler (Yang 2003)

Boyut	0B	1B	2B	3B
İzomer	Fulleren	Nanotüp	Grafit	Elmas
Bağ Şekli	sp^2	$sp^2(sp^1)$	sp^2	sp^3
Yoğunluk(g/cm^3)	1.72	1.2-2.0	2.26	3.515
Bağ Uzunluğu($Å^0$)	1.40(C=C)	1.44(C=C)	1.42(C=C)	1.54(C-C)
Elektronik Özellikleri	Yarı iletken $E_g=1.9$ eV	Metal veya yarı iletken	Yarı metal(metalimsi)	Yalıtkan $E_g=5.47$ eV

(iv) Karbon nanotüp

Grafen nano-levhasının rulo halinde sarmalanmasıyla elde edilen yapıya karbon nanotüp denmektedir. Karbon nanotüpler grafen yapılardan oluşur (Özyurt 2012). Karbon nanotüplerin bilimsel olarak kullanımı, 1985 yıllarında 60 ya da daha fazla karbon atomunun birleşiminden oluşan, futbol topu şeklindeki moleküllerin (fulleren)

keşfedilmesi ile başlamıştır. Bu önemli buluştan sonra, birçok bilim adamı bu konu üzerinde araştırmalara başlamış ve sıcak karbon buharını yoğunlaştırarak futbol topuna benzer moleküller elde etmeye çalışmışlardır. İlk tüp şeklindeki moleküller, 1991’de elektron mikroskobu uzmanı Iijima (1991) tarafından fullerenlerin ark boşalımı sentezi sırasında katot malzemesinin çevresinde toplanan maddenin incelemesi esnasında gözlemlenmiştir. Bu maddenin keşfi ve çeşitli özelliklerinin incelenerek belirlenmesi, bilim dünyasında büyük bir devrime neden olmuş ve birçok bilim insanı, bu maddenin olağanüstü özelliklerinin incelenmesi konusuna odaklanmıştır. Bu araştırmaların hem uygulamalı ve hem de kuramsal devam etmesi ile birlikte, karbon nanotüplerin nanoteknoloji alanında bir model sistem haline dönüşmesine neden olmuştur. 1993 yılında tek cidarlı nanotüplerin elde edilmesi, karbon nanotüplerin gelişmesinde büyük bir aşama olmuştur. 1996 yılında Rice Üniversitesinde çalışan bir Araştırma Grubu, tek cidarlı karbon nanotüp gruplarının oluşturmak için daha etkin bir yöntem bulmuşlar ve çok sayıda karbon nanotüp deneylerinin yapılması için uygun bir ortam oluşturmuşlardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanan karbon nanotüpler, 1200°C sıcaklıkta karbonun lazer-buharlaştırılmasıyla elde edilmeye başlanmıştır, (Örs 2009).

Karbon nanotüpler, en basit tarzda, karbon atomlarının bal peteği şeklindeki levhaların silindirik sarılması ile elde edilirler. Bu malzemelerin yapısında bulunan atomlar birbirleri ile sp^2 şeklinde (grafit plakta olduğu gibi) bağlanırlar. Atomlar sadece altıgen geometri oluşturur, her atomun sadece üç komşusu bulunur. Karbon nanotüpler delik yapıları ve yüksek uzunluk/çap oranları sebebiyle, bası, eğilme, bükülme gibi etkilere karşı dirençleri yüksektir, (Özyurt 2012). Tek bir grafit levhanın sarılmasından ortaya çıkan tüpler, tek cidarlı karbon nanotüp (SWCNT) olarak adlandırılır. Nanotüplerin tek eksenli olarak iç içe olması sebebiyle ortaya çıkan çoklu karbon silindirlere çok cidarlı karbon nanotüp (MWCNT) ismi verilmektedir. Bu malzemelerin çapları birkaç nanometre ve boyları ise mikron mertebesinde. MWCNT’lerin çapları büyük olduğundan için, SWCNT’lere göre daha az eğilirler. MWCNT’lerin en büyük avantajları üretimlerinin ucuz olmasıdır (Örs 2009).

Grafen nano levhalardaki C-C bağı doğada gözlenmiş olan en kuvvetli bağıdır. Bundan dolayı çok iyi mekanik özelliklere sahiptir. Dolayısıyla kompozit malzemelerin güçlendirilmesinde, karbon nanotüpler önemli bir takviye elemanıdır. Ayrıca bu bağ yapısı sayesinde elmasan (sp^3 hibritleşmesine sahip) daha mukavemetlidir. Bu olay C-C bağları arasındaki uzunlukların birbirinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır (grafende 0,142 nm, elmasa 0,154 nm) (Hsiao *et al.* 2003). Bu sebeplerden dolayı karbon nanotüp, tüp eksenine yönündeki mukavemeti göz önüne alındığında, en mukavim elyaf türü olarak tanımlanmaktadır. Bu güne kadar yapılan karbon nanotüp konusunda deneysel ve teorik çalışmalar, bu maddenin çok yüksek elastisite modülü ve çekme mukavemetine sahip olduğunu göstermektedir.

Karbon nanotüpler, grafen levhalarının rulo şeklinde yuvarlatılmasıyla elde edilmektedir. Grafen levhasının yuvarlatılması, eğilme miktarına bağlı olarak tüpün enerjisinin artırmaktadır. Bu durumda, nanotüpün çapının azalması ile birlikte, şekil değiştirme enerjisi artmakta ve böylece daha küçük çaplı bir nanotüpün daha büyük çapa sahip olan bir nanotüpten daha kararlı olduğu anlaşılır. Başka bir deyişle; grafen tabakalarının tüp oluşturma amacıyla yuvarlatılmasında meydana gelen burulma momenti, C-C bağlarının bir miktar düzlem dışı biçim değişimine (distorsiyon) neden olmaktadır. Nanotüp çapının azalmasına bağlı olarak, σ bağlarının yeniden hibritleşmesinde artış meydana gelmektedir. Grafen tabakasının yuvarlatılarak tüp elde edilmesinde, hegzagonal simetri kırılır ve C-C bağının rijitliğinde düşüşe sebep olmaktadır (Güler 2011).

Yapılan teorik çalışmalara göre, SWCNT'nin termal iletkenliğinin çok yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Normal şartlarda SWCNT'nin termal iletkenlik değeri 6600 W/mK olarak tahmin edilmiştir. Bu iletkenlik değeri, elmas için 2000 W/mK ve grafit için 400 W/mK gibi olan malzemelerin iletkenlik değerleri ile karşılaştırdığında, aşırı bir fark görülmektedir (Güler 2011). Karbon nanotüplerin özellikleri kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilir (Seyman 2010):

- Çok yüksek mukavemetlidirler,

- Rijit bir yapıya sahiptirler,
- Oldukça sünektirler,
- Çekme mukavemetleri 50-200 GPa aralığında değişmektedir (bilinen en mukavim malzeme),
- Elastisite modülleri yaklaşık 1TPa'dır,
- Yüzde uzamaları %5 ile %20 aralığında değişmektedir,
- Yoğunlukları oldukça düşüktür,
- Bulunduğu yapıya göre elektriksel özellik gösterirler. Hegzegonal yapı boyunca (tüp duvarları boyunca) metal veya yarı iletken gibi davranırlar,
- Yüksek ergime sıcaklığına sahiptirler.

Çok cidarlı karbon nanotüpler (MWCNT), farklı çaplardaki tek cidarlı karbon nanotüplerin eş eksenli olarak iç içe geçmesinden ortaya çıkmakta olup, tek cidarlı karbon nanotüplerden farklı özellikler göstermektedirler. MWCNT'lerin iç çapları 0,4 nm'e kadar inebilmekte olup yaklaşık 5 nm civarındadırlar. Bu dolgu malzemelerinin dış çapları ise yaklaşık 15 nm mertebesinde (Saito and Dresselhaus 1998). Bu rakamlar göz önüne alındığında MWCNT'lerde cidarlar arası mesafenin 0,339 nm olacağı sonucuna varılabilir. Hâlbuki TEM ve XRD analizlerinde grafen cidarlarının birbirlerine olan mesafesi 0,34-0,39 nm olarak ölçülmüştür (Andrews 2001). Bu değerler grafitteki tabakalar arası mesafenin 0,335 nm'den fazla olmasından dolayı MWCNT'lerde komşu grafen duvarlarının, birbirleri ile kristalografik açıdan ilişkisinin bulunmadığını göstermektedir (Chen 2009). Elde edilen analitik ve deneysel sonuçlar, MWCNT'lerde komşu cidarlar arası etkileşimlerin az olmasından dolayı cidarların birbirlerinden bağımsız öteleme ve dönme hareketleri yapabileceğini ispat etmektedir. MWCNT'lerin dönme esnasında, iç tüplerinin sürtünmesinin yaklaşık sıfır olması bu nanodolgunun kullanım alanını, özellikle nanomakine üretiminde yaygınlaştırmıştır. Yapılan deney sonuçları, MWCNT'lerin elastisite modüllerinin, tüp cidarlarının düzen derecesine bağlı olduğunu göstermektedir. Cidar düzensizliğinin artmasıyla birlikte elastisite modülü de azalmaktadır. Nanotüpün küresel uç kısımlarına baskı yapılması, eğilmesine neden olabilir, fakat uç kısım hasar görmez. Kuvvet kaldırıldığında nanotüp eski durumuna geri dönebilir (Örs 2009).

Karbon nanotüpler, yalnızca mekanik özellikleriyle değil, termal özellikleriyle de büyük ilgi çekmektedirler. Bu malzemelerin termal genleşme katsayıları, karbon tellerinden temel olarak farklı ve grafit kadar iyidir. Kusursuz karbon nanotüpler için izotropik genleşme katsayısı avantajlı olabilir. Karbon nanotüpler için çok düşük ısısal genleşme katsayısı tahmin edilmektedir (Örs 2009).

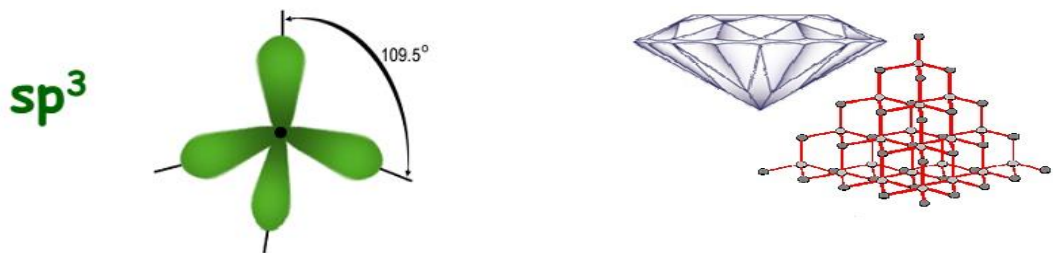
Xu vd. epoksi reçinesine sadece kütlece %0,1 MWCNT nanodolgu eklenmesi ile elastisite modülünün %20 arttığını belirlemişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre, epoksi nanokompozitinin mekanik özelliklerinin daha da iyileştirmesi için kullanılan MWCNT oranını artırmak gerekmektedir(Örs 2009).

(v) Grafen Nano Levha (GNP)

Karbon atomunun doğada bulunma formları Şekil 2.51 ile 2-54 aralığında gösterilmiştir. Karbon atomunun hibritleşmesi sp , sp^2 ve sp^3 formları şeklinde kovalent bağ yapmasını sağlar.

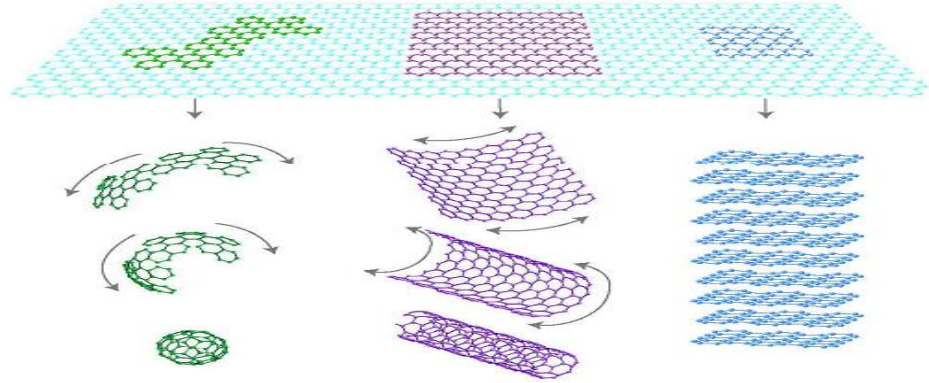


Şekil 2.51. Grafen hibritleşme, grafit yapısı ve kullanım örneği (Arseven 2010)

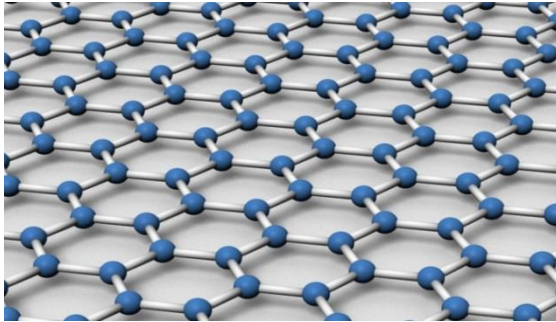


Şekil 2.52. Elmas hibritleşme, elmas yapısı ve örneği (Arseven 2010)

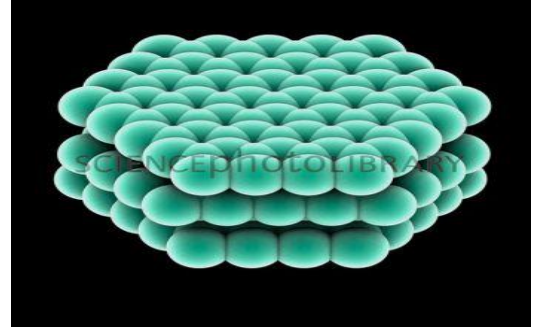
Tek tabakalı grafit yapısı olan ve GNP başlangıç maddesinden elde edilen 60 karbon atomuna sahip futbol topu şeklindeki yapılara fulleren, boru şeklinde katlanmasıyla oluşan yapılara CNT denir.



Şekil 2.53. İki boyutlu GNP levhasından oluşan 0 boyutlu fulleren, 1boyutlu karbon nanotüp ve 3 boyutlu grafit malzemesi (Arseven 2010)



(a)



(b)

Şekil 2.54. (a) İki boyutlu GNP, (b) 3 boyutlu grafit yapısı (Arseven 2010)

GNP sentez teknikleri aşağıdaki gibi sıralanır (Kumskov *et al.* 2012; Chorro *et al.* 2013):

- 1- Fiziksel yöntemler
 - a- HOPG'nin kimyasal ekfolasyonu
 - b- Mikromekanik olarak grafit tabakasından ayrılma (çok sayıda tabaka)

- c- Hidrokarbonların buhar fazı çöktürülmesiyle epitaksiyal büyüme (UHV)
 - d- Metal yüzeyi üzerinde karbon çöktürme (CVD)
 - e- SiC ile termal bozunma
- 2- Kimyasal yöntemler
 - a- Aşağıdan yukarıya organik sentez
 - b- Grafit-oksitin GNP'ye indirgenmesi

Tek tabakalı GNP, çeliğe göre 200 kat daha fazla mukavemete sahiptir ki, o en dayanıklı malzeme olarak bilinmektedir (Calizo *et al.* 2009). 1 TPa'lık elastisite modülü (Yang *et al.* 2010; Kuilla *et al.* 2010; Zhan *et al.* 2011; Xue *et al.* 2013) ve 130 GPa'lık çekme mukavemeti (Lee *et al.* 2012), bu malzemeyi ultra mukavemetli kompozit yapılarında kullanımını uygun hale getirmiştir.

GNP levhasının teorik alanı, hiç bir örtüşme (overlap) olmaksızın $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ ' dir. (Yuan *et al.* 2010). Başka araştırmalarda da, kalınlığı 0,35 nm'den 1 nm'ye kadar değişen levhalar üzerinde çalışılmıştır. Bununla birlikte, eksfolasyon ile elde edilen GNP levhalarda, deneylerle ölçülen levha alanlarında, örtüşmeden dolayı daha küçük değerlere de rastlanmıştır. GNP nanotaneçığının ısı iletkenliği, şimdiye kadar keşfedilen tüm nano partiküllerden daha yüksektir. GNP levhaları, çok büyük yüzey alanına sahip olmalarından dolayı, bu malzemelerden yapılan kompozitlerin mekanik, termal ve elektrik özelliklerinin gelişmesinde çok büyük bir paya sahiptir. Ayrıca bu nanotaneçiklerin polimer malzemelere çok küçük bir oranda eklenmesi ile bu malzemelerin mekanik, termal ve elektrik özelliklerinde çok büyük bir artış olmaktadır (Montazeri and Rafii-Tabar 2011; Chandra *et al.* 2012).

Bundan dolayı, GNP üzerinde yapılan çalışmalar, katı hal fiziği ve malzeme biliminin geleceğinde, bu malzemeyi çok önemli bir hale getirmektedir (Eslami-Farsani *et al.* 2013; Subagia and Kim 2013). Buna ilaveten, yakın bir zamanda yüksek spesifik yüzey alanı, yüksek en/boy oranı ve katmanlı yapısından dolayı, karbon nanotüp malzemelerine alternatif olması beklenmektedir.

Öte yandan, son yıllarda yapılan çalışmalara göre, GNP'nin üretim maliyeti, karbon nanotüplerden çok daha düşük olduğu görülmüştür. Doğal kristal grafitin fiyatı 1,5 \$/lb civarında olup, bu grafitten elde edilen GNP'nin oldukça ucuz olduğunu göstermektedir. Eksfole edilmiş GNP'nin fiyatı ise 5\$ /lb olması beklenmektedir (Xu and Van Hoa 2008).

Şu ana kadar, GNP bazlı nanokompozitlerin, havacılık, nanosensörler, nanoelektronik, kimya gibi geniş alanlarda kullanımı hakkında çok sayıda araştırma yapılmıştır. Ayrıca biyosensörler (Sideridis *et al.* 2005), elektrokimyasal sensörler (Zhang *et al.* 2012), moleküler sensörler (Siddiqui *et al.* 2007; Li *et al.* 2013), pil (Yokozeki *et al.* 2007; Kim *et al.* 2008; Yavari *et al.* 2010; Hossain *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2012), sıvı kristal ekran (Wichmann *et al.* 2006), ışık yayan cihazlar (Iwahori *et al.* 2005), yüksek frekanslı analog elektronik (Shen *et al.* 2009), süperkapasitör (Meszaros *et al.* 2013; Sideridis *et al.* 2005), optoelektronik cihazlar (Lombardo 2005), güneş pili (Ma and Zhang 2013), görüntü ekranlarında kullanılan esnek ve şeffaf elektrotlar (Kalita *et al.* 2010; Kim *et al.* 2009), hidrojen (Patchkovskii *et al.* 2005) ve enerji depolama aygıtları (Brownson *et al.* 2011), nanokompozitler (Zhou *et al.* 2006; Sadeghian *et al.* 2006; Kim *et al.* 2008; Yavari *et al.* 2010; Morales *et al.* 2010) gibi birçok teknolojik alanlarda kullanımı giderek artmaktadır. Ayrıca, GNP alternatifi olmayan iki boyutlu karbon yapıya sahip olduğundan dolayı, polimerlerde alevlenme geciktirici katkı maddesi olarak da kullanılabilir. Bu nano-dolgunun ağ yapısı, çevreye ısı transferini arttırdığından dolayı, kompozit malzemelerinin alev geciktirme özelliğini artırmaktadır (Monakhova *et al.* 1988; Chatterjee and Deopura 2006; Shi and Li 2011)

Bal peteği kristal yapısına sahip olan, sp^2 hibritleşme yapan grafitin, nanotübün ve fullerenin ana yapıtaşı olan grafen ilk olarak 2004 yılında sentezlenmiştir. Grafen karbon tabanlı bal peteği ağ örgülü, π -elektron yapılı sistemler içerisinde değerlendirilirler. Grafenin yapısında grafen iki boyutlu düzlemsel yapıların çok nadir örneklerinden birisidir. Karbon atomları 1-s ve 2-p orbitallerinin birleşimi ile 120 derece açılı sp^2 hibritleşme yapar. Grafen yapısında karbon- karbon bağ mesafesi yaklaşık olarak 14,2nm' olarak ölçülmüştür (Yüce 2009).

Fullerene ve karbon nanotüpler gibi bükük yapılar normal şartlarda kararlı olarak bulunmaktayken iki boyutlu (2D) grafenin tek başına kararlı olarak bulunamayacağı ileri sürülmüştür(Landau and Sowjetunion 1937).

Gerçekten de grafenin elektronik yapısıyla ilişkin Schrödinger denklemi ile yapılan kuramsal çalışmalar da grafenin termodinamiksel olarak kararsız olacağı gösterilmiştir (Shenderova 2002). Ancak 2004 yılında Geim ve Novoselov'un tek atom kalınlığında olan grafen tabakasını mikromekanik bir yöntemle kararlı bir şekilde grafitten sıyrarak elde etmişlerdir ve bu tek tabaka üzerine yapılan deneysel incelemeler bilim ve teknoloji dünyasında adeta bir şok yaşatmıştır (Novoselov 2004).

Grafende elektron-boşluk çiftinin hareketi bir ışın fotonu gibi kütsüz nitelik gösteriyor, bu nedenle Schrödinger denklemi ile değil Dirac tipi bir denklemlle olay açıklanabiliyormuş. Geim ve Novoselov bu araştırma sonucu 2010 da Nobel Fizik Ödülü'nü almışlardır.

Grafeni olduğundan daha da çekici yapan özellik grafenin içinde elektronların fotonlar gibi davranış gösterebilmeleridir. Grafeni oluşturan karbon atomlarda mevcut bulunan elektronlar fotonlar gibi saniyede yaklaşık 800km hızla hareket etme kabiliyetine sahiptirler. Yapılmış olan teorik çalışmalar ve deneysel bulgular elektronların ve deşiklerin Brillouin bölgesi içinde bulunan K noktası etrafında (ki bu nokta Dirac noktasıolarak adlandırılır) oluşan konik bant dağılımı nedeni ile 10^6 m/s hızla hareket eden kütsüz fermiyonlar gibi davrandığını göstermektedir.

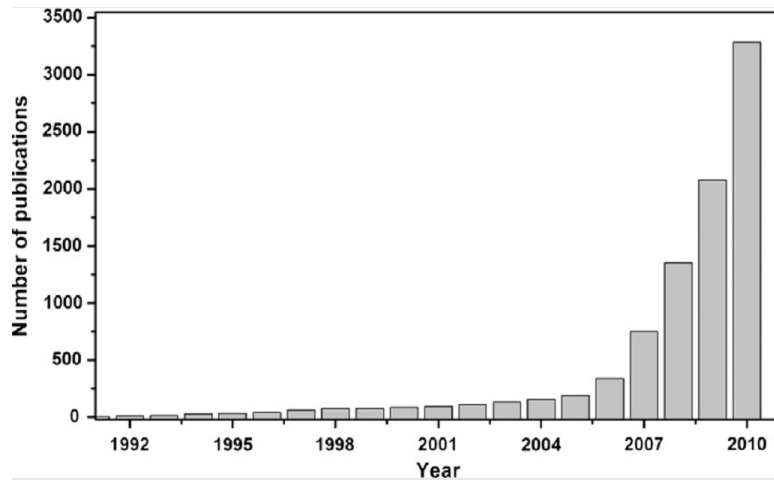
Grafen tabakalarının üst üste dizilmesi ile ortaya çıkan grafit malzemesinde iki grafen tabakası arasındaki mesafe ise yaklaşık olarak 33,5nm' olarak ölçülmüştür. Grafendeki güçlü karbon bağları ona yeryüzündeki bilinen en sağlam malzeme özelliğini kazandırmıştır. Aynı zamanda grafitteki grafen katmanlar arasında oluşan Van der Waals bağlar oldukça zayıftır. Andre Geim, Kostya Novoselov ve meslektaşları 2004 yılında basit bir tesadüfle grafen nano tabakasını grafitten ayırmasını başarmışlardır (Yüce 2009).

- Grafenin önemli özellikleri şöyledir(Celep 2007):
- Yük aktarım hareketliliği-Oda sıcaklığında ve normal şartlarda: $\sim 250,000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
- Isıl iletkenliği : $\sim 5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Elastisite modülü: 1100 GPa
- Elmaştan sert ancak esnektir: %20 oranında esneyebilir;
- Belirli oranda bükülebilir.
- Saydamdır

GNP, karbon atomlarından oluşan tek tabakalı ve iki boyutlu yapıya sahip bir nano partikül olup, 0 boyutlu fulleren (Dyachkov and Breslavskaya 1999; Ivanovskii 2003; Dinadayalane and Leszczynski 2010), bir boyutlu karbon nanotüp (Kumskov *et al.* 2012; Chorro *et al.* 2013) ve üç boyutlu grafit (Compton and Nguyen 2010; Bernal *et al.* 2012) nano malzemelerin yapı taşı oluşturur. 1940 yılında grafitin, GNP tabakalarından oluştuğu teorik olarak ispat edilmiştir (Bruch 1981). Bu sihirli bileşik bugüne kadar evrendeki en ince ve en güçlü malzeme olarak tanımlanmaktadır (Lee *et al.* 2008). Bu ince tabakalar, tek atom kalınlığında olan karbon atomlarının sp^2 bağlarından oluşmuş ve olağanüstü mekanik (Zheng and Wong 2003; Scharitel *et al.* 2003; Uhl *et al.* 2005; Kim *et al.* 2007), termal (Du *et al.* 2004; Hung *et al.* 2006), yapısal (Wang *et al.* 2013) ve elektrik (Boehm *et al.* 1994; Lebaron *et al.* 1999; Novoselov *et al.* 2004; Novoselov *et al.* 2005; Mo *et al.* 2005; Stankovich *et al.* 2006; Ajayan and Tour 2007; Ramanathan *et al.* 2008;) gibi dikkat çekici özelliklere sahip olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca çok güçlü nano-dolgu-matris yapışma özelliğinden dolayı (Huang *et al.* 2012; Ebrahimi *et al.* 2013) polimer matris malzemelerle çok yüksek mukavemetli bir nanokompozit malzemesi oluşturmaktadır (Li *et al.* 2011; Lu *et al.* 2013; Li *et al.* 2013). Bu özelliklerin bir arada toplanması, GNP'i polimer malzemelerin, mekanik, termal ve elektrik özelliklerinin geliştirmesi için ideal bir malzeme haline getirmiştir. GNP, karbonun yeni alotropu olarak 2004 yılında Geim tarafından keşfedildikten sonra, teorik ve deneysel bilim alanlarında çok dikkat çekmiştir. Yüksek pürüzlülük (Seo *et al.* 2013), mükemmel elektron mobilitesi (Bolotin *et al.* 2008; Morozov *et al.* 2008), termal mukavemeti (Yang *et al.* 2010) ve yüksek ısı iletkenliği ($\sim 5000 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) (Zhou *et al.* 2013; Pereira and Donadio 2013), optik

saydamlığı (97% Optical transmission) (Morgan 2005; Balandin *et al.* 2008; Geim, 2009; Li *et al.* 2009; Dreyer *et al.* 2010) gibi olağanüstü özelliklerinden dolayı bu nanoparçacığın kullanımı çok yüksek oranda artmıştır.

Grafen ile ilgili yayınlanan makalelerin yıllara dağılımı *ISI Web of Knowledge*'den alınan istatistiklere göre Şekil 2.55'de verilmiştir. Bu diyagram son zamanlarda grafen ile ilgili araştırmaların ne kadar arttığını göstermektedir.



Şekil 2.55. Grafenle ilgili yayınlanan makalelerin yıllara göre dağılımı (Erbatur 2012)

2.7. Diğer Nanodolgu Türleri

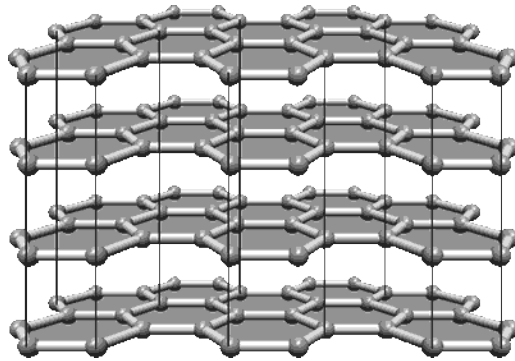
(i) Fulleren

Fullerenler, karbon atomlarının bir araya toplanması ve futbol topuna benzer kapalı küresel kafes bir yapı oluşturarak meydana gelirler. Oluşan kafeste her bir karbon atomunun üç yakın komşusu vardır. Fulleren moleküllerinde, karbon atomları güçlü π ve σ bağları kurarak, kristal içerisindeki fulleren molekülleri zayıf Van der Waals bağları ile bağlanırlar (Yılmaz 2003). Günümüzde, üzerinde en çok çalışılan ve araştırma yapılan fulleren molekülleri C_{60} ve C_{70} molekülleridir. Bu moleküller arasında en kararlı yapıya sahip olan C_{60} molekülüdür (Güler 2011).

(ii) Grafit

Grafit, karbon elementinin diğerkristali olarak tanımlanmaktadır. Grafit oda sıcaklığı ve atmosfer basıncında elmastan daha karardır. Bu maddenin kristal yapısında karbon atomları altıgen şeklinde dizilir ve çeşitli tabakalar ortaya çıkmaktadır. Grafitin yapısında, her bir karbon atomu kendisine komşu diğerkarbon atomu ile güçlü kovalent bağlar oluşturmaktadır (Şekil 2.56). Her tabakada bulunan karbon atomu, geriye kalan diğerbir elektronu ile diğertabakadaki karbon atomunun dördüncü elektronu ile zayıf van der Waals bağı oluşturur. Bu zayıf bağlardan dolayı grafit yüzeyleri birbirlerinden kolaylıkla ayrılabilir. Bu durum grafitte kaygan bir özellik kazandırmaktadır (Yüce 2009). Grafitin özellikleri kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir (William and Callister2002):

- Yüksek mukavemet,
- Yüksek sıcaklıkta kimyasal denge,
- Yüksek ısı iletkenliği,
- Düşük ısıl genleşme katsayısı,
- Yüksek elektriksel iletkenlik,
- Isıdan kaynaklanan şoklara karşı yüksek direnç,
- Yüksek gaz absorpsiyonu.



Şekil 2.56. Grafitin kristal yapısı (William and Callister 2002)

(iii) Tek cidarlı karbon nanotüpler (SWCNT)

Tek cidarlı karbon nanotüpler her iki ucu kapatılmış halde olan grafit tüpleri şeklinde olmaktadır ve 1-2 nm aralığında değişen çap değerlerine sahiptirler. Bu nanotüplerin uçları açık ya da kapalı olabilir. Ancak, genellikle iki ucu da kapalı olmaktadır (Yetim 2011). Buna rağmen, farklı yöntemlerin uygulaması ile 0,4 nm kadar küçük çaplı SWCNT'ler de üretilebilmiştir. MWCNT'ler çoğu kez altıgen-paketlenmiş kristalli demetler halinde bulunmaktadır. Bu demetler birbirlerine van der Waals bağları ile bağlanır (Andrews 2001) ve aynı zamanda 100-500 kadar MWCNT içerebilirler. Tek cidarlı karbon nanotüpler, çok cidarlılara göre, daha esnek özellik göstermektedirler ve bükülebilme, düzleştirilebilme veya kırılmadan küçük halkalar haline getirilebilme kabiliyetine sahiptirler (Örs 2009).

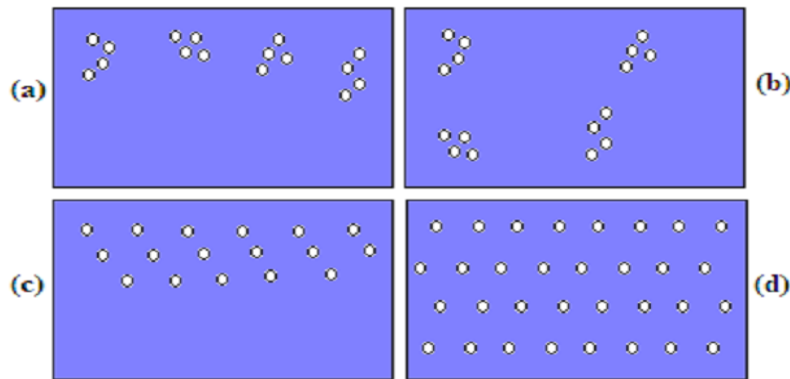
2.8. Nano Kompozit Malzemeler

2.8.1. Karbon nanotüp dolgulu polimer kompozitler

Nanoteknoloji alanında, moleküler boyutta çalışılarak, moleküler yapısı yenilenmiş daha büyük yapılar elde edilir. Malzemelerin nanometrik boyuttaki özellikleri, aynı malzemenin makro boyuttaki özelliklerine göre çok büyük oranda değişmektedir. Nano kompozit malzemeler, bir matris içerisinde nanometre boyutlarındaki parçacıkların dağılması ile elde edilen malzemelerdir (Kornmann 2001). Nanoteknoloji, yeni bilim dalı olarak, çok hızlı bir şekilde 21. yüzyılın bilimsel devrimi olarak gündemde yerini korumaktadır.

Son zamanlarda, bazı inorganik dolguların, polimer matris içerisinde nanometre boyutlarında dispersiyonu sonucunda elde edilen polimer kompozitlerin özelliklerinde, çok yüksek iyileşmeler elde edilmiştir (Novak 1993). Nanokompozit malzemeler, bir fazın diğer ikinci bir faz içerisinde nanometre (10^{-9} m) boyutlarında dispersiyonu sonucunda elde edilmekte ve en az iki fazlı malzeme grubu olarak tanımlanmaktadır (Kornmann 2001).

Nanokompozitler, geleneksel kompozitlere göre daha üstün fiziki ve kimyevi özelliklere sahiptirler. Bu malzemelerin özelliklerinin iyileşmesi, büyük ölçüde nanodolguların matris içerisinde dispersiyon oranına bağlıdır. Nanokompozit yapısındaki iyi bir dispersiyon, matris malzemesi ile nano tanecik arasındaki birim hacme karşılık gelen arayüzey alanının geleneksel kompozitlere kıyasla oldukça fazla olmasına neden olmakta ve takviye malzemesinden beklenen etki geleneksel kompozitlere göre çok daha verimli olmaktadır (Lee *et al.* 2012). Başka bir deyişle, geleneksel kompozitlerde %30–50 takviye fazı ile elde edilen özellikler, nanokompozitlerde %2–7 nano tanecik takviyesi ile sağlanmaktadır. Nanodolgu malzemelerin sahip olduğu özelliklerden, nanokompozit yapısında en verimli bir şekilde faydalanmak için, bu malzemelerin nanokompozit yapısında iyice disperse edilmesi ve eksfolasyonunu sağlamak gerekmektedir. Nanokompozit yapısında nanodolgu malzemelerin dağılım ve dispersiyon ihtimalleri Şekil 2.57’de gösterilmiştir.



Şekil 2.57. Nanokompozit yapısında nano dolgu malzemelerin dispersiyonu ve dağılım ihtimalleri (a) kötü dispersiyon ve kötü dağılım, (b) kötü dispersiyon ve iyi dağılım, (c) iyi dispersiyon ve kötü dağılım, (d) iyi dispersiyon ve iyi dağılım (Ersoy 2012)

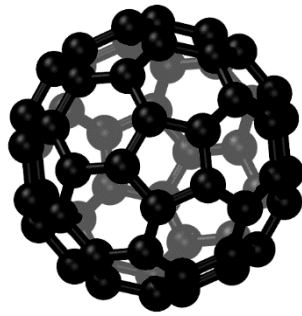
Nanokompozit yapılarda matris malzemesi olarak polimerler, metaller ya da seramikler kullanılabilir. Bu kapsamda ilk aşamalar polimerler kullanılarak kaydedildiğinden dolayı şimdiye kadar yaygın olarak kullanılan matris malzemeleri bunlardır. Polimerik malzemeler içinde yaygın olarak en çok kullanılan polimer malzemesi epoksi, doymamış polyester, polipropilendir ve poliamittir (Chin *et al.* 2001).

Polimerlerin içersine makro ya da mikro boyutlarda takviye malzemelerinin ilavesi ile elde edilen polimer kompozit malzemeleri, daha öncelere dayanan bir teknoloji iken, kompozit teknolojisinde nanometre boyutunda (1 nm kalınlığında ve 100-1000 nm uzunluğunda) parçacıklar kullanılması, son zamanlarda araştırmacıların dikkatini çekmiştir (Bağcı 2006).

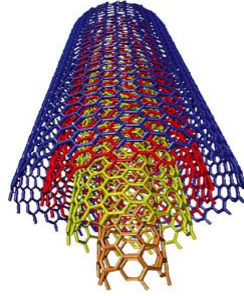
Polimer nano kompozit malzemeler, nanometre boyutundaki takviye tanecikler ile polimer matrisin moleküler seviyesinde olan karışımlarıdır. Polimerler bugüne kadar metaller, mineraller, elyaf malzemeleri gibi pek çok taneciklerle takviye edilerek kompozit malzeme üretiminde kullanılmışlardır. Takviye maddelerinin boyutları küçüldükçe yüzey alanlarının çoğalmasıyla ortaya çıkan güçlü etkileşim sonucunda polimer nano kompozitlerin özellikleri daha çok gelişmiştir. Böylece polimer nano kompozitlerin mukavemetleri, toklukları, sertlikleri, ısıl dayanımları artmış, termal stablileleri, camsı geçiş sıcaklıkları (T_g), termal genleşme katsayıları (CTE), bariyer özellikleri iyileşmiş, elastisite modülleri ve kırılma dayanımları gibi mekanik özellikleri artmış, aynı zamanda maliyetleri de düşmüştür (Bağcı 2006).

Aslında nanokompozitlerin içersinde en azından bir nanometrik boyutta taneciğin bulunması gerekmektedir. Nano kompozitler, nano boyutta ebatlarına göre aşağıdaki gibi tasnif edilirler (Lee *et al.* 2011):

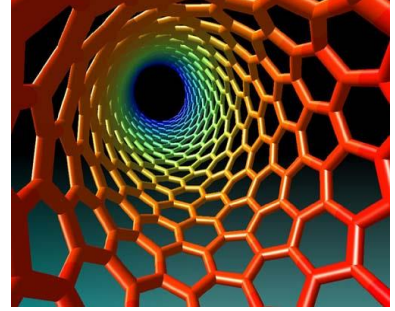
- Eğer nanodolgu malzemesi, üç boyutta nano ebata sahip ise *isodimensional* nano malzemesi olarak tanımlanmaktadır. Bu tür nano malzemeye örnek olarak, küresel fulleren (Fullerenes) dolguları verilebilir (Şekil 2.58-a).
- Bazı nanodolgu malzemeler iki boyutta nano ebata sahiptirler. Hâlbuki üçüncü boyutları nano boyutundan yüz kat daha yüksek olabilir ve hatta mikro boyutlara kadar varabilirler. Bu tür nano dolgu malzemelere örnek olarak karbon nanotüpler verilebilir (Şekil 2.58-b ve c).
- Üçüncü tür nano dolgu malzemeleri, iki boyutta yüksek oranda değerlere sahiptirler ve aynı anda üçüncü boyutta nano boyutunda bulunmaktadırlar. Bu grup nanodolgulardan en meşhur ve yaygın olanı grafen tabakalarıdır (Şekil 2.58-d).



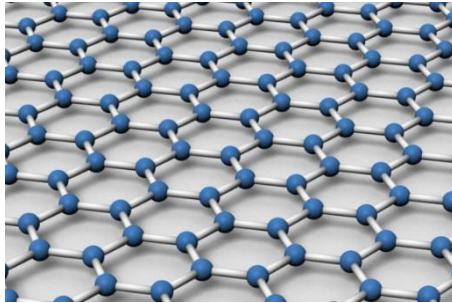
(a)



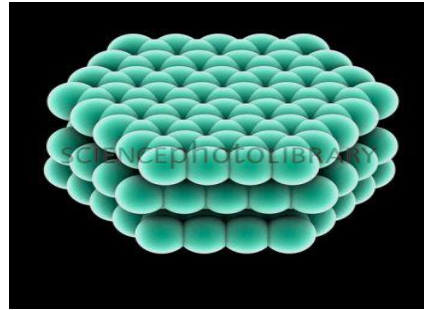
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 2.58. Yaygın olarak ve bu çalışmada kullanılan nanodolgu malzemeleri

(a) *Isodimensional* fulleren nanodolgu (b) Tek cidarlı karbon nanotüp nanodolgu (c) Çift cidarlı karbon nanotüp (d) Grafen nanolevhası (e) Grafit yapısı (Lee *et al.* 2011)

Nano kompozit üç boyutta da nanometrik seviyede olursa ‘isodimensional’ nanotanecikler olarak adlandırılır ve ‘in-situ’ sol-gel metodu kullanılarak elde edilirler. Kübik silis nano tanecikleri buna bir örnek olarak verilebilir (Bağcı 2006a).

Eğer nano kompozit iki boyutta nanometrik ve diğer boyutta daha büyük boyda olursa, nanotüpler veya kil kristalleri olarak adlandırılırlar. Karbon nano tüpler bu tür nano kompozitlere örnek olarak verilebilir. Bunlar malzemelerin güçlendirmesinde nano dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Üçüncü tür nano dolgular ise, sadece tek boyutta nanometrik seviyededirler. Bu tür nano dolgu malzemeleri bir defter yaprağı gibi sadece tek bir boyutta nanometrik seviyededirler ve diğer boyutlarda ise mikro boyutlarda bile olabilirler. Bu nanodolgu türlerinden üretilen malzemeler, kristal

katmanlı polimer nano kompozitler adı altında bir araya gelmektedirler. Bu malzemeler, polimerlere *intercalation* (araya girme) metodu uygulanarak elde edilirler ve bu da kristal tabaka galerilerinde gerçekleşmektedir (Bağcı 2006a).

Dünyada ilk kez olarak, Toyota araştırma grubunun, poliamid-6 ve montmorillonit kullanarak ürettiği polimer nano kompozit malzemenin mekanik ve bariyer özelliklerinde çok yüksek oranda artış sağlamıştır (Kornmann 2001).

Nano kompozitlerin yapısında nano boyutlarda tanecikler bulunduğu için, dolgu maddesi ve matris malzemesi arasında çok büyük oranda yüzey alanı oluşmaktadır. Bundan dolayı, bu kompozitlerin çok önemli özellikleri bu büyük yüzeyler arası etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Klasik kompozitlerde karbon, kevlar, cam ve bazalt elyaflarında olduğu gibi mikrometre boyutunda tanecikler bulunduğu için, bu yüzeysel etkileşim çok daha düşüktür (Velde 1992).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kullanılan Hipotezler

Polimer reçine malzemeleri, yüksek termal genleşme katsayısına (CTE) sahip olduklarından ($\alpha=20$ ila $60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) dolayı, sıcaklık değişiminden çok yüksek oranda etkilenmektedirler. Karbon, bazalt ve epoksi malzemelerinin termal genleşme katsayılarının farklı olmasından dolayı, $+120^{\circ}\text{C}$ ve -40°C aralığında termal çevrim esnasında, malzemelerde farklı oranda şekil değiştirmeler olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan epoksi malzemesi yüksek CTE değerine sahip olduğundan dolayı, sıcaklık artışıyla birlikte büyük oranda termal genleşme göstermektedir. Hâlbuki karbon elyafının CTE değeri negatif olduğu için, sıcaklığın artmasıyla birlikte büzülme meydana gelmektedir. Kompozitlerin mukavemetinin yüksek olması için, elyaf-matris arayüzeylerinde bağ kuvvetlerinin yüksek olması gerekmekte ve delaminasyon olayının önlenmesi ve malzemenin mukavemeti bu bağların gücüne bağlı olmaktadır. Bu tür malzemelerde sıcaklık değişimi olduğunda, kompozit yapısında kullanılan malzemelerin CTE değerlerinin farklı olmasından dolayı, malzemeler farklı genleşme oranı gösterirler ve elyaf-matris arayüzeylerinde uyumsuzluk meydana gelmekte ve bu gerilme yığılmalarına sebep olmakta ve böylece kompoziti bir arada tutan bağlar kırılmakta, dolayısıyla arayüzeylerde mikro çatlaklar ortaya çıkmaktadır. Oluşan mikro çatlaklar, aşırı derecede elyaf-matris arayüzey tutunmasını etkilemekte ve tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) düşmektedir. Buradaki mikro çatlakların sayısı, termal çevrimin devam etmesi ile artmakta ve yoğunlaşmasıyla ILSS değeri azalmakta ve sıfıra yaklaştığında elyaf-matris arayüzeylerinde ayrışmalar meydana gelmektedir. Sıcaklık sürekli olarak değiştiğinde bağların kırılması daha hızlı olarak devam etmekte ve mikro çatlakların sayısının artmasıyla birlikte, malzemenin çekme mukavemeti, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinde azalma meydana gelmekte ve malzemede istenmeyen delaminasyonlar ortaya çıkmaktadır. Bu problemin çözümüyle ilgili literatürde pek fazla çalışmaya rastlanmamış olup, elyafla matris malzemesinin CTE farkından kaynaklanan bu problemin çözümü için, bu farkı gidermeğe yoğunlaşmak gerekmektedir. Bu farkı gidermek için üç farklı yöntem göz önüne alınacaktır:

i) Farklı malzemelerin kullanılması: Bu çalışmada, daha önce de bahsedildiği gibi, seçilen elyaf ve matris malzemesi, kullanım şartlarına uyumlu olması gerekmektedir. Tasarlanan malzeme uçak gövdesinde kullanım şartlarını sağlamak için çok yüksek mukavemet, darbe dayanımı, sürtünme dayanımı, yüksek sıcaklık ve termal çevrim dayanımına sahip olması gerekir. Ayrıca, uçaklarda, yüksek ivme, kontrol kabiliyeti, enerji tasarrufu, hafiflik, düşük maliyet gibi nedenlerden dolayı mümkün olduğunca büyük oranda kompozit kullanımı gerekmektedir. Bu konuda yapılmış araştırmalara göre, bütün bu özelliklere havi bir malzeme elde etmek oldukça zordur. Bundan dolayı bu çalışmada, bahsi geçen problemi minimize etmek amacıyla, hibrit kompozit malzemeler üzerinde çalışılmaktadır. Bu amaçla, malzemeler seçilerek optimize edilmiş olup, bundan dolayı, malzeme değişikliğine gidilmektedir.

ii) Elyaf yüzey işlemleri: Bu işlemler, oksidatif ve oksidatif olmayan işlemler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bu yöntemlerin her biri başka metotlar kullanılarak yapılabilmektedir. oksidatif işlemler, sıvı fazda oksidasyon, gaz oksidasyonu ve plazma oksidasyonu olmak üzere üç şekilde uygulanmaktadır. Oksidatif olmayan işlemler ise, viskerleme, plazma polimerizasyonu, polimer aşılama ve pirolitik karbon depozisyonu şeklinde gruplandırılabilir. Elyaf yüzey işlemleri, ILSS değerini artırmak ve malzemenin termal çevrime karşı dayanımını artırma açısından çok uygun bir metot sayılmaktadır.

iii) Malzemeleri modifiye etme: buradaki temel amaç, kullanılan malzemelerde modifikasyon yaparak, bileşen malzemelerin CTE farklarını en aza indirmektedir. Karbon elyafın CTE değeri $-1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ile $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ arasında değişmekte olup, bu değer bazalt elyafı için 7 ila $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ arasında ve epoksi için ise 50 ila $65 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ aralığında değişmektedir. Buna göre en büyük fark, karbon elyafı ile epoksi malzemesi arasında olup, bu malzemelerden müteşekkil kompozitin mukavemetinin azalmasına ve delaminasyon meydana gelmesine neden olmaktadır. Bilindiği gibi karbon elyafın CTE değerini artırmak oldukça zor olup, çok yüksek maliyet gerektirmektedir. Bu durumda en uygun çözüm olarak, matris malzemesinin CTE değerinin indirgenmesiyle karbon ve bazalt CTE değerine yaklaştırılması hedeflenmektedir. Bu amaca yönelik olarak, epoksi malzemesine kil, karbon nanotüp, flören ve GNP gibi nanopartiküller eklenmesi amaçlanmaktadır.

Bugüne kadar, termal çevrimin polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştıran çok az sayıda çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte, nanotaniciklerle takviye edilmiş hibrit polimer kompozitler (özellikle kumaş elyaf dokuma takviyeli) üzerinde termal çevrimin araştırıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bundan dolayı bu çalışmada, uçuş esnasında bir uçağın gövdesinde sürtünmeden kaynaklanan sıcaklık değişimi, çok yüksek irtifalardaki düşük sıcaklık, yere indiğinde yüksek sıcaklık ve bunların sürekli değişiminden kaynaklanan termal yüklerden dolayı yüksek gerilmeler, burkulma, darbe gibi mekanik yüklerin etkileri araştırılmaktadır. Bu amaçla, uzun kullanım sürelerine uygun, dayanıklı, hafif ve düşük maliyetli malzemeler tasarlanmaya çalışılmaktadır. Çalışmada, üretilen 15 çeşit malzeme üzerinde, termal çevrimin mekanik ve termal özellikler üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmektedir. Bu malzemeler aşağıda listelenmektedir.

1. Karbon elyaf takviyeli örgülü epoksi kompozitler,
2. Bazalt elyaf takviyeli örgülü epoksi kompozitler,
3. Karbon- Bazalt elyaf takviyeli örgülü epoksi intra-ply hibrit kompozitler,
4. Karbon elyaf takviyeli örgülü %0,1 oranında GNP dolgulu epoksi kompozitler,
5. Karbon elyaf takviyeli örgülü %0,5 oranında GNP dolgulu epoksi kompozitler,
6. Bazalt elyaf takviyeli örgülü %0,1 oranında GNP dolgulu epoksi kompozitler,
7. Bazalt elyaf takviyeli örgülü %0,5 oranında GNP dolgulu epoksi kompozitler,
8. Karbon Bazalt elyaf takviyeli %0,1 oranında GNP dolgulu ve örgülü epoksi intra-ply hibrit kompozitler,
9. Karbon Bazalt elyaf takviyeli %0,5 oranında GNP dolgulu ve örgülü epoksi intra-ply hibrit kompozitler,
10. Karbon elyaf takviyeli örgülü %0,1 oranında CNT dolgulu epoksi kompozitler,
11. Karbon elyaf takviyeli örgülü %0,5 oranında CNT dolgulu epoksi kompozitler,
12. Bazalt elyaf takviyeli örgülü %0,1 oranında CNT dolgulu epoksi kompozitler,
13. Bazalt elyaf takviyeli örgülü %0,5 oranında CNT dolgu içeren epoksi kompozitler,
14. Karbon Bazalt elyaf takviyeli %0,1 oranında CNT dolgu içeren örgülü epoksi intra-ply hibrit kompozitler,

15. Karbon Bazalt elyaf takviyeli %0,5 oranında CNT dolgu içeren örgülü epoksi intra-ply hibrit kompozitler

Üretilen malzemelerde kullanılmış olan elyaf, reçine, nano malzeme türleri ve bu bileşenlerin hacim oranları Çizelge 4.1’ de verilmektedir.

3.2. Üretim Aşamaları

3.2.1. Elyaf kumaş dokuma

Çalışmada kullanılan karbon ve bazalt elyaf türleri bobin olarak alındıktan sonra dokunup, kumaş haline getirilmesi için Spinteks Tekstil A.Ş./ Denizli’ye gönderilmiş ve üç farklı elyaf dokunmuştur:

- Twill karbon kumaş
- Twill bazalt kumaş
- Twill intra-ply bazalt-karbon hibrit kumaş.

Bu aşamada dokunan kumaşlar, gerekli boyutlarda kesildikten sonra, kompozit üretimi için İzmir’de bulunan Fibermak Mühendislik Ltd. Şti.’ne gönderilmiştir. Şekil 3.1’de Spinteks Tekstil A.Ş.’inde kumaş dokuma atölyesi görülmektedir.



Şekil 3.1. Spinteks Tekstil A.Ş. 'inde kumaş dokuma atölyesi

Şekil 3.2'de kesilmiş kumaşlar görülmektedir. Bu kumaşlar şekilde görüldüğü gibi, itina ile twill tipinde dokunarak, kompozit üretimi için hazırlanmışlardır.



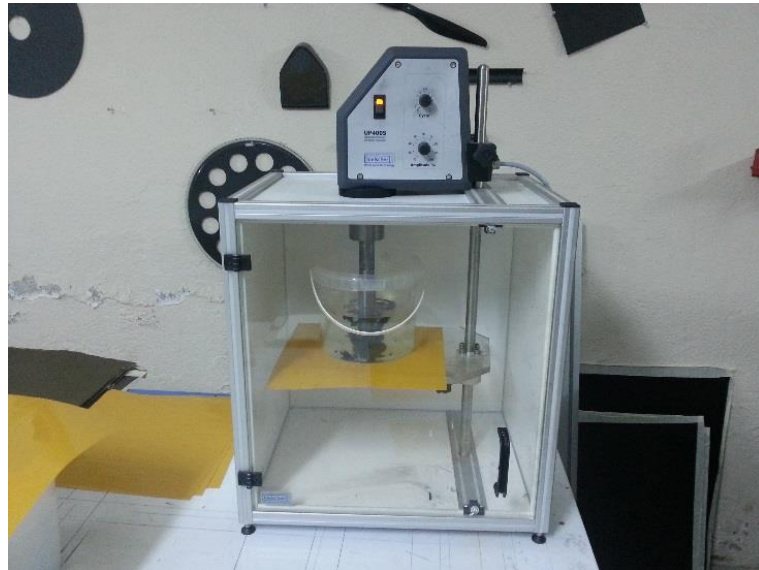
Şekil 3.2. Gerekli boyutlarda kesilmiş kumaşlar

3.2.2. Nano malzeme dolgulu epoksi reçinesinin hazırlanması

Epoksi hazırlama aşamasında, epoksi reçinesine ultrasonik karıştırıcı kullanılarak 2 tür nano malzeme (GNP ve CNT nano tanecikler) iki farklı hacim oranında disperse edilmiştir. Bu aşama Fibermak Mühendislik Ltd. Şti.'inde UP 400 S karıştırıcı kullanarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan 4 tür nano katkılı epoksi reçineleri aşağıda verilmiştir:

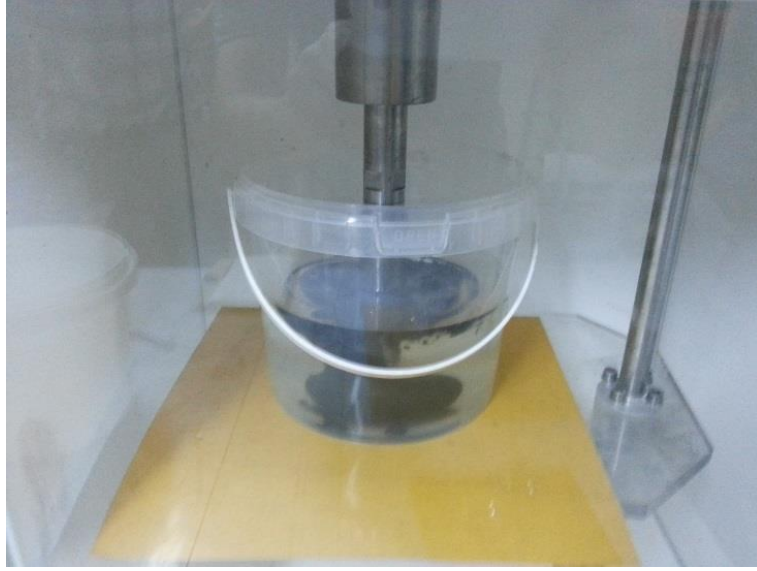
- Ağırlık olarak %0,1 CNT katkılı epoksi reçinesi
- Ağırlık olarak %0,5 CNT katkılı epoksi reçinesi
- Ağırlık olarak %0,1 GNP katkılı epoksi reçinesi
- Ağırlık olarak %0,5 GNP katkılı epoksi reçinesi

Ultrasonik karıştırıcıları titreşim yoluyla sıvı içinde bulunan partikülleri atomize ederek dağıtılmasında ve karıştırılmasında kullanıldığı gibi, kimyevi reaksiyonların hızlandırılmasında da kullanılabilirler. Nano malzemenin tam homojen karışımını sağlamak için Şekil 3.3'te gösterilen ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Kullanılan UP 400 S ultrasonik karıştırıcı

Bilindiği gibi çalışmada kullanılan GNP ve CNT nano tanecikler çok yüksek en/ boy oranına sahip olduklarından dolayı, reçinede dağılım esnasında aralarında güçlü kovalant bağlar oluşturarak topaklanabilirler. Nano taneciklerin topaklanması termal yorulma öncesi ve sonrası malzemede artık gerilmeler oluşturarak kompozit yapısında delaminasyon olayına neden olabilirler. Bu olayı önlemek için bütün dispersiyon ve karışım işlemleri Şekil 3.4'te gösterildiği gibi ultrasonik karıştırıcı vasıtasıyla yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.4. GNP veya CNT nano taneciklerin ultrasonik karıştırıcı ile disperse edilmesi

Şekil 3.5'te ultrasonik karıştırıcı kullanılarak disperse edilmiş CNT veya GNP katkılı reçine malzemesi gösterilmektedir. Bu nano katkılı reçine malzemesi kompozit üretimi için kullanıma hazırdır.



Şekil 3.5. Kullanıma hazır nano katkılı epoksi reçinesi

3.2.3. Kompozit üretimi

Kompozit üretimi için vakum-torbalama yöntemi kullanılmıştır. Spinteks'te dokunan kumaşlar, Fibermak Mühendislik Ltd. Şti.'de istiflendikten sonra, matris malzemesi ile birleştirilerek kompozit plaklar üretilmektedir. Vakum-infüzyon yöntemi ile gerçekleşen kompozit üretim aşamaları aşağıda sıralanmıştır:

- Üretimin gerçekleştirileceği vakum torbalama cihazının platformu ıslak bir bezle iyice temizlenir ve sonra kuru bez ile silinerek kurutulur.
- Ayırıcı tabaka cihaz platformu üzerine serilir (Şekil 3.6).
- Birinci kumaş levha ayırıcı tabakanın üzerine serilir (Şekil 3.6).
- İstiflenmiş elyaf tabakaların boyutlarından en az 50'şer mm dışındaki çevre boyunca yapıştırıcı bantlar yapıştırılır.



Şekil 3.6. Kesilmiş bazalt kumaşların ayırıcı tabaka üzerine serilmesi

- Kesilen kumaşların üzerine reçine dökülür ve kumaşta bulunan liflerin arasına sızması için el-yatırma ile emdirilir (Şekil 3.7 ve 3.8).



Şekil 3.7. Kumaşlar üzerine reçine döküm aşaması



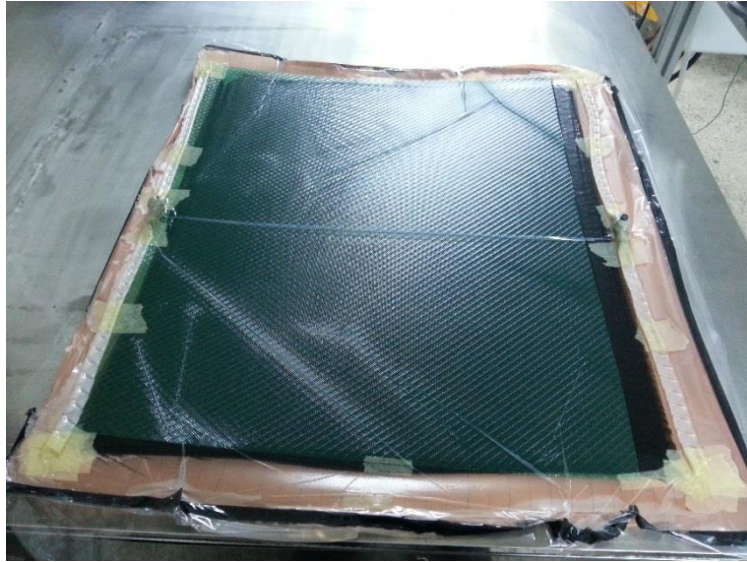
Şekil 3.8. Reçinenin el-yatırma ile kumaşlara emdirilmesi



Şekil 3.9. Peel-ply kumaşın uygun boyutlarda kesilmesi

- Ayırıcı tabaka üzerine serilmiş olan kumaşların üzerine Peel-ply serilir. Peel-ply kesilirken 3 kenardan 20'şer mm ve diğer kenardan (reçine hattı) 60 mm fazla olacak şekilde kesilmelidir. Peel-ply kullanılmasının amacı vakum esnasında reçinenin hızlı ve homojen dağılımını sağlamaktır(Şekil 3.9).

Şekil 3.10’da kompozit yapısında matris malzemesi olarak kullanılan reçine malzemesinin fazla olan kısmının transferini gerçekleştiren spiral hattının kuruluş tarzı görülmektedir. Bu hat spiral hortumlar ve üç-yollardan oluşmaktadır.



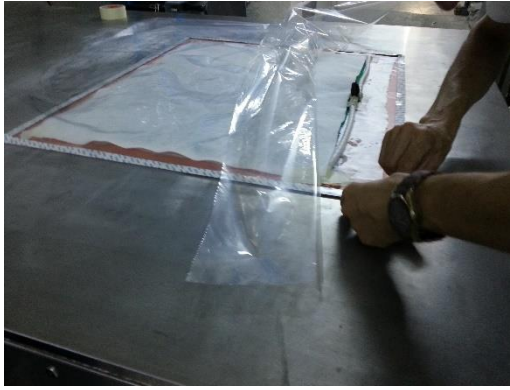
Şekil 3.10. Kurulmuş spiral reçine hattının görüntüsü

- Vakum battaniyesinin kesilip, peel-ply üzerine serilmesi Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Vakum battaniyesinin peel-ply üzerine serilmesi

- Vakum işlemini gerçekleştirmek amacıyla kullanılan vakum torbası çok dikkat ile kumaşlar ve peel-ply üzerine serilip(3.12a), bantlar kullanarak herhangi bir sızma ihtimalinin önüne geçilir (Şekil 3.12b).



(a)



(b)

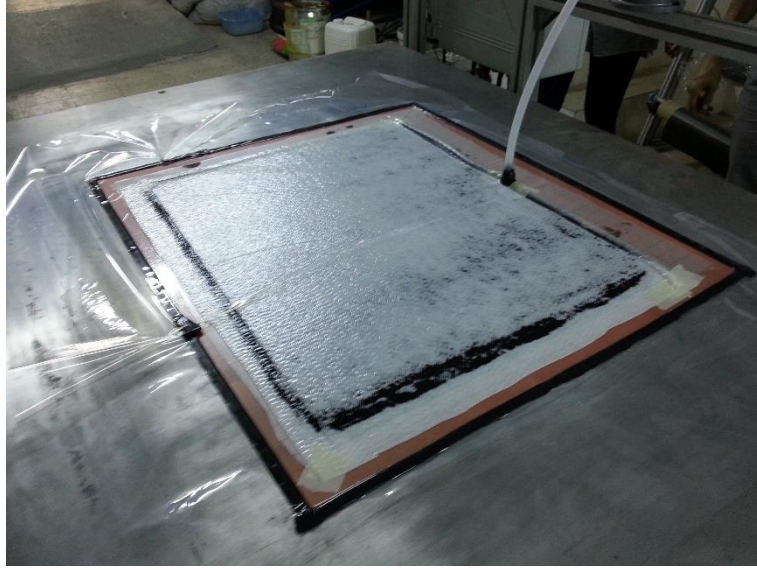
Şekil 3.12. Vakum ortamının hazırlanması (a) vakum torbasının serilmesi, (b) vakum torbasının yapıştırılması

- Şeffaf hortum bir ucundan spiral hortuma bağlanır. Spiral hortum fazladan bırakılmış (60 mm) peel-ply ile sarılır ve çözülmemesi için kâğıt bant ile yapıştırılır. Reçine transfer hortumunun takılması Şekil 3.13’de görüntülenmiştir.



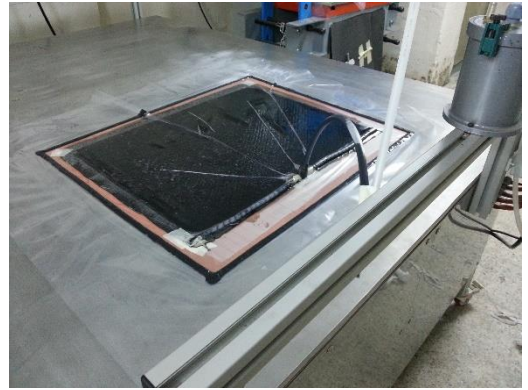
Şekil 3.13. Reçine transfer hortumunun takılması

- Sistem kurulduktan sonra vakum pompası çalıştırılıp, vakum torbasının çeşitli kısımları sızdırmayı önlemek amacıyla kaç kez kontrol edilmektedir (Şekil 3.14).



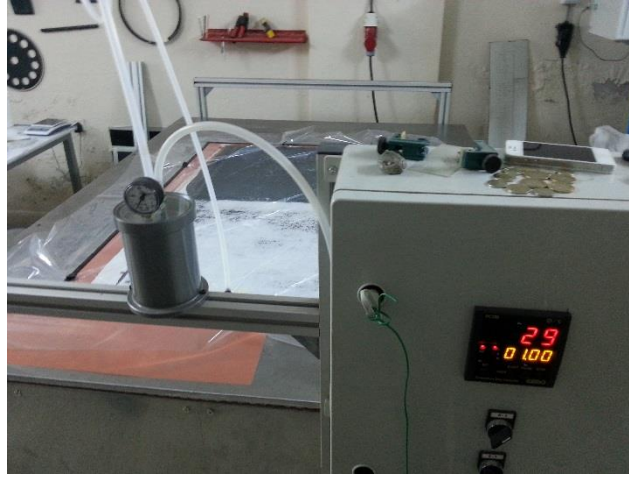
Şekil 3.14. Vakum pompasının çalıştırılması

- Vakum ortam nedeni ile fazla olan reçine malzemesi emilip ve hortuma dolmaktadır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Reçine transferi

Vakum esaslı kompozit üretim cihazının düzeneği Şekil 3.16’da görülmektedir.



Şekil 3.16. Vakum-torbalama cihazı

Vakum torbalama yöntemi kullanılarak üretilmiş kompozit levhasının görüntüsü Şekil 3.17’de verilmektedir.



Şekil 3.17. Üretilmiş kompozit levha

3.3. Çalışma kapsamında üretilen kompozitler

Çalışma kapsamında üretilen kompozit malzemeler, karbon ve bazalt elyafı, hibrit elyaf ve CNT ve GNP dolgulu epoksi reçinelerinin birleştirilmesi ile üretilmektedir. Üretilen kompozitlerin özelliklerini belirlemek amacıyla bazı deneyler yapılmıştır. Çizelge 3.1’de çekme, eğilme ve ILSS deneyleri için kullanılan numunelerin plakaların içeriği

sayısı ve kalınlıkları verilmektedir. Bu kapsamda 15 adet plaka imal edilmiş ve su jeti ile ASTM kriterlerine göre numuneler kesilerek üretilmişlerdir.

Çizelge 3.1. Çekme, eğilme ve ILSS deneyleri için üretilmiş kompozit plaklar ve kalınlıkları

	Pür	%0,1 CNT	%0,5 CNT	%0,1 GNP	%0,5 CNT	Kalınlık
Bazalt Elyaf	1 adet plaka	1 adet plaka	1 adet plaka	1 adet plaka	1 adet plaka	2 mm
Karbon Elyaf	1 adet plaka	1 adet plaka	1 adet plaka	1 adet plaka	1 adet plaka	2,5 mm
Bazalt/karbon	1 adet plaka	1 adet plaka	1 adet plaka	1 adet plaka	1 adet plaka	3mm

Darbe ve mod I kırılma deneyi için üretilmiş plakaların kalınlıkları 5 mm olup, Çizelge 3.2'ye göre bazalt, karbon elyafı ve epoksi reçinesinden oluşmaktadırlar. Bu plakalarda nanodolgu malzemesi olarak ağırlık olarak %0,1 oranında grafen tanecikleri kullanılmıştır. Bu kapsamda pür ve nanodolgu içeren 6 adet plaka üretilmiştir.

Çizelge 3.2. Darbe ve mod I kırılma plakları ve kalınlıkları

	Pür	%0,1 GNP	Kalınlık
Bazalt Elyafı	1 adet plaka	1 adet plaka	5mm
Karbon Elyafı	1 adet plaka	1 adet plaka	6mm
Bazalt/karbon	1 adet plaka	1 adet plaka	7mm

3.4. Numune Kesimi

Üretilmiş olan kompozit plaklar 700×700 mm² boyutlarında olup, bu levhalardan, ASTM standartlarına göre, numuneler su jeti ile kesilerek elde edilmiştir. Su jeti ile numune elde edilmesi Şekil 3.18'te görülmektedir.



Şekil 3.18. Üretilen plakların kesim aşaması

Elde edilen, çekme, eğilme ve ILSS testlerine tabi tutulmuştur. Numunelerle ilgili bilgiler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çekme, Eğilme ve ILSS testlerinde kullanılan numune sayıları

	Pür	%0,1 CNT	%0,5 CNT	%0,1 GNP	%0,5 CNT
Karbon	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune
Bazalt	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune
Bazalt/karbon Hibrit	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune

Çizelge 3.3'e göre test başına her malzemeden 20 adet numune kesilmiştir. Böylece, her test için 60 adet numune kesilmiş ve çekme, eğilme ve ILSS deneyleri için numunelerin sayısı 900 olmaktadır. Darbe ve kırılma testleri için numuneler, 20 tabakalı kompozit plaklardan 20'şer adet kesilmiştir.

Çizelge 3.4. Darbe ve kırılma testleri için kesilmiş olan numune sayıları

	Pür	%0,1 CNT	%0,1 GNP
Karbon	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune
Bazalt	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune
Bazalt/karbon Hibrit	20 adet numune	20 adet numune	20 adet numune

Çizelge 3.4'e göre test başına her malzemeden 20 adet kesilmiştir. Böylece darbe ve mod I deneyleri için toplam 240 adet numune üretilmiştir. Çizelge 3.3 ve 3.4'te verilen numune sayıları göz önüne alındığında, çalışmada kullanılan numune sayıları toplam olarak 1140 olmaktadır.

ASTM standartlarına göre elde edilmiş numuneler kesildikten sonra zımparalanarak yüzeyleri düzgün hale getirilmiştir. Daha sonra numunelerin boyutları tekrar ölçülmüş ve Çizelge 3.5'te görüldüğü gibi kodlanmıştır.

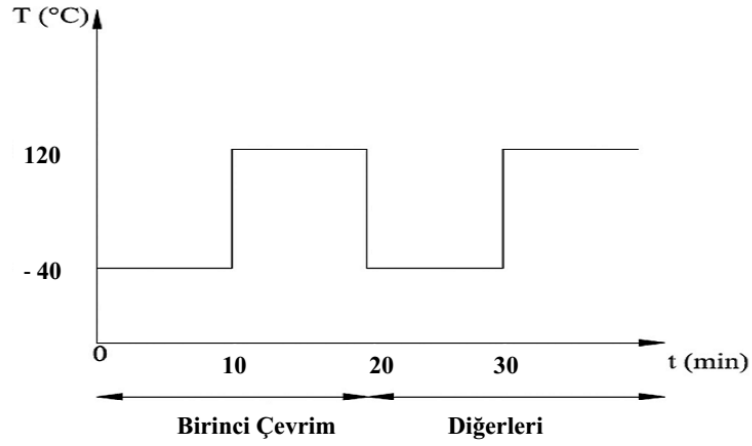
Çizelge 3.5. Kesilmiş olan numunelerin kodları

SAYI	KODLAMA	Numune
1	C-Pür	Karbon Elyaf/Epoksi kompozit malzeme
2	B-Pür	Bazalt Elyaf/Epoksi kompozit malzeme
3	CB-Pür	Bazalt-Karbon İnter-Ply Hibrit Elyaf/Epoksi kompozit malzeme
4	C-0,1 CNT	Karbon Elyaf takviyeli %0,1 CNT dolgulu Epoksi kompozit malzeme
5	B-0,1 CNT	Bazalt Elyaf takviyeli %0,1 CNT dolgulu Epoksi kompozit malzeme
6	CB-0,1 CNT	Bazalt-Karbon intra-ply Elyaf takviyeli %0,1 CNT dolgulu Epoksi kompozit malzeme
7	C-0,5 CNT	Karbon Elyaf takviyeli %0,5 CNT dolgulu Epoksi kompozit malzeme

Çizelge 3.5. (devam)

8	B-0,5 CNT	Bazalt Elyaf takviyeli %0,5 CNT dolgulu Epoksi kompozit malzeme
9	CB-0,5 CNT	Bazalt-Karbon Elyaf takviyeli %0,5 CNT dolgulu Epoksi kompozit malzeme
10	C-0,1 GNP	Karbon Elyaf takviyeli %0,1 GNP dolgulu Epoksi kompozit malzeme
11	B-0,1 GNP	Bazalt Elyaf takviyeli %0,1 GNP dolgulu Epoksi kompozit malzeme
12	CB-0,1 GNP	Bazalt-Karbon Elyaf takviyeli %0,1 GNP dolgulu Epoksi kompozit malzeme
13	C-0,5 GNP	Karbon Elyaf takviyeli %0,5 GNP dolgulu Epoksi kompozit malzeme
14	B-0,5 GNP	Bazalt Elyaf takviyeli %0,5 GNP dolgulu Epoksi kompozit malzeme
15	CB-0,5 GNP	Bazalt-Karbon Elyaf takviyeli %0,5 GNP dolgulu Epoksi kompozit malzeme

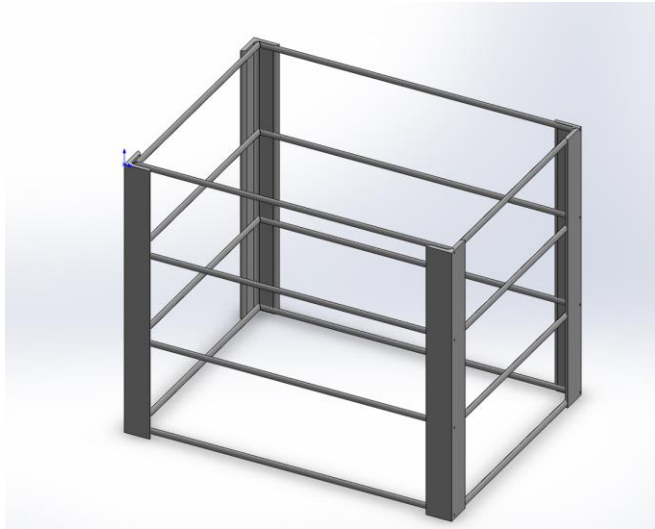
Üretilmiş kompozit numuneler, termal çevrim kapsamında Şekil 3.20’de tasarlanmış olan aparat içerisine yerleştirildikten sonra 10 dakika -40°C ve hemen sonra aynı süre $+120^{\circ}\text{C}$ ’de bekletilmiştir. Termal çevrim sıcaklık profili Şekil 3.19’da verilmektedir. Buna göre, termal çevrimin bir döngüsünde, sıcaklık -40 ile $+120^{\circ}\text{C}$ aralığında değişmekte olup, her döngü 20 dakika sürmektedir. Bu termal çevrim her numune için 20, 40, 60, 80 kere tekrar edilmiştir. Daha sonra, bu numuneler yeniden, aynı mekanik ve termal testlere tabi tutulmuşlar ve malzemelerin termal çevrim öncesi ve sonrası mekanik ve termal özellikleri karşılaştırılmıştır. Böylece malzemelerin özelliklerinde meydana gelen değişimler belirlenmiştir.



Şekil 3.19. Zamana bağlı olarak sıcaklık değişimi ve termal çevrim

Her çevrimin tamamlanması 20 dakika sürdüğüne göre 20 çevrim için 400 dakika, 40 çevrim için 800 dakika, 60 çevrim için 1200 dakika ve 80 çevrim için 1600 dakika zamana ihtiyaç vardır. Böylece bir deneyin tamamlanma aşaması 27 saat sürmektedir.

Numune sayısının fazla olduğundan dolayı numuneleri teker teker termal çevrime maruz bırakmak makul değildir. Bundan dolayı, numuneleri toplu şekilde fırın ve derin dondurucuya koymak gerekmektedir. Böylece numuneleri -40 ile +120°C'lik sıcaklıklara maruz bırakmak için Şekil 3.20'de iskelet tasarlanmıştır.



Şekil 3.20. Numuneleri taşımak için kullanılan iskelet

Numunelerin yanmaması için, çubuklar yalıtkan tellerle sarılmışlardır. Çekme numunelerini ihtiva eden taşıma iskeleti görüntüleri Şekil 3.21’de verilmektedir.



(a)



(c)



(d)

Şekil 3.21. Termal çevrim için kullanılan numune taşıma iskeleti a) Çekme numune deneyleri, b) Derin dondurucu içerisinde, c) Fırın içerisinde

Fırının ısıtma sistemi çevre cidarlarından olduğundan dolayı, tasarlanan taşıma iskeleti ile numuneler üzerinde daha homojen sıcaklık dağılımı sağlanabilmektedir. Ayıca bu iskelet sayesinde çubuklar ve numuneler arasındaki temas yüzeyi azaldığı için, numunelerin bölgesel ısınma olmamaktadır. Derin dondurucuda 4 ayrı odacık bulunduğu için, her odacıkta sıcaklık dağılımı homojendir. Böylece fırında ve derin

dondurucuda bulunan numuneler termal çevrim esnasında homojen olarak ısıtılıp-soğutulmuşlardır.

3.5. Yapılan Deneyler

Üretim ve kullanım esnasında çeşitli işlemler ve şartların malzemeler üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla bazı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birincisi, malzemenin üretim ve kullanım şartlarına maruz bırakılmadan önce ve sonra, bazı özelliklerini değişik deneyler kullanarak belirleyip daha sonra bu değerleri kıyaslayarak özelliklerin etkileşimini incelemektir. Bilindiği gibi, malzemeler mekanik, termal, elektriksel gibi bazı özellikleri üzerlerinde barındırırlar. Bu özelliklerin belirlenmesi için her özelliğe ait parametrelerin bulunması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, bazı kompozit malzemelerin termal yorulmadan neşet eden mekanik ve termal özelliklerindeki etkileşimleri incelemektir. Bundan dolayı, yukarıda belirtilen özelliklere ait parametreler incelenmiş ve her parametre için belirli deneylerin yapılmıştır. Farklı deneyler kullanılarak kompozit malzemelerin çeşitli özelliklerini belirlemek için aşağıda sıralanmış olan bazı temel varsayımlar kabul edilmiştir (Şen, 2007):

1. Takviye fazı, matris içerisinde düzgün (uniform) olarak dağılmıştır,
2. Takviye fazı ile matris arasında mükemmel bir yapışma oluşmuştur,
3. Matris içerisinde hava boşluğu ve gözenek bulunmamaktadır,
4. Numuneye uygulanan yük elyaf doğrultusuna paralel ya da dik konumdadır,
5. Deney numuneleri başlangıçta gerilmesiz durumdadır (yani artık gerilme bulunmamaktadır),
6. Elyaf ve matris malzemeleri lineer elastik malzeme olarak davranış göstermektedir.

Mekanik özellikler; malzemenin çekme, eğilme, kayma, kırılma, darbe gibi dış kuvvetler etkisindeki davranışlarıdır. Polimer esaslı malzemelerin mekanik özellikleri; kimyasal ve fiziksel yapılarına, işlenme yöntemlerine, kullanım şartları ve kullanım sürelerine bağlıdır. Polimerlerden üretilen malzemelerin elastisite modülü, çekme

dayanımı, kırılma tokluğu, darbe dayanımı gibi sertlik türü mekanik özellikleri, standart şartlarda veya malzemenin kullanılacağı şartlara yaklaştırılmış laboratuvar ortamında yapılan deneylerle ölçülebilmektedir. Mekanik deney sonuçlarına göre, polimerlerin deneylerden elde edilmiş mekanik özelliklerine bakılarak kullanılıp kullanılamayacağı ve test şartlarına benzer ortamlarda çalışabilirliği gibi iki temel bilgi elde edilebilmektedir. Böylece farklı malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırılabilmektedir (Demirel 2007).

3.5.1. Tabakalı kompozit malzemelerin çekme özelliklerinin belirlenmesi

Malzemeler uygulamada, normal kuvvet, burulma, eğilme darbe, basınç yükü gibi çok farklı yüklere maruz kalırlar. Uygulanan bu yüklerin malzemede kalıcı deformasyonlara yol açmaması için, bu yüklere dayanacak tasarımlar yapılması ve uygun malzeme seçimi yapılması gerekmektedir. Çekme testinde, numuneye eksenel yük uygulanır ve kırılıncaya kadar devam eder. Yapılan test neticesinde malzemenin gerilme-gerinim ilişkisi ortaya çıkarılır (Demirel 2007).

Uygulama alanında kullanılan malzemeler çeşitli yüklere maruz kalmaktadırlar. Uygulanan kuvvetlerin etkisi altında, malzemede plastik şekil değiştirmeye uğramamsın için uygulanan yükün belirli bir seviye altında tutulması veya malzemenin mukavemetinin artırılması gerekmektedir. Bu deneyde yük uygulandığından itibaren, kuvvet değerleri ve numunedeki şekil değiştirmeler kayıt edilerek kuvvet-şekil değiştirme grafiği elde edilir. Veya kuvvet kesit alanına bölünerek gerilme ve şekil değiştirme numunenin ilk boyuna bölünerek birim şekil değiştirme (gerinim) elde edilerek gerilme-gerinim diyagramı çizilir. Bu grafiklerden malzemelerin, elastisite modülü, akma, çekme kopma mukavemetleri gibi önemli mekanik özellikleri elde edilir.

Elastisite modülü (E): Malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme diyagramının belirli kısmı doğrusaldır daha sonra malzemede plastik şekil değiştirme (eğer sünek ise) meydana geleceğinden doğrusaldık bozulur. Bu doğrusal kısmının eğiminden elastisite modülü elde edilir. Elastisite modülünü elde etmek için Denklem 3.1 kullanılmaktadır:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Bu denklemde:

E: elastisite modülü (GPa)

σ : Gerilme değeri (MPa)

ε : Birim şekil değiştirme

Akma gerilmesi (σ_y): Yük artırıldığında, malzemenin elastik davranışının sonuna varılır. Bundan sonra, malzeme plastik davranış gösterir. Bu noktaya denk gelen gerilme değerine akma mukavemeti denir ve Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanır:

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0} \quad (3.2)$$

Bu denklemde:

σ_y : Akma gerilmesi (MPa)

P_a : Akma kuvveti (N)

A_0 : Numunenin kesit alanı(mm²)

Çekme mukavemeti (σ_u): Çekme diyagramında, akma noktasından sonra, zirve noktasına denk gelen gerilmeye, yani numunenin dayanabildiği maksimum gerilmeye çekme mukavemeti denir. Çekme mukavemeti Denklem 3.3'ten elde edilir:

$$\sigma_u = \frac{P_u}{A_0} \quad (3.3)$$

Bu denklemde:

σ_u : Çekme mukavemeti (MPa)

P_u : Zirve noktasındaki kuvvet değeri (N)

A_0 : Numunenin kesit alanı (mm²)

Kopma uzaması (ϵ_b): Deney numunesinin maksimum şekil değiştirmesine (uzamasına) kopma uzaması denir ve bu numunede kopma meydana geldikten sonra ölçülür. Bu parametre, çekme deneyine tabi tutulan numunenin kopan kısımlarının bir araya getirilmesi ve son boyunun ölçülmesi ve boyda meydana gelen uzama yüzdesinin hesaplanması ile son bulur. Kopma uzaması malzemenin şekil değiştirme kabiliyetini gösterir ve malzemenin sünek veya gevrek olmasını belirleyen önemli bir parametredir. Bir malzemenin çekme uzaması ne kadar yüksek olursa, o malzeme o kadar sünek diye tanımlanır. Kopma uzama değeri Denklem 3.4 kullanılarak bulunmaktadır.

$$\epsilon_b = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (3.4)$$

Bu denklemde:

ϵ_b : Kopma uzaması

$\Delta L = L - L_0$: Kopma şekil değiştirmesi

L_0 : Numunenin ilk boyu

Poisson oranı (ν): Malzemedeki enine birim şekil değiştirmesinin, boyuna şekil değiştirmesine oranı “Poisson oranı” olarak tanımlanmaktadır. Poisson oranını denklem 3.5’ ile hesaplanmaktadır.

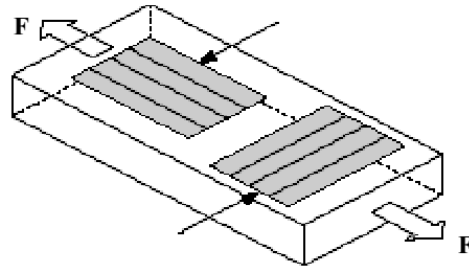
$$\nu = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (3.5)$$

Burada

ε_1 : Boyuna birim şekil değiştirmesine

ε_2 : Enine birim şekil değiştirmesine

Poisson oranını elde etmek için çekme numunesinin yüzeyine Şekil 3.22’de gösterildiği gibi enine ve boyuna olarak iki adet uzama ölçer (strain-gage) yapıştırılması gerekmektedir. Numune çekmeye maruz kaldığında, boyuna yapıştırılmış uzama ölçerden ε_1 ve enine yapıştırılmış uzama ölçerden ε_2 değeri ölçülür ve yukarıdaki formül ile Poisson oranı bulunur.

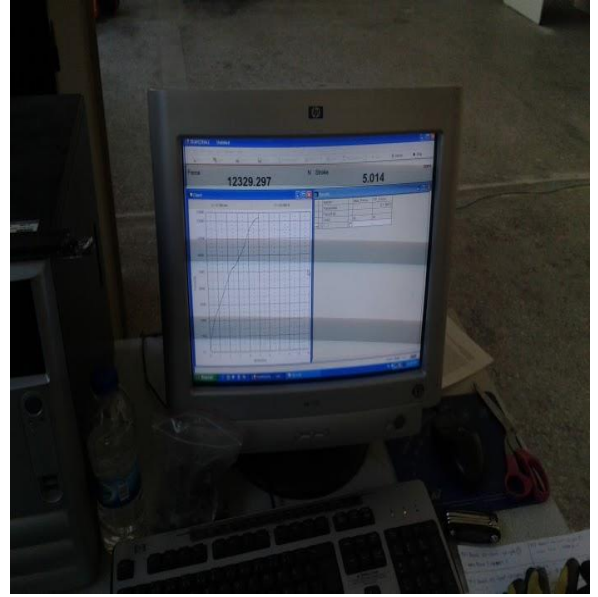


Şekil 3.22. Çekme numunesine iki yönlü uzama ölçer yapıştırılması

Çalışmada kullanılan çekme numuneleri ve çekme cihazının deney esnasında görüntüleri Şekil 3.23’de verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.23. Çekme deney düzeneği, a) çekme cihazı, b) veri kayıt düzeneği



(a)



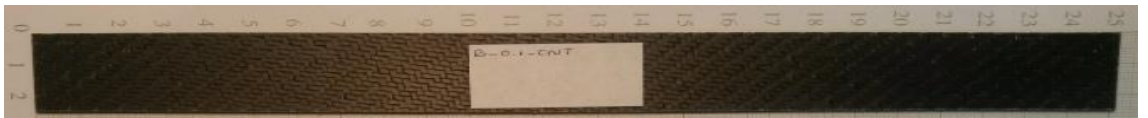
(b)



(c)

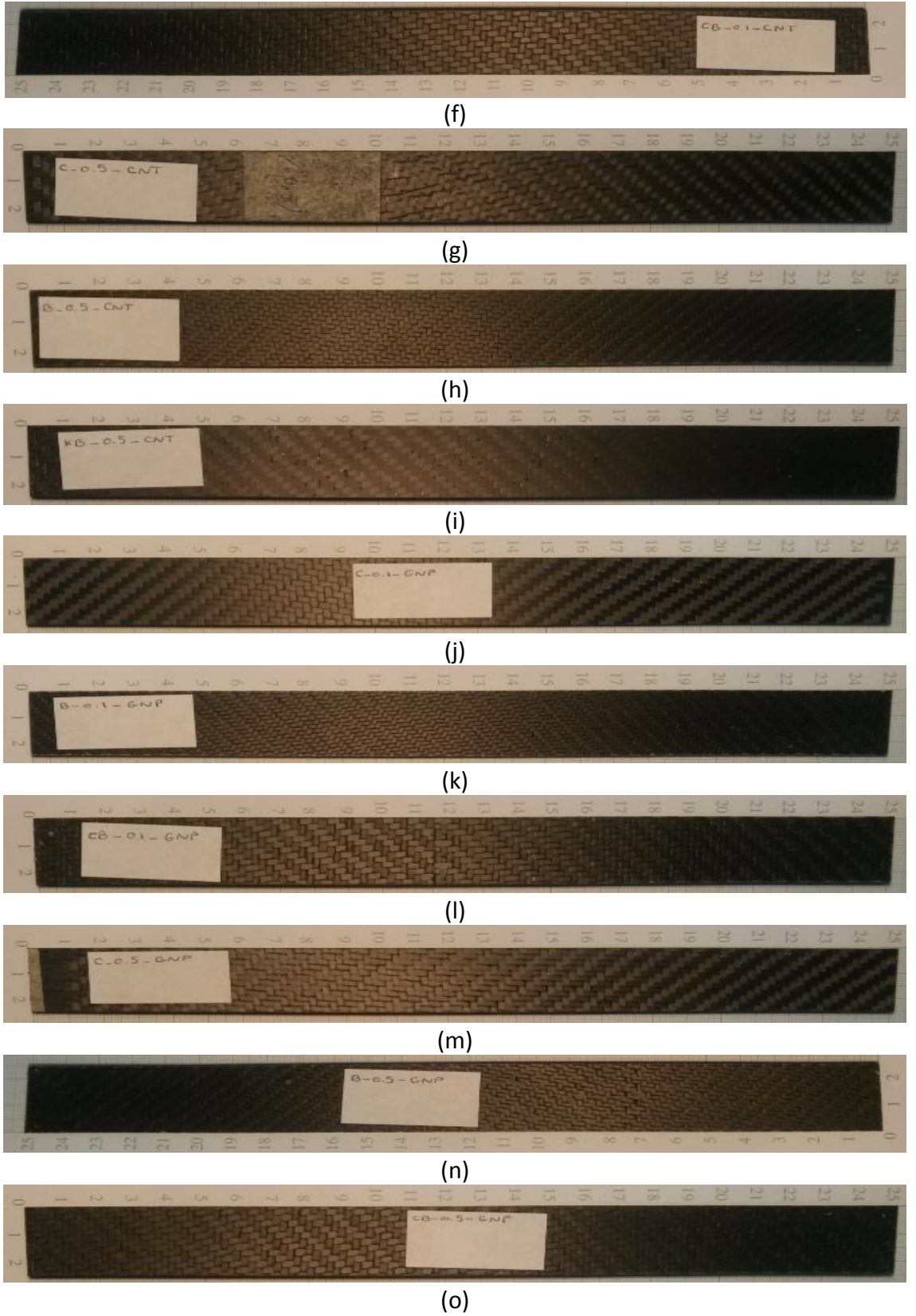


(d)



(e)

Şekil 3.24. (devam)



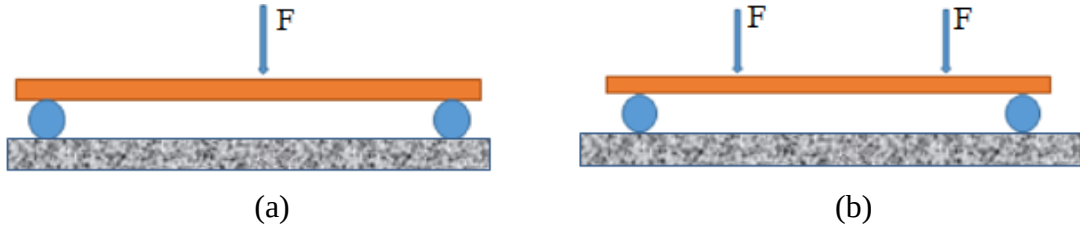
Şekil 3.24. Çekme numunelerinin görüntüleri

a) C-pür, b) B-pür, c) CB-pür, d) C-0,1 CNT, e) B-0,1 CNT, f) CB-0,1 CNT, g) C-0,5 CNT, h) B-0,5 CNT, i) CB-0,5 CNT, j) C-0,1 GNP, k) B-0,1 GNP, l) CB-0,1 GNP, m) C-0,5 GNP, n) B-0,5 GNP, o) CB-

0,5 GNP

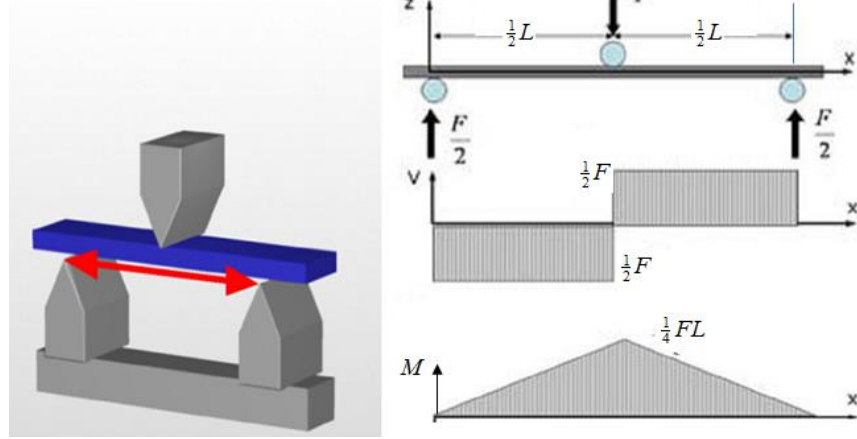
3.5.2. Tabakalı kompozit malzemenin eğilme özelliklerinin belirlenmesi

Eğilme deneyi, üç nokta eğilme ve dört nokta eğilme olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Her iki deney için ASTM standartları mevcuttur. Üç nokta eğilme deneyi, ASTM D790'a göre yapılmakta olduğu halde, dört nokta eğilme deneyi D7264'e göre yapılmaktadır. Her iki deneyin şemaları Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Üç nokta eğilme deneyi, eğilme testleri içerisinde en yaygın kullanılan deney yöntemidir. Bu deneyin temel prensibi, "basit kiriş" modeline dayanmaktadır. Kirişteki yeterli kiriş açıklığı (mesnetler arası mesafe) dolayısıyla, kirişte oluşan kayma gerilmeleri, normal gerilmelere göre çok küçük olduklarından ihmal edilebilirler. Bu sebepten dolayı, numunenin uzunluk/genişlik oranı en az 16 kat olması gerekmektedir. Deneyde, kiriş şeklindeki numuneler iki ucundan, Şekil 3.25'te görüldüğü gibi kayabilen iki mesnet ile desteklenmektedir.



Şekil 3.25. Eğilme deney şemaları (a) üç nokta eğilme deneyi (b) dört nokta eğilme deneyi

Bu deneylerde, esneme tepkisi genellikle yüke karşı sapma (yön değiştirme) ile belirlenir. Dört nokta eğilme deneyinde, numune iki ucundan mesnetlenerek, iki noktasından da eşit kuvvetlerle yükleme uygulanır. Yükleme noktaları, mesnetler arasındaki mesafenin 1/3 ü ya da 1/2 si kadar olmalıdır (Yıldız 2011).



Şekil 3.26. Üç nokta eğilme deneyinin prensibi: Numunedeki kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları

Eğilme mukavemeti: Eğilme mukavemeti, kirişin üç nokta eğilme deneyinde kırılmadan dayanabileceği maksimum gerilmedir ve 3.6 nolu denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3.6)$$

Bu denklemde:

σ_f = Eğilme mukavemeti (MPa) ,

F = Uygulanan kuvvet (N),

L = Mesnetler arası uzaklık

b = Numune genişliği

h = Numune kalınlığı

Eğilme modülü: Eğilme modülü, belli bir oranda çekme geriliminin uzama değerine bölünmesi ile elde edilen değerdir ve 3.7 nolu denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$E_B = \frac{mL^3}{4bd^3} \quad (3.7)$$

Bu denklemde:

E_B = Eğilme modülü (MPa),

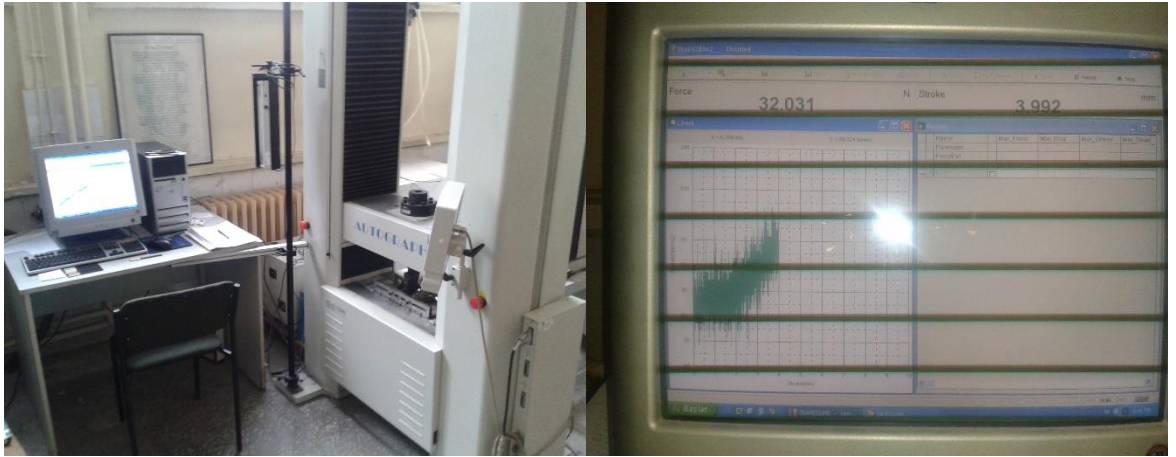
L = Mesnetler arası uzaklık

b = Numune genişliği,

m = Kuvvet-yer değiştirme diyagramına başlanışta teğet olan çizginin eğimidir.

İdeal olarak bir malzemede eğilme modülü ile çekme modülü eşit kabul edilir. Ama aslında bu değerler özellikle plastik malzemelerde farklı olabilmektedir. Eğer test edilen malzeme homojen ise bu değerler eşit olur.

Çalışmada kullanılan eğilme numuneleri ve eğilme cihazının deney esnasında görüntüleri Şekil 3.27’de verilmektedir.



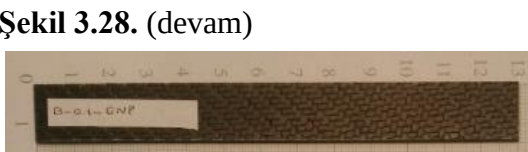
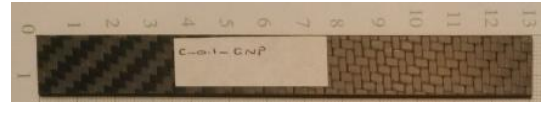
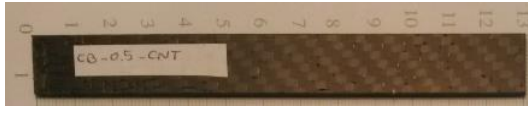
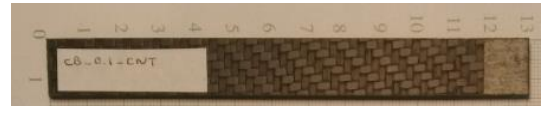
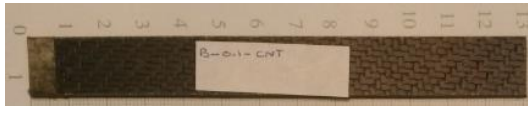
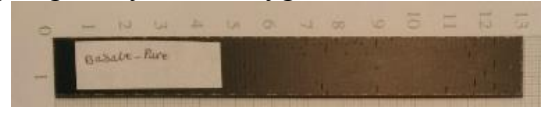
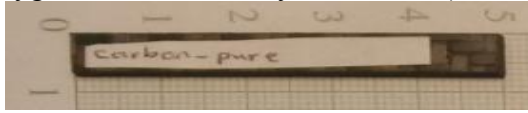
(a)

(b)

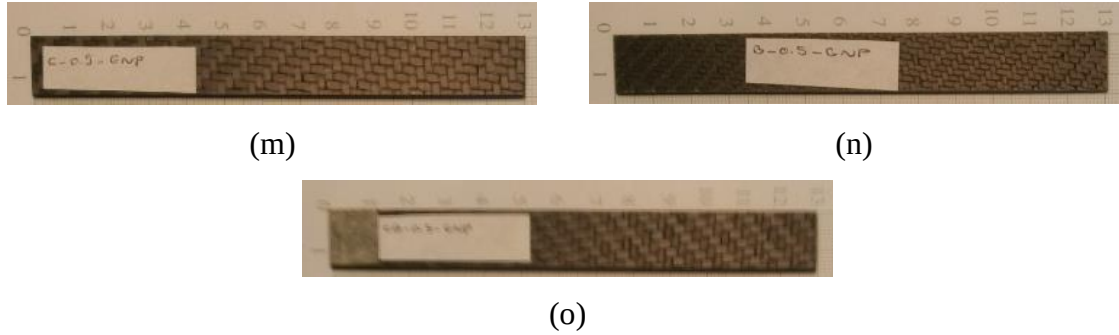
Şekil 3.27. (devam)



Şekil 3.27. Eğilme deneyi düzeneği a) Çekme cihazı, b) veri kayıt düzeneği, c) yük uygulama burnunun ayarlanması, d) numuneye eğilme yükünün uygulanması



Şekil 3.28. (devam)



Şekil 3.28. Çalışmada kullanılan eğilme numunelerinin görüntüleri a) C-pür, b) B-pür, c) CB-pür, d) C-0,1 CNT, e) B-0,1 CNT, f) CB-0,1 CNT, g) C-0,5 CNT, h) B-0,5 CNT, i) CB-0,5 CNT, j) C-0,1 GNP, k) B-0,1 GNP, l)CB-0,1 GNP, m) C-0,5 GNP, n) B-0,5 GNP, o) CB-0,5 GNP

3.5.3. Kısa kiriş kayma testi (short beam sheering test) ve tabakalı kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma özelliklerinin belirlenmesi

Kompozit malzemelerde elyaf ile matris malzemesinin tutunması, bu iki bileşenin ara yüzeyinde oluşan bağlardan etkilenmektedir. Bu malzemelerin mekanik etkileşimleri kimyasal bağlar, reaksiyon bağı, elektrostatik çekim, değişim reaksiyonu bağı, adsorpsiyon ve ıslanma gibi mekanizmalara bağlıdır. Ayrıca bu etkileşim hidrojen bağı, *vanderwaals* kuvvetler gibi mekanizmalardan da etkilenmektedir (Erden 2009).

Bilindiği gibi, kompozit malzemelerin en büyük dezavantajı ve bu malzemelerin kullanılmasını kısıtlayan çok önemli etkenlerden biri delaminasyondur. Kompozit malzemelerde, elyaf malzemesi ile matris malzemesi arasında oluşan bağlar, bu malzemelerin kimyasal ve yüzey pürüzlülük durumlarından büyük oranda etkilenmektedir. Matris malzemesi ile elyaf arasındaki uyumsuzluk iki malzemeyi birbirine bağlayan bağları olumsuz yönde etkiler ve kompozitin ara yüzey dayanımını düşürerek delaminasyonun ortaya çıkmasına neden olur. Tabaka sayıları ve farklı özelliklileri olan tabakalardan dolayı, tabakalar arası kayma gerilmesinin artmasına sebep olur ve tabakalar arasında ayrışma (delaminasyon) meydana gelir. Tabakalı kompozit malzemelerde ortaya çıkan delaminasyonlar iki kategoride incelenmektedir:

- 1- Elyaf-la matris ayrışmasından ortaya çıkan delaminasyonlar

2- Kayma gerilmesinden dolayı tabakalar arasında ortaya çıkan delaminasyonlar

Kısa kiriş deneyi, tabakalı kompozit malzemelerde elyafla matris ve tabakalar arasında oluşan bağlar ve bu bağların dayanımını test etmek için, en önemli ve yaygın olarak kullanılan metotlardan birisidir. Bu deneyde kompozit numunesi, üç nokta eğilme deney yöntemi kullanılarak kayma gerilmesine maruz bırakılır ve numune orta kısmından yüke maruz kaldığında numunede oluşan tarafsız eksenin üst kısmında bası gerilmeleri ortaya çıktığı halde alt kısmında çeki gerilmeleri meydana gelmektedir. Kompozit malzemelerin kayma yüklere dayanımını incelemek amacıyla ASTM D 2344 (*Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*) standart deney yöntemi kullanılmaktadır. Tabakalar arası kayma mukavemeti Denklem 3.8 kullanılarak hesaplanır.

$$\tau = 0.75 \frac{F_{maks}}{bt} \quad (3.8)$$

Bu denklemde:

τ = Tabakalar arası kayma gerilmesi [MPa],

F_{maks} = kirişteki maksimum kesme kuvveti [N],

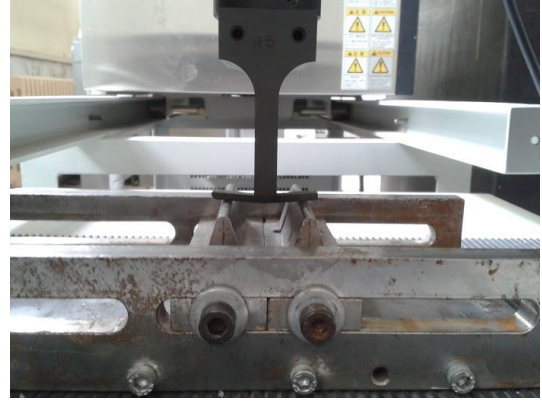
b = Numune genişliği [mm (in)]

t = Numune kalınlığı [mm(in)]

Çalışmada kullanılan ILSS numuneleri ve çekme cihazının ILSS deneyi esnasında görüntüleri Şekil 3.29'da ve ILSS numuneler 3.30'da verilmektedir.

