

**NANOKİL KATKILI TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN
MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

DUYGU BAYRAM

HAZİRAN 2022

DIYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANOKİL KATKILI TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN
MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

DUYGU BAYRAM

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV
YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

HAZİRAN 2022

DİYARBAKIR

**NANOKİL KATKILI TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Duygu BAYRAM tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

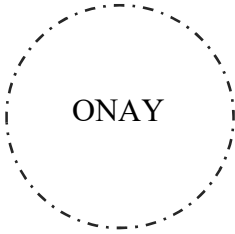
Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN
Danışman, **Makine Mühendisliği Bölümü,**
Dicle Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa GÜR (*)
Makine Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN (**)
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Kadir TURAN
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi



Savunma Tarihi: 16 / 06 / 2022

(*) Sınav Jürisi kısmının birinci satırına Jüri Başkanının bilgilerini yazınız.

(**) Sınav Jürisi kısmının ikinci satırına Tez Danışmanının bilgilerini yazınız.

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Duygu BAYRAM

İmza:

TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, lisans eğitimimden bugüne, mesleki gelişimime sağladıkları katkılarından, ön açıcı fikirleriyle geliştiren, her anlamda hiç yalnız bırakmayan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gurbet Örçen'e manevi desteğini esirgemediği, sonsuz sabrı ve hoşgörüsü için minnettarım.

Eğitim süresinde engin bilgilerini paylaşarak, desteklerinden dolayı Prof. Dr. Kadir Turan'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkan'ı Prof. Dr. Yeliz Pekbey'e ve Arş. Gör. Hasan Yavuz Ünal'a bilgi paylaşımı ve saha çalışmasındaki yardımlarından dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Dicle üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümü Dr. Öğr. Üyesi Haluk Kejanlı ve Arş. Gör. Taner Aydın'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmamızdaki nanokilin teminini sağlamak konusunda yardımcı olan Esan Eczacıbaşı'na, üretimi gerçekleştirdiğimiz Fibermak'taki çalışanlara katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (DÜBAP), tez çalışması için sağladıkları finansal destek için (Proje No: DÜBAP-FBE.21.017) için teşekkür ederim.

Tez sürecinde gösterdikleri özveri ve desteklerinden dolayı arkadaşlarıma, Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, 12 ve 13. Dönem Diyarbakır Şubesi yönetim kurullarına teşekkürü bir borç bilirim.

En önemlisi, bana her zaman güç veren, desteğini hiç esirgemeyen annem Sündüz Bayram'a, hayatım boyunca gelişim ve eğitimimi teşvik eden babam Reşat Bayram'a, her zaman beni şanslı hissettiren, varlıklarıyla beni motive eden, kız kardeşlerim Ezgi Bayram Öz, Aksel Bayram Kıran, Beste Bayram Kotay, Berfin Bayram ve Berivan Gizem Bayram'a her süreçte yanımda olup bana inandıkları için şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	19
3.1 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi.....	19
3.2 Kompozit Malzemelerin Avantajlı ve Dezavantajlı Özellikleri.....	20
3.3 Kompozit Malzemelerde Sınıflandırma	21
3.3.1 Matris malzemesine göre kompozit malzemeler.....	21
3.3.2 Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler.....	24
3.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	26
3.4.1 Elle yatırma yöntemi	26
3.4.2 Püskürtme yöntemi	27
3.4.3 Elyaf sarma yöntemi	28
3.4.4 Reçine transfer yöntemi (RTM).....	28
3.4.5 Vakum torbası tekniği ile üretim.....	29
3.4.6 Reçine infüzyonu yöntemi	29
3.4.7 Baskı kalıplama yöntemi.....	30
3.4.8 Enjeksiyon kalıplama yöntemi.....	30
3.4.9 Profil çekme (pultrüzyon) yöntemi	31
4. NANOKOMPOZİT MALZEMELER	32
4.1 Nano Teknoloji.....	32

4.2	Nano Partiküller	32
4.3	Nanokompozitlerin Tarihçesi	33
4.4	Nanokompozit Malzemeler	33
4.5	Nanokompozit Malzemelerin Avantajları	34
4.6	Nanokompozitlerin Sınıflandırılması	34
4.6.1	Seramik nanokompozit malzemeler	34
4.6.2	Metalik nanokompozit malzemeler	35
4.6.3	Polimer nanokompozit malzemeler	35
4.7	Nanokompozit Malzemelerde Takviye Çeşitleri	37
4.7.1	Nanokiller	37
4.7.2	Nanolifler	38
4.7.3	Nanotüpler	39
5.	MATERYAL VE METOT	41
5.1	Kullanılan Malzemeler	41
5.2	Plakaların Üretimi	43
5.2.1	Matris malzemesinin hazırlanışı	43
5.2.2	Takviye malzemesinin hazırlanışı	46
5.2.3	Plakaların üretimi	47
5.3	Numunelerin Boyutlandırılması	49
5.4	Mekanik Deneyler	49
5.4.1	Çekme deneyi	49
5.4.2	Basma deneyi	51
5.4.3	Kayma deneyi	53
5.4.4	Sertlik deneyi	54
5.5	Dinamik Mekanik Analizi (DMA)	54
5.6	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)	57
5.7	Termogravimetrik Analiz (TGA)	58

6.	BULGULAR VE TARTIŞMA	59
6.1	Çekme Deneyi Sonuçları	59
6.2	Basma Deneyi Sonuçları	61
6.3	Kayma Deneyi Sonuçları.....	64
6.4	Sertlik Deneyi Sonuçları	67
6.5	Nanokil Analizi Sonuçları	68
6.6	SEM Görüntüleri	69
6.7	Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları.....	70
6.8	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analiz Sonuçları	77
6.9	Termogravimetrik Analiz Sonuçları (TGA).....	79
6.10	Hasar Tipleri Açısından Değerlendirme.....	84
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	86
	KAYNAKLAR	88
	ÖZGEÇMİŞ	94

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Polimer yapıların amorf ve kristalin olarak gösterimi	23
Şekil 3.2 Farklı tip fiberlerin gösterimi.....	24
Şekil 3.3 El yatırma yönteminin şematik gösterimi	27
Şekil 3.4 Püskürtme yönteminin şematik gösterimi.....	27
Şekil 3.5 Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi	28
Şekil 3.6 RTM yönteminin şematik gösterimi	29
Şekil 3.7 Vakum tekniği ile üretim yönteminin şematik gösterimi	29
Şekil 3.8 Reçine film infüzyon işleminin şematik gösterimi	30
Şekil 3.9 Baskı kalıplama işleminin şematik gösterimi	30
Şekil 3.10 Enjeksiyon kalıplama işleminin şematik gösterimi	31
Şekil 3.11 Pultrüzyon yönteminin şeması	31
Şekil 4.1 Polimer ve nanokillerden oluşan farklı nanokompozit tipleri.....	36
Şekil 4.2 Farklı nanoboyutlu nanopartiküller	37
Şekil 4.3 Montmorillonit sodyum yapısı.....	37
Şekil 4.4 Katyon değişim reaksiyonu	38
Şekil 4.5 Farklı nanotüplerin formlarının gösterimi	39
Şekil 4.6 Karbon nanotüplerin polimerle birleşimi.....	40
Şekil 5.1 Numune üretiminin şematik gösterimi.....	42
Şekil 5.2 Katkı malzemesi olarak nanokilin reçineye karıştırılması.....	43
Şekil 5.3 Sonikasyon düzeneği	44
Şekil 5.4 Karışım sıcaklığının ölçülmesi	45
Şekil 5.5 Karışımın tamamlanması	45
Şekil 5.6 Fiber kumaşın seçimi	46
Şekil 5.7 Elle yatırma yöntemi ile kompozitin üretimi	46
Şekil 5.8 Reçine emdirilmiş takviye malzemesinin kurumaya bırakılması	47
Şekil 5.9 Tabakaların üretimi.....	47
Şekil 5.10 Üretilen tabakaların sıcak pres için yanmaz jelatinle kaplanması	48
Şekil 5.11 Plaklara sıcak pres uygulanması	48
Şekil 5.12 Numunelerin boyutlandırılması	49
Şekil 5.13 Çekme testi numunesinin geometrisi.....	49
Şekil 5.14 Instron marka test cihazı ve çekme testinin yapılışı	50
Şekil 5.15 Kullanılan strain-gauge özellikleri.....	51

Şekil 5.16 Numunelerin strain-gauge bağlantısı	51
Şekil 5.17 Basma testi numunesinin geometrisi	51
Şekil 5.18 Basma deneyi için hazırlanan numuneler	52
Şekil 5.19 Instron marka test cihazı ve basma testinin yapılışı.....	52
Şekil 5.20 Kayma testi numunesinin geometrisi.....	53
Şekil 5.21 Kayma testi numunesi strain gauge bağlantısı.....	53
Şekil 5.22 Instron marka test cihazı ile kayma testinin yapılışı.....	54
Şekil 5.23 DMA ile amorf bir polimer için viskoelastik aralığın gösterimi	56
Şekil 5.24 Q800 tipi DMA cihazı	56
Şekil 5.25 Numunenin DMA cihazına yerleşimi	57
Şekil 5.26 DSC analizinde ısı akış şeması	58
Şekil 6.1 Katkısız numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği	59
Şekil 6.2 %0,5 katkılı numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği	59
Şekil 6.3 %1 katkılı numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği	60
Şekil 6.4 %1,5 katkılı numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği	60
Şekil 6.5 Gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması	61
Şekil 6.6 Katkısız numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	62
Şekil 6.7 %0,5 katkılı numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği	62
Şekil 6.8 %1 katkılı numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği	62
Şekil 6.9 %1,5 katkılı numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği	63
Şekil 6.10 Gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması	63
Şekil 6.11 Katkısız numunenin kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiği	64
Şekil 6.12 %0,5 katkılı numunenin kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiği.....	64
Şekil 6.13 %1 katkılı numunenin kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiği.....	64
Şekil 6.14 %1,5 katkılı numunenin kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiği.....	65
Şekil 6.15 Kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması.....	65
Şekil 6.16 Nanokili oluşturan elementlerin gösterimi.....	69
Şekil 6.17 Numunelerin SEM görüntüsü	69
Şekil 6.18 Katkısız numunenin DMA grafiği	71
Şekil 6.19 %0,5 oranında kil katkılı kompozit malzemenin DMA grafiği	71
Şekil 6.20 %1 oranında kil katkılı kompozit malzemenin DMA grafiği	72
Şekil 6.21 %1,5 oranında kil katkılı kompozit malzemenin DMA grafiği	72

Şekil 6.22 Farklı oranlarda nanokil katkılı numunelerin depolama modülü - sıcaklık grafiği	73
Şekil 6.23 Farklı oranlarda nanokil katkılı numunelerin kayıp modülü - sıcaklık grafiği	75
Şekil 6.24 Farklı oranlarda nanokil katkılı numunelerin $\tan(\delta)$ - sıcaklık grafiği	76
Şekil 6.25 Katkısız numunenin DSC analizi grafiği	77
Şekil 6.26 %0,5 oranında kil katkılı numunenin DSC analizi grafiği.....	77
Şekil 6.27 %1 oranında kil katkılı numunenin DSC analizi grafiği.....	78
Şekil 6.28 %1,5 oranında kil katkılı numunenin DSC analizi grafiği.....	78
Şekil 6.29 Katkısız numunenin sıcaklık aralıklarına göre ağırlık değişim yüzdeleri	80
Şekil 6.30 %0,5 katkılı numunenin sıcaklık aralıklarına göre ağırlık değişim yüzdeleri	80
Şekil 6.31 %1 katkılı numunenin sıcaklık aralıklarına göre ağırlık değişim yüzdeleri	81
Şekil 6.32 %1,5 katkılı numunenin sıcaklık aralıklarına göre ağırlık değişim yüzdeleri	81
Şekil 6.33 Katkısız numunenin sabit sıcaklık aralığına göre TGA grafiği	82
Şekil 6.34 %0,5 katkılı numunenin sabit sıcaklık aralığına göre TGA grafiği	82
Şekil 6.35 %1 katkılı numunenin sabit sıcaklık aralığına göre TGA grafiği.....	83
Şekil 6.36 %1,5 katkılı numunenin sabit sıcaklık aralığına göre TGA grafiği	83
Şekil 6.37 %1,5 nanokil katkılı numunelerden elde edilen hasar tipleri.....	85

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Cam fiber çeşitlerinin bazı mekanik özellikleri.....	25
Tablo 3.2 Farklı derecedeki kevlarların özellikleri	26
Tablo 4.1 Kullanılan bazı takviye ve dolgu malzemelerinin yüzey alanları.....	33
Tablo 5.1 Kullanılan malzemelerin özellikleri.....	41
Tablo 5.2 Katkı oranına göre malzeme miktarları	43
Tablo 6.1 Elde edilen mekanik özellikler ve değerleri	66
Tablo 6.2 Numunelerin sertlik değerleri	67
Tablo 6.3 Kil yapısındaki elemanlar	68
Tablo 6.4 DSC ile elde edilen t_g değerleri.....	79
Tablo 6.5 Numunelerin TGA değerleri.....	83

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
σ	Gerilim
F	Kuvvet
A	Kesit Alanı
ε	Şekil Değişimi
l	Uzunluk
l_0	İlk uzunluk
τ	Kayma gerilimi
G_{12}	Kayma Modülü
γ_{12}	Poisson Oranı
E'	Depolama Modülü
E''	Kayıp Modülü
δ	Faz Açısı
t_g	Camsı Geçiş Sıcaklığı

Kısaltma	Açıklama
AAS	Alkali Aktive Cüruf
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFRP	Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer
CNT	Karbon Nanotüp
CNT-GE	Germanium NANOTÜP
DCB	Double Cantilever Beam
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetri
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
FESEM	Field Emission Scanning Electron

FFF	Füzyonlu Filament Fabrikasyon
GFRP	Glass Fibre Reinforced Polymer
GKFRP	Nanokil Dolgulu Hibrit Cam/Kenaf
GNP	Grafen Nanoplateletler
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
HDTMA	Heksadesiltrimetilamonyum
HDTTPP	Heksadesiltrifenilfos-Fonyum
HNT	Hal Loysit Nanotüp
KFRP	Nanokil Dolgulu Kenaf
MMT	Montmorillonit
NC	Nano Clay
NC-GE	Germanium Nano-Crystals
OM	Organo-Modifiye
OMMT	Montmorillonitin Organo-Nanokilleri
PAN	Poliakrilonitril
PBAT	Polybutylene Adipate Terephthalate
PCL	Polikaprolakton
PHBV	Poli, Polihidroksialkanoat
PLA	Polilaktik Asit
PP	Polipropilen
SAM	Scanning Acoustic Microscopy
SEM	Scanning Electron Microscopy
TGA	Termogravimetrik Analiz
UHMWPE	Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
UV	Ultraviyole Işın
VARIM	Vakum Destekli Reçine Infüzyon Kalıplama
XRD	X-Ray Diffraction
NC	Nano Clay

ÖZET

NANOKİL KATKILI TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Bayram, Duygu

Yüksek Lisans, Mühendislik Bölümü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN

Haziran 2022, 110 sayfa

Bu çalışmada, nanokil katkıli tabakalı kompozit levhaların mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada woven kumaş cam fiber takviyeli epoksi kompozit levhalar kullanılmıştır. Levhaların üretimi, epoksi ağırlığına bağlı olarak nanokil katılarak elle yatırma yöntemi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma, katkısız, ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında nanokil katkısı ile elde edilen levhalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen levhalardan ASTM standartlarına uygun olarak numuneler elde edilmiştir. Bu numuneler daha sonra mekanik özelliklerin tespiti için çekme testine, basma testine, kayma testine ve sertlik testine tabi tutulmuşlardır. Ayrıca kompozit numunelerin; Dinamik Mekanik Analiz (DMA), Termogravimetrik Analizi (TGA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizleri de yapılmıştır. Elde edilen tüm bu özellikler katkısız numuneler ile kendi aralarında karşılaştırma yapılarak değerlendirilmiştir. Aynı zamanda numunelerin Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntüleri alınarak, nanokilin dağılımları gözlemlenmiştir. Nanokilin, numunelerin kırılma tipleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada nanokil katkıli numunelerden elde edilen; Elastisite modülü, kayma modülü, kayma modülü, çekme mukavemeti, kayma mukavemeti, poisson oranı ve sertlik değerlerinin, nanokil katılmamış numunelerden elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Nanokilin çekme mukavemetine etkisi, katkısız numunelere göre %0,5, %1, %1,5 oranlarında sırasıyla, %26,97, %31,06, %21,73 oranlarında artış şeklinde olmuştur. Basma mukavemet değerlerinde ise en yüksek değer ağırlıkça %1 nanokil katkıli numunelerden elde edilmiştir. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizi ile nanokil oranı arttıkça t_g sıcaklıklarının, katkısız numunenin t_g sıcaklığına göre arttığı tespit edilmiştir. Termogravimetrik (TGA) analizinde ise sabit sıcaklık değerlerinde (300-490 °C) en yüksek kütle kayıp oranı, ağırlıkça %1,5 nanokil oranına sahip numuneden elde edilmiştir. Kayıp modülünde %1,5 nanokil katkıli numuneden, depolama modülünde ise %0,5 nanokil katkıli numuneden maksimum sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca nanokil oranı artıkça numunelerde tabakalar arası ayrışma olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanokil, Mekanik özellikler, Nanokompozit levhalar, DMA, TGA.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF NANO CLAY DOPED LAMINATED COMPOSITE SHEETS

Bayram, Duygu

Master of Science in the Department of Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Gurbet ÖRÇEN

Jun 2022, 110 pages

In this study, the mechanical behavior of nanoclay reinforced laminated composite sheets were investigated experimentally. In the study, woven fabric glass fiber reinforced epoxy composite sheets were used. The sheets were produced by the hand laying method by adding nanoclay depending on the epoxy weight. The study was carried out without additives, on boards obtained with nanoclay additives at 0.5%, 1%, and 1.5% by weight. Samples were obtained from the obtained plates following ASTM standards. These samples were then subjected to tensile test, compression test, shear test, and hardness test to determine the mechanical properties. In addition, Dynamic Mechanical Analysis (DMA) analyses, Differential Scanning Calorimetry (DSC), and Thermogravimetric Analysis (TGA) analyzes were also performed to evaluate the thermomechanical properties of composite samples. These properties were compared for all the samples (pure and with nanoclay) and the results are evaluated. At the same time, the SEM images of the samples were taken and the distribution of nanoclay was observed. The effect of nanoclay on the fracture types of the samples was also investigated. In the experimental study, obtained from nanoclay added samples; It was determined that the modulus of elasticity, shear modulus, tensile strength, shear strength, Poisson's ratio, and hardness values were higher than the values obtained from the samples without nanoclay. The effect of nanoclay on tensile strength increased by 26.97%, 31.06% and 21.73%, respectively, compared to the 0.5%, 1%, and 1.5% additive ratios of the undoped samples. The highest value in compressive strength values was obtained from the samples containing 1 wt% nanoclay. With the DSC analysis, it was determined that the t_g temperatures increased as the nanoclay ratio increased compared to the t_g temperature of the undoped sample. In the TGA analysis, at constant temperature values (300-490°C), the highest mass loss rate was obtained from the samples with a nanoclay ratio of 1.5% by weight. It was observed that the storage modulus decreased with the increase in temperature in all samples. In addition, as the nanoclay ratio increased, it was determined that there was a separation between the layers in the samples. Maximum results were obtained from the sample with 1.5% nanoclay in the loss module and from the sample with 0.5% nanoclay in the storage module. In addition, as the nanoclay ratio increased, it was determined that there was separation between the layers in the samples.

Keywords: Nano clay, Mechanical properties, Nanocomposite sheets, DMA, TGA.

1. GİRİŞ

İnsanlık alet yapıp kullanmaya başladığından beri çevresindeki doğayı kendisi için konforlu hale getirmeye çalışmıştır. Mekanik özellikleri daha iyi malzemeler keşfettikçe daha iyi aletler yapıp gelişimini sürdürmüştür. Örneğin; tarım devriminden önce mağaralarda, ağaç kovuklarında yaşayan insanlar, yerleşik hayata geçtikten sonra kendilerini korumak için ellerindeki aletlerle barınaklar yapmışlardır. O dönemde gözlem yaparak çevresindeki nesnelere hakkında elde ettikleri bilgilerle çamurdan barınak yapmaya çalışmışlardır. Daha sonra kullandıkları çamuru doğa şartlarından koruyabilmek ve daha dayanıklı hale getirmek için otlarla karıştırmaya başlamışlar ve barınaklarını geliştirdikleri bu malzemeyle yapmaya başlamışlardır.

Tarihte bilinen ilk kompozit olan kerpiç bu şartlarda ortaya çıkmıştır. O zamanki şartlarda ergonomik, ekonomik vb. kaygılar ön planda olmadığından sadece ihtiyaca cevap olabilmesi yeterli olmuştur. Ancak günümüzde üretim çıktıları için ergonomik, ekonomik, ticari, kültürel, kullanım ömrü, çalışma şartları vb. kaygılar ön planda olduğundan bu durum insanları yeni arayışlara itmiştir. O dönemden günümüze kompozit malzemeler insan yaşamında kendisine daha çok yer bulmuştur. Örneğin araç yollarının kararlılığı için asfalt kullanılmış, daha sağlam veya daha yüksek yapılar yapmak için betonarme yöntemler kullanılmıştır. Kompozitlerdeki bu gelişimin sebebi, kompozitlerin geleneksel malzemelere göre geliştirilme ve değiştirilmeye olan yatkınlığıdır. Kompozit malzemelerin artık günlük hayatta üretim alanlarında sıklıkla kullanılmasıyla yeni ihtiyaçlar ortaya çıkmıştır. Bu malzemelere ek özellikler kazandırılarak kullanım alanları çoğaltılmaya ve geliştirilmeye çalışılmıştır.

Nanokompozitler de nanoteknolojinin gelişimine paralel olarak bu çalışma alanlarında kendine yer bulmuştur. Nanoteknoloji çok küçük atom molekülleri ile kendileriyle kıyaslandığında milyar kat büyüklükte üretim çıktılarının alınması için geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu teknoloji alışılmadık özelliklerin geliştirilmesiyle neredeyse tüm alanlardaki çalışmaların ilgi odağı olmuştur. Teknolojinin nanoboyuttaki bu araştırma eğlencesi, kerpiçten, yangın duvarlarına, oklardan kurşungeçirmez yeleklere, otomobil basamaklarından, uçak kanatlarına evrilen yeni bir nanokompozit bilimini açığa çıkarmıştır. Bu gelişim, elbetteki nanopartiküllerde hapsolan mükemmel özelliklerin açığa çıkarılması ile ilişkilidir. Bütün bu ilerlemenin kaydedilmesi, araştırmacıların

nanopartiküllerinin fiziksel, termal, mekanik özellikleri odağında yaptıkları çalışmalarla, nanopartiküllerin, gelişime açık kompozit bilimine entegrasyonu ile sağladığı üstün özellikler sayesinde kaydedilmiştir. Örneğin; General Motors ve Basell, hafif olmasına karşın daha dayanıklı bir malzeme arayışına girmiş ve nanokil katkılı TPO yaparak otobüslerde basamak olarak kullanmıştır. Bununla birlikte hastanelerde yüzey kaplamaları için kullanılan kompozitlerin sterilizasyonu zor olduğundan bu kompozitlere enfeksiyonları önlemek ve daha steril bir ortam oluşturabilmek için güneş ışınlarıyla kendini temizleme özelliği bulunan titanyum dioksit nano partikülleri eklenmiştir. İnşaat sektöründe ise yüksek darbe dayanımı elde etmek amacıyla Al_2O_3 nanotüpleri kompozitler kullanılmaktadır. Aynı zamanda zararlı ışınlarla karşı koruma özelliği kazandırmak gibi birçok hedefle, nanokompozit yapılar geliştirilmiştir.

Nanokompozitlerin kullanım alanlarının daha fazla genişletilmesi, farklı uygulama alanlarına yaygınlaştırılması için nanokil katkısının mekanik etkilerinin araştırılması ve davranışlarının incelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada tabakalı kompozitlere farklı oranlarda nanokil takviyesi yapılarak, elde edilen nanokompozit levhalarının mekanik davranışları incelenmiştir. Elde edilen bulgular ışığında, nanokil katkısı ile iyileşen mekanik özelliklere göre nanokompozitlerin uygulama alanlarının genişletilmesi amaçlanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Nanokompozitlerin üretim çıktısı olarak kullanılmasıyla birlikte bu alanla ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Araştırmalarda kompozitlere nanokil eklenerek, malzemelerin termal, mekanik ve kimyasal özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Shelly vd., (2021), silanize nanokil ve uyumlu ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) lifleri içeren epoksi bazlı cam elyaf takviyeli kompozit levhaların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için farklı parametreleri araştırmışlardır. Bu amaçla mekanik özellikler için vakum destekli reçine infüzyon kalıplama yöntemi kullanılarak levhalar hazırlamışlar. UHMWPE liflerini, üç farklı yüzey işlemi kullanılarak uyumlu hale getirmişler ve bunların uyumluluğunu, enerji dağılımlı spektroskopi ile doğrulamışlar. 2 phr silanize nanokil ve 0.25 phr uyumlu UHMWPE lifleri ile takviye edilmiş nanokompozitlerin, örnek numuneye göre darbe mukavemetinde %30'luk önemli bir gelişme gösterdiğini belirtmişler. Diğer tüm mekanik özelliklerin de önemli gelişmeler gösterdiği belirtmişler. SEM analizi ile, nanokilin silanizasyonunun ve UHMWPE liflerinin optimum işlem yoluyla uyumlu hale getirilmesinin, GFRP nanokompozit sisteminin farklı bileşenleri arasında gelişmiş ara yüzey bağlanmasıyla sonuçlandığını açıklamışlardır.

Shelly vd., (2018), modifiye edilmemiş kil (Nanomer® PGV) ve organik olarak modifiye edilmiş kil (Nanomer® I.28E) olmak üzere iki farklı nanokilin takviyesini kullanarak, epoksi esaslı malzemelerin darbe dayanımı, çekme özellikleri, kırılma tokluğu ve eğilme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP)'leri vakum destekli reçine infüzyon kalıplama (VARIM) tekniği kullanarak üretmişler. İşlenen tüm nanokompozitlerde pul pul dökülmüş nano-kil morfolojileri elde etmişlerdir. Özelliklerde iyileştirme/değişim mekanizmalarını, SEM/TEM analizi ve x-ışını kırınım modelleri yardımıyla desteklemişlerdir. Organik olarak değiştirilmiş nanokil ile karşılaştırıldığında, değiştirilmemiş nanokil ile güçlendirilmiş nanokompozitler için mekanik performansta daha fazla gelişme gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Nanokil içermeyen GFRP'ye göre darbe mukavemetinde, eğilme mukavemetinde ve kırılma tokluğunda sırasıyla %22, %31 ve %73'lük maksimum iyileşme gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Bağcı vd., (2020), yaptıkları çalışmada, nanokil ilaveli cam elyaf/epoksi kompozitler için katı partikül aşınma davranışı üzerinde bu periyodun etkisi araştırmışlardır. Kompozitlerin yüzey aşınma özellikleri, aşındırıcı olarak 400 µm boyutunda açısız alümina parçacıkları kullanılarak katı parçacık aşınma testleri ile elde edildiğini belirtmişlerdir. Testler, çalışma koşulları olarak ~23 veya ~34 m/s darbe hızları ve 30°, 60° veya 90° çarpma açıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınmış yüzeyleri, nanokompozitlerde yer alan inkübasyon mekanizmalarını karakterize etmek için bir taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmişlerdir. Çalışmada, nanokil içermeyen cam elyaf/epoksi kompozit numunenin, nanokil katkılı kompozitlerle karşılaştırıldığında (ağırlıkça %1 ile %3 arasındaki oranlarda) en yüksek aşınma direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmanın bulgularında nanokilin, cam elyaf ve epoksinin toplanmasının; zayıf uyumluluğun sonuçları etkilediğini belirtilmiştir.

Jojibabu vd., (2020) yaptıkları çalışmada, yapıştırıcı malzemesi olarak epoksi dayanımlı nanokompozitler üzerine yapılan çalışmaları araştırmışlardır. Karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen nanoplateletler (GNP'ler), nanokil, nanosilika (nano SiO₂) ve nano-alümina (nano-Al₂O₃) dâhil olmak üzere çeşitli nano-dolgu maddelerin dahil edilerek yapışkan bir malzeme olarak nanokompozitin araştırılması ve geliştirilmesi için gözden geçirmişlerdir. Farklı nano dolguların epoksinin mekanik özellikleri ve bağlantı mukavemeti üzerindeki etkisini belirtmişlerdir. Nano dolgu maddelerinin dispersiyonu için mevcut prensiplerin, tekniklerin ve nano dolgu ilavesinin epoksi bağlantıların mukavemeti ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerini de gözden geçirilmişlerdir.

Başara vd., (2005), farklı killerin içeriğinin ve türünün nanokompozitlerin yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için epoksi-kil nanokompozitler sentezleyerek araştırmışlardır. Bisfenol-A'nın (epoksi) diglisidil eterini, ağırlıkça %0,5-11 doğal sodyum kolositit ve organik olarak modifiye edilmiş 30B kolosititi montmorillonit türleri ile güçlendirmişlerdir. SEM sonuçları ile kolositit takviyesi arttıkça daha fazla topaklanmaların bulunduğunu göstermişlerdir. 30B kolositinin, sodyum kolosititi katkısı içeren nanokompozitlere göre daha iyi bir dağılım ve daha düşük derecede toplanma sergilediğini belirtmişlerdir. X-ışını sonuçları, ağırlıkça %3

Cloisite 30B içeren nanokompozitlerde, d-aralığının 18.4 Å'den (saf kilin başlangıç değeri) 38.2 Å'ye genişlediğini göstermişlerdir. Cam geçiş sıcaklığı, dolgunsuz epoksi reçinede 73°C'den, ağırlıkça %9 Cloisite 30B katkısı ile nanokompozitte 83,5°C'ye yükseldiğini elde etmişlerdir. Çekme mukavemetinin ise ağırlıkça %1 modifiye kil yüklemesinde maksimum değere çıktığını elde etmişlerdir. Ağırlıkça %0,5 organik olarak modifiye edilmiş kil ilavesinin, epoksi reçinenin darbe mukavemetini %137 oranında iyileştirdiğini ancak ağırlıkça %0,5 oranında modifiye edilmemiş kil ilavesinin ise darbe mukavemetini %72 oranında iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Her iki nanokompozit tipinde de artan kil yüklemesi ile çekme modülünün arttığını elde etmişlerdir.

Lakshmi vd., (2008), organik olarak modifiye edilmiş killer, yani (i) heksadesiltrimetilamonyum (HDTMA) ve (ii) heksadesiltrifenilfos-fonyum (HDTTP) ile modifiye edilmiş killer kullanarak, hazırlanan epoksi-kil nanokompozitlerin sentezi ve karakterizasyonu ile ilgilenmişlerdir. BDGE, BPDG, BBDG ve TGDDM gibi farklı epoksiler kullanarak, %5 modifiye kil, sertleştirici olarak DDS kullanarak, eriyik harmanlama yöntemiyle birkaç epoksi-kil nanokompoziti hazırlamışlardır. Nanokilin epoksi-nanokompozit içine katılmasıyla kütleme davranışı ve camsı geçiş sıcaklığının azalmasını, polimerizasyon üzerindeki etkili eksfoliasyona ve nanotabaka kısıtlamasına bağlamışlardır. Alkilamonyum kil epoksi kompozitin, daha yüksek termal direnç özellikleri (>300°C) gösterdiğini belirtmişlerdir. Alkilfosfonyum kil epoksi kompozitin, daha önce rapor edilen değerden daha yüksek termal direnç özellikleri (400°C) gösterdiğini elde etmişlerdir. Ayrıca, karşılaştırma çalışmaları modifiye edilmiş sistemler içinde, HDTMA-BDGE sisteminin, malzemelerin geliştirilmiş sertlik ve tokluk özelliklerini teyit eden çekme, kırılma, darbe ve depolama modülü özellikleri açısından diğer sistemlere göre üstün özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir. HDTMA-TGDDM sistemin, t_g değeri ve nem direnci özellikleri açısından, diğer sistemlere göre daha üstün olsa da organokilin tetra işlevine karıştırıldığını belirten ilgili modifiye edilmemiş sisteme kıyasla kırılma tokluğunu, darbe dayanımını, depolama modülünü ve eğilme dayanımını düşürdüğünü elde etmişlerdir. Ayrıca HDTTP-BDGE sisteminin, modifiye edilmiş sistemler arasında en yüksek termal kararlılık özelliği ile üstün termal özellikler gösterdiğini, kil modifiyeli sistemler arasında ise HDTMA-BDGE üstün mekanik özellikler sergilediğini

belirtmişlerdir. Çalışmalarında, hazırlanan tüm numunelerden daha iyi mekanik ve termal özellikler sergilendiğini elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Ilyin vd., (2015), ağırlıkça %2 ve %5 doğal ve organomodifiye kil içeren epoksi oligomer-montmorillonit (MMT) nanokompozitlerinin, reolojik ve yapışkan özelliklerini incelemişlerdir. Epoksi-kil sistemlerinin homojenleştirilmesi için ultrasonik işlem uygulamışlar. Reolojik verilere göre, ultrasonik karıştırmanın, organo modifiye edilmiş MMT durumunda iyi dağılmış sistemlerin geliştirilmesine izin verdiğini, doğal kil ile kompozitlerin sonikasyonunun verimsiz ve zayıf dağılmış bir yapıya yol açtığını belirtmişlerdir. X-ışını verileri ile MMT interkalasyonunun göstergesi olan organo-modifiye MMT için katmanlar arası boşlukta (2 kata kadar) artış gösterdiğini elde etmişlerdir. Kil ilavesinin, kürlenmiş epoksi reçinenin kesme yapışma mukavemetinde %40-65 artışa yol açtığını belirtmişlerdir. Herhangi bir kilin ağırlıkça %2'si ile sistemin kesme yapışma mukavemeti üzerinde sonikasyonun etkisinin az olduğunu gördüğünü ve sistemlerin ağırlıkça %5 kil ile ultrasonla karıştırılmasının, organo modifiye MMT için daha yüksek yapışma değerleri ile sonuçlandığını belirtmişlerdir.

Sancaktar ve Kuznicki (2011), gözenekli taş (granit) substratlara epoksi bağlama alanında, epoksi-kil nanokompozitlerin rolünü incelemişlerdir. İki bisfenol A epoksi sistemi, epoksi reçinesindeki kil taktiodlarının (yüzlerce 8-10 mikrometrik partikülün üst üste gelmesiyle oluşan, tabakalı kil yapısı) araya girmesi ve dökülmesinde viskozitenin rolünü belirlemek için daha geniş bir epoksi sisteminden optimal yapışkan özelliklerini belirleyen önceki çalışmaya dayalı olarak seçim yaptıklarını belirtmişlerdir. Sistemler, karakterize edilmiş ve değişen seviyelerde interkalasyonlu ve pul pul dökülmüş organik kil taktiodlarında mekanik olarak test edilmişlerdir. Çalışmalarının ilk aşamasında, epoksi-kil sistemleri, kil katmanlarının katmanlar arası mesafelerini tespit etmek ve karıştırma prosedürlerinin gerçekten de kil katmanlarını yeterince dağıtıp pul pul dökmediğini belirlemek için geniş açılı X-ışını kırınımı (WAXD) ile karakterize edildiğini belirtmişler. Çalışmanın ikinci aşamasında, epoksi-nanokil sistemlerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kırılma davranışı, çentikli çift bindirme konfigürasyonunda granit taş substratlar kullanarak incelemişler. Çekme özelliklerini ise dökme çekme numuneleri kullanarak ölçmüşlerdir. Düşük viskoziteli

reçine sistemi için, mekanik özelliklerde en göze çarpan iyileştirmelerin maksimum gerilme, elastik modül ve akma gerilimi olduğunu elde etmişlerdir. Ağırlıkça %1 nanokil yüklemesinde artan tokluğun, kilin bu epoksi sisteminde bir toklaştırma maddesi olarak hareket edebileceğini ortaya çıkardığını belirtmişlerdir.

