



**INTERPLY VE INTRAPLY HİBRİT
KOMPOZİTLERİN KARŞILAŞTIRMALI
MEKANİK VE DİNAMİK ANALİZİ**

Muhammet Raci AYDIN

Doktora Tezi

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı
Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU**

2019

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**INTERPLY VE INTRAPLY HİBRİT KOMPOZİTLERİN
KARŞILAŞTIRMALI MEKANİK VE DİNAMİK ANALİZİ**

Muhammet Raci AYDIN

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



TEZ ONAY FORMU

INTERPLY VE INTRAPLY HİBRİT KOMPOZİTLERİN KARŞILAŞTIRMALI
MEKANİK VE DİNAMİK ANALİZİ

Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU danışmanlığında, Muhammet Raci AYDIN tarafından hazırlanan bu çalışma, 23/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mustafa YAMAN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Rıza POLAT

İmza :

Üye : Doç. Dr. Fatih YILDIZ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **17/10** 2019 tarih ve **41/19** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma TÜBİTAK ve BAP Koordinasyon Birimi, TÜBİTAK 3001 ve BAP FDK projeleri kapsamında desteklenmiştir.

TÜBİTAK Proje No: 117M894

BAP Proje No: FDK-2017-6225

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

ÖZET

Doktora Tezi

INTERPLY VE INTRAPLY HİBRİT KOMPOZİTLERİN KARŞILAŞTIRMALI MEKANİK VE DİNAMİK ANALİZİ

Muhammet Raci AYDIN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

Özellikle havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan tabakalı kompozit yapılar, çalışma ortamları gereği dinamik yüklere maruz kalmaktadırlar. Bu dinamik yükler, zamana bağlı değişken genlikli gerilmeler ve titreşimler oluşturarak kompozit yapıların kullanım ömürlerini azaltmaktadır. Bu durum, elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapıların emniyetli kullanımı açısından üstesinden gelinmesi gereken ciddi bir problemdir. Bu sorunun giderilmesi için hibrit kompozit yapıların kullanılması düşünülmüştür. Aynı tabaka sayısı, elyaf yönlenme açısı ve elyaf içeriğine sahip interply ve intraply hibrit kompozit yapıların karşılaştırmalı analizleri yapılarak amaca uygun avantajlı hibrit yapılar belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, takviye elemanları olarak endüstriyel ölçekte yaygın kullanım alanına sahip olan karbon, aramid ve cam elyaflar kullanılmıştır. Farklı kumaş türleri (tekil ve hibrit kumaşlar), farklı tabaka sayıları (4, 8, 12) ve farklı elyaf yönlenme açılarına ($0^\circ/90^\circ$, $30^\circ/60^\circ$, $45^\circ/-45^\circ$) sahip tekil, interply hibrit ve intraply hibrit kompozit üretim grupları oluşturulmuştur. Taguchi üretim tasarımı yapılarak tam faktöriyel tasarıma göre üretilmesi gereken kompozit plaka sayısı, 1/3 oranında azaltılmıştır. VARTM yöntemiyle üretimler yapılarak ilgili ASTM standartlarına göre mekanik (çekme, eğilme ve darbe) ve dinamik (mod şekli, doğal frekans ve sönüm oranı) testler yapılmıştır. Ayrıca, üretim parametrelerinin doğal frekans üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yapılan ANSYS® paket programı ile sayısal modeller oluşturularak her bir numune türü için modal analizler yapılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve kabul edilebilir doğrulukta sayısal modeller elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen deneysel sonuçlara göre Taguchi analizleri yapılarak amaca uygun, en etkili üretim parametreleri belirlenmiştir. Son olarak, interply ve intraply hibritleşmenin etkisini belirlemek amacıyla aynı içeriğe sahip yapıların mekanik ve dinamik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2019, 167 sayfa

Anahtar Kelimeler: Interply, intraply, hibrit kompozit, doğal frekans, sönüm oranı, darbe, eğilme, çekme, Taguchi deney tasarımı

ABSTRACT

PhD Thesis

COMPARATIVE MECHANICAL AND DYNAMIC ANALYSIS OF INTERPLY AND INTRAPLY HYBRID COMPOSITES

Muhammet Raci AYDIN

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

Supervisor: Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU

Layered composite structures, which are widely used in aviation sector, are subject to dynamic loads due to their working environments. These dynamic loads create time dependent variable amplitude stresses and vibrations, reducing the service life of composite structures. This is a serious problem that must be overcome in terms of the safe use of fiber-reinforced laminated composite structures. To overcome this problem, hybrid composite structures are considered to be used. Comparative analysis of interply and intraply hybrid composite structures having the same number of layers, fiber orientation angle and fiber content were performed to determine advantageous hybrid structures. In this study, carbon, aramid and glass fibers which are widely used in industrial scale are used as reinforcing elements. Single, interply hybrid and intraply hybrid composite production groups were formed with different types of fabrics (single and hybrid fabrics), different layer numbers (4, 8, 12) and different fiber orientation angles ($0^\circ/90^\circ$, $30^\circ/60^\circ$, $45^\circ/-45^\circ$). Taguchi production design was attempted to reduce the number of composite plates that should be produced according to full factorial design by 1/3. Mechanical (tensile, bending and impact) and dynamic (mode shape, natural frequency and damping ratio) tests were performed according to the relevant ASTM standards. In addition, numerical models were created using ANSYS[®] package program to determine the effect of production parameters on natural frequency and modal analyzes were performed for each sample type. The numerical results were compared with the experimental results and numerical models were obtained with acceptable accuracy. In addition, Taguchi analysis was performed and the most effective production parameters were determined according to the experimental results. Finally, in order to determine the effect of interply and intraply hybridization, the mechanical and dynamic properties of the structures with the same content were examined comparatively.

2019, 167 pages

Keywords: Interply, intraply, hybrid composite, natural frequency, damping ratio, impact, bending, tensile, Taguchi experiment design

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılmasında fikri yardımları, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU'ya teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında fikri ve teknik olmak üzere, öneri ve yardımlarını esirgemeyen değerli dostum Sayın Arş. Gör. Volkan ACAR'a, fedakâr bir şekilde üretimlerde ve testlerin icrasındaki katkılarından dolayı laboratuvar arkadaşım Makine Mühendisi Onur Ahmet AYDIN'a teşekkür ederim. Ayrıca; Makine Yüksek Mühendisi Tayyab KHAN'a, Makine Mühendisi Resul ŞAHİN'e, Makine Yüksek Mühendisi Burak HÜLAGÜ'ya, Makine Yüksek Mühendisi Ahmet Mesut ÖZTÜRK'e, Metalurji Yüksek Mühendisi Taha Çağrı ŞENOCAK'a, Dokuz Eylül Üniversitesi'nde icra edilen düşük hızlı darbe testlerindeki yardımlarından dolayı Makine Yüksek Mühendisi Halis KANDAŞ'a, laboratuvar ihtiyaçlarına yaptıkları katkılardan dolayı Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi çalışanlarından Sayın Fahri FINDIK ve Sayın Abit CÖMERT'e teşekkür ederim.

Tezin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi kapsamında verdikleri destekler için tez savunma jürisi hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa YAMAN, Sayın Prof. Dr. Murat Demir AYDIN ve Sayın Doç. Dr. Rıza POLAT'a, ilgileri için Sayın Prof. Dr. Hamit AKBULUT, Sayın Doç. Dr. Ferit ÇAKIR, Sayın Doç. Dr. Kadri Vefa EZİRMİK ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi S.Yenal VANGÖLÜ'ne teşekkür ederim.

Ayrıca, TÜBİTAK (Proje No: 117M894) ve Atatürk Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi (Proje No: FDK-2017-6225) tarafından desteklenen bu çalışma için ilgili kurumlara şükranlarımı sunarım.

Bana her zaman maddi ve manevi destek veren sevgili aileme, özellikle Mustafa Sabri AYDIN ve Hüseyin Erkam AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Muhammet Raci AYDIN

Ekim, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1. Takviye Elemanları	6
2.1.1. Karbon elyaflar.....	7
2.1.2. Aramid elyaflar.....	7
2.1.3. Cam elyaflar	8
2.2. Elyaf Kumaş Dokuma Türleri	9
2.3. Matris Malzemeleri	11
2.3.1. Termoset matrisler.....	11
2.3.2. Epoksi reçine sistemi.....	13
2.4. Elyaf Takviyeli Tabakalı Kompozit Malzemeler	14
2.5. Hibrit Kompozit Malzemeler	14
2.6. Hibritleşme	15
2.6.1. Termal etkiden kaynaklı artık gerilmeler	16
2.6.2. Hasar gelişiminde oluşan değişiklikler.....	18
2.6.3. Dinamik gerilme toplanmaları.....	18
2.7. Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Dinamik Analizleri.....	20
2.8. Hibrit Kompozitlerin Dinamik Analizleri	22
2.8.1. Interply hibrit kompozitlerin dinamik analizleri	22
2.8.2. Intraply hibrit kompozitlerin dinamik analizleri	23
2.9. Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	24
2.9.1. Çekme özellikleri	24
2.9.2. Darbe (impact) özellikleri	26

2.9.3. Eğilme özellikleri	30
2.10. Yalancı Süneklik (Pseudo-Ductility).....	33
2.11. Sayısal Model Oluşturulması (ANSYS® APDL)	34
2.12. Taguchi Deney Tasarımı	35
2.13. Tez Çalışmasının Özgünlüğü	37
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	39
3.1. Materyal.....	39
3.2. Yöntem	42
3.2.1. Taguchi yöntemi ile deney tasarımı ve üretim optimizasyonu.....	42
3.2.2. Üretimlerin yapılması.....	49
3.2.3. Üretilen levhalardan test numunesi hazırlama işlemleri	57
3.2.4. Numunelerin malzeme özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi	60
3.2.5. Kalınlık ölçümleri.....	60
3.2.6. Yoğunluk ölçümleri.....	60
3.2.7. Titreşim (doğal frekans ve sönüm oranı) testleri.....	62
3.2.8. Poisson oranlarının tespiti	67
3.2.9. Çekme testleri.....	68
3.2.10. Üç nokta eğilme testleri.....	71
3.2.11. Düşük hızlı darbe testleri.....	73
3.2.12. Sayısal analizler (ANSYS® APDL)	75
3.2.13. Taguchi yöntemi ile analiz	77
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	78
4.1. Elyaf-Matris Ağırlık Oranları.....	78
4.2. Kalınlık Ölçüm Sonuçları.....	80
4.3. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları.....	82
4.4. Titreşim Testi Sonuçları	84
4.5. Sayısal Analizler.....	87
4.6. Çekme Testi Sonuçları	90
4.6.1. Poisson oranları	90
4.6.2. Çekme dayanımı ve elastisite modülü sonuçları	91
4.7. Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları.....	93
4.8. Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları	96

4.9. Taguchi Analizleri	100
4.9.1. Titreşim analizleri.....	100
4.9.2. Çekme testi analizleri	106
4.9.3. Düşük hızlı darbe testleri.....	108
4.9.4. Üç nokta eğilme testi analizleri	112
4.10. Tekil Üretim Gruplarında Kumaş Türü ve Tabaka Sayısının Etkisi	113
4.10.1. Titreşim testleri.....	113
4.10.2. Çekme testleri.....	115
4.10.3. Düşük hızlı darbe testleri.....	116
4.10.4. Üç nokta eğilme testleri.....	122
4.11. İnterply-İnterply Hibrit Kompozitlerin Mekanik ve Dinamik Özellikleri	123
4.11.1. Titreşim testi sonuçları	124
4.11.2. Çekme testi sonuçları	128
4.11.3. Düşük hızlı darbe testi sonuçları	133
4.11.4. Üç nokta eğilme testi sonuçları	146
4.12. İnterply ve İnterply Karşılaştırması.....	151
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	157
KAYNAKLAR	161
ÖZGEÇMİŞ	168

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

σ	Çekme dayanımı (Gerilim)
ω_n	Doğal frekans
σ_e	Eğilme dayanımı
E_e	Eğilme modülü
Δ	Fark (örneğin; $\Delta\sigma$, Gerilim farkı)
ω	Frekans (ω_1, ω_2)
ε	Gerinim
ν	Poisson oranı
A	Alan
b	Genişlik
E	Elastisite modülü
GA	Güven aralığı
h	Yükseklik (Kalınlık)
l	Uzunluk
m	Eğim (Eğilme kuvveti/uzama grafiğinin eğimi)
n	Deney sayısı
P	Maksimum kuvvet (Eğilme veya çekme)
SS	Standart sapma
ζ	Sönüm oranı

Kısaltmalar

A	Aramid
C	Cam
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol

DU	Düşük uzamaya sahip elyaf
FRF	Frekans Cevap Fonksiyonu (Frequency Response Function)
IN	İnterply hibrit (Interply hybrid)
IR	İntraply hibrit (Intraply hybrid)
K	Karbon
S/N	Sinyal gürültü oranı
SA	Tekil Aramid (Singular Aramid)
SC	Tekil Karbon (Singular Carbon)
SG	Tekil Cam (Singular Glass)
TGK	Termal Genleşme Katsayısı
VARTM	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding)
YU	Yüksek uzamaya sahip olan elyaf

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İnterply ve intraply hibrit kompoziti oluşturan elyaf kumaşlar	2
Şekil 2.1. Elde ediliş türlerine göre elyaflar	6
Şekil 2.2. Kullanım şekillerine ve dokuma türlerine göre elyaflar	10
Şekil 2.3. Kullanım alanlarına göre matrisler	12
Şekil 2.4. Gerilim gerinim diyagramı	33
Şekil 3.1. Üretimlerin yapıldığı kompozit laboratuvarı	50
Şekil 3.2. Test numunesi elde etmek amacıyla kullanılan kesim şablonu	51
Şekil 3.3. Farklı yönlenme açısına sahip plakalarda kullanılan elyaf kumaşların kesilmesi	52
Şekil 3.4. Farklı yönlenme açısına sahip elyaf kumaş örneği.....	52
Şekil 3.5. Üretim esnasında kullanılan iş takip formundan örnek bir sayfa	53
Şekil 3.6. Epoksi reçine sistemi hazırlama işlem basamakları	54
Şekil 3.7. Reçine sisteminin içindeki gazı giderme işlemi için kullanılan sistem	55
Şekil 3.8. Plakalar üretilirken takip edilen adımlar.....	55
Şekil 3.9. VARTM cihazı ile üretimin şematik gösterimi	56
Şekil 3.10. Vakum etkisiyle yapılan reçine infüzyonu	56
Şekil 3.11. Reçine sisteminin kürleşme süreci.....	57
Şekil 3.12. CNC Router ile test numunesi kesme işlemi	58
Şekil 3.13. Karbon plakadan CNC Router ile test numunesi kesme işlemi.....	58
Şekil 3.14. Aramid plakadan su jeti ile test numunesi kesme işlemi.....	59
Şekil 3.15. a) Su jeti ile kesilmiş örnek bir aramid plaka, b) Kesimden sonra etiketlenerek gruplandırılan test numuneleri.....	59
Şekil 3.16. Kalınlık ölçüm noktaları	60
Şekil 3.17. Yoğunluk testleri için kullanılan düzenek	61
Şekil 3.18. Yoğunluk testleri için kullanılan düzenek	62
Şekil 3.19. Yoğunluk testleri için kullanılan numune ebatları.....	62
Şekil 3.20. Ankastre-serbest sınır şartında kullanılan bir titreşim test numunesinin ebatları	63
Şekil 3.21. Titreşim testi deney düzeneği	63

Şekil 3.22. Ankastre-serbest sınır şartında test edilen örnek bir numune	64
Şekil 3.23. Deneysel titreşim ölçüm sisteminin şematik gösterimi	65
Şekil 3.24. Yarı güç bant genişliği metoduna göre kullanılan verilerin grafik üzerinde gösterimi	66
Şekil 3.25. PULSE ölçüm sisteminden alınan doğal frekans ve sönüm oranı değerlerini gösteren örnek bir FRF grafiği.....	67
Şekil 3.26. Poisson oranlarını tespit etmek amacıyla kullanılan deney düzeneği ve strain gaugeler	68
Şekil 3.27. Çekme testlerinde kullanılan numune ebatları	69
Şekil 3.28. Çekme testlerinin yapıldığı Shimadzu AG-X 100 universal test cihazı	69
Şekil 3.29. Farklı türden çekme test numunelerinin kırılma şekilleri.....	70
Şekil 3.30. Üç nokta eğilme test numunesi.....	72
Şekil 3.31. a) Üç nokta eğilme test düzeneği, b) Kuvvetin etkisiyle numunenin bükülmesi	72
Şekil 3.32. Düşük hızlı darbe testi numunesi.....	73
Şekil 3.33. CEAST Fractovis Plus® düşük hızlı darbe test cihazı	74
Şekil 3.34. 20 Joule darbe enerjisine maruz bırakılan örnek bir test numunesinin ön ve arka yüzü	75
Şekil 3.35. Sayısal analizlerde kullanılan kabuk eleman (SHELL281).....	76
Şekil 3.36. SA5 numunesine ait ANSYS® analizinde girilen malzeme özellikleri ve sonuçlar.....	77
Şekil 4.1. ANSYS analizlerinden elde edilen ilk üç doğal frekansa ait mod şekilleri	88
Şekil 4.2. Tekil üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. doğal frekansın kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği	101
Şekil 4.3. Tekil üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği	102

Şekil 4.4. İnterply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. doğal frekans değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği	103
Şekil 4.5. İnterply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği	104
Şekil 4.6. İntraply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. doğal frekans değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği	105
Şekil 4.7. İntraply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği	106
Şekil 4.8. Tekil Grup X yönünde elastisite modülünün, kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği	107
Şekil 4.9. Maksimum temas kuvvetinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği	109
Şekil 4.10. Eğilme rijitliğinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği.....	109
Şekil 4.11. 40j'lük darbe enerjisine karşı absorbe edilen enerjinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği	110
Şekil 4.12. Tekil Grup, 0°/90° açılı, X yönündeki numunelerin doğal frekans değişimleri.....	114
Şekil 4.13. Tekil Grup, 0°/90° açılı, X yönündeki numunelerin sönüm oranı değişimleri.....	115
Şekil 4.14. Tekil grup, 0°/90° açılı, X yönündeki numunelerin elastisite modülü değerleri	116
Şekil 4.15. Tekil grup, 0°/90° açılı, X yönündeki numunelerin çekme dayanımları değerleri.....	116
Şekil 4.16. Tekil ürün grubu, 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin, maksimum temas kuvveti grafiği	117

Şekil 4.17. Tekil ürün grubu, 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin, eğilme rijitliği grafiği	118
Şekil 4.18. Tekil ürün grubu, 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin, absorbe edilen enerji grafiği	118
Şekil 4.19. 0°/90° yönlenme açısına sahip 4 tabakalı tekil karbon, aramid ve cam kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı	119
Şekil 4.20. 0°/90° yönlenme açısına sahip 4 ve 8 tabakalı tekil aramid kompozitlerin absorbe ettikleri enerjiler açısından kıyaslanması	119
Şekil 4.21. 0°/90° yönlenme açısına sahip 4 ve 12 tabakalı tekil cam kompozitlerin absorbe ettikleri enerjiler açısından kıyaslanması	120
Şekil 4.22. 0°/90° yönlenme açısına sahip 4 tabakalı karbon, aramid, cam elyafı tekil kompozitler için 10j'lük darbe karşısında Temas Kuvveti-Deformasyon grafikleri	121
Şekil 4.23. 0°/90° yönlenme açısına sahip 4 ve 8 tabakalı aramid elyafı tekil kompozitler için 10j ve 30 j'lük darbe karşısında Temas Kuvveti-Deformasyon grafikleri	121
Şekil 4.24. 0°/90° yönlenme açısına sahip 4 ve 12 tabakalı cam elyafı tekil kompozitler için 10j ve 40j'lük darbe karşısında Temas Kuvveti-Deformasyon grafikleri	122
Şekil 4.25. Tekil ürün grubu 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin, eğilme dayanımı grafiği	123
Şekil 4.26. Tekil ürün grubu 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin, eğilme modülü grafiği	123
Şekil 4.27. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci doğal frekanslar	126
Şekil 4.28. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci doğal frekanslar	126
Şekil 4.29. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci doğal frekanslar	127
Şekil 4.30. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci sönüm oranları	127

Şekil 4.31. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci sönüm oranları.....	128
Şekil 4.32. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci sönüm oranları.....	128
Şekil 4.33. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin elastisite modülü değerleri	130
Şekil 4.34. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri.....	130
Şekil 4.35. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin elastisite modülü değerleri	131
Şekil 4.36. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri.....	131
Şekil 4.37. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin elastisite modülü değerleri	132
Şekil 4.38. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri.....	132
Şekil 4.39. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin maksimum temas kuvveti.....	134
Şekil 4.40. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin maksimum temas kuvveti.....	134
Şekil 4.41. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin maksimum temas kuvveti.....	135
Şekil 4.42. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme rijitliği grafikleri	135
Şekil 4.43. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme rijitliği grafikleri.....	136
Şekil 4.44. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme rijitliği grafikleri.....	136
Şekil 4.45. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin 40J darbe enerjisi karşısında absorbe ettikleri enerji grafikleri	137
Şekil 4.46. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin 40J darbe enerjisi karşısında absorbe ettikleri enerji grafikleri	137

Şekil 4.47. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin 40J darbe enerjisi karşısında absorbe ettikleri enerji grafikleri	138
Şekil 4.48. 0/90 yönlenme açısına sahip 4 tabakalı aramid ve cam elyaf takviyeli interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri	139
Şekil 4.49. 30/60 yönlenme açısına sahip 8 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri	139
Şekil 4.50. 45/-45 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri	140
Şekil 4.51. Karbon ve aramid içeren 0/90 yönlenme açısına sahip 8 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri	140
Şekil 4.52. Karbon ve aramid içeren 30/60 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri	141
Şekil 4.53. Karbon ve aramid içeren 45/-45 yönlenme açısına sahip 4 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri	141
Şekil 4.54. Karbon ve cam içeren 0/90 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri	142
Şekil 4.55. Karbon ve cam içeren 30/60 yönlenme açısına sahip 4 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri	143
Şekil 4.56. Karbon ve cam içeren 45/-45 yönlenme açısına sahip 8 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri	143
Şekil 4.57. 0/90 yönlenme açısına sahip 4 tabakalı cam ve aramiddan oluşan hibrit kompozitler için 10j'lük darbe karşısında Temas Kuvveti-Deformasyon grafikleri	144

Şekil 4.58. 45/-45 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı cam ve aramidden oluşan hibrit kompozitler için 40j'lük darbe karşısında temas kuvveti-deformasyon grafikleri	145
Şekil 4.59. 30/60 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı karbon ve aramidden oluşan hibrit kompozitler için 30j'lük darbe karşısında temas kuvveti-deformasyon grafikleri.....	145
Şekil 4.60. 45/-45 yönlenme açısına sahip 8 tabakalı cam ve karbondan oluşan hibrit kompozitler için 10j'lük darbe karşısında temas kuvveti-deformasyon grafikleri	146
Şekil 4.61. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme dayanımı grafikleri	148
Şekil 4.62. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme modülü grafikleri.....	148
Şekil 4.63. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme dayanımı grafikleri	149
Şekil 4.64. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme modülü grafikleri.....	149
Şekil 4.65. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme dayanımı grafikleri	150
Şekil 4.66. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme modülü grafikleri.....	150

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Üretimlerde kullanılan elyaf kumaşların ülkemiz pazarında 2019 yılı itibariyle güncel fiyatları	6
Çizelge 3.1. Üretimlerde kullanılan elyaf kumaşlara ait özellikler	40
Çizelge 3.2. Epoksi reçine sistemine ait mekanik özellikler	41
Çizelge 3.3. Epoksi reçine sistemine ait fiziksel özellikler	41
Çizelge 3.4. Epoksi reçine sistemine ait karışım oranları	42
Çizelge 3.5. Taguchi ve tam faktöriyel deney tasarımında dikkate alınan faktör & seviye ve gerekli üretim sayıları.....	45
Çizelge 3.6. Taguchi deney tasarımına göre üretim grupları için oluşturulan ortogonal diziler	46
Çizelge 3.7. Tekil plakaların kumaş türü, oryantasyon açısı, tabaka sayısı, diziliş sırası ve kod isimleri	47
Çizelge 3.8. İnterply plakaların kumaş türü, oryantasyon açısı, tabaka sayısı, diziliş sırası ve kod isimleri	48
Çizelge 3.9. İntraply plakaların kumaş türü, oryantasyon açısı, tabaka sayısı, diziliş sırası ve kod isimleri	49
Çizelge 4.1. Tekil üretim grubuna ait elyaf ve matris ağırlık oranları.....	78
Çizelge 4.2. İnterply üretim grubuna ait elyaf ve matris ağırlık oranları	79
Çizelge 4.3. İntraply üretim grubuna ait elyaf ve matris ağırlık oranları	79
Çizelge 4.4. Tekil üretim grubuna ait ortalama kalınlık değerleri.....	80
Çizelge 4.5. İnterply üretim grubuna ait ortalama kalınlık değerleri.....	81
Çizelge 4.6. İntraply üretim grubuna ait ortalama kalınlık değerleri.....	82
Çizelge 4.7. Tekil üretim grubuna ait ortalama yoğunluk değerleri	83
Çizelge 4.8. İnterply üretim grubuna ait ortalama yoğunluk değerleri.....	83
Çizelge 4.9. İntraply üretim grubuna ait ortalama yoğunluk değerleri.....	84
Çizelge 4.10. Tekil üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri.....	85
Çizelge 4.11. Tekil üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri.....	85

Çizelge 4.12. İnterply üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri	86
Çizelge 4.13. İnterply üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri	86
Çizelge 4.14. İntraply üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri.....	87
Çizelge 4.15. İntraply üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri	87
Çizelge 4.16. Tekil üretim grubuna ait ANSYS ile deneysel ilk üç doğal frekans ve % fark değerleri	88
Çizelge 4.17. İnterply üretim grubuna ait ANSYS ile deneysel ilk üç doğal frekans ve % fark değerleri	89
Çizelge 4.18. İntraply üretim grubuna ait ANSYS ile deneysel ilk üç doğal frekans ve % fark değerleri	90
Çizelge 4.19. Strain gauge ile yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen poisson oranı değerleri.....	90
Çizelge 4.20. Tekil grup X yönündeki numunelerin çekme testi sonuçları.....	91
Çizelge 4.21. Tekil grup Y yönündeki numunelerin çekme testi sonuçları.....	91
Çizelge 4.22. İnterply grup X yönündeki numunelerin çekme testi sonuçları.....	92
Çizelge 4.23. İnterply grup Y yönündeki numuneler için çekme testi sonuçları.....	92
Çizelge 4.24. İntraply grup X yönündeki numuneler için çekme testi sonuçları.....	93
Çizelge 4.25. İntraply grup Y yönündeki numuneler için çekme testi sonuçları.....	93
Çizelge 4.26. Tekil grup X yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları	94
Çizelge 4.27. Tekil grup Y yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları	94
Çizelge 4.28. İnterply grup X yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları	95
Çizelge 4.29. İnterply grup Y yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları	95
Çizelge 4.30. İntraply grup X yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları	96

Çizelge 4.31. İntraply grup Y yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları	96
Çizelge 4.32. Tekil grup, maksimum temas kuvveti – darbe enerjisi değerleri.....	97
Çizelge 4.33. Tekil grup, absorbe edilen enerji değerleri	97
Çizelge 4.34. İnterply grup, maksimum temas kuvveti – darbe enerjisi değerleri	98
Çizelge 4.35. İnterply grup, absorbe edilen enerji değerleri.....	99
Çizelge 4.36. İntraply grup, maksimum temas kuvveti – darbe enerjisi değerleri	99
Çizelge 4.37. İntraply grup, absorbe edilen enerji değerleri.....	100
Çizelge 4.38. Tekil üretim grubunda, ankastre-serbest sınır şartı için 1. doğal frekansın kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu.....	101
Çizelge 4.39. Tekil üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu.....	101
Çizelge 4.40. İnterply üretim grubunda, ankastre-serbest sınır şartı için 1. doğal frekans değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu.....	102
Çizelge 4.41. İnterply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından Sinyal gürültü oranı cevap tablosu	103
Çizelge 4.42. İntraply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. doğal frekans değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu.....	104
Çizelge 4.43. İntraply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu.....	105
Çizelge 4.44. Tekil Grup X yönünde elastisite modülünün, kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu	107
Çizelge 4.45. Maksimum temas kuvvetinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu.....	108
Çizelge 4.46. Eğilme rijitliğinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu.....	109

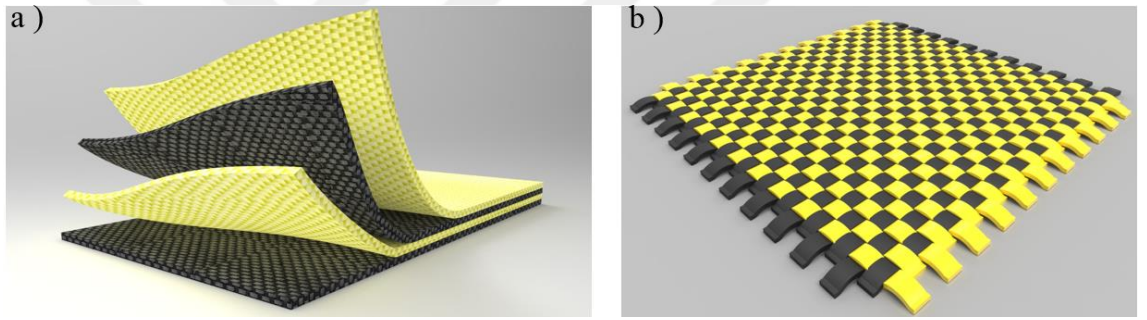
Çizelge 4.47. 40j'lük darbe enerjisine karşı absorbe edilen enerjinin kumaş türü, yönelme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu	110
Çizelge 4.48. Tekil üretim grubundan 0°/90° yönelme açısına sahip numuneler	113
Çizelge 4.49. Tekil ürün grubu 0°/90° yönelme açısına sahip numunelerin titreşim testi sonuçları.....	114
Çizelge 4.50. Tekil ürün grubu 0°/90° yönelme açısına sahip numunelerin çekme testi sonuçları.....	115
Çizelge 4.51. Tekil ürün grubu 0°/90° yönelme açısına sahip numunelerin darbe testi sonuçları.....	117
Çizelge 4.52. Tekil üretim grubundan 0°/90° yönelme açısına sahip numunelerin üç nokta eğilme testi sonuçları	122
Çizelge 4.53. İnterply ve intraply üretimlerden kumaş türü, oryantasyon açısı ve tabaka sayısı açısından karşılaştırılan eşdeğer içeriğe sahip numuneler	124
Çizelge 4.54. Eşdeğer özelliklere sahip interply ve intraply hibrit kompozitlerin doğal frekans ve sönüm oranı değerleri	125
Çizelge 4.55. Eşdeğer özelliklere sahip interply ve intraply hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları	129
Çizelge 4.56. Eşdeğer özellikli interply ve intraply hibrit kompozitlerin darbe testi sonuçları	133
Çizelge 4.57. Eşdeğer özellikli interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme testi sonuçları	147

1. GİRİŞ

İnsanlar, çok eski zamanlardan beri gerek günlük ihtiyaçları için gerekse savaşlarda kullanmak amacıyla daha iyi özelliklere sahip yeni malzemeler elde etmeye çalışmışlardır. Bu amaçla bir malzemeyi başka bir malzeme ile karıştırmış veya birleştirmişlerdir. En az iki farklı malzemenin, her birinin tek başına sahip olduğu özelliklerden daha farklı özelliklere sahip yeni bir malzeme oluşturması amacıyla, fiziksel olarak birleştirilmesi ile elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir. Kompozit malzemeler, hafiflik ile beraber yüksek mekanik, dinamik ve termal performanslarından dolayı yeni teknolojik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde birçok kompozit malzeme türü olmakla birlikte mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilenlerinden biri elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemelerdir. Elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemeler, belirli bir üretim yöntemi ile üst üste dizilen takviye elemanları (elyaflar) ve matris bileşenlerinden meydana gelmektedir. Takviye elemanları olan elyaflar, kompozit yapı içerisinde yük taşıma, mukavemet ve rijitlik özelliklerine, dolayısıyla kompozit yapı içerisinde mekanik ve dinamik performansa direkt olarak katkı sağlayan yapı elemanlarıdır. Matris malzemesini oluşturan *epoksi* ve reçine sistemi ise elyafların bir bütün olarak dış etkilere korunmasını, yapıya etkiyen kuvvetlerin elyaflara düzgün dağılmasını ve kompozit yapının sönüm ve tokluk özelliklerini artırır. Ayrıca matris yapının, çatlak oluşumunu ve çatlak ilerlemesini engellemesi/geciktirmesi gibi katkıları da vardır.

Son yıllardaki teknolojik gelişmelere paralel olarak kompozit malzeme araştırmaları, bilimsel ve endüstriyel seviyede artarak devam etmektedir. Bu yapıların, özellikle hafiflik ve dayanım gerektiren uygulamalarda daha yüksek performans göstermeleri için büyük çaba harcanmaktadır. Bu kapsamda, daha yüksek yapısal özelliklere sahip kompozit malzemelerin elde edilmesi amacıyla, farklı elyafların aynı kompozit yapı bünyesinde birlikte kullanılması ile oluşturulan hibrit kompozit malzemelerin kullanımı gündeme gelmiştir. Hibritleştirilmedeki temel amaç, farklı elyafların birbirlerinin eksik yönlerini tamamlaması ve sahip oldukları tekil avantajları yeni oluşturulan hibrit kompozit yapıya aktarmalarıdır. Bünyesinde birden fazla elyaf çeşidi barındıran bu tür kompozitlere elyaf

takviyeli tabakalı hibrit kompozit malzemeler denilmektedir. Bu kompozitlerde yaygın olarak iki farklı elyaf kumaş türü kullanılabilir. Birincisi, tek tip elyafların beraber dokunması ile elde edilen **tekil kumaşlar**; ikincisi, farklı elyafların birlikte dokunmasıyla üretilen **hibrit kumaşlar**dır. Burada bahsedilen kumaş türleri ile oluşturulan en önemli iki hibrit kompozit konfigürasyonu Şekil 1.1’de görselleştirilmiştir. En az iki farklı tekil elyaf kumaşın üst üste dizilerek, matris yapı katkısıyla birleştirilmesi neticesinde elde edilen kompozit yapılara *interply* veya *interlayer hibrit kompozit yapılar* denilmektedir (Şekil 1.1.a). Bu yöntem, hibrit kompozit yapı üretmek için daha kolay ve daha ucuzdur. Diğer hibrit kompozit türü ise hibrit kumaşların üst üste dizilmesiyle oluşturulan *intraply* veya *intralayer hibrit kompozitler*dir (Şekil 1.1.b).



Şekil 1.1. İnterply (a) ve intraply (b) hibrit kompoziti oluşturan elyaf kumaşlar

Hibrit kompozit malzemeler; uzay ve havacılık endüstrisi, denizcilik sanayi, savunma sanayi, otomotiv sektörü, rüzgâr türbin kanatları, doğalgaz depolama tankları ve yarı iletkenlere kadar birçok alanda kullanıma uygundur. Bu malzemelerin çalışma esnasında maruz kaldıkları dinamik yükler, zamana bağlı değişken genlikli gerilmeler ve titreşimler oluşturmakta dolayısıyla yapının faydalı kullanım ömrünü azaltmaktadır. Bu durum, elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapıların emniyetli kullanımı açısından üstesinden gelinmesi gereken ciddi bir problemdir.