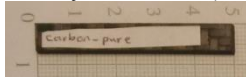


(a)

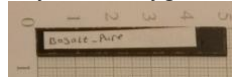


(b)

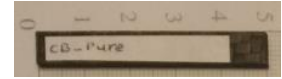
Şekil 3.29. Eğilme deneyi düzeneği a) çekme cihazı, b) veri kayıt düzeneği, c) yük uygulama burnunun ayarlanması, d) numuneye eğilme yükünün uygulanması



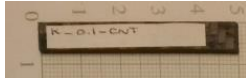
(a)



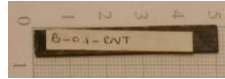
(b)



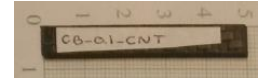
(c)



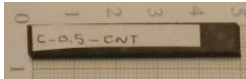
(d)



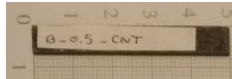
(e)



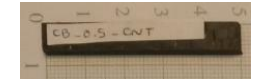
(f)



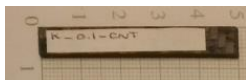
(g)



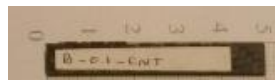
(h)



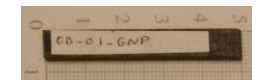
(i)



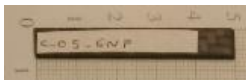
(j)



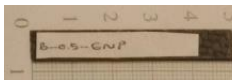
(k)



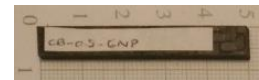
(l)



(m)



(n)



(o)

Şekil 3.30. Çalışmada kullanılan eğilme numunelerinin görüntüleri

a) C-pür, b) B-pür, c) CB-pür, d) C-0,1 CNT, e) B-0,1 CNT, f) CB-0,1 CNT, g) C-0,5 CNT, h) B-0,5 CNT, i) CB-0,5 CNT, j) C-0,1 GNP, k) B-0,1 GNP, l) CB-0,1 GNP, m) C-0,5 GNP, n) B-0,5 GNP, o) CB-0,5 GNP

3.6. Kompozit Kirişler İçin Titreşim Deneyleri

Ankastre-serbest titreşim deneyinde 250 mm uzunluğunda karbon kompozitler için $2,5 \times 25 \text{ mm}^2$, bazalt elyaf takviyeli kompozitler için $2 \times 25 \text{ mm}^2$ ve bazalt-karbon intraply hibrit kompozit numuneler için $3 \times 25 \text{ mm}^2$ kesit alanına sahip kirişlerin bir taraftan ankastre olarak tutma cihazına bağlanması gerekmektedir. Kiriş bir ucundan ankastre olarak bağlandıktan sonra, yapı modal çekiçe tahrik edilerek, bir lazer titreşim ölçer vasıtasıyla yapının cevabı yani doğal frekans ve sönümleme oranı ölçülmektedir. Bu yöntemde malzeme üzerinde belirli noktalarda darbe çekici kullanılarak tahrik kuvveti uygulanıp ve malzemenin titreşim cevabı ölçülerek aradaki transfer fonksiyonu (FRF) modal analiz yardımıyla elde edilir. Uygulanan tahrik kuvveti bir kuvvet transdüseri (çekiç) ile ölçülmektedir (Yüzbaioğlu 2010).

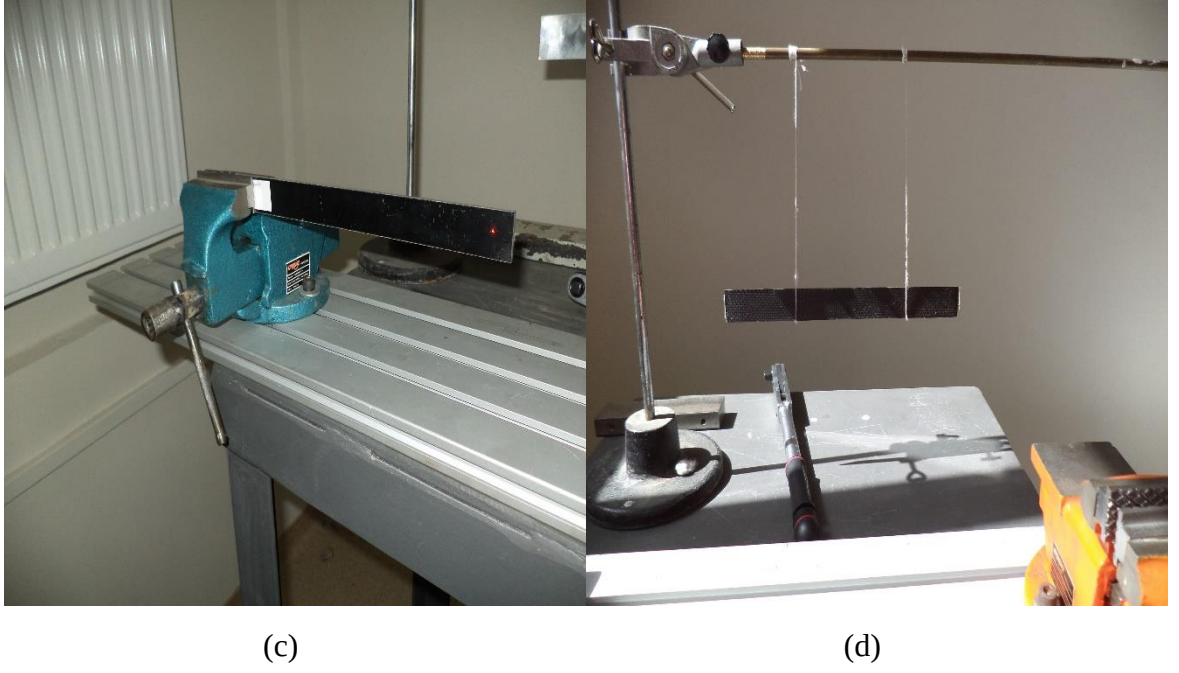
Bu deneyde, her malzeme için üç numune kullanılmış, her numune altı kere denenmiş ve böylece numunenin doğal frekans ve sönüm oranı değerleri bulunmuştur. Titreşim deney düzeneğinin görüntüleri Şekil 3.31’te verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 3.31. (devam)



Şekil 3.31. Titreşim özellikleri ölçümü

a) lazer vibrometre, b) puls titreşim seti, c) ankastre–serbest titreşim düzeneği, d) serbest-serbest titreşim düzeneği

Doğal frekans, sönüm oranı gibi titreşim özelliklerini ölçmek için çekme deney numuneleri kullanılmıştır. Kullanılan numunelerin görüntüsü Şekil 3.32’de verilmiştir.



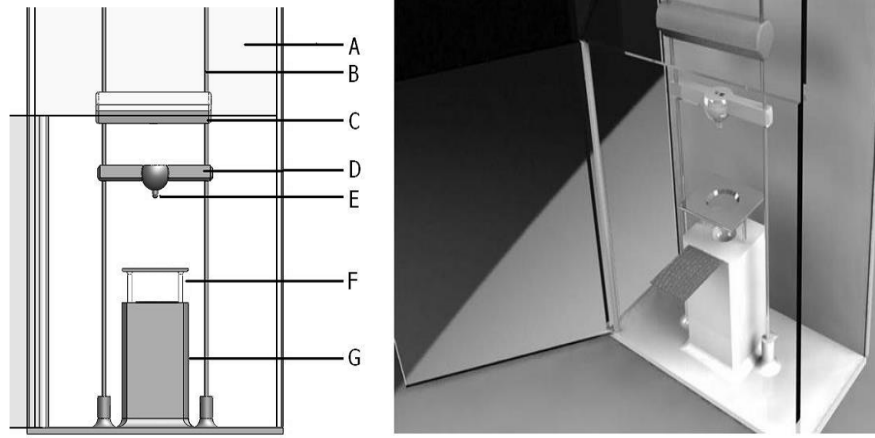
Şekil 3.32. Titreşim deneyinde kullanılan numuneler

3.6.1. Darbe deneyi

Darbe, iki cismin çarpışması durumunda, oluşan etki-tepki kuvvetlerine karşı cisimlerin dinamik cevabı olarak tanımlanabilir (Kara 2006). Genellikle, darbe mekaniği, yüksek hızlı ve düşük hızlı olarak iki kategoride incelenmektedir. Bununla birlikte, bu iki kategori arasında net olarak bir geçiş bulunmamaktadır. Bu alanda yapılmış olan araştırmaların bazıları, düşük hızlı darbeyi statik olarak kabul etmektedir. Bu çalışmalarda deney malzemesinin özellikleri, rijitliği ve çarpan cismin rijitliği ve kütlesine bağlı olarak 1 m/s ila 10 m/s arasında değişen hızlardaki çarpmalar düşük hızlı darbe olarak değerlendirilmektedir. Kompozit bir malzeme üzerine, imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın çarpması, düşük hızlı darbeye örnek olarak verilebilir. Düşük hızlı darbede, genelde vurucunun malzemeye çarptığı anda malzemenin içyapısında deformasyonlar meydana gelir. Düşük hızlı darbeye bazen düşük enerjili çarpışma olayı da denmektedir.

Düşük hızlı darbede, malzemenin darbeye karşı cevap vermesi için temas sresinin yeterli olması gerekmektedir. Ayrıca, burada fazla kalan enerji, malzeme yapısında absorbe edilir. Bundan dolayı, çarpmaya maruz kalan malzemenin dinamik tepkisi çok önem kazanmaktadır (Ceyhun and Turan 2003).

Bu çalışmada malzemenin tokluğunu bulmak için ağırlık düşürme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem belli bir yükseklikten vurucunun bırakılması ve numuneye çarpması şeklinde gerçekleşir. Vurucunun numuneye çarpma hızı, ivmesi ve kontak kuvvetleri gibi parametreler bu test kullanılarak incelenerek, bu parametrelerin zamana göre değişimleri de elde edilebilmektedir.



Şekil 3.33. Ağrlık düşürme deney düzeneği (Karadayı 2012)

Darbe deneyinde kullanılmış olan düşük darbe deney prensibi Şekil 3.33 ve darbe deney düzeneği Şekil 3.34’de verilmektedir. Şekil 3.35’de darbe deneyinde kullanılan numunelerin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.34. Darbe deney düzeneği



(a)



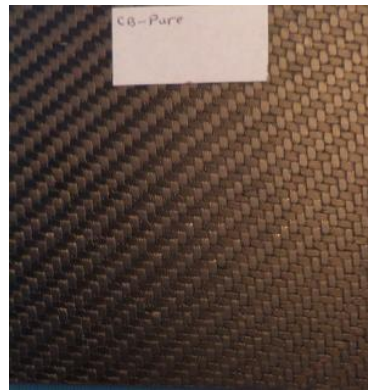
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 3.35. Çalışmada kullanılan darbe numunelerinin görüntüleri
 a) C-pür, b) C-0,1 GNP, c) B-pür, d) B-0,1 GNP, e) CB-pür, f) CB-0,1 GNP

3.7. Kullanılan Cihazlar

3.7.1. Isıtma fırını (NÜVE, FN 032.055.120):

Bu çalışmada kompozit numuneleri termal çevrim kapsamında yüksek sıcaklığa tabi tutmak amacıyla NÜVE, FN 032.055.120 model sterilizatör kullanmıştır. Bu model kuru havalı olup, masaüstü kullanımına uygun ve 250°C'ye kadar kararlı sıcaklık sağlayabilmektedir. Bu cihazda, numunelerin ihtiyacı olan kararlı ortam sıcaklığı, programlanabilir mikro işlemcili kontrol sistemi ile sağlanmaktadır. Sistem, sıcaklık dalgalanmalarını engellemekte ve kapağın açılıp kapanmasından sonra sıcaklık geri kazanımlarının en hassas ve hızlı şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Kullanılan bu fırında, ısıtma sistemi fırının içerisinde bütün çevre duvarları boyunca yerleştirilmiş ısıtma rezistansları yardımıyla ve konveksiyon ile gerçekleşmektedir. Bu cihaz Şekil 3.36'da görülmektedir.



Şekil 3.36. Nüve ısıtma fırınının görünümü

3.7.2. Derin dondurucu

Bu çalışmada termal çevrim kapsamında numuneleri düşük sıcaklıklara maruz bırakmak için Nüve FR 490 model derin dondurucu kullanılmıştır. Bu cihaz sıcaklığı -45°C'a kadar indirgeme kabiliyetine sahiptir. Kullanılan derin dondurucu 555×630×1320 mm

iç ebadında olup, 461 litre kapasiteye sahiptir. Şekil 3.37’ de görüldüğü gibi 5 odacıktan oluşmakta ve her odacığın kendi kapısı bulunmaktadır.



Şekil 3.37. Nüve derin dondurucunun görünümü

3.7.3. Sıcaklık kalibrasyon cihazları

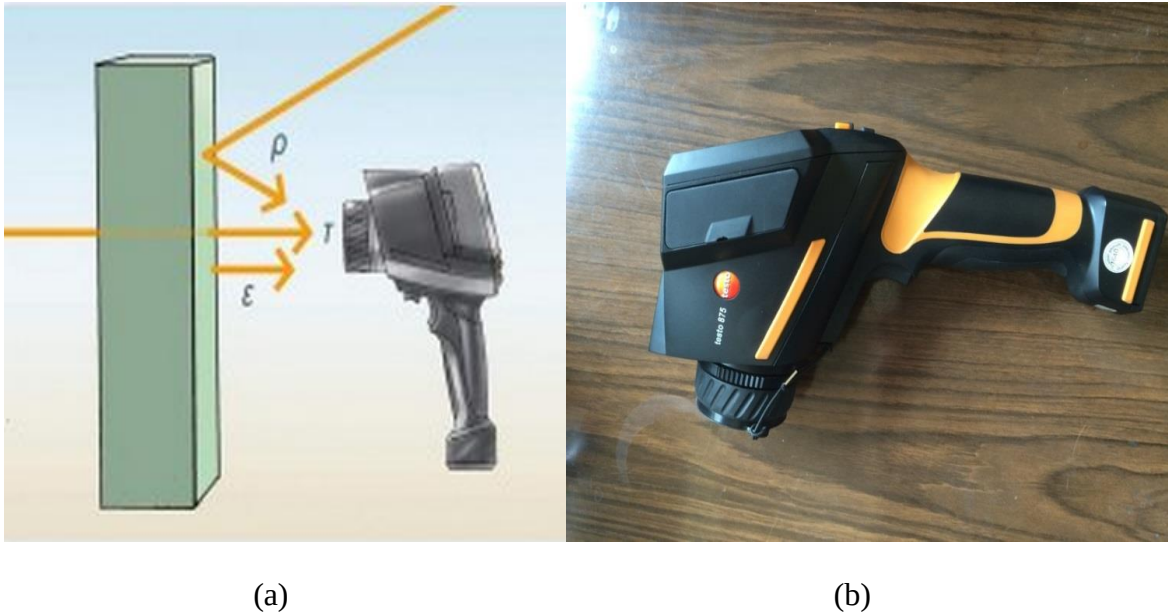
(i) İnfrared termometre (Model VS 900): Bu cihaz ile, ortam ile temasta olan yüzeylerin sıcaklığı ölçülmektedir. Bu cihaz şekil 3.38’ te görülmektedir. Bu cihaz çok hassas olduğu için, gönderdiği ve aldığı dalgaların hava molekülleri ile çarpıştığından dolayı, sıcaklık değerinde sürekli değişme meydana gelir ve bu durum kesin bir değer yakalama ihtimalini azaltmaktadır.



Şekil 3.38. İnfrared termometre (Model VS 900)

(ii) Termal Kamera

Bir termal kamera tarafından kaydedilen ışınlım, termal kameranın görüş alanındaki nesnelerden yayılan infrared ışının emisyonu, iletimi ve yansımından oluşur (Şekil 3.39a). Termal kamerayı etkin bir şekilde kullanabilmek için, bu üç terim hakkında bilgi sahibi olmak gerekir.



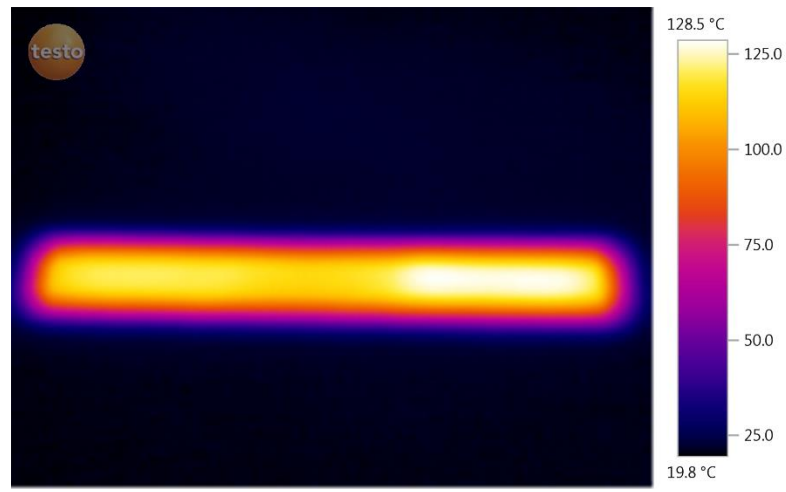
Şekil 3.39. Termal kamera

(a) şematik görünüm (b) Testo 875-2

Kalibrasyon için kullanılan termal kamera Testo 875-2 model olup, kameradan elde edilen sonuçlar kullanılarak malzemeyi ısıtmak için kullanılan fırın kalibre edilir. Kullanılan termal kameranın görüntüsü Şekil 3.43 de verilmektedir.

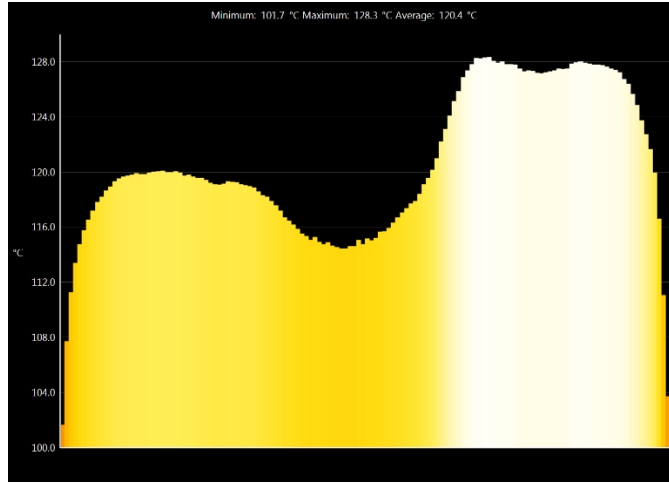
Bu çalışmada fırın sıcaklığını kalibre edilerek, istenen sıcaklık (120°C) değerinde ayarlamak amacıyla termal kamera kullanılmış, deneme yanılma yöntemi ile doğru sıcaklık değerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla fırın 250°, 180°, 175° ve 120°C sıcaklıklarına ayarlanarak, numunenin yüzey sıcaklığı üç aşamada ölçülmüş ve böylece

fırın için uygun sıcaklığa karar verilmiştir. Kalibrasyon için daha doğru sıcaklıkların elde edilmesi için numunenin yüzey sıcaklığı 10 dakika fırında bekletilip, çıkarıldıktan hemen 2-4 saniye sonra ölçülmüştür. Termal kameranın ölçtüğü sıcaklık yüzey sıcaklığı olduğu için, malzemenin iç yapısının sıcaklığı bu değerden küçük olması gerekir. Bunun için numunenin iç yapısının 120°C’de olması için yüzey sıcaklığının 130°C civarında olması gerekmektedir. Şekil 3.40’te numunenin fırından çıkarıldığı andaki termogramı görülmektedir.



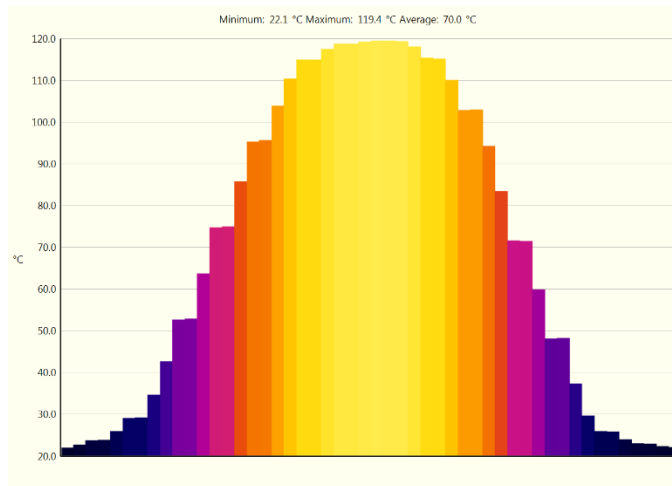
Şekil 3.40. 180°C’deki numunenin fırından çıkarıldıktan sonraki yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımı

Görüldüğü gibi fırının 180°C’ye ayarlanması durumunda, numune yüzeyinde sıcaklık değeri maksimum 128,5°C ve minimum 19,8°C olmaktadır. Numunenin fırında 180°’de 10 dakika bekletilip, çıkarıldıktan hemen sonra boylamasına sıcaklık dağılımı Şekil 3.41’de verilmektedir.



Şekil 3.41. 180°C sıcaklıkta numunenin fırından çıkarıldığında boyunda oluşan sıcaklık dağılımı

Şekil 3.41'teki termograma göre, malzemenin boyunda meydana gelen maksimum ve minimum sıcaklık değerlerinin, sırasıyla, 128,4°C ve 101,7°C olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu sıcaklıkta malzeme yüzeyindeki ortalama sıcaklık değerinin 120,4° olduğu görülmektedir. 180°C sıcaklığında malzemenin hemen fırından çıkarıldığı an eninde meydana gelmiş olan sıcaklık dağılımı Şekil 3.42'de verilmiştir.



Şekil 3.42. 180°C sıcaklığında numunenin fırından çıkarıldığı an eninde ortaya çıkan sıcaklık dağılımı

Şekil 3.42’de görüldüğü gibi numunenin eninde maksimum sıcaklık 119,4° ve minimum sıcaklığın 22,1°C olduğu görülmektedir. Ayrıca numune yüzeyinde ortaya çıkmış olan sıcaklığın ortalama değerinin 70°C olduğu da bu diyagramdan tespit edilmektedir.

3.7.4. Çekme cihazı

Çekme, eğilme ve ILSS deneyleri, universal çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu cihazda gereken çekme kuvveti, mekanik veya hidrolik güç aktarım elemanları ile sağlanır. Şekil 3.43’de çekme deney cihazı görülmektedir. Cihaz, deney numunesini tutmayı sağlayan üst çene ve alt çeneden ibarettir. Deney esnasında, kuvvet değeri, yük hücresinden ve uzama miktarı üst çenenin hareketini sağlayan vidanın adımına göre ölçülmektedir. Deney sırasında çekme numunesine sürekli olarak artan çekme kuvveti uygulanır ve kırılma anına kadar hem uygulanan kuvvet hem de numunede meydana gelen uzama, bilgisayara kaydedilir (Savaşkan 2004). Bu cihaz eğilme ve ILSS deneylerinde kullanıldığında, aynı düzenek ve aynı yük uygulama sistemi kullanılmaktadır. Fakat bu deneyler için uygulanan yük çekme yerine, bası yüküdür. Eğilme deneyi ile ILSS aynı şartlarda yapılır, sadece numunelerin boyutları farklıdır. Çalışmada kullanılan çekme cihazı Shimadzu AGIS100 model olup, Şekil 3.43’te görülmektedir (Shimadzu Corporation/Japonya).



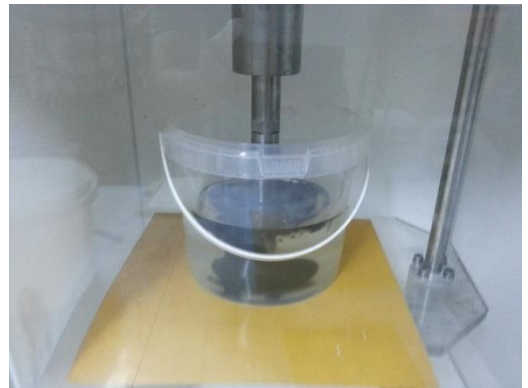
Şekil 3.43. Shimadzu universal çekme cihazı

3.7.5. Ultrasonik homojenizatör (karıştırıcı)

Ultrasonik karıştırıcıları titreşim yoluyla sıvı içinde bulunan partikülleri atomize ederek dağıtılmasında ve karıştırılmasında kullanıldığı gibi kimyevi reaksiyonların hızlandırılmasında da kullanılabilirler. Nano malzemenin tam homojen karışımını sağlamak için Şekil 3.44’te gösterilen ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.44. UP 400 S ultrasonik karıştırıcı (a) Cihaz, (b) karıştırıcı bölümü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmanın bu bölümünde yapılan deney sonuçları graflar ve diyagramlar haline getirilip, literatürde incelenmiş çalışmalar yardımıyla yorumlanmıştır. Bulgular bölümü genel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar hibritleşme, nanodolgu malzeme eklenme ve termal yorulma olayının etkilerinin çalışma kapsamında üretilmiş olan kompozit malzemelerin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerinde etkilerini kapsamaktadır.

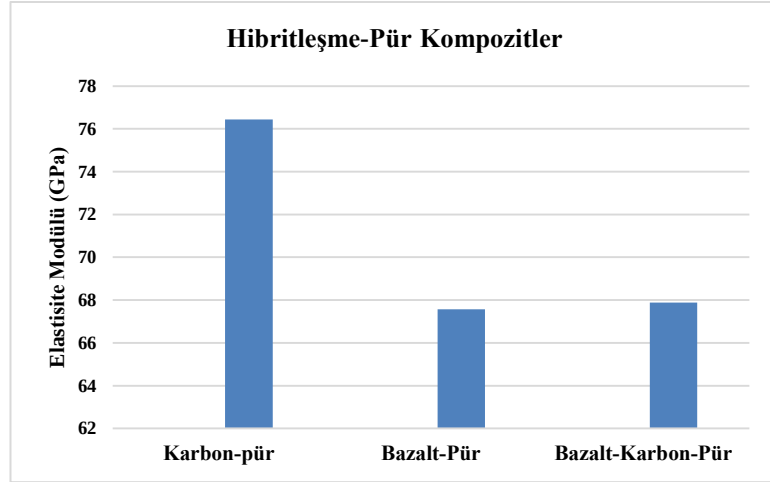
4.1. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Çekme Özelliklerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler

Önceden de tanımlandığı gibi, hibritleşme olayı, kompozitlerde iki ve ya daha fazla elyaf türünün aynı matris malzemesinde planlandığı kullanım alanına en iyi avantajları sağlamak, diğer bileşen liflerden kaynaklanan zaafları gidermek, tasarım esnekliği ve daha düşük üretim maliyetini sağlamak gibi amaçlarla uygulanmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde hibritleşme olayının çalışmada kullanılan malzemelerin eğilme özelliklerinde ortaya çıkardığı etkiler incelenmektedir. Çalışmanın bu bölümünde hibritleşme olayının kullanılan malzemelerin çekme özelliklerinde ortaya çıkardığı etkiler incelenmektedir.

4.1.1. Bazalt-karbon-pür

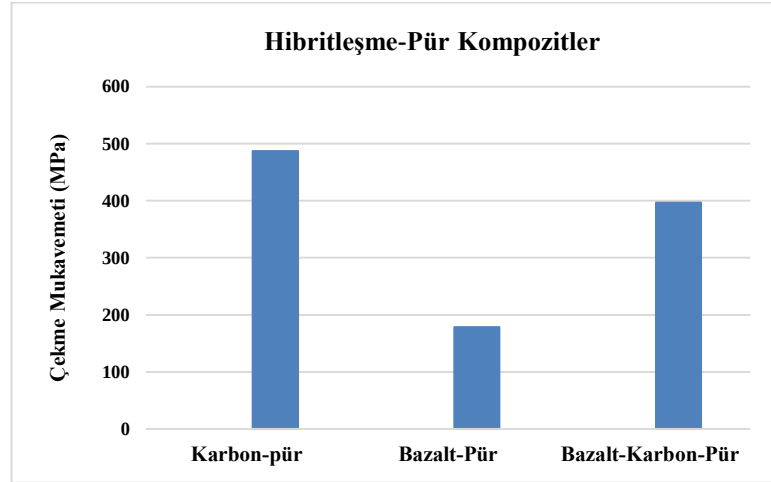
Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-pür malzemesinin çekme özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla üç tür numune kullanılmıştır. Birinci numune %60 oranında karbon elyaf, ikincisi %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede ise %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-pür malzemelerin çekme özelliklerini bulmak için ASTM D3039 standardına göre çekme

deneyleri yapılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin elastisite modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi pür karbon kompozitin elastisite modülü 76,43 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 67,57 GPa olup, karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu durum, karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre daha yüksek olduğundan kaynaklanmaktadır. Daha öncede söylenildiği gibi kullanılan karbon elyaf ile bazalt elyafın elastisite modülleri sırasıyla 525 ve 89 GPa’dır. Bu iki tür elyafın birleşimi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülünün değeri 67,88 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın elastisite modüllerinin arasında olduğundan dolayı mantıki olarak doğru bir değer olabilmektedir. Böylece karbon ile bazaltın hibrit kompozitinin elastisite modül değeri karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %11,19 azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %0,46 oranında artmıştır. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür kompozitlerinin çekme mukavemeti için elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’de verilmiştir.



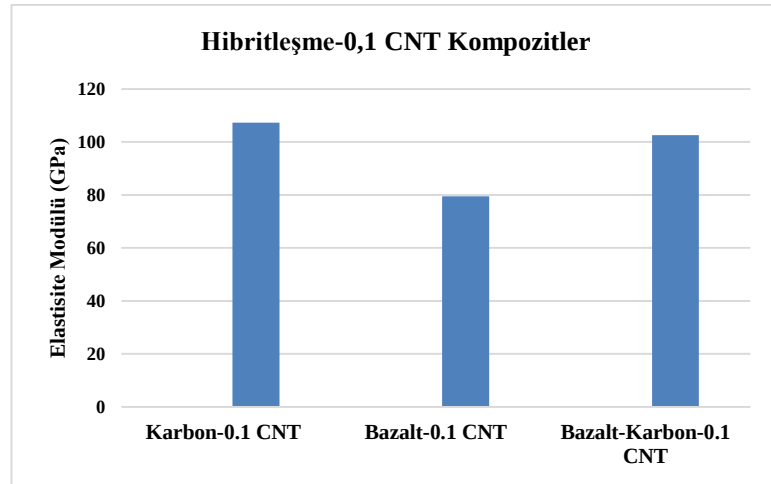
Şekil 4.2. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin çekme mukavemetlerinin kıyaslanması

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi pür karbon kompozitin çekme mukavemeti 487,15 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 178,69 MPa olup, karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bunun nedeni karbon elyafın çekme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve epoksi reçinesi ile daha kuvvetli kovalent bağlar kurmasından kaynaklanmaktadır. Kullanılan karbon elyaf ile bazalt elyafın çekme mukavemet değerleri sırasıyla 5100 ve 4840 MPa’dır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin çekme mukavemeti 396,44 MPa olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın çekme mukavemetlerinin arasında olduğundan dolayı, mantıksal olarak doğru bir değer olarak kabul edilebilir. Böylece karbon ile bazalt elyaf takviyeli hibrit kompozitin çekme mukavemeti karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre %18,62 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre ise %121,86 oranında artış göstermiştir.

4.1.2. Bazalt-karbon-0,1 CNT

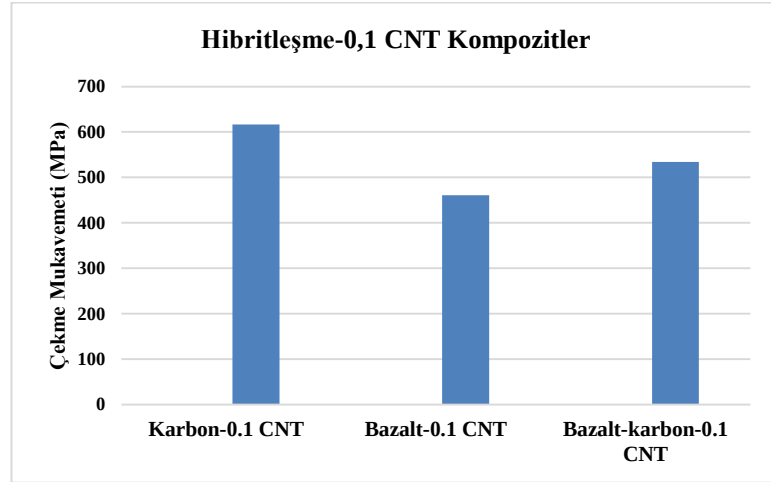
Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin çekme özelliklerinde hibritleşme olayının etkilerini incelemek amacıyla üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede % 0,1 ağırlık ve $0,733 \times 10^{-3}$ oranında CNT nanodolgu içeren epoksi reçinesi %60 oranında

karbon, aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune ise %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %0,1 oranında CNT nanodolg içeren epoksi reçinesi içerisinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1CNT ve Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerin çekme özelliklerini bulmak için ASTM D3039 standardına göre çekme testi yapılmıştır. Elastisite modülü için bulunan değerler Şekil 4.3' te verilmiştir.



Şekil 4.3 Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi matrisi %0,1 CNT içeren karbon kompozitin elastisite modülü 107,2 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 79,42 GPa olup, karbon kompozitlere göre düşük bir seviyededir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafın elastisite modülüne göre çok büyük olmasından kaynaklanmakta olabilir. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesi ile oluşturulan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modül değeri 102,51 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon ile bazalt elyafının elastisite modüllerinin arasında olduğuna göre mantıklı olarak doğru bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %4,38 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %29,07 oranında artmıştır. Çekme mukavemeti için elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'te verilmiştir.



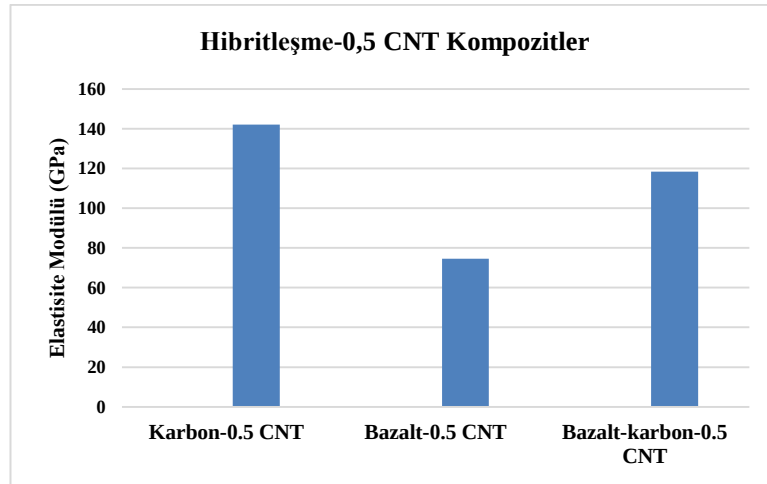
Şekil 4.4. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin çekme mukavemetinin kıyaslanması

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi matrisi %0,1 CNT içeren karbon kompozitin çekme mukavemeti 616,65 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 460,5 MPa olup, karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu olayın nedeni karbon elyafın çekme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturmamasından kaynaklanmakta olabilir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin çekme mukavemeti 534,24MPa değerine sahip olmaktadır. Bulunan bu değer, karbon-0,1 CNT'ile bazaltın çekme mukavemetinin arasında olduğuna göre mantıksal olarak doğru bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafının hibritleşmesinden elde edilen kompozitin çekme mukavemeti karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %13,36 oranında düşmüş ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre ise %16 oranında artmıştır.

4.1.3. Bazalt-karbon-0,5 CNT

Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerin çekme özelliklerinde hibritleşme olayının etkilerini araştırmak için üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede ağırlık olarak %0,5 ve hacim olarak $3,671 \times 10^{-3}$ oranında CNT dolgulu epoksi reçinesi %60

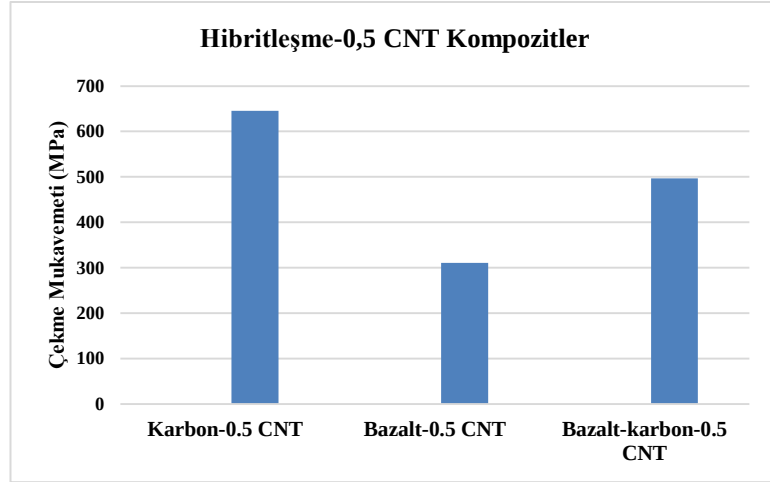
oranında karbon, aynı matris özelliklerine sahip ikincisi %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %0,5 oranında CNT dolgulu epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin elastisite modülünü bulmak için ASTM D3039 standardına göre çekme deneyleri yapılmıştır. Elastisite modülü için bulunan değerler Şekil 4.5’ te verilmiştir.



Şekil 4.5. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.5’te görüldüğü gibi matrisi %0,5 CNT nanodolgu içermekte olan ve karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitin elastisite modülü 142,08 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 74,51 GPa olarak bulunmuş ve karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyededir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmakta olabilir. Bu iki tür elyafın birleştirilmesi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülü 118,39 GPa olmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazalt elyafın elastisite modül değerlerinin arasında olduğundan dolayı makul bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşme sonucunda ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %16,67 oranında azalmış olup, bazalt elyaf ile

takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %58,11 oranında artmıştır. Çekme mukavemeti için elde edilen sonuçlar Şekil 4.6’da verilmiştir.

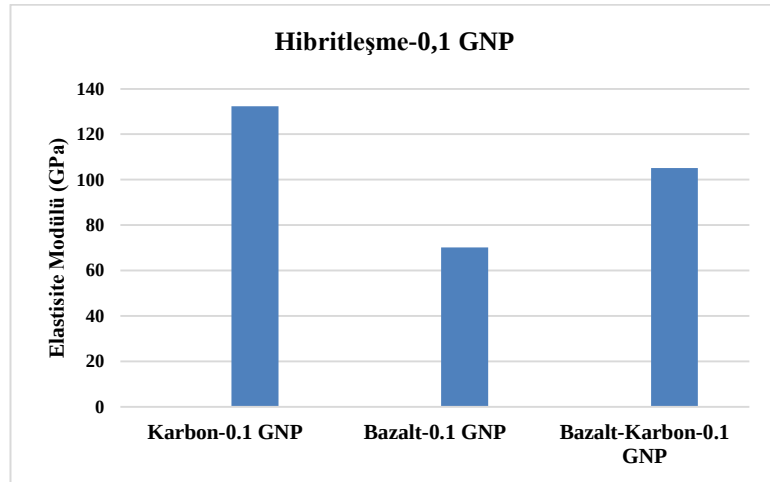


Şekil 4.6. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi kompozitin matrisi %0,5 CNT nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile nano ve karbon elyaf ile mikro boyutunda takviye edildiği durumda, elde edilen malzemenin çekme mukavemeti 645,5 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 310,44 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlere göre çok düşük bir değerdir. Bu durum karbon elyafın çekme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturduğundan kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen *intra-ply* hibrit kompozitin çekme mukavemeti 496,67 MPa değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 CNT ile bazalt-0,5 CNT malzemelerin sahip olduğu çekme mukavemetinin arasında olduğuna göre mantıklı bir değer olmaktadır. Böylece karbon ile takviye edilmiş kompozitin çekme mukavemetinde hibritleşme olayı sonucunda yaklaşık %23,05 oranında düşüş ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitin bu değerinde ise %59,99 oranında artış meydana gelmiştir.

4.1.4. Bazalt-karbon-0,1 GNP

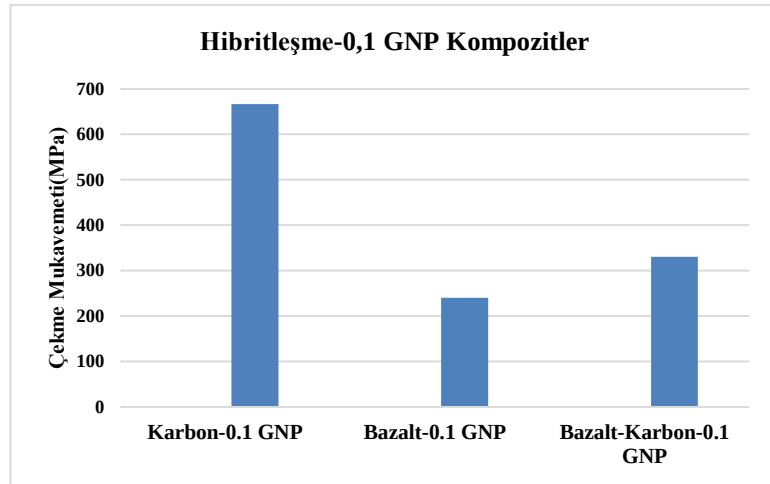
Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin çekme özelliklerinde etkilerini araştırmak için üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunedeki ağırlık olarak %0,5 ve hacim olarak $1,07 \times 10^{-3}$ oranında CNT dolgululu epoksi reçinesi %60 oranında karbon, aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunedeki ise %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %0,1 oranında GNP içeren epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin çekme özelliklerini bulmak için ASTM D3039 standardına göre çekme deneyleri yapılmıştır. Elastisite modülü için bulunan değerler Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Karbon-0.1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi matrisi %0,1 GNP içeren karbon kompozitin elastisite modülü 132,35 GPa olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozit için 70,135 GPa olup, karbon kompozitlere göre çok düşük bir değere sahiptir. Bu olay karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmakta olabilmektedir. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesinden üretilmiş olan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modül değeri 105,14 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon-0,1 GNP ile

bazalt-0,1 GNP kompozitlerin elastisite modüllerinin arasında olduğundan dolayı mantıklı bir değer olmaktadır. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %20,56 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %49,91 oranında artmıştır. Çekme mukavemeti için elde edilen sonuçlar Şekil 4.8’de verilmiştir.



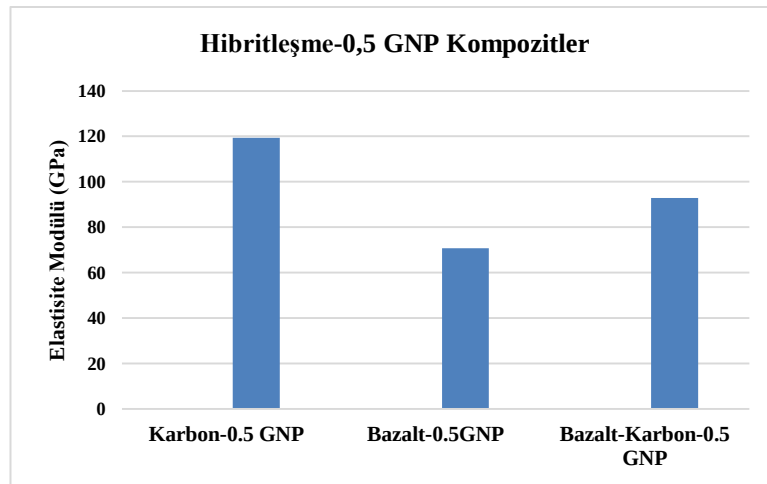
Şekil 4.8. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi matrisi %0,1 GNP içeren karbon kompozitin çekme mukavemeti 666,35 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 240,39 MPa olup, karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın çekme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturduğundan kaynaklanmakta olabilmektedir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin çekme mukavemeti 330,58 MPa değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,1 GNP ile bazalt-0,1 GNP kompozitlerin çekme mukavemetinin arasında olmasına göre makul bir değer sayılmaktadır. Böylece hibritleşme sonucu ortaya çıkan Bazalt-karbonun hibrit kompozitin çekme mukavemeti karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre %50,39 oranında düşük ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş

kompozitlere göre ise %27,28 oranında büyük bir değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

4.1.5. Bazalt-karbon-0,5 GNP

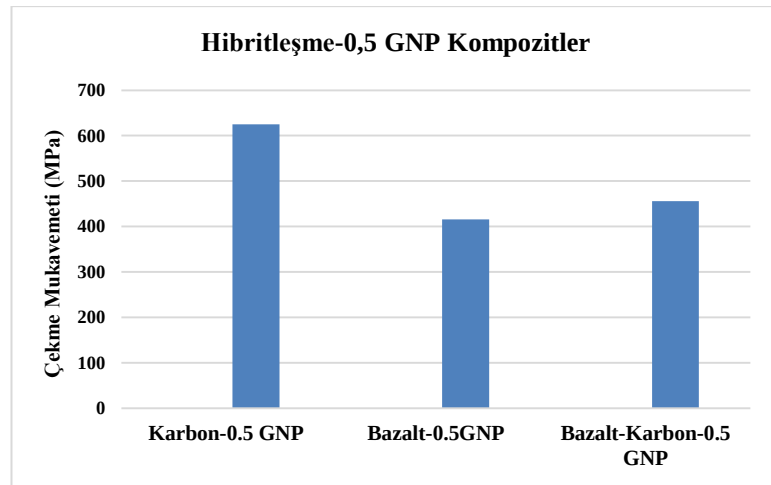
Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerin çekme özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri araştırmak amacıyla üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede %0,5 ağırlık ve $4,671 \times 10^{-3}$ hacim oranında GNP dolgulu epoksi reçinesi %60 oranında karbon, aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune ise %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %0,5 oranında GNP içeren epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Şekil 4.9’da karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP hibrit malzemelerin elastisite modül değerleri verilmektedir.



Şekil 4.9 Karbon-0,5 GNP, bazalt-0.5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi matrisine %0,5 GNP oranında nanodolgu malzemesi eklenmiş ve karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitin elastisite modülü 119,35 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 70,67 GPa olarak bulunmuş ve karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyededir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafın

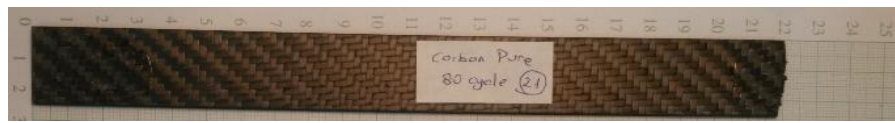
elastisite modülüne göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmakta olabilir. Bu iki tür elyafın birleştirilmesi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modül değeri 92,83 GPa olmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın elastisite modüllerinin arasında olduğundan dolayı makul bir değer olabilmektedir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşme sonucunda ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %22,22 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %31,36 oranında artmıştır. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin çekme mukavemetini bulmak için ASTM D3039 standardına göre çekme deneyi yapılmıştır. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin çekme mukavemeti için elde edilen sonuçlar Şekil 4.10'da verilmektedir.



Şekil 4.10. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi kompozitin matrisi %0,5 GNP nano dolgu malzemesinin eklenmesi ve mikro boyutunda karbon elyaf ile takviye edildiği durumda, elde edilen malzemenin çekme mukavemeti 625,25 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 415,75 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlere göre çok düşük bir değere olmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen *intra-ply* hibrit kompozitin çekme mukavemeti

455,51 MPa değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 GNP ile bazalt-0,5 GNP kompozitin çekme mukavemetlerinin arasında olduğuna göre mantıklı bir değer olabilmektedir. Böylece karbon ile takviye edilmiş kompozitin çekme mukavemetinde hibritleşme sonucunda yaklaşık %27,14 oranında düşüş ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitin bu değerinde ise %9,56 oranında artış meydana gelmiştir. Şekil 4.11’de klasik karbon, bazalt ve intra-ply bazalt-karbonelyaf takviyeli kompozitlerin çekme sonucu kırılmış olan numuneleri verilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.11. Çekme deneyi uygulanarak kırılmış olan örnek numunelerin görüntüleri
a) karbon-pür, b) bazalt-pür, c) bazalt-karbon

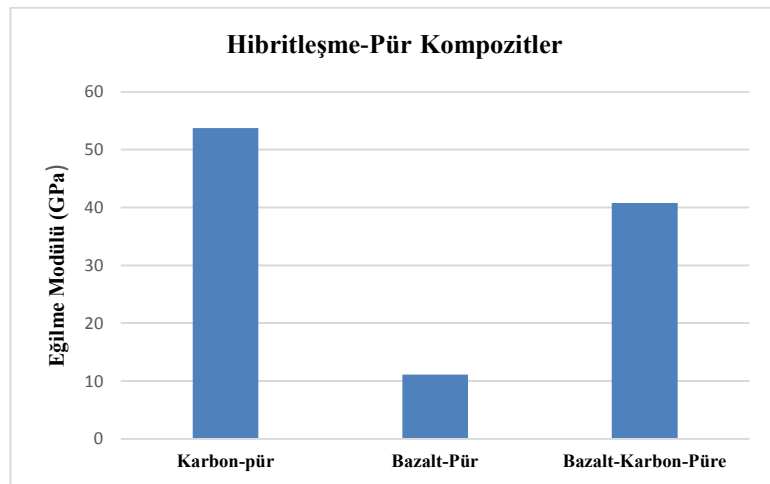
Şekil 4.11’de verildiği numunelerin kırılma modları göz önüne alındığında karbon ve bazalt-karbon elyaf takviyeli kompozitlerde gevrek kırılma olayının ortaya çıktığı görülmektedir. Aynı zamanda bazalt elyaf takviyeli kompozitte sünek kırılma olayının ortaya çıktığı izlenmektedir.

4.2. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Eğilme Özelliklerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler

Çalışmanın bu bölümünde hibritleşme olayının kullanılan malzemelerin eğilme özelliklerinde ortaya çıkardığı etkiler incelenmektedir.

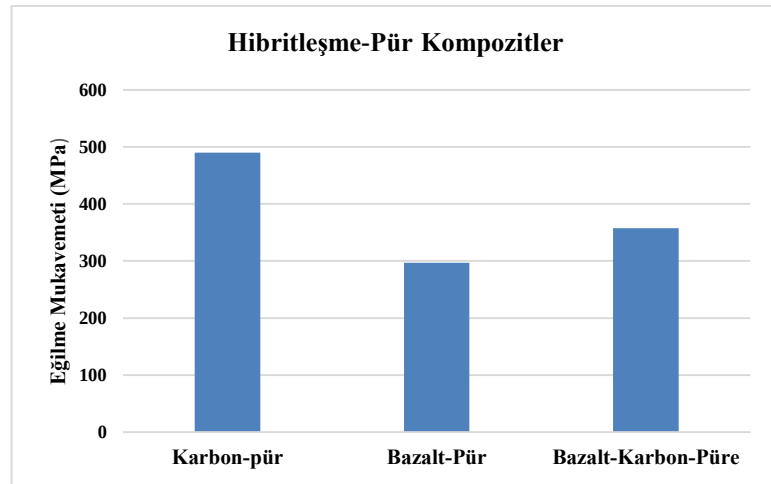
4.2.1. Bazalt-karbon-pür

Hibritleşme olayının etkilerini Bazalt-karbon-pür malzemelerin eğilme özelliklerinde incelemek için üç tür numune kullanılmıştır. Birinci numune %60 oranında karbon elyaf, aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Bütün kompozitler 12 kat twill kumaş tabakalarının istiflenmesinden üretilmiştir. Karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-püre malzemelerin eğilme özelliklerini bulmak için ASTM D790 standardına göre üç-nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12 Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin eğilme modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi pür karbon kompozitin eğilme modülü 53,695 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 11,11 GPa olup, karbon kompozitlere göre oldukça düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olmasından kaynaklanabilmektedir. Kullanılan karbon elyaf ile bazalt elyafın elastisite modülleri sırasıyla 525 ve 89 GPa’dır. Bu iki tür elyafın birleşimi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin eğilme modülünün değeri 40,78 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın eğilme modüllerinin arasında bulunduğundan dolayı makul olarak doğru bir değerdir. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin eğilme modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %24 azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %267 oranında artmıştır. Karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-püre malzemelerin eğilme mukavemetini elde etmek için ASTM D790 standardına göre üç-nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Karbon-pür, bazalt-pür ve bazalt-karbon-pür malzemelerinin eğilme mukavemeti için elde edilen sonuçlar Şekil 4.13’de verilmiştir.



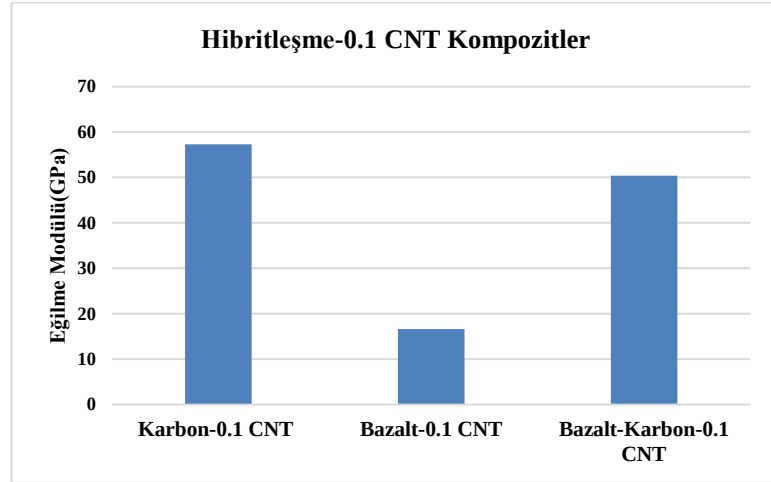
Şekil 4.13 Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.13’te görüldüğü gibi pür karbon kompozitin eğilme mukavemeti 489,6 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 297

MPa olup, karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve epoksi reçinesi ile daha kuvvetli kovalant bağlar kurmasından kaynaklanabilmektedir. Kullanılan karbon elyaf ile bazalt elyafın eğilme mukavemet değerleri sırasıyla 5100 ve 4840 MPa'dır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden oluşan *intra-ply* hibrit kompozitin eğilme mukavemeti değeri 357,198 MPa olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın eğilme mukavemetinin aralığında olduğundan dolayı mantıki olarak doğru bir değer sayılır. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin eğilme mukavemeti karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre %27 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre ise %20,27 oranında artış göstermiştir.

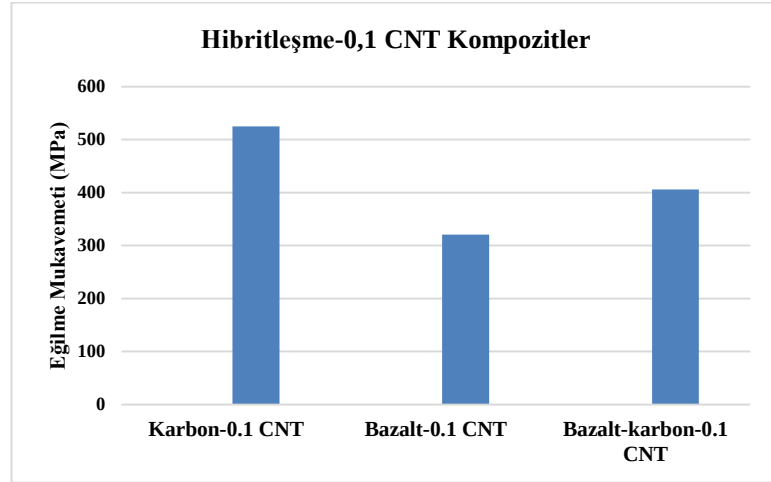
4.2.2. Bazalt-karbon-0,1 CNT

Hibritleşme olayının etkilerini Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin eğilme özelliklerinde araştırmak amacıyla üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede %0,1 ağırlık ve 0.733×10^{-3} hacim oranında CNT dolgulu epoksi reçinesi %60 oranında karbon, aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında %0,1 oranında CNT dolgulu epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Bütün kompozitler 12 kat twill kumaş tabakalarının istiflenmesinden üretilmişlerdir. Karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-püre malzemelerin eğilme özelliklerini bulmak için ASTM D790 standardına göre yapılan üç-nokta eğilme deneyi kullanılmıştır. Eğilme modülü için bulunan değerler Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin eğilme modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi matrisi %0,1 CNT içeren karbon kompozitin eğilme modülü 57,27 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 16,63 GPa olup, karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyededir. Bu olayın nedeni karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok daha büyük olmasından kaynaklanmakta olabilir. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesinden *intra-ply* hibrit kompozitin eğilme modülünün değeri 50,38 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın eğilme modüllerinin aralığında olduğundan dolayı mantıksal olarak doğru bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin eğilme modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %12 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %202 oranında artmıştır. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT, Bazalt-Karbon-0,1 CNT malzemelerinin eğilme mukavemetini elde etmek için ASTM D790 standardına göre üç-nokta eğilme testi yapılmıştır. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin eğilme mukavemetleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.15'te verilmiştir.



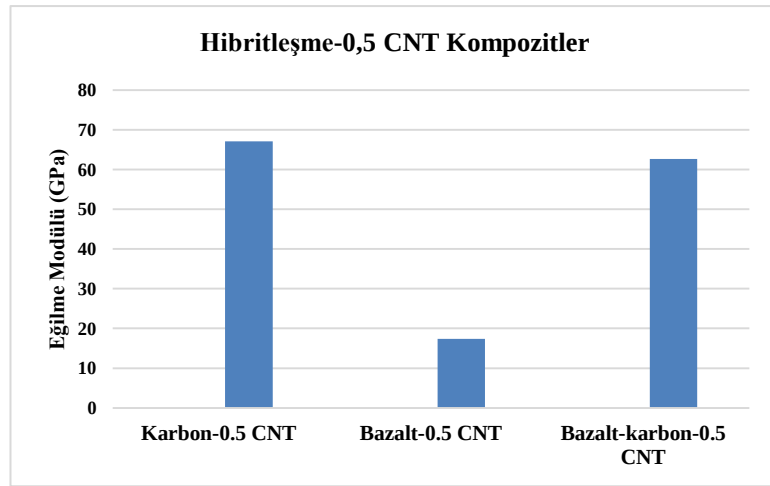
Şekil 4.15. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi matrisi %0,1 CNT içeren karbon kompozitin eğilme mukavemeti 524,92 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 320,5 MPa olup, karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu olay karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturduğundan kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan intra-*ply* hibrit kompozitin eğilme mukavemeti 405,82MPa değerine sahip olmaktadır. Bulunan bu değer karbon-0,1 CNT ile bazalt-0,1 CNT eğilme mukavemetinin arasında olduğuna göre mantıksal olarak doğru bir değerdir. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin eğilme mukavemeti karbon elyafı ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %22,69 oranında azalıp, bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre ise %26,62 oranında artmıştır.

4.2.3. Bazalt-karbon-0,5 CNT

Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerin eğilme özelliklerinde hibritleşme olayının etkilerini araştırmak için üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede ağırlık olarak %0,5 oranında CNT dolgulu epoksi reçinesi %60 oranında karbon, aynı matris

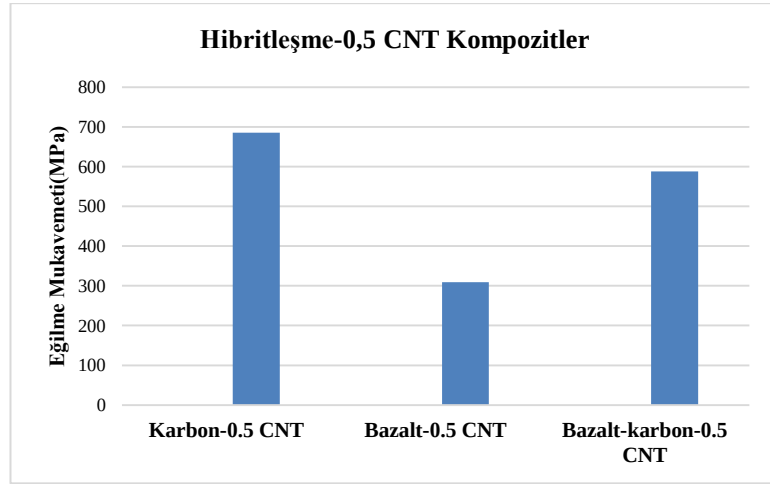
özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede ise %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında %0,5 oranında CNT dolgulu epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Bütün kompozitler 12 kat twill kumaş tabakalarının istiflenmesinden üretilmişlerdir. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerin eğilme özelliklerini bulmak için ASTM D790 standardına göre üç-nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme modülü için bulunan değerler Şekil 4.16’da verilmektedir.



Şekil 4.16. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin eğilme modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.16’da görüldüğü gibi matrisi %0,5 CNT nanodolgu malzemesi eklenmiş karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitin eğilme modülü 67,11 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 17,36 GPa olarak bulunmuş ve karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyedir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleştirilmesi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin eğilme modülü 62,62 GPa olmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın eğilme modüllerinin aralığında olduğundan dolayı mantıklı bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşme sonucunda ortaya çıkan kompozitin eğilme modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %6,69 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre

%260,71 oranında artmıştır. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin eğilme mukavemeti için elde edilen sonuçlar Şekil 4.17’de verilmiştir.

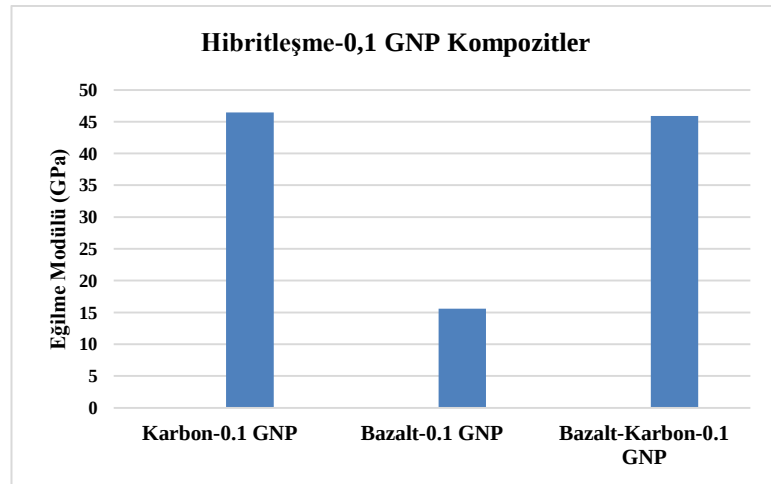


Şekil 4.17 Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve Bazalt-Karbon-0,5 CNT malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi kompozitin matrisi nano boyutlarında %0,5 CNT malzemesi ve mikro boyutta karbon elyaf ile takviye edildiği durumda, elde edilen malzemenin eğilme mukavemeti 684,96 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 308,75 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlere göre çok düşük bir değerdir. Bu durum karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturduğundan kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen *intra-ply* hibrit kompozitin eğilme mukavemeti 587,5 MPa değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 CNT’ ile bazalt 0,5 eğilme mukavemet değerlerinin aralığında olduğundan dolayı makul bir değer olmaktadır. Böylece karbon ile takviye edilmiş kompozitin eğilme mukavemetinde hibritleşme olayı sonucunda yaklaşık %14,23 oranında düşüş ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitin bu değerinde ise %47,45 oranında artış meydana gelmiştir.

4.2.4. Bazalt-karbon-0,1 GNP

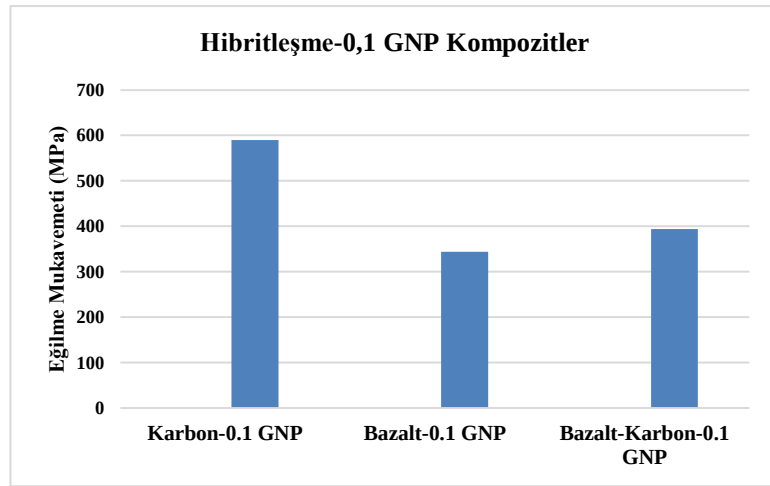
Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin eğilme özelliklerinde etkilerini araştırmak için üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede ağırlık olarak %0,1 oranında GNP içeren epoksi reçinesi %60 oranında karbon, ikincisi aynı matris özelliklerine sahip %60 hacim oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede ise %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında %0,1 GNP içeren epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Bütün kompozitler 12 kat twill kumaş tabakalarının istiflenmesinden üretilmişlerdir. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerin eğilme özelliklerini bulmak için ASTM D790 standardına göre üç-nokta eğilme testi yapılmıştır. Eğilme modülü için bulunan değerler Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin eğilme modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi matrisi %0,1 GNP içeren karbon kompozitin eğilme modül değeri 46,45 GPa olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozit için 15,61 GPa olup, karbon kompozitlere göre çok düşük bir değere sahiptir. Bu olay karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmakta olabilmektedir. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesinden üretilmiş olan *intra-ply* hibrit kompozitin eğilme

modülünün değeri 45,88 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın eğilme modüllerinin arasında bulunduğundan dolayı mantıklı bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin eğilme modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %1,23 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %193,91 oranında artmıştır. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin eğilme mukavemetleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.19’da verilmiştir.



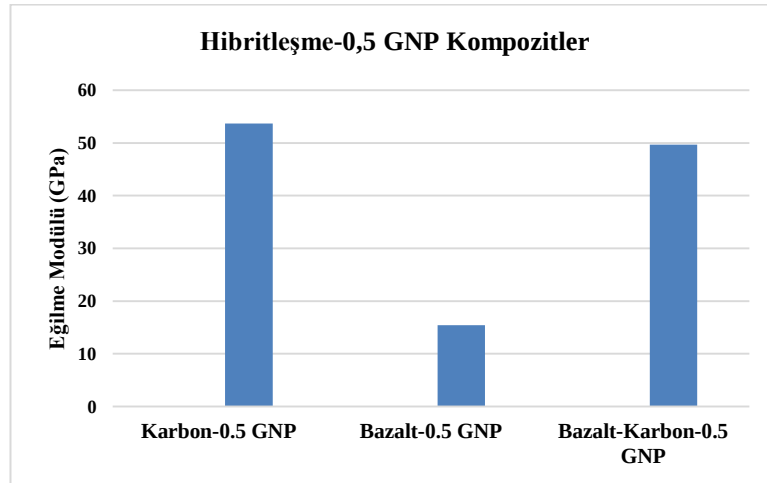
Şekil 4.19. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi matrisi %0,1 GNP içeren karbon kompozitin eğilme mukavemeti 590 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 343,75 MPa bulunmuştur ve karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturduğundan olabilmektedir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin eğilme mukavemeti 393,7 MPa değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,1 GNP ile bazaltın eğilme mukavemetinin arasında olduğuna göre makul bir değer sayılabilir. Böylece hibritleşme sonucu ortaya çıkan Bazalt-karbon hibrit kompozitin eğilme mukavemetinin karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre

%33,27 oranında düşük ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre ise %14,53 büyük bir değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

4.2.5. Bazalt-karbon-0,5 GNP

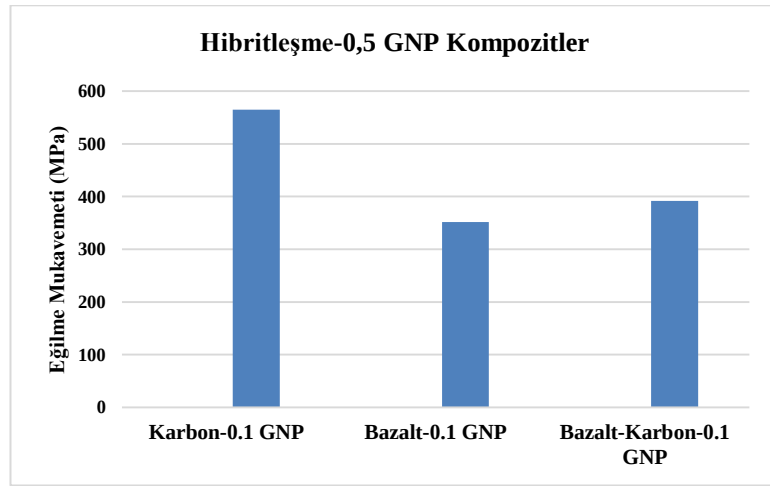
Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin eğilme özelliklerinde etkilerini araştırmak için üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede ağırlık olarak %0,5 oranında CNT içeren epoksi reçinesi %60 oranında karbon ve aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında %0,5 CNT içermekte olan epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir.



Şekil 4.20. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin eğilme Modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi matrisi %0,5 oranında GNP nanodolgu malzemesi içeren karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitin eğilme modülü 53,676 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 15,42 GPa olarak bulunmuş ve karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyededir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmakta olabilir. Bu iki tür elyafın birleştirilmesi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin eğilme modülü 49,67 GPa

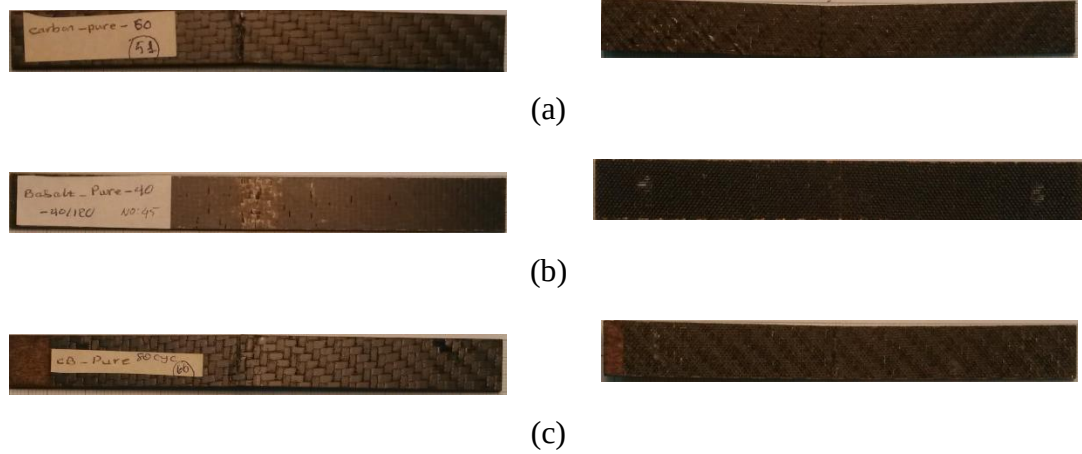
olmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın eğilme modüllerinin arasında olduğundan dolayı mantıksal olarak doğru bir değer sayılabilmektedir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşme sonucunda ortaya çıkan kompozitin eğilme modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %7,46 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %222,11 oranında artmıştır. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin eğilme mukavemetini bulmak için ASTM D790 standardına göre üç-nokta eğilme testi yapılmıştır. Eğilme mukavemeti için elde edilen sonuçlar Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi kompozitin matrisine nano boyutunda %0,5 GNP oranında dolgu malzemesinin eklenmesi ve mikro boyutunda karbon elyaf ile takviye edilmesi ile, elde edilen malzemenin eğilme mukavemeti 564,96 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 351,55 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlere göre çok düşük bir değere olmaktadır. Bu olay karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturmamasından kaynaklanabilmektedir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen intra-ply hibrit kompozitin eğilme mukavemeti 391,96 MPa değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 GNP ile bazaltın-0,5 GNP eğilme

mukavemetinin arasında olduğuna göre mantıklı bir değer olabilmektedir. Böylece karbon ile takviye edilmiş kompozitin eğilme mukavemetinde hibritleşme olayında yaklaşık %30,62 oranında düşüş ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitin bu değerinde %11,49 oranında artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.22. Üç-nokta eğilme deneyi uygulanarak kırılmış olan örnek numunelerin ön ve arka görüntüleri

a) karbon-pür, b) bazalt-pür, c) bazalt-karbon-pür

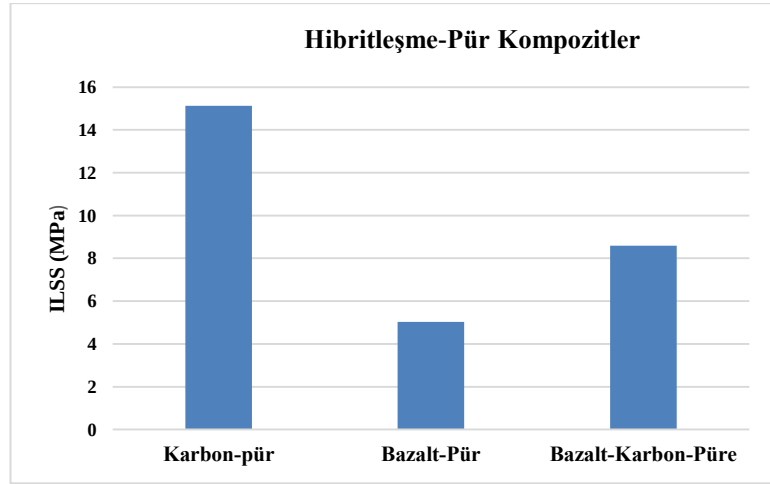
4.3. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin ILSS değerlerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler

Çalışmanın bu bölümünde hibritleşme olayının çalışmada kullanılan malzemelerin ILSS değerlerinde ortaya çıkardığı etkiler incelenmektedir.

4.3.1. Bazalt-karbon-pür

Hibritleşme olayının etkilerini Bazalt-karbon-pür malzemelerin ILSS değerlerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek için üç tür numune kullanılmıştır. Birinci numune %60 oranında karbon elyaf, aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede ise %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Karbon-

pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-pür malzemelerin ILSS değerlerini bulmak için ASTM D2344 standardına göre kısa kiriş deneyi yapılmıştır. ILSS için elde edilen sonuçlar Şekil 4.23'te verilmiştir.

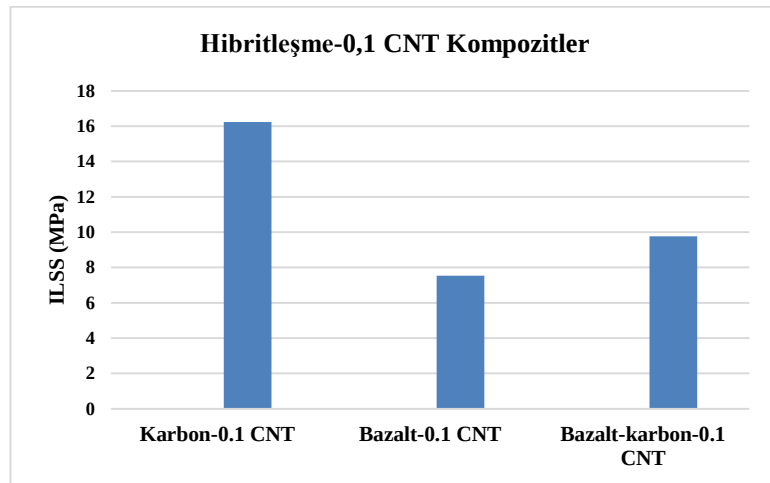


Şekil 4.23. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.23'te görüldüğü gibi pür karbon kompozitin ILSS değeri 15,13 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 5,03 MPa olup, karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve epoksi reçinesi ile daha kuvvetli kovalant bağlar kurmasından kaynaklanabilmektedir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden oluşan intra-ply hibrit kompozitin ILSS değeri 8,59 MPa olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın ILSS değerinin aralığında olduğundan dolayı mantıki olarak doğru bir değer sayılır. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin ILSS değeri karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre %43,22 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre ise %70,77 oranında artış göstermiştir.

4.3.2. Bazalt-karbon-0,1 CNT

Hibritleşme olayının etkilerini, Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerin ILSS değerlerinde araştırmak amacıyla üç tür numune üretilmiştir. Birinci numune %0,1 ağırlık ve $0,733 \times 10^{-3}$ hacim oranında CNT dolgulu epoksi reçinesi %60 oranında karbon, aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numune %30 karbon ve %30 bazalt elyafı takviyeli %0,1 oranında CNT dolgulu epoksi reçinesi içerisinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1CNT ve Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerin ILSS değerlerini bulmak için ASTM D2344 standardına göre kısa kiriş deneyi yapılmıştır. ILSS için bulunan değerler Şekil 4.24’de verilmiştir.



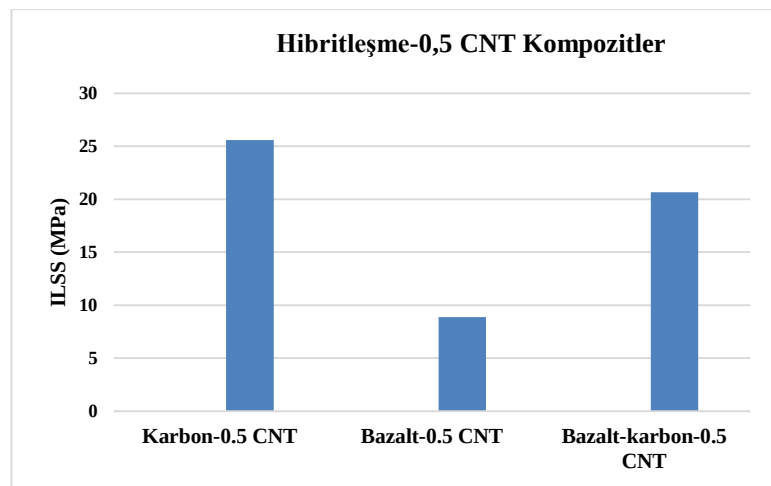
Şekil 4.24 Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve Bazalt-Karbon-0,1 CNT malzemelerinin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.24’te görüldüğü gibi matrisi %0,1 CNT içeren karbon kompozitin ILSS değeri 16,23 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 7,53 MPa olup, karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturduğundan kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin ILSS değeri 9,76 MPa

değerine sahip olmaktadır. Bulunan bu değer karbon-0,1 CNT ile bazalt-0,1 CNT ILSS değerleri arasında olduğuna göre mantıklı bir değerdir. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin ILSS değeri karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %53,60 oranında azalıp, bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre ise %29,61 oranında artmıştır.

4.3.3. Bazalt-karbon-0,5 CNT

Hibritleşme olayının etkilerini Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerin ILSS değerleri üzerinde araştırmak için üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede ağırlık olarak %0,5 CNT dolgulu epoksi reçinesi %60 oranında karbon, aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede ise %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında %0,5 oranında CNT dolgulu epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Bütün kompozitler 12 kat twill kumaş tabakalarının istiflenmesinden üretilmişlerdir. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerin ILSS değerlerini bulmak için ASTM D2344 standardına göre kısa kiriş deneyi yapılmıştır. ILSS için bulunan değerler Şekil 4.25'te verilmektedir.

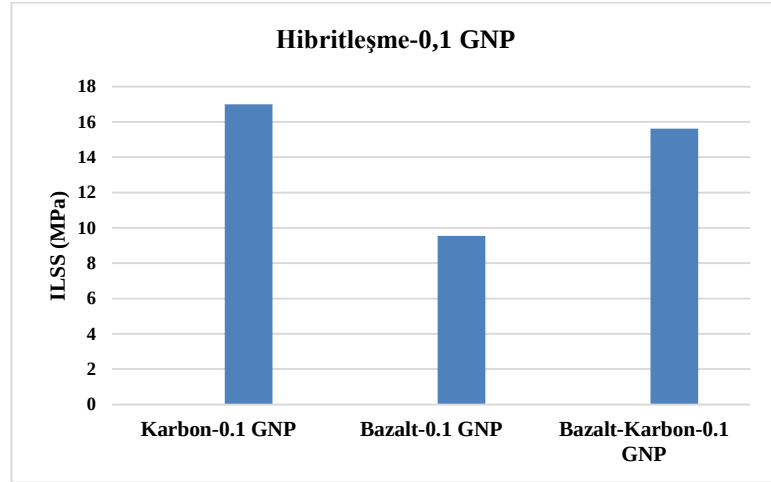


Şekil 4.25. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT, Bazalt-Karbon-0,5 CNT malzemelerinin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.25'te görüldüğü gibi kompozitin matrisi %0,5 CNT nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile nano boyutta ve karbon elyaf ile mikro boyutunda takviye edildiği durumda, elde edilen malzemenin ILSS değeri 25,58 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 8,87 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlere göre çok düşüktür. Bu olayın nedeni karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturduğundan kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen *intra-ply* hibrit kompozitin ILSS değeri 20,65 MPa değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 CNT' ile bazaltın ILSS değerleri aralığında olduğuna göre makul bir değer olmaktadır. Böylece karbon ile takviye edilmiş kompozitin ILSS değeri hibritleşme olayı sonucunda yaklaşık %19,27 oranında düşüş ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitin bu değerinde ise %132,87 oranında artış meydana gelmiştir.

4.3.4. Bazalt-karbon-0,1 GNP

Hibritleşme olayının etkilerini Bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin ILSS değerlerinde araştırmak için üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede ağırlık olarak %0,5 oranında CNT dolgulu epoksi reçinesi %60 oranında karbon, ikincisi aynı matris özelliklerine sahip %60 hacim oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında %0,1 GNP dolgulu epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP Bazalt-karbon-GNP malzemelerin ILSS değerlerini bulmak için ASTM D2344 standardına göre kısa kiriş testi yapılmıştır. ILSS için bulunan değerler Şekil 4.26' da verilmiştir.



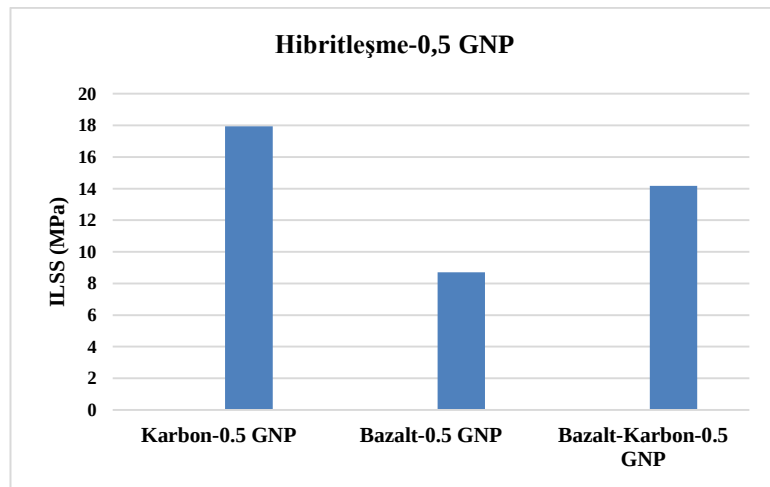
Şekil 4.26. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.26’da görüldüğü gibi matrisi %0,1 GNP içeren karbon kompozitin ILSS değeri 17 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 9,54 MPa olarak bulunmuştur ve karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturduğundan kaynaklanabilmektedir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan intra-ply hibrit kompozitin ILSS değeri 15,62 MPa değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,1 GNP ile bazaltın ILSS değerinin arasında olduğuna göre makul bir değer sayılabilir. Böylece hibritleşme sonucu ortaya çıkan Bazalt-karbon elyafının hibrit kompozitin ILSS değeri elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre %8,11 oranında düşük ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre ise %63,73 oranında daha büyük bir değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

4.3.5. Bazalt-karbon-0,5 GNP

Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin ILSS değerlerinde etkilerini araştırmak için üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede ağırlık olarak %0,5 CNT içeren epoksi reçinesi %60 oranında karbon elyafı ve aynı matris

özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında %0,5 CNT içermekte olan epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin eğilme mukavemetini bulmak için ASTM D2344 standardına göre kısa kiriş testi yapılmıştır. ILSS değeri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.27. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerinin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.27’de görüldüğü gibi kompozitin reçinesi nano boyutunda %0,5 GNP dolgu malzemesi ve mikro boyutta karbon elyaf ile takviye edilmesi ile elde edilen malzemenin ILSS değeri 17,94 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 351,55 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlere göre çok düşük bir değerdir. Bu durum karbon elyafın eğilme mukavemetinin bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olması ve polimerizasyon esnasında epoksi reçinesi ile daha kuvvetli bağlar oluşturmasından kaynaklanabilmektedir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen *intra-ply* hibrit kompozitin ILSS değeri 14,17 MPa değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 CNT ile bazaltın eğilme mukavemetinin arasında olduğuna göre mantıklı bir değer olabilmektedir. Böylece karbon ile takviye edilmiş kompozitin eğilme mukavemetinde hibritleşme olayında yaklaşık %21 oranında düşüş ve bazalt elyaf ile

takviye edilmiş klasik kompozitin bu değerinde %38,60 oranında artış meydana gelmiştir.

4.4. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Ankastre-Serbest Titreşim Özellikleri ve Elastisite Modülünde Ortaya Çıkardığı Etkiler

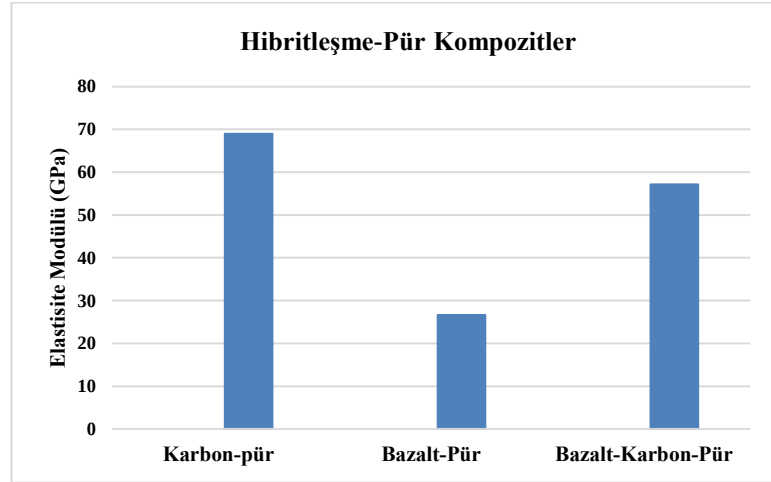
Çalışmanın bu bölümünde hibritleşme olayının kullanılan malzemelerin doğal frekansından elde edilen elastisite modülünde ve sönüm oranlarında ortaya çıkardığı etkiler incelenmektedir. Bu bölümde ankastre-serbest titreşim deneyinden elde edilen doğal frekans değerleri denklem 2 kullanılarak elastisite modülünü bulmak için kullanılmışlardır.

$$f_{n,i} = \frac{(\beta l)_i^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad \begin{aligned} (\beta l)_1 &= 1,875104 \\ (\beta l)_2 &= 4,694091 \\ (\beta l)_3 &= 7,854757 \\ (\beta l)_4 &= 10,995541 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$E = \frac{4\pi^2 \rho A l^4 \omega^2}{(\beta_{L1})^4} \quad (4.2)$$

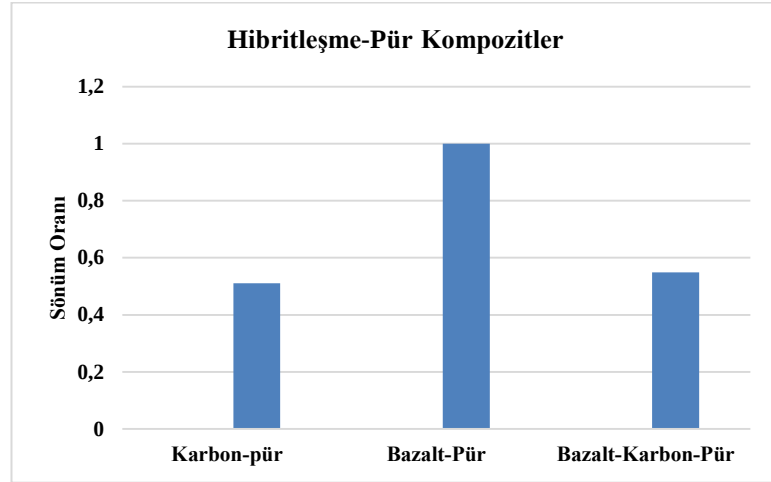
4.4.1. Bazalt-karbon-pür

Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-pür malzemesinin ankastre-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon pür intra-ply hibrit olarak üç tür numune kullanılmıştır. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerin titreşim özelliklerini bulmak için D5023 standardına göre yapılmakta olan ankastre-serbest titreşim deneyi kullanılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.28. Doğal frekanstan elde edilen karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-pür malzemelerinin elastisite modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.28’de görüldüğü gibi pür karbon kompozitin elastisite modülü 69 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 26,67 GPa olup, karbon kompozitlere göre oldukça düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olmasından kaynaklanmakta olabilir. Bu iki tür elyafın birleşimi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülünün değeri 57,18 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın elastisite modüllerinin arasında olduğundan dolayı mantıklı olarak doğru bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafının hibritleşmesinden elde edilen kompozitin elastisite modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %17 azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %414,67 oranında artmıştır. Karbon-pür, bazalt-pür ve bazalt-karbon-pür kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.29’da verilmektedir.

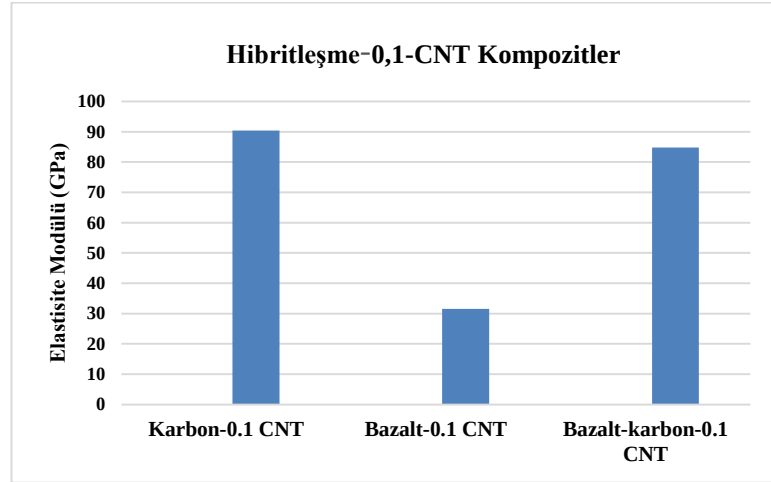


Şekil 4.29. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması

Şekil 4.29’da gösterildiği gibi pür karbon kompozitin sönüm oranı 0,511 olarak elde edilmiştir. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 1 olup, karbon kompozitlere göre yüksek bir değere sahiptir. Bu iki elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin sönüm oranı 0,549 değerine sahip olmaktadır. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın sönüm oranlarının arasında olduğundan dolayı makul bir değer sayılır. Böylece karbon ile bazalt elyaf takviyeli hibrit kompozitin sönüm oranı karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitler göre %7,43 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre %45,10 oranında düşüş göstermiştir.

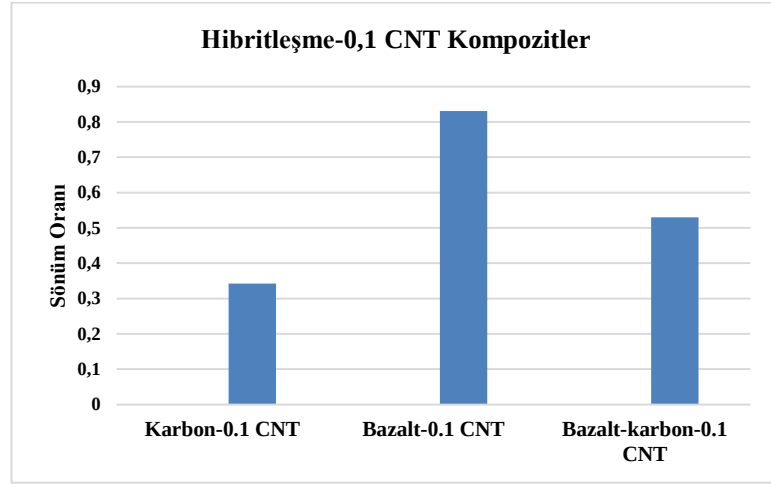
4.4.2. Bazalt-karbon-0,1 CNT

Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin ankastre-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon 0,1 CNT *intra-ply* hibrit olarak üç tür numune kullanılmıştır. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerin titreşim özelliklerini bulmak için D5023 standardına göre ankastre-serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.30. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.30’da görüldüğü gibi matrisi %0,1 CNT içeren karbon kompozitin elastisite modülü 90,45 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 31,526 GPa olup, karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyededir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesi ile oluşturulan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülünün değeri 84,77 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer matrisi 0,1 CNT içeren karbon ile bazalt elyafın elastisite modüllerinin aralığında olduğundan dolayı makul bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %6,27 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %171,21 oranında artmıştır. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerinin sönüm oran değerleri Şekil 4.31’de verilmektedir.

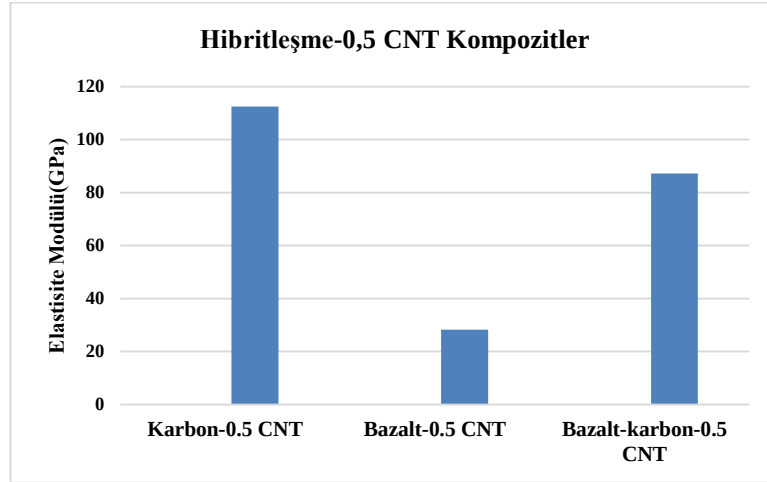


Şekil 4.31. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve Bazalt-Karbon-0,1 CNT kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması

Şekil 4.31’ de görüldüğü gibi matrisi %0,1 CNT içeren karbon kompozitin sönüm oranı 0.342 olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 0,831 olup ve karbon kompozitlere göre çok yüksek bir değere sahiptir. Bu iki elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin sönüm oranı 0,53 değerine sahip olmaktadır. Bulunan bu değer, karbon-0,1 CNT ile bazaltın sönüm oranının arasında olduğuna göre mantıklı bir değer sayılabilmektedir. Böylece matrisi 0,1 CNT içeren ve karbon ile bazaltın hibritleşme sonucu ortaya çıkan kompozitin sönüm oranı aynı matrise sahip olan karbon elyafla takviye edilmiş kompozite göre %54.97 oranında artmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre ise %36.22 oranında artmıştır.

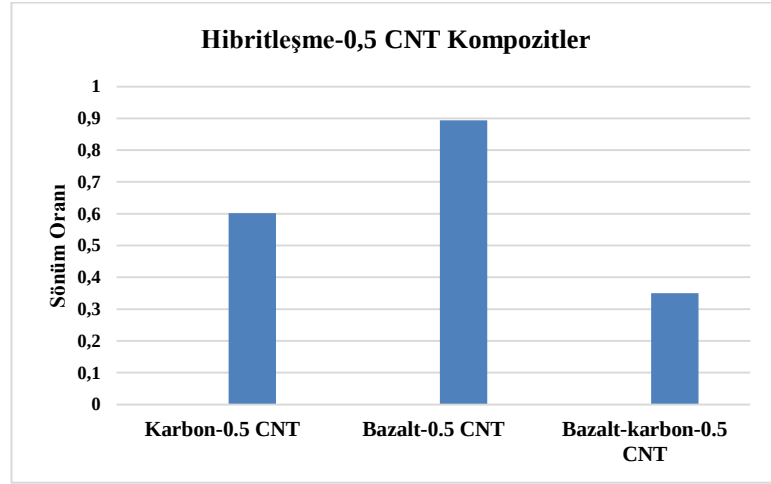
4.4.3. Bazalt-karbon-0,5 CNT

Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin ankastre-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon pür *intra-ply* hibrit olarak üç tür numune kullanılmıştır. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerin titreşim özelliklerini bulmak için D5023 standardına göre ankastre-serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.32’de görüldüğü gibi matrisi %0,5 CNT nanodolgu malzemesi eklenmiş karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitin elastisite modülü 112,46 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 28,2 GPa olarak bulunmuş ve karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyededir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafın elastisite modülüne göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmakta olabilmektedir. Bu iki elyafın birleştirilmesi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülü 87,15 GPa olmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazalt elyaflarının elastisite modüllerinin arasında olduğundan dolayı mantıklı bir değer olabilmektedir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşme sonucunda ortaya çıkan ve matrisi 0,5 CNT içeren kompozitin elastisite modülü aynı matrise sahip karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozite göre %22,5 oranında azalmış olup, bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %209 oranında artmıştır. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.33’te verilmektedir.



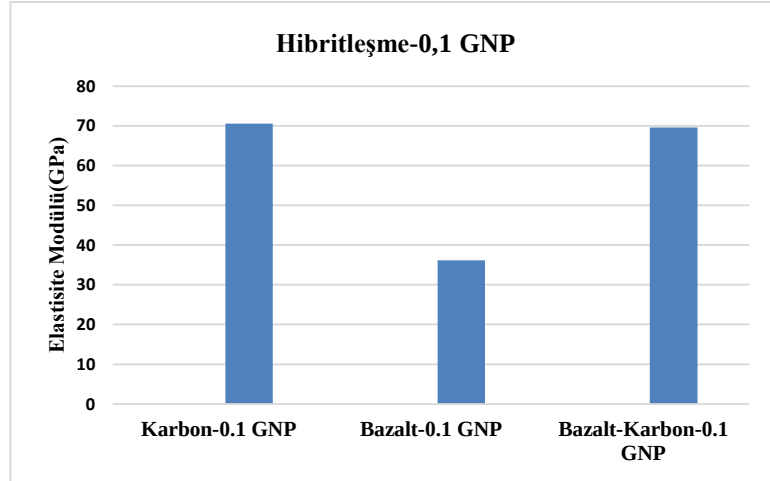
Şekil 4.33. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.33'te görüldüğü gibi nano boyutunda kompozitin matrisine %0,5 CNT nano dolgu malzemesinin eklenmesi ve mikro boyutunda karbon elyaf ile takviye edildiği durumda, elde edilen malzemenin sönüm oranı 0,41 olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 1 olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlere göre çok yüksek bir değere sahip olmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen *intra-ply* hibrit kompozitin sönüm oranı 0,63 değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 CNT ile bazalt-0,5 CNT malzemelerin sahip olduğu sönüm oranı arasında olduğuna göre makul bir değer olabilmektedir. Böylece reçinesi 0,5 CNT içeren karbon ile takviye edilmiş kompozitin sönüm oranı hibritleşme olayında yaklaşık %0,54 oranında artmış ve aynı matrise sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin bu değerinde %37 oranında düşüş meydana gelmiştir.

4.4.4. Bazalt-karbon-0,1 GNP

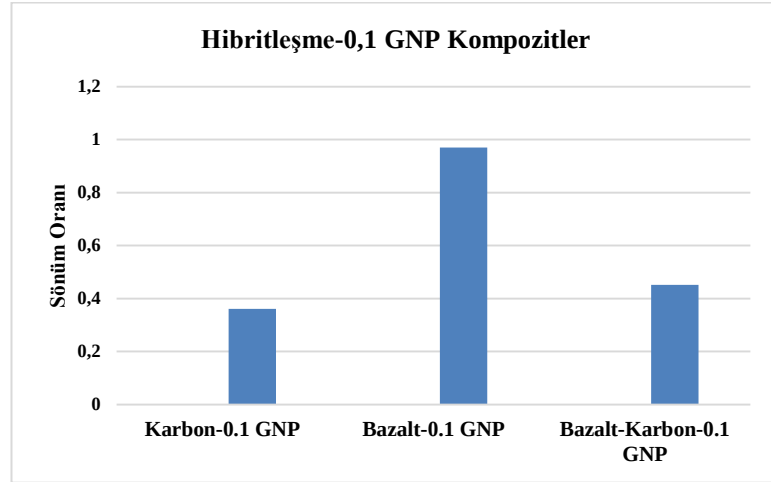
Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin ankastre-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon pür *intra-ply* hibrit olarak üç tür numune kullanılmıştır. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerin titreşim özelliklerini bulmak

için D5023 standardına göre ankastre-serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.34'te verilmiştir.



Şekil 4.34. Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP, bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.34'te görüldüğü gibi matrisi %0,1 GNP içeren karbon kompozitin elastisite modülü 70,5 GPa olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozit için 36,18 GPa olup, karbon kompozitlere göre çok düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafın elastisite modülüne göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanabilmektedir. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesinden üretilmiş olan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülünün değeri 69,55 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer aynı matrise sahip karbon ile bazaltın elastisite modüllerinin arasında olduğundan dolayı mantıki bir değer sayılabilmektedir. Böylece matrisi 0,1 GNP içeren karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü aynı matrise sahip olan karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozite göre %1,35 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %92,23 oranında artmıştır. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin sönüm oran değerleri Şekil 4.35'te verilmektedir.

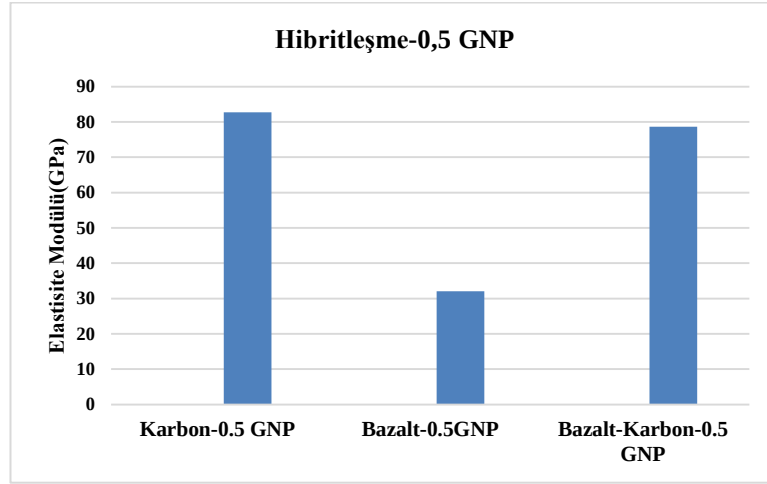


Şekil 4.35. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP, bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması

Şekil 4.35'te görüldüğü gibi matrisi %0,1 GNP içeren karbon kompozitin sönüm oranı 0,361 olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 0,97 olup, karbon kompozitlere göre çok yüksek bir değere sahiptir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin sönüm oranı 0,452 değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,1 GNP ile bazalt-0,1 GNP kompozitlerin sönüm oranlarının arasında olmasına göre makul bir değer sayılmaktadır. Böylece hibritleşme sonucu ortaya çıkan Bazalt-karbonun hibrit kompozitin sönüm oranı reçinesi 0,1 GNP içeren karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre %25,21 oranında yüksek ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre %53,40 oranında düşük bir değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

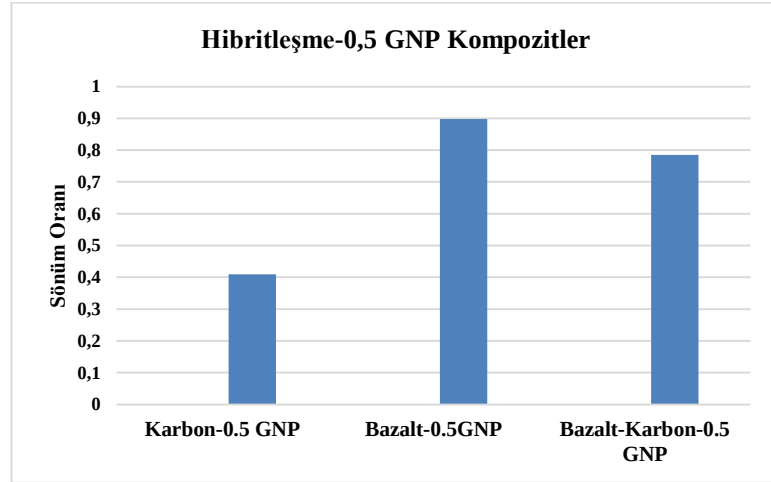
4.4.5. Bazalt-karbon-0,5 GNP

Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin ankastre-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon pür *intra-ply* hibrit olarak üç tür numune kullanılmıştır. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerin titreşim özelliklerini bulmak için D5023 standardına göre ankastre-serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP kompozitlerin doğal frekanstan elde edilen elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.36’da görüldüğü gibi matrisi %0,5 GNP nanodolgu malzemesi eklenmiş karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitin elastisite modülü 82,71 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 32,04 GPa olarak bulunmuş ve karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyededir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafın elastisite modülüne göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı matrise sahip olan ve bu iki elyafın birleştirilmesi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülü 78,66 GPa olmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın elastisite modüllerinin aralığında olduğundan dolayı makul bir değer sayılabilir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşme sonucunda ortaya çıkan çok ölçekli kompozitin elastisite modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozite göre %4,90 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %145,50 oranında artmıştır. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.37’de verilmektedir.



Şekil 4.37. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve Bazalt-Karbon-0,5 GNP malzemelerinin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.37’de görüldüğü gibi kompozitin matrisi %0,5 GNP nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile ve mikro boyutunda karbon elyaf ile takviye edildiği durumda, elde edilen malzemenin sönüm oranı 0,41 olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 0,898 olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlere göre çok düşük bir değere olmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen intra-ply hibrit kompozitin elastisite mukavemeti 0,785 değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 GNP ile bazalt-0,5 GNP’nin sönüm oranlarının arasında olduğuna göre makul bir değer sayılabilmektedir. Böylece karbon ile takviye edilmiş kompozitin sönüm oranı hibritleşme sonucunda yaklaşık %0.91,46 oranında artmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitin bu değerinde ise %12,58 oranında düşüş meydana gelmiştir.

4.5. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Serbest-Serbest Titreşim Özellikleri ve Elastisite Modülünde Ortaya Çıkardığı Etkiler

Çalışmanın bu bölümünde hibritleşme olayının çalışmada kullanılan malzemelerin serbest-serbest doğal frekansından elde edilen elastisite modülünde ortaya çıkardığı etkiler incelenmektedir. Bu bölümde serbest-serbest titreşim deneyinden elde edilen

doğal frekans değerleri Denklem 4.4 kullanılarak elastisite modülünü bulmak için kullanılmışlardır.