Dorigato ve Pegoretti (2012), yaptıkları çalışmada iki çeşit organo-modifiye (OM) killeri, çeşitli dolgu miktarlarında nanokompozit yapıştırıcıların hazırlanması için bir epoksi reçine içinde dağıtmışlardır. XRD testleri, kil hidrofilikliği ile interkalasyon derecesini artırarak, interkalasyonlu yapıların oluşumunu kanıtlamışlardır. Numunelerin orijinal şeffaflığının, ağırlıkça %3'lük bir dolgu içeriğine kadar korunduğunu ve daha sonra dolgu maddesi aglomerasyonu nedeniyle azaldığını belirtmişlerdir. Daha hidrofilik kil (30B) ile doldurulmuş nanokompozitlerin cam geçiş sıcaklığının, ağırlıkça %3'lük bir dolgu içeriğine kadar yükseldiğini elde etmişlerdir. Daha sonra azalmanın fiziksel zincir blokajının eşzamanlı-zıt etkileri ve çapraz bağlanma derecesinin azalması nedeniyle gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca elastik modül, kopma gerilimi ve kırılma tokluğunun, ağırlıkça %0,5-1'lik dolgu yüklemelerine kadar nanokil ilavesi ile önemli ölçüde iyileştirildiğini elde etmişlerdir. Çalışmalarında, daha yüksek konsantrasyonlar için kil nanoplateletlerin pozitif katkısı, matriste aglomere taktoidlerin mevcudiyeti ile dengelendiğini açıklamışlardır. Tek tesirli kompozit (epoksi/cam) yapıştırılmış derzler üzerindeki mekanik testlerde, ağırlıkça %1'lik bir optimal dolgu içeriği için kesme mukavemetinde yaklaşık %25'lik bir artış olduğunu kanıtlamışlardır. Bu nedenle, epoksi yapıştırıcılara uygun miktarda OM kili ilavesinin, yapıştırıcıyla birleştirilmiş kompozit yapıların kayma direncini iyileştirmenin etkili bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Nachikethas ve Manoj (2013) çalışmalarında, mekanik karıştırma ve ultrasonikasyon işlemi yoluyla farklı kil yüklemeleri (ağırlıkça %1, 3 ve 5) kullanarak, epoksi reçineli organo-modifiye Cloisite 93A nanokil takviyesinin kullanımını açıklamışlardır. Numuneler, üç noktalı eğilme mekanizmasında çekme, eğilme testleri, sertlik, darbe ve su emme testlerine tabi tutulmuşlardır. Ortaya çıkan mekanik özellikleri incelemek için Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi yapmışlar. Çalışmalarında, depolama modülü, kayıp modülü ve sönümlenme katsayısını incelemek için Dinamik Mekanik Analizini (DMA) yapmışlardır.

Garcia del Cid vd., (2014), çalışmalarında %0, 2, 4, 6, 10, ve 12 oranlarında epoksi içerisinde karıştırılmış nanokilin, epoksi bağlantılar için bindirme kesme mukavemetinde bir azalma gözlemlemişler. Epoksi reçineleri Cloisite 30B ve Nanomer I30E ile modifiye etmişler ve bağlantı hazırlığı için alüminyum şeritleri önce Scotch Brite aşındırma ile aşındırmışlar, ardından oda sıcaklığında metil etil keton (MEK) ile temizlemişler. Temizlenen substratları, daha sonra alkalın bir çözeltiye daldırarak ön işleme tabi tutmuşlar, ardından her işlemde sonra damıtılmış su içinde durulanan asit ferrik sülfat bazlı bir işlem yapmışlardır. Bindirme kesme testi sonuçları, kullanılan nanokil tipine bağlı olarak bindirme kesme kuvvetinde yaklaşık %10-20'lik bir azalma meydana geldiğini belirtmişler.

Khalili vd., (2010), çalışmalarında hem statik (çekme) hem de dinamik (darbe) yükler altında nanokil dolgulu epoksi yapıştırıcı tek bindirmeli bağlantıların mekanik özelliklerini karakterize etmeyi amaçlamışlardır. Nanokil oranlarını ağırlıkça %1, 3 ve %5 olarak, epoksi reçinesi ise Araldite LY5052 tipi olarak seçmişler. Nanokil parçacıklarını bir karıştırma cihazı ile epoksi reçinesi içinde dağıtmışlar ve daha sonra reçine ve kil parçacıklarının karışımı bir ultrasonikatör kullanarak sonikasyona tabi tutmuşlar. Cam/epoksi kompozit yapıştırıcıları imal etmişler ve epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların davranışlarını incelemek için kullanmışlar. Kompozit yapıştırılan yüzeyleri ASTM D2093'e göre hazırlamışlar. ASTM D3165'e göre, kesmedeki güçlendirilmiş yapıştırıcının özelliklerinin, tek bindirmeli bağlantı numunelerinin gerilim yüklemesiyle elde edildiğini belirtmişler. Ayrıca bağlantı bölgelerini, düzlem içi ve düzlem dışı Charpy darbe testlerine tabi tutmuşlar. Yazarlar, %1 nanokil partiküllü yapıştırıcı bağlantıların çekme yüklemesinde maksimum dayanıma sahip olduğunu ve en yüksek Charpy darbe enerjisi değerlerinin, %3 nanokil partikülleri ile doldurulmuş yapıştırıcılara sahip bağlantılardan elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Beesetty vd., (2020), çalışmalarında nanokili (NC), 3D yazıcılarda kullanılacak filamentin geliştirilmesi için nispeten ucuz, yaygın olarak tüketilen HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) ile harmanlamışlar. NC/HDPE karışımlarına, NC oranlarını % (0,5, 1, 2 ve 5) olarak almışlar ve eriyik akış indeksi (MFI) ölçümlerine tabi tutmuşlar.

MFI ölçümlerinin, NC yüklemeleri ile azaldığını göstermişler. NC/HDPE nanokompozit karışımlarını ayrıca tek vidalı bir ekstrüder kullanılarak ekstrüde etmişler. Geliştirilen nanokompozit filamentler, NC/HDPE nanokompozit, baskıların gerçekleştirilmesi için füzyonlu filament fabrikasyon (FFF) tabanlı 3D yazıcıya aktarmışlar. Filament ve basılı numunelerin termal çalışmasını, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) kullanarak gerçekleştirmişler. Yazarlar, NC ilavesinin, erime tepe sıcaklığında önemli bir değişiklik olmaksızın kristalliği ve kristalleşme sıcaklığını artırdığını belirtmişler. Filamentler ve baskılar üzerinde çekme testi yapmışlar, basılmış nanokompozitleri de eğilme testine tabi tutmuşlar. HDPE matrisinde NC ilavesi ile çekme modülünün ve filamentin mukavemetinin arttığını belirtmişler. Nano kompozit baskıların çekme ve eğilme özelliklerinin (modül ve mukavemet) NC içeriği ile arttığını belirtmişler.

Zare ve Rhee (2020), çalışmalarında, nanokompozitlerde polimer ve nanokil (Sc) arasındaki kritik arayüzey kesme modülünün, etkin interfaz özellikleri üzerindeki etkilerini vurgulamak için matematiksel olarak araştırmışlar. Ayrıca, kil boyutu, kil morfolojisi, interfaz özellikleri, “Sc” ve arayüzey kesme modülü (Si) dikkate alınarak, polimer kil nanokompozitlerinin çekme modülü için bir model geliştirmişler. Geliştirilen modelin tahminlerini, birkaç örnek için deneysel verilerle karşılaştırmışlar. Hesaplamalar ve deneysel değerler arasında, önerilen modelin doğruluğunu onaylayan iyi bir uyum olduğunu belirtmişler. İnce ve büyük kil ile birlikte zayıf bir “Sc” ve yüksek bir “Si”, interfaz bölgesinin verimliliği, nanokompozitlerin modülünü pozitif olarak kontrol edebildiğini açıklamışlar. Çalışmalarında; 1 nm'lik bir kil kalınlığı (t) ve 11 nm'lik kil uzunluğunun, polimer matrisinin modülünü %120 artırdığını, ancak $t > 4$ nm veya $t > 3$ nm ve $l < 4$ nm için sadece nanokompozit modülünde %10'luk bir iyileşme sağlandığını belirtmişlerdir.

Pal vd., (2020), sürdürülebilir bir PHBV/PBAT karışımının mekanik, termal ve bariyer özellikleri üzerinde organik olarak modifiye edilmiş nanokil (ağırlıkça %0,6, 1,2 ve %1,8) etkisini, iki farklı teknikle (sıkıştırma kalıplama ve dökme film ekstrüzyonu) işledikten sonra araştırmışlar. İlk olarak, eriyik ekstrüzyon kullanarak PBAT ile %20 nanokil karıştırarak, peletlenmiş bir nanokil masterbatch üretmişler. Masterbatchı, bir eriyik ekstrüzyon işlemi kullanarak nanokompozit peletlerin üretilmesi için

PHBV/PBAT karışım matrisi için bir takviye fazı olarak kullanmışlar. Hazırlanan PHBV/PBAT/Nanoclay nanokompozit peletler, sıkıştırma kalıplama ve dökme film ekstrüzyonu kullanarak filmleri imal etmek için kullanmışlar. Dökme ekstrüde edilmiş PHBV/PBAT nanokompozit filmlerin, yüksek hızlı gerdirme sırasında zincir oryantasyonu nedeniyle sıkıştırmayla kalıplanmış filmlere kıyasla daha iyi bariyer özellikleri (oksijen ve su buharı) gösterdiğini belirtmişler. Bariyer özellikleri sonuçlarının, ağırlıkça %1,2 nanokil ilave edildikten sonra döküm PHBV/PBAT kompozit filmlerinde oksijen ve su buharı geçirgenliğinde sırasıyla ~%79 ve ~%70'lik önemli bir gelişme gösterdiğini; bunun da nanokilin iyi bir dağılımını ve matris ile dolgu arasında güçlü bir ara yüzey yapışması oluşturduğunu belirtmişler. Ayrıca PHBV ve PBAT karışım matrisinin ara yüzünde nano kilin interkalasyonu/eksfoliasyonunu, transmision elektron mikroskobu (TEM) ile doğrulamışlar. Dökme PHBV/PBAT/Nanoclay (%1,2) nanokompozit filminin kopma uzaması %'si (567.6×0.1), sıkıştırma ile kalıplanmış filme kıyasla daha iyi stress transfer kabiliyeti nedeniyle PHBV/PBAT karışımıninkine kıyasla oldukça iyileştirildiğini belirtmişler. Reolojik özellikler ayrıca nano kilin daha iyi dağılmasını ve matris ile dolgu arasındaki etkileşimini desteklediğini, bu nedenle, %1,2 nanokil içeren dökme ekstrüde nanokompozit filmlerin, esnek paketlemede kullanılmak için potansiyel bir aday olduğunu belirtmişler.

Panda vd., (2020), ekstrüzyon bazlı 3D baskı için formüle edilmiş alkali aktive cüruf (AAS) bağlayıcıların özelliklerini araştırmışlar. AAS karışımlarının özelliklerini, nanokil (NC) ve çekirdeklenme tohumları kullanarak uyarlamışlar. AAS karışımlarına %0,4 NC eklenmesi ile bağlayıcının ekstrüde edilebilirliğini ve şekil doğruluğunu açıklayan flokülasyon etkisinden dolayı gelişmiş tiksotropik özelliklere yol açtığını belirtmişler. Bu karışım tasarımına; %2 hidromanyezit tohumlarının dahil edilmesinin, hidrat fazlarının artan çökmesi için ek çekirdeklenme bölgeleri sağlayarak daha yoğun mikro yapılara neden olduğunu göstermişler. Bunun hidrasyon reaksiyonunu ve büyük ölçekli 3D baskı için gerekli olan yapısal birikme oranını iyileştirdiğini belirtmişler. Çalışmada %0,4 NC ve %2 hidromanyezit tohumları içererek geliştirilen AAS karışımının, 3B baskı uygulamalarında kullanılabilirliğini göstermek için gerçek bir 3B yapının baskısında kullandıklarını belirtmişlerdir.

Gudapati vd., (2020), yaptıkları çalışmada yaban çimen ağacı elyaf takviyeli polyester kompozitlerin termal karakterizasyonunun %4 Nano kil ilavesiyle potansiyel olarak olağanüstü sonuçlar gösterdiklerini belirtmişler. Çeşitli termal özellikler test edilmiş ve pratik uygulamalara uygun olduğunu belirtmişler. Termal iletkenliği, değişen hacim oranı ve sıcaklık ile belirlemişler. Fiber içeriğinin artmasıyla kompozitin termal iletkenliğinin azaldığını ve sıcaklığa göre oldukça zıt bir eğilim gözlemlendiğini belirtmişler. Maksimum hacim fraksiyonunda yaban çimen ağacı elyaf takviyeli polyester kompozitin termal yayılımının, artan lif içeriği ve nano kil (MMT) ilavesiyle azaldığını açıklamışlar.

Kumar vd., (2020), AlMg4.5Mn takviyeli nanokil nanokompozitlerin oda sıcaklığında titreşim ve düşük hızlı darbe davranışını araştırmışlardır. Nanokilin homojen dağılımını sağlamak için farklı ağırlık yüzdesine (0, 1.5, 2.5%) sahip nanokil içeren kompozit numuneleri, sıvı halde sentez döküm tekniği kullanılarak üretilmişler. SEM ve EDS ile malzeme karakterizasyonu incelemişler. Çalışmada, nanokil ağırlık yüzdesine ilave olarak alüminyum alaşımı takviyeli nanokilin, sertlik değerinin arttığı belirtmişler. Nanokil takviyeli AlMg4.5Mn kompozitlerin darbeleri doğal frekanslarının, ağırlıkça %2,5 oranında nanokil eklenmesiyle arttığını belirtmişlerdir.

Sen vd., (2020), bu çalışmalarında ikili nanoparçacıkların dahil edilmesinin ve nanokil bileşiminin varyasyonunun, karbon nanotüp/nanokil parçacık takviyeli cam elyaf/epoksi kompozit laminatlarının, mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlar. 0.1 CNT- 0.1 NC-GE, 0.1 CNT-0.5 NC-GE, 0.1 CNT-1 NC-GE gibi nanokillere göre farklı kompozisyonlarda kompozit laminatlar üretmişler ve mekanik özellikleri değerlendirmişler. Bunlar ayrıca saf GE, 0.1 CNT-GE ve 0.5 NC-GE kompozit numunelerle karşılaştırmışlar. Eğilme testi, nanokil bileşiminin varyasyonunun, özelliklerde geniş bir varyasyona yol açtığını göstermişler. 0.1 CNT-0.5 NC-GE, saf GE kompozitine kıyasla eğilme mukavemetinde %17,9'luk artış ve eğilme modülünde %12,3'lük artış ile eğilme özelliğinde maksimum artışın gerçekleştiğini belirtmişler. 0.1 CNT-0.1 NC-GE ve 0.1 CNT 1 NC-GE'de ise eğilme özelliklerinde kayda değer bir gelişme elde edilmediğini belirtmişler. Ayrıca FESEM kullanılarak birincil başarısızlık modunu, bağlanma derecesini ve ikili nanodolguların

kırılma mekanizması üzerindeki etkisinin belirlenmesi için fraktografi çalışması yapmışlar.

Nayak vd., (2020), cam elyaf/epoksi kompozitlerde takviye edilmiş nanosilika ve nanokilin eğilme ve termal özellik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Nanosilika (ağırlıkça epoksinin %1'i) ve nanokil (ağırlıkça epoksinin %2'si) içeren modifiye epoksi, güçlendirilmiş cam elyafın mekanik karakterizasyonu, eğilme mukavemetini ve eğilme modülünü elde etmek için eğilme testi numuneleri hazırlamışlar ve karşılaştırmışlar. Cam geçiş sıcaklığındaki (T_g) değişikliği, diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) kullanarak ölçmüşler. Çalışmada, ağırlıkça %1 silika nanopartiküller ve ağırlıkça %2 nanokil ile epoksi karışımının, saf GE numuneleri ile karşılaştırıldığında, numunenin eğilme mukavemetinin iyileştiğini ancak T_g 'nin azaldığının görüldüğünü belirtmişler. Bu nedenle, matris modifikasyonunun, malzemenin eğilme özelliği için avantajlı olduğunu, ancak cam geçiş sıcaklığında bir azalma sağladığını belirtmişler.

Moyo vd., (2021), kil nanoparçacıkları katılmış kenaf fiber takviyeli polilaktik asit (PLA) biyokompozitlerinin, termo-mekanik özelliklerinin davranışını araştırmışlardır. Kenaf/PLA biyokompozitleri, reçine döküm yöntemi kullanarak üretmişler. İçerikleri, PLA'ya göre ağırlıkça %0, 3, 5 ve %7 oranlarında nanokil ilavesiyle elde etmişler. Termo mekanik özellikleri, termogravimetrik analizör (TGA) ve dinamik mekanik analiz (DMA) kullanarak araştırmışlar. TGA sonuçlarında, nanokillerin termal bariyer etkilerinden dolayı nanokil içeriği arttıkça biyokompozitlerin termal stabilitesinde bir gelişme olduğunu belirtmişler. DMA sonuçlarında, nanokil içeriğindeki ağırlıkça %5 nanokil yüklemesine kadar depolama ve kayıp modüllerinin arttığını ve ardından bir azalmanın gözlemlendiğini, tan deltanın ise nanokil içeriğindeki artışla kademeli olarak azaldığını elde etmişler. Nanokil oranının artmasının, biyokompozitlerin camı geçiş sıcaklığını azalttığını belirtmişlerdir. Bunun nedeninin, kristalliği geliştiren biyokompozit faz yapısına kendilerini infüze eden nanokillerden kaynaklandığını belirtmişlerdir. T_g 'nin ayrıca yüksek nanokil yüklemesinde aglomerasyon etkilerinden dolayı azaldığını, sonuç olarak, kenaf/PLA biyokompozitlerine kil nanoparçacıklarının infüzyonunun, biyokompozitlerin termo-mekanik özelliklerini

geliştirdiğini belirtmişler. Ayrıca çalışmada, ağırlıkça %5 nanokil yüklemesi ile optimum iyileştirmeler elde etmişlerdir.

Zawawi vd., (2021), polilaktit asit (PLA) ve polipropileni (PP), sabit bir PLA/PP oranı ile ağırlıkça %75 ila 25 arasında çift vidalı ekstrüder kullanarak harmanlamışlar. Polimer harmanlarına bir bağdaştırıcı olarak ağırlıkça %3 MAgPP ilave etmişler. Nanokompozitlerin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerini iyileştirmek için polimer karışımlarına ağırlıkça %1, 3, 5 ve 7 oranında montmorillonitin organonanokilleri (OMMT) eklemişler. Yazarlar, elde edilen polimer nanokompozitleri, evrensel test makinesi, izod darbe testi, termogravimetrik analizör (TGA) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak değerlendirmişler. Ağırlıkça %1 nanokil içeren nanokompozitlerden, 49.53 MPa ile en yüksek çekme mukavemeti sonuçları elde ettiklerini, izod darbe dayanımının, ağırlıkça %3 nanokil için %39,2'ye kadar arttığını tespit etmişler. Nanokil içermeyen PLA/PP harmanına kıyasla, ağırlıkça %1 nanokil ilave edildikten sonra çekme geriniminin yaklaşık %9,4 arttığını, genel çekme gerinimi sonuçlarından, nanokil içeriğinin ağırlıkça %3'ten %5'e ve ağırlıkça %7'ye yükseltilmesiyle hafif değişikliklerin gözlemlendiğini belirtmişlerdir. TGA sonuçlarından ise PLA/PP harmanına ağırlıkça %5 nanokil eklenmesiyle bozunma sıcaklığının iyileştiğini belirtmişlerdir. Gevrek kırılmış yüzeyin, ağırlıkça %5 nanokil kullanıldığında SEM analizi altında elde edildiğini, genel olarak, nanokil içeriği arttıkça mekanik özelliklerin azaldığını belirtmişler.

Sapiai vd., (2021); düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet gibi mükemmel özelliklerinden dolayı alternatif bir takviye malzemesi olarak doğal bir elyaf olmasından dolayı kenaf takviye elemanı olarak çalışmalarında kullanmışlar. Çalışmada, kenaf kompozitlerini cam elyafı ile hibridize ederek geliştirmişler ve mekanik özelliklerini geliştirmek için nanokil ile modifiye etmişlerdir. Dokuma tip cam elyafı, kenaf kompozitinin üstüne ve altına yerleştirmişler. Nanokil içeriğinin üç farklı yüzdesi, yani ağırlıkça %1, ağırlıkça %3 ve ağırlıkça %5, nanokil dolgulu Kenaf (KFRP) ve nanokil dolgulu hibrit Cam/Kenaf (GKFRP) kompozitlerini imal etmek için epoksi reçine ile modifiye etmişler. Kompozitleri, üç silindriği değirmen makinesi kullanarak, epoksiye nanokil dağıtarak hazırlamışlar, kenaf lifini ise filament sarma makinesi kullanarak sarmışlar. Cam elyafın hibridize edilmesinin ve KFRP

kompozitlerine nanokil eklenmesinin etkisini incelemek için boyuna ve enine elyaf yönünde eğilme testi ve çekme testi yapmışlar. Kenaf elyafının cam elyafı ile hibridizasyonunun, her iki elyaf yönünde bükülme ve çekme özelliklerini geliştirdiğini belirtmişlerdir. Ağırlıkça %1 ve ağırlıkça %3 nanokil ilavesi de KFRP kompozitlerinin çekme ve eğilme özelliklerini iyileştirdiğini ancak bununla birlikte, ağırlıkça %5 nanokil ilavesinin kompozitlerin mekanik performansını düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Muralishwara vd., (2021), çalışmalarında epoksi kil nanokompozit kaplamanın yüzey özelliklerini araştırmışlardır. Epoksi kil nanokompozit kaplamayı, yüzey sertliği, yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi ve topografyası açısından değerlendirmişlerdir. Nanokil epoksi kaplamanın sertliği üzerindeki etkileri ve giriş faktörleri etkisini değerlendirmelerinin yanı sıra sertliği optimize etmek için tüm faktörel dizaynları içeren 3 girdi faktöründen (nanokil yükleme, sonikasyon genliği ve sonikasyon süresi) ve bir çıkış tepkisini (sertlik) uygulamışlar. Tüm faktörler için üç seviye seçmişler ve bu nedenle yirmi yedi deneysel deneme yapmışlar. Her üç faktörden önemli sonuçlar elde edildiğini ancak nanokil yükleme ve sonikasyon süresinin katkısının, sonikasyon genliğine kıyasla çok yüksek olduğunu belirtmişler. Nanokil yüklemesinin sertlik üzerinde negatif etkiye sahipken diğer iki faktörün pozitif etkiye sahip olduğunu belirtmişler. Maksimum sertliğin, nanokil yüklemesi ağırlıkça %1, sonikasyon süresi 20 dakika ve sonikasyon genliği %100 olduğunda elde edildiğini belirtmişler. SEM ile kaplamanın morfolojisini, AFM ile topografisini değerlendirmişler. Tam faktöriyel deneyde minimum ve maksimum sertlik nedenleri SEM ve AFM görüntülerini kullanarak açıklamışlar. Ağırlıkça %1'lik nanokil yüklemesinde, daha küçük küme boyutu ile daha iyi nanokil dağılımı olduğunu gözlemlemişler. Nanokildeki artışın, küme boyutunu ve yüzey pürüzlülüğünü artırdığını ancak sertleşme etkisinin azalmasından dolayı kaplamanın sertliğini azalttığını belirtmişler.

Kundu vd., (2021), kemik dokusu mühendisliği uygulamaları için polikaprolakton (PCL), montmorillonit nanokil ve nano-hidroksiapatit-kil kullanılarak polimer kompozit fiberlerin yeni bir üretimini gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamlı araştırmalarında, kemik dokusu rejenerasyon uygulamaları için nano-hidroksiapatit-kil PCL kompozit liflerinin üretimi için yeni yöntemleri göstermişler. Basınçlı bir dönme düzeneği kullanarak, nano-hidroksiapatit-kil ve montmorillonit nanokil ile %2

w/w ve %5 w/w ile birleştirilmiş PCL fiberleri üretmişler. Ayrıca, hazırlanan lifler kullanılarak yapılan 3D yapı iskeleleri kemik büyümesini, hücre canlılığını ve proliferasyonunu artırdığını belirtmişler. Sonuçların, hazırlanan polimer elyaf yapı iskelelerinin biyouyumlu olduğunu, ECM oluşumunun ana bileşenleri olan kalsiyum birikimi ve kollajen oluşumunun da oluştuğunu gözlemlediklerini belirtmişler. Çalışmalarında, Nano-hidroksiapatit-kil ilavesinin, PCL fiber yapı iskelelerinde hücre canlılığını ve hücrelerin çoğalmasını artırdığı, ayrıca, hücre içi ALP seviyelerinin, PCL nano-hidroksiapatit-kil fiber iskelesi ile arttığını ve bunun da MSC'lerin osteojenik farklılaşmasını artırdığını belirtmişlerdir. Burada üretilen nano-hidroksiapatit-kil polimer liflerinin sıkıştırılmış peletlerinin, birleşme olmayan kemik kusurları için dolgu maddeleri olarak potansiyel uygulamalarda ve bunların kemik dokusu rejenerasyonunda birleşmeyen yapı iskelesi hazırlıkları için çimento olarak kullanılabileceğini belirtilmişler.

Chen vd., (2021), çalışmalarında farklı yapıları nanokillerin kullanıldığı bazalt elyaf takviyeli polimerlerin (BFRP'ler) mekanik özelliklerini deneysel ve hesaplamalı olarak araştırmışlar. Ayrıca çalışmalarında inorganik bazalt elyafın doğasında var olan zayıf arayüzey yapışma problemini çözmeyi de amaçlamışlar. Her ikisini de kaolin'in alt grubundan türetilen hal loysit nanotüp (HNT) ve nano kaolin, ayırt edici yapıları nedeniyle çalışmayı yürütmek için kullanmışlar. Birleştirilmiş nanokillerin yapıları ile ilgili olarak BFRP'lerin etkili modülünü tahmin etmek için, değiştirilmiş bir Eshelby-Mori-Tanaka mikromekanik modelini uygulamışlar. Hesaplamalı ve deneysel sonuçların, düzleştirilmiş bir nanokil yapısının veya daha büyük kesit görünüş oranının, modül iyileştirmesi için daha etkili olduğu yönünde eğilim gösterdiğini belirtmişler. Farklı yapılandırılmış nanokillerin dâhil edilmesinin, deneysel yaklaşımla BFRP'lerin katmanlar arası mukavemetini ve tokluğunu geliştirdiğini belirtmişler. Nanokillerin göreceli olarak yoğun ve düzgün dağılımını, kırık çift konsol giriş (DCB) numunelerinin katmanlar arası yüzeyinde gözlemlemişler ve çatlak yayılmasını engelleyen boru şekilli HNT'lerin köprüleme etkisinin, tabakalar arası özelliklerin iyileştirilmesinin mekanizması olduğunu belirtmişler.

Öner vd., (2018), çalışmalarında nanokil ilavesinin, hibrit karbon/fiberglas kompozit laminatların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Fiber takviyeli

polimer kompozitlerin üretimi sırasında, organo modifiye nanokil (ağırlıkça %0, %0,5, %0,75 ve nanokil takviyesinin %1.25'i) kullanmışlar. Ultrasonik karıştırıcı ile epoksi sistemini karıştırmışlar. Üretilen matrisi daha sonra elle yatırma yöntemini kullanılarak elyafların üzerine uygulamışlar. Nanokil içeriğinin, fabrikasyon hibrit karbon/fiberglas kompozitlerin çekme ve eğilme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için mekanik testler yapmışlar. Hibrit laminatların çekme mukavemetini, elastisite modülünü ve eğilme modülünü ölçmek için çekme ve üç nokta eğme testlerini sırasıyla ASTM D3039 ve ASTM D7264'e göre gerçekleştirmişler. Çalışmalarında deneysel sonuçların, hibrit karbon/fiberglas kompozitlerin çekme ve eğilme performansının nanokil içeriği ile değiştiğini belirtmişler.

Shettar vd., (2021), polyester-nanokil nanokompozitin, mekanik özelliklerini ve su alımı ve aşınma özelliklerini araştırmışlar. Araştırma sonucunda, ağırlıkça %2 ve %4 nanokil ilavesinin, topaklanma etkisinden dolayı saf polyestere kıyasla nanokompozitin toplam su alımını sırasıyla %11 ve %18 oranında azalttığını belirtmişler. Nanokilin ağırlıkça %2-%4 oranında katılmasının sırasıyla, saf polyestere göre çekme mukavemetini %14 ve %11 oranında ve eğilme mukavemetini ise %10 ve %5 oranında artırdığını tespit etmişler. SEM görüntülerinde ise düzgün polyesterin, çatlağın hızlı yayılmasını ve düşük kırılma tokluğunu gösteren daha pürüzsüz bir yüzey gösterdiğini elde etmişler. Öte yandan, nanokompozitlerin SEM mikrografının, önemli ölçüde daha pürüzlü bir kırılma yüzeyi ortaya çıkardığını, nanokompozitlerde ağırlıkça %2 nanokilin, çatlak yayılmasını geciktirdiği ve engellediğini belirtmişlerdir. Hava kabarcığı ve mikro boşlukların varlığını, ağırlıkça %4 nanokil ile nanokompozitin çekme mukavemetindeki azalmanın sebebi olarak açıklamışlar.

Awan vd., (2021), çalışmalarında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ikili ve üçlü kompozitleri, çeşitli endüstriyel uygulamalar için kaplanmış kalsiyum karbonat (CaCO₃) ve nanokil ile güçlendirmişler. Dolgu maddelerini, Brabender karıştırıcı kullanarak HDPE ile eriterek harmanlamışlar ve sıkıştırma kalıplama kullanarak örneklendirmişler. Dolgu maddelerinin çekme mukavemetine etkilerini, tokluk, darbe mukavemetini ve sertlikleri analiz etmişler ve hem ikili hem de üçlü kompozitlerde önemli gelişmeler elde etmişler. Çalışmada, üçlü nanokompozit için young modülünün %22,5'e kadar arttığını tespit etmişler. CaCO₃ ilavesi, üçlü kompozit ile

karşılaştırıldığında mekanik sonuçlarda önemli bir gelişme gösterdiğini belirtmişler. Çekme mukavemetinde %27,7, toklukta %118, darbe mukavemetinde %55,4 ve sertlikte %15 civarında artış elde ettiklerini, üçlü kompozitlerde ise rijitlik açısından daha umut verici sonuçlar tespit ettiklerini belirtmişler. Çalışmalarında teorik modellerde; Guth ve Halpin-Tsai mekanik özelliklerin tahmini için kullanmışlar ve hem ikili hem de üçlü kompozitler için iyileştirmenin sağlandığı belirtmişler.

Khan vd., (2010), çalışmalarında nanokil ilavesinin, yorulmadan sonra karbon fiber takviyeli kompozitlerin (CFRP'ler) döngüsel yorulma davranışı ve artık özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlar. %0, 3, 5 oranlarında nanokil kullanmışlar. Çekme-çekme döngüsel yorulma testlerini, S-N eğrisini oluşturmak için çeşitli yük seviyelerinde gerçekleştirmişler. Artık mukavemet ve modülünü, yorulma döngülerinin farklı aşamalarında ölçmüşler. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve taramalı akustik mikroskopi (SAM) yardımıyla altta yatan yorulma hasarı mekanizmalarını ve ilerleyici hasar büyümesini karakterize etmişler. Nanokilin CFRP kompozitlerine dâhil edilmesinin, sadece statik yüklemde kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmekle kalmadığını, aynı zamanda belirli bir döngüsel yük seviyesi için yorulma ömrünü ve belirli bir döngüsel yorulma periyodundan sonra kalan mekanik özellikleri de geliştirdiğini belirtmişler. Çalışmalarında ilgili yorulma hasarı alanının, nanokil nedeniyle önemli ölçüde azaldığını belirtmişler. Nanokilin, fiber/matris ara yüzey bağını geliştirerek ve nanokil ile indüklenen çukurların oluşumu yoluyla delaminasyon hasarı büyümesini ve nihai başarısızlığı bastırmaya ve geciktirmeye hizmet ettiğini belirtmişler.

Firdosh vd., (2015), nanokilin, vinilister/cam elyafı kompozitleri üzerinde 30°C, 50°C ve 60°C'de, yetmiş beş gün boyunca, %95 RH'de (bağıl nem) higrotermal yaşlandırmanın etkisini incelemişler. Çalışmalarında %0-5 oranlarında nanokil ilavesi kullanmışlar. Nem difüzyonu nedeniyle çekme mukavemetindeki bozulmayı tespit etmişler ve Arrhenius oran modeli kullanarak on yıla kadar uzun vadeli dayanıklılık tahmini yapmışlar. Deneysel ve analitik değerlendirmelere yaptıkları çalışmalarında, nanokilin vinilester içinde pul pul dökülmüş olarak tespit ettiklerini belirtmişler. Vinilestere ağırlıkça %4 oranında nanokil eklenmesinin, t_g 'yi %10 oranında artırdığını tespit etmişler. 60°C'de ve %95 RH'de higrotermik yaşlandırmada ise T_g 'de %6

oranında azalma olduğunu belirtmişler. Çalışmada, nanokil katkısının geçirgenlik ve nem difüzyonunu sırasıyla %11 ve %28 oranlarında azalttığını, doyma nemini ise %21 oranında artırdığını tespit ettiklerini belirtmişler.

Jeyakumar vd., (2021), çalışmalarında genel bir araştırma yapmışlar. Polimer nanokompozitlerin, çok çeşitli mühendislik endüstrilerinde olası uygulamaları nedeniyle modern çağda büyük bir gelişme gösterdiklerini, nano dolgu maddelerinin polimer matris ile kombinasyonlarının ise tek bir element kullanılarak mümkün olmayan mükemmel özelliklere sahip malzemeler sunduğunun belirgin olduğunu belirtmişler. Üretilen takviyeli kompozitlerin çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, darbe mukavemeti, mikro sertlik, tabakalar arası kesme mukavemeti ve basma mukavemeti, aşınma testi gibi mekanik özelliklerin tespiti için araştırma yapmışlar. Yapılan aşınma testinde, aşınma kaybının yük ve kayma hızı ile orantılı olarak arttığını kanıtlamışlar. Morfolojik davranışları değerlendirmek için ise nanokilin epoksi matrisi içinde homojen dağılımını görselleştirmek için taramalı elektron mikroskobu kullanılarak inceleme yapmışlar. Nano kilin homojen olarak dağıldığını, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile doğrulamışlar. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti ile çekme ve eğilme modülünün, nanokil artışı ile önemli ölçüde arttığını ve daha sonra nanokil ilavesi ile azaldığını belirtmişler. Nanokompozitlerin sertliği ve tabakalar arası kesme mukavemetinin, nanokilin takviye oranı arttıkça arttığını ve daha sonra oranın artmasıyla azaldığını belirtmişler.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler birden fazla şekilde tanımlanabilmektedir. En temelinde iki farklı malzemenin daha iyi özellikler sağlamak amacıyla, kimyasal bir reaksiyon göstermeksizin bir araya getirilmesinden oluşmaktadır. Temel yapı bileşenleri dolgu malzemesi olan matris ve dayanımı artıran takviye elemanı denilen fiber yapılarıdır. Kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere görece daha çok geliştirilmesine ve uygulama alanlarının artmasına; daha iyi mekanik dayanım, hafiflik, aşınma ve korozyon dayanımı, işlenebilirliği ve montaj kolaylığı, estetiklik, ısıl dayanım gibi başlıca özelliklerin iyileştirilmesi sebep olmaktadır.

3.1 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Kompozitler, ilk uygarlıkların ev sahipliği yapmaya başladıkları tarihten bugüne birçok gelişim göstermiş ve insanlık tarihi boyunca önemli bir rol üstlenmişlerdir. Kompozit malzemenin MÖ 3400'lü yıllarda Mezopotamyalılar tarafından kontrplak oluşturmak için ahşap şeritleri farklı açılarda birleştirerek kullanıldığı belirtilmektedir. MÖ 1200 civarında ise Mısırlılar ve Mezopotamyalılar çamur, çömlek, tekne kalıplarını güçlendirmek için saman kullanmaya başlayarak bilinen ilk kompozit olan kerpici üretmişlerdir. MS 1200 yıllarında Moğollar tarafından doğal çam reçinesi ile bağlanmış ahşap, kemik, sığır tendonları, boynuzlar, bambu ve ipek birleşiminden oluşan ilk kompozit yaylar icat edilmiştir (Kompozit Malzemelerin Tarihi, 2013).