Tez çalışmasının temel amacı, bu tür yüklemelere maruz kalabilecek interply ve intraply hibrit kompozit yapılarda kumaş türü, elyaf oryantasyon (yönlenme) açısı ve tabaka sayısının dinamik ve mekanik davranışlar üzerine olan etkisinin deneysel olarak belirlenmesi ve doğal frekans değerlerinin sayısal bir model kullanılarak analizlerinin

yapılmasıdır. Tez çalışması kapsamında takviye elemanı olarak endüstriyel ölçekte yaygın kullanıma sahip olan karbon (K), aramid (A), cam (C) elyaflar kullanılmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında, farklı yoğunluk ve farklı dokuma türlerine sahip elyaf kumaşlar kullanılarak üretilmiş tekil kompozitler, inter-ply ve intra-ply hibrit kompozit malzemelerin, mekanik, dinamik ve termal özellikleri ile ilgili yapılmış çalışmaların olduğu görülmüştür. Fakat aynı yoğunluk ve dokuma türlerine sahip kumaşlar ile “elyaf kumaş türü, oryantasyon (yönlenme) açısı ve tabaka sayısı” parametreleri dikkate alınarak oluşturulan interply ve intraply hibrit kompozitlerin dinamik ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmalara rastlanılmamıştır. Çalışmanın daha kapsamlı olması amacıyla tekil elyaf (K, A, C) ve hibrit elyaf (K/A, K/C, C/A) kumaş türlerinin dışında, farklı oryantasyon açılarının ($0^\circ/90^\circ$, $30^\circ/60^\circ$, $45^\circ/-45^\circ$) ve farklı tabaka sayılarının (4, 8, 12) hibritleşme üzerine etkileri incelenmiştir. Tekil, interply hibrit ve intraply hibrit kompozit levhalar, VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) yöntemiyle üretilmiştir. Bu levhalardan, ilgili ASTM standartlarına göre test numuneleri (titreşim, çekme, üç nokta eğilme, düşük hızlı darbe ve yoğunluk) “CNC Router” ve “Su jeti” ile kesilerek elde edilmiştir.

Araştırma konusu; ihtiva ettiği farklı elyaflar, hibritleşme konfigürasyonları, tabaka sayıları ve yönlenme açıları gibi parametrelerden dolayı, çok sayıda üretim ile birlikte çok sayıda mekanik ve dinamik testin yapılmasını gerekli kılmaktadır. Bu da hem maddi açıdan hem de zaman açısından ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Bu problemin çözümü için “Taguchi yöntemi ile deney tasarımı” yapılarak üretim sayıları sistematik bir şekilde azaltılmıştır. Taguchi yöntemi ile deney tasarımı, özellikle deneysel çalışmalarda uzun zamandan beri yaygın olarak kullanılan, güvenilirliği literatüre geçmiş birçok çalışma ile teyit edilmiş, sistem ve tolerans tasarımı üzerine kurulmuş istatistiksel bir deney tasarım ve optimizasyon yöntemidir. Bu yönteme göre bütün parametrelerin bütün seviyelerini üretmek yerine daha az sayıda üretim yapılarak amaca uygun en etkili parametre ve seviyelerin belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Standartlara uygun yeterli miktarda deneysel verinin elde edilmesi ile Taguchi analizleri yapılmıştır. Böylece her bir test türü (titreşim, çekme, eğilme, darbe) için elyaf kumaş türü, oryantasyon açısı ve tabaka sayısı faktörlerinin en etkili seviyeleri belirlenmiştir. Diğer yandan, ilgili testler sonucunda elde

edilen malzeme özellikleri, ANSYS® paket programı ile oluşturulan sayısal modellerde kullanılarak modal analizler yapılmıştır. Sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak sayısal modellerin kabul edilebilir yakınlıkta sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu sayede ileride yapılacak çalışmalar için, sayısal model üzerinde üretim parametreleri değiştirilerek, incelenmek istenen yapıların cevapları kolaylıkla elde edilebilecektir. Dolayısıyla çok sayıda maliyetli ve zaman alıcı yeni üretimlerin yapılmasına gerek kalmayacaktır.



2. KURAMSAL TEMELLER

Özellikle son yüzyılda, sanayileşmede ve teknolojiadaki hızlı gelişmelere paralel olarak geleneksel malzemelere göre daha dayanıklı ve daha hafif malzemelere duyulan ihtiyaç artmıştır. İlk olarak 1800'li yılların sonlarında kullanılmaya başlayan ve 1930'lu yıllarda Amerika'da ticari olarak satılmaya başlayan cam elyaflarıyla üretilen kompozit malzemeler bu ihtiyaçları karşılamak için iyi bir alternatif olmuştur. Bunu sonraki yıllarda diğer elyaf türlerinin kullanılması ile elde edilen yeni kompozit malzemeler takip etmiştir. İyi bir tasarım yapılarak (farklı matris ve elyaf çeşitleri kullanılarak) amaca uygun istenen özelliklere sahip yeni kompozit malzemeler üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Profesyonel anlamda en eski ve en çok kullanılan takviye elemanı türü cam elyaflardır. Bunun yanı sıra karbon elyafı, 1960'lı yıllardan günümüze kadar hem hafifliği hem de üstün mekanik özelliklerinden dolayı özellikle havacılık sektöründe yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Gelişen teknolojilerin karbon elyafının üretimini kolaylaştırması ve önceki yıllara göre maliyetlerini düşürmesine rağmen karbon elyafı hala maliyeti yüksek bir elyaf türüdür. Bu elyaf türünün kullanım alanlarının çokluğu ve maliyetlerinin yüksek olması alternatif takviye elemanı arayışlarını hızlandırmıştır. Bu kapsamda doğal ve suni elyaf türleri araştırılmakla birlikte hâlihazırda piyasada mevcut elyaf türlerinin üstün yönlerinin tek bir kompozit yapıda elde edilmesine yönelik hibritleştirme çalışmaları da devam etmektedir.

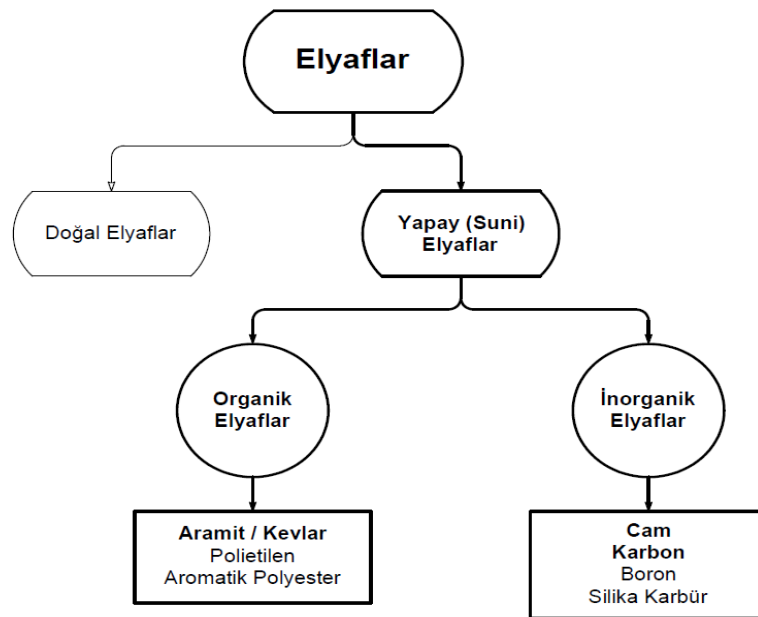
Kompozitlerin fiyat-performans oranlarını iyileştirmek amacıyla yapılan hibritleşme çalışmalarının ve mevcut kaynakların en uygun şekilde kullanılmasının önemini vurgulamak açısından tez çalışması kapsamında kullanılan elyaf türlerinin ülkemiz pazarında 2019 yılına ait ortalama güncel maliyetleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Bunlara üretimde kullanılan sarf malzeme ve ekipmanların temin ve kullanım maliyetleri de ilave edilecek olursa oldukça yüksek maliyetler ile karşılaşıldığı görülmektedir.

Çizelge 2.1. Üretimlerde kullanılan elyaf kumaşların ülkemiz pazarında 2019 yılı itibarıyla güncel fiyatları

Ürün Adı	Birim Miktar	Özellik	KDV hariç Birim fiyat (Euro)
Karbon Elyaf Kumaş	1 m ²	200 gr/m ² düz dokuma	14
Aramid Elyaf Kumaş	1 m ²	200 gr/m ² düz dokuma	10
Cam Elyaf Kumaş	1 m ²	200 gr/m ² düz dokuma	3.7
Aramid / Karbon Elyaf Kumaş	1 m ²	200 gr/m ² düz dokuma	12
Cam / Aramid Elyaf Kumaş	1 m ²	200 gr/m ² düz dokuma	8
Cam / Karbon Elyaf Kumaş	1 m ²	200 gr/m ² düz dokuma	9
Epoksi Reçine Sistemi	1 kg	Epoksi-Sertleştirici	6.5

2.1. Takviye Elemanları

Şekil 2.1’de şematik olarak gösterildiği üzere üretim ve elde edilme şekillerine göre çok farklı elyaf türleri mevcuttur. Takviye elemanları; kompozit yapıda yük taşıma, direngenlik, mukavemet, termal stabilite sağlama ve elektrik iletkenliğini veya yalıtımı sağlamak gibi temel görevlere sahiptir. Bunlardan sadece tez çalışması kapsamında kullanılan karbon, cam ve aramid elyaflar hakkında bilgi verilecektir.



Şekil 2.1. Elde ediliş türlerine göre elyaflar

2.1.1. Karbon elyaflar

Karbon elyaflar, %95 oranında karbon atomlarından oluşan, modern teknoloji ürünü, ipliksi dokuya sahip çok dayanıklı inorganik takviye elemanlarıdır. Yoğunluk değerleri 1750-2000 kg/m³ arasındadır. Ana bileşimleri karbonlaşmış akrilik elyaf, katran ve naylondur. Karbon elyafı, çelikten 4.5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklıdır. Yüksek mekanik mukavemet, düşük yoğunluk, iyi ısı iletkenlik, yüksek çekme dayanımı, düşük elyaf çapı, korozyona karşı dayanım ve sınırsız raf ömrü gibi özellikleri, karbon elyafın tercih edilme sebeplerindendir. Hava araçları için bir dezavantajı alüminyumdan daha düşük iletkenlik göstermesidir. Bu nedenle yıldırım düşmesine karşı eğilimli olan uçak parçaları için yıldırımdan korunma ağı veya kaplaması gereklidir. Karbon elyafın bir diğer dezavantajı yüksek maliyetidir. Ayrıca karbon elyaflar, yapılarda metal bağlantı elemanları ile kullanıldığında galvanik korozyona neden olma potansiyeline sahiptir (Anonymous 2012).

2.1.2. Aramid elyaflar

Yüksek mukavemete, yüksek elastisite modülü ve yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip organik elyaflardır. Yüksek mukavemetli aramid elyafların yoğunluğu cam ve karbon elyaflarından daha düşüktür. Yoğunluk değerleri 1440-1470 kg/m³ arasındadır. Yapay elyaflar arasında ısıya en dayanıklı elyaf türü olarak bilinirler. Yüksek sıcaklıklarda iyi kumaş bütünlüğüne sahiptirler. Ateşe dayanıklıdırlar, erime noktaları yoktur, 500°C'nin üstündeki ısılarda bozulmaya başlarlar. Aşınma ve kesme dirençleri oldukça iyidir, penetrasyona dirençlidirler. Delinmeme özelliği istenen malzemelerin üretiminde, kurşungeçirmez yeleklerde, motorlu teknelerde ve otomobil lastiklerini takviye etmek gibi yüksek gerilme mukavemeti ve düşük ağırlık istenen yerlerde kullanılırlar. Ayrıca darbeye dirençli olması istenen yapılar da aramiden üretilmektedir. Ultraviyole ışınlarına, tuz ve asitlere karşı duyarlıdırlar. Elyaf ve kumaş halinde iken, katlanma, kesme ve işleme zorluğu vardır. Yapıları itibarı ile nem almaya müsaittirler (Callister and Rethwisch 2014; Vinay *et al.* 2014). Piyasada bulunan aramid elyaflardan Kevlar, DuPont firmasının aramid elyafının ticari adıdır. Bir takviye elemanı olarak, aramid elyaflar,

hafiflik, yüksek gerilme mukavemeti ve darbe dayanımı (örneğin, bir el aletinin yanlışlıkla düşürülmesinin neden olduğu veya çalışma ortamları gereği darbelere maruz kalabilecek yerlerde) önemli olduğu deniz ve havacılık uygulamalarında kullanılır. Aramid elyaf takviyeli kompozitlerin en büyük dezavantajları, düşük basınç dayanımları ve kesme veya işlemede güçlüklerdir (Mallick 2007). Kullanım ile ilgili raporlar Kevlar®'dan yapılan bazı parçaların, ağırlıklarının yüzde 8'i kadar su absorbe göstermiştir. Bu nedenle, aramid elyaflardan yapılan parçaların dış etkilerden korunması gerekir. Doğal renkleri sarıdır. Piyasadan kuru elyaf kumaş ve prepreg olarak temin edilebilirler. Aramid elyaf demetleri, karbon veya cam elyaflar gibi iplikçik sayısına göre değil de ağırlıkça boyutlandırılırlar.

Polimerik elyaflar sınıfından olan aramid elyafların üretiminde iki ana faz vardır. Katı polimerin erime veya çözelti ile sıvı faza dönüşümü, ardından ekstrüzyon ve soğutma. En iyi bilinen polimer elyaflar, sırasıyla DuPont, Teijin ve Akzo Nobel firmaları tarafından KevlarTM, TechnoraTM ve TwaronTM ticari markaları ile altında üretilen, aramid elyaf (ARomatik-poliAMİD) adı verilen poliamitten işlenen elyaflardır. Darbe (impact) esnasında yüksek enerji emme kabiliyetine sahiptirler, bu da çarpma ve balistik koruma için tercih edilmelerine sebep olmuştur. Düşük yoğunluklarından ötürü, uçak ve vücut zırhları için tercih edilirler. Aramid elyaflar polimerik esaslı olduklarından polimerik matrisler ile benzer özelliklere sahiptirler. Sıkıştırma dayanımları düşüktür ve mekanik özellikleri sıcaklıkla değişebilmektedir. 177°C'deki çekme dayanımı oda sıcaklığındaki değerinin %75-80'ine kadar düşebilmektedir (Lee 1991). Bazı özelliklerindeki düşüş tolere edilebilecekse 250°C'ye kadar kullanılabilirler (Barbero 2017).

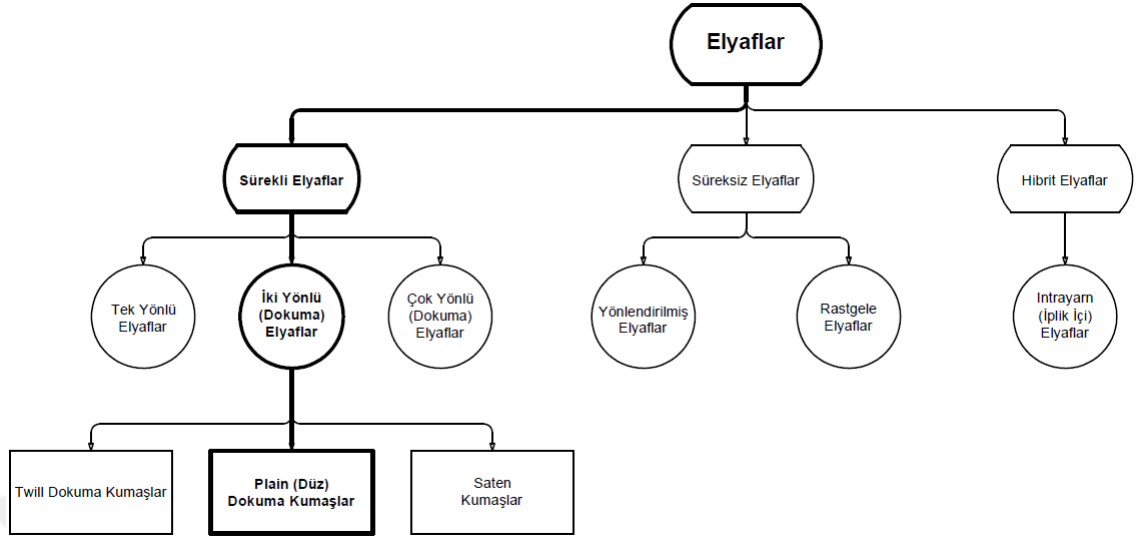
2.1.3. Cam elyaflar

Silika, kolemanit, alüminyum oksit ve soda gibi cam üretiminde kullanılan maddelerden üretilmektedirler. Cam elyafın hammaddesi, özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük delikler bulunan özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesi ve bunun etkisiyle oluşan ince elyafların soğutulduktan sonra makaralara sarılmasıyla meydana gelir. Isı iletim değerleri düşük olduğu için yalıtım malzemesi olarak da kullanılırlar. Çekme mukavemeti

yüksektir ve ısı dirençleri düşüktür. Yoğunluk değerleri 2460-2600 kg/m³ arasındadır. Diğer bağlayıcı malzemelerle karıştırılarak kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıklarda yumuşarlar. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler. Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir. Elektriği iletmedikleri için elektriksel yalıtımın önem kazandığı yerlerde kullanılabilirler. İçerisine kullanım amacına göre çeşitli katkı malzemeleri eklenerek veya katkı oranları değiştirilerek farklı özelliklere sahip cam elyaf türleri (E-cam, S-cam, C-cam, D-cam vb) elde edilebilir. Bunlardan en yaygın olanı E-cam elyaflardır. Yüksek çekme dayanımı ve iyi kimyasal dayanım gereken yerlerde kullanılırlar. E-cam, mekanik performans, korozyon direnci ve diğer türlere nispeten düşük maliyeti nedeniyle tercih edilmektedir. S-cam yüksek mukavemet değerlerine sahip olan fakat yüksek maliyetinden dolayı sınırlı kullanım alanı olan elyaf türüdür. E-camdan üç ila dört kat daha pahalı olmasından dolayı düşük maliyetli karbon elyaflar bile S-camına alternatif olarak değerlendirilebilmektedir. C-cam ise korozyona dayanıklı uygulamalarda tercih edilmektedir (Barbero 2017).

2.2. Elyaf Kumaş Dokuma Türleri

Kompozitlerde kullanılan sürekli elyaflar, kullanım amacına ve dokuma şekline göre farklı türlerde kullanılabilmektedirler (Şekil 2.2). Bunları en genel anlamda tek yönlü ve dokuma kumaş olmak üzere gruplandırabiliriz.



Şekil 2.2. Kullanım şekillerine ve dokuma türlerine göre elyaf

Tek yönlü kumaşlar; havacılık endüstrisi içerisinde yıllardır standart bir şekilde termoset reçineleri ile kullanılmaktadırlar. En yaygın üretim yöntemi, sıcak erimiş reçinelerin, ısı ve basınç kullanılarak ipliklerle birleştirildiği emprenye makinesine, toplanmış ham (kuru) iplerin çekilmesi ile elde edilen elyaflardır. Bu ürünler elyaf yönünde yüksek mukavemete sahip olmasına rağmen elyafa dik yönde neredeyse hiç mukavemeti yoktur.

Çift yönlü (dokuma) kumaşlar; bu kumaş yapılarının çoğu, karmaşık şekillerin üretilmesinde, düz tek yönlü kumaşların sunduğundan daha fazla esneklik sunarlar. Genel olarak, yapısal uygulamalar için kullanılan bu kumaşlar, hem çözü (boyuna) hem de dolgu-atkı- (enine) yönlerinde aynı ağırlıkta veya verimde elyaflardan oluşturulurlar. Havacılık ve uzay yapıları için sıkıca dokunmuş kumaşlar genellikle ağırlık tasarrufu yapma, reçine boşluğu boyutunu en aza indirme ve imalat işlemi sırasında elyaf oryantasyonunu sürdürme işlemlerindeki avantajlarından dolayı tercih edilirler. Dokuma kumaşların en yaygın kullanılan çeşitleri, plain (plain weave (düz dokuma)), twill ve sateen dokuma formlarıdır. Düz yüzeyler için plain dokuma kumaşlar uygun bir tercih olabilir. Kıvrımlı yüzeylerin imalatında ise eğilip bükülmesi daha kolay olan twill ve sateen dokuma elyaf kumaşlar tercih edilirler.

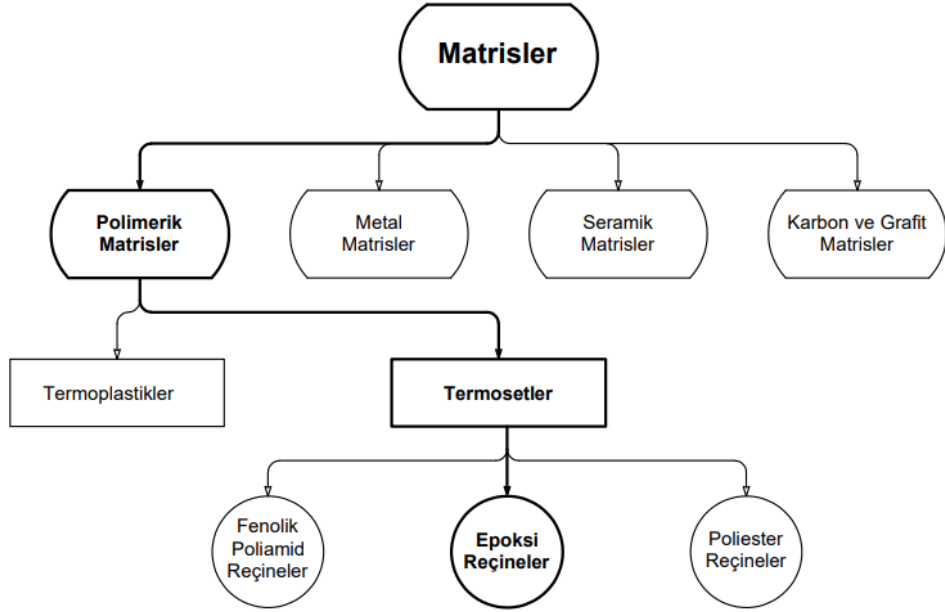
2.3. Matris Malzemeleri

Matris bileşeni, elyaflar ile bir bütün oluşturarak kompozit yapıyı meydana getirir. Matris yapı, kompozite uygulanan yükleri elyaflara aktarır, elyafları konumunda ve seçilen yönde tutar, kompozitin çevresel etkilere dirençli olmasını sağlar ve kompozitin maksimum servis sıcaklığını belirler (Anonymous 2012). Şekil 2.3'te görüldüğü üzere kullanım alanlarına göre çok farklı matris türleri mevcuttur. Bunlardan sadece tez çalışması kapsamında tabakalı kompozit yapılarda kullanılan matris grubu ve reçine sistemi hakkında ayrıntılı bilgi verilecektir.

2.3.1. Termoset matrisler

Termoset matris grubunda yer alan reçine sistemleri, düşük viskoziteye sahiptir ve kürlendikten sonra kimyasal olarak geri dönüşümü mümkün olmayan matris yapılarıdır. Bu reçineler, işlem kolaylıkları, geniş kullanım ve performans aralıkları nedeniyle kompozit sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Reçine sistemleri ile ilgili bazı temel kavramlar tanımlanacak olursa;

- Raf ömrü, karıştırılmamış reçine sisteminin bozulmadan depolanabileceği süreye denir. Genellikle ürünün nominal raf ömrünü sağlamak için soğutmalı depolama önerilmektedir.
- Kap ömrü, karışım ömrü veya jel süresi, karıştırılan epoksi ve sertleştiricinin, işlenebildiği süredir. Bu sürenin sonunda reçine sistemi kürleşmeye başlar ve kürleştikten sonra işlenmesi mümkün değildir.



Şekil 2.3. Kullanım alanlarına göre matrisler

Ortam sıcaklığına, sertleştirme ve/veya hızlandırma bileşenlerine bağlı olarak epoksi reçine sisteminin kürleşme süresi dakika, saat veya günler arasında değişebilir. Tepkimeler reçine sistemine bağlı olarak ekzotermik veya endotermik olabilir. Buna bağlı olarak da sistem katılaşıırken hacimsel olarak genişir veya büzüşebilir. Bunların hepsi üretimde dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir.

Reçine, polimeri tanımlamak için kullanılan genel bir terimdir. Reçine, kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri temel olarak bir kompozit malzemenin işlenmesini, üretilmesini ve nihai özelliklerini etkiler. Termosetler, reçine sistemleri içinde, insan yapımı malzemeler arasında en çeşitli ve en yaygın şekilde kullanılan matris türleridir. Kolayca dökülürler veya herhangi bir şekilde (kalıba göre) biçimlendirilebilirler. Diğer birçok malzemeye uyumludurlar ve kolayca (ısı veya katalizörle) çözünmeyen bir katı halinde sertleşirler. Termoset reçineler ayrıca mükemmel yapıştırıcılar ve bağlayıcı maddelerdir (Anonymous 2012).

2.3.2. Epoksi reçine sistemi

Epoksi reçine sistemleri, genel olarak iki bileşenin (epoksi ve sertleştiricinin) hacimsel veya ağırlıkça belli oranda karıştırılması ile elde edilen termoset reçine grubuna ait malzemelerdir. Bunlar çok yönlü bağ kurmaları, yüksek mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dirençleri nedeniyle kompozit yapılarda yaygın olarak kullanılırlar. Epoksiler diğer malzemelere göre daha az büzüşür (hacim olarak %1.2-4), bu da yapıştırıcı olarak kullanıldıklarında mükemmel bağ özellikleri kurmalarını sağlar. Su ve ısıdan diğer polimer matrislerden daha az etkilenecek şekilde formüle edilebilirler. Epoksi reçineleri, kullanılan iyileştirici ve hızlandırıcıların türüne bağlı olarak, 5 ila 150°C arasındaki sıcaklıklarda basit kürleşme işlemlerinden dolayı da tercih edilirler. Uzay ve havacılık sanayisinden spor ekipmanlarına kadar farklı alanlarda kompozit üretimlerinde kullanılmaktadırlar. Uçaklarda sandviç yapılarda yapıştırıcı olarak, uçak gövdesi ve füze uygulamalarında laminasyon reçinesi olarak kullanılırlar. Plastik/metal tekne ve otomobillerin yapım ve onarımında, kalafatlama bileşikleri olarak çok kullanışlı elemanlardır. Bina ve otoyol yapımında, yüksek kimyasal dayanıma ihtiyaç duyulan yerlerde dolgu ve sızdırmazlık maddesi olarak da kullanılırlar. Epoksi reçineler ayrıca kısa süreli prototip kalıpların imalatında ve kalıplamada döküm bileşiklerinde kullanılırlar. Son olarak, mükemmel elektriksel yalıtımları nedeniyle elektrik sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Epoksi reçine sistemlerinin maliyeti ise geniş aralıkta değişen performansları ile doğrudan ilişkilidir (Barbero 2017).

Epoksiler polimerleşebilen termoset reçinelerdir ve sıvıdan katıya kadar çeşitli viskozitelerde temin edilebilirler. Pek çok farklı epoksi türü olduğu için kullanıcıların, ihtiyaca uygun türü belirlemesi uzmanlık gerektirir. En büyük dezavantajları, kırılganlık ve nem varlığında özelliklerindeki azalmadır. Epoksilerin işlenmesi veya kürlenmesi polyester reçinelerden daha yavaştır. İşleme teknikleri arasında otoklav kalıplama, filament sarımı, pres kalıplama, vakum torbası ile kalıplama, reçine transfer kalıplama ve pultrusion bulunur. Sertleşme sıcaklıkları, oda sıcaklığından 180°C'ye kadar değişebilmektedir (Anonymous 2012).

2.4. Elyaf Takviyeli Tabakalı Kompozit Malzemeler

Çeşitli endüstriyel uygulamalarda, özellikle havacılık, deniz taşımacılığı, rüzgâr enerjisi, otomotiv ve spor uygulamalarında hafif ve dayanıklı yapıların tasarlanması, giderek önem kazanmıştır. Kompozit sektöründe görülen gelişmelere paralel olarak yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve mükemmel korozyon direnci özelliklerinden dolayı elyaf takviyeli kompozitlerin kullanımı yaygınlaştırmıştır. Özellikle havacılık sanayisinde 1960’lardan sonra alüminyum parçalara göre ağırlık tasarrufu sağladıkları için belli uçak parçaları, tabakalı kompozit malzemelerden yapılmaya başlamıştır. Yeni nesil uçakların, gövde ve kanat yapılarının büyük bölümünde elyaf takviyeli kompozitler kullanılmaktadır (Anonymous 2012). Bu gelişmeler, kompozit malzemelerin üretim, kullanım ve onarımında derinlemesine bilgi birikimini gerektirmektedir. Dolayısıyla bu ürünlerin daha etkili ve verimli kullanılmaları amacıyla malzeme karakterizasyonu, mekanik ve dinamik özelliklerin belirlenmesi önem arz etmektedir.

2.5. Hibrit Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler yapısal uygulamalarda hızla artan bir pazar payına sahip olmaya başlamasına karşın tokluk, sertlik ve dayanımlarındaki zayıflık ve yüksek maliyetler kompozit üreticilerini farklı arayışlara sevk etmiştir. Metal esaslı elyaflar, yüksek sertlik değerlerine rağmen yüksek yoğunluk değerlerine sahiptirler. Bu durum metal esaslı elyafların kompozit yapılarda kullanımını sınırlamıştır. Polimer esaslı elyafları ise, düşük yoğunluk değerlerine sahip olmasına karşın, düşük sertlik değerleri ve sınırlı sıcaklık dirençlerinden dolayı kısıtlanmıştır.

Geliştirilen yeni üretim metotları ile elyaf ve polimerik matrisler kullanılarak bu eksikliklerin giderilmesi oldukça aktif bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu malzemeleri daha dayanıklı hale getirmek için birçok strateji önerilmiştir. En çok araştırılan stratejilerden biri, termoset ve termoplastik matrislerin kimyasal özelliklerinin ayarlanması veya nano ölçekli takviye elemanları ile polimer matrislerin sertleştirilmesidir. Bu sayede, matris oranı yüksek kompozit yapıların sertliği artırılarak

kompozitin genel yapısında iyileştirmeler sağlanabilecektir. Ancak elyaf oranının yüksek olması kompozit yapılarda bu durum çok da mümkün değildir. Bu sorun için önerilen diğer önemli bir strateji ise elyaf hibritleştirilmesidir. Hibritleşme işlemi yapılarak hibrit olmayan kompozitlerden daha üstün özellikler elde edilebilecektir. Böylece istenilen özelliklere sahip yapılar elde edilerek genellikle pahalı olan tek tip takviye elemanının kullanılmasından meydana gelen yüksek maliyetler de düşürülebilecektir.

Bu tez çalışması, elyaf hibridizasyonu yapılarak hibrit olmayan kompozitlerden daha iyi dinamik ve mekanik özellikler elde etme ve hibritleştirme etkisini araştırmayla ilgili olduğu için bu bağlamda yapılmış polimer matrisli tabakalı hibrit kompozitler ile ilgili önem arz eden çalışmalara değinilecektir.

Swolfs *et al.* (2014), polimer kompozitlerin elyaf hibritleşmesi ile ilgili kapsamlı bir literatür taraması yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada hibrit mekanizması hakkında temel bilgiler verilmiş olup optimal tasarım için eğilme, çekme, darbe ve yorulma özellikleri hakkında ayrıntılara girilmiştir. Piyasaya sürüldükten sonra karbon elyafların ticari olarak geliştirilmesinde ve kullanımında en önemli kısıt yüksek üretim fiyatlarıydı (Shindo 1964; Tang and Bacon 1964). Maliyetlerin düşürülerek karbon elyafın üstün özelliklerinden yararlanmak amacıyla yetmişli yıllardan günümüze hibridizasyon işlemi oldukça aktif bir araştırma alanı haline gelmiştir. Gelişen elyaf ve kompozit üretim teknikleri bu konuyu sürekli gündemde tutmaktadır.

2.6. Hibritleşme

Genel olarak, iki elyaf türünü tek bir kompozit haline getirmedeki amaç, her bir elyafın avantajlarını korurken dezavantajlarını azaltmaktır. Hibritleştirmede kullanılan iki elyaf türünden biri, genelde düşük uzamaya sahip olan (DU) (Low Elongation, LE), elyaflardır. Diğeri ise daha yüksek uzamaya sahip olan (YU) (High Elongation, HE) elyaflardır. Bir hibrit kompozit yapı, elyaf yönünde bir yüklemeye maruz kalırsa DU elyaflar daha önce kırılır. YU elyaflar ise her zaman DU elyafından daha büyük kopma değerlerine sahiptir. Bu çalışma kapsamında, DU ve YU elyaflar genellikle sırayla “kırılgan” ve “sünek”

elyaflar olarak da ifade edilmektedir. Hibritleştirme yapılırken DU ve YU elyaflar birçok farklı konfigürasyonda birleştirilebilirler.

Hibritleşmenin etkisini tanımlayan en yaygın model basit karışım modelidir (rule of mixtures, ROM). Buna göre hibrit kompozitin alacağı değer, hibrit kompoziti oluşturan iki elyafın değerlerinin arasında olmalıdır. Örneğin, karbon elyaf takviyeli bir kompozit yapıda iç tabakalardaki karbon elyafların daha ucuz olan cam elyaflar ile değiştirilmesi ile eğilme özellikleri neredeyse hiç etkilenmezken çekme özellikleri basit karışım kuralına göre arada bir değer alır. Karbon elyaf takviyeli hibrit kompozitlerde çekme gerilmelerinde basit karışım modeli, uygun bir yaklaşım iken eğilme dayanımlarında çoğu zaman doğru bir yaklaşım değildir. Dolayısıyla, basit karışım kuralları eğilme koşullarına uygulanmaz. Mevcut basit teoriler ile karmaşık yapılara sahip kompozitlerin karmaşık yükleme koşullarında dayanım ve kırılma uzamalarının öngörülmesi oldukça zorlaşmıştır. Eğilmede hibritleşme etkisini belirlemek için klasik tabaka teorisi gibi daha ileri teorilere ihtiyaç vardır (Swolfs *et al.* 2014).

Hibritleşme etkisini açıklamak için yaygın olarak kullanılan üç farklı yaklaşım vardır.

- Termal etkilerden kaynaklı artık gerilmeler,
- Hibrit kompozitin nihai kırılmasına yol açan hasar gelişimindeki değişiklikler ve
- Dinamik gerilme toplanmaları.

Bu yaklaşımların çoğu ya iplikçi (intrayarn) ya da interply konfigürasyonda tek yönlü hibrit kompozitlere uygulanmıştır. Bu hipotezler, çok yönlü kompozitlere de genişletilebilir, çünkü bunlar daha karmaşık olmasına rağmen, elyafların yükleme yönündeki kırılmaları benzer özellikler göstermektedir (Swolfs *et al.* 2014).

2.6.1. Termal etkiden kaynaklı artık gerilmeler

Bu yaklaşıma göre, iki elyaf türünün termal genleşme farklılıklarından dolayı ısı büzüşmeleri arasında oluşan farklılık, artık çekme gerilmelerine sebep olmaktadır. Bu

yaklaşımı daha iyi anlayabilmek için klasik bir epoksi matrisinde karbon ve cam elyaflarını bir arada düşünelim. Epoksi ile ıslanan elyafın, epoksiyi emmesinden sonra, kürleşinceye kadar sıcaklık yükselmektedir. Elyaf, farklı termal genleşme katsayılarına (TGK) sahip oldukları için sıcaklığın etkisiyle uzunluklarını değiştirme eğiliminde olacaklardır. Karbon elyafın TGK değeri -1 ile $+1 \text{ K}^{-1}$ arasında (Mander and Bader 1981; Kul Karni and Ochoa 2006; Dong 2008) iken, cam elyafının TGK değeri $5-10 \text{ K}^{-1}$ arasındadır (Mander and Bader 1981; Motoc *et al.* 2013). Bu durum, ısıtma sırasında cam elyaf uzunluklarının artmasına neden olurken, karbon elyaf uzunluklarının çok da değişmemesi anlamına gelir. Reçine sıvı iken herhangi bir gerilme oluşumu olmayacaktır. Ancak reçine sertleştikten ve kompozit soğuduktan sonra, cam elyaflar küçülmeye çalışacak, karbon elyaflar ise uzunluğunu az-çok koruyacaktır. Reçine kürlendiğinde katmanlar birleştiği için elyaflar matris yapı içinde aynı uzunluğa sahip olacaktır. Bu durumu dengelemek için matris yapı tarafından karbon elyaflara bası gerilmesi ve cam elyaflara çeki gerilmesi uygulanacaktır. Sistem rijit bir hal aldığı için cam elyaflar kısalamayacak ve bu durum kompozit yapının ön gerilme ile yüklenmesine sebep olacaktır.