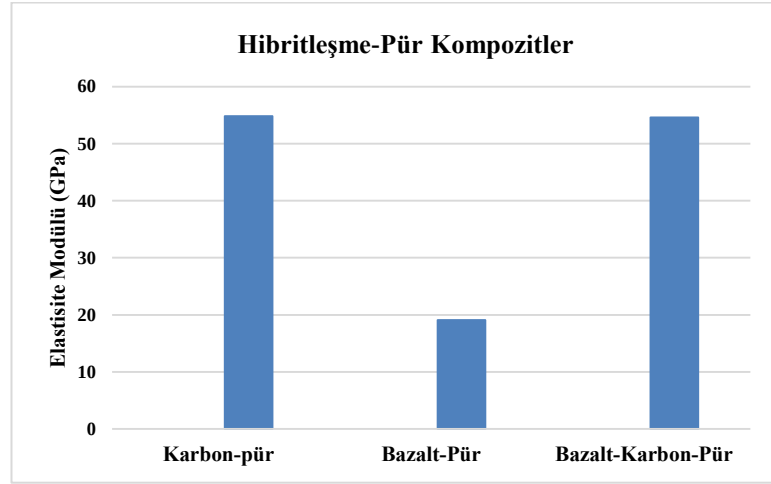
$$\begin{aligned}
 (\beta l)_1 &= 1,875104 \\
 (\beta l)_2 &= 4,694091 \\
 (\beta l)_3 &= 7,854757 \\
 (\beta l)_4 &= 10,995541
 \end{aligned}$$

$$f_{n,i} = \frac{(\beta l)_i^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (4.3)$$

$$E = \frac{4\pi^2 \rho A l^4 \omega^2}{(\beta_{L1})^4 \times I} \quad (4.4)$$

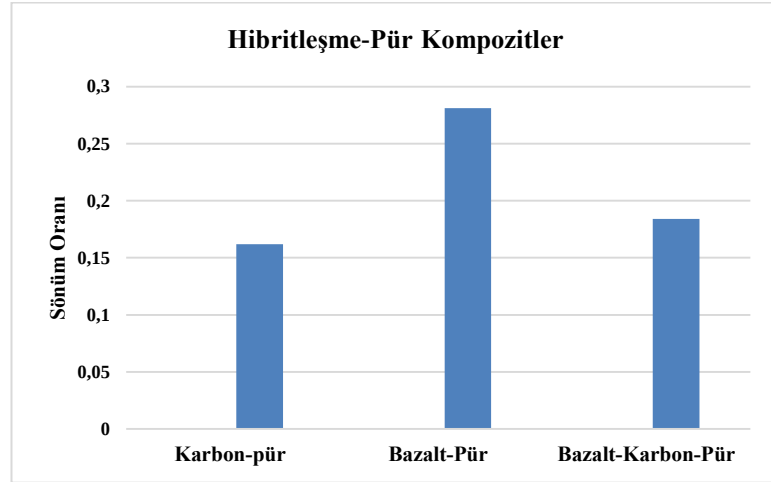
4.5.1. Bazalt-karbon-pür

Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-pür malzemesinin serbest-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon pür intra-ply hibrit olarak üç tür numune kullanılmıştır. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerin titreşim özelliklerini bulmak için D5023 standardına göre yapılan serbest-serbest titreşim deneyi kullanılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.38. Doğal frekanstan elde edilen karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.38’de görüldüğü gibi pür karbon kompozitin elastisite modülü 54,84 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 19,11 GPa olup, karbon kompozitlere göre oldukça düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok daha yüksek bir değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşimi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülünün değeri 54,6 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon takviyeli kompozit ile bazalt takviyeli kompozitin elastisite modüllerinin arasında olduğundan dolayı makul bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %0,44 azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %185,71 oranında artmıştır. Karbon-pür, bazalt-pür ve bazalt-karbon-pür kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.39’da verilmektedir

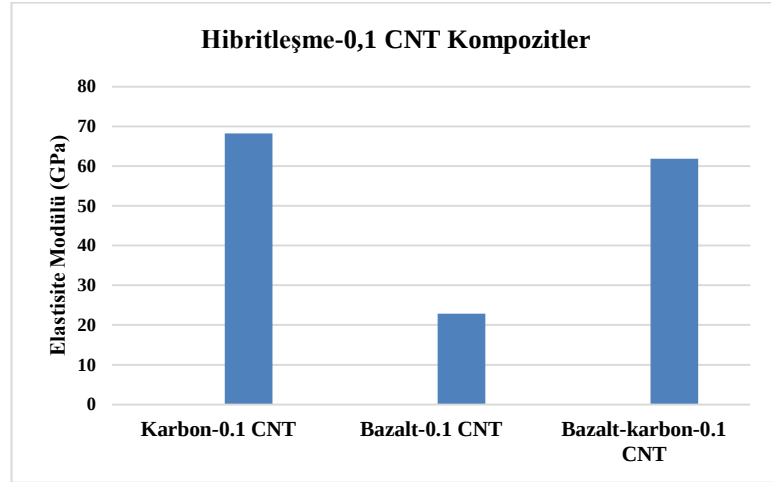


Şekil 4.39. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.39’da görüldüğü gibi pür karbon kompozitin sönüm oranı 0,162 olarak elde edilmiştir. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 0.281 olup, karbon kompozitlere göre çok yüksek bir değere sahiptir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin sönüm oranı 0,184 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın sönüm oranının arasında olduğundan dolayı mantıklı bir değer sayılabilir. Böylece karbon ile bazalt elyaf takviyeli hibrit kompozitin sönüm oranı karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre %13,58 oranında artmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre ise %34,52 oranında artış göstermiştir.

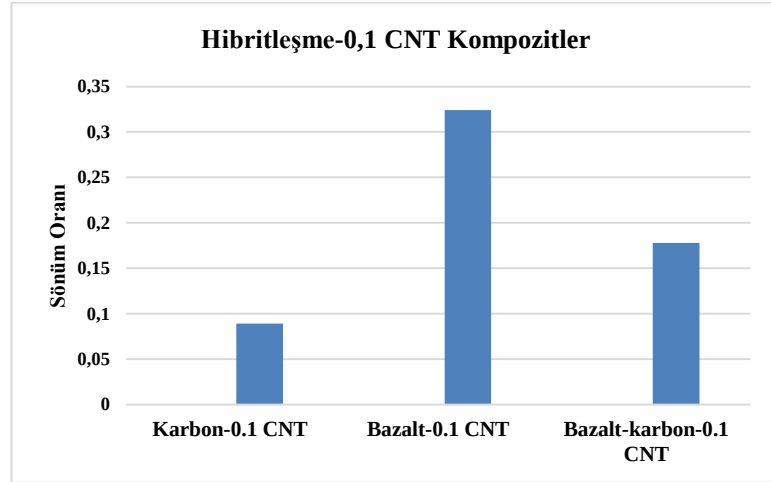
4.5.2. Bazalt-karbon-0,1 CNT

Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin serbest-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon pür *intra-ply* hibrit olarak üç tür numune kullanılmıştır. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerin titreşim özelliklerinde bulmak için D5023 standardına göre serbest-serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.40’da verilmiştir.



Şekil 4.40. Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.40’da görüldüğü gibi matrisi %0,1 CNT içeren karbon kompozitin elastisite modülü 68,18 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 22,86 GPa olup, karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyededir. Bu olayın nedeni, karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesi ile oluşturulan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülü 61,83 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon ile bazalt elyafın elastisite modüllerinin arasında olduğuna göre mantıksal olarak doğru bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %9,31 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %170,47 oranında artmıştır. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.41’de verilmektedir.

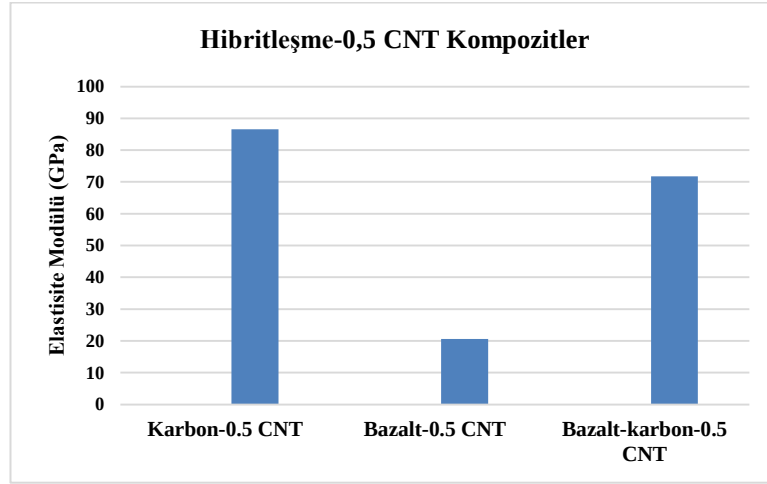


Şekil 4.41. Karbon-0,1 CNT, bazalt-0,1 CNT ve bazalt-karbon-0,1 CNT kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.41’de görüldüğü gibi matrisi %0,1 CNT içeren karbon kompozitin sönüm oranı 0.089 olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 0,324 olup, karbon kompozitlere göre çok yüksek bir değere sahiptir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin sönüm oranı 0,178 değerine sahip olmaktadır. Bulunan bu değer, karbon-0,1 CNT ile bazalt-0,1 CNT’nin sönüm oranlarının arasında olduğuna göre makul bir değerdir. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden elde edilen 0,1 CNT dolgulu kompozitin elastisite modülü karbon-0,1CNT kompozite göre %100 oranında artmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş 0,1 CNT nanodolgu içeren kompozite göre ise %82 oranında düşmüştür.

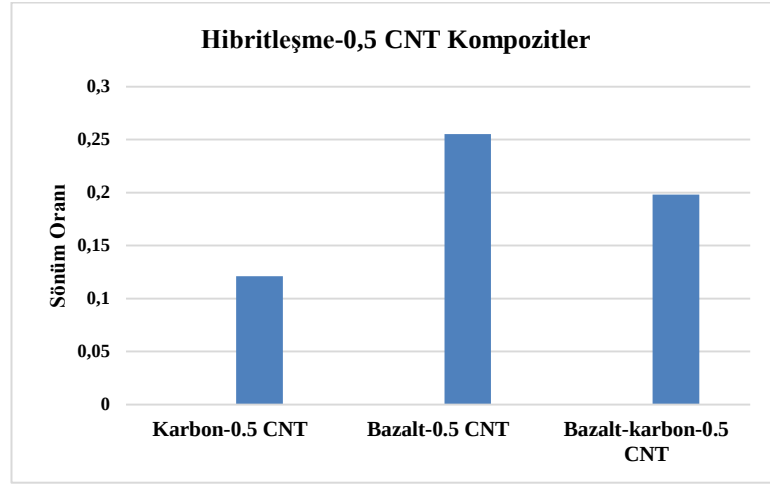
4.5.3. Bazalt-karbon-0,5 CNT

Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin serbest-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon pür *intra-ply* hibrit olarak üç tür numune kullanılmıştır. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve Bazalt-karbon-0,5 CNT titreşim özelliklerini bulmak için ASTM D5023 standardına göre serbest-serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.42’de verilmektedir.



Şekil 4.42. Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.42’de görüldüğü gibi matrisine %0,5 CNT nanodolgu malzemesi eklenmiş karbon elyaf takviyeli kompozitin elastisite modülü 86,59 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 20,62 GPa olarak bulunmuş ve karbon kompozitlere göre çok düşük bir seviyededir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleştirilmesi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülü 71,73 GPa olmuştur. Bulunan bu değer karbon ve bazalt takviyeli kompozitlerin elastisite modüllerinin arasında olduğundan göre makul bir değer olabilir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşme sonucunda ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü matrisi 0,5 CNT içeren karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %17,16 oranında azalmış olup, aynı matrise sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozite göre ise %247,87 oranında artmıştır. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.43’de verilmektedir.



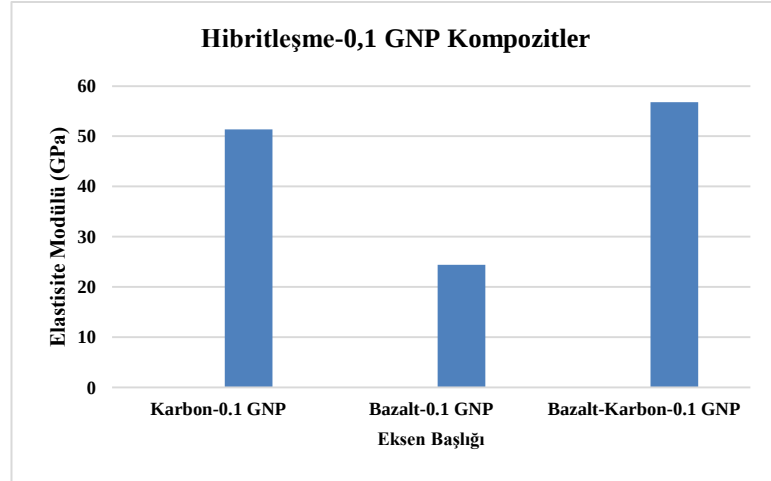
Şekil 4.43. Karbon-0,5 CNT, bazalt-0,5 CNT ve bazalt-karbon-0,5 CNT kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.43’da görüldüğü gibi nano boyutta, kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano dolgu malzemesinin eklenmesi ve mikro boyutunda karbon elyaf ile takviye edildiği durumda, elde edilen malzemenin sönüm oranı 0,121 olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 0,255 olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlere göre çok yüksek bir değerdir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen ve aynı matrise sahip olan *intra-ply* hibrit kompozitin sönüm oranı 0,198 değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 CNT ile bazalt-0,5 CNT malzemelerin sahip olduğu sönüm oranının arasında bulunduğu göre mantıklı bir değer sayılır. Böylece matrisi %0,5 CNT içeren karbon ile takviye edilmiş kompozitin sönüm oranı hibritleşme olayında yaklaşık %63,67 oranında artmış ve aynı matrise sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin bu değerinde %22,35 oranında düşüş meydana gelmiştir.

4.5.4. Bazalt-karbon-0,1 GNP

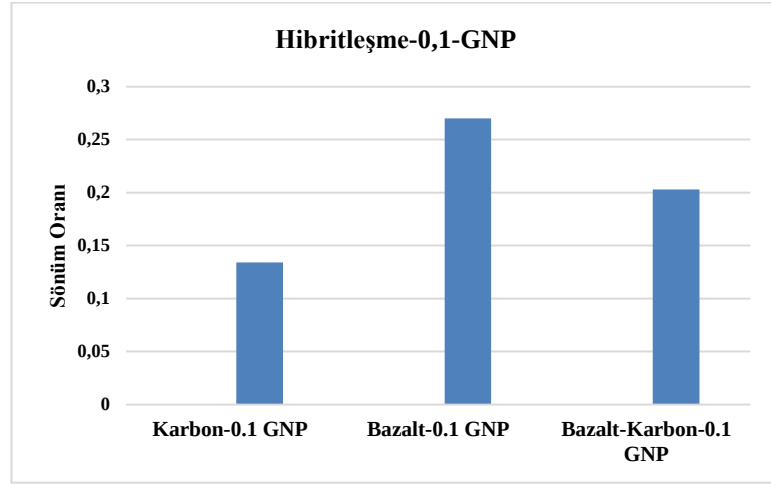
Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin serbest-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon 0,1 GNP *intra-ply* hibrit olarak üç tür numune kullanılmıştır. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemelerin titreşim özelliklerini bulmak

için D5023 standardına göre serbest-serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.44’te verilmiştir.



Şekil 4.44 Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP, Bazalt-Karbon-0,1 GNP kompozitlerin elastisite modül değerleri kıyaslanması

Şekil 4.44’te görüldüğü gibi matrisi %0,1 GNP içeren karbon kompozitin elastisite modülü 51,35 GPa olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozit için 24,43 GPa olup, karbon kompozitlere göre çok düşük bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafın elastisite modülüne göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesinden üretilmiş olan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülünün değeri 56,78 GPa olarak elde edilmiştir. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın elastisite modüllerinin aralığında olduğundan dolayı makul bir değerdir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü aynı matrise sahip olan ve karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozite göre %10,57 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozite göre %132,42 oranında artmıştır. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.45’de verilmektedir

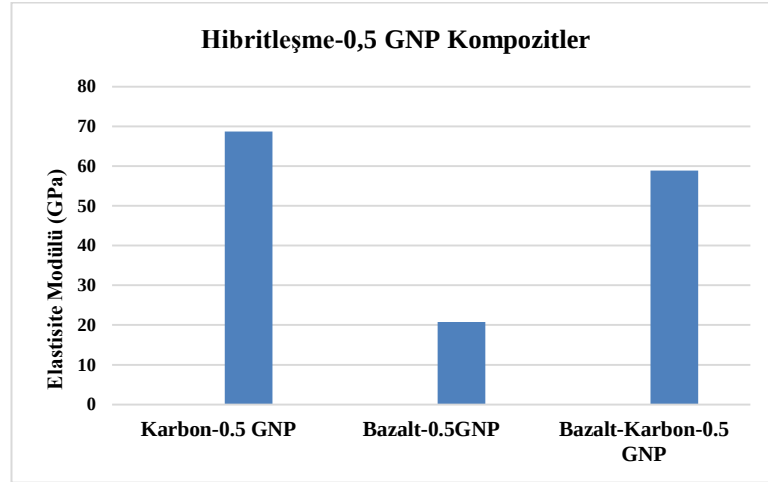


Şekil 4.45. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.45’de görüldüğü gibi matrisi %0,1 GNP içeren karbon kompozitin sönüm oranı 0,134 olarak elde edilmiştir. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 0,27 olup, karbon kompozitlere göre çok yüksek bir değere sahiptir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin sönüm oranı 0,203 değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,1 GNP ile bazalt-0,1 GNP kompozitlerin sönüm oranlarının aralığında olmasına göre makul bir değer sayılabilir. Böylece hibritleşme sonucu ortaya çıkan ve matrisi 0,1 GNP içeren Bazalt-karbon takviyeli kompozitin sönüm oranı aynı matrise sahip karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozite göre %51,49 oranında artmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre %24,81 oranında düşmüştür.

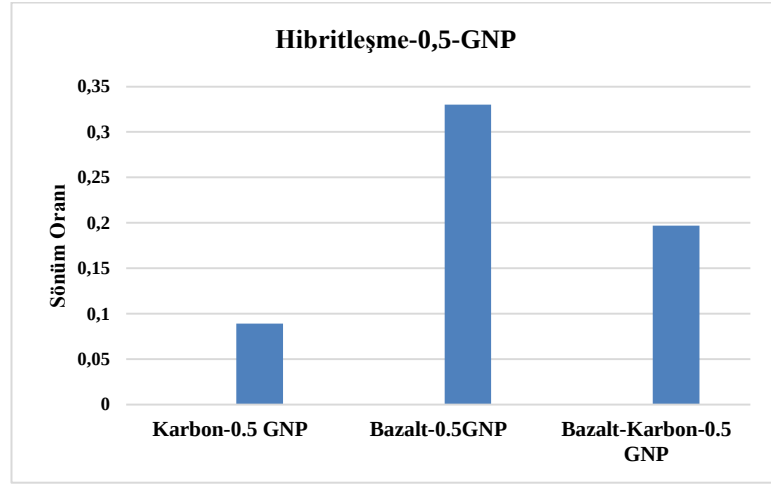
4.5.5. Bazalt-karbon-0,5 GNP

Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin serbest-serbest titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek amacıyla karbon, bazalt ve bazalt-karbon 0,5 GNP *intra-ply* hibrit olarak üç tür numune üretilmiştir. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemelerin titreşim özelliklerini bulmak için D5023 standardına göre serbest-serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Elastisite modülü için elde edilen sonuçlar Şekil 4.46’da verilmiştir



Şekil 4.46. Doğal frekanstan elde edilen karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.46’da görüldüğü gibi matrisi %0,5 GNP nanodolgu malzemesi eklenmiş karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitin elastisite modülü 68,7 GPa olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 20,78 GPa olarak bulunmuş ve karbon kompozitlere göre çok yüksek bir seviyededir. Bu olayın nedeni karbon elyafın elastisite modülünün bazalt elyafa göre çok büyük bir değere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleştirilmesi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin elastisite modülü 58,86 GPa olmuştur. Bulunan bu değer karbon ile bazaltın elastisite modüllerinin aralığında olduğundan dolayı makul bir değerdir. Böylecematrisi 0,5 GNP içeren ve karbon ile bazalt elyafın hibritleşme sonucunda ortaya çıkan kompozitin elastisite modülü aynı matrise sahip karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozite göre %14,32 oranında azalmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %183,25 oranında artmıştır. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.47’de verilmektedir.



Şekil 4.47. Karbon-0,5 GNP, bazalt-0,5 GNP ve bazalt-karbon-0,5 GNP kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

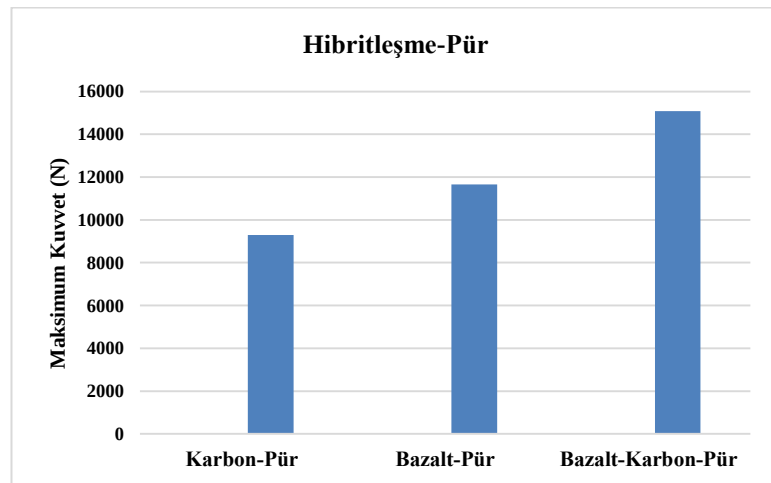
Şekil 4.47’de görüldüğü gibi nano boyutta kompozitin matrisine %0,5 GNP nano dolgu eklenmesi ile ve mikro boyutunda karbon elyaf ile takviye edildiği durumda, elde edilen malzemenin sönüm oranı 0,089 olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 0,33 olarak elde edilmiştir. Bu değer karbon kompozitlerin bu özellik değerlerine göre çok büyüktür. Bu iki tür elyafın birleşmesinden elde edilen intra-ply hibrit kompozitin sönüm oranı 0,197 değerine sahiptir. Bulunan bu değer karbon-0,5 GNP ile bazalt-0,5 GNP’nin sönüm oranlarının aralığında olduğuna göre makul bir değer olabilir. Böylece reçinesi 0,5 GNP içeren karbon ile takviye edilmiş kompozitin sönüm oranı hibritleşme sonucunda yaklaşık %121,3 oranında artmış ve aynı matrise sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin bu değerinde %40,30 oranında düşüş meydana gelmiştir.

4.6. Hibritleşme Olayının Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışlarında Ortaya Çıkardığı Etkiler

Çalışmanın bu bölümünde hibritleşme olayının kullanılan malzemelerin darbe davranışlarında ortaya çıkardığı etkiler incelenmektedir.

4.6.1. Bazalt-karbon-pür

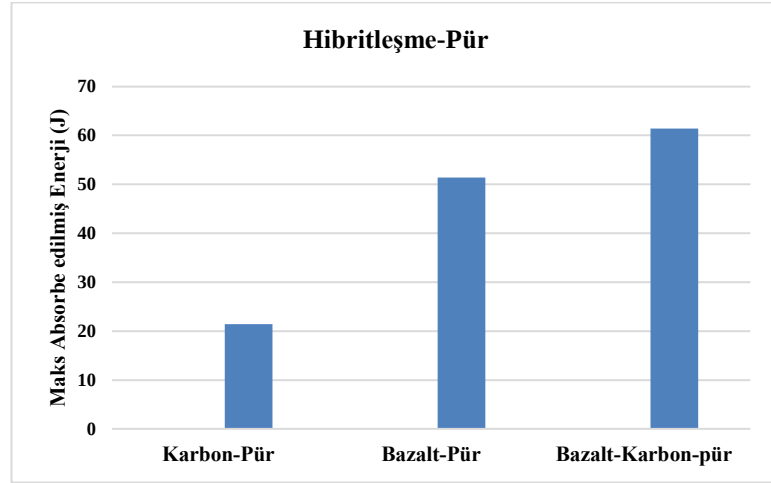
Hibritleşme olayının etkilerini Bazalt-karbon-pür malzemelerde incelemek için üç tür numune kullanılmıştır. Birinci numune %60 oranında karbon elyaf, aynı matris özelliklerine sahip ikinci numune %60 oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Bütün kompozitler 20 kat twill kumaş tabakalarının istiflenmesinden üretilmişlerdir. Karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-püre malzemelerin darbe deneyleri ASTM D7136 standardına göre yapılmıştır. Darbe sonucu ortaya çıkan maksimum kuvvet değerleri Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.48. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinin kıyaslanması

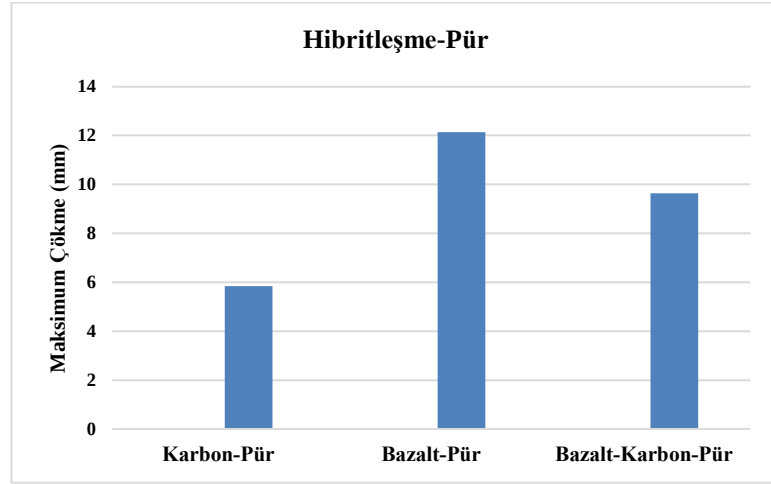
Şekil 4.48’de görüldüğü gibi pür karbon kompozitin maksimum kuvvet değeri 9,291 kN olarak bulunmuştur. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 11,66 kN olup, karbon kompozitlere göre daha yüksek bir değere sahiptir. Bu olay karbon elyafın gevrek olmasından kaynaklanmaktadır. Hâlbuki bazalt elyafı karbon elyafına göre oldukça sünektir ve darbe davranışı karbon elyafına göre çok daha iyidir. Bu iki tür elyafın birleşmesi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin darbe sonucu maksimum kuvvet değeri 15,08 olarak elde edilmiştir. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin maksimum kuvvet değeri karbon elyaf ile

takviye edilmiş klasik kompozite göre %62 ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %29,33 oranında artmıştır. Karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-püre malzemelerinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerleri Şekil 4.49'da verilmiştir.



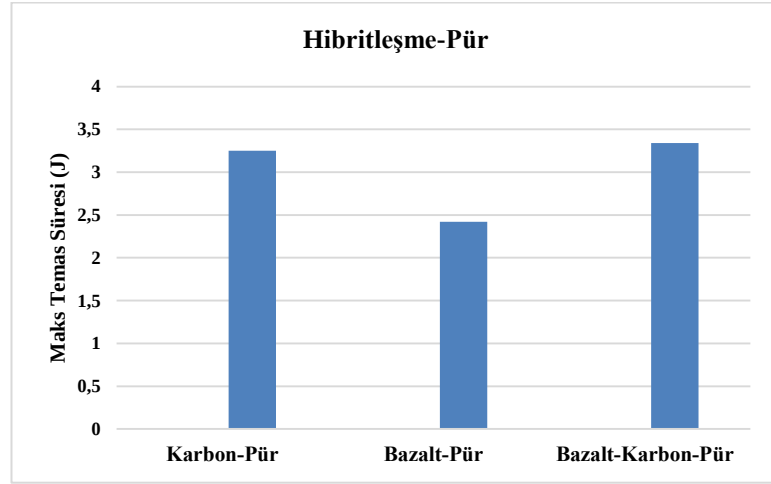
Şekil 4.49. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.49'da görüldüğü gibi pür karbon kompozitin maksimum absorbe edilmiş enerji değeri 21,45 J olarak elde edilmiştir. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 51,37 J olup, karbon kompozitlere göre oldukça yüksek bir değere sahiptir. Bu durum karbon elyafın gevrek olduğundan ve darbe sonucu düşük oranda enerji absorpsiyonundan kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden oluşan intra-ply hibrit kompozitin maksimum absorbe edilmiş enerji değeri 61,37 J olarak bulunmuştur. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin maksimum absorbe edilmiş enerji değeri karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre %186,10 oranında ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre ise %19,47 oranında artış göstermiştir. Karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-püre malzemelerinin darbe sonucu maksimum çökme değerleri Şekil 4.50'de verilmiştir.



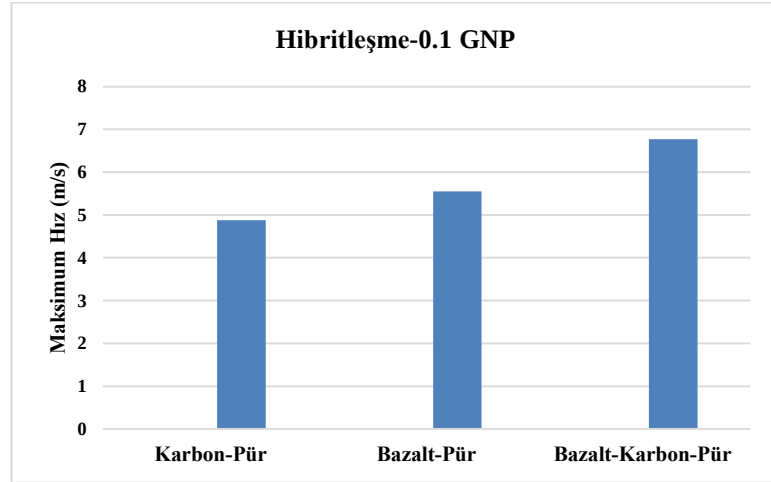
Şekil 4.50. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.50’de görüldüğü gibi karbon elyaf takviyeli kompozitin maksimum çökme değeri 5,85 mm olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 12,14 mm olup, karbon kompozitlere göre çok yüksek bir seviyededir. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesinden oluşan *intra-ply* hibrit kompozitin çökme değeri 9,64 mm olarak elde edilmiştir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin maksimum çökme değeri karbon elyafı ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %65,18 oranında artmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %44,07 oranında azalmıştır. Karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-püre malzemelerin darbe esnasında maksimum temas süreleri Şekil 4.51’de verilmiştir.



Şekil 4.51. Karbon-pür, bazalt-pür ve Bazalt-karbon-pür malzemelerinin darbe sonucu maksimum temas sürelerinin kıyaslanması

Şekil 4.51’te görüldüğü gibi karbon-pür elyaf ile takviye edilmiş kompozitin darbe esnasında temas süresi 3,25s olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 2,42s olup, karbon kompozitlere göre daha düşük bir değere sahiptir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin temas süresi 3,34s olmaktadır. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin temas süresi karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %2,77 ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre ise %38,11 oranında artmıştır. Vurucunun darbe deney sonucu karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-püre malzemelerine çarpma sonucu maksimum hız değerleri Şekil 4.52’de verilmiştir.



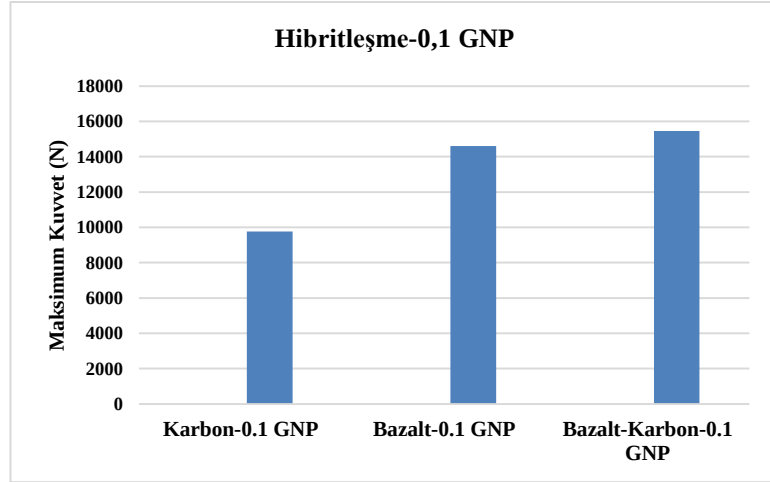
Şekil 4.52. Vurucunun darbe deney sonucu karbon-pür, bazalt-pür Bazalt-karbon-püre malzemelerine çarpma sonucu maksimum hız değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.52’de görüldüğü gibi vurucunun pür karbon kompozite çarpma sonucu maksimum hız değeri 4,88 m/s olarak ölçülmüştür. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 5,55 m/s olup, karbon kompozitlere göre yüksek bir değere sahiptir. Bu iki tür elyafın birleşimi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin darbe sonucu maksimum hız değeri 6,77 m/s olarak elde edilmiştir. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin vurucuyla çarpma sonucu maksimum hız değeri karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %38,73 ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %21,98 oranında artmıştır.

4.6.2. Bazalt-karbon-0,1 GNP

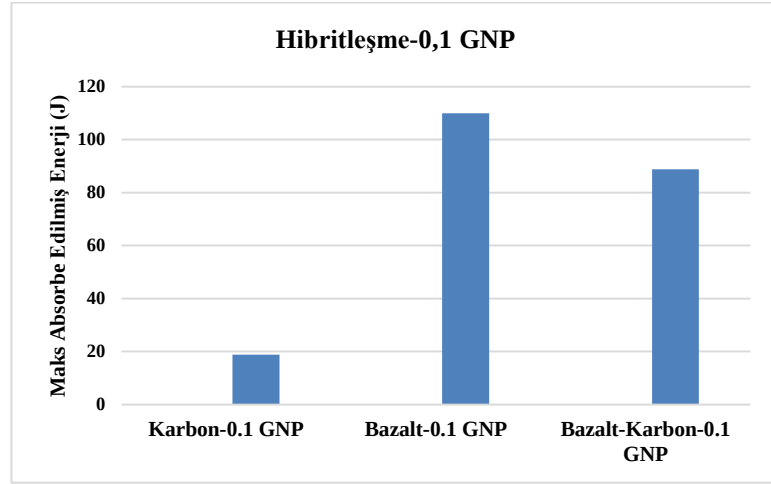
Hibritleşme olayının Bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe davranışlarında etkilerini araştırmak için üç tür numune üretilmiştir. Birinci numunede ağırlık olarak %0,1 oranında GNP içeren epoksi reçinesi %60 oranında karbon, ikincisi aynı matris özelliklerine sahip %60 hacim oranında bazalt elyaf ile takviye edilmiştir. Üçüncü numunede %30 karbon ve %30 bazalt elyafı %40 oranlarında %0,1 GNP içeren epoksi reçinesinde *intra-ply* olarak hibritleşmişlerdir. Bütün kompozitler 20 kat twill kumaş tabakalarının istiflenmesinden üretilmişlerdir. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerin darbe deneyi ASTM D 7136 standardına göre

yapılmıştır. Darbe sonucu ortaya çıkan maksimum kuvvet değerleri Şekil 4.53’ de verilmiştir.



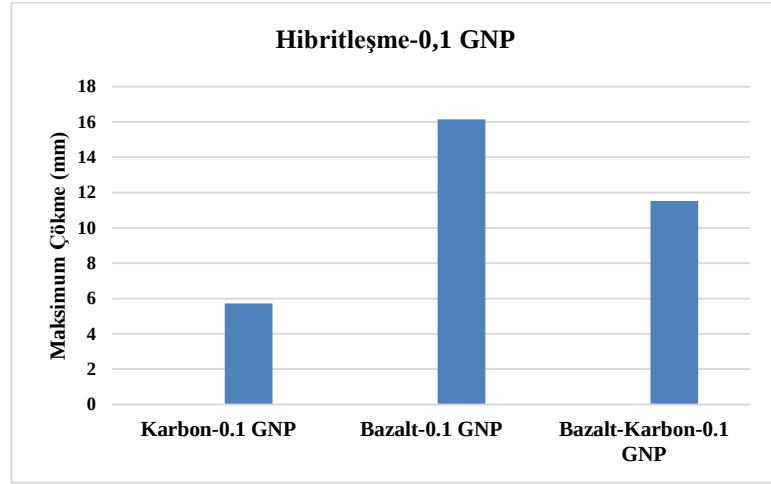
Şekil 4.53. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.53’de görüldüğü gibi reçinesi %0,1 GNP nano dolgu içeren karbon elyaf takviyeli kompozitin maksimum kuvvet değeri 9,76 kN olarak bulunmuştur. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 14,60 kN olup, karbon kompozitlere göre daha yüksek bir değere sahiptir. Bu olay karbon elyafın gevrek olmasından kaynaklanmaktadır. Hâlbuki bazalt elyafı karbon elyafına göre oldukça sünektir ve darbe davranışı karbon elyafına göre çok daha iyidir. Bu iki tür elyafın birleşimi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin darbe sonucu maksimum kuvvet değeri 15,44 kN olarak elde edilmiştir. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan reçinesi %0,1 GNP içeren kompozitin maksimum kuvvet değeri karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %58,19 ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %5,83 oranında artmıştır. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerleri Şekil 4.54’de verilmiştir.



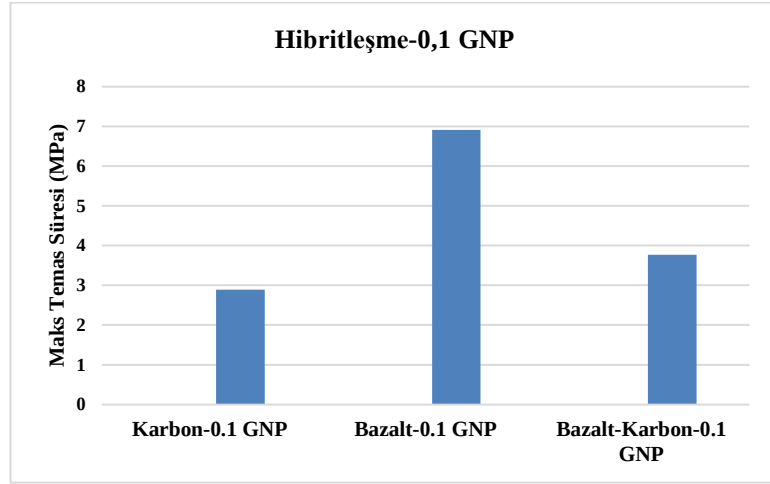
Şekil 4.54. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.54’de görüldüğü gibi reçinesi %0,1 GNP içeren karbon elyaf takviyeli kompozit malzemesinin maksimum absorbe edilmiş enerji değeri 18,79 J olarak elde edilmiştir. Bu değer bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 109,88 J olup, karbon kompozitlere göre oldukça yüksek bir değerdir. Bu durum karbon elyafın gevrek olduğundan ve darbe sonucu düşük oranda enerji absorpsiyonundan kaynaklanmaktadır. Bu iki tür elyafın birleşmesinden oluşan *intra-ply* hibrit kompozitin maksimum absorbe edilmiş enerji değeri 88,78 J olarak bulunmuştur. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin maksimum absorbe edilmiş enerji değeri karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre %372,68 oranında artmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozitlere göre ise %19,20 oranında düşüş göstermiştir. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerin darbe sonucu maksimum çökme değerleri Şekil 4.55’de verilmiştir.



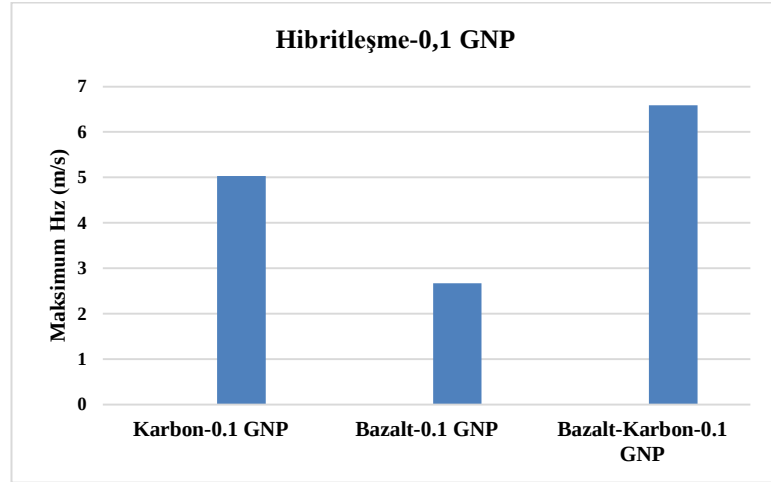
Şekil 4.55. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.55’de görüldüğü gibi karbon-0,1 GNP kompozitin maksimum çökme değeri 5,73 mm olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip olan bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 16,14 mm olup, karbon kompozitlere göre yüksek bir seviyededir. Bu iki tür elyafın bir araya gelmesinden oluşan *intra-ply* hibrit kompozitin çökme değeri 11,52 mm olarak elde edilmiştir. Böylece karbon ile bazalt elyafın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin maksimum çökme değeri karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %101 oranında artmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %28.62 oranında azalmıştır. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerin darbe sonucu maksimum temas süreleri Şekil 4.56’da verilmiştir.



Şekil 4.56. Karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin darbe sonucu maksimum temas süre değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.56’da görüldüğü gibi karbon-0,1 GNP kompozitin darbe esnasında temas süresi 2,89s olarak bulunmuştur. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 6,91s olup, karbon kompozitlere göre oldukça yüksek bir değere sahiptir. Bu iki tür elyafın birleşmesinden ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin temas süresi 3,77s değerine sahip olmaktadır. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozitin temas süresi karbon elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre %30,45 artmış ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitlere göre ise %45,44 oranında azalmıştır. Vurucunun darbe deneyinde karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerine çarpma sonucu maksimum hız değerleri Şekil 4.67’de verilmiştir.



Şekil 4.57. Vurucunun darbe deneyinde karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerine çarpma sonucu maksimum hız değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.57’te görüldüğü gibi karbon-0,1 GNP kompozitin darbe esnasında maksimum hız değeri 5.03 m/s olarak ölçülmüştür. Bu değer aynı matris malzemesine sahip bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitler için 2,67 m/s olup, karbon kompozitlere göre düşük bir değere sahiptir. Bu iki tür elyafın birleşimi ile ortaya çıkan *intra-ply* hibrit kompozitin darbe sonucu maksimum hız değeri 6,59 m/s olarak elde edilmiştir. Böylece karbon ile bazaltın hibritleşmesinden ortaya çıkan kompozite çarpma sonucu vurucunun maksimum hız değerleri karbon elyaf ile takviye edilmiş nano kompozitlere göre %31,8 ve bazalt elyaf ile takviye edilmiş klasik kompozite göre ise %146,81 oranında artmıştır.

4.7. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzemesi Eklenmesinin Bu Malzemelerin Çekme Özelliklerinde Etkileri

Önceden de söylenildiği gibi, nanodolgu tanecikler kompozit malzemelerin mekanik, termal, elektrik, optik gibi davranışlarının geliştirmiş amacıyla bu malzemelerin reçinesine eklenmektedirler. Çalışmanın bu kısmında, üretilen pür karbon, bazalt ve bazalt-karbon *intra-ply* hibrit takviyeli malzemelerin çekme özelliklerini iyileştirmek için kompozitin reçinesine farklı oranlarda (%0,1 ve 0,5) CNT ve GNP nano partiküller

eklenmiştir. Bu nanotaniciklerin eklenmesi ile 12 tür çok-ölçekli malzeme ortaya çıkmıştır. Elde edilen malzemeler ve bileşen oranları Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Çok ölçekli kompozitler ve bileşenlerinin oranı

Sayı	Malzeme	Karbon Elyaf Oranı	Bazalt Elyaf Oranı	Epoksi Oranı	GNP Oranı	CNT Oranı
1	Karbon-0,1 CNT	%60	0	%40	0	%0,1
2	Karbon-0,5 CNT	%60	0	%40	0	%0,5
3	Karbon-0,1 GNP	%60	0	%40	%0,1	0
4	Karbon-0,5 GNP	%60	0	%40	%0,5	%0,1
5	Bazalt-0,1 CNT	0	%60	%40	0	%0,1
6	Bazalt-0,5 CNT	0	%60	%40	0	%0,5
7	Bazalt-0,1 GNP	0	%60	%40	%0,1	0
8	Bazalt-0,5 GNP	0	%60	%40	%0,5	0
9	Bazalt-Karbon-0,1 CNT	%30	%30	%40	0	%0,1
10	Bazalt-Karbon-0,5 CNT	%30	%30	%40	0	%0,5
11	Bazalt-Karbon-0,1 GNP	%30	%30	%40	%0,1	0
12	Bazalt-Karbon-0,5 GNP	%30	%30	%40	%0,5	0

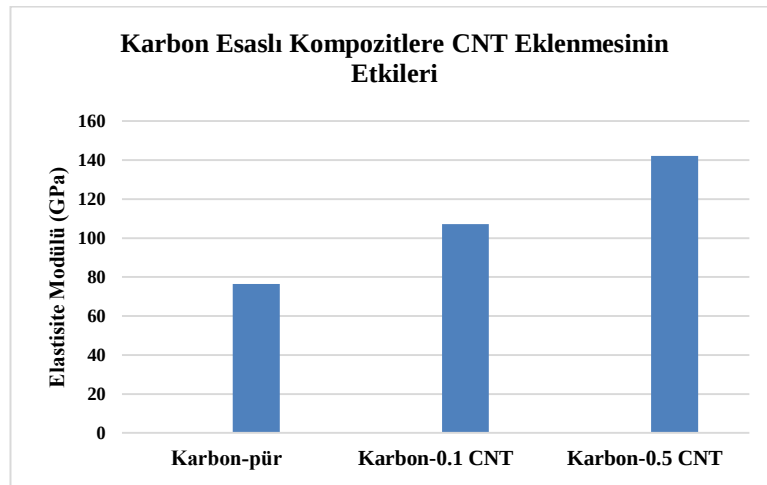
4.7.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler

Bu kategoride yer alan kompozit malzemelerin esas bileşeni karbon elyaftır ve Çizelge 4.1’de 1-4 arasındaki malzemeleri kapsamaktadır. Bütün bu malzemelerin %60’ını karbon elyaf ve %40’ını nanodolgu içeren epoksi reçinesi oluşturmaktadır. Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP oluşmaktadır. Kompozitin çekme özelliklerini

incelemek için, reçineye nano partikül ekleyerek ASTM D3039 standardına göre çekme deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, her tür malzemeden iki numune test edilerek malzemelerin çekme modül ve çekme mukavemet değerleri bulunmuştur.

a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

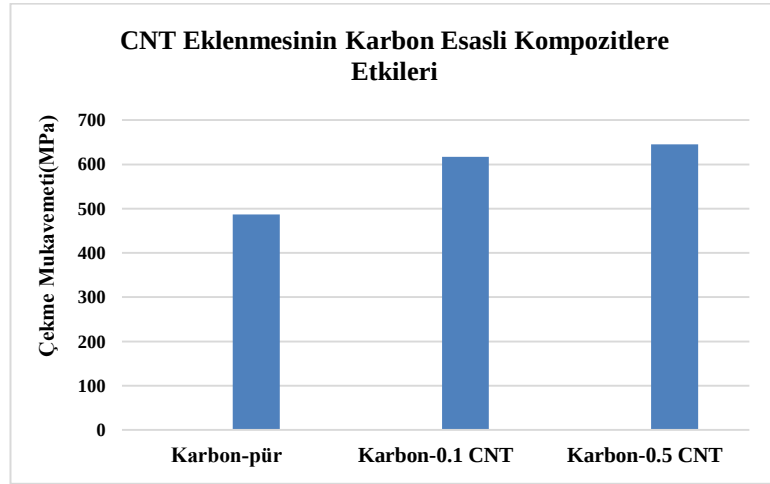
Bilindiği gibi CNT nano partikül malzemeleri, nano boyutlarda çap ve mikro boyutlarda boya sahip olduğu için çok büyük bir en-boy oranına sahiptirler. Bu nano partiküllerin elastisite modülleri yaklaşık 950 GPa ve çekme mukavemetleri 150 MPa'dır. CNT nano partikülün karbon takviyeli klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi sonucunda elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.58'de verilmektedir.



Şekil 4.58. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerleri

Şekil 4.58'de görülen değerlere göre, karbon elyaf esaslı pür kompozitin elastisite modül değerleri ortalama 76,43 GPa olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde %40,26 oranında artış meydana gelerek 107,2 GPa olmuştur. Bu artış CNT nano partiküllerin yüksek elastisite modülüne sahip olmalarından dolayı, kompozitin reçinesine eklenerek reçinenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Kompozit reçinesinde CNT oranının artıp, %0,5 değerine varması ile kompozitin elastisite modülü %32,4'lük bir

artış göstererek 142,08 GPa olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre klasik kompozitlere %0,5 CNT eklenmesi ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde %85,90 oranında bir artış meydana gelmiştir. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerleri şekil 4.59' de verilmiştir.

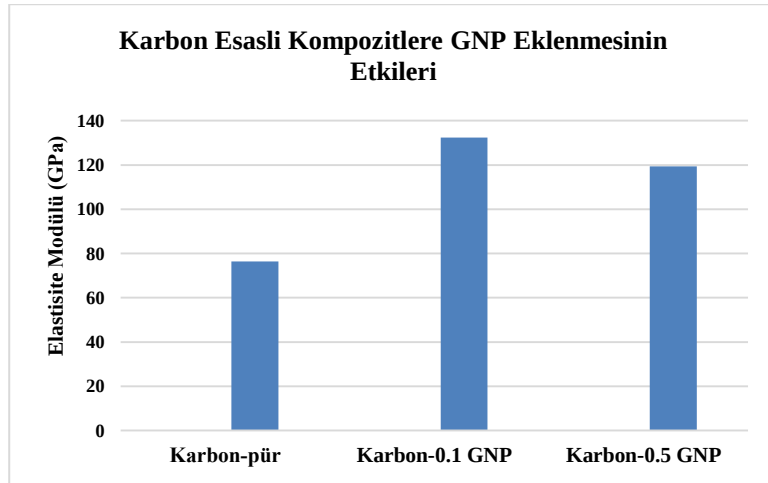


Şekil 4.59. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerleri

Şekil 4.59'da verilen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi ile, elde edilen çok-ölçekli kompozitin çekme mukavemeti %26,58 oranında artarak 616,65 MPa olmuştur. Malzemenin reçinesine CNT eklenmesi ile kompozitin çekme mukavemetinin artması, CNT partiküllerin yüksek çekme mukavemetine (150 MPa) sahip olmasından ve epoksiye eklenerek reçinenin çekme mukavemetini artırmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, CNT' nin epoksiye eklenmesi, karbon elyaf ile epoksinin arasında kurulan bağların sayısını artırarak, daha dayanıklı malzemenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Reçineye disperse edilen CNT oranının artması ve %0,5 değerine varması şekil 4.59' de de görüldüğü gibi kompozitin çekme mukavemetini %30,47artırarak 645,5 MPa değerine ulaştırmıştır. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin çekme mukavemetinde %32,50 artışın ortaya çıkması görülmüştür.

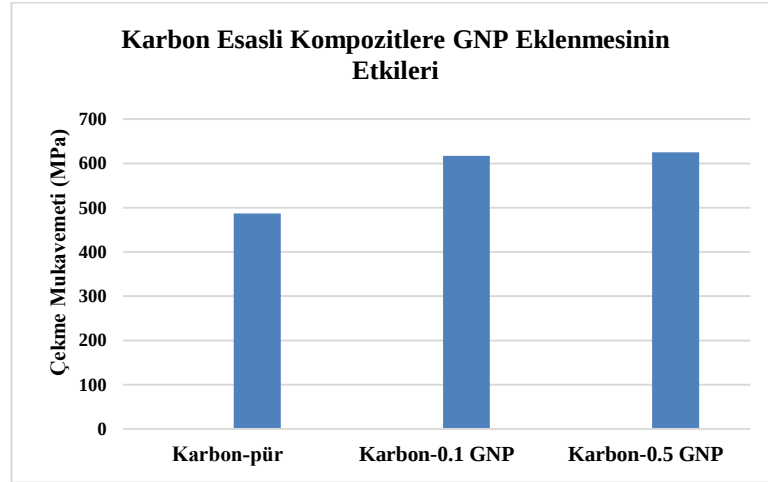
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partikülün klasik kompozitlerin reçinesine eklenme sonucu ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerleri Şekil 4.60'da verilmektedir.



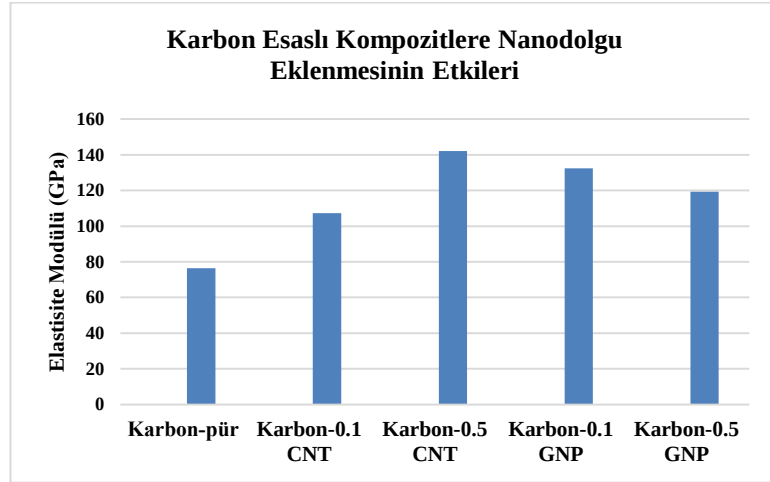
Şekil 4.60. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerleri

Şekil 4.60'da görüldüğü gibi karbon elyaf esaslı pür kompozitin elastisite modül değerleri 53,695 GPa olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi durumunda kompozitin elastisite modülünde %73,16'lık bir artış meydana gelerek 132,35 GPa olmuştur. Bu durum GNP' nanotaniciklerin yüksek elastisite modülüne sahip olması ve kompozitin reçinesine eklenerek elastisite modülünün artırmasından kaynaklanmaktadır. Eklenen GNP oranının kompozit reçinesinde artıp, %0,5 değerine varması ile kompozitin elastisite modülü %9,81 oranında azalarak 119,36 değerine düşmüştür. Kompozitin elastisite modülünde meydana gelen azalma GNP oranının artması ile reçine yapısında topaklanma olayının ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre klasik kompozitlere %0,5 GNP eklenmesi ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde %56,17 oranında bir artış meydana gelmiştir. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.61'de verilmiştir.



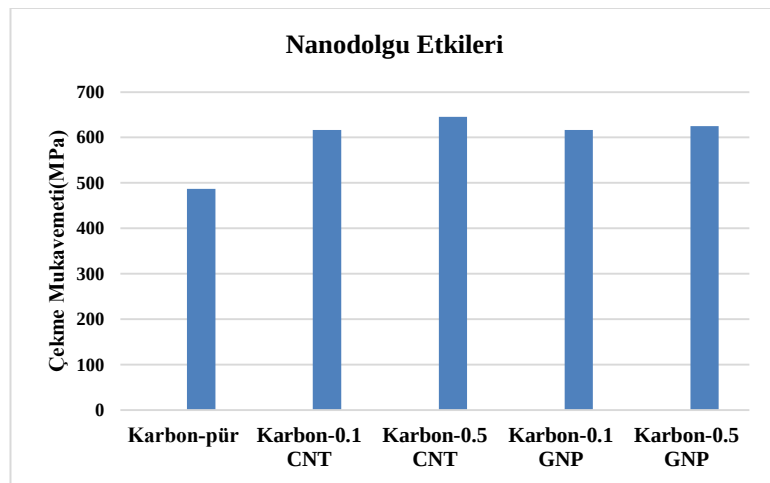
Şekil 4.61. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerleri

Şekil 4.61’de verilen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül eklenmesi sonucu, elde edilen çok-ölçekli kompozitin çekme mukavemeti %26,58 oranında artarak 590 MPa değerine yükselmiştir. Malzemenin reçinesine GNP partiküllerin disperse edilmesi ile kompozitin çekme mukavemetinin artması GNP partiküllerin yüksek çekme mukavemetine sahip olmasından ve epoksiye eklenmesi ile reçinenin bu özelliğini artırmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, GNP’ nin epoksiye eklenmesi, karbon elyaf ile epoksinin daha iyi yapışmasını sağlayarak malzemenin çekme mukavemetinin artmasına neden olmuştur. Reçineye eklenen GNP oranının %0,5 artması kompozitin çekme mukavemetini %1,39 oranında artırmakla birlikte 625,25 MPa değerine yükseltmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 GNP nano partikül eklenmesi ile kompozitin çekme mukavemetinde %28,34 oranında bir artış ortaya çıkmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin karbon esaslı kompozit malzemelerin elastisite modülünde ortaya çıkardığı etkiler Şekil 4.62’de gösterilmiştir.



Şekil 4.62. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe göre %0,5 CNT partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi ile pür kompozit malzemesinin elastisite modülünü %85,90 artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,1 CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesi pür karbon kompozite göre %40,26 oranında daha yüksek elastisite modülüne sahip olarak en zayıf performansı sergilemiştir. CNT ve GNP nano partiküllerin karbon esaslı kompozite eklenmesinin malzemenin çekme mukavemetinde ortaya çıkardığı etkiler Şekil 4.63’ da verilmektedir.



Şekil 4.63. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

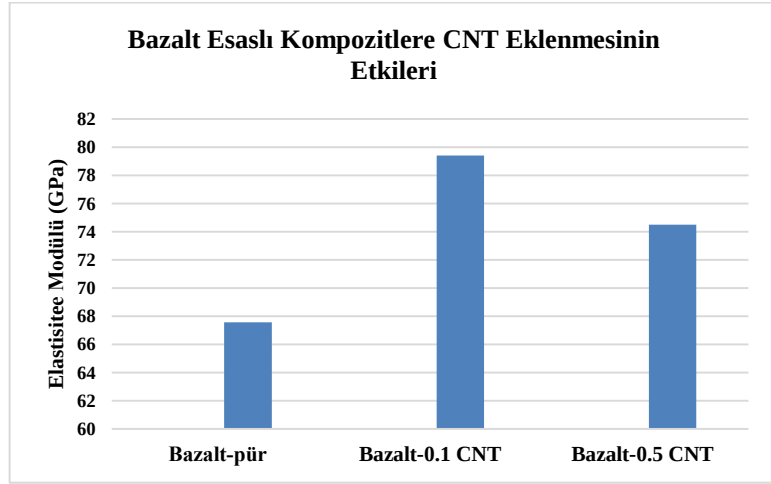
CNT ve GNP nano partiküller ve ağırlık oranlarının kompozitin çekme mukavemet değerlerinde etkileri Şekil 4.63’de gösterilmektedir. Bu grafiğe dikkat ederek, elastisite modülünde olduğu gibi %0,5 CNT dolgu malzemesinin kompozitin reçinesine eklenmesi, pür kompozit malzemesinin çekme mukavemetini %32,50 oranında artırarak en iyi performansı sağlamıştır. Bu arada matrisi %0,1 CNT ve GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemeler pür karbon kompozite göre %26,58 oranında artış göstererek en zayıf performansa sahip olmuşlardır.

4.7.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler

Bu bölümde incelenen kompozit malzemelerin esas bileşeni bazalt elyafıdır ve Çizelge 4.1’de 5-8 arasındaki malzemeleri kapsamaktadır. Bütün bu malzemelerin %60’ını bazalt elyaf ve %40’ını nano dolgu içeren epoksi reçinesi oluşturmaktadır. Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT,%0,1 GNP ve %0,5 GNP’ den oluşmaktadır. Kompozitin çekme özelliklerini incelemek için, reçineye nano partikül ekleyerek ASTM D3039 standardına göre çekme deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, her tür malzemedan iki numune test edilerek malzemelerin elastisite modülleri ve çekme mukavemetleri bulunmuştur.

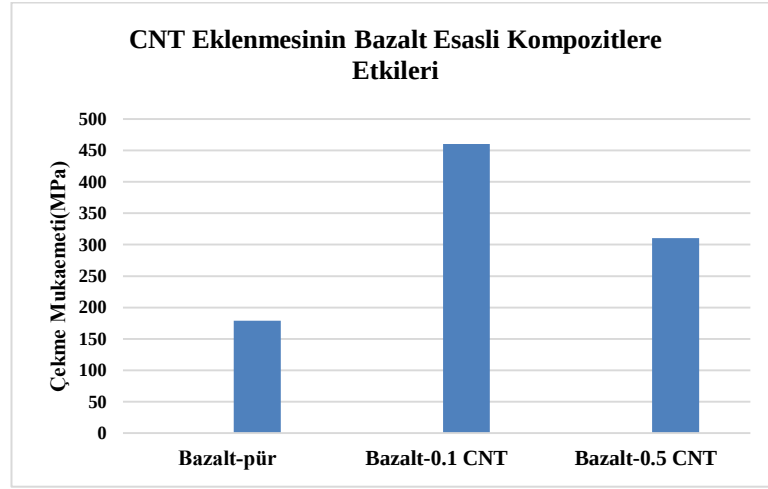
a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.64’de verilmektedir.



Şekil 4.64. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.64’de verilen grafiğe bakıldığında, nanodolgu içermeyen bazalt esaslı klasik kompozitin elastisite modülü 67,57 GPa olarak bulunmuştur. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin elastisite modülü %17,54 oranında artarak 79,42 GPa değerine ulaşmaktadır. Reçinede CNT dolgu malzemesinin artıp, %0,5 değerine gelmesi ile topaklanma olayından dolayı, elde edilen kompozitin elastisite modülünde %6,18’lik bir azalma meydana gelerek, 74,51 GPa değerine düşmüştür. Böylece bazalt elyaf takviyeli kompozitin reçinesine %0,5 oranında CNT taneciklerin artırılmasıyla kompozitin elastisite modülünde %10,27 oranında artış meydana gelmiştir. Bu artışın nedeni yüksek elastisite modülüne sahip olan CNT nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenerek bu malzemenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.65’de verilmektedir.

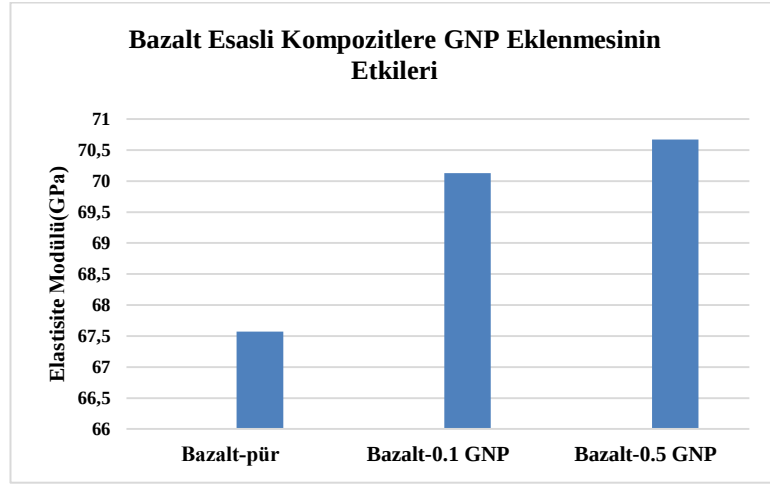


Şekil 4.65. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.65’de görüldüğü gibi pür bazalt ile takviye edilmiş kompozitin çekme mukavemeti 178,69 MPa olarak elde edilmiştir. Kompozitin reçinesine %0,1 oranında CNT nanodolgunun eklenmesi ile kompozitin çekme mukavemetinde %157 oranında artış göstererek 460,5 MPa değerine yükselmiştir. CNT nano taneciklerin yüksek çekme mukavemetine sahip olmasından dolayı epoksiye eklenerek bu malzemenin çekme mukavemeti artmış olup, çok-ölçekli kompozitin çekme mukavemeti de yükselir. CNT oranının kompozit yapısında artması ve %0,5 değerine varması ile reçinede disperse olmuş nanopartikül oranının artmasıyla reçinede topaklanma olayı ortaya çıkar ve bu olay kompozit yapısında oluşan artık gerilmeleri artırır. Böylece kompozitin çekme mukavemeti %48,34 oranında azalarak 310,44MPa değerine düşer. Sonuçlara göre pür kompozitin reçinesine %0,5 oranında CNT nano partiküllerin eklenmesi ile elde edilen kompozitin çekme mukavemeti %73,73 oranında artmıştır.

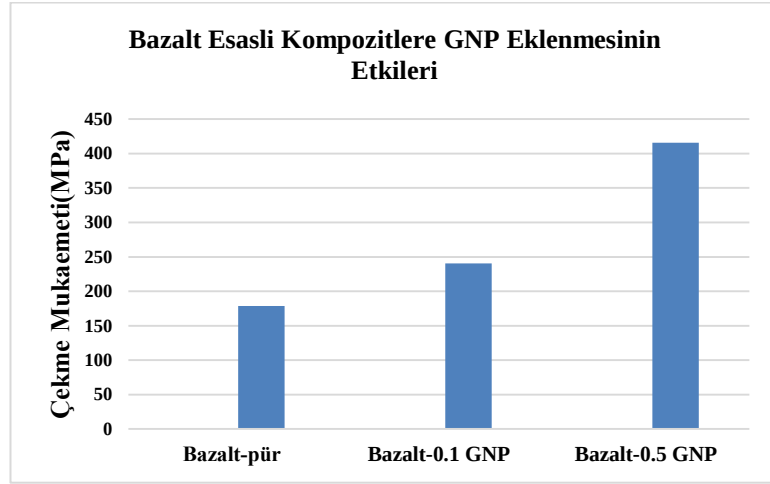
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partiküllerin bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitlerin elastisite modül değerleri Şekil 4.66’da verilmektedir.



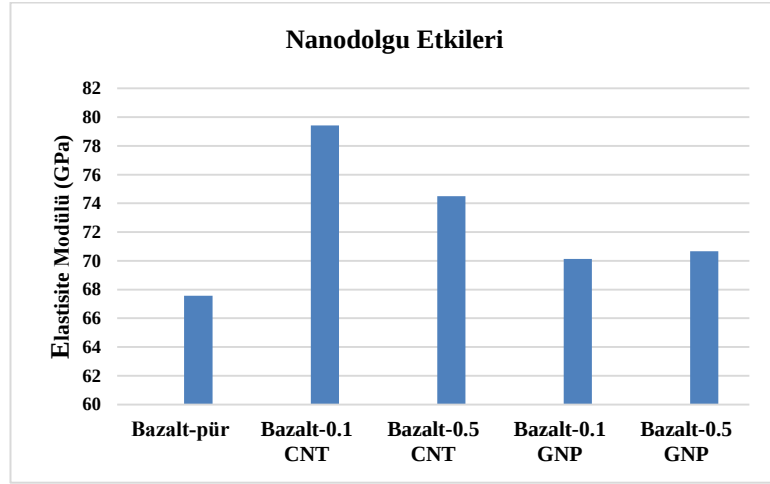
Şekil 4.66. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulı kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.66’da verilen grafiğe göre, bazalt esaslı klasik kompozitin elastisite modülü 67,57 GPa olarak bulunmuştur. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin elastisite modülü %3,79 oranında artarak 70,13 GPa değerine yükselmektedir. Reçinede GNP dolgu malzemesinin artıp,%0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülünde %0,77’lik oranında bir artış ortaya çıkarak, 70,67 GPa değerine yükselmiştir. Böylece %0,5 GNP nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %4,59 oranında artış ortaya çıkmıştır. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt esaslı çok-ölçekli kompozitlerin çekme mukavemeti Şekil 4.67’de verilmiştir.



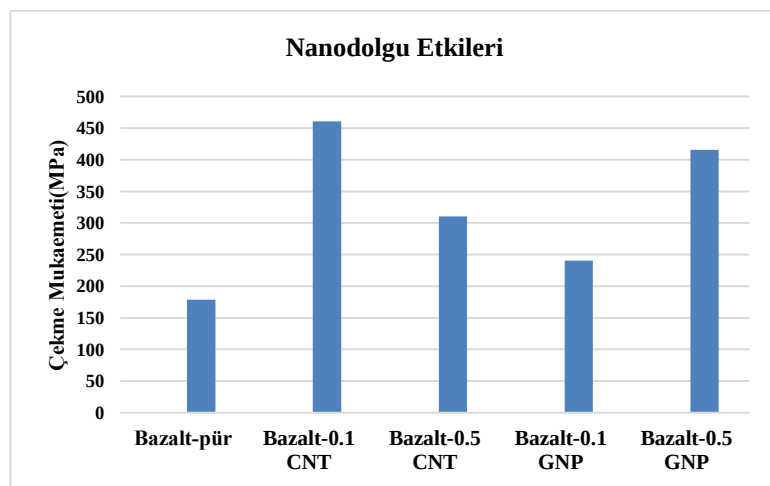
Şekil 4.67. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.67’de görüldüğü gibi pür bazalt ile takviye edilmiş kompozitin çekme mukavemeti 178,69 MPa değerine sahiptir. Kompozitin reçinesine %0,1 oranında GNP nanodolgunun eklenmesi ile kompozitin çekme mukavemeti %34,53’lik bir artış göstererek 240,39 MPa değerine kadar artmıştır. kompozit yapısında GNP nanopartiküllerin artıp, %0,5 değerine varmasıyla kompozitin çekme mukavemeti %72,95 oranında artarak 415,75 MPa olmuştur. GNP nano taneciklerin yüksek çekme mukavemetine sahip olması ve kompozitin reçinesine eklenmesi ile reçinenin çekme mukavemetini artırması bu artışların en önemli nedeni olarak sayılmaktadır. Ayrıca, GNP’nin eklenmesi sonucunda, elyaf ile reçine malzemesinin daha iyi bağlar kurması bu artışın olası nedenlerinden olabilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre pür kompozitin reçinesine %0,5 oranında GNP nano partiküllerin eklenmesi ile elde edilen kompozitin çekme mukavemeti %133,78 oranında artmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt esaslı kompozit malzemelerin çekme özelliklerinde etkileri Şekil 4.68’de gösterilmiştir.



Şekil 4.68. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe göre %0,1 oranında CNT partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi pür kompozit malzemesinin elastisite modülünü %17,54 oranında artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin elastisite modülü pür karbon kompozite göre %3,79 oranında artış göstererek en zayıf performansı sağlamıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt esaslı kompozit malzemelerin çekme mukavemetlerine etkileri Şekil 4.69’da verilmiştir.



Şekil 4.69. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

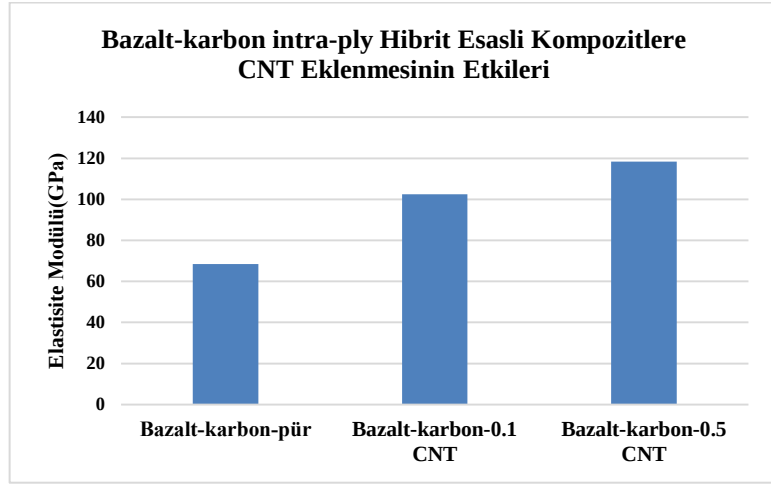
Bu grafiğe göre kompozitin reçinesine %0,5 oranında GNP nano taneciklerin eklenmesi ile pür kompozitin çekme mukavemeti %133,78 oranında artarak en iyi performansı sağlamıştır. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin elastisite modülü pür bazalt kompozite göre %34,53 oranında artış göstererek, bu malzeme en zayıf performansı sergilemiştir.

4.7.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler

Çalışmanın bu kısmında incelenen kompozit malzemelerin takviye fazları bazalt ve karbon elyafın intra-ply dokunmasından oluşmaktadır. Bu kompozitler Çizelge 4.1’de 8-10 arasındaki malzemeleri kapsamaktadırlar. Bütün bu malzemelerin %30’unu bazalt elyafı, %30’unu karbon elyafı ve %40’ını nano dolgu içeren epoksi reçinesi oluşturmaktadır. Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP’ den oluşmaktadır. Kompozitin çekme özelliklerini incelemek için, reçineye nano partikül ekleyerek ASTM D3039 standardına göre çekme deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, her tür malzemeden iki numune test edilerek malzemelerin elastisite modül ve mukavemet değerleri bulunmuştur.

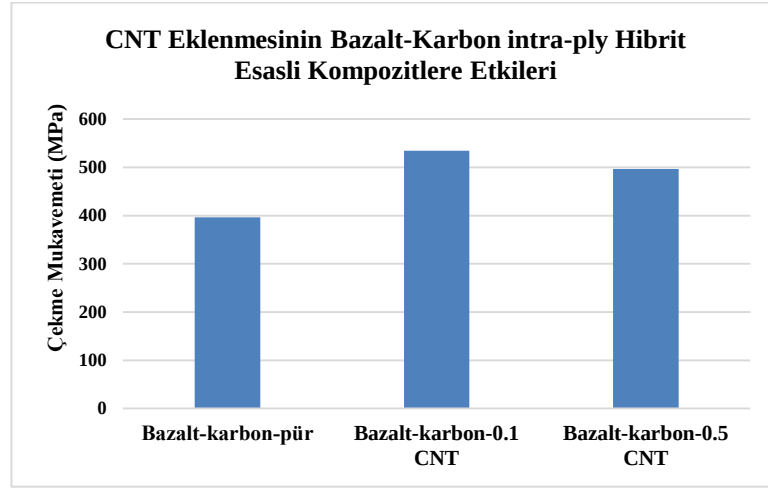
a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.70’te verilmektedir.



Şekil 4.70. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.70’te verilen grafiğe bakıldığında, nanodolgu içermeyen bazalt-karbon hibrit kompozitin elastisite modül değeri 68,45 GPa olarak elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül malzemesi eklenerek kompozitin elastisite modülü %49,76 oranında artarak 102,51 GPa değerine yükselmiştir. Reçinede nano takviye fazının artması ve %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülünde %15,49’luk bir artış ortaya çıkarak, 118,39 GPa değerine ulaşır. %0,5 CNT nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %72,96 oranında artış ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, CNT nanopartiküllerin bazalt-karbon esaslı kompozitlerin reçinesine eklenmesi ve oranının artması ile elde edilen çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde uniform bir artış meydana gelmiştir. Bu artışların nedeni yüksek elastisite modülüne sahip CNT nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenmesi ile bu malzemenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin çekme mukavemeti Şekil 4.71’te verilmektedir.

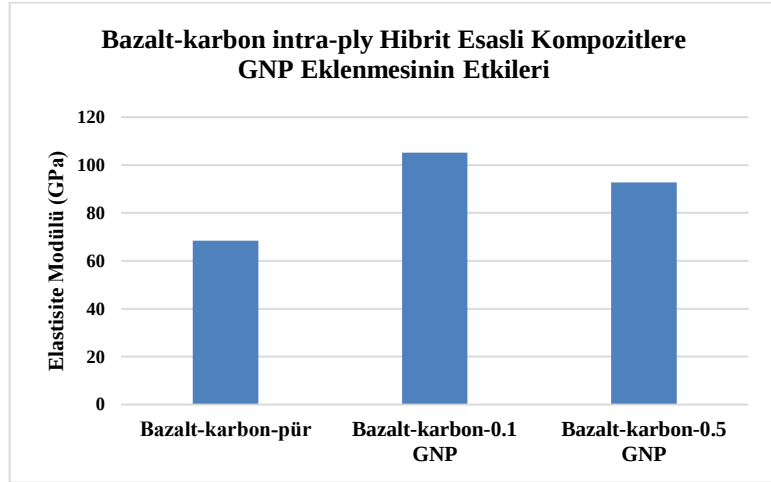


Şekil 4.71. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.71’te görüldüğü gibi pür bazalt-karbon intra-ply hibrit elyaf kullanılarak takviye edilmiş kompozitin çekme mukavemeti 396,44 MPa değerine sahiptir. Kompozitin reçinesine %0,1 oranında CNT nano dolgunun eklenmesi ile kompozitin çekme mukavemeti %34,76’lık bir artış göstererek 534,24 MPa değerine ulaşmıştır. kompozit yapısında CNT nano partiküllerin artıp, %0,5 oranına varmasıyla topaklanma olayından dolayı kompozitin çekme mukavemeti %7,03 oranında azalarak 496,67 MPa değerine düşmüştür. Sonuçlara göre pür kompozitin reçinesine %0,5 oranında CNT nano partiküllerin eklenmesi ile elde edilen kompozitin çekme mukavemet değeri %25,28 oranında artmıştır. Bu durum GNP nano taneciklerin yüksek çekme mukavemetine sahip olması ve kompozitin reçinesine eklenmesi ile reçinenin çekme mukavemetini artırmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, CNT ’nin eklenmesi ile elyaf ile reçine malzemesinin arayüzeyinde oluşan çapraz bağlar sayısının artması bu artışın diğer nedeni olarak tahmin edilmektedir.

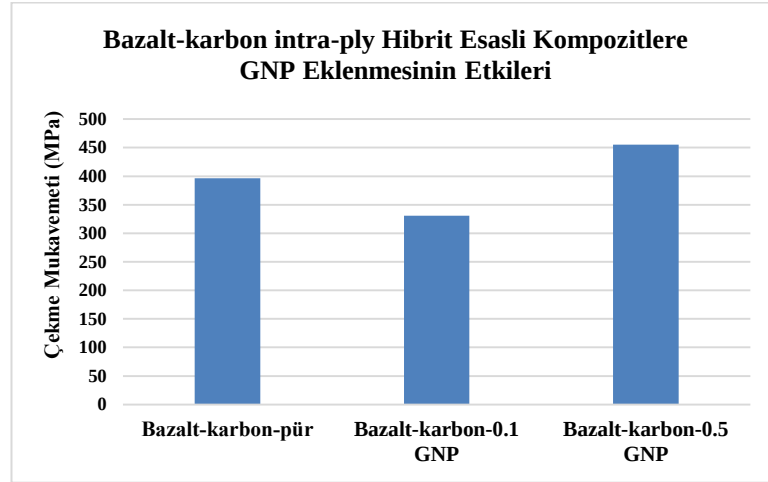
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partikülün bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.72’de verilmektedir.



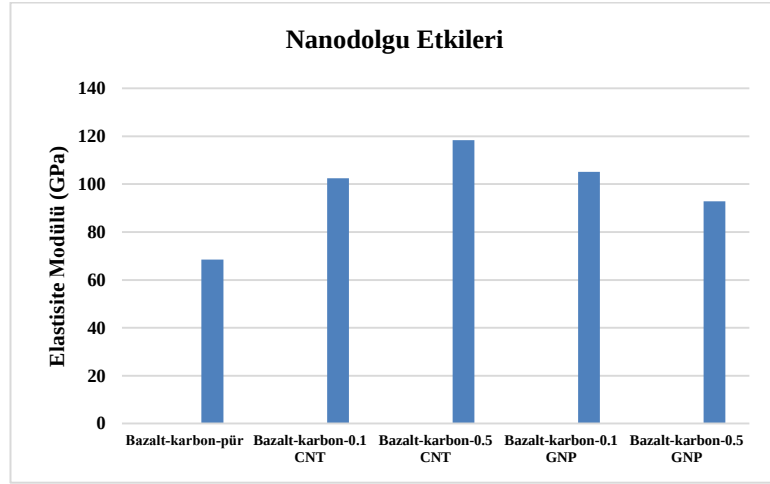
Şekil 4.72. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.72’de verilen grafiğe bakıldığında, pür bazalt-karbon hibrit kompozitin elastisite modülü 68,45 GPa olarak elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül malzemesi eklenerek kompozitin elastisite modülü %53,60 oranında artarak 105,14 GPa değerine yükselmiştir. Reçinede nano takviye fazının artması ve %0,5 değerine gelmesi ile malzeme yapısında topaklanma meydana gelir ve elde edilen kompozitin elastisite modülünde %11,71’lik bir azalma ortaya çıkarak, 92,83 GPa değerine düşer. %0,5 GNP nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %35,62 oranında artış ortaya çıkmıştır. Reçinesi GNP nano partikül ile takviye edilmiş bazalt-karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.73’de verilmektedir.



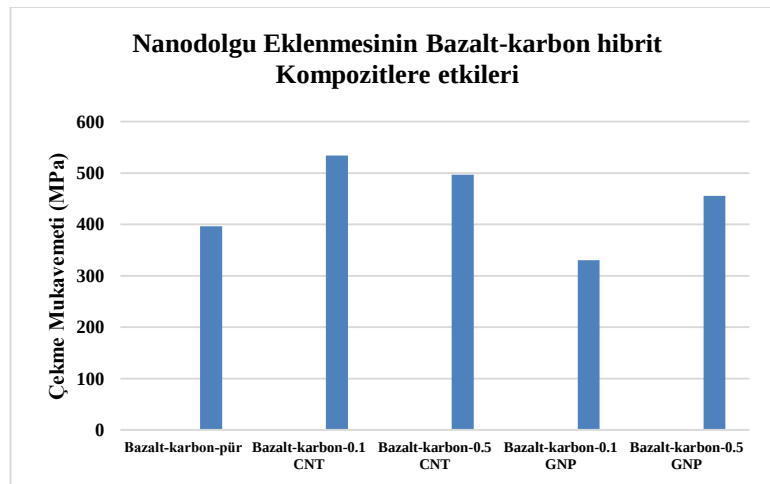
Şekil 4.73. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.73’de görüldüğü gibi pür bazalt-karbon intra-ply hibrit elyaf ile takviye edilmiş kompozitin çekme mukavemeti 396,44 MPa değerine sahiptir. Kompozitin reçinesine %0,1 oranında GNP nano dolgunun eklenmesi ile kompozitin çekme mukavemeti %16,61 oranında azalarak 330,58 MPa değerine düşmüştür. Bu düşüşün nedeni GNP parçacıklarının reçinenin çekme mukavemetini artırmak için yeterli hacim oranına sahip olmaması ve minimum kritik takviye hacminin altında olmasından kaynaklanmaktadır. Kompozit yapısında GNP nano partiküllerin artıp, %0,5 oranına varmasıyla kompozitin çekme mukavemeti %37 oranında artarak 455,51 MPa değerine yükselmiştir. GNP nano taneciklerin yüksek çekme mukavemetine sahip olması ve kompozitin reçinesine eklenmesi ile reçinenin çekme mukavemetini artırması bu artışın en önemli nedeni olarak sayılmaktadır. Ayrıca, GNP ’nin eklenmesi ile elyaf ile reçine malzemesinin arayüzeyinde oluşan çapraz bağlar sayısının artması bu artışın diğer nedeni olarak tahmin edilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre pür kompozitin reçinesine %0,5 oranında GNP nano partiküllerin eklenmesi ile elde edilen kompozitin çekme mukavemeti %14,90 oranında artmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt-karbon hibrit takviyeli kompozitlerin elastisite modülünde etkileri Şekil 4.74’de verilmektedir.



Şekil 4.74. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe bakıldığında pür kompozit malzemesinin reçinesine %0,5 oranında CNT partiküllerin eklenmesi kompozitin elastisite modülünü %72,96 oranında artırarak en iyi performansı sergilemiştir. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin elastisite modülü pür karbon kompozite göre %49,76 oranında artış göstererek en düşük performansı sergilemiştir. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt esaslı kompozit malzemelerin çekme mukavemet değerlerine etkileri Şekil 4.75'te verilmiştir.



Şekil 4.75. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe göre pür kompozit malzemesinin reçinesine %0,1 oranında CNT partiküllerin eklenmesi kompozitin çekme mukavemetini %34,76 oranında artırarak en iyi performansı sağlamıştır. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin elastisite modülü pür karbon kompozite göre %16,61 oranında düşüş göstererek en düşük performansı sergilemiştir.

4.8. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzeme Eklenmesinin Eğilme Özelliklerinde Etkileri

Daha önce belirtildiği gibi, nanodolgu tanecikler kompozit malzemelerin mekanik, termal, elektrik, optik gibi davranışlarının geliştirmesi amacıyla bu malzemelerin reçinesine eklenmektedirler. Çalışmanın bu kısmında, üretilen pür karbon, bazalt ve bazalt-karbon *intra-ply* hibrit takviyeli malzemelerin eğilme özelliklerini iyileştirmek için kompozitin reçinesine farklı oranlarda(%0,1 ve 0,5) CNT ve GNP nano partiküller eklenmiştir.

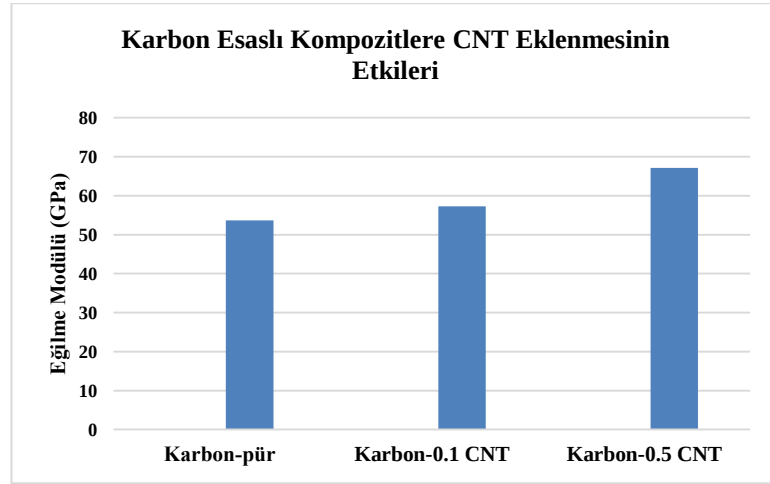
4.8.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler

Bu kategoride yer alan kompozit malzemelerin esas bileşeni karbon elyafıdır ve Çizelge 4.1'de verilen 1-4 arasındaki malzemeleri kapsamaktadır. Bütün bu malzemelerin %60'ını karbon elyaf ve %40'ını nanodolgu içeren epoksi reçinesi oluşturmaktadır. Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup ve %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP oluşmaktadır. Kompozitin eğilme özelliklerini incelemek için, reçineye nano partikül ekleyerek ASTM D790 standardına göre üç-nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, her tür malzemeden iki numune test edilerek malzemelerin eğilme modül ve eğilme mukavemet değerleri bulunmuştur.

a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

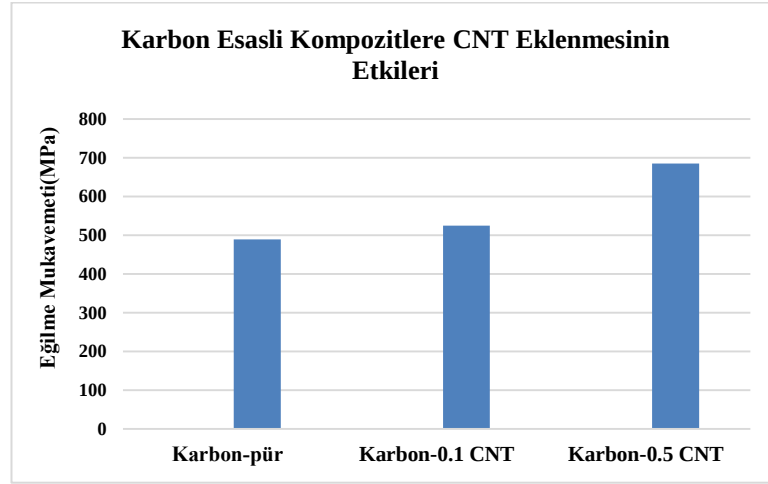
Bilindiği gibi CNT nano partikül malzemeleri, nano boyutlarda çap ve mikro boyutlarda boya sahip olduğu için çok büyük bir en-boy oranına sahiptirler. Bu nano partiküllerin

elastisite modülleri yaklaşık 950 GPa ve çekme mukavemetleri 150 MPa'dır. CNT nano partikülün karbon takviyeli klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi sonucunda elde edilen kompozitin eğilme modül değerleri Şekil 4.76'da verilmiştir.



Şekil 4.76. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.76'da görüldüğü gibi karbon elyaf esaslı pür kompozitin eğilme modülü 53,695 GPa olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT eklenmesi ile kompozitin eğilme modülünde %6,67 oranında artış meydana gelmiş olup, bu değer 57,276 GPa olmuştur. Bu artış, CNT nano partiküllerin yüksek elastisite modülüne sahip olmalarından dolayı, kompozitin reçinesine eklenerek, reçinenin eğilme modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Reçine içerisinde CNT oranının artarak %0,5 değerine varması ile kompozitin eğilme modülünde %17,17'lik bir artış göstererek 67,11 GPa'lık bir değer elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, klasik kompozitlere %0,5 CNT eklenmesi ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitin eğilme modülünde %24,98 oranında bir artış meydana gelmiştir. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemeti Şekil 4.77'de verilmiştir.



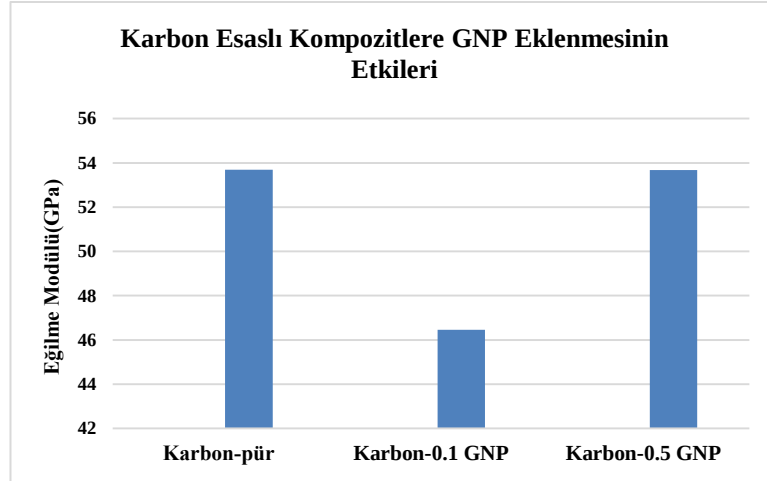
Şekil 4.77. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması

Şekil 4.77’de görülen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi ile elde edilen çok-ölçekli kompozitin eğilme mukavemeti %7,23 oranında artarak 524,992 MPa olmuştur. Malzemenin reçinesine CNT eklenmesi ile kompozitin eğilme mukavemetinin artması, CNT partiküllerin yüksek eğilme mukavemetine (150 MPa) sahip olmalarından dolayı, reçinenin eğilme mukavemetini artırmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, CNT’nin epoksiye eklenmesi, karbon elyafı ile epoksinin arasında kurulan bağların sayısını artırarak, daha dayanıklı bir malzemenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Reçine içerisinde disperse edilen CNT oranının artması ve %0,5 değerine varması, Şekil 4.77’de de görüldüğü gibi kompozitin eğilme mukavemetini %30,47 artırarak 684,96 MPa değerine ulaştırmıştır. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi sonucunda kompozitin eğilme mukavemetinde %39.90’lık bir artış görülmüştür.

b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nanodolgu malzemesi iki boyutlu levhalardan oluşmaktadır. Bu levhaların kalınlıkları nano boyutlarda olup, uzunluk ve ya genişlikleri mikro boyutlarındadırlar. Bu nanodolgu malzemeler çok yüksek en/boy oranına sahiptirler. Bu nano partiküllerin elastisite modülleri yaklaşık 1 TPa ve çekme mukavemetleri 130 MPa’dır. GNP nano

partikülün klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi sonucunda elde ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitlerin eğilme modülleri Şekil 4.78’de verilmektedir.

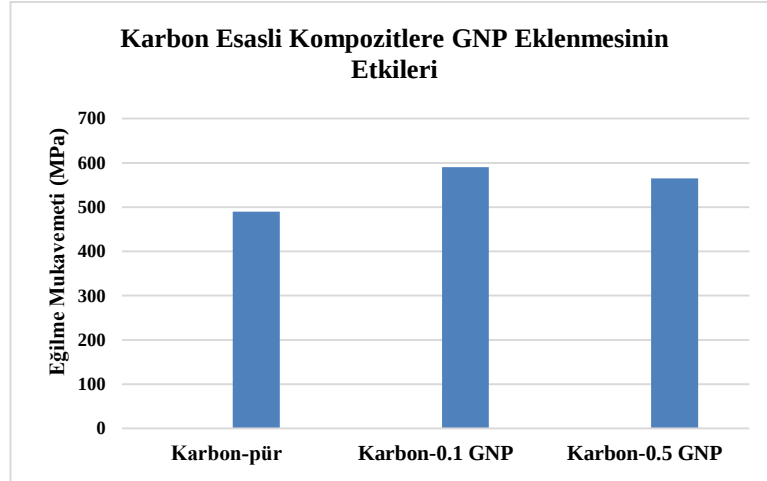


Şekil 4.78. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.78’de görüldüğü gibi karbon elyaf esaslı pür kompozitin eğilme modülü 53,695 GPa olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi durumunda kompozitin eğilme modülünde %13,49’luk bir azalma meydana gelerek, bu değer 46,45 MPa olmuştur. Bu durum eklenen GNP oranının kritik hacim V_{cr} oranından küçük olduğundan kaynaklanmaktadır (NOT). Eklenen GNP oranının kompozit reçinesinde artıp ve %0,5 değerine varması ile kompozitin eğilme modülü %15,55’lik bir artış göstererek 53,676 GPa değerine varmıştır. Elde edilen sonuçlara göre klasik kompozitlere %0,5 GNP eklenmesi ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitin eğilme modülünde %0,03’lük bir düşüşün meydana geldiği gözlemlenmiştir. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemeti Şekil 4.79’da verilmiştir.

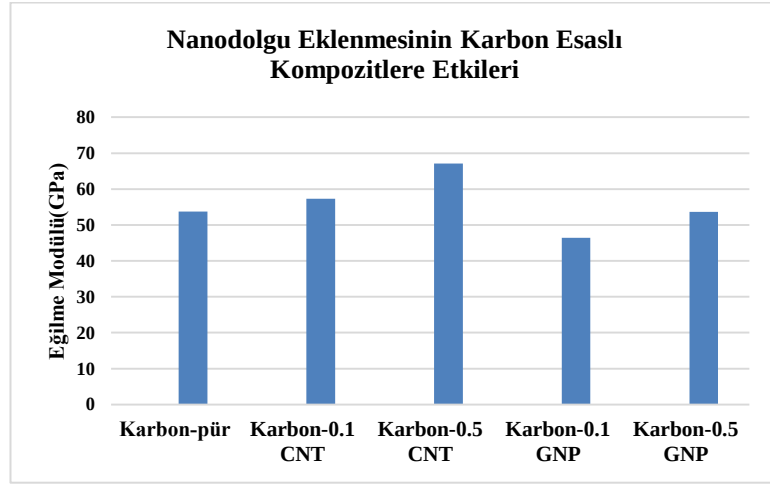
NOT: kompozit malzemelerde takviye etkisinin gerçekleşmesi için bulunması gereken minimum bir takviye hacim oranı vardır. Bu oranın altındaki bir takviye fazı oranı ile yapılan takviyelerde takviye fazının malzemenin modülünün artırmasında etkisi olmaz. Dolayısıyla böyle bir takviyenin hiçbir yararı olmayacağı gibi kuvveti aktarmakta olan

matris malzemesinde gerilme yığılmasını artırdığından eğilme modülünün düşmesine neden olur.



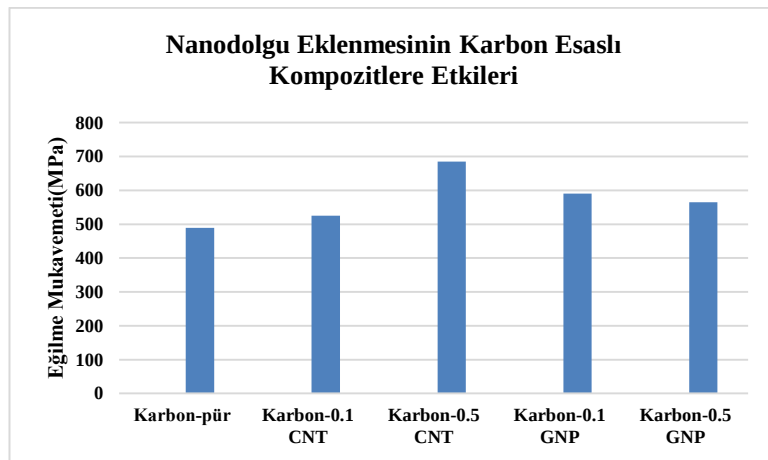
Şekil 4.79. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması

Şekil 4.79’da verilen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül eklenmesi sonucunda elde edilen çok-ölçekli kompozitin eğilme mukavemeti %20,50 oranında artarak 590 MPa değerine yükselmiştir. Malzemenin reçinesine GNP partiküllerin disperse edilmesi ile kompozitin eğilme mukavemetinde meydana gelen artış GNP partiküllerin yüksek eğilme mukavemetine (130 MPa) sahip olmalarından ve epoksiye eklenmesi ile reçinenin eğilme mukavemetini artırmasından kaynaklanmakta olabilir. GNP’nin epoksiye eklenmesi, karbon elyaf ile epoksinin daha güçlü bağlar sağlayarak malzemenin eğilme mukavemetinin artmasına neden olmuştur. Reçineye eklenen GNP oranının %0,5 değerine artması ile kompozitin eğilme mukavemeti %4,43 azalarak 564,96 MPa değerine düşmüştür. Bu durum GNP nano levhalarının çok büyük bir yüzey alanına sahip olmasından dolayı, hacim oranının artması ile reçinede topaklanmasından kaynaklanmakta olabilir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 GNP nano partikül eklenmesi ile kompozitin eğilme mukavemetinde %15,3 oranında bir artış ortaya çıkmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin karbon esaslı kompozit malzemelerin eğilme özelliklerinde ortaya çıkardığı etkiler Şekil 4.80’de verilmiştir.



Şekil 4.80. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması

CNT ve GNP nano partiküller ve ağırlık oranlarının kompozitin eğilme modülüne etkileri Şekil 4.80’de gösterilmiştir. Bu grafiğe göre %0,5 CNT partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi pür kompozit malzemesinin eğilme modülüne %24,98 artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesi pür karbon kompozite göre %13,48 oranında daha düşük eğilme modülüne sahip olarak en zayıf performansı sağlamıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin karbon esaslı kompozit malzemelerin eğilme özelliklerinde etkileri Şekil 4.81’de verilmektedir.



Şekil 4.81. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması

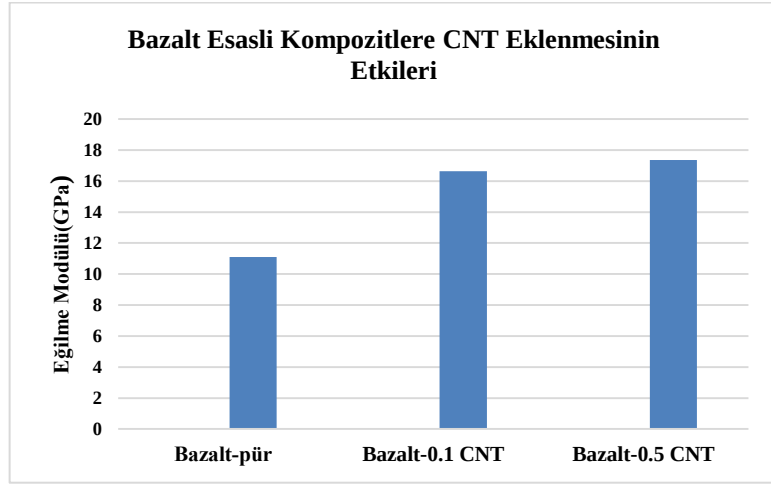
Kompozitin eğilme mukavemetinde CNT ve GNP nano partiküller ve ağırlık oranlarının etkileri Şekil 4.81’de gösterilmektedir. Bu grafiğe dikkat ederek, eğilme modülünde olduğu gibi %0,5 CNT dolgu malzemesinin kompozitin reçinesine eklenmesi, pür kompozit malzemesinin eğilme mukavemetini %39,90 artırarak en iyi performansı sağlamıştır. Bu arada matrisi %0,1 CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesi pür karbon kompozite göre %7,23 oranında artış göstererek en zayıf performansa sahip olmuştur.

4.8.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler

Bu bölümde incelenen kompozit malzemelerin esas bileşeni bazalt elyafıdır ve Çizelge 4.1’de 5-8 arasındaki malzemeleri kapsamaktadırlar. Bütün bu malzemelerin %60’ını bazalt elyaf ve %40’ını nano dolgulu içermekte olan epoksi reçinesi oluşturmaktadır. Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT,%0,1 GNP ve %0,5 GNP oluşmaktadır. Nano partikül eklenmesinin kompozit malzemelerin eğilme özelliklerinde etkilerini incelemek amacıyla ASTM D790 standardına göre üç-nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Bu amaçla her tür malzemeden iki numune test edilerek malzemelerin eğilme modülleri ve eğilme mukavemetleri bulunmuştur.

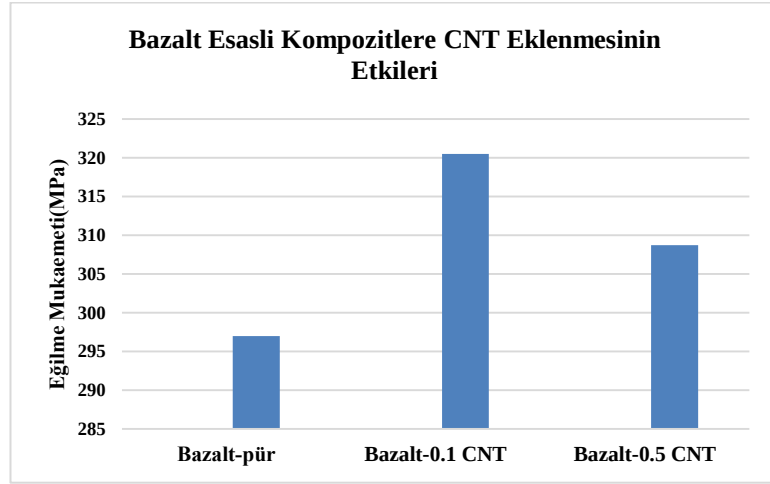
a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin eğilme modül değerleri Şekil 4.82’te verilmektedir.



Şekil 4.82. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.82’de verilen grafiğe bakıldığında, nanodolgu içermeyen bazalt esaslı klasik kompozitin eğilme modülü 11,11 GPa olarak bulunmuştur. Kullanılan epoksi malzemesinin eğilme modülünün 3,5 GPa olduğuna göre, bazalt elyafın takviye fazı olarak kullanımı epoksinin eğilme modülünü %217 oranında artırdığı anlaşılmaktadır. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin eğilme modülü %49 oranında artarak 16,63 GPa değerine ulaşmaktadır. Reçinede CNT dolgu malzemesinin artıp, %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin eğilme modülünde %4,38’lik bir artış ortaya çıkarak, 17.36 GPa değerine ulaşır. %0,5 CNT nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin eğilme modülünde toplam %56,25 artış ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, CNT nanopartiküllerin bazalt esaslı kompozitlerin reçinesine eklenmesi ve oranının artması ile elde edilen çok-ölçekli kompozitin eğilme modülünde uniform bir artış meydana gelmiştir. Bu durum yüksek elastisite modülüne sahip olan CNT nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenerek elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmakta olabilmektedir. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemeti Şekil 4.83’de verilmiştir.

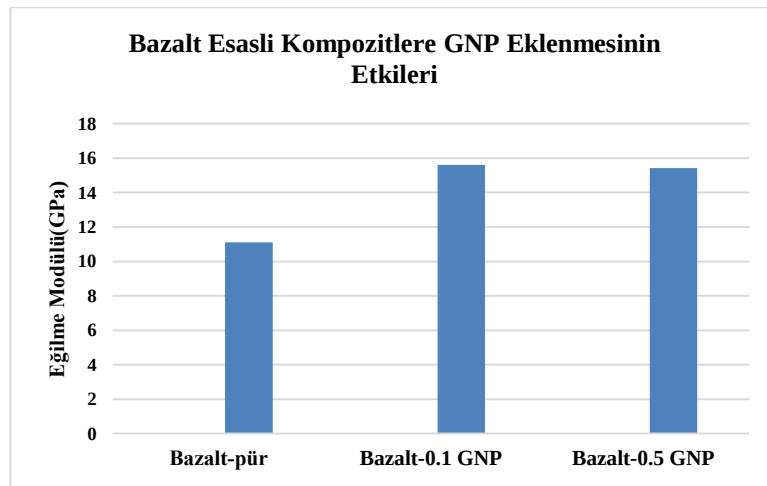


Şekil 4.83. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması

Şekil 4.83’de görüldüğü gibi pür bazalt ile takviye edilmiş kompozitin eğilme mukavemeti 297 MPa olarak elde edilmiştir. Epoksi malzemesinin eğilme mukavemetinin 95 MPa olduğuna göre, epoksi ile bazalt elyafın bileşimi bu malzemenin eğilme mukavemetini %212,63 oranında artırarak 297MPa değerine yükseltmiştir. Kompozitin reçinesine %0,1 oranında CNT nanodolgunun eklenmesi ile kompozitin eğilme mukavemeti %7,33’lük bir artış göstererek 320,5 MPa değerine yükselmiştir. CNT nano taneciklerin yüksek eğilme mukavemetine sahip olmasından dolayı epoksiye eklenerek bu malzemenin eğilme mukavemeti artmış olup ve böylece çok-ölçekli kompozitin eğilme mukavemeti de yükselir. CNT oranının kompozit yapısında artması ve %0,5 değerine varması ile reçinede topaklanma olayı ortaya çıkarak kompozit yapısında oluşan artık gerilmeleri artar ve böylece eğilme mukavemeti %3,67oranında azalarak 308,75MPa değerine düşer. Sonuçlara göre pür kompozitin reçinesine %0.5 oranında CNT nano partiküllerin eklenmesi ile elde edilen kompozitin eğilme mukavemeti %3,95 oranında artmıştır. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt esaslı çok-ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemeti Şekil 4.84’de verilmektedir.

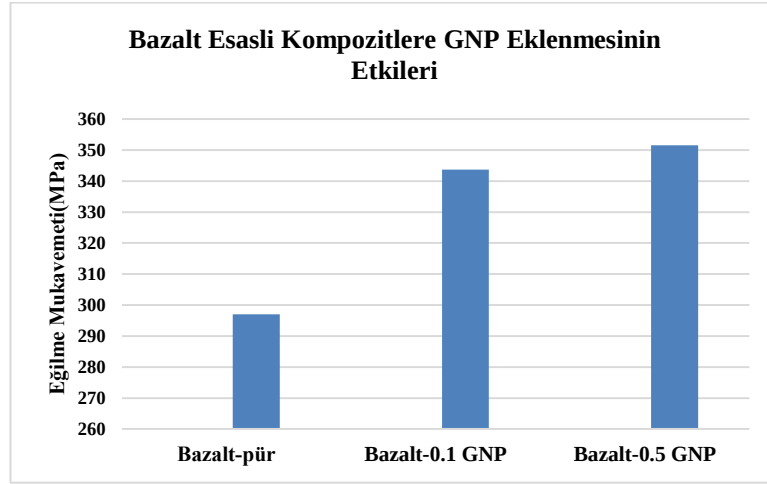
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partikülün bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin eğilme modül değerleri Şekil 4.84’de verilmektedir.