1930'ların sonlarında, Owens-Illinois Glass Company, camı ince şeritler veya lifler halinde çekmek için bir proses geliştirmiştir ve bunları kumaş şeklinde örmeye başlamıştır. Bu yeni cam elyaflar, sentetik reçinelerle birleştiğinde, hafif ve dayanımı yüksek kompozitler üretilmesi açısından kompozit gelişiminde önemli bir başlangıç olmuştur. 2. Dünya savaşı sırasında savunma sanayisinde oluşan ihtiyaçlar kompozit malzemelerin geliştirmesinde de önemli olmuştur. Spruce Goose'da Howard Hughes, ince ahşap katmanlar ve plastik reçine kullanarak kompozit kanat direklerini üretmiştir; bu hem kanat ağırlığını azaltmıştır hem de hava şartlarına karşı dayanımını artırmıştır. Savaştan sonra sağladığı üstün özelliklerden dolayı kompozitlerin geliştirilmesi devam etmiştir. Özellikle otomotiv alanında olmak üzere tekneler, kamyonlar, spor arabalar, depolama tankları, borular, kanallar da kullanımı artmıştır. 1953 yılında, Chevrolet Corvette cam fiber gövde paneli üretmiş ve montajını sağlamıştır. Karbon fiberlerin kullanılması ise 1961 yılında patentinin alınması ile

yaygınlaşmıştır. Ticari olarak kullanılabilir olmasından sonra havacılık, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde yoğunlukla tercih edilmiştir. 1966'da kimyager Stephanie Kwolek, gelişmiş kompozitlerde kullanılacak, balistik ve delinmeye dayanıklı vücut zırhında kullanımı ile tanınan, para-aramid elyaf olan Kevlar'ı icat etmiştir. Kompozit kullanımının artması, kullanılan reçinelerin geliştirilmesini de sağlamıştır (Kompozitlerin Tarihi, 2015).

3.2 Kompozit Malzemelerin Avantajlı ve Dezavantajlı Özellikleri

Kompozit malzemeler sahip oldukları özgün yapılarından dolayı, diğer malzemelere göre ısı iletkenlik, alev geçirmezlik, yüksek kimyasal ve mekanik dayanımı gibi birçok avantajlı özellik sağlamaktadır. Başlıca avantajlı özellikleri şu şekilde sıralanmaktadır;

- ✓ Elektriksel iletim özelliği sağlaması
- ✓ Kolay şekillendirilebilmesi
- ✓ Titreşimi absorbe etmesi
- ✓ Düşük ısı geçirgenliği
- ✓ Yorulma dayanımının yüksek olması
- ✓ Yüksek mekanik dayanım sağlaması
- ✓ Kimyasal ve korozyon etkilerine karşı dayanıklı olması
- ✓ Bazı metallere göre daha fazla sertlik sağlaması
- ✓ Birleştirme işlemlerinin kolay olması
- ✓ Farklı renklere olanak sağlaması
- ✓ Darbeye karşı dirençli olmaları
- ✓ Özgül ağırlıklarının düşük olması
- ✓ Anizotropik olmalarından dolayı özelliklerinin yönlendirilebilmesi (Sayman, 2007)

Kompozit malzemelerin avantajlarının yanında bir takım dezavantajlı özellikleri de bulunmaktadır. Bu özellikler şu şekildedir;

- ✓ Sarf malzeme maliyetinin yüksek olması
- ✓ Analiz ve deneysel işlemlerinin pahalı olması
- ✓ Metal veya karbon ile temaslarında korozyona uğramaları
- ✓ Çok yüksek sıcaklıklarda bozunabilmeleri
- ✓ Birleştirme yöntemlerinin dayanımlarını düşürmesi
- ✓ Üretim süreci hatalarının, kullanım ömrünü düşürmesi

- ✓ Her numune için farklı özellik göstermesi
- ✓ Ultraviyole ışınlarından etkilenmesi (Sayman, 2007)

3.3 Kompozit Malzemelerde Sınıflandırma

Kompozit malzemelerde birden fazla sınıflandırma yöntemi bulunmaktadır. Fakat kendini oluşturan temel yapı bileşenlerinin türüne göre sınıflandırılması en yaygın kullanılan iki sınıflandırma biçimidir. Matris malzemesine göre sınıflandırılmasında matris türü belirleyici olurken, takviye malzemesine göre sınıflandırılmasında takviye malzemenin geometrisi belirleyici olmaktadır.

3.3.1 Matris malzemesine göre kompozit malzemeler

Matris malzemeleri metal, seramik, polimer, karbon/karbon, hibrit olarak çeşitlendirilmektedir. Polimer esaslı reçinelerden dolayı polimer matrisli kompozitler en yaygın kullanılan çeşit olmaktadır. Diğer çeşitler ise daha özel uygulamalar için tercih edilmektedir (Sepet, 2014).

3.3.1.1 Metal matrisli kompozitler (MMK)

Bu kompozitlerde ana bileşen matris, metal malzemedir. Takviye elemanı olarak genellikle seramik tercih edilmektedir. Alüminyum – Alüminyum alaşımları en yaygın kullanılan metal matris elemanlarıdır. Metal alaşımlarının birçoğu, bazı özellikleri sağlamasına rağmen kırılğan yapılarından kaynaklı yüksek sıcaklıklara dayanımları düşüktür. Fakat metalik fiber takviye ile metal matrisler ile üretilen kompozitler, yüksek dayanım göstermelerinin yanında büyük çalışma sıcaklığı aralığına sahiptirler. Takviye elemanı olarak wolfram molibden fiberler ile bakır-alüminyum matrisli metal kompozitlere iyi bir örnektir (Sayman, 2007).

3.3.1.2 Seramik matrisli kompozitler (SMK)

Seramik malzemeler daha çok düşük yoğunluk özellikleri nedeniyle ve yüzey dayanımlarının yüksek olması sebebiyle tercih edilmektedir. Özellikle yoğunluğu yüksek olan metal matrislere göre daha avantajlı sayılmakta ve yüksek çalışma sıcaklığı aralığı özelliğiyle de alternatif sağlamaktadır. Yoğunluklarının düşük olması aynı zamanda yüksek oksidasyon direnci kazandırmaktadır. Askeri materyaller ve uzay araçları öncelikli kullanım alanlarıdır (Kalemtaş, 2015).

3.3.1.3 Karbon matrisli kompozit malzemeler

Karbon-Karbon kompozitler üstün mekanik ve termal dayanım davranışları sergilemektedir. Bu kompozitler, seramik ve metal matrisli kompozitlere göre daha yüksek sıcaklıklara dayanabilmekte ve bu sıcaklıklarda mekanik dayanımlarında artmaktadır. MMK ve SMK'lara göre yoğunluklarının 1,6- 2,2 g/cm³ değerleri arasında olması bu kompozitlere üstün bir özellik sağlamaktadır. Düşük yoğunlukları sayesinde hava sanayisinde kullanılmalarına olanak sağlamaktadır. Karbon- Karbon kompozitler, yüksek tokluk ve yük altında düşük kırılma özelliğine sahip olmalarından kaynaklı, monolitik ve elyaf takviyeli kompozitler gibi kırılma davranış gösteren kompozitlere göre üstünlük sağlamaktadır (Sepet, 2014).

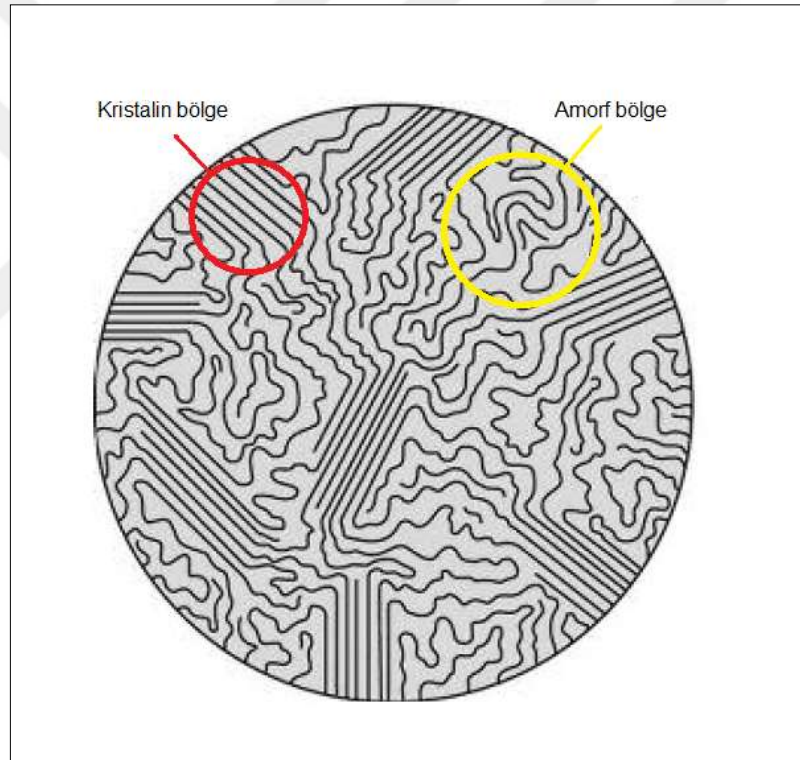
3.3.1.4 Hibrit kompozitler

Hibrit kompozitler, matris malzemesinin türünden bağımsız olarak adlandırılmaktadır. Bu kompozitler birden farklı kompozit türünün birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kâğıt petek, plastik köpüğü veya metalin cam elyaf takviyeli boruların arasına ince kabuklar halinde birleştirilmesiyle oluşturulan yapısal malzemeler hibrit kompozitlere örnektir. Uzay araç ve gereçlerinde hibrit kompozitler, karbon veya kevlar elyaf takviye edilerek, boru kırılma özelliğini iyileştirdiği için kullanılmaktadır (Sepet, 2014).

3.3.1.5 Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Polimer malzemeler, ciddi gelişmeler kaydederek yıllar içinde endüstri ve olağan hayatta sıklıkla kullanan malzemeler olmaktadır. Metal matrislere göre seramik matrisler gibi daha hafif ve yüksek mukavemetlidirler. İnsan dokuları ile gösterdikleri uyum bazı polimerlerin tıbbi alanlarda kullanılmasını ve geliştirilmesini sağlamaktadır. Biyouyumlu malzemelerde yoğunlukla farklı polimerler kullanılmaktadır. Biyopolimer olarak kolajen, polilaktik asit gibi türleri biyobozunurluk özelliklerinin yanında termal plastisitelerinden dolayı doku alanlarında kullanılmaktadır (Terzioğlu ve Kalemtaş, 2017). Organik ve inorganik bileşenler takviye malzemesi olarak bu kompozitlerde yaygın kullanılmaktadır. Katkısız kullanılan polimerlerin darbe ve çekme dayanımları ile elastik modülleri düşük olmaktadır. Uygun takviye elemanları ile bu özellikler iyileştirildiği gibi, yüksek kırılma, korozyon direnci, yüksek yorulma ve aşınma dayanımı gibi özellikleri de geliştirilmektedir (Ngo, 2020).

Polimer matrisli kompozitler genellikle termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Polimer molekülleri termoset polimerlerde güçlü kovalent bağlar ile çaprazlanmaktadır. Bundan dolayı termoset polimerler amorf yapıdadır ve bu yapıları sayesinde, termosetlerin, plastik deformasyona uğramaları zor olmaktadır. Termoplastiklerde ise moleküller hidrojen veya zayıf Van der Waals bağları oluşturmaktadır. Termoplastik polimerlerin şekillendirilebilir olması, bu zayıf bağların sıcaklık etkisiyle daha fazla zayıflamasından kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı termoplastikler camsı geçiş sıcaklıklarının üzerinde daha fazla şekillendirilmeye müsaittirler. Sürekli olarak ısıtma ve soğutma uygulamasına maruz kaldıklarında bozunmalar ve depolimerizasyonlar gerçekleşmektedir (Eker, 2008).



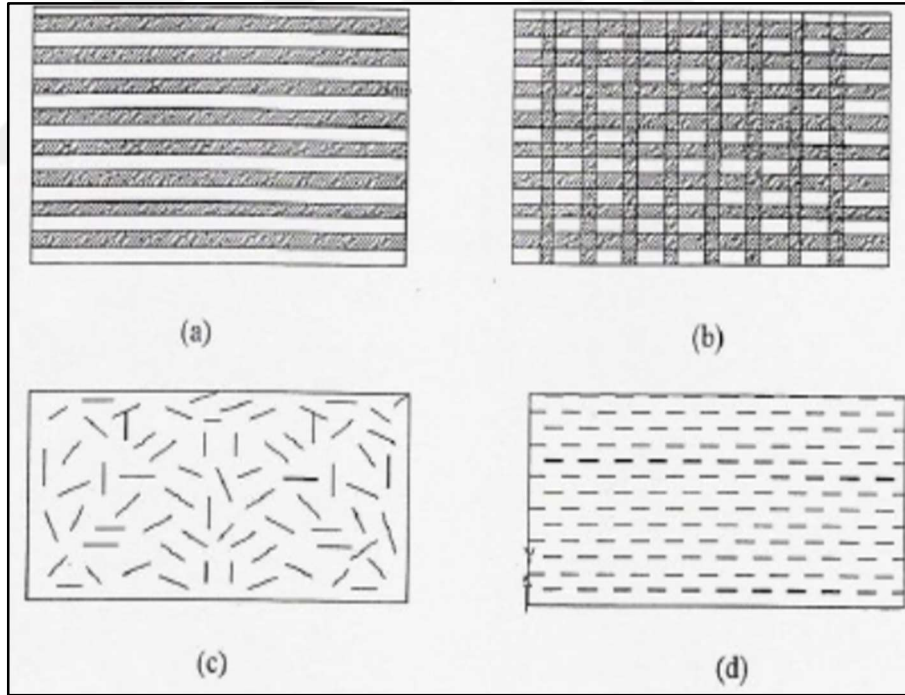
Şekil 3.1 Polimer yapıların amorf ve kristalin olarak gösterimi (Amorf Yapı, 2020).

Amorf plastikler kristalin plastiklere göre daha yumuşak, düşük erime noktalarına sahip ve çözücü/kimyasal dirençleri daha düşüktür. Amorf plastiklerin keskin bir erime noktası yoktur, geniş bir sıcaklık aralığında (doğrusal yumuşama) erimekte-dirler. Kristalin plastik ise düzenli atomik ve moleküler yapıdadır (Bkz. Şekil 3.1). Camsı geçiş sıcaklığının (t_g) geçilmesi ile amorf bölgelerde hareketlilik başlar ve belli bir sıcaklığı absorbe ettikleri zaman kristalin bölgeler dağılmaya başlar

dolayısıyla hızla viskoziteleri düşerek sıvılaşırlar. Genellikle erime ve camsı geçiş sıcaklığı, zincir uzunluğu, zincirler arası çekim kuvveti, moleküler rijitlik ve kristallik arttıkça artar. Termoset malzemeler için ise t_g , çaprazlanma yoğunluğu ile artmaktadır (Ngo, 2020).

3.3.2 Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler

Takviye elemanları kompozit malzemelerinin temel yapı bileşenlerinden bir tanesidir. Temel amacı kompozit birleşimine mekanik dayanım sağlayarak, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve rijitliği artırmaktır. Bunların yanında malzeme türüne bağlı olarak elektrik iletkenliğine veya yalıtkanlığına katkıda bulunur. Parçacıklar, levhalar ve fiberler gibi çeşitli türde takviye malzemeleri kullanılmaktadır (Ünal, 2016). Takviye elemanlarının yerleşimine ve şekillendirilmesine göre sınıflandırma yapılabilmektedir. Şekil 3.2’de farklı dağılımlara sahip takviye fiber elemanlarının çeşitleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Farklı tip fiberlerin gösterimi a) Sürekli tek yönlü b) Örgülü, c) Süreksiz, rastgele dağılmış, d) Süreksiz, yönlendirilmiş (Sayman, 2007)

Elyaf çeşitlerinden takviye malzemesi olarak kullanılan başlıca tipler boron, cam, karbon, aramid olarak sıralanabilmektedir. PMK’larda yoğunlukla kullanılan cam, karbon, aramid elyaf çeşitleri aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

3.3.2.1 Cam elyaf fiberler

Cam elyaflar saflık dereceleri yüksek olarak üretilmektedir. Kuartz camı gibi birçok çeşitleri bulunmaktadır ve polimerik yapıya sahiptirler. Üç boyutlu yapıya sahip silisyum ve oksijen (SiO_4) atomundan oluşmaktadır (Sayman, 2007). Cam elyaflar, elyaf takviyeli kompozitler için maliyetlerinin düşük olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Özgül ağırlığında sağladığı çekme mukavemeti, çelik malzemelere göre çok daha yüksektir. Kuvars, E-cam, S-cam, C-cam olmak üzere dört çeşit cam fiber, kompozit sektöründe kullanılmaktadır. Tablo 3.1’de bu çeşitlerin özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bu çeşitleri içerisinde E-cam fiberler kompozit malzeme üretiminde en çok tercih edilendir. E-cam fiberler diğerlerine göre düşük dayanımları ve az maliyetleri sayesinde bu tür özellik istenen alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. E-cam fibere göre dayanımı daha yüksek olan S-cam fiberler ikinci en çok kullanılan çeşittir. Aynı zamanda S-camlar yüksek sıcaklıkta bozunmayıp mekanik dayanımlarını korumaktadırlar (Ünal, 2016).

Tablo 3.1 Cam fiber çeşitlerinin bazı mekanik özellikleri (Ünal, 2016)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm^3)	Filaman çapı (μm)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
E-Cam	2,62	5-20	81	3450	4,9
S-Cam	2,50	5-10	89	4590	5,7
C-Cam	2,52	3,8-5	68,9	3310	4,8
Kuvars	2,20	10	74	6000	5,0

3.3.2.2 Karbon elyaf fiberler

Karbon fiberlerin temel öncüleri poliakrilonitril (PAN), zift, selüloz (Rayon), lignin ve polietilen gibi öncülerdir. Karbon fiberler, PAN polimer öncüsünün gerilmesi, erimiş ziftin eriyik eğrilmesi ve çekme gerilimi altında grafitleştirme yoluyla üretilmektedir. Düşük yoğunluklarına karşın yüksek mukavemet ve tokluk değerleri karbon elyafların en önemli mekanik özelliklerindedir. Aynı zamanda sürtünmeye karşı dirençleri, yorulma mukavemetleri ve nemden etkilenmemeleri geniş uygulanama alanları sağlamaktadır. Bundan kaynaklı otomotiv, askeri ve sivil uçak teknolojisinde geniş bir kullanım alanları vardır. Karbon elyaflar yaygın olarak epoksi

reçinelerde kullanılmakla birlikte magnezyum ve alüminyum gibi metal matrisleri kompozit üretiminde de kullanılmaktadır (Ngo, 2020).

3.3.2.3 Aramid fiberler

Ticari olarak kevlar olan bu elyafların, yüksek dayanım ve elastisite modülü, hafiflik, yüksek darbe dayanımı ve aşınma direnci, yüksek sürünme-kopma gibi üstün mekanik özellikleri bulunmaktadır. En yaygın kullanılan aramid fiber türü kevlar olmaktadır. Bu özellikleri geniş sıcaklık aralıklarında kimyasal ve mekanik bozunmaya uğramadan koruyabilen takviye malzemesidirler. Yüksek mekanik kabiliyetlerinden dolayı kurşungeçirmez yelekler, tekne, yelken ve tıbbi cihazlar gibi alanlarda kullanılmaktadır. Kevlar elyaflar, geometrik olarak kırılmış şekilde takviye edildiğinde düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet sergilemektedir (Ngo, 2020). Farklı derecelerde üç ana tipi olan kevlarların bazı mekanik özellikleri Tablo 3.2’te gösterilmektedir.

Tablo 3.2 Farklı derecedeki kevlarların özellikleri (Ngo, 2022)

Lif türü	E (GPa)	σ' (GPa)	ϵ' (%)
Kevlar 29	83	3.6	4.0
Kevlar 49	131	3.6	2.8
Kevlar 149	186	3.4	2.0

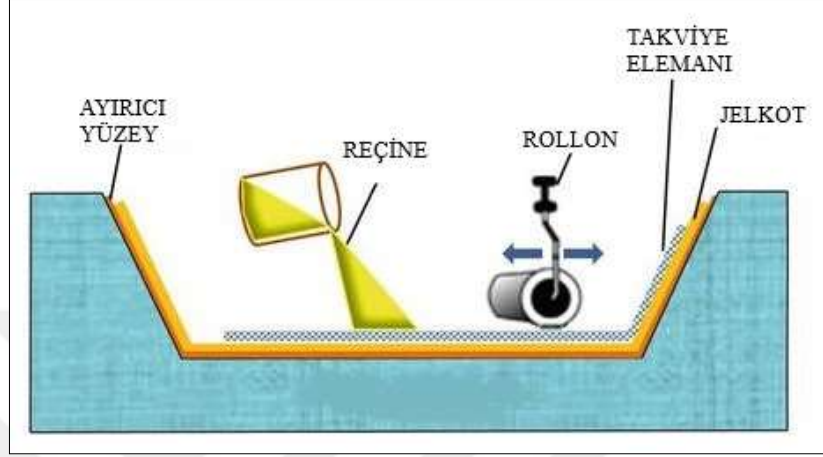
3.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretimi için çeşitli yöntemler vardır. Üretim yönteminin belirlenmesinde kullanım yeri, istenilen mekanik ve fiziksel özellikler, parça geometrisi, çalışma şartları, takviye ve matris malzemesinin özellikleri belirleyicidir.

3.4.1 Elle yatırma yöntemi

El yatırması, kompozit malzemelerin üretimi için açık temaslı bir kalıplama tekniğidir. Bu yöntem ile termoset reçine epoksi, polyester gibi termoset reçineler kullanılabilir. Cam, kevlar, karbon elyafların takviye malzemesi olarak kullanılmasına olanak sağlar. Reçine emdirilmesini zorlaştıracak ağır aramid liflerin kullanımına uygun değildir. Düşük maliyetlerinden dolayı çok yaygın kullanılan bir üretim tekniğidir. Her noktada aynı fiber hacimsel yoğunluğun sağlanması, hava

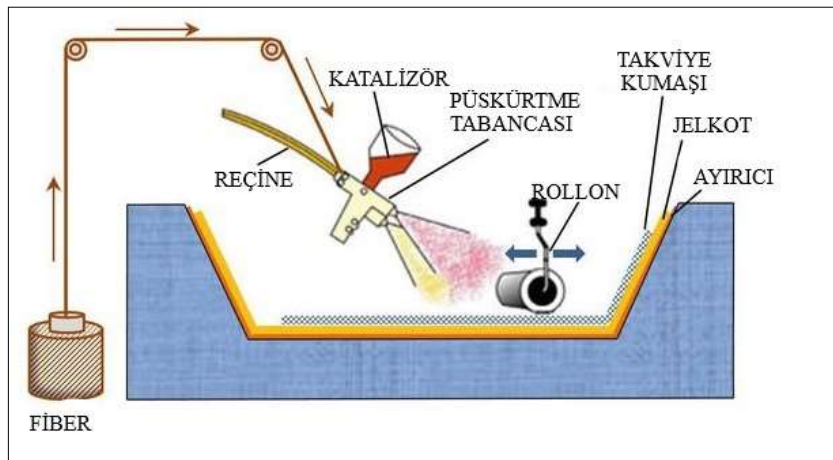
boşluklarının oluşmaması gibi nedenlerden dolayı yöntemi uygulayacak kişinin el becerisi hem önemlidir hem de bu üretim yönteminin önemli bir dezavantajıdır. Yoğunluğu ve viskozitesi düşük reçinelerin kullanılması gerekmektedir (Ngo, 2020). Şekil 3.3'te elle yatırma yönteminin uygulanması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.3 El yatırma yönteminin şematik gösterimi (Ngo, 2022)

3.4.2 Püskürtme yöntemi

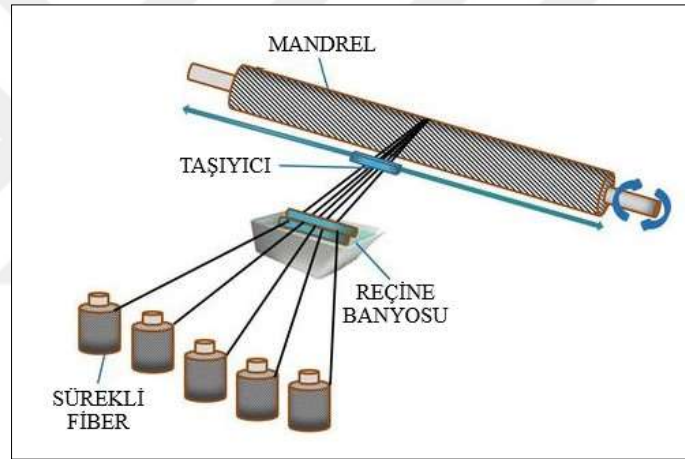
Bu yöntemde açık kalıp tekniklerinden biridir. Tabaka oryantasyonları ve kalınlıkları fiber-reçine oranına göre değişmektedir. Bu yöntem en fazla %35 fiber oranına sahip kompozitlerin üretilmesine olanak tanır. Elle yatırma yönteminin insan kaynaklı hatalarından ziyade bu yöntem stiren gazlarından dolayı daha sağlıklı çalışma ortamı oluşturmaktadır. Aynı zamanda maliyetlerin azalmasını sağladığından ekonomiktir. (Işık, 2008). Üretim yönteminin uygulanması Şekil 3.4'te belirtilmektedir.



Şekil 3.4 Püskürtme yönteminin şematik gösterimi (Ngo, 2022)

3.4.3 Elyaf sarma yöntemi

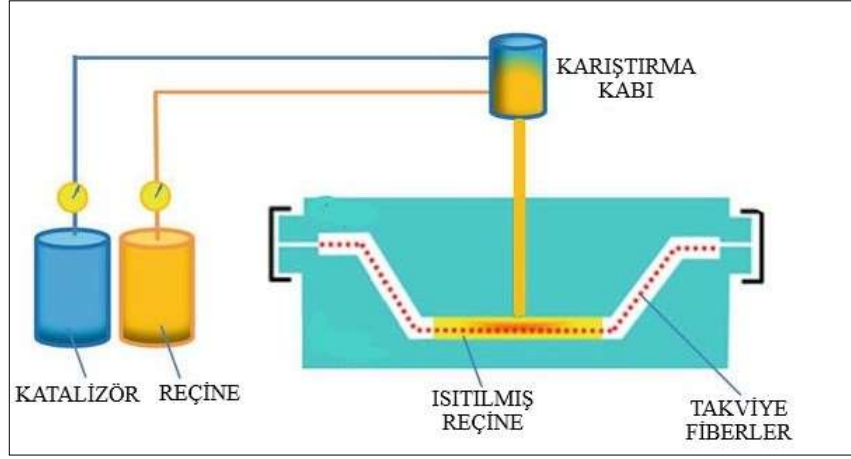
Bu yöntem açık kalıplamanın diğer tekniklerine göre nispeten düşük malzeme maliyetleri ile yüksek oranda otomatikleştirilebilen ve tekrarlanabilen sürekli bir imalat yöntemidir. Yöntem uygulanması yönünden elyafların ardışık sarılmasından ve sürekli olmasından dolayı fiberlere yüksek mukavemet sağlamaktadır. Birçok matris ve takviye elemanı çeşidinin kullanımına olanak sağlamaktadır. Hareket kabiliyeti sınırlı olduğundan tasarım çeşitliliğine cevap olamamaktadır. Şekil 3.5 elyaf sarma yönteminin şematik gösterimidir. Bu yöntemde kevlar, karbon ve cam lifleri kırılmış, sürekli, tek yönlü şeritler, keçeler ve sürekli tipler halinde elyaf sarma yönteminde kullanılabilir. Hibrit kompozit üretiminde bu yöntemin kullanılması yaygınlaşmaya başlamıştır (Işık, 2008).



Şekil 3.5 Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi (Ngo, 2022)

3.4.4 Reçine transfer yöntemi (RTM)

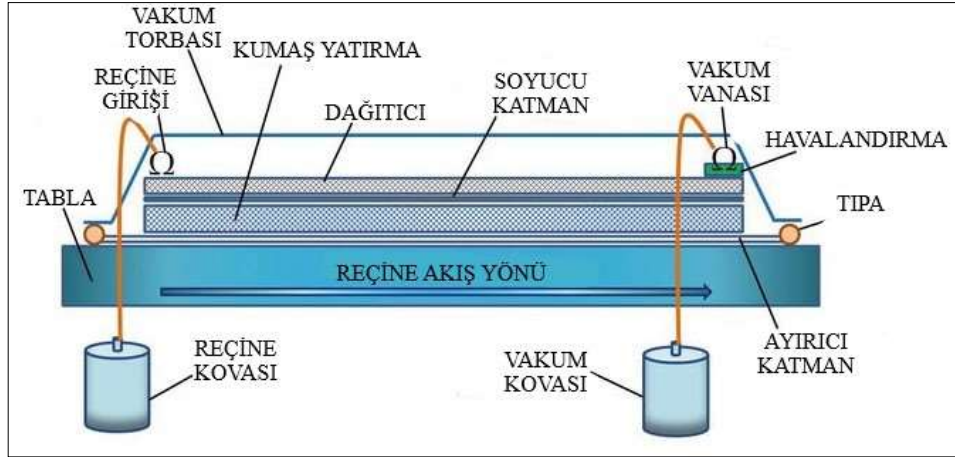
Kompozit malzemelerin üretiminde en sık kullanılan sıvı kalıplama tekniğidir. Kalıp yüzeylerinden birine veya ikisine birden jelkot uygulanabildiğinden her iki yüzeyi düzgün yapısal parçaların üretilmesini mümkün kılmaktadır (Işık, 2008). RTM yönteminde matris malzemesi olarak en çok kullanılan reçineler, epoksi ve doymamış polyesterlerdir. Kullanılacak takviye malzemesinin türünün seçilmesinde üretim parçasının hacmi belirleyicidir ve buna göre değişkenlik göstermektedir. Düşük hacimli uygulamalarda dokuma, örme ve keçe kumaş kullanılırken, yüksek hacimli uygulamalarda rastgele fiber taslaklar kullanılmaktadır. RTM yönteminde, karbon, aramid ve en çok da cam fiber kumaşlardan kompozit malzeme üretilmektedir (Ünal, 2016). RTM üretim süreci Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6 RTM yönteminin şematik gösterimi (Ngo, 2022)

3.4.5 Vakum torbası tekniği ile üretim

Şekil 3.7’de gösterildiği gibi, en hızlı büyüyen kalıplama teknolojisini temsil eden vakum destekli reçine transfer kalıplamadır. Bu yöntem ile RTM arasındaki fark, vakum tekniği ile reçinenin dağıtılmasıdır, RTM yöntemindeki gibi basınç altında pompalama kullanılmamaktadır. Vakum tekniğinde yüksek ısı veya basınç uygulanmamaktadır. Genellikle düşük maliyetli takımlarla çalışır ve büyük, karmaşık parçaların tek seferde ucuza üretilmesini mümkün kılmaktadır (Ngo, 2020).

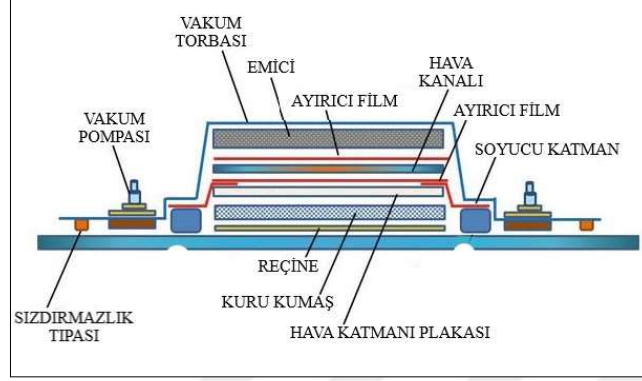


Şekil 3.7 Vakum tekniği ile üretim yönteminin şematik gösterimi (Ngo, 2022)

3.4.6 Reçine infüzyonu yöntemi

Reçine film infüzyonu yönteminde uygulanan ısı, vakum ve basınç altında reçineyi sıvılaştırarak ön kalıp tarafından çekilmektedir. Sertleştirici katılmış ya da yüksek viskoziteli reçineler, kısa akış mesafesinden dolayı bu yöntemde kullanılmaktadır. Otomatik kontroller ve düzeltmeye gerek kalmadan düşük hava boşluklarının

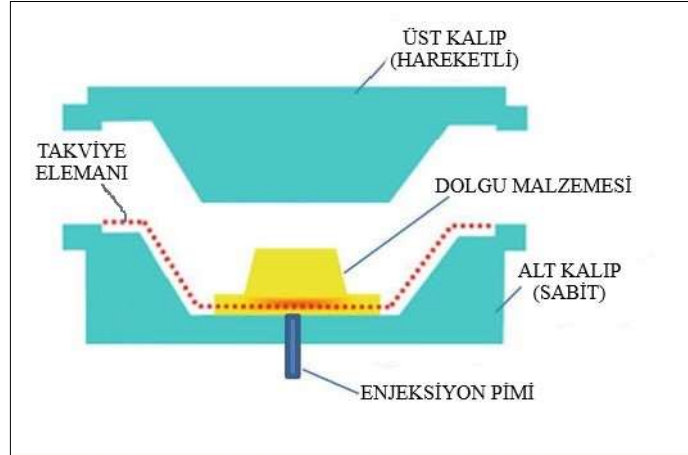
oluşmasını sağlar. Reçine infüzyonu, tekne yapımında önemli bir uygulama olmaktadır (Ngo, 2020). Şekil 3.8’de reçine film infüzyon işleminin şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Reçine film infüzyon işleminin şematik gösterimi (Ngo, 2022)

3.4.7 Baskı kalıplama yöntemi

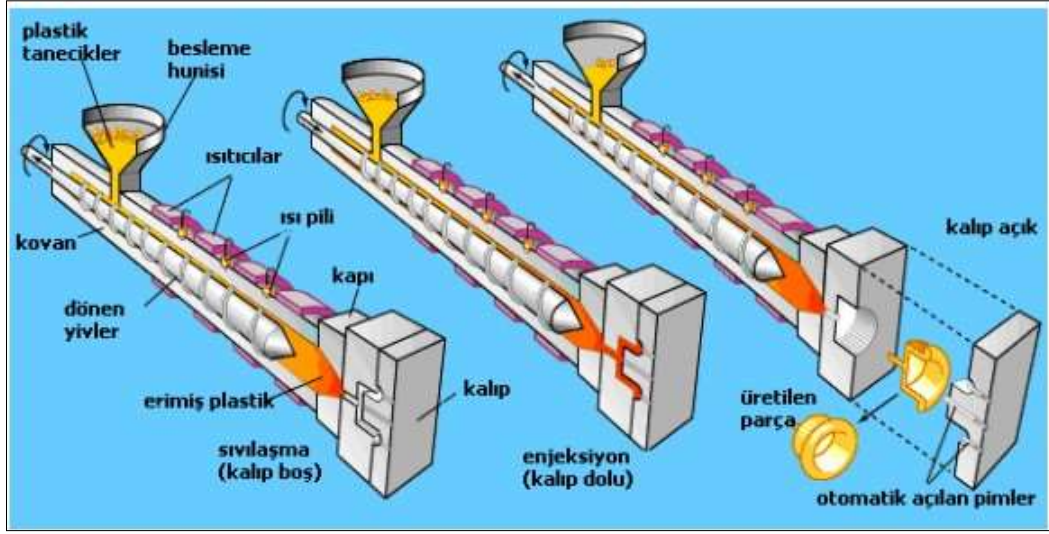
Baskı kalıplama, çok farklı hacimlerde yüksek kaliteli kompozit malzemeler üretmek için hassas ve hızlı bir işlem olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.9’da belirtilen şemada görüldüğü gibi malzeme manuel veya robotik olarak kalıba yerleştirilmektedir (Ngo, 2020).