Bu ön gerilmeler, karbon elyafların belirgin kırılma uzamasını artırırken cam elyaflarda azalmaya sebep olacaktır. Termal etki hibritleşme etkisini tanımlamaya katkıda bulunabilirken, bu durumun tamamını açıklamak için yeterli değildir. Zweben (1977), aramid elyaflarla karbon elyafları hibritleştirmiştir. Aramid elyafın TGK'sı karbon elyafın TGK'sından daha küçüktür ve bu da karbon elyaflarda artık gerilme uzamalarına sebep olmuştur. Mander and Bader (1981), Zweben (1977) ve Bunsell and Harris (1974), termal etkinin hibritleşmede sadece %10'luk bir etkiye, Kretsis (1987) ise %50'ye varan bir etkiye sebep olabileceğini belirtmişlerdir. Kısa süre sonra yapılan çalışmalar hibrit etkilerin daha çok aşağıda bahsedilen diğer iki sebepten kaynaklı olabileceğini göstermiştir.

2.6.2. Hasar gelişiminde oluşan değişiklikler

Hibritleşme etkisini açıklamaya çalışan ikinci yaklaşım, hasar gelişimindeki değişikliklerle ilgilidir. Bu durum, Manders and Bader (1981) tarafından açıklandığı gibi istatistiksel veya kırılma mekaniği yaklaşımı ile ele alınabilir. Kırılma mekaniği yaklaşımı önceden bir çatlak içeren yapıyı dikkate alır. Enerji açısından bu çatlağın büyümesi için uygun zamanı belirler. Bununla birlikte elyaf takviyeli kompozitlerin yapısal anizotropisi, bu yaklaşım ile kompozitin mukavemetinin modellenmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, istatistiksel yaklaşım kırılma mekaniği yaklaşımından daha fazla ilgi çekmektedir. Buna göre elyafların rastgele olarak dağılmış kusurlarından dolayı ardışık olarak kırılmaları istatistiksel bir problem olarak ele alınmaktadır. Matris yapı, üzerine gelen yükü elyaflara eşit bir şekilde dağıttığı için gerilmeye maruz bir kompozit yapıda üretim esnasında hasar alan veya diğerlerine göre daha zayıf olan elyaflar diğer elyaflara veya elyaf demetlerine göre daha önce kopacaktır. Eğer bütün elyaflar sağlamsa, o zaman gerilme, tüm elyaflarda aynı olmalıdır. Gerilme daha da artarsa, ilk elyaf kopar ve yerel olarak yük taşıma kapasitesini kaybeder. Bununla birlikte, bu durum kompozit yapının tamamen kırılmasına yol açmaz. İlk elyaf kopmasından sonra, çevresindeki elyaflara daha fazla yük biner (Hedgepeth and Van Dyke 1967; Landis and McMeeking 1999). Gerilmenin daha da artmasıyla kopmuş elyaf sayıları artarak, kırık elyaf kümeleri oluşur (Rosen 1964). Bu kümelerden biri yeterince büyüyüp kritik bir boyuta ulaşırsa, bu küme dengesiz bir şekilde büyüyerek ve nihai kırılmalar oluşacaktır (Pimenta and Pinho 2013). Hibritleştirme sayesinde bu hasar gelişim sürecine farklı bir şekilde etki edilebilecektir. Örneğin bir DU / YU elyaflı bir hibrit kompozit yapı, aynı hacimli bir DU elyaflı kompozit ile karşılaştırılırsa, hibrit kompozitteki DU elyafların hacmi daha az olduğu için kırılma olasılığı da daha düşük olacaktır.

2.6.3. Dinamik gerilme toplanmaları

Araştırmacıların hibritleşme etkisini açıklamak için üzerinde durdukları bir diğer yaklaşım ise kompozitlerin hasar görmesinde, dinamik gerilme toplanmalarının etkisi ile

ilgilidir. Bir elyaf koptuğu zaman, o elyafın üzerindeki yük yerel olarak dağılır ve elyaf geri yaylanır. Bu, her elyaf boyunca hareket eden bir gerilme dalgasına sebep olur ve gerilme toplanmalarında geçici ani bir artış meydana gelir. Bu ilk olarak Hedgepeth (1961) tarafından ifade edildi, daha sonra Ji *et al.* (1985) yine bu duruma dikkat çektiler. Hedgepeth, dinamik gerilme toplanmalarının statik gerilme toplanmalarından %15-27 daha yüksek olduğunu kanıtlamak için bir kesme gecikmesi yaklaşımı kullanmıştır. Aynı zamanda bu dinamik olayları incelemek için kayma gecikme yaklaşımının sınırlamalarına değinmiştir. Ayrıca dinamik gerilme toplanmalarını azaltmak için matris plastisitesi ve tekyönlü sapmalar üzerinde durmaktadır. Ji *et al.* (1985), Hedgepeth'in çalışmalarını, sadece elyaf kopma düzleminde değil, elyaflar boyunca oluşan dinamik gerilme toplanmalarından bahsetmiştir. Xia and Ruiz (1991), dinamik gerilme toplanması faktörlerinin, cam elyafı kompozitlerde karbon elyafı kompozitlere göre %20 daha yüksek olduğunu, bu durumun iki elyaf türünün dinamik yükleme altında farklı davranmasıyla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Xing *et al.* (1981) bir sıra DU ve bir sıra YU elyaftan oluşan hibrit kompozitleri dikkate almışlardır. Teorik modelleri, bir DU elyafı bir hibrit kompozitte parçalandığında iki bağımsız gerilme dalgasının hibrit kompozit boyunca geliştiğini ve yayıldığını göstermiştir. İlk dalga DU elyaf katmanında yayılırken, ikincisi YU elyaf katmanında yayılır. Her iki dalga da her zaman faz dışıdır ve bu, DU/YU elyaf takviyeli hibrit kompozitlerde gerilme toplanmalarının, DU elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla daha düşük olmasına yol açmıştır. Bu açıdan bakıldığında, kırılma deformasyonu için pozitif bir hibritleşme etkisi her zaman beklenmektedir.

Hibritleşme etkisi hakkında genel geçer bilgiler elde etmek için daha ayrıntılı araştırmalar yapılmalıdır. Kırk yılı aşkın bir süredir, hibritleştirme etkisi üzerine yapılan araştırmalar neticesinde, kırılma deformasyonu ile ilgili birçok veri elde edilmiş olmasına rağmen tam olarak açıklanamayan hususlar vardır. Termal etkiyi anlamak ve tahmin etmek kolaydır, ancak bu hibrit etkinin sınırlı bir kısmını açıklayabilmiştir. Dinamik gerilme toplanmaları ile ilgili daha ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç vardır. İstatistiksel etkinin en büyük etki olması beklenir, ancak bunun tahmin edilmesi oldukça karmaşık ve zordur.

Özellikle eski tarihli yapılan araştırmaların çoğu tek yönlü düşük özellikli elyaf ve basit üretim metotları ile çalışmalardır. Bu açıdan düşünülünce kapsamlı güncel çalışmalar bu konuyu daha iyi anlamaya yardımcı olacaktır.

Tez çalışması kapsamında üretilen ve testleri yapılan elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin, titreşim özelliklerinin daha iyi anlaşılması amacıyla literatürden seçilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur. Titreşim özelliklerinden frekans değerleri doğrudan yapının rijitliği ve kütlesi ile ilgili olduğu için daha çok bu yapıların sönüm özellikleri ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir.

2.7. Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Dinamik Analizleri

Tasarlanan kompozitlerin mekanik, dinamik, termal ve malzeme özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu malzemelerin çalışma şartlarında oluşabilecek etkilere verecekleri tepkileri önceden belirlemek ve ona göre tasarımlar yapmak oldukça önemlidir. Bu durum aynı zamanda birçok çalışmanın altyapısını oluşturmaktadır. Bu bağlamda üretilen numunelere uygun test tekniklerinin uygulanması gerekmektedir. Örneğin standart dinamik mekanik analiz testi hafif ağırlıklı yüksek rijitlikli malzemeler için çoğu zaman uygun bir test tekniği olmayabilir (Gibson 2011). Özellikle dinamik özelliklerin tayini için yapılan testlerde en büyük problem, geleneksel ivmeölçer ve sınır koşulları için kullanılan test ekipmanlarının numunenin kütlesine yaptığı etkidir. Talbot and Woodhouse (1997) yaptıkları çalışmada deneysel sonuçlar ve öngörülen koşullar arasında önemli farklılıklar bulmuşlardır. El Mahi *et al.* (2008), ortotropik kompozit malzemelerin ve plakaların sönüm analizini incelediği çalışmalarında, farklı uzunluklarda tek yönlü cam elyaf takviyeli kompozitlerde sönüm parametrelerini deneysel modal analiz yaparak lazer ve çekiç (impact hammer) testi tekniğini kullanarak araştırmışlardır. Farklı tabakaların enerjilerini dikkate alan bir sönüm modeli geliştirerek sonlu elemanlar analizi yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar ile oldukça iyi bir uyum gösterdiği için sonlu elemanlar analizi ile geliştirilen modelin karmaşık şekilli yapılara da uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Maheri (2010), plakalar üzerinde farklı sınır şartları altında elyaf takviyeli polimerik kompozitlerde sönüm ile ilgili çalışmalar yapmış ve

kısıtların sönümleme üzerine etkisinin rijitlik dağılımı ile ilgili olduğunu ifade etmiştir. Chung (2003), yaptığı çalışmada matris elyaf hacim oranı arttırılarak sönüm oranının arttırılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca polimerlerin kendi yapısının sönüm için ana faktör olduğunu, termoplastiklerin termosetlere göre daha yüksek enerji dağıtma özelliğine sahip olduğunu vurgulamıştır. İlave olarak termosetlerin yüksek rijitlik ve iyi yapışma değerleri sağladığı ifade etmiştir. Ni and Adams (1984) yaptıkları çalışmada karbon elyaf takviyeli polimerik kompozitler (CFRP) ve cam elyaf takviyeli polimerik kompozitler (GFRP)'de hacim oranının 0.6'ya kadar olan değerlerinde sönümde parabolik bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Maheri and Adams (2002), Rayleigh-Ritz yöntemini ortotropik malzemelerin serbest titreşiminde kullanarak modal sönümlemeyi hesaplamışlardır. Elyaf takviyeli polimerik kompozitlerde elyaf yönlerinin eğilme yönlerine paralel olması durumunda özel sönüm kapasitesi (Specific damping capacity)'nin arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca Rayleigh-Ritz yönteminin, ince dikdörtgen plakaların modal sönümlemesini doğru olarak tahmin etmede kullanılabileceğini ve bu sonuçların sonlu elemanlar yöntemi sonuçlarıyla yakın değerler verdiğini belirtmişlerdir. Doebling *et al.* (1996); tabakalı kompozit yapılarda elyaf ayrılması, yapışma zayıflaması, yapraklanma gibi hataların sönümü arttırdığını belirtilmişlerdir. Vazquez *et al.* (1998), tek ve çift kat epoksi reçine ile kaplanmış cam elyafli kompozitlerde sönümün azaldığını ifade etmişlerdir. Finegan and Gibson (2000), bakır elyaflarının PVC ile kaplanması ile rijitlik özelliklerinin arttığını ve PVC hacim oranı artışı ile kayıp faktörünün de arttığını ifade etmişlerdir. Berthelot and Sefrani (2004) tek yönlü farklı elyaf malzemeleri karşılaştırmış; aramidin, cam ve karbona göre daha yüksek sönüm değerlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Crane and Gillespie (1991), tek yönlü, 0° ve 90° yönlenme açısına sahip tabakalı kompozitlerde malzeme sönümünü deneysel olarak yarı güç bant genişliği (half-power bandwidth) metodu ile bulmuşlardır. Ayrıca cam/epoksi ve grafit/epoksi kompozitlerde titreşim sönümlerini kayıp faktörünü (loss factor) dikkate alarak karakterize etmişlerdir. Cam ve karbon elyafını karşılaştırmışlar ve cam elyafının daha iyi bir sönüm değerlerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Adam and Bacon (1973), tek yönlü karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerde açılı tabakaları modellemiş ve test etmişler, en iyi sönüm değerlerini bükülmede 35° için, burkulmada ise 45° için elde edildiğini belirtmişlerdir. Kompozit malzemelerin özellikleri, takviye elemanlarının geometrik özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Elyafın uzunluğu ve şekli özellikle kısa elyaf

ile takviye edilen polimerik kompozitler için oldukça önemlidir. Gibson *et al.* (1982) maksimum sönüm için optimum elyaf en-boy oranını bulmuşlardır. Sıcaklık ve frekans, kompozit yapıyı oluşturan matrisin davranışını, dolayısıyla sönümü etkiler. Çoğu uygulamada frekans aralığı sınırlıdır ve matrisin viskoelastik özellikleri sabit kabul edilir. Benchekchou *et al.* (1998), camı geçiş sıcaklığı civarında CFRP'li numuneler için sönümün en üst değeri aldığını belirtmişlerdir.

2.8. Hibrit Kompozitlerin Dinamik Analizleri

Hibrit kompozitlerin titreşim özellikleri ile ilgili yapılan araştırmalar, mekanik özellikler ile ilgili çalışmalara kıyaslanamayacak kadar azdır. Tez konusuna uygun olarak ilgili literatürden seçilen çalışmalar, interply ve intraply başlıkları altında sunulacaktır.

2.8.1. Interply hibrit kompozitlerin dinamik analizleri

Li and Narita (2013) tarafından yapılan çalışmada kompozit yapının arasına konulan viskoelastik tabakalar ile oluşturulan hibrit kompozit yapılarda sönümleme özellikleri araştırılmıştır. Yönlenme açıları gibi rijitlik dağılımının da sönümleme özellikleri için önemli olduğu ifade edilmiştir. Berthelot *et al.* (2008), tabakalı kompozitlerde viskoelastik malzeme kullanarak, tabakaların ve yönlenme açılarının kirişin uzunluk değişiminin, titreşim üzerindeki etkisini analiz ederek frekansa bağlı kayıp faktörlerini ve sönüm katsayılarını hem sonlu elemanlar modeli ile hem de deneysel olarak belirlemişlerdir. Bulut *et al.* (2016) yaptıkları çalışmada farklı oranlarda bazalt ve aramid elyaflara sahip interply hibrit kompozitlerin sönümleme ve titreşim (doğal frekans) özellikleri araştırmışlardır. Tek yönlü bazalt elyaf ve twill örgülü aramid elyaflar takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında karşılaştırma için hibrit olmayan bazalt/epoksi ve aramid/epoksi tabakalı kompozitler de imal edilmiştir. Kompozit plakaların dinamik özellikleri modal analiz kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Sönümleme özellikleri, logaritmik azalma yöntemi ile hesaplanmıştır. Yapıların kayıp modülü (loss modulus), depolama modülü (storage modulus) ve sönümleme oranı (damping ratio) da belirlenmiştir. Hibrit yapılar ile hibrit olmayan bazalt/epoksi ile

aramid/epoksi kompozit yapılar arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Ayrıca, aramid elyafların tabakalı kompozit yapıda sönümlenme özelliklerini arttırdığı buna karşı mukavemet değerlerini düşürdüğü belirtmişlerdir. Bulut ve arkadaşları tarafından yapılan diğer bir çalışmada, aramid ve cam elyaflı interply hibrit kompozitlerin gerilme ve sönümlenme davranışları incelenmiştir. Hibrit aramid/cam epoksi reçineli yapılarda, hibridizasyonun etkisini göstermek için farklı elyaf hacim oranlarına göre numuneler imal edilmiş, çekme testi yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Ayrıca numunelerin dinamik özelliklerini belirlemek için bir dizi titreşim testi yapılmıştır. Sönümlenme özellikleri, logaritmik azalma yöntemiyle hesaplanmıştır, elyaf açısının doğal frekanslara olan etkileri ise ANSYS® paket programı kullanılarak incelenmiştir (Bulut *et al.* 2016).

2.8.2. Intraply hibrit kompozitlerin dinamik analizleri

Yapılan literatür araştırmalarında, intraply hibrit kompozitlerin dinamik analizlerinin, ilk etapta tek bir tabaka için analitik yaklaşım kullanılarak mikromekanik model halinde irdelendiği görülmüştür (Baburaj and Matsuzaki 1993, 1994). Bu bağlamda, intraply hibrit kompozit tabakasının malzeme sönüm analizi ve mikromekaniği hakkında çalışılmıştır. Malzemenin özel sönümlenme kapasitesi için elyaf matris sistemini bir lineer viskoelastik malzeme özelliğinde kabul ederek düzlem içi ve düzlem dışı gerilmeleri dikkate alarak analitik denklemler elde edilmiştir (Baburaj and Matsuzaki 1993). Ayrıca diğer bir çalışmada mevcut yöntemlerinin doğruluğunu göstermek için, tipik bir şekil hafızalı alaşımla elyaf takviyeli hibrit kompozit tabakanın sönümlenme analizlerini yapmışlardır (Baburaj and Matsuzaki 1994). Rajesh and Pitchaimani (2016), ise yaptıkları çalışmada, doğal muz ve jüt (hint keneviri) elyaflarını kullanarak farklı intraply dokuma şekilleri ile elde ettikleri kompozit yapıların serbest titreşim ve dinamik-mekanik analizlerini yapmışlardır. Farklı çözgü ve atkı sıralamalarıyla oluşturdukları intraply hibrit kompozit yapılarda dokuma şekillerinin titreşim özelliklerine etkilerini belirlemişlerdir.

Konu ile ilgili yapılan araştırmalarda, özellikle intraply hibrit kompozitlerin titreşim davranışının incelendiği detaylı çalışmalara rastlanılmaması tez çalışmasının bu konu ile ilgili literatüre olumlu katkı sağlayacağı fikrini desteklemektedir.

2.9. Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Bu bölümde, konunun daha iyi anlaşılması için hibrit kompozitlerin temel mekanik özelliklerinden çekme, eğilme, darbe dayanımları hakkında yapılmış önemli çalışmalara değinilecektir.

2.9.1. Çekme özellikleri

Konu ile ilgili yapılmış birçok araştırmada hibrit kompozitlerin boylamasına çekme modülünün karışım kuralına doğrudan uyduğu ifade edilmiştir (Hayashi 1972; Bunsell and Harris 1974; Harris and Bunsell 1975; Phillips 1976; Marom *et al.* 1978; Kretsis 1987; Zhang 2013). Bu davranışa uymayan sonuçların genel olarak, elyaf oryantasyonu ve elyaf hacim oranındaki değişikliklerden kaynaklandığı düşünölmektedir. Ren *et al.* (2010), intralayer karbonlu kompozitlerin tek yönlü interlayer karbon elyafly hibrit kompozitlerden daha yüksek çekme modölüne sahip olduğunu bildirmişlerdir. Raporda belirtilen küçük sapmaların kıvrımlar, katlanmalar, yanlış elyaf yönlenmeleri veya elyaf hacim oranındaki ölçüm hatalarından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Farklı olarak, Phillips (1981, 1982) bu sapmaların, karışım kuralının yanlış kullanılmasından kaynaklı olduğunu bildirmiştir. Hibrit yapıyı oluşturan her iki elyafın nispi hacim oranları, birleştirme parametresi olarak kullanılmalıdır, ancak bunların hibrit kompozitlerde ayrı ayrı ölçölmesi oluka zordur. Tabaka oranı veya çekme oranına dayanan tahminlerin yapılması daha kolaydır. Ancak bu durumda değişim, karışım kuralı ile doğru orantılı olmayabilir. Mallick (2007)'e göre, karışım kuralı kullanımında aşağıdaki varsayımlar kabul edilmelidir.

- Elyaf lar, matris boyunca düzgün bir şekilde dağılmıştır.
- Elyaf ve matris arasında mükemmel yapışma vardır.

- Matris boşluksuzdur.
- Uygulanan yükler elyaf yönüne paralel veya normaldir.
- Tabakalar başlangıçta gerilmesiz bir durumdadır yani artık gerilmenin olmadığı kabul edilir.
- Elyaf ve matrisin, elastik olarak doğrusal malzemeler gibi davrandığı kabul edilir.

Karışım kuralı doğrusal değilse veya az doğru ise hibrit etki, boyuna çekme modülünden ziyade enine doğrultuda gerçekleşebilir. Taketa (2011), kendinden takviyeli dokuma polipropilen ile tek yönlü karbon elyaf takviyeli polipropileni hibritleştirmiştir. Enine doğrultuda gerilme modülünde pozitif bir hibrit etkisi görüldüğünü ifade etmiştir. Bu durumu, çekme testi sırasında enine yönde büzülme eğilimi yüksek olan kendinden güçlendirilmiş polipropilenin poisson oranına dayanarak açıklamıştır. Bu enine yön, kompozit yapının büzülmesini engelleyen sert karbon elyaflarla çakışır. Bu yüzden kompozit yapı ek kısıtlamaların etkisiyle bir bütün olarak değerlendirilecek olursa, karışım kuralının beklenen doğrusal etkisinden daha sert davrandığı görülür.

Kretsis (1987)'in analiz ettiği literatür verilerinde DU elyaf içeriğinin azalmasıyla hibritleştirme etkisinin arttığını açıkça göstermiştir. Kopma gerilmesi için hibrit etkisinin tipik bir aralığı %10-50 olarak görülmüştür. Ancak aykırı olarak Chamis *et al.* (1981), %66'ya kadar negatif hibrit etki değerleri bildirdiği daha önce yapılmış bir çalışma da mevcuttur. Bu sonuçlar gerçekçi olmayan değerler olarak dikkate alınmamıştır. Aveston and Sillwood (1976), karbon/cam tabakalar arası hibritlerde %116'lık pozitif bir hibrit etki rapor etmişlerdir. Ancak bunun nedeni ise karbon elyaflar için makul olmayacak derecede düşük kırılma kopması değerlerini referans değer olarak almalarıdır. Kretsis'in (1987) topladığı literatür verilerini yorumlamak için önemli bir husus bu verilerin 32 yıl öncesine dayanmaktadır. O zamanlardan günümüze elyaf üretim teknolojisindeki ciddi gelişmeler, elyafların malzeme özelliklerini de önemli dercede iyileştirmiştir. Zhang *et al.* (2012) dokuma cam ve karbon elyafını hibritleştirmişler ve kırılma kopması değerlerinde %10-31 arasında iyileşmeler bulmuşlardır. Eğer her iki elyaf da doğrusal olarak elastik ise, gerilme modülü, elyaf yönünde karışım kuralını doğrusal bir şekilde izlemektedir. DeneySEL olarak kopma gerilmesinin arttığı gözlemlendiğinde, çekme

dayanımının da artması beklenir. Ancak bu durum, her zaman beklendiği gibi olmayabilir. Kopma gerilmesinin artmasının nedeni genellikle kademeli bir kırılmadır, yani gerilme diyagramının son kısımları artık doğrusal değildir. Zhang *et al.* (2013) hibritleşme neticesinde, tek yönlü cam/keten hibrit kompozitlerin nihai gerilme dayanımının %15 arttığını bildirmişlerdir. Ren *et al.* (2010) iki farklı karbon elyaf türünü tek bir kompozitte birleştirerek küçük ama negatif bir hibrit etki gözlemlemişlerdir. Intralayer hibritlerin gerilme mukavemetini, interlayer hibritlerden biraz daha yüksek bulmuşlardır. Bunu artan dispersiyonun hibrit kompozitlerde daha iyi mekanik performansa yol açması ile açıklamışlardır.

2.9.2. Darbe (impact) özellikleri

Sertlik ve tokluk değerlerini iyileştirmek amacıyla yapılan hibridizasyon çalışmalarında hibrit etkiyi belirlemek için genellikle düşük hızlı darbe testleri yapılmaktadır. Bu yapıların darbe dayanımları hakkında fikir yürütebilmek için; tabakalar arası yapışma, yüzey tabaka türü, sertlik ve tokluk gibi farklı durumlardan kaynaklanabilen aşağıdaki üç önemli hususa dikkat etmek gerekir.

- Delme sırasında emilen enerji,
- Delici olmayan darbe etkisi sonucunda oluşan hasarlı bölgenin analizi
- Darbeden sonra artık özellikler

Hibrit kompozitlerin darbe performansının katmanların dağılımından (dispersion) ve konumlandırılmasından etkilendiğine dair birçok çalışma mevcuttur. Artan dispersiyon, hibrit kompozitlerde delici olmayan darbe direncini ve artık özelliklerini arttırmaktadır. Delinme darbe direncinin, dispersion ile de arttığını gösteren bazı kanıtlar bulunmaktadır. En yüksek enerji emme potansiyeline sahip elyafları dış tabakada konumlandırma, hibrit kompozitin daha fazla enerji emmesini sağlamaktadır.

Katmanların diziliş sırası eğilmede olduğu gibi darbeye de oldukça önemlidir. Özellikle temas yüzeyindeki elyaf türü, eğilme dayanımı gibi darbe hasar mekanizmalarını da

doğrudan etkiler. Sayer *et al.* (2010), karbon ve cam elyaflarından oluşan simetrik olmayan interlayer hibrit kompozit üretimi yaptılar. Bu simetrik olmayan plakalardan elde edilen test numuneleri sayesinde, cam elyaf içeren yüzeyin yanı sıra karbon elyaf içeren yüzeyinde test edilmesi mümkün hale gelmiştir. Karbon tabakaları darbeden dolayı direkt etkilenen tarafta iken, delinme direnci %30 artmıştır. Park and Jang (2001), simetrik olmayan aramid/karbon hibrit kompozitler üzerinde benzer testler yapmışlar ve önceki çalışmalara benzer şekilde karbon tabakanın çarpma tarafında olması durumunda, delinme direncinin daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Jang *et al.* (1989) sadece iki katmanlı simetrik olmayan aramid/karbon elyaflı hibrit kompozitleri incelemiş ve darbe testleri sonunda iki katman arasında ciddi bir fark bulamamışlardır. Bu tür birbirine benzemeyen elyaf türlerinin benzer davranış göstermesi şaşırtıcı bulunmuştur. Karbon elyafların, darbelere karşı daha yumuşak olan polietilen elyaflar ile değiştirilmesinin, diğer tarafa konulmasına kıyasla çarpma direncini yaklaşık %50 artırdığı ifade edilmiştir. Polyester terephthalate (PET) ve karbon elyaflı hibrit kompozitler için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, iki yüzeyin maruz kaldığı hasar mekanizmalarındaki farka atfedilebilir. Yani çarpma yüzeyi bası sıkıştırmasına maruz kalırken diğer yüz çekme dayanımı ile yüklendiği için hasar mekanizmaları farklı olacaktır. Bu sonuçlar, YU elyafların darbe tarafına koyulmasının faydalı olacağını göstermektedir. Jang *et al.* (1989)'ın sonuçları, Sayer *et al.* (2010) ve Park and Jun (2001)'nin sonuçlarına aykırı görünmektedir. Bu durum, büyük olasılıkla malzemelerdeki ve ara yüzlerindeki farklılıklar tarafından tetiklenen hasar mekanizmalarındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Bu ilişkiyi tam olarak açıklamak oldukça zordur.

Enfedaque *et al.* (2010) ve Sevkati *et al.* (2009), cam elyafların içeriden ziyade dışarıya konumlandırıldığında simetrik karbon/cam hibritlerinin daha iyi darbe direncine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Her iki araştırmacı da bunu, cam elyafların hasar başlamasını geciktiren daha yüksek kopma uzaması değerlerine sahip olmasına bağlamıştır. Sevkati *et al.* (2010) başka bir çalışmada, karbon elyafları ile güçlendirilmiş kompozitlerde tekrarlanan darbe testlerinden sonra özellikle dış tabakalara cam elyaf tabakası

eklendiğinde hasar birikiminin yavaşladığını bildirmişlerdir. Sevkati *et al.* (2009), karbon/cam elyafli hibrit kompozitlerde hasarlı alanın her iki referans kompozitten daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Bu durum, katmanların uyumsuzluğundan dolayı oluşan delaminasyonlara bağlanmıştır. Naik *et al.* (2001) ise karbon/cam hibritlerin darbe sonrası çarpma dayanımlarının her iki referans kompozitinkinden daha yüksek olduğunu bildirmiştir. İlginç bir şekilde, karbonun dışarıda olduğu hibrit kompozitler için en yüksek değerler bildirilmiştir. Bu durum, dış yüzeyinde karbon elyafı içeren hibrit kompozitlerin kırılma endeksi parametresine dayanarak çarpma sonrasında daha iyi performans gösterdikleri sonucuna varmış olan Kowsika and Mantena (1999)'nın sonuçlarını doğrulamaktadır. Bunlar, kırılma endeksi parametresini, hasar başlatmak için gereken enerjinin, toplam absorbe edilen enerjiye oranı olarak tanımlamışlardır. Burada hasar başlatma enerjisi, kuvvet-yer değiştirme diyagramındaki doğrusallıktan ilk önemli sapmaya göre belirlenir. Literatürde simetrik olmayan hibrit kompozitlerde katmanların konumlandırılmasının, “darbe etkisi ile delinme direnci” üzerindeki etkisine dair net bir sonuç elde edilememiştir. De Rosa *et al.* (2011), daha güçlü bazalt elyaflarının dışa koyulmasının, bazalt/cam hibritlerde eğilme sonrası mukavemeti geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte çarpma sonrası eğilme testlerinde dezavantaj olarak, daha kapsamlı bir akustik emisyon ve karmaşık bir hasar gelişimi tespit etmişlerdir. Park and Jang (2000) prensipte, intralayer aramid/polietilen elyaf hibritlerin, daha küçük delamine edilmiş bir alana sahip olmasının, daha iyi çarpma sonrası mekanik özelliklere yol açması gerektirdiğini ifade etmişlerdir. Ancak, interlayer hibritlerin intralayer hibritlerinden daha yüksek bir “penetrasyon darbe direncine” sahip olduğunu gözlemlemişlerdi. Bu durumu, interlayer hibritlerde intralayer hibritlerden daha kolay delaminasyon gelişmesine bağlamışlardır.

Hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri ile ilgili yapılan literatür taramasında, her zaman böyle olmamakla birlikte, çoğu durumda pozitif hibrit etkilerin elde edilebileceğini kanıtlamıştır. Dağılım (dispersion) derecesinin önemli bir parametre olduğu, genel olarak artan dağılımın daha büyük hibrit etkilere ve daha iyi performansa yol açtığı görülmüştür. Bununla birlikte, bazı istisnalara da rastlanılmıştır. Özellikle eğilme ve darbe gibi

karmaşık yükleme koşulları için, bazı araştırmacıların belirli parametrelerin etkisiyle ilgili çelişkili sonuçları olmuştur.

Hibrit kompozit araştırmalarının ilk hedeflerinden birisi, maliyetleri düşürüp, karbon elyafın kırılma uzamasını (failure strain) iyileştirmektir. Günümüzde bu hedef güncelliğini korumakla beraber daha çok ayrı ayrı sahip olunmayan malzeme özelliklerinin birleştirme sonrasında oluşturulan hibrit kompozit yapıdan elde edilmesi üzerine odaklanılmıştır. Eğilme ve darbe gibi karmaşık yükleme koşullarında hibrit kompozit yapıların etkilenme mekanizmalarını daha iyi anlamak için daha ayrıntılı çalışmalara gereksinim duyulmaktadır. Hibrit etkinin doğru bir şekilde ölçülmesi ve değerlendirilmesi için, hibrit ve tekil referans kompozitlerin üretim, numune hazırlama, standartlaştırılmış deney düzeneği ve yapılan test işlemlerinde çok hassas olunması gerekir. Literatürde bildirilen çelişkili olabilecek hibrit etkilerin, bu hassasiyete uyulmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Nosraty *et al.* (2015) çalışmalarında naylon elyafın mükemmel dayanıklılığını ve bazalt elyafın iyi mukavemet özelliğini kullanarak daha üstün özellikli intraply hibrit kompozit yapılar elde etmişlerdir. Deneysel olarak; beş farklı hacim oranında bazalt ve naylon dokumalı intraply hibrit kompozit yapılar üretmiş, çekme, basma testlerini ve kırılma sonucu numunelerin SEM analizlerini yapmışlardır. Sonuçlar, çekme ve basma performanslarının bazalt ve naylon elyaf oranları ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Dehkordi *et al.* (2013) tarafından farklı oranlarda yumuşak ve iyi darbe direncine sahip naylon elyaflar ile kırılma fakat iyi mekanik özelliklere sahip bazalt elyafı takviye edilerek üretilen intraply hibrit kompozit tabakaların düşük hızlı darbe ve basınç testleri yapılmıştır. Düşük darbe enerjisinde naylon bazalt değişiminin darbe performanslarını geliştirmediği, darbe enerjisinin artması ile darbe performansının kompoziti oluşturan içerikle doğrudan ilgili olduğu tespit edilmiştir. Pegoretti *et al.* (2004) ise E-cam ve polivinil alkol dokuma kumaşlar ile intraply ve interply hibrit kompozit malzemeler üretmişler, çekme ve darbe testlerini yaparak elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Intraply hibrit kompozitlerde çatlak ilerlemesinin, interply hibrit kompozitlere göre daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Zhang *et al.* (2012),

hafif yük taşıyan yapılar için cam ve karbon elyaf dokuma kumaşlarla güçlendirilmiş interply hibrit kompozitlerde, plain dokuma cam elyaflar ile twill dokuma karbon elyafların farklı diziliş sıraları için çekme, basma ve üç nokta eğilme testleri sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Deneysel olarak test edilen numuneler için analitik çözümler geliştirmişler ve bu çözümlerin deneysel verilerle iyi bir uyum sağladığı belirtmişlerdir. Hibrit kompoziti oluşturan elyafların diziliş sırası değiştirilerek maksimum dayanım elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Yeter *et al.* (2014) tabakalı kompozit yapılarda hibritleşmenin burulma davranışına etkisini incelemiştir. Bunun için 12 tabakalı 0/90, 30/60, -45/45 yönlenme açılı ve S-cam, aramid ve karbon elyaf takviye elemanlı interply hibrit kompozit numunelerde burulma davranışlarını araştırmışlardır. Diziliş sırasının burulmayı doğrudan etkilediğini belirtmişler ve ayrıca bu sonuçları sayısal analiz sonuçlarıyla (ANSYS® ile) desteklemişlerdir. Zhang *et al.* (2018) çeşitli oranlarda cam ve karbon içeren interlayer ve intralayer kompozit plakalar üretmişlerdir. Bunları düşük hızlı darbe testlerine tabi tutmuşlar. Ve en iyi darbe direncini 1:1 karbon cam içeriğine sahip intralayer kompozitlerde görüldüğünü ifade etmişlerdir. Ying *et al.* (2017) karbon ve aramid elyaf içeren, 13 tabakalı, 4 interply, 1 intraply olmak üzere beş farklı hibrit kompoziti düşük hızlı darbe testine tabi tutmuşlardır. Aynı darbe enerjileri için, darbe yüzeyinde karbon elyaf bulunan interply hibrit kompozitlerin daha yüksek darbe hasar direncine sahip olduğu belirtilmiştir. Yüksek gerilimli bölgelere takviye olarak karbon elyaf kumaş yerleştirilmesinin darbe özelliklerini iyileştireceği ve interply hibrit kompozitlerin diğer hibritlere göre daha avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir.

2.9.3. Eğilme özellikleri

Eğilme durumunda, tarafsız eksen boyunca gerilmeler sıfırdır, ancak bu eksen den uzaklaştıkça kuvvetin etki ettiği yüzeyde bası gerilmesi ve diğer yüzeyde ise çeki gerilmesi şeklinde görülür. Hibrit kompozitlerde, elyaf türü, diziliş sırası, tabaka kalınlığı ve elyaf yönlenme açıları değiştirilerek eğilme performansında amaca uygun en iyi alternatifler elde edilebilmektedir. Ancak hibrit kompozitlerde eğilme özelliklerinde, çekme özellikleri gibi basit karışım kuralı yerine klasik tabaka teorisi daha doğru sonuçlar vermektedir.

Bası dayanımının çeki dayanımına oranı, karbon ve cam elyafı kompozitler için farklıdır. Bu değerler ile ilgili genel geçerlilik olmamasına rağmen Wonderly *et al.* (2005) bu oranı, cam elyafı kompozitler için 0.73, karbon elyaflar için 0.34 olarak vermişlerdir. Bununla birlikte, sıkıştırıcı tarafta dıştaki karbon elyafları, cam elyaflar ile değiştirilerek kompozitin eğilme mukavemetinin artırılmasının mümkün olabileceği ifade edilmiştir.