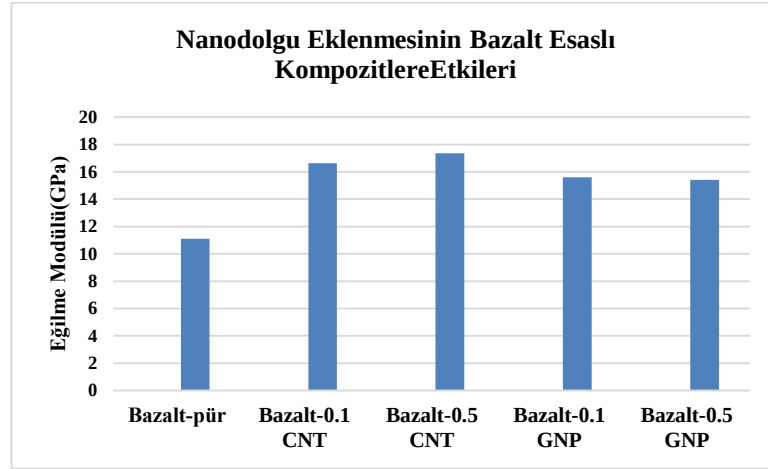
Şekil 4.84. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.84’de verilen grafiğe göre, bazalt esaslı klasik kompozitin eğilme modülü 11,11 GPa olarak bulunmuştur. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin eğilme modülü %40,50 oranında artarak 15,61 GPa değerine yükselmektedir. Reçinede GNP dolgu malzemesinin artıp ve %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin eğilme modülünde %1,21’lik oranında bir azalma ortaya çıkarak, 15,42 GPa değerine düşmüştür. GNP oranının artması ile eğilme modülünün azalması GNP taneciklerinin topaklanmasından kaynaklanmaktadır. %0,5 GNP nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin eğilme modülünde toplam %38,79 oranında artış ortaya çıkmıştır. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt esaslı çok-ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemeti Şekil 4.85’de verilmiştir.



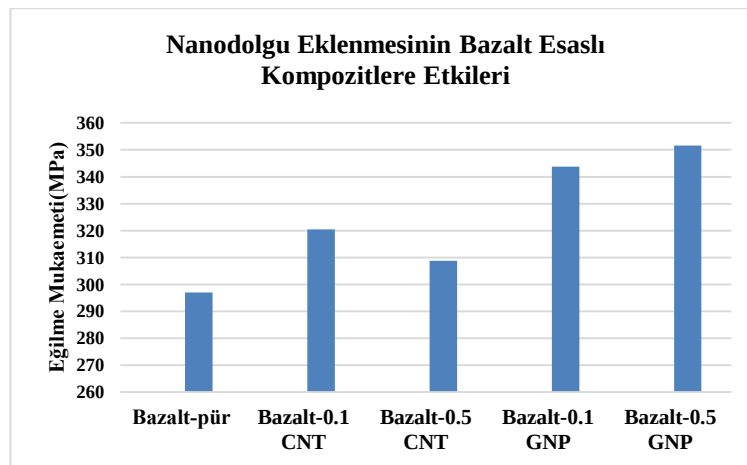
Şekil 4.85. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması

Şekil 4.85’de görüldüğü gibi pür bazalt ile takviye edilmiş kompozitin eğilme mukavemeti 297 MPa değerine sahiptir. Kompozitin reçinesine %0,1 oranında GNP nanodolgunun eklenmesi ile kompozitin eğilme mukavemetinde %15,74’lik bir artış göstererek 343,75 MPa değerine kadar artmıştır. kompozit yapısında GNP nanopartiküllerin artması ve %0,5 değerine varmasıyla kompozitin eğilme mukavemeti %2,27 oranında artarak 351,55 MPa olmuştur. GNP nano taneciklerin yüksek eğilme mukavemetine sahip olması ve kompozitin reçinesine eklenerek, reçinenin eğilme mukavemetini artırması bu artışların en önemli nedeni olarak sayılabilir. Ayrıca, GNP’nin eklenmesi ile elyaf ile reçine malzemesinin daha iyi bağlar kurması bu artışın olası nedenlerinden olabilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre pür kompozitin reçinesine %0,5 oranında GNP nano partiküllerin eklenmesi ile elde edilen kompozitin eğilme mukavemeti %18,37 oranında artmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt esaslı kompozit malzemelerin eğilme özelliklerine etkileri Şekil 4.86’da verilmiştir.



Şekil 4.86. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması

Kompozitin eğilme modülüne CNT ve GNP nano partiküllerin eklenmesi ve ağırlık oranlarının etkileri Şekil 4.86’da verilmektedir. Bu grafiğe göre %0,5 oranında CNT partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi pür kompozit malzemesinin eğilme modülünü %56,25 oranında artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,5 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin eğilme modülü pür karbon kompozite göre %38,79 oranında artış göstererek en zayıf performansı sağlamıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt esaslı kompozit malzemelerin eğilme mukavemetlerine etkileri Şekil 4.87’de verilmiştir.



Şekil 4.87. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması

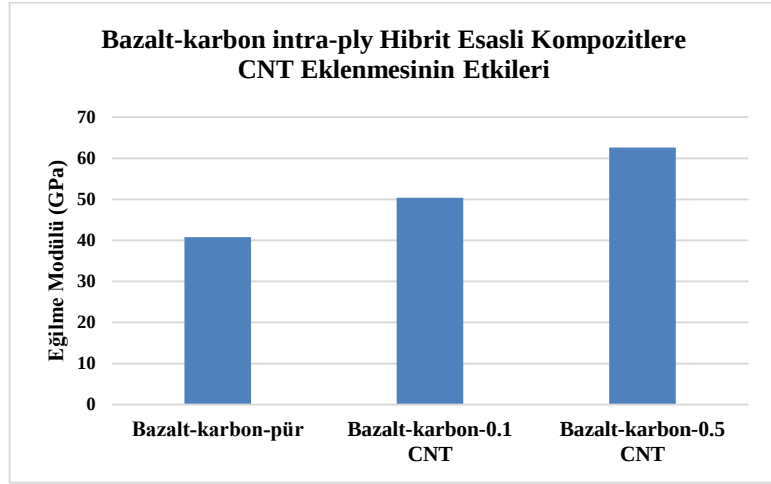
CNT ve GNP nano partiküller ve ağırlık oranlarının bazalt takviyeli kompozitin eğilme mukavemetine etkileri Şekil 4.87’de verilmiştir. Bu grafiğe göre %0,5 oranında GNP nano taneciklerin kompozitin reçinesine eklenmesi ile pür kompozit malzemesinin eğilme mukavemeti %18,37 oranında artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,5 CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin eğilme modülü pür bazalt kompozite göre %3,96 oranında artış göstererek en zayıf performansı sergilemiştir.

4.8.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler

Bu kısımda incelenen kompozit malzemelerin takviye fazları bazalt ve karbon elyafın intra-ply dokunmasından oluşmaktadır. Bu kompozitler Çizelge 4.1’ de 8-10 arasındaki malzemeleri kapsamaktadırlar. Bütün bu malzemelerin %30’unu bazalt elyafı, %30’unu karbon elyafı ve %40’ını nano dolgu içeren epoksi reçinesi oluşturmaktadır. Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup ve %0,1 CNT, %0,5 CNT,%0,1 GNP ve %0,5 GNP’ den oluşmaktadır. Kompozitin eğilme özelliklerinde nano partikül eklenmesinin etkilerini incelemek amacıyla ASTM D790 standardına göre üç-nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Bu amaçla her tür malzemedan iki numune test edilerek malzemelerin eğilme modülleri ve eğilme mukavemetleri bulunmuştur.

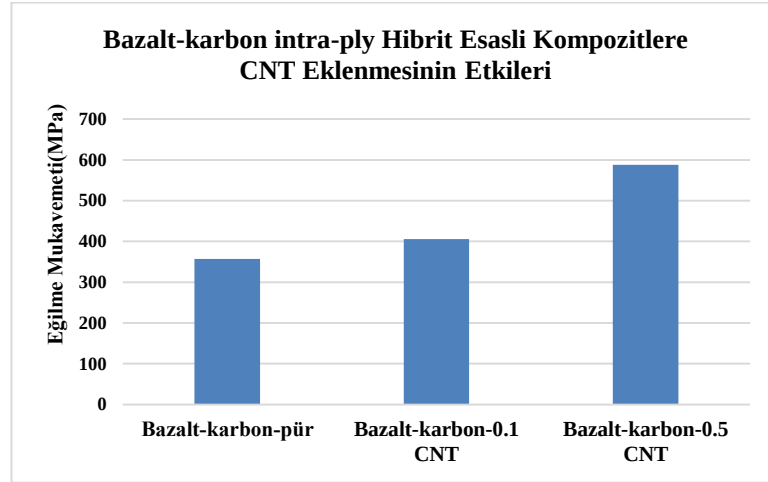
a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

Bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine CNT nano partikülün eklenmesi ile elde edilen kompozitin eğilme modül değerleri Şekil 4.88’de verilmektedir.



Şekil 4.88. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.88’de verilen grafiğe bakıldığında, nanodolgu içermeyen bazalt-karbon hibrit kompozitin eğilme modül değeri 40,78 GPa olarak elde edilmiştir. Kullanılan epoksi malzemesinin eğilme modülünün 3,5 GPa olduğuna göre, bazalt elyafı ile karbonun hibritleşme sonucu elde edilen hibrit takviye fazının epoksi reçinesi ile birleşmesinden ortaya çıkan çok-ölçekli hibrit kompozitin eğilme modülünde sarf epoksiye göre %1065,14 oranında artış meydana gelmiştir. Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül malzemesi eklenerek kompozitin eğilme modülü %23,53 oranında artıp, 50,38 GPa değerine yükselmiştir. Reçinede nano takviye fazının artması ve %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin eğilme modülünde %24,30’luk bir artış ortaya çıkarak, 62,62 GPa değerine ulaşır. %Kompozitin reçinesine %0,5 CNT nanodolgunun, eklenmesi ile kompozitin eğilme modülünde toplam %53,55 oranında artış ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, CNT nanopartiküllerin bazalt-karbon esaslı kompozitlerin reçinesine eklenmesi ve oranının artması ile elde edilen çok-ölçekli kompozitin eğilme modülünde uniform bir artış meydana gelmiştir. Bu artışların nedeni yüksek elastisite modülüne sahip olan CNT nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenmesi ile bu malzemenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş bazalt-karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemetleri Şekil 4.89’da verilmektedir.

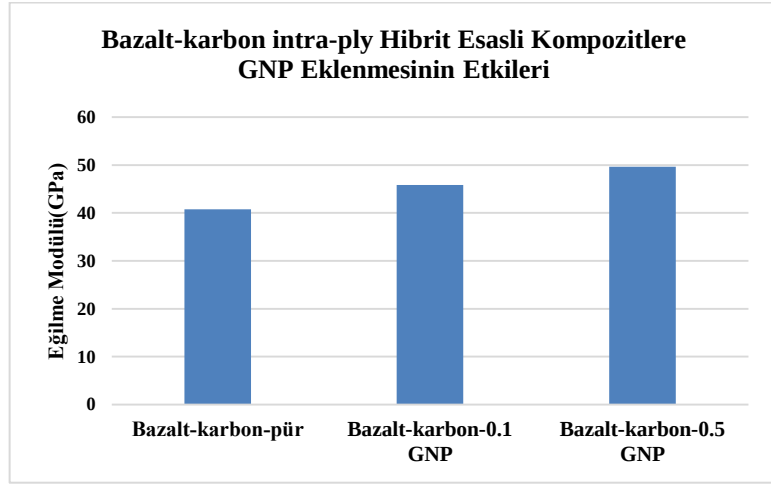


Şekil 4.89. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması

Şekil 4.89’ te görüldüğü gibi pür bazalt-karbon hibrit elyaf kullanılarak takviye edilmiş kompozitin eğilme mukavemeti 357,198 MPa değerine sahiptir. Kompozitin reçinesine %0,1 oranında CNT nano dolgunun eklenmesi ile kompozitin eğilme mukavemeti %13,61’lik bir artış göstererek 405,816 MPa değerine ulaşmıştır. kompozit yapısında CNT nano partiküllerin artması ve %0,5 oranına varmasıyla kompozitin eğilme mukavemeti %44,84 oranında artarak 587,5 MPa değerine yükselmiştir. CNT nano taneciklerin yüksek eğilme mukavemetine sahip olması ve kompozitin reçinesine eklenmesi ile, reçinenin eğilme mukavemetini artırması bu artışın en önemli nedeni olarak sayılabilmektedir. Ayrıca, CNT ’nin eklenmesi ile elyaf ile reçine malzemesinin arayüzeyinde oluşan çapraz bağların sayısının artması, bu artışın diğer nedeni olarak tahmin edilebilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre pür kompozitin reçinesine %0,5 oranında CNT nano partiküllerin eklenmesi ile elde edilen kompozitin eğilme mukavemeti %64,47 oranında artmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt-karbon hibrit takviyeli kompozitlerin eğilme modülünde etkileri Şekil 4.90’da verilmektedir.

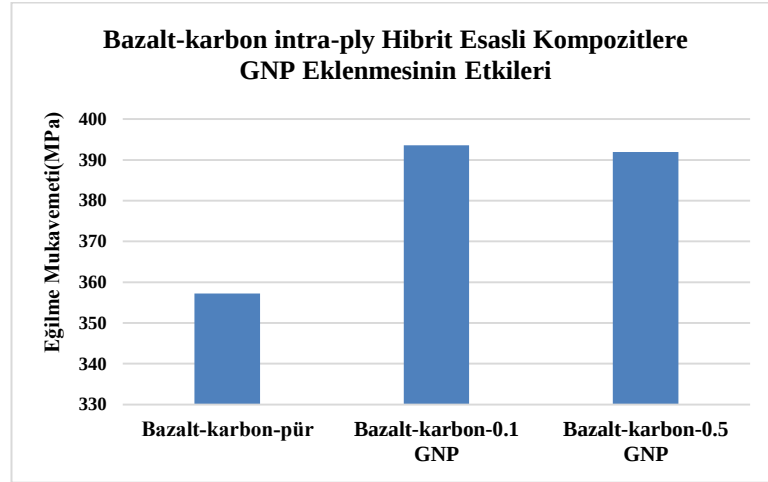
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partikülün bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin eğilme modül değerleri Şekil 4.90’da verilmektedir.



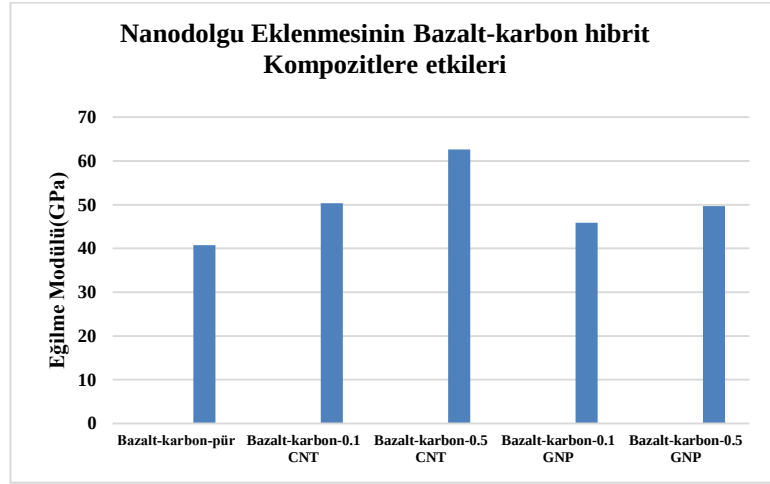
Şekil 4.90. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.90’da verilen grafiğe bakıldığında, nanodolgu içermeyen bazalt-karbon hibrit kompozitin eğilme modül değeri 40,78 GPa olarak elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül malzemesi eklenerek kompozitin eğilme modülü %12,5 oranında aratarak 45,88 GPa değerine yükselmiştir. Reçinede nano takviye fazının artması ve %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin eğilme modülünde %8,28’lik bir artış ortaya çıkar ve bu değer 49,675 GPa değerine ulaşır. %0,5 GNP nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin eğilme modülünde toplam %21,81 oranında artış ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, GNP nanopartiküllerin bazalt-karbon esaslı kompozitlerin reçinesine eklenmesi ve oranının artması ile elde edilen çok-ölçekli kompozitin eğilme modülünde uniform bir artış meydana gelmiştir. Bu durum yüksek elastisite modülüne sahip olan GNP nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenmesi ile bu malzemenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt-karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemeti Şekil 4.91’de verilmektedir.



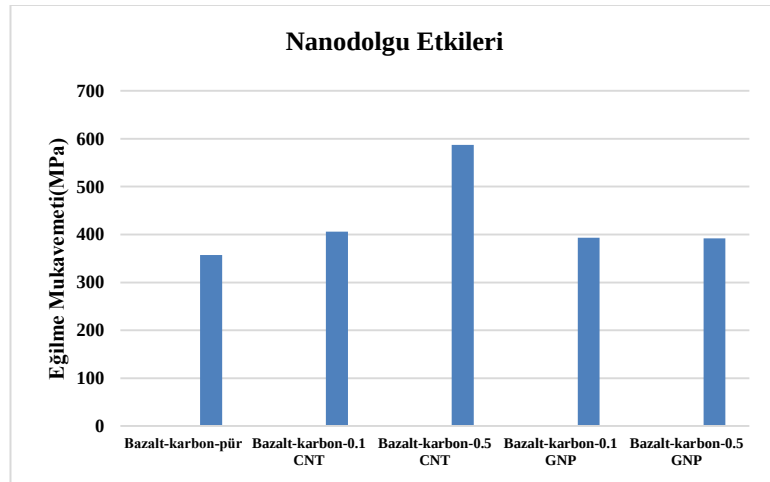
Şekil 4.91. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması

Şekil 4.91’de görüldüğü gibi pür bazalt-karbon hibrit elyaf kullanılarak takviye edilmiş kompozitin eğilme mukavemeti 357,198 MPa değerine sahiptir. Kompozitin reçinesine %0,1 oranında GNP nano dolgunun eklenmesi ile kompozitin eğilme mukavemeti %13,61’lik bir artış göstererek 393,6 MPa değerine ulaşmıştır. B durum GNP nano taneciklerin yüksek eğilme mukavemetine sahip olması ve kompozitin reçinesine eklenmesi ile, reçinenin eğilme mukavemetini artırmasından kaynaklanmakta olabilir. Ayrıca, GNP ’nin eklenmesi ile elyaf ile reçine malzemesinin arayüzeyinde oluşan çapraz bağların sayısının artması bu artışın diğer nedeni olarak tahmin edilmektedir. Kompozit yapısında GNP nano partiküllerin artması ve %0,5 oranına varmasıyla kompozitin eğilme mukavemetinde taneciklerin topaklanması ve artık gerilmelerin artması nedeni ile %0,42 azalarak 391,6 MPa değerine düşmüştür. Elde edilen sonuçlara göre pür kompozitin reçinesine %0,5 oranında GNP nano partiküllerin eklenmesi ile elde edilen kompozitin eğilme mukavemeti %9,73 oranında artmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt-karbon hibrit takviyeli kompozitlerin eğilme modülünde etkileri Şekil 4.92’de verilmektedir.



Şekil 4.92. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme modüllerinin kıyaslanması

Bu grafiğe bakıldığında %0,5 oranında CNT partiküllerin pür kompozit malzemesinin reçinesine eklenmesi kompozitin eğilme modülünde %53,55 oranında artışa neden olarak en iyi performansı sergilemiştir. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin eğilme modülü pür karbon kompozite göre %12,51 oranında artış göstererek en düşük performansı sağlamıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt-karbon esaslı kompozit malzemelerin eğilme mukavemetlerine etkileri Şekil 4.93’de verilmiştir.



Şekil 4.93. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin kıyaslanması

CNT ve GNP nano partiküller ve ağırlık oranlarının kompozitin eğilme mukavemetinde etkileri Şekil 4.93’de gösterilmiştir. Bu grafiğe bakıldığında %0,5 oranında CNT partiküllerin pür kompozit malzemesinin reçinesine eklenmesi kompozitin eğilme mukavemetini %64,47 oranında artırarak en iyi performansı sergilemiştir. Bu arada matrisi %0,5 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin eğilme modülü pür karbon kompozite göre %9,73 oranında artış göstererek en düşük performansı sağlamıştır.

4.9. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzemesi Eklenmesinin Bu Malzemelerin ILSS Değerlerinde Etkileri

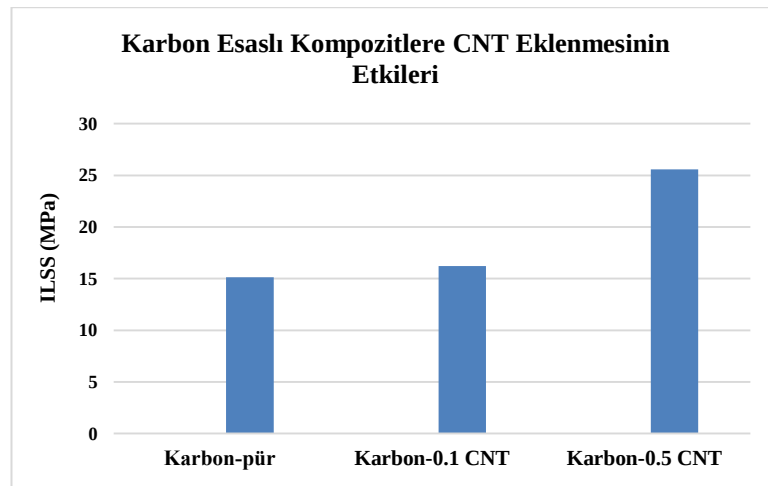
Önceden de söylenildiği gibi, nanodolgu tanecikler kompozit malzemelerin mekanik, termal, elektrik, optik gibi davranışlarının geliştirmiş amacıyla bu malzemelerin reçinesine eklenmektedirler. Çalışmanın bu kısmında, üretilen pür karbon, bazalt ve bazalt-karbon *intra-ply* hibrit takviyeli malzemelerin ILSS değerlerini iyileştirmek için kompozitin reçinesine farklı oranlarda (%0,1 ve 0,5) CNT ve GNP nano partiküller eklenmiştir.

4.9.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler

Bu kategoride yer alan kompozit malzemelerin esas bileşeni karbon elyafıdır ve Çizelge 4.1’ de 1-4 arasındaki malzemeleri kapsamaktadır. Bütün bu malzemelerin %60’ını karbon elyaf ve %40’ını nanodolgu içeren epoksi reçinesi oluşturmaktadır. Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP oluşmaktadır. Kompozitin ILSS değerlerini bulmak için, reçineye nano partikül ekleyerek ASTM D 2344 standardına göre kısa kiriş deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, her tür malzemedan iki numune test edilerek malzemelerin ILSS değerleri bulunmuştur.

a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün karbon takviyeli klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi sonucunda elde edilen kompozitin ILSS değerleri Şekil 4.94’de verilmektedir.

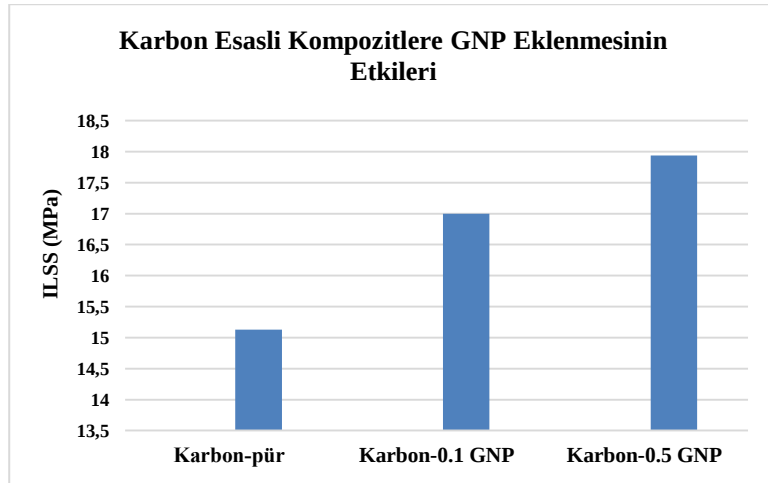


Şekil 4.94 Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulı kompozitlerin ILSS değerleri

Şekil 4.94’de verilen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi ile, elde edilen çok-ölçekli kompozitin ILSS değeri %7,27 oranında artarak 16,23 MPa olmuştur. Bu durum CNT partiküllerin iyi mekanik özelliklere sahip olmasından ve epoksiye eklenerek reçinenin bu özelliklerini artırmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, CNT’ nin epoksiye eklenmesi, karbon elyaf ile epoksinin arasında kurulan bağların sayısını artırarak, daha dayanıklı malzemenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Reçineye disperse edilen CNT oranının artması ve %0,5 değerine varması şekil 4.94’ de de görüldüğü gibi kompozitin ILSS değerini %36,55 oranında artırarak 25,58 MPa değerine ulaştırmıştır. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin ILSS değerinde %69,07 oranında artışın ortaya çıkması görülmüştür. Reçinesi GNP nano partikül ile takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin ILSS değerleri Şekil 4.95’de verilmiştir.

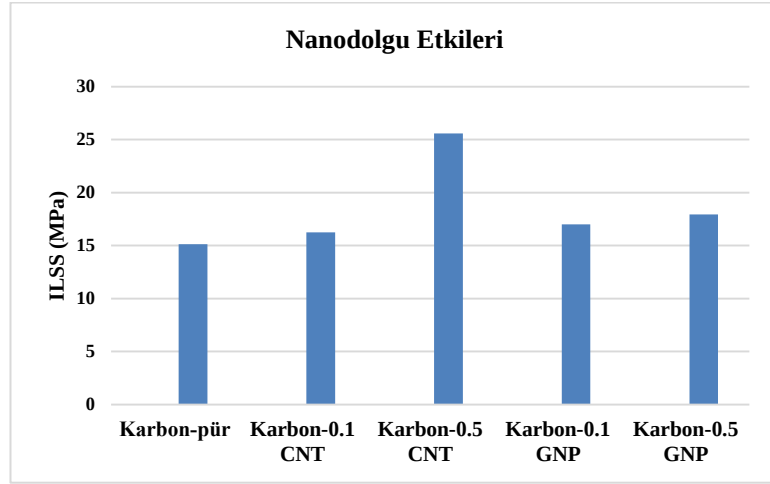
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partikülün klasik kompozitlerin reçinesine eklenme sonucu ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitlerin ILSS değerleri Şekil 4.95’de verilmektedir.



Şekil 4.95. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin ILSS değerleri

Şekil 4.95’de görüldüğü gibi karbon elyaf esaslı pür kompozitin ILSS değeri 15,13 MPa olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi durumunda kompozitin ILSS değerinde %12,36’lık bir artış meydana gelerek 17 MPa olmuştur. Bu durum GNP’ nanotaneçiklerin yüksek mekanik özelliklere sahip olması ve kompozitin reçinesine eklenerek malzemenin bu özelliklerini iyileştirmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca GNP taneciklerin eklenmesi kompozit arayüzey bölgesinde elyaf ile matris arasındaki bağları artırarak ayrışmayı önlemesine neden olarak ILSS değerini artırmış olabilir. Eklenen GNP oranının kompozit reçinesinde artıp, %0,5 değerine varması ile kompozitin ILSS değeri %5,53 oranında artırarak 17,94 MPa değerine yükseltmiştir. Elde edilen sonuçlara göre klasik kompozitlere %0,5 GNP eklenmesi ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitin ILSS değerinde %18,57 oranında bir artış meydana gelmiştir. CNT ve GNP nano partiküllerin karbon esaslı kompozit malzemelerin ILSS değerlerinde ortaya çıkardığı etkiler Şekil 4.96’da verilmiştir.



Şekil 4.96. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması

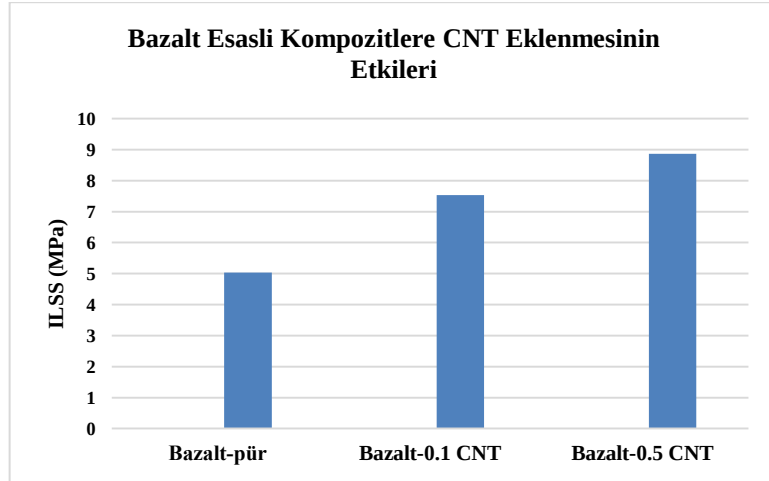
Bu grafiğe göre ağırlık olarak %0,5 oranında CNT partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi ile pür kompozit malzemesinin ILSS değerini %40,85 oranında artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,1 oranında CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesi pür karbon kompozite göre %7,27 oranında daha yüksek ILSS değerine sahip olarak en zayıf performansı sergilemiştir.

4.9.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler

Bu bölümde incelenen kompozit malzemelerin esas bileşeni bazalt elyafıdır ve Çizelge 4.1’de 5-8 arasındaki malzemeleri kapsamaktadır. Bütün bu malzemelerin %60’ını bazalt elyaf ve %40’ını nano dolgu içeren epoksi reçinesi oluşturmaktadır. Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP’ den oluşmaktadır. Kompozitin ILSS değerlerini bulmak için, reçineye nano partikül ekleyerek ASTM D2344 standardına göre kısa kiriş deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla, her tür malzemedan iki numune test edilerek malzemelerin ILSS değerleri bulunmuştur.

a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin ILSS değerleri Şekil 4.97’te verilmektedir.

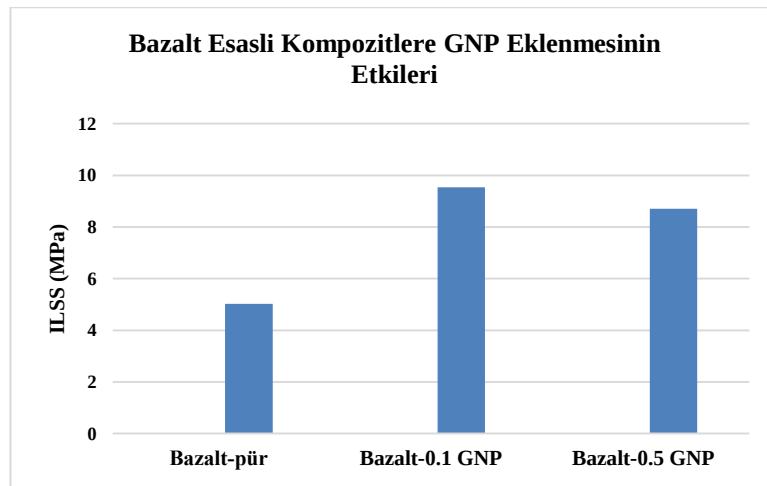


Şekil 4.97. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.97’de verilen grafiğe bakıldığında, nanodolgu içermeyen bazalt esaslı klasik kompozitin ILSS değeri 5,03 MPa olarak bulunmuştur. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin ILSS değeri %33,2 oranında artarak 7,53 GPa değerine ulaşmaktadır. Reçinede CNT dolgu malzemesinin artıp, %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin ILSS değerinde %17,79’luk bir artış meydana gelerek, 8,87 MPa değerine yükselmiştir. Böylece bazalt elyaf takviyeli kompozitin reçinesine %0,5 oranında CNT taneciklerin artırılmasıyla kompozitin ILSS değerinde %76,34 oranında artış meydana gelmiştir. Bu artışın nedeni yüksek mekanik özelliklere sahip olan CNT nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenerek bu malzemenin mekanik özellikleri ve arayüzey davranışını iyileştirmesinden kaynaklanmaktadır. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt esaslı çok-ölçekli kompozitlerin çekme mukavemeti Şekil 4.98’de verilmektedir.

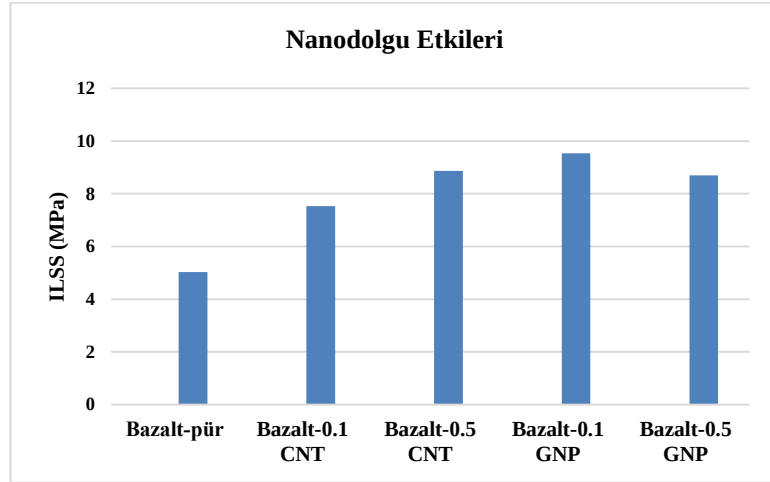
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partiküllerin bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitlerin ILSS değerleri Şekil 4.99’da verilmektedir.



Şekil 4.98. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.98’de verilen grafiğe göre, bazalt esaslı klasik kompozitin ILSS değerleri 5,03 MPa olarak bulunmuştur. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine %0,1 oranında GNP nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin ILSS değerinde %89,66 oranında artarak 9,54 MPa değerine yükselmektedir. Reçinede GNP dolgu malzemesinin artıp,%0,5 değerine gelmesi ile kompozitin yapısında topaklanma olayı meydana gelir ve elde edilen kompozitin ILSS değerinde %8,80’lik bir artış azalma çıkarak, 8,7 MPa değerine düşmüştür. Böylece %0,5 GNP nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin ILSS değeri toplam olarak %72,96 oranında artış ortaya çıkmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt esaslı kompozit malzemelerin ILSS değerlerinde ortaya çıkardığı etkiler Şekil 4.99’da verilmiştir.



Şekil 4.99. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması

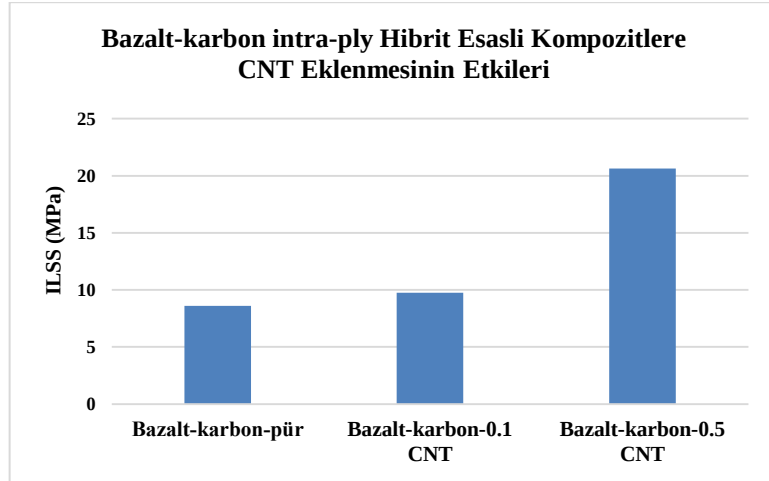
Bu grafiğe göre kompozitin reçinesine %0,1 oranında GNP partiküllerin eklenmesi pür kompozit malzemesinin ILSS değerini %89,66 oranında artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,1 CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin ILSS değeri pür karbon kompozite göre %49,70 oranında artış göstererek en zayıf performansı sağlamıştır.

4.9.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler

Çalışmanın bu kısmında incelenen kompozit malzemelerin takviye fazları bazalt ve karbon elyafın intra-ply dokunmasından oluşmaktadır. Bu kompozitler Çizelge 4.1’de 8-10 arasındaki malzemeleri kapsamaktadırlar. Bütün bu malzemelerin %30’unu bazalt elyafı, %30’unu karbon elyafı ve %40’ını nano dolgu içeren epoksi reçinesi oluşturmaktadır. Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP’ den oluşmaktadır. Kompozitin ILSS değerlerini incelemek için, reçineye nano partikül ekleyerek ASTM D2344 standardına göre kısa kiriş deneyi yapılmıştır. Bu amaçla, her tür malzemedan iki numune test edilmiştir.

a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin ILSS değerleri Şekil 4.100’de verilmektedir.

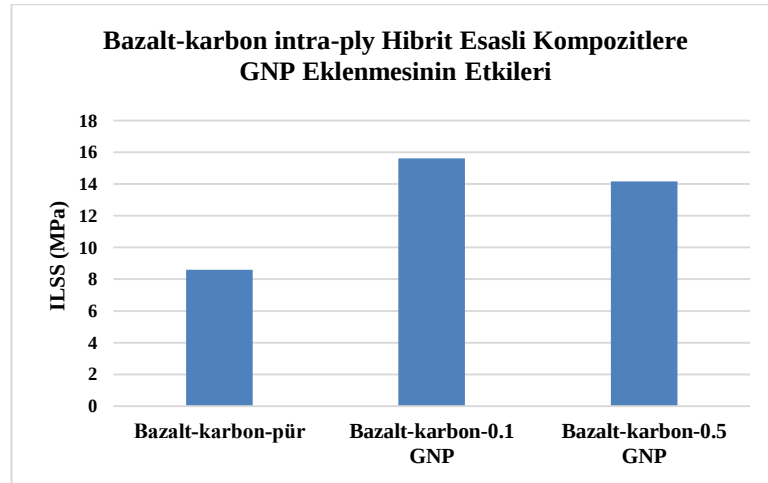


Şekil 4.100. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu hibrit kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.100’de verilen grafiğe bakıldığında, nanodolgu içermeyen bazalt-karbon hibrit kompozitin ILSS değeri 8,59 MPa olarak elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozitin reçinesine %0,1 CNT oranında nano partikül malzemesi eklenerek kompozitin ILSS değeri %13,62 oranında artarak 9,76 MPa değerine yükselmiştir. Reçinede nano takviye fazının artıp, %0,5 oranına gelmesi ile elde edilen kompozitin ILSS değerinde %111,47’lik bir artış ortaya çıkarak, 9,76 MPa değerine ulaşmıştır. %0,5 CNT nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin ILSS değerinde toplam %140,28 oranında artış ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, CNT nanopartiküllerin bazalt-karbon esaslı kompozitlerin reçinesine eklenmesi ve oranlarının artması ile elde edilen çok-ölçekli kompozitin ILSS değerinde uniform bir artış meydana gelmiştir. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt-karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin ILSS değerleri Şekil 4.101’de verilmektedir.

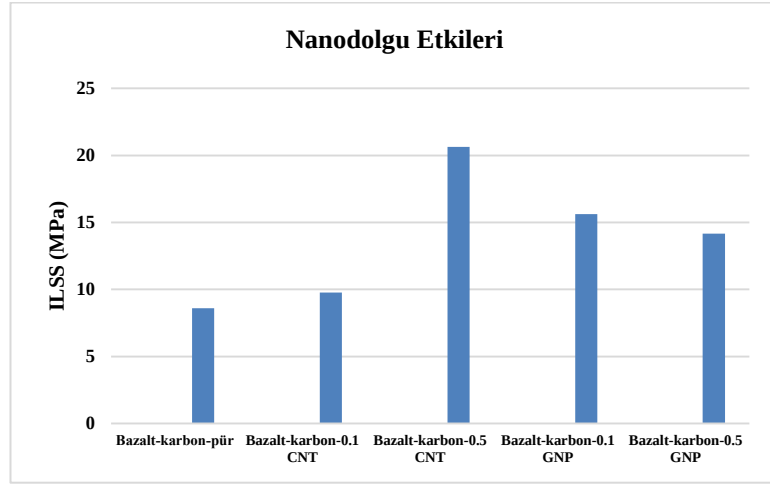
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partikülün bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin ILSS değerleri Şekil 4.102’de verilmektedir.



Şekil 4.102. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.102’de görüldüğü gibi pür bazalt-karbon intra-ply hibrit elyaf kullanılarak takviye edilmiş kompozitin ILSS değeri 8,59 MPa değerine sahiptir. Kompozitin reçinesine %0,1 oranında GNP nano dolgunun eklenmesi ile kompozitin ILSS değeri %81,84’lük bir artış göstererek 15,62 MPa değerine ulaşmıştır. kompozit yapısında GNP nano partikül oranının artıp, %0,5 değerine varmasıyla topaklanma olayından dolayı kompozitin ILSS değeri %9,29 oranında azalarak 14,17 MPa değerine düşmüştür. Sonuçlara göre pür kompozitin reçinesine %0,5 oranında GNP nano partiküllerin eklenmesi ile elde edilen kompozitin ILSS değeri %64,96 oranında artmıştır. Bu durum GNP nano taneciklerin yüksek mekanik özelliklere sahip olması ve kompozitin reçinesine eklenmesi ile reçinenin özelliklerini iyileştirmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, GNP ’nin eklenmesi ile elyaf ile reçine malzemesinin arayüzeyinde oluşan çapraz bağlar sayısının artması bu artışın diğer nedeni olarak tahmin edilmektedir. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt-karbon hibrit takviyeli kompozitlerin ILSS değerlerinde etkileri Şekil 4.103’te verilmektedir.



Şekil 4.103. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin ILSS değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe bakıldığında pür kompozit malzemesinin reçinesine %0,5 oranında CNT partiküllerin eklenmesi kompozitin ILSS değerini %140,28 oranında artırarak en iyi performansı sergilemiştir. Bu arada matrisi %0,1 CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin ILSS değeri pür karbon kompozite göre %13,69 oranında artış göstererek en düşük performansı sergilemiştir.

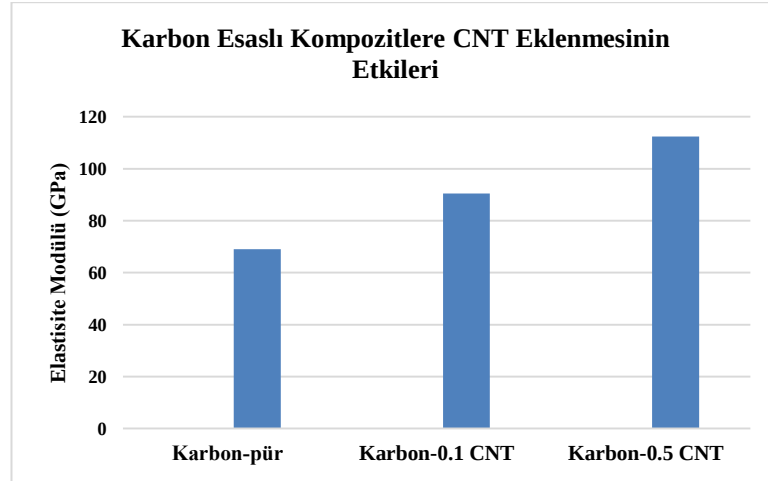
4.10. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzeme Eklenmesinin Ankastre-Serbest Titreşim Özelliklerinde Etkileri

4.10.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler

Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP'den oluşmaktadır. Nano partikül eklenmesinin kompozitin titreşim özelliklerinde ortaya çıkardığı etkileri incelemek için ASTM D5022 standardına göre ankastre-serbest titreşim deneyi yapılmıştır. Bu amaçla her tür malzemeden üç numune test edilerek malzemelerin doğal frekansı, sönüm oranı ve elastisite modülü bulunmuştur.

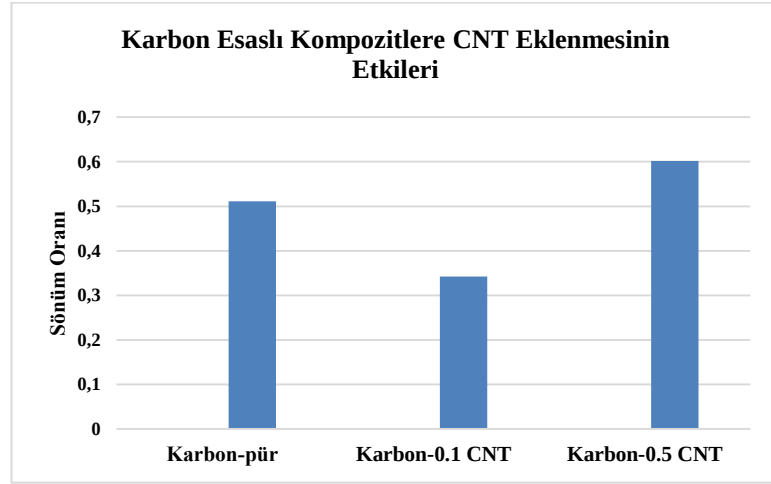
a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün karbon takviyeli klasik kompozitlerin reçinesine eklenme sonucu elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.104’de verilmektedir.



Şekil 4.104. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.104’de görüldüğü gibi karbon elyaf esaslı pür kompozitin elastisite modülü 69 GPa olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde %31,07 oranında artış meydana gelerek, bu değer 90,447 GPa olmuştur. Bu artış CNT nano partiküllerin yüksek elastisite modülüne sahip olduğundan ve kompozitin reçinesine eklenerek reçinenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Kompozit reçinesinde CNT oranının artıp, %0,5 değerine varması ile kompozitin elastisite modülü %24,34’ lük bir artış göstermekle birlikte 112,46 GPa olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre klasik kompozitlere %0,5 CNT eklenmesi ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde %62,99 oranında bir artış meydana gelmiştir. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.105’de verilmiştir.

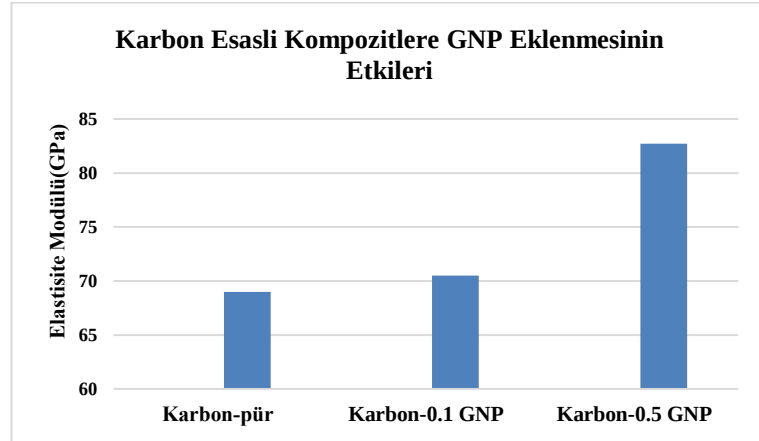


Şekil 4.105. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması

Şekil 4.105’de verilen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi ile, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %33,07 oranında azalarak 0,342 MPa değerine düşmüştür. Reçineye disperse edilen CNT oranının artıp, %0,5 değerine varması ile kompozitin sönüm oranı %76,78 artırarak 0,602 değerine ulaştırmıştır. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranında %32,50 artışın ortaya çıkması görülmüştür.

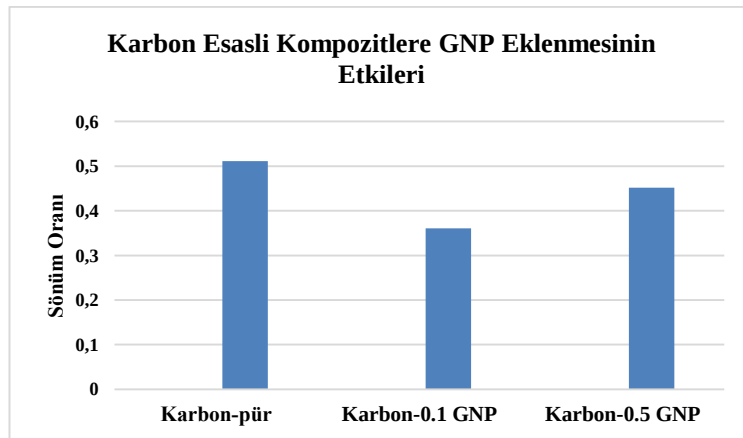
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partikülün klasik kompozitlerin reçinesine eklenme sonucu ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerleri Şekil 4.106’da verilmektedir.



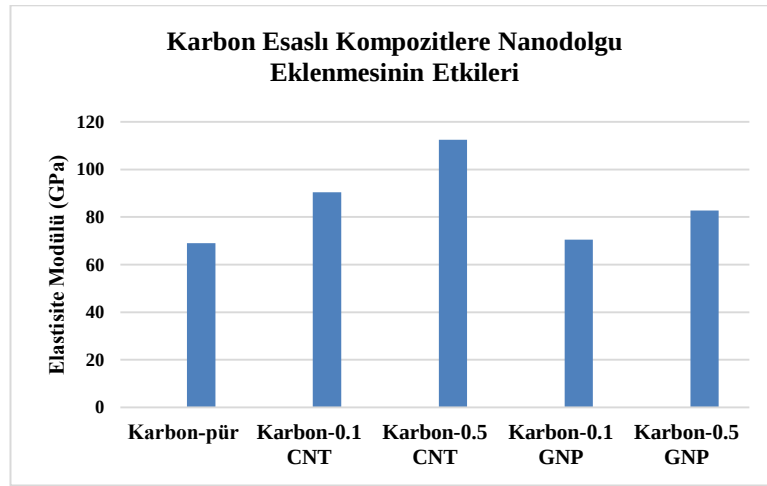
Şekil 4.106. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modüllerinin kıyaslanması

Şekil 4.106’de görüldüğü gibi karbon elyaf esaslı pür kompozitin elastisite modülü 69 GPa olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi durumunda kompozitin elastisite modülünde %2,17’lik bir artış meydana gelerek, bu değer 70,5 MPa olmuştur. Eklenen GNP oranının kompozit reçinesinde artıp ve %0,5 değerine varması ile kompozitin elastisite modülü %17,32 lik bir artış göstererek 82,71 GPa değerine yetiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre klasik kompozitlere %0,5 GNP eklenmesi ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde %19,87 lik bir artışın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oranı Şekil 4.107’de verilmiştir.



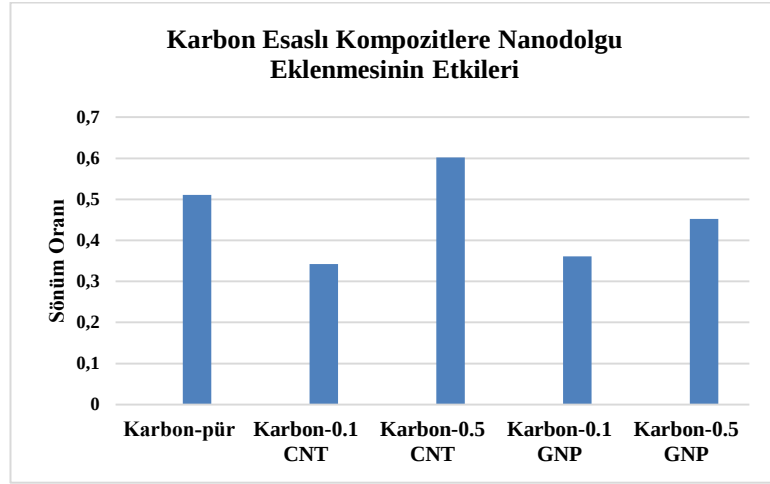
Şekil 4.107. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması

Şekil 4.107’de verilen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül eklenmesi sonucu, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %29,35 oranında azalarak 0,361 değerine düşmüştür. Reçineye eklenen GNP oranının %0,5 artması kompozitin sönüm oranını %25,21 oranında artırarak 0,452 değerine yükseltmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0.5 GNP nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranı %11,55 oranında bir düşüş ortaya çıkmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin karbon esaslı kompozit malzemelerin elastisite modülünde ortaya çıkardığı etkiler Şekil 4.108’da gösterilmiştir.



Şekil 4.108. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe göre %0,5 CNT partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi pür kompozit malzemesinin elastisite modülünü %62,98 artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesi pür karbon kompozite göre %2,17 oranında daha yüksek elastisite modülüne sahip olarak en zayıf performansı sergilemiştir. CNT ve GNP nano partiküllerin karbon esaslı kompozit malzemelerin sönüm oranında etkileri Şekil 4.109’da verilmektedir.



Şekil 4.109. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oranlarının kıyaslanması

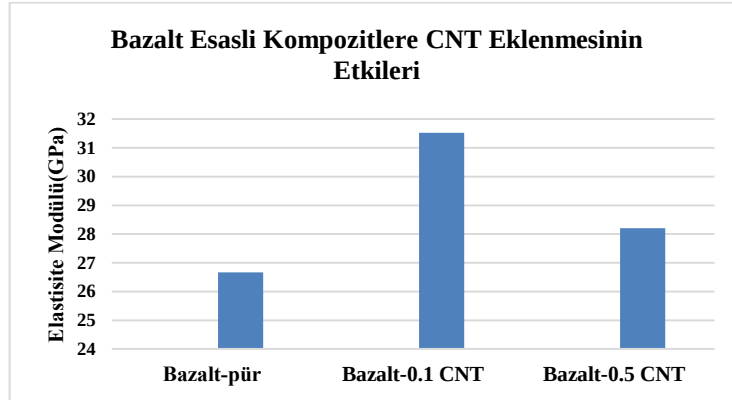
Bu grafiğe dikkat ederek, %0,5 CNT dolgu malzemesinin kompozitin reçinesine eklenmesi, pür kompozit malzemesinin sönüm oranında %17,81 oranında artırarak en yüksek artış oranına sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesi pür karbon kompozite göre %29,35 oranında düşüş göstererek en zayıf performansa sahip olmuştur.

4.10.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler

Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, % 0,1 GNP ve % 0,5 GNP oluşmaktadır. Nano partikül eklenmesinin kompozitin titreşim özelliklerine etkilerini incelemek için ASTM D5022 standardına tabi titreşim deneyi yapılmıştır. Bu amaçla, her tür malzemeden üç numune test edilerek malzemelerin doğal frekansı, sönüm oranı ve elastisite modülü bulunmuştur.

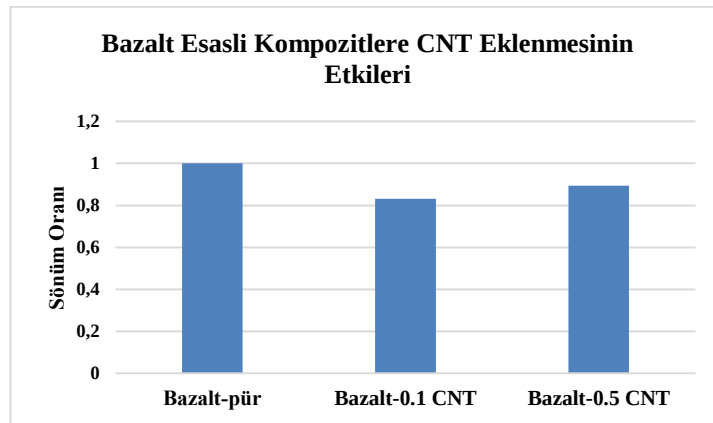
a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.110'da verilmektedir.



Şekil 4.110. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.110’da verilen grafiğe göre, nanodolgu içermeyen bazalt esaslı klasik kompozitin elastisite modülü 26,67 GPa olarak bulunmuştur. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine % 0,1 CNT nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin elastisite modülü %49 oranında artarak 31,526 GPa değerine ulaşmıştır. Reçinede CNT oranının artıp, % 0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülünde %10,55’lik bir azalma ortaya çıkarak, 28,2 GPa değerine düşmüştür. %0,5 CNT nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %5,73 oranında artış ortaya çıkmıştır. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.111’de verilmiştir.

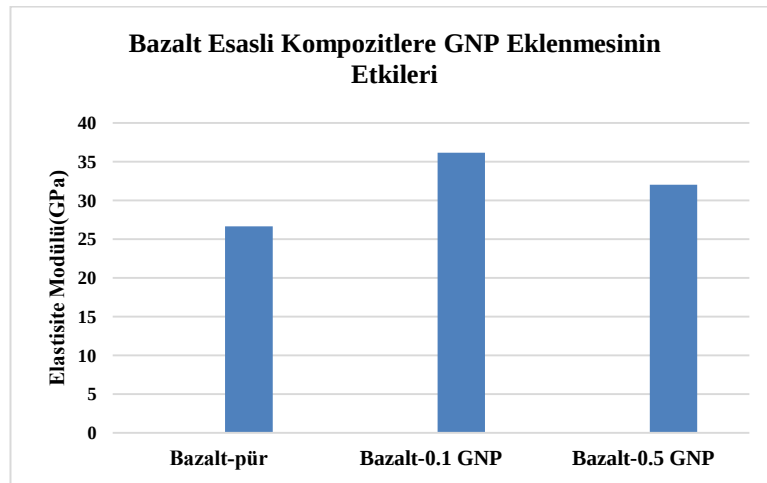


Şekil 4.111. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oranların değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.111’de verilen değerlere göre, bazalt esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi sonucu, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %16,90 oranında azalarak 0,831 değerine düşmüştür. Reçineye eklenen CNT oranının %0,5 değerine artması kompozitin sönüm oranını %7,58 oranında artırarak 0,894 değerine yükseltmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranı %10,60 oranında bir artış ortaya çıkmıştır

b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

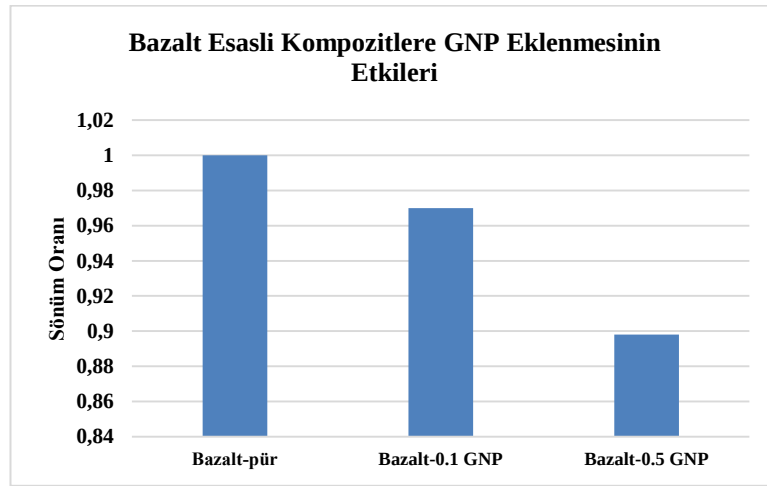
GNP nano partiküllerin bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitlerin elastisite modül değerleri Şekil 4.112’de verilmektedir



Şekil 4.112. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

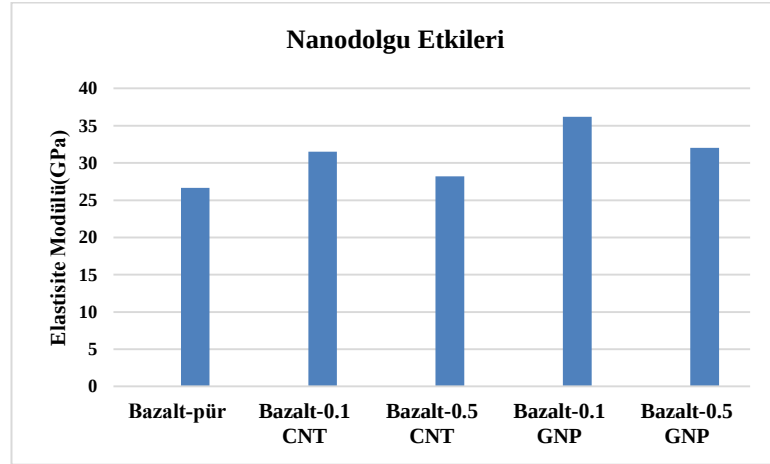
Şekil 4.112’de verilen grafiğe göre, bazalt esaslı klasik kompozitin elastisite modülü 26,67 GPa olarak bulunmuştur. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin elastisite modülü %35,66 oranında artarak 36,18 GPa değerine yükselmektedir. Reçinede GNP dolgu malzemesinin artıp ve %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülünde %1,21’lik oranında bir azalma ortaya çıkarak, 32,04 GPa değerine düşmüştür. GNP oranının artması ile elastisite modülünün azalması nano partikül

oranının artması ile kompozit yapısında topaklanma olayının ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. %0,5 GNP nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %20,14 oranında artış ortaya çıkmıştır. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.113’de verilmiştir.



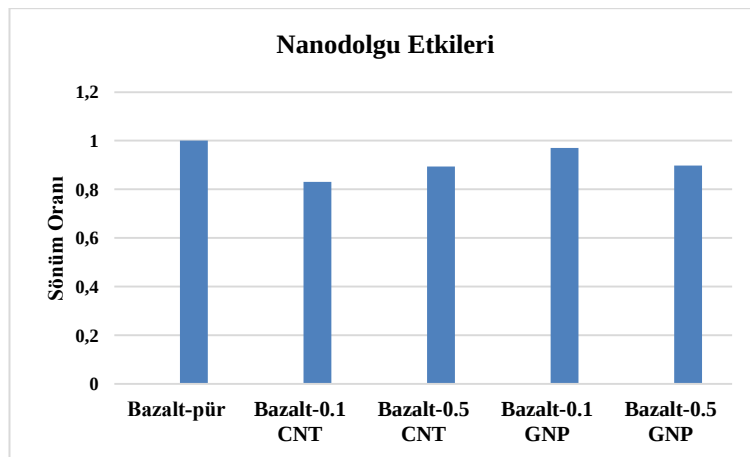
Şekil 4.113. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.113’da verilen değerlere göre, bazalt esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi sonucu, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %3,00 oranında azalarak 0,97 değerine düşmüştür. Reçineye eklenen CNT oranının %0,5 değerine artması kompozitin sönüm oranını %7,42 oranında azaltarak 0,898 değerine indirmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranı %10,20 oranında bir düşüş ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.114. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modüllerinin kıyaslanması

CNT ve GNP nano partiküller ve ağırlık oranlarının kompozitin elastisite modülüne etkileri Şekil 4.114’de verilmektedir. Bu grafiğe göre %0,1 oranında GNP partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi pür kompozit malzemesinin elastisite modülüne %35,66 oranında artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,5 CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin elastisite modülü pür karbon kompozite göre %5,74 oranında artış göstererek en zayıf performansı sergilemiştir. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt esaslı kompozit malzemelerin sönüm oran değerlerine etkileri Şekil 4.115’de verilmiştir.



Şekil 4.115. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

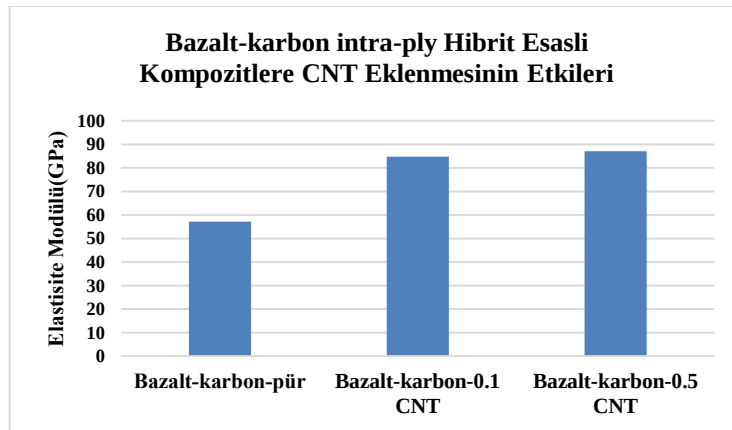
CNT ve GNP nano partiküller ve ağırlık oranlarının bazalt takviyeli kompozitin elastisite sönüm oranına etkileri Şekil 4.115'te verilmiştir. Bu grafiğe göre %0,1 oranında GNP nano taneciklerin kompozitin reçinesine eklenmesi ile pür kompozit malzemesinin sönüm oranı %3,00 oranında azaltarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,5 CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin sönüm oranı pür bazalt kompozite göre %16,9 oranında azalarak en zayıf performansı sergilemiştir.

4.10.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler

Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, % 0,1 CNT, % 0,5 CNT, % 0,1 GNP ve % 0,5 GNP oluşmaktadır. Nano partikül eklenmesinin kompozitin titreşim özelliklerine etkilerini incelemek için ASTM D5022 standardına tabi titreşim deneyi yapılmıştır. Kompozitlerin titreşim özelliklerini incelemek için her tür malzemeden üç numune test edilerek malzemelerin doğal frekansı, sönüm oranı ve elastisite modülü bulunmuştur.

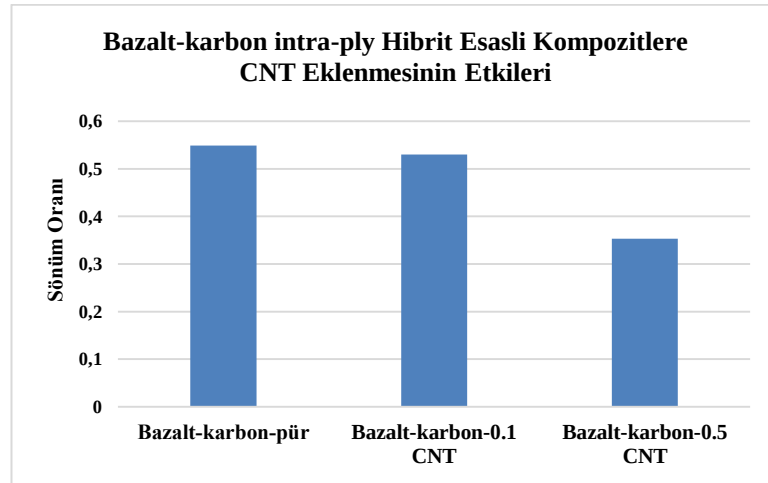
a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.116'da verilmektedir.



Şekil 4.116. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.116'da verilen grafiğe göre, nanodolgu içermeyen bazalt-karbon hibrit kompozitin elastisite modül değeri 57,18 GPa olarak elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozitin reçinesine % 0,1 CNT nano partikül malzemesi eklenerek kompozitin elastisite modülü % 48,25 oranında artarak 84,77 GPa değerine yükselmiştir. Reçinede nano takviye fazının artması ve %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülünde % 2,81'lik bir artış ortaya çıkarak, 87,15 GPa değerine ulaşmıştır. % 0,5 CNT nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %52,41 oranında artış ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, CNT nanopartiküllerin bazalt-karbon esaslı kompozitlerin reçinesine eklenmesi ve oranının artması ile elde edilen çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde uniform bir artış meydana gelmiştir. Bu artışların nedeni yüksek elastisite modülüne sahip olan CNT nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenmesi ile bu malzemenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.117'de verilmektedir.



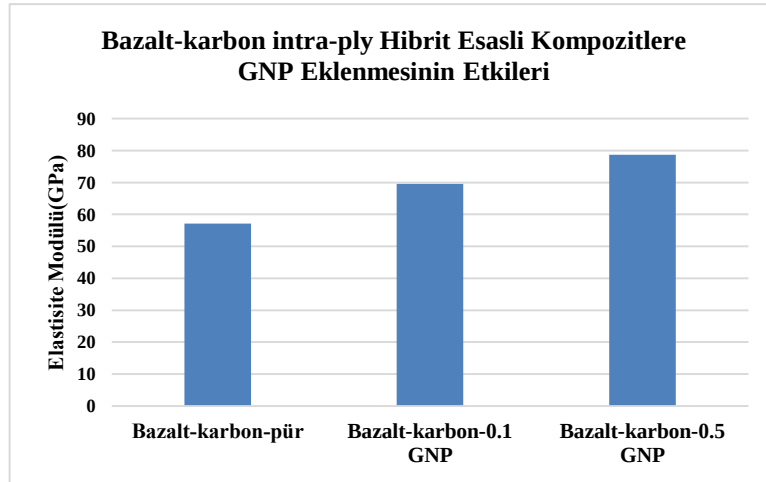
Şekil 4.117. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.117'de verilen değerlere göre, bazalt-karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi sonucu, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %3,46 oranında azalarak 0,53 değerine düşmüştür. Reçineye eklenen CNT

oranının %0,5 değerine artması kompozitin sönüm oranını %33,39 oranında azaltarak 0,353 değerine indirmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranı %35,70 oranında bir düşüş ortaya çıkmıştır.

b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

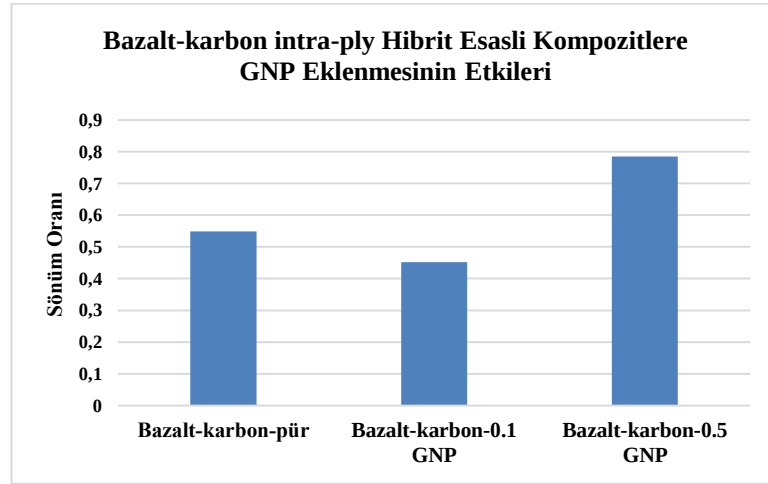
GNP nano partikülün bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.118’de verilmektedir.



Şekil 4.118. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulı kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

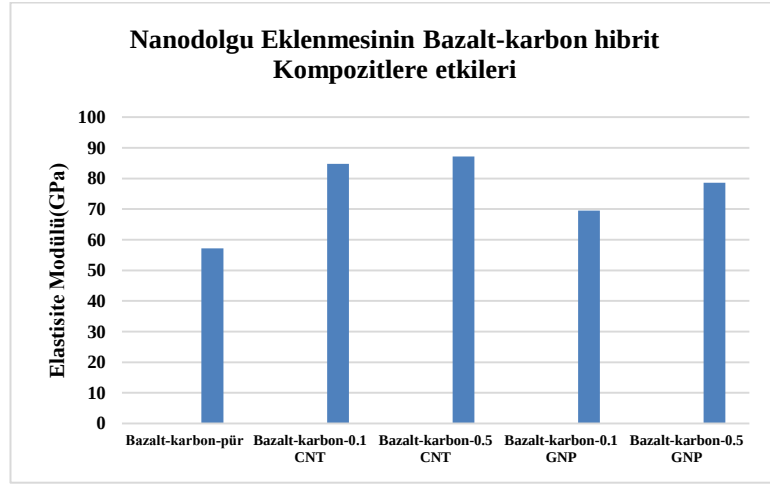
Şekil 4.118’de verilen grafiğe göre, pür bazalt-karbon hibrit kompozitin elastisite modülü 57,18 GPa olarak elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül malzemesi eklenerek kompozitin elastisite modülü %21,63 oranında artarak 69,55 GPa değerine yükselmiştir. Reçinede nano takviye fazının artması, %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülünde %13,09’luk bir artış ortaya çıkarak, 78,66 GPa değerine ulaşır. %0,5 GNP nanodolgunun kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %37,57 oranında artış ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, GNP nanopartiküllerin bazalt-karbon esaslı kompozitlerin reçinesine eklenmesi ve oranının artması ile elde

edilen çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde uniform bir artış meydana gelmiştir. Bu artışların nedeni yüksek elastisite modülüne sahip olan GNP nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenmesi ile bu malzemenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt-karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oranı Şekil 4.119’da verilmektedir.



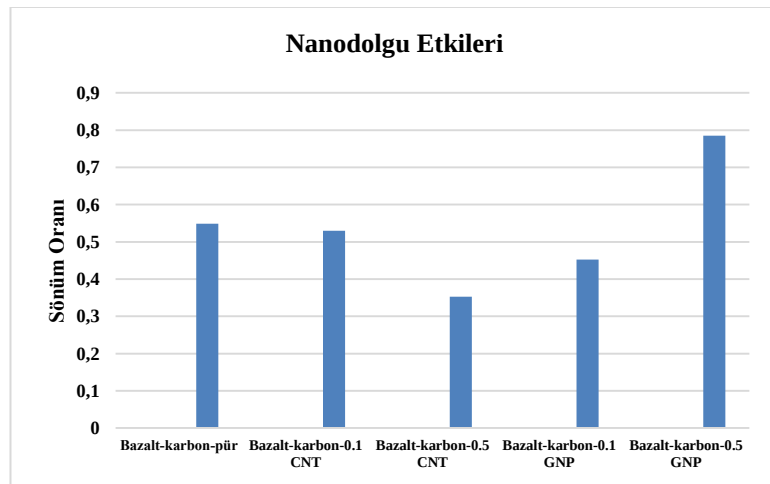
Şekil 4.119. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.119’da verilen değerlere göre, bazalt-karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül eklenmesi sonucu, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %17,67 oranında azalarak 0,452 değerine düşmüştür. Reçineye eklenen GNP oranının %0,5 değerine artması kompozitin sönüm oranını %73,67 oranında artırarak 0.785 değerine yükselmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranında %42,99’luk bir artış ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.120. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe göre %0,5 oranında CNT partiküllerin pür kompozit malzemesinin reçinesine eklenmesi kompozitin elastisite modülünü %52,41 oranında artırarak en iyi performansı sağlamıştır. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin elastisite modülü pür karbon kompozite göre %21,63 oranında artış göstererek en düşük performansı sergilemiştir. CNT ve GNP nano partikül eklenmesinin bazalt-karbon esaslı kompozit malzemelerin sönüm oran değerlerine etkileri Şekil 4.121’de verilmiştir.



Şekil 4.121. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite mukavemetlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe göre %0,5 oranında GNP partiküllerin pür kompozit malzemesinin reçinesine eklenmesi, kompozitin sönüm oran değerini %42,98 oranında artırarak en iyi performansı sağlamıştır. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin sönüm oranı pür karbon kompozite göre %35,70 oranında azalarak en düşük performansı sergilemiştir.

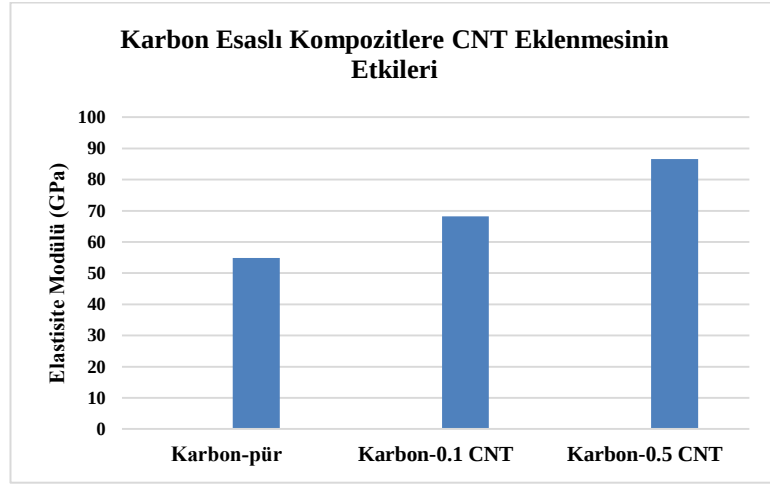
4.11. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzemesi Eklenmesinin Serbest-Serbest Titreşim Özelliklerinde Etkileri

4.11.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler

Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP'den oluşmaktadır. Nano partikül eklenmesinin kompozitin serbest-serbest titreşim özelliklerine etkilerini incelemek için ASTM D5022 standardına tabi titreşim deneyi yapılmıştır. Kompozitlerin titreşim özelliklerini incelemek amacıyla her tür malzemeden üç numune test edilerek malzemelerin doğal frekans, sönüm oranı ve elastisite modülü bulunmuştur.

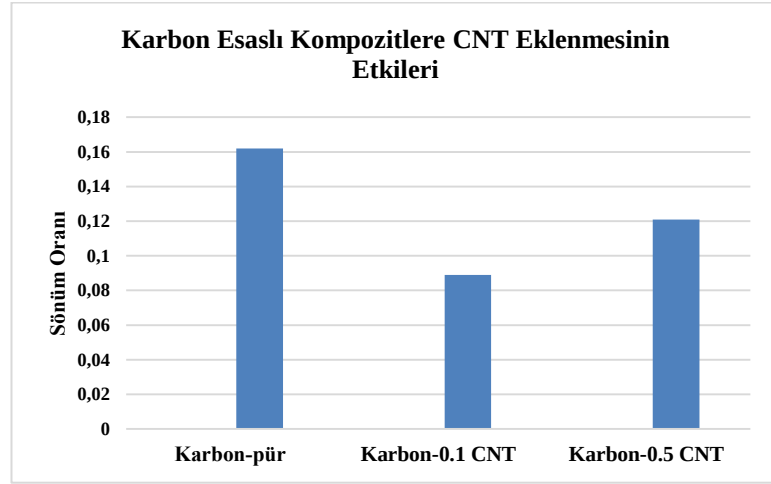
a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün karbon takviyeli klasik kompozitlerin reçinesine eklenme sonucu elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.122'de verilmektedir.



Şekil 4.122. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.122’de görüldüğü gibi karbon elyaf esaslı pür kompozitin elastisite modül değeri 54,84 GPa olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde %24,32 oranında artış meydana gelmekle birlikte, 68,18 GPa değerine yükselmiştir. Bu artış CNT nano partiküllerin yüksek elastisite modülüne sahip olmasından ve kompozitin reçinesine eklenerek reçinenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. CNT oranının kompozit reçinesinde artıp, %0,5 değerine varması ile kompozitin elastisite modülü %27,00’lik bir artış göstererek 86,59 GPa değerine yükselmiştir. Elde edilen sonuçlara göre klasik kompozitlere %0,5 CNT eklenmesi ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde %57,89 oranında bir artış meydana gelmiştir. Reçinesi CNT nano partikül ile takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.123’te verilmiştir.

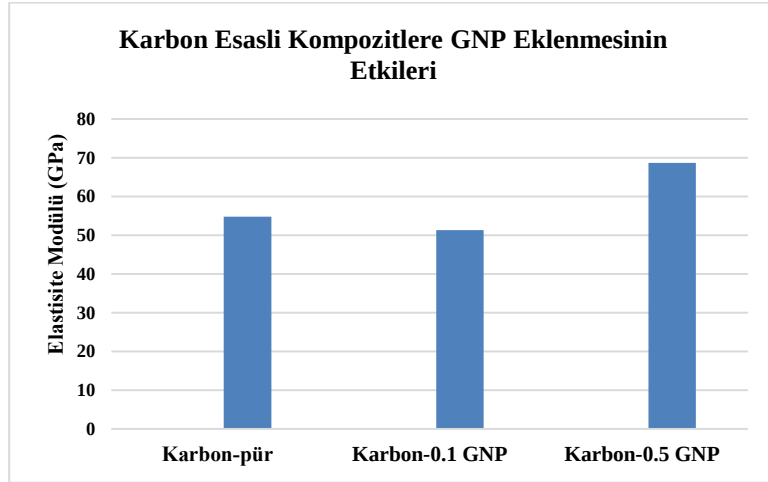


Şekil 4.123. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.123’de verilen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi ile, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %45,06 oranında azalarak 0,089 değerine düşmüştür. Reçineye disperse edilen CNT oranının artıp, %0,5 değerine varması ile kompozitin sönüm oranı %35,96 artarak 0,121 değerine ulaştırmıştır. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranında %25,30 oranında düşmüştür.

b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

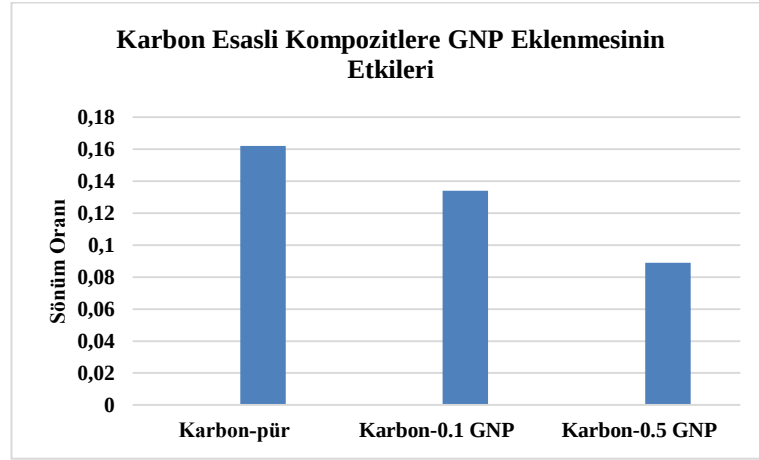
GNP nano partikülün klasik kompozitlerin reçinesine eklenme sonucunda ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitlerin elastisite modülleri Şekil 4.124’de verilmektedir.



Şekil 4.124. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

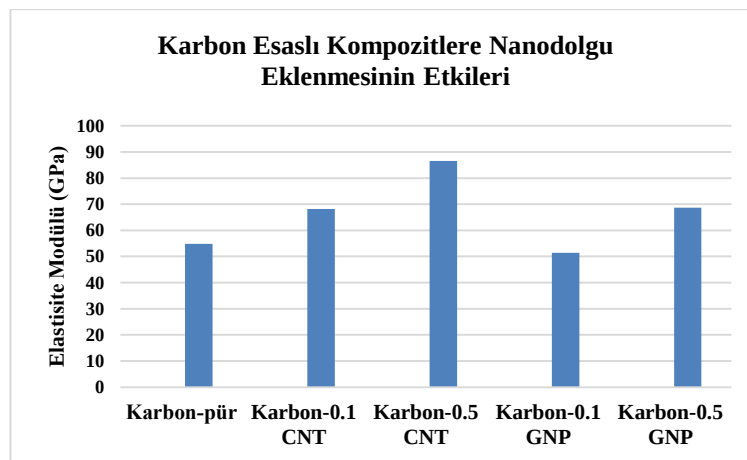
Şekil 4.124'te görüldüğü gibi karbon elyaf esaslı pür kompozitin elastisite modülü 54,84 GPa olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi durumunda kompozitin elastisite modülünde %13,49'luk bir azalma meydana gelmekle birlikte 51,35 GPa değerine yükselmiştir. GNP nano partikül eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde meydana gelen düşüş eklenen GNP oranının kritik hacim V_{cr} oranından küçük olduğundan kaynaklanmaktadır. Eklenen GNP oranının kompozit reçinesinde artıp, %0,5 değerine varması ile kompozitin elastisite modülü %33,88'lik bir artış göstererek 68,7 GPa değerine ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlara göre klasik kompozitlere %0,5 GNP eklenmesi ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde %25,27'lik bir artışın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.125'te verilmiştir.

NOT: Kompozit malzemelerde takviye etkisinin gerçekleşmesi için bulunması gereken minimum bir takviye hacim oranı vardır. Bu oranın altındaki bir takviye fazı oranı ile yapılan takviyelerde takviye fazının malzemenin modülünün artırmasında etkisi olmaz. Dolayısıyla böyle bir takviyenin hiçbir yararı olmayacağı gibi kuvveti aktarmakta olan matris malzemesinde gerilme yığılmasını artırdığından elastisite modülünün düşmesine neden olur.



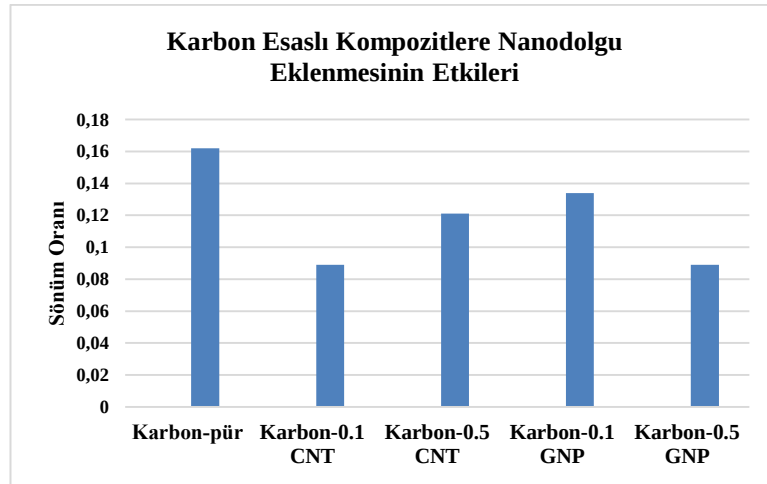
Şekil 4.125. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.125'te verilen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül eklenmesi sonucu, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %17,28 oranında azalarak 0,134 değerine düşmüştür. Reçineye eklenen GNP oranının %0,5 değerine artması ile kompozitin sönüm oranı %33,58 oranında azalarak 0,089 değerine indirgenmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 GNP nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranı %45,06 oranında bir düşüş ortaya çıkmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin karbon esaslı kompozit malzemelerin elastisite modül değerlerinde ortaya çıkardığı etkiler Şekil 4.126'te gösterilmiştir.



Şekil 4.126. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe göre %0,5 CNT partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi pür kompozit malzemesinin elastisite modülünü %57,89 oranında artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesi pür karbon kompozite göre %6,37 oranında daha düşük elastisite modülüne sahip olarak en zayıf performansı sergilemiştir. CNT ve GNP nano partiküllerin karbon esaslı kompozit malzemelerin sönüm oran değerlerinde etkileri Şekil 4.127’de verilmektedir.



Şekil 4.127. Karbon elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe dikkat ederek, %0,1 GNP dolgu malzemesinin kompozitin reçinesine eklenmesi, pür kompozit malzemesinin sönüm oranını %17,81 oranında artırarak en yüksek artış oranına sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesi pür karbon kompozite göre %29,35 oranında düşüş göstererek en zayıf performansa sahip olmuştur.

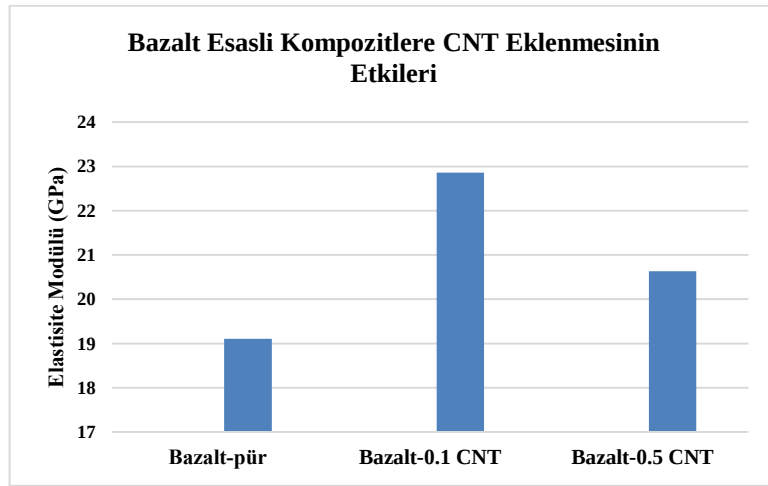
4.11.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler

Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP’den oluşmaktadır. Nano partikül eklenmesinin kompozitin titreşim özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla ASTM D5022 standardına göre titreşim deneyi yapılmıştır. Kompozitlerin titreşim özelliklerini

incelemek için her tür malzemeden üç numune test edilerek malzemelerin doğal frekansı, sönüm oranı ve elastisite modül değerleri bulunmuştur.

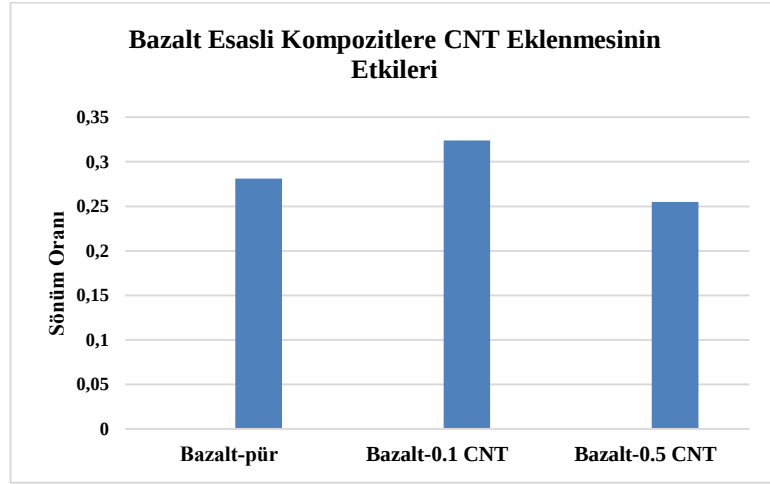
a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

CNT nano partikülün bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.128’de verilmektedir.



Şekil 4.128. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.128’de verilen grafiğe göre, nanodolgu içermeyen bazalt esaslı klasik kompozitin elastisite modülü 19,11 GPa olarak bulunmuştur. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin elastisite modülü %19,62 oranında artarak 22,86 GPa değerine ulaşmaktadır. Reçinede CNT dolgu malzemesinin artıp, %0,5 değerine gelmesi ile birlikte topaklanma olayından dolayı elde edilen kompozitin elastisite modülünde %9,75’lik bir azalma ortaya çıkarak, 20,63 GPa değerine düşmüştür. %0,5 CNT nano dolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %7,95 oranında bir artış ortaya çıkmıştır. Reçinesi CNT nano partikül ile takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.129’da verilmiştir.

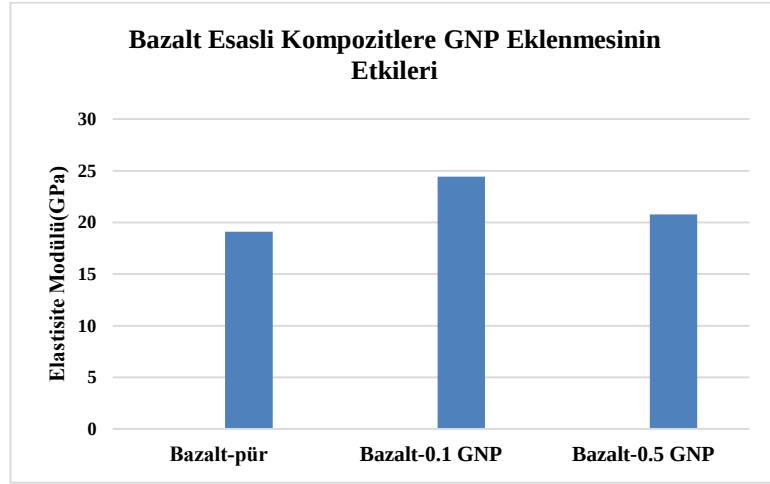


Şekil 4.129. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.129’da verilen değerlere göre, bazalt esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi sonucunda, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %15,30 oranında artarak 0.324 değerine yükselmiştir. Reçineye eklenen CNT oranının %0,5 değerine artması, kompozitin sönüm oranını %21,29 oranında azaltarak 0,255 değerine düşürmüştür. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranı %9,25 oranında bir düşüş ortaya çıkmıştır.

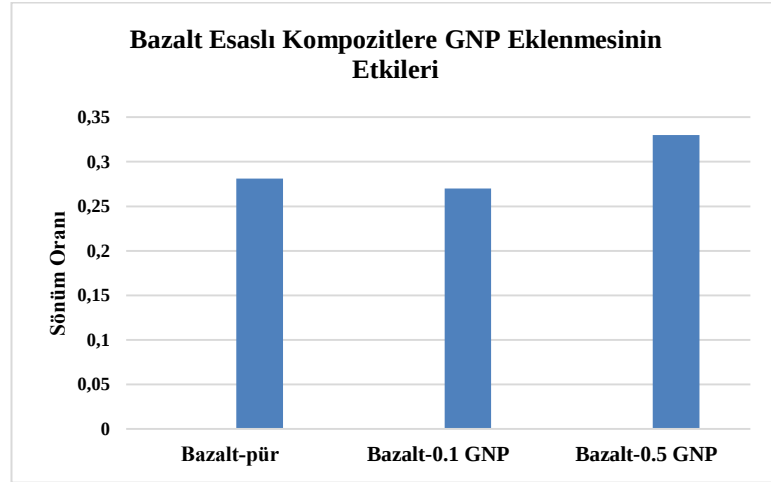
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partiküllerin bazalt esaslı klasik kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitlerin elastisite modül değerleri Şekil 4.130’da verilmektedir.



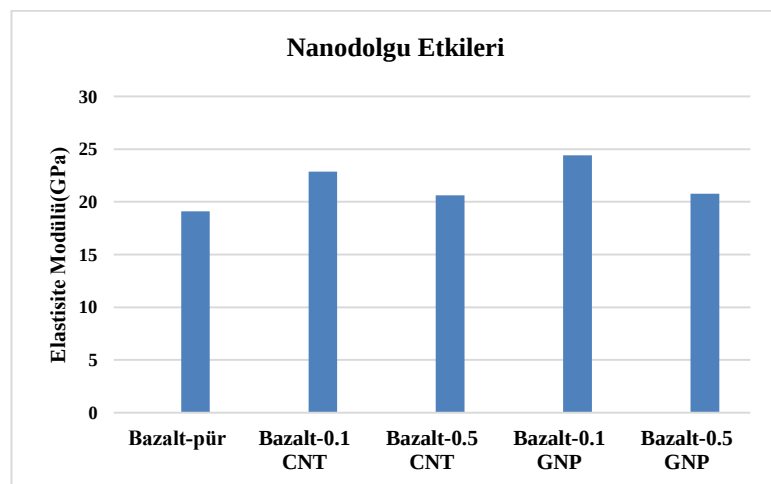
Şekil 4.130. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerin kıyaslanması

Şekil 4.130’da verilen grafiğe göre, bazalt esaslı klasik kompozitin elastisite modülü 19,11 GPa olarak bulunmuştur. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano dolgu malzemesinin eklenmesi ile kompozitin elastisite modülü %27,84 oranında artarak 24,43 GPa değerine yükseltmiştir. Reçinede GNP dolgu malzemesinin artıp, %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülünde %14,94’lük bir azalmayla birlikte, 20,78 GPa değerine düşmüştür. Bu durum dolgu malzemesinin hacim oranının artması ile topaklanma olayının ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır. %0,5 GNP nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %8,74’lük bir artış ortaya çıkmıştır. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.131’da verilmiştir.



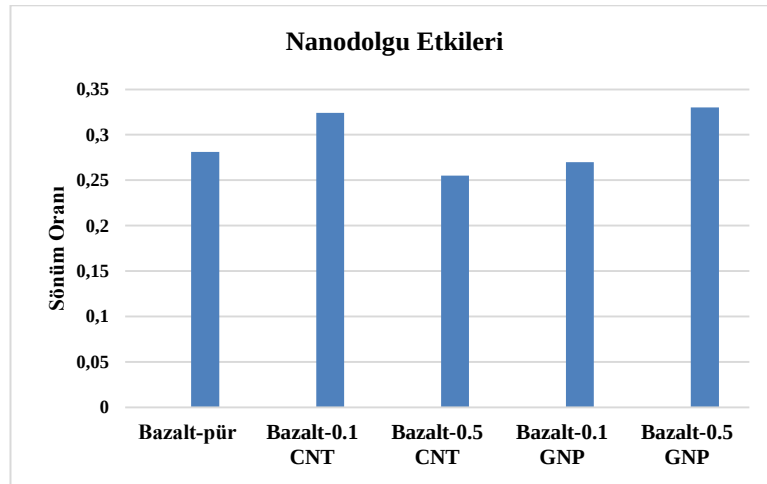
Şekil 4.131. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.131’de verilen değerlere göre, bazalt esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenmesi sonucu, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %3,91 oranında azalarak 0,27 değerine düşmüştür. Reçineye eklenen CNT oranının %0,5 değerine artması ile kompozitin sönüm oranında %22,22 oranında artırarak 0,33 değerine yükseltmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranı %17,44 oranında bir artış ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.132. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modüllerinin kıyaslanması

CNT ve GNP nano partiküller ve ağırlık oranlarının kompozitin elastisite modülüne etkileri Şekil 4.132’de verilmektedir. Bu grafiğe göre %0,1 oranında GNP partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi pür kompozit malzemesinin elastisite modülüne %27,84 oranında artırarak en iyi performansa sahip olmuştur. Bu arada matrisi %0,5 CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin elastisite modülü pür karbon kompozite göre %7,95 oranında artış göstererek en zayıf performansı sağlamıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt esaslı kompozit malzemelerin sönüm oran değerlerinde etkileri Şekil 4.133’de verilmiştir.



Şekil 4.133. Bazalt elyaf esaslı pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe göre %0,5 oranında GNP nano taneciklerin kompozitin reçinesine eklenmesi ile pür kompozit malzemesinin sönüm oranını %17,44 oranında artırarak en iyi performansı sağlamışlardır. Bu arada matrisi %0,5 CNT içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin sönüm oranı pür bazalt kompozite göre %9,25 oranında düşürerek en zayıf performansı sergilemiştir.

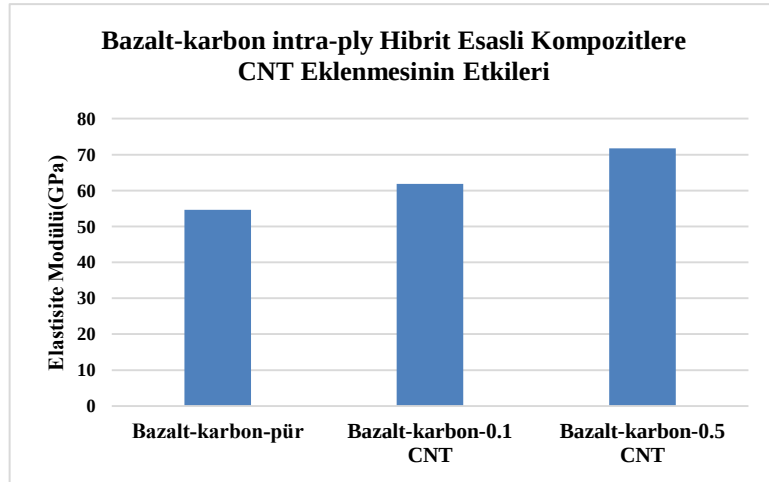
4.11.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli intra-ply hibrit kompozitler

Bu kategoride bulunan malzemelerin nano takviye fazları farklı olup, %0,1 CNT, %0,5 CNT, %0,1 GNP ve %0,5 GNP’den oluşmaktadır. Nano partikül eklenmesinin

kompozitin titreşim özelliklerinde etkilerini incelemek amacıyla ASTM D5022 standardına tabi titreşim deneyi yapılmıştır. Kompozitlerin titreşim özelliklerini incelemek için her tür malzemeden üç numune test edilip, malzemelerin doğal frekans, sönüm oranı ve elastisite modül değerleri bulunmuştur.

a. CNT Nano Partikül Eklenmesi

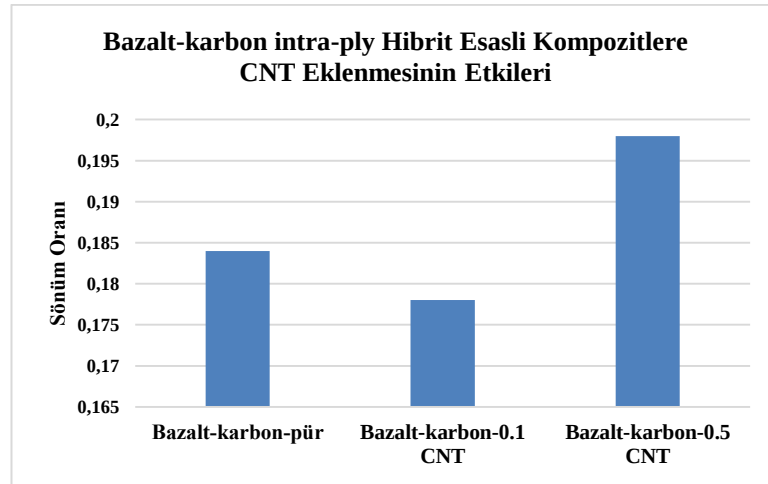
CNT nano partikülün bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.134’de verilmektedir.



Şekil 4.134. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.134’te verilen grafiğe göre, nanodolgu içermeyen bazalt-karbon hibrit kompozitin elastisite modül değeri 54,60 GPa olarak elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül malzemesi eklenerek kompozitin elastisite modülü %13,24 oranında artmakla birlikte 61,83 GPa değerine yükselmiştir. Reçinede nano takviye fazının artması ve %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülünde %16,01’lik bir artış ortaya çıkarak, 71,73 GPa değerine ulaşır. %0,5 CNT nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %31,37 oranında artış ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, CNT nanopartiküllerin bazalt-karbon esaslı

kompozitlerin reçinesine eklenmesi ve oranının artması ile elde edilen çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde uniform bir artış meydana gelmiştir. Bu artışlar yüksek elastisite modülüne sahip olan CNT nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenmesi ile bu malzemenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Reçinesi CNT nano partikülle takviye edilmiş karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oranı Şekil 4.135'te verilmektedir.

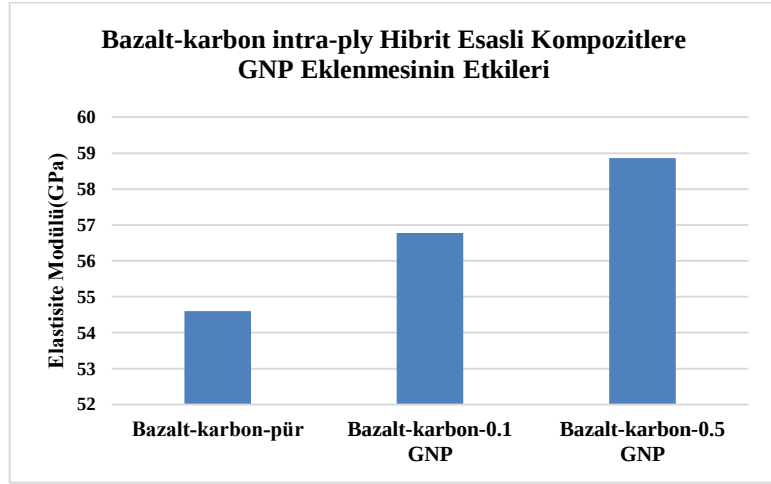


Şekil 4.135. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli CNT dolgulu sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.135'te verilen değerlere göre, bazalt-karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 CNT nano partikül eklenme sonucunda, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %3,26 oranında azalarak 0,178 değerine düşmüştür. Reçineye eklenen CNT oranının %0,5 değerine artması kompozitin sönüm oranını %11,24 oranında artarak 0,198 değerine yükselmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranı %7,61 oranında bir artış ortaya çıkmıştır.

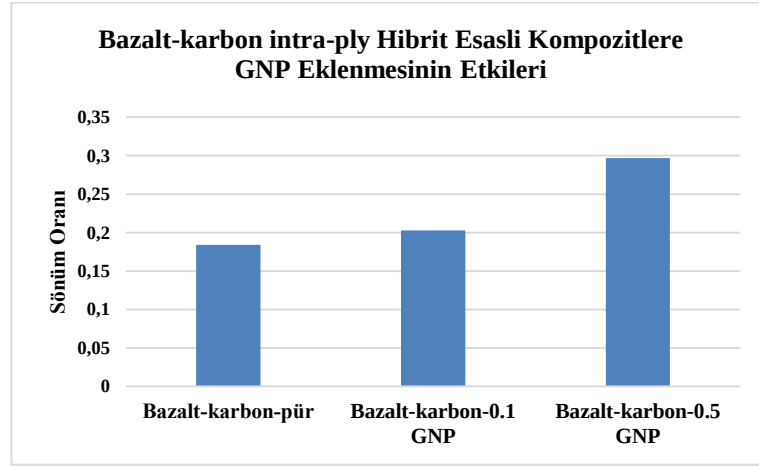
b. GNP Nano Partikül Eklenmesi

GNP nano partikülün bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitlerin reçinesine eklenmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modül değerleri Şekil 4.136'de verilmektedir.



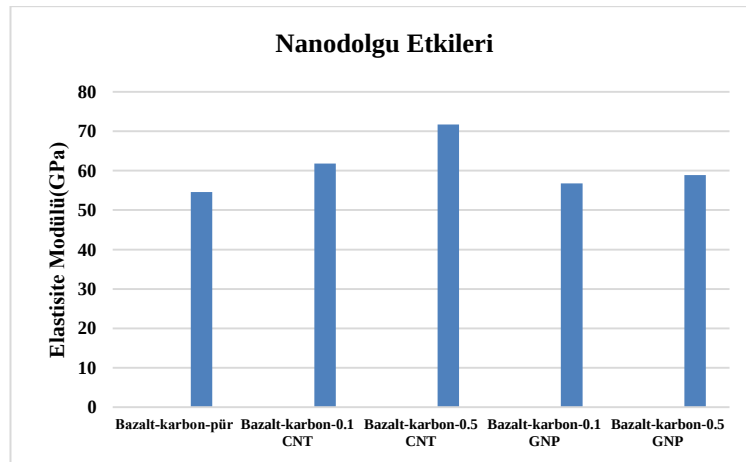
Şekil 4.136. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.136’de verilen grafiğe bakıldığında, pür bazalt-karbon hibrit kompozitin elastisite modülü 54,60 GPa olarak elde edilmiştir. Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül malzemesi eklenerek kompozitin elastisite modülü %3,99 oranında artarak 56,78 GPa değerine yükselmiştir. Reçinede nano takviye fazının artıp, %0,5 değerine gelmesi ile elde edilen kompozitin elastisite modülünde %3,66’lık bir artış ortaya çıkarak, 58,86 GPa değerine ulaşmıştır. %0,5 GNP nanodolgunun, kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin elastisite modülünde toplam %7,80 oranında artış ortaya çıkmıştır. Sonuçlara göre, GNP nanopartiküllerin bazalt-karbon esaslı kompozitlerin reçinesine eklenmesi ve oranının artması ile elde edilen çok-ölçekli kompozitin elastisite modülünde uniform bir artış meydana gelmiştir. Bu artışların nedeni yüksek elastisite modülüne sahip, GNP nano dolgunun kompozitin reçinesine eklenmesi ile bu malzemenin elastisite modülünü artırmasından kaynaklanmaktadır. Reçinesi GNP nano partikülle takviye edilmiş bazalt-karbon esaslı çok-ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerleri Şekil 4.137’de verilmektedir.