Şekil 3.9 Baskı kalıplama işleminin şematik gösterimi (Ngo, 2022)

3.4.8 Enjeksiyon kalıplama yöntemi

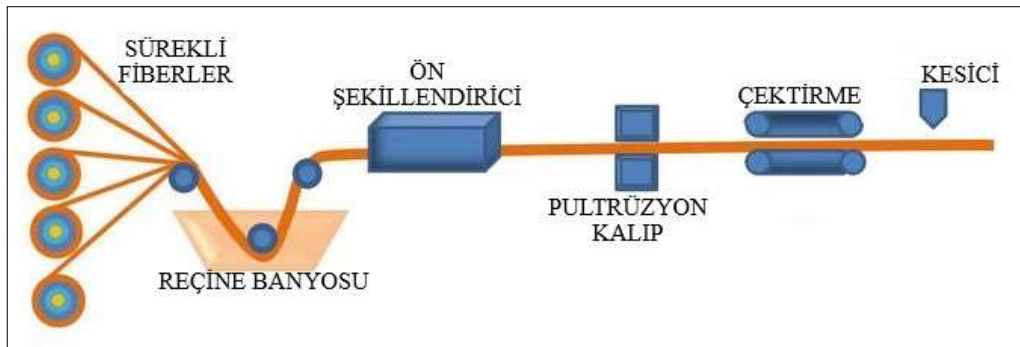
Bu yöntemle dolgu malzemesi olarak termoplastiklerin kullanımı yaygındır fakat termoset uygulamalarında iyi sonuçlar elde edilmektedir. Yöntem temel olarak, termoplastiklerin sıcaklık değişimi ile gösterdikleri yumuşama ve sertleşme özelliğine dayanmaktadır (Işık, 2008). Prosesin şekillendirilmiş hali Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Enjeksiyon kalıplama işleminin şematik gösterimi (Işık, 2008)

3.4.9 Profil çekme (pultrüzyon) yöntemi

Profil çekme yöntemi; sabit kesitlere sahip, sürekli uzunluklarda fiber takviyeli polimer yapıda kompozitler üretmek için kullanılmaktadır. Bu, yüksek oranda otomatikleştirilebilen sürekli bir üretim yöntemidir. Bu işlemde Şekil 3.11’de gösterildiği gibi sürekli kuru elyaf demeti, ısıtılmış bir reçine ıslatma istasyonundan çekilmektedir (Ngo, 2020). Pultrüzyon yöntemi ile nihai ürün boyutunun ya da uzunluğunun sınırlandırılmasına gerek kalmamaktadır. Elyafların çekme yönünde mukavemeti artarken, aksi yöndeki mukavemeti düşük kalmaktadır. Bu yöntem sayesinde bazı reçinelerin (fenolik gibi) üretilen kompozite duman yayılımını engelleme ve yüksek alevlenebilirlik dayanımı kazandırmaktadır. Epoksi reçinelerin ise ısı dirençlerini artırmakta ve mukavemet özelliklerinin iyileşmesinde etkili olmaktadır (Işık, 2008).



Şekil 3.11 Pultrüzyon yönteminin şeması (Ngo, 2022)

4. NANOKOMPOZİT MALZEMELER

4.1 Nano Teknoloji

Ünlü fizikçi Richard Feynman'ın 1959 yılında "En Altta Çok Yer Var" başlıklı konuşması ile birlikte sanayi teknolojileri devasa makineler ve yapılara alternatif olarak, atom molekülleri derecesinde yapıların geliştirilmesi başlanmıştır. Feynman'ın bu önerisi ile birlikte nanoteknoloji alanında muazzam ilerleme kaydedilmiştir. Nanoteknoloji akademide, endüstriyel sektöründe geniş ölçekte incelenmektedir (Edwards vd., 2017).

Genel bir söylem olarak nanoteknoloji, maddeyi oluşturan atom ve molekülleri 1-100 nm aralığındaki boyutsal seviyelerde inceleyerek, yeniden yapılandırma, şekillendirme ile atomların tekli veya toplu davranışlarını kontrol ederek farklı özellikler keşfetme bilimidir. Ortaya çıkan yeni ve mükemmel özelliklerle üretim ve sistemler geliştirilerek, nano boyutta gerçekleşen fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkileşimler izlenmektedir (Roco, 2017). Nanoteknoloji ulaşım, savunma, tıp, tarım ve enerji üretimi dâhil olmak üzere çok sayıda endüstri alanlarına finansal olarak da büyük bir etki yaratmaktadır.

4.2 Nano Partiküller

Nanopartiküller genellikle, en az bir boyutu 100 nm ve altında olan mikroskopik nesnelere adlandırılmaktadır (Guo vd., 2014). Yüzey alanlarının genişlemesi ile nano taneciklerin birbiriyle olan etkileşimleri farklılaşmaktadır. Nanotanecikler boyutları sayesinde daha kolay emildiklerinden dolayı daha üstün difüzyon ve hapsolme özelliklerine sahip olmalarının yanında daha üstün yapısal, ısı, elektromanyetik, optik ve mekanik özelliklere sahiptirler. Bu nedenle nano taneciklerin kullanıldığı malzemelerin ağırlığı, sertliği, mekanik, kimyasal ve ısı özellikleri değişebilmektedir. Nanopartiküller, dökme malzemeler ve moleküler (atomik) yapılar arasında bir geçiş sağlamaktadır. Dökme malzemelerin değişmeyen fiziksel özellikleri vardır, çünkü uzayda tek tek yönlendirilmiş ve tane sınırları boyunca birbirleriyle temas eden tane yapılarına sahiptirler. Ancak nanomalzemeler, tüm atomların kristal bir kafes içinde hareket ettiği tek bir taneden oluşmaktadır. Yüzey atomlarının yapısı, yüksek yüzey enerjileri, hacimsel tutunma gibi özellikleri sayesinde nanomalzemeler, mevcut dökme malzemelere kıyasla azaltılmış kusurları bulunmaktadır (Pradhan, 2013).

4.3 Nanokompozitlerin Tarihçesi

Nanokompozit malzemeler 1985 yılında Toyota'da polimer matrise nanokil ilavesiyle icat edilmiştir. Bu gelişim, polimer biliminin alanını, hazırlama, yapı ve arayüzler dâhil genişletmiş, otomotiv, elektrik ve gıda endüstrileri için yeni uygulamalara yol açmıştır. Nanokil katkılı nanokompozit parçaları ile üretilmiş binek otomobiller, bu keşiften dört yıl sonra ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. O zamandan beri, nanokompozitler hakkında dünya genelinde kapsamlı araştırmalar sanayi ve akademi alanlarında yürütülmektedir (Okada ve Usuki, 2006).

4.4 Nanokompozit Malzemeler

Nanokompozitlerde, geleneksel kompozitlere kıyasla işleme sırasında reolojik özelliklerdeki değişimi en aza indirecek düşük seviyelerde takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Ayrıca nanokompozitler geleneksel kompozit malzemelere göre çekme mukavemeti, elastik modülü gibi mekanik özelliklerde ve daha iyi bariyer özellikleri, azaltılmış alevlenebilirlik gibi fiziksel özelliklerde iyileşmeler sağlamaktadır (Bertolini ve Dufrense, 2009). Arayüz fazlarındaki etkileşimlerin doğası ve etkinliği, nanokompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerine etki eden ana parametredir. Hem ara yüzey bölgesi hem de partikül dağılımı, özellikle dolgu maddeleri ve takviyelerin geniş bir temas yüzey alanına sahip olması nanokompozit malzemelerin önemli bir ayrıcalığıdır. Güçlü bir arayüzün oluşması uygulanan bir yükün matristen takviyelere kolayca aktarılabilmesini sağlamaktadır (Bertolini ve Dufrense, 2009). Tablo 4.1'de bazı mikro ve nanomalzemeler için yüzey alanlarını karşılaştırması görülmektedir.

Tablo 4.1 Kullanılan bazı takviye ve dolgu malzemelerinin yüzey alanları (Bertolini ve Dufrense, 2009)

Katkı tipi	Yüzey Alanı (m ² /g)
Natural fibers	0.5
Glass fibers	1
Paper fibers	4
Cellulose nanofibrils	250
Graphite	25-300
Fumed silica	100-400
Exfoliated clays	500
Carbon nanotubes	300-1000

4.5 Nanokompozit Malzemelerin Avantajları

Genellikle oluşturdukları iyileştirilmiş arayüzeyler sayesinde kompozit endüstrisinde yer almasının yanında organik ve inorganik bileşenlerinin dolgu malzemelerinde uyumlaştırıcı özellikleriyle takviye edilmeleri birçok mekanik ve fiziksel özelliği iyileştirmektedir. Nanokompozitlerin belirgin avantajları aşağıda belirtilmektedir.

- ✓ Saf polimerlere göre bariyer özellikleri yüksektir
- ✓ Yüksek sıcaklık ve ısıya karşı dayanıklılık
- ✓ Termal ve genleşme katsayılarının düşük olması
- ✓ Bozunma sıcaklıklarının yüksek olması
- ✓ Gaz geçirgenliklerinin düşük olması
- ✓ Nanokil katkısının alev geciktiricilik özelliği
- ✓ Elektriksel ve iyonik iletkenliği geliştirmesi (Kim vd., 2002)

Polimer matrisinde inorganik nanopartiküllerin kullanılması, birçok endüstriyel alanda uygulama bulan yüksek performanslı yeni malzemeler sağlayabilmektedir. Fakat nanoteknolojideki gelişimin bir sonucu olarak, inorganik nanoyapılı malzemeler süper paramanyetizma, boyuta bağlı bant aralığı, ferromanyetizma, elektron ve fonon taşınımı gibi önemli ortak fiziksel fenomenlerle üretildiklerinden dolayı üretim giderleri yüksek olmaktadır. Yine nanopartiküllerin işlenmesi ve şekillendirilmesi gibi tedarik süreçleri dezavantajlı özelliklerinden sayılmaktadır (Li vd., 2010).

4.6 Nanokompozitlerin Sınıflandırılması

Nanokompozitlerin, kompozitlerde olduğu gibi matrisin kökeni, takviyelerin şekli ve boyutu, uygulama alanları gibi farklı başlıklarda sınıflandırma yöntemleri bulunmaktadır. Literatürde yaygın olarak matris malzemesine ve nanopartikül türüne göre sınıflandırma yapılmaktadır.

4.6.1 Seramik nanokompozit malzemeler

Nanokompozitlerin gelişmesinin akabinde üretilen selülozik nanokompozitler, alternatif ve doğaya duyarlı malzemeler olarak tanımlanan selülozik nanofibrillerin kullanılması ile üretilmektedir. Ahşap, tarımsal kalıntılar veya bakteriyel selüloz dahil olmak üzere farklı kaynaklardan üretilen selülozik fibrillerin sentez aşamaları bu nedenle dezavantajlı özelliklerindedir. Diğer yandan selülozik yüzeylerin çeşitli plastik malzemelerle uyumlu olmaması kullanım ve uygulama alanını sınırlandırmaktadır. Bu dezavantajlı durumların iyileştirilmesi sonucunda selülozik

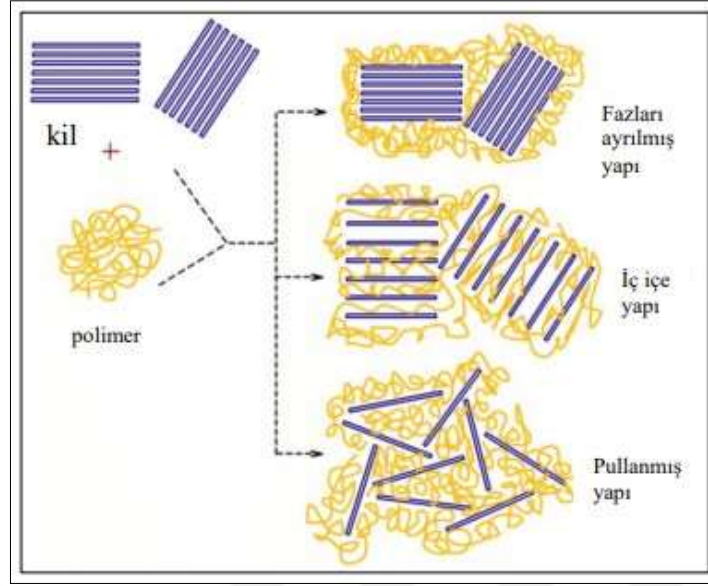
nano bileşenlerin çok çeşitli yüksek teknoloji uygulamalarında kullanım potansiyeli açığa çıkmaktadır (Hubbe vd., 2008). Üretilen bu kompozitlerin büyük bir çoğunluğu seramikler tarafından oluşturulmuş, oksit, bromür, nitrit ve silisitler tarafından desteklenmiştir. Birçok durumda alüminyum, magnezyum, titanyum, bakır ve süper alaşımlar gibi metaller ile çevrilmişlerdir. Bu kombinasyonlarla oluşturulmuş nanokompozitler, yüzey pürüzsüzlüğü, korozyon direnci yüksek ve diğer birçok koruyucu özelliği ile optik, elektriksel ve mekanik dayanımı oldukça fazla malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, selüloz nanokristallerinin yüksek erime sıcaklığı, termal geçiş özelliklerini olumlu yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda performans göstermesi gereken malzemelerin tasarımı için tercih sebebi olmaktadır (Kaştan, 2015).

4.6.2 Metalik nanokompozit malzemeler

Metal kolloidlerin dolgu malzemesine takviyesiyle metalik nanokompozitler üretilmektedir. Bu malzemelerin optik özellikleri önemli ölçüde iyileştiği görülmüştür. Örneğin cama metal nanoparçacıkların eklenmesiyle, ışığın emildiği ancak neredeyse dağılmadığı renkli malzemeler elde edilmiştir. Diğer yandan sıvılar içinde dağılmış, aurum potabile (içilebilir altın), olarak adlandırılan altın nanoparçacıkları hazırlanmıştır (Caseri, 2000). Genellikle polimer matrisle üretilen koloidal metal nanopartiküller, katalizör etkisi yapmaktadır. Bu etkiyle oluşan polimer hidrojel ağları, kataliz, fotonik, sensörler, elektronik, ilaç, biyotıp teknolojileri gibi alanlar için metalik nanokompozitleri kullanışlı hale getirmektedir (Tarnavchyk, 2009).

4.6.3 Polimer nanokompozit malzemeler

Modern nanokompozitler, yaklaşık olarak 1990'ların başında otomobil sanayisi araştırmacılarının, saf polimere göre boyutsal kararlılık, sertlik ve bozulma sıcaklığında önemli iyileştirmeler sergileyen nanoyapılı kil takviyelerini kullanarak kompozit (yani kil-polimer nanokompozitler) oluşturmasıyla gelişmeye başlamıştır (Bertolini ve Dufrense, 2009). Şekil 4.1'de nanokil ve polimer birleşiminden oluşan nanokompozit türlerinden bazıları gösterilmiştir.

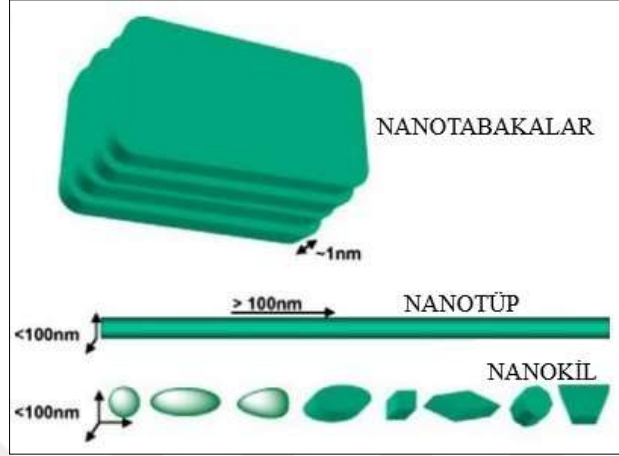


Şekil 4.1 Polimer ve nanokillerden oluşan farklı nanokompozit tipleri (Bertolini ve Dufrense, 2009)

İnorganik bir nanopartikül, yenilikçi nanokompozitlerin geliştirmesi için mükemmel destekleyici ve hızlandırıcı materyallerdir. İnorganik nanoparçacıkları ile polimerlerin yapı ve özellikleri birbirinden oldukça farklıdır. İnorganik nanoparçacıklar yüksek sertlik ve yüzey bağlanma enerjileri, yüksek ısı dayanımına sahipken, polimerler düşük özgül ağırlığa, yüksek dielektrik ve dayanıklılığa sahiptirler. Bu nedenle, inorganik nanopartiküllerin polimerler ile bir araya gelmesiyle kapsamlı ve büyük ölçüde iyileştirilmiş mekanik ve termal davranışlara sahip yeni nanokompozitlerin elde edilebilmektedir (Akçay, 2006). Aynı zamanda polimerler düşük maliyetle üretilen esnek ve hafif malzemelerdir. Ayrıca, kolay işlemeye izin verdikleri ve daldırılabilir kaplama, döndürmeli kaplama, film döküm ve baskı gibi çeşitli tekniklerle ince filmler halinde şekillendirilebildikleri bilinmektedir. Bu nedenle, inorganik nano yapı malzemelerin kullanılmasının sakıncaları (üretim masrafları, işleme zahmeti vb.), polimer matrisin işlenebilirliği kullanılarak aşılabilmektedir (Li vd., 2010). Polimer dolgululu nanokompozitleri üretmek amacıyla çeşitli üretim yöntemleri bulunmaktadır ve geliştirilmektedir. Bunlardan bazıları, yerinde polimerizasyon ve eriyik harmanlama yöntemidir. Bu yöntemler nanokompozitin amaçlanan, mekanik özellikleri, kullanım alanı ve üretim verimliliğine göre belirlenmektedir. Genelde eriyik harmanlama kullanılmaktadır. Önemli olan nano taneciklerin matris içinde düzenli ve homojen olarak dağılmış olmalarıdır (Şen vd., 2010).

4.7 Nanokompozit Malzemelerde Takviye Çeşitleri

Nano ölçekli parçacıklar nanopartiküller, nanotüpler ve boyutlarına bağlı olarak nano tabakalar şeklindedir (Bkz. Şekil 4.2).

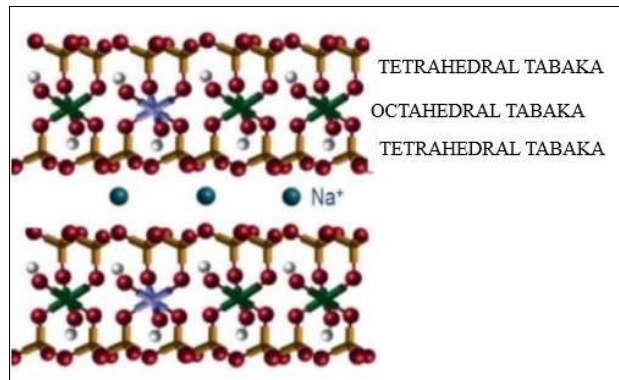


Şekil 4.2 Farklı nanoboyutlu nanopartiküller (Majeed vd., 2013)

İzotropik silika nanopartiküller, nano ölçekli aralıkta üç boyuta sahiptir; diğer yandan nanotüpler ve nanolifler nanoölçek aralığında iki boyuta sahipken, üçüncü boyut bu aralığın dışındadır. Bu nedenle fiber benzeri yapılar oluştururlar. Nanotüpler ve nanolifler arasındaki fark, nanotüplerin içi boşken, nanoliflerin doldurulmuş malzemeler olmasıdır (Majeed vd., 2013).

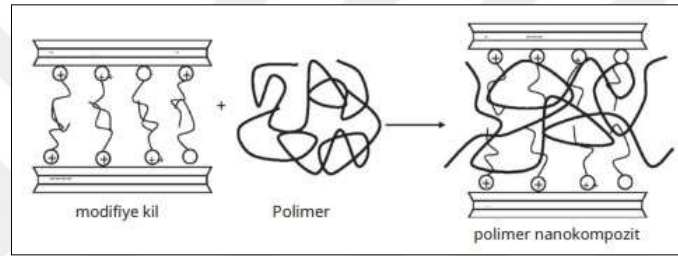
4.7.1 Nanokiller

Genellikle kullanılan nanokil, iki tetrahedral silika tabakasından oluşan montmorillonitlerdir (Bkz. Şekil 4.3). Montmorillonitler (MMT), doğada bulunmalarından kaynaklı en çok kullanılan nano boyutlu takviye elemanıdır (Majeed vd., 2013).



Şekil 4.3 Montmorillonit sodyum yapısı (Majeed vd., 2013)

MMT killer, kuvars, mika, feldispat ve zeolit gibi mineralleri de içeren bentonit mineral kilin ana bileşenidir; bentonit, kaynağına bağlı olarak taş ocakçılığı veya madencilik yoluyla elde edilmektedir (Armstrong, 2015). Nanokil molekülleri (monomer veya polimer), galeri tabakaları arasındaki bölgeye difüzyon sağlayarak, kil tabakaları arasındaki mesafeyi artırıp modifiye edilmelerini sağlamaktadır. Montmorillonit kil, bazı organik katyonlar sayesinde birçok farklı türde polimer matrisini uyumlaştırıcı ajan davranışı sergileyerek uyumlu hale getirebilmektedir. Killerdeki bu katyon değişim reaksiyonları, Şekil 4.4'te şematik olarak gösterildiği gibi, polimerlerle işlevsellik ve uyumluluk kazandırmak için çok önemlidir (Bertolini ve Dufrense, 2009).



Şekil 4.4 Katyon değişim reaksiyonu (Majeed vd., 2013)

Nanokiller polimerlerde değişik oranlarda kullanıldığında çekme dayanımını ve basınç, delinme dayanımını artırmaktadır (Okada ve Usuki, 2006). Polimerlerin ısıya dayanımını artırarak, alevlenme ısılarını yükseltmektedirler. Ayrıca plastik malzemelerin bünyesindeki zararlıları, nanokiller bünyelerinde toplayarak, plastiklerin kanserojen etkilerini azaltmakta ve UV ışınlarına karşı koruyucu etki sağlamaktadırlar. Bu nedenle paketleme sektöründe kullanılmaktadırlar (Kaştan, 2015; Majeed vd., 2013).

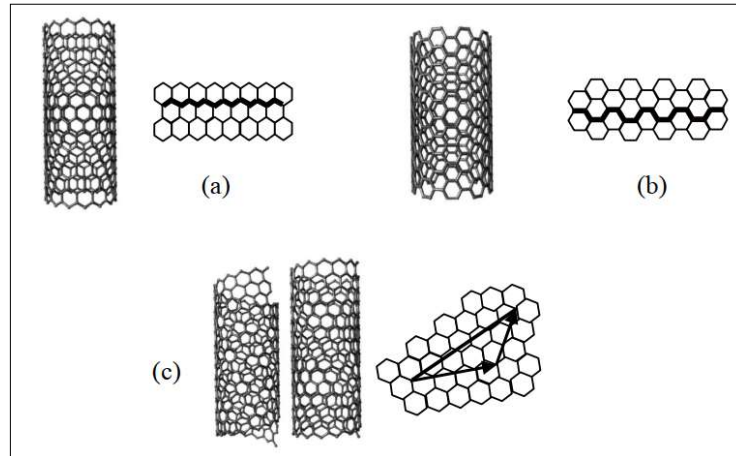
4.7.2 Nanolifler

0,5 mikronun altında lif çapına sahip lifler genellikle nanolif olarak kabul edilir. Kısa boya sahip nano liflerin molekül varyasyonları ve mekanik davranışları oldukça iyidir. Küçük lif çaplarından dolayı, birim yüzeydeki hacim ve kütle oranları yüksektir. Buzlanmayı engelleyen motor, yanmayı geciktirici kaplamalar, katı roket motor enjektörleri, iletken uzay yapışkanları, termo-oksidatif dayanıklı yapılar gibi farklı uzay uygulamaları için karbon nanolifler geliştirilmiştir (Arı, 2009). Nanolifler ile ilgili çalışmalar devam etmekle birlikte daha çok selülozik kaynaklı nanoliflerin geliştirilmesine odaklanılmaktadır. Selüloz nanoliflerin kullanımı birçok farklı alanda

artmakla birlikte özellikle takviye olarak nanokompozitlerin geliştirilmesinde kullanılması yönünden yüksek potansiyele sahiptir. Selüloz nanolifler, hücre duvarlarından basit mekanik yöntemlerle veya hem kimyasal hem de mekanik yöntemlerin bir kombinasyonu ile elde edilmektedir. Selüloz nanoliflerin kullanımı, biyobozunurlukları, yenilenebilirlikleri ve yüksek özgül mukavemet özellikleri nedeniyle araştırma konusu olmaktadır. Selüloz, düzenli bir moleküller arası ve moleküller arası hidrojen bağları ağı aracılığıyla, mikrofibriller adı verilen mükemmel stereo-düzenli konfigürasyonda organize edilir ve bunlar lifi oluşturmak için farklı seviyelerde toplanır. Çeşitli seviyelerdeki, özellikle de temel seviyedeki hidrojen bağları, bu lifleri mikrofibriller seviyelerinde tersine mühendislikle uygulamak için üstesinden gelinmesi gereken ana bağlayıcı kuvvettir (Janardhnan ve Sain, 2011).

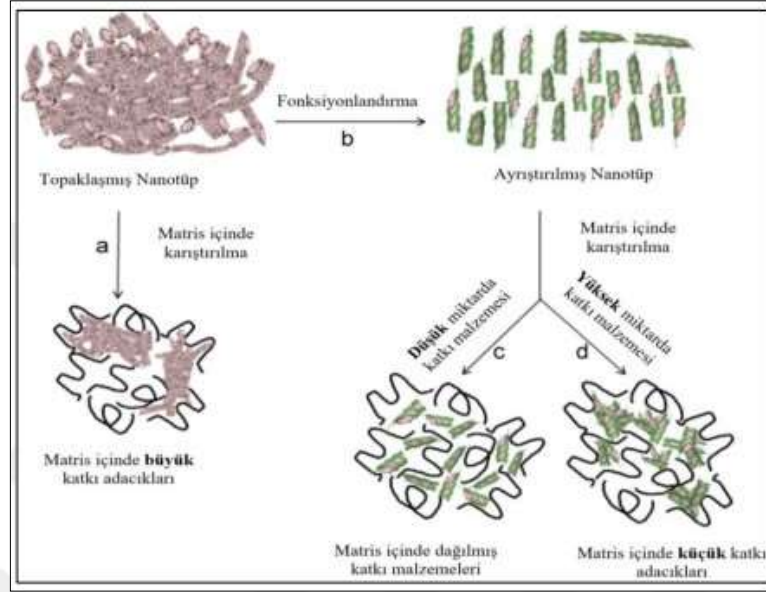
4.7.3 Nanotüpler

Nanotüp, çapları nano boyutta olan kalınlıkları çok düşük olan, tüp formundaki yapıların genel adlandırılmasıdır. En çok bilinen ve uygulaması yaygınlaşan nanotüp karbon nanotüplerdir. Karbon nanotüpler çapları 1-100 nm arasında değişen uzunluklarla milimetre mertebesindeki tüplerdir. Şekil 4.5'te farklı formlardaki nanotüp yapıları gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Farklı nanotüplerin formlarının gösterimi, a) Zikzak form, b) Koltuk form, c) Sarmal form

Karbon nanotüp tek sıra karbon atomundan oluşan örgü şeklindeki grafen katmanının yuvarlatılarak uçlarının birleştirildiği silindirik bir yapıdır (Armstrong, 2015). Şekil 4.6'te karbon nanotüplerin polimer matris içinde dağıtımını gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Karbon nanotüplerin polimerle birleşimi (Doğan, 2008)

Mükemmel mekanik özelliklere ve ısı iletkenliklerinden dolayı mukavemet istenen alanlarda kullanılırken, yüksek ısı iletkenliklerinden dolayı iletken malzemeler alanlarında da kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek etkili elektron yayıcısı özellikleri, nanotüplerin mikro elektronik vakumlarda kullanılmasını sağlamaktadır. Nano boyuttaki üretim teknolojileri için ağırlıklarına göre hidrojen depolama oranlarının yüksek olmasından dolayı tercih edilmektedirler (Akçay, 2006).

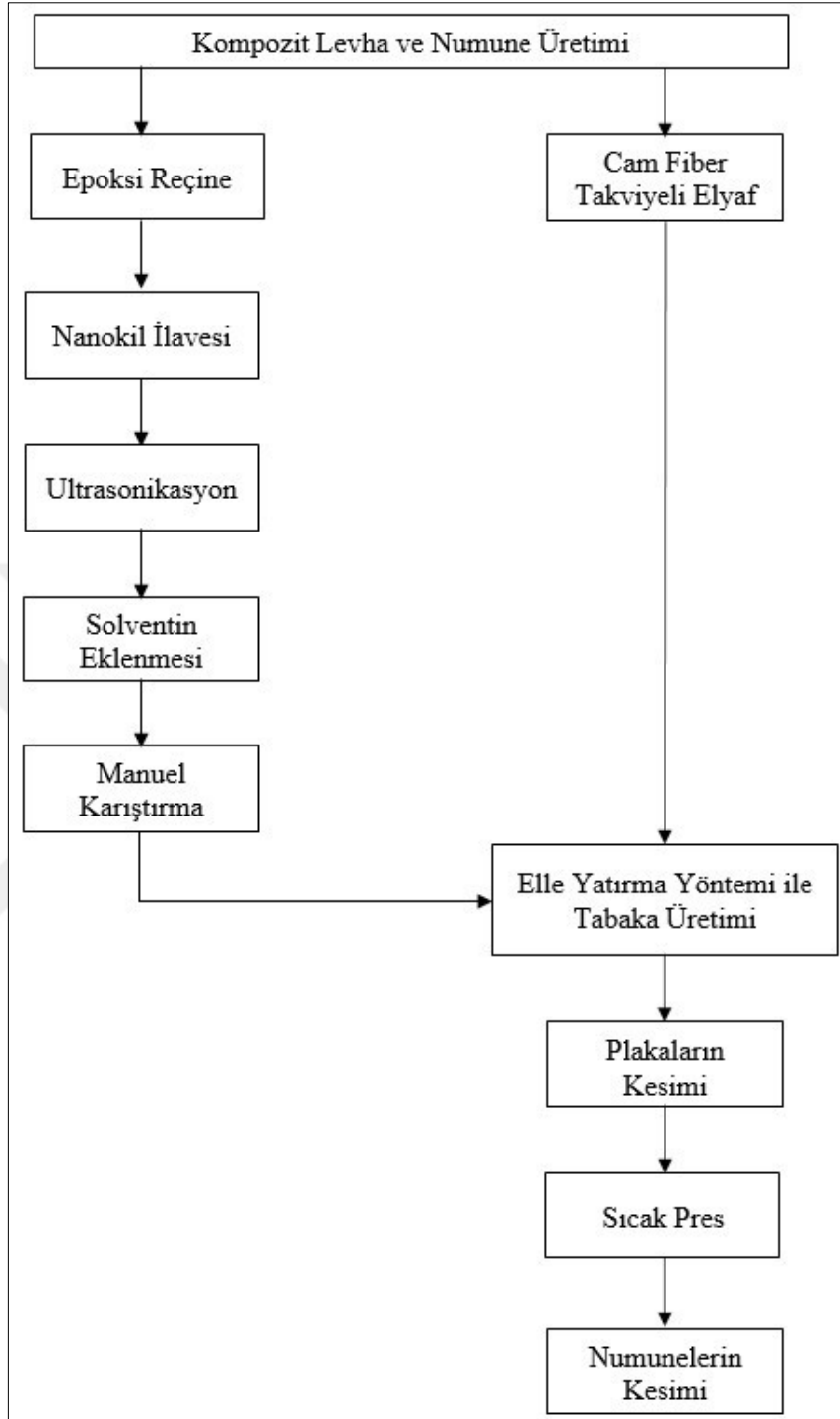
5. MATERYAL VE METOT

5.1 Kullanılan Malzemeler

Çalışmamızda cam fiber takviyeli epoksi kompozit levhalar kullanılmıştır. Kullanılan bu kompozitler levhaların üretimi Fibermak Composites firmasında yapılmıştır. Reçine ve cam fiber kumaşlar aynı firmadan tedarik edilmiştir. Epoksi reçineye, ağırlığınca %0,5, %1, %1,5 oranlarında nanokil katılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Reçine ve kompozit malzemeyi güçlendirmek, mekanik özelliklerini iyileştirmek bunun yanında reçine-fiber ara yüzeyini kuvvetlendirmek amacıyla nanokil katkı malzemesi kullanılmıştır. Nanokil ilavesi yapılmış kompozitler ile katkı malzemesi katılmamış katkısız (pure) kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve nanokilin mekanik davranışlara etkisi incelenmiştir. Aynı zamanda bu mekanik özelliklerin, kullanım alanlarına göre tercih sebebini oluşturmak, alternatifini geliştirmek üzere nanokil katkısının etkileri incelenmiştir. Referans numune olan, katkısız kompozitin üretimi de aynı firmada gerçekleştirilmiştir. Düz örgü tipinde (woven) cam (E-cam) kumaş fiber kullanılmıştır. Nanokil malzemesi Esan1-140 ürünü olup, ESAN Eczacıbaşı firmasından temin elde edilmiş ve kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Tablo 5.1’de belirtilmiştir. Üretimin şematik gösterimi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Kullanılan malzemelerin özellikleri

Malzeme Türü				
Türü	Reçine	Sertleştirici	Fiber	Nanokil
Ticari Adı	F-1564	F-3487	-	Esan 1-140
Fiziksel Özelliği	1,15 gr/cm ³	1 gr/cm ³	200 gr/cm ³	<20 µm



Şekil 5.1 Numune üretiminin şematik gösterimi

5.2 Plakaların Üretimi

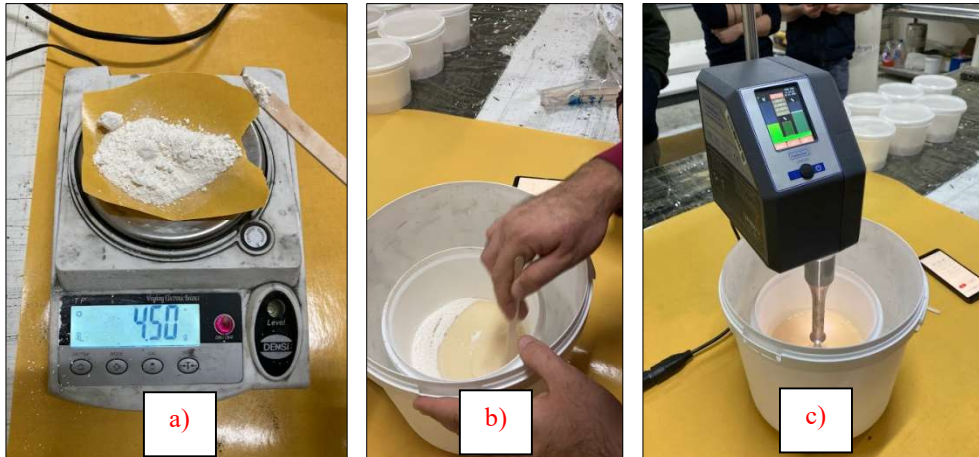
5.2.1 Matris malzemesinin hazırlanışı

Epoksi reçineye takviye edilecek katkı malzemesi; reçine ağırlığına göre hesaplanarak elde edilmiştir. Epoksi reçineye (450 gr) ağırlıkça sırasıyla %0,5, %1, %1,5 oranlarında nanokil ilave edilmiştir. Tablo 5.2’de belirlenen bu oranlara denk gelen nanokil miktarları belirtilmiştir.