Eğilme testleri, çenelerin numuneyi kavrama sorununa kıyasla çekme testlerine göre avantajlıdır. Fakat elyaf diziliş simetrik olmayan, farklı elyaf yönelme açılarına sahip (30°/60° gibi) test numunelerinde çarpık bükülme (twist)'den dolayı test edilen düzlemde eksenden kayma gibi olumsuz durumlar ile karşılaşmak mümkündür. Boyutsal etkilerin, hibrit olmayan tabakalı kompozit yapılarda olduğu gibi, hibrit yapıların da eğilme mukavemet özelliklerinde etkili olduğu bilinmektedir (Wisnom *et al.* 1991; Wisnom 1997). Hibrit kompozitlerde tabakaların farklı sertliklerde olmasından dolayı gerilme gradyanlarının dağılımı oldukça karmaşık olabilmektedir. Mevcut literatürde bu önemli durum yeterince yer almadığı için bu konu ile ilgili yapılacak ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç vardır.

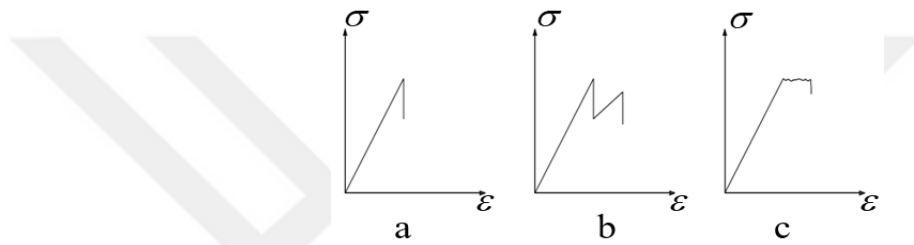
Dong *et al.* (2012), karbon/cam intralayer hibritlerin deneysel eğilme mukavemetlerini ayrı ayrı karbon ve cam referans kompozitlerine göre %40 ve %9 daha yüksek bulmuşlardır. Hibrit kompozitler için deneysel olarak elde edilen dayanım değerleri, hem sonlu elemanlar analizi hem de klasik laminat teorisine göre elde edilen değerlerden daha yüksektir. Benzer şekilde, Giancaspro *et al.* (2010), cam elyaf kompozitlerinin gerilme tarafından (tension side) kırıldığını, karbon elyaf kompozitlerin ise çoğunlukla sıkıştırma tarafından (compression side) kırıldığını belirtmişlerdir. Cam elyafı kompozitlerinin gerilme tarafına karbon elyafı eklemek, eğilme dayanımını arttırırken, sıkıştırma tarafına eklendiklerinde durum aynı değildir. Sonraki durumda, hata modu, gerilme tarafındaki kırılmadan, sıkıştırma tarafındaki ezilme şekline değişmiştir. Davies and Hamada (2001), sıkıştırma tarafındaki %12.5'lik karbon elyafının yerine silikon karbid elyafların yerleştirilmesinin eğilme dayanımını %22 arttırdığını belirtmişlerdir. Giancaspro *et al.* (2010), ve Dong and Davies (2012), maksimum eğilme mukavemetini elde etmek için optimal bir cam elyaf seviyesinin belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. Dong and Davies

(2012) karbon/cam hibritlerdeki en yüksek eğilme dayanımının, tümü sıkıştırma tarafına (compressive side) yerleştirilmiş %12.5'lik bir cam elyafı içeriği ile elde edildiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle simetrik bir plaka, bükülme yüklerine maruz kalacak hibrit bir kompozit için en uygun tasarım değildir (Dong *et al.* 2012; Dong and Davies 2012). diğer Bir optimal tasarım için, cam elyaf katmanlarının içindeki elyaf hacminin karbon elyaf katmanlarından daha yüksek olması durumunda eğilme mukavemetinin daha da geliştirilebileceğini ifade etmişlerdir.

Ayrıca birçok araştırmacı doğal elyafların hibrit kompozitlerin eğilme davranışına etkisini araştırmışlardır. Beklendiği üzere, hibridizasyon işlemi ile çoğunlukla her iki elyaf tipinin performansı arasında bir performans elde edilmektedir. Ancak bu alandaki araştırmaların çoğu hibritleşmenin oluşturduğu etkiler ile ilgili olarak içsel mekanizmaların net bir şekilde değerlendirilmediği görülmüştür. Bazı araştırmacılar, ara yüz kalitesi eksikliği nedeniyle oluşan yapışma sorunlarının beklenenden daha düşük eğilme özelliklerine sebep olduğunu bildirmişlerdir (Khanam *et al.* 2010; Petrucci *et al.* 2013; Boopalan *et al.* 2013). Yüzey işlemleri yapılarak yapışmanın artırılması ile muz/cam elyafı hibrit kompozitlerde (Haneefa 2008) ve hindistancevizi/ipek hibrit kompozitlerde (Khanam *et al.* 2010) eğilme dayanımında artış elde edilmiştir. Wu *et al.* (2018), cam ve karbon ile yaptıkları interlayer ve intralayer hibrit kompozit yapılarında eğilme testlerini yaparak hibritleşirmenin etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Genel olarak simetrik dizilişe sahip olmayan numune türlerini incelemişlerdir. İntralayer kompozitler üzerindeki deneysel sonuçlar, karışım kuralı (ROM-Rule of Mixtures-) aracılığıyla hesaplanan teorik değerlerle iyi bir uyum göstermiştir. Karbon elyaf içeriğinin artmasıyla, eğilme kırılma dayanımının azaldığı, eğilme modülünün arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, interlayer hibrit kompozitlerin intralayer hibrit yapılarla kıyasla daha iyi tasarlanabilirliğini, karışım oranı ve hibrit yapının optimizasyonu yoluyla daha az karbon elyaf ile mükemmel esneklik performanslarının elde edilmesinin mümkün olacağını belirtmişlerdir. Böylece hibrit kompozitlerin eğilme özellikleri daha yüksek bir seviyeye ulaşabileceğini ifade etmişlerdir.

2.10. Yalancı Süneklik (Pseudo-Ductility)

Hibrit kompozitler üzerine yapılan araştırmalarda ilgi çekici diğer konuların başında yalancı süneklik (pseudo-ductility) kavramı gelmektedir (Swolfs *et al.* 2014). Geleneksel elyaf takviyeli kompozitlerin düşük yoğunluklu ve iyi mekanik özelliklere sahip olmasına dikkat edilir. Bu Kompozitlerin kırılmaları bir uyarı olmadan, ani ve yıkıcı bir şekilde meydana gelmektedir (Şekil 2.4. a).



Şekil 2.4. Gerilim gerinim diyagramı

a) hibrit olmayan b) klasik hibrit c) sahte sünek hibrit (Swolfs *et al.* 2014)

Hibridizasyon yapılarak, kırılğan elyaf takviyeli kompozitlerde, kontrollü ve kademeli bir kırılma sağlanabilir. Bu davranış, tipik olarak metallerde bulunan sünek davranışına benzer olduğu için sahte süneklik (pseudo-ductility) olarak adlandırılmaktadır. Bu tür davranışlar, ilk olarak yetmişli yıllarda dikkat çekmiş (Bunsell and Harris 1974) ve müteakip yıllarda Manders and Bader (1981) gibi birçok araştırmacı tarafından mevzu bahis edilmiştir. Klasik bir hibrit kompozitin gerilim-gerinim diyagramı, Şekil 2.4.b’de gösterilmiştir. Bu tür yapılarda ilk olarak DU elyafli tabakalar, daha sonra YU elyafli tabakalar kademeli olarak kırılırlar. Bununla birlikte uygun elyaf türleri ve oranları kullanılarak, hasar mekanizmaları kontrol edilebilecektir. Böylece, Şekil 2.4.c’de gösterildiği gibi, daha kademeli bir kırılmaya sebep olan sahte süneklik kavramı ile nitelenen durum elde edilebilecektir. Son yıllarda sahte sünek malzeme özelliğine sahip hibrit sistemlere artan bir ilgi vardır. Önümüzdeki yıllarda yapılacak hibritleştirme çalışmalarında sahte süneklik kavramı açısından en önemli sorunun, hibrit yapı içerisindeki DU elyafları daha yüksek hacim oranlarında elde etmeye yönelik yöntemlerin geliştirilmesi olacağı düşünülmektedir.

Hibrit kompozitler hakkında yapılan ilk çalışmalarda, karbon elyaflar, cam ya da aramid elyaflarla hibritleştirilmiştir. Cam ya da aramid elyaflar, karbon elyaflardan daha büyük bir kopma uzaması değerlerine sahiptirler.

Son yıllarda, çoğunlukla çevresel kaygılardan dolayı üzerinde durulan konulardan başında doğal elyaflar gelmektedir. Bambu, sisal, muz, kenevir, jüt, keten, hindistan cevizi gibi birçok doğal elyaf türü ile ilgili hibritleştirme çalışmaları yapılmıştır. Doğal elyafların cam elyaflar ile hibritleştirilmesi neticesinde, genelde birçok mekanik özellik geliştirilmiştir. Bunun yanında nem hassasiyeti azalmış, dayanıklılık ve darbe direnci değerleri artırmıştır. Karbon elyafın, doğal elyaf ile oluşturduğu hibritleştirmelere nadiren rastlanılmıştır (Jawaid and Khalil 2011). Bunun başlıca sebebi olarak, doğal elyaflar ile karbon elyaflar arasındaki fiyat farkı ve cam elyaflara kıyasla karbon elyafların yüksek yaşam döngüsü maliyetleridir.

Tekil kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalar belli bir olgunluğa ulaşmış ve hibrit kompozit mekanizmalarının daha iyi anlaşılması için bir alt yapı oluşturmuştur. Hibrit kompozitlerin gerilme özellikleri ile ilgili de oldukça fazla veri bulunmaktadır. Eğilme ve darbe testleri gibi daha karmaşık yükleme koşulları altındaki hibrit etkiler henüz iyi anlaşılmamıştır. Bazı çalışmalarda hem sonuçlar, hem de oluşan hasar mekanizmaları hakkında çelişkilere rastlanılmaktadır. Bu alanda içyapı mekanizmalarını net olarak anlamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Bu sorunlara rağmen, hibrit kompozitler hem akademik alanda hem de endüstriyel uygulamalarda sürekli artan bir ilgiye sahiptir. Sahte süneklığe sahip hibrit yapılar oluşturmak için sünek ve doğal elyafların kullanılması yeni gelişmeler için önemlidir. Bu gelişmeler sayesinde hibrit kompozit yapıların uygulanabilirliğine katkı sağlanacaktır.

2.11. Sayısal Model Oluşturulması (ANSYS® APDL)

Gerçek hayatta karşılaşılan sorunların mevcut teorik yaklaşımlarla çözülmesi oldukça zordur. Bu tarz problemlere karşı sayısal yöntemlerin kullanılması ciddi kolaylıklar sağlamaktadır. Birçok endüstriyel ve akademik uygulamada sonlu elemanlar yöntemine

göre çözüm üreten ANSYS® paket programı kullanılmaktadır. Üretimlerden önce farklı çalışma şartları ve yükleme durumlarını dikkate alarak sayısal yöntemler ile analiz yapan bu tür programlar sayesinde, maliyet, zaman ve güvenlik açısından ciddi kazanımlar sağlanmıştır. Doğruluğu kanıtlanmış iyi bir model sayesinde istenilen özelliklere sahip üretimlerin gerçekleştirilmesi mümkündür. Ancak bu tür programlarda üzerinde durulması gereken önemli bir husus, oluşturulan modelin gerçek durumu iyi bir şekilde temsil etmesidir. Başlangıç ve sınır şartlarının, yükleme durumunun, analiz türünün ve “mesh”lemenin problemin gerçekleri ile örtüşmesi gerekmektedir. Aksi takdirde elde edilen sonuçlar çok yanıltıcı olabilir.

2.12. Taguchi Deney Tasarımı

Geleneksel metotlar ile yapılan deneysel çalışmalarda, parametreler arasındaki ilişkiler dikkate alınmamakla birlikte çok fazla para ve zaman harcanmaktadır. İstatistiksel yöntemlerden olan tam faktöriyel deney tasarımı, en az iki parametre ve bu parametrelere ait en az iki seviyenin bulunması durumunda, seviye sayılarının birbirleriyle çarpımları kadar üretim yapılmasını gerekli kılar. Tam faktöriyel deney tasarımı, olabilecek bütün ihtimallerin üretilmesi gerekeceği için maksimum maliyet ve zaman gereklidir. Kesirli faktöriyel deney tasarımı, tam faktöriyel deney tasarımına nispeten maliyetten ve zamandan tasarruf etmek amacıyla deney sayısının orantılı olarak azaltılmasını önerir. Örneğin; 3 parametre ve her bir parametre için üçer seviyenin gerekli olduğu bir durumda, tam faktöriyel deney tasarımı yapıldığında $3^3=27$ üretim yapılması gerekir. Kesirli faktöriyel deney tasarımı ise bunun $2/3$ 'ü yani 18 deney ile veya $1/3$ 'ü yani 9 deney ile yapılabilir. Burada deney sayısını kesirli olarak azaltmak tamamen araştırmacının tercihine bağlıdır.

Taguchi yöntemi ile deney tasarımı ise, sistem tasarımı ve tolerans tasarımı üzerine kurulmuş bir deney tasarım ve optimizasyon yöntemidir. Taguchi yöntemi, üretim parametrelerini optimize etmek ve imal edilen ürünlerin kalitesini artırmak için kullanılan istatistiksel bir yaklaşımdır. Taguchi yöntemiyle parametre tasarımının, işlem parametrelerini optimize etmekte basit, sistematik ve etkili bir yöntem sağladığı, yapılmış

birçok akademik çalışma ile de teyit edilmiştir. Taguchi deney tasarım yöntemi, farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasından optimum kombinasyonu belirlemek için oldukça faydalı bir yöntemdir. Bütün parametrelerin, bütün seviyelerini dikkate alarak çok sayıda deneysel çalışma yapılması gereken durumlarda Taguchi yöntemi kullanılarak, daha az sayıda deneysel çalışma ile sonuca ulaşılabilir. Taguchi deney tasarımında üç ana kavram üzerinde durulur. Bunlar; sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır.

Taguchi Deney Tasarımı kullanılarak bulunan deneysel sonuçlar, Sinyal/Gürültü (S/G) oranına dönüştürülerek kullanılmaktadır.

- S/G oranı değeri daha küçük olan değer, daha iyi
- daha büyük olan değer, daha iyi
- hedef ortalama değer, daha iyi

alternatiflerinden amaca uygun olanı tercih edilerek analizler yapılabilir.

Taguchi yönteminde elde edilen grafikler yardımı ile üretimde en etkili parametreler belirlenir. Bu tasarımda nihai sonuca göre gerekli görülmesi halinde doğrulama deneyleri için ilave deneylerin yapılması teklif edilebilmektedir. Athreya and Venkatesh (2012), yaptıkları çalışmada gerekli parametrelerin optimize edilmesi için Taguchi deney tasarımı metodunu uygulamış ve tam faktöriyel tasarım ile karşılaştırıldığında daha az sayıda deney ile benzer sonuçların elde edildiğini görmüşlerdir. Gürkan and Cebeci (2016), prepreg kompozitlerde CNT takviyesinin ara tabaka kayma mukavemetine (ILSS) etkisini belirlemek için Taguchi'nin L8 ortogonal dizisini kullanarak numunelerini imal etmişlerdir. Nanubala *et al.* (2016) ürettikleri GFRP kompozitlerde, delme işlemi esnasında malzeme uzaklaştırma oranını en üst düzeye çıkarmak ve delaminasyon hasarını en aza indirmek için kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap çapı gibi parametreler için Taguchi yöntemi ile varyans analizi ANOVA (Analysis of Variance) yaparak en etkili parametreleri bulmuşlardır. Sutharson *et al.* (2012), Taguchi metodunu kullanarak doğal elyaf (hint keneviri) ve GFRP'den oluşan hibrit kompozitlerin kesme mukavemeti,

sertliği ve sıkıştırma mukavemeti için deneysel araştırmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, diziliş sırası, NaOH yüzdesi, işlem saatleri ve fırın kürlenme süresi gibi süreç parametrelerinin etkisini, Taguchi yöntemi ile varyans analizi yaparak en etkili parametreleri tespit etmişlerdir. Aydın and Gündoğdu (2018) sandviç kompozit yapılarda doğal frekans ve sönüm oranı üzerinde poliüretan köpük dolgusu, yüzey tabakası kalınlığı ve çekirdek malzemesi kalınlığı faktörlerinin en etkili seviyelerini Taguchi yöntemi ile belirlemişlerdir.

Yukarıda da bahsedildiği üzere Taguchi yöntemi ile deney tasarımı, deneysel çalışmalarda farklı faktör ve seviye durumları için çok yaygın olarak kullanılan etkili bir metottur. Kompozit yapılarla ilgili deneysel çalışmalarda da başarılı bir şekilde kullanıldığı literatürdeki birçok çalışmadan görülmüştür. Tez çalışması kapsamında Taguchi yöntemi ile üretim optimizasyonu yapılarak hem maddi hem de zaman ile ilgili ciddi kazanımlar elde edilerek ilgili testler için yapılacak üretimlerde en etkili parametrelerin tespit edilmesi mümkün olmuştur.

2.13. Tez Çalışmasının Özgünlüğü

Yapılan literatür araştırmalarında farklı üretim metodları ile üretilmiş tekil kompozitler, interply ve intraply hibrit kompozit malzemelerin, mekanik, dinamik ve termal özelliklerinin tespiti ve karşılaştırılması ile ilgili birçok çalışmaya rastlanmıştır. Fakat tabakalı kompozitlerde interply ve intraply hibritleşmenin dinamik özellikler üzerine yaptığı etkiyi ayrıntılı olarak karşılaştırmalı bir şekilde inceleyen çalışmalara rastlanmamıştır. Hibrit kompozitlerin titreşim özelliklerinin araştırıldığı çalışmalarda daha çok interply hibrit kompozit yapılar üzerine çalışılmıştır. Dolayısıyla intraply hibrit kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalar henüz yeterli seviyeye ulaşmamıştır. Literatürde yapılan çalışmaların tez kapsamında yapılan çalışmadan bir önemli farkı; yapılan çalışmaların çoğunlukla farklı dokuma türlerine (tek yönlü-unidirectional-, düz-plain- ve balıksırtı-twill- dokuma) ve yoğunluklarına sahip kumaşlar ile üretilen kompozitlerin birbirleri ile karşılaştırılmasıdır. Tez çalışması kapsamında ise aynı iplik bobinlerinden, aynı gramajlarda ve aynı dokuma şekilleri ile üretilen karbon, aramid ve cam kumaşlar

kullanılarak oluşturulan tekil, interply ve intraply kompozitlerin mekanik ve dinamik özellikleri karşılaştırmalı bir şekilde analiz edilmiştir. Tez çalışması, eşdeğer özelliklere sahip elyaf kullanılarak üretilen interply ve intraply hibritleştirme işlemlerinin karşılaştırmalı olarak incelemesi sebebiyle özgün değere sahiptir.

Tez çalışması kapsamının asıl ilgi odağı tabakalı hibrit kompozit malzemelerin titreşim özellikleri iken bu özelliklerin mekanik özellikler ile ilişkili olması ve sayısal analizler için mekanik özelliklerin bilinmesi gerektiği için mekanik özellikler üzerinde de ayrıntılı olarak durulmuştur. Kompozit malzemeler ile ilgili çok fazla üretim gerektiren deneysel çalışmalarda Taguchi deney tasarımı ile üretim optimizasyonunun yapılması da ayrı bir yenilik olarak değerlendirilebilir. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçların, elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapıları kullanan ve hibrit kompozit yapı kullanımı ile ilgilenen taraflar için yararlı olacağını düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında; güvenilirliği yüksek, tekrarlanabilir, standartlara uygun testler icra edilmiştir. Bu sayede gerek elyaf yönlenme açısı, gerekse tabaka sayısı ve elyaf kumaş türleri etkili bir şekilde kullanılarak elyaf takviyeli kompozitlerde interply ve intraply hibritleştirme etkisi daha iyi anlaşılmıştır. Bu sayede; zaman ve maddi imkânlar gibi sınırlı kaynakların en iyi şekilde kullanılması sağlanmıştır. İnterply ve intraply hibrit kompozitlerin karşılaştırmalı dinamik ve mekanik analizleri yapılmıştır. Bu sayede farklı yükleme durumlarının hibritleştirme türleri üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Dinamik şartlar altında çalışabilen, mekanik ve dinamik özellikleri bilinen, farklı yükleme durumlarına dayanıklı, yüksek sönüm kapasitesine sahip tabakalı hibrit kompozit malzemelerin tasarlanması mümkün olmuştur. Sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumluluğu göz önüne alınarak kabul edilebilir doğrulukta sayısal modeller elde edilmiştir. Bu sayede de ilave üretimler yapılmaksızın farklı konfigürasyonların frekans analizlerinin yapılması mümkün olmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Hibrit ve tekil kumaşlardan düz kompozit plakalar üretilerek hibritleşme özellikleri karşılaştırılacağı için *plain dokuma* elyaf kumaşların kullanımı uygun görülmüştür. Tekil ve interply hibrit kompozitlerin üretiminde 200g/m^2 yoğunluk ve 1m genişliğe sahip karbon (K), aramid (A) ve cam (C) elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Intraply hibrit kompozitlerin üretiminde ise aynı yoğunluk ve genişlik değerlerine sahip cam-aramid (CA), karbon-aramid (KA) ve karbon-cam (KC) hibrit kumaşlar kullanılmıştır. Tekil ve hibrit elyaf kumaşlar, Carbomid® A.Ş. (İstanbul)'ye özel sipariş verilerek temin edilmiştir. Kullanılan 6 (altı) farklı kumaş türünün de aynı yoğunluk (g/m^2 cinsinden) ve dokuma şekline (plain woven-düz dokuma-) sahip olması üretilen kompozitlerin özelliklerinin karşılaştırılması açısından önemli bir parametredir. Üretimlerde kullanılan tekil ve hibrit elyaf kumaşların özellikleri, Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Epoksi reçine sistemi olarak ise Duratek DTE 1120 epoksi & DTS 1151 orta hızlı sertleştirici Duratek A.Ş. (Gebze)'den temin edilmiştir. Ayrıca VARTM yöntemiyle üretim için gerekli ekipman ve sarf malzemeler Dost Kimya A.Ş. (Tuzla) ve Fibermak A.Ş. (İzmir)'den temin edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan epoksi reçine sistemi, bir reçine (DTE 1200) ve 4 farklı (DTS 2110 hızlı, DTS 1151 orta, DTS 1155 yavaş, DTS 1110 ise ekstra yavaş) sertleştirici seçeneği sunan uluslararası kabul gören yerli üretim bir üründür. Hızlı sertleştirici küçük/ince ve/veya hızlı üretilmesi gereken parçalarda kullanılırken, ekstra yavaş olan sertleştirici ise tam tersine büyük/kalın ve/veya üretilmesi zaman alan parçaların üretiminde tercih edilmektedir.

Çizelge 3.1. Üretimlerde kullanılan elyaf kumaşlara ait özellikler (Carbomid® 2019)

Elyaf Kumaş Özellikleri						
	Karbon	Aramid	Cam	Karbon Aramid	Aramid Cam	Karbon Cam
Ürün Kodu	CM CP 200	CM AP 200	EWP200S	CM HPS 200	CM AG 200	CM GC 200
Ürün Dokuma türü, Yoğunluğu	Carbon Fabric 3k – Plain 200 gr/m ²	Aramid Fabric 1580 Dtex – Plain 200 gr/m ²	Glass Fabric 300 Tex Plain, 200±5 gr/m ²	Carbon & Aramid Fabric- 3K & 1580 Dtex Hybrid, Plain 200 gr/m ²	Aramid & Glass Fabric- 158 Tex & 300 Tex Hybrid, Plain 200 gr/m ²	Glass & Carbon Fabric-300 Tex & 200 Tex Hybrid, Plain 200 gr/m ²
Çözümlü İpliği	5.0 / Warp-200 Tex 3k Carbon Fiber	6.0 / Warp-1580 Dtex Aramid Fiber	8.0 Warp 300 Tex Glass Fiber	5.5 / Warp-200 Tex 3 K Carbon Fiber	6.0 / Warp-158 Tex Aramid Fiber	3.5 / Warp-300 Tex Glass Fiber
Atkı İpliği	5.0 / Warp-200 Tex 3k Carbon Fiber	6.0 / Warp-1580 Dtex Aramid Fiber	7.0 Weft 300 Tex Glass Fiber	5.5 / Weft-1580 Dtex Aramid Fiber	3.5 / Weft-300 Tex Glass Fiber	4.8 / Weft-200 Tex Carbon Fiber
İplik	Dow Aksa Carbon 3k-A/38	1580 Dtex 1000F High Tenacity / Kolon-Heracron Aramid	300 Tex Glass Fiber	Carbon A/38-3K Aramid 1580 Dtex	Aramid 158 Tex Glass 300 Tex	Carbon A/38-3K Glass 300 Tex
Gerilme Dayanımı	4200 MPa	197 cN/Tex	2306 MPa	Carbon: 3800 MPa – Aramid: 197 Cn/Tex	Aramid: 197 Cn/Tex – Glass: 2306 MPa	Carbon: 3800 MPa – Glass: 2306 MPa
Elastisite Modülleri	240 GPa	118 GPa	Glass: 81.5 GPa	Carbon: 240 GPa- Aramid:118 GPa	Aramid 118 GPa – Glass: 81.5 GPa	Carbon: 240 GPa-Glass:81.5 GPa
Gerinim	1.8%	2.5%	2.97%	Carbon: 1.6%-Aramid 2.5%	Aramid: 2.5%-Glass: 2.97%	Carbon: 1.6%-Glass: 2.97%
Reçine Uyumluluğu	Polyester, Vinylester, Epoxy Resins	Polyester, Vinylester, Epoxy Resins	Polyester, Vinylester, Epoxy Resins	Polyester, Vinylester, Epoxy Resins	Polyester, Vinylester, Epoxy Resins	Polyester, Vinylester, Epoxy Resins
Test Metodu	ISO 10618	ISO 10618	ISO 10618	ISO 10618	ISO 10618	ISO 10618
Rulo Ağırlığı	20 Kg	20 Kg	20 Kg	20 Kg	20 Kg	20 Kg
Rulo Uzunluğu	100m	100m	100m	100m	100m	100m
Rulo Genişliği	100cm	100cm	100cm	100cm	100cm	100cm

Üretimlerde kullanılan epoksi reçine sisteminin başlıca avantajları;

- Esas olarak; infüzyon, VARTM, RTM ve L-RTM yöntemlerine uygundur, el yatırması, vakum torbalama ve filament sargı için de kullanılabilir.
- Farklı sertleştiricileri ile 70-600 dakika arası değişen karışım ömrüne sahiptir.
- Tekne ve rüzgâr türbin kanadı gibi büyük parçaların tek bir seferde infüzyon yöntemiyle üretilmesine olanak sağlamaktadır.
- Oda sıcaklığında kürlenebilmektedir.

- Nispeten düşük sıcaklıkta sıcak kürlendirilerek yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilmektedir.
- Hızlı, orta ve yavaş sertleştiricileri uluslararası kabul gören Germanischer Lloyd, ekstra yavaş sertleştiricisi Lloyd's Register sertifikalı “yerli” olarak üretilen bir sistemdir.

Bu epoksi reçine sistemi, dikey yönde parça üretiminde kullanıldığında, zemine dik yüzeylerde süzülme oluşabilme ihtimali bir dezavantaj olarak dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Çizelge 3.2’de üretimlerde kullanılan yerli Duratek® firmasına ait epoksi reçine sisteminin mekanik ve malzeme özellikleri, Çizelge 3.3’te fiziksel özellikleri, Çizelge 3.4’te ise epoksi ve sertleştiricinin karşım oranları verilmiştir (Duratek®2018).

Çizelge 3.2. Epoksi reçine sistemine ait mekanik özellikler (Duratek® 2018)

Duratek® Epoksi Reçine Sistemi: DTE 1200 (Epoksi) + DTS 1151 (Sertleştirici)			
Özellik	Birim	Standart	100°C’de 4 Saat
Çekme Mukavemeti	N / mm ²	ISO 527 – 2	76 – 81
Maks. Çek. Uzama	%	ISO 527 – 2	4.5 – 5.0
Çekme E – Modülü	kN / mm ²	ISO 527 – 2	3.1 – 3.4
Eğilme Mukavemeti	N / mm ²	EN ISO 178	128 – 133
Eğilme E – Modülü	kN / mm ²	EN ISO 178	3.4 – 3.7
HDT*	°C	ISO 75 – 2	77 – 82
Su Emme	mg	EN ISO 175	41 – 46

* HDT (Heat Deflection Temperature-Isıl Eğilme Sıcaklığı), Polimer malzemelerin hangi sıcaklık değerine kadar kullanım limitini koruyup koruyamadığını belirlemek için kullanılır.

Çizelge 3.3. Epoksi reçine sistemine ait fiziksel özellikler (Duratek® 2018)

Duratek® Epoksi Reçine Sistemi: DTE 1200 (Epoksi) + DTS 1151 (Sertleştirici)		
Yoğunluk	kg/lt (g/cm ³)	1.10±0.05
Viskozite	mPas	350±50
Karışım Ömrü (23°C’de, 100 ml)	dakika	170±15

Çizelge 3.4. Epoksi reçine sistemine ait karışım oranları (Duratek® 2018)

Duratek® Epoksi Reçine Sistemi: DTE 1200 (Epoksi) + DTS 1151 (Sertleştirici)		
	DTE 1200	DTS 1151
Ağırlıkça	100	27
Hacimce	100	33

3.2. Yöntem

Kompozit malzemelerin dinamik özelliklerinin sınıflandırılması ve standardizasyonu oldukça zordur. Özellikle titreşim testlerinde kullanılan akustik ve optik yöntemlerde test ekipmanlarının ve temassız algılayıcıların kullanılması deneysel sonuçların güvenilirliği ve tekrarlanabilirliğini arttırmaktadır. Enerji kayıp mekanizmalarının altında yatan fiziksel nedenlerin daha iyi anlaşılması için daha fazla araştırma çabalarına ihtiyaç vardır (Treviso *et al.* 2015). Bu da iyi bir deneysel sınıflandırma ve deney tasarımı ile mümkün olabilir. Deneysel çalışmaların güvenilirliği, deneylerin standartlara uygun sınır şartlarında ve yeterli miktarda yapılmasına bağlıdır. Sonuçta, fiziksel gözlemlerin en uygun bir şekilde matematiksel ifadelere dönüştürülmesi, deneylerin standartlara göre icra edilip sonuçlarının yorumlanması öngörülen modellerin doğruluk kabiliyetlerini geliştirecektir.

3.2.1. Taguchi yöntemi ile deney tasarımı ve üretim optimizasyonu

Taguchi yöntemi ile deney tasarımı, farklı parametrelerin farklı seviyeleri arasından optimum kombinasyonu belirlemek için kullanılan oldukça faydalı istatistiksel bir yaklaşımdır. Bütün parametrelerin, bütün seviyeleri dikkate alındığında çok sayıda üretim yapılması gereken durumlarda, Taguchi Yöntemi kullanılarak daha az sayıda üretim ile benzer sonuçların elde edilebildiği görülmüştür. Etkisi araştırılacak parametre ve seviyelere uygun ortogonal matrisi belirlemek amacıyla Minitab® programında, DOE (Design of Experiments) içeriğinde bulunan Taguchi tasarımı oluşturma (Create Taguchi Design) modülü kullanılmıştır. Öncelikle bu analizin temel argümanları olan faktörler ve

seviyelere göre üretimlerde referans alınan ortogonal matrisler hakkında bilgi verilecektir.

Çalışma kapsamında üç ayrı üretim grubuna (tekil, interply ve intraply), Taguchi deney tasarımı uygulanmıştır. Dikkate alınan faktör ve seviyeler Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

- Kumaş Türü (Faktör A),
- Tabaka Sayıları (Faktör B) ve
- Yönlenme Açıları (Faktör C) olmak üzere 3 (üç) faktör dikkate alınacaktır.

Seviye, her bir faktör için, etkisi araştırılan durumlar olarak tanımlanabilir. Buna göre üretim gruplarında her bir faktör için dikkate alınacak seviyeler aşağıdaki gibidir.

- Faktör A (Kumaş Türü) için;
 - Tekil üretim grubunda K, A ve C olmak üzere 3 seviye
 - İnterply üretim grubunda (C/A)_s, (A/C)_s, (K/A)_s, (A/K)_s, (K/C)_s ve (C/K)_s olmak üzere 6 seviye
 - İntraply üretim grubunda ise CA, KA ve KC olmak üzere 3 seviye dikkate alınacaktır.
- Faktör B (Yönlenme Açıları)'nın etkisini belirlemek için;
 - Tekil, interply ve intraply üretim gruplarında 0°/90°, 45°/-45° ve 30°/60° yönlenme açıları olmak üzere ortak 3 seviye dikkate alınacaktır.
- Faktör C (Tabaka Sayısı)'nın etkisini belirlemek amacıyla
 - Tekil, interply ve intraply üretim gruplarında 4, 8 ve 12 olmak üzere ortak 3 seviye dikkate alınacaktır.

Dolayısıyla, tekil ve intraply üretimlerde her bir faktör için üçer seviye varken, interply üretimlerde birinci faktör için 6 seviye, diğer iki faktör için ise üçer seviye bulunmaktadır.

Çizelge 3.5'te *Tam Faktöriyel Tasarım* ile *Taguchi Deney Tasarımına* göre gerekli üretim gruplarının faktör ve seviyeleri gösterilmiştir. Bu üç üretim grubu (tekil, intraply ve interply üretim grupları) için Tam Faktöriyel Tasarım ile üretilmesi gereken toplam plaka sayısı, 108'dir. Üretim ve testler esnasında karşılaşılabilecek **deneysel hataların** etkisinin azaltılması, test sonuçlarının **hata** değerlerinin düşürülmesi ve **tekrarlanabilirlik** açısından her bir plakadan iki adet üretilecek, dolayısıyla 108 olan toplam üretim sayısı 216'ya çıkacaktır.

Taguchi deney tasarımı ile üretim optimizasyonu yapılarak toplam üretim adedi 36'ya düşürülmüştür. Aynı yaklaşım ile **deneysel hataların** etkisinin azaltılması, **hata** değerlerinin düşürülmesi ve **tekrarlanabilirlik** açısından her bir plakadan ikişer adet üretilerek plaka sayısı 72'ye çıkarılmıştır. Dolayısıyla Taguchi deney tasarımından faydalanılarak, 216 olan üretim adedi, 72 üretim adedine düşürülerek; maliyet, üretim süresi bakımından ciddi kazanımlar sağlanmıştır.

Taguchi Deney Tasarımına göre üretilmesi gereken ortogonal diziler (üretim şablonları) Çizelge 3.6'daki gibidir. Interply üretim için L18 ortogonal dizisi, intraply ve tekil üretimler için ise L9 ortogonal dizileri, uygun diziler olarak seçilmiştir. Çizelge 3.6'da ilgili üretimlerde dikkate alınan faktör ve seviye kodları belirtilmiştir. Taguchi tasarımına göre hangi faktörlerin hangi seviyelerinin kullanılarak üretim yapılacağını Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da bir örnek üzerinde açıklayalım. Bu örnek üretim, Çizelge 3.6'da "INTERPLY" üretim grubunda "Üretim No 1" kodu ile gösterilen üretimdir.