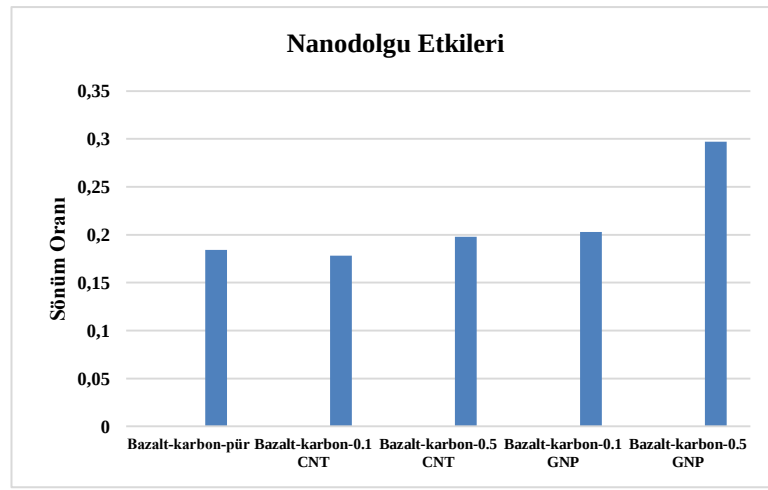
Şekil 4.137. Bazalt-karbon intra-ply hibrit pür ve çok ölçekli GNP dolgulu kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 4.137’de verilen değerlere göre, bazalt-karbon esaslı klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül eklenme sonucunda, elde edilen çok-ölçekli kompozitin sönüm oranı %10,33 oranında artarak 0,203 değerine ulaşmıştır. Reçineye eklenen GNP oranının %0,5 değerine artması kompozitin sönüm oranını %46,30 oranında artırarak 0,297 değerine yükselmiştir. Böylece klasik kompozitin reçinesine %0,5 CNT nano partikül eklenmesi ile kompozitin sönüm oranında %46,30’luk bir artış ortaya çıkmıştır. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt-karbon hibrit takviyeli kompozitlerin elastisite modülünde ortaya çıkardığı etkiler Şekil 4.138’de verilmektedir.



Şekil 4.138. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe göre %0,5 oranında CNT partiküllerin pür kompozit malzemesinin reçinesine eklenmesi kompozitin elastisite modülünü %31,37 oranında artırarak en iyi performansı sağlamıştır. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin elastisite modülü pür karbon kompozite göre %3,99 oranında artış göstererek en düşük performansı sergilemiştir. CNT ve GNP nano partiküllerin bazalt esaslı kompozit malzemelerin sönüm oran değerlerinde etkileri Şekil 4.139'da verilmiştir.



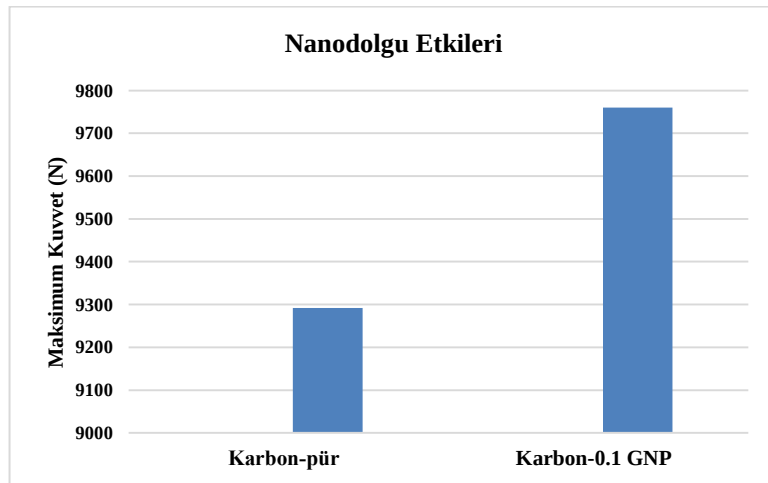
Şekil 4.139. Bazalt-karbon hibrit takviyeli pür ve çok ölçekli kompozitlerin sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Bu grafiğe bakıldığında %0,5 oranında GNP partiküllerin pür kompozit malzemesinin reçinesine eklenmesi kompozitin sönüm oranında %61,41 oranında artırarak en iyi performansı sergilemiştir. Bu arada matrisi %0,1 GNP içeren çok-ölçekli kompozit malzemesinin elastisite modülü pür karbon kompozite göre %3,26 oranında düşüş göstererek en düşük performansa sahip olmuştur.

4.12. Kompozitin Reçinesine Nanodolgu Malzemesi Eklenmesinin Bu Malzemelerin Darbe Davranışlarında Etkileri

4.12.1. Karbon elyaf takviyeli kompozitler

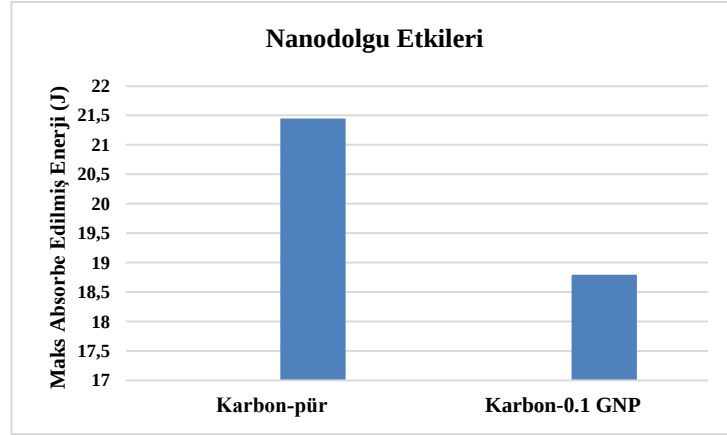
Bu kategoride yer alan kompozit malzemelerin takviye fazı karbon elyafından oluşmaktadır. Nano dolgu malzeme eklenmesinin malzemenin darbe davranışında etkilerini incelemek amacıyla kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmiştir. Bu malzemelerin darbe deneyleri ASTM D7136 standardına göre ve 80 j vurucu enerjisi ile yapılmıştır. Şekil 4.140’de karbon-pür ve karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerinin darbe sonucu yapılarında ortaya çıkan maksimum kuvvet değerleri kıyaslanmaktadır.



Şekil 4.140. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinde etkileri

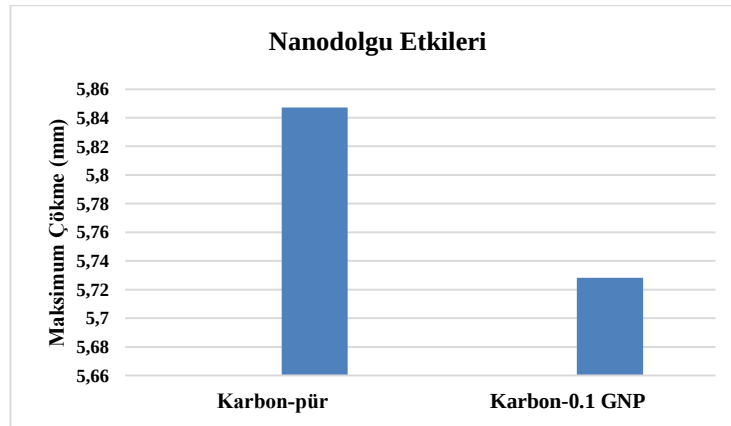
Şekil 4.140’de görülen değerlere göre, karbon elyaf esaslı pür kompozitin darbe sonucu yapısında ortaya çıkan maksimum kuvvet değeri 9,291 kN olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum kuvvet değerinde %5,06 oranında artış meydana gelerek 9,76 kN değerine yükselmiştir. Bu artış GNP nano partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin tokluğu ve mukavemetini artırmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.141’de karbon-pür ve karbon-

0,1 GNP kompozit malzemelerinin darbe sonucu absorbe edilmiş maksimum enerji değerleri kıyaslanmıştır.



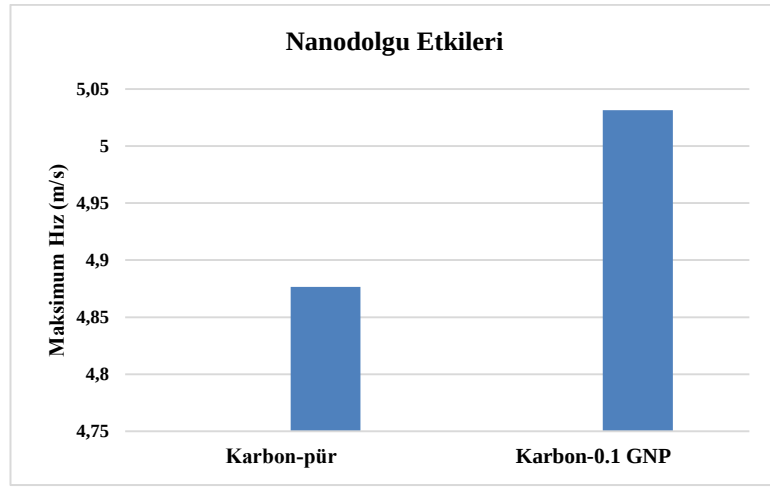
Şekil 4.141. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinde etkileri

Şekil 4.141’de görülen değerlere göre, karbon elyaf esaslı pür kompozitin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değeri 21,45 J olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum absorbe edilmiş enerji değerinde %12,35 oranında azalma meydana gelerek 18,79 J değerine düşmüştür. Şekil 4.142’de karbon-pür ve karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe sonucu yapılarında ortaya çıkan maksimum çökme değerleri kıyaslanmıştır.



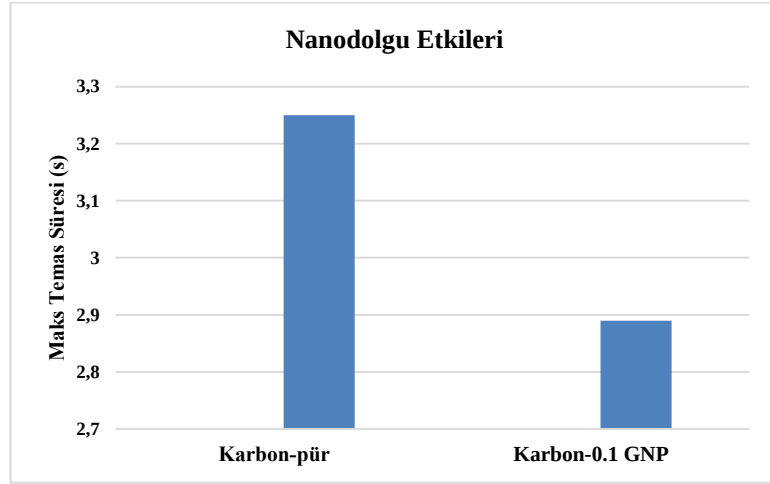
Şekil 4.142. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinde etkileri

Şekil 4.142’de görülen değerlere göre, karbon elyaf esaslı pür kompozitin maksimum çökme değeri ortalama 5,85 mm olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum çökme değerinde %2,05 oranında düşüş meydana gelerek 5,73 mm olmuştur. Şekil 4.143’te karbon-pür ve karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe sonucu vurucunun maksimum hız değerleri kıyaslanmıştır.



Şekil 4.143. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu vurucunun maksimum hız değerlerinde etkileri

Şekil 4.143’te verilen değerlere göre, karbon esaslı klasik kompozitin darbe sonunda vurucu hızı 4,87 m/s olarak ölçülmüştür. Bu tür kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül eklenmesi ile, elde edilen çok-ölçekli kompozitin darbe sonucu vurucu hızı %3,28 oranında artarak 5,03 m/s değerine yükselmiştir. Şekil 4.144’te karbon-pür ve karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe deneyinde maksimum temas süreleri kıyaslanmıştır.

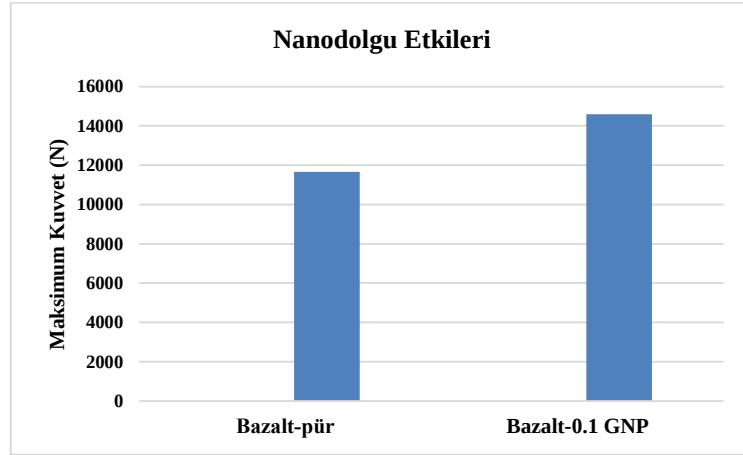


Şekil 4.144. Nano dolgu eklenmesinin darbe deneyinde maksimum temas süresine etkileri

Şekil 4.144'te görüldüğü gibi, karbon elyaf esaslı pür kompozitin darbe deneyinde maksimum temas süresi 3,25s olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum süresi %11,08 oranında azalarak 2,89s değerine düşmüştür.

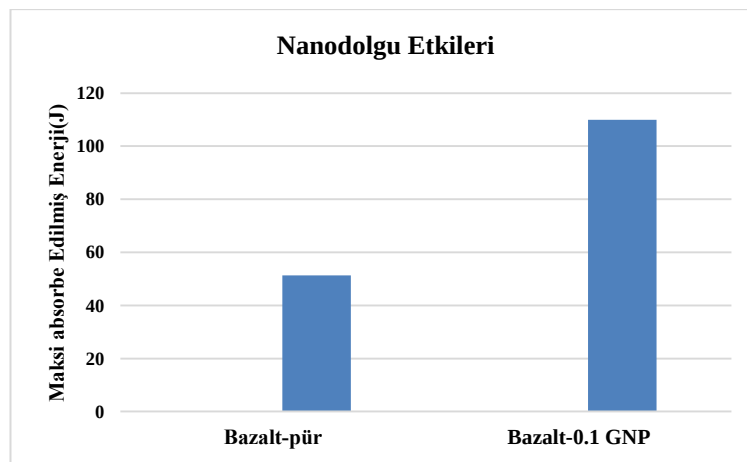
4.12.2. Bazalt elyaf takviyeli kompozitler

Bu kategoride yer alan kompozit malzemelerin takviye fazı bazalt elyafından oluşmaktadır. Nano dolgu malzeme eklenmesinin malzemenin darbe davranışında etkilerini incelemek amacıyla kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmiştir. Bu malzemelerin darbe deneyleri ASTM standardına göre ve 120 j vurucu enerjisi ile yapılmıştır. Şekil 4.145'te bazalt-pür ve bazalt-0,1 GNP kompozit malzemelerinin darbe sonucu yapılarında ortaya çıkan maksimum kuvvet değerleri kıyaslanmaktadır.



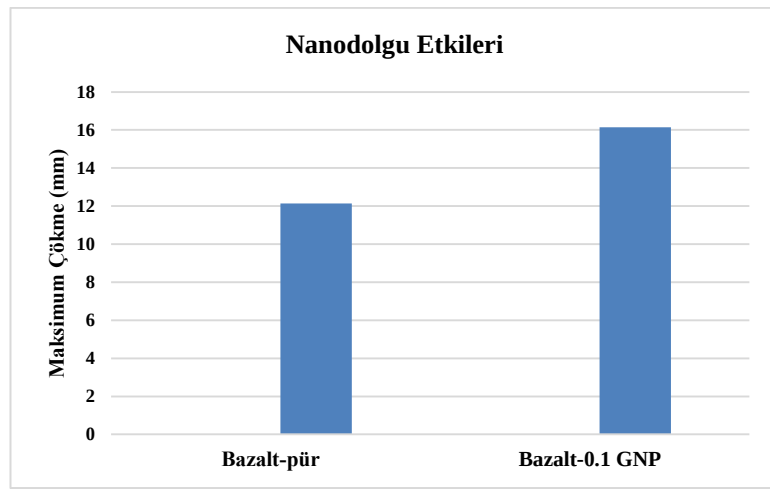
Şekil 4.145. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinde etkileri

Şekil 4.145’de görülen değerlere göre, bazalt elyaf esaslı pür kompozitin darbe sonucu yapısında ortaya çıkan maksimum kuvvet değeri 11,66 kN olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum kuvvet değerinde %25,21 oranında artış meydana gelerek 14,60 kN değerine yükselmiştir. Bu artış GNP nano partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin tokluğu ve mukavemetini artırmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 8’de bazalt-pür ve bazalt-0,1 GNP kompozit malzemelerinin darbe sonucu absorbe edilmiş maksimum enerji değerleri kıyaslanmıştır.



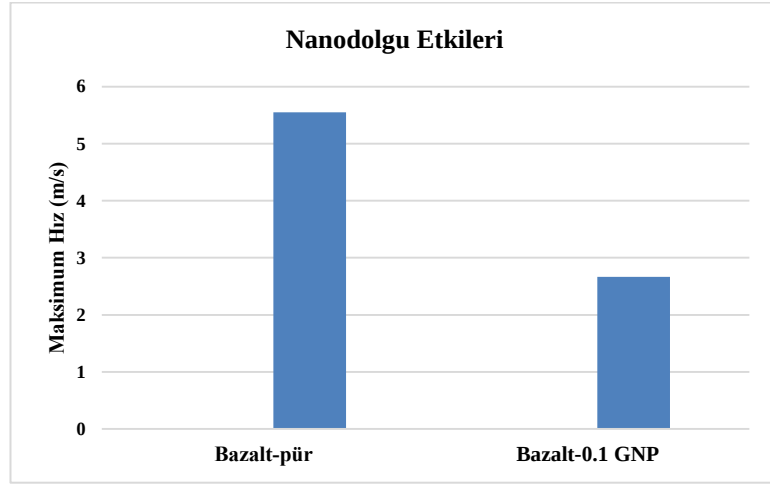
Şekil 4.146. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinde etkileri

Şekil 4.146’de görülen değerlere göre, bazalt elyaf esaslı pür kompozitin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değeri 51,37 J olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum absorbe edilmiş enerji değerinde %114 oranında artış meydana gelerek 109,88 J değerine yükselmiştir. Şekil 4.147’de bazalt-pür ve bazalt-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe sonucu yapılarında ortaya çıkan maksimum çökme değerleri kıyaslanmıştır.



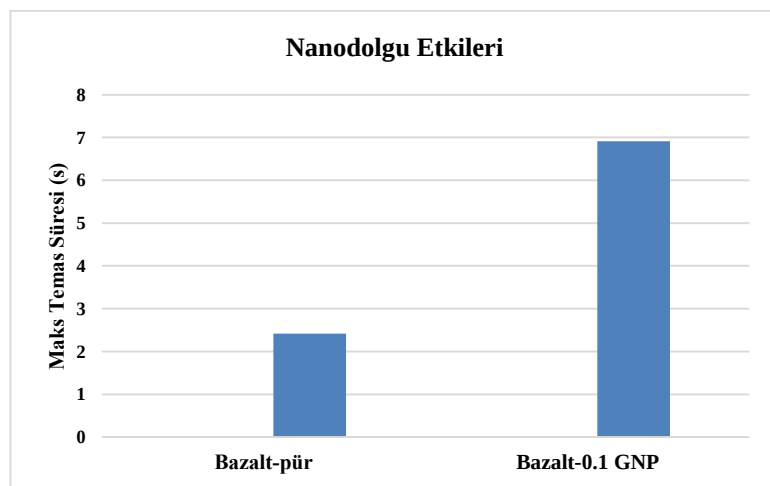
Şekil 4.147. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinde etkileri

Şekil 4.147’de görülen değerlere göre, bazalt elyaf esaslı pür kompozitin maksimum çökme değeri ortalama 12,13 mm olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum çökme değerinde %33,1 oranında artış meydana gelerek 16,14 mm olmuştur. Şekil 4.148’de bazalt-pür ve bazalt-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe sonucu vurucunun maksimum hız değerleri kıyaslanmıştır.



Şekil 4.148. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu vurucunun maksimum hız değerlerinde etkileri

Şekil 4.148’da verilen değerlere göre, bazalt esaslı klasik kompozitin darbe sonunda vurucu hızı 5,55 m/s olarak ölçülmüştür. Bu tür kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül eklenmesi ile, elde edilen çok-ölçekli kompozitin darbe sonucu vurucu hızı %3,28 oranında azaltarak 2,67 m/s değerine düşmüştür. Şekil 4.149’da bazalt-pür ve bazalt-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe deneyinde maksimum temas süreleri kıyaslanmıştır.

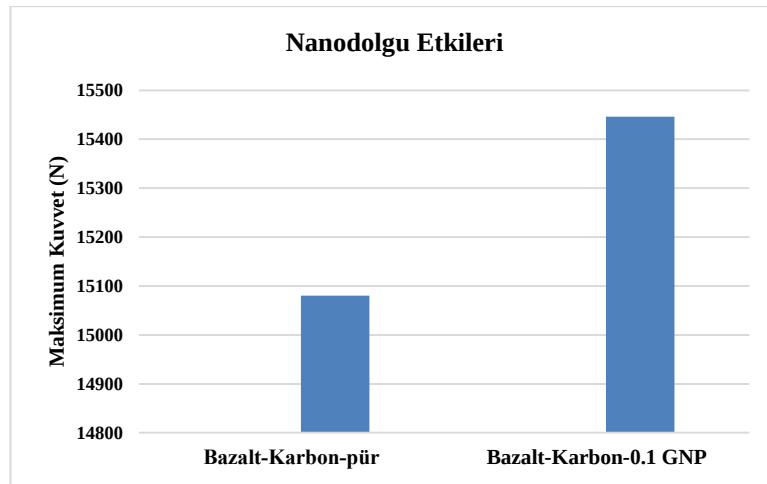


Şekil 4.149. Nano dolgu eklenmesinin darbe deneyinde maksimum temas süresine etkileri

Şekil 4.149’da görüldüğü gibi, bazalt elyaf esaslı pür kompozitin darbe deneyinde maksimum temas süresi 2,42s olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum süresi %185,53 oranında artarak 6,91s değerine yükselmiştir.

4.12.3. Bazalt-karbon elyaf takviyeli hibrit kompozitler

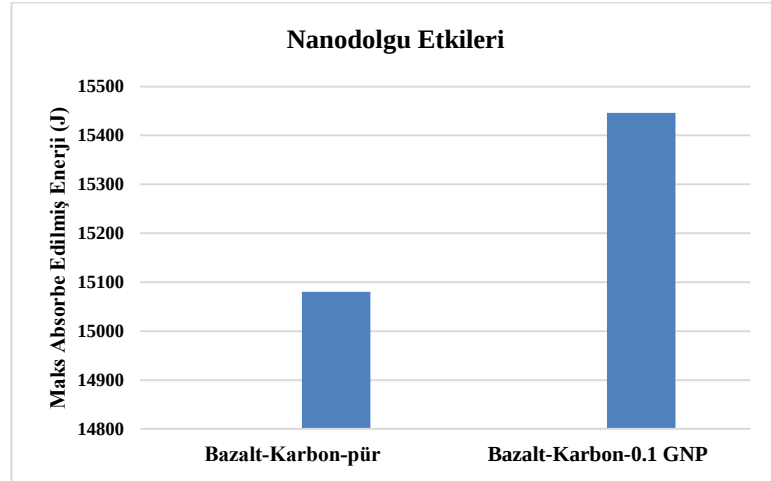
Bu kategoride yer alan kompozit malzemelerin takviye fazı bazalt-karbon elyafının intra-ply hibritleşmesinden oluşmaktadır. Nano dolgu malzeme eklenmesinin malzemenin darbe davranışında etkilerini incelemek amacıyla kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmiştir. Bu malzemelerin darbe deneyleri ASTM standardına göre ve 200 j vurucu enerjisi ile yapılmıştır. Şekil 4.150’de bazalt-karbon-pür ve bazalt-karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerinin darbe sonucu yapılarında ortaya çıkan maksimum kuvvet değerleri kıyaslanmaktadır.



Şekil 4.150. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum kuvvet değerlerinde etkileri

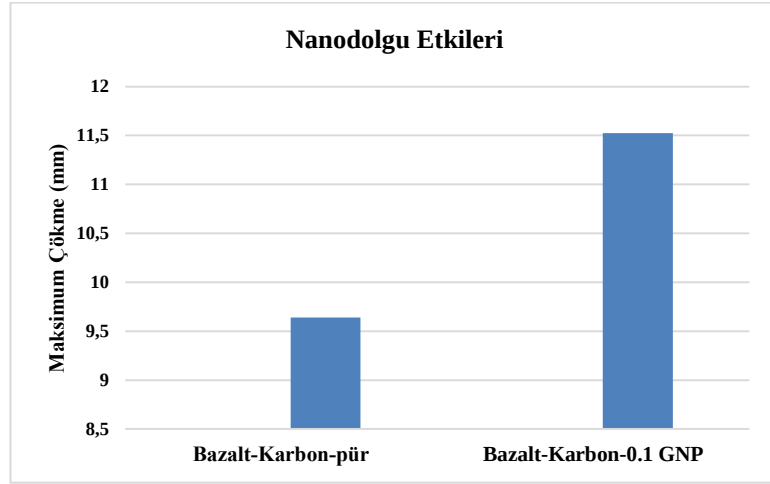
Şekil 4.150’de görülen değerlere göre, bazalt-karbon elyaf esaslı pür kompozitin darbe sonucu yapısında ortaya çıkan maksimum kuvvet değeri 15,1 kN olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum kuvvet değerinde %2,32 oranında artış meydana gelerek 15,45 kN değerine yükselmiştir. Bu

artış GNP nano partiküllerin kompozitin reçinesine eklenmesi ile kompozitin tokluğu ve mukavemetini artırmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.151’de bazalt-karbon-pür ve bazalt-karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerinin darbe sonucu absorbe edilmiş maksimum enerji değerleri kıyaslanmıştır.



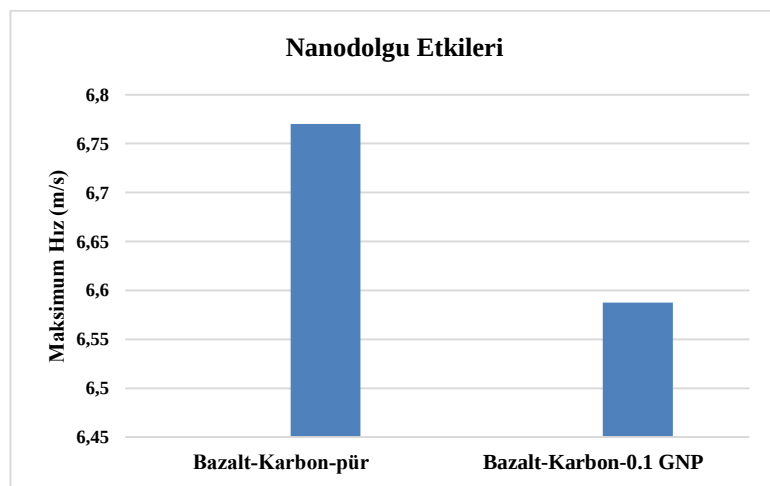
Şekil 4.151. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değerlerinde etkileri

Şekil 4.151’de görülen değerlere göre, bazalt-karbon elyaf esaslı pür kompozitin darbe sonucu maksimum absorbe edilmiş enerji değeri 15,08 J olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum absorbe edilmiş enerji değerinde %2,45 oranında artış meydana gelerek 15,45 J değerine yükselmiştir. Şekil 4.152’de bazalt-karbon-pür ve bazalt-karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe sonucu yapılarında ortaya çıkan maksimum çökme değerleri kıyaslanmıştır.



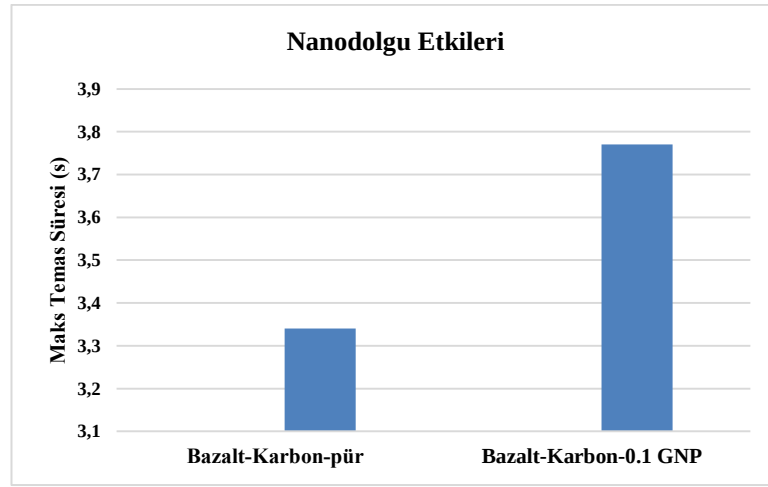
Şekil 4.152. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu maksimum çökme değerlerinde etkileri

Şekil 4.152’de görülen değerlere göre, bazalt-karbon elyaf esaslı pür kompozitin maksimum çökme değeri ortalama 9,64 mm olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum çökme değerinde %19,5 oranında artış meydana gelerek 11,52 mm yükselmiştir. Şekil 4.153’te bazalt-karbon-pür ve bazalt-karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe sonucu vurucunun maksimum hız değerleri kıyaslanmıştır.



Şekil 4.153. Nano dolgu eklenmesinin darbe sonucu vurucunun maksimum hız değerlerinde etkileri

Şekil 4.153'te verilen değerlere göre, bazalt-karbon esaslı klasik kompozitin darbe sonunda vurucu hızı 6,77 m/s olarak ölçülmüştür. Bu tür kompozitin reçinesine %0,1 GNP nano partikül eklenmesi ile, elde edilen çok-ölçekli kompozitin darbe sonucu vurucu hızı %2,81 oranında azalarak 6,59 m/s değerine düşmüştür. Şekil 4.154'te karbon-pür ve karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe deneyinde maksimum temas süreleri kıyaslanmıştır.



Şekil 4.154. Nano dolgu eklenmesinin darbe deneyinde maksimum temas süresine etkileri

Şekil 4.154'de görüldüğü gibi, karbon elyaf esaslı pür kompozitin darbe deneyinde maksimum temas süresi 3,34s olarak bulunmuştur. Klasik kompozitin reçinesine %0,1 GNP eklenmesi ile kompozitin maksimum süresi %12,87 oranında artarak 3,77s değerine yükselmiştir.

4.13. Termal Yorulma Olayının Kompozitlerin Çekme Özelliklerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler

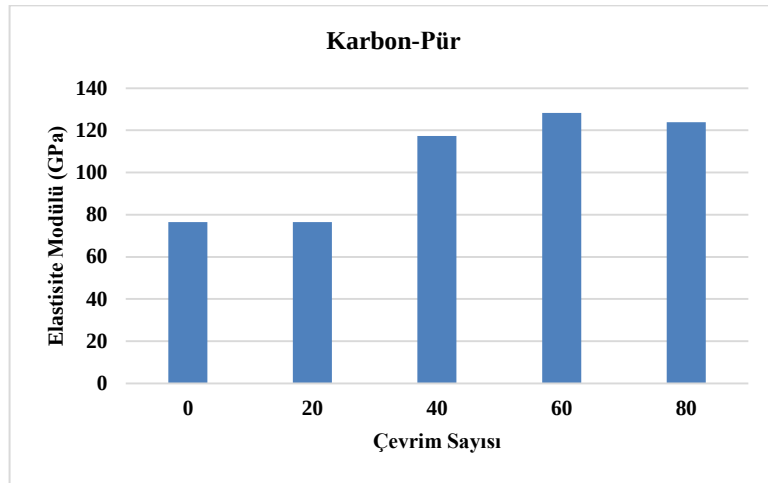
4.13.1. Karbon pür

Karbon pür numuneleri 250 mm uzunluk, 25mm genişlik ve 2,5 mm'lik kalınlıkta olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin çekme özelliklerinde termal

çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin elastisite modülü (Tensile Modulus) ve çekme mukavemeti (Tensile Strength) ASTM D3039 standardı kullanılarak bulunmuştur.

a. Elastisite Modülü

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon pür numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.155'te verilen grafikte gösterilmiştir.



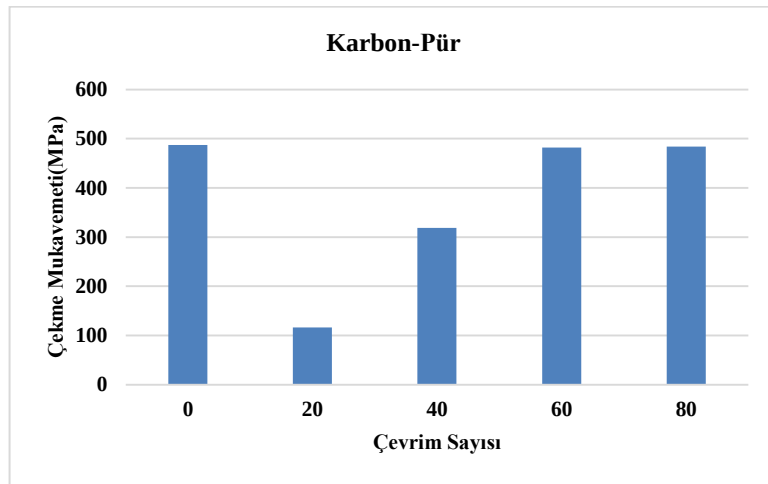
Şekil 4.155. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

Deney sonuçlarına göre, karbon pür numunelerinin elastisite modülü oda sıcaklığında ortalama 76,34 GPa olarak bulunmuştur. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldıktan sonra elyaf malzemesi ile matris malzemesinin termal genleşme katsayısının (CTE) değerlerinde bulunduğu farktan dolayı ve böylece değişik sıcaklıklarda kompozit bileşenlerinin şekil değiştirme oranlarının farklı olması neticesinde (epoksi sıcaklık etkisi ile genişip ve karbon elyafı büzülür) kompozit arayüzey bölgesinde artık gerilmeler ortaya çıkarak elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışma meydana gelir ve böylece malzemenin elastisite modülünde %0,027'lik bir

düşüş ortaya çıkarak bu değer 76,41 GPa olur. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile malzemenin düşük sıcaklıklardan dolayı yapısında büzülme olayı ortaya çıkıp, arayüzey bölgesinde meydana gelen ayrışmaları kapatarak %85,09'luk bir artış ortaya çıkarak elastisite modülü 117,40 GPa değerine yükselmiştir. Çevrimlerin devam etmesi ile 60 çevrimde malzemenin elastisite modülü, post kürleşme olayından dolayı %9,25 oranında artarak 128,26 GPa değerine yükselmiştir. Çevrimlerin artması ve 80 değerine varması ile yüksek sıcaklıktan dolayı malzeme yapısında termal gerilmeler artar ve böylece elastisite modülü %3,48 oranında azalarak 123,79 GPa değerine düşmüş olur. Elastisite modülünün grafiğine bakıldığında -40 ile +120°C aralığında 80 çevrim neticesinde malzemenin elastisite modülü %62 oranında azalmıştır.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon pür numunelerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.156'de bulunan diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.156. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

Yapılan çekme deney sonuçlarına göre, karbon pür numunelerinin çekme mukavemet değerlerinin oda sıcaklığında ortalaması 487,15 MPa olarak elde edilmiştir. Bu tür

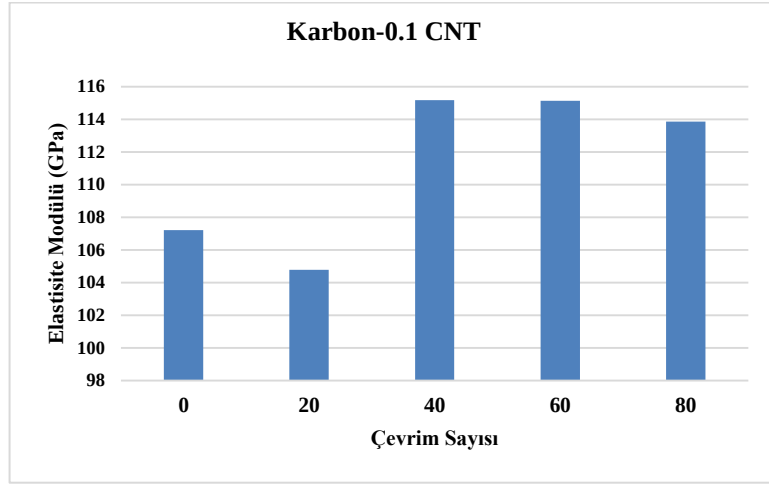
malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakılarak karbon elyaf ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozit arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler ortaya çıkar. Artık gerilmeler arayüzey bölgesinde mikro çatlakların oluşmasına neden olur. Çevrimlerin devam etmesi ile mikro çatlakların sayısı artıp, birleşmeleri ile arayüzey bölgesinde delaminasyon olayı ortaya çıkar ve böylece malzemenin çekme mukavemeti %76,18 azalmayla birlikte 116 MPa değerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ile yüksek sıcaklıklardan dolayı malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve çekme mukavemeti artmaya başlar. Çevrim sayısının 40 âdete varmasıyla malzemenin çekme mukavemeti %174,66 oranında artarak 318,6 MPa değerine yükselmiş olur. Çevrimlerin devam etmesi ile post kürleşme olayı devam edip, malzemenin çekme mukavemeti 60 ve 80 çevrime gelmesi ile sırasıyla 482 ve 484 MPa değerlerine yükselir. Böylece 80 çevrimin sonunda malzemenin çekme mukavemetinde %0,65 oranında düşüş meydana gelir.

4.13.2. Karbon - 0,1 CNT

Termal çevrimden dolayı karbon-0,1 CNT çekme özelliklerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra numunelerin çekme özellikleri, D3039 ASTM standardına tabi çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elastisite Modülü

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz kalmış karbon-0,1 CNT numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.157’de verilen grafikte gösterilmiştir.

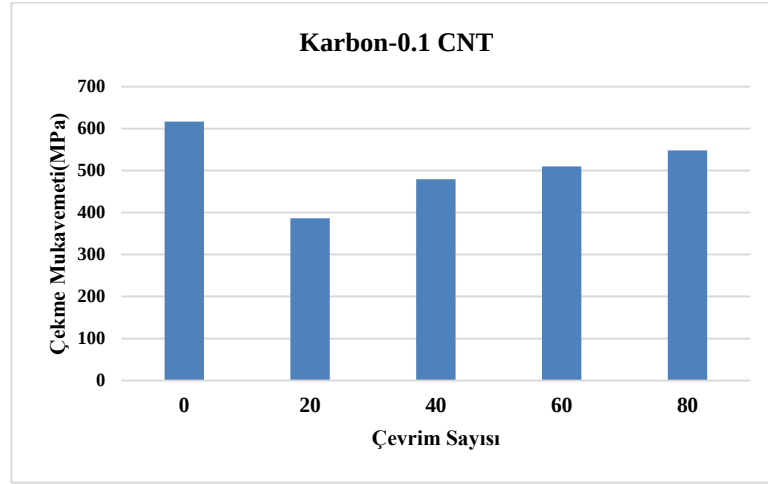


Şekil 4.157. Karbon-0.1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

ASTM D 3039 standardına tabii çekme deney sonuçlarına göre, karbon-0,1 CNT numunelerinin elastisite modülü oda sıcaklığında ortalama 107,20 GPa olarak belirlenmiştir. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime tabii tutulduğunda elyaf malzemesi ile nano dolgulu matris malzemesinin CTE değerlerinin farklı olmasından dolayı kompozit arayüzeyinde artık gerilmeler oluşur ve elyaf ile matris malzemesi arasındaki çapraz bağlarının kırılmasından dolayı kompozitin elastisite modülünde %2,27'lik bir azalma ortaya çıkarak bu değer 104,77 GPa değerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile yüksek sıcaklıklardan dolayı malzeme yapısında gevrekleşme olayı ortaya çıkar ve kompozitin elastisite modülünü %9,02 oranında artırarak 115,14 GPa değerine ulaştırır. Elastisite modülünün grafiğine bakıldığında -40 ile +120°C aralığında 80 çevrim neticesinde malzemenin bu özelliğinde %6,19 oranında bir artışın ortaya çıktığı gözlenmiş olur.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,1 CNT numunelerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.158'de bulunan grafikte verilmiştir:



Şekil 4.158. Karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

Çekme deney sonuçlarına göre, karbon-0,1 CNT malzemesinin oda sıcaklığında çekme mukavemet değerlerinin ortalama 616,65 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında karbon takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde temasta bulunan bileşenlerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu gerilmeler matris ile elyaf arasındaki çapraz bağların kırılmasına neden olmuştur. Çapraz bağ sayılarının azalması sonucunda elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışma ortaya çıkarak malzemenin çekme mukavemeti %36,82 oranında azalarak 386,6 MPa değerine düşmüştür. Çevrimin devam etmesi ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelerek çekme mukavemeti %23,98 oranında artıp, 479,3 MPa değerine ulaşmıştır. Çevrimlerin devam etmesi ve post kürleşme olayının şiddetlenmesi ile malzemenin çekme mukavemeti %6,44' lük bir artış göstererek 510,15 MPa değerine yükselmiştir. Çevrimlerin devam etmesi ile post kürleşme olayı devam eder ve 80 çevrim sonunda kompozitin mukavemeti %7,33 oranında artarak 547,55 MPa değerine ulaşır. Elde edilen sonuçlara göre karbon-0,1 CNT malzemesinin 80 çevrim esnasında çekme mukavemetinde %11,21 oranında düşüş meydana gelmiştir. Bu durum yüksek sıcaklıklarda CNT taneciklerle epoksinin CTE

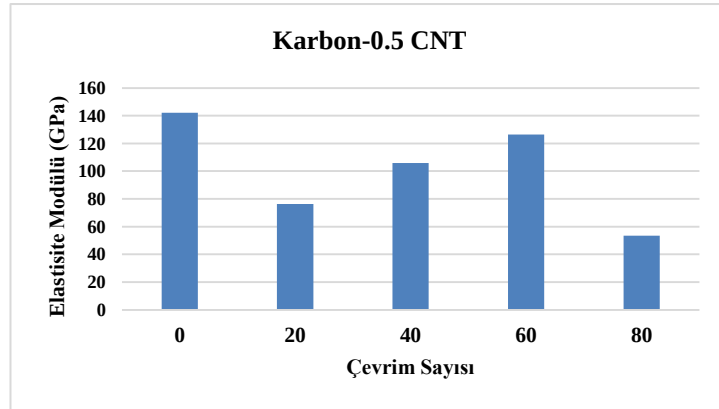
değerlerinin yüksek oranda farkından ve böylece bu bölgelerde takviye fazının reçineden ayrışmasından kaynaklanmaktadır.

4.13.3. Karbon - 0,5 CNT

Termal çevrimden dolayı karbon –0,5 CNT kompozitinin çekme özelliklerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra numunelerin çekme özellikleri, ASTM D3039 standardına tabi olan çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elstisite modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 CNT numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.159’da verilen grafikte gösterilmiştir.



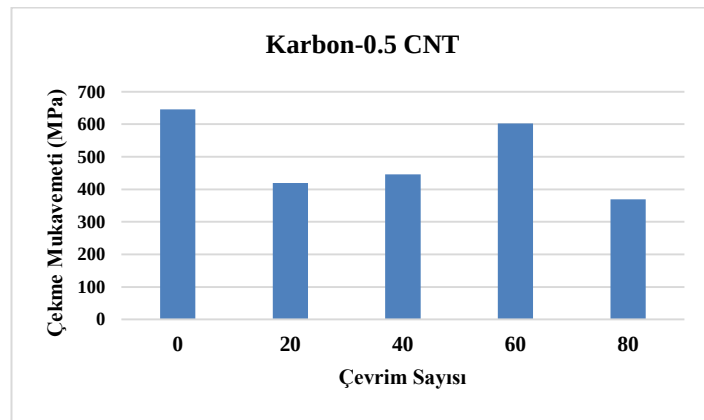
Şekil 4.159. Karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki elastisite modül değerleri

Çekme deney sonuçlarına göre, karbon-0,5 CNT malzemesinin elastisite modülü oda sıcaklığında ortalama 142,08 GPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemeden üretilen numunelerin elastisite modülü-40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim sonrası %46,33 oranında düşerek 76,24 GPa değerine varmıştır. Elastisite modülünün ani düşüş

nedeni yüksek oranda CNT nano taneciklerin eklenmesi ile reçinede tanecik topaklanma oranının artması ve oluşan topakların boyutlarının artmasından dolayı matris ile nano dolgu arayüzeyinde daha büyük artık gerilmelerin ortaya çıkması ve bu bölgelerde gerilme yığılma oranının artması olarak açıklanmıştır. Hâlbuki bu düşüş miktarı karbon-0,1 CNT numunelerinde %2,27 oranındadır. 20 çevrim sonunda malzemenin elastisite modül değeri 76,25 GPa olarak ölçülmüştür. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile yüksek sıcaklıktan dolayı kompozitin yapısında post kürleşme meydana gelip, kompozitin çekme modülünü %39 oranında artmaya neden olarak elastisite modül değerini 106,99 GPa değerine kadar yükseltmiştir. Çevrimlerin artması ile post kürleşme olayının etkisi hafiflemiş olup, malzemenin elastisite modülü 60 çevrim sonunda %19,22 oranında artarak 126,36 GPa değerine ulaşır. Çevrim sayılarının artması ile arayüzey bölgesinde termal gerilmeler artmış ve elastisite modülü 80 çevrim sonunda %57,60 oranında azalarak 53,57 MPa değerine düşmüştür. Şekil 4.159'da verilen grafiğin değerlerine bakılırsa malzemenin 80 çevrim sonunda Çekme modülünde %62,27 oranında düşüş meydana geldiği anlaşılr.

b. Çekme mukavemeti

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 CNT numunelerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.160'de verilen grafikte verilmektedir.



Şekil 4.160. Karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

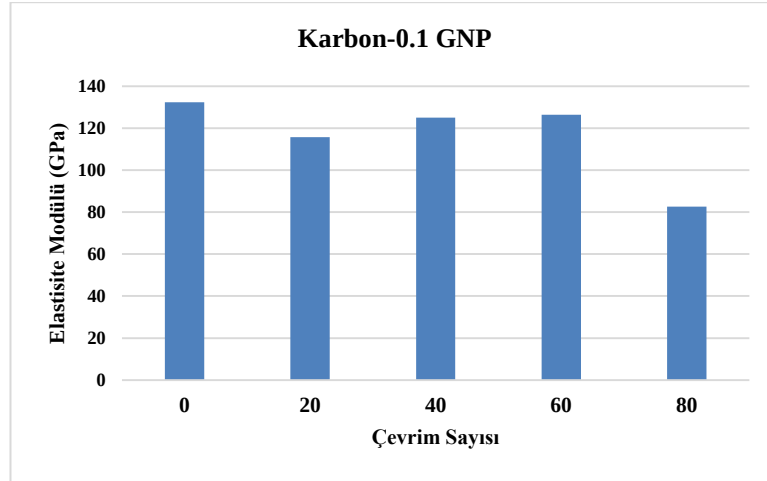
ASTM D 3039 standardına göre yapılan çekme deney sonuçlarına göre, oda sıcaklığında karbon-0,5 CNT malzemesinin çekme mukavemet değerleri ortalama 645,5 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemenin deney numuneleri -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kalması ile kompozit yapısında bileşen malzemelerin CTE değerlerinin uyumsuzluğu sonucunda, sıcaklığın artması ile negatif CTE değerine sahip olan karbon elyafı büzülür ve tam tersi epoksi malzemesi yüksek CTE değerine sahip olduğundan dolayı genişir. Çapraz bağlarla sıkıca tutulan iki malzemenin temas bölgesinde bileşenlerin ters şekil değiştirmesi arayüzey bağlarının kırılmalarına neden olur. Böylece 20 çevrim sonucunda kompozitin çekme mukavemeti %35 oranında azalarak 419,25 MPa değerini bulur. Çevrim sayılarının artması ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelerek çapraz bağların sayısı artar ve böylece 40 çevrim sonunda kompozitin çekme mukavemetinde %6,24 oranında artış meydana gelir ve 445,4 MPa değerine yükselir. Çevrim sayılarının artması ve 60 çevrime varması ile post kürleşme olayı devam eder ve kompozitin çekme mukavemetini %35,16 oranında artırarak 602 MPa değerine yükseltir. Çevrimlerin devam etmesi ve malzemenin sürekli termal gardiyana maruz kalması arayüzeydeki elyaf ile matris uyumsuzluklarını artırarak gerilme yığılmasının artmasına neden olur ve böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin çekme mukavemetinde %38,64'lük bir düşüş yaşanarak malzemenin bu özelliği 369,4 MPa değerine düşer. Şekil 4.160'de verilen grafiğe dikkat edilirse 80 çevrim sonunda malzemenin çekme mukavemetinde %38,59 oranında düşüş gözlemlenmiştir.

4.13.4. Karbon - 0,1 GNP

Termal çevrim nedeni ile karbon -0,1 GNP kompozitinin çekme özelliklerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra numunelerin çekme özellikleri, ASTM D3039 standardına tabi olan çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elastisite modülü

Oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,1 GNP numunelerin elastisite modülleri Şekil 4.161’de verilmiştir.



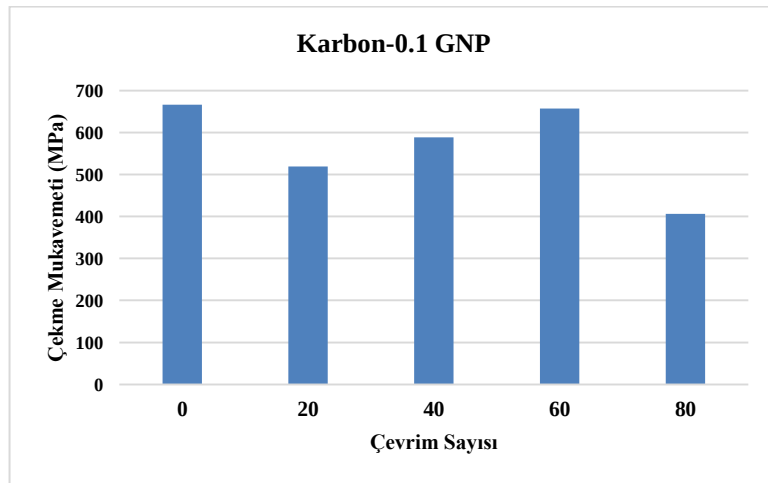
Şekil 4.161. Karbon-0.1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

ASTM D 3039 standardına göre yapılan çekme deney sonuçlarına göre, karbon-0,1 GNP malzemesinin elastisite modül değerleri oda sıcaklığında ortalama 132,35 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında karbon takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde bileşenlerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu gerilmeler matris ile elyaf arasındaki çapraz bağların kırılmasına neden olarak elyaf ile matris arasında ayrışma olayının ortaya çıkmasına neden olarak malzemenin elastisite modülünü %12,65 oranında azaltarak 115,61 GPa değerine düşürür. Çevrimin devam etmesi ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve malzemenin elastisite modül değeri %8,04 oranında artarak 124,91GPa değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ile ve post kürleşme olayının şiddetlenmesi ile malzemenin elastisite modülü %1,14’lük bir artış göstererek 126,33GPa değerine varmıştır. Çevrimlerin artmasıyla arayüzey bölgesinde

artık gerilmeler artmış olup, post kürleşme olayının etkisini azaltarak 80 sayılı çevrimde malzemenin elastisite modülünde %38,26 oranında azalma ortaya çıkararak 82,65 GPa değerine düşmesine neden olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre karbon-0,1 GNP malzemesinin 80 çevrim sonunda elastisite modülünde %34,58'lik bir düşüş meydana gelmiştir.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,1 GNP malzemesinin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.162'de verilen diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.162. Karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

Çekme deney sonuçlarına göre, karbon-0,1 GNP malzemesinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 665,35 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında karbon takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde temasta bulunan bileşenlerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu gerilmeler matris ile elyaf arasındaki çapraz

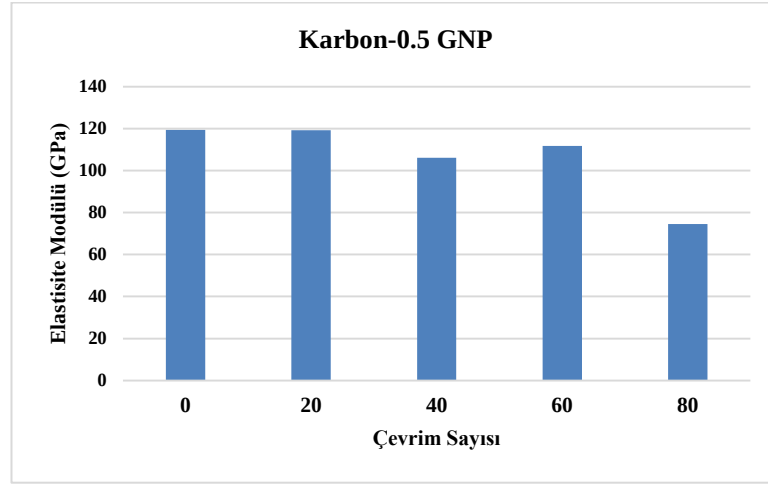
bağların kırılmasına neden olmuştur. Bu olay sonucunda elyaf ile matris arasında ayrışma ortaya çıkar ve malzemenin çekme mukavemeti %22,15 oranında azalarak 518,65 MPa değerine düşer. Çevrimin devam etmesi ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve malzemenin çekme mukavemeti %12,04 oranında artarak 588,34 MPa değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ile ve post kürleşme olayının şiddetlenmesi ile malzemenin çekme mukavemeti %11,72'lik bir artış göstererek 657,3 MPa değerine varmıştır. Çevrimlerin artmasıyla arayüzey bölgesinde artık gerilmeler artmış olup, post kürleşme olayının etkisini azaltarak 80 sayılı çevrimde malzemenin çekme mukavemetinde %38,26 oranında azalma ortaya çıkararak 405,8 MPa değerine düşmesine neden olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre karbon-0,1 GNP malzemesinin 80 çevrim sonunda çekme mukavemetinde %39,10'luk bir düşüş meydana gelmiştir.

4.13.5. Karbon-0,5 GNP

Termal çevrim nedeni ile karbon-0,5 GNP kompozit malzemesinin çekme özelliklerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra numunelerin çekme özellikleri, ASTM D3039 standardına tabi olan çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elstisite modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 GNP numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.163'te verilen grafikte gösterilmiştir.

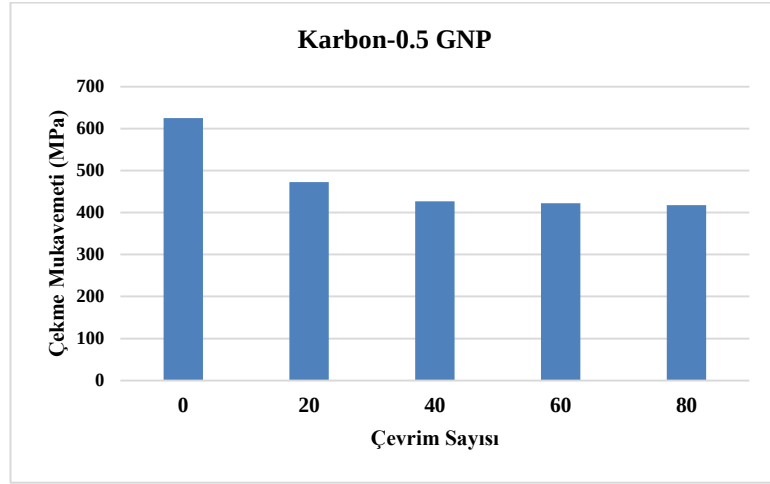


Şekil 4.163. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

Çekme deney sonuçlarına göre, karbon-0,5 GNP malzemesinin elastisite modülü oda sıcaklığında ortalama 119,36 GPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemeden üretilen numunelerin elastisite modülü -40 ile $+120^{\circ}\text{C}$ aralığında 20 adet termal çevrim sonrası %5,33 oranında artarak 119,22 GPa değerine düşmüştür. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın sürekli değişimi kompozitin arayüzeyinde oluşan artık gerilmeleri artırır ve böylece 40 çevrim sonunda malzemenin elastisite modülü %4,53 oranında düşmekle birlikte 106,07 GPa olur. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın artması ile post kürleşme olayı artık gerilme etkilerine galip gelerek kompozitin elastisite modülünü %4,11 oranında artırarak 111,65 GPa değerine yükseltir. Çevrim sayılarının artmasıyla birlikte kompozitin arayüzeyinde ayrışma meydana gelir ve malzemenin elastisite modülü %1,33 oranında düşerek 74,51 GPa değerine varır. Şekil 4.163'te verilen grafiğin değerlerine bakılırsa malzemenin 80 çevrim sonunda elastisite modülünde %37,58'lik bir düşüş meydana geldiği anlaşılır.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 GNP malzemesinin çekme mukavemetleri Şekil 4.164'te verilen diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.164. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

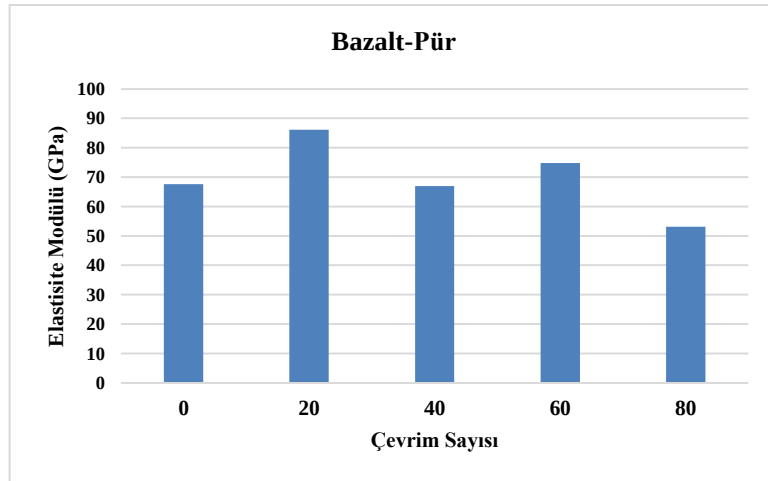
Yapılan çekme deney sonuçlarına göre, karbon 0,5 GNP numunesinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 625,25 MPa olarak elde edilmiştir. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda takviye fazı ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozitin arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler oluşur. Artık gerilmelerin arayüzey bölgesinde artması elyaf ile matris arasındaki gerilme geçirgenliğini azaltarak arayüzeydeki gerilme yığılmasını daha da artırır. Gerilme yığılmasının artması ile kompozitin çekme mukavemeti azalır. Bu nedenle 20 çevrim sonrası kompozitin çekme mukavemeti %4,62 oranında azalarak 472,3MPa değerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile sıcaklığın sürekli olarak değişmesinden dolayı artık gerilmeler artar ve mikro çatlakları oluşturarak kompozitin çekme mukavemetini %9,71oranında azaltmakla birlikte 426,45MPa değerine düşürür. Sıcaklığın sürekli -40' ile 120° aralığında değişmesi ile mikro çatlakların sayısı artıp, birleşerek çatlakları ortaya çıkarır. Çatlağın oluşumu kompozitin yapısında delaminasyon olayına neden olup, kompozitin çekme mukavemetini azaltarak 60 ve 80 çevrim sonunda sırasıyla 421,9 ve 417,7 MPa değerlerine düşürür. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin çekme mukavemetinde %33,19'luk bir düşüş meydana gelmiş olur.

4.13.6. Bazalt pür

Bazalt pür numuneleri 250 mm uzunluk, 25mm genişlik ve 2 mm' lik kalınlıkta olup, %60 bazalt elyafı ve %40 epoksi matris malzemesi içermektedirler. Bu numunelerin çekme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Bu numunelerin elastisite modülü ve çekme mukavemeti ASTM D3039 standardı kullanılarak bulunmuştur.

a. Elastisite Modülü

Oda sıcaklığında bulunan ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt pür numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.165'da verilen diyagramda gösterilmiştir.



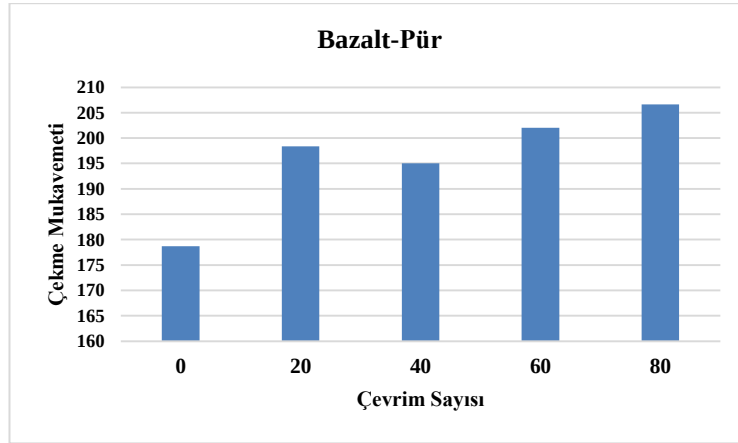
Şekil 4.165. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

Deney sonuçlarına bakıldığında, bazalt pür numunesinin oda sıcaklığında elastisite modülü ortalama 67,57 GPa olarak bulunmuştur. Bu tür kompozit -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldığında yüksek sıcaklıktan dolayı yapısında post kürleşme meydana gelerek elastisite modülü %27,42 oranında artar ve 86,09 GPa

değerine ulaşır. Çevrimlerin devam edip, 40 çevrime gelmesi ile birlikte yüksek sıcaklıklardan dolayı malzeme yapısında termal gerilmeler ortaya çıkar ve böylece elastisite modülünde %22,13'lük hafif bir düşüş ortaya çıkarak değeri 66,97 GPa olur. Çevrim sayılarının artıp, 60 sayısına vardığında malzemenin elastisite modülü gevrekleşme olayı neticesinde %11,72 oranında artarak 74,82 GPa değerlerine ulaşır. Çevrimlerin devam etmesi ve 80 çevrime gelmesi ile birlikte elastisite modül değeri %29,16 oranında azalarak 53,1 GPa değerine düşer. Böylece bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin elastisite modülünde 80 çevrim sonunda %21,56 oranında artış meydana gelmiş olur.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-pür malzemesinin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.166'de bulunan diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.166. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

Yapılan çekme deney sonuçlarına göre, bazalt pür numunelerinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 178,69 MPa olarak elde edilmiştir. Bu tür malzemeden üretilen numuneler -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldığında kompozit yapısında post kürleşme olayından dolayı malzemenin çekme mukavemetinde %11,01'lik bir artış ortaya çıkarak 198,37 MPa değerine yükselmiştir.

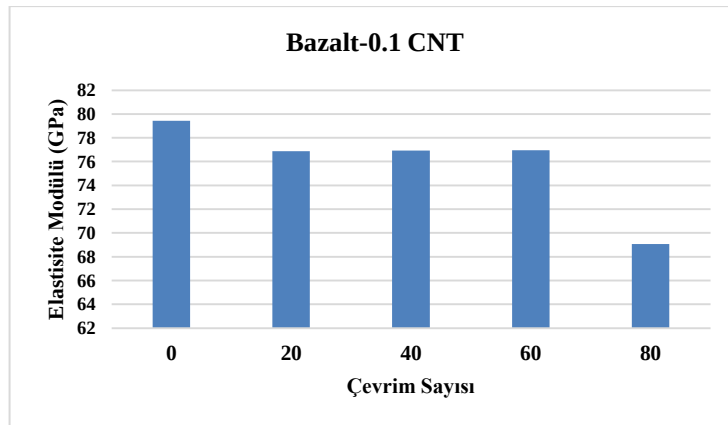
Çevrim sayılarının artması ile kompozit bileşenlerinin CTE farkından dolayı, malzemede artık gerilmeler oluşur ve malzemenin çekme mukavemetini %1,69 oranında azaltarak 195 MPa değerine düşürür. Çevrimlerin devam etmesi ile kompozit yapısında post kürleşme olayı başlar ve bu olay kompozitin mukavemetini 60 ve 80 çevrim sonunda %3,59 ve 2,29 oranında artırarak sırasıyla 202 ve 206,63 MPa değerlerine yükseltir. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin çekme mukavemetinde %15,63 oranında artışın meydana geldiği ortaya çıkar.

4.13.7. Bazalt - 0,1 CNT

Termal çevrim nedeni ile karbon-0,1 CNT kompozitinin çekme özelliklerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra numunelerin çekme özellikleri, ASTM D3039 standardına tabi olan çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elastisite Modülü

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 CNT numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.167’de verilen grafikte gösterilmiştir.

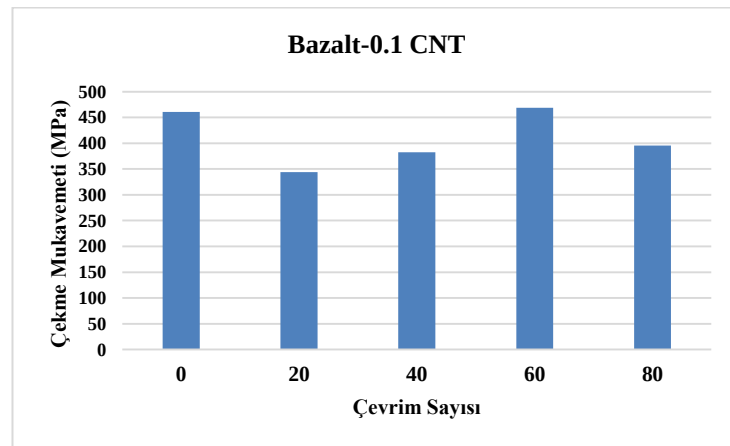


Şekil 4.167. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

ASTM D 3039 standardına tabi çekme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,1 CNT numunelerinin elastisite modülü oda sıcaklığında ortalama 79,42 GPa olarak bulunmuştur. Bu tür malzemeler -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime tabii tutulduklarında elyaf malzemesi ile nano dolgulu matris malzemesinin CTE değerlerinin farklı olmasından dolayı kompozit arayüzeyinde artık gerilmeler oluşur ve böylece kompozitin elastisite modülünde %3,20'lik bir düşüş ortaya çıkarak bu değer 76,88 GPa olur. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile birlikte yüksek sıcaklıklardan dolayı kompozit yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve böylece malzemenin elastisite modülünde %31,52'lik bir artış ortaya çıkarak bu değer 76,92 GPa olur. Çevrimlerin devam etmesi ile yüksek sıcaklıktan dolayı kompozit yapısında post kürleşme olayı ortaya çıkar ve malzemenin elastisite modülün %0,04 oranında artırarak 76,94GPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin devam etmesi arayüzeyde meydana gelen gerilme yığılmasını artırır ve kompozitin elastisite modülünü %10,32 oranında azaltarak 69,1 GPa değerine düşürür. Elde edilen sonuçlara göre bazalt-0,1 CNT kompozitin elastisite modülü 80 çevrim sonucunda %13,12 oranında azalmıştır.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 CNT numunelerin çekme mukavemetleri Şekil 4.168'de verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.168. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

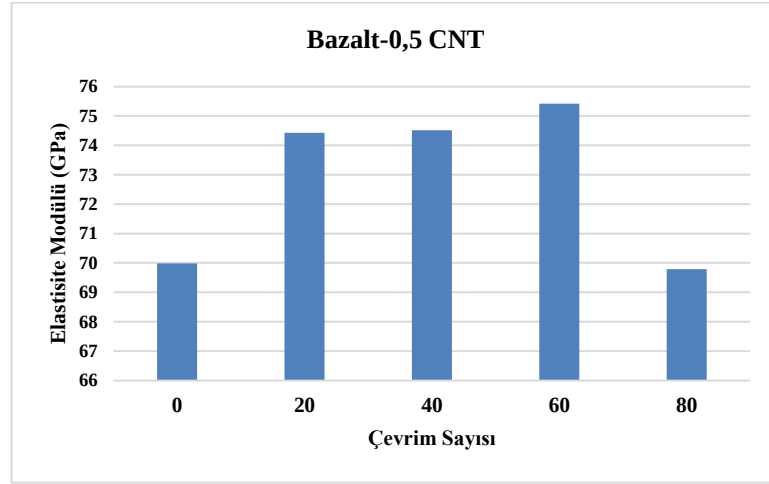
Çekme deney sonuçlarına bakıldığında, bazalt-0,1 CNT malzemesinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 460,5 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında bazalt takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde temasta bulunan bileşenlerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkıp, kompozitin çekme mukavemeti %25,34 oranında azalarak 343,81MPa değerine düşmüş olur. Çevrimlerin devam etmesi ve malzemenin yüksek sıcaklığa maruz kalmasıyla kompozitin yapısında post kürleşme olayı ortaya çıkar ve bu olay kompozitin çekme mukavemetini 40 ve 60 çevrim sonunda %11,81 ve 22,63 oranında artırarak sırasıyla 382,5 ve 468,75 MPa değerlerine ulaştırır. Çevrim sayılarının artmasıyla kompozitin arayüzey bölgesinde artık gerilmelerin oluşmasından dolayı malzemenin çekme mukavemeti 80 çevrim sonunda %15,59 oranında azalarak 395,65 MPa değerine düşer. Elde edilen sonuçlara göre bazalt-0,1 CNT malzemesinin 80 çevrim sonunda çekme mukavemetinde %14,08'lik bir düşüş meydana gelmiş olur.

4.13.8. Bazalt-0,5 CNT

Bazalt-0,5 CNT malzemesi bazalt elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 CNT tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemedan üretilen numunelerin çekme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra Malzemenin elastisite modülüASTM D3039 standardına uygun çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elastisite modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 CNT numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.169'da verilen grafikte gösterilmiştir.

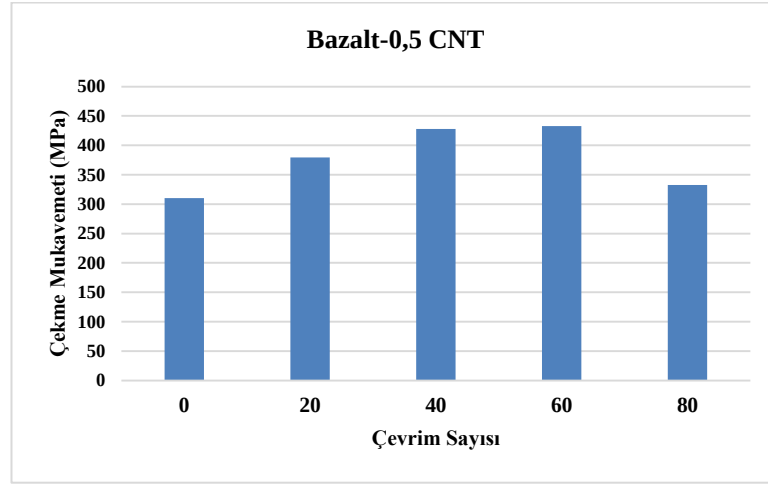


Şekil 4.169. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

Çekme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,5 CNT malzemesinin elastisite modül değeri oda sıcaklığında 69,98 GPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemenin -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kalması ile yüksek sıcaklıktan dolayı kompozitin yapısında ortaya çıkan post kürleşme nedeni ile elastisite modülü artmaya başlar ve 20 çevrim sonunda %6,34 oranında artmakla birlikte 74,42 GPa değerine ulaşır. Çevrimlerin devam etmesi ile post kürleşme olayı devam eder ve malzemenin elastisite modülü 40 ve 60 çevrim sonrasında sırasıyla %0,107 ve %1,23 oranında artarak 74,51 ve 75,42 GPa değerine yükselir. Çevrimlerin artması ile sürekli sıcaklık değişiminden dolayı kompozit arayüzeyinde artık gerilmeler artar ve mikro çatlaklar ortaya çıkar. Çevrim sayısının 80 âdete varması ile kompozit arayüzeyinde mikro çatlaklardan dolayı ayrışma meydana gelir ve böylece malzemenin elastisite modülü %6,24 oranında düşerek 69,79 GPa değerine gelmiş olur. Deney sonuçlarına bakıldığında 80 çevrim sonunda malzemenin elastisite modülü %0,286 oranında düşüş meydana gelmiş olur.

b. Çekme mukavemeti

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 CNT numunelerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.170’te bulunan grafikte verilmektedir.



Şekil 4.169. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

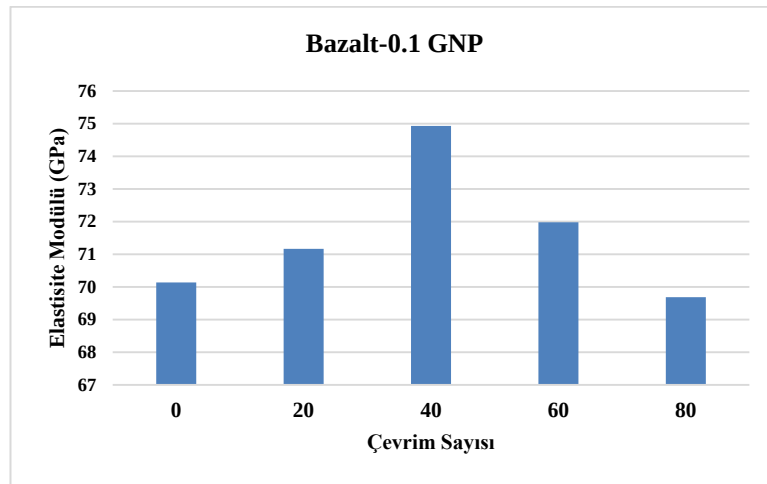
ASTM D3039 standardına göre yapılan çekme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,5 CNT malzemesinin çekme mukavemeti oda sıcaklığında ortalama 310,44 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemeden üretilen deney numuneleri -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kalması ile yüksek sıcaklıktan dolayı kompozitin yapısında ortaya çıkan post kürleşme nedeni ile çekme mukavemeti artmaya başlar ve 20 çevrim sonunda %22,23 oranında artmakla birlikte 379,44 değerine ulaşır. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın daha da artması ile post kürleşme olayı devam eder ve malzemenin çekme mukavemeti 40 ve 60 çevrim sonrasında sırasıyla %12,71 ve %1,19 oranında artarak 427,69 ve 432,81 MPa değerine yükselir. Çevrimlerin artması ile sürekli sıcaklık değişiminden dolayı kompozit arayüzeyinde artık gerilmeler artar ve mikro çatlaklar ortaya çıkar. Çevrim sayısının 80 âdete varması ile kompozit arayüzeyinde mikro çatlaklardan dolayı ayrışma meydana gelir ve böylece malzemenin mukavemeti %23,1 oranında düşerek 332,81MPa değerine gelmiş olur. Deney sonuçlarına bakıldığında 80 çevrim sonunda malzemenin çekme mukavemetinde %7,21 oranında artış meydana gelmiş olur.

4.13.9. Bazalt-0,1 GNP

Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çekme özelliklerinde termal çevrimden dolayı ortaya çıkan değişimleri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal yorulma etkisine tabii tutulan numunelerin çekme özelliklerinin incelenmesi amacıyla numuneler çekme deneyi kullanılarak test edilip, malzemenin elastisite modülü ve mukavemeti elde edilecektir.

a. Elastisite modülü

Oda sıcaklığı ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 GNP numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.170’te verilmiştir.



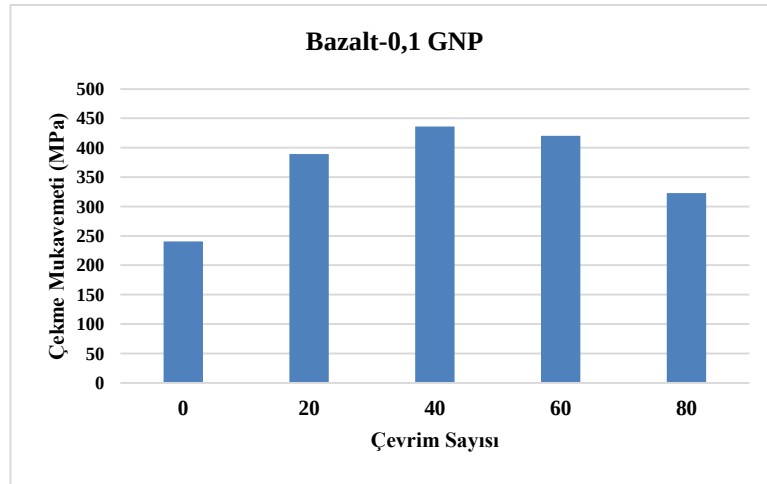
Şekil 4.170. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

ASTM D 3039 standardına göre yapılan çekme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,1 GNP malzemesinin elastisite modül değeri oda sıcaklığında ortalama 70,13 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzemeye -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında sıcaklığın artmasından dolayı malzeme yapısında post kürleşme meydana gelir ve kompozitin elastisite modülü %2,181 oranında artırarak 71,16 GPa

değerine ulaştırır. Çevrim sayısının artması ile malzeme yapısında meydana gelen post kürleşme olayı devam eder ve malzemenin elastisite modülü %5,29 oranlarında artırarak 40 çevrim sonunda 74,93 GPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin devam etmesi ile kompozitin arayüzeyinde toplanan artık gerilmelerin oranı artarak delaminasyon neden olur. Böylece kompozitin mukavemeti 60 ve 80 çevrim sonunda %3,94 ve 3,19 oranında azalarak sırasıyla 71,98 ve 69.68 GPa değerlerine düşer. Elde edilen sonuçlara göre 80 çevrim sonunda bazalt-0,1 GNP malzemesinin elastisite modülünde %0,64 oranında bir düşüşün meydana geldiği gözlemlenir.

b. Çekme mukavemeti

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 GNP numunelerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.171’de bulunan grafikte verilmektedir.



Şekil 4.171. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

Çekme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,1 GNP malzemesinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 240,39 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında sıcaklığın artmasından dolayı malzeme yapısında post kürleşme meydana gelir ve kompozitin çekme mukavemetini %61,92 oranında artırarak 389,25

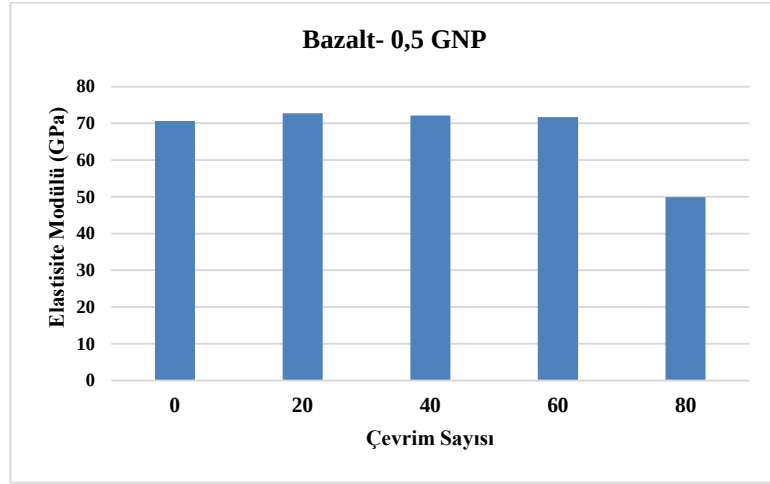
MPa değerine ulaştırır. Çevrim sayısının artması ile malzeme yapısında meydana gelen post kürleşme olayı devam eder ve malzemenin çekme mukavemetini %12,06 oranlarında artırarak 40 çevrim sonunda 436,19 MPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin devam etmesi ile kompozitin arayüzeyinde toplanan artık gerilmelerin oranı artar ve arayüzey ayrışmasına neden olur. Böylece kompozitin mukavemeti 60 ve 80 çevrim sonunda %3,75 ve 23.28 azalarak sırasıyla 420,44 ve 322,56 MPa değerlerine düşer. Elde edilen sonuçlara göre 80 çevrim sonunda bazalt-0,1 GNP malzemesinin çekme mukavemetinde %34,18 oranında artış meydana gelmiştir.

4.13.10. Bazalt-0,5 GNP

Bazalt-0,5 GNP malzemesinden üretilen numunelerin çekme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Her çevrim için ikişer numune kullanılmıştır. Termal çevrimden sonra malzemenin elastisite modülü ASTM D 3039 standardına göre yapılan çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elastisite modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 GNP numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.172’de verilen grafikte gösterilmiştir.

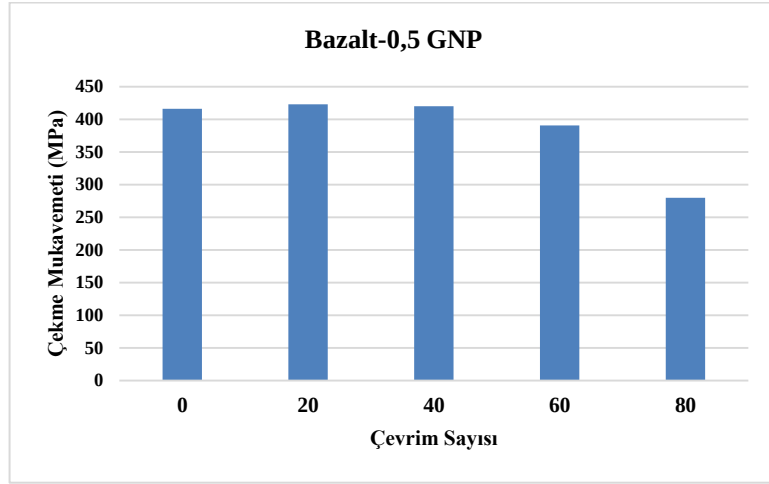


Şekil 4.172. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

Çekme deney sonuçlarına bakıldığında, bazalt 0,5 GNP numunesinin elastisite modülü oda sıcaklığında 70,67 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldığında kompozitin yapısında yüksek sıcaklıklardan dolayı post kürleşme olayı ortaya çıkar ve malzemenin çekme mukavemeti %2,87 oranında artarak 72,71 GPa değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ile sıcaklığın sürekli değişiminden dolayı kompozit bileşenlerinin CTE farkından dolayı malzeme yapısında artık gerilmeler oluşup, malzemenin elastisite modülünü 40 ve 60 çevrim sonunda %0,85 ve 0,55 oranında azaltarak sırasıyla 72,08 ve 71,68 GPa değerlerine düşürür. Çevrim sayılarının artması ile artık gerilmelerden dolayı arayüzey bölgesinde delaminasyon olayı ortaya çıkar ve bu olay 80 çevrim sonunda kompozitin elastisite %30,40 oranında azaltarak 49,89 MPa değerine düşürür. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin çekme mukavemetinde %29,40'lık bir düşüş meydana gelmiş olur.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 GNP malzemesinin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.173'te verilen diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.173. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

Yapılan çekme deney sonuçlarına göre, bazalt 0,5 GNP numunesinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 415,75 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda kompozitin yapısında yüksek sıcaklıklardan dolayı post kürleşme olayı meydana gelir ve malzemenin çekme mukavemetini %13,36 oranında artırarak 422,94 MPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın sürekli değişmesi ile kompozit malzemesini oluşturan bileşenlerin CTE farkından dolayı malzeme yapısında, özellikle arayüzey bölgesinde artık gerilmeler oluşup, malzemenin çekme mukavemeti 40 ve 60 çevrim sonunda %0,75 ve 7,56 oranında azalarak sırasıyla 419,75 ve 390,25 MPa değerlerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile artık gerilmelerden dolayı arayüzey bölgesinde delaminasyon olayı ortaya çıkar ve bu olay 80 çevrim sonunda kompozitin çekme mukavemetini %28,37 azaltarak 279,56 MPa değerine düşürür. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin çekme mukavemetinde %32,76'lık bir artış meydana gelmiş olur.

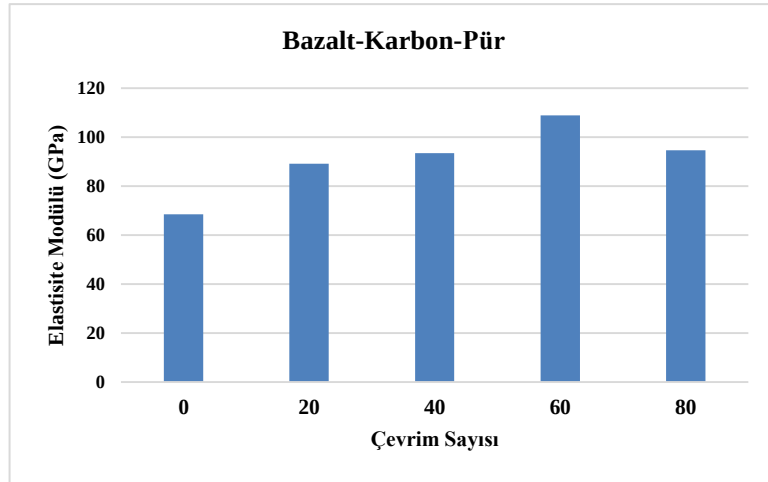
4.13.11. Bazalt-karbon pür

Bazalt-karbon pür numunelerin çekme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki

adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Bu numunelerin elastisite modülü ve çekme mukavemeti ASTM D 3039 standardı kullanılarak bulunmuştur.

a. Çekme Modülü

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon pür numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.174'te bulunan diyagramda gösterilmiştir.



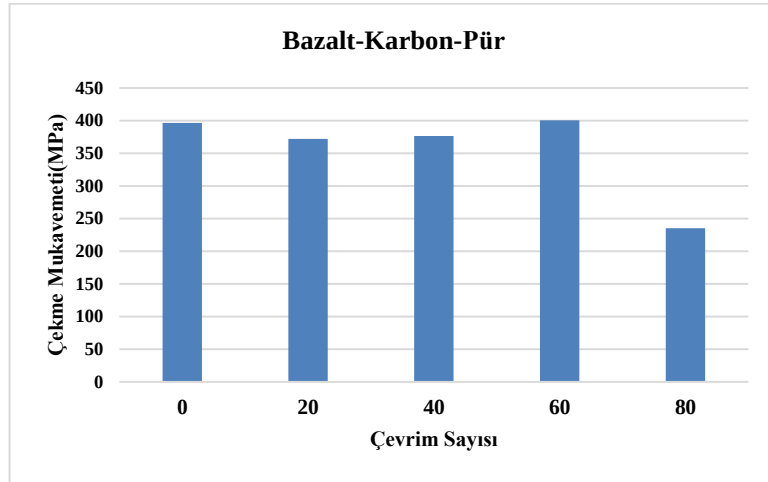
Şekil 4.174. Bazalt-karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

Deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon pür numunelerinin elastisite modülü oda sıcaklığında ortalama 68,45 GPa olarak bulunmuştur. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldıktan sonra yüksek sıcaklıklardan dolayı kompozitin yapısında gevrekleşme olayı ortaya çıkar ve malzemenin elastisite modülünde %30,02 oranında artışla birlikte 93,46 GPa değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ile yüksek sıcaklıklardan dolayı malzeme yapısında post kurlaşma olayı ortaya çıkar ve elastisite modülünü 40 ve 60 çevrim sonunda %5,01 ve %17 artırarak sırasıyla 93,46 ve 108,84 GPa değerine ulaştırır. Çevrim sayılarının artması ile sıcaklığın sürekli değişiminden ve bileşen elyaf malzemeleri ile matris malzemesinin CTE

değerlerinde bulunduğu farktan dolayı kompozit bileşenlerinin şekil değiştirme oranlarının farklı olması neticesinde kompozit arayüzey bölgesinde artık gerilmeler ortaya çıkarak elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışma meydana gelir ve böylece malzemenin elastisite modülünde %15,11'lik bir düşüş ortaya çıkarak bu değer 94,55 GPa olur. Elastisite modülünün grafiğine bakıldığında -40 ile +120°C aralığında 80 çevrim sonrası malzemenin elastisite modülünde %38'lik bir artışın ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon pür numunelerin çekme mukavemetleri Şekil 4.175'te bulunan diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.175. Bazalt-karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

Yapılan çekme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon pür numunelerinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 396,44 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldığında, kompoziti yapısında gevrekleşme olayı ortaya çıkarak malzemenin çekme mukavemetini %6,58 oranında azaltarak 371,96 MPa değerine düşürür. Çevrimlerin devam etmesi ile yüksek sıcaklıklardan ortaya çıkan post kürleşme neticesinde kompozitin çekme mukavemeti

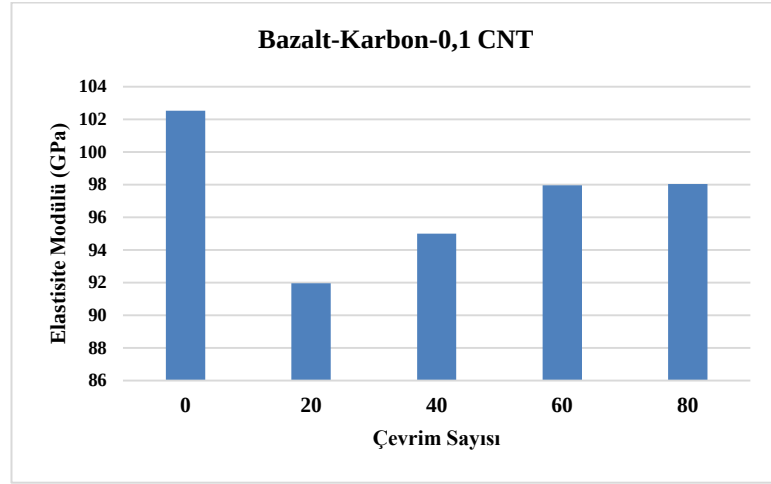
%1,14 ve 6,44 oranında artarak 40 ve 60 çevrim sonunda sırasıyla 376,2 ve 400,44 MPa olur. Çevrim sayısının artması ve sıcaklığın sürekli değişimi ve bileşen elyaf malzemeleri ile matris malzemesinin CTE değerlerinde bulunduğu farktan dolayı kompozit bileşenlerinin şekil değiştirme oranlarının farklı olması neticesinde kompozit arayüzey bölgesinde artık gerilmeler ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu gerilmeler elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışmanın meydana gelmesine neden olarak kompozit malzemesinin gevrekleşmesine neden olur ve böylece 80 çevrim sonunda çekme mukavemeti %41,28 oranında düşerek 235,15 MPa olur. Deney sonucuna göre, malzemenin çekme mukavemeti 80 çevrim termal yorulmaya maruz kalarak %19,45 oranında artmıştır.

4.13.12. Bazalt-karbon-0,1 CNT

Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinden üretilmiş olan numunelerin termal çevrimden dolayı çekme özelliklerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra numunelerin çekme özellikleri çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elastisite Modülü

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon-0,1 CNT numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.176'da verilen grafikte gösterilmiştir.

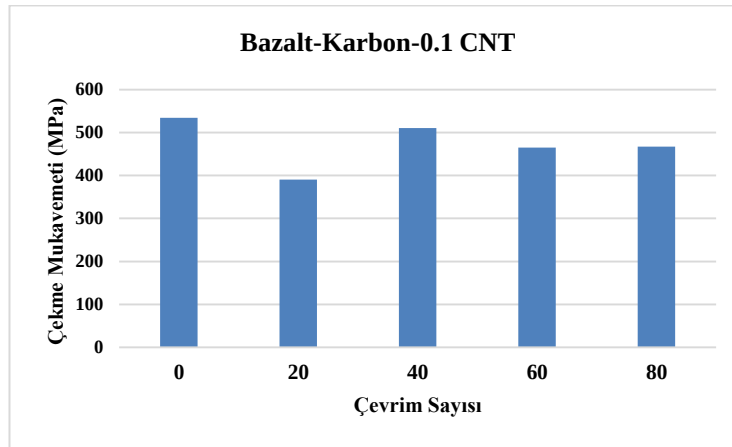


Şekil 4.176. Bazalt-karbon-0.1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki elastisite modül değerleri

ASTM D 3039 standardına tabii çekme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon-0,1 CNT numunesinin elastisite modülü normal şartlarda ortalama 102,51 GPa olarak belirlenmiştir. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kaldığında kompozitin tabakalar arasında termal gerilme meydana gelerek ayrışma olayı ortaya çıkar ve böylece malzemenin elastisite modül değerinde 20 çevrim sonunda %10,29 oranında azalma meydana gelerek 91,96 GPa değerine düşer. Çevrim sayılarının artıp, 40 çevrime geldiğinde malzemenin yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve kompozitin elastisite modülünü %3,30 oranında artırarak 94,99 GPa değerine yükseltir. Çevrimlerin devam edip, 60 ve 80 çevrime gelmesi ile kompozit yüksek sıcaklıklardan dolayı gevrekleşir ve elastisite modülü %3,11 ve 0,06 oranında artarak sırasıyla 97,94 ve 98,03 GPa değerlerine ulaşır. Şekil 4.176’da verilen grafiğe bakılırsa 80 çevrim sonunda malzemenin elastisite modülünde %4.40’lık bir düşüşün meydana geldiği görülmüş olur.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon-0,1 CNT numunelerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.177’de bulunan grafikte verilmiştir:



Şekil 4.177. Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

Çekme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 534,24 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında Bazalt-karbon takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde temasta bulunan malzemelerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu gerilmeler matris ile elyaf arasındaki çapraz bağların kırılmasına neden olmuştur. Çapraz bağların azalması sonucunda elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışma ortaya çıkarak malzemenin çekme mukavemeti %26,91 oranında azalmakla birlikte 390,49 MPa değerine düşmüştür. Çevrimin devam etmesi ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelerek, malzemenin çekme mukavemeti %30,71 oranında artmakla birlikte 510,41 MPa değerine yükselmiştir. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın sürekli değişimi nedeni ile kompozit bileşenlerinin CTE farkından dolayı malzeme yapısında artık

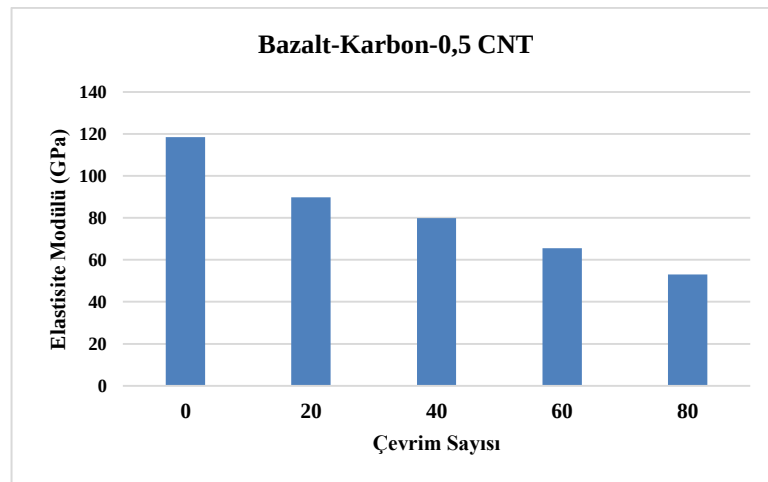
gerilmeler ortaya çıkar ve böylece malzemenin çekme mukavemeti inmeye başlar ve 60 çevrim sonunda %8,86 oranında azalarak 465,17 MPa değerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile sıcaklık artar ve post kürleşmeye neden olarak kompozitin çekme mukavemetini 80 çevrim sonunda %0,48 artırmakla birlikte 467,42 MPa değerine yükseltir. Elde edilen sonuçlara göre Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin 80 çevrim sonunda çekme mukavemetinde %12,51 düşüş meydana gelmiştir.

4.13.13. Bazalt-karbon - 0,5 CNT

Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinden üretilmiş olan numunelerin çekme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra numunelerin çekme özellikleri çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elstisite modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 CNT numunelerin elastisite modülü değerleri Şekil 4.178’de verilen grafikte gösterilmiştir.

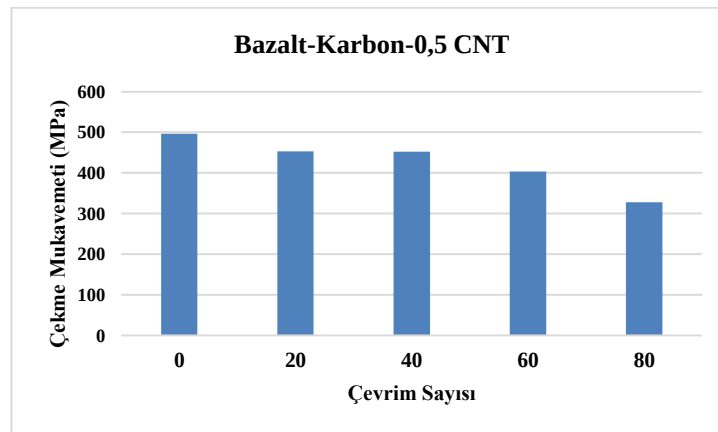


Şekil 4.178. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme modül değerleri

Çekme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon-0,5 CNT kompozit malzemesinin elastisite modül değeri oda sıcaklığında 118,39 GPa olarak bulunmuştur. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda takviye fazı ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozitin arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler oluşur. Artık gerilmelerin arayüzey bölgesinde artması elyaf ile matris arasındaki gerilme geçirgenliğini azaltarak arayüzeydeki gerilme yığılmasını daha da artırır. Gerilme yığılmasının artması ile kompozitin elastisite modülü %24,21 oranında azalarak 89,73 GPa değerine düşer. Bu nedenle çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile sıcaklığın sürekli olarak değişmesinden dolayı artık gerilmeler artar ve mikro çatlakları oluşturarak kompozitin elastisite modülünü %11,01 oranında azaltarak 79,85 GPa değerine düşürür. Sıcaklığın sürekli -40' ile +120° aralığında değişmesi ile mikro çatlakların sayısı artar ve mikro çatlakların birleşmesi ile çatlaklar ortaya çıkar. Çatlağın oluşumu kompozitin yapısında delaminasyon olayına neden olarak kompozitin çekme mukavemetini %17,99 ve 19,05 oranında azaltarak 60 ve 80 çevrim sonunda sırasıyla 65,48 ve 53,05 GPa değerlerine düşürür. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin elastisite modülünde %55,23'lik bir düşüş meydana gelmiş olur.

b. Çekme mukavemeti

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 CNT numunelerin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.179'da bulunan grafikte verilmektedir.



Şekil 4.179. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

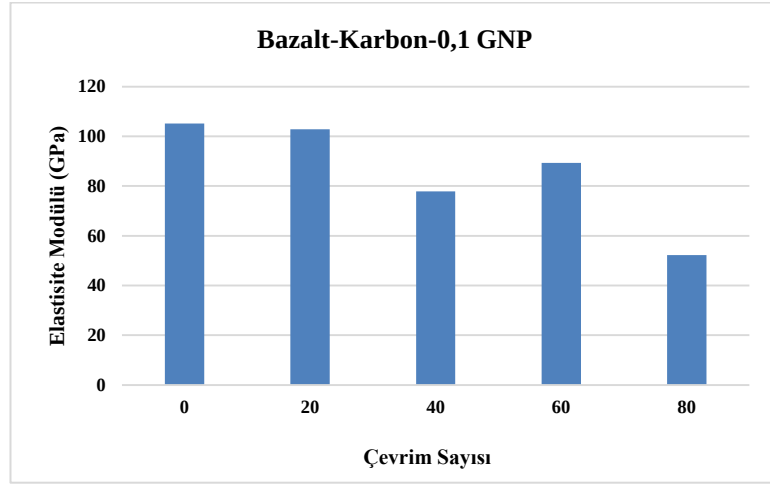
Yapılan çekme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon-0,5 CNT numunesinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 496,67 MPa olarak elde edilmiştir. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda takviye fazı ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozitin arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler oluşur. Artık gerilmelerin arayüzey bölgesinde artması elyaf ile matris arasındaki gerilme geçirgenliğini azaltarak arayüzeydeki gerilme yığılmasını daha da artırır. Gerilme yığılmasının artması ile kompozitin çekme mukavemeti azalır. Bu nedenle 20 çevrim sonrası kompozitin çekme mukavemeti %8,75 oranında azalarak 453,22 MPa değerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile sıcaklığın sürekli olarak değişmesinden dolayı artık gerilmeler artar ve mikro çatlakları oluşturarak kompozitin çekme mukavemetini %0,18 oranında azaltarak 352,39 MPa değerine düşürür. Sıcaklığın sürekli -40' ile +120° aralığında değişmesi ile mikro çatlakların sayısı artar ve mikro çatlakların birleşmesi ile çatlaklar ortaya çıkar. Çatlağın oluşumu kompozitin yapısında delaminasyon olayına yol açar ve kompozitin çekme mukavemetini %10,78 ve 18,81 oranında azaltarak 60 ve 80 çevrim sonunda sırasıyla 403,61 ve 327,7 MPa değerlerine düşürür. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin çekme mukavemetinde %34,02'lik bir düşüş meydana gelmiş olur.

4.13.14. Bazalt-karbon - 0,1 GNP

Termal çevrim nedeni ile bazalt-karbon-0,1 GNP kompozit malzemesinin çekme özelliklerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra numunelerin çekme özellikleri, ASTM D3039 standardına tabi olan çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elstisite modülü

Oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,1 GNP numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.180'de verilmektedir.

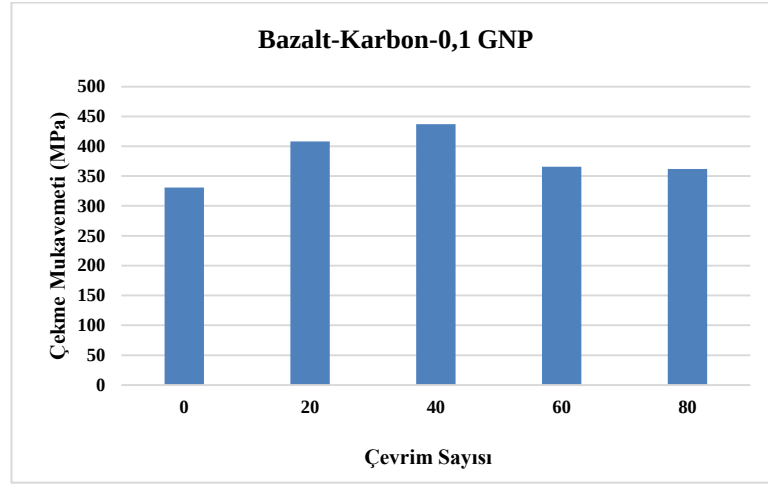


Şekil 4.180. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki elastisite modül değerleri

ASTM D3039 standardına göre yapılan çekme deney sonuçlarına göre, bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin elastisite modül değerleri oda sıcaklığında ortalama 105,14 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzemeden üretilen numuneler -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz sünekleşme ortaya çıkar ve böylece malzemenin elastisite modülü 20 ve 40 çevrim sonunda %2,03 ve 24,34 oranında azalarak 102,87 ve 77,83 GPa değerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile yüksek sıcaklıktan dolayı malzeme yapısında gevrekleşme ortaya çıkıp, kompozitin elastisite modülünü %14,69 oranında artırarak 89,25 GPa değerine yükseltir. Çevrimlerin devam etmesi ve sürekli sıcaklık değişimi ile kompozit arayüzeyinde artık gerilme oranı artarak gerilme yığılması meydana gelir ve böylece kompozitin elastisite modülü %41,48 oranında azalarak 52,23 GPa değerine düşer. Deney sonuçlarına göre 80 çevrim sonucunda kompozitin elastisite modülünde %3,09'luk bir düşüş meydana gelmiştir.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.181'de bulunan diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.181. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

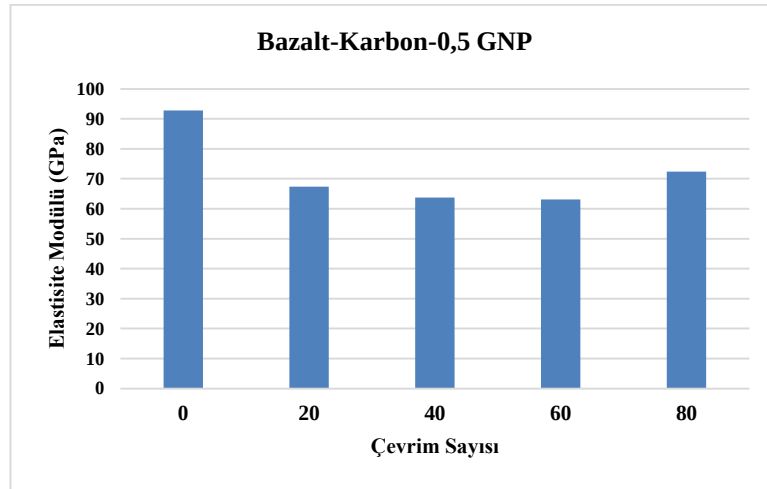
Çekme deney sonuçlarına bakıldığında, bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 330,58 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında post kürleşme olayından dolayı malzemenin çekme mukavemeti %18,96 oranında artarak 407,9 MPa olmuştur. Çevrim sayısının artması ile post kürleşme olayı şiddetlenerek kompozitin çekme mukavemetini %7,09 oranında artırmıştır. Böylece kompozitin çekme mukavemeti 40 çevrim sonunda 436,81 MPa değerine yükselmiştir. Çevrimlerin devam etmesi ile sürekli sıcaklık değişiminden dolayı artık gerilmeler artarak kompozit arayüzey bölgesinde delaminasyon meydana gelmiş ve 60 çevrim sonunda kompozitin çekme mukavemetini %16,23 oranında azaltarak 365,91 MPa değerine düşürmüştür. Çevrim sayılarının artması delaminasyon olayını şiddetlendirerek malzemenin çekme mukavemetini %1,04 oranında düşürerek 80 çevrim sonunda 362,1 MPa değerine indirgemıştır. Elde edilen sonuçlara göre bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin 80 çevrim sonunda çekme mukavemetinde %9,53'lik bir artış meydana gelmiştir.

4.13.15. Bazalt-karbon-0,5 GNP

Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinden üretilen numunelerin çekme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Her çevrim için ikişer numune kullanılmıştır. Termal çevrimden sonra malzemenin elastisite modülü ASTM D3039 standardına uygun çekme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Elastisite modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 GNP numunelerin elastisite modül değerleri Şekil 4.182’de bulunan grafikte verilmektedir.