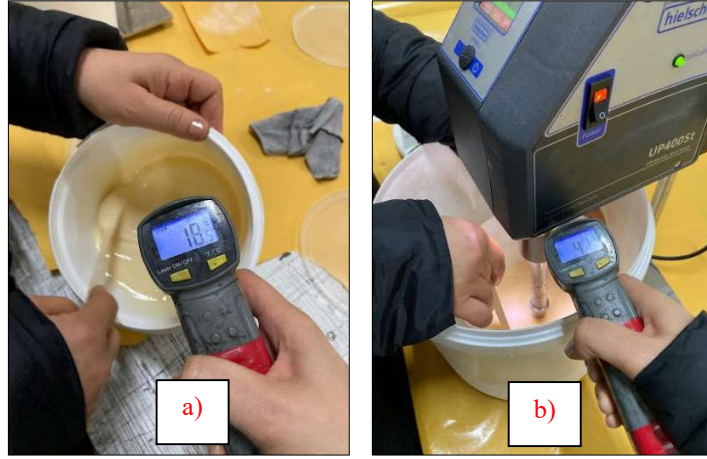
Tablo 5.2 Katkı oranına göre malzeme miktarları

Ağırlıkça oran (%)	0,5	1	1,5
Katkı türü			
Epoksi Reçine	450 gr		
Solvent (Sertleştirici)	135 gr		
Nanokil	2,25 gr	4,5 gr	6,75 gr

Özellikle nanokil partiküllerinin topaklanmaya eğilimli davranış göstermesinden dolayı karışımın homojen olması büyük önem taşımaktadır. Montmorillonit killerin tabakalı yapısından dolayı yüzeyler arası bağlanma mesafeleri, doğru bir birleştirmeye homojen bir yapıya dönüştürülebilmektedir (Bertolini ve Dufrense 2009). Takviye katkı malzemelerinin miktarı hassas terazi ile tartılmıştır (Bkz. Şekil 5.2a). Reçineye ilk olarak eklenen nanokil, öncelikle nanokil partiküllerinin topaklanmasını için manuel olarak tahta bir çubuk yardımıyla karıştırılmıştır (Bkz. Şekil 5.2b). Nanokilin reçine yüzeyinden kaybolması görüldükten sonra ultrasonik karıştırıcıya alınmıştır (Bkz. Şekil 5.2c).

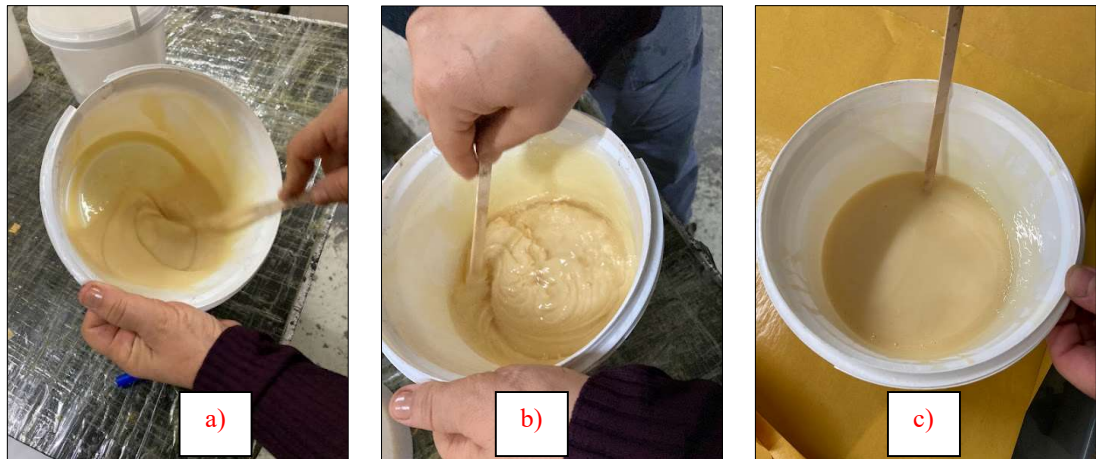


Şekil 5.2 Katkı malzemesi olarak nanokilin reçineye karıştırılması, a) Nanokil gramajının ayarlanması, b) Epoksi reçineye katılıp ön karıştırma yapılması, c) Karışımın ultrasonik karıştırıcıya alınması



Şekil 5.4 Karışım sıcaklığının ölçülmesi, a) Sonikasyon öncesi, b) Sonikasyon sonrası

Sonikasyon probu, karışım kabını aşındırmaması için tabanından iki veya üç santimetre yukarıya konumlandırılmış ve sonikasyon sırasında da sabit tutulmuştur. Karışımın sonikasyon periyodu üç dakika bir dakika ara verilerek yapılmıştır. Bir dakikalık bu ara esnasında karışım manuel olarak karıştırılmıştır (Bkz. Şekil 5.5a). Reçineye ağırlıkça %0,5 ve %1 takviye oranlarında nanokil ilave edilen karışımlar 30 dakika, %1,5 takviye oranındaki karışım ise 40 dakika karıştırılmıştır. Karışım tamamlandıktan sonra reçinenin akışkanlığı ve rengi kontrol edilmiştir. Reçine ağırlığının %30'u kadar (135 gr) sertleştirici olarak solvent eklenmiştir (Bkz. Şekil 5.5b). Bu işlemden sonra karışım manuel olarak tahta çubuk yardımıyla beş dakika daha karıştırılmıştır (Bkz. Şekil 5.5c).



Şekil 5.5 Karışımın tamamlanması, a) Sonikasyon sonrası akışkanlığın kontrolü, b) Sertleştiricinin eklenmesi, c) Son olarak reçinenin manuel karıştırılması

Nano parçacık miktarı arttıkça karışım süresi artmıştır. Bu nedenle %1,5 takviye oranındaki katkılı reçineler daha uzun sonikasyona maruz kalmıştır. Her oran için bu karışımlar iki kez hazırlanmıştır.

5.2.2 Takviye malzemesinin hazırlanışı

Takviye malzemesi olarak woven cam elyaf takviyeli fiber kumaş kullanılmıştır. Levhalar, 8 tabakalı ve kalınlığı 2,5 mm olacak şekilde elde edilmiştir. Hazırlanan epoksi reçine karışımı 1 m² için yeterli olacağından, her bir plaka için cam elyaf fiberler iki adet 1 x 1 m² şeklinde rulodan kesilmiştir (Bkz. Şekil 5.6a ve 5.6b). E-cam kumaşlar, düz örgü biçiminde 0° ve 90° fiber takviye yönüne sahiptir (Bkz. Şekil 5.6c).



Şekil 5.6 Fiber kumaşın seçimi, a) Rulodan kumaşın kesilmesi, b) Kumaş geometrisi, c) Örgü tipi

Hazırlanmış olan reçine cam-elyaf fiber kumaşın üzerine dökülmüştür. Şekil 5.7a’da görüldüğü gibi takviye yönünde reçine gezdirilerek, kumaş yüzeyinin tamamına reçine dağıtılmıştır. Elle yatırma yöntemi uygulanarak, ıspatula yardımıyla kumaşın reçineyi emmesi ve hava boşluklarının oluşmaması sağlanmıştır (Bkz. Şekil 5.7b).



Şekil 5.7 Elle yatırma yöntemi ile kompozitin üretimi, a) Reçinenin kumaşa dökülmesi, b) Reçinenin kumaşa emdirilmesi

Daha sonra kumaşlar oranlarına göre etiketlenerek Şekil 5.8’de gösterildiği gibi, kuruması için bir hafta bekletilmiştir.



Şekil 5.8 Reçine emdirilmiş takviye malzemesinin kurumaya bırakılması

5.2.3 Plakaların üretimi

Bu çalışma için 500x500 mm² boyutunda plakalardan sekiz tabakalı kompozit üretimi yapılmıştır. Şekil 5.9a'da görüldüğü gibi kurumuş olan 1 m²'lik kumaşlar önce dört eşit parçaya bölünmüştür. Daha sonra reçine emdirilmiş bu dört kumaş birleştirilerek dört tabaka elde edilmiştir (Bkz. Şekil 5.9b). İki kumaşın kesilmesinden elde edilen parçalar birleştirilerek sekiz tabaka elde edilmiştir (Bkz. Şekil 5.9c).



Şekil 5.9 Tabakaların üretimi, a) Kumaşın uygun ölçülerde kesimi, b) Kesilen parçaların birleştirilmesi, c) Birleştirilen tabakaların son hali

Birleştirilen tabakalar preslenmeden önce yanmaz jelatin ile kaplanmıştır. Bu aynı zamanda preslenmesi esnasında eriyen dolgu malzemesinin dışarıya akmasını da

engellemektedir. Kaplanan plakalara katkı oranları yazılarak tekrar etiketleme yapılmıştır (Bkz. Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Üretilen tabakaların sıcak pres için yanmaz jelatinle kaplanması

Presleme işlemi plakanın kürleşmesini ve dolgu malzemesinin tabaka yüzeylerine eşit dağılımı sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Hidrolik pres ünitesine alınan plakalar ayrı ayrı numune kalınlığı ayarlanarak preslenmiştir (Bkz. Şekil 5.11a ve 5.11b). Plaklara oda sıcaklığından 115°C'ye kadar kademeli olarak basınç uygulanmıştır. Reçinenin 100 °C'de akmaya başlaması görüldükten sonra basınç 200 bar'a yükseltilerek, ısıtıcı kapatılmış, bir saat bekletilmiştir (Bkz. Şekil 5.11c ve 5.11d). Bu işlem sırasında ünite 10 dakikada bir kontrol edilmiş ve basıncın 200 bar'ın altına düşmemesi sağlanmıştır (Bkz. Şekil 5.11e).



Şekil 5.11 Plaklara sıcak pres uygulanması, a) Birleştirilen tabakaların prese yerleştirilmesi, b) Kalınlık plakasının yerleştirilmesi, c) Sıcak presin uygulanması, d) Kontrol paneli, e) Manometre

Kürleşmesi sağlanan plakalar, çarpılma olmaması için pres ile birlikte soğumaya bırakılmıştır. Sıcaklık göstergesinden bir saat sonunda derece kontrol edilmiş ve 45°C'nin altında ise presten çıkarılmıştır.

5.3 Numunelerin Boyutlandırılması

Üretimi yapılan nanokil katkılı tabakalı kompozit plakaları bilgisayar destekli lazer kesim cnc tezgahı yardımıyla numune boyutlarına göre kesilmiştir (Bkz. Şekil 5.12). Numune boyutları; çekme, basma, kayma testi, dinamik mekanik analizlerinde kullanılan standart ölçülerine göre belirlenmiştir.

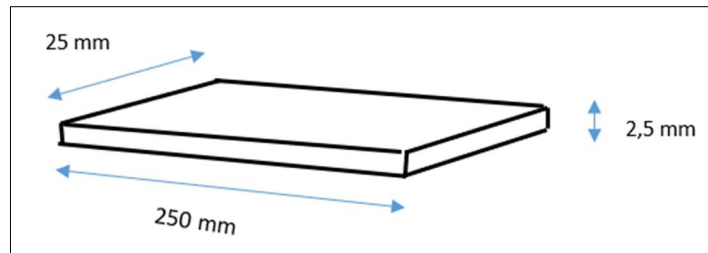


Şekil 5.12 Numunelerin boyutlandırılması

5.4 Mekanik Deneyler

5.4.1 Çekme deneyi

Çekme testi, kompozit malzemelerde statik yükleme koşulları altında mekanik özelliklerin belirlenerek, malzemenin özelliklerine göre sınıflandırmak amacıyla uygulanan mekanik bir deneydir. Bu nedenle hazırlanan numuneler ilk olarak çekme testine tabi tutulmuştur. %0,5, %1 ve %1,5 oranında nanokil katkılı ve katkısız olarak hazırlanan kompozitlerden her test için üçer adet numune hazırlanmıştır. Üretilen plakalardan, ASTM 3039-17 standardına uygun 250 mm boy, 25 mm genişlik ve 2,5 mm kalınlığındaki numuneler kesilmiştir. Numune geometrisi Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13 Çekme testi numunesinin geometrisi

DeneYler, Şekil 5.14'te gösterilen Dicle Üniversitesi, Merkezi labaratuvarında bulunan Instron marka BS 8801 tipindeki 100 kN kapasiteli cihazda gerçekleştirilmiştir. Numunelerin çekme testi için ASTM 3039-17 standardı referans alınmıştır. ASTM 3039-17 standardında belirtildiği gibi çekme deneyleri 1 mm/dk hızında yapılmıştır.



Şekil 5.14 Instron marka test cihazı ve çekme testinin yapılışı

Çekme deneyi verileri ile bir malzemenin çekme gerilmesini bulmak için Denklem 5.1 kullanılmaktadır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

Burada;

“ σ ” çekme gerilimini; “ F ” maksimum kuvveti; “ A ” ise kesit alanını tanımlamaktadır.

Gerinim değeri ise Denklem 5.2 ile tespit edilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{(l-l_0)}{l_0} \quad (5.2)$$

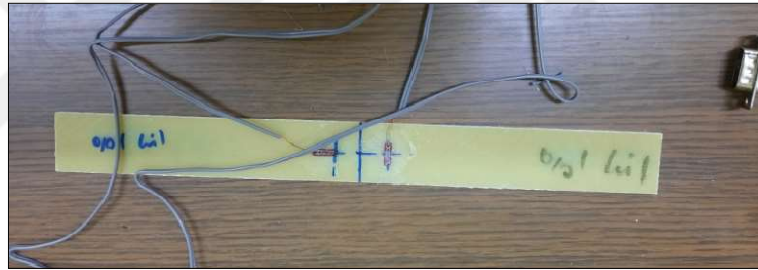
Burada;

“ ε ” gerinimi; “ l_0 ” numunenin deneyden önceki boyunu; “ l ” ise deney sonrasındaki boyunu ifade etmektedir.

Numunelerin şekil değişimini ölçmek için strain gauge kullanılmıştır. Ve deneyler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Poisson oranı için; enine ve elastisite modülü için, boyuna olmak üzere iki adet strain-gauge bağlantısı yapılmıştır. Şekil 5.15'te görüldüğü gibi strain-gauge faktörü 2.11 olan bağlantı tipi kullanılmıştır. Strain-gaugeler yapıştırılmadan önce numune yüzeyi temizlenmiştir. Pattex marka hızlı yüzey yapıştırıcısı ile strain-gauge rozetleri numune yüzeyine yapıştırılmıştır (Bkz. Şekil 5.16).



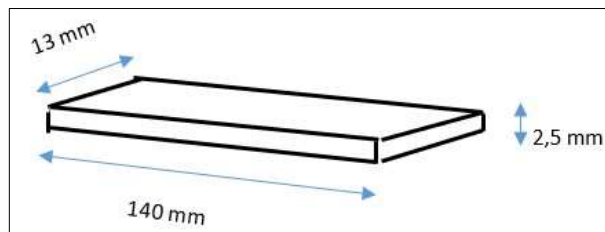
Şekil 5.15 Kullanılan strain-gauge özellikleri



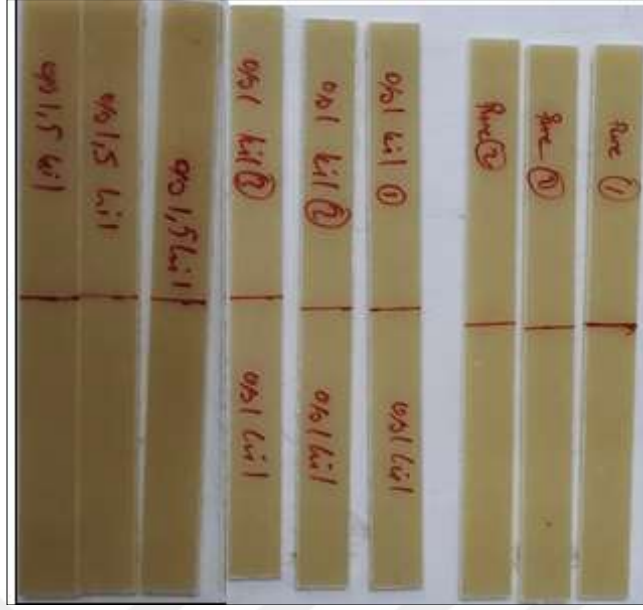
Şekil 5.16 Numunelerin strain-gauge bağlantısı

5.4.2 Basma deneyi

Basma deneyi çekme deneyinin tersi olarak uygulanmaktadır. Basma testi numunelerinde; numune yüksekliğinin genişliğine oranı önemli ölçüde deney sonucunu etkilemektedir. Basma testi için hazırlanan numune ölçüleri ASTM D 6641-16 standartına göre, ölçüleri 140 mm boy, 13 mm genişlik ve 2,5 mm kalınlık olarak belirlenmiştir. Numune geometrisi Şekil 5.17'de gösterilmektedir. Numuneler Şekil 5.18'de görüldüğü gibi hazırlanmış ve test 1mm/dk hızında yapılmıştır.

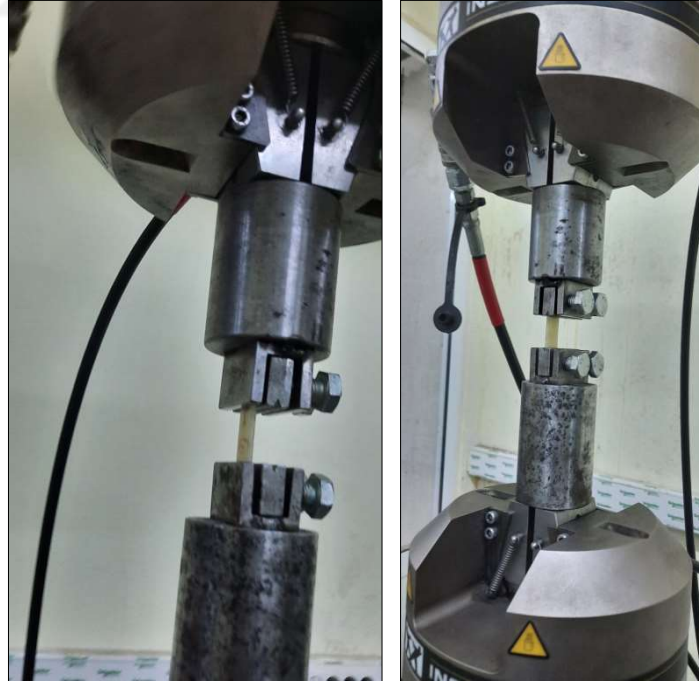


Şekil 5.17 Basma testi numunesinin geometrisi



Şekil 5.18 Basma deneyi için hazırlanan numuneler

Basma testi, çekme testi ile aynı cihaz olan Dicle Üniversitesi, Merkezi laboratuvarında bulunan Instron marka BS8801 tipindeki 100 kN kapasiteli cihazda, basma aparatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bkz. Şekil 5.19).



Şekil 5.19 Instron marka test cihazı ve basma testinin yapılışı

5.4.3 Kayma deneyi

Numunelerin kayma özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D 7078 standardı esas alınmıştır. ASTM D 7078 standardına göre test için gerekli çentikli kayma numunesi hazırlanmıştır.

Kayma mukavemeti ve kayma modülü aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$\tau = G_{12} \cdot \gamma_{12} \quad (5.3)$$

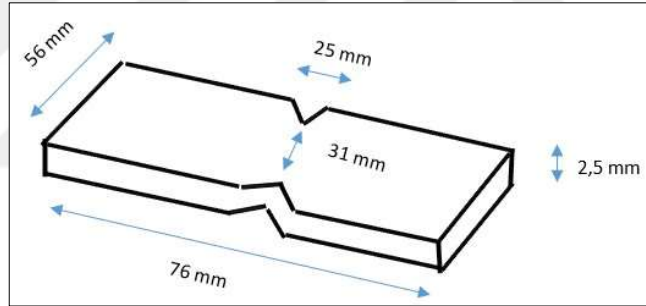
$$\gamma_{12} = 2 \cdot \varepsilon \quad (5.4)$$

$$G_{12} = \frac{P}{A \cdot 2 \cdot \varepsilon} \quad (5.5)$$

Burada;

“ τ ” kayma mukavemetini; “ G_{12} ” kayma modülünü; “ γ_{12} ” poisson oranını; “A” kesit alanını; “ ε ” ise gerinimi ifade etmektedir.

Hazırlanan numune geometrisi ise Şekil 5.20’de gösterilmektedir.



Şekil 5.20 Kayma testi numunesi geometrisi

Yapılan deneyde birim uzama miktarı, strain gaugeler kullanılarak tespit edilmiştir. Kayma modülü tespiti için numunelere Şekil 5.21’de gösterildiği gibi 45°’lik açıyla strain gauge’ler bağlanmıştır. Strain gaugelerin bağlantısı için Pattex marka yapıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 5.21 Kayma testi numunesi strain gauge bağlantısı

Deneyleyler Instron marka BS8801 tipindeki 100 kN kapasiteli cihaza kayma çene aparatı takılarak gerçekleştirilmiştir (Bkz. Şekil 5.22). Deneyley hızı ilgili ASTM D 7078 standartında belirttiği gibi 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.22 Instron marka test cihazı ile kayma testinin yapılışı

5.4.4 Sertlik deneyi

Dicle üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme laboratuvarında Vickers test metodu ile sertlik ölçümü yapılmıştır. Vickers sertlik testi diğer adıyla HV en fazla kullanılan sertlik ölçüm birimlerinden biridir. HV; Vickers Primit numarası olarak bilinmektedir (“Sertlik”, 2016).

Numunelere sertlik cihazında 10 saniyede, 0,3 kg’lık yük uygulanması ile sertlik ölçümü yapılmıştır. Her numuneden 3 ölçüm alınıp, daha sonra bunların ortalaması alınarak sertlik değerleri elde edilmiştir.

5.5 Dinamik Mekanik Analizi (DMA)

Dinamik Mekanik Analiz yöntemi, çok çeşitli malzemelerin; zaman, frekans, sıcaklık, stress ve gerinme gibi değişken parametreler altında mekanik ve reolojik özelliklerini ölçmek için kullanılmaktadır. Bu analizin en önemli özelliği, polimerler gibi hem elastik hem viskoz özellik gösteren viskoelastik malzemelerin davranışlarını gözlemlemeye olanak sağlamasıdır. Dinamik mekanik analiz çalışma prensibinde malzemeye salınımlı bir deformasyon uygulanmaktadır. Bu deformasyon sonucunda malzemenin gerilme veya gerilimi yani tepkisi ölçülmektedir. Dinamik mekanik analiz sonucunda elde edilen parametreler kayıp modülü, depolama modülü ve bunların birbirlerine oranından elde edilen tan (δ) değerleridir. Depolama modülü E’ olarak

gösterilir ve malzemenin elastikiyet (elastik modül) ölçüsüdür yani malzemenin enerji depolama yeteneğini gösterir. Kayıp modülü ise malzemenin enerji dağıtma yeteneği olarak bilinir ve E'' ile gösterilmektedir. Tanjant deltası (δ) ise malzemenin sönümleme özelliğidir. Elastik bir bileşen olan depolama modülü ile viskoz bileşen olan kayıp modülü arasında ilişki kurmamızı sağlayan $\tan(\delta)$, uygun sertlikte viskoz özelliğin ve malzemenin viskoelastik yapısının ölçüsüdür ("*Dinamik Mekanik Analiz*", 2020).

DMA testlerinden elde edilen viskoelastik parametreler aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$E' = \left(\frac{\sigma}{\gamma}\right) \cos \delta \quad (5.6)$$

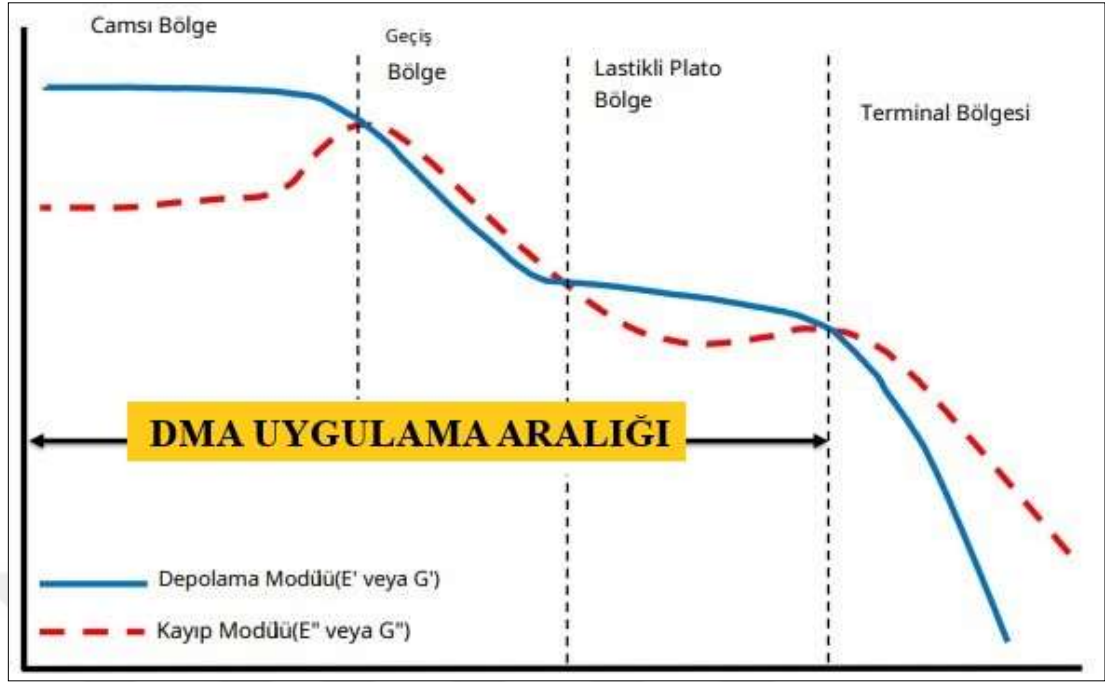
$$E'' = \left(\frac{\sigma}{\gamma}\right) \sin \delta \quad (5.7)$$

$$\tan \delta = \left(\frac{E''}{E'}\right) \quad (5.8)$$

Burada;

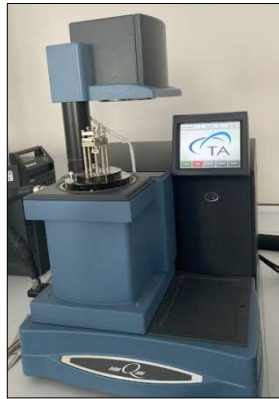
" E' " depolama modülünü; " E'' " kayıp modülünü; " σ " gerilimi; " δ " faz açısını; " γ " ise gerinimi ifade etmektedir.

Bilinen çekme testi cihazları, yalnızca elastik bileşenlere odaklanırken DMA çalışmaları ilk olarak lineer viskoelastik aralıkta çalışır. Bu nedenle molekül yapısına daha duyarlıdır. Molekül zincirleri amorf halde bulunan polimerlerin kauçuğumsu hale geçtiği sıcaklık ise camsı geçiş sıcaklığı " t_g " olarak tanımlanmaktadır (Kaştan, 2015). Dinamik mekanik analiz camsı geçiş sıcaklığını belirlemek için analitik bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bir polimer camsı halde ısıtılırsa, sert ve kırılğan bir malzemeden daha viskoz özelliklere sahip daha yumuşak kauçuksu bir malzemeye geçiş yapar (Bkz. Şekil 5.23). Bu nedenle camsı geçiş bir sıcaklık aralığında meydana gelmektedir ("*Camsı Geçiş Sıcaklığı*", 2020).



Şekil 5.23 DMA ile amorf bir polimer için viskoelastik aralığın gösterimi

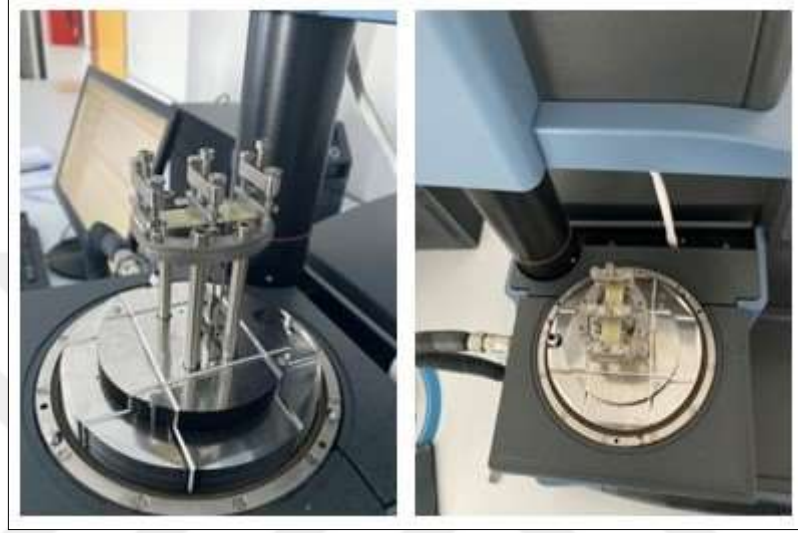
DMA ile t_g 'nin tanımlanmasında kullanılan üç yöntem bulunmaktadır. Depolama modülünün başlangıcı, kayıp modülü tepe noktası ve $\tan(\delta)$ değerinin tepe noktasından camlı geçiş sıcaklıkları tanımlanabilmektedir. Viskoelastik kaybın ölçüsü olan $\tan(\delta)$ ne kadar yüksek ise malzemenin yüksek derecede viskoelastik olduğunu anlayabilmekteyiz. Bu nedenle bu çalışmada nanokil katkısının polimer molekül zincirlere etkisini yorumlanması bakımından camlı geçiş sıcaklığı $\tan(\delta)$ grafiğinden alınmıştır. Numunelerin Dinamik Mekanik Analizleri Ege Üniversitesi Merkezi araştırma test ve analiz laboratuvarı uygulama ve araştırma merkezinde bulunan TA Instruments Q800 DMA cihazında yapılmıştır (Bkz. Şekil 5.24).



Şekil 5.24 Q800 tipi DMA cihazı

Deney metodu çift konsol (dual cantilever) eğilme modu olarak seçilmiştir. Metot parametreleri; 1 Hz frekans, 1 N kuvvet, 15 mikron genlik olarak seçilmiştir. Isıtma

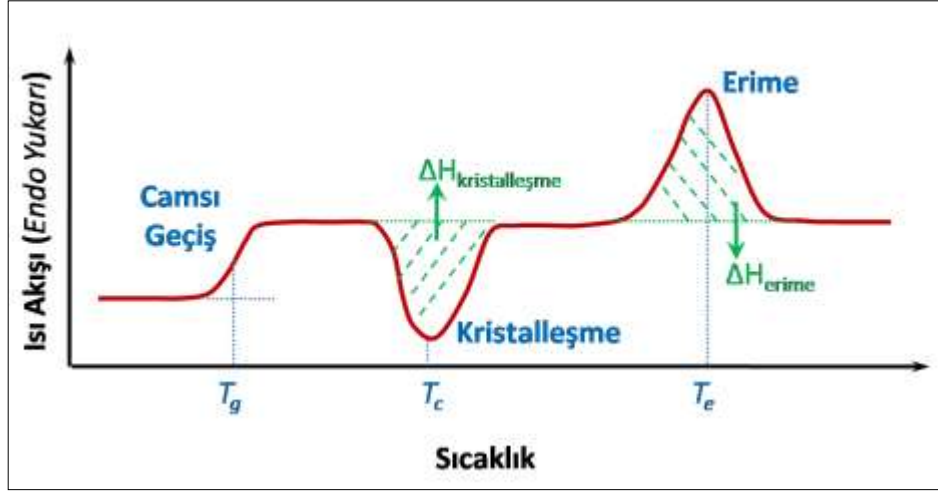
hızı dakikada 5°C olacak şekilde, sıcaklık, oda sıcaklığından 150°C'ye kadar yükseltilmiştir. Numune ölçüleri ASTM D 4065 standardına ve deney metodu seçimine göre belirlenmiştir. Buna göre kalınlık 2,5 mm, genişlik 12 mm ve uzunluk 55 mm olacak şekilde numuneler üzerinde test yapılmıştır. Şekil 5.25'te numunenin analiz cihazına yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 5.25 Numunenin DMA cihazına yerleşimi

5.6 Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)

Diferansiyel taramalı kalorimetri veya DSC ısı analizi yapmaya yarayan termal analitik bir yöntemdir. Malzeme soğutulup veya ısıtılırken belirlenen sabit sıcaklıkta tutulurken harcanan veya açığa çıkan enerji miktarını ölçmek için kullanılmaktadır. DSC analizi temel olarak malzemenin ekzotermik ve endotermik işlemler esnasında faz değişimleri, faz değişimi sıcaklığı gibi ısı değişimlerinin ölçümünde kullanılmaktadır (Kaştan, 2015). Şekil 5.26'da DSC analizinde sıcaklığa göre ısı akışı şeması gösterilmektedir. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri analizi ile numunelerin, camsı geçiş sıcaklıkları (t_g) tespit edilmiş olup, bu analiz Dicle Üniversitesi Merkez Laboratuvarında yapılmıştır. Shimadzu DSC-60 tipi cihaz ile dakikada 10°C sıcaklık artırımını ile sıcaklık 500°C 'ye kadar çıkarılarak analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.26 DSC analizinde ısı akış şeması (Kaştan, 2015)

5.7 Termogravimetrik Analiz (TGA)

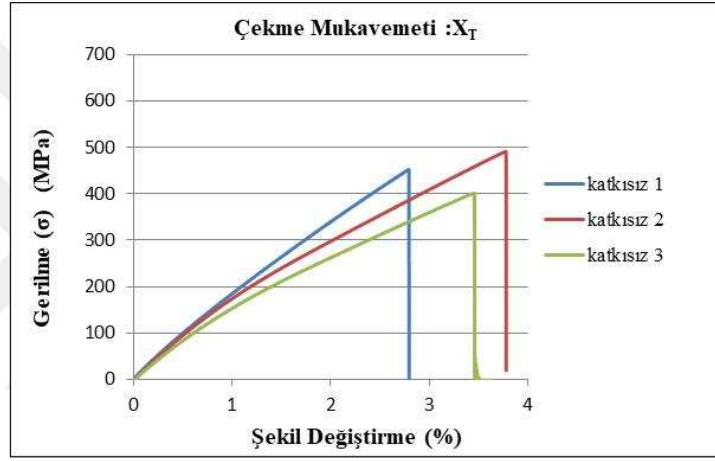
Termogravimetrik analiz, bir numunenin kütlesinde sıcaklık artışı sonunda meydana gelen ağırlık değişimlerini nicel yani kantitatif olarak gösteren bir tekniktir. TGA malzemenin dehidrasyonu veya bozunması sırasındaki ağırlık değişimlerini zamana veya sıcaklığa bağlı olarak değişimini göstermektedir. Ağırlık değişimi yüksek sıcaklıklarda fiziksel veya kimyasal bağların kopması sonucunda meydana gelmektedir. TGA özellikle bozunma süreçlerini göstermesinden kaynaklı polimerle ilgili analizlerde kullanılmaktadır (“Termogravimetrik Analiz”, 2020). Bu çalışmada Termogravimetrik analizi (TGA), Dicle Üniversitesi Merkez Laboratuvarında yapılmıştır. DTG-60H Shimadzu marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 10 °C/dk ısıtma hızı ile 800°C'ye kadar çıkarılarak yapılmıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

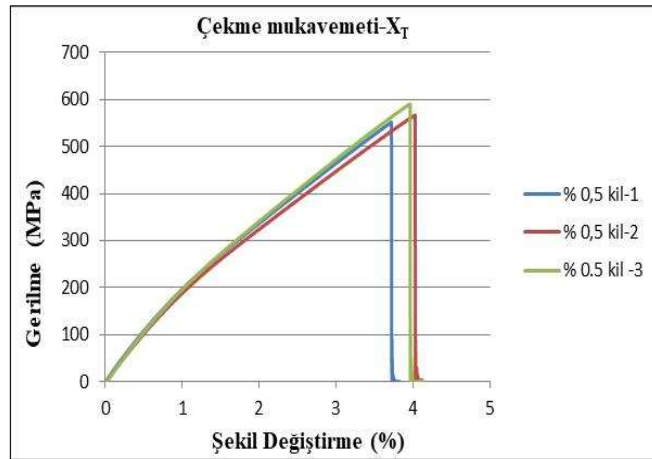
Bu bölümde, çalışmanın konusu olan farklı oranlarda nanokil takviyesi yapılmış kompozit numuneler üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları verilmektedir.

6.1 Çekme Deneyi Sonuçları

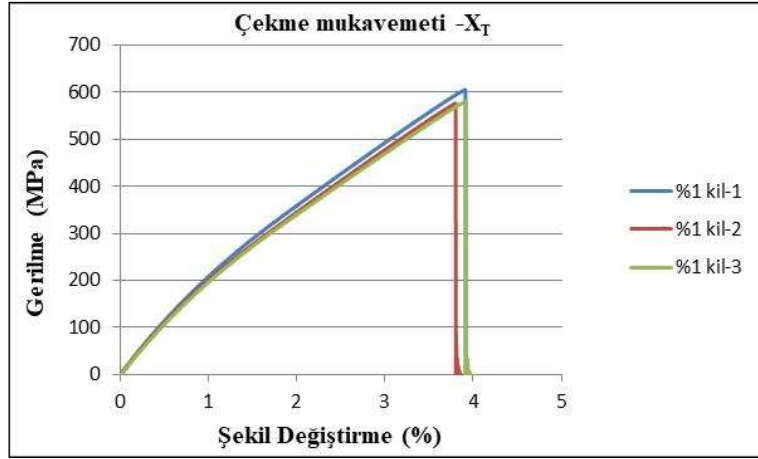
Çekme mukavemetleri açısından katkısız ve üç farklı oranda nanokil katılmış numunelerden elde edilen Gerilme-Şekil değiştirme grafikleri sonuçları aşağıda verilmiştir (Bkz. Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4). Her numuneden 3 adet üretilmiş ve bu numuneler teste tabi tutulmuştur. Grafiklerde her üç numunenin sonuçları örnek olarak gösterilmiştir.