- A faktörünün 1. Seviyesi: (C/A)_S, kumaş türünde,
- B faktörünün 1. Seviyesi: 0/90 yönlenme açısına sahip,
- C faktörünün 1. Seviyesi: 4 tabakalı

Çizelge 3.5. Taguchi ve tam faktöriyel deney tasarımında dikkate alınan faktör & seviye ve gerekli üretim sayıları

ÜRETİM GRUPLARI	SEVİYELER	FAKTÖRLER			GEREKLİ ÜRETİM SAYILARI			
		FAKTÖR (A)	FAKTÖR (B)	FAKTÖR (C)	Tam Faktöriyel Deney Tasarımı		Taguchi Deney Tasarımı	
		Kumaş Türü	Yönlenme Açıları	Tabaka Sayısı	Bir adet plaka üretilirse	Her bir plaka türünden iki adet plaka üretilirse	(Taguchi Ortogonal Dizisi) Bir adet plaka üretilirse	Her bir plaka türünden iki adet plaka üretilirse
Tekil	Sev. 1	K	0/90	4	27	54	(L9) 9	18
	Sev. 2	A	30/60	8				
	Sev. 3	C	45/-45	12				
Interply	Sev. 1	(C/A) _s	0/90	4	54	108	(L18) 18	36
	Sev. 2	(A/C) _s	30/60	8				
	Sev. 3	(K/A) _s	45/-45	12				
	Sev. 4	(A/K) _s	-	-				
	Sev. 5	(K/C) _s	-	-				
	Sev. 6	(C/K) _s	-	-				
Intraply	Sev. 1	(CA) _s	0/90	4	27	54	(L9) 9	18
	Sev. 2	(KA) _s	30/60	8				
	Sev. 3	(KC) _s	45/-45	12				
TOPLAM ÜRETİM SAYISI					108	216	36	72

Çizelge 3.6. Taguchi deney tasarımına göre üretim grupları için oluşturulan ortogonal diziler

	FAKTÖRLER			INTERPLY Üretim No		FAKTÖRLER			TEKİL Üretim No		FAKTÖRLER			INTRAPLY Üretim No
	A	B	C			A	B	C			A	B	C	
SEVİYELER	1	1	1	1	SEVİYELER	1	1	1	1	SEVİYELER	1	1	1	1
	1	2	2	2		1	2	2	2		1	2	2	2
	1	3	3	3		1	3	3	3		1	3	3	3
	2	1	1	4		2	1	2	4		2	1	2	4
	2	2	2	5		2	2	3	5		2	2	3	5
	2	3	3	6		2	3	1	6		2	3	1	6
	3	1	2	7		3	1	3	7		3	1	3	7
	3	2	3	8		3	2	1	8		3	2	1	8
	3	3	1	9		3	3	2	9		3	3	2	9
	4	1	3	10										
	4	2	1	11										
	4	3	2	12										
	5	1	2	13										
	5	2	3	14										
	5	3	1	15										
	6	1	3	16										
	6	2	1	17										
	6	3	2	18										

Yani, “INTERPLY” üretim grubundan “Üretim No 1” kodu ile gösterilen üretim; 0°/90° yönlenme açılı, 4 tabakalı, “CAAC” diziliş sırasına sahip plakadır. Üretimlere başlanmadan önce çok sayıda plaka üretimi, test numunesi hazırlama ve test işlemi olduğu için her bir plakaya ad verme, kodlama ve etiketlendirme işlemleri yapılmıştır. Bu kapsamda aşağıda, Çizelge 3.7-3.9’da gösterilen plaka isimlendirmeleri yapılmıştır. Burada, ilk iki karakter üretim grubunu [Inter-ply: IN], [Intraply: IR], [(Tekil Karbon: SC), (Tekil Aramid: SA), (Tekil Cam: SG)], üçüncü karakter ilgili üretim grubundaki sıralamasını, dördüncü karakter ise birinci veya ikinci plaka olduğunu göstermektedir. Örneğin, “IN1-1” kodu ile etiketlenen plaka; INTERPLY üretim grubunun (IN), birinci üretiminin (IN1), ilk plakasını (IN1-1) sembolize etmektedir. Çizelge 3.7’de son dört satırdaki plakalar * ilavesiyle gösterilen “SG10-1*, SG10-2*, SA11-1*, SA11-2*” kodlu üretimler Taguchi üretim tasarımına ek olarak üretilen 4 tabakalı, 0°/90° yönlenme açısına sahip tekil cam ve aramid plakalarını ifade etmektedir.

Çizelge 3.7. Tekil plakaların kumaş türü, oryantasyon açısı, tabaka sayısı, diziliş sırası ve kod isimleri

Tekil Üretimler				
Kumaş Türü	Oryantasyon Açısı	Tabaka Sayısı	Diziliş	Plaka Adı
K	0/90	4	K/K/K/K	SC1-1
K	0/90	4	K/K/K/K	SC1-2
K	30/60	8	K/K/K/K/K/K/K/K	SC2-1
K	30/60	8	K/K/K/K/K/K/K/K	SC2-2
K	45/-45	12	K/K/K/K/K/K/K/K/K/K/K/K	SC3-1
K	45/-45	12	K/K/K/K/K/K/K/K/K/K/K/K	SC3-2
A	0/90	8	A/A/A/A/A/A/A/A	SA4-1
A	0/90	8	A/A/A/A/A/A/A/A	SA4-2
A	30/60	12	A/A/A/A/A/A/A/A/A/A/A/A	SA5-1
A	30/60	12	A/A/A/A/A/A/A/A/A/A/A/A	SA5-2
A	45/-45	4	A/A/A/A	SA6-1
A	45/-45	4	A/A/A/A	SA6-2
C	0/90	12	C/C/C/C/C/C/C/C/C/C/C/C	SG7-1
C	0/90	12	C/C/C/C/C/C/C/C/C/C/C/C	SG7-2
C	30/60	4	C/C/C/C	SG8-1
C	30/60	4	C/C/C/C	SG8-2
C	45/-45	8	C/C/C/C/C/C/C/C	SG9-1
C	45/-45	8	C/C/C/C/C/C/C/C	SG9-2
C	0/90	4	C/C/C/C	SG10-1*
C	0/90	4	C/C/C/C	SG10-2*
A	0/90	4	A/A/A/A	SA11-1*
A	0/90	4	A/A/A/A	SA11-2*

Çizelge 3.8. İnterply plakaların kumaş türü, oryantasyon açısı, tabaka sayısı, diziliş sırası ve kod isimleri

İnterply Hibrit Üretimler				Plaka Adı
Kumaş Türü	Oryantasyon Açısı	Tabaka Sayısı	Diziliş Sırası	
CA _S	0/90	4	C/A/A/C	IN1-1
CA _S	0/90	4	C/A/A/C	IN1-2
CA _S	30/60	8	C/A/C/A/A/C/A/C	IN2-1
CA _S	30/60	8	C/A/C/A/A/C/A/C	IN2-2
CA _S	45/-45	12	C/A/C/A/C/A/A/C/A/C/A/C	IN3-1
CA _S	45/-45	12	C/A/C/A/C/A/A/C/A/C/A/C	IN3-2
AC _S	0/90	4	A/C/C/A	IN4-1
AC _S	0/90	4	A/C/C/A	IN4-2
AC _S	30/60	8	A/C/A/C/C/A/C/A	IN5-1
AC _S	30/60	8	A/C/A/C/C/A/C/A	IN5-2
AC _S	45/-45	12	A/C/A/C/A/C/C/A/C/A/C/A	IN6-1
AC _S	45/-45	12	A/C/A/C/A/C/C/A/C/A/C/A	IN6-2
KA _S	0/90	8	K/A/K/A/A/K/A/K	IN7-1
KA _S	0/90	8	K/A/K/A/A/K/A/K	IN7-2
KA _S	30/60	12	K/A/K/A/K/A/A/K/A/K/A/K	IN8-1
KA _S	30/60	12	K/A/K/A/K/A/A/K/A/K/A/K	IN8-2
KA _S	45/-45	4	K/A/A/K	IN9-1
KA _S	45/-45	4	K/A/A/K	IN9-2
AK _S	0/90	12	A/K/A/K/A/K/K/A/K/A/K/A	IN10-1
AK _S	0/90	12	A/K/A/K/A/K/K/A/K/A/K/A	IN10-2
AK _S	30/60	4	A/K/K/A	IN11-1
AK _S	30/60	4	A/K/K/A	IN11-2
AK _S	45/-45	8	A/K/A/K/K/A/K/A	IN12-1
AK _S	45/-45	8	A/K/A/K/K/A/K/A	IN12-2
KC _S	0/90	8	K/C/K/C/C/K/C/K	IN13-1
KC _S	0/90	8	K/C/K/C/C/K/C/K	IN13-2
KC _S	30/60	12	K/C/K/C/K/C/C/K/C/K/C/K	IN14-1
KC _S	30/60	12	K/C/K/C/K/C/C/K/C/K/C/K	IN14-2
KC _S	45/-45	4	K/C/C/K	IN15-1
KC _S	45/-45	4	K/C/C/K	IN15-2
CK _S	0/90	12	C/K/C/K/C/K/K/C/K/C/K/C	IN16-1
CK _S	0/90	12	C/K/C/K/C/K/K/C/K/C/K/C	IN16-2
CK _S	30/60	4	C/K/K/C	IN17-1
CK _S	30/60	4	C/K/K/C	IN17-2
CK _S	45/-45	8	C/K/C/K/K/C/K/C	IN18-1
CK _S	45/-45	8	C/K/C/K/K/C/K/C	IN18-2

Çizelge 3.9. İntraply plakaların kumaş türü, oryantasyon açısı, tabaka sayısı, diziliş sırası ve kod isimleri

Intraply Hibrit Üretimler				Plaka Adı
Kumaş Türü	Oryantasyon Açısı	Tabaka Sayısı	Diziliş Sırası	
CA	0/90	4	CA/AC/AC/CA	IR1-1
CA	0/90	4	CA/AC/AC/CA	IR1-2
CA	30/60	8	CA/AC/CA/AC/AC/CA/AC/CA	IR2-1
CA	30/60	8	CA/AC/CA/AC/AC/CA/AC/CA	IR2-2
CA	45/-45	12	CA/AC/CA/AC/CA/AC/AC/CA/AC/CA/AC/CA	IR3-1
CA	45/-45	12	CA/AC/CA/AC/CA/AC/AC/CA/AC/CA/AC/CA	IR3-2
KA	0/90	8	KA/AK/KA/AK/AK/KA/AK/KA	IR4-1
KA	0/90	8	KA/AK/KA/AK/AK/KA/AK/KA	IR4-2
KA	30/60	12	KA/AK/KA/AK/KA/AK/AK/KA/AK/KA/AK/KA	IR5-1
KA	30/60	12	KA/AK/KA/AK/KA/AK/AK/KA/AK/KA/AK/KA	IR5-2
KA	45/-45	4	KA/AK/AK/KA	IR6-1
KA	45/-45	4	KA/AK/AK/KA	IR6-2
KC	0/90	12	KC/CK/KC/CK/KC/CK/CK/KC/CK/KC/CK/KC	IR7-1
KC	0/90	12	KC/CK/KC/CK/KC/CK/CK/KC/CK/KC/CK/KC	IR7-2
KC	30/60	4	KC/CK/CK/KC	IR8-1
KC	30/60	4	KC/CK/CK/KC	IR8-2
KC	45/-45	8	KC/CK/KC/CK/CK/KC/CK/KC	IR9-1
KC	45/-45	8	KC/CK/KC/CK/CK/KC/CK/KC	IR9-2

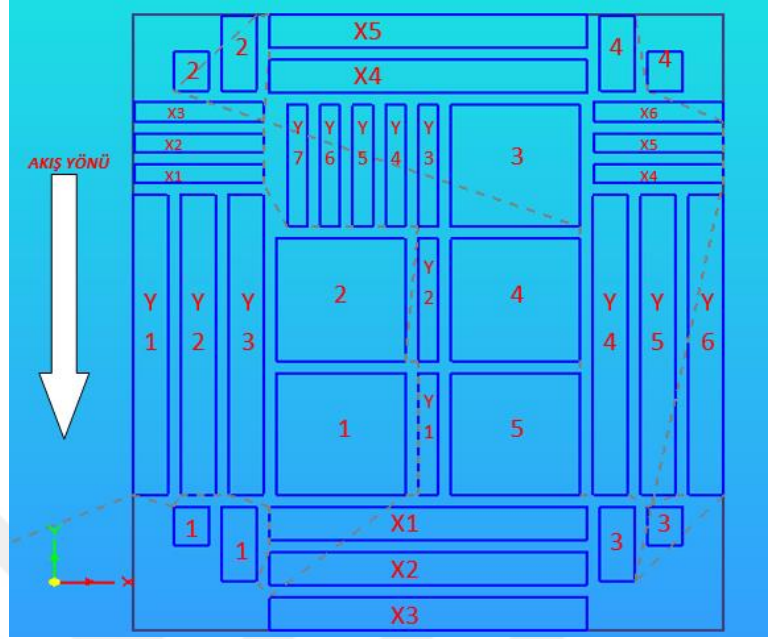
3.2.2. Üretimlerin yapılması

Plaka üretimleri, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında bulunan Vakum Destekli Reçine Transferiyle Kalıplama (VARTM-Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding) cihazı ile yapılmıştır. VARTM cihazı, sarf malzemeler ve elyaf kumaşların bulunduğu üretimlerin yapıldığı laboratuvar, Şekil 3.1.a ve b’de gösterilmiştir. Üretimlere başlamadan önce, yapılması planlanan testlere ve ilgili standartların gerektirdiği asgari numune ebatlarına göre üretim ve kesim şablonu tasarlanmıştır. Bu tasarıma göre üretilecek plaka ebatları 500mm x 550mm olarak belirlenmiştir. Plakalardan kesilerek elde edilecek numunelerin konumlarını gösteren kesim şablonu Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Üretimlerin yapıldığı kompozit laboratuvarı (a, b)

Her bir plakadan 37 adet test numunesi kesilerek elde edilecektir. En az 76 plakadan (72 adet Taguchi deney tasarımına göre, 4 adet referans numunesi olarak) her birinden 37'şer adet olmak üzere toplam 2812 (ikibin sekizyüz oniki) adet test numunesi elde edilecektir.



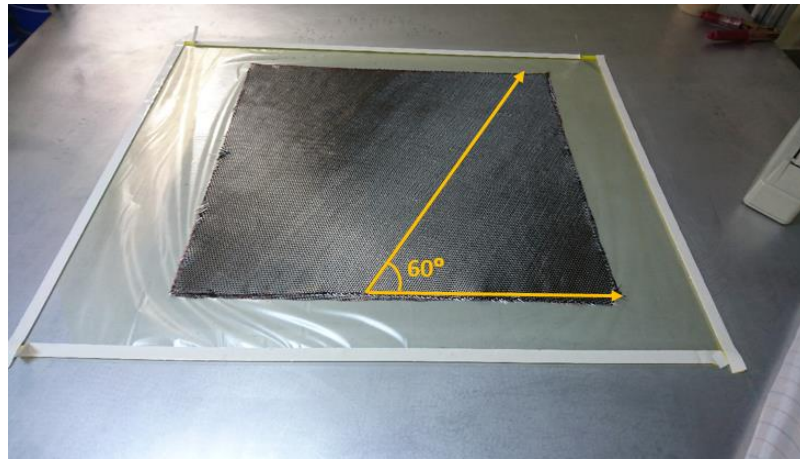
Şekil 3.2. Test numunesi elde etmek amacıyla kullanılan kesim şablonu

Farklı yönlenme açısına sahip plakalarda kullanılan elyaf kumaşların kesilmesi Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Özellikle açılı (45/-45 ve 30/60) elyaf iplikçiklerinin dağılmaması ve yüksek kalitede kesim yapılabilmesi için tüm elyaf kumaş kesim işlemlerinde elektrikli/şarjlı kompozit kesim makası kullanılmıştır. Şekil 3.4'te ise yine farklı yönlenme açılarına sahip kesilen bir kumaşın elyaf yönlenme açısı renkli olarak gösterilmiştir.

Ayrıca deneysel verilerin doğruluğunu arttırmak amacıyla iş takip formu oluşturularak üretim adımlarının standartlaştırılması yapılmıştır. Üretimlerde kullanılan elyaf kumaş ebatları, sarf malzeme ebatları, epoksi/sertleştirici ağırlıkları, reçinenin karışım şekli/süresi, reçinenin vakumlanması, infüzyon vakumu ve sıcaklık değerleri gibi birçok parametrenin standart bir şekilde yapılması ve not alınarak kaydedilmesi amacıyla üretim planı ve iş takip form defteri oluşturulmuştur. Bu iş takip formundan örnek bir sayfa Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Farklı yönlenme açısına sahip plakalarda kullanılan elyaf kumaşların kesilmesi



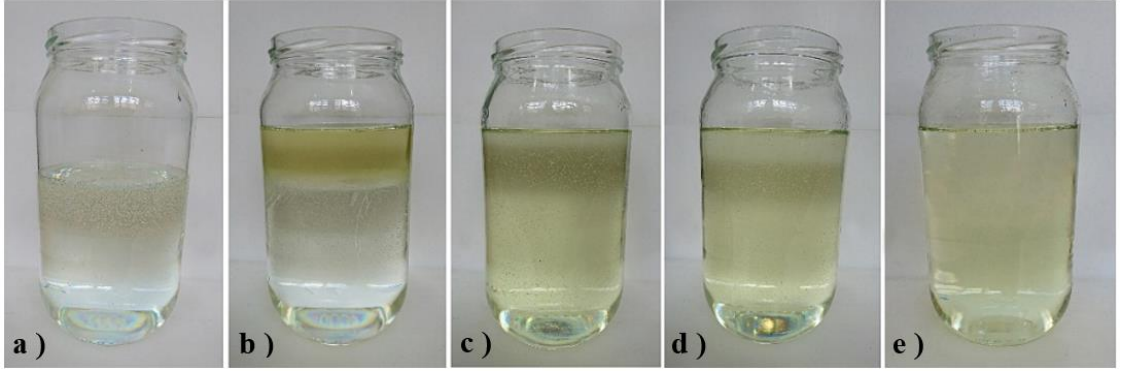
Şekil 3.4. Farklı yönlenme açısına sahip elyaf kumaş örneği

PARÇA ADI : IN1-1 TARİH: 16.12.2018 SAAT: 10:00
 DİZİLİŞ SEKİ: CAAC TABAKA SAYISI: 4 AÇI ORY: 0/90, 30/60, -45/45
 KULLANILAN KUMAŞ TÜRLERİ: CARBON (C), ARAMİD (A), GLASS (G), C/A, C/G, A/G
 KUMAŞ EBATLARI: 50 X 55 cm²
 KUMAŞ AĞIRLIĞI : KUMAŞ 1: 115 gr (C) / KUMAŞ 2: 115 gr (A) TOPLAM: 230 gr
 EPOKSİ REÇİNE SİSTEMİ AĞIRLIĞI (DURATEK DTE 1200 - DTS 1151) : 720 gr
 [(4 TABAKA İÇİN 650 gr) / (8 TABAKA İÇİN 800 gr) / (12 TABAKA İÇİN 950 gr)]
 EPOKSİ (DURATEK DTE 1200) AĞIRLIĞI (ORANSAL OLARAK, AĞIRLIKÇA 100 gr): 565 gr
 SERTLEŞTİRİCİ (DURATEK DTS 1151) AĞIRLIĞI (ORANSAL OLARAK, AĞIRLIKÇA 27 gr) : 155 gr
 KARIŞTIRMA: ÖNCE ELLE KARIŞTIRMA / MEKANİK KARIŞTIRICI (500 devir/dk devirde 5 dk boyunca) ✓
 DEGASSING (60 dk SÜRECEK) ✓
 RELEASE FİLM (65x80 cm²) ✓
 PEEL PLY (58x70 cm²) ✓
 AKIŞ FİLESİ (52X50 cm²) ✓
 T BAĞLANTILAR (2 adet) ✓
 SİRİAL HORTUM (52 cm) ✓
 VAKUM TORBASI (80X100 cm²) ✓
 VAKUM HORTUMU POMPA TARAFINDAN 110±20 cm ✓
 VAKUM HORTUMU REÇİNE TARAFINDAN 82±5 cm ✓
 MANOMETRE KONTROLÜ (MİN. 625 mmHg) ✓
 PROGRAMIN ÇALIŞTIRILMASI (100 °C DE 4 SAAT) ✓
 NİHAİ MANOMETRE KONTROLÜ (MİN. 625 mmHg) ✓
 100 °C 'de REÇİNE SİSTEMİ İNFÜZYONU (BAŞLAMA SAATİ: 11:30)
 REÇİNEİN AKIŞ FİLESİNİ KAPATMA SÜRESİ: (39 sn)
 KALIBIN KAPANMA SÜRESİ: (71 sn)
 REÇİNE TÜM KUMAŞI ISLATTIKTAN SONRA BESLEME SÜRESİ (10 dk) ✓
 INLET KISMININ BAĞLANTISININ KESİLMESİ (İNFÜZYON BAŞLANGICINDAN 10 DK SONRA) ✓
 EXIT KISMINDAKİ HORTUMUN KAPATILMASI (İNFÜZYONDAN İTİBAREN 60 DK SONRA) ✓
 VAKUM POMPASININ KAPATILMASI (İNFÜZYONDAN 60 DK SONRA) (Saat: 12:31)
 7 SAAT SONRA, YAKLAŞIK OLARAK 40°C'de, NUMUNE PARÇA SÖKÜLECEK. (Saat: 19:30)
 REÇİNEİN GİRİŞ-ÇIKIŞ YÖNLERİ İŞARETLENECEK VE ETİKETLEME YAPILACAK.
 PARÇA AĞIRLIĞI: 430 gr ✓
 SÖKEN KİŞİLER: Mehmet Raci AYDIN PARAF: RA

Şekil 3.5. Üretim esnasında kullanılan iş takip formundan örnek bir sayfa

Sertleştirici/Epoksi, 27/100 ağırlık oranına göre karıştırılarak epoksi reçine sistemi oluşturulmuştur. İlk olarak elle karıştırılan sertleştirici ve epoksi birleşimi, daha sonra mekanik karıştırıcı ile 500 devir/dakika ile 5 dakika süreyle karıştırılmıştır. Son olarak

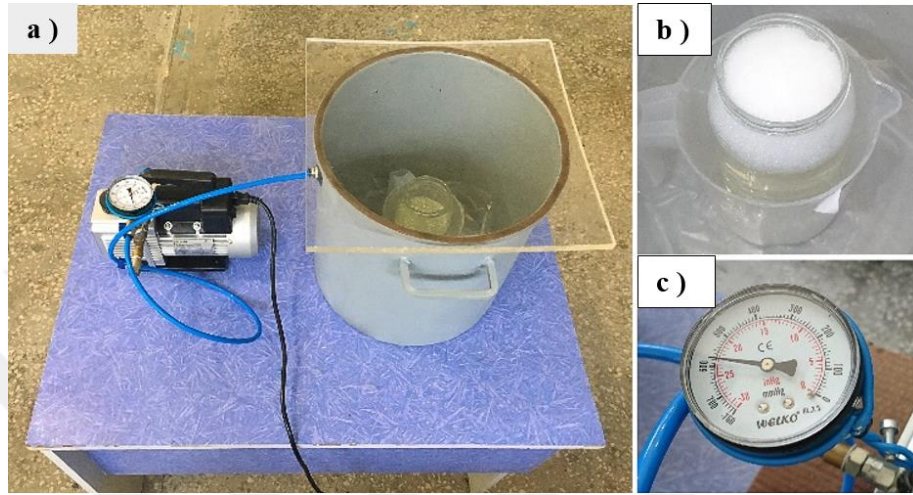
reçine sistemi, içindeki hava boşluklarının tam olarak giderilmesi için bir saat boyunca vakum haznesinin içine konularak, 0.8 atm negatif basınç ile vakumlama (gaz giderme) işlemi yapılmıştır. Şekil 3.6.a'da epoksi, b'de ilave edilen sertleştirici (yoğunluk farkından dolayı sertleştirici üstte, epoksi altta) gözükmemektedir. Şekil 3.6.c'de elle karıştırma sonrası reçine sistemi içinde bulunan makro hava kabarcıkları gözükmemektedir. Şekil 3.6.d'de mekanik karıştırma sonucunda reçine sistemi içerisinde daha homojen bir şekilde dağılmış hava kabarcıkları gözükmemektedir. Şekil 3.6.e'de ise bir saat boyunca 0.8 atm negatif basınç etkisiyle gazı giderilmiş daha berrak ve hava kabarcığı içermeyen, kullanılmaya hazır epoksi reçine sistemi gözükmemektedir.



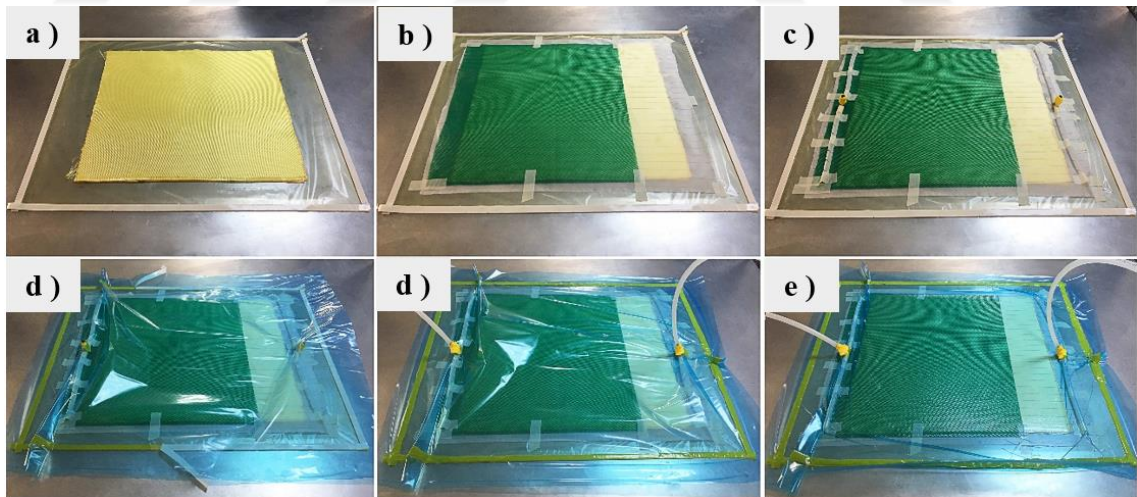
Şekil 3.6. Epoksi reçine sistemi hazırlama işlem basamakları

Şekil 3.7.a'da gaz giderme işlemi yapılan sistem (vakum pompası ve vakum haznesi), Şekil 3.7.b'de negatif basınç etkisiyle reçine sisteminin bulunduğu kavanozdaki hava kabarcıklarının köpürerek dışarı çıkması, Şekil 3.7.c'de vakum basınç göstergesi gözükmemektedir. Şekil 3.8'de kompozit plakalar üretilirken takip edilen adımlar gösterilmiştir. Şekil 3.8.a'da ayırıcı film (release film), VARTM cihazının üstüne kenarlarından sızdırmazlık bandı ile sabitlenerek üretimi yapılacak elyaf kumaşlar uygun tabaka sayısı ve yönlenme açısına göre ayırıcı film üzerine konulmuştur. Şekil 3.8.b'de elyaf kumaş üzerine sırasıyla soyma kumaşı (peel ply) ve akış filesi yerleştirilerek yan taraflarından kağıt bant ile sabitlenmiştir. Şekil 3.8.c'de reçine infüzyon (sol) ve vakum pompası (sağ) taraflarına spiral hortum ve T bağlantılar yerleştirilmiştir. Şekil 3.8.d'de kalıp vakum poşeti ile kapatılmıştır. Şekil 3.8.e'de T bağlantıların vakum ve reçine infüzyon uçlarına hortumlar takılarak kalıp ile bağlantı yerleri sızdırmazlık bantı ile

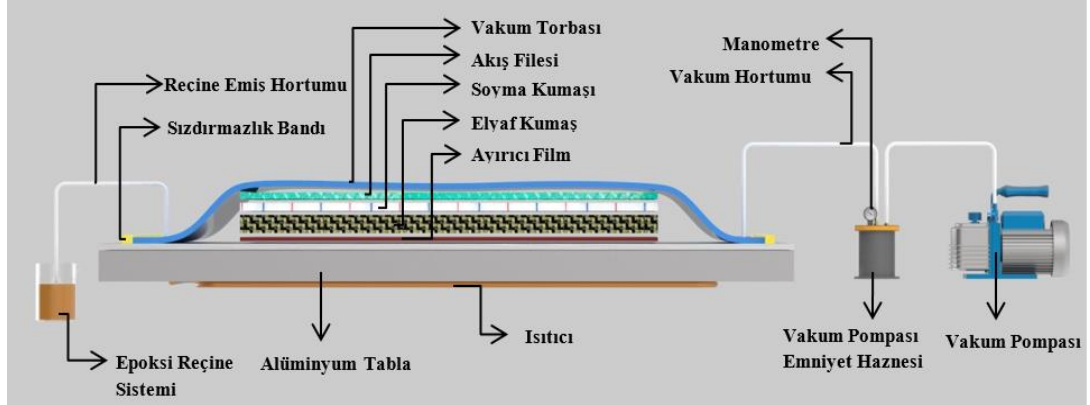
kapatılmıştır. Şekil 3.8.f’de kalıbın herhangi bir yerinden hava kaçağı olup olmadığını kontrol etmek amacıyla sistem vakum altına alınarak basınç kontrolü yapılmıştır. Şekil 3.9’da VARTM cihazı ile üretimin şematik gösterimi yapılmıştır.



Şekil 3.7. Reçine sisteminin içindeki gazı giderme işlemi için kullanılan sistem

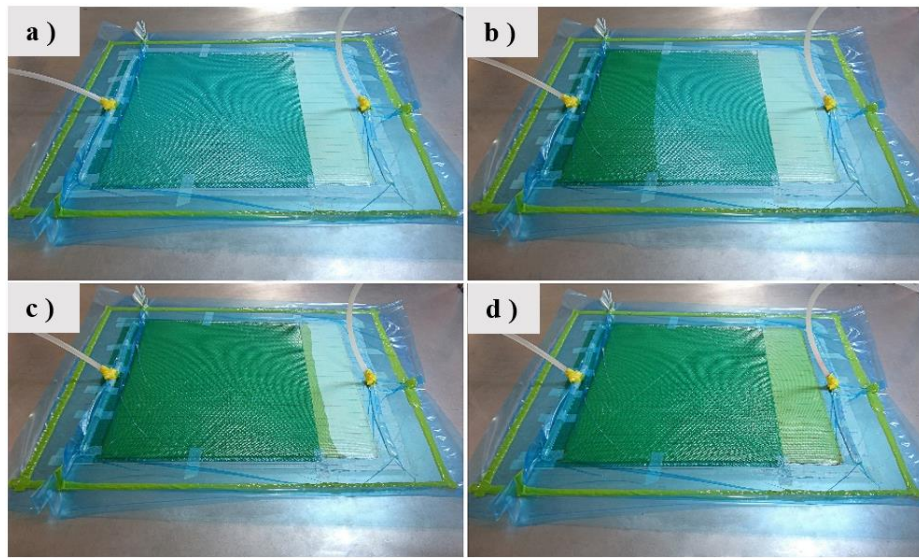


Şekil 3.8. Plakalar üretilirken takip edilen adımlar



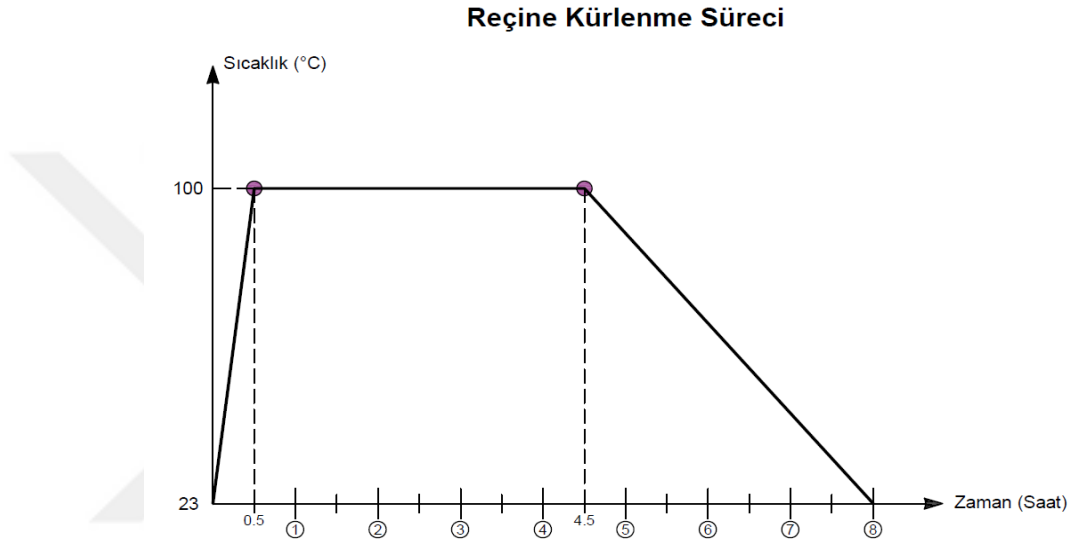
Şekil 3.9. VARTM cihazı ile üretimin şematik gösterimi

Şekil 3.10'da vakum etkisiyle yapılan reçine infüzyon adımları gösterilmiştir. Şekil 3.10.a'da infüzyona hazır, basınç kaybı olmayan, negatif basınç altındaki kalıp gösterilmiştir. Şekil 3.10.b'de vakum etkisiyle infüze edilen reçine sistemi istiflenmiş elyaf kumaşların 1/3'lük kısmına nüfuz etmiştir. Şekil 3.10.c'de elyaf kumaşların 2/3'lük kısmı reçineyi emmiştir. Şekil 3.10.d'de ise kalıbın tamamı reçine sistemi ile ıslanmış ve negatif basınç etkisiyle elyaf kumaşlar reçineyi emmiştir. Elyafaların reçineye doymasıyla vakum etkisiyle elyafları geçen reçine sistemi spiral hortum ve T bağlantıdan geçerek pompa tarafına doğru kalıptan uzaklaşmaya başlamıştır.



Şekil 3.10. Vakum etkisiyle yapılan reçine infüzyonu

Şekil 3.11’de reçine sisteminin kürleşme süreci gösterilmiştir. Tabla, yarım saat içerisinde oda sıcaklığından 100°C ’ye çıkmaktadır. Bu sıcaklığa ulaşıncı sisteme reçine infüzyonu başlatılır ve 4 saat boyunca bu sıcaklık değeri sabit tutulur. Daha sonra ısı kaynağı kapatılır ve sistem sıcaklığı üç buçuk saat sonra oda sıcaklığına iner. Kalıp sıcaklığı $35\text{-}40^{\circ}\text{C}$ iken plakalar sökülüştür.

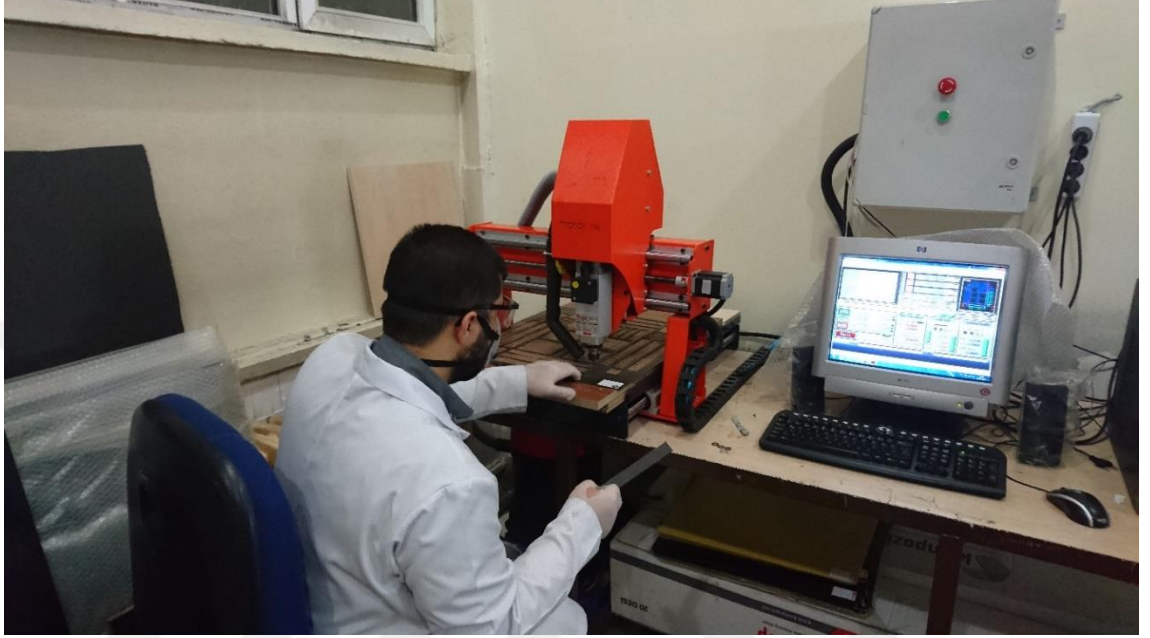


Şekil 3.11. Reçine sisteminin kürleşme süreci

3.2.3. Üretilen levhalardan test numunesi hazırlama işlemleri

Kompozit levhalardan, ilgili ASTM standartları (ASTM D3039, ASTM E756-05, ASTM D790, ASTM D792, ASTM 3763) göz önüne alınarak, boyutlandırma ve levhalardan test numunesi kesme işlemlerine başlanılmıştır. Kesim işlemleri için CNC Router kesim cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.12). Karbon ve cam içeren kompozit plakalar CNC Router ile kolaylıkla kesilmiştir (Şekil 3.13). Aramid elyaf içeren tekil ve hibrit kompozitlerde ise aramid elyaflar, kesici uca dolanarak elyaf-elyaf sürtünmesine sebep olmuştur. Bundan dolayı kesici uç ve levhada yüksek ısılar ve tahribatlar oluşmuş ve kesme işlemi gerçekleştirilememiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde aramid elyaf takviyeli kompozitler için en uygun kesme yönteminin su jeti ile kesme olduğu görülmüştür. Bunun üzerine aramid elyaf içeren plakalar su jeti ile kesilerek, test numuneleri elde

edilmiştir (Şekil 3.14 ve Şekil 3.15.a). Kesme işlemi sonrasında elde edilen test numuneleri etiketlenerek gruplara ayrılmıştır (Şekil 3.15.b).