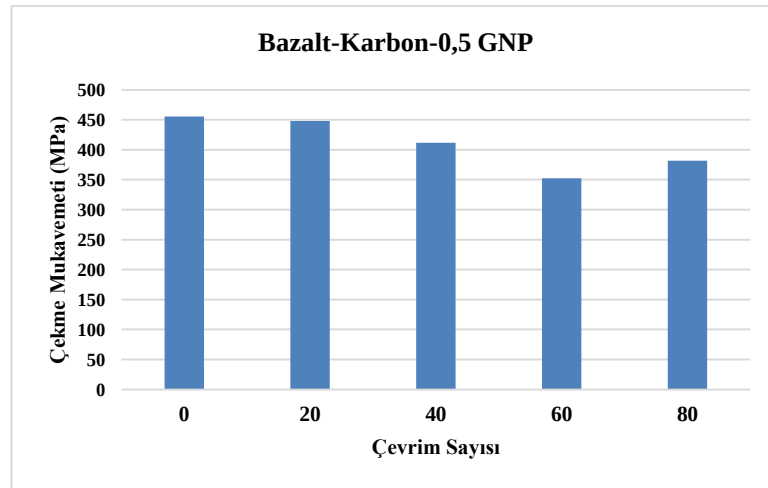
Şekil 4.182. Bazalt-karbon-0.5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki elastisite modül değerleri

Çekme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon-0,5 GNP numunesinin elastisite modül değerleri normal şartlarda 92,83 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz kaldığında takviye fazı ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozitin arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler oluşur. Artık

gerilmelerin arayüzey bölgesinde artması, elyaf ile matris arasındaki gerilme geçirgenliğini azaltıp, arayüzeydeki gerilme yığılmasını artırır. Gerilme yığılmasının artması ile kompozitin elastisite modülü 20 çevrim sonunda %27,38 oranında azalıp, 67,41GPa değerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 ve 60 çevrimlere varması ile sıcaklığın sürekli olarak değişmesinden dolayı artık gerilmeler artar ve mikro çatlakları oluşarak kompozitin elastisite modülü %5,43 ve 0,01 oranında azalarak sırasıyla 63,73 ve 63,11 GPa değerlerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile yüksek sıcaklıklardan dolayı malzeme yapısında post kürleşme olayı ortaya çıkar ve kompozitin elastisite modülünü %14,69 oranında artarak 72,38 GPa değerine yükseltir. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin elastisite modülünde %22,03'lük bir düşüş meydana gelmiş olur.

b. Çekme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çekme mukavemet değerleri Şekil 4.183'te bulunan diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.183. Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki çekme mukavemet değerleri

Yapılan çekme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon-0,5 GNP numunesinin çekme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 455,51 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda takviye fazı ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozitin arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler oluşur. Artık gerilmelerin arayüzey bölgesinde artması, elyaf ile matris arasındaki gerilme geçirgenliğini azaltarak arayüzeydeki gerilme yığılmasını daha da artırır. Gerilme yığılmasının artması ile kompozitin çekme mukavemeti azalır. Bu nedenle 20 çevrim sonrası kompozitin çekme mukavemeti %1,63 oranında azalmakla birlikte 448,1 MPa değerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile sıcaklığın sürekli olarak değişmesinden dolayı artık gerilmeler artar ve mikro çatlakları oluşturarak kompozitin çekme mukavemetini %8,14 oranında azaltarak 411,61 MPa değerine düşürür. Sıcaklığın sürekli -40' ile 120° aralığında değişmesi ile mikro çatlakların sayısı artıp, birleşmeleri ile çatlaklar ortaya çıkar. Çatlağın oluşumu kompozitin yapısında delaminasyon olayına yol açar ve kompozitin çekme mukavemetini %10,78 oranında azaltarak 60 çevrim sonunda 352,33MPa değerine düşürür. Çevrim sayılarının artması ile düşük sıcaklık etkilerinden dolayı çatlaklar kapanmaya başlar ve malzemenin mukavemeti %8,41'lik bir artışa maruz kalarak 381,95 MPa değerine ulaşır. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin çekme mukavemetinde %16,15'lik bir düşüş meydana gelmiş olur.

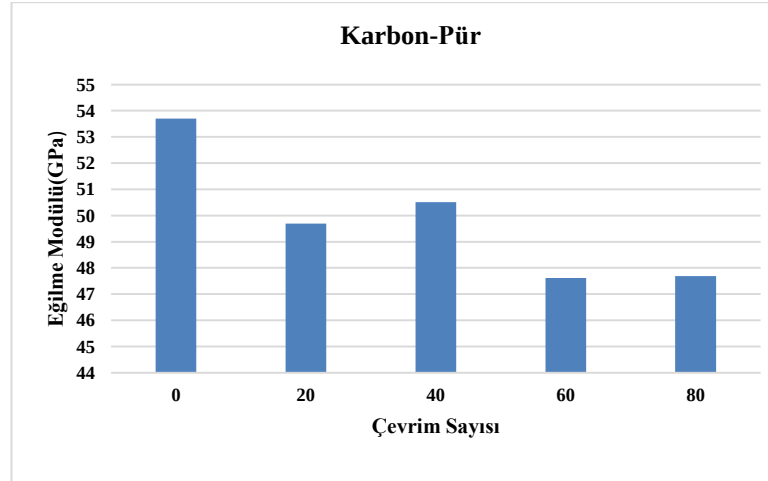
4.14. Termal yorulma olayının kompozitlerin eğilme özelliklerinde ortaya çıkardığı etkiler

4.14.1. Karbon pür

Karbon pür eğilme numuneleri 130 mm uzunluk, 15 mm genişlik ve 2,5 mm kalınlıkta olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde, termal çevrimin etkilerini incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin eğilme modülü ve eğilme mukavemeti ASTM D790 standardı kullanılarak bulunmuştur.

a. Eğilme Modülü

Oda sıcaklığında bulunan ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış karbon pür numunelerin eğilme modülleri Şekil 4.184’da verilen diyagramda gösterilmiştir.



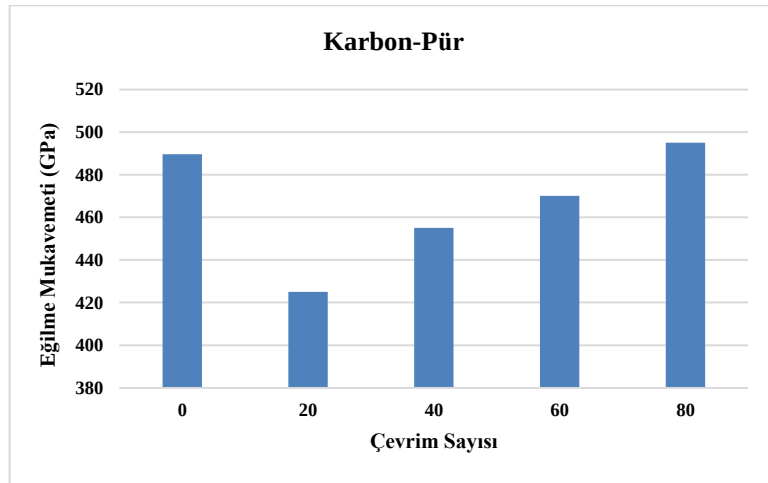
Şekil 4.184. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modülü değerleri

Deney sonuçlarına göre, karbon pür numunelerinin eğilme modül değerleri oda sıcaklığında ortalama 53,695 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldıktan sonra, elyaf malzemesi ile matris malzemesinin termal genleşme katsayısı (CTE) değerleri arasındaki farktan dolayı (epoksi için $+65 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ve karbon elyafı için $-6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), değişik sıcaklıklarda kompozit bileşenlerinin şekil değiştirme oranlarının farklı olması neticesinde (epoksi sıcaklık etkisi ile genişip ve karbon elyafı büzülür) kompozit arayüzey bölgesinde artık gerilmeler ortaya çıkarak, elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışma meydana gelmiş olup, malzemenin eğilme modülünde %7,46’lık bir düşüş ortaya çıkarak bu değer 49,69 GPa olmuştur. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile, düşük sıcaklıklardan malzemenin yapısında büzülme ortaya çıkmakta, böylece arayüzey bölgesinde meydana gelen ayrışmaları azaltarak %1,65’lik bir artışla birlikte eğilme modülü 50,51 GPa değerine yükselmiştir. Çevrimlerin 60 çevrime ulaşması sonucunda ayrışmalar artmış ve malzemenin eğilme modülü %4,2 oranında azalarak 47,61 değerine

düşmüştür. 80 çevrime yükselmesiyle birlikte ise, yüksek sıcaklıktan kaynaklanan post kürleşme olayından dolayı, malzemenin eğilme modülü %1,68’lik bir artış göstererek 47,69 GPa değerine yükselmiştir. Eğilme modülü grafiğine bakıldığında -40°C ile $+120^{\circ}\text{C}$ aralığında 80 çevrim neticesinde malzemenin eğilme modülü %11,2 oranında azalmıştır.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış karbon pür numunelerin eğilme Mukavemetleri Şekil 4.185’te bulunan diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.185. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemeti değerleri

Yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, karbon pür numunelerinin eğilme mukavemeti oda sıcaklığında ortalama 489,6 MPa olarak elde edilmiştir. Bu tür malzeme -40 ile $+120^{\circ}\text{C}$ aralığında 20 çevrime maruz bırakılarak karbon elyaf ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozit arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler ortaya çıkar. Artık gerilmeler arayüzey bölgesinde mikro çatlakların oluşmasına neden olup, çevrimlerin devam etmesi ile mikro çatlakların sayısı artar. Bu mikro çatlakların birleşmesi ile arayüzey bölgesinde delaminasyon olayı ortaya çıkar ve böylece malzemenin eğilme mukavemetinde %13,2 azalma meydana gelerek 424,96

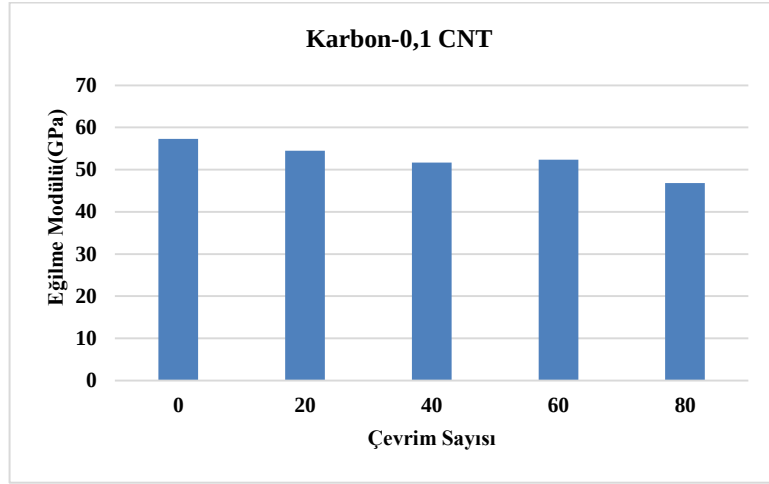
MPa değerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ile malzeme yapısında yüksek sıcaklıklardan dolayı post kürleşme olayı meydana gelir ve eğilme mukavemeti artmaya başlar. Çevrimlerin 40 çevrime armasıyla birlikte malzemenin eğilme mukavemeti %7 oranında artarak 455 MPa değerine yükselmiş olur. Çevrimlerin devam etmesi ile post kürleşme olayı devam eder ve malzemenin eğilme mukavemeti 60 ve 80 çevrim sonunda sırasıyla 470 ve 495 MPa değerlerine yükselir. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin eğilme mukavemetinde %1,1 oranında artış meydana gelmiş olur.

4.14.2. Karbon - 0,1 CNT

Karbon-0,1 CNT malzemesi karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 ve hacimsel olarak $0,7335 \times 10^{-3}$ CNT tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D790 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 2,5 mm' lik kalınlığa sahip olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal çevrimden sonra numunelerin eğilme özellikleri 3-nokta eğilme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Eğilme Modülü

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,1 CNT numunelerin eğilme modül değerleri Şekil 4.186'da bulunan grafikte gösterilmiştir.



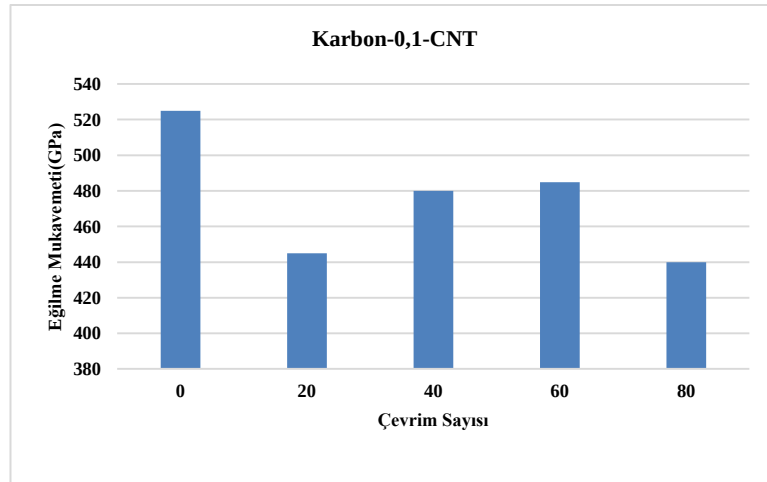
Şekil 4.186. Karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

ASTM D 790 standardına göre yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, karbon-0,1 CNT numunelerinin eğilme modül değerleri oda sıcaklığında ortalama 57,28 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime tabii tutulduğunda elyaf malzemesi ile nano dolgulu matris malzemesinin CTE değerlerinin farklı olmasından dolayı kompozit arayüzeyinde artık gerilmeler oluşur ve elyaf ile matris malzemesi arasındaki çapraz bağların kırılmasıyla birlikte kompozitin eğilme modülünde %4,88’lik bir düşüş ortaya çıkarak 54,48 GPa değerine varır. Bu düşüş karbon pür malzemesi için %7,46 oranında olduğuna göre, eğilme modülü konusunda karbon-0,1 CNT’ nin daha iyi bir performans sergilediği ortaya çıkmaktadır. Bu olayın nedeni karbon-0,1 CNT malzemesinde kompozitin reçinesine CNT taneciklerinin eklenmesi ile birlikte malzemenin CTE’ sinin azalması ve böylece elyaf ile matris malzemesinin daha yakın CTE değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime varması ile arayüzeyde meydana gelen termal gerilmelerin artması ile malzemenin eğilme modülünde %5,16 oranında azalma meydana gelir. 60 çevrim sonunda, düşük sıcaklıklarda ortaya çıkan büzülme ve ardından mikro çatlakların basma gerilmesi etkilerinin azalmasından dolayı malzemenin yapısında eğilme modülü 52,365 GPa değerine varmasıyla birlikte %1,3’ lük bir artış gösterir. Neyse ki çevrimin 80 sayısına varması ile malzeme yeniden yüksek sıcaklıklara maruz kalarak basma gerilmelerin etkisi azalır, malzemenin eğilme modülü

%10,57 oranında azalarak 46,83 GPa değerine düşmüştür. Eğilme modülünün grafiğine bakıldığında -40 ile +120°C aralığında 80 çevrim neticesinde malzemenin eğilme modülünde %18,23 oranında bir azalma gözlenmiştir. Halbuki bu azalma oranı karbon pür malzemesi için %11,2 olarak bulunmuştur. Eğilme modülünün 80 çevrim sonucunda karbon-0,1 CNT malzemesinde daha fazla azalmasının nedeni çevrimlerin artması ile CNT nano partiküllerle epoksi arayüzeyinde artık gerilmelerinin artması ile bu bölgede ayrışma olayının meydana gelmesi olarak tahmin edilmiştir.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,1 CNT numunelerin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.187’de verilen grafikte bulunmaktadır.



Şekil 4.187. Karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

Üç-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, karbon-0,1 CNT malzemesinin eğilme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 524,99 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında karbon takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde temasta

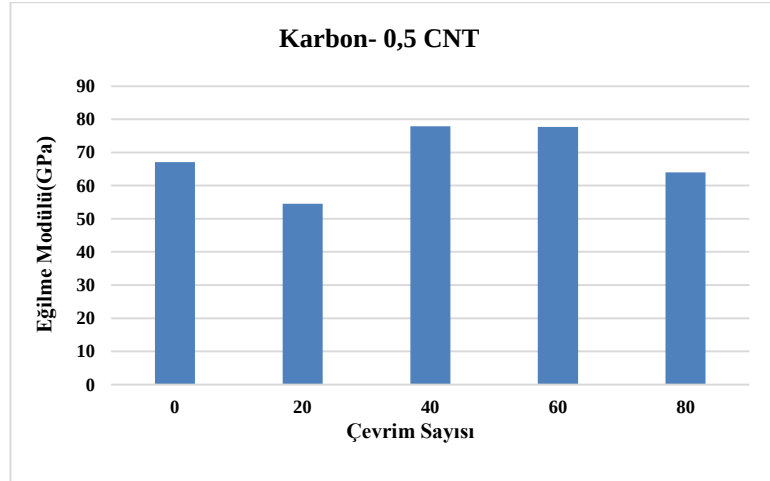
bulunan malzemelerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu gerilmeler matris ile elyaf arasındaki çapraz bağlarının kırılmasına neden olarak çapraz bağların azalmasına neden olmuştur ve böylece elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışma ortaya çıkarak malzemenin eğilme mukavemeti %15,24 oranında azalmasıyla birlikte 444,96 MPa değerine düşmüştür. Çevrimin devam etmesi ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelerek malzemenin eğilme mukavemeti %7,3 oranında artmış ve 480 MPa değerine yükselmiştir. Çevrimlerin devam etmesi ile post kürleşme olayı şiddetlenmiş ve malzemenin eğilme mukavemeti %0,99' lük bir artış göstererek 484 MPa değerine varmıştır. Çevrimlerin devam etmesi ile arayüzey bölgesinde artık gerilmeler artmış olup, post kürleşme olayının etkisini azaltarak 80. çevrimde malzemenin eğilme mukavemetini %9 oranında azaltarak 440 MPa değerine düşmesine sebep olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre karbon-0,1 CNT malzemesinin 80 çevrim esnasında eğilme mukavemetinde %16,19 oranında düşüş meydana gelmiştir. Bu yüksek miktarda düşüşün nedeni CNT taneciklerle epoksinin CTE değerlerinin yüksek oranda farkından ve yüksek sıcaklıklarda bu bölgelerde takviye fazının reçineden ayrışma nedeni ile kompozitin içyapısında ortaya çıkan gözeneklerden olabileceği tahmin edilmektedir.

4.14.3. Karbon-0,5 CNT

Karbon-0,5 CNT malzemesi karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 ve hacimsel olarak $3,671 \times 10^{-3}$ CNT tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri, 15mm genişlik ve 2,5 mm' lik kalınlığa sahip olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal çevrimden sonra Malzemenin eğilme modülü ASTM D790 standardına uygun 3-nokta eğilme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Eğilme modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 CNT numunelerin eğilme modül değerleri Şekil 4.188’de bulunan grafikte gösterilmiştir.



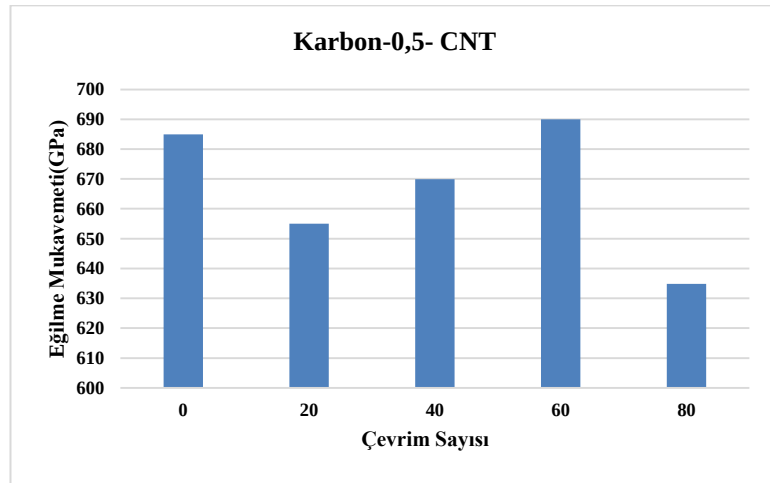
Şekil 4.188. Karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

Eğilme deney sonuçlarına göre, karbon-0,5 CNT malzemesinin eğilme modülü oda sıcaklığında ortalama 67,1 GPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemedan üretilen numunelerin -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim sonrası eğilme modülü %18,71 oranında düşerek 54,54 GPa değerine varmıştır. Eğilme modülünün ani düşüş nedeni yüksek oranda CNT nano taneciklerin eklenmesi ile reçinede tanecik topaklanma oranının artması ve oluşan topakların boyutlarının artmasından dolayı matris ile nano dolgu arayüzeyinde daha büyük artık gerilmelerin ortaya çıkması ve bu bölgelerde gerilme yığılma oranının artması olarak açıklanmıştır. Hâlbuki bu düşüş miktarı karbon-0,1 CNT numunelerde %4,88 oranındadır. 20 çevrim sonunda malzemenin eğilme modül değeri 54,54 GPa olarak ölçülmüştür. Çevrimlerin 40 çevrime varmasıyla birlikte yüksek sıcaklıktan dolayı kompozitin yapısında post kürleşme olayı meydana gelip, kompozitin eğilme modülünü %29,96 oranında artırması ile birlikte 77,87 GPa değerine kadar yükseltmiştir. Çevrimlerin artması ile post kürleşme olayının etkisi hafiflemiş ve malzemenin eğilme modülü 60 çevrim sonunda %0,16 oranında azalarak 77,74 GPa

değerine gelmiştir. Çevrim sayılarının artması ile arayüzey bölgesinde termal gerilmeler artmış ve eğilme modülü 80 çevrim sonunda %17,67 oranında azalarak 60 MPa değerine düşmüştür. Şekil 4.188’de verilen grafiğin değerlerine bakılırsa malzemenin 80 çevrim sonunda eğilme modülünde %4,62 oranında düşüşün meydana geldiği anlaşılr.

b. Eğilme mukavemeti

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 CNT numunelerin eğilme mukavemeti Şekil 4.189’da bulunan grafikte verilmektedir.



Şekil 4.189. Karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

ASTM D790 standardına göre yapılan eğilme deney sonuçlarına göre, karbon-0,5 CNT malzemesinin eğilme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 684,96 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemenin deney numuneleri -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kalması ile kompozit yapısında bileşen malzemelerin CTE değerlerinin uyumsuzluğu nedeni ile, sıcaklığın artması ile karbon elyafın CTE’ sinin negatif olduğundan dolayı bu malzemede büzülme ve tam tersi epoksi malzemesinde CTE’ değerinin pozitif ve büyük bir değere sahip olduğundan dolayı genleşme olayı meydana gelir. Çapraz bağlarla sıkıca tutulan iki malzemenin temas bölgesinde

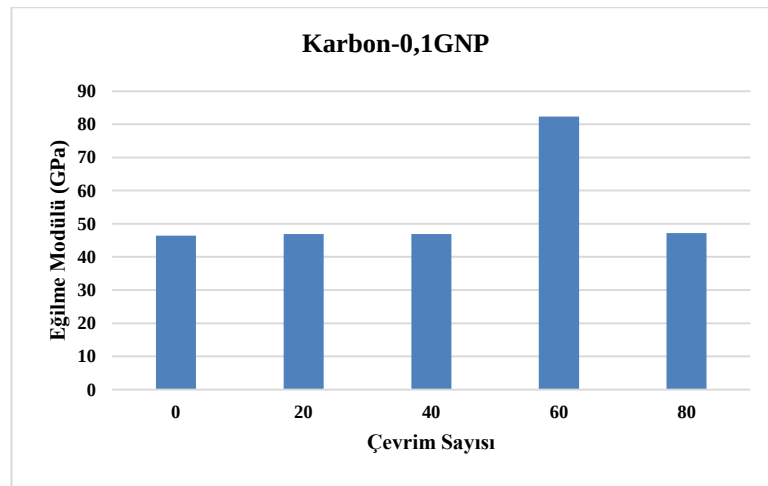
bileşenlerin ters olarak şekil değiştirmesi, arayüzey bağlarını zorlayarak kırılmalarına neden olur. Böylece 20 çevrim sonucunda kompozitin eğilme mukavemeti %4,37 oranında azalmakla birlikte 655,04 MPa değerini bulur. Çevrim sayılarının artması ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelerek çapraz bağların sayısı artar ve böylece 60 çevrim sonunda kompozitin eğilme mukavemetinde %2,99 oranında artış meydana gelir ve 690 MPa değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ve malzemenin sürekli termal gardiyana maruz kalması arayüzeydeki elyaf ile matris uyumsuzluklarını artırmasıyla birlikte gerilme yığılmasının artmasına neden olur ve böylece 80 çevrim sonunda malzemenin eğilme mukavemetinde %7,99'lük bir düşüş ortaya çıkarak, malzemenin bu özelliği 634,88 MPa değerine düşer. Şekil 4.189'da verilen grafiğe dikkat edilirse 80 çevrim sonunda malzemenin eğilme mukavemetinin %7,31 oranında azalması gözlemlenir. Bu malzemede 80 çevrim sonucunda meydana gelen düşüşler, karbon-0,1 CNT malzemesinin sonuçları ile karşılaştırıldığında (%16,19 düşüş) karbon-0,5 CNT'nin daha iyi bir performans sergilediğini ortaya çıkar. Bu olay CNT taneciklerin oranlarının matris malzemesinde artmasıyla, CTE değerinin daha fazla düşürmesi ve böylece arayüzeyde elyaf ile matris uyumsuzluğunun azalmasından kaynaklanmaktadır.

4.14.4. Karbon-0,1 GNP

Karbon-0,1 GNP malzemesi karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 ve hacimsel olarak $1,07 \times 10^{-3}$ GNP tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D790 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 2,5 mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu malzemenin eğilme özelliklerinde termal çevrim nedeni ile ortaya çıkan değişimleri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal yorulma etkisine tabii tutulan numunelerin eğilme özelliklerinin incelenmesi amacıyla numuneler üç-nokta eğilme deneyi kullanılarak test edilip, malzemenin eğilme modülü ve eğilme mukavemeti elde edilecektir.

a. Eğilme modülü

Oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,1 GNP numunelerin eğilme modül değerleri Şekil 4.190’da verilmiştir.



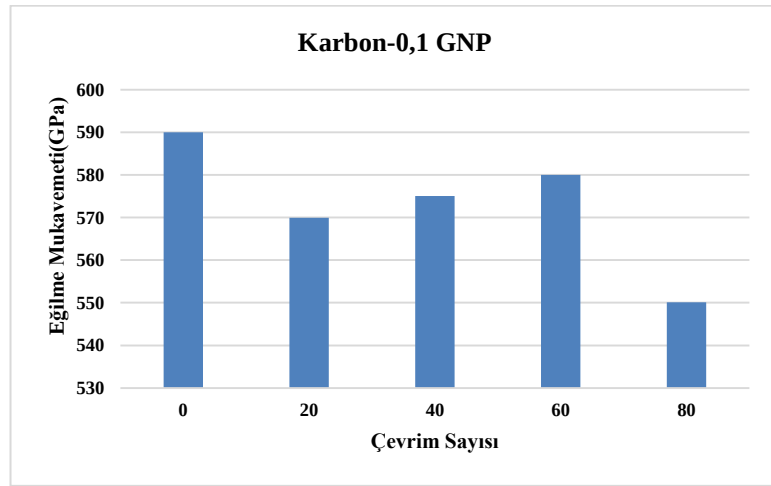
Şekil 4.190. Karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

ASTM D 790 standardına göre yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, karbon-0,1 GNP malzemesinin eğilme modül değeri oda sıcaklığında ortalama 46,45 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldığında yüksek sıcaklıktan dolayı yapısında çok hafif oranda post kürleşme meydana gelir. Bu olay malzemenin eğilme modülünde %1,04’ lük bir artışa neden olmakla birlikte bu parametrenin değerini 46,94 GPa değerine artırır. Çevrimin devam etmesi ve 40 sayısına gelmesi ile malzemenin eğilme modülünde her hangi bir değişim söz konusu olmaz. Çevrimlerin ilerlemesi ile 60 çevrim sonunda kompozitin yapısında yüksek oranda post kürleşme ortaya çıkıp, malzemenin eğilme modülü %42,95 oranında artarak 82,28 GPa değerine yükselir. Çevrimlerin 80 çevrime artması sonucunda, yüksek sıcaklıklardan dolayı kompozit arayüzeyinde meydana gelen artık gerilmeler artar ve malzemenin eğilme modülünde %42,66’lık bir düşüş meydana gelmekle birlikte bu değer 47,18 GPa değerine düşer. Karbon-0,5 GNP termal çevrim grafiği göz önüne

alınırsa 80 çevrim sonucunda malzemenin eğilme modülünde %1,56'lık bir artışın ortaya çıkması gözlemlenmiştir.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,1 GNP malzemesinin eğilme Mukavemetleri Şekil 4.191'de bulunan diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.191. Karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

Üç-nokta eğilme deney sonuçlarına bakıldığında, karbon-0,1 GNP malzemesinin eğilme mukavemeti oda sıcaklığında ortalama 590 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden olan numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında karbon takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde, temasta bulunan bileşenlerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu gerilmeler matris ile elyaf arasındaki çapraz bağların kırılmasına neden olarak çapraz bağların azalmasıyla birlikte elyaf ile matris malzeme arasında ayrışma ortaya çıkarır ve böylece malzemenin eğilme mukavemetini %3,40 oranında azalarak 569,92 MPa değerine düşürür. Çevrimlerin devam etmesi ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve malzemenin eğilme

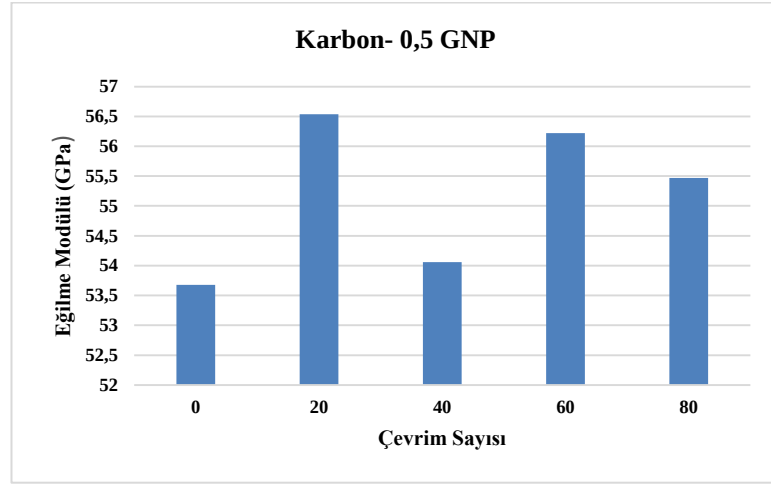
mukavemeti %0,89 oranında artarak 575,04 MPa değerine yükselir. Çevrim sayılarının artması post kürleşme olayını şiddetlendirir ve malzemenin eğilme mukavemetini %0,85 oranında artırarak 580 MPa değerine yükseltir. Çevrimlerin 80 sayısına artmasıyla arayüzey bölgesinde artık gerilmeler artar ve post kürleşme olayı etkileri azalır ve böylece malzemenin eğilme mukavemetinde %5,17 oranında azalma ortaya çıkması ile birlikte 550,08 MPa değerine düşmesine neden olur. Elde edilen sonuçlara göre karbon-0,1 GNP malzemesinin 80 çevrim sonunda eğilme mukavemetinde %6,78'lik bir düşüş meydana gelmiştir.

4.14.5. Karbon - 0,5 GNP

Karbon-0,5 GNP malzemesi karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 ve hacimsel olarak $3,671 \times 10^{-3}$ GNP tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D790 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 2,5 mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal çevrimden sonra malzemenin eğilme modülü ASTM D790 standardına uygun 3-nokta eğilme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Eğilme modülü

Oda şartları ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 GNP numunelerin eğilme modül değerleri Şekil 4.192'de verilen grafikte gösterilmiştir.

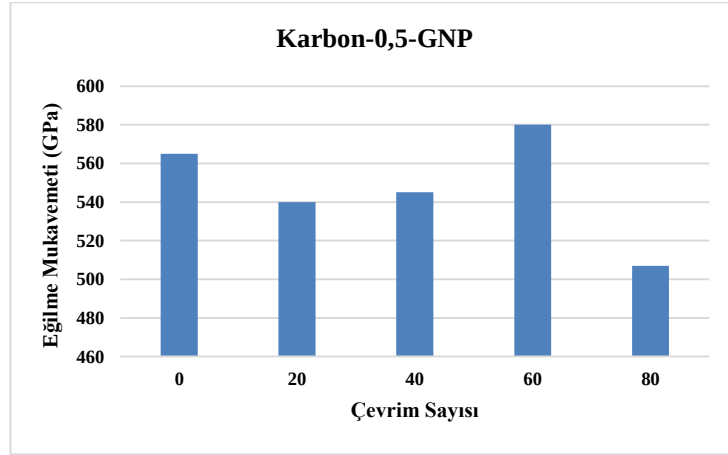


Şekil 4.192. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

Eğilme deney sonuçlarına göre, karbon-0,5 GNP malzemesinin eğilme modülü oda sıcaklığında ortalama 53,68 GPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemeden üretilen numunelerin eğilme modül değeri -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim sonrası %5,33 oranında artmakla birlikte 56,535 GPa değerine yükselmiştir. Eğilme modülünün ani artma nedeni malzemenin ısıtılması ile gevrekleşmesinden kaynaklanmakta olabilir. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın sürekli değişimi kompozitin arayüzeyinde oluşan artık gerilmeleri artırır ve böylece 40 çevrim sonunda malzemenin eğilme modülü %4,53 oranında düşmekle birlikte 54,06 GPa olur. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın artması ile post kürleşme olayı artık gerilme etkilerine galip gelerek kompozitin eğilme modülünü %4,11 oranında artırarak 56,22 GPa değerine yükseltir. Çevrim sayılarının artması ile kompozitin arayüzeyinde ayrışma meydana gelir ve malzemenin eğilme modülü %1,33 oranında azalarak 55,47 GPa değerine düşer. Şekil 4.192’de verilen grafiğin değerlerine bakılırsa malzemenin 80 çevrim sonunda eğilme modülünde %3,34’ lük bir artışın meydana geldiği anlaşılır.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 GNP malzemesinin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.193'ta verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.193. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

Yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, karbon 0,5 GNP numunesinin eğilme mukavemeti oda sıcaklığında ortalama 564,96 MPa olarak elde edilmiştir. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda takviye fazı ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozit arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler oluşur. Artık gerilmelerin arayüzey bölgesinde artması elyaf ile matris arasındaki gerilme geçirgenliğini azaltarak arayüzey bölgesindeki gerilme yığılmasını daha da artırır ve kompozitin eğilme mukavemetinin düşmesine neden olur. Bu nedenle 20 çevrim sonrası kompozitin eğilme mukavemeti %4,62 oranında azalarak 540MPa değerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ile birlikte 40 çevrime sonunda kompozitin yapısında post kürleşme olayından dolayı %0,93'lük bir artış meydana gelir ve malzemenin eğilme mukavemeti 545,12 MPa değerine artar. Yüksek sıcaklıktan dolayı çevrim sayılarının artması ile post kürleşme oranı artar ve kompozitin eğilme mukavemetini %6,40 oranında artırarak 580 MPa değerine kadar yükseltir. Çevrimlerin artması ile elyaf ve reçine malzemesinin CTE uyumsuzluğundan dolayı kompozit yapısında meydana gelen artık gerilmeler artar ve gerilme yığılmasına neden olur.

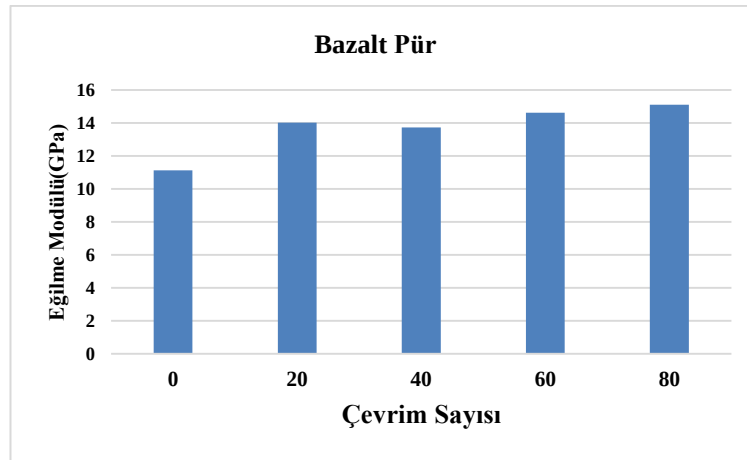
Gerilme yığılmasının ortaya çıktığı bölgelerde matris ile elyaf malzemesinin ayrışmasından dolayı eğilme mukavemetinde %12,60 oranında düşüş meydana gelmekle birlikte bu değer 506,88 MPa olur. Böylece 80 çevrimin sonunda malzemenin eğilme mukavemetinde %11,46'lık bir düşüş meydana gelmiş olur.

4.14.6. Bazalt pür

Bazalt pür numuneleri 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 2 mm'lik kalınlıkta olup, %60 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin eğilme modülü ve eğilme mukavemeti ASTM D790 standardına göre yapılmıştır.

a. Eğilme Modülü

Oda sıcaklığında bulunan ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt pür numunelerin eğilme modülleri Şekil 4.194'te bulunan diyagramda gösterilmiştir.

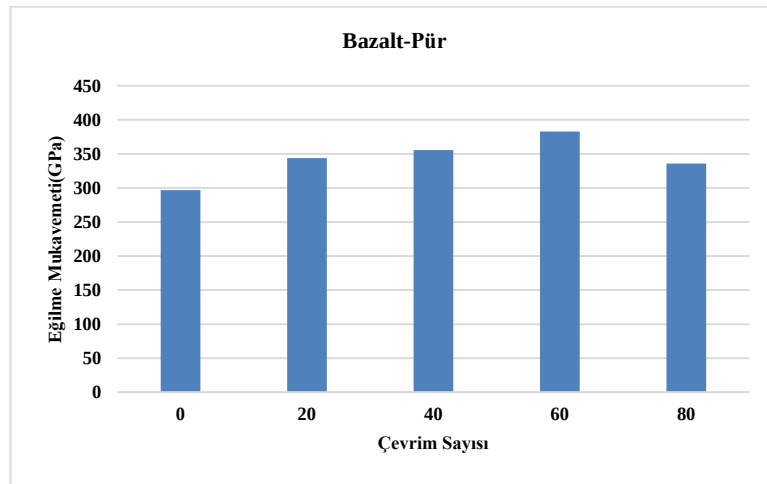


Şekil 4.194. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modülü

Deney sonuçlarına bakıldığında, bazalt pür numunesinin oda sıcaklığında eğilme modül değerleri ortalama 11,11 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldığında yüksek sıcaklıktan dolayı yapısında post kürleşme meydana gelerek eğilme modülü %26,10 oranında artmakla birlikte, 14,01GPa değerine ulaşır. Çevrimlerin devam etmesi ve 40 çevrime gelmesi ile malzeme yüksek sıcaklık etkisi ile gevrekleşip, eğilme modülünde %2,06'lık hafif bir azalma ortaya çıkarak 13,72 GPa değerine düşer. Çevrim sayılarının artması ve 60 ile 80 sayısına varması ile malzemenin elastisite modülü post kürleşme nedeni ile sırasıyla %6,09 ve %3,18 oranında artarak 14,61 ve 15,09 GPa değerlerine varır. Böylece bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozitin eğilme modülünde 80 çevrim sonunda %26,37 oranında artış meydana gelmiş olur.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-pür malzemesinin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.195'te verilen diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.195. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

Yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt pür numunelerinin eğilme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 297 MPa olarak elde edilmiştir. Bu

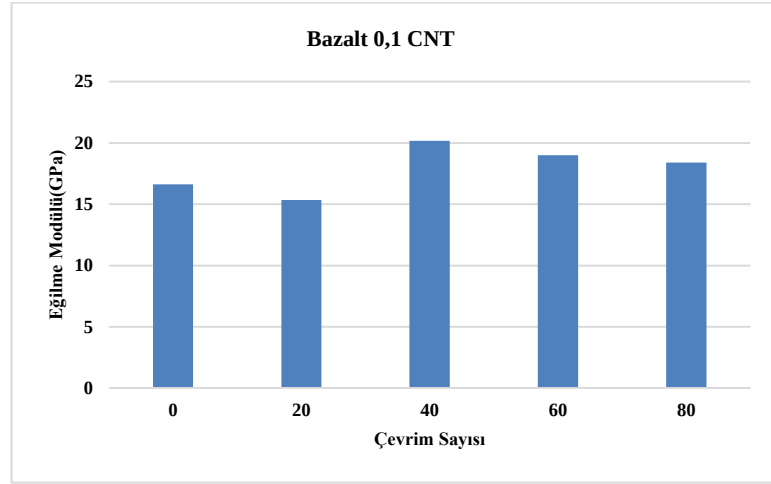
malzemedan üretilen numuneler -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz kaldığında yapısında post kürleşme olayından dolayı eğilme mukavemetinde %15,74'lük bir artış ortaya çıkar ve 343,75 MPa değerine yükselir. Çevrim sayılarının artması ile post kürleşme devam eder ve kompozitin eğilme mukavemeti 40 ve 60 çevrim süresinde sırasıyla %3,42 ve 7,12 oranında artış ile birlikte 355,5 ve 382,75 MPa değerlerine yükselir. Sıcaklığın sürekli değişimi, bazalt elyaf ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozit arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler ortaya çıkarır. Artık gerilmeler arayüzey bölgesinde mikro çatlakların oluşmasına neden olur. Çevrimlerin devam etmesi ile mikro çatlakların sayısı artar ve birleşerek arayüzey bölgesinde delaminasyon olayını ortaya çıkarır. Bu durumda malzemenin eğilme mukavemeti %12,1'lik azalmayla birlikte 336 MPa değerine düşer. Böylece 80 çevrim sonunda malzemenin eğilme mukavemetinde %13,13 oranında artışın meydana geldiği ortaya çıkar.

4.14.7. Bazalt-0,1 CNT

Bazalt-0,1 CNT malzemesi bazalt elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 ve hacimsel olarak $0,7335 \times 10^{-3}$ CNT tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadırlar. Bu malzemenin numuneleri ASTM D790 standardına göre 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 2 mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal çevrimden sonra numunelerin eğilme özellikleri 3-nokta eğilme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Eğilme Modülü

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 CNT numunelerin eğilme modül değerleri Şekil 4.196'da bulunan grafikte gösterilmiştir.

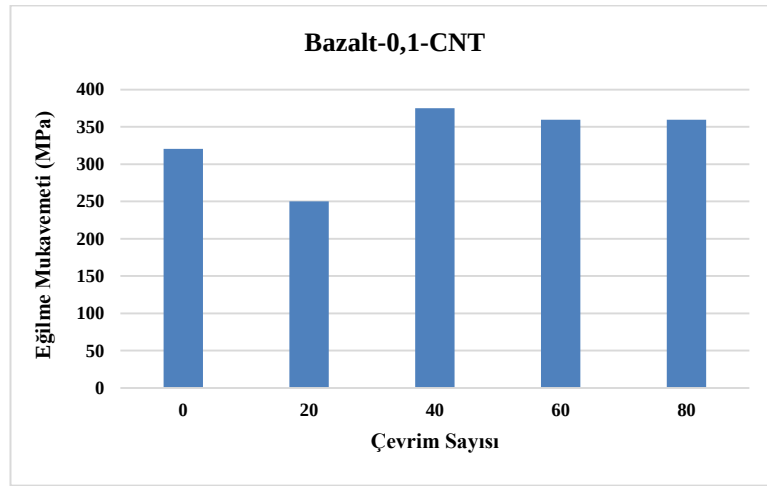


Şekil 4.196. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

ASTM D 790 standardına göre yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,1 CNT numunelerinin eğilme modül değerleri oda sıcaklığında ortalama 16,63 GPa olarak belirlenmiştir. Bu malzemeler -40 ile +120 °C aralığında 20 adet termal çevrime tabii tutulduklarında elyaf malzemesi ile nano dolgulu matris malzemesinin CTE değerlerinin farklı olmasından dolayı kompozit arayüzeyinde artık gerilmeler oluşur ve böylece kompozitin eğilme modülünde %7,82’lik bir düşüşle birlikte bu değer 15,328 GPa olur. Çevrimlerin 40 çevrime varması ile yüksek sıcaklıklardan dolayı kompozit yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve böylece malzemenin eğilme modülünde %31,52’lik bir artış meydana gelerek bu değer 20,16 GPa olur. Çevrimlerin devam etmesi ile sıcaklık sürekli olarak değişir ve bileşenlerin CTE uyumsuzluğundan dolayı kompozitin arayüzey bölgesinde termal gerilmeler ortaya çıkar ve bu artık gerilmeler malzemenin elastisite modülünü %6,1 oranında düşürerek 19 GPa değerine indirger. Çevrimlerin devam etmesi arayüzeyde meydana gelen gerilme yığılmasını artırır ve kompozitin eğilme modülünü %3,21 oranında azaltarak 18.39 GPa değerine düşürür. Elde edilen sonuçlara göre bazalt-0,1 CNT kompozitin eğilme modülünün 80 çevrim sonucunda %10,59 oranında arttığı ortaya çıkmaktadır.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 CNT numunelerin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.197’da bulunan grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.197. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

Üç-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,1 CNT malzemesinin eğilme mukavemeti değerleri oda sıcaklığında ortalama 320,5 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında bazalt takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde temasta bulunan malzemelerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkmış ve böylece kompozitin eğilme mukavemeti %22 oranında azalarak 250 MPa değerine düşmüştür. Çevrimlerin devam etmesi ve malzemenin yüksek sıcaklığa maruz kalması kompozitin yapısında post kürleşme olayının ortaya çıkmasına neden olur ve eğilme mukavemetini %50 artırarak 375MPa değerine yükselmesine neden olur. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın sürekli değişmesi ile arayüzey bölgesinde oluşan artık gerilme oranı artarak gerilme yığılmasından dolayı malzemenin mukavemeti 60 ve 80 çevrim sonunda sırasıyla %4,17 ve 0.035 azalmakla

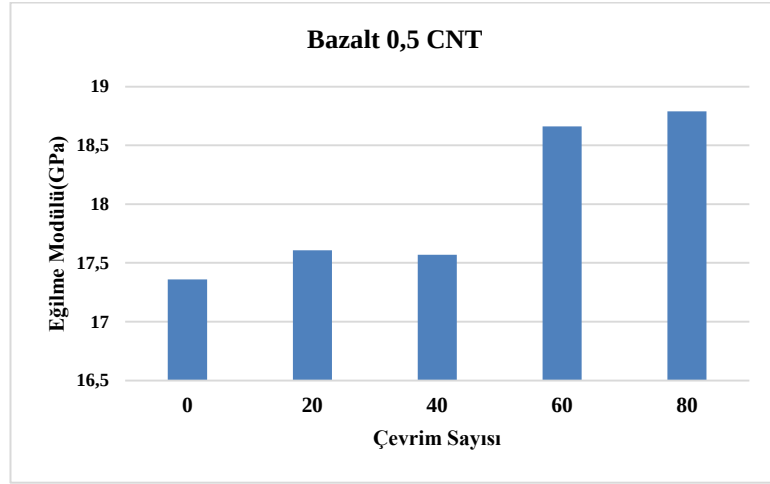
birlikte 359,375 ve 359,25MPa değerlerine düşer. Elde edilen sonuçlara göre bazalt-0,1 CNT malzemesinin 80 çevrim esnasında eğilme mukavemetinde %12,09'luk bir artış meydana gelmiştir. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozit malzemesinin CNT taneciklerinin artışıyla termal çevrim karşısında daha iyi performans göstermesinin nedeni CNT nano taneciklerin düşük CTE değerlerinden ve bu taneciklerin kompozitin matrisine eklenmesi ile reçine malzemesinin CTE değerine düşürerek bileşenlerin CTE farkını azalttığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu taneciklerin yüksek eğilme mukavemetine sahip olmaları ve kompozitin reçinesine eklenmeleri ile kompozitin eğilme mukavemetinin artmasına neden olmaktadır.

4.14.8. Bazalt-0,5 CNT

Bazalt-0,5 CNT malzemesi bazalt elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 ve hacimsel olarak $3,671 \times 10^{-3}$ CNT tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 2mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal çevrimden sonra malzemenin eğilme modülü ve mukavemeti ASTM D790 standardına uygun 3-nokta eğilme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Eğilme modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 CNT numunelerin eğilme modülleri Şekil 4.198'de verilen grafikte gösterilmiştir.

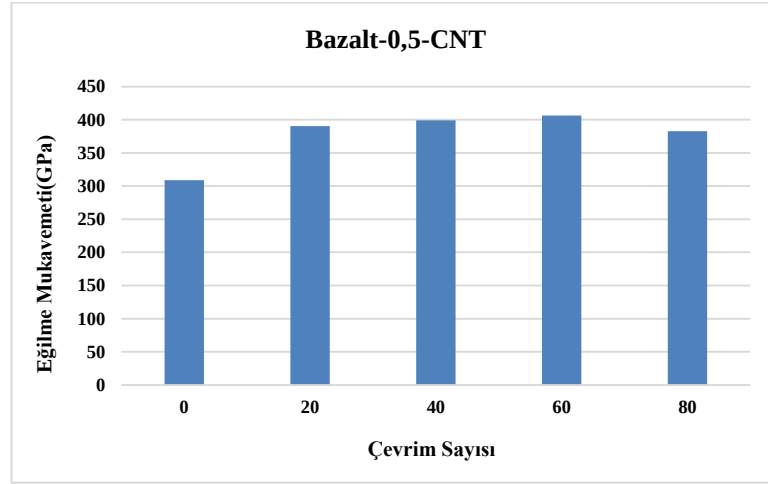


Şekil 4.198. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

Eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,5 CNT malzemesinin eğilme modül değerleri oda sıcaklığında ortalama 17,36 GPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemedan üretilen numunelerin eğilme modülü -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim sonrası %3,15 oranında azalarak 16,83 GPa değerine varmıştır. Bu durum sıcaklığın değişiminden dolayı malzemenin arayüzey bölgesinde artık gerilme yığılmasının oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çevrimin devam etmesi ve malzemede sıcaklığın artması ile kompozitte post kürleşme olayı ortaya çıkar ve arayüzeyde çapraz bağların sayısını artırıp ve malzemenin mukavemetini 40, 60 ve 80 çevrim sonrasında sırasıyla %4,21, %5,84 ve %0,7 oranında artırarak 17,57, 18,66 ve 18,79 GPa değerine yükseltir.

b. Eğilme mukavemeti

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 CNT numunelerin eğilme mukavemeti Şekil 4.199’da bulunan grafikte verilmektedir.



Şekil 4.199. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

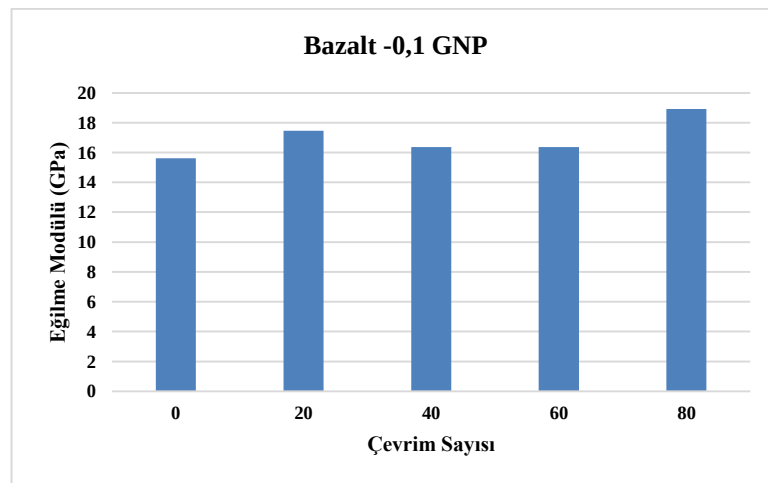
ASTM D790 standardına göre yapılan eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,5 CNT malzemesinin eğilme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 308,75 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemeden üretilen deney numunelerinin -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kalması ile yüksek sıcaklıktan dolayı kompozitin yapısında ortaya çıkan post kürleşme nedeni ile eğilme mukavemeti artmaya başlar ve 20 çevrim sonunda 390.5 değerine yükselir. Çevrim sayılarının devam etmesi ve sıcaklığın daha da artması ile post kürleşme olayı devam eder ve malzemenin eğilme mukavemeti 40 ve 60 çevrim sonunda sırasıyla %2,18 ve %1,78 oranında artarak 399 ve 406,25 MPa değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ile sürekli sıcaklık değişiminden dolayı kompozit arayüzeyinde artık gerilmeler artar ve mikro çatlaklar ortaya çıkar. Çevrim sayısının 80 âdete varması ile kompozit arayüzeyinde mikro çatlaklardan dolayı ayrışma meydana gelir ve böylece malzemenin mukavemeti %6,14 oranında düşerek 382,75 MPa değerine gelmiş olur. Deney sonuçlarına bakıldığında 80 çevrim sonunda malzemenin eğilme mukavemetinin %23,97 oranında artmış olduğu gözlemlenmiştir.

4.14.9. Bazalt-0,1 GNP

Bazalt-0,1 GNP malzemesi bazalt elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 ve hacimsel olarak $1,07 \times 10^{-3}$ GNP tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D790 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 2mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 bazalt elyafı içermektedirler. Bu malzemenin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı ortaya çıkan değişimleri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal yorulma tabii tutulan numunelerin eğilme özelliklerini bulmak için numuneler üç-nokta eğilme deneyi kullanılarak test edilmişler ve böylece malzemelerin eğilme modülü ve eğilme mukavemeti elde edilmiştir.

a. Eğilme modülü

Oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 GNP numunelerin eğilme modül değerleri Şekil 4.200'de verilmiştir.

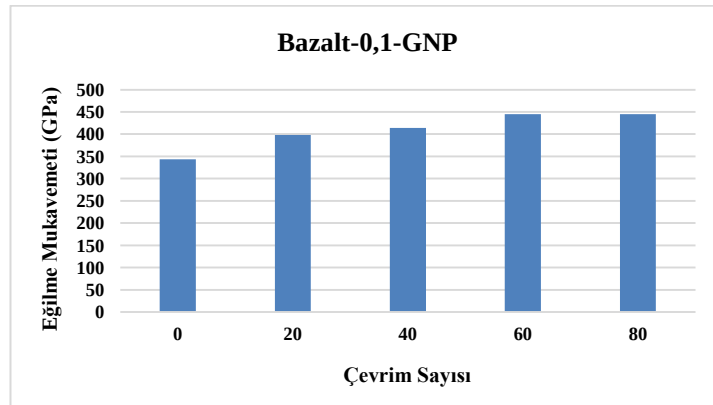


Şekil 4.200. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

ASTM D 790 standardına göre yapılmış olan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,1 GNP malzemesinin eğilme modülü oda sıcaklığında ortalama 14,61 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldığında yüksek sıcaklıktan dolayı kompozit yapısında post kürleşme meydana gelir ve çapraz bağların sayısı artmaya başlar. Bu olay malzemenin eğilme modülünde %11,82'lük bir artışa neden olarak bu parametrenin değerini 17,455 GPa değerine artırır. Çevrim sayılarının artması kompozit arayüzey bölgesinde oluşan artık gerilmelerin oranını artırarak eğilme modülünü 40 çevrim sonunda %6,30 oranında düşürmekle birlikte 16,355 GPa değerine indirger. Çevrimin devam edip, 60 sayısına gelmesi ile post kürleşme ve CTE uyumsuzluğundan dolayı kompozit yapısında ortaya çıkan ayrışma olayı eşdeğer bir etki ortaya çıkarıp, malzemenin eğilme modülünde her hangi bir değişim söz konusu olmaz. 80 çevrim sonunda kompozitin yapısında post kürleşme ortaya çıkarak malzemenin eğilme modülünü %15,62 artırmakla birlikte 18,91 GPa değerine varmasını sağlar. Bazalt-0,1 GNP termal çevrim grafiği göz önüne alındığında 80 çevrim sonucunda malzemenin eğilme modülünde %21,14'lük bir artışın ortaya çıktığı gözlemlenmiş olur.

b. Eğilme mukavemeti

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 GNP numunelerin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.201'de verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.201. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

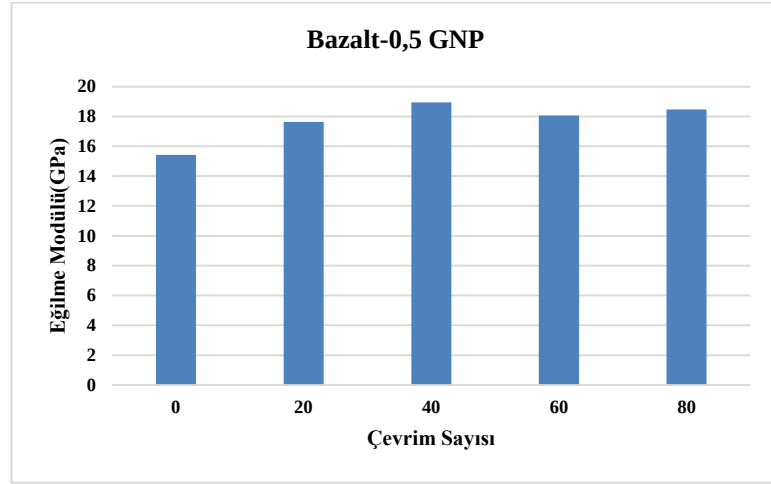
Üç-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,1 GNP malzemesinin eğilme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 343,75 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzemeden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında sıcaklığın artmasından dolayı malzeme yapısında post kürleşme meydana gelir ve kompozitin eğilme mukavemetini %15,93 oranında artırarak 398,5 MPa değerine ulaştırır. Çevrim sayısının artması ile malzeme yapısında meydana gelen post kürleşme olayı devam edip, malzemenin eğilme mukavemetini sırasıyla %3,89 ve 7,56 oranlarında artırarak 40 ve 60 çevrim sonunda 414 ve 445,3 MPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin devam etmesi ve 80 çevrime gelmesi ile kompozitin arayüzeyinde toplanan artık gerilmelerin oranı artar ve arayüzey ayrışmasına neden olur. Böylece kompozitin mukavemeti %0,24 oranında azalmakla birlikte 444,25 MPa değerine düşer. Elde edilen sonuçlara göre 80 çevrim sonunda bazalt-0,1 GNP malzemesinin eğilme mukavemetinde %29,24 oranında artış meydana gelmiştir.

4.14.10. Bazalt-0,5 GNP

Bazalt-0,5 GNP malzemesi bazalt elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 ve hacimsel olarak $3,671 \times 10^{-3}$ GNP tanecikler içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 2 mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal çevrimden sonra malzemenin eğilme özelliklerini bulmak amacıyla ASTM D790 standardına göre 3-nokta eğilme deneyi yapılmıştır.

a. Eğilme modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 GNP numunelerin eğilme modül değerleri Şekil 4.202'de bulunan grafikte gösterilmiştir.

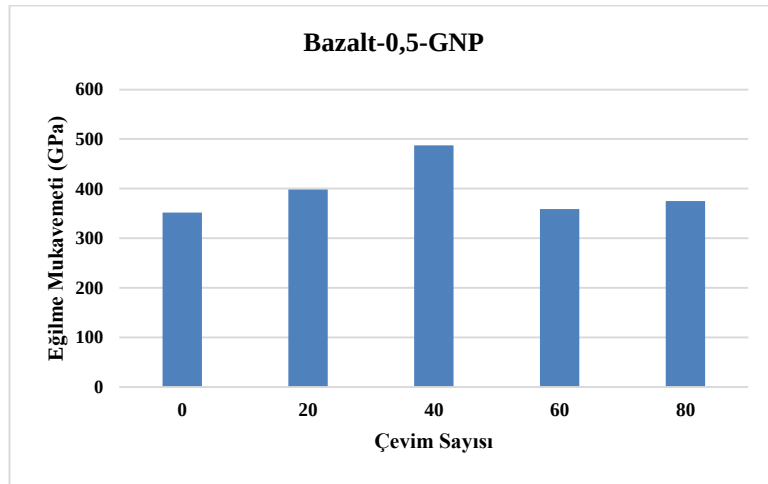


Şekil 4.202. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

Eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-0,5 GNP malzemesinin eğilme modül değerleri oda sıcaklığında ortalama 15,42 GPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemedan üretilen numunelerin eğilme modülü -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim sonrası %14,36 oranında artarak 17,634 GPa değerine yükselmiştir. Eğilme modülünün ani artma nedeni malzemenin ısıtılması ile gevrekleşmesi ve böylece eğilme modülünün artmasıdır. Eğilme modülünün değerindeki artış çevrimlerin devam etmesi ile devam eder ve 40 çevrim sonunda %7,35 oranında olmakla birlikte 18,93 GPa değerine ulaşır. Sıcaklığın sürekli değişimi kompozitin arayüzeyinde oluşan artık gerilmeleri artırır ve böylece 60 çevrim sonunda malzemenin eğilme modül değeri %4,65 oranında azalarak 18,05 GPa değerine düşer. Çevrimlerin 80 sayısına gelmesi ile sıcaklığın artmasından dolayı kompozit yapısında post kürleşme olayı artık gerilme etkilerine galip gelerek kompozitin eğilme modülünü %2,36 oranında artırmakla birlikte 18,476 GPa değerine yükseltir. Şekil 4.203 'te verilen grafiğin değerlerine bakılırsa malzemenin 80 çevrim sonunda eğilme modülünde %19,82'lik bir artışın meydana geldiği anlaşılr.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 GNP malzemesinin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.203'te verilen diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.203. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

Yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt 0,5 GNP numunesinin eğilme mukavemeti oda sıcaklığında ortalama 351,55 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda kompozitin yapısında yüksek sıcaklıklardan dolayı post kürleşme olayı meydana gelir ve malzemenin eğilme mukavemetini %13,36 oranında artırarak 398,5 MPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın artması post kürleşme olayını şiddetlendirir ve 40 çevrim sonunda %22,33 oranında artırarak 487,5 MPa değerine ulaştırır. Sıcaklık değişiminin devam etmesi ile kompozit arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler oluşur. Artık gerilmelerin arayüzey bölgesinde artması elyaf ile matris arasındaki gerilme geçirgenliğini azaltarak arayüzeydeki gerilme yığılmasını daha da artırır. Gerilme yığılmasının artması ile kompozitin eğilme mukavemeti azalır. Bu nedenle 60 çevrim sonunda kompozitin eğilme mukavemeti %26,30 oranında azalarak 359,25MPa değerine düşer. Çevrimlerin devam edip 80 çevrime geldiğinde kompozitin eğilme

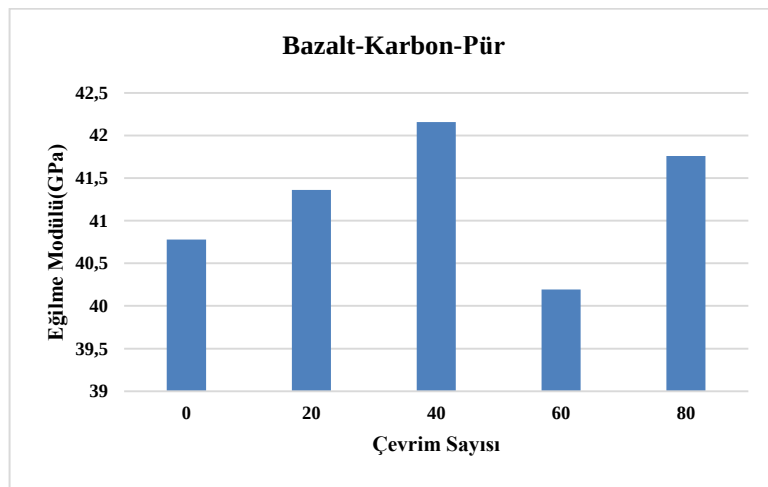
mukavemetinde post k rle me olayından dolayı %4,38’lik bir artış meydana gelir ve malzemenin eğilme mukavemeti 475 MPa değerine artar. Böylece 80  evrimin bitmesi ile malzemenin eğilme mukavemetinde %6,67’lik bir artış meydana gelmiş olur.

4.14.11. Bazalt-karbon p r

Bazalt-karbon p r numuneleri 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 3 mm’lik kalınlıkta olup ve %30 karbon ve %30 bazalt elya ı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin eğilme modülü ve eğilme mukavemeti ASTM D790 standardı kullanılarak bulunmuştur.

a. Eğilme Modülü

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon p r numunelerin eğilme modülleri  ekil 4.204’te verilen diyagramda gösterilmiştir.

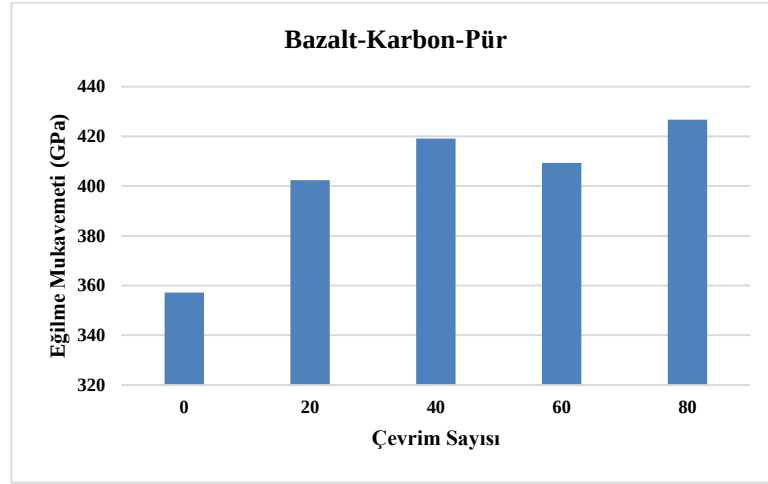


Şekil 4.204. Bazalt-karbon p r malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

Deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon pür numunelerinin eğilme modül değerleri oda sıcaklığında ortalama 40,78 GPa olarak bulunmuştur. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldıktan sonra yüksek sıcaklıklardan dolayı kompozitin yapısında post kürleşme olayı ortaya çıkarak malzemenin eğilme modülünü %1,422 oranında artırarak 41,36 GPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin devam etmesi ile post kürleşme olayı devam eder ve kompozitin eğilme modülünü 40 çevrim sonunda %1,92 oranında artırarak 42,155 GPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin devam etmesi sıcaklığın sürekli değişiminden ve bileşen elyaf malzemeleri ile matris malzemesinin CTE değerlerinde bulunduğu farktan dolayı kompozit bileşenlerinin şekil değiştirme oranlarının farklı olması neticesinde kompozit arayüzey bölgesinde artık gerilmeler ortaya çıkarak elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışma meydana gelir ve böylece malzemenin eğilme modülünde %4,65'lik bir düşüşle birlikte 40,194 GPa olur. Çevrimlerin devam etmesi ve 80 çevrime varması ile malzeme yapısında gevrekleşmeden dolayı %1,4'lük bir artış meydana gelerek eğilme modülü 41,757 GPa olur. Eğilme modülünün grafiğine bakıldığında -40 ile +120°C aralığında 80 çevrim sonunda malzemenin eğilme modülünde %3,88'lik bir artışın ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon pür numunelerin eğilme mukavemetleri Şekil 4.205'te verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.205. Bazalt-karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

Yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon pür numunelerinin eğilme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 357,198 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldıktan sonra yüksek sıcaklıklardan dolayı post kürleşme neticesinde eğilme mukavemeti %12,65 oranında artarak 402,375 MPa değerine ulaşır. Çevrimlerin devam etmesi ile post kürleşme olayı devam edip, kompozitin eğilme mukavemeti 40 çevrim sonunda %4,14 oranında artarak 419,02 MPa değerine ulaşır. Çevrim sayısının artması ve yüksek sıcaklıktan dolayı kompozit malzemesi gevrekleşir ve böylece eğilme mukavemeti %2,32 oranında düşerek 409,31 MPa olur. Çevrimlerin devam etmesi ile 80 çevrim sonunda malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve kompozitin eğilme mukavemeti %4,24 oranında artmakla birlikte 426,68 MPa olur. Deney sonucuna göre, malzemenin eğilme mukavemeti 80 çevrim sonunda %19,45 oranında artmıştır.

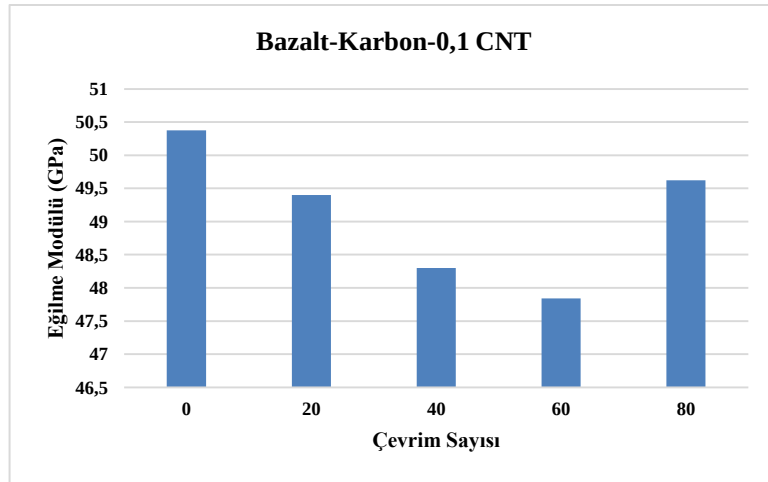
4.14.12. Bazalt-karbon - 0,1 CNT

Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesi Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 ve hacimsel olarak $0,7335 \times 10^{-3}$ CNT tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D790 standardına tabi tutularak 130

mm uzunluk, 15mm genişlik ve 3mm'lik kalınlığa sahip olup, %30 karbon ve %30 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal çevrimden sonra numunelerin eğilme özellikleri 3-nokta eğilme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Eğilme Modülü

Oda sıcaklığında bulunan, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon-0,1 CNT numunelerin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.206'da verilen grafikte gösterilmiştir.



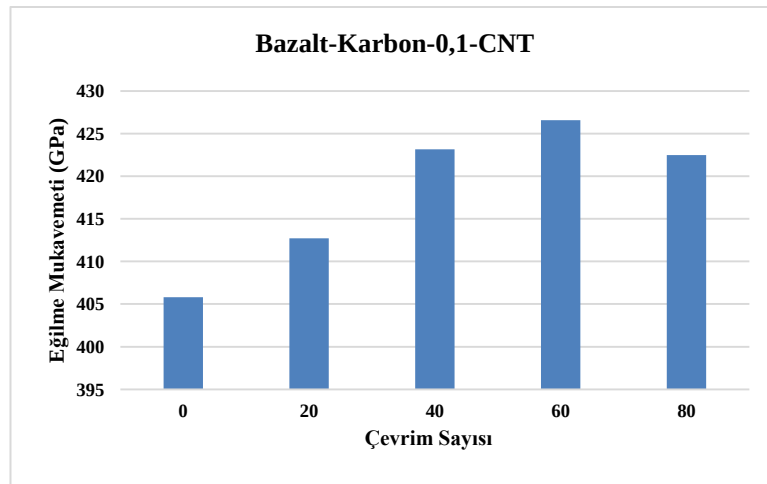
Şekil 4.206. Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

ASTM D 790 standardına tabii 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon-0,1 CNT numunesinin eğilme modülü normal şartlarda ortalama 50,376 GPa olarak belirlenmiştir. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kaldığında kompozitin tabakalar arasında termal gerilme meydana gelerek hafif ayrışma olayı ortaya çıkar ve böylece malzeme esnekleşir ve eğilme modülünde 20, 40 ve 60

çevrim sonunda sırasıyla %1,93, 2,23 ve 6,21 oranlarında bir azalma ortaya çıkarak 49,4, 48,3 ve 47,84 GPa değerine düşer. 80 çevrim sonunda malzemenin eğilme modülü düşük sıcaklıklarda yapısında ortaya çıkan büzülme ve yüksek sıcaklıkta ortaya çıkan gevrekleşme etkisi ile gevrekleşir ve böylece eğilme modül değeri %3,72 oranında artarak 49,62 GPa değerine yükselir. Şekil 4.207’de verilen grafiğe bakılırsa 80 çevrim sonunda malzemenin eğilme modülünde %1,5’luk bir düşüşün meydana geldiği görülmüş olur.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında bulunan ve 20, 40, 60, 80 çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon-0,1 CNT numunelerin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.207’de bulunan grafikte verilmiştir:



Şekil 4.207. Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

Üç-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin eğilme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 405,82 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında kompozit yapısını oluşturan tabakalar arasında hafif ayrışma ortaya çıkar. Ortaya çıkan ayrışmalar malzemenin sünekleşmesine neden olur ve böylece

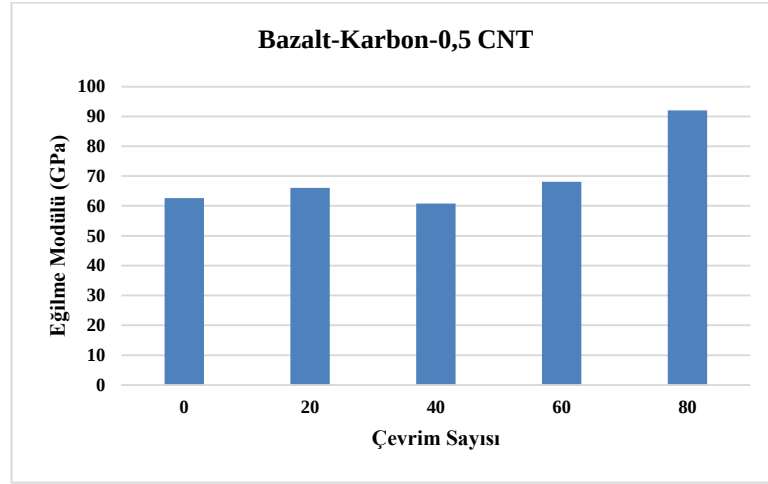
kompozitin mukavemeti artmaya başlar ve 20, 40 ve 60 çevrim sonunda %1,69, 2,53, 0,844 artarak sırasıyla 412,70, 423,13 ve 426,57 değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ile Bazalt-karbon takviye fazı ile epoksi reçinesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde bileşenler arasında farklı oranlarda şekil değiştirmelerden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu gerilmeler matris ile elyaf arasındaki çapraz bağların kırılmasına neden olmuştur. Çapraz bağların azalması sonucunda elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışma ortaya çıkıp, malzemenin eğilme mukavemeti %0,96 oranında azalarak 412,70 MPa değerine düşmüştür. Elde edilen sonuçlara göre Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin 80 çevrim esnasında eğilme mukavemetinde %4,14 oranında artmıştır.

4.14.13. Bazalt-karbon-0,5 CNT

Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesi bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 ve hacimsel olarak $3,671 \times 10^{-3}$ CNT tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D790 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 3 mm'lik kalınlığa sahip olup, %30 bazalt ve %30 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Her çevrim için ikişer numune kullanılmıştır. Malzemenin eğilme modülü termal çevrim sonrası 3-nokta eğilme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Eğilme modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 CNT numunelerin eğilme modülü değerleri Şekil 4.208'de verilen grafikte gösterilmiştir.

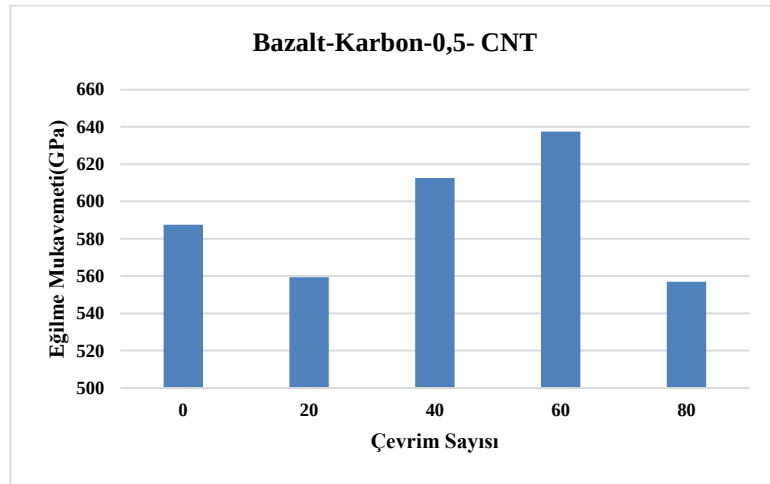


Şekil 4.208. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

Eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin eğilme modül değerleri normal şartlarda ortalama 62.62 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzemeden üretilen numunelerin eğilme modülü -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim sonrası %5,54 oranında artarak 66,088 GPa değerine yükselmiştir. Bu artış malzemenin çok yüksek ve düşük sıcaklıklara maruz kalarak gevrekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Çevrimlerin devam etmesi ile kompozit yapısında bulunan tabakalar arasında hafif ayrışma meydana gelir. Bu ayrışma malzemenin esnekleşmesine neden olur ve böylece 40 çevrim sonunda kompozitin eğilme modülü %8,01 oranında azalarak 60,79 GPa değerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile kompozit daha yüksek sıcaklıklara ve daha geniş zamanda maruz kalır ve böylece kompozitin yapısında post kürleşme olayı ortaya çıkar ve böylece eğilme modülü 60 çevrim sonunda %11,94 oranında artarak 68,05 GPa değerine ulaşır. Çevrim sayılarının artması ile malzeme yapısında gevrekleşme olur ve kompozitin eğilme modülü %35,19 oranında artarak 80 çevrim sonucu 92 GPa değerine yükselir. Şekil 4.208’te verilen grafiğin değerlerine bakılırsa malzemenin 80 çevrim sonunda eğilme modülünde %46,92 oranında bir artışın meydana geldiği gözlemlenmiştir olur.

b. Eğilme mukavemeti

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 CNT numunelerin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.209’da bulunan grafikte verilmektedir.



Şekil 4.209. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

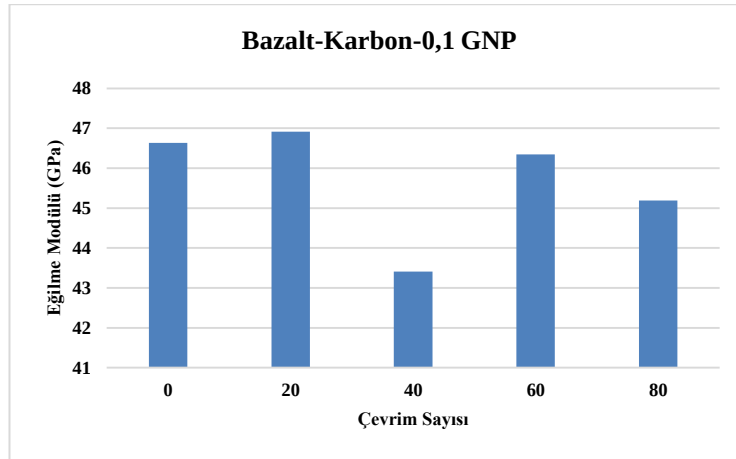
ASTM D790 standardına tabii yapılan eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin eğilme mukavemet değerleri oda sıcaklığında ortalama 587,5 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemenin deney numuneleri -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kalması ile gevrekleşme ortaya çıkar ve böylece kompozitin eğilme mukavemeti %4,78 oranında azalarak 559,4 MPa değerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile yüksek sıcaklık nedeni ile malzemede post kürleşme olayı meydana gelir ve böylece kompozitin eğilme mukavemeti artmaya başlar. Mukavemet artışı 60 çevrime kadar devam eder ve 40 ve 60 sayılı çevrim sonlarında sırasıyla %8,67 ve 4,08 oranında yükselmesi ile birlikte 612,5 ve 637,5 MPa değerlerine ulaşır. Çevrim sayılarının artması ile malzeme gevrekleşir ve bu olay kompozitin eğilme mukavemetini %12,64 oranında azaltarak 556,9 MPa değerine düşmesine neden olur. Sonuçlara göre, kompozitin 80 çevrim -40 ile +120°C aralığında termal yorulmaya maruz kalması ile kompozitin yapısında %5,21’lik bir düşüş meydana gelmiştir.

4.14.14. Bazalt-karbon-0,1 GNP

Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesi bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 ve hacimsel olarak $1,07 \times 10^{-3}$ GNP tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D790 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 3 mm'lik kalınlığa sahip olup, %30 bazalt ve %30 karbon elyafı içermektedirler. Bu malzemenin eğilme özelliklerinde termal çevrim nedeni ile ortaya çıkan değişimleri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır.

a. Eğilme modülü

Oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,1 GNP numunelerin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.210'da verilmektedir.



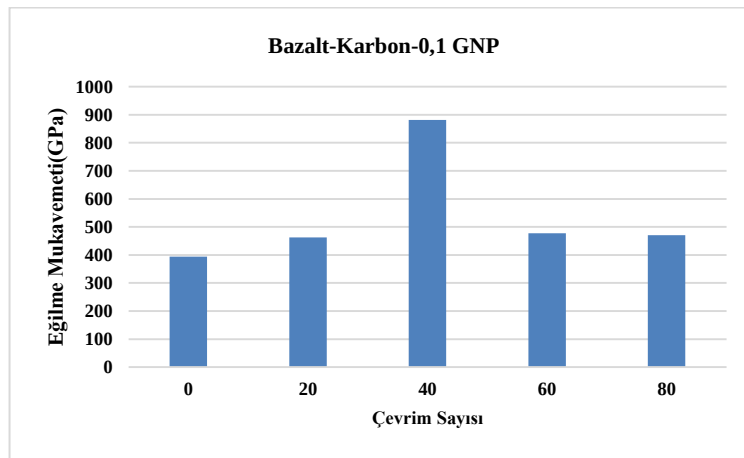
Şekil 4.210. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

ASTM D 790 standardına göre yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin eğilme modülü oda sıcaklığında ortalama 46,43 GPa olarak bulunmuştur. Bu malzemeden üretilen numuneler -40 ile +120°C aralığında 20

çevrime maruz bırakıldıklarında kompozit yapısında post kürleşme olayı ortaya çıkıp, malzemenin eğilme modülü %0,61 oranında artarak 46,916 GPa değerine yükselir. Çevrim sayılarının artması ile kompozit tabakalarının temas ettiği bölgelerde termal gerilmeler ortaya çıkar ve çevrimlerin tekrar edilmesi ile mikro çatlaklar oluşturarak tabakalar arsında hafif bir ayrışma ortaya çıkarır. Bu ayrışma üç-nokta eğilme testi esnasında tabakaların bir biri üzerinde kaymasını kolaylaştırarak eğilme modülünü %7,48 oranında azaltmakla birlikte 43,41 GPa değerine düşürür. Çevrimlerin sayısı arttıkça malzeme sürekli yüksek ve düşük sıcaklıklara maruz kalarak gevrekleşir ve böylece 60 çevrim sonunda kompozitin eğilme modülü %6,75 artarak 46,344 GPa değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ve sürekli sıcaklık değişimi ile kompozit arayüzeyinde artık gerilme oranı artarak gerilme yığılması meydana gelir ve böylece kompozitin eğilme modülü %2.49 oranında azalarak 45,188 GPa değerine düşer. Deney sonuçlarına göre 80 çevrim sonucunda kompozitin eğilme modülünde %3,09'lük bir düşüş meydana gelmiştir.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin eğilme mukavemet değerleri Şekil 4.211'de verilen diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.211. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

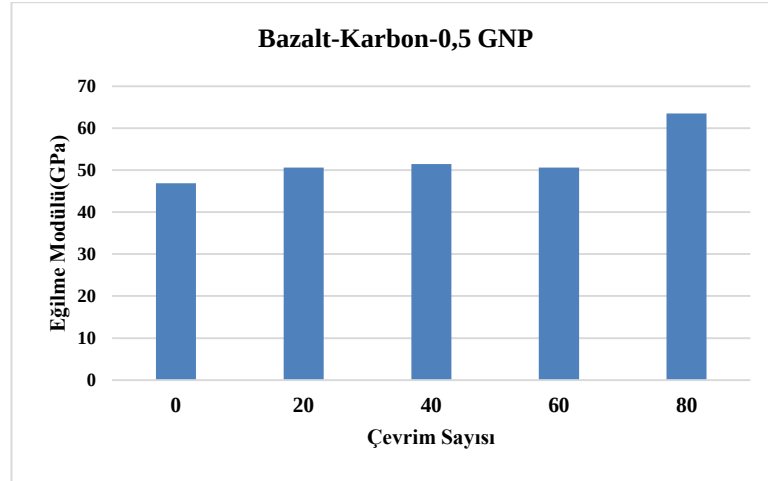
Üç-nokta eğilme deney sonuçlarına bakıldığında, bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin eğilme mukavemeti değerleri oda sıcaklığında ortalama 393.606 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında post kürleşme olayından dolayı malzemenin eğilme mukavemeti %17,59 oranında artarak 462,87 MPa olmuştur. Çevrim sayısının artması ile post kürleşme olayı şiddetlenerek kompozitin eğilme mukavemetini %90,40 oranında artırmıştır. Böylece kompozitin eğilme mukavemeti 40 çevrim sonunda 881,34 MPa değerine yükselmiştir. Çevrimlerin devam etmesi ile sürekli sıcaklık değişiminden dolayı artık gerilmeler artarak kompozit arayüzey bölgesinde delaminasyon meydana gelmiş ve 60 çevrim sonunda kompozitin eğilme mukavemetini %45,88 oranında azaltarak 476,967 MPa değerine düşürmüştür. Çevrim sayılarının artması delaminasyon olayını şiddetlendirerek malzemenin eğilme mukavemetini daha da düşürmüş ve 80 çevrim sonunda 469,964 MPa değerine indirgemıştır. Elde edilen sonuçlara göre bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin 80 çevrim sonunda eğilme mukavemetinde %6,78'lik bir düşüş meydana gelmiştir.

4.14.15. Bazalt-karbon-0,5 GNP

Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesi bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 ve hacimsel olarak $3,671 \times 10^{-3}$ GNP tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 3 mm'lik kalınlığa sahip olup, %30 bazalt ve %30 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Termal çevrimden sonra malzemenin eğilme modülü ASTM D790 standardına uygun 3-nokta eğilme deneyi ile belirlenmiştir.

a. Eğilme modülü

Oda şartları, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 GNP numunelerin eğilme modülleri Şekil 4.212’de bulunan grafikte gösterilmiştir.



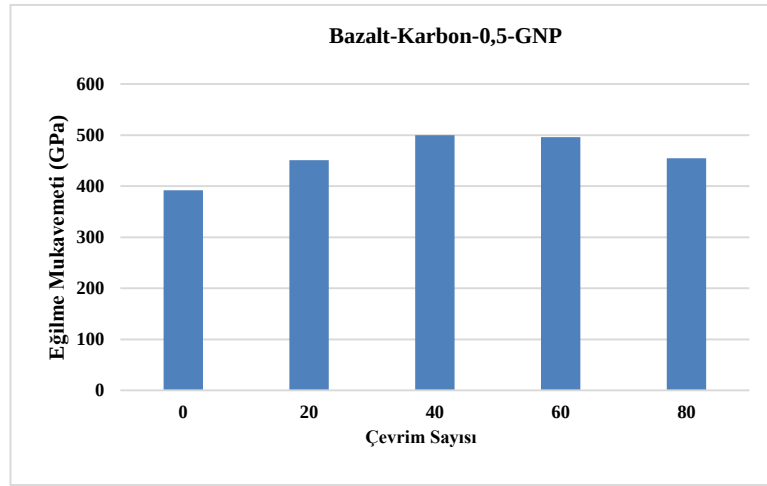
Şekil 4.212. Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme modül değerleri

Eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin eğilme modülü oda sıcaklığında ortalama 46.89 GPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemeden üretilen numunelerin eğilme modülü -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim sonrası %10,09 oranında artarak 51,63 GPa değerine yükselmiştir. Bu olay, eğilme modülünün yüksek sıcaklığa maruz kalmasından dolayı yapısında meydana gelen post kürleşme olayından kaynaklanmaktadır. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın devamlı olarak değişiminden dolayı kompozitin tabakalar arası bağları zayıflamaya başlar ve tabakalar arasında kayma ortaya çıkar. Böylece 40 çevrim sonunda kompozitin eğilme modülü %2,2 oranında azalarak 50,564 GPa değerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile kompozitin yapısında gevrekleşme olayı ortaya çıkar. Malzemenin eğilme modülü bu gevrekleşme nedeni ile 60 çevrim sonunda %0,14 oranında artarak 50,564 GPa değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ile malzeme daha geniş zamanda yüksek ve düşük sıcaklıklara maruz kalır ve böylece gevrekleşme olayı şiddetlenerek, 80 çevrim sonunda kompozitin eğilme modülü %25,58 oranında artarak 63,5 GPa değerine yükselir. Şekil

4.194’de verilen grafiğin değerlerine bakılırsa malzemenin 80 çevrim sonunda eğilme modülünde %35,40’ lık bir artış meydana geldiği anlaşılr.

b. Eğilme Mukavemeti

Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin eğilme Mukavemet değerleri Şekil 4.213’te verilen diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.213. Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

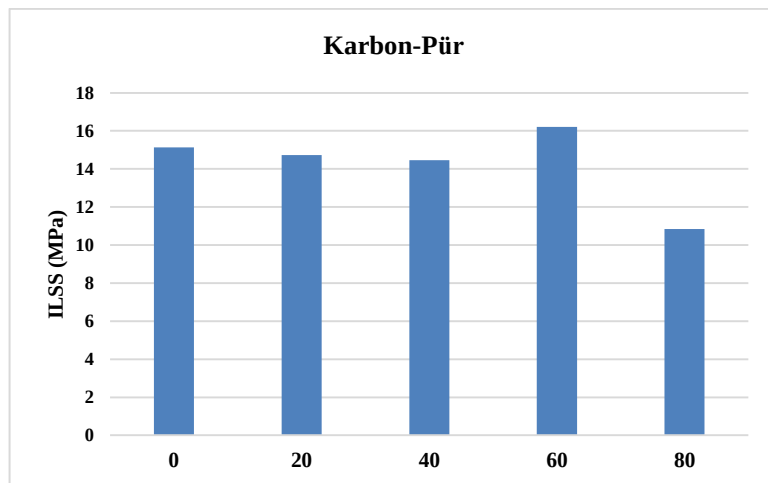
Yapılan 3-nokta eğilme deney sonuçlarına göre, bazalt-karbon 0,5 GNP numunesinin eğilme mukavemeti oda sıcaklığında ortalama 391,96 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda yüksek sıcaklıktan dolayı malzeme yapısında post kürleşme olayı ortaya çıkar ve kompozitin eğilme mukavemetini %15,03 oranında artırarak 450,882 MPa değerine ulaştırır. Çevrim sayılarının artmasıyla kompozitin post kürleşme etkisi hafifleşir ve 40 çevrim sonunda malzemenin eğilme mukavemetini %10,78 oranında artırarak 499,5 MPa değerine yükseltir. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın artması ile kompozit yapısında gevrekleşme olayı ortaya çıkıp, 60 çevrim sonunda mukavemeti %0,69 oranında azaltarak 496,025 MPa değerine düşürür. Çevrimlerin artması malzeme yapısında

meydana gelen gevrekleşme olayını artırır ve böylece kompozitin eğilme mukavemetini 80 çevrim sonunda %8,38 oranında azaltarak 454,434 MPa değerine indirger. Şekil 4.195'te verilen deney sonuçları gözden geçirilirse, 80 çevrim sonunda malzemenin eğilme mukavemetinde %8,38'lik bir artışın ortaya çıktığı belli olur.

4.15. Termal Yorulma Olayının Kompozitlerin ILSS Değerlerinde Ortaya Çıkardığı Etkiler

4.15.1. Karbon pür

Karbon pür eğilme numuneleri 130 mm uzunluk, 7 mm genişlik ve 2,5 mm kalınlıkta olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin ILSS özelliklerinde, termal çevrimin etkilerini incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra kısa kiriş deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin ILSS değerleri (Inter Laminar Shear Strength) ASTM D2344 standardı kullanılarak bulunmuştur. Farklı sayılarda termal çevrime maruz bırakılmış karbon pür numunelerin ILSS değerleri Şekil 4.214'te bulunan diyagramda gösterilmiştir.

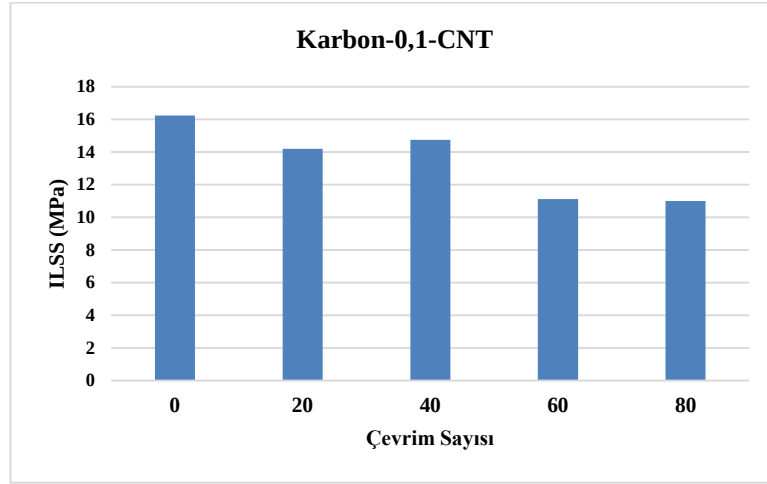


Şekil 4.214. Karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri

Yapılan kısa kiriş deney sonuçlarına göre, karbon pür numunelerinin ILSS değeri oda sıcaklığında ortalama 15,13 MPa olarak elde edilmiştir. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakılarak karbon elyaf ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozit arayüzey bölgelerinde ve kompozit yapısını oluşturan tabakalar arasında artık gerilmeler ortaya çıkar. Artık gerilmeler bu bölgelerde mikro çatlakların oluşmasına neden olup, çevrimlerin devam etmesi ile mikro çatlakların sayısı artar. Bu mikro çatlakların birleşmesi ile arayüzey bölgesinde delaminasyon olayı ortaya çıkar ve böylece malzemenin ILSS değerinde 20 ve 40 çevrim sonunda %2,64 ve 1,83 oranında azalma meydana gelerek sırasıyla 14,73 ve 14,46 MPa değerlerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile malzeme yapısında post kürleşme olayı ortaya çıkıp, 60 çevrim sonunda kompozitin ILSS değerini %12,03 oranında artırarak 16,21 MPa değerine yükseltir. Çevrimlerin ilerlemesi ile sürekli sıcaklık değişiminden dolayı arayüzey ve tabakalar arasında bulunan çapraz bağlar kırılmaya başlar ve böylece 80 çevrim sonunda malzemenin ILSS değeri %33,02 oranında azalarak 10,85 MPa değerine düşer. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin ILSS değerinde %28,31 oranında düşüş meydana gelmiş olur.

4.15.2. Karbon-0,1 CNT

Karbon-0,1 CNT malzemesi karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 oranında CNT tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D2344 standardına göre 130 mm uzunluk, 7 mm genişlik ve 2,5 mm' lik kalınlığa sahip olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin ILSS değerlerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra kısa kiriş deneyine tabi tutulmuşlardır. Farklı sayılarda termal çevrime maruz bırakılmış karbon-0,1 CNT numunelerin ILSS değerleri Şekil 4.215'de verilen grafikte bulunmaktadır.

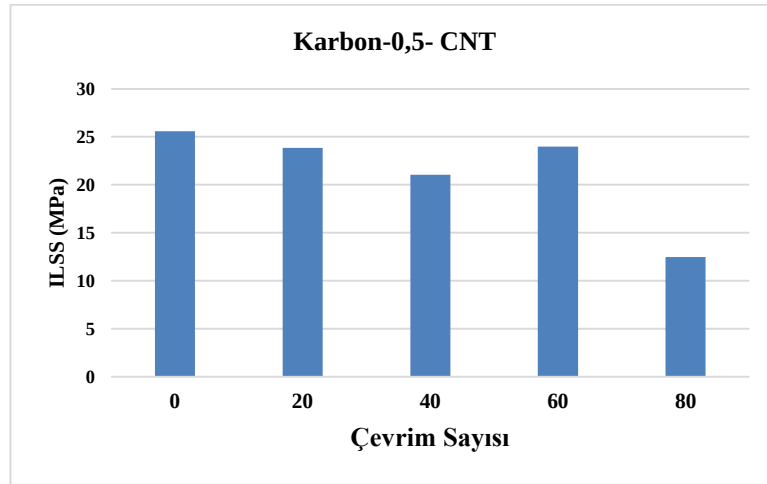


Şekil 4.215. Karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri

Kısa kiriş deney sonuçlarına göre, karbon-0,1 CNT malzemesinin ILSS değeri oda sıcaklığında 16,23 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında karbon takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgeler ve tabakalar arasında temasta bulunan malzemelerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu gerilmeler matris ile elyaf arasındaki çapraz bağlarının kırılmasına neden olarak çapraz bağların azalmasına neden olmuştur ve böylece elyaf ile matris malzemesi arasında ayrışma ortaya çıkarak malzemenin ILSS değerini %12,51 oranında azaltmasıyla birlikte 14,19 MPa değerine düşürmüştür. Çevrimin devam etmesi ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelerek malzemenin ILSS değeri %3,80 oranında artmış ve 14.73 MPa değerine yükselmiştir. Çevrimlerin ilerlemesi ve sıcaklığın sürekli değişmesi ile arayüzey ve tabakalar arası termal gerilmeleri artar ve bu olay kompozitin ILSS değerini 60 ve 80 çevrim sonunda %24,57 ve 1,17 oranında azaltarak sırasıyla 11,12 ve 10,98 MPa değerlerine düşürür. Elde edilen sonuçlara göre karbon-0,1 CNT malzemesinin 80 çevrim sonunda ILSS değerinde %32,34 oranında düşüş meydana gelmiştir.

4.15.3. Karbon-0,5 CNT

Karbon-0,5 CNT malzemesi karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 CNT tanecikler içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri, 15mm genişlik ve 2,5 mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin termal çevrimden dolayı ILSS değerlerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra kısa kiriş deneyine tabi tutulmuşlardır. Farklı sayılarda termal çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 CNT numunelerin ILSS değerleri Şekil 4.216'da bulunan grafikte verilmektedir.



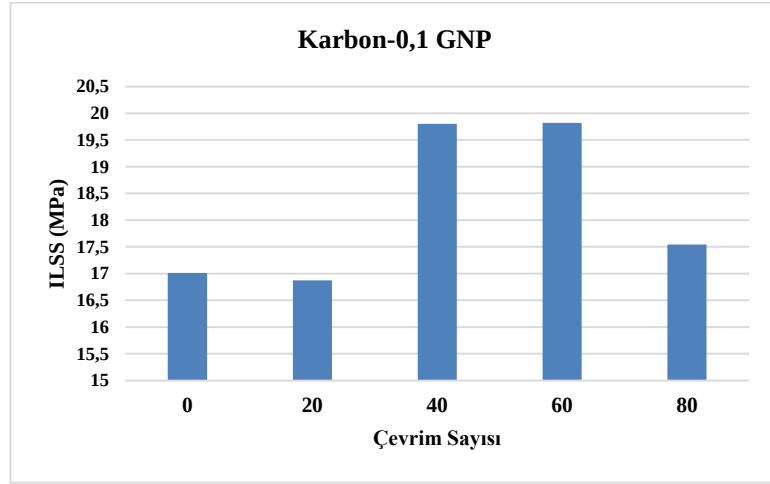
Şekil 4.216. Karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri

ASTM D2344 standardına göre yapılan kısa kiriş deney sonuçlarına göre, karbon-0,5 CNT malzemesinin ILSS değeri oda sıcaklığında 25,58 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemenin deney numuneleri -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kalması ile kompozit yapısında bileşen malzemelerin CTE değerlerinin uyumsuzluğu nedeni ile, sıcaklığın artması ile karbon elyafında büzülme ve tam tersi epoksi malzemesinde genleşme olayı meydana gelir. Çapraz bağlarla sıkça tutulan iki malzemenin temas bölgelerinde bileşenlerin ters olarak şekil değiştirmesi, arayüzey bağlarını zorlayarak kırılmalarına neden olur. Böylece 20 ve 40 çevrim sonunda

kompozitin ILSS değeri %6,80 ve 11,79 oranında azalmakla birlikte sırasıyla 23,84 ve 21,03 MPa değerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelerek çapraz bağların sayısı artar ve böylece 60 çevrim sonunda kompozitin ILSS değerinde %14,14 oranında artış meydana gelir ve 23,97 MPa değerine yükselir. Çevrimlerin devam etmesi ve malzemenin sürekli termal gardiyana maruz kalması arayüzeydeki elyaf ile matris ve aynı zamanda kompoziti oluşturan tabakalar arasında uyumsuzlukların artmasına neden olur. Bu gerilmelerin artması gerilme yığılmasının çoğalmasına neden olur ve böylece 80 çevrim sonunda malzemenin ILSS değerinde %48,01'lik bir düşüş ortaya çıkarak, malzemenin bu özelliği 12,46 MPa değerine düşer. Şekil 4.198'te verilen grafiğe dikkat edilirse 80 çevrim sonunda malzemenin ILSS değerinin %51.33 oranında azalması gözlemlenir.

4.15.4. Karbon-0,1 GNP

Karbon-0,1 GNP malzemesi karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 oranında GNP tanecikler içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D2344 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 7 mm genişlik ve 2,5 mm' lik kalınlığa sahip olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu malzemenin ILSS değerinde termal çevrim nedeni ile ortaya çıkan değişimleri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal yorulmaya tabii tutulmuş numunelerin ILSS değerlerini incelemek amacıyla numuneler kısa kiriş deneyi kullanılarak test edilip, malzemenin ILSS değerleri elde edilmiştir. Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,1 GNP malzemesinin ILSS değerleri Şekil 4.217'de bulunan grafikte gösterilmiştir.

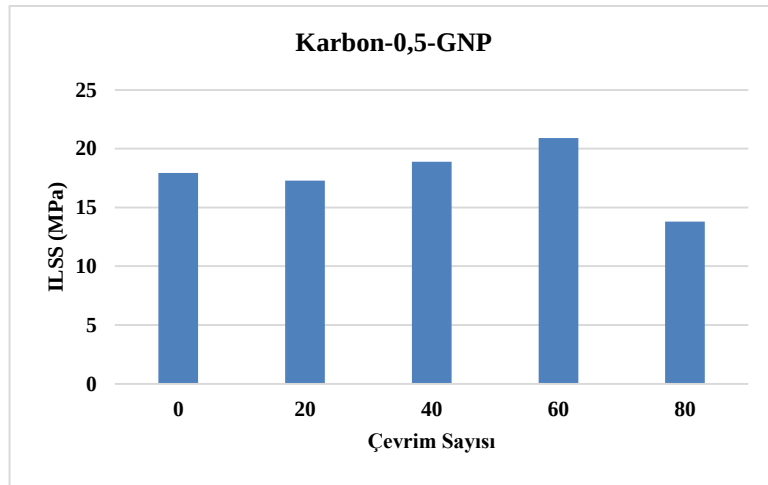


Şekil 4.217. Karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri

Kısa kiriş deney sonuçlarına bakıldığında, karbon-0,1 GNP malzemesinin ILSS değeri oda sıcaklığında 17 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme türünden kesilmiş olan numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında karbon takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgeler ve kompoziti oluşturan tabakalar arasında, temasta bulunan bileşenlerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkar. Ortaya çıkan bu gerilmeler matris ile elyaf arasındaki çapraz bağların kırılmasına neden olarak çapraz bağların azalmasıyla birlikte elyaf ile matris malzeme arasında ve tabakalar arasında ayrışmaya neden olarak kompozitin ILSS değerini %0,76 oranında azaltarak 16,87 MPa değerine düşürür. Çevrimlerin devam etmesi ile yüksek sıcaklıklardan dolayı malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve malzemenin ILSS değerini %14,75 ve 0,15 oranında artarak sırasıyla 19,79 ve 19,82 MPa değerine yükselir. Çevrimlerin ilerlemesi ile sıcaklığın sürekli değişmesinden dolayı elyaf ile matris ve kompozit yapısını oluşturan tabakalar arasındaki bağlar kırılmaya başlar ve böylece kompozitin ILSS değeri 80 çevrim sonunda %11,54 oranında azalarak 17,54MPa değerine düşer. Elde edilen sonuçlara göre karbon-0,1 GNP malzemesinin 80 çevrim sonunda ILSS değerinde %3,18'lik bir artış meydana gelmiştir.

4.15.5. Karbon-0,5 GNP

Karbon-0,5 GNP malzemesi karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 GNP tanecikler içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D2344 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 7mm genişlik ve 2,5 mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin ILSS değerlerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra malzemenin ILSS değerlerini bulmak amacıyla numuneler kısa kiriş deneyine tabi tutulmuşlardır. Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış karbon-0,5 GNP malzemesinin ILSS değerleri Şekil 4.218'de verilen grafikte gösterilmiştir.



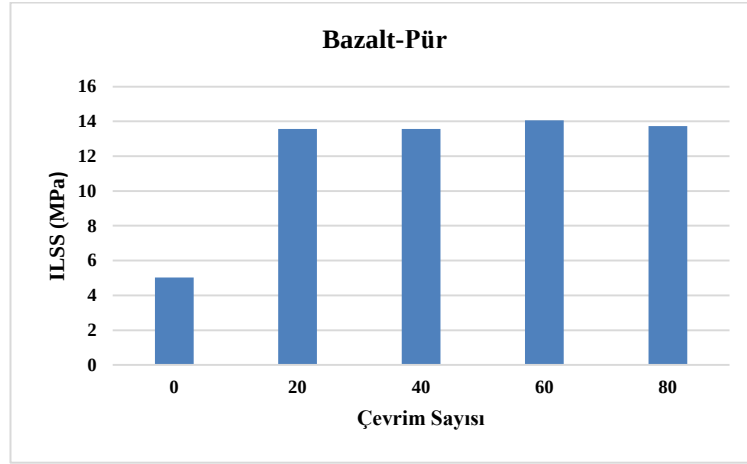
Şekil 4.218. Karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki eğilme mukavemet değerleri

Yapılan kısa kiriş deney sonuçlarına göre, karbon 0,5 GNP numunesinin ILSS değeri oda sıcaklığında ortalama 17,95 MPa olarak elde edilmiştir. Bu tür malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda takviye fazı ile epoksi reçinesinin CTE farkından dolayı kompozit yapısını oluşturan tabakalar arası ve elyaf ile matris arayüzey bölgelerinde artık gerilmeler oluşur. Artık gerilmelerin bu bölgelerde artması elyaf ile matris ve tabakalar arasındaki gerilme geçirgenliğini azaltarak bu bölgelerde gerilme

yığılmasını daha da artırır ve kompozitin ILSS değerinin düşmesine neden olur. Bu nedenle 20 çevrim sonrası kompozitin ILSS değeri %3,73 oranında azalarak 17,27 MPa değerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ile birlikte 40 ve 60 çevrime sonunda kompozitin yapısında post kürleşme olayından dolayı ILSS değerinde %0,93 ve bir artış meydana gelerek bu değer sırasıyla 18,88 ve 20,89 MPa olur. Çevrimlerin ilerlemesi ve sıcaklığın sürekli olarak değişmesi ile tabakalar ve elyaf ile reçine malzemesinin CTE uyumsuzluğundan dolayı kompozit yapısında meydana gelen artık gerilmeler artar ve gerilme yığılmasına neden olur. Gerilme yığılmasının ortaya çıktığı bölgelerde tabakalar arası ve matris ile elyaf malzemesinin ayrışmasından dolayı ILSS değerinde %33,99 oranında düşüş meydana gelmekle birlikte bu değer 13,79 MPa olur. Böylece 80 çevrimin sonunda malzemenin ILSS değerinde %23,13'lük bir düşüş meydana gelmiş olur.

4.15.6. Bazalt pür

Bazalt pür numuneleri 130 mm uzunluk, 7mm genişlik ve 2 mm'lik kalınlıkta olup, %60 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin ILSS değerlerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra kısa kiriş deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin ILSS değerleri ASTM D2344 standardına göre yapılmıştır. Oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmış bazalt-pür malzemesinin ILSS değerleri Şekil 4.219'da verilen diyagramda gösterilmiştir.