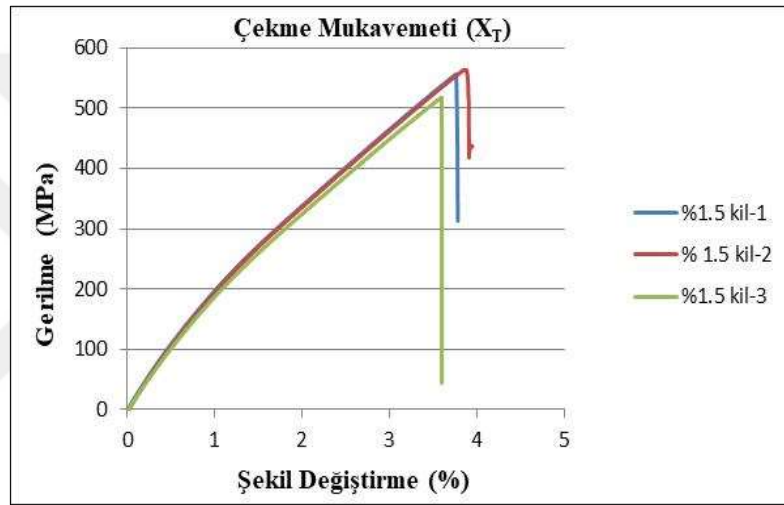
Şekil 6.1 Katkısız numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 6.2 %0,5 katkılı numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği

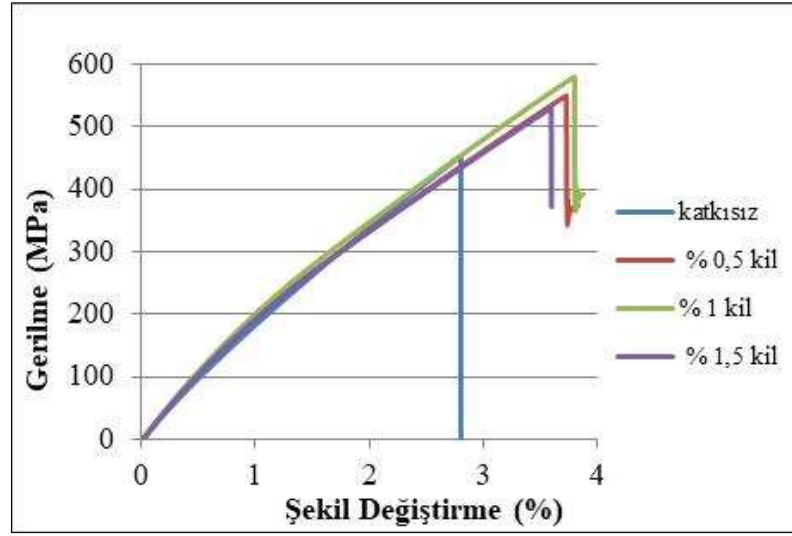


Şekil 6.3 %1 katkılı numunenin gerilme-şekil değişirme grafiği



Şekil 6.4 %1,5 katkılı numunenin gerilme-şekil değişirme grafiği

Aynı zamanda numunelerin karşılaştırmalı grafiği de hazırlanmıştır. Her oranda hazırlanmış ve teste tabi tutulan 3'er adet numuneden elde edilen çekme gerilme değerlerinin ortalaması alınarak hazırlanan karşılaştırmalı grafik Şekil 6.5'te verilmiştir.

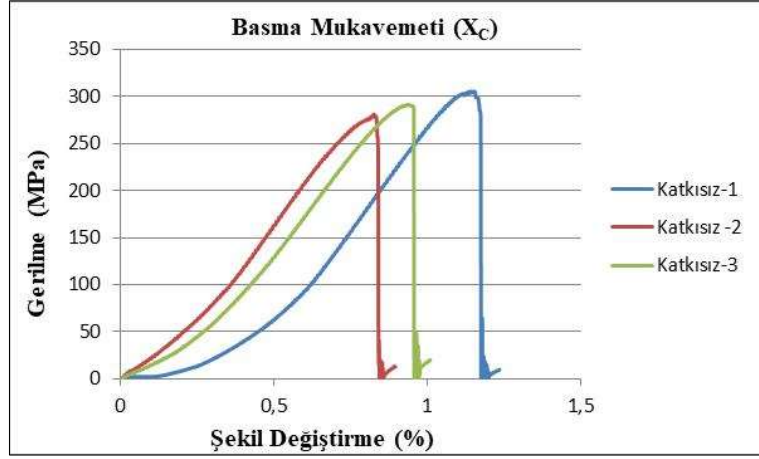


Şekil 6.5 Gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

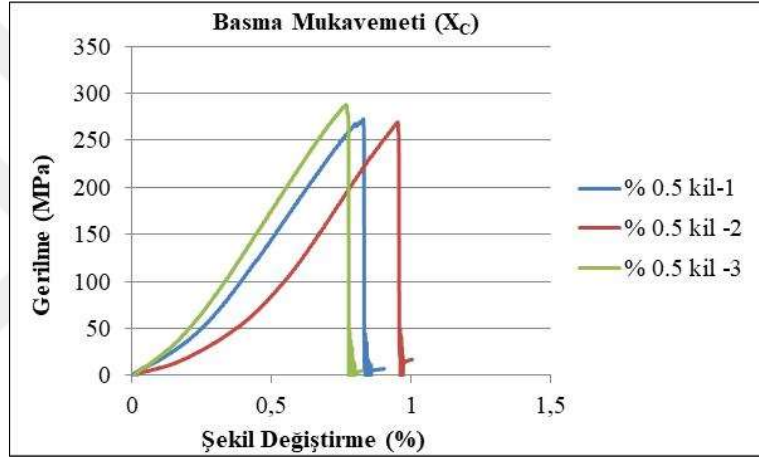
Yapılan çekme testinde nanokil takviyesinin her oran için çekme mukavemetini artırdığı tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 6.5). Ağırlıkça %1 oranında nanokil katılmış numunelerden elde edilen çekme gerilme değerinin, katkısız, %0,5 nanokil katkılı ve %1,5 nanokil katkılı numunelerden elde edilen çekme gerilme değerlerinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 6.3 ve Şekil 6.5). Katkısız numuneden elde edilen çekme gerilmesi; %0,5, %1 ve %1,5 nanokil katkılı numunelerden elde edilen değerlere göre sırasıyla, %26,97, %31,06 ve %21,3 oranlarında daha düşük elde edilmiştir. En fazla nanokil oranına sahip numunede çekme dayanımının aynı oranda artmadığı görülmektedir. Bu durum nanokil ile epoksi reçine ara yüzeylerinde yeterli modifikasyon sağlanmadığı ile açıklanabilmektedir. Numunelerin uzama oranını incelediğimizde; %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında nanokil katkısının numunelerde uzama oranını artırdığı tespit edilmiştir.

6.2 Basma Deneyi Sonuçları

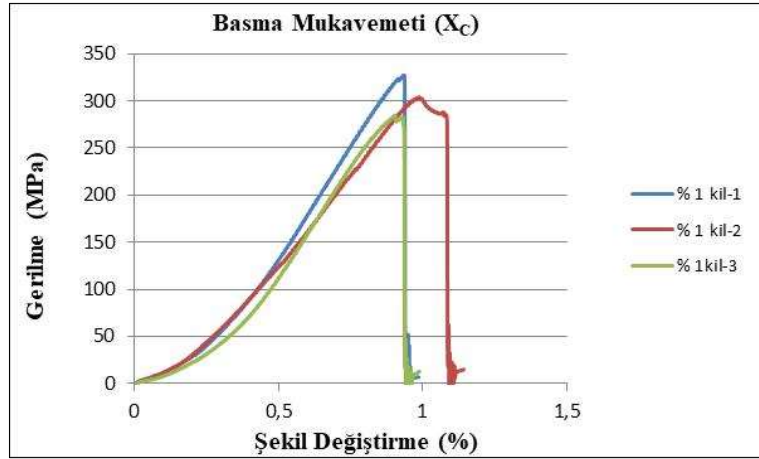
Basma gerilmeleri açısından katkısız ve her üç oranda kil katılmış numunelerden elde edilen Gerilme-Şekil değiştirme grafikleri sonuçları aşağıda verilmiştir (Bkz. Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9). Her numuneden 3 adet üretilmiş ve bunlar teste tabi tutulmuştur. Grafiklerde her üç numunenin sonuçları örnek olarak gösterilmiştir.



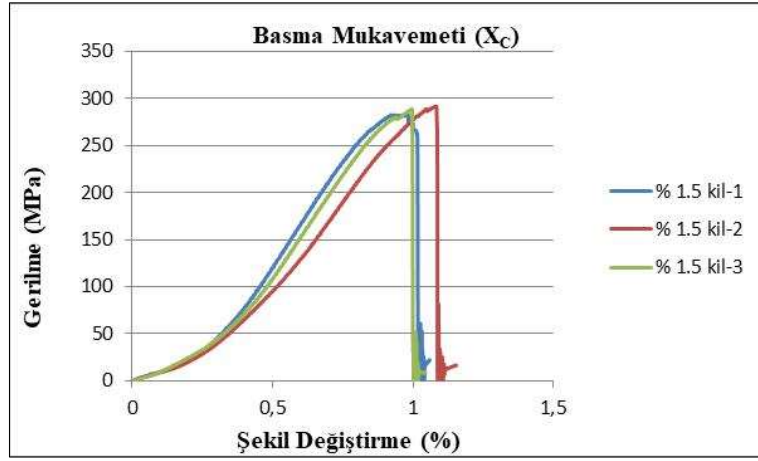
Şekil 6.6 Katkısız numunenin gerilme-şekil değişirme grafiği



Şekil 6.7 %0,5 katkılı numunenin gerilme-şekil değişirme grafiği

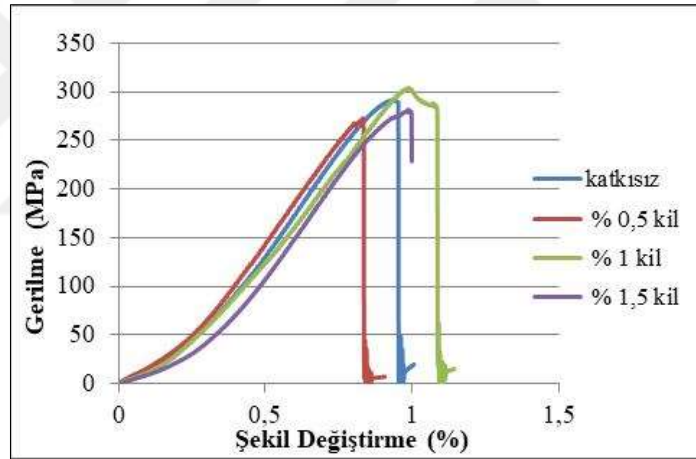


Şekil 6.8 %1 katkılı numunenin gerilme-şekil değişirme grafiği



Şekil 6.9 %1,5 katkılı numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği

Aynı zamanda; katkısız ve her üç orandaki nanokil takviyeli kompozit numunelerinin basma deneyi sonrası elde edilen değerlerin ortalaması alınarak hazırlanan gerilme-şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 6.10’da verilmiştir.



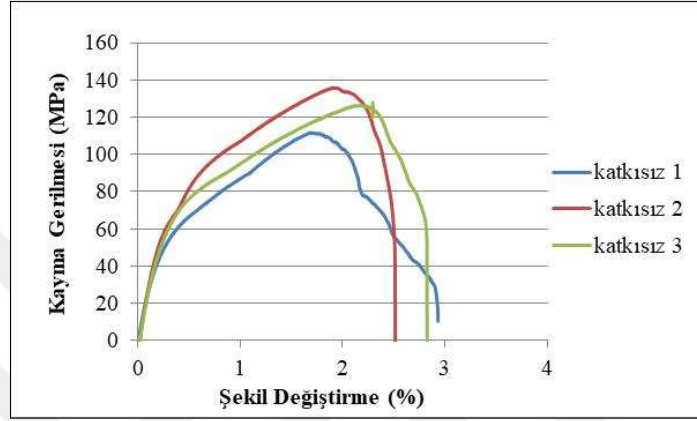
Şekil 6.10 Gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Elde edilen basma gerilmesi grafiklerine bakıldığında sadece %1 oranında nanokil katkısının basma gerilmesini artırdığı görülmektedir. Özellikle %0,5 oranındaki nanokil katkısının basma gerilmesini düşürdüğünü tespit edilmiştir. %1,5 oranında nanokil katkılı numunenin, kil katkısız numune ile benzer davranış sergilediği tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 6.10). %0,5 ve %1,5 nanokil katkılı kompozitlerin basma gerilmesinin, katkısız numuneden elde edilen basma gerilmesi değerine göre sırasıyla %5,82 ve %1,71 oranında daha düşük olduğu elde edilmiştir. %1 oranında nanokil katkılı kompozitlerin basma gerilmesinin, katkısız numuneden elde edilen basma gerilmesi değerine göre %4,25 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 6.8 ve Şekil 6.10). Uzama miktarlarını incelediğimizde %1 nanokil katkılı

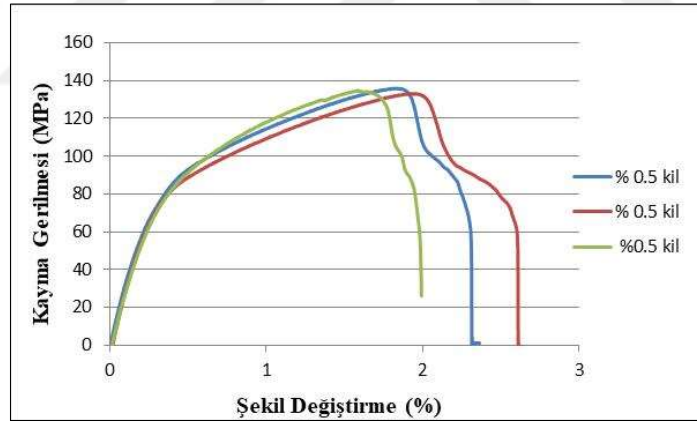
numunedeki uzama miktarının diğer oranlardaki numunelerden ve katkısız numuneden elde edilen uzama miktarından daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

6.3 Kayma Deneyi Sonuçları

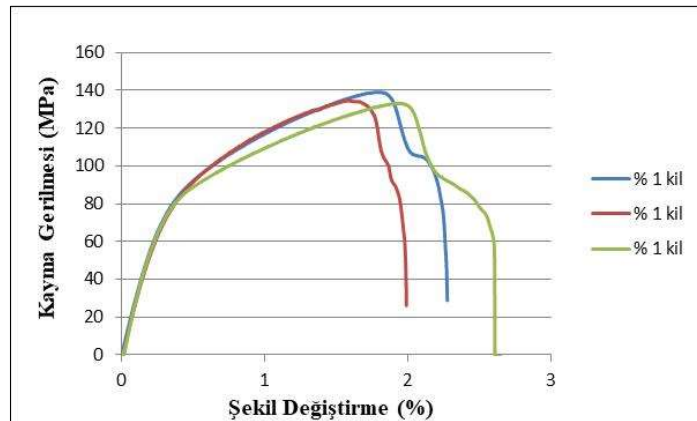
Katkısız ve %0,5, %1, %1,5 oranlarında nanokil katılmış numunelerden 3'er adet test edilmiş ve her numuneden elde edilen kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafikleri sonuçları aşağıda verilmiştir (Bkz. Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14).



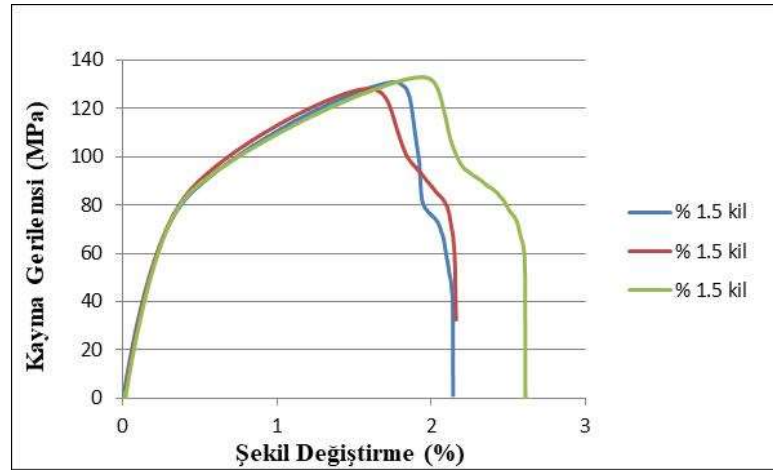
Şekil 6.11 Katkısız numunenin kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiği



Şekil 6.12 %0,5 katkılı numunenin kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiği

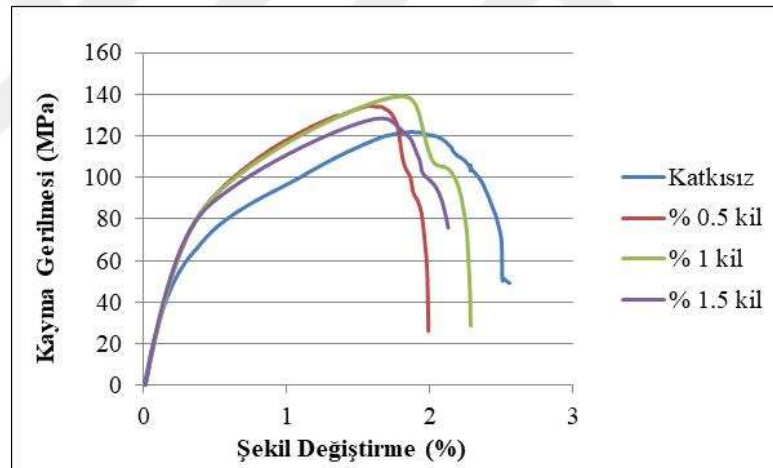


Şekil 6.13 %1 katkılı numunenin kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiği



Şekil 6.14 %1,5 katkıli numunenin kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiği

Şekil 6.15'te katkısız ve her üç orandaki nanokil katkıli kompozit numunelerinin, kayma testi sonrası elde edilen değerlerin ortalaması alınarak hazırlanan kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafikleri, karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 6.15 Kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması

Her üç nanokil katkıli kompozitten elde edilen kayma gerilmesi değerlerinin, katkısız kompozitten elde edilen gerilme değerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. En yüksek değer %1 nanokil katkıli kompozitlerden elde edilmiştir (Bkz. Şekil 6.13). Katkısız kompozit numuneden elde edilen kayma gerilme değerinin, %0,5, %1 ve %1,5 nanokil oranlarına sahip numunelerden elde edilen kayma gerilmesi değerine göre sırasıyla, %12,29, %14,30 ve %8,26 oranlarında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Katkısız numuneye göre daha fazla gerilme değeri elde edilmesine rağmen %1,5 nanokil katkıli numunede kayma gerilmesinde düşme olduğu tespit edilmiştir.

Numunelerin elastisite modülü (E) ve poisson oranları (ν_{12}) değerleri çekme testi ile strain-gauge yardımıyla elde edilmiştir. Kayma modülü (G_{12}) değerleri ise kayma testi ile yine strain-gauge yardımıyla elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 6.1’de belirtilmiştir.

Elastisite modülü (E) ve kayma modülü (G_{12}) değerleri nanokil oranı arttıkça arttığı tespit edilmiştir. Maksimum elastisite modülü ve kayma modül değeri %1 oranında nanokil katkılı kompozit numunelerden elde edilmiştir. %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında nanokil katkılı kompozitlerden elde edilen Elastisite modülleri, katkısız kompozite göre sırasıyla %4,35, %7,35 ve %5,62 oranlarında arttığı tespit edilmiştir (Bkz. Tablo 6.1). Nanokilin; numunelerin kayma modülü (G_{12}) değerleri üzerinde olumlu bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında nanokil katkılı kompozitlerden elde edilen kayma modül değerlerinin, katkısız numuneye göre sırasıyla %10,02, %11,94 ve %7,59 oranlarında daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Bkz. Tablo 6.1).

Tablo 6.1 Elde edilen mekanik özellikler ve değerleri

Mekanik özellikler	Katkısız	Nanokil Oranı		
		% 0,5	% 1	% 1,5
Çekme Mukavemeti (MPa) -(X_T)	448,377	569,315	587,640	545,831
Basma Mukavemeti (MPa) - (X_C)	292,87	276,77	305,32	287,95
Kayma Mukavemeti (MPa) -(S_{12})	119,81	134,53	136,94	129,71
Elastisite Modülü (MPa)- E_{12}	22085,98	23047	23709,53	23326,72
Kayma modülü (MPa)- G_{12}	4087,78	4497,24	4576,04	4398,13
Poisson oranı- ν_{12}	0,16	0,20	0,18	0,18

Nanokil oranı arttıkça numunelere ait poisson oranlarının (ν_{12}) arttığı tespit edilmiştir. En yüksek değer %0,5 nanokil katkıli kompozitlerden elde edilmiştir (Bkz. Tablo 6.1). Ayrıca %1 ve %1,5 oranlarında nanokil katkıli numunelerden elde edilen poisson oranları eşit elde edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda; nanokil ilavesinin çekme dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir. Nanokillerin fiberler ile oluşturduğu arayüzeyler sayesinde matrise mukavemet kazandırdığı ve kuvvetin her noktaya iletilmesini sağladığı sonucunu doğrulamaktadır (Ünal, 2016). Benzer şekilde kayma mukavemetinde, elastisite modülü ve poisson oranının artmasında da nanokilin olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Nanokil takviyesi sadece basma mukavemetinde olumsuz bir etki sağlamıştır. %1 oranında nanokil katkısında olumlu bir etki sağlamış olup, diğer oranlarda ise kısmen basma mukavemetini düşürdüğü tespit edilmiştir. Nanokil katkısının epoksi reçineye takviye oranı arttıkça meydana gelen hareket kısıtlılığı nanokil moleküllerinin özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle bu çalışmada mekanik özelliklerin iyileştirilmesi yönünden basma mukavemetinde optimum nanokil takviye oranı %1 olarak tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçların literatürde de Başara vd., (2005), Zawawi vd., (2021), Jeyakumar vd., (2021), Awan vd., (2021), Okada ve Usuki (2006) tarafından yaptıkları çalışmalarda eklenen kil oranlarına göre çekme mukavemetinin belli bir orana kadar arttığını belirtmişlerdir. Bu çalışmamızda da %1 oranında maksimum değerler elde edilmiş olup, %1,5 oranında bu değerlerin düştüğü tespit edilmiştir. Bu anlamda elde edilen deney sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

6.4 Sertlik Deneyi Sonuçları

AOB marka test cihazından, 0,3 kg'lık yük ile 10 saniyede (HV0.3/10) Vickers sertlik ölçümü yapılmıştır. Her numuneden 3 ölçüm alınıp, daha sonra bunların ortalaması alınarak Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2 Numunelerin sertlik değerleri

Numune tipi	Sertlik ölçüm değeri (HV)
Katkısız	31
%0,5 Nanokil katkıli	38,83
%1 Nanokil katkıli	41,1
%1,5 Nanokil katkıli	39,05

Kompozitlerin sertlikleri nanokil oranı arttıkça artmıştır. En yüksek sertlik değeri %1 nanokil oranına sahip numunelerden elde edilmiştir. Katkısız olan numuneden elde edilen sertlik değerinin % 0,5, %1 ve %1,5 oranlarına sahip numunelere göre sırasıyla %25,26, %32,58 ve %25,97 oranlarında daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Bkz. Tablo 6.2).

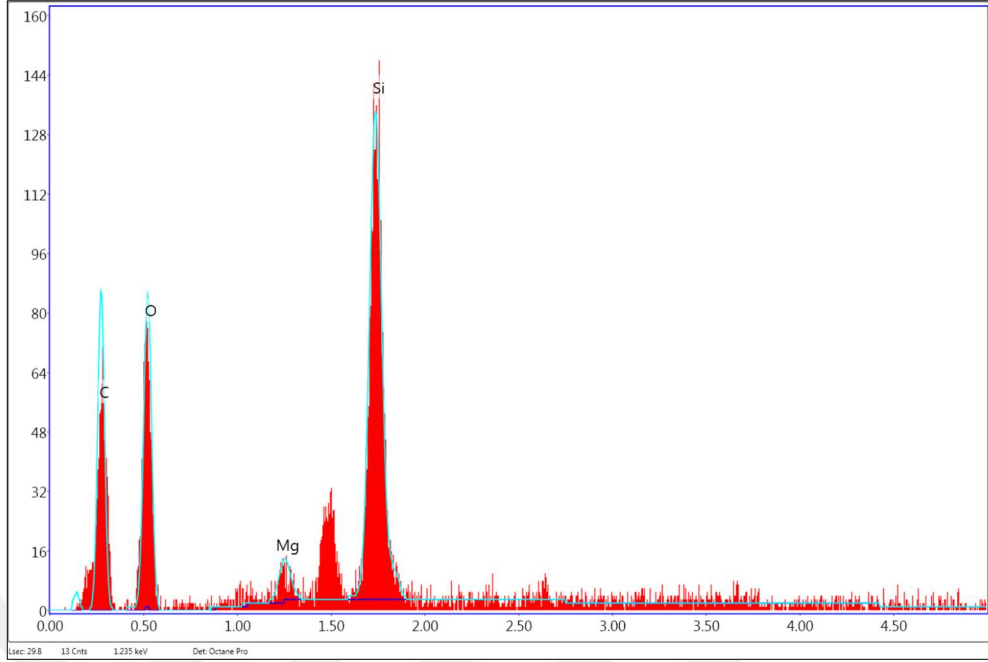
Literatürde Awan vd., (2021), yaptıkları çalışmada nanokil eklenmesi ile sertlikte %15 civarında artış gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Jeyakumar vd., (2021), ise yaptıkları çalışma ile kil oranı ile sertliğin arttığını belirtmişlerdir. Yaptığımız çalışma da elde edilen sertlik değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

6.5 Nanokil Analizi Sonuçları

Nanokilin yapılan “EDAX TEAM EDS” incelenmesinde bileşimindeki elamanlar tespit edilmiştir. Analiz, Dicle Üniversitesi Merkez laboratuvarında yapılmıştır. Tablo 6.3’te bileşim değerleri ve Şekil 6.16’da analiz grafiği verilmektedir. Analiz sonucunda kullanılan Esan 1-140 ticari nanokilin, Si, O, C, Mg bileşiminden oluşan bir kil olduğu tespit edilmiştir. En fazla orana sahip Si olduğu görülmektedir.

Tablo 6.3 Kil yapısındaki elemanlar

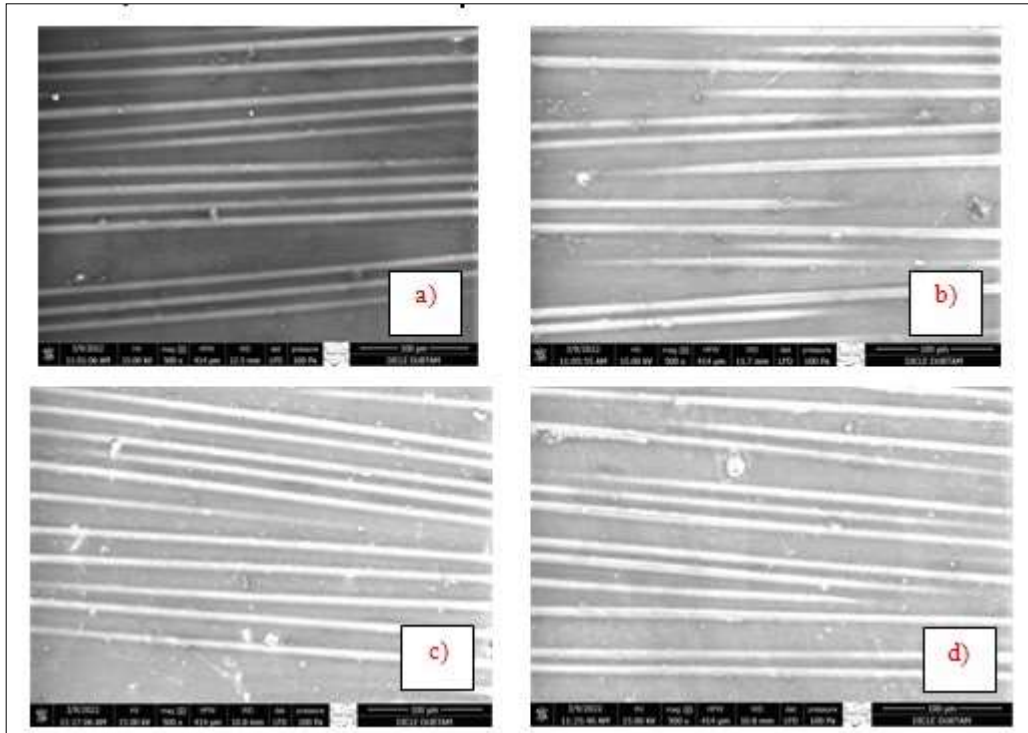
Element	Wt %	Atomic %	Error %	Net Int.	Net Error %	K Ratio	Z	R	A	F
C K	47.42	56.46	11.18	26.08	4.07	0.1680	1.0251	0.9846	0.3457	1.0000
O K	43.38	38.77	13.26	29.90	3.87	0.0633	0.9871	1.0043	0.1479	1.0000
Mg K	1.10	0.65	28.50	4.72	22.01	0.0038	0.9200	1.0356	0.3739	1.0058
Si K	8.09	4.12	7.00	68.91	3.27	0.0508	0.9084	1.0485	0.6886	1.0045



Şekil 6.16 Nanokili oluşturan elementlerin gösterimi

6.6 SEM Görüntüleri

Nanokil katkı, cam fiber takviyeli epoksi kompozit numuneler, Quanta FEG 250 tipi Taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak analizleri yapılmıştır. Analizler Dicle Üniversitesi Merkez laboratuvarında yapılmıştır. SEM görüntüleri Şekil 6.17’de verilmektedir.



Şekil 6.17 Numunelerin SEM görüntüsü, a) Katkısız, b) %0,5 katkı, c) %1 katkı, d) %1,5 katkı

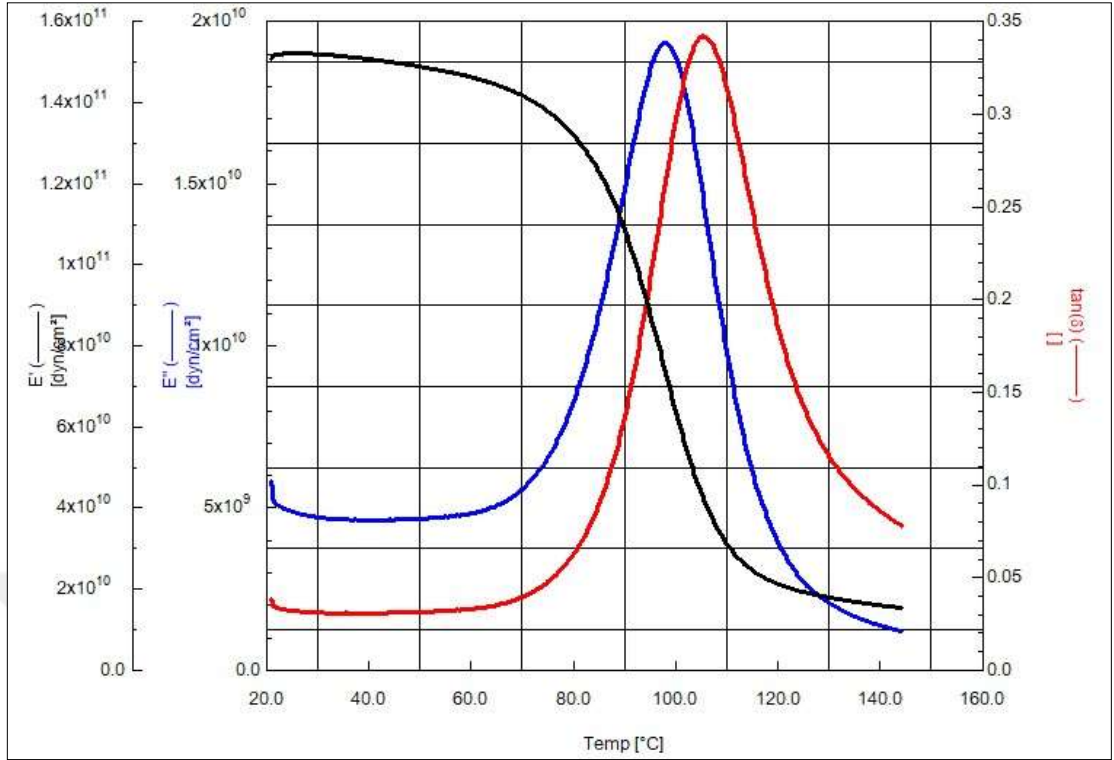
SEM görüntüleri, nanokil oranı artması ile elde ettiğimiz mekanik değerleri açıklamak için önemli bir bulgudur. Aynı zamanda özellikle numunelerin hasar tiplerini tanımlamak, nanokilin homojen dağılımını açıklamak ve nanokilin reçine/fiber üzerinde etkisini anlamak açısından önemlidir.

Shettar vd., (2021) yaptıkları çalışmada, SEM görüntülerinde numunelerin kaba kırık yüzeylerini, çok sayıda mikro çatlakın gelişimini destekleyen çatlak yollarının önündeki nanokil varlığından kaynaklandığını belirtmişler. Ayrıca çatlak yayılma yolunun dolambaçlı bir yol çizmeye çalışırken, kırılma yüzeyinin alanını ve kırılma tokluğunu artırdığını belirtmişler.

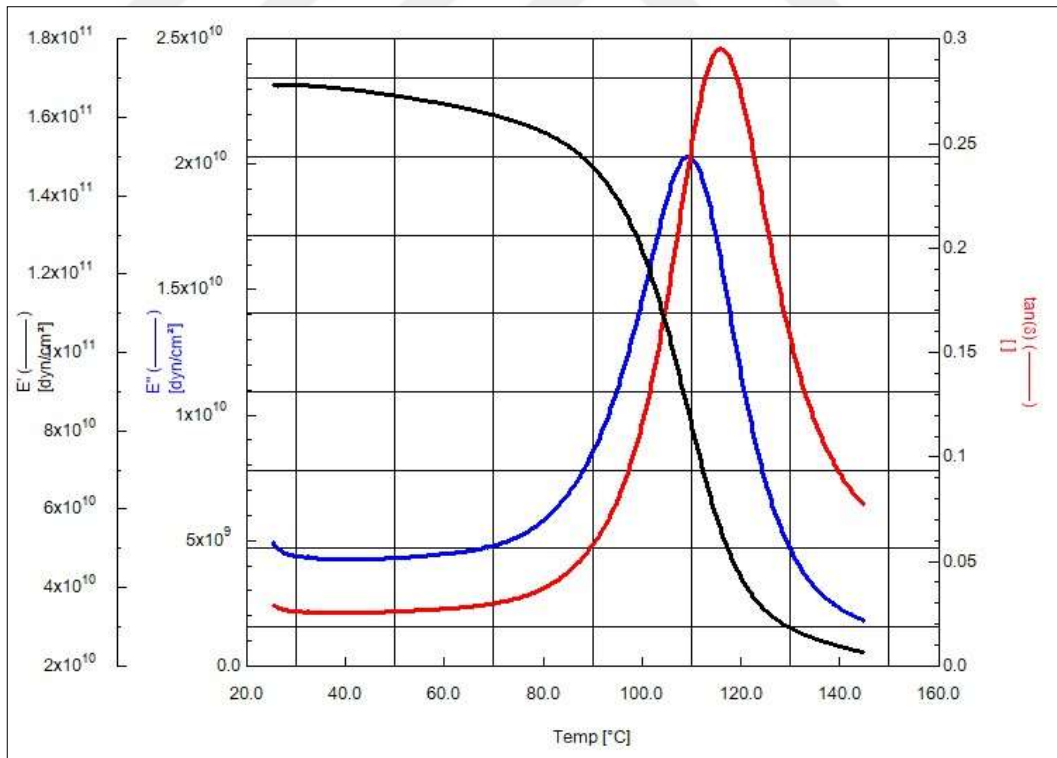
Bu çalışmamızda maksimum çekme mukavemetinin ağırlıkça %1 oranında nanokil takviyesiyle elde edilmesinin, çatlak yayılmasına karşı bir bariyer görevi olarak yorumlanabilir. Ayrıca ultrasonikasyon esnasında epoksi reçinenin ağırlıkça %1,5 oranında nanokil takviyesi ile daha yapışkan ve yoğun bir karışım olduğu gözlemlenmişti. Bununla birlikte karışıma katalizör olarak eklenen solvent kürleşme sonrası hava kabarcıklarına neden olmaktadır. Shettar vd., (2021) çalışmalarında da kürleşme sonrası bu hava kabarcıklarının etkisinden bahsetmektedirler. Bundan dolayı %1,5 oranında nanokil katkılı numuneden elde edilen çekme mukavemetinin; %0,5 ve %1 oranında nanokil katkılı numunelerden elde edilen değerlere göre daha düşük elde edilmiştir diyebiliriz.