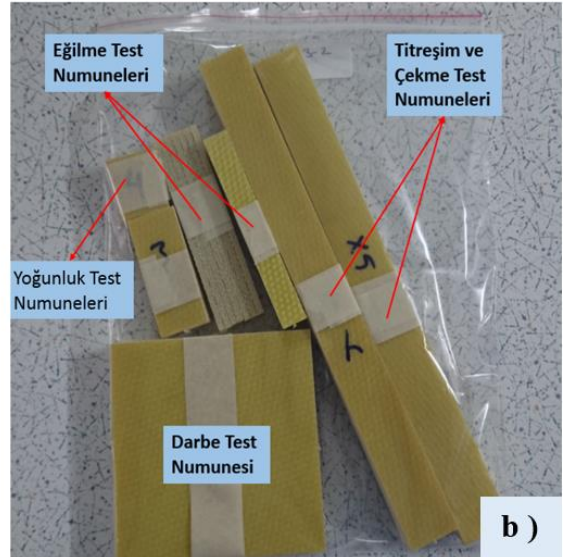
Şekil 3.12. CNC Router ile test numunesi kesme işlemi



Şekil 3.13. Karbon plakadan CNC Router ile test numunesi kesme işlemi



Şekil 3.14. Aramid plakadan su jeti ile test numunesi kesme işlemi



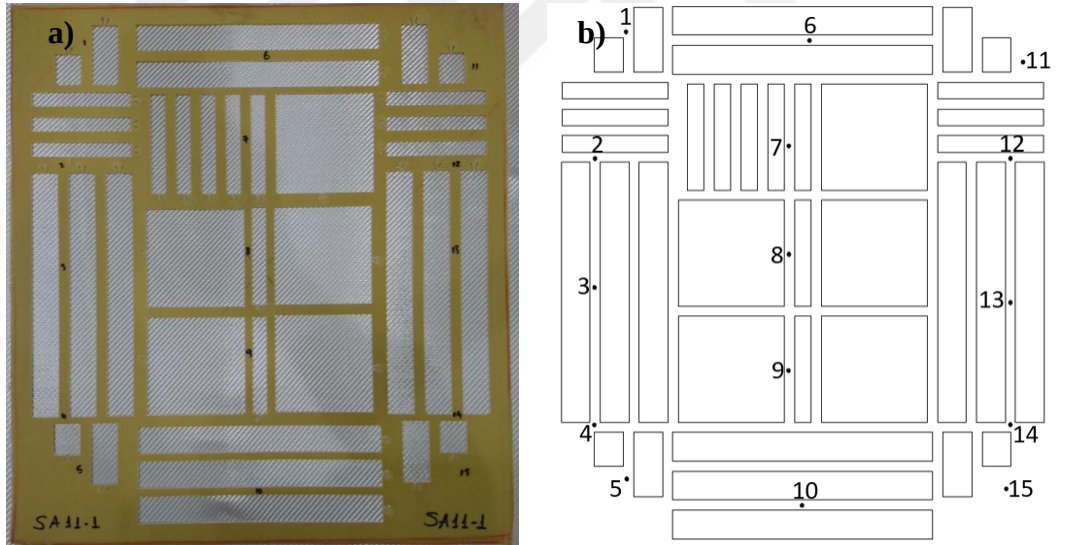
Şekil 3.15. a) Su jeti ile kesilmiş örnek bir aramid plaka, b) Kesimden sonra etiketlenerek gruplandırılan test numuneleri

3.2.4. Numunelerin malzeme özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi

Çekme testi için ASTM D3039, titreşim testleri (doğal frekans ve sönüm oranı) için ASTM E756-05, üç nokta eğilme testi için ASTM D790, düşük hızlı darbe testi için ASTM 3763 ve yoğunluk ölçümleri için ise ASTM D792 standardı referans alınmıştır.

3.2.5. Kalınlık ölçümleri

Üretilen plakaların özellikle reçine infüzyon bölgesi ile vakum bölgesinde kalınlık değerlerinin dengeli bir dağılım gösterip göstermediklerini belirlemek amacıyla 15 farklı noktadan mikrometre kullanılarak kalınlık ölçümleri yapılmıştır (Şekil 3.16.a ve Şekil 3.16.b). Buradan elde edilen sonuçlar üretim kalitesi hakkında bilgi verecektir.



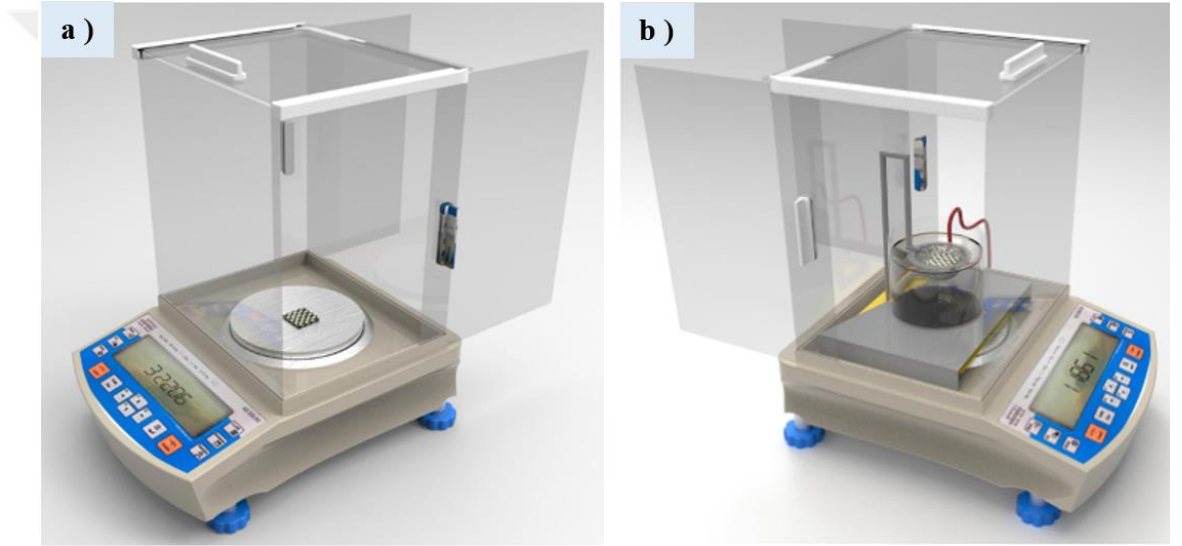
Şekil 3.16. Kalınlık ölçüm noktaları
a) örnek bir plaka üzerinde, b) kesim şablonu üzerinde

3.2.6. Yoğunluk ölçümleri

ASTM D792 standardına göre yoğunluk ölçümlerinde kullanılan düzenek Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Şekil 3.17.a’da numunenin havada iken, Şekil 3.17.b’de ise sıvı içindeyken ölçülen kütle değerleri gösterilmiştir. ASTM D792 standardına göre

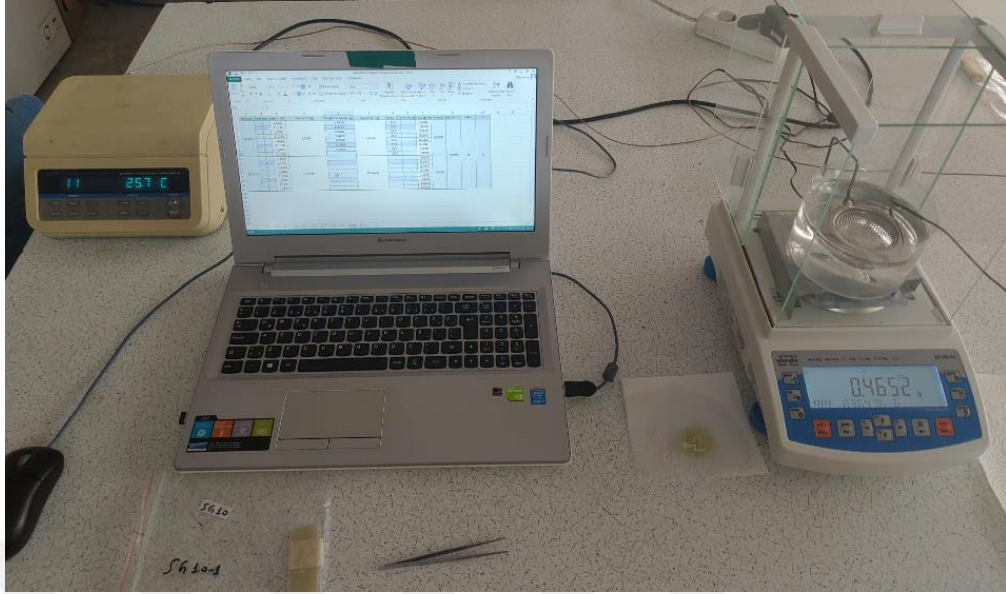
numunenin yoğunluğu, numunenin hava ve sıvı içerisindeki kütlesine ek olarak saf suyun ilgili sıcaklık değerinde sahip olduğu yoğunluk değeri ile formülize edilmiştir (Denklem 3.1). Burada ρ_n numunenin yoğunluğunu, m_h numunenin havadaki kütlesini, m_s sudaki kütlesini, ρ_s ise ölçüm yapılan suyun sıcaklığa bağlı yoğunluk değeridir.

$$\rho_n = \frac{m_h}{(m_h - m_s)} \rho_s \quad (3.1)$$

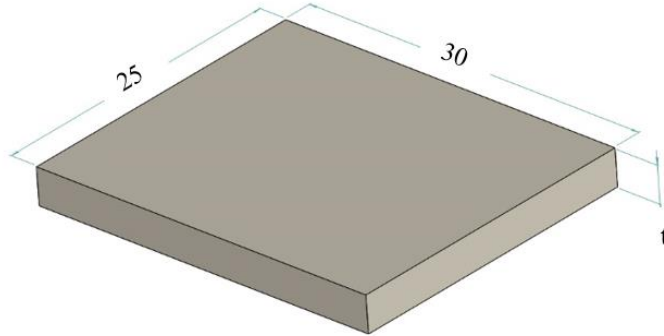


Şekil 3.17. Yoğunluk testleri için kullanılan düzenek (ASTM D792 standardına göre)

Şekilden de görüldüğü üzere numunenin havadaki ağırlığı ve saf su içerisindeki ağırlığı ölçülmüştür. Ayrıca ölçüm yapılan su kabı içerisine yerleştirilen termokupul vasıtasıyla sıcaklık değerine göre değişen suyun yoğunluk değerleri dikkate alınarak, Denklem (3.1) vasıtasıyla yoğunluk hesapları yapılmıştır. Şekil 3.19’da yoğunluk testleri için kullanılan bir test numunesinin ebatları görselleştirilmiştir.



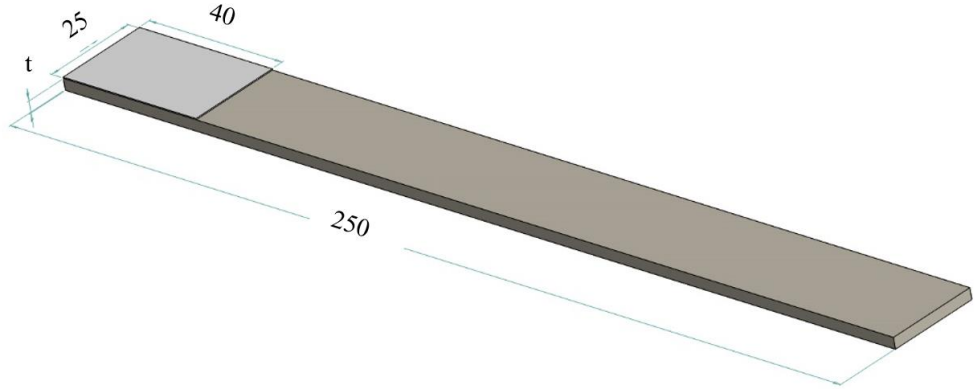
Şekil 3.18. Yoğunluk testleri için kullanılan düzenek (ASTM-D-792 standardına göre)



Şekil 3.19. Yoğunluk testleri için kullanılan numune ebatları

3.2.7. Titreşim (doğal frekans ve sönüm oranı) testleri

Tahribatlı olan çekme testleri yapılmadan önce tahribatsız bir test tekniği ile ankastre-serbest sınır şartında titreşim testleri yapılarak numunelerin doğal frekans ve sönüm oranı değerleri tespit edilmiştir. Titreşim testleri, ASTM E756-05 standardına göre icra edilmiştir. Titreşim numuneleri 250mm uzunluğunda 25mm genişliğindedir (Şekil 3.20).

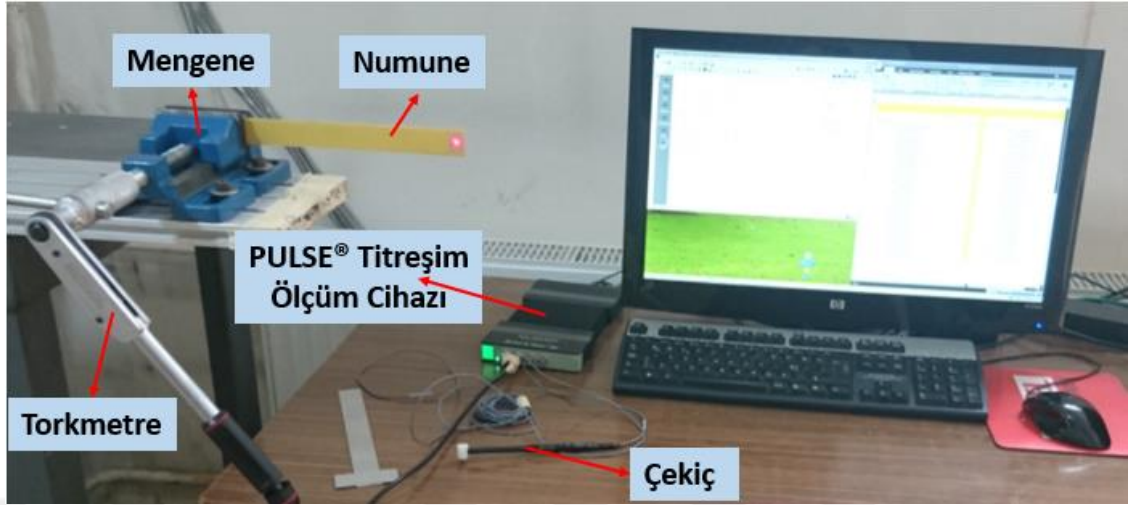


Şekil 3.20. Ankastre-serbest sınır şartında kullanılan bir titreşim test numunesinin ebatları

Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de gösterilen titreşim ölçüm sistemi kullanılarak ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri belirlenmiştir.

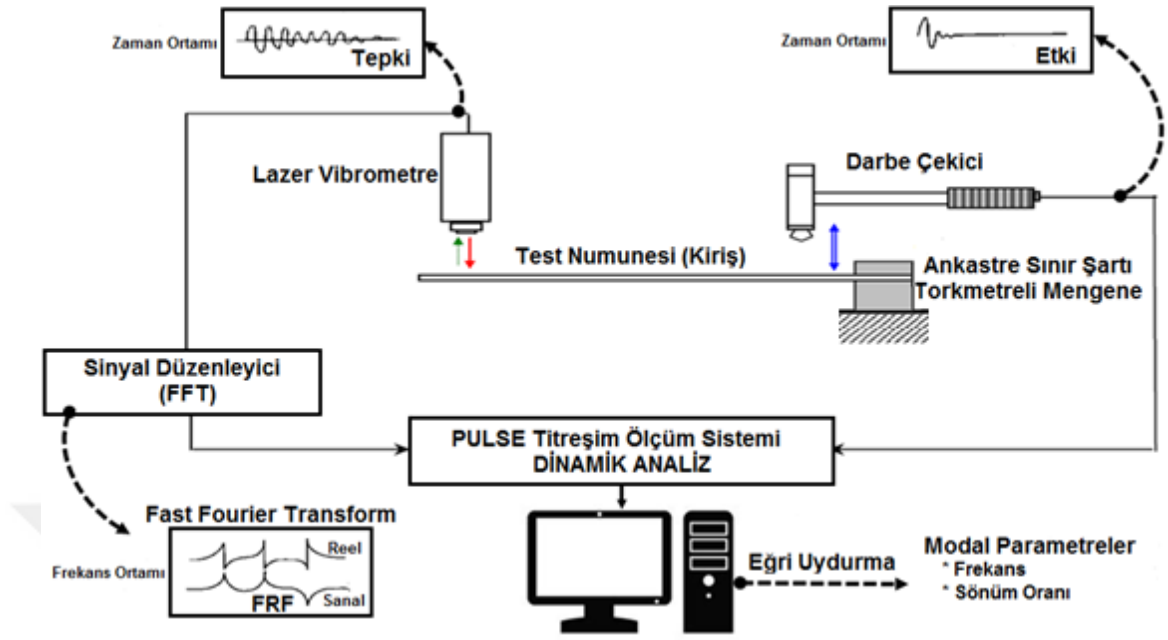


Şekil 3.21. Titreşim testi deney düzeneği



Şekil 3.22. Ankastre-serbest sınır şartında test edilen örnek bir numune

Bütün titreşim numuneleri, ankastre-serbest sınır şartını sağlamak amacıyla bir ucundan 40mm mengenenin arasında kalacak şekilde, 8 Nm'lik sabit tork değeri ile sıkıştırılmıştır. Titreşim özelliklerin tespiti için yapılan testlerde, ivmeölçerlerden gelen ilave kütle etkisini yok ederek sonuçların güvenilirliği artırabilmek amacıyla, optik yöntemler ile temassız algılayıcılar kullanılmıştır. Bu kapsamda bir lazer vibrometre (Ometron VH300+, U.K) ve çok kanallı bir analiz sistemi (PULSE®, Brüel & Kjør Sound & Vibration Measurement A/S/Danimarka)'nden oluşan titreşim ölçüm sistemi ile testler yapılmıştır. Titreşim testlerinde, test numuneleri üzerinde belirli noktadan darbe çekici (kuvvet transdüseri) ile tahrik kuvveti uygulanmıştır. Bu etkiye karşı malzemenin cevabı ise lazer vibrometre ile ölçülerek aradaki transfer fonksiyonu (FRF), ME'scopeVES® (Vibrant Technology, Inc./ABD) modal analiz programı yardımıyla elde edilmiştir. Deneysel titreşim ölçüm sistemi Şekil 3.23'te şematik olarak gösterilmiştir. Burada, test numunesine uygulanan etki (impact) çekicinin başlığına yerleştirilen bir kuvvetölçer ile zamana bağlı olarak ölçülür. Kuvvetin etkisiyle, test numunesi başlangıç-sınır şartlarına ve malzeme özelliklerine bağlı olarak titreşim hareketi yapar. Test numunesinin bu etkiye gösterdiği tepki ise lazer ölçüm sistemi ile zaman ortamında ölçülmektedir. FFT (Fast Fourier Transform: Hızlı Fourier Dönüşümü) yapılarak etki-tepki fonksiyonları zaman ortamından frekans ortamına dönüştürülür. Böylece test numunesinin deneysel modal parametreleri (frekansı ve sönüm oranı) başlangıç (ilk konum ve ilk hız) ve sınır şartlarına (ankastre-serbest) bağlı olarak bulunabilir.



Şekil 3.23. Deneysel titreşim ölçüm sisteminin şematik gösterimi

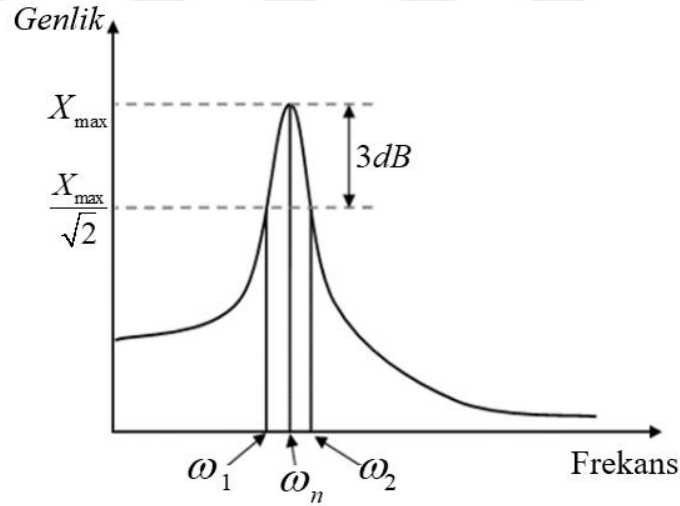
Elde edilen veriler yardımıyla sönüm oranı, frekans tabanında yarı bant güç metodu (Half-Power Bandwidth Method) ile tespit edilmektedir (Şekil 3.24). Kullanılan titreşim ölçüm sistemi vasıtasıyla doğal frekans ve sönüm oranı değerlerini doğrudan ekran üzerinden okumak mümkündür (Şekil 3.25).

- **Yarı güç bant genişliği metodu ile sönüm oranının hesaplanması**

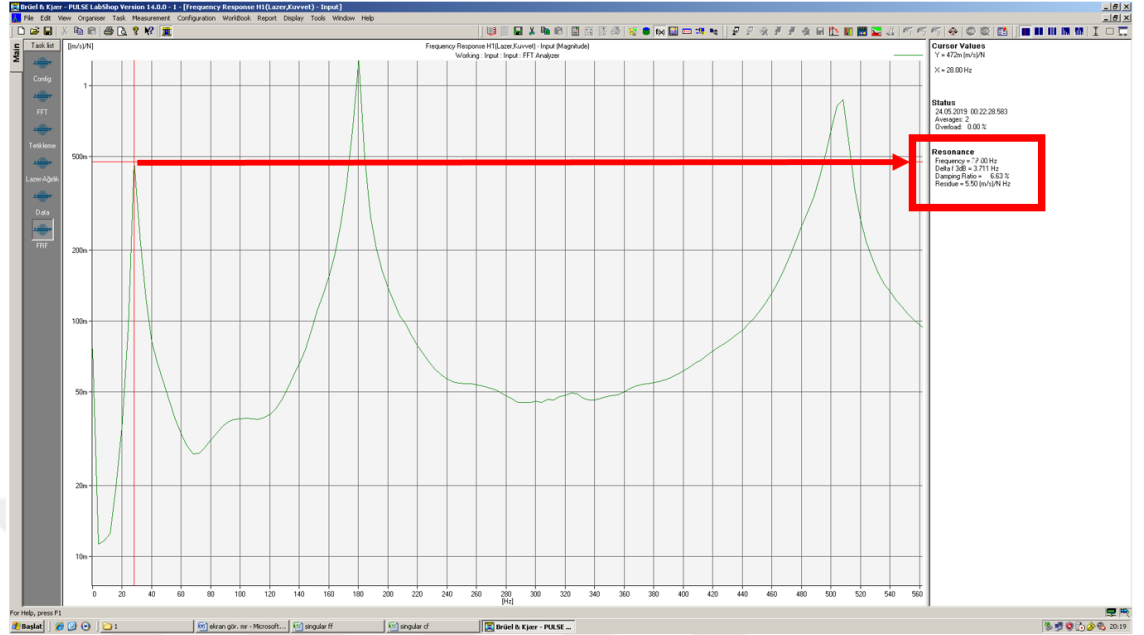
Titreşim yapan sürekli bir sistemde her mod şeklinin kendine has bir sönüm oranı değeri vardır. Yarı Güç Bant Genişliği Metodu (Half Power Bandwidth Method) ile frekans tabanında genlik değişiminden yararlanılarak sönüm oranı değerleri hesaplanabilmektedir. Şekil 3.24'te bu metot ile sönüm oranının hesaplanmasında kullanılan veriler, grafik üzerinde gösterilmiştir. Buna göre herhangi bir mod için sönüm oranı (ζ), aşağıdaki formül yardımıyla belirlenebilir (Denklem 3.2) (Rao 2011).

$$\frac{w_2 - w_1}{2w_n} = \zeta \quad (3.2)$$

Burada ω_n ifadesi rezonans frekansına karşılık gelirken, ω_2 ve ω_1 ifadeleri ise rezonans frekansına karşı gelen genlik değerinin (X_{max} 'ın) $\sqrt{2}$ değerine bölünmesiyle elde edilen genliğe karşılık gelen frekans değerlerini göstermektedir. Bu metot ile doğru ölçümler yapabilmek için elde edilen FRF (Frequency Response Function) fonksiyonlarındaki maksimum genliklerin doğru olarak ölçülmesi gereklidir. Dolayısıyla çekiç testi yapılırken yüksek frekans çözünürlüğünde işlemler yapılmalıdır. Bu grafikler vasıtasıyla doğal frekans (rezonans frekansı) ve sönüm oranı değerleri doğrudan ekran üzerinden okunabilir (Şekil 3.25). Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozit numunelerinin doğal frekans ve sönüm oranı değerleri bu şekilde belirlenmiştir.



Şekil 3.24. Yarı güç bant genişliği metoduna göre kullanılan verilerin grafik üzerinde gösterimi



Şekil 3.25. PULSE ölçüm sisteminden alınan doğal frekans ve sönüm oranı değerlerini gösteren örnek bir FRF grafiği

3.2.8. Poisson oranlarının tespiti

Özellikle hibritleşmenin ve farklı yönlenme açılarının etkisiyle hibrit kompozit yapılarda farklı poisson oranlarının görüleceği açıktır. Bu numunelerin poisson oranlarının tespiti için Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında bulunan 100kN’luk Shimadzu AG-X (Shimadzu® Corp./Japonya) universal test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.26). Poisson oranlarını tespit etmek amacıyla kompozitler için uygun olan, iki eksenli gerinim pulları (strain gauge) ve bu pulların bağlandığı TDS 530 Data Logger (Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd./Japonya) kullanılmıştır. 10 farklı numune üzerine gerinim pulları yapıştırılarak poisson oranları belirlenmiştir. Poisson oranı (ν_{12}), yanıl gerinim farkı ($\Delta\epsilon_y$), eksenel gerinim farkı ($\Delta\epsilon_x$) oranıyla bulunabilir (Denklem 3.3).

$$\nu_{12} = -\frac{\Delta\epsilon_y}{\Delta\epsilon_x} \quad (3.3)$$

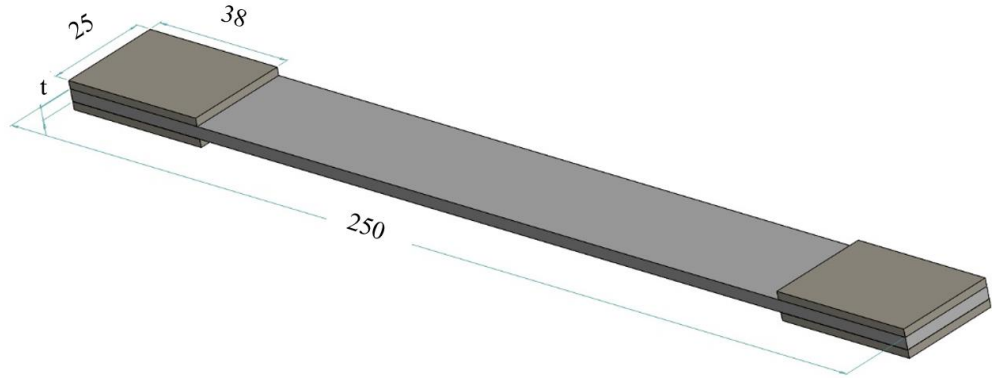


Şekil 3.26. Poisson oranlarını tespit etmek amacıyla kullanılan deney düzeneği ve strain gaugeler

3.2.9. Çekme testleri

Çekme (tensile) testleri, ASTM D3039 standardına göre Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında bulunan 100kN kapasiteli (AG-X 100, Shimadzu® Corp. / Japonya) universal test cihazı ile yapılmıştır. Her ikili üretimin bir plakasından kesim şablonuna göre X ve Y yönlerinden kesilerek elde edilen toplam 380 adet numune test edilmiştir.

Numuneler test edilirken çenelerde oluşacak gerilme yığılmalarını önlemek amacıyla standart gereği çenelerin her iki ucuna şekilde gösterilen 25mm x 38mm ebatlarında tablalar yapıştırılmıştır. Çekme testlerinde kullanılan numune ebatları 250mm x 25mm'dir (Şekil 3.27). Şekil 3.28'de çekme testlerinin icra edildiği test cihazı gösterilmiştir.

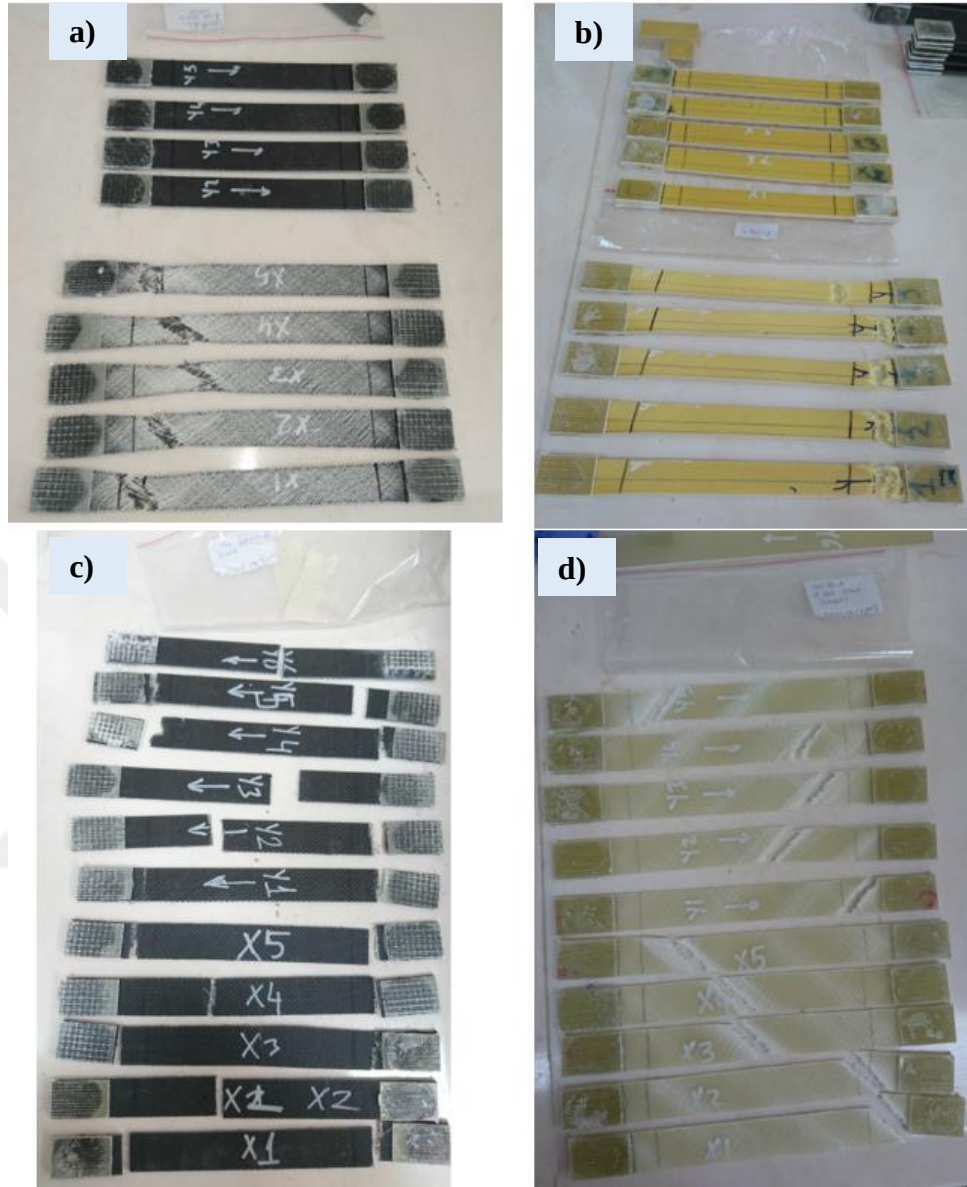


Şekil 3.27. Çekme testlerinde kullanılan numune ebatları



Şekil 3.28. Çekme testlerinin yapıldığı Shimadzu® AG-X 100 universal test cihazı

Şekil 3.29.a'da $45^\circ/-45^\circ$ yönlenme açısına sahip karbon ve cam elyaf içeren hibrit kompozit numunelerin çekme testi öncesi ve sonrasında çekilen resimleri gösterilmiştir. Şekil 3.29.b'de $30^\circ/60^\circ$ açılı aramid elyaf içeren tekil numune, 3.29.c'de $0^\circ/90^\circ$ açılı karbon elyaf içeren tekil kompozit numune, 3.29.d'de ise cam elyaf içeren $30^\circ/60^\circ$ yönlenme açına sahip tekil numuneler gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Farklı türden çekme test numunelerinin kırılma şekilleri

Çekme testinden elde edilen sonuçlara göre, çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri aşağıda verilen formüllere göre hesaplanmıştır (Denklem 3.4 ve 3.5) (ASTM D3039).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.5)$$

Burada;

σ , çekme dayanımı (MPa)

E , elastisite modülü (MPa)

P , maksimum çekme kuvveti (N)

A , ortalama kesit alanı (mm²)

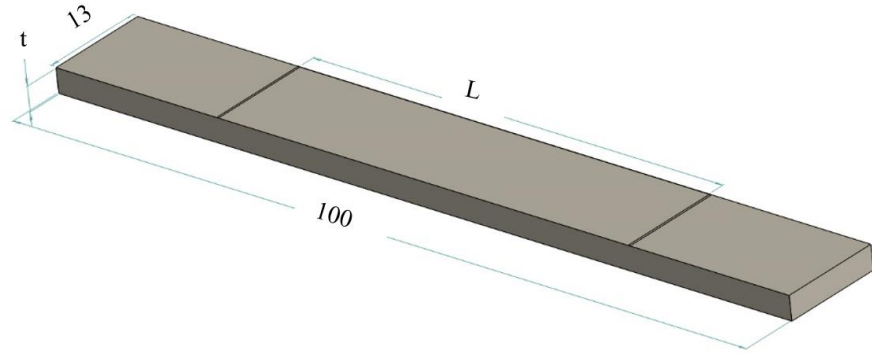
$\Delta\sigma$, gerilim-gerinim diyagramında lineer bölgede iki nokta arasındaki gerilim farkı (N/mm²),

$\Delta\varepsilon$, gerilim-gerinim diyagramında lineer bölgede iki nokta arasındaki gerinim farkıdır.

3.2.10. Üç nokta eğilme testleri

Üç nokta eğilme testleri de ASTM D790 standardına Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında bulunan 100 kN kapasiteli (Shimadzu® Corp. / Japonya) universal test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kolaylık açısından bütün üç nokta eğilme test numuneleri, 13mm x 100mm ebatlarında levhalardan kesilmiştir (Şekil 3.30). Numuneler test edilirken standart gereği her bir numune türü için kalınlığa bağlı alt destek mesafeleri (support span) belirlenerek testler icra edilmiştir. 4, 8 ve 12 tabakalı numunelerin destek mesafeleri standarda uygun olarak sırasıyla kalınlığın 48, 24 ve 16 katı olarak belirlenmiştir. Şekil 3.30'de “L” sembolü alt destekler arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Şekil 3.31.a'da üç nokta eğilme test düzeneği, Şekil 3.31.b'de ise kuvvetin etkisiyle numunenin bükülmesi gözükmemektedir.

Üç nokta eğilme testi sonunda ASTM D790 standardına göre eğilme dayanımı (σ_e) ve eğilme modülü (E_e) değerleri sırasıyla denklem (3.6) ve denklem (3.7)'de verilen formüller vasıtasıyla hesaplanır.