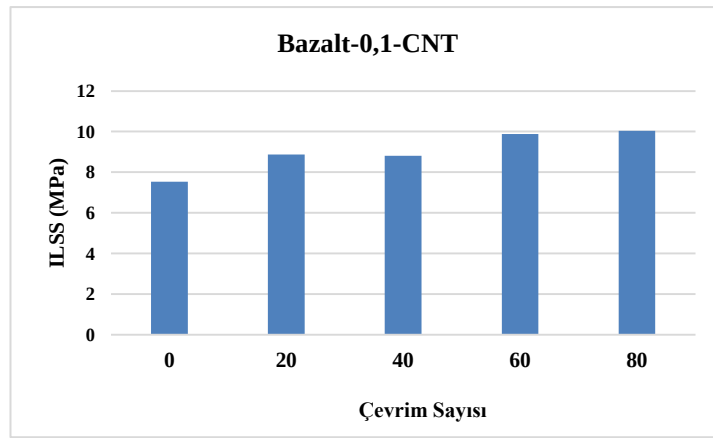
Şekil 4.219. Bazalt pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri

Yapılan kısa kiriş deney sonuçlarına göre, bazalt pür numunelerinin ILSS değerleri oda sıcaklığında ortalama 5,03 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemedan üretilen numuneler -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz kaldığında yapısında post kürleşme olayından dolayı ILSS değerinde %169.58'lük bir artış ortaya çıkar ve 13,5601 MPa değerine yükselir. Çevrim sayılarının artması ile post kürleşme devam eder ve kompozitin ILSS değeri 40 ve 60 çevrim sonunda sırasıyla %0,002 ve 3,68 oranında artış ile birlikte 13,5604 ve 14,06 MPa değerlerine yükselir. Sıcaklığın sürekli değişimi, bazalt elyaf ile epoksi reçine ve tabakaların CTE farkından dolayı kompozit yapısında artık gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olur. Artık gerilmeler arayüzey ve tabakalar arasında mikro çatlakların oluşmasına neden olur. Çevrimlerin devam etmesi ile mikro çatlakların sayısı artar ve birleşerek arayüzey bölgesinde delaminasyon olayını ortaya çıkarır. Bu durumda malzemenin ILSS değeri %2,42'lik artmasıyla birlikte 13,72 MPa değerine yükselir. Böylece 80 çevrim sonunda malzemenin ILSS değerinde %172,76 oranında artışın meydana geldiği ortaya çıkar.

4.15.7. Bazalt-0,1 CNT

Bazalt-0,1 CNT malzemesi bazalt elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 CNT tanecikler içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadırlar. Bu malzemenin numuneleri ASTM D2344 standardına göre 130 mm uzunluk, 7mm genişlik ve 2 mm'lik kalınlığa

sahip olup, %60 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin ILSS değerlerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmışlardır. Termal çevrimden sonra numunelerin ILSS değerleri kısa kiriş deneyi ile belirlenmiştir. Çeşitli sıcaklıklarda termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 CNT numunelerin ILSS değerleri Şekil 4.220’de bulunan grafikte gösterilmiştir.



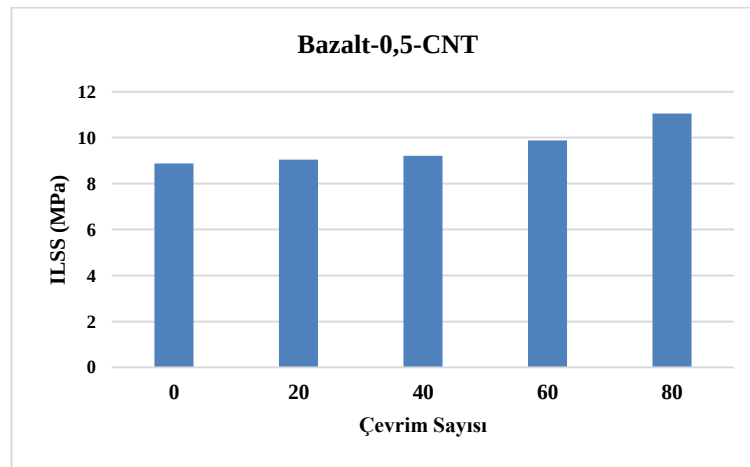
Şekil 4.220. Bazalt-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri

Kısa kiriş deney sonuçlarına göre, bazalt-0,1 CNT malzemesinin ILSS değeri oda sıcaklığında ortalama 7,53 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında kompozit yapısında post kürleşme olayı ortaya çıkar ve kompozitin ILSS değerini %17,79 oranında artırarak 8,87 MPa değerine yükseltir. Çevrimlerin devam etmesi ile sıcaklık değişiminden dolayı bazalt takviye fazı ile epoksi reçine malzemesinin CTE değerlerinde bulunan farklar nedeni ile tabakalar arası ve elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde temasta bulunan malzemelerin farklı oranlarda şekil değiştirmelerinden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkar. Böylece kompozitin ILSS değeri 40 çevrim sonunda %0,79 oranında azalarak 8,80 MPa değerine düşmüştür. Çevrimlerin ilerlemesi ve malzemenin yüksek sıcaklıklara maruz kalması kompozitin yapısında post kürleşme olayının ortaya çıkmasına neden olur ve ILSS değerini 60 ve 80 çevrim sonunda %12,27 ve 5,77 oranında artırarak 9,88 ve 10,04MPa değerine

yükselmesine neden olur. Elde edilen sonuçlara göre bazalt-0,1 CNT malzemesinin 80 çevrim esnasında ILSS değerinde %5,78'lik bir artış meydana gelmiştir. Bazalt elyaf ile takviye edilmiş kompozit malzemesinin CNT taneciklerinin artışıyla termal çevrim karşısında daha iyi performans göstermesinin nedeni CNT nano taneciklerin düşük CTE değerlerinden ve bu taneciklerin kompozitin matrisine eklenmesi ile reçine malzemesinin CTE değerini düşürerek bileşenlerin CTE farkını azalttığından kaynaklanmaktadır.

4.15.8. Bazalt-0,5 CNT

Bazalt-0,5 CNT malzemesi bazalt elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 CNT tanecikler içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri 130 mm uzunluk, 15mm genişlik ve 2mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin eğilme özelliklerinde termal çevrimden dolayı meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmıştır. Termal çevrimden sonra malzemenin ILSS değerlerinde ASTM D2344 standardına uygun kısa kiriş deneyi ile belirlenmiştir. Farklı sürelerde termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 CNT numunelerin ILSS değerleri Şekil 4.221'de bulunan grafikte verilmektedir.

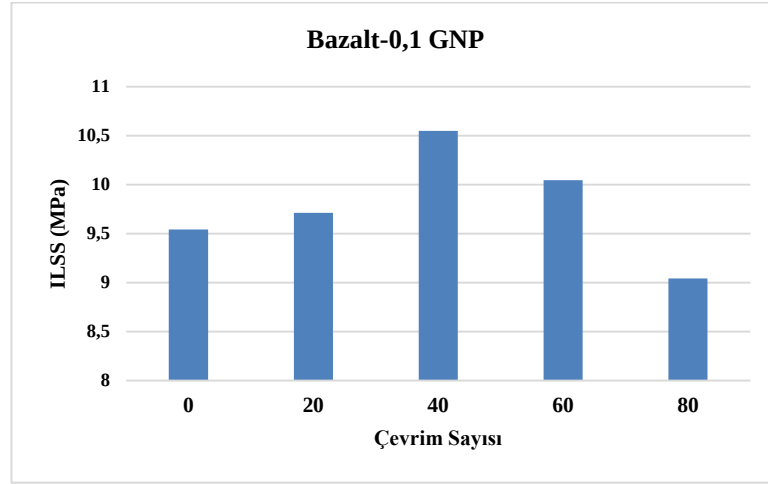


Şekil 4.221. Bazalt-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri

ASTM D2344 standardına göre yapılmış olan kısa kiriş deney sonuçlarına göre, bazalt-0,5 CNT malzemesinin ILSS değerleri oda sıcaklığında ortalama 8,87 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemeden üretilen deney numunelerinin -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kalması ile yüksek sıcaklıktan dolayı kompozitin yapısında ortaya çıkan post kürleşme nedeni ile ILSS değeri artmaya başlar ve 20 çevrim sonunda 9,04 değerine yükselir. Çevrim ilerlemesi ve sıcaklığın daha da artması ile post kürleşme olayı devam eder ve malzemenin ILSS değeri 40, 60 ve 80 çevrim sonunda sırasıyla %2,18, 1,78 ve 10,68 oranında artarak 9,21, 9,88 ve 11,05 MPa değerine yükselir. Deney sonuçlarına bakıldığında 80 çevrim sonunda malzemenin ILSS değerinin %24,58 oranında artmış olduğu gözlemlenmiştir.

4.15.9. Bazalt - 0,1 GNP

Bazalt-0,1 GNP malzemesi bazalt elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 GNP tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D2344 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 7mm genişlik ve 2mm'lik kalınlığa sahip olup, %60 bazalt elyafı içermektedirler. Bu malzemenin ILSS değerlerinde termal çevrimden dolayı ortaya çıkan değişimleri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmışlardır. Termal yorulmaya tabii tutulmuş numunelerin ILSS değerlerini bulmak için numuneler kısa kiriş deneyi kullanılarak test edilmişler ve böylece malzemelerin ILSS değerleri elde edilmiştir. Farklı sürelerde termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 GNP numunelerin ILSS değerleri Şekil 4.222'de verilmiştir.



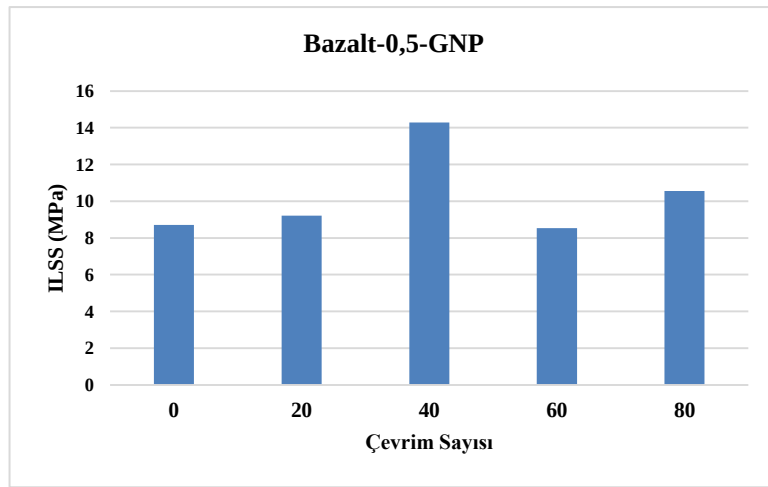
Şekil 4.222. Bazalt-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonundaki ILSS değerleri

Kısa kirş deney sonuçlarına göre, bazalt-0,1 GNP malzemesinin ILSS değerleri oda sıcaklığında ortalama 9,54 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzemedan üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında sıcaklığın artmasından dolayı malzeme yapısında post kürleşme meydana gelir ve kompozitin ILSS değerini %1,78 oranında artırarak 9,71 MPa değerine ulaştırır. Çevrim sayısının artması ile malzeme yapısında meydana gelen post kürleşme olayı devam edip, 40 çevrim sonunda malzemenin ILSS değerini %8,55 oranında artırarak 10,55 MPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin sayılarının artması ile kompozit yapısında kullanılan malzeme tabakaların CTE farkından dolayı arayüzey ve tabakalar arasında termal gerilmeler ortaya çıkıp, sıcaklığın sürekli değişmesi ile artmaya başlar. Bu olay kompozitlerin ILSS değerini%ve oranında azaltarak 60 ve 80 çevrim sonunda sırasıyla 10,04 ve 9,04 MPa değerlerine düşürür. Elde edilen sonuçlara göre 80 çevrim sonunda bazalt-0,1 GNP malzemesinin ILSS değerinde %5,24 oranında düşüş meydana gelmiştir.

4.15.10. Bazalt - 0,5 GNP

Bazalt-0,5 GNP malzemesi bazalt elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 GNP tanecikler içermekte olan epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri 130 mm uzunluk, 7mm genişlik ve 2 mm'lik kalınlığa sahip olup, %60

bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin termal çevrimden dolayı ILSS değerlerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmışlardır. Termal çevrimden sonra malzemenin ILSS değerlerini bulmak amacıyla ASTM D2344 standardına göre kısa kiriş deneyi yapılmıştır. Farklı süreler boyunca termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,5 GNP malzemesinin ILSS değerleri Şekil 4.223'te verilen diyagramda gösterilmiştir.



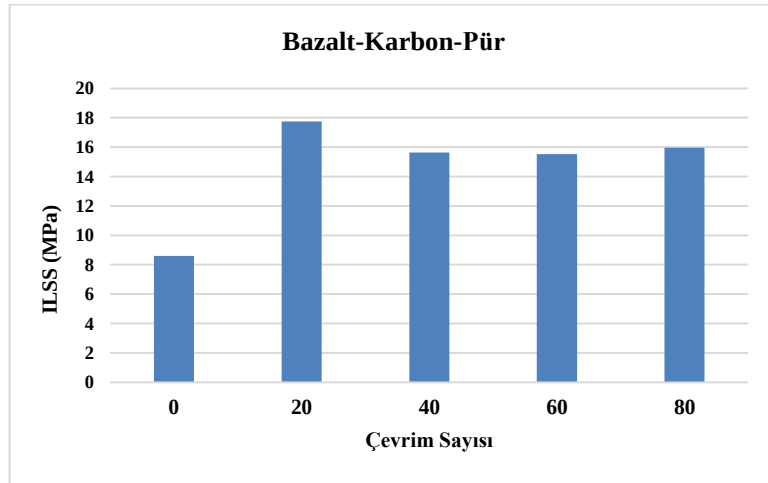
Şekil 4.223. Bazalt-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonunda ILSS değerleri

Yapılan kısa kiriş deney sonuçlarına göre, bazalt 0,5 GNP numunesinin ILSS değeri oda sıcaklığında 8,71 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda kompozitin yapısında yüksek sıcaklıklardan dolayı post kürleşme olayı meydana gelir ve malzemenin ILSS değerini %5,75 oranında artırarak 9,21 MPa değerine ulaştırır. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın artması post kürleşme olayını şiddetlendirir ve 40 çevrim sonunda %55,32 oranında artırarak 14,29 MPa değerine ulaştırır. Sıcaklık değişiminin devam etmesi ile kompozit arayüzey bölgeleri ve tabakalar arasında artık gerilmeler oluşur. Artık gerilmelerin bu bölgelerde artması elyaf ile matris arasındaki gerilme geçirgenliğini azaltarak arayüzey ve tabakalar arasında gerilme yığılmasını daha da artırır. Gerilme yığılmasının artması ile kompozitin ILSS değeri azalır. Bu nedenle 60 çevrim sonunda kompozitin ILSS değeri %40,24 oranında azalarak 8,54 MPa değerine düşer. Çevrimlerin devam edip, 80

çevrime geldiğinde kompozitin ILSS değerinde post kürleşme olayından dolayı %23,54'lik bir artış meydana gelir ve malzemenin ILSS değeri 10,55 MPa değerine artar. Böylece 80 çevrimin bitmesi ile malzemenin ILSS değerinde %21,15'lik bir artış meydana gelmiş olur.

4.15.11. Bazalt-karbon pür

Bazalt-karbon-pür numuneleri 130 mm uzunluk, 7mm genişlik ve 3 mm'lik kalınlıkta olup, %30 karbon ve %30 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin termal çevrimden dolayı ILSS değerlerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra kısa kiriş deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu numunelerin ILSS değerleri ASTM D2344 standardı kullanılarak bulunmuştur. Farklı sürelerde termal çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon pür numunelerin ILSS değerleri Şekil 4.224'te verilen grafikte gösterilmiştir.



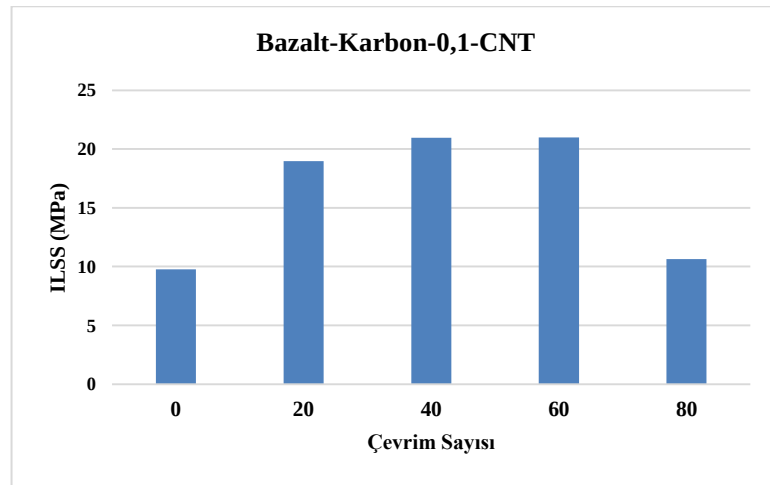
Şekil 4.224. Bazalt-karbon pür malzemesinin çeşitli çevrim sonucundaki ILSS değerleri

Yapılan kısa kiriş deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon pür numunelerinin ILSS değerleri oda sıcaklığında ortalama 8,59 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakıldıktan sonra yüksek sıcaklıklardan dolayı post kürleşme neticesinde ILSS değeri %106,63 oranında artarak 17,74 MPa değerine

ulaşır. evrim sayısının artması ve yüksek sıcaklıktan dolayı kompozit malzemesi gevrekleşir ve böylece 40 ve 60 çevrim sonunda ILSS değeri %11,95 ve oranında azalarak 15,62 ve 15,51 MPa değerlerine düşer. Çevrimlerin devam etmesi ile 80 çevrim sonunda malzeme yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve kompozitin ILSS değeri %2,90 oranında artmakla birlikte 15,96 MPa değerine yükselir. Deney sonucuna göre, malzemenin ILSS değeri 80 çevrim sonunda %85,68 oranında artmıştır.

4.15.12. Bazalt-karbon-0,1 CNT

Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesi Bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 CNT tanecikler içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D2344 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 7mm genişlik ve 3mm'lik kalınlığa sahip olup, %30 karbon ve %30 bazalt elyafı içermektedirler. Bu numunelerin termal çevrimden dolayı ILSS değerlerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakıldıktan sonra kısa kiriş deneyine tabi tutulmuşlardır. Çeşitli sürelerde termal çevrime maruz bırakılmış Bazalt-karbon-0,1 CNT numunelerin ILSS değerleri şekil 4.225'te verilen grafikte gösterilmiştir.

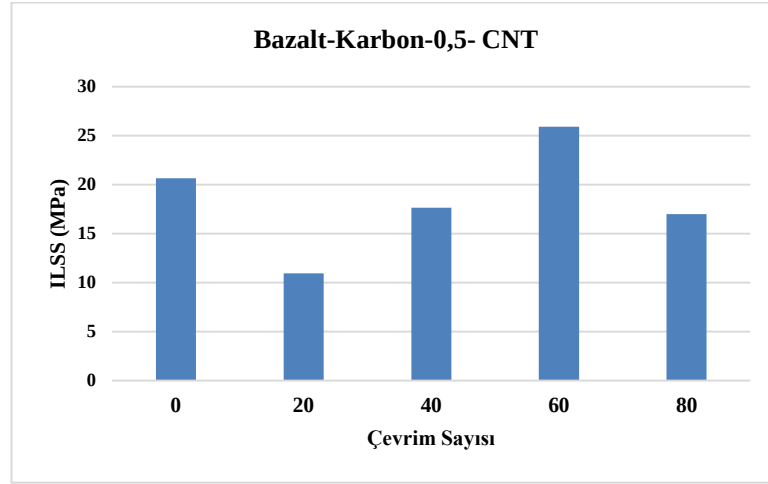


şekil 4.225. Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonundaki ILSS değerleri

Kısa kiriş deney sonuçlarına göre, Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin ILSS değerleri oda sıcaklığında ortalama 9,76 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında sıcaklığın artmasından dolayı kompozit yapısında post kürleşme olayı meydana gelir ve malzemenin arayüzey ve tabakalar arası bölgelerinde çapraz bağların sayıları artmaya başlar ve böylece 20 ve 40 çevrim sonunda kompozitin ILSS değerleri %94,36 ve 10,49 oranında yükselerek sırasıyla 18,97 ve 20,96 MPa değerine varır. Çevrimlerin devam etmesi ile post kürleşme olayı devam eder ve 60 çevrim sonunda kompozitin ILSS değeri %0,095 oranında artarak 20,98 MPa değerine yükselir. Çevrimlerin artması ve 80 sayısına geldiğinde Bazalt-karbon takviye fazı ile epoksi reçinesinin CTE değerlerinde bulunan farktan dolayı elyaf ile matris malzemesinin temas ettiği bölgelerde bileşenler arasında farklı oranlarda şekil değiştirmelerden dolayı artık termal gerilmeler ortaya çıkarak kompozitin ILSS değeri %49,28 oranında azalarak 10,64 MPa değerine düşer. Elde edilen sonuçlara göre Bazalt-karbon-0,1 CNT malzemesinin 80 çevrim sonunda ILSS değerinde %0,095 düşüş meydana gelmiştir.

4.15.13. Bazalt-karbon-0,5 CNT

Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesi bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 CNT tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D2344 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 7 mm genişlik ve 3 mm'lik kalınlığa sahip olup, %30 bazalt ve %30 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin termal çevrimden dolayı ILSS değerlerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmışlardır. Her çevrim için ikişer numune kullanılmıştır. Farklı sürelerde termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 CNT numunelerin ILSS değerleri Şekil 4.226'de verilen grafikte izlenmektedir.



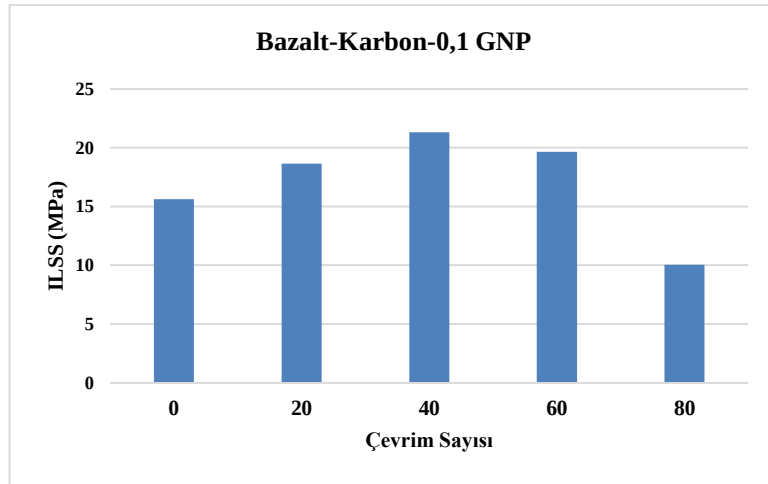
Şekil 4.226. Bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin çeşitli çevrim sonundaki ILSS değerleri

ASTM D2344 standardına göre yapılan kısa kiriş deney sonuçlarına göre, bazalt-karbon-0,5 CNT malzemesinin ILSS değerleri oda sıcaklığında ortalama 20,65 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzemenin deney numuneleri -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrime maruz kalması ile malzeme gevrekleşir ve böylece ILSS değeri %47,07 oranında azalarak 10,94 MPa değerine düşer. Çevrim sayılarının artması ile yüksek sıcaklık nedeni ile malzemede post kürleşme olayı meydana gelir ve böylece kompozitin ILSS değeri artmaya başlar. ILSS değerinin artışı 60 çevrime kadar devam eder ve 40 ve 60 sayılı çevrim sonlarında sırasıyla %61,30 ve 46,85 oranında yükselmesi ile birlikte 17,63 ve 25,89 MPa değerlerine ulaşır. Çevrim sayılarının artması ile malzeme gevrekleşir ve bu olay kompozitin ILSS değerini %34,49 oranında azaltarak 16.96 MPa değerine düşmesine neden olur. Sonuçlara göre, kompozitin 80 çevrim -40 ile +120°C aralığında termal yorulmaya maruz kalması ile kompozitin yapısında %17,83'lik bir düşüş meydana gelmiştir.

4.15.14. Bazalt-karbon - 0,1 GNP

Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesi bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,1 oranında GNP tanecikler içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri ASTM D2344 standardına tabi tutularak 130 mm uzunluk, 7

mm genişlik ve 3 mm'lik kalınlığa sahip olup, %30 bazalt ve %30 karbon elyafı içermektedirler. Bu malzemenin ILSS değerlerinde termal çevrim nedeni ile ortaya çıkan değişimleri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında, 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmışlardır. Farklı sürelerde termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin ILSS değerleri Şekil 4.227'de verilen diyagramda gösterilmiştir.



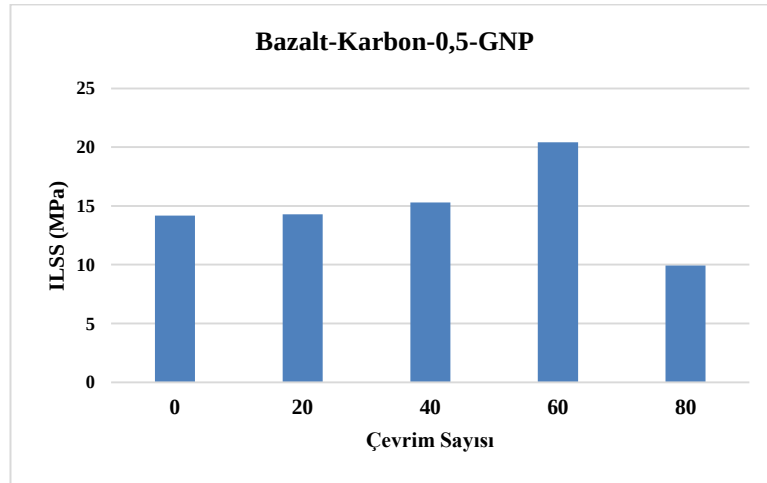
Şekil 4.227. Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonundaki ILSS değerleri

Kısa kiriş deney sonuçlarına bakıldığında, bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin ILSS değeri oda sıcaklığında ortalama 15,63 MPa olarak elde edilmiştir. Bu malzeme cinsinden üretilen numunelere -40 ile +120°C aralığında 20 adet termal çevrim uygulandığında post kürleşme olayından dolayı malzemenin ILSS değeri %19,32 oranında artarak 18,64 MPa olmuştur. Çevrim sayısının artması ile post kürleşme olayı şiddetlenerek kompozitin ILSS değerini %14,38 oranında artırarak 40 çevrim sonunda 21,32MPa değerine yükseltmiştir. Çevrimlerin devam etmesi ile sürekli sıcaklık değişiminden dolayı artık gerilmeler artarak kompozit tabakalar arası ve arayüzey bölgelerinde delaminasyon meydana gelmiş ve 60 çevrim sonunda kompozitin ILSS değerini %7,88 oranında azaltarak 19,64 MPa değerine düşürmüştür. Çevrim sayılarının artması delaminasyon olayını şiddetlendirerek malzemenin ILSS değerini daha da düşürmüş ve 80 çevrim sonunda 10,00 MPa değerine indirgemıştır. Elde edilen

sonuçlara göre bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin 80 çevrim sonunda ILSS değerinde %49,08'lik bir düşüş meydana gelerek bu değer 10,05 MPa olmuştur.

4.15.15. Bazalt-karbon-0,5 GNP

Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesi bazalt-karbon elyaf ile takviye edilmiş ağırlık olarak %0,5 GNP tanecikleri içeren epoksi malzemesinden oluşmaktadır. Bu malzemenin numuneleri 130 mm uzunluk, 7 mm genişlik ve 3 mm'lik kalınlığa sahip olup, %30 bazalt ve %30 karbon elyafı içermektedirler. Bu numunelerin termal çevrimden dolayı ILSS değerlerinde meydana gelen etkileri incelemek amacıyla 10 adet numune kullanılmış olup, her çevrim için iki adet numune ile birlikte, sırasıyla oda sıcaklığında 20, 40, 60 ve 80 çevrime maruz bırakılmışlardır. Termal çevrimden sonra malzemenin ILSS değeri ASTM D2344 standardına uygun kısa kiriş deneyi ile belirlenmiştir. Farklı sürelerde termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin ILSS değerleri Şekil 4.228'de verilen diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 4.228. Bazalt-karbon-0,5 GNP malzemesinin çeşitli çevrim sonundaki ILSS değerleri

Yapılan kısa kiriş deney sonuçlarına göre, bazalt-karbon 0,5 GNP numunesinin ILSS değeri oda sıcaklığında ortalama 14,17 MPa olarak bulunmuştur. Bu malzeme -40 ile +120°C aralığında 20 çevrime tabi tutulduğunda yüksek sıcaklıktan dolayı malzeme

yapısında post k rle me olayı ortaya çıkar ve kompozitin ILSS değerini %0,77 oranında artırarak 14,28 MPa değerine ulaştırır.  evrim sayılarının artmasıyla kompozitin post k rle me etkisi devam edip, 40 ve 60 çevrim sonunda malzemenin ILSS değerlerini %7,07 ve 33,55 oranında artırarak sırasıyla 15,29 ve 20,42 MPa değerine yükseltir. Çevrimlerin devam etmesi ve sıcaklığın artması ile kompozit yapısında gevrekle me olayı ortaya çıkıp, 80 çevrim sonunda ILSS değerini %105,74 oranında azaltarak 9,93 MPa değerine düşürür. Şekil 4.228’te verilen deney sonuçları gözden geçilirse, 80 çevrim sonunda malzemenin ILSS değerinde %29,92’lik bir d     n ortaya çıktığı gözlemlenir.

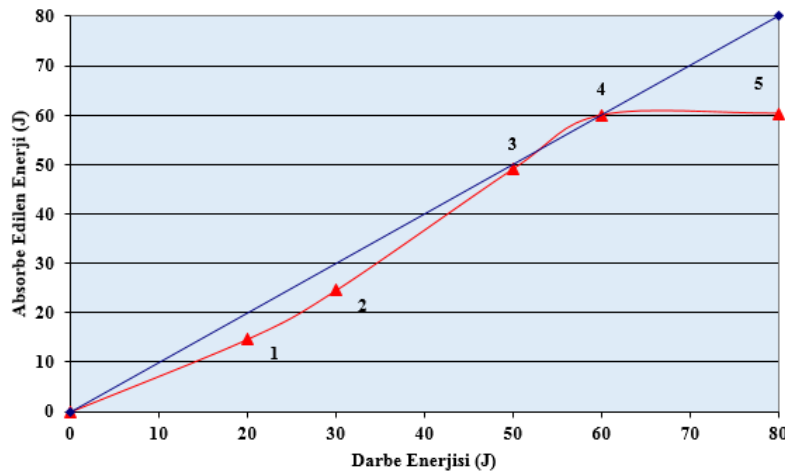
4.16. Termal Yorulma Olayının Kompozitlerin Darbe Davranışlarına Etkiler

Darbe olayı sabit halde bulunan bir numune ile hareketli olan vurucu arasındaki enerji transferi olarak tanımlanmaktadır. Numunenin absorbe ettiği enerji, numuneye transfer edilmiş darbe enerjisidir. Darbe olayında transfer edilmiş olan enerji numunenin kinetik enerjisi ve  ekil değiştirme enerjisini içermektedir. Bir malzemenin darbeye karşı mukavemeti, malzemenin tokluğu ile ilişkilidir. Tokluk, malzemenin yapısında deformasyonun ortaya çıkması için gereken enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır. Darbe olayı esnasında malzeme tarafından absorbe edilmiş olan enerji, malzemenin mukavemeti ve tokluğunun bir    t  olarak kullanılmaktadır. Çalışmanın bu kısmında üretilmiş malzemelerin darbe mukavemetini belirlemek amacıyla karbon-p r, bazalt-p r, Bazalt-karbon-p r, karbon-0,1 GNP, bazalt-0,1 GNP ve bazalt-karbon-0,1 GNP malzemeleri kapsamakta olan altı tür malzeme düşük hızlı darbe deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak ve malzemenin darbe dayanımı ve tokluğunu incelemek amacıyla kuvvet-çökme, kuvvet-zaman, enerji-zaman, çökme-zaman, hız-zaman ve temas süresi-zaman gibi diyagramlar çizilip, incelenmiştir. Ayrıca termal yorulmanın, test edilen malzemelerin darbe dayanım ve tokluğu üzerinde etkilerini incelemek amacıyla çeşitli termal çevrim sayıları için ilgili diyagramlar çizilip, incelenmiştir. Darbe testlerinde kullanılan vurucu mermi şeklinde olup, kütlesi 4,926 kg’dır. Test edilmekte olan malzemeler için uygun darbe enerjisinin bulunması amacıyla bu edilen malzemeler çeşitli enerji değerinde darbeye maruz bırakılarak,

uygun enerji değerleri bulunmuştur. Kalibrasyon deneyine ait diyagramlar her malzeme için verilmiştir.

4.16.1. Karbon-Pür

Bu malzemeden üretilmiş olan numuneler 100 mm boyutlarında ve 5 mm kalınlığında dörtgen şeklinde olup, 24 kat geleneksel twill kumaştan oluşmaktadırlar. Karbon-pür kompozit malzemelerin darbe enerji kalibrasyon diyagramı Şekil 4.229’de verilmektedir.



Şekil 4.229. Karbon-pür kompozitin darbe enerji kalibrasyon diyagramı

Şekil 4.229’da belirlenmiş olan noktalara göre 1,2 ve 3 numaralı numunelerde, çarpan vurucunun enerjisi numuneye saplanmak ve ya delip geçmek için yeterli olmamıştır. Böylece vurucunun enerjisi artırılarak 4. numunede bu enerji 60 J değerine yükseltilmiştir. Görüldüğü gibi bu numune eşit enerji çizgisi üzerinde bulunmaktadır. Buna göre 60 J enerjisi kullanıldığında vurucu numuneye saplanmaktadır. 5’olu numunede kullanılan enerji değeri 80 J olmaktadır. Görüldüğü gibi bu enerji değerinde vurucu numuneyi delip geçmiştir. Böylece 80 J enerji değeri karbon elyaf takviyeli kompozitlerin darbe enerjileri için uygun bir değerdir. Karbon elyafından üretilmiş olan kompozit numuneler oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrim -40 ile +120°C sıcaklığa

maruz bırakıldıktan sonra ASTM 7136 göre darbe deneyine tabi tutulmuşlardır. Karbon-pür numunelerinde darbe sonucu ortaya çıkmış olan hasar Şekil 4.230'da gösterilmiştir. Bu malzemelere ait kuvvet-çökme diyagramları Şekil 4.231'de verilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.230. (devam)

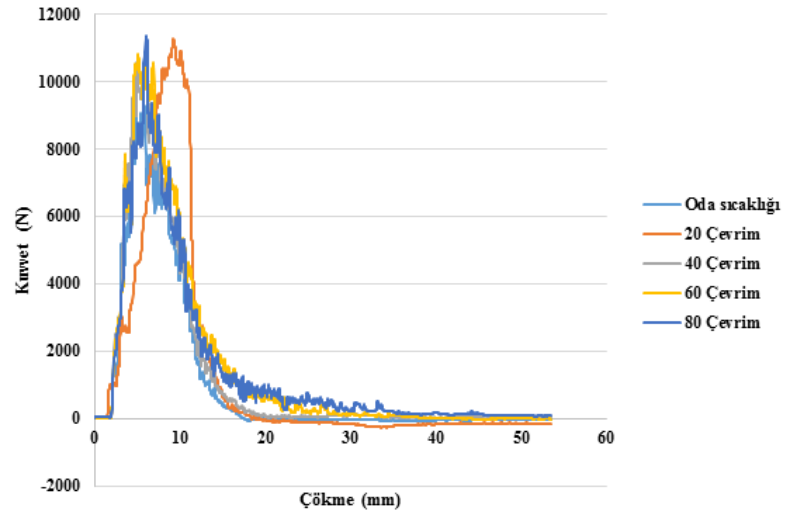


(d)



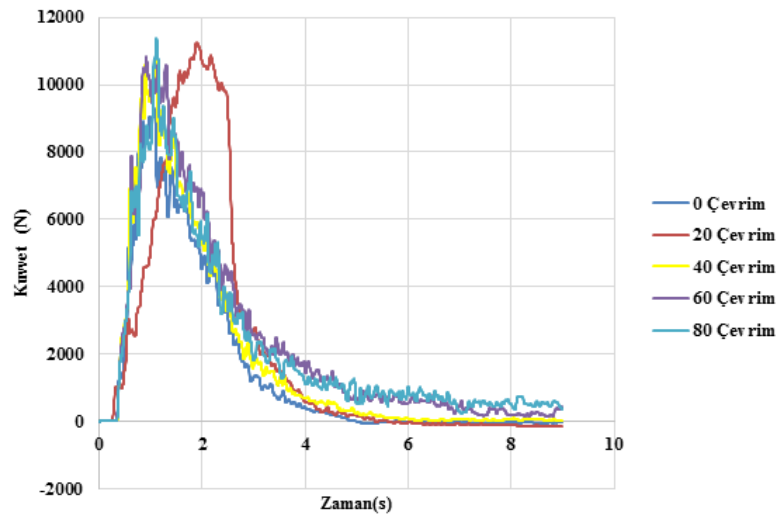
(e)

Şekil 4.230. Darbe sonucu karbon-pür numunelerinde ortaya çıkan hasarlar
(a) oda sıcaklığı, (b) 20 çevrim, (c) 40 çevrim, (d) 60 çevrim, (e) 80 çevrim



Şekil 4.231. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları

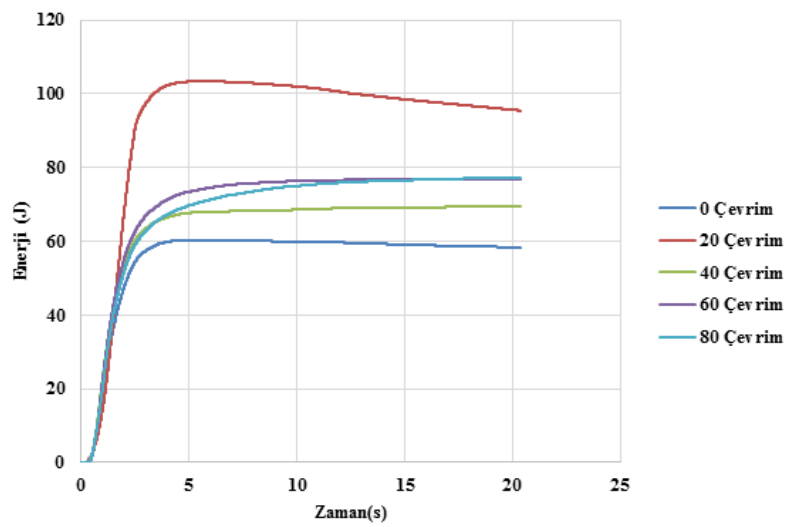
Şekil 4.231’de farklı sayılarda termal çevrime maruz bırakılmış numunelerin kuvvet-çökme diyagramları gözden geçirildiğinde 20 çevrime maruz bırakılmış numunenin yükleme bölümünde daha düşük eğime sahip olduğu ve böylece daha düşük eğilme rijitliğine sahip olduğu görülmektedir. Bu malzeme zirve kuvvet noktasında en yüksek çökme miktarına (9,132mm), yükten boşalma kısmında en yüksek eğime sahip olmaktadır. Aynı zamanda 80 çevrime termal yorulmaya tabi tutulmuş karbon-pür numunesi yükleme kısmında en yüksek ve yükten boşalma kısmında en düşük eğime sahiptir. Ayrıca bu malzemenin zirve kuvvet noktası en düşük (5,99 mm) çökme değerine sahip olmaktadır. Şekil 4.232’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-pür malzemelerinin kuvvet-zaman diyagramları verilmektedir.



Şekil 4.232. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları

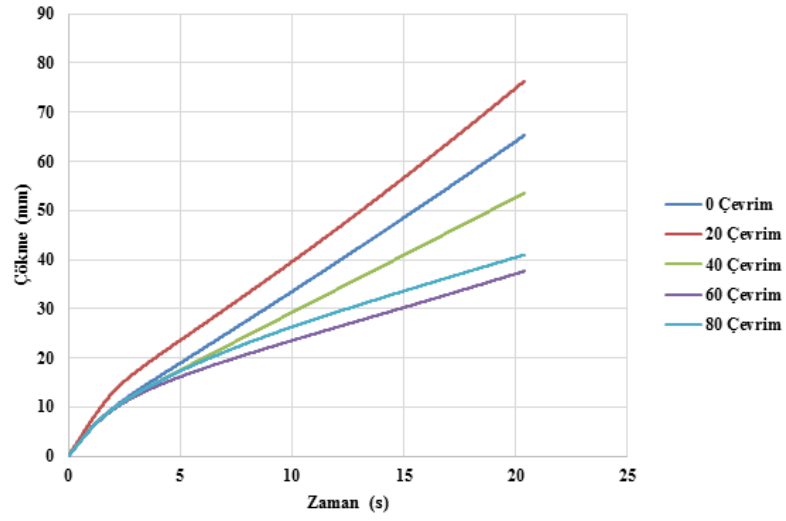
Şekil 4.232’de çeşitli sayıda termal çevrime tabi tutulmuş karbon-pür numunelerinin kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, aynen kuvvet-çökme diyagramında olduğu gibi -20 ile 120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakılmış numune yükleme bölümünde daha düşük eğime sahip olup, daha düşük eğilme rijitliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu malzeme zirve kuvvet noktasında en geç zamanda (1,912s), yükten boşalma kısmında en yüksek eğime sahip olmaktadır. Aynı zamanda 80 çevrime termal yorulmaya tabi tutulmuş karbon-pür numunesi yükleme kısmında en yüksek ve yükten

boşalma kısmında en düşük eğime sahiptir. Ayrıca bu malzemenin maksimum kuvveti diğer numunelere göre en erken zamanda (1,116s) ortaya çıkmıştır. 80 çevrim grafiğinde görülen sürekli ve küçük oranlarda düşüş ve artışlar darbe esnasında karbon elyafın gevrek olduğundan dolayı kırılmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.233'te çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-pür malzemelerinin enerji-zaman diyagramları verilmektedir.



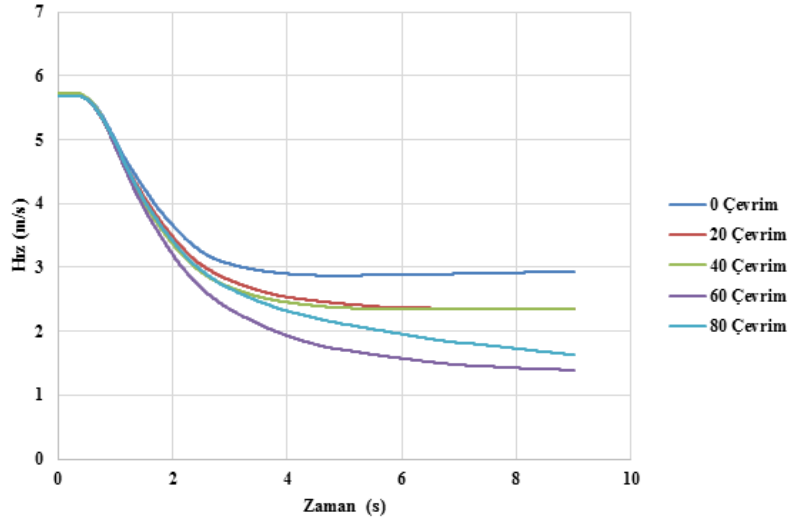
Şekil 4.233. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları

Şekil 4.233'te çeşitli sayıda termal çevrime maruz bırakılmış karbon-pür numunelerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde, -20 ile 120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakılmış numune diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha yüksek enerji absorpsiyon oranına sahip olmaktadır. Bilindiği gibi absorbe edilen enerji, kuvvet-çökme eğrisinin altında kalan alan miktarından hesaplanır (Sayer 2009). Şekil 4.231'de verilmiş olan kuvvet-çökme diyagramına göre, 20 çevrime tabi tutulmuş numunenin altında bulunan alanın diğer numunelere göre daha büyük olduğu net olarak görülmektedir. Şekil 4.234'te çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-pür malzemelerinin çökme-zaman diyagramları verilmektedir.



Şekil 4.234. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları

Şekil 4.234'te çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış karbon-pür numunelerinin çökme-zaman grafiklerine bakıldığında, -20 ile 120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakılmış numune diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha yüksek çökmeye sahip olmaktadır. Bilindiği gibi darbe kuvvetinin maksimum değere ulaştığında numunedeki çökme artış hızının azalması gerekmektedir (Sayer 2009). Şekil 4.232'de verilmiş olan kuvvet-zaman ve Şekil 4.234'te bulunan çökme zaman diyagramları kıyaslandığında bu olayın 1,6 s'de meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.235'te çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-pür malzemelerinin hız-zaman diyagramları verilmektedir.

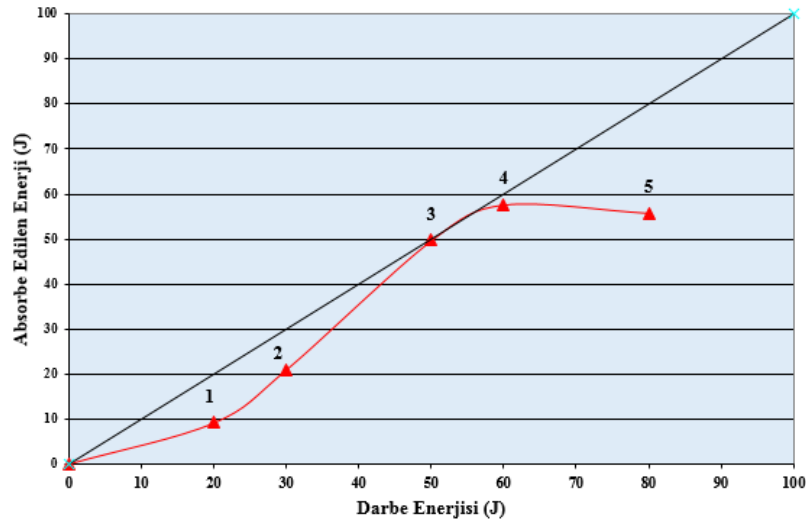


Şekil 4.235. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları

Şekil 4.235'te çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış karbon-pür numunelerinin hız-zaman ve kuvvet-zaman grafikleri gözden geçirilirse, bütün numunelerin hızlarının düşüş noktası maksimum kuvvet zamanına denk gelmektedir. Bilindiği gibi vurucunun çarpma sonucu numuneyi delip geçme sonucunda, vurucu belli bir hız ile numuneye saplanıp, kalınlık boyunca ilerlemesi gerekmektedir. Bu arada, vurucunun hızını yavaşlatan olay, vurucu ve numune arasındaki sürtünmedir. Bunun sonucunda da geri sekme meydana gelmediğine göre vurucunun darbe sonunda pozitif bir hıza sahip olduğu belirlenmektedir. Bu olay Şekil 4.235'te verilmiş hız-zaman diyagramının son kısmının x eksenine paralel olmasından net olarak anlaşılmaktadır (Sayer 2009).

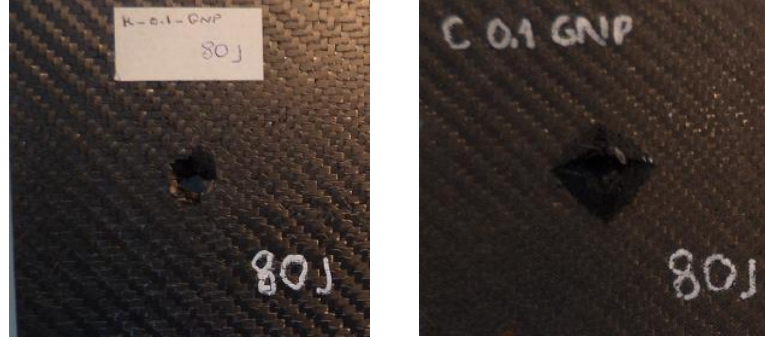
4.16.2. Karbon-0,1 GNP

Bu malzemeden üretilmiş olan numuneler 100 mm boyutlarında ve 5 mm kalınlığında dörtgen şeklinde olup, 24 kat geleneksel twill kumaştan oluşmaktadırlar. Karbon-pür kompozit malzemelerin darbe enerji kalibrasyon diyagramı Şekil 4.236'da verilmektedir.



Şekil 4.236. Karbon-0,1 GNP kompozitinin darbe enerji kalibrasyon diyagramı

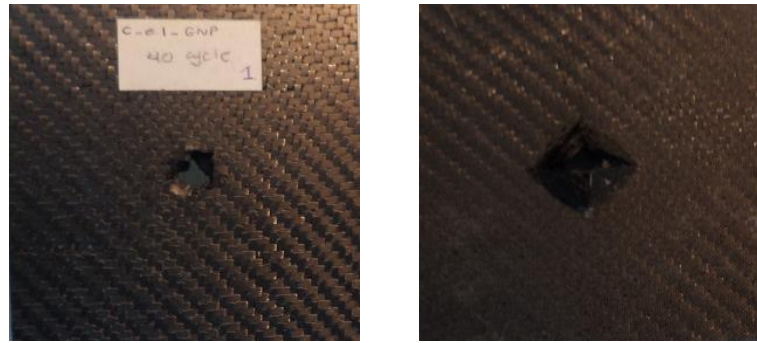
Karbon-0,1 GNP malzemesinin darbe deneyi enerjisinin kalibrasyonu için beş adet numune kullanılmıştır. Şekil 4.236'da belirlenmiş olan noktalara göre 1 ve 2 numaralı numunelerde, çarpan vurucunun enerjisi numuneye saplanmak ve ya delip geçmek için yeterli olmamıştır ve bu enerjilerde darbe sonucunda vurucu geri sekmiştir. Böylece vurucunun enerjisi artırılarak 3. numunede bu enerji 50 J değerine yükseltilmiştir. Görüldüğü gibi bu numune eşit enerji çizgisi üzerinde bulunmaktadır. Buna göre 50 J enerjisi kullanıldığında vurucu numuneye saplanmaktadır. 4'üncü numunede kullanılan enerji değeri 80 J olmaktadır. Görüldüğü gibi bu enerji değerinde vurucu numuneyi delip geçmiştir. Böylece 80 J enerji değeri karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe enerjileri için uygun bir değerdir. Karbon-0,1 GNP malzemesinden üretilmiş olan kompozit numuneler oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrim -40 ile +120°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonra ASTM D7136 göre darbe deneyine tabi tutulmuşlardır. Karbon-0,1 GNP numunelerinde darbe sonucu ortaya çıkmış olan hasar Şekil 4.237'de gösterilmiştir. Bu malzemelere ait kuvvet-çökme diyagramları Şekil 4.238'de verilmektedir.



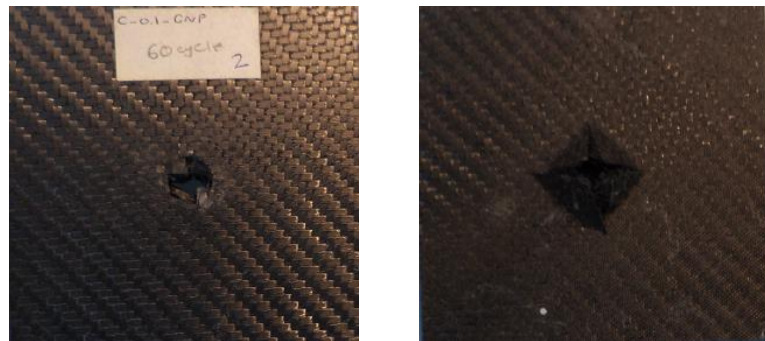
(a)



(b)

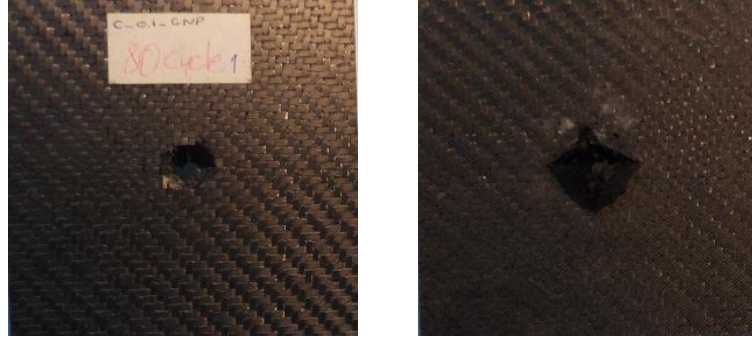


(c)



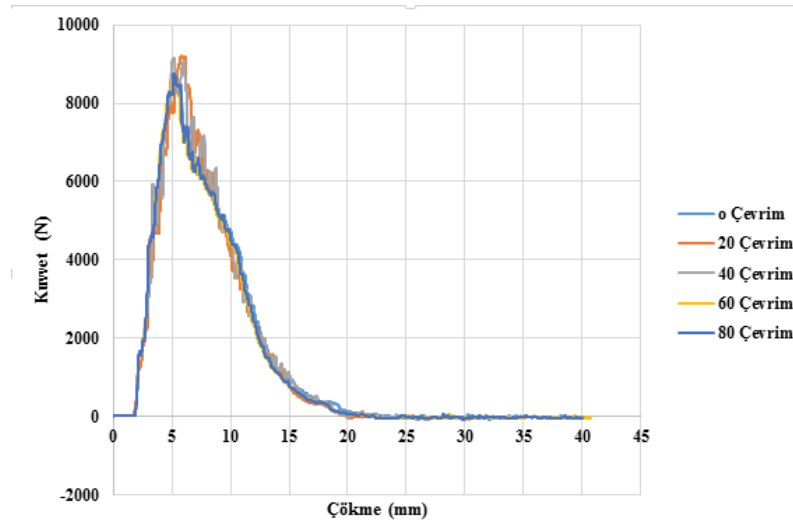
(d)

Şekil 4.237. (devam)



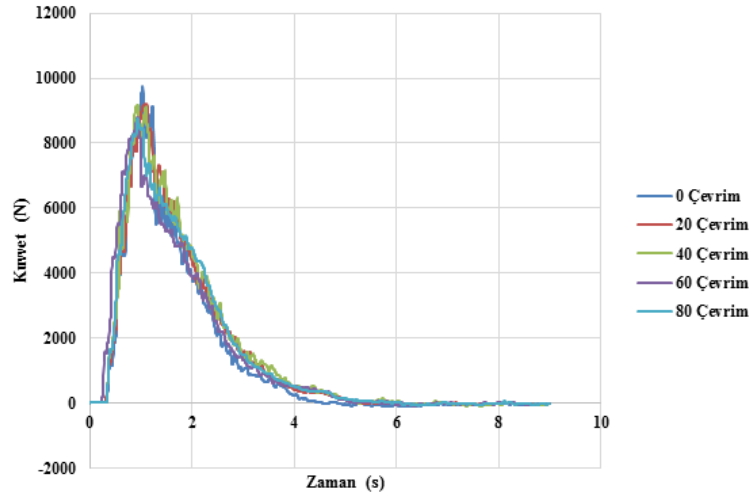
(e)

Şekil 4.237. Darbe sonucu karbon-0,1 GNP numunelerinde ortaya çıkan hasarlar
(a) oda sıcaklığı, (b) 20 çevrim, (c) 40 çevrim, (d) 60 çevrim, (e) 80 çevrim



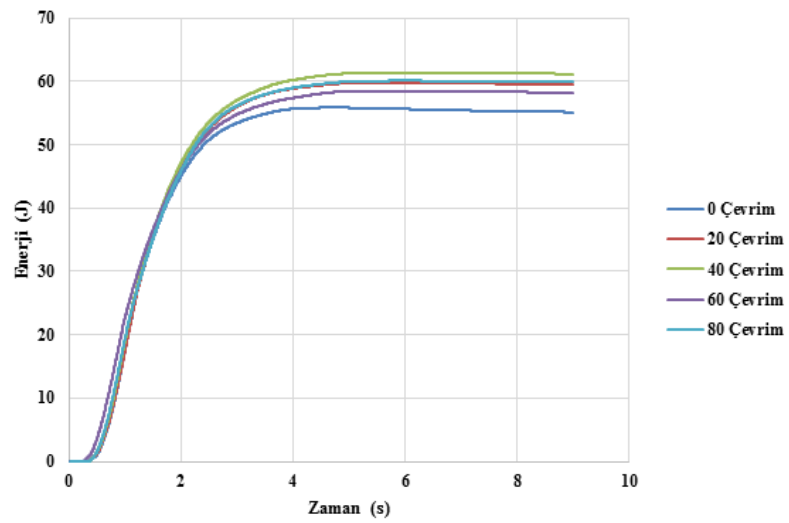
Şekil 4.238. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları

Şekil 4.238’de verilmiş olan farklı sayılarda termal çevrime tabi tutulmuş numunelerin kuvvet-çökme diyagramları gözden geçirildiğinde, bu malzemelerin darbeye karşı çok yakın bir performans gösterdikleri görülmüş olur. Numunelerin hepsinde maksimum kuvvet değerinde yaklaşık 5,2 mm çökme ortaya çıkmıştır. Şekil 4.239’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-0,1 GNP malzemelerinin kuvvet-zaman diyagramları verilmektedir.



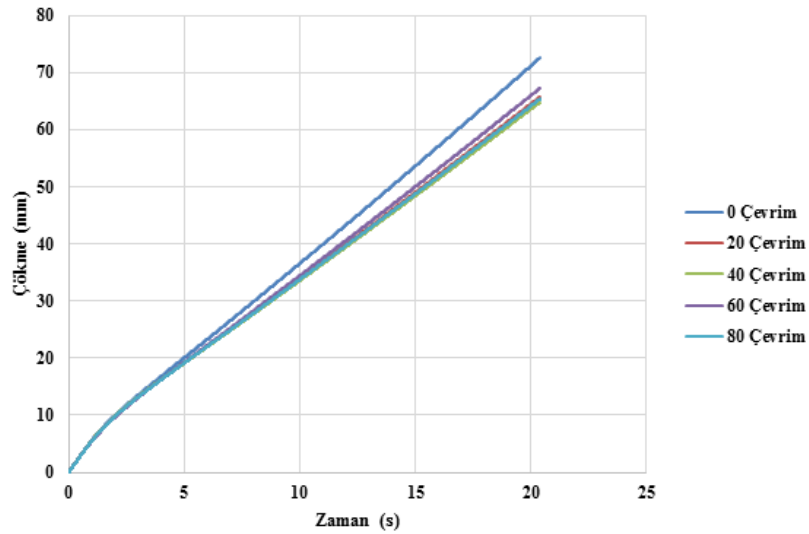
Şekil 4.239. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları

Şekil 4.239’da verilmiş olan farklı sayılarda termal çevrime tabi tutulmuş numunelerin kuvvet-zaman diyagramlarına bakıldığında, bu malzemelerin darbeye karşı çok yakın bir performans gösterdikleri görünmüş olur. Numunelerin hepsinde maksimum kuvvet değeri yaklaşık 1-1,1 aralığında ortaya çıkmıştır. Şekil 4.240’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-0,1 GNP malzemelerinin enerji-zaman diyagramları verilmektedir.



Şekil 4.240. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları

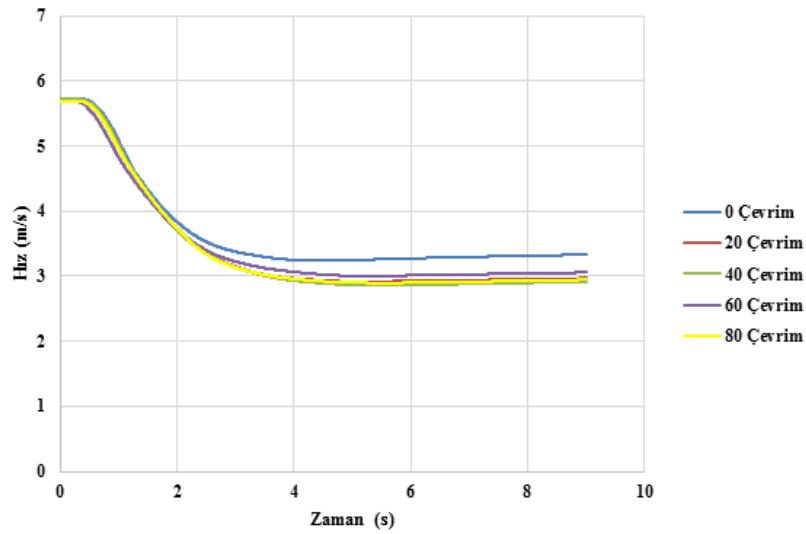
Şekil 4.240'ta reçinesi %0,1 GNP içeren karbon elyaf takviyeli kompozitler için verilmiş olan farklı sayılarda termal çevrime tabi tutulmuş numunelerin enerji-zaman diyagramlarına bakıldığında, oda sıcaklığında bulunan ve termal işleme tabi tutulmayan numune diğer numunelere göre darbe deney sonucunda en düşük enerji absorpsiyon oranına sahip olmaktadır. Bilindiği gibi absorbe edilen enerji, kuvvet-çökme eğrisinin altında kalan alan miktarından hesaplanır. Şekil 4.238'de verilmiş olan kuvvet çökme diyagramına bakıldığında, bütün numunelerin darbeye karşı çok yakın bir performans sergiledikleri gözlemlenir. Böylece diyagramda bulunan eğrilerin altında bulunan alanlarında çok yakın olması beklenmektedir. Şekil 4.240'ta verilmiş olan enerji-zaman eğrilerin çok benzer olması bu olaydan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.241'de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-0,1 GNP malzemelerinin çökme-zaman diyagramları verilmektedir.



Şekil 4.241. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları

Şekil 4.241'de çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış karbon-0,1 GNP numunelerinin çökme-zaman grafiklerine bakıldığında, -20 ile 120°C aralığında 80 çevrime tabi tutulmuş numunenin diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha yüksek çökme oranına sahip olduğu görülmektedir. Tam tersi oda sıcaklığında bulunan numunenin aynı enerjide darbeye maruz kalmasıyla diğer numunelere göre daha yüksek oranda

çökmesi Şekil 4.241’de verilen eğrilerin eğiminden belli olmaktadır. Şekil 4.239’da verilmiş olan kuvvet-zaman ve şekil 4.241’de bulunan çökme zaman diyagramları kıyaslandığında bu olayın yaklaşık 1. s’de meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.242’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-0,1 GNP malzemelerinin hız-zaman diyagramları verilmektedir.

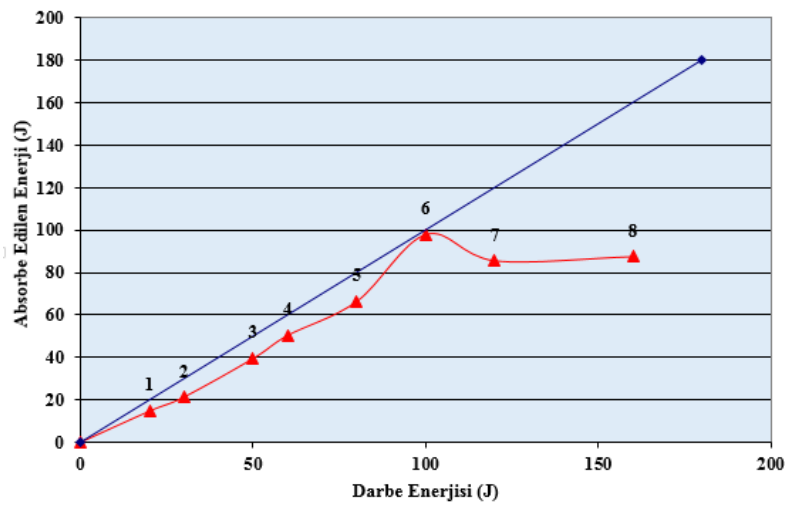


Şekil 4.242. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları

Şekil 4.242’de çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış karbon-0,1 GNP kompozit numunelerinin hız-zaman ve Şekil 4.239’da bulunan kuvvet-zaman grafikleri gözden geçirilirse, bütün numunelerin hızlarının düşüş noktası maksimum kuvvet zamanına denk gelmektedir. Bilindiği gibi vurucunun çarpma sonucu numuneyi delip geçme sonucunda, vurucu belli bir hız ile numuneye saplanıp, kalınlık boyunca ilerlemesi gerekmektedir. Bu arada, vurucunun hızını yavaşlatan olay, vurucu ve numune arasındaki sürtünmedir. Bunun sonucunda da geri sekme meydana gelmediğine göre vurucunun darbe sonunda pozitif bir hıza sahip olduğu belirlenmektedir. Bu olay Şekil 4.242’de verilmiş hız-zaman diyagramının son kısmının x eksenine paralel olmasından anlaşılmaktadır (Sayer 2009).

4.16.3. Bazalt-Pür

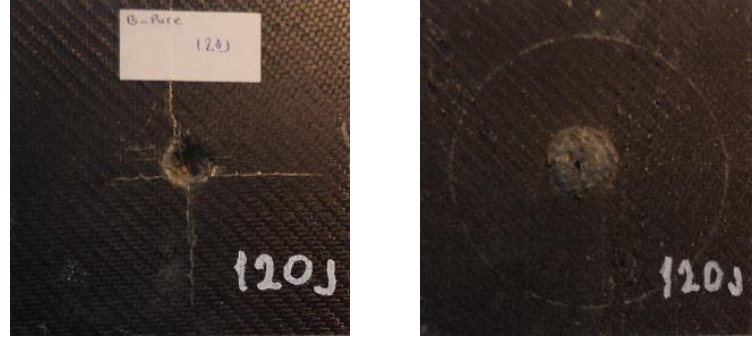
Bu malzemeden üretilmiş olan numuneler 100 mm boyutlarında ve 4 mm kalınlığında dörtgen şeklinde olup, 24 kat geleneksel twill kumaştan oluşmaktadırlar. Bazalt elyaf takviyeli kompozit malzemelerin darbe enerji kalibrasyon diyagramı Şekil 4.243'te verilmektedir.



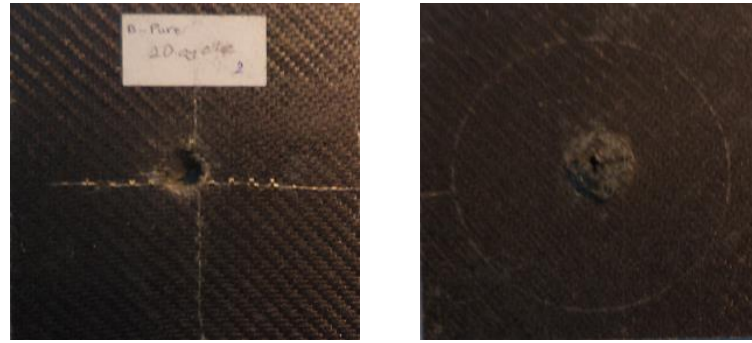
Şekil 4.243. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin darbe enerji kalibrasyon diyagramı

Şekil 14'de belirlenmiş olan noktalara göre 1,2, 3,4 ve 5 numaralı numunelerde, çarpan vurucunun enerjisi numuneye saplanmak ve ya delip geçmek için yeterli olmamıştır. Böylece vurucunun enerjisi artırılarak 6. numunede bu enerji 100 J değerine yükseltilmiştir. Görüldüğü gibi bu numune eşit enerji çizgisi üzerinde bulunmaktadır. Buna göre 100 J enerji değeri kullanıldığında vurucu numuneye saplanmaktadır. 7 ve 8'nolu numunelerde kullanılan enerji değerleri sırasıyla 100 ve 120 olmaktadır. Görüldüğü gibi bu enerji değerlerinde vurucu numuneyi delip geçmiştir. Böylece 120 J enerji değeri bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin darbe enerjileri için uygun bir değerdir. Bazalt elyafından üretilmiş olan kompozit numuneler oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrim -40 ile +120°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ASTM D7136 göre darbe deneyine tabi tutulmuşlardır. Bazalt-pür numunelerinde darbe sonucu ortaya

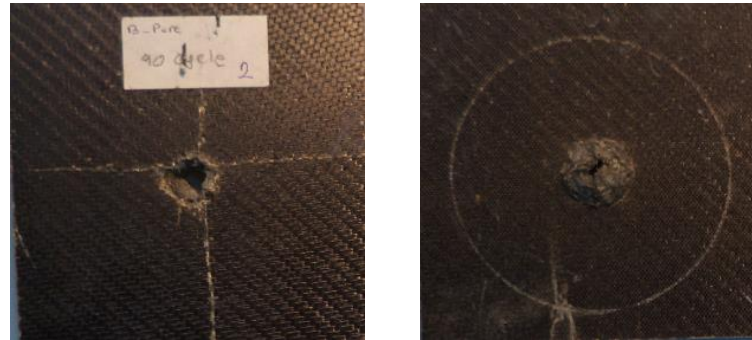
çıkması olan hasar Şekil 4.244'te gösterilmiştir. Bu malzemelere ait kuvvet-çökme diyagramları Şekil 4.245'te verilmektedir.



(a)

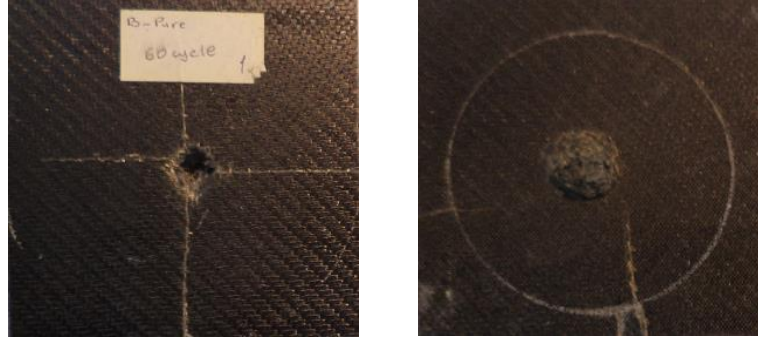


(b)

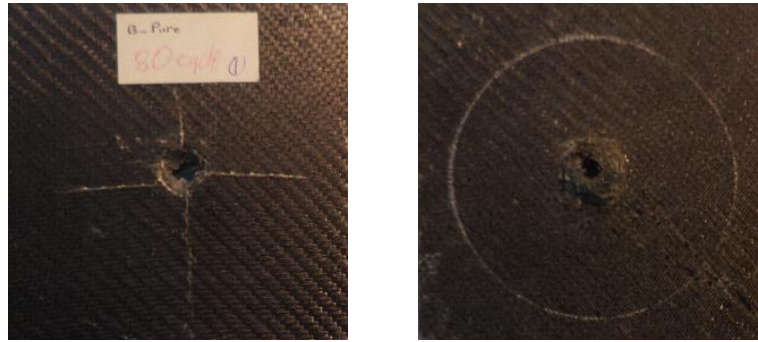


(c)

Şekil 4.244. (devam)

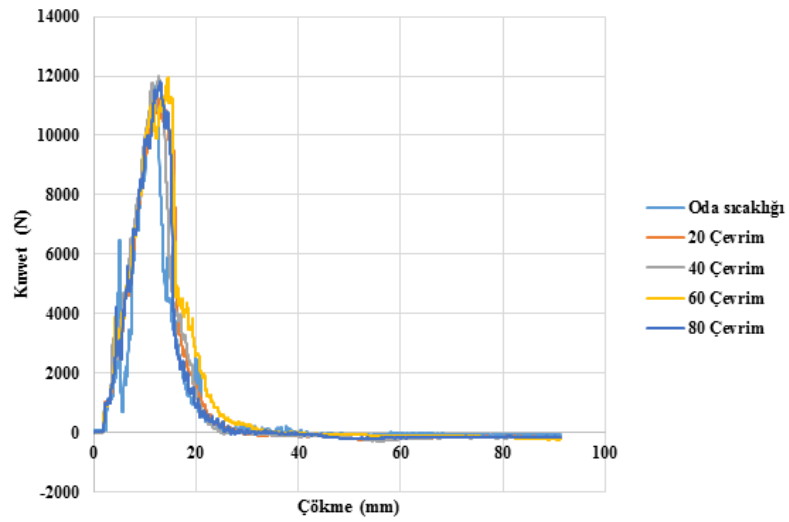


(d)



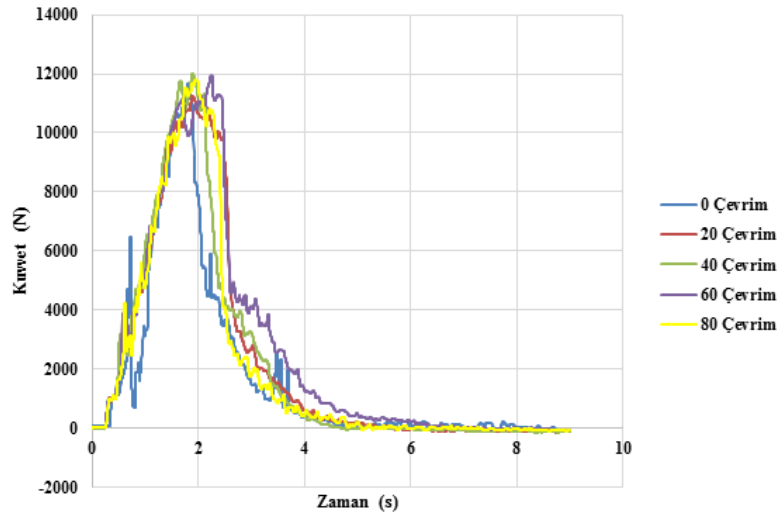
(e)

Şekil 4.244. Darbe sonucu bazalt numunelerinde ortaya çıkan hasarlar
(a) oda sıcaklığı, (b) 20 çevrim, (c) 40 çevrim, (d) 60 çevrim, (e) 80 çevrim



Şekil 4.245. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları

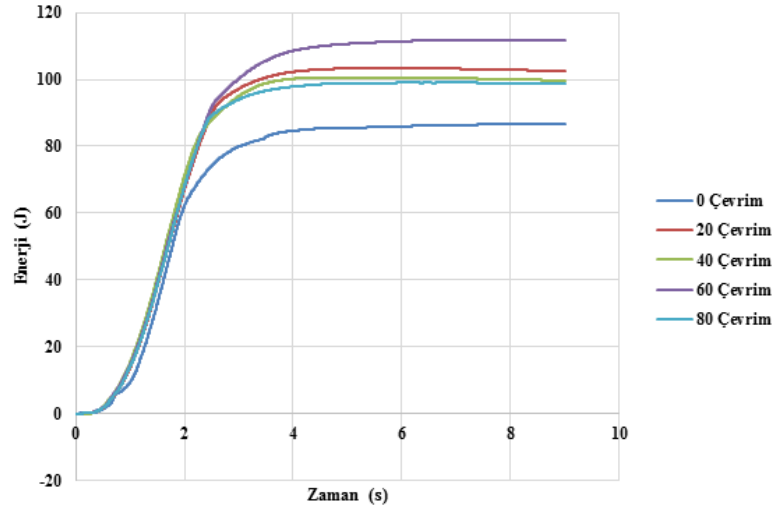
Şekil 4.245'te verilmiş olan farklı sayılarda termal çevrime maruz bırakılmış numunelerin kuvvet-çökme diyagramları gözden geçirildiğinde, oda sıcaklığında bulunan numunenin yükleme bölümünde daha düşük eğime sahip olduğu ve böylece daha düşük eğilme rijitliğine sahip olduğu görülmektedir. Bu malzeme zirve kuvvet noktasında 12,74 mm çökme miktarına ve yükten boşalma kısmında en yüksek eğime sahip olmaktadır. Aynı zamanda 60 çevrime termal yorulmaya tabi tutulmuş bazalt elyaf takviyeli kompozit numunesi zirve kuvvet noktasında 13,11 mm çökme miktarına sahip olarak en yüksek değeri almıştır. Bu kategoride bulunan diğer malzemele kuvvet-çökme konusunda benzer performanslar sergilemişlerdir. Şekil 4.246'da çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür malzemelerinin kuvvet-zaman diyagramları verilmektedir.



Şekil 4.246. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları

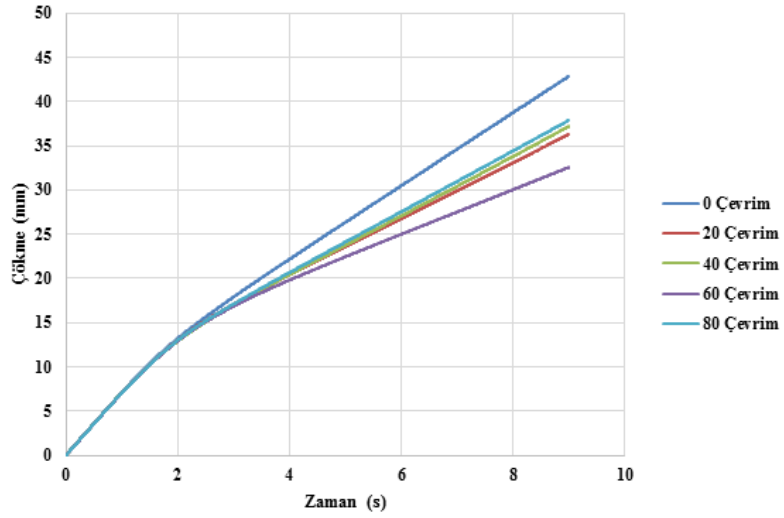
Şekil 4.246'da verilmiş olan çeşitli sayıda termal çevrime tabi tutulmuş bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, aynen kuvvet-çökme diyagramında olduğu gibi oda sıcaklığında bulunan numunenin yükleme bölümünde en düşük ve yük boşaltma kısmında en yüksek eğime sahip olduğu görülmektedir. Bu malzeme için maksimum kuvvet 1,86 s'de ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda 60 çevrim termal yorulmaya tabi tutulmuş bazalt elyaf takviyeli kompozit numunesinin zirve

maksimum kuvvet değeri 1,72 s’de ortaya çıkmıştır. Bu kategoride bulunan diğer malzemeler kuvvet-zaman konusunda benzer performanslar sergilemişlerdir. Şekil 4.247’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür malzemelerinin enerji-zaman diyagramları verilmektedir.



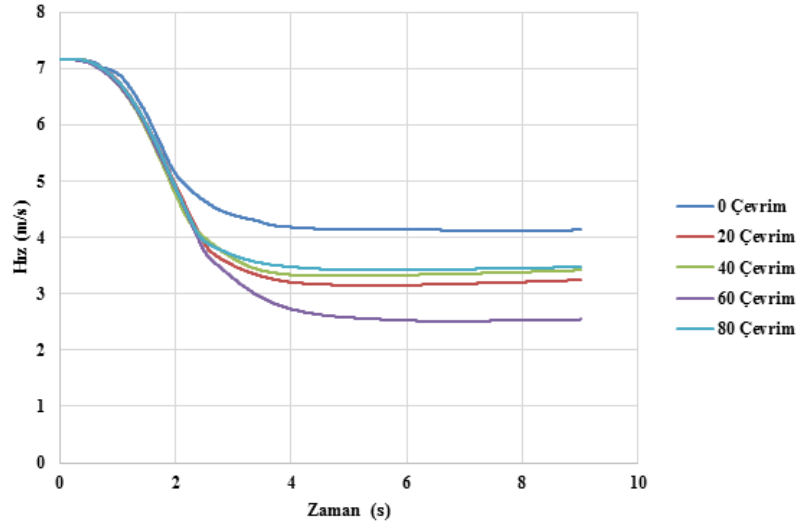
Şekil 4.247. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları

Şekil 4.247’de verilmiş olan çeşitli sayıda termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-pür numunelerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde, -20 ile 120°C aralığında 60 çevrime maruz bırakılmış numune diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha yüksek enerji absorpsiyon oranına sahip olmaktadır. Şekil 4.245’te verilmiş olan kuvvet-çökme diyagramına göre, 60 çevrime tabi tutulmuş numunenin altında bulunan alanın diğer numunelere göre daha büyük olduğu net olarak görülmektedir ve böylece absorbe edilmiş olan enerji değerininin bu numunede daha yüksük olması mantıki bir durumdur. Şekil 4.248’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozit malzemelerinin çökme-zaman diyagramları verilmektedir.



Şekil 4.248. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları

Şekil 4.248’de görülmekte olan çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış bazalt-pür numunelerinin çökme-zaman grafiklerine bakıldığında, oda sıcaklığında bulunan numune diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha yüksek çökmeye sahip olmaktadır. Bilindiği gibi darbe kuvvetinin maksimum değere ulaştığında numunedeki çökme artış hızının azalması gerekmektedir (Sayer 2009). Şekil 4.246’da verilmiş olan kuvvet-zaman ve şekil 4.248’de bulunan çökme zaman diyagramları kıyaslandığında bu olayın 2. s’de ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 4.249’da çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-pür malzemelerinin hız-zaman diyagramları verilmektedir.

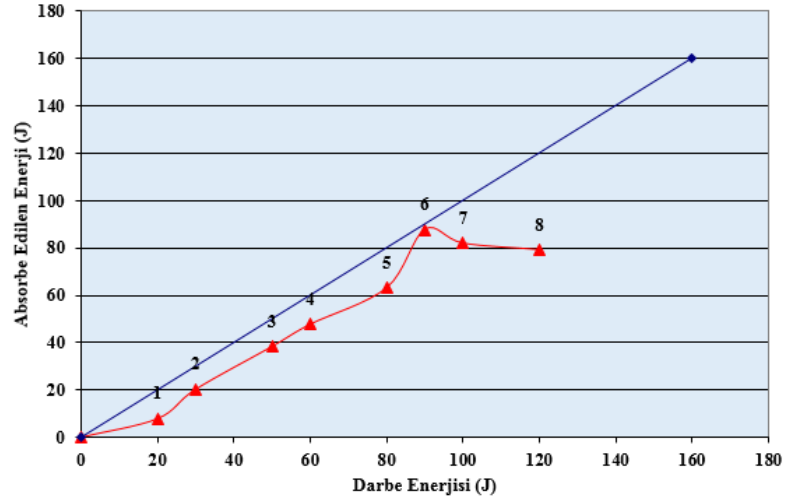


Şekil 4.249. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları

Şekil 4.249 ve 4.246'da verilmiş olan çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış bazalt-pür numunelerinin hız-zaman ve kuvvet-zaman grafiklerine bakılırsa, bütün numunelerin hızlarının düşüş noktası kuvvet-zaman diyagramlarının zirvede olduğu zamana (2.s) denk gelmektedir. Bilindiği gibi vurucunun çarpma sonucu numuneyi delip geçme sonucunda, vurucu belli bir hız ile numuneye saplanıp, kalınlık boyunca ilerlemesi gerekmektedir. İlk başta belli bir hıza sahip vurucunun numune ile ilk temasından sonra vurucunun hızının azalması gerekmektedir (Sayer 2009). Delinme olayından sonra, vurucunun hızını yavaşlatan olay, vurucu ve numune arasındaki sürtünmedir. Bu olay Şekil 4.249'de verilmiş hız-zaman diyagramının son kısmının x eksenine paralel olmasından net olarak anlaşılmaktadır.

4.16.4. Bazalt-0,1 GNP

Bu malzemeden üretilmiş olan numuneler 100 mm boyutlarında ve 4 mm kalınlığında dörtgen şeklinde olup, 24 kat geleneksel twill kumaştan oluşmaktadırlar. Bazalt-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe enerji kalibrasyon diyagramı Şekil 4.250'de verilmektedir.

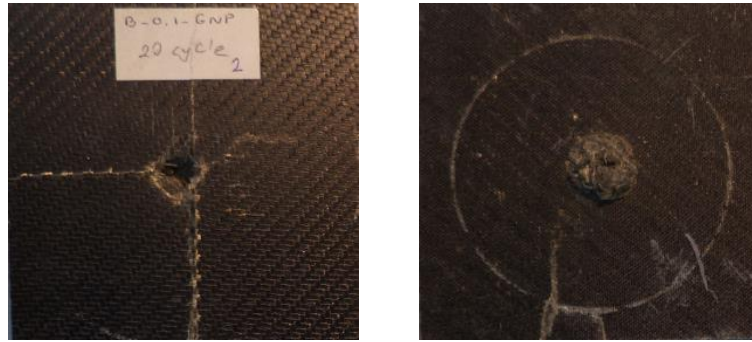


Şekil 4.250. Bazalt-0.1 GNP kompozitinin darbe enerji kalibrasyon diyagramı

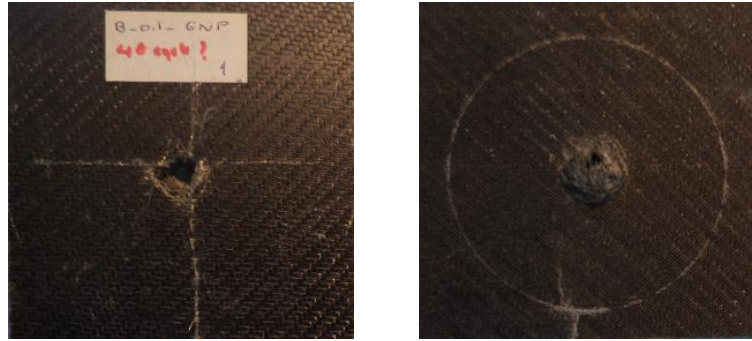
Bazalt-0,1 GNP malzemesinin uygun darbe enerjisini bulmak için sekiz tane numune kullanılmıştır. Şekil 4.232’de belirlenmiş olan noktalara göre 1,2, 3,4 ve 5 numaralı numunelerde, çarpan vurucunun enerjisi numuneye saplanmak ve ya delip geçmek için yeterli olmamıştır. Böylece vurucunun enerjisi artırılarak 6. numunede bu enerji 90 J değerine yükseltilmiştir. Görüldüğü gibi bu numunenin konumu eşit enerji çizgisi üzerinde bulunmaktadır. Buna göre bu enerji değeri kullanıldığında vurucu numuneye saplanmaktadır. 7 ve 8’olu numunelerde kullanılan enerji değerleri sırasıyla 100 ve 120 J olmaktadır. Görüldüğü gibi bu enerji değerlerinde vurucu numuneyi delip geçmiştir. Böylece 120 J enerji değeri bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe enerjileri için uygun bir değerdir. Bazalt elyafından üretilmiş olan ve reçinesi %0,1 GNP içeren kompozit numuneler oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrim -40 ile +120° C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ASTM D7136 göre darbe deneyine tabi tutulmuşlardır. Bazalt-0,1 GNP numunelerinde darbe sonucu ortaya çıkmış olan hasar Şekil 4.251’de gösterilmiştir. Bu malzemelere ait kuvvet-çökme diyagramları Şekil 4.252’de verilmektedir.



(a)



(b)

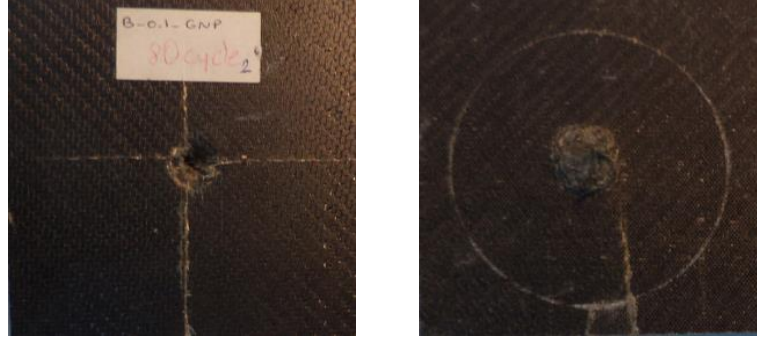


(c)



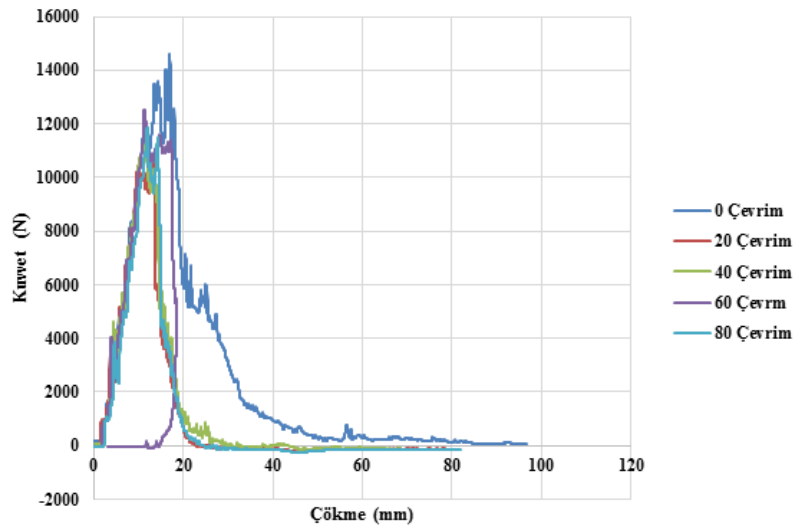
(d)

Şekil 4.251. (devam)



(e)

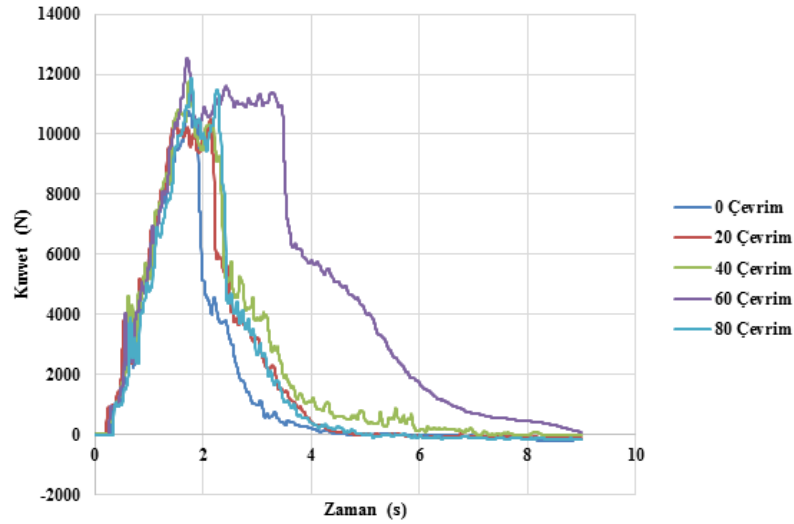
Şekil 4.251. Darbe sonucu bazalt-0,1 GNP numunelerinde ortaya çıkan hasarlar (a) oda sıcaklığı, (b) 20 çevrim, (c) 40 çevrim, (d) 60 çevrim, (e) 80 çevrim



Şekil 4.252. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları

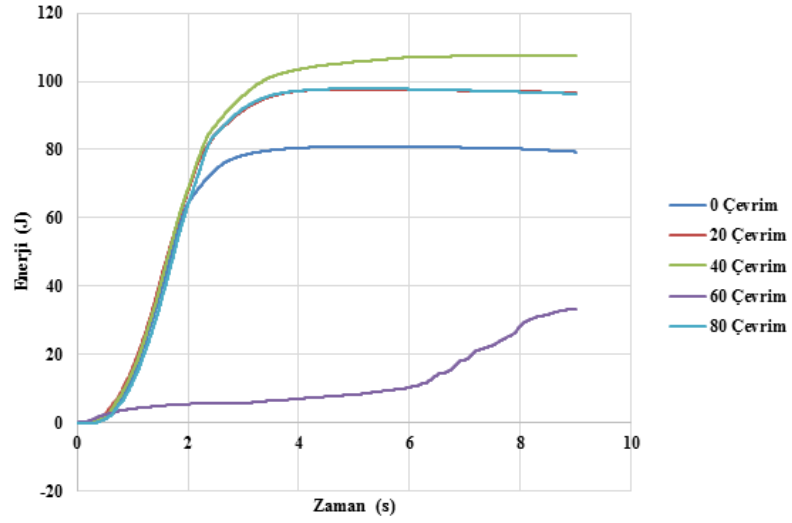
Şekil 4.234’de verilmiş olan farklı sayılarda termal çevrim uygulanmış numunelerin kuvvet-çökme diyagramları gözden geçirildiğinde 60 çevrim -50 ile 120 aralığında termal çevrime maruz bırakılmış numune dışında bütün numunelerde darbe sonucu delip geçme olayı ortaya çıkmıştır. Bu olay 60 çevrim diyagramının kapalı tip olduğundan anlaşılmaktadır. Bu arada oda sıcaklığında bulunan numunenin maksimum kuvvetine denk gelen çökmenin (17mm) diğer numunelere göre daha yüksek değere ve yükten boşalma kısmında daha düşük eğime sahip olduğu görülmektedir. Bu kategoride

bulunan diğer malzemele kuvvet-çökme konusunda benzer performanslar sergilemişlerdir. Şekil 4.253’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP malzemelerinin kuvvet-zaman diyagramları verilmektedir.



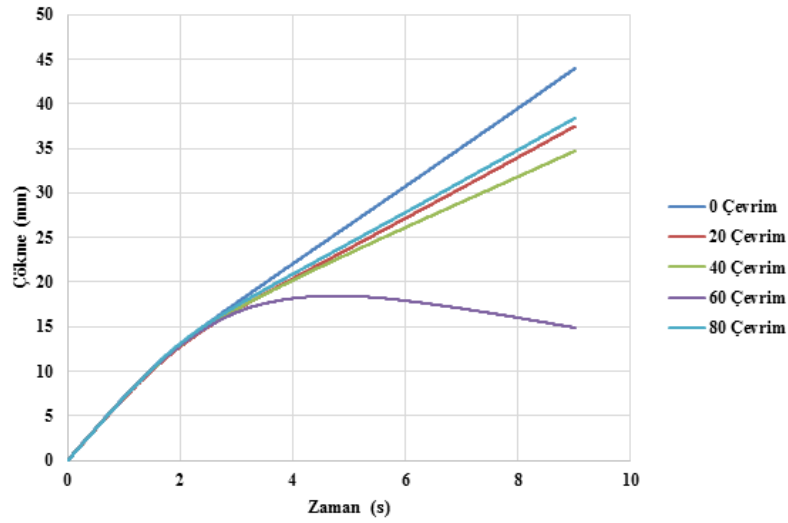
Şekil 4.253. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları

Şekil 4.253’de verilmiş olan çeşitli sayıda termal çevrime tabi tutulmuş reçinesi %0,1 GNP içeren bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, 60 çevrim numune eğrisinin parabolik şeklinde olduğu görülmektedir. Bu numunede darbe enerjisi numuneyi delip geçmek için yeterli olmamıştır ve vurucu numune yüzeyine çarptıktan sonra gerisekmıştır. Bu arada oda sıcaklığında bulunana numune yükten boşalma bölümünde en yüksek eğimi göstermekte olup, diğer numuneler benzer performanslar sergilemişlerdir. Numunede delinme meydana geldiğinde kuvvetin sıfır olması gerekir ama şekilden de görüleceği üzere vurucu ve numune arasında sürtünmemeydana geldiğinden eğrinin uç kısmı yatay eksene paralel ilerlemiştir (Sayer 2009). Bu olay Şekil 4.253’de 60 çevrim dışında bütün numuneler için görülmektedir. Şekil 4.254’te çeşitli çevrimlerde termal çevrime tabi tutulmuş bazalt-pür malzemelerinin enerji-zaman diyagramları verilmektedir.



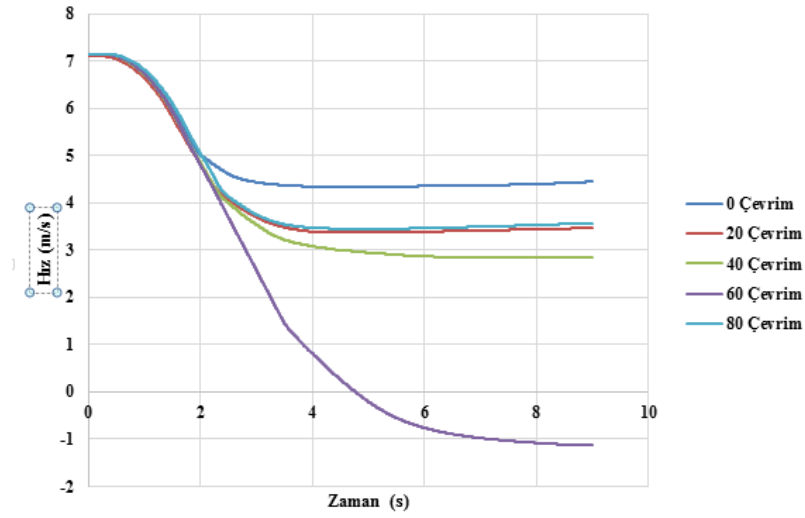
Şekil 4.254. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları

Şekil 4.254’da verilmiş olan çeşitli sayıda termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-0,1 GNP numunelerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde, -20 ile 120°C aralığında 40 çevrime maruz bırakılmış numune diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha yüksek enerji absorpsiyon oranına sahip olmaktadır. Bu arada 60 çevrime tabi tutulmuş numunenin enerji-zaman eğrisine bakıldığında darbe sonucu gerisekme olayının ortaya çıktığı net olarak görülmektedir. Şekil 4.254’ten de görüldüğü gibi diğer numunelerde, maksimum enerji absorpsyonu vurucunun numuneye temas ettiği zamanda (1,8s) ortaya çıkmıştır. Şekil 4.255’te çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozit malzemelerinin çökme-zaman diyagramları verilmektedir.



Şekil 4.255. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları

Şekil 4.255'te görülmekte olan çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış bazalt-0,1 GNP numunelerinin çökme-zaman eğrilerine 60 çevrime tabi tutulmuş numunede darbe sonucu gerisekme olayının ortaya çıktığı net olarak görülmektedir. Bu arada oda sıcaklığında bulunan numunenin kuvvet-çökme diyagramının diğer numunelere göre daha yüksek eğime sahip olduğu Şekil 4.252'den net olarak anlaşılmaktadır. Bilindiği gibi darbe kuvvetinin maksimum değere ulaştığında numunedeki çökme artış hızının azalması gerekmektedir (Sayer 2009). Şekil 4.253'te verilmiş olan kuvvet-zaman ve Şekil 4.237'te bulunan çökme-zaman diyagramları kıyaslandığında bu olayın yaklaşık 1,8 s'de ortaya çıktığı izlenmektedir. Şekil 4.256'da çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-pür malzemelerinin hız-zaman diyagramları verilmektedir.

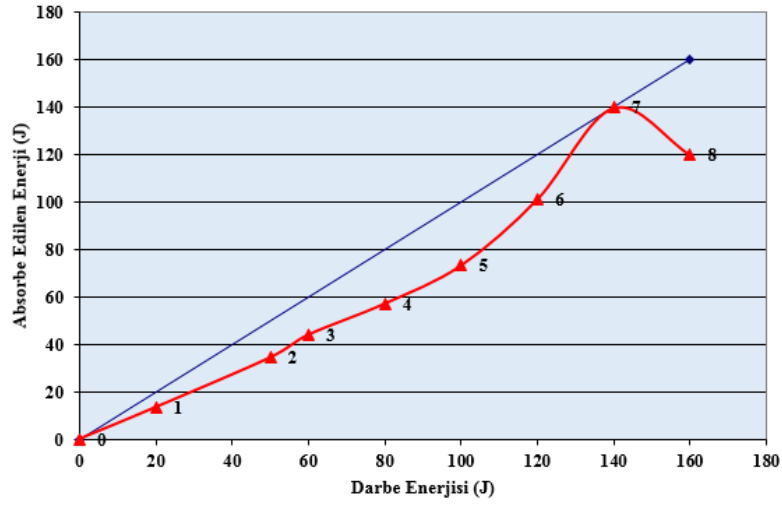


Şekil 4.256. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları

Şekil 4.256 ve 4.253'te verilmiş olan çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış bazalt-0,1 GNP numunelerinin hız-zaman ve kuvvet-zaman grafiklerine bakıldığında, bütün numunelerin hızlarının düşüş noktası kuvvet zaman diyagramının zirvede olduğu zaman (1,8s) noktasına denk geldiği ortaya çıkmış olur. Bilindiği gibi vurucunun çarpma sonucu numuneyi delip geçmeye enerjisi yetmiyorsa numune yüzeyinden geri sekip, hızının yön değiştirmesi gerekmektedir. Şekil 4.256'da 60 çevrim termal yorulmaya maruz kalmış numunenin hız-zaman grafiğine bakıldığında bu olayın ortaya çıktığı net olarak görülmektedir. Bu arada oda sıcaklığında bulunan numunenin darbe sonucu diğer numunelere göre hızında en az azalma ortaya çıktığı görülmektedir.

4.16.5. Bazalt-karbon-Pür

Bu malzemeden üretilmiş olan numuneler 100 mm boyutlarında ve 6 mm kalınlığında dörtgen şeklinde olup, 24 kat geleneksel twill kumaştan oluşmaktadırlar. Bazalt-karbon hibrit kompozit malzemelerin darbe enerji kalibrasyon diyagramı Şekil 4.257'de verilmektedir.

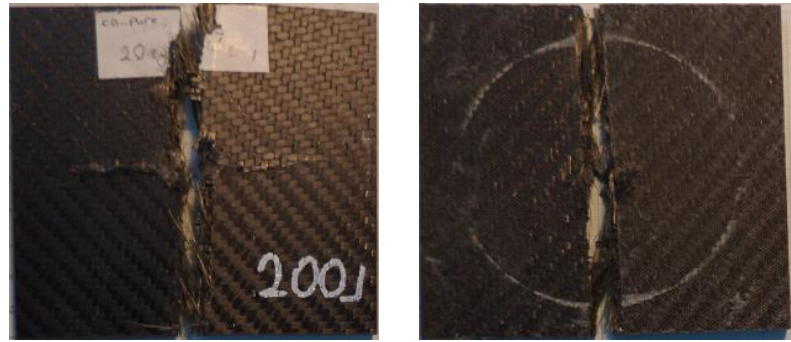


Şekil 4.257. Bazalt-karbon-pür hibrit kompozitin darbe enerji kalibrasyon diyagramı

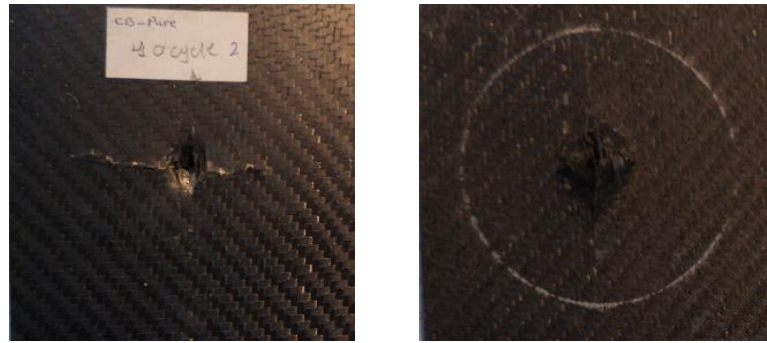
Bazalt-karbon-pür malzemesinin uygun darbe enerjisini bulmak amacıyla yedi tane numune kullanılmıştır. Şekil 4.257’de belirlenmiş olan enerji konum noktalarına göre 1,2, 3, 4,5 ve 6 numaralı numunelerde, çarpan vurucunun enerjisi numuneye saplanmak veya delip geçmek için yeterli olmadığı görülmektedir. Böylece vurucunun enerjisi artırılarak 7. numunede bu enerji 140 J değerine yükseltilmiştir. Görüldüğü gibi bu numunenin konumu eşit enerji çizgisi üzerinde bulunmaktadır. Buna göre bu enerji değeri kullanıldığında vurucu numuneye saplanmıştır. Bu numunelerin kırılma enerjisi olarak 200 J enerji değeri uygun bir değer olarak seçilmiştir. Bazalt-karbon hibrit kumaş elyafından üretilmiş olan kompozit numuneler oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrim - 40 ile +120°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ASTM 7136 göre darbe deneyine tabi tutulmuşlardır. Bazalt-karbon-pür numunelerinde darbe sonucu ortaya çıkmış olan hasar Şekil 4.258’de gösterilmiştir. Bu malzemelere ait kuvvet-çökme diyagramları Şekil 4.259’da verilmektedir.



(a)



(b)

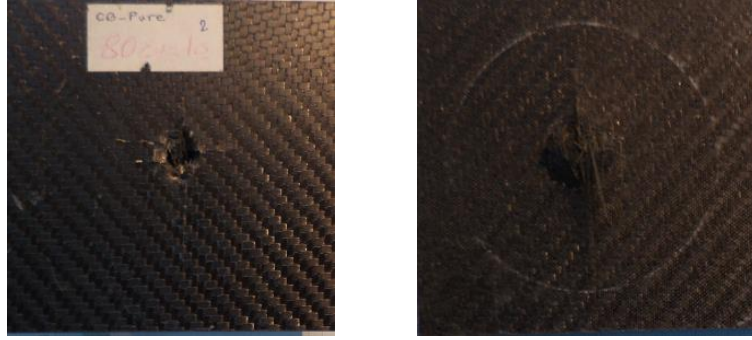


(c)



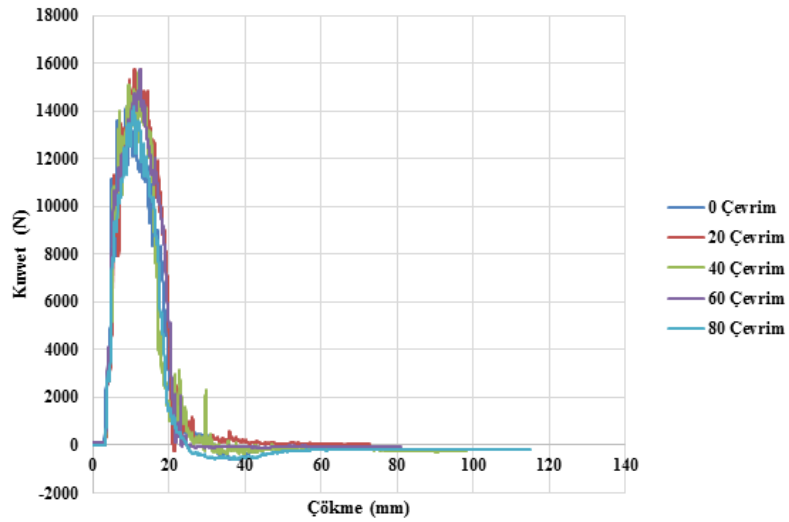
(d)

Şekil 4.258. (devam)



(e)

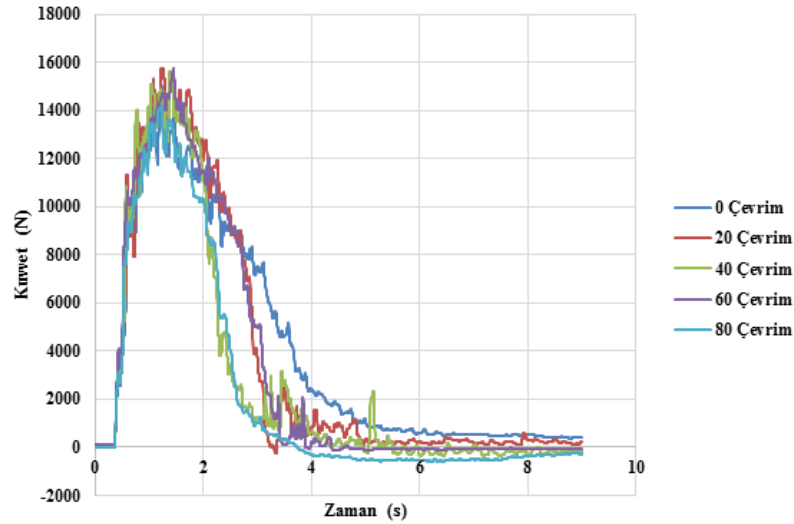
Şekil 4.258. Darbe sonucu bazalt-karbon-pür numunelerinde ortaya çıkan hasarlar
(a) oda sıcaklığı, (b) 20 çevrim, (c) 40 çevrim, (d) 60 çevrim, (e) 80 çevrim



Şekil 4.259. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları

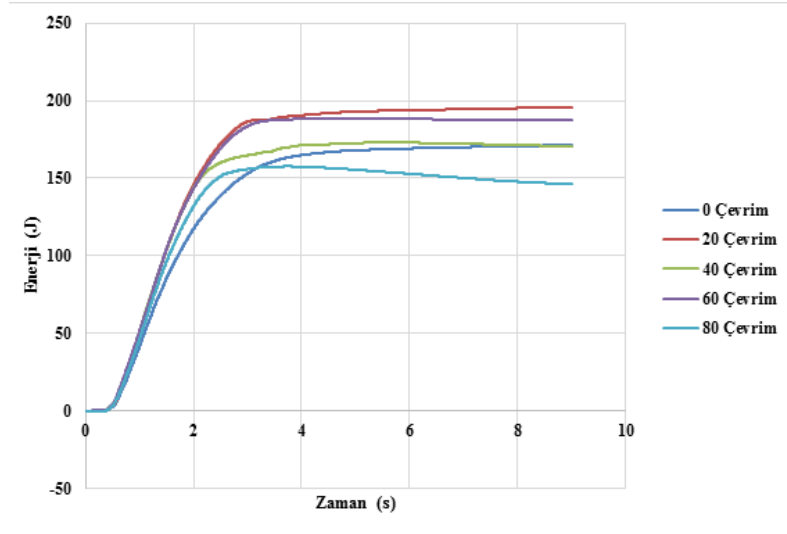
Şekil 4.259'de verilmiş olan farklı sayılarda termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon hibrit kompozit numunelerinin kuvvet-çökme diyagramları gözden geçirilirse, 80 çevrime tabi tutulmuş olan numunenin diğer numunelere göre daha düşük maksimum temas kuvvetine sahip olduğu görülmüş olur. Bu malzeme için maksimum temas kuvveti 10,97 mm çökme değerinde ortaya çıkmıştır. Bu diyagramda bulunan 80 çevrim eğrisi dikkate alınırsa kuvvetin 20 mm ile 60 mm arasında eksi değerlere düştüğü izlenmektedir. Bu olay bu aralıkta temas kuvvetinin yönünün değişmesinden

kaynaklanmaktadır. Şekil 4.260'ta çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür malzemelerinin kuvvet-zaman diyagramları verilmektedir.