6.7 Dinamik Mekanik Analiz Sonuçları

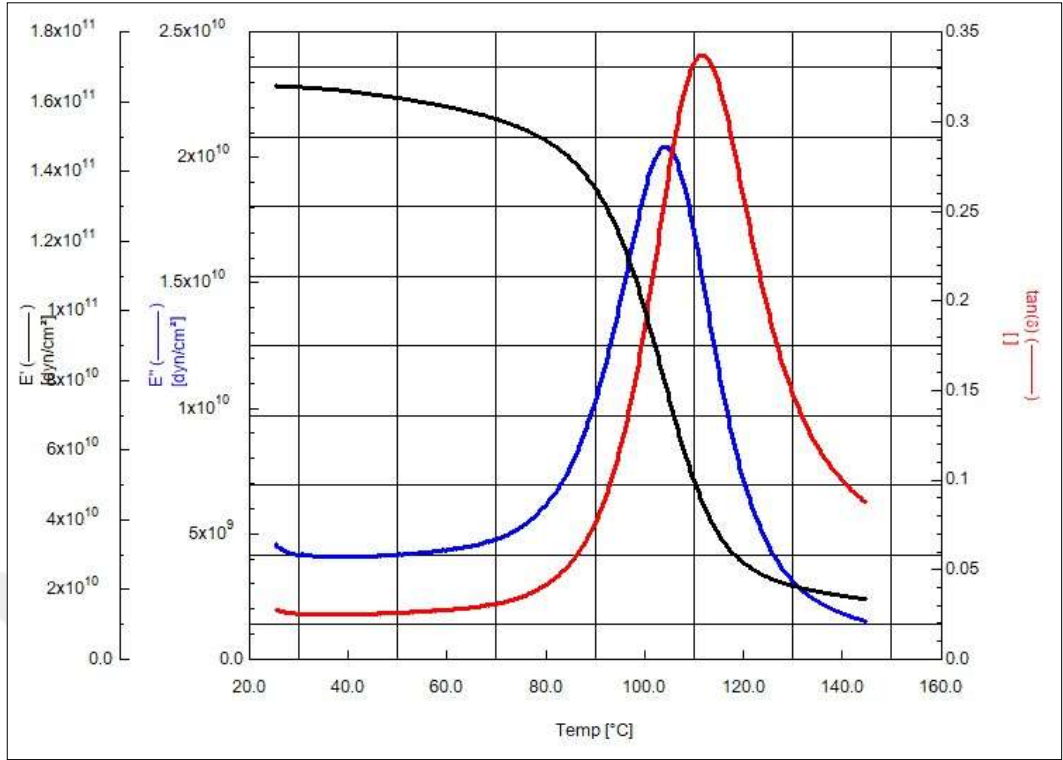
Hazırlanan katkısız, %0,5, %1 ve %1,5 nanokil katkılı numunelerden elde edilen DMA verileri grafiklere aktarılmıştır. Bu grafikler Şekil 6.18 ile Şekil 6.21 arasında verilmiştir. Bu grafiklerde elde edilen depolama modülü (E'), kayıp modülü (E'') ve $\tan(\delta)$ verileri görülmektedir.



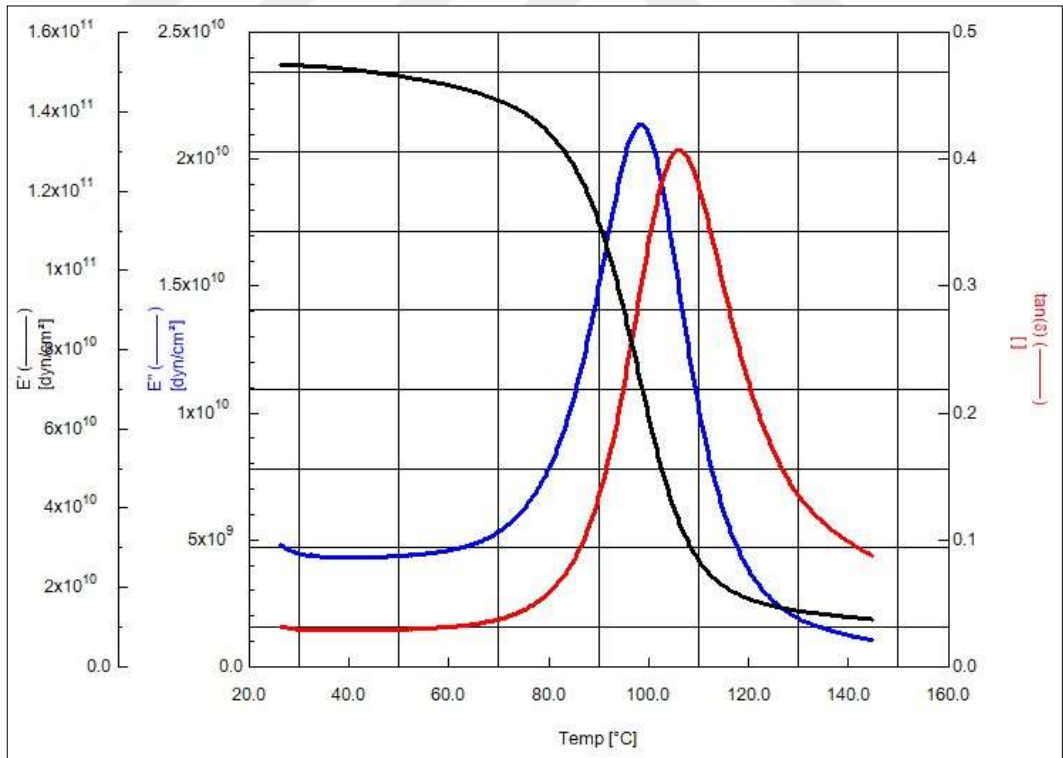
Şekil 6.18 Katkısız numunenin DMA grafiği



Şekil 6.19 %0,5 oranında kil katkılı kompozit malzemenin DMA grafiği



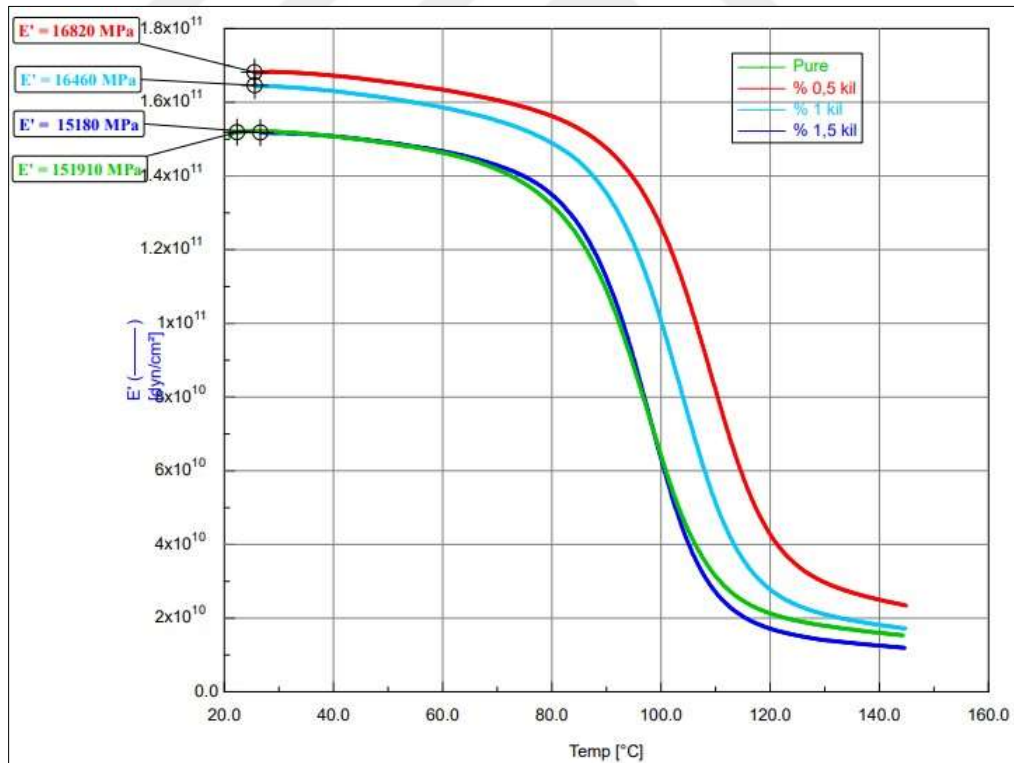
Şekil 6.20 %1 oranında kil katkılı kompozit malzemenin DMA grafiği



Şekil 6.21 %1,5 oranında kil katkılı kompozit malzemenin DMA grafiği

Kayıp modülünün (E'') zirvesi, moleküler hareket açısından fiziksel bir anlama sahiptir. Malzeme kayıp modülünün zirvesine yaklaştıkça, polimerin büyük parçaları

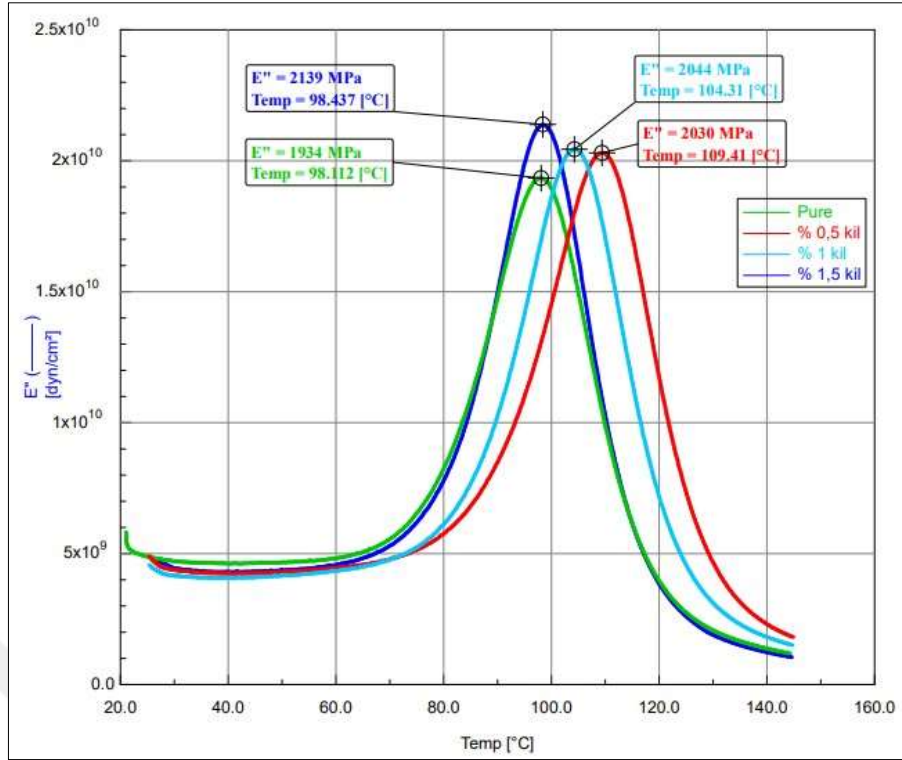
birlikte hareket edebildiğinden, harcanan enerji artmaktadır. Tersten yorumlanırsa özellikle molekül zincirleri yeterince hareketliliğe ulaştığında cam geçiş sıcaklığı gerçekleşmektedir. Bunun sonucu olarak numune grafiklerine bakıldığında camı geçiş sıcaklığından sonra numunelerin depolama modüllerinin (E') önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. Bu durum moleküllerin elastik özellikler göstermediğini belirtmektedir. Bununla birlikte, aynı zamanda malzeme genel olarak deforme edilmesi daha kolay hale gelmektedir. Artan viskoz davranışın daha kolay deformasyonla rekabet eden iki etkisi, gözlemlenen pik ile sonuçlanır. $\tan(\delta)$ sinyali, salınımdaki gerilim ve gerinim dalgaları arasındaki faz açısının tanjantıdır. Matematiksel olarak bunun aynı zamanda kayıp modülünün depolama modülüne oranı olarak tanımlanmaktadır. $\tan(\delta)$ sinyalinin zirvesi, malzemenin deformasyona karşı en viskoz tepkiye sahip olduğu geçiş bölgesindeki noktadır (TA Instruments, 2018). Katkısız, %0,5, %1 ve %1,5 nanokil katkılı numunelerin depolama modülünün sıcaklıkla değişim grafiği ise Şekil 6.22'de gösterilmiştir.



Şekil 6.22 Farklı oranlarda nanokil katkılı numunelerin depolama modülü- sıcaklık grafiği

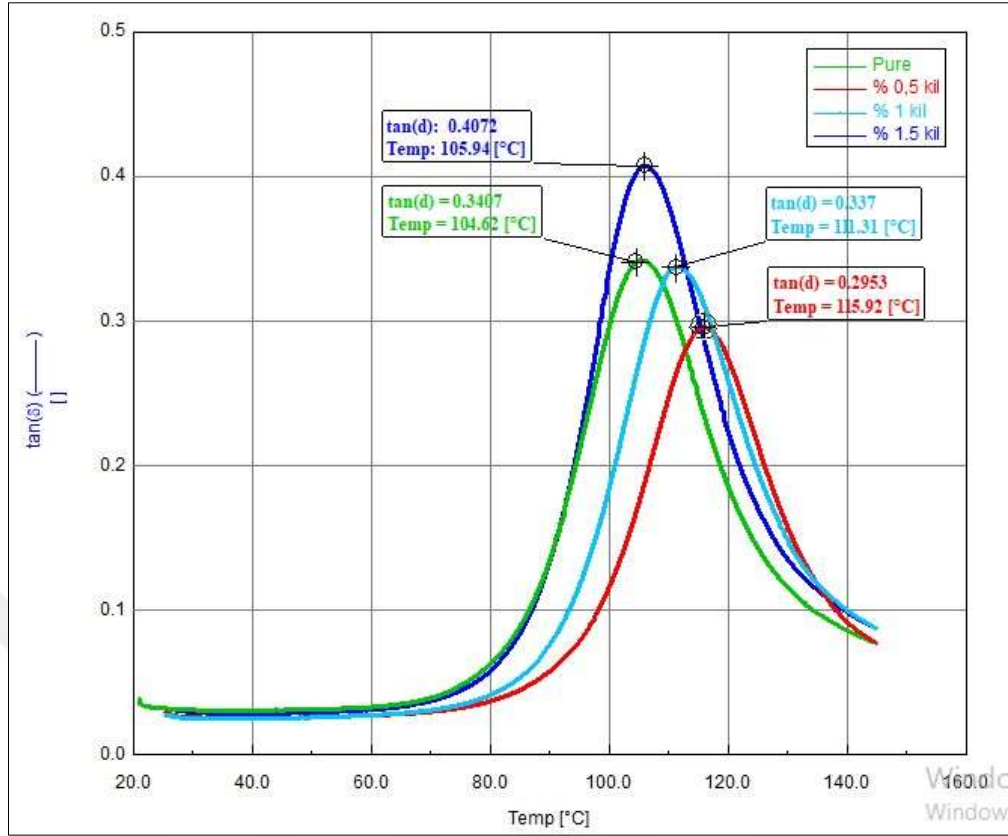
Grafiğe bakıldığında; başlangıçta en fazla depolama modülüne sahip numune %0,5 oranında nanokil katkılı kompozit numunesi olduğu ve 16820 MPa değerinde olduğu görülmektedir. %1 nanokil oranına sahip numunenin ise depolama modülünün 16460

MPa değerinde olduğu görülmektedir. En düşük depolama modülü ise %1,5 nanokil katkılı numuneden elde edilmiş olup, 15180 MPa değerindedir. Katkısız numuneden elde edilen değer ise 15190 MPa olarak elde edilmiştir. %0,5 nanokil katkısı ile numuneden elde edilen depolama modülünün, katkısız numuneye göre %10,73 oranında fazla olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda katkısız numune ile %1,5 oranında nanokil takviyesi yapılmış numunenin oda sıcaklığında depolama modül değerlerinin çok yakın olduğu ve benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Yine de aralarında %0,066 oranında bir fark olduğu tespit edilmiştir. Tüm numunelerde sıcaklık artışı ile birlikte depolama modülünün düştüğü gözlemlenmiştir. 150°C sıcaklıkta katkısız, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında katkılı numunelerden elde edilen depolama modül değerleri sırasıyla; 1534 MPa, 2344 MPa, 1719 MPa ve 1198 MPa şeklinde olmuştur. Camsı geçişten sonra depolama modülündeki en az düşüş oranı %86 (16820 MPa → 2344 MPa) ile %0,5 oranında nanokil katkılı kompozit numunesinde gerçekleşmiştir. Kauçuk plato bölgesine en hızlı geçiş %1,5 oranında nanokil katkılı numunede görülmektedir. Camsı geçiş noktasından sonra depolama modülünün sabit bir genişlikte görüldüğü bölge kauçuk plato bölgesidir. Ayrıca DMA sonuçları çapraz bağ yoğunluğu hakkında fikir verebilmektedir. Kauçuk plato bölgesine en hızlı geçiş %1,5 oranında nanokil katkılı numunede grlmştir. Katkısız ve %1,5 oranında nanokil katkılı numunelerde en az depolama modülü düşüş oranı gerçekleştiği görülmektedir. Bu düşüş oranı çapraz bağ yoğunluğunun artması olarak açıklanmaktadır (nal vd., 2017). Polimerlerde kısmi bir çapraz bağlanma gerçekleşmişse, erimiş hali bir sıcaklık rampası testinde gzlemlenmeyecektir. Camsı geçiş sıcaklığından sonra, kauçuksu plato alanı, polimer ayrışmaya başlayanaya kadar daha yüksek sıcaklıklara kadar uzayacaktır. Depolama modülü, çapraz bağlanma olmaksızın polimerin normal erimiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda kayıp modülünden daha büyük kalmaktadır (TA Instruments, 2018). Bu durum sadece %0,5 katkılı numunede gerçekleşmiştir. Bu nedenle bu numunede çapraz bağ yoğunluğunun diğer numunelere göre daha yoğun gerçekleştiği değerlendirilmiştir. Katkısız ve %0,5, %1, %1,5 oranlarındaki nanokil katkılı kompozit numunelerinin, DMA sonucunda elde edilen kayıp modülünün sıcaklıkla değişimi grafiği Şekil 6.23'te belirtilmektedir.



Şekil 6.23 Farklı oranlarda nanokil katkıli numunelerin kayıp modülü- sıcaklık grafiği

Numunelerin kayıp modülü (E'') ve sıcaklık grafiği incelendiğinde ilk olarak camı geçişin başladığı sıcaklıktan itibaren, kompozit numunelere nanokil ilavesinin kayıp modülünü artırdığı görülmektedir. Başlangıç sıcaklığında katkısız (pure) numune en yüksek kayıp modülüne sahiptir. Katkısız numunede kayıp modülü 1934 MPa olarak elde edilmiştir. Nanokil ilavesi ile birlikte maksimum kayıp modülü, 2139 MPa değeri ile %1,5 oranındaki nanokil katkıli kompozitten elde edilmiştir. Camı ısı geçiş sıcaklığı sonrası kauçuk bölgede katkısız ve %1,5 oranında nanokil katkıli numunenin düşüş hızı benzer şekilde ilerlemektedir. Benzer bir durum depolama modülü diyagramında da görülmektedir. %0,5 nanokil katkıli numuneden 2030 MPa değerinde kayıp modülü elde edilirken, %1 nanokil katkıli numuneden ise 2044 MPa olarak elde edilmiştir. %1,5 oranında nanokil katkısı ile E'' tepe noktası sıcaklığı katkısız numuneye göre çok değişmezken, %0,5 ve %1 oranındaki nanokil katkısı E'' tepe noktasını sağ tarafa doğru kaydırmıştır. Bu tepki tepe noktası sıcaklığının artması ile sonuçlanmıştır. Camı geçiş sıcaklığı (t_g) tespitinin bir yöntemi olan E'' tepe noktası sıcaklığı ile camı geçiş sıcaklığı değerlendirilebilmektedir. Bu durumda; %0,5 oranında nanokil katkıli kompozit numuneden en yüksek camı geçiş sıcaklığı elde edildiği görülmektedir. Şekil 6.24'te ise numunelerden elde edilen $\tan(\delta)$ grafikleri verilmiştir.

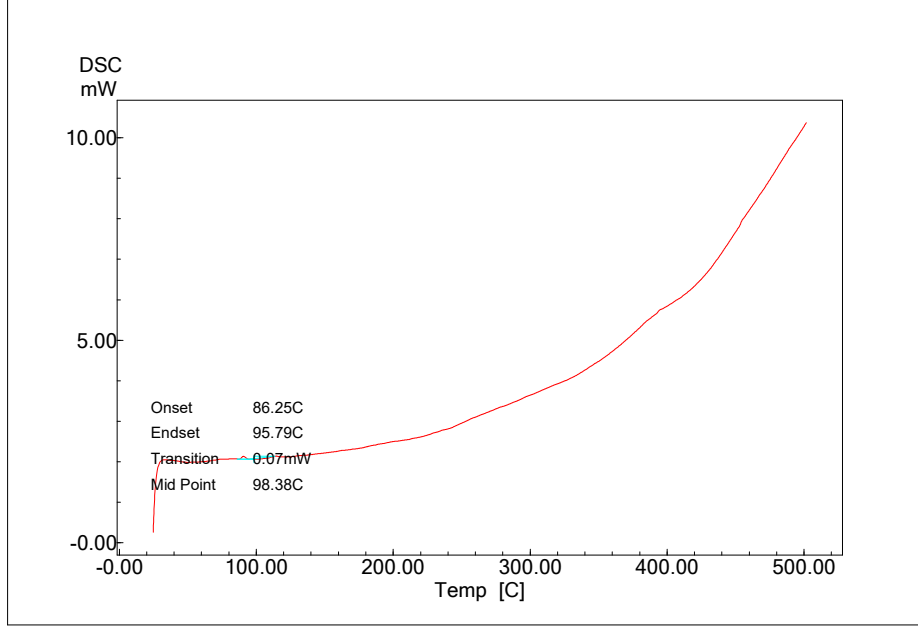


Şekil 6.24 Farklı oranlarda nanokil katkılı numunelerin tan(δ)- sıcaklık grafiği

Camsı geçiş sıcaklığı en yaygın DMA sonuçlarından elde edilen tan (δ) değerinin maksimum yani tepe noktası sıcaklığı olarak alınmaktadır. Nanokil ilavesi tüm numunelerde t_g değerini artırmıştır. Katkısız numunede 104,62°C olan camsı geçiş sıcaklığı, %0,5 ve %1 oranlarındaki nanokil katkılı numunelerde sırasıyla 115,92°C ve 111,31°C olarak elde edilmiştir. Nanokil ilave oranı arttıkça camsı geçiş daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. En yüksek ilave oranı olan %1,5 nanokil katkılı numunede, t_g değeri 105,94°C olarak gerçekleşmiştir. Camsı geçiş sıcaklığının artması, molekül hareketliliğinin sıcaklığa bağlı olarak daha geç gerçekleşmesi olarak değerlendirilmektedir. Tan (δ) grafiği aynı zamanda malzemenin elastik özelliklerini kaybettiği anlamını taşımaktadır. Sıcaklık arttıkça polimer zincirlerin hareketliliği artmaktadır. Viskoelastisite özelliğinin ölçüsü olan tan (δ) değeri ne kadar yüksekse, bu malzemenin yüksek derecede viskoelastik olduğu anlamına gelmektedir. Tan (δ) değeri ne kadar yüksekse çapraz bağlanma yoğunluğu o kadar yüksek olmaktadır (Keskin, 2019).

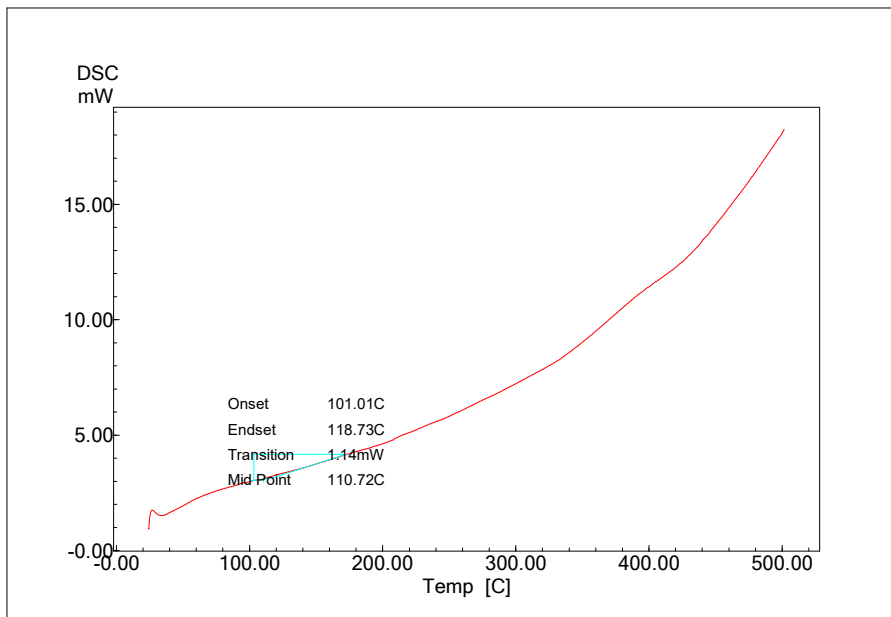
6.8 Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analiz Sonuçları

DSC analizi ile numunelerin camsı geçiş sıcaklıkları (t_g) belirlenmiştir. Bu analiz sıcaklığın 500°C 'ye kadar, dakikada 10°C sıcaklık artırımını ile yapılmıştır. Şekil 6.25'te katkısız numunenin DSC grafiği gösterilmiştir.



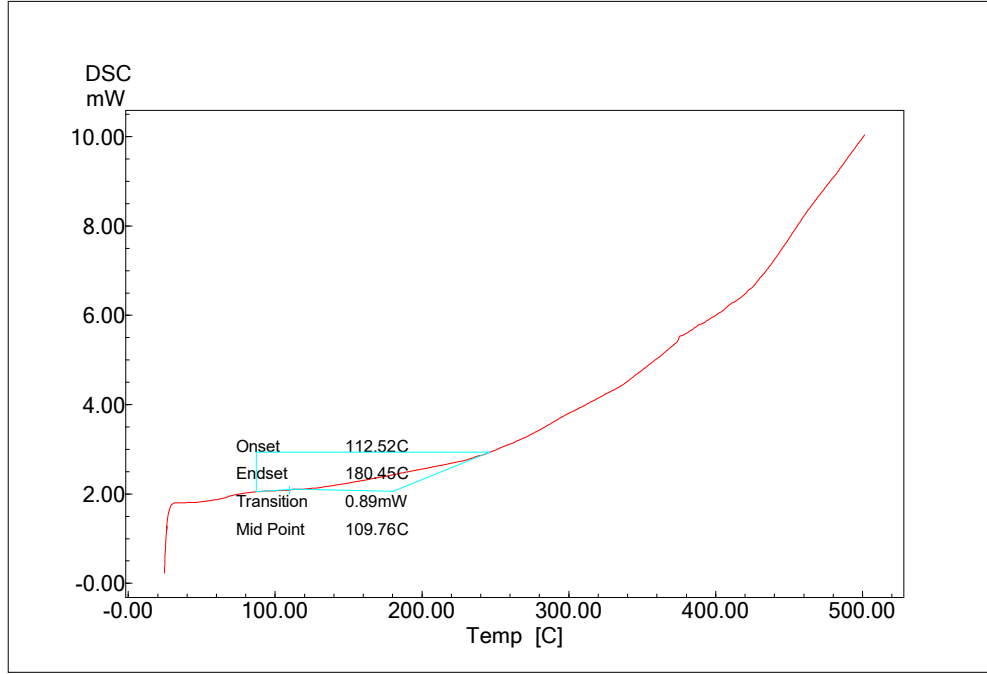
Şekil 6.25 Katkısız numunenin DSC analizi grafiği

Ağırlıkça %0,5 nanokil katkı oranına sahip numunenin DSC grafiği Şekil 6.26'da verilmiştir.



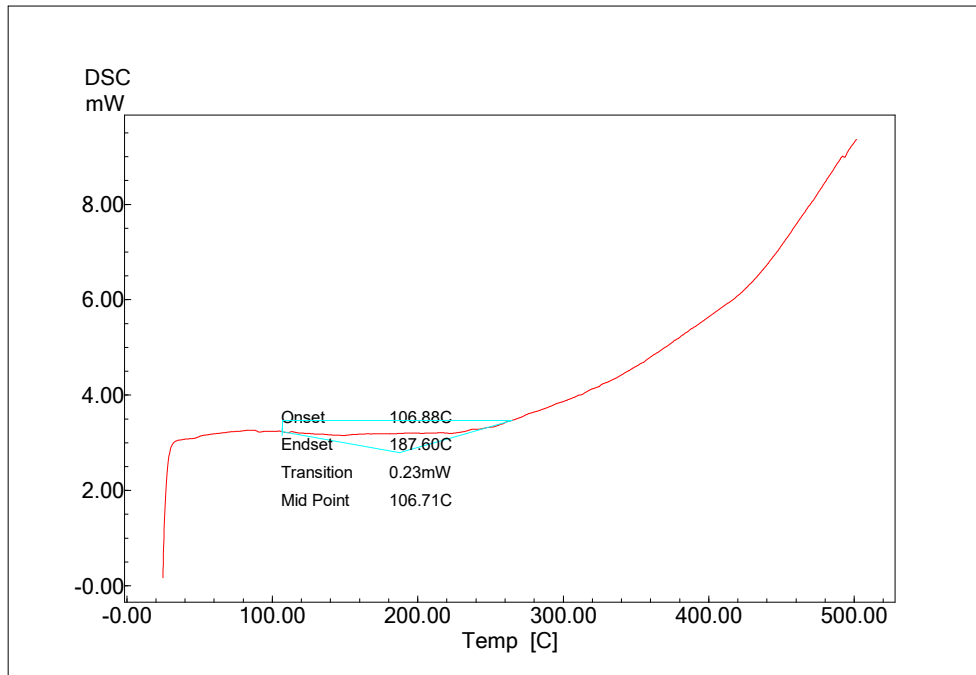
Şekil 6.26 %0,5 oranında kil katkılı numunenin DSC analizi grafiği

Ağırlıkça %1 nanokil katkı oranına sahip numunenin DSC analizi ise Şekil 6.27’de belirtilmektedir.



Şekil 6.27 %1 oranında kil katkılı numunenin DSC analizi grafiği

Ağırlıkça %1,5 nanokil katkı oranına sahip numunenin DSC analizi ise Şekil 6.28’de belirtilmektedir.



Şekil 6.28 %1,5 oranında kil katkılı numunenin DSC analizi grafiği

Tablo 6.4'te ise her bir numune için, DSC analizleri sonucunda elde edilen, camsı geçiş sıcaklıkları belirtilmektedir.

Tablo 6.4 DSC ile elde edilen t_g değerleri

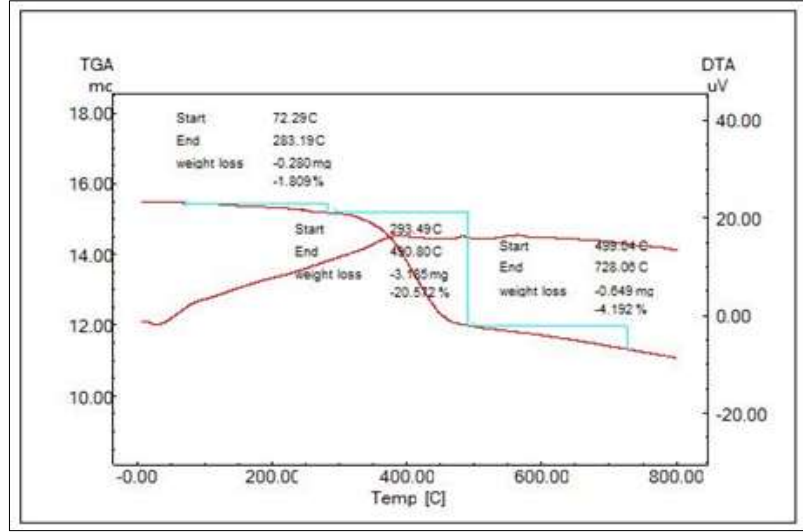
Numune tipi	Camsı geçiş sıcaklığı (t_g) (°C)
Katkısız	98,38
%0,5 Nanokil katkılı	110,72
%1 Nanokil katkılı	109,76
%1,5 Nanokil katkılı	106,71

Nanokilin camsı geçiş sıcaklıklarına olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir. Nanokil katılmış numunelerden elde edilen t_g sıcaklıkları, katkısız numunenin camsı geçiş sıcaklığından daha yüksek elde edilmiştir. En yüksek t_g sıcaklığı %0,5 oranında nanokil katılmış numuneden elde edilmiştir. Katkısız numuneden elde edilen t_g sıcaklığının; %0,5, %1 ve %1,5 oranlarındaki nanokil katkılı numunelerden elde edilen t_g sıcaklıklarına göre sırasıyla %12,54, %11,57 ve %8,47 oranlarında daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca DSC ile elde edilen t_g sıcaklık değerlerinin, DMA analizlerinde elde edilen t_g sıcaklıkları ile orantılı olduğu tespit edilmiştir.

6.9 Termogravimetrik Analiz Sonuçları (TGA)

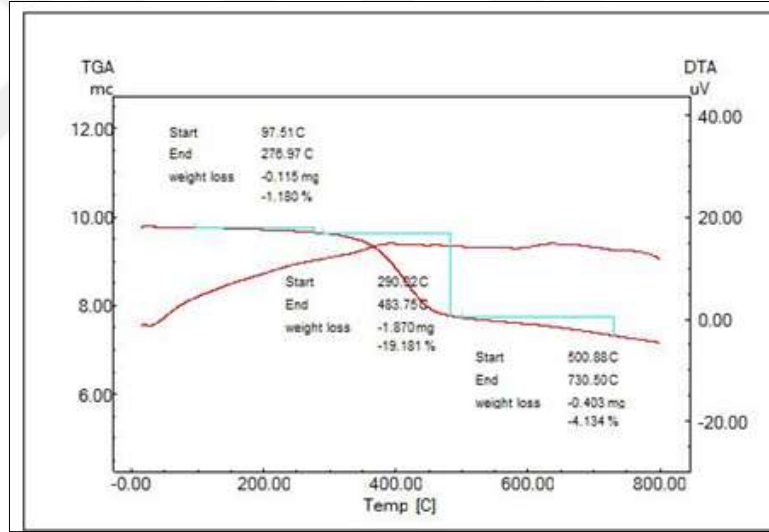
Numuneler üzerinde yapılan test sonucu elde edilen TGA sonuçları, Şekil 6.29 ile Şekil 6.32 aralığındaki grafiklerle belirtilmiştir. Bu grafikler, her numuneye ait sıcaklık aralığındaki ağırlık değişimini göstermektedir (Bkz. Şekil 6.29, Şekil 6.30, Şekil 6.31, Şekil 6.32). Bu ağırlık değişimleri 3 bölgede incelenmiştir. I. bölge, ağırlık değişiminin fazla gerçekleşmediği başlangıç bölgesidir. Bu bölgede, numunelerde nem, su ve uçucu madde kaybı gerçekleşmiştir. II. bölge, kauçuksu bölge diye adlandırdığımız en fazla ağırlık kaybının gerçekleştiği bölgedir. Bu bölgede tek aşamalı bir ayrışma gerçekleşmektedir (Moyo vd., 2021). III. bölge ise sıcaklığın arttığı ancak ağırlık değişimlerinin azaldığı ve stabil hale gelmeye başladığı bölge olarak incelenmiştir.



Şekil 6.29 Katkısız numunenin sıcaklık aralıklarına göre ağırlık değişim yüzdeleri

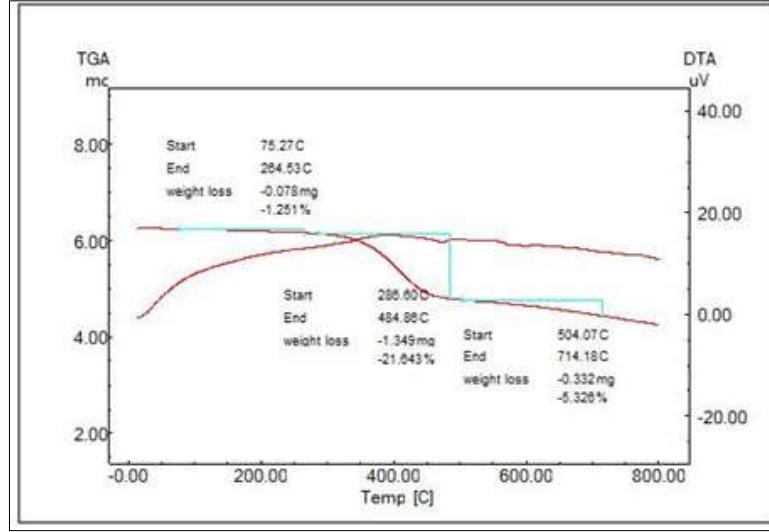
Şekil 6.29’da katkısız numunenin bölgelere göre ağırlık değişimi yüzdeleri verilmiştir.

II. Bölgede %20,572 oranında bir ağırlık kaybı olduğu tespit edilmiştir.



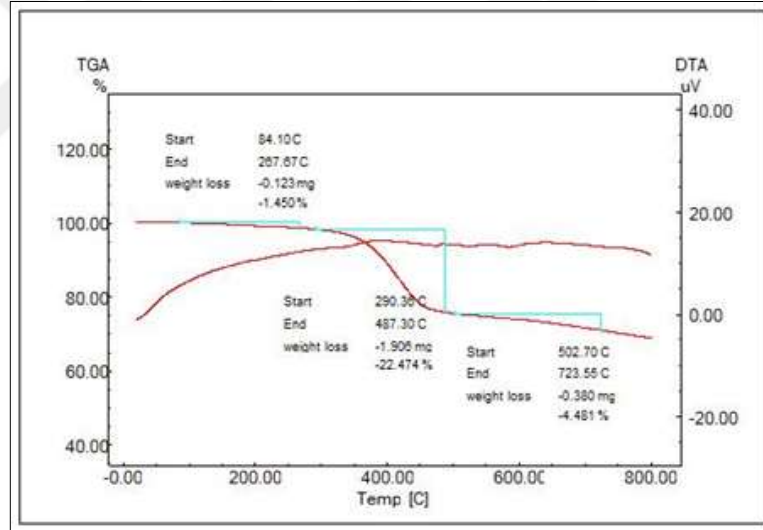
Şekil 6.30 %0,5 katkılı numunenin sıcaklık aralıklarına göre ağırlık değişim yüzdeleri

Şekil 6.30’a bakıldığında, ağırlık değişim yüzdesi %19,181 oranı ile daha düşük elde edilen %0,5 katkılı numune olmuştur.



Şekil 6.31 %1 katkılı numunenin sıcaklık aralıklarına göre ağırlık değişim yüzdeleri

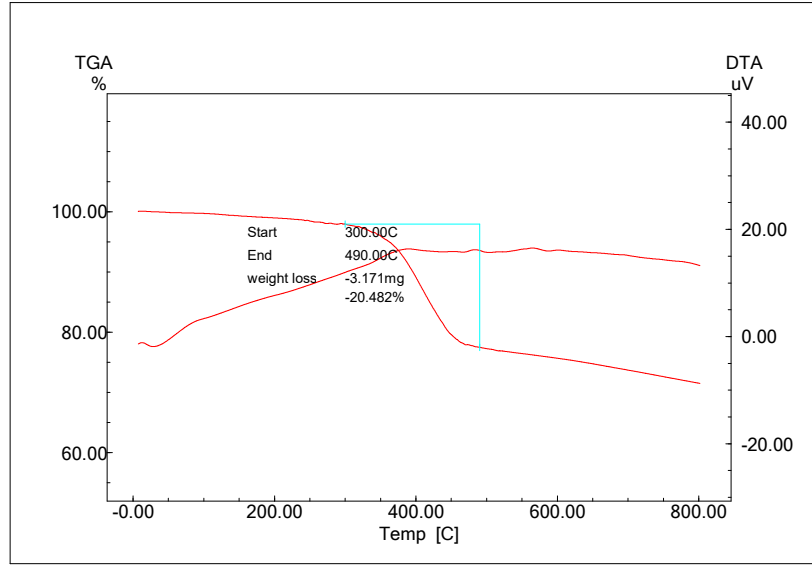
Şekil 6.31 incelendiğinde %1 nanokil ilavesinin sıcaklıkla ağırlık değişimi yüzdesi, II. Bölgede %21,643 oranında gerçekleşmiştir.



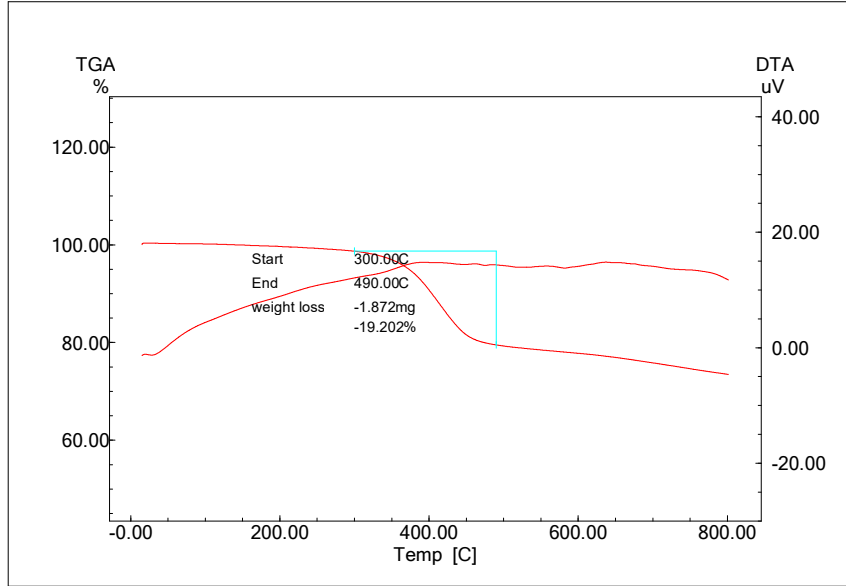
Şekil 6.32 %1,5 katkılı numunenin sıcaklık aralıklarına göre ağırlık değişim yüzdeleri

Şekil 6.32'de ise %1,5 nanokil katkılı numunede %22,474 oranında ağırlık kaybı olduğu tespit edilmiştir. En fazla kayıp bu oranda elde edilmiştir.

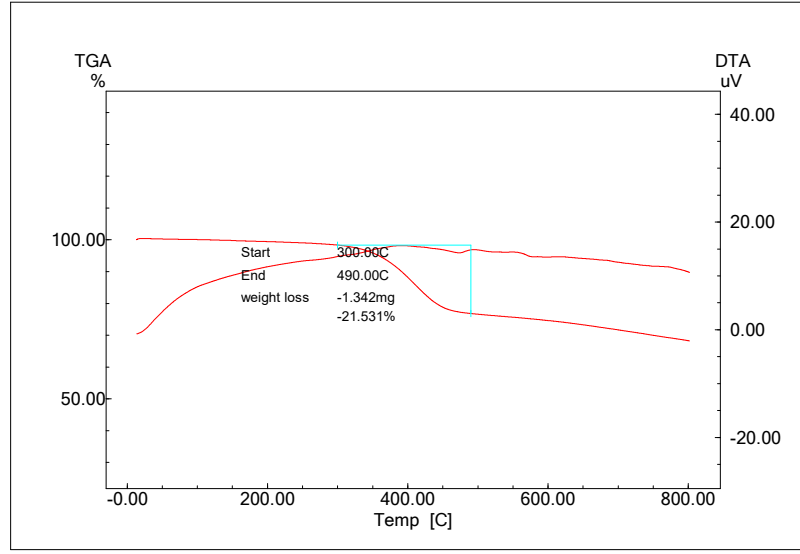
Ayrıca 300°C ile 490°C sıcaklık aralığı sabit alınarak elde edilen ağırlık değişimi yüzdeleri ve ağırlık kayıp miktarları Şekil 6.33 ile Şekil 6.36 arası grafiklerde belirtilmiştir.



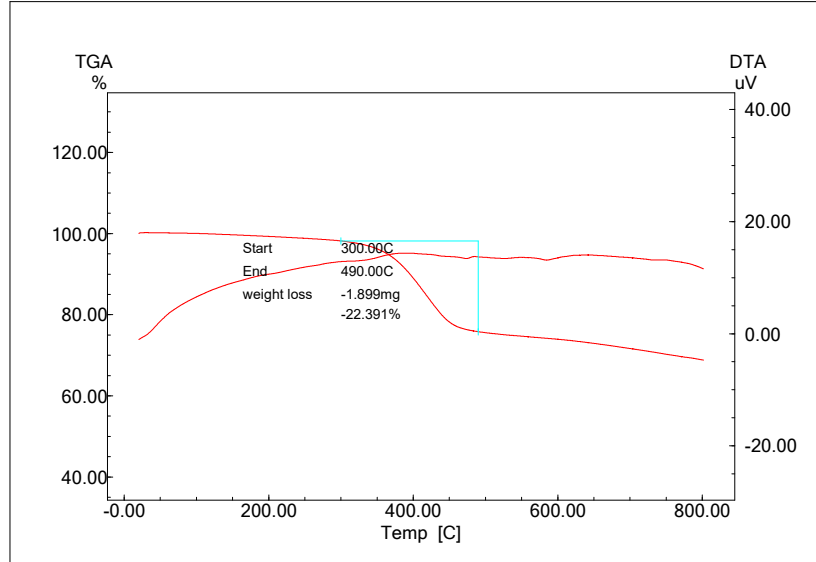
Şekil 6.33 Katkısız numunenin sabit sıcaklık aralığına göre TGA grafiği



Şekil 6.34 %0,5 katkılı numunenin sabit sıcaklık aralığına göre TGA grafiği



Şekil 6.35 %1 katkılı numunenin sabit sıcaklık aralığına göre TGA grafiği



Şekil 6.36 %1,5 katkılı numunenin sabit sıcaklık aralığına göre TGA grafiği

Belirlenen bu sabit sıcaklıkta numunelerin Termogravimetrik analizi sonucunda bulunan ağırlık kaybı değerleri Tablo 6.5’te verilmiştir.

Tablo 6.5 Numunelerin TGA değerleri

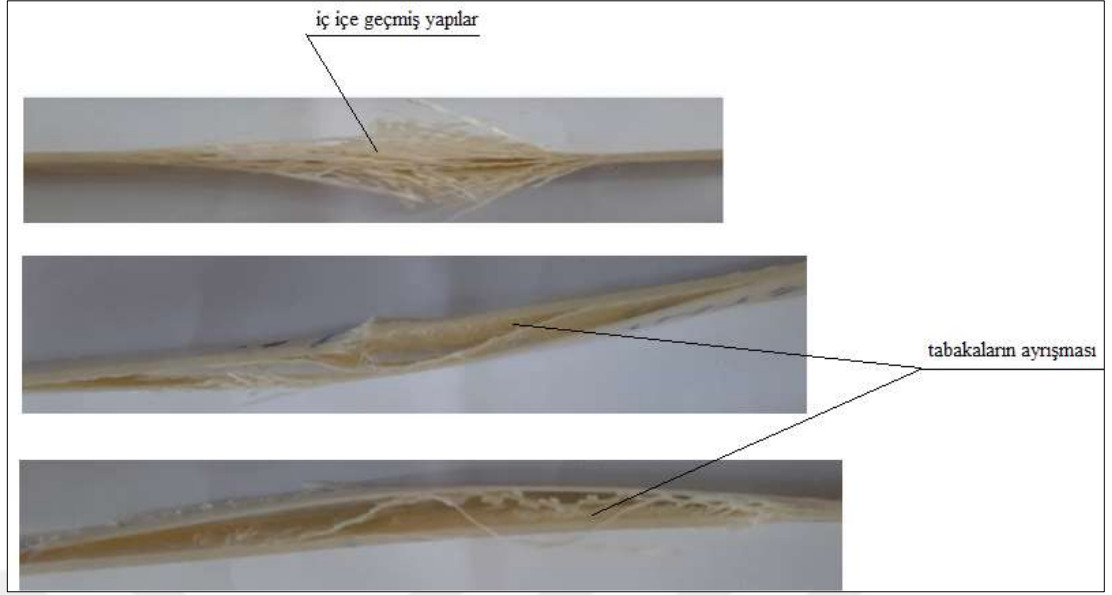
Numune tipi	Ağırlık kaybı (Mg / %)
Katkısız	-3,171 / 20,482
%0,5 Nanokil katkılı	-1,872 / 19,202
%1 Nanokil katkılı	-1,342 / 21,531
%1,5 Nanokil katkılı	-1,899 / 22,391

Sabit sıcaklık aralığında ve üç bölgeye ayrılmış halde yapılan analiz sonuçlarında da en fazla ağırlık kaybı yüzdesinin %1,5 katkılı numunede gerçekleştiği görülmüştür. Tablo 6.5'te görüldüğü gibi daha sonra katkısız numune ağırlıkça en fazla kayba uğrayan numune olmuştur. Katkısız numune, en az ağırlık kaybeden %1 katkılı numuneye göre %136,29 oranında daha fazla ağırlık kaybetmiştir. %1 nanokil katkılı numunenin en düşük ağırlık miktarı gerçekleştirmesi, nanokil moleküllerinin amorflaşması ile açıklanabilmektedir. Sıcaklıkla birlikte molekül hareketliliğinin artması, nanokil yapılarının molekül bağları geliştirmesini sağlamaktadır (Kaştan, 2015). Bu hareketlilik polimer yapılarda hacim genişlemesine sebep olmaktadır. %1 nanokil takviyesinin ağırlık kaybının az, ağırlık değişim yüzdesinin fazla olması bu hacimsel artışla açıklanabilmektedir. Diğer yandan %0,5 katkılı numune ağırlık değişim yüzdesi en az olan numunedir. Camsı geçiş sıcaklığı dikkate alındığında, kütle kaybının başlaması bu numunede daha yüksek sıcaklıkta gerçekleşmesinin beklenen bir durum olduğu anlaşılmaktadır. %0,5 ile %1,5 oranında nanokil ilavesinin ağırlık kayıp miktarları çok yakın değerler olarak görülmektedir.

TGA sonuçlarında katkısız numuneye göre tüm oranlardaki nanokil katkısının daha yüksek sıcaklıklarda ağırlık değişimine başladığı görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde bu değişimin en hızlı gerçekleştiği sıcaklık aralığı camsı geçiş sıcaklığı ile birlikte başlamıştır (II. Bölge). Katkılı numunelerin camsı bölgede davranışları, katkısız numuneye göre kütle değişimlerinin sıcaklık artışıyla daha yavaş olması nanokil katkısının bozunma sıcaklığına iyileştirici etkisi olarak açıklayabiliriz. Benzer sonuç, Zawawi vd., (2021) tarafından yapılan çalışmada da görülmüştür.

6.10 Hasar Tipleri Açısından Değerlendirme

Çalışmamızda numuneler çekme testine tabi tutulduktan sonra, elde edilen hasar tipleri değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan değerlendirmede özellikle nanokil oranı arttığı zaman numunede meydana gelen hasar tipinde değişiklik olduğu gözlemlenmiştir. Nanokil oranı %1,5 olan numunelerde bu değişiklik gözlemlendiği için Şekil 6.37'de bu orana ait her üç numunenin fotoğrafları verilmiştir. %1,5 nanokil katkılı bu numunelerde elde edilen hasar tiplerine baktığımız zaman; özellikle tabakalar arası ayrışma ve fazları ayrışmış yapı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.37 %1,5 nanokil katkılı numunelerden elde edilen hasar tipleri

%1,5 oranındaki numunelerin çekme testi sonucu elde edilen değerlerin, %1 oranına sahip numunelerden daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum %1,5 nanokil oranına sahip numunede meydana gelen hasar tiplerini göz önüne aldığımızda birbiri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Nachikethas ve Manoj (2013), yaptıkları çalışmalarında kil oranı arttığı zaman pul pul dökülme olduğunu belirtmişlerdir. Bunun nedenini, kil yüklemesinde yüksek kil konsantrasyonu ve nispeten daha yüksek kil aglomerasyonu olarak belirtmişler. Aynı zamanda kil içeriği arttıkça sistemin viskozitesinin artması ve numune hazırlama sırasında hava kabarcıklarının tutulması nedeniyle heterojenlik ve nano-boşluk oluşumuna neden olmasından dolayı pul pul döküldüğünü tespit ettiklerini belirtmişlerdir. Bu anlamda elde ettiğimiz hasar tipinin literatür ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, polimer epoksi reçineye ağırlığınca %0,5, %1, %1,5 oranlarında nanokil takviye edilerek nanokompozitler üretilmiştir. Takviye elemanı olarak cam fiber elyaflar kullanılmıştır. Nanokil, erimiş polimere ultrasonikasyon cihazı ile karıştırılarak takviye edilip, elle yatırma yöntemi ile tabakalar üretilmiştir. Üretilen kompozit tabakalarına kürleşme işlemi uygulanmış ve daha sonrada mekanik özelliklerin deneysel tespiti için ASTM standartlarına göre numuneler boyutlandırılmıştır. Nanokil katkısının; mekanik özellikler üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Aynı zamanda DMA, TGA ve DSC analizleri gerçekleştirilerek nanokilin, cam fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeler üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

1. Her orandaki nanokil katkısı, katkısız numuneye göre çekme dayanımını artırmıştır. Fakat bu artış nanokil oranının artması ile aynı doğrultuda gerçekleşmemiştir.
2. %1 oranında nanokil takviyesi diğer oranlara göre en yüksek çekme dayanımını sağlamıştır. %1,5 nanokil takviyesinden elde edilen çekme dayanımı, %1 nanokil takviyesinden elde edilen çekme dayanımına göre %7,11 oranında düşük elde edilmiştir.
3. Tüm oranlardaki nanokil katkısı elastisite modülünü artırmıştır. Elastisite modülünde en az etki %0,5 nanokil katkılı kompozit numunelerden elde edilmiştir.
4. Basma kuvveti altında en yüksek dayanım %1 nanokil katkılı numunelerden elde edilmiştir. Katkısız numuneye kıyaslandığında %1 katkı oranlı numuneler, çekme dayanımında daha yüksek oranda bir iyileştirme sağlamıştır. Ancak %0,5 ve %1,5 oranlarındaki nanokil katkısı basma dayanımlarını düşürmüştür.
5. Yapılan testler sonucunda elde edilen değerlere bakıldığında %1 oranında nanokil katkısı, çekme dayanımı, basma dayanımı, kayma dayanımı, elastisite ve kayma modüllerinde olumlu bir etki yaratmıştır.
6. Nanokilin moleküler hareketliliği artırmasından kaynaklı Dinamik Mekanik analiz (DMA) ile elde edilen camsı geçiş sıcaklıklarında (t_g), tüm katkı oranlarında artış elde edilmiştir. Katkısız numuneye göre t_g değerlerinde %0,5,

%1, %1,5 oranlarında nanokil katkısıyla sırasıyla %11,40, %10,76 ve %1,9'luk artış oranları gerçekleşmiştir.

7. DMA grafiklerinde görülen diğer bir veri, nanokil katkısının $\tan(\delta)$ değerini yükseltmesi olmuştur. Viskoelastik davranışın ölçüsü olan bu değer ile nanokilin kompozit malzemelerin viskoelastik özelliklerini artırdığını göstermektedir.
8. DMA sonuçlarında malzemenin enerji depolama yeteneği olan depolama modülünün (E') oda sıcaklığındaki değeri, katkısız numuneye göre %0,5 ve %1 oranındaki nanokil ilavesiyle sırasıyla %10,73 ve %7,49 oranında artarken, %1,5 oranında nanokil katkısıyla %0,06 oranında düştüğü görülmüştür.
9. DMA verilerinde, sıcaklıkla birlikte molekül hareketliliğin artması sonucunda harcanan enerji miktarı artmıştır. Bu nedenle camsı geçiş sıcaklığında kayıp modülünün (E'') her numunede maksimum değerine ulaştığı görülmüştür. Tüm oranlardaki nanokil ilavesi bu sıcaklıktaki kayıp modülü değerini katkısız numuneye göre artırmıştır.
10. Dinamik Mekanik Analiz (DMA) ile elde edilen camsı geçiş sıcaklık değerleri ile DSC analizi ile elde edilen camsı geçiş sıcaklık değerleri arasında orantılı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.
11. TGA'dan elde edilen verilerde, sıcaklıkla ağırlık değişiminin, nanokil katkısıyla arttığı, bozunma sıcaklıklarını yükselttiği elde edilmiştir.
12. Nanokil oranı arttığı zaman hasar tipinde tabakalar arası ayrışma/ fazları ayrışmış yapı elde edilmiştir.

Bu sonuçlar ışığında nanokilin mekanik ve termal özellikleri iyileştirdiği görülmüştür. En verimli sonuçlar %1 oranındaki nanokil katkısıyla elde edilen numunelerden alınmıştır. Sıcaklık artışı ile iyileşen özellikler, nanokillerin yüksek ısı dayanımı özellikleri ile uyumaktadır. Bu anlamda, gelişen nanokompozit endüstrisinde, nanokiller ambalaj ve paketleme sanayisinde kullanılarak, bu gelişimdeki yerini alabilir.

Ayrıca literatürde sıklıkla mekanik özelliklerinin incelendiği nanokompozitlerin, çevresel şartlar altındaki davranışlarının incelenmesi yönündeki çalışmaların yapılması araştırmacılara önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akçay, D. (2006). Poli (metil metakrilat) /bentonit nanokompozitin kütle polimerizasyonu yöntemiyle sentezlenmesi ve karakterizasyonu. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Albayrak Arı, G. (2009). Polimer nanokompozitlerin özelliklerine değişik nanopartiküllerin etkisinin incelenmesi. (Yayınlanmış Doktora Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Amorf Yapı. (2020). *Amorf Yapı*. <https://tinyurl.com/mp6p7wx5>. (Erişim Tarihi: 13 Mayıs 2022)
- Armstrong, G. (2015). An Introduction to Polymer Nanocomposites. *European Journal of Physics*, 36(6), 063001.
- Awan, M. O., vd., (2021). Development of HDPE composites with improved mechanical properties using calcium carbonate and NanoClay. *Physica B: Condensed Matter*, 606, 412568.
- Basara, C., vd., (2005). Synthesis and characterization of epoxy based nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 98(3), 1081-1086.
- Bağcı, İ. (2006). Epoksi reçinesi ile nanokompozit sentezi (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bagci, M., vd., (2020). The effect of nanoclay particles on the incubation period in solid particle erosion of glass fibre/epoxy nanocomposites. *Wear*, 444, 203159.
- Beesetty, P., vd., (2020). Mechanical behavior of additively manufactured nanoclay/HDPE nanocomposites. *Composite Structures*, 247, 112442.
- Bertolini, A. ve Dufrense, A., vd., (2009). Starch-based nanocomposites., *Starches: Characterization, Properties, and Applications* (s. 205-252). ABD: CRC Press
- Casari, W. (2000). Nanocomposites of polymers and metals or semiconductors: Historical background and optical properties. *Macromolecular Rapid Communications*, 21(11), 705-722.
- Chen, Z., vd., (2021). Different-structured nanoclays incorporated composites: Computational and experimental analysis on mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 203, 108612.
- Doğan, K. (2018). Karbon nano tüp ve grafen nano partikül katkılı fenolik reçine matrisli nanokompozitlerin üretimi (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Dorigato, A. ve Pegoretti, A. (2012). Development and thermo-mechanical behavior of nanocomposite epoxy adhesives. *Polymers for Advanced Technologies*, 23(3), 660-668.
- Ege Üniversitesi, Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi(MATAL), Diferansiyel Taramalı Kalorimetri [PDF belgesi]. Mart 2022 tarihinde https://egematal.ege.edu.tr/files/egematal/icerik/20170209_dsc.pdf adresinden erişildi.

- Edwards, E., vd., (2017). Overview of Nanotechnology in Military and Aerospace Applications. T. O. Mensah, vd., (Ed.), *Nanotechnology Commercialization: Manufacturing Processes and Products* (s. 133-176). ABD: John Wiley & Sons.
- Firdosh, S., vd., (2015). Durability of GFRP nanocomposites subjected to hygrothermal ageing. *Composites Part B: Engineering*, 69, 443-451.
- García del Cid, M. A., vd., (2014). Influence of different organoclays on the curing, morphology, and dynamic mechanical properties of an epoxy adhesive. *The Journal of Adhesion*, 90(10), 817-834.
- Gudapati, S. K., vd., (2020). Influence of nanoclay on thermal properties of wild cane grass fiber reinforced polyester composites. *Materials Today: Proceedings*, 23, 632-636.
- Guo, D., vd., (2014). Mechanical properties of nanoparticles: basics and applications. *Journal of physics D: Applied Physics*, 47(1), 013001.
- Hubbe, M., vd., (2008). Cellulosic Nanocomposites: A Review. *BioResources*.3(3), 929-980.
- Ilyin, S. O., vd., (2015). Epoxy reinforcement with silicate particles: Rheological and adhesive properties Part I: Characterization of composites with natural and organically modified montmorillonites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 61, 127-136.
- Işık, A. (2008). Kompozit malzemedeki imal edilmiş bir takviye elemanın eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Janardhnan, S., ve Sain, M. (2011). Isolation Of Cellulose Nanofibers: Effect Of Biotreatment On Hydrogen Bonding Network In Wood Fibers. *International Journal of Polymer Science*, 2011, 46-51.
- Jeyakumar, R., vd., (2021). Mechanical and wear characteristics of glass fiber reinforced modified epoxy nano composites—A review. *Materials Today: Proceedings*, 37, 901-907.
- Jojibabu, P., vd., (2020). A review of research advances in epoxy-based nanocomposites as adhesive materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 96, 102454.
- Kaştan, A. (2015). Pa 6/ Pe / Nano-kil kompozitlerin özelliklerinin incelenmesi. (Yayınlanmış Doktora Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Kalemtaş, A. (2015). Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler. *Putech & Composites*. 2015, 21-26.
- Keskin, M., A., (2019). *Naylon 6.6 Nanoelyaf İle Takviye Edilmiş Epoksi Nano Kompozitlerin Üretimi Ve Dinamik Mekanik Analizi (Dma)*. (Yayınlanmış Yüksek Lisans tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.

- Kim, T., H., vd., (2002). Synthesis and Rheology of Intercalated Polystyrene/ Na⁺ - Montmorillonite Nanocomposites. *Macromolecular Rapid Communications*, 23(3), 191-195.
- Khan, S. U., vd., (2010). Fatigue damage behaviors of carbon fiber-reinforced epoxy composites containing nanoclay. *Composites Science and Technology*, 70(14), 2077-2085.
- Khalili, S. M., vd., (2010). Mechanical properties of nanoclay reinforced epoxy adhesive bonded joints made with composite materials. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24(11-12), 1917-1928.
- Kompozit Malzemelerin Tarihi. (2013). *History of Composite Materials*. <https://tinyurl.com/2p9fyajw>. (Erişim tarihi: 25 Mayıs 2022)
- Kompozitlerin Tarihi. (2015). *History of Composites*. <https://tinyurl.com/3yjs56rv>. (Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2022)
- Kumar, S. R. ve Madara, S. R. (2020). Vibration–Impact study on AlMg4. 5Mn reinforced nanoclay composites. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1140-1143.
- Kundu, K., vd., (2021). Composite nanoclay-hydroxyapatite-polymer fiber scaffolds for bone tissue engineering manufactured using pressurized gyration. *Composites Science and Technology*, 202, 108598.
- Lakshmi, M. S., vd., (2008). Enhanced thermal stability and structural characteristics of different MMT-Clay/epoxy-nanocomposite materials. *Polymer Degradation and Stability*, 93(1), 201-213.
- Li, S., vd., (2010). Nanocomposites Of Polymer And Inorganic Nanoparticles For Optical And Magnetic Applications. *Nano Reviews*. 1 (1), 5214.
- Majeed, K., vd., (2013). Potential Materials For Food Packaging From Nanoclay/Natural Fibres Filled Hybrid Composites. *Materials & Design*, 46, 391-410.
- Moyo, M., vd., (2021). Thermo-mechanical response of kenaf/PLA biocomposites to clay nanoparticles infusion. *Materials Today: Proceedings*, 38, 609-613.
- Muralishwara, K., vd., (2021). Surface properties of epoxy clay nanocomposite coating. *Materials Today: Proceedings*, 38, 2725-2731.
- Nachikethas, K. K. ve Manoj, P. J. (2013). Mechanical and adhesive performance of nanoclay reinforced epoxy resin. In Proceedings of international conference on materials for the future - innovative materials, processes, products and applications. *ICMF*, 2013 165-173.
- Nayak, B. A., vd., (2020). Effect of nanosilica and nanoclay reinforcement on flexural and thermal properties of glass fiber/epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5098-5102.
- Ngo, T., D., (2020). Introduction to composite materials. *Composite and Nanocomposite Materials From Knowledge to Industrial Applications*. BoD-Books on Demand.
- Okada, A. ve Usuki, A. (2006). Twenty Years of Polymer-Clay Nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 291 (12), 1449-1476.

- Öner, G., vd., (2017). Karbon Nanotüp Katkılı Camlifi-Epoksi Kompozitlerin Termal Ve Eğilme Özelliklerinin Araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(4), 805-816.
- Öner, G., vd., (2018). Mechanical performance of hybrid carbon/fiberglass composite laminates reinforced with nanoclay. *Acta Phys. Pol. A*, 134, 164-167.
- Pal, A. K., vd., (2020). Reactive extrusion of sustainable PHBV/PBAT-based nanocomposite films with organically modified nanoclay for packaging applications: compression moulding vs. cast film extrusion. *Composites Part B: Engineering*, 198, 108141.
- Panda, B., vd., (2020). Investigation of the properties of alkali-activated slag mixes involving the use of nanoclay and nucleation seeds for 3D printing. *Composites Part B: Engineering*, 186, 107826.
- Terzioğlu, P., ve Kalemtaş, A. (2017). Kemik Doku Mühendisliği Uygulamaları için Polilaktik Asit-Hidroksiapatit Kompozitler. *Putech and Composites*.2017, (20-28)
- Pradhan, S. (2013). *Comparative analysis of Silver Nanoparticles prepared from Different Plant extracts (Hibiscus rosa sinensis, Moringa oleifera, Acorus calamus, Cucurbita maxima, Azadirachta indica) through green synthesis method*. (Yayınlanmış Doktora tezi). Department of Life Science, National Institute of Technology, Rourkela
- Roco, M. C., (2017). Overview: Affirmation of Nanotechnology between 2000 and 2030. T. O. Mensah, vd., (Ed.), *Nanotechnology Commercialization: Manufacturing Processes and Products* (s. 1-23). ABD: John Wiley & Sons.
- Sancaktar, E. ve Kuznicki, J. (2011). Nanocomposite adhesives: mechanical behavior with nanoclay. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(5), 286-300.
- Sapiai, N., vd., (2021). Mechanical properties of nanoclay-filled kenaf and hybrid glass/kenaf fiber composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1787-1791.
- Sayman, O. 2007. Kampozit Malzemeler Ders Notlar. D.E.Ü. Makine Mühendisliği Bölümü.
- Sen, B., vd., (2020). A study of the effect of carbon nanotube/nanoclay binary nanoparticle reinforcement on glass fibre/epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2026-2031.
- Sepet, H. (2014). Nano-partikül takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen nanokompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması. (Yayınlanmış Yüksek lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Shelly, D., vd., (2018). Addition of nanomer clays to GFRPs for enhanced impact strength and fracture toughness. *Materials Research Express*, 5(10), 105013.
- Shelly, D., vd., (2021). Addition of compatibilized nanoclay and UHMWPE fibers to epoxy based GFRPs for improved mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 145, 106371.
- Shettar, M., vd., (2021). Study On Mechanical Properties And Water Uptake Of Polyester-Nanoclay Nanocomposite And Analysis Of Wear Property Using RSM. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 1618-1629.

- Şen, F., vd., (2010). Polimerik Nanokompozitler ve Kullanım Alanları. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 111-118.
- TA Instruments, Dynamic Mechanical Analysis Basic Theory & Applications Training [PDF belgesi]. Online Training. Mayıs 2020 tarihinde <https://www.tainstruments.com/online-training-course-downloads/> adresinden erişildi.
- Tarnavchyk, I., vd., (2009). Reactive Hydrogel Networks for the Fabrication of Metal Polymer Nanocomposites. *Macromolecular Rapid Communications*, 30(18), 1564-1569.
- Uzmanlar Kalibrasyon Merkezi. (2006). *Sertlik Ölçüm Cihazları Kalibrasyonu*. <https://www.ukm.com.tr/hizmetler/sertlik-olcum- cihazlari-kalibrasyonu.html> (Erişim tarihi: 7 Mart 2022)
- Ünal, H.Y. (2016). Nano takviyeli kompozit malzemelerde yorulma karakteristiğinin araştırılması. (Yayınlanmış Yüksek lisans Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Ünal, H., Y., vd., (2017). Comparison of the experimental mechanical properties and DMA measurement of nanoclay hybrid composites. *European Mechanical Science*, 2(1), 31-36.
- Zare, Y. ve Rhee, K. Y. (2020). Effects of critical interfacial shear modulus between polymer matrix and nanoclay on the effective interphase properties and tensile modulus of nanocomposites. *Construction and Building Materials*, 247, 118536.
- Zawawi, E. Z. E., vd., (2021). Effect of nanoclay on mechanical and morphological properties of poly (lactide) acid (PLA) and polypropylene (PP) blends. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1778-1782.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad

Bayram, Duygu

Web sayfası

-

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	2022
Lisans	Dicle Üniversitesi	2012
Lise	Van Atatürk Lisesi	2006

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2013-2014	METTA Müh. Müş. Tic. Ltd. Şti.	Proje Mühendisi
2015-2022	MMO Diyarbakır Şube	Şube Müdürü
2022-Devam ediyor	MMO İzmir Şube	Teknik Görevli

Yabancı Dil

İngilizce, orta düzey

Özel İlgiler

Müzik, Doğa Yürüyüşü, Ağaç ve Bahçe işleri, Kitap Okumak

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Duygu BAYRAM
Öğrenci No	188182204
Ana Bilim Dalı	Makine Mühendisliği
Program Türü	Proje <input type="checkbox"/> Yüksek Lisans <input checked="" type="checkbox"/> Doktora <input type="checkbox"/>
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	-
Tez Başlığı	Nanokil Katkılı Tabakalı Kompozit Levhaların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi
RAPOR BİLGİLERİ	
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası
Sayfa Sayısı	110
Raporlama Tarihi	16.06.2022
Benzerlik Oranı (%)	6

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 110 sayfalık kısmına ilişkin, 16/06/2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından turnitin isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %6 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

- Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç
Kaynaklar hariç
Alıntılar hariç/dâhil
Diğer (Her şey dâhil)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Benzerlik oranım üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Duygu BAYRAM

Tarih:16.06.2022

İmza:

Danışman Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN

İmza:

Tarih:16.06.2022

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Prof. Dr. Vedat ORUÇ

İmza:

Tarih:16.06.2022