Şekil 3.30. Üç nokta eğilme test numunesi



Şekil 3.31. a) Üç nokta eğilme test düzeneği, b) Kuvvetin etkisiyle numunenin bükülmesi

$$\sigma_e = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.6)$$

$$E_e = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (3.7)$$

Burada,

σ_e , eğilme dayanımını (MPa)

E_e , eğilme modülünü (MPa)

P , maksimum yükleme kuvvetini (N),

L , destekler arası mesafeyi (mm),

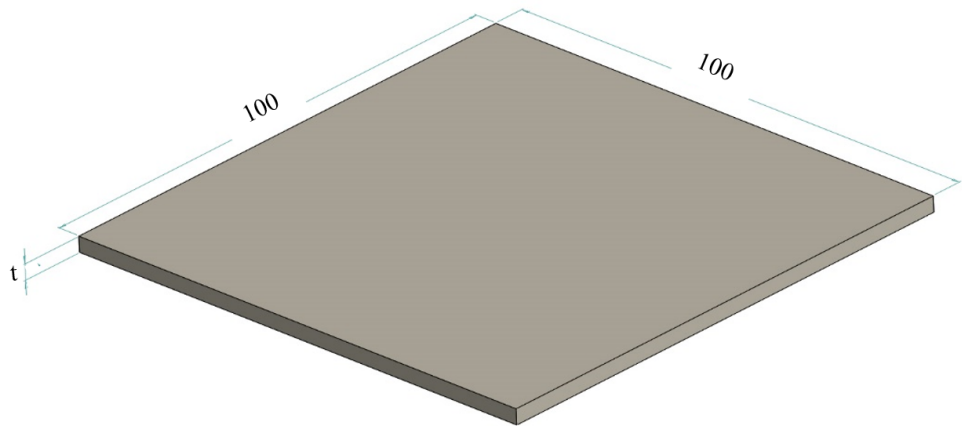
b , test numunesinin genişliğini (mm),

d , test numunesinin kalınlığını (mm),

m , kuvvet-uzama eğrisinde lineer bölgenin eğimi (N/mm), ifade etmektedir.

3.2.11. Düşük hızlı darbe testleri

Düşük hızlı darbe testleri, ASTM 3763 standardına uygun bir şekilde İzmir’de Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarında bulunan CEAST Fractovis Plus® darbe cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Darbe test numuneleri 100mm x 100mm ebatlarında, plakalardan kesilerek elde edilmiştir (Şekil 3.32). Bu test cihazı belli bir yükseklikten ağırlık düşürme prensibine göre çalışmaktadır. Tez çalışması kapsamında kullanılan vurucu uç, yarım küre şeklinde, 12.7mm çapında, 626 gr ağırlığa sahiptir. Vurucu uç, bir veri okuyucuya bağlı olup, sabitlendiği kuvvet dönüştürücüsünün kapasitesi 22.4kN’dur. Veri okuyucu vasıtasıyla yer değiştirme, temas kuvveti, zaman ve enerji değerleri isteğe bağlı olarak farklı sıklıklarda elde edilebilmektedir. Darbe testi esnasında vurucu uçta oluşan sekmelerde, vurucu ucun tekrar numuneye çarpmasını engelleyen geri sekme önleyici bir sistem bulunmaktadır.

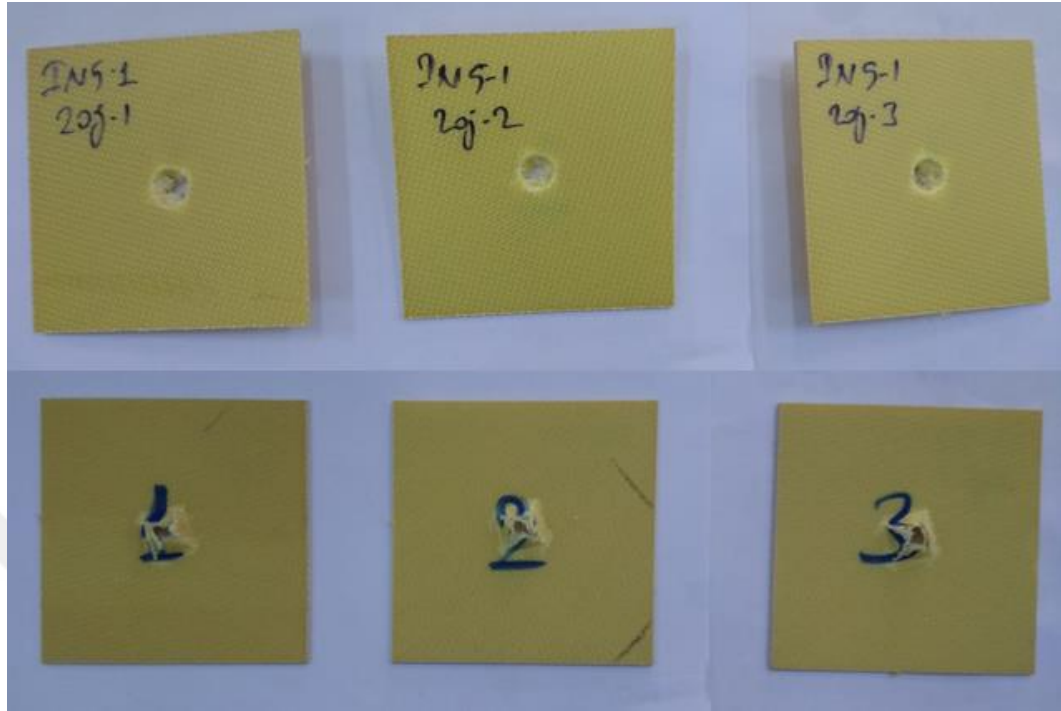


Şekil 3.32. Düşük hızlı darbe testi numunesi

Şekil 3.33'te düşük hızlı darbe testlerinin yapıldığı laboratuvar ve CEAST Fractovis Plus® darbe cihazı gözükmemektedir. Ayrıca, 20 joule darbe enerjisine maruz bırakılan örnek bir test numunesinin ön ve arka yüzü Şekil 3.34'te gösterilmiştir.



Şekil 3.33. CEAST Fractovis Plus® düşük hızlı darbe test cihazı



Şekil 3.34. 20 Joule darbe enerjisine maruz bırakılan örnek bir test numunesinin ön ve arka yüzü

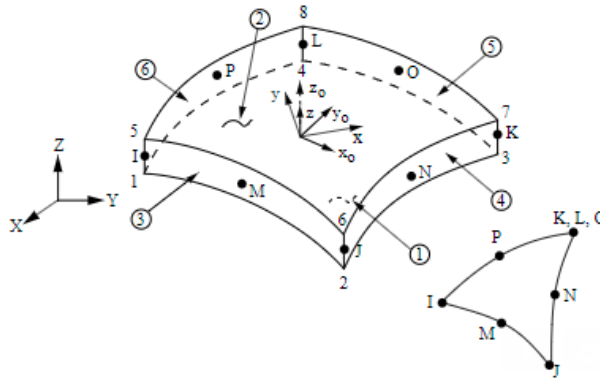
3.2.12. Sayısal analizler (ANSYS® APDL)

Sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm üreten ANSYS® APDL paket programı vasıtasıyla modal analiz yapılarak her bir bir numune türüne ait doğal frekans değerleri hesaplanmıştır. Bu kapsamda, ankastre-serbest sınır şartına uygun şekilde bir ucu sabitlenen 210mm x 25mm ebatlarında test numunelerinin sayısal modelleri oluşturulmuştur. Sayısal analizler için gerekli malzeme özellikleri olarak testler sonucunda elde edilen değerler kullanılmıştır. Test numuneleri; farklı elyaf kumaş türü, farklı yönlenme açısı ve matris malzemesinden oluştuğu için ortotropik özellik göstermektedir. Yani her yönde (x, y, z), farklı elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranı değerlerine sahiptir. Sayısal modelde kullanılan elastisite modülü ve poisson oranı değerleri deneysel olarak belirlenmiş ve literatürden (İkbal *et al.* 2017) desteklenmiştir. Kayma modülü değerleri ise aşağıdaki formül (Denklem 3.8) yardımıyla hesaplanmıştır (Jones 1999).

$$G_{12} = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_x} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right)} \quad (3.8)$$

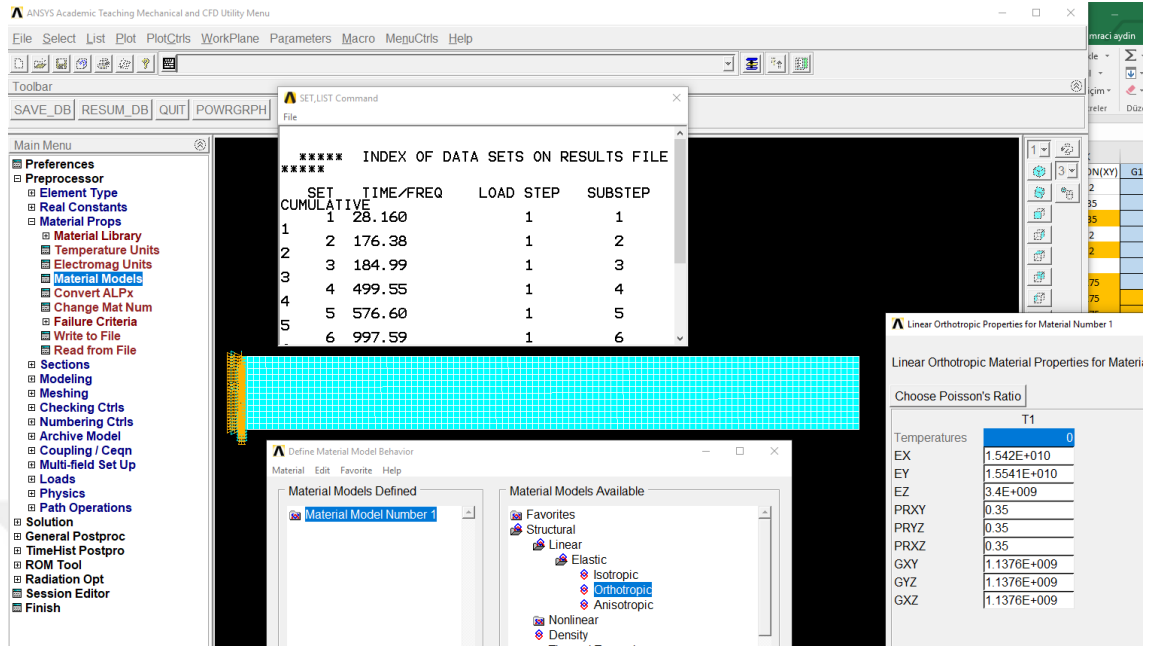
Burada E_x , 45° yönlenme açısına sahip aynı kumaş türüyle üretilmiş numunenin çekme yönündeki elastisite modülü değeridir. E_1 , E_2 ve ν_{12} ise sırasıyla; 1(x), 2(y) yönündeki elastisite modülü değerleri ve poisson oranı değeridir.

Ayrıca sayısal analizler kullanılan eleman türü olarak “SHELL281” kullanılmıştır (Şekil 3.35). Bu eleman ince ve orta kalınlıkta kabuk yapılarının analizinde kullanılabilir. Aynı zamanda tabakalı kompozit gibi katmanlı uygulamaların modellenmesi için uygun bir eleman türüdür. Bu eleman, her biri altı serbestlik derecesine sahip (üç öteleme, üç dönme), sekiz düğümden oluşmaktadır. Numunelerin modellenmesinde kullanılan ortalama eleman sayısı 1124’tür.



Şekil 3.35. Sayısal analizlerde kullanılan kabuk eleman (SHELL281)

Şekil 3.36’da SA5 numunesine ait ANSYS® analizinde girilen malzeme özellikleri ve sonuçlar gösterilmiştir. Üretilen kompozit plakalar her üç yönde farklı malzeme özelliklerine sahip olduğu için ortotropik malzemeye göre analiz yapılmıştır. 3 yönündeki poisson oranı (PRXZ) ve kayma modülü (GXZ) aslında 1 ve 2 yönlerinden farklıdır fakat bu durum sayısal çözümü çok da etkilemediği için analizlerde diğer yönler ile aynı değerler kullanılmıştır.



Şekil 3.36. SA5 numunesine ait ANSYS® analizinde girilen malzeme özellikleri ve sonuçlar

3.2.13. Taguchi yöntemi ile analiz

Bu kısımda, Taguchi deney tasarımına göre üretilen üretim gruplarının (tekil, interply ve intraply) titreşim, düşük hızlı darbe ve çekme testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar, ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bunun için özellikle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ve birçok istatistiksel yöntemi içinde barındıran Minitab® (Minitab Inc./ABD) paket programı kullanılmıştır. Taguchi üretim tasarımına oluşturulan numunelerden elde edilen deneysel veriler, bu programın DOE (Design of Experiments) içeriğinde bulunan Taguchi tasarım analiz (Analyze Taguchi Design) modülü vasıtasıyla analiz edilerek, S/N (sinyal gürültü oranı) grafikleri ve ilgili tablolar yorumlanmış ve amaca uygun en etkili faktör ve seviyeler belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Genel olarak deneysel ölçümlerden elde edilen veriler, %95 güven aralığına (confidence interval) göre aşağıdaki formüle (Denklem 4.1) göre değerlendirilmiştir. Güven aralığı (*GA*) değerleri hesaplanırken her bir ürün grubunun ilgili numuneleri için elde edilen verilerin ortalamaları ve standart sapmaları kullanılmıştır. Bu hesaplanan değerler, üretimlerin tekrarlanabilirlikleri ve elde edilen sonuçların tutarlılıkları açısından oldukça önem arz etmektedir. Burada *SS*, standart sapma ve *n* veri sayısını ifade etmektedir.

$$GA = \frac{1.96SS}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

4.1. Elyaf-Matris Ağırlık Oranları

Çizelge 4.1-4.3'te sırasıyla tekil, interply ve intraply kompozitlere ait elyaf ve matris ağırlık oranları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Tekil üretim grubuna ait elyaf ve matris ağırlık oranları

Numune	Elyaf Kütlesi (gr)	Plaka Kütlesi (gr)	Elyaf/Ağırlık Oranı	Matris/Ağırlık Oranı
SC1	230	400	0.58	0.42
SC2	460	785	0.59	0.41
SC3	680	1180	0.58	0.42
SA4	447.5	875	0.51	0.49
SA5	677.5	1325	0.51	0.49
SA6	240	452.5	0.53	0.47
SG7	692.5	1217.5	0.57	0.43
SG8	240	422.5	0.57	0.43
SG9	450	835.00	0.54	0.46
SG10	225	405.00	0.56	0.44
SA11	220	437.50	0.50	0.50

Çizelge 4.2. İnterply üretim grubuna ait elyaf ve matris ağırlık oranları

Numune	Elyaf Kütlesi (gr)	Plaka Kütlesi (gr)	Elyaf/Ağırlık Oranı	Matris/Ağırlık Oranı
IN1	230	435	0.53	0.47
IN2	465	887.5	0.52	0.48
IN3	680	1307.5	0.52	0.48
IN4	227.5	437.5	0.52	0.48
IN5	465	875	0.53	0.47
IN6	690	1297.5	0.53	0.47
IN7	450	830	0.54	0.46
IN8	680	1257.5	0.54	0.46
IN9	220	427.5	0.51	0.49
IN10	677.5	1242.5	0.55	0.45
IN11	230	430	0.53	0.47
IN12	460	845	0.54	0.46
IN13	467.5	815	0.57	0.43
IN14	680	1220	0.56	0.44
IN15	220	420	0.52	0.48
IN16	692.5	1210	0.57	0.43
IN17	230	420	0.55	0.45
IN18	457.5	805	0.57	0.43

Çizelge 4.3. İntraply üretim grubuna ait elyaf ve matris ağırlık oranları

Numune	Elyaf Kütlesi (gr)	Plaka Kütlesi (gr)	Elyaf/Ağırlık Oranı	Matris/Ağırlık Oranı
IR1	235	465	0.51	0.49
IR2	467.5	910	0.51	0.49
IR3	690	1332.5	0.52	0.48
IR4	410	777.5	0.53	0.47
IR5	615	1152.5	0.53	0.47
IR6	205	392.5	0.52	0.48
IR7	680	1167.5	0.58	0.42
IR8	230	402.5	0.57	0.43
IR9	415	790	0.53	0.47

En yüksek elyaf-ağırlık oranına sahip kompozitlerin, karbon elyaf kumaşlı plakalar olduğu görülmektedir. Aramid elyaf kumaş içeren kompozitler ise en düşük elyaf- ağırlık oranlarına sahiptir. Matris-ağırlık oranları elyaf ağırlık oranları ile ters orantılıdır.

4.2. Kalınlık Ölçüm Sonuçları

Mikrometreyle yapılan ölçümler neticesinde tekil, interply ve intraply üretim gruplarından elde edilen kalınlık değerleri sırasıyla Çizelge 4.4-4.6’da verilmiştir. Bu değerler daha önce kalınlık ölçümleri ile ilgili bölümde anlatıldığı üzere her bir plaka üzerinden, 15 ayrı noktadan alınan kalınlık değerlerinin ortalamasıdır. Elde edilen sonuçlara göre, genel olarak plakaların kalınlık dağılımları oldukça iyi ve tutarlıdır. Burada üretim parametrelerinin Şekil 3.5’te gösterilen iş takip formuna uygun bir şekilde standartlaştırılmasının önemi büyüktür.

Çizelge 4.4. Tekil üretim grubuna ait ortalama kalınlık değerleri

Tekil Plakalar		Bir Plakanın (15 Değerin) Ortaması (mm)	İki Plakanın (30 Değerin) Ortalaması (mm)	İki Plakanın Standart Sapması	İki Plaka İçin %95 Güven Aralığı Değeri (mm)
SC1	SC1-1	1.0129	1.0201	0.0476	0.0170
	SC1-2	1.0272			
SC2	SC2-1	1.9335	1.9342	0.0404	0.0144
	SC2-2	1.9348			
SC3	SC3-1	2.8711	2.8703	0.0746	0.0267
	SC3-2	2.8695			
SA4	SA4-2	2.4266	2.4002	0.0681	0.0244
	SA4-3	2.3737			
SA5	SA5-1	3.5920	3.5897	0.0717	0.0257
	SA5-2	3.5875			
SA6	SA6-1	1.2932	1.2866	0.1077	0.0385
	SA6-2	1.2801			
SG7	SG7-1	2.6663	2.6677	0.0666	0.0238
	SG7-2	2.6691			
SG8	SG8-1	1.0087	1.0120	0.0472	0.0169
	SG8-2	1.0153			
SG9	SG9-1	1.7675	1.7540	0.0606	0.0217
	SG9-2	1.7405			
SG10	SG10-	0.8768	0.8815	0.0435	0.0156
	SG10-	0.8862			
SA11	SA11-	1.2224	1.2096	0.0443	0.0158
	SA11-	1.1969			

Çizelge 4.5. İnterply üretim grubuna ait ortalama kalınlık değerleri

İnterply Plakalar		Bir Plakanın (15 Değerin) Ortaması (mm)	İki Plakanın (30 Değerin) Ortalaması (mm)	İki Plakanın Standart Sapması	İki Plaka İçin %95 Güven Aralığı Değeri (mm)
IN1	IN1-1	1.0875	1.1063	0.0504	0.0180
	IN1-2	1.1251			
IN2	IN2-1	2.2322	2.2270	0.1060	0.0379
	IN2-2	2.2219			
IN3	IN3-1	3.1365	3.1457	0.0569	0.0204
	IN3-2	3.1549			
IN4	IN4-1	1.0937	1.1221	0.0799	0.0286
	IN4-2	1.1505			
SA5	IN5-1	2.1359	2.1371	0.0460	0.0165
	IN5-2	2.1382			
IN6	IN6-1	3.1428	3.1381	0.0519	0.0186
	IN6-2	3.1334			
IN7	IN7-1	2.1654	2.1549	0.0682	0.0244
	IN7-2	2.1444			
IN8	IN8-1	3.2816	3.2784	0.0771	0.0276
	IN8-2	3.2753			
IN9	IN9-1	1.1780	1.1598	0.0613	0.0219
	IN9-2	1.1415			
IN10	IN10-1	3.2349	3.2391	0.0819	0.0293
	IN10-2	3.2433			
IN11	IN11-1	1.1513	1.1449	0.0640	0.0229
	IN11-2	1.1385			
IN12	IN12-1	2.3599	2.3001	0.1270	0.0455
	IN12-2	2.2403			
IN13	IN13-1	1.9207	1.9214	0.0478	0.0171
	IN13-2	1.9221			
IN14	IN14-1	2.7444	2.7349	0.0593	0.0212
	IN14-2	2.7255			
IN15	IN15-1	1.1122	1.1176	0.1006	0.0360
	IN15-2	1.1231			
IN16	IN16-1	2.8400	2.8111	0.0541	0.0194
	IN16-2	2.7823			
IN17	IN17-1	0.9645	0.9622	0.0369	0.0132
	IN17-2	0.9599			
IN18	IN18-1	1.8281	1.8427	0.0459	0.0164
	IN18-2	1.8573			

Çizelge 4.6. Intraply üretim grubuna ait ortalama kalınlık değerleri

Intraply Plakalar		Bir Plakanın (15 Değerin) Ortaması (mm)	İki Plakanın (30 Değerin) Ortalaması (mm)	İki Plakanın Standart Sapması	İki Plaka İçin %95 Güven Aralığı Değeri (mm)
IR1	IR1-1	1.1496	1.1613	0.0547	0.0196
	IR1-2	1.1729			
IR2	IR2-1	2.2485	2.2683	0.0982	0.0352
	IR2-2	2.2882			
IR3	IR3-1	3.2953	3.3233	0.1627	0.0582
	IR3-2	3.3513			
IR4	IR4-1	2.0506	2.0531	0.0693	0.0248
	IR4-2	2.0557			
IR5	IR5-1	3.0546	3.0635	0.0879	0.0314
	IR5-2	3.0723			
IR6	IR6-1	1.1019	1.1123	0.0761	0.0272
	IR6-2	1.1227			
IR7	IR7-1	2.6440	2.6474	0.0764	0.0273
	IR7-2	2.6508			
IR8	IR8-1	0.9803	0.9897	0.0599	0.0214
	IR8-2	0.9991			
IR9	IR9-1	1.8181	1.8080	0.1026	0.0367
	IR9-2	1.7978			

4.3. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Tekil, interply ve intraply üretim gruplarına ait ASTM D792 standardına göre belirlenen yoğunluk ölçüm sonuçları aşağıda sırasıyla Çizelge 4.7-4.9’da verilmiştir. Burada her bir plakadan alınan dörder adet 25mm x 30mm’lik numunenin, en az üçer defa hassas terazi ile havada ve sıvı içinde ölçülmesi ile elde edilen ağırlık değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.7. Tekil üretim grubuna ait ortalama yoğunluk değerleri

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	ASTM D792 (g/cm ³)	%95 Güven Aralığı Değeri
SC1	K	0/90	4	1.4358	0.0081
SC2	K	30/60	8	1.4403	0.0040
SC3	K	45/-45	12	1.4489	0.0021
SA4	A	0/90	8	1.2822	0.0031
SA5	A	30/60	12	1.2849	0.0025
SA6	A	45/-45	4	1.2824	0.0018
SG7	C	0/90	12	1.6827	0.0079
SG8	C	30/60	4	1.6473	0.0081
SG9	C	45/-45	8	1.6824	0.0023
SG10	C	0/90	4	1.6634	0.0073
SA11	A	0/90	4	1.2912	0.0037

Çizelge 4.8. Interply üretim grubuna ait ortalama yoğunluk değerleri

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	ASTM D792 (g/cm ³)	%95 Güven Aralığı Değeri
IN1	CAs	0/90	4	1.4529	0.0037
IN2	CAs	30/60	8	1.4549	0.0037
IN3	CAs	45/-45	12	1.4527	0.0018
IN4	ACs	0/90	4	1.4543	0.0036
IN5	ACs	30/60	8	1.4529	0.0038
IN6	ACs	45/-45	12	1.4488	0.0026
IN7	KAs	0/90	8	1.3661	0.0011
IN8	KAs	30/60	12	1.3635	0.0016
IN9	KAs	45/-45	4	1.3497	0.0022
IN10	AKs	0/90	12	1.3620	0.0020
IN11	AKs	30/60	4	1.3543	0.0020
IN12	AKs	45/-45	8	1.3593	0.0013
IN13	KCs	0/90	8	1.5625	0.0032
IN14	KCs	30/60	12	1.5656	0.0026
IN15	KCs	45/-45	4	1.5458	0.0035
IN16	CKs	0/90	12	1.5613	0.0035
IN17	CKs	30/60	4	1.5418	0.0039
IN18	CKs	45/-45	8	1.5543	0.0033

Çizelge 4.9. Intraply üretim grubuna ait ortalama yoğunluk değerleri

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	ASTM D792 (g/cm ³)	%95 Güven Aralığı Değeri
IR1	CA	0/90	4	1.4349	0.0041
IR2	CA	30/60	8	1.4407	0.0036
IR3	CA	45/-45	12	1.4451	0.0037
IR4	KA	0/90	8	1.3666	0.0032
IR5	KA	30/60	12	1.3646	0.0021
IR6	KA	45/-45	4	1.3598	0.0037
IR7	KC	0/90	12	1.5785	0.0036
IR8	KC	30/60	4	1.5532	0.0063
IR9	KC	45/-45	8	1.5750	0.0046

4.4. Titreşim Testi Sonuçları

Titreşim testleri, ankastre serbest sınır şartında ASTM E756-05 standardına uygun bir şekilde her bir plakadan X ve Y yönlerinden en az beşer adet deney numunesi kullanılarak icra edilmiştir. Her bir test numunesinden üç veri grubu alınmıştır. Her bir veri grubu için en az iki çekiç dardesi vurulmuştur. Her bir veri grubunda ilk üç doğal frekans ve bu frekanslara karşılık gelen sönüm oranı değeri bulunmaktadır. Dolayısıyla, 76 plakadan onar adet test numunesine (5 tane X, 5 tane Y yönünde) en az üçer veri grubu için ikişer defa çekiç ile vurulmuştur. Yani ankastre-serbest sınır şartı için toplamda 4560 defa çekiç ile vurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla ankastre-serbest sınır şartı için $(76 \times 10 \times 3 \times 6 =)$ 13.680 (On üç bin altı yüz seksen) adet veri değerlendirilmiştir. Bu verilere ait ortalama değerler, standart sapmalar ve %95 seviyesine göre güven aralığı değerleri kullanılarak, sonuçlar değerlendirilmiştir. X ve Y yönlerine ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri aşağıda Çizelge 4.10-4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Tekil üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri (X yönü)

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
				1	2	3	1	2	3
SC1	K	0/90	4	16.8	105.1	294.1	13.572	2.345	1.168
SC2	K	30/60	8	21.6	135.1	384.9	12.221	2.066	1.369
SC3	K	45/-45	12	28.8	178.4	519.1	7.325	1.540	1.167
SA4	A	0/90	8	34.9	214.8	602.5	7.389	1.629	1.371
SA5	A	30/60	12	30.0	185.5	529.3	6.717	1.986	1.494
SA6	A	45/-45	4	8.0	56.1	164.7	28.460	4.489	2.206
SG7	C	0/90	12	28.0	169.5	475.6	7.025	1.501	0.953
SG8	C	30/60	4	8.0	47.6	130.5	19.367	4.423	2.342
SG9	C	45/-45	8	14.8	87.2	245.6	19.480	3.038	1.590
SG10	C	0/90	4	8.0	51.6	144.1	20.163	4.574	1.843
SA11	A	0/90	4	16.0	107.1	300.0	14.162	2.413	1.860

Çizelge 4.11. Tekil üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri (Y yönü)

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
				1	2	3	1	2	3
SC1	K	0/90	4	24.3	111.9	310.8	13.939	2.214	1.085
SC2	K	30/60	8	20.0	122.0	358.3	8.316	2.365	1.573
SC3	K	45/-45	12	28.4	183.7	524.9	7.560	1.583	1.215
SA4	A	0/90	8	36.0	225.9	632.7	5.982	1.447	1.198
SA5	A	30/60	12	30.0	189.9	541.9	9.380	1.880	1.493
SA6	A	45/-45	4	8.0	57.7	168.3	25.460	4.588	2.125
SG7	C	0/90	12	28.0	172.8	485.2	5.767	1.569	1.107
SG8	C	30/60	4	8.0	47.6	132.8	24.557	4.933	2.298
SG9	C	45/-45	8	15.2	89.9	252.0	16.815	2.884	1.523
SG10	C	0/90	4	8.0	54.1	154.0	21.917	3.940	2.048
SA11	A	0/90	4	16.0	107.6	300.3	13.979	2.807	1.852

Çizelge 4.12. İnterply üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri (X)

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
				1	2	3	1	2	3
IN1	CA _s	0/90	4	12.0	74.7	207.5	12.507	3.302	1.585
IN2	CA _s	30/60	8	17.6	112.4	319.2	17.803	2.505	1.577
IN3	CA _s	45/-45	12	24.0	154.0	436.9	9.329	1.784	1.247
IN4	AC _s	0/90	4	14.4	88.0	245.5	21.607	2.508	1.790
IN5	AC _s	30/60	8	16.4	110.4	315.5	17.223	2.486	1.819
IN6	AC _s	45/-45	12	24.0	152.7	433.6	6.713	1.926	1.391
IN7	KA _s	0/90	8	35.6	222.4	620.7	6.912	1.269	1.071
IN8	KA _s	30/60	12	32.0	201.1	570.7	6.080	1.341	1.049
IN9	KA _s	45/-45	4	12.0	68.4	196.7	16.697	3.090	1.674
IN10	AK _s	0/90	12	52.4	328.7	913.9	3.762	1.095	0.856
IN11	AK _s	30/60	4	8.0	58.3	166.7	30.540	4.973	2.222
IN12	AK _s	45/-45	8	18.1	114.9	330.3	16.258	2.235	1.474
IN13	KC _s	0/90	8	29.7	184.3	516.3	8.631	1.534	0.879
IN14	KC _s	30/60	12	28.0	175.2	494.0	6.856	1.546	1.266
IN15	KC _s	45/-45	4	8.0	54.0	156.3	20.733	4.099	1.947
IN16	CK _s	0/90	12	36.3	228.8	640.4	6.307	1.434	0.975
IN17	CK _s	30/60	4	8.0	51.6	145.5	19.050	4.217	2.253
IN18	CK _s	45/-45	8	16.0	102.4	289.2	9.976	2.144	1.491

Çizelge 4.13. İnterply üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri (Y)

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
				1	2	3	1	2	3
IN1	CA _s	0/90	4	12.0	72.7	203.7	12.780	3.297	1.892
IN2	CA _s	30/60	8	17.2	110.3	312.4	14.967	2.673	1.527
IN3	CA _s	45/-45	12	25.1	158.0	444.8	9.064	1.782	1.298
IN4	AC _s	0/90	4	16.0	88.8	249.2	19.047	2.847	1.762
IN5	AC _s	30/60	8	17.1	111.5	317.9	14.155	2.448	1.763
IN6	AC _s	45/-45	12	24.0	151.6	432.4	7.137	1.926	1.491
IN7	KA _s	0/90	8	36.0	225.6	627.9	5.658	1.263	1.031
IN8	KA _s	30/60	12	30.0	188.1	533.9	7.890	1.600	1.174
IN9	KA _s	45/-45	4	12.0	65.2	187.6	26.117	3.586	1.854
IN10	AK _s	0/90	12	51.6	321.3	894.8	3.805	1.468	0.976
IN11	AK _s	30/60	4	8.0	56.8	163.9	24.780	4.252	2.192
IN12	AK _s	45/-45	8	17.9	114.0	317.7	19.090	2.235	1.562
IN13	KC _s	0/90	8	29.6	184.3	517.7	6.401	1.413	0.824
IN14	KC _s	30/60	12	28.0	175.3	495.1	6.209	1.763	1.351
IN15	KC _s	45/-45	4	8.0	55.2	157.6	22.420	3.626	1.887
IN16	CK _s	0/90	12	36.8	230.3	644.0	4.897	1.119	0.883
IN17	CK _s	30/60	4	8.0	48.8	139.9	19.210	5.299	2.618
IN18	CK _s	45/-45	8	16.0	102.0	288.4	9.704	2.659	1.412

Çizelge 4.14. İntraply üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri (X yönü)

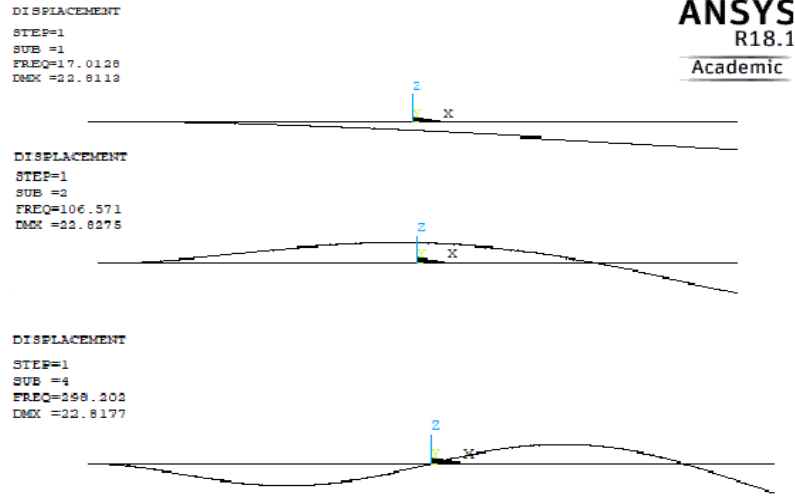
Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
				1	2	3	1	2	3
IR1	CA	0/90	4	12.0	75.0	213.6	13.427	3.392	1.319
IR2	CA	30/60	8	18.0	113.2	323.2	14.894	2.532	1.468
IR3	CA	45/-45	12	25.3	160.8	454.7	8.225	1.739	1.322
IR4	KA	0/90	8	36.1	222.3	619.3	6.244	1.317	0.826
IR5	KA	30/60	12	28.8	182.1	522.5	6.512	1.677	1.190
IR6	KA	45/-45	4	8.0	57.2	165.1	26.580	3.741	1.810
IR7	KC	0/90	12	36.4	231.2	646.5	6.271	1.151	0.714
IR8	KC	30/60	4	8.0	50.4	143.5	19.147	4.268	2.090
IR9	KC	45/-45	8	16.0	102.8	292.0	10.392	2.515	1.361

Çizelge 4.15. İntraply üretim grubuna ait ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri (Y yönü)

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
				1	2	3	1	2	3
IR1	CA	0/90	4	16.0	99.2	281.3	9.705	2.659	1.381
IR2	CA	30/60	8	19.6	123.1	351.3	12.262	2.335	1.596
IR3	CA	45/-45	12	26.8	167.2	474.1	10.795	1.796	1.282
IR4	KA	0/90	8	32.0	200.9	562.5	6.837	1.477	1.070
IR5	KA	30/60	12	28.4	174.5	497.6	6.551	1.700	1.261
IR6	KA	45/-45	4	8.0	57.6	164.3	27.120	5.020	1.958
IR7	KC	0/90	12	40.8	247.3	687.5	4.836	1.079	0.815
IR8	KC	30/60	4	8.0	55.6	158.0	23.890	3.545	1.932
IR9	KC	45/-45	8	16.0	100.4	286.9	9.327	2.713	1.419

4.5. Sayısal Analizler

ANSYS® APDL18.1 programı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Mod şekillerine bakılarak ilk üç doğal frekans değerleri kaydedilmiştir (Şekil 4.1). Her bir üretim grubu için ANSYS sonuçları ile deneysel sonuçlar ve % fark değerleri Çizelge 4.16-4.18’de gösterilmiştir. Sayısal analizlerde girilen malzeme özellikleri deneysel olarak elde edilen mekanik ve malzeme özellikleri ve Denklem (3.8) yardımı ile hesaplanan kayma modülü değerleridir.



Şekil 4.1. ANSYS analizlerinden elde edilen ilk üç doğal frekansa ait mod şekilleri

Çizelge 4.16. Tekil üretim grubuna ait ANSYS ile deneysel ilk üç doğal frekans ve % fark değerleri

TEKİL ÜRETİMLER		1.Frek.(Hz)	2. Frek.(Hz)	3. Frek.(Hz)	1. % Fark	2. % Fark	3. % Fark
SC1	Deneysel	16.8	105.1	294.1	1.27	1.43	1,38
	ANSYS	17.013	106.57	298.2			
SC2	Deneysel	21.6	135.1	384.9	0.58	0.69	0.07
	ANSYS	21.726	136	385.19			
SC3	Deneysel	28.8	178.4	519.067	0.49	1.79	0.82
	ANSYS	28.941	181.6	514.79			
SA4	Deneysel	34.933	214.8	602.533	9.1	7.6	8.15
	ANSYS	31.754	198.47	553.41			
SA5	Deneysel	30	185.467	529.333	4.99	3.85	4.74
	ANSYS	28.503	178.33	504.25			
SA6	Deneysel	8	56.133	164.667	6.88	4.25	0.57
	ANSYS	8.551	53.747	165.6			
SG7	Deneysel	28	169.467	475.6	13.64	10.7	11.09
	ANSYS	24.182	151.33	422.85			
SG8	Deneysel	8	47.6	130.533	4.55	0.4	2.84
	ANSYS	7.636	47.792	134.24			
SG9	Deneysel	14.800	87.200	245.6	13.72	8.3	8.38
	ANSYS	12.769	79.961	225.01			
SG10	Deneysel	8	51.6	144.133	2.56	5.34	5.13
	ANSYS	7.796	48.842	136.74			
SA11	Deneysel	16	107.067	300	3.64	9.81	9.96
	ANSYS	15.418	96.562	270.110			

Çizelge 4.17. İnterply üretim grubuna ait ANSYS ile deneysel ilk üç doğal frekans ve % fark değerleri

İTERPLY ÜRETİM.		1.Frekans (Hz)	2. Frekans (Hz)	3. Frekans (Hz)	1. % Fark	2. % Fark	3. % Fark
IN1	Deneysel	12	74.667	207.467	3.08	3.77	4.49
	ANSYS	12.369	77.478	216.78			
IN2	Deneysel	17.6	112.4	319.2	1.91	0.15	0.67
	ANSYS	17.937	112.23	317.05			
IN3	Deneysel	24	154	436.933	2.39	0.05	0.31
	ANSYS	24.574	154.07	435.57			
IN4	Deneysel	14.4	88	245.467	8.96	6.67	6.37
	ANSYS	13.11	82.128	229.83			
IN5	Deneysel	16.4	110.4	315.467	5.79	1.7	3.05
	ANSYS	17.349	108.52	305.86			
IN6	Deneysel	24	152.667	433.6	2.81	4.27	4.87
	ANSYS	23.325	146.15	412.47			
IN7	Deneysel	35.6	222.4	620.667	1.26	13.2	13.25
	ANSYS	30.878	193.04	538.43			
IN8	Deneysel	32	201.067	570.667	14.39	18.65	18.72
	ANSYS	26.116	163.56	463.84			
IN9	Deneysel	12	68.4	196.667	14.94	17.36	19.4
	ANSYS	8.648	54.477	156.55			
IN10	Deneysel	52.4	328.667	913.867	15.1	18.44	19.78
	ANSYS	39.246	245.06	682.22			
IN11	Deneysel	8	58.267	166.667	8.84	6.44	7.26
	ANSYS	8.707	54.516	154.56			
IN12	Deneysel	18.133	114.933	330.267	6.06	6.96	8.07
	ANSYS	17.035	106.93	303.63			
IN13	Deneysel	29.733	184.267	516.267	12.77	11.94	12.23
	ANSYS	25.936	162.26	453.12			
IN14	Deneysel	28	175.2	494	14.15	16.98	18.6
	ANSYS	22.637	141.780	402.13			
IN15	Deneysel	8	54	156.267	8.45	1.11	0.16
	ANSYS	8.676	54.601	156.51			
IN16	Deneysel	36.267	228.800	640.4	4.63	5.46	5.74
	ANSYS	34.586	216.300	603.66			
IN17	Deneysel	8	51.600	145.467	2.09	0.98	1.26
	ANSYS	8.167	51.096	143.64			
IN18	Deneysel	16.000	102.4	289.2	0.04	2.07	2.19
	ANSYS	16.007	100.280	282.88			

Çizelge 4.18. İntraply üretim grubuna ait ANSYS ile deneysel ilk üç doğal frekans ve % fark değerleri

INTRAPLY ÜRETİM.		1. Frekans (Hz)	2. Frekans (Hz)	3. Frekans (Hz)	1. % Fark	2. % Fark	3. % Fark
IR1	Deneysel	12	75	213.6	6.02	6.24	4.37
	ANSYS	12.722	79.682	222.93			
IR2	Deneysel	18	113.2	323.2	1.19	1.71	2.83
	ANSYS	17.786	111.26	314.06			
IR3	Deneysel	25.333	160.8	454.667	3.59	4.81	4.92
	ANSYS	24.423	153.07	432.3			
IR4	Deneysel	32	200.933	562.533	10.39	10.75	11.03
	ANSYS	28.675	179.33	500.48			
IR5	Deneysel	28.8	182.133	522.533	12.47	13.31	14.29
	ANSYS	25.208	157.89	447.87			
IR6	Deneysel	8	57.2	165.067	2.72	14.31	14.7
	ANSYS	7.783	49.013	140.81			
IR7	Deneysel	36.4	231.2	646.533	8.95	10.36	10.57
	ANSYS	33.143	207.24	578.2			
IR8	Deneysel	8	50.4	143.467	4.48	5.11	5.67
	ANSYS	7.642	47.827	135.33			
IR9	Deneysel	16	102.8	292	12.11	14.19	14.35
	ANSYS	14.063	88.209	250.1			

4.6. Çekme Testi Sonuçları

4.6.1. Poisson oranları

Strain gauge kullanılarak yapılan çekme testleri neticesinde elde edilen poisson oranı değerleri aşağıda Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19. Strain gauge ile yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen poisson oranı değerleri

Numuneler	Elyaf kumaş türü	Yönlenme Açısı	Tabaka sayısı	Poisson Oranı
SC1	Karbon	0/90	4	0.06
SG10	Cam	0/90	4	0.13
SA11	Aramid	0/90	4	0.06

4.6.2. Çekme dayanımı ve elastisite modülü sonuçları

Çizelge 4.20-4.25'te çekme testleri neticesinde X ve Y yönlerinde elde edilen değerler tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.20. Tekil grup X yönündeki numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Elastisite Modülü (GPa)	%95 Güven
SC1	615.100	23.481	27.2207	1.2328
SC2	204.470	2.610	9.953	0.2777
SC3	177.890	4.844	8.1483	0.0748
SA4	431.860	8.031	15.42	0.7194
SA5	216.989	10.652	5.0085	0.0638
SA6	234.590	4.490	3.9982	0.0884
SG7	291.890	8.410	9.9595	0.3465
SG8	114.340	5.563	4.6448	0.1655
SG9	117.270	4.929	5.8683	0.2125
SG10	231.580	10.588	9.5107	0.2393
SA11	401.170	11.723	15.0693	0.5925

Çizelge 4.21. Tekil grup Y yönündeki numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Elastisite Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
SC1	669.190	26.363	24.1285	1.1854
SC2	161.500	14.048	5.7973	0.2476
SC3	190.210	2.662	7.9702	0.3035
SA4	436.560	8.772	15.5413	0.7009
SA5	220.950	7.153	5.3733	0.1779
SA6	253.730	7.156	4.1306	0.1130
SG7	360.020	10.568	11.6172	0.2679
SG8	124.060	2.249	5.474	0.2269
SG9	118.370	4.803	5.7425	0.2013
SG10	318.820	11.873	11.239	0.4308
SA11	381.160	16.528	15.1183	0.1355

Çizelge 4.22. İnterply grup X yönündeki numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Elastisite Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
IN1	353.730	6.921	13.8127	0.5980
IN2	166.370	4.118	4.4115	0.1974
IN3	188.860	3.950	4.344	0.1756
IN4	338.670	16.415	13.583	0.1951
IN5	168.170	3.997	5.8883	0.2030
IN6	172.490	2.955	4.7445	0.2126
IN7	460.590	14.425	18.227	0.0396
IN8	218.180	7.311	6.5813	0.2419
IN9	151.140	2.540	4.406	0.1636
IN10	490.370	13.863	14.405	0.2897
IN11	175.820	5.087	5.1283	0.0363
IN12	174.750	6.152	4.6703	0.1813
IN13	401.440	15.569	20.9295	0.1990
IN14	183.110	2.333	7.4757	0.1849
IN15	127.060	4.299	4.6984	0.1517
IN16	444.010	7.372	15.8717	0.6680
IN17	164.240	0.751	7.0477	0.1605
IN18	149.100	4.154	6.9968	0.33

Çizelge 4.23. İnterply grup Y yönündeki numuneler için çekme testi sonuçları

Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Elastisite Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
IN1	401.56	8.822	15.0448	0.6851
IN2	168.8	3.463	4.9548	0.1959
IN3	190.36	3.779	4.4182	0.1240
IN4	361.74	10.393	13.7787	0.6288
IN5	165.75	2.116	5.9570	0.1406
IN6	186.61	3.966	5.0040	0.0981
IN7	460.576	20.662	18.2270	0.0396
IN8	214.53	8.618	6.8860	0.1202
IN9	169.922	4.63	4.1168	0.0872
IN10	535.96	16.247	15.7607	0.4630
IN11	163.83	5.571	5.0167	0.23
IN12	201.54	9.947	4.6378	0.1522
IN13	452.85	16.572	17.8463	0.1441
IN14	178.91	6.741	8.0427	0.1661
IN15	137	3.605	5.0897	0.2460
IN16	493.76	12.44	14.7115	0.7713
IN17	138.12	3.491	6.3748	0.2557
IN18	150.04	7.072	6.9100	0.2670

Çizelge 4.24. İntraply grup X yönündeki numuneler için çekme testi sonuçları

Numune Adı	Çekme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Elastisite Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
IR1	353.36	12.243	13.2395	0.4164
IR2	173.22	7.206	5.6293	0.2134
IR3	168.025	1.949	4.1840	0.1762
IR4	547.5	25.491	18.2470	0.8034
IR5	192.41	5.32	6.3520	0.1645
IR6	181.01	4.405	4.3652	0.1458
IR7	521.015	22.134	18.0767	0.2509
IR8	164.79	3.79	8.0105	0.1698
IR9	180.68	8.522	6.3478	0.1964

Çizelge 4.25. İntraply grup Y yönündeki numuneler için çekme testi sonuçları

Numune Adı	Çekme dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Elastisite Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
IR1	359.02	5.166	11.0147	0.4939
IR2	191.68	6.319	6.1503	0.1285
IR3	176.19	4.53	4.3324	0.2094
IR4	542.91	14.597	16.9314	0.1977
IR5	223.34	6.115	7.2913	0.1719
IR6	190.24	7.781	4.2470	0.1926
IR7	489.94	7.712	17.9615	0.5731
IR8	177.48	3.675	8.3725	0.2260
IR9	162.38	0.625	6.3226	0.1803

4.7. Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları

İlgili ASTM D790 standardına göre X ve Y yönlerinde her bir levhadan en az beşer adet test numunesi ile yapılan üç nokta eğilme testler neticesinde eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerleri %95 güven aralığına göre hesaplanarak Çizelge 4.26-4.31’de verilmiştir.

Çizelge 4.26. Tekil grup X yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Eğilme Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
SC1	691.633	13.087	32.764	0.503
SC2	414.554	15.008	18.642	0.717
SC3	285.055	8.394	7.514	0.371
SA4	345.046	11.336	12.917	0.451
SA5	226.559	9.876	8.167	0.366
SA6	266.042	11.181	5.871	0.278
SG7	356.297	9.001	15.592	0.693
SG8	326.428	10.025	8.362	0.468
SG9	261.45	12.381	7.113	0.286
SG10	390.987	10.024	12.357	0.585
SA11	352.779	15.702	12.231	0.468

Çizelge 4.27. Tekil grup Y yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Eğilme Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
SC1	672.883	11.307	31.626	0.569
SC2	361.293	11.796	15.065	0.626
SC3	277.13	7.451	6.912	0.343
SA4	350.328	14.488	13.713	0.754
SA5	228.174	5.083	7.69	0.34
SA6	228.444	8.467	5.199	0.241
SG7	424.299	20.554	8.96	0.378
SG8	379.367	17.5	8.978	0.382
SG9	307	12.54	7.937	0.324
SG10	457.9	19.282	14.483	0.726
SA11	364.58	13.103	14.517	0.523

Çizelge 4.28. İnterply grup X yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Eğilme Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
IN1	436.982	14.642	12.392	0.61
IN2	243.379	9.292	8.303	0.389
IN3	217.97	1.901	5.193	0.171
IN4	385.913	16.959	14.09	0.641
IN5	222.714	9.185	7.955	0.343
IN6	215.915	4.193	5.417	0.104
IN7	591.382	16.552	39.383	0.961
IN8	291.044	8.182	9.665	0.405
IN9	317.929	15.132	7	0.333
IN10	562.039	12.331	24.685	0.481
IN11	267.128	6.448	7.506	0.343
IN12	219.417	8.711	5.901	0.236
IN13	602.722	14.949	33.807	1.239
IN14	332.737	10.118	9.803	0.457
IN15	427.365	4.4	10.053	0.401
IN16	570.418	10.312	27.167	1.332
IN17	388.785	9.823	12.823	0.617
IN18	331.847	14.923	9.169	0.421

Çizelge 4.29. İnterply grup Y yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Eğilme Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
IN1	416.895	14.722	17.289	0.91
IN2	241.064	9.52	8.639	0.587
IN3	236.536	8.321	5.732	0.267
IN4	359.135	16.004	13.235	1.301
IN5	218.605	7.342	7.931	0.56
IN6	235.437	5.944	5.886	0.205
IN7	559.099	18.44	38.114	1.095
IN8	265.804	9.16	8.835	0.574
IN9	242.036	8.265	5.447	1.18
IN10	553.285	15.889	24.587	0.826
IN11	234.906	6.372	7.322	0.628
IN12	230.277	6.171	7.092	0.262
IN13	608.764	19.96	34.111	0.751
IN14	332.199	3.13	10.02	0.5
IN15	422.923	15.963	9.217	1.152
IN16	595.762	14.722	27.693	0.234
IN17	357.8	15.87	11.879	1.58
IN18	311.155	13.477	8.282	0.334

Çizelge 4.30. İntraply grup X yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Eğilme Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
IR1	363.106	18.116	11.535	0.576
IR2	195.694	8.667	6.695	0.321
IR3	207.696	4.274	5.943	0.162
IR4	555.973	12.176	33.183	1.655
IR5	307.907	8.246	9.502	0.357
IR6	277.094	13.344	5.943	0.617
IR7	678.446	10.347	30.902	0.382
IR8	361.775	15.562	12.721	1.339
IR9	288.488	10.318	7.772	0.353

Çizelge 4.31. İntraply grup Y yönündeki numuneler için üç nokta eğilme testi sonuçları

Numune Adı	Eğilme Dayanımı (MPa)	%95 Güven Aralığı	Eğilme Modülü (GPa)	%95 Güven Aralığı
IR1	385.744	15.15	11.403	0.571
IR2	213.749	10.559	8.243	0.364
IR3	225.177	5.236	5.958	0.288
IR4	563.268	18.639	27.789	1.499
IR5	309.28	13.032	10.233	0.323
IR6	276.133	8.25	6.237	0.231
IR7	687.319	20.604	38.878	0.784
IR8	341.967	14.421	13.886	0.655
IR9	289.717	14.114	7.905	0.351

4.8. Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları

ASTM D3763 standardına uygun bir şekilde vurucu ucun test numunesine çarpma hızı değiştirilerek 10j, 20j, 30j, 40j, 50j ve 60j'lük darbe enerjisi seviyelerine göre testler yapılmıştır. Düşük hızlı darbe testleri neticesinde elde edilen maksimum temas kuvveti, eğilme rijitliği, absorbe edilen enerji değerleri aşağıda Çizelge 4.32-4.37'de verilmiştir.

Çizelge 4.32. Tekil grup, maksimum temas kuvveti – darbe enerjisi değerleri

Num	Maksimum Temas Kuvveti-[N]							Eğilme Rijitliği (N/mm)
	10 j	20 j	30 j	40 j	50 j	60 j	Ort.	
SC1	1583.62	1501.41	1378.58	1264.25			1431.96	435.6
SC2		2571.96	2581.41	2962.19	2692.90		2702.12	738.3
SC3		3694.95	3778.57	3996.84	3738.88	3984.08	3838.66	1677.5
SA4		3235.26	3265.50	3380.30	3336.37		3304.36	817.7
SA5		4481.56	4794.79	4852.90	4662.98	4920.93	4742.63	1574.3
SA6	1825.51	1783.93	1793.38	1743.30			1786.53	383.4
SG7		4385.18	4556.68	4794.79	4928.01	4861.40	4705.21	858.5
SG8	2058.89	2194.95	2159.05	2423.61			2209.13	450.6
SG9		3258.89	3306.13	3557.47	3449.75		3393.06	760.6
SG10	1992.75	2064.56	2228.97	2208.18			2123.61	457.4
SA11	1769.76	1849.13	1804.25	1746.14			1792.32	408.1

Çizelge 4.33. Tekil grup, absorbe edilen enerji değerleri

Absorbe Edilen Enerji-[J]						
Numune Adı	10 j	20 j	30 j	40 j	50 j	60 j
SC1	9.40	9.40	9.57	10.50		
SC2		19.40	19.53	21.70	21.70	
SC3		11.35	27.15	35.90	34.80	36.45
SA4		17.70	26.43	27.50	27.10	
SA5		11.60	19.90	40.00	43.25	45.80
SA6	10.00	11.20	11.80	11.60		
SG7		11.80	19.90	39.50	40.10	43.55
SG8	9.87	10.37	10.77	11.10		
SG9		18.87	23.60	25.30	23.20	
SG10	8.80	9.50	11.47	12.00		
SA11	10.00	11.60	12.10	12.50		

Çizelge 4.34. İnterply grup, maksimum temas kuvveti – darbe enerjisi değerleri

Num	Maksimum Temas Kuvveti-[N]							Eğilme Rijitliği (N/mm)
	10 j	20 j	30 j	40 j	50 j	60 j	Ortalama	
IN1	2179.84	2150.54	2204.40	2293.22			2207.00	439.3
IN2		3465.82	3430.85	3505.50	3469.59		3467.94	665.5
IN3		4746.60	5085.34	4947.86	5074.00	5047.07	4980.17	1243.7
IN4	2377.31	2455.74	2490.23	2537.00			2465.07	496.7
IN5		3472.43	3444.08	3714.32	3500.78		3532.90	610.1
IN6		4746.60	5085.34	4947.86	5003.13	5219.98	5000.58	535.1
IN7		3113.38	3068.97	3106.76	2948.56		3059.42	712.4
IN8		4373.84	4699.83	4470.22	4664.39	4431.95	4528.05	2013.9
IN9	1683.77	1713.07	1710.23	1726.29			1708.34	348
IN10		4307.23	4397.94	4372.43	4603.45	4403.61	4416.93	1774.9
IN11	1573.22	1577.00	1590.23	1700.78			1610.31	391.9
IN12		2964.08	2934.79	2943.30	2899.83		2935.50	906.3
IN13		3147.39	3339.20	3133.22	3112.43		3183.06	643.5
IN14		4300.14	4549.59	4433.37	4597.78	4719.67	4520.11	1482.1
IN15	2149.60	2239.36	2410.39	2191.17			2247.63	439.5
IN16		3925.97	4107.39	4149.91	4331.32	4274.63	4157.84	1512.9
IN17	1611.96	1691.33	1707.40	1709.29			1679.99	465.3
IN18		2984.87	2778.89	2978.26	2948.02		2922.51	688.7

Sadece 4 tabakalı kompozit numuneler, 10j'lük enerji seviyesinde darbeye maruz bırakılırken bu numuneler 40j'lük darbe enerjisiyle tamamen delindiği için 50j ve 60j'lük darbe enerjileri ile test etmeye gerek kalmamıştır. Aynı mantık çerçevesinde, yapılan ön testler ile, vurucu ucun sekme, saplanma ve delme şekillerine göre uygulanan darbe enerjileri belirlenmiştir.

Buna göre;

4 tabakalılar; 10j, 20j, 30j ve 40j ile test edilmiştir.

8 tabakalılar; 20j, 30j, 40j ve 50j ile test edilmiştir.

12 tabakalılar ise 20j, 30j, 40j, 50j ve 60j ile test edilmiştir.

Çizelge 4.35. İnterply grup, absorbe edilen enerji değerleri

Absorbe Edilen Enerji-[J]						
Numune Adı	10 j	20 j	30 j	40 j	50 j	60 j
IN1	10.00	11.97	12.80	12.50		
IN2		17.40	26.00	25.37	27.00	
IN3		11.00	24.25	39.60	40.65	41.60
IN4	10.00	12.97	12.10	12.90		
IN5		20.00	22.17	24.80	23.10	
IN6		10.95	24.60	39.90	37.50	40.65
IN7		18.57	19.27	19.97	18.90	
IN8		11.50	29.45	33.25	33.10	33.65
IN9	8.00	9.00	8.40	8.70		
IN10		11.00	29.45	31.50	33.50	34.30
IN11	8.37	8.73	8.87	10.10		
IN12		18.30	18.23	18.87	19.90	
IN13		18.53	19.05	19.57	20.20	
IN14		10.45	29.20	34.85	36.10	37.60
IN15	8.97	9.37	9.97	9.50		
IN16		8.60	18.75	38.20	40.65	42.20
IN17	7.83	9.77	8.80	8.10		
IN18		17.93	22.97	25.60	22.50	

Çizelge 4.36. İntraply grup, maksimum temas kuvveti – darbe enerjisi değerleri

Maksimum Temas Kuvveti-[N]								Eğilme Rijitliği (N/mm)
Num	10 j	20 j	30 j	40 j	50 j	60 j	Ortalama	
IR1	1902.99	2014.48	1932.28	1890.70			1935.11	433
IR2		3399.67	3708.65	3977.94	3846.60		3733.22	738.9
IR3		5195.89	5388.64	5782.66	5616.83	5696.20	5536.04	1276.5
IR4		2832.75	2742.98	2908.34	3103.93		2897.00	805.2
IR5		3975.58	4188.17	3961.40	4050.69	4229.28	4081.03	1490.9
IR6	1472.12	1457.00	1450.89	1510.86			1472.72	348.5
IR7		3937.31	4195.26	3950.07	4175.42	4319.99	4115.61	1182.7
IR8	1559.99	1702.67	1782.04	1726.29			1692.75	442
IR9		2845.03	2982.98	3015.11	2902.67		2936.45	617.5

Çizelge 4.37. İntraply grup, absorbe edilen enerji değerleri

Absorbe Edilen Enerji-[J]						
Numune Adı	10 j	20 j	30 j	40 j	50 j	60 j
IR1	10.00	11.20	12.20	11.80		
IR2		18.50	26.93	28.80	28.10	
IR3		9.90	19.70	40.00	46.65	49.20
IR4		19.87	22.10	21.60	21.70	
IR5		10.50	23.65	37.50	37.20	39.15
IR6	8.73	11.97	8.73	9.10		
IR7		10.00	29.25	34.55	35.15	36.00
IR8	8.10	8.60	8.30	8.50		
IR9		18.97	20.10	20.17	19.70	

4.9. Taguchi Analizleri

Her bir üretim grubunun titreşim, çekme, darbe ve eğilme testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar, Minitab®19 programının DOE sekmesi altında bulunan “Taguchi” modülünde üretimi yapılan ortogonal dizilerde kullanılarak “daha büyük daha iyi” amacına göre analizler yapılmıştır. Böylece amaca uygun, üretimlerde dikkat edilmesi gereken en etkili faktör ve seviyeler belirlenmiştir.

4.9.1. Titreşim analizleri

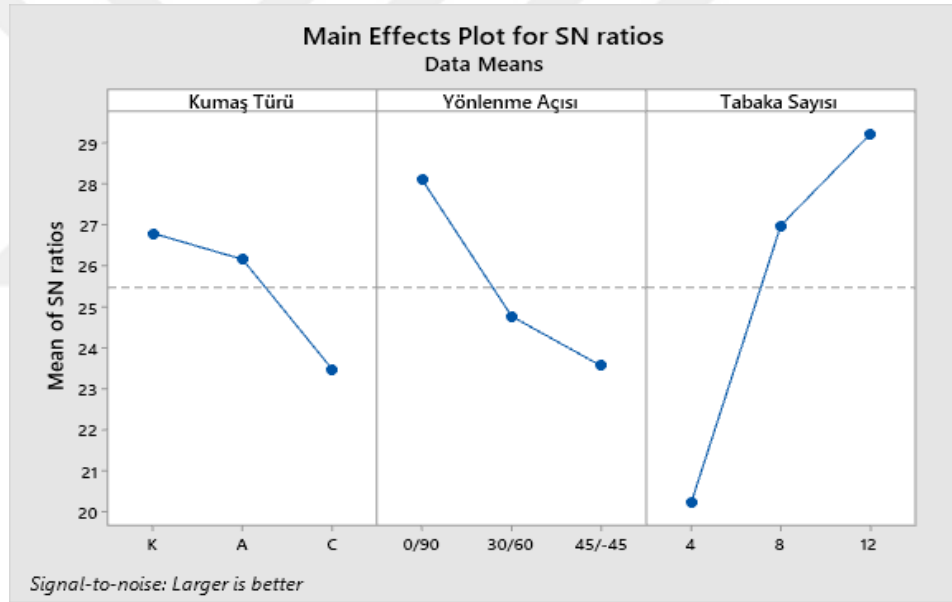
Titreşim testlerinden elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak Taguchi analizleri yapılmış, tekil, interply ve intraply hibrit kompozitlerin titreşim davranışları karşılaştırılmıştır. Kumaş türü, oryantasyon açısı (yönlenme açısı) ve tabaka sayısının birinci doğal frekans ve birinci sönüm oranına etkisinde en önemli faktör ve seviyeler belirlenmiştir. İkinci ve üçüncü doğal frekans ve sönüm oranı değerleri ile ilgili analizler yapılmış olup genel eğilim birinci doğal frekans ve birinci sönüm oranına benzer olduğu için bu durumların Taguchi analizleri ayrıca verilmemiştir.

Aşağıda her bir üretim grubuna ait analizlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.38-4.43 ve Şekil 4.2-4.7’de verilmiştir.

- Tekil üretim grubu

Çizelge 4.38. Tekil üretim grubunda, ankastre-serbest sınır şartı için 1. doğal frekansın kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu

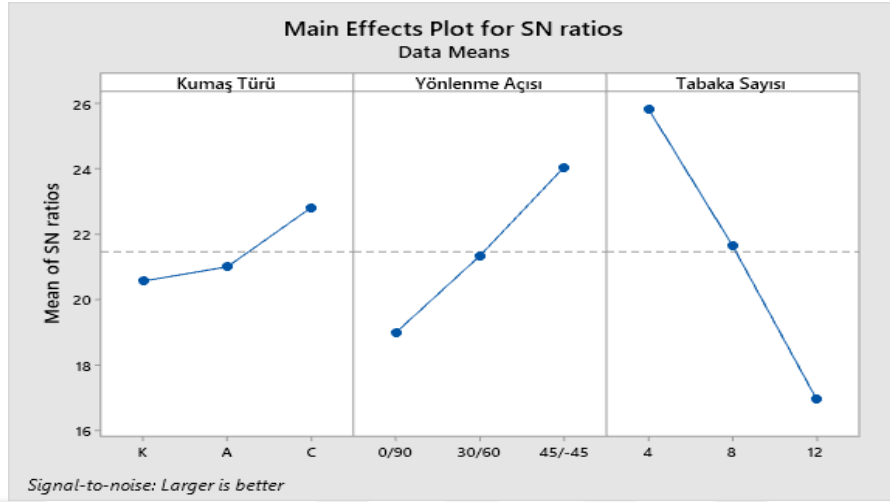
Seviye	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı
1	26.79	28.10	20.21
2	26.16	24.76	26.99
3	23.47	23.55	29.22
Fark	3.32	4.55	9.01
Önem Sıralaması	3	2	1



Şekil 4.2. Tekil üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. doğal frekansın kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Çizelge 4.39. Tekil üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu

Seviye	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı
1	20.56	18.99	25.83
2	21.00	21.34	21.64
3	22.82	24.06	16.92
Fark	2.26	5.07	8.90
Önem Sıralaması	3	2	1



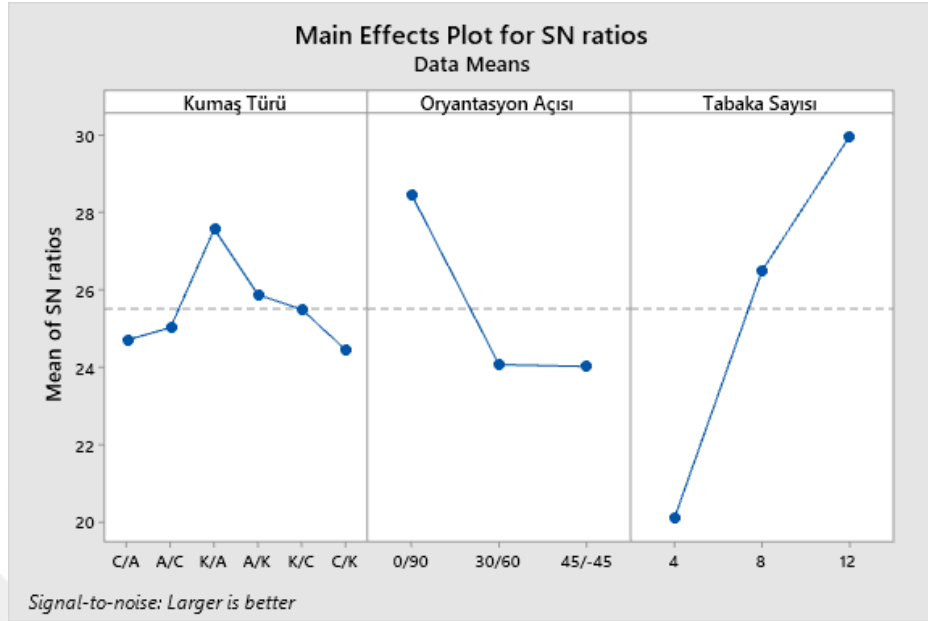
Şekil 4.3. Tekil üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Bu üretim grubunda K, A, C kumaş türleri, doğal frekans ve sönüm oranı açısından Çizelge 4.38-4.39 ve Şekil 4.2-4.3'te analiz edilmiştir. İlgili tablo ve grafiklere göre hem doğal frekansta hem de sönüm oranında en etkili faktörler sırasıyla tabaka sayısı, yönlenme açısı ve kumaş türüdür. Ancak doğal frekans ve sönüm oranı için farklı seviyelerin etkili olduğu görülmektedir. Tekil üretimlerde doğal frekans için en etkili seviyeler karbon, 0°/90° ve 12 tabaka kombinasyonu ile elde edilirken sönüm oranında ise cam, 45°/-45° ve 4 tabaka kombinasyonu ile edilmektedir.

- İnterply üretim grubu

Çizelge 4.40. İnterply üretim grubunda, ankastre-serbest sınır şartı için 1. doğal frekans değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu

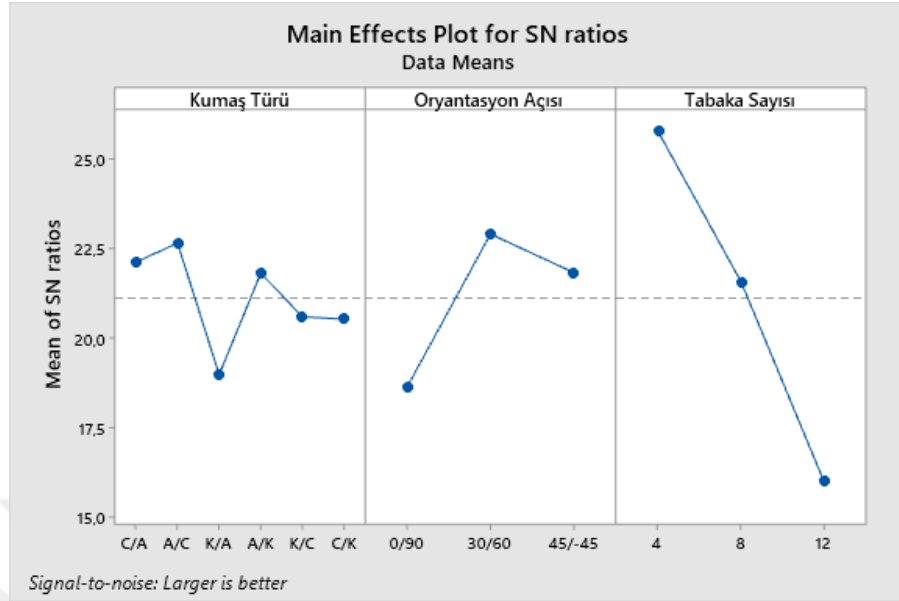
Seviye	Kumaş Türü	Oryantasyon Açısı	Tabaka Sayısı
1	24.70	28.47	20.09
2	25.02	24.06	26.49
3	27.57	24.02	29.97
4	25.87		
5	25.49		
6	24.44		
Fark	3.13	4.45	9.89
Önem Sıralaması	3	2	1



Şekil 4.4. İnterply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. doğal frekans değerlerinin kumaş türü, yönelme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Çizelge 4.41. İnterply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönelme açısı ve tabaka sayısı açısından Sinyal gürültü oranı cevap tablosu

Seviye	Kumaş Türü	Oryantasyon Açısı	Tabaka Sayısı
1	22.12	18.61	25.79
2	22.65	22.90	21.57
3	18.97	21.82	15.97
4	21.81		
5	20.59		
6	20.52		
Fark	3.68	4.30	9.81
Önem Sıralaması	3	2	1



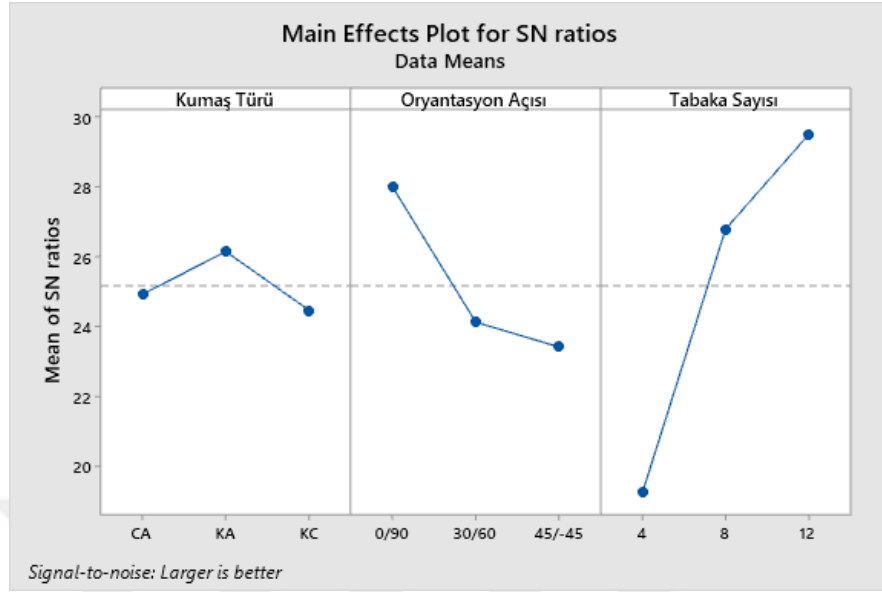
Şekil 4.5. İnterply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Bu üretim grubunda C/A, A/C, K/A, A/K, K/C, C/K kumaş türleri, doğal frekans ve sönüm oranı açısından Çizelge 4.40-4.41 ve Şekil 4.4-4.5'te analiz edilmiştir. Buna göre hem doğal frekansta hem de sönüm oranında en etkili faktörler tekil üretim grubunda olduğu gibi sırasıyla tabaka sayısı, yönlenme açısı ve kumaş türüdür. Yine tekil üretim grubu ile aynı şekilde doğal frekans ve sönüm oranı için etkili seviyelerin farklı olduğu görülmektedir. En etkili seviyeler; doğal frekansta K/A, 0°/90° ve 12 tabaka iken sönüm oranında ise A/C 30°/60° ve 4 tabakadır.

- İnterply üretim grubu

Çizelge 4.42. İnterply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. doğal frekans değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu