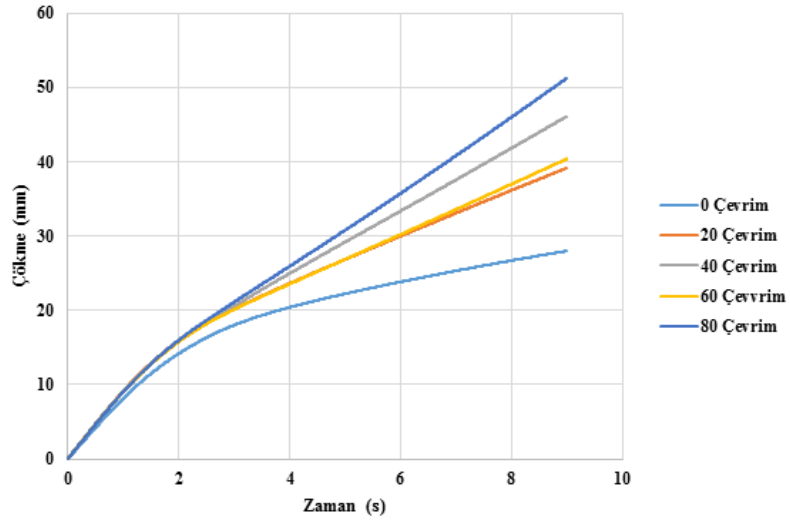
Şekil 4.260. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları

Şekil 4.260'ta görülmekte olan çeşitli sayıda termal çevrime tabi tutulmuş bazalt-karbon ıtra-ply elyaf takviyeli kompozitlerin kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, 80 çevrime tabi tutulmuş olan numunenin diğer numunelere göre daha düşük maksimum temas kuvvetine sahip olduğu görülmüş olur. Bu malzeme için maksimum temas kuvveti 1,64 s'de ortaya çıkmıştır. Aynen kuvvet-çökme diyagramında olduğu gibi oda sıcaklığında bulunan numune eğrisinin yükten boşalma eğime sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda 80 çevrim termal yorulmaya tabi tutulmuş bazalt-karbon elyaf takviyeli kompozit numunesinin temas kuvveti 4 ile 9s değeri eksi olmuştur ve bu olay malzemenin bu aralıkta temas kuvvetinin yön değiştirdiğini göstermektedir. Şekil 4.261'de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür malzemelerinin enerji-zaman diyagramları verilmektedir.



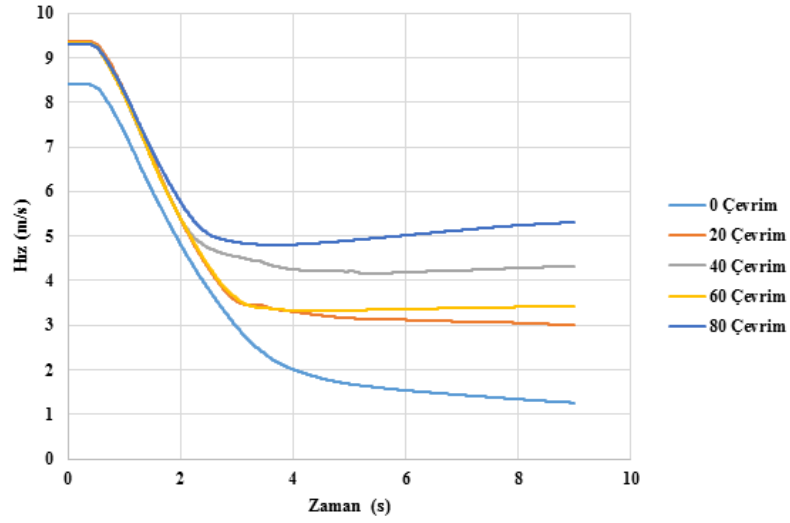
Şekil 4.261. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları

Şekil 4.261’de verilmiş olan çeşitli sayıda termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-pür numunelerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde, -20 ile 120°C aralığında 20 çevrime maruz bırakılmış numune diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha yüksek enerji absorpsiyon oranına sahip olmaktadır. Şekil 4.259’da verilmiş olan kuvvet-çökme diyagramına göre, 20 çevrime tabi tutulmuş numunenin altında bulunan alanın diğer numunelere göre daha büyük olduğu net olarak görülmektedir ve böylece absorbe edilmiş olan enerji değerinin bu numunede daha yüksek olması mantıki bir durumdur. Aynı zamanda oda sıcaklığında bulunan numune en düşük enerji absorpsiyon oranına sahip olmuştur. Şekil 4.262’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür kompozit malzemelerinin çökme-zaman diyagramları verilmektedir.



Şekil 4.262. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-pür kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları

Şekil 4.262’de görülmekte olan çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış bazalt-karbon-pür numunelerinin çökme-zaman grafiklerine bakıldığında, oda sıcaklığında bulunan numune diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha düşük çökme hızına sahip olmaktadır. Bilindiği gibi darbe kuvvetinin maksimum değere ulaştığında numunedeki çökme artış hızının azalması gerekmektedir (Sayer, 2009). Şekil 4.260’da verilmiş olan kuvvet-zaman ve şekil 4.262’de bulunan çökme zaman diyagramları kıyaslandığında bu olayın 1,6 s’de ortaya çıktığı görülmektedir. Şekil 4.263’te çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış karbon-pür malzemelerinin hız-zaman diyagramları verilmektedir.

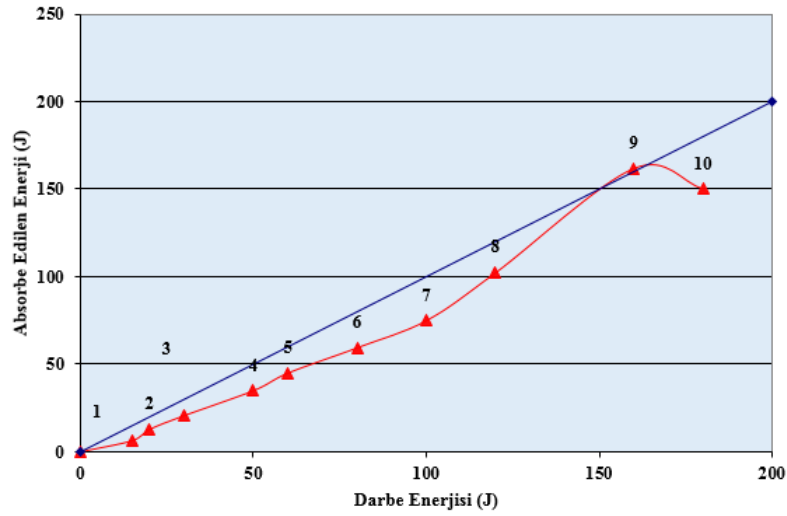


Şekil 4.263. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-pür kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları

Şekil 4.263 ve 4.260’da verilmiş olan çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış bazalt-karbon-pür numunelerinin hız-zaman ve kuvvet-zaman grafiklerine bakılırsa, bütün numunelerin hızlarının düşüş noktası kuvvet zaman diyagramının zirvede olduğu zamana (1,6s) noktasına denk gelmektedir. Bilindiği gibi vurucunun çarpma sonucu numuneeyi delip geçme sonucunda, vurucu belli bir hız ile numuneye saplanıp, kalınlık boyunca ilerlemesi gerekmektedir. İlk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra vurucunun hızının azalması gerekmektedir (Sayer, 2009). Bu olay Şekil 4.263’te verilmiş hız-zaman diyagramının son kısmının x eksenine paralel olmasından net olarak anlaşılmaktadır.

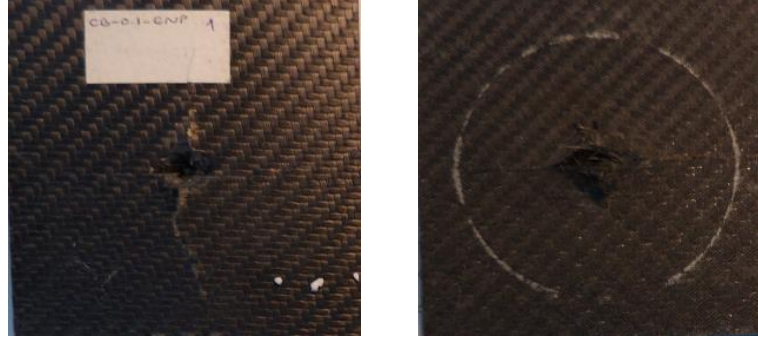
4.16.6. Bazalt-Karbon-0,1 GNP

Bu malzemeden üretilmiş olan numuneler 100 mm boyutlarında ve 6 mm kalınlığında dörtgen şeklinde olup, 24 kat geleneksel twill kumaştan oluşmaktadırlar. Bazalt-karbon-0,1 GNP kompozit malzemelerin darbe enerji kalibrasyon diyagramı Şekil 4.264’te verilmektedir.

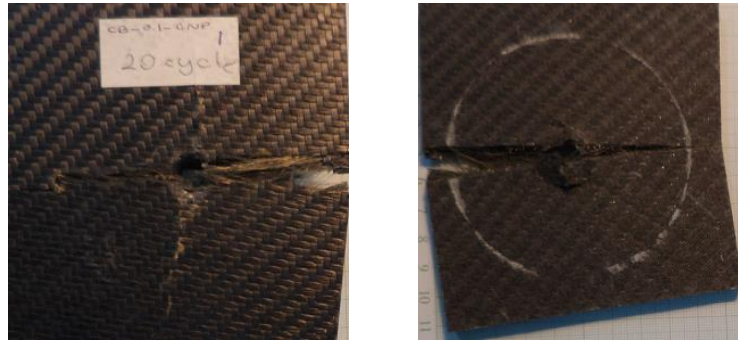


Şekil 4.264. Bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitinin darbe enerji kalibrasyon diyagramı

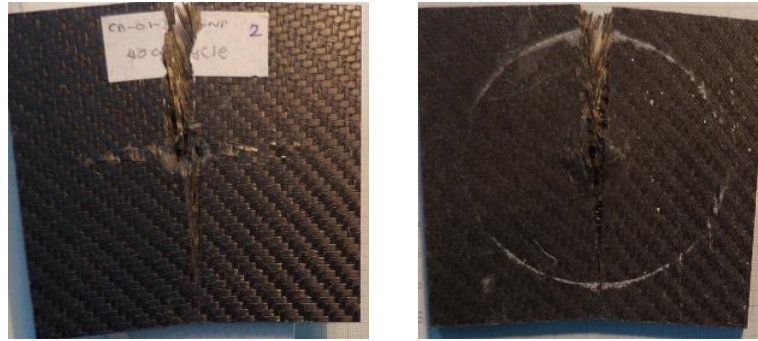
Bazalt-karbon-0,1 GNP malzemesinin uygun darbe enerjisini bulmak için on tane numune kullanılmıştır. Şekil 4.246'de belirlenmiş olan noktalara göre 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 numaralı numunelerde, çarpan vurucunun enerjisi numuneye saplanmak ve ya delip geçmek için yeterli olmamıştır. Böylece vurucunun enerjisi artırılarak 9. numunede bu enerji 160 J değerine yükseltilmiştir. Görüldüğü gibi bu numunenin konumu eşit enerji çizgisi üzerinde bulunmaktadır. Buna göre bu enerji değeri kullanıldığında vurucu numuneye saplanmaktadır. 10 numaralı numunede vurucunun enerjisi 180 J değerine artırılmıştır. Görüldüğü gibi bu enerji değerlerinde vurucu numuneyi delip geçmiştir. Böylece 200 J enerji değeri bazalt-0,1 GNP kompozitlerin darbe enerjileri için uygun bir değerdir. Bazalt-karbon elyafından üretilmiş olan ve reçinesi %0,1 GNP içeren kompozit numuneler oda sıcaklığı, 20, 40, 60 ve 80 çevrim -40 ile +120°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ASTM 7136 göre darbe deneyine tabi tutulmuşlardır. Bazalt-karbon-pür numunelerinde darbe sonucu ortaya çıkmış olan hasar Şekil 4.265'te gösterilmiştir. Bu malzemelere ait kuvvet-çökme diyagramları Şekil 4.266'da verilmektedir.



(a)



(b)



(c)



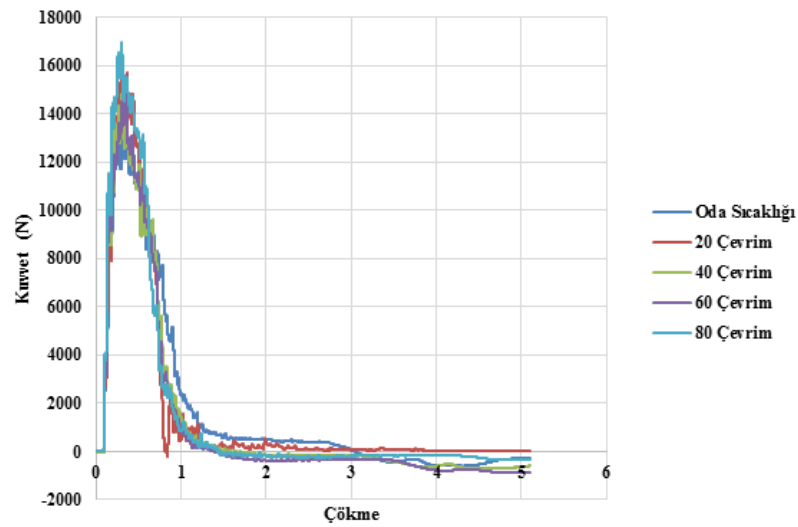
(d)

Şekil 4.265. (devam)



(e)

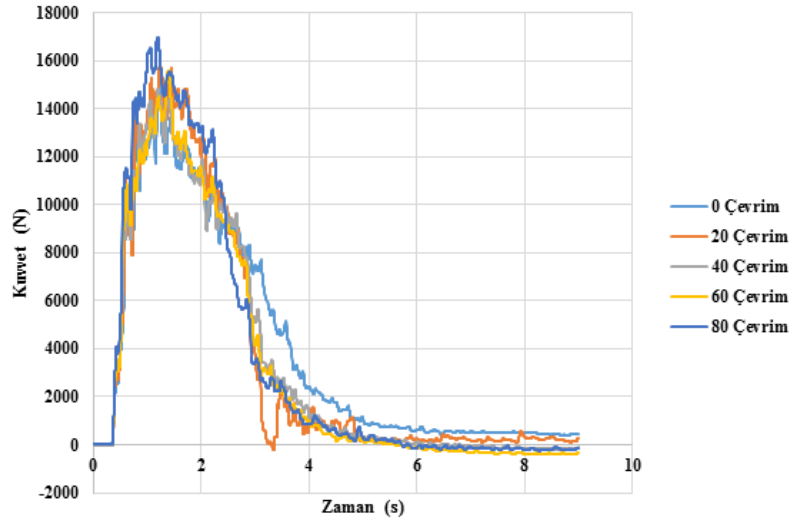
Şekil 4.265. Darbe sonucu bazalt-karbon-0,1 GNP numunelerinde ortaya çıkan hasarlar (a) oda sıcaklığı, (b) 20 çevrim, (c) 40 çevrim, (d) 60 çevrim, (e) 80 çevrim



Şekil 4.266. Çeşitli sayıda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-çökme diyagramları

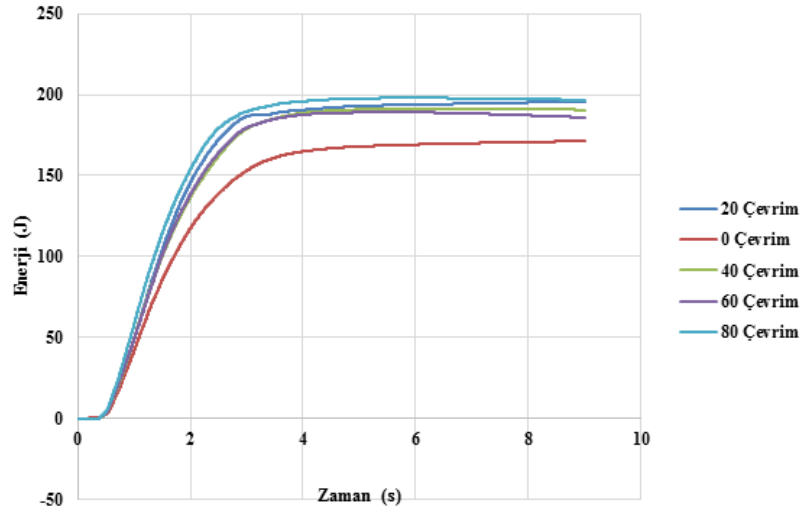
Şekil 4.266'te verilmiş olan farklı sayılarda termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozit numunelerinin kuvvet-çökme diyagramlarına bakılırsa, 80 çevrime tabi tutulmuş olan numunenin diğer numunelere göre daha yüksek maksimum temas kuvvetine sahip olduğu görülmektedir. Bu malzeme için maksimum temas kuvveti 0,295 mm çökme değerinde ortaya çıkmıştır. 20 çevrime maruz kalmış numunenin kuvvet-çökme eğrisi göz önüne alınırsa bu malzemede elyaf kırılmasından dolayı kuvvet değerinde sürekli düşüş ve yükselişin ortaya çıktığı net olarak

görülmektedir. Şekil 4.267’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları verilmektedir.



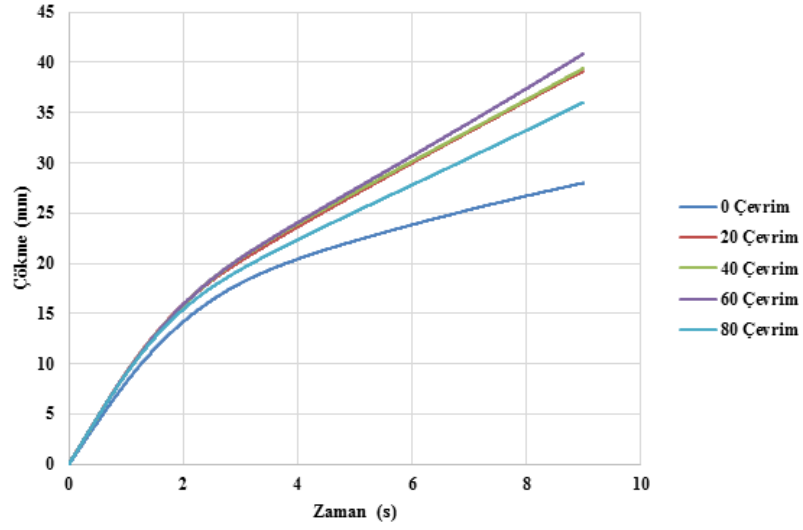
Şekil 4.267. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu kuvvet-zaman diyagramları

Şekil 4.267’de verilmiş olan farklı sayılarda termal çevrime tabi tutulmuş numunelerin kuvvet-zaman diyagramlarına göre, 80 çevrime tabi tutulmuş olan numunenin diğer numunelere göre daha yüksek maksimum temas kuvvetine sahip olduğu ve bu maksimum kuvvetin en erken zamanda (1,472s) ortaya çıktığı görülmektedir. 20 çevrime maruz kalmış numunenin kuvvet-zaman eğrisi dikkate alınırsa bu malzemede elyaf kırılmasından dolayı kuvvet değerinde sürekli düşüş ve yükselişin ortaya çıktığı net olarak görülmektedir. Şekil 4.268’de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin enerji-zaman diyagramları verilmektedir.



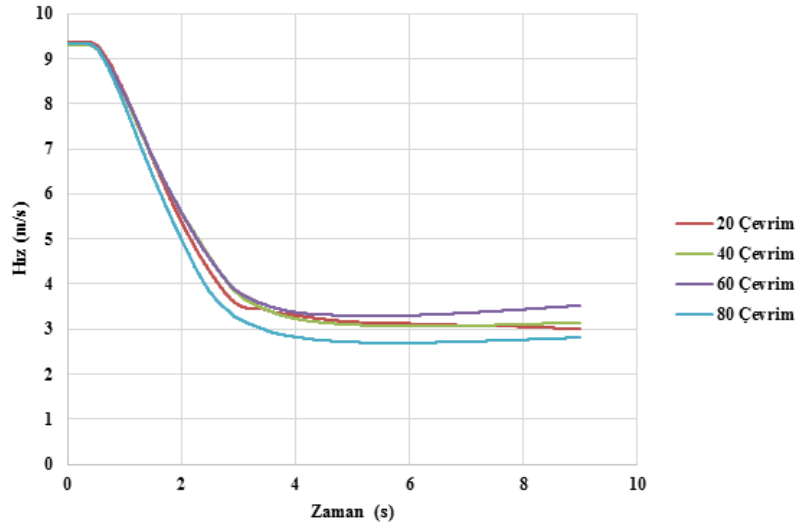
Şekil 4.268. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış Bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu enerji-zaman diyagramları

Şekil 4.268’de çeşitli sayıda termal çevrime maruz bırakılmış bazalt-karbon-0,1 GNP numunelerinin enerji-zaman grafikleri incelendiğinde, -20 ile 120°C aralığında oda sıcaklığında bulunan numune diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha düşük enerji absorpsiyon oranına sahip olmaktadır. Aynı zamanda 80 çevrim termal yorulmaya maruz kalmış numunenin diğer numunelere göre daha yüksek enerji absorpsiyon oranına sahip olmuştur. Şekil 4.266’da verilmiş olan kuvvet-çökme diyagramına göre, 80 çevrime tabi tutulmuş numunenin altında bulunan alanın diğer numunelere göre daha büyük olduğu net olarak görülmektedir. Şekil 4.269’da çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin çökme-zaman diyagramları verilmektedir.



Şekil 4.269. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu çökme-zaman diyagramları

Şekil 4.269'da çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış bazalt-karbon-0,1 GNP numunelerinin çökme-zaman grafiklerine bakıldığında, -20 ile 120°C aralığında 60 çevrime tabi tutulmuş numunenin diğer numunelere göre darbe deney sonucunda daha yüksek çökme oranına sahip olduğu görülmektedir. Tam tersi oda sıcaklığında bulunan numunenin aynı enerjide darbeye maruz kalmasıyla diğer numunelere göre daha düşük oranda çökmesi Şekil 4.269'da verilen eğrilerin eğiminden belli olmaktadır. Şekil 4.267'de verilmiş olan kuvvet-zaman ve Şekil 4.269'da bulunan çökme zaman diyagramları kıyaslandığında bu olayın yaklaşık 0,9 s'de meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.270'de çeşitli çevrimlerde termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP malzemelerinin hız-zaman diyagramları verilmektedir.

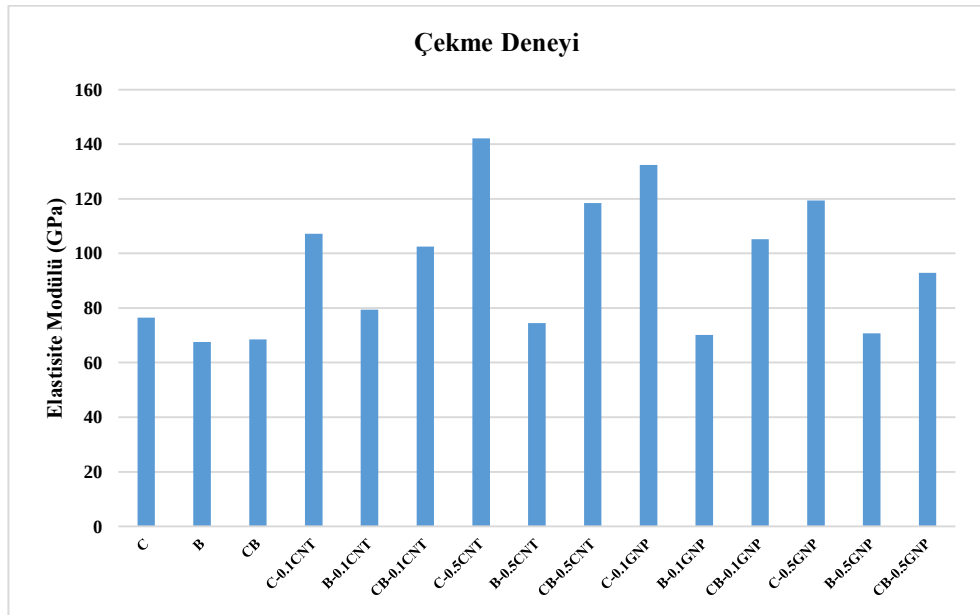


Şekil 4.270. Çeşitli sayılarda termal çevrime maruz kalmış bazalt-karbon-0,1 GNP kompozitlerin darbe sonucu hız-zaman diyagramları

Şekil 4.270’de verilmiş olan çeşitli sayıda termal çevrim uygulanmış bazalt-karbon-0,1 GNP numunelerinin hız-zaman diyagramları kuvvet-zaman grafikleri ile bir araya getirilirse, bütün numunelerin hızlarının düşüş noktası kuvvet-zaman diyagramlarının zirvede olduğu zamana (1,472s) denk gelmektedir. Bilindiği gibi vurucunun çarpma sonucu numuneyi delip geçme sonucunda, vurucu belli bir hız ile numuneye saplanıp, kalınlık boyunca ilerlemesi gerekmektedir. İlk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızının azalması gerekmektedir (Sayer 2009). Delinme olayından sonra, vurucunun hızını yavaşlatan olay, vurucu ve numune arasındaki sürtünmedir. Bu olay Şekil 4.270’de verilmiş hız-zaman diyagramının son kısmının x eksenine paralel olmasından net olarak anlaşılmaktadır.

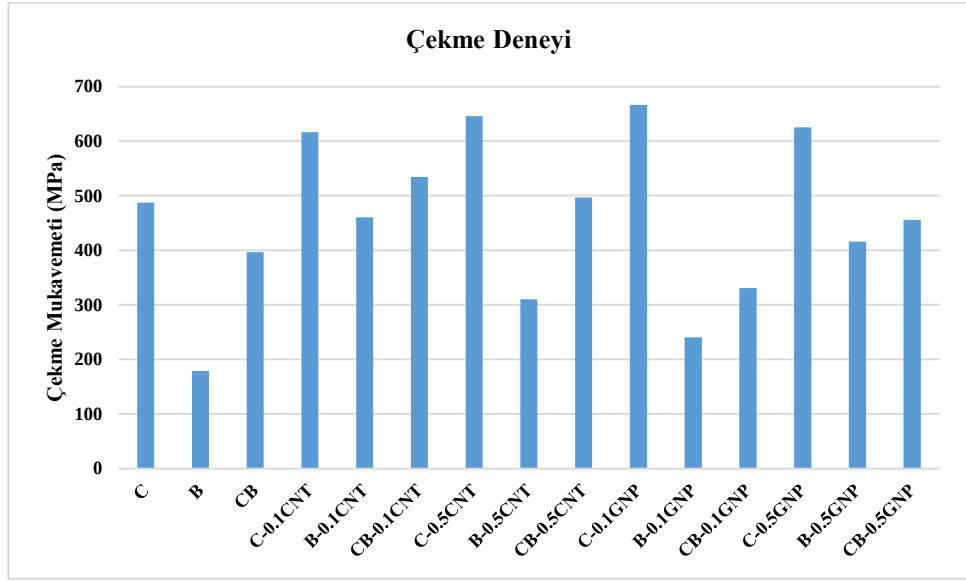
5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Çalışmanın bu kısmında tez çalışma kapsamında üretilmiş olan 15 tür pür, hibrit ve çok-ölçekli malzemelerin oda sıcaklığındaki eğilme, çekme, ILSS gibi mekanik ve titreşim özellikleri kıyaslanmıştır. Şekil 5.1’de çekme deneyi kullanılarak elde edilmiş olan bütün malzemelerin elastisite modülleri kıyaslanmaktadır.



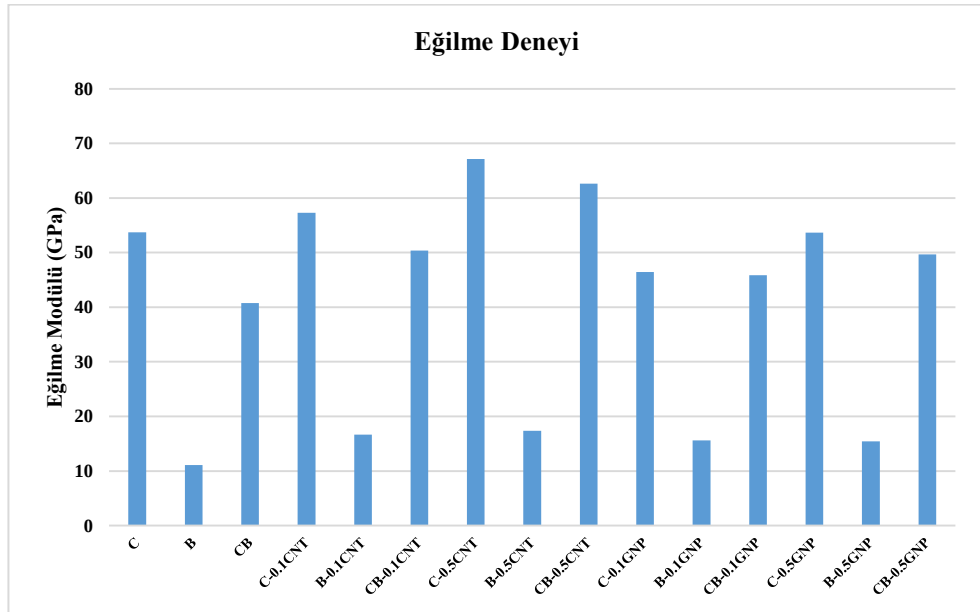
Şekil 5.1. Üretilmiş malzemelerin elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.1’de verilen değerler dikkate alınır, karbon-0,5 CNT çok ölçekli kompozit malzemesi 142,08 GPa elastisite modül değerine sahip olarak bu konuda en iyi performansı sağlamaktadır. Bunun tam tersi bazalt-pür kompozit malzemesi ise 67,57 GPa elastisite modülü ile en düşük performansa sergilemiştir. Şekil 5.2’de üretilmiş bütün malzemelerin çekme mukavemet değerleri kıyaslanmaktadır.



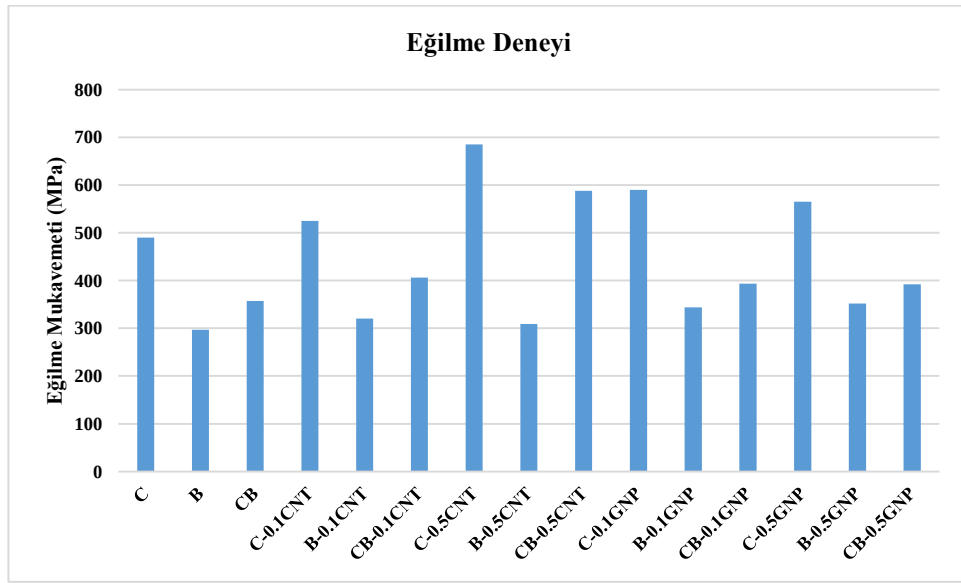
Şekil 5.2. Üretilmiş malzemelerin çekme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.2’de verilen değerler dikkate alınırsa, karbon-0,1 GNP çok ölçekli kompozit malzemeleri 666,35 MPa çekme mukavemetlerine sahip olarak bu konuda en iyi performansa sahip olmuşlardır. Aksine bazalt-pür kompozit malzemesi ise 178,69 MPa çekme mukavemeti ile en düşük performansa sergilemiştir.



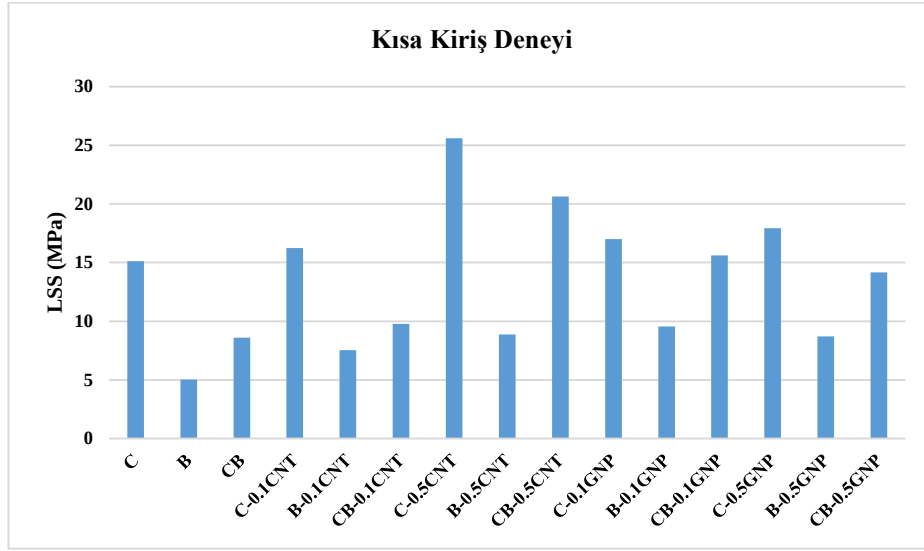
Şekil 5.3. Üretilmiş malzemelerin eğilme modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.3'te verilen değerler dikkate alınır, karbon-0,5 CNT çok ölçekli kompozit malzemesi 67,17 GPa eğilme modül değerine sahip olarak bu konuda en iyi performansı sağlamaktadır. Bunun tam tersi bazalt-pür kompozit malzemesi ise 11,11 GPa eğilme modülü ile en düşük performansa sergilemiştir. Şekil 5.4'te üretilmiş bütün malzemelerin eğilme mukavemetleri kıyaslanmaktadır.



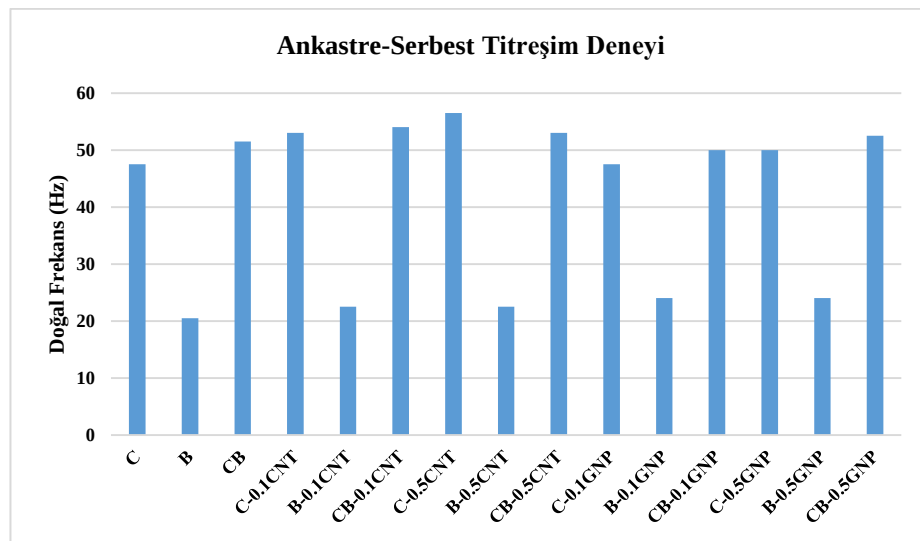
Şekil 5.4. Üretilmiş malzemelerin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.4'te verilen değerler dikkate alınır, karbon-0,5 CNT çok ölçekli kompozit malzemeleri 684,96 MPa eğilme mukavemetine sahip olarak bu konuda en iyi performansa sahip olmuşlardır. Aksine bazalt-pür kompozit malzemesi ise 297 MPa eğilme mukavemeti ile en düşük performansa sergilemiştir. Şekil 5.5'te üretilmiş bütün malzemelerin ILSS değerleri kıyaslanmaktadır.



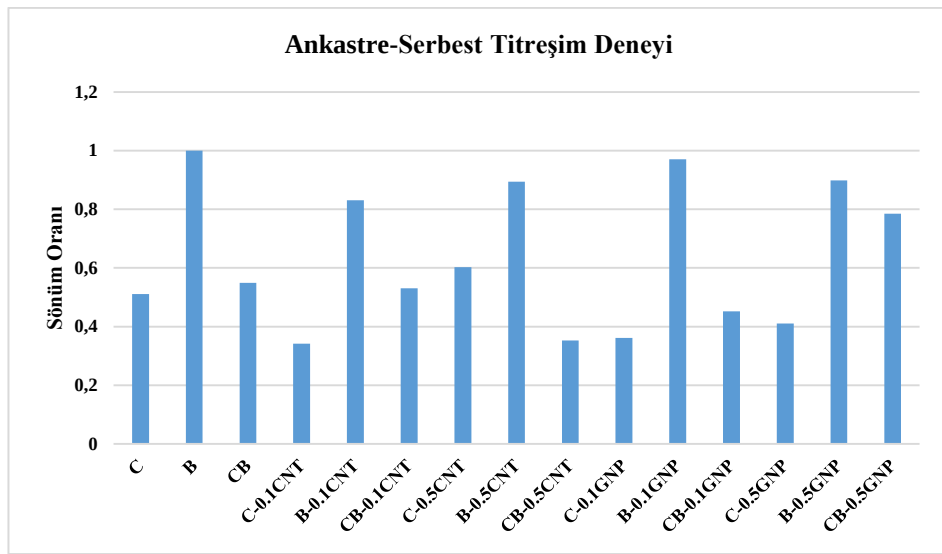
Şekil 5.5. Üretilmiş malzemelerin eğilme mukavemet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.5'te verilen değerler dikkate alınırsa, karbon-0,5 CNT çok ölçekli kompozit malzemeleri 25,58 MPa ILSS değerine sahip olarak bu konuda en iyi performansa sahip olmuşlardır. Aksine bazalt-pür kompozit malzemesi ise 5,03 MPa çekme mukavemeti ile en düşük performansa sergilemiştir. Şekil 5.6'da çalışmada kullanılan malzemeler için ankastre-serbest titreşim deneyinden elde edilmiş olan doğal frekans değerleri kıyaslanmaktadır.



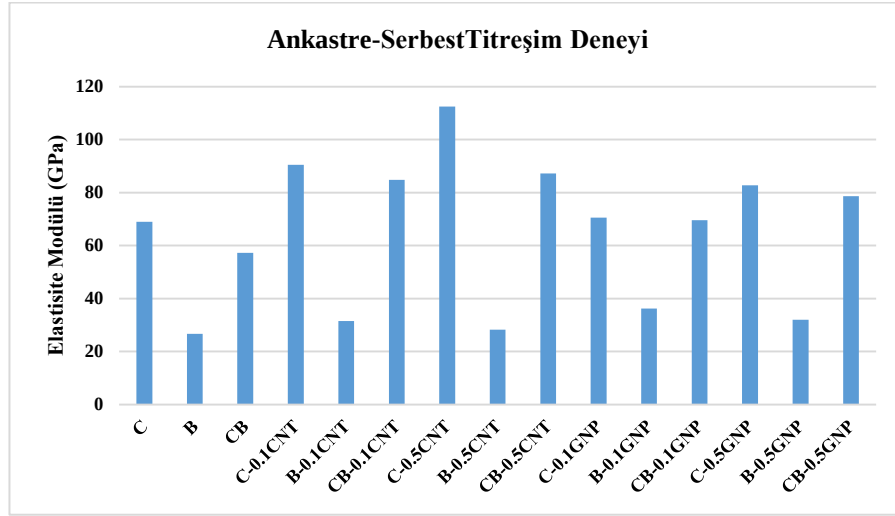
Şekil 5.6 Üretilmiş malzemelerin ankastre-serbest doğal frekans değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.6’da kullanılan malzemelerin doğal frekans değerleri dikkate alınır, karbon-0,5 CNT çok ölçekli kompozit malzemesi 56,5 Hz ankastre-serbest doğal frekans değerine sahip olarak en yüksek değeri sergilemektedir. Bu arada bazalt-pür kompozit malzemesi ise 20,5 Hz doğal frekans değeri ile en düşük değere sahip olmuştur. Şekil 5.7’de çalışmada kullanılan malzemeler için ankastre-serbest titreşim deneyinden elde edilmiş olan sönüm oran değerleri kıyaslanmaktadır.



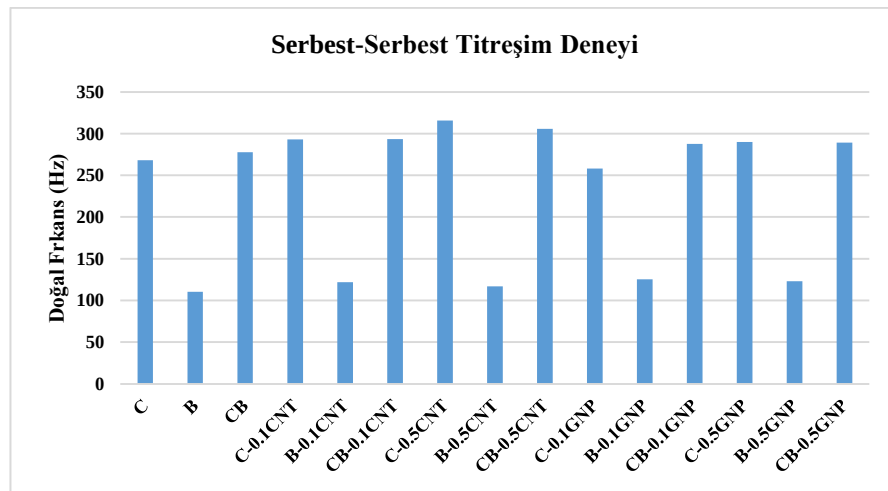
Şekil 5.7. Üretilmiş malzemelerin ankastre-serbest sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.7’de verilmiş olan sönüm oran değerleri göz önüne alınırsa, bazalt-pür kompozit malzemesinin sönüm oran değerinin 1 olarak bulunduğu görülmektedir. Bu malzeme bütün malzemeler arasında en yüksek ankastre-serbest sönüm oran değerine sahip olmaktadır. Tam aksine karbon-0,1 CNT kompozit malzemesi ise 0,34 sönüm oran değerine sahip olarak ankastre serbest deneyinde en düşük sönüm oranına sahip olmuştur. Şekil 5.8’de ankastre-serbest titreşim deneyinden elde edilmiş olan elastisite modül değerleri üretilmiş bütün malzemeler için kıyaslanmaktadır.



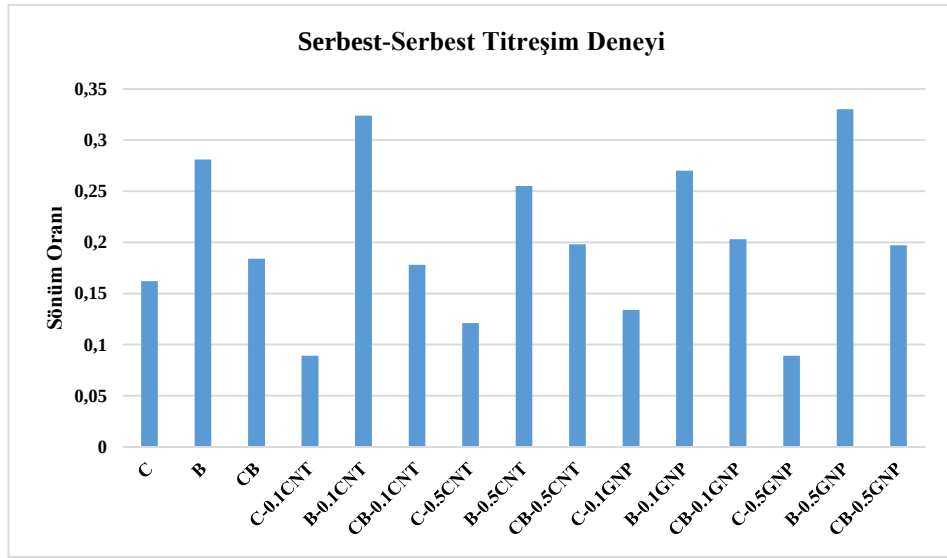
Şekil 5.8. Üretilmiş malzemelerin ankastre-serbest deneyinden bulunan elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.8’de verilmiş olan ankastre-serbest titreşim deney sonucu bulunmuş olan elastisite modül değerleri göz önüne alınırsa karbon-0,5 CNT çok ölçekli kompozit malzemesi 112,46 GPa elastisite modül değerine sahip olarak bu konuda en iyi performansı sağlamaktadır. Bunun tam tersi bazalt-pür kompozit malzemesi ise 26,67 GPa elastisite modülü değeri ile en düşük performansı sergilemiştir. Şekil 5.9’da çalışmada kullanılan malzemeler için serbest-serbest titreşim deneyinden elde edilmiş olan doğal frekans değerleri kıyaslanmaktadır.



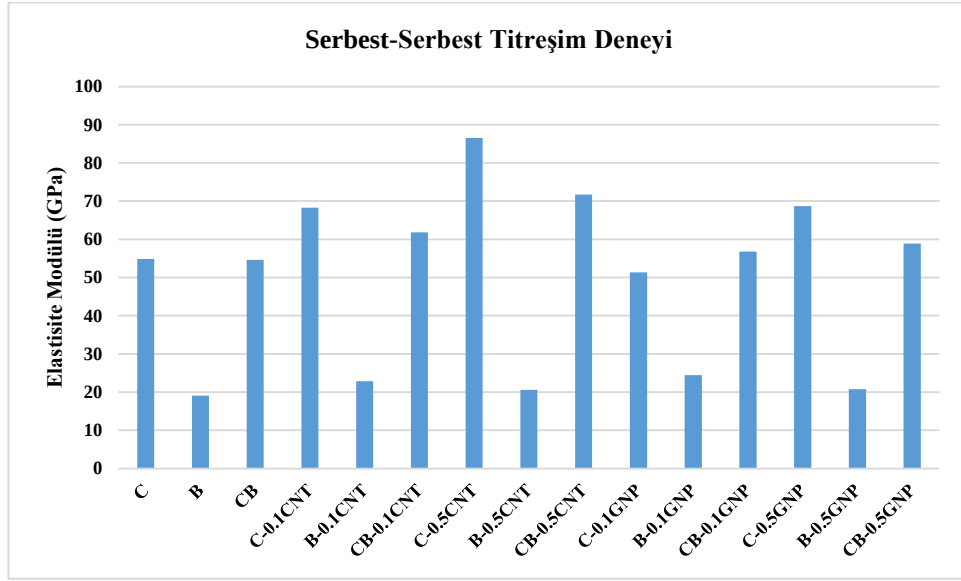
Şekil 5.9. Üretilmiş malzemelerin serbest-serbest doğal frekans değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.9’da çalışma kapsamında üretilmiş olan malzemelerin serbest-serbest titreşim deneyinden elde edilen doğal frekans değerleri dikkate alınır, karbon-0,5 CNT çok ölçekli kompozit malzemesi 315,5 Hz doğal frekans değerine sahip olarak en yüksek değeri sergilemiştir. Bu arada bazalt-pür kompozit malzemesi ise 110,5 Hz doğal frekans değeri ile en düşük değere sahip olmuştur. Şekil 5.10’da üretilmiş bütün malzemelerin sönüm oranları kıyaslanmaktadır.



Şekil 5.10. Üretilmiş malzemelerin serbest-serbest sönüm oran değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.10’da verilmiş olan sönüm oran değerleri göz önüne alınır, bazalt-0,5 GNP kompozit malzemesinin sönüm oran değerinin 0,33 olarak bulunduğu görülmektedir. Bu malzeme bütün malzemeler arasında en yüksek serbest-serbest sönüm oran değerine sahip olmaktadır. Tam aksine karbon-0,1 CNT ve karbon-0,5 GNP kompozit malzemeleri ise 0,089 sönüm oran değerine sahip olarak serbest-serbest deneyinde en düşük sönüm oranına sahip olmuşlardır. Şekil 5.11’de serbest-serbest titreşim deneyinden elde edilmiş olan elastisite modül değerleri üretilmiş bütün malzemeler için kıyaslanmaktadır.



Şekil 5.11. Üretilmiş malzemelerin serbest-serbest deneyinden bulunan elastisite modül değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.11’de verilmiş olan serbest-serbest titreşim deney sonucu bulunmuş olan elastisite modül değerlerine bakılırsa karbon-0,5 CNT çok ölçekli kompozit malzemesi 86,59 GPa elastisite modül değerine sahip olarak bu konuda en iyi performansı sağlamaktadır. Bunun tam tersi bazalt-pür kompozit malzemesi ise 26,67 GPa elastisite modülü değeri ile en düşük performansı sergilemiştir.

5.1. Sonuç ve Öneriler

- Karbon elyafı ile bazaltın hibritleşme sonucu ortaya çıkmış olan hibrit kompozitin mekanik özellikleri karbon elyaf esaslı kompozitlere göre düşük ve bazalt elyaf esaslı kompozite göre daha yüksektir.
- Bazalt elyafın hibrit kompozitlerde karbon elyafa gereksiz kısımlarda alternatif olarak kullanılması kompozit üretim masraflarının yüksek oranda düşmesine ve ortaya çıkan hibrit kompozitin daha yüksek darbe tokluğu ve termal stabilitesine neden olmuştur.
- Elde edilen sonuçlara göre karbon elyaf takviyeli kompozitler (özellikle karbon-0,5 CNT kompozit) mekanik özellikler konusunda en iyi performansı sağlamışlardır.

- Mekanik testler sonuçları incelendiğinde bazalt elyaf esaslı kompozitlerin (özellikle pür-bazalt kompozit) en düşük performansı sağladığı görülmektedir.
- Kompozitin reçinesine nano dolgu malzemelerin eklenmesi, bu malzemelerin yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeni ile ortaya çıkan çok-ölçekli kompozit malzemesinin mekanik özelliklerinin iyileşmesine neden olmuştur.
- Genelde CNT dolgulu çok-ölçekli kompozitlerin mekanik performansının GNP dolgulu olanlara göre daha iyi olduğuna rastlanmıştır.
- CNT dolgulu kompozitlerde nanodolgu malzemesinin oranının artması kompozitin mekanik özelliklerinin iyileşmesine neden olmuştur. Hâlbuki GNP dolgulu kompozitlerde nano dolgu oranının artması ile topaklanma olayının meydana gelmesinden dolayı kompozitin mekanik performansı düşmüştür.
- Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin titreşim deney sonucunda daha yüksek doğal frekansa (özellikle karbon-0,5 CNT) ve bazalt esaslı (özellikle bazalt-pür) kompozitlerin daha düşük değerlere sahip oldukları görülmektedir.
- Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin titreşim deney sonucunda daha yüksek sönüm oranına (özellikle bazalt-pür) ve bazalt esaslı kompozitlerin daha düşük değerlere sahip oldukları görülmektedir.
- Titreşim deneylerinden elde edilen sonuçlara göre karbon elyaf takviyeli kompozitlerin (özellikle karbon-0,5 CNT) daha yüksek ve bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin (özellikle bazalt-pür) daha düşük elastisite modül değerlerine sahip oldukları anlaşılmaktadır.

5.2. Darbe Deneyi

- Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin darbe deney kalibrasyonundan elde edilen enerji miktarı 80 j, bazalt elyaf takviyeli kompozitler için 120 j ve bazalt-karbon intra-ply hibrit kompozitler için 200 j olarak bulunmuştur.
- Karbon esaslı kompozitler, bu elyafın gevrek olduğundan dolayı, düşük hızlı darbe sonucu daha düşük performans göstermişlerdir.
- Bazalt elyaf takviyeli kompozitler bu elyaf türünün yüksek darbe dayanımından dolayı, darbe deney esnasında iyi performans sergilemişlerdir.

- Bazalt-karbon hibrit kompozitlerde kullanılan enerji miktarının yüksek olduğundan dolayı ve karbon ile bazalt elyafın kompozit yapısında iyice tutunmamasından dolayı genelde hasar oranı çok şiddetlidir.
- Bazalt elyaf ile karbonun hibritleşmesi, ortaya çıkan hibrit kompozitin sünekliğinin artmasına ve böylece darbe performansının iyileşmesine neden olmaktadır.

5.3. Termal Yorulma Etkileri

- Kompozit yapısında kullanılan bileşenlerin CTE değerlerinin farklı olması neticesinde bu malzemeler sıcaklığın değişmesi ile farklı oranlarda şekil değiştirirler. Bu olay malzeme yapısında uyumsuzluğa ve böylece iç gerilmelere neden olur.
- Sıcaklığın sürekli değişimi kompozit yapısında ve özellikle arayüzey bölgesinde meydana gelen iç gerilmeleri artırır.
- İç gerilmelerin artması kompozit yapısında mikro çatlakların ortaya çıkmasına neden olur.
- Çevrim sayılarının artmasıyla mikro çatlak sayıları artar ve birleşerek çatlak ve sonuçta delaminasyonun ortaya çıkmasına neden olur ve bu olay çevrim sayılarının artmasıyla malzemenin mekanik özelliklerinin düşmesine neden olur.
- Bu olayı önlemek için kompozit bileşenlerinin yakın CTE değerlerine sahip olması gerekmektedir.
- CNT ve GNP nano taneciklerin reçineye eklenmesi, ortaya çıkan nano reçine malzemesinin CTE değerinin düşmesine ve diğer bileşenlere yaklaşılarak uyumsuzluğun azalmasına neden olmaktadır.
- Termal çevrim sırasında post kürleşme olayı çapraz bağların sayısını artırarak mekanik özelliklerin iyileşmesine neden olmuştur.

KAYNAKLAR

- Abali, F., Pora, A. and Shivakumar, K. 2003. Modified short beam shear test for measurement of Interlaminar shear strength of composites. *Journal of Composite Materials*, 37, 453-464.
- Adams, D.S. Bowles, D.E. and Herakovich, C.T. 1986. Thermally induced transverse cracking in graphite/epoxy cross-ply laminates. *J Reinf Plast Compos*, 5(3), 152-69.
- Ajayan, P. M. and Tour, J. M. 2007. Materials science - Nanotube composites. *Nature*, 447, 1066-1068.
- Akbulut, H. 2011. Kompozit malzemeler ders notları, Mühendislik Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Al-Haik, M. S., Garmestani, H. and Savran, A. 2004. Explicit and implicit viscoplastic models for polymeric composite. *International Journal of Plasticity*, 20, 1875-1907.
- Andrews, R. Weisenberger, M. C. 2004. Carbon nanotube polymer composites. *Solid State and Materials Science*, 8, 31-37.
- Aran, A. 1990. Elyaf takviyeli karma malzemeler, Makine Mühendisliği Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi.
- Arıkan, A. 2001. Flexibility Improvement of Short Glass Fiber Reinforced Epoxy. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ODTÜ, Ankara, Türkiye.
- Arseven, M. 2010. Nanokarbon ve Formları. İleri Malzemeler Araştırma Grubu, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı, Beytepe, Türkiye.
- Artemenko, S. E. 2003. Polymer composite materials made from carbon, basalt, and glass fibres. Structure and properties. *Fibre Chemistry*, 35, 226-229.
- Ataş, C. 2008. Manufacturing of polymer composites using vacuum assisted resin infusion molding. *Archives of Materials science and Engineering*, 34, 117-120.
- Avila, A. F., Peixoto, L. G. Z. D., Neto, A. S., De Avila, J. and Carvalho, M. G. R. 2012. Bending Investigation on Carbon Fiber/Epoxy Composites Nano-Modified by Graphene. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34, 269-275.
- Avila, A. F., Yoshida, M. I., Carvalho, M. G. R., Dias, E. C. and De Avila, J. 2010. An investigation on post-fire behavior of hybrid nanocomposites under bending loads. *Composites Part B-Engineering*, 41, 380-387.
- Bağcı, İ. 2006. Epoksi reçinesi İle Nanokompozit Sentezi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimler Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W. Z., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F. and Lau, C. N. 2008. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 8, 902-907.
- Bansal, D., Pillay, S. and Vaidya, U. 2013. Processing and characterization of nanographene platelets modified phenolic resin as a precursor to carbon/carbon composites-part I. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32, 585-592.
- Bashtannik, P. I., Kabak, A. I. and Yakovchuk, Y. 2003. The effect of adhesion interaction on the mechanical properties of thermoplastic basalt plastics. *Mechanics of Composite Materials and Design*, 39, 1-8.

- Bayat, D. 2010. Grafen tabanlı nano yapılarda safsızlık etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi.
- Bekyarova, E., Thostenson, E. T., Yu, A., Itkis, M. E., Fakhrutdinov, D., Chou, T. W. and Haddon, R. C. 2007. Functionalized single-walled carbon nanotubes for carbon fiber-epoxy composites. *Journal of Physical Chemistry C*, 111, 17865-17871.
- Bernal, M. M., Molenberg, I., Estravis, s., Rodriguez-perez, M. A., Huynen, I., Lopez-manchado, M. A. and Verdejo, R. 2012. Comparing the effect of carbon-based nanofillers on the physical properties of flexible polyurethane foams. *Journal of Materials Science*, 47, 5673-5679.
- Bhattacharyya, A., Rana, S., Parveen, S., Fangueiro, R., Alagirusamy, R. and Joshi, M. 2013. Mechanical and thermal transmission properties of carbon nanofiber-dispersed carbon/phenolic multiscale composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 129, 2383-2392.
- Bin Wei, Hailin Cao and Song, S. 2010. Tensile Behavior Contrast of Basalt And Glass Fibers After Chemical Treatment. *Materials And Design*, 31, 4244-4250.
- Boehm, H. P., Setton, R. and Stumpp, E. 1994. Nomenclature and Terminology of Graphite-Intercalation Compounds. *Pure and Applied Chemistry*, 66, 1893-1901.
- Bolotin, K. I., Sikes, K. J., Jiang, Z., Klima, M., Fudenberg, G., Hone, J., Kim, P. and Stormer, H. L. 2008. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*, 146, 351-355.
- Boogh, L. C. N., Meier, R. J., Kausch, H. H. and Kip, B. J. 1992. A Raman Microscopy Study of Stress Transfer in High-Performance Epoxy Composites Reinforced with Polyethylene Fibers. *Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics*, 30, 325-333.
- Brownson, D. A. C., Kampouris, D. K. and Banks, C. E. 2011. An overview of graphene in energy production and storage applications. *Journal of Power Sources*, 196, 4873-4885.
- Bruch, L. W. 1981. Band-Structure Effects in the Specific-Heat of Helium Adsorbed on Graphite - Perturbation-Theory. *Physical Review B*, 23, 6801-6804.
- Byrd, L. W. and Birman, V. 2006. Effectiveness of z-pins in preventing delamination of co-cured composite joints on the example of a double cantilever test. *Composites Part B-Engineering*, 37, 365-378.
- Calizo, I., Ghosh, S., Bao, W. Z., Miao, F., Lau, C. N. and Balandin, A. A. 2009. Raman nanometrology of graphene: Temperature and substrate effects. *Solid State Communications*, 149, 1132-1135.
- Carmisciano, S., De Rosa, I. M., Sarasini, F., Tamburrano, A. and Valente, M. 2011. Basalt Woven Fiber Reinforced Vinylester Composites: Flexural And Electrical Properties. *Materials and Design*, 32, 337-342.
- Celep, Ş. 2007. Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulama Alanları. Yüksek Lisans Tezi, Fenbilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Celik, E., Guven, I., and Madenci, E. 2009. Experimental and Numerical Characterization of NonFickian Moisture Diffusion in Electronic Packages. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 32, 666-674.
- Çelik, K. V., Karaşin, H. 2014. Karbon elyaf ile betonun güçlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik dergisi*, 5, 1-11.

- Ceyhun, V., Turan, M. 2003. Tabakalıkompozit malzemelerin darbe davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41.
- Chandra, Y., Chowdhury, R., Scarpa, F., Adhikari, S., Sienz, J., Arnold, C., Murmu, T. and Bould, D. 2012. Vibration Frequency of Graphene Based Composites: A Multiscale approach. *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials*, 177, 303-310.
- Chatterjee, A. and Deopura, B. L. 2006. Thermal stability of polypropylene/carbon nanofiber composite. *Journal of Applied Polymer Science*, 100, 3574-3578.
- Che, J. F., Yuan, W., Jiang, G. H., Dai, J., Lim, S. Y. and Chan-Park, M. B. 2009. Epoxy Composite Fibers Reinforced with Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes Functionalized with Generation 0-2 Dendritic Poly(amidoamine). *Chemistry of Materials*, 21, 1471-1479.
- Chen, L., Lu, L., Wu, D. J. and Chen, G. H. 2007. Silicone rubber/graphite nanosheet electrically conducting nanocomposite with a low percolation threshold. *Polymer Composites*, 28, 493-498.
- Chen, W., Shen, H. B., Auad, M. L., Huang, C. Z. and Nutt, S. 2009. Basalt fiber-epoxy laminates with functionalized multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 40, 1082-1089.
- Chin, I., Thurn-Albrecht, T., Kim, H., Russel, T. P. and Wang, J. 2001. On Exfoliation of Montmorillonite in Epoxy. *Polymer*, 42, 5947-5952.
- Chisholm, N., Mahfuz, H., Rangari, V. K., Ashfaq, A. and Jeelani, S. 2005. Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy nanocomposites. *Composite Structures*, 67, 115-124.
- Cho, J., Chen, J. Y. and Daniel, I. M. 2007. Mechanical enhancement of carbon fiber/epoxy composites by graphite nanoplatelet reinforcement. *Scripta Materialia*, 56, 685-688.
- Chorro, M., Kane, G., Alvarez, L., Cambedouzou, J., Paineau, E., Rossberg, A., Kociak, M., Aznar, R., Pascarelli, S., Launois, P. and Bantignies, J. L. 2013. 1D-confinement of polyiodides inside single-wall carbon nanotubes. *Carbon*, 52, 100-108.
- Chorro, M., Kane, G., Alvarez, L., Cambedouzou, J., Paineau, E., Rossberg, A., Kociak, M., Aznar, R., Pascarelli, S., Launois, P. and Bantignies, J. L. 2013. 1D-confinement of polyiodides inside single-wall carbon nanotubes. *Carbon*, 52, 100-108.
- Chou, T. W., Gao, L. M., Thostenson, E. T., Zhang, Z. G. and Byun, J. H. 2010. An assessment of the science and technology of carbon nanotube-based fibers and composites. *Composites Science and Technology*, 70, 1-19.
- Chowdhury, F. H., Hosur, M. V. and Jeelani, S. 2007. Investigations on the thermal and flexural properties of plain weave carbon/epoxy-nanoclay composites by hand-layup technique. *Journal of Materials Science*, 42, 2690-2700.
- Chu, Y. H., Fu, Q. G., Li, H. J. and Li, K. Z. 2011. Thermal fatigue behavior of C/C composites modified by SiC-MoSi₂-CrSi₂ coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 8111-8115.
- Coban, O., Bora, M. O., Sinmazcelik, T. and Gunay, V. 2010. Effect of Fiber Orientation on Viscoelastic Properties of Polymer Matrix Composites Subjected to Thermal Cycles. *Polymer Composites*, 31, 411-416.

- Cohen 1984. The Effects of Thermal Cycling on Matrix Cracking and Stiffness Changes in Composite Tubes. National sampe technical conference. Proceedings of the 16th conference, Virginia Tech Center, USA.
- Compton, O. C., Nguyen, S. T. 2010. Graphene Oxide, Highly Reduced Graphene Oxide, and Graphene: Versatile Building Blocks for Carbon-Based Materials. *Small*, 6, 711-723.
- Dean, D., Obore, A. M., Richmond, S. and Nyairo, E. 2006. Multiscale fiber-reinforced nanocomposites: Synthesis, processing and properties. *Composites Science and Technology*, 66, 2135-2142.
- Dehkordi, M. T., Nosraty, H., Shokrieh, M. M., Minak, G. and Ghelli, D. 2010. Low velocity impact properties of intra-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics. *Materials and Design*, 31, 3835-3844.
- Demirel, A. 2007. Karbon Elyaf Takviyeli epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimler Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Dinadayalane, T. C. and Leszczynski, J. 2010. Remarkable diversity of carbon-carbon bonds: structures and properties of fullerenes, carbon nanotubes, and graphene. *Structural Chemistry*, 21, 1155-1169.
- Dong, C. S., Ranaweera-Jayawardena, H. A. and Davies, I. J. 2012. Flexural properties of hybrid composites reinforced by S-2 glass and T700S carbon fibres. *Composites Part B-Engineering*, 43, 573-581.
- Dreyer, D. R., Ruoff, R. S. and Bielawski, C. W. 2010. From Conception to Realization: An Historial Account of Graphene and Some Perspectives for Its Future. *Angewandte Chemie-International Edition*, 49, 9336-9344.
- Du, X. S., Xiao, M., Meng, Y. Z. and Hay, A. S. 2004. Synthesis and properties of poly (4,4 '-oxybis (benzene)disulfide)/graphite nanocomposites via in situ ring-opening polymerization of macrocyclic oligomers. *Polymer*, 45, 6713-6718.
- Du, Y., Shen, S. Z., Yang, W. D., Donelson, R., Cai, K. F. and Casey, P. S. 2012. Simultaneous increase in conductivity and Seebeck coefficient in a polyaniline/graphene nanosheets thermoelectric nanocomposite. *Synthetic Metals*, 161, 2688-2692.
- Dyachkov, P. N. and Breslavskaya, N. N. 1999. Calculations of the electronic structure of tubulenes and fullerenes with the use of data on the structure of sigma- and pi-bands of graphite. *Chemical Physics Reports*, 18, 213-225.
- Ebrahimi, S., Montazeri, A. and Rafii-Tabar, H. 2013. Molecular dynamics study of the interfacial mechanical properties of the graphene-collagen biological nanocomposite. *Computational Materials Science*, 69, 29-39.
- Erbatur, O. 2012. Ultrasonik Etkileşim ve Süperkritik Çözgenler Aracılığı ile Grafen Üretimi ve Grafen-İletken Polimer Kompozitleri Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Ed. Fakültesi, Adana.
- Erden, S. 2009. Karbon fiberlerden imal edilen kompozit yapılarda, fiber yüzey işlemlerinin fiber, ara bölge ve kompozit yapı özelliklerine etkileri. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Ersoy, M. S. 2012. Nanokompozit Yapılı Elektriksel İletken ve Elektromanyetik Kalkan Özellikli Teknik Tekstillerin Tasarımı ve Geliştirilmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Eselun, S. A., Neubert, H. D. and Wolff, E. G. 1979. Microcracking effects on dimensional stability. National SAMPE technical conference. Proceedings of the 24th conference. San Fransisco, USA.
- Eslami-Farsani, R., Khalili, S. M. R. and Najafi, M. 2013. Effect of Thermal Cycling on Hardness and Impact Properties of Polymer Composites Reinforced by Basalt and Carbon Fibers. *Journal of Thermal Stresses*, 36, 684-698.
- Fan, Z. H., Santare, M. H. and Advani, S. G. 2008. Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 39, 540-554.
- Figiel, L. and Kaminski, M. 2003. Mechanical and thermal fatigue delamination of curved layered composites. *Computers and Structures*, 81, 1865-1873.
- Fiore, V., Di Bella, G. and Valenza, A. 2011. Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications. *Materials and Design*, 32, 2091-2099.
- Freilich, M. A., Meiers, J. C., Duncan, J. P. and Goldberg, A. J. 2002. Clinical evaluation of fiber-reinforced fixed partial dentures: Survival data. *Journal of Dental Research*, 81, A224-A224.
- Fu, Q. G., Li, H. J., Li, K. Z., Shi, X. H., Huang, M., Sun, G. D. and Zhang, Y. L. 2006. Study on the thermal fatigue behavior of SiC coated carbon/carbon composites. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 434, 335-338.
- Gauvin, F., Cousin, P., Mathieu, R. 2015. Improvement of the interphase between basalt fibers and vinylester by nano-reinforced post-sizing. *Fibers and Polymers*, 16, 434-442.
- Geim, A. K. 2009. Graphene: Status and Prospects. *Science*, 324, 1530-1534.
- Godara, A., Mezzo, L., Luizi, F., Warrier, A., Lomov, S. V., Van Vuure, A. W., Gorbatiikh, L., Moldenaers, P. and Verpoest, I. 2009. Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/epoxy composites. *Carbon*, 47, 2914-2923.
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H. G., Fiedler, B., Bauhofer, W. and Schulte, K. 2005. Influence of nano-modification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 36, 1525-1535.
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H. G., Kopke, U., Fiedler, B. and Schulte, K. 2004. Carbon nanotube-reinforced epoxy-compo sites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content. *Composites Science and Technology*, 64, 2363-2371.
- Green, K. J., Dean, D. R., Vaidya, U. K. and Nyairo, E. 2009. Multiscale fiber reinforced composites based on a carbon nanofiber/epoxy nanophased polymer matrix: Synthesis, mechanical, and thermomechanical behavior. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 40, 1470-1475.
- Gümlüçine, T., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z. ve Ünal, A. 2013. Izoftalik Polyester Matrislisüreklie-Cami ve Bazalt Fiber Takviyelikompozitlerin Mekanik Özellikleri üzerine Deneysel Bir Çalışma, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 5, 104-115.
- Gurumurthy, C. K., Kramer, E. J. and Hui, C. Y. 2001. Hydro-thermal fatigue of polymer interfaces. *Acta Materialia*, 49, 3309-3320.

- Hajian, M., Reisi, M. R., Koohmareh, G. A. and Jam, A. R. Z. 2012. Preparation and characterization of Polyvinylbutyral/Graphene Nanocomposite. *Journal of Polymer Research*, 19, 100-109.
- Hancox, N. L. 1998. Thermal effects on polymer matrix composites: Part 1. Thermal cycling. *Materials and Design*, 19, 85-91.
- Hao, L. C. and Yu, W. D. 2010. Comparison of the morphological structure and thermal properties of basalt fiber and glass fiber. *Proceedings of 2009 International Textile Science and Technology Forum*, Xian, China.
- Herakovitch, C. T. and Hyer, M. W. 1986. Damage-Induced Property Changes in Composites Subjected to Cyclic Thermal Loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 25, 779-786.
- Hossain, M. K., Hossain, M. E., Dewan, M. W., Hosur, M. and Jeelani, S. 2013. Effects of carbon nanofibers (CNFs) on thermal and interlaminar shear responses of E-glass/polyester composites. *Composites Part B-Engineering*, 44, 313-320.
- Hossain, M. K., Hossain, M. E., Hosur, M. V. and Jeelani, S. 2011. Flexural and compression response of woven E-glass/polyester-CNF nanophased composites. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 42, 1774-1782.
- Hsiao, K. T., Alms, J. and Advani, S. G. 2003. Use of epoxy/multiwalled carbon nanotubes as adhesives to join graphite fibre reinforced polymer composites. *Nanotechnology*, 14, 791-793.
- Huang, H. D., Ren, P. G., Chen, J., Zhang, W. Q., Ji, X. and Li, Z. M. 2012. High barrier graphene oxide nanosheet/poly(vinyl alcohol) nanocomposite films. *Journal of Membrane Science*, 409, 156-163.
- Huang, L., Wang, C. and Lu, Y. F. 2008. Thermal and moisture adsorption properties of cyanate ester modified epoxy resin and fiber-glass composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, 725-738.
- Hung, M. T., Choi, O., Ju, Y. S. and Hahn, H. T. 2006. Heat conduction in graphite-nanoplatelet-reinforced polymer nanocomposites. *Applied Physics Letters*, 89, 58-67.
- Hurley, S. A. 2002. The Use of Epoxy, Polyester and Similar Reactive Polymers in Construction: Materials and Their Practical Applications, *Materials Technology*, 1, 178-186.
- Iijima, S. 1991. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354, 56-58.
- Ivanovskii, A. L. 2003. Fullerenes and related nanoparticles encapsulated in nanotubes: Synthesis, properties, and design of new hybrid nanostructures. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 48, 846-860.
- Iwahori, Y., Ishiwata, S., Sumizawa, T. and Ishikawa, T. 2005. Mechanical properties improvements in two-phase and three-phase composites using carbon nano-fiber dispersed resin. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 36, 1430-1439.
- Jiří Militký, Martin Černý, Petr Jakeš, Vladimír Kovačič, Zbyněk Sucharda and Glogar, P. 2008. Composite materials with basalt fibre reinforcement and pyrolysed polysiloxane matrix. *Acta Research*, 17, 31-36.
- Kalaitzidou, K., Fukushima, H., Askeland, P. and Drzal, L. T. 2008. The nucleating effect of exfoliated graphite nanoplatelets and their influence on the crystal structure and electrical conductivity of polypropylene nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 43, 2895-2907.

- Kalita, G., Masahiro, M., Uchida, H., Wakita, K. and Umeno, M. 2010. Few layers of graphene as transparent electrode from botanical derivative camphor. *Materials Letters*, 64, 2180-2183.
- Kara, M. 2012. Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Karadayı, S. 2012. Düşük hızlı darbe yükü altında tabakalı kompozit malzemenin mekanik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Kellogg, K. G., Kallmeyer, A. R. and Dutta, P. K. 2003. Influence of moisture and reduced-temperature thermal cycles on the Izod notch toughness of a pultruded glass-fiber composite. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 13, 232-239.
- Kim, H., Hahn, H. T., Viculis, L. M., Gilje, S. and Kaner, R. B. 2007. Electrical conductivity of graphite/polystyrene composites made from potassium intercalated graphite. *Carbon*, 45, 1578-1582.
- Kim, J., Im, H., Kim, J. M. and Kim, J. 2012. Thermal and electrical conductivity of Al(OH)(3) covered graphene oxide nanosheet/epoxy composites. *Journal of Materials Science*, 47, 1418-1426.
- Kim, K. S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S. Y., Kim, J. M., Kim, K. S., Ahn, J. H., Kim, P., Choi, J. Y. and Hong, B. H. 2009. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature*, 457, 706-710.
- Kim, M. G., Hong, J. S., Kang, S. G. and Kim, C. G. 2008. Enhancement of the crack growth resistance of a carbon/epoxy composite by adding multi-walled carbon nanotubes at a cryogenic temperature. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 39, 647-654.
- Kim, M. G., Kang, S. G., Kim, C.G. and Kong, C.W. 2007. Tensile response of graphite/epoxy composites at low temperatures. *Composite Structures*, 79, 84-89.
- Kim, M., Park, Y. B., Okoli, O. I. and Zhang, C. 2009. Processing, characterization, and modeling of carbon nanotube-reinforced multiscale composites. *Composites Science and Technology*, 69, 335-342.
- Kim, Y. A., Kamio, S., Tajiri, T., Hayashi, T., Song, S. M., Endo, M., Terrones, M. and Dresselhaus, M. S. 2007. Enhanced thermal conductivity of carbon fiber/phenolic resin composites by the introduction of carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 90, 34-45.
- Kmita, G., Nowak, T. and Sekula, R. 2012. Modeling and Prediction of Thermal Cycle Induced Failure in Epoxy-Silica Composites. *Applied Composite Materials*, 19, 65-78.
- Kobayashi, S., Terada, K., Ogihara, S. and Takeda, N. 2001. Damage-mechanics analysis of matrix cracking in cross-ply CFRP laminates under thermal fatigue. *Composites Science and Technology*, 61, 1735-1742.
- Kontou, E. and Kallimanis, A. 2006. Thermo-visco-plastic behaviour of fibre-reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology*, 66, 1588-1596.
- Koo, J. H., Lao, S. C., Lee, J., Chen, D. Z., Lam, C., Yong, W., Londa, M. and Pilato, L. A. 2011. Morphology and thermal characterization of nanographene platelets. *Journal of Materials Science*, 46, 3583-3589.

- Kornmann, X. 2001. Polymer Layered Silcate Nanocomposites, EMP , Dübendorf, Switzerland.
- Kuilla, T., Bhadra, S., Yao, D. H., Kim, N. H., Bose, S. and Lee, J. H. 2010. Recent advances in graphene based polymer composites. *Progress in Polymer Science*, 35, 1350-1375.
- Kumar, D. 2011. Basalt Fiber. *Journal of the textile association*, 71, 5, 242-246.
- Kumskov, A. S., Zhigalina, V. G., Chuvilin, A. L., Verbitskiy, N. I., Ryabenko, A. G., Zaytsev, D. D., Eliseev, A. A. and Kiselev, N. A. 2012. The structure of 1D and 3D CuI nanocrystals grown within 1.5-2.5 nm single wall carbon nanotubes obtained by catalyzed chemical vapor deposition. *Carbon*, 50, 4696-4704.
- Lafarie-Frenot, M. C. 2006. Damage mechanisms induced by cyclic ply-stresses in carbon-epoxy laminates: Environmental effects. *International Journal of Fatigue*, 28, 1202-1216.
- Lafarie-Frenot, M. C., Rouquie, S., Ho, N. Q. and Bellenger, V. 2006. Comparison of damage development in C/epoxy laminates during isothermal ageing or thermal cycling. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 37, 662-671.
- Landau, L. and Sowjetunion, Z. 1937. *Statistical Physics Part I*, Pergamon press, 280p, Oxford, UK.
- Larsson, F. and Svensson, L. 2001. Carbon, polyethylene and PBO fibre composites for structural lightweight armour. *Composites:Part A*, 33, 221-231.
- Lebaron, P. C., Wang, Z. and Pinnavaia, T. J. 1999. Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview. *Applied Clay Science*, 15, 11-29.
- Lee, C., Wei, X. D., Kysar, J. W. and Hone, J. 2008. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321, 385-388.
- Lee, J. K., Song, S. and Kim, B. 2012. Functionalized graphene sheets-epoxy based nanocomposite for cryotank composite application. *Polymer Composites*, 33, 1263-1273.
- Li, T., Shen, J. F., Li, N. and Ye, M. X. 2013. Hydrothermal preparation, characterization and enhanced properties of reduced graphene-BiFeO₃ nanocomposite. *Materials Letters*, 91, 42-44.
- Li, W. K., Dichiaro, A. and Bai, J. B. 2013. Carbon nanotube-graphene nanoplatelet hybrids as high-performance multifunctional reinforcements in epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 74, 221-227.
- Li, X. S., Zhu, Y. W., Cai, W. W., Borysiak, M., Han, B. Y., Chen, D., Piner, R. D., Colombo, L. and Ruoff, R. S. 2009. Transfer of Large-Area Graphene Films for High-Performance Transparent Conductive Electrodes. *Nano Letters*, 9, 4359-4363.
- Li, Y. F., Zhu, J. H., Wei, S. Y., Ryu, J., Sun, L. Y. and Guo, Z. H. 2011. Poly(propylene)/Graphene Nanoplatelet Nanocomposites: Melt Rheological Behavior and Thermal, Electrical, and Electronic Properties. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 212, 1951-1959.
- Li, Y., Gong, W. J. and Qu, J. 2010. Experimental Study on Crack Resistance of Fiber Mortar Using Knife-Edge Binding Method. *Proceedings of the 6th International Specialty Conference on Fibre Reinforced Materials*, 219-224.
- Lombardo, N. 2005. Effect of an inhomogeneous interphase on the thermal expansion coefficient of a particulate composite. *Composites Science and Technology*, 65, 2118-2128.

- Long, S. G. and Zhou, Y. C. 2005. Thermal fatigue of particle reinforced metal-matrix composite induced by laser heating and mechanical load. *Composites Science and Technology*, 65, 1391-1400.
- Lopresto V., Leone C. and I., D. I. 2011. Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. *Composites Part B: Engineering*, 42, 717-723.
- Lu, L. M., Zhang, O., Xu, J. K., Wen, Y. P., Duan, X. M., Yu, H. M., Wu, L. P. and Nie, T. 2013. A facile one-step redox route for the synthesis of graphene/poly (3,4-ethylenedioxythiophene) nanocomposite and their applications in biosensing. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 181, 567-574.
- Madhukar, M. S., Bowles, K. J. and Papadopoulos, D. S. 1997. Thermo-oxidative stability and fiber surface modification effects on the inplane shear properties of graphite/PMR-15 composites. *Journal of Composite Materials*, 31, 596-618.
- Mallick, P. K. 1993. *Fiber-Reinforced Composites*, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan-Dearborn, 616 p, Dearborn, Michigan, USA.
- Mathur, R. B., Chatterjee, S. and Singh, B. P. 2008. Growth of carbon nanotubes on carbon fibre substrates to produce hybrid/phenolic composites with improved mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 68, 1608-1615.
- Mazumdar, S. K. 2001. *Composites Manufacturing: Materials, Product And Process Engineering*. *Crc Press*, 41-45 p, USA.
- Meguid, S. A. and Sun, Y. 2004. On the tensile and shear strength of nano-reinforced composite interfaces. *Materials and Design*, 25, 289-296.
- Meric, G. and Ruyter, I. E. 2007. Effect of thermal cycling on composites reinforced with two differently sized silica-glass fibers. *Dental Materials*, 23, 1157-1163.
- Meric, G. and Ruyter, I. E. 2008. Influence of thermal cycling on flexural properties of composites reinforced with unidirectional silica-glass fibers. *Dental Materials*, 24, 1050-1057.
- Meszaros, L., Deak, T., Balogh, G., Czvikovszky, T. and Czigany, T. 2013. Preparation and mechanical properties of injection moulded polyamide 6 matrix hybrid nanocomposite. *Composites Science and Technology*, 75, 22-27.
- Meszaros, L., Deak, T., Balogh, G., Czvikovszky, T. and Czigany, T. 2013. Preparation and mechanical properties of injection moulded polyamide 6 matrix hybrid nanocomposite. *Composites Science and Technology*, 75, 22-27.
- Mo, Z. L., Sun, Y. X., Chen, H., Zhang, P., Zuo, D. D., Liu, Y. Z. and Li, H. J. 2005. Preparation And Characterization of a Pmma/Ce(Oh)(3), Pr2o3/Graphite Nanosheet Composite. *Polymer*, 46, 12670-12676.
- Monakhova, T. V., Nedorezova, P. M., Bogaevskaya, T. A., Tsvetkova, V. I. and Shlyapnikov, Y. A. 1988. Thermooxidative Degradation of Polypropylene - Graphite Compositions. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya Seriya A*, 30, 2415-2419.
- Montazeri, A. and Rafii-Tabar, H. 2011. Multiscale modeling of graphene- and nanotube-based reinforced polymer nanocomposites. *Physics Letters A*, 375, 4034-4040.
- Morales, G., Barrena, M. I., De Salazar, J. M. G., Merino, C. and Rodriguez, D. 2010. Conductive CNF-reinforced hybrid composites by injection moulding. *Composite Structures*, 92, 1416-1422.

- Morgan, P. 2005. Carbon Fiber and Their Composites, Taylor and Francis Press, 1200 p, Boca Raton.
- Morozov, S. V., Novoselov, K. S., Katsnelson, M. I., Schedin, F., Elias, D. C., Jaszczak, J. A. and Geim, A. K. 2008. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer. *Physical Review Letters*, 100.
- Nakamura, T., Ramanujam, N., Vaddadi, P. and Singh, R. P. 2007. Interlaminar Fatigue Growth Under Thermal Cycles in Composite Laminates. *Proceedings of the 16th International Conference on Composite Materials*, Kyoto, Japan.
- Nasir, V., Karimipour, H., Taheri-Behrooz, F. and Shokrieh, M. M. 2012. Corrosion behaviour and crack formation mechanism of basalt fibre in sulphuric acid. *Corrosion Science* 64, 1–7.
- Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V. and Firsov, A. A. 2004. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306, 666-669.
- Novoselov, K. S., Jiang, D., Schedin, F., Booth, T. J., Khotkevich, V. V., Morozov, S. V. and Geim, A. K. 2005. Two-dimensional atomic crystals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 10451-10453.
- Olçay, Y., Akyol, M. and Gemci, R. 2002. Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metodlarının etkisinin incelenmesi. *Mühendislik-Mimarlık fakültesi*, 94-96.
- Ömercikoğlu, A. 2009. Metal Katmanlar İçeren Hibrit Katmanlı Kompozit Plakların Anlık Basınç Yüğü Altındaki dinamik Cevabının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Örs, A. 2009. Karbon Nanotüplerin Polimer ile Fonksiyonlaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özyurt, D. 2012. Sıcak filament destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile karbon nanotüp yüzey modifikasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Paillous, A. and Pailler, C. 1994. Degradation of Multiply Polymer-Matrix Composites Induced by Space Environment. *Composites*, 25, 287-295.
- Papadimitrakopoulos, G. C., Koutsomitopoulou, A. F. and Sfakianakis, A. 2012. Effect of thermal fatigue on the mechanical properties of epoxy matrix composites reinforced with olive pits powder. *Journal of Applied Polymer Science*, 124, 67-76.
- Papadimitrakopoulos, G. C., Xepapadaki, A. G. and Tagaris, G. D. 2009. Effect of thermal shock cycling on the creep behavior of glass-epoxy composites. *Composite Structures*, 88, 436-442.
- Park, J. S., Park, S. S. and Lee, S. 2007. Thermal and mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composites modified with CTBN and hydroxyl terminated polyester. *Macromolecular Symposia*, 249, 568-572.
- Park, R. and Jang, J. 1999. Performance improvement of carbon fiber polyethylene fiber hybrid composites. *Journal of Materials Science*, 34, 2903-2910.
- Parlevliet, P. P., Bersee, H. E. N. and Beukers, A. 2006. Residual stresses in thermoplastic composites - A study of the literature - Part I: Formation of residual stresses. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 37, 1847-1857.

- Partridge, I. K. and Cartie, D. D. R. 2005. Delamination resistant laminates by Z-Fiber (R) pinning: Part I - manufacture and fracture performance. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 36, 55-64.
- Patchkovskii, S., Tse, J. S., Yurchenko, S. N., Zhechkov, L., Heine, T. and Seifert, G. 2005. Graphene nanostructures as tunable storage media for molecular hydrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, USA.
- Pegoretti, A., Fabbri, E., Migliaresi, C. and Pilati, F. 2004. Intraply and interply hybrid composites based on E-glass and poly(vinyl alcohol) woven fabrics: tensile and impact properties. *Polymer International*, 53, 1290-1297.
- Pereira, L. F. C. and Donadio, D. 2013. Divergence of the thermal conductivity in uniaxially strained graphene. *Physical Review B*, 87.
- Pervin, F., Zhou, Y. X., Rangari, V. K. and Jeelani, S. 2005. Testing and evaluation on the thermal and mechanical properties of carbon nano fiber reinforced SC-15 epoxy. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 405, 246-253.
- Popov, V. 2004. Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science and Engineering*, 41, 61-102.
- Qian, D., Dickey, E. C., Andrews, R. and Rantell, T. 2000. Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites. *Applied Physics Letters*, 76, 2868-2870.
- Qiu, J. J., Zhang, C., Wang, B. and Liang, R. 2007. Carbon nanotube integrated multifunctional multiscale composites. *Nanotechnology*, 18, 40-48.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H. H., Yu, Z. Z. and Koratkar, N. 2010. Fracture and Fatigue in Graphene Nanocomposites. *Small*, 6, 179-183.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H. H., Yu, Z. Z. and Koratkar, N. 2009a. Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content. *Acs Nano*, 3, 3884-3890.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Yu, Z. Z. and Koratkar, N. 2009b. Buckling resistant graphene nanocomposites. *Applied Physics Letters*, 95(22).
- Ramanathan, T., Abdala, A. A., Stankovich, S., Dikin, D. A., Herrera-Alonso, M., Piner, R. D., Adamson, D. H., Schniepp, H. C., Chen, X., Ruoff, R. S., Nguyen, S. T., Aksay, I. A., Prud'homme, R. K. and Brinson, L. C. 2008. Functionalized graphene sheets for polymer nanocomposites. *Nature Nanotechnology*, 3, 327-331.
- Ramanujam, N., Vaddadi, P., Nakamura, T. and Singh, R. P. 2008. Interlaminar fatigue crack growth of cross-ply composites under thermal cycles. *Composite Structures*, 85, 175-187.
- Rana, S., Alagirusamy, R. and Joshi, M. 2011. Single-Walled Carbon Nanotube Incorporated Novel Three Phase Carbon/Epoxy Composite with Enhanced Properties. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11, 7033-7036.
- Ravve, A. 2000. *Principles of Polymer Chemistry*. 2nd edition, Plenum Press, 688 p, New York, USA.
- Ray, B. C. 2004. Thermal shock on interfacial adhesion of thermally conditioned glass fiber/epoxy composites. *Materials Letters*, 58, 2175-2177.

- Ray, B. C. 2006. Effect of thermal shock on interlaminar strength of thermally aged glass fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 100, 2062-2066.
- Recman, L. and Poláček, K. I. P. 2007. A study of interfacial aspects of epoxy-based hybrid composites reinforced with basalt, carbon and ceramic fibres by DMA analysis. *Vysoké učení technické*, 3, 12-24.
- Rodgers, R. M., Mahfuz, H., Rangari, V. K., Chisholm, N. and Jeelani, S. 2005. Infusion of SiC nanoparticles into SC-15 epoxy: An investigation of thermal and mechanical response. *Macromolecular Materials and Engineering*, 290, 423-429.
- Rosselli, F. and Santare, M. H. 1997. Comparison of the short beam shear (SBS) and interlaminar shear device (ISD) tests. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 28, 587-594.
- Rouquie, S., Lafarie-Frenot, M. C., Cinquin, J. and Colombaro, A. M. 2005. Thermal cycling of carbon/epoxy laminates in neutral and oxidative environments. *Composites Science and Technology*, 65, 403-409.
- Russell-Stevens, M., Todd, R. and Papakyriacou, M. 2005. The effect of thermal cycling on the properties of a carbon fibre reinforced magnesium composite. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 397, 249-256.
- Saçak, M. 2002. *Polimer Kimyası*, Gazi Kitabevi, 164s, Ankara.
- Sadeghian, R., Gangireddy, S., Minaie, B. and Hsiao, K. T. 2006. Manufacturing carbon nanofibers toughened polyester/glass fiber composites using vacuum assisted resin transfer molding for enhancing the mode-I delamination resistance. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 37, 1787-1795.
- Şahin, Y. 2000. *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, 327s, Ankara.
- Savaşkan, T. 2004. *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Derya Kitabevi, 220s, Trabzon.
- Sayer, M. 2009. *Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi*. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Schartel, B., Braun, U., Schwarz, U. and Reinemann, S. 2003. Fire retardancy of polypropylene/flax blends. *Polymer*, 44, 6241-6250.
- Şen, F. 2007. *Failure Analysis of Composite Pin-Loaded Joints Under Preload Moments*. Ph.D. Thesis, Dokuz Eylül University, İzmir.
- Sengupta, R., Bhattacharya, M., Bandyopadhyay, S. and Bhowmick, A. K. 2011. A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites. *Progress in Polymer Science*, 36, 638-670.
- Seo, S. D., Lee, D. H., Kim, J. C., Lee, G. H. and Kim, D. W. 2013. Room-temperature synthesis of CuO/graphene nanocomposite electrodes for high lithium storage capacity. *Ceramics International*, 39, 1749-1755.
- Sever, K., Sarıkanat, M., Seki, Y. and Tavman, İ. H. 2011. Isıl Çevrimin Jüt Fiber /Yüksek Yoğunluklu Polietilen(YYPE) Kompozitlerin Tabakalararası Kayma Dayanımına Etkisi. *Proceedings of the 6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey.
- Sevgi, H. E. 2007. *Bir Plâğın Deneysel ve ANSYS ProgramıYardımlıyla İncelenmesi*. Lisans Bitirme Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Seyman, M. C. 2010. *Çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Sgriecchia, N. 2008. Hawley, M. C. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. *Composites: Part A*, 39, 1632-1637.
- Shen, Z. Q., Bateman, S., Wu, D. Y., McMahon, P., Dell'olio, M. and Gotama, J. 2009. The effects of carbon nanotubes on mechanical and thermal properties of woven glass fibre reinforced polyamide-6 nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 69, 239-244.
- Shenderova, O. A., Zhirnov, V. V. 2002. *Carbon Nanostructures*. North Carolina State University Press, 130 p, North Carolina, USA.
- Shi, Y. M. and Li, L. J. 2011. Chemically modified graphene: flame retardant or fuel for combustion? *Journal of Materials Chemistry*, 21, 3277-3279.
- Shiino, M. Y., Faria, M. C. M., Botelho, E. C. and De Oliveira, P. C. 2012. Assessment of cumulative damage by using ultrasonic c-scan on carbon fiber/epoxy composites under thermal cycling. *Materials Research-Ibero-American Journal of Materials*, 15, 495-499.
- Shimokawa, T., Katoh, H., Hamaguchi, Y., Sanbongi, S., Mizuno, H., Nakamura, H., Asagumo, R. J. and Tamura, H. 2002. Effect of thermal cycling on microcracking and strength degradation of high-temperature polymer composite materials for use in next-generation SST structures. *Journal of Composite Materials*, 36, 885-895.
- Shin, K. B., Kim, C. G., Hong, C. S. and Lee, H. H. 2000. Prediction of failure thermal cycles in graphite/epoxy composite materials under simulated low earth orbit environments. *Composites Part B-Engineering*, 31, 223-235.
- Shindo, Y., Takano, S., Narita, F. and K. Horiguchi 2006. Tensile and damage behaviour of plain weave glass/epoxy composites at cryogenic temperatures. *Fusion Engineering and Design*, 81, 2479-2483.
- Siddiqui, N. A., Woo, R. S. C., Kim, J. K., Leung, C. C. K. and Munir, A. 2007. Mode I interlaminar fracture behavior and mechanical properties of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 38, 449-460.
- Sideridis, E., Kytopoulos, V. N., Kyriazi, E. and Bourkas, G. 2005. Determination of thermal expansion coefficient of particulate composites by the use of a triphase model. *Composites Science and Technology*, 65, 909-919.
- Sim, J. Park, C. and DY, M. 2010. Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials and Design*, 31, 4244-4250.
- Sinmazcelik, T., Arici, A. A. and Gunay, V. 2006. Impact-fatigue behaviour of unidirectional carbon fibre reinforced polyetherimide (PEI) composites. *Journal of Materials Science*, 41, 6237-6244.
- Sinmazcelik, T., Coban, O., Bora, M. O., Guenay, V. and Curgul, I. 2008. The effects of thermal cycles on the impact fatigue properties of thermoplastic matrix composites. *Applied Composite Materials*, 15, 99-113.
- Sokolinskaya, M. A., Zabava L. K., Tsybulya, T. M. and Medvedev, A. A. 1991. Strength properties of basalt fibers. *Glass and Ceramics*, 48, 435-437.
- Stankovich, S., Dikin, D. A., Dommett, G. H. B., Kohlhaas, K. M., Zimney, E. J., Stach, E. A., Piner, R. D., Nguyen, S. T. and RUOFF, R. S. 2006. Graphene-based composite materials. *Nature*, 442, 282-286.

- Subagia, I. D. G. A. and Kim, Y. 2013. A study on flexural properties of carbon-basalt/epoxy hybrid composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27, 987-992.
- Sundaram, R. S., Gomez-Navarro, C., Balasubramanian, K., Burghard, M. and Kern, K. 2008. Electrochemical modification of graphene. *Advanced Materials*, 20, 3050-3053.
- Swink, M. 2002. Continuous filament basalt a unique fiber capable of leadership in high temperature applications. *Proceeding of the Techtextil North America Symposium*, Atlanta, USA.
- Tang, T., Hui, C. Y., Retsos, H. G. and Kramer, E. J. 2005. Characterization of a fracture specimen for crack growth in epoxy due to thermal fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 72, 791-805.
- Tartrattanakul, V. and Jaroendee, D. 2006. Comparison between microwave and thermal curing of glass fiber-epoxy composites: Effect of microwave-heating cycle on mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 102, 1059-1070.
- Tekeli, S. 2007. Örgülü Kompozit Malzemenin (Glass Epoxy) Ansys Ve Abaqus İle Gerilme Analizleri ve Deneysel Kırılma Tokluğunun Hesaplanması, Bitirme Projesi, Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Thostenson, E. T., Ren, Z. F. and Chou, T. W. 2001. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites Science and Technology*, 61, 1899-1912.
- Tibor Czigány, János Vad and Pölöskei, K. 2005. Basalt fiber as a reinforcement of polymer composites. *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, 49,1, 3-14.
- Toğrul, T. 1995. *İnstrümental Analiz*. Ankara Üniversitesi, 85 s, Ankara.
- Towo, A. N. and Ansell, M. P. 2008. Fatigue evaluation and dynamic mechanical thermal analysis of sisal fibre-thermosetting resin composites. *Composites Science and Technology*, 68, 925-932.
- Uhl, F. M., Yao, Q., Nakajima, H., Manias, E. and Wilkie, C. A. 2005. Expandable graphite/polyamide-6 nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 89, 70-84.
- Velde, B. 1992. *Introduction to Clay Minerals, Chemistry, Origins, Uses and Environmental Significance*, London Great Britain Press, 198 s, UK.
- Wang, Q. H., Zhang, X. R. and Pei, X. Q. 2010. Study on the friction and wear behavior of basalt fabric composites filled with graphite and nano-SiO₂. *Materials and Design*, 31, 1403-1409.
- Wang, S. R., Tambraparni, M., Qiu, J. J., Tipton, J. and Dean, D. 2009. Thermal Expansion of Graphene Composites. *Macromolecules*, 42, 5251-5255.
- Wang, X., Hu, B., Feng, Y., Liang, F., Mo, J., Xiong, J. and Qiu, Y. 2008. Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 68, 444-450.
- Wang, X., Jin, J. and Song, M. 2013. An investigation of the mechanism of graphene toughening epoxy. *Carbon*, 65, 324-333.
- Wei, B., Cao, H. L. and Song, S. H. 2010. Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials and Design*, 31, 4244-4250.
- Wichmann, M. H. G., Sumfleth, J., Gojny, F. H., Quaresimin, M., Fiedler, B. and Schulte, K. 2006. Glass-fibre-reinforced composites with enhanced mechanical

- and electrical properties - Benefits and limitations of a nanoparticle modified matrix. *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 2346-2359.
- Wonderly, C., Grenestedt, J., ernlund, G. Fand Cepus, E. 2005. Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites. *Composites: Part B*, 60, 1-10.
- Wong, H. S. P., Mitra, S., Akinwande, D., Beasley, C., Chai, Y., Chen, H. Y., Chen, X. Y., Close, G., Deng, J., Hazeghi, A., Liang, J. L., Lin, A., Liyanage, L. S., Luo, J. Y., Parker, J., Patil, N., Shulaker, M., Wei, H., Wei, L. and Zhang, J. 2011. Carbon Nanotube Electronics - Materials, Devices, Circuits, Design, Modeling, and Performance Projection. *Proceedings of the Ieee International Electron Devices*, Stanford Univ., Stanford, USA.
- Xing, MA., Zhang, H. 2013. Fabrication of graphene films with high transparent conducting characteristics. *Nanoscale Research Letters*, 8, 121-129.
- Xu, Y. and Van Hoa, S. 2008. Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy/clay nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 68, 854-861.
- Xue, Z. W., Wang, L. D., Yang, C. T., Liu, Z. and Fei, W. D. 2011. Effects of thermal cycling on thermal expansion behaviors of beta-LiAlSiO₄ reinforced copper matrix composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21, 384-388.
- Yang, X. L., Wang, Z. C., Xu, M. Z., Zhao, R. and Liu, X. B. 2013. Dramatic mechanical and thermal increments of thermoplastic composites by multi-scale synergetic reinforcement: Carbon fiber and graphene nanoplatelet. *Materials and Design*, 44, 74-80.
- Yasmin, A., Luo, J. J. and Daniel, I. M. 2006. Processing of expanded graphite reinforced polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 66, 1182-1189.
- Yavari, F., Rafiee, M. A., Rafiee, J., Yu, Z. Z. and Koratkar, N. 2010. Dramatic Increase in Fatigue Life in Hierarchical Graphene Composites. *Acs Applied Materials and Interfaces*, 2, 2738-2743.
- Yetim, A. 2011. Karbon Nano Tüpler. Yüksek Lisans Tezi, Fenbilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Yokozeki, T., Iwahori, Y. and Ishiwata, S. 2007. Matrix cracking behaviors in carbon fiber/epoxy laminates filled with cup-stacked carbon nanotubes (CSCNTs). *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 38, 917-924.
- Yu, Q., Chen, P., Gao, Y., Mu, J. J., Chen, Y. W., Lu, C. and Liu, D. 2011. Effects of vacuum thermal cycling on mechanical and physical properties of high performance carbon/bismaleimide composite. *Materials Chemistry and Physics*, 130, 1046-1053.
- Yuan, W., Feng, J. L., Judeh, Z., Dai, J. and Chan-Park, M. B. 2010. Use of polyimide-graft-bisphenol a diglyceryl acrylate as a reactive noncovalent dispersant of single-walled carbon nanotubes for reinforcement of cyanate ester/epoxy composite. *Chemistry of Materials*, 22, 6542-6554.
- Yüce, M., 2011, bazı ağır metallerin tayininde kullanılmak üzere mikrobiyal biyosensör geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Biyoteknoloji Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Zhan, Y. Q., Meng, F. B., Yang, X. L. and Liu, X. B. 2011. Magnetite-graphene nanosheets (GNs)/poly(arylene ether nitrile) (PEN): Fabrication and

- characterization of a multifunctional nanocomposite film. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 390, 112-119.
- Zhang, B. M., Yang, Z. and Sun, X. Y. 2010. Measurement and analysis of residual stresses in single fiber composite. *Materials and Design*, 31, 1237-1241.
- Zhang, C. H., Zhang, J. B., Qu, M. C. and Zhang, J. N. 2011a. Toughness properties of basalt/carbon fiber hybrid composites. *Advances in Composites*, 150, 732-735.
- Zhang, J. W., Jiang, D. Z., Wang, C. Q. and Zhang, W. Mechanical properties of hybrid of carbon nanotube and carbon fiber reinforced epoxy composites. *Proceedings of the 18 th international conference on composite materials*, Jeju Island, Korea.
- Zhang, M. X. and Hu, H. 2009. Mechanical properties of novel different stitched density 3D hybrid basalt composite. *Proceedings of the Fiber Society 2009 Spring Conference*, Shanghai, China.
- Zhang, Q., Wu, S. Y., Zhang, L., Lu, J., Verproot, F., Liu, Y., Xing, Z. Q., Li, J. H. and Song, X. M. 2011b. Fabrication of polymeric ionic liquid/graphene nanocomposite for glucose oxidase immobilization and direct electrochemistry. *Biosensors and Bioelectronics*, 26, 2632-2637.
- Zhang, X. Q., Fan, X. Y., Yan, C., Li, H. Z., Zhu, Y. D., Li, X. T. and Yu, L. P. 2012. Interfacial microstructure and properties of carbon fiber composites modified with graphene oxide. *Acs Applied Materials and Interfaces*, 4, 1543-1552.
- Zhang, X., Hounslow, L. and Grassi, M. 2006. Improvement of low-velocity impact and compression-after-impact performance by z-fibre pinning. *Composites Science and Technology*, 66, 2785-2794.
- Zheng, L., Zhang, G. N., Zhang, M., Guo, S. H. and Liu, Z. H. 2012. Preparation and capacitance performance of Ag-graphene based nanocomposite. *Journal of Power Sources*, 201, 376-381.
- Zhishen, W., Xin, W. and Gang, W. 2012. Advancement of structural safety and sustainability with basalt fiber reinforced polymers. *Proceedings of CICE 2012 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Rome, Italy.
- Zhou, Y. X., Pervin, F., Jeelani, S. and Mallick, P. K. 2008. Improvement in mechanical properties of carbon fabric-epoxy composite using carbon nanofibers. *Journal of Materials Processing Technology*, 198, 445-453.
- Zhou, Y. X., Pervin, F., Rangari, V. K. and Jeelani, S. 2006. Fabrication and evaluation of carbon nano fiber filled carbon/epoxy composite. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 426, 221-228.
- Zhu, J., Kim, J. D., Peng, H. Q., Margrave, J. L., Khabashesku, V. N. and Barrera, E. V. 2003. Improving the dispersion and integration of single-walled carbon nanotubes in epoxy composites through functionalization. *Nano Letters*, 3, 1107-1113.
- Zor, M. 2008. Kompozit malzemeler-genel bilgi. *Makina Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir*.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İran’da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Maraghe’de tamamladı. 2000 yılında girdiği Razi Devlet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2004 yılında mezun oldu. 2004 yılında başladığı Yüksek Lisansı Tabriz Devlet Üniversitesinde Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim dalında 2007 yılında bitirmiş oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora öğrenimine başladı.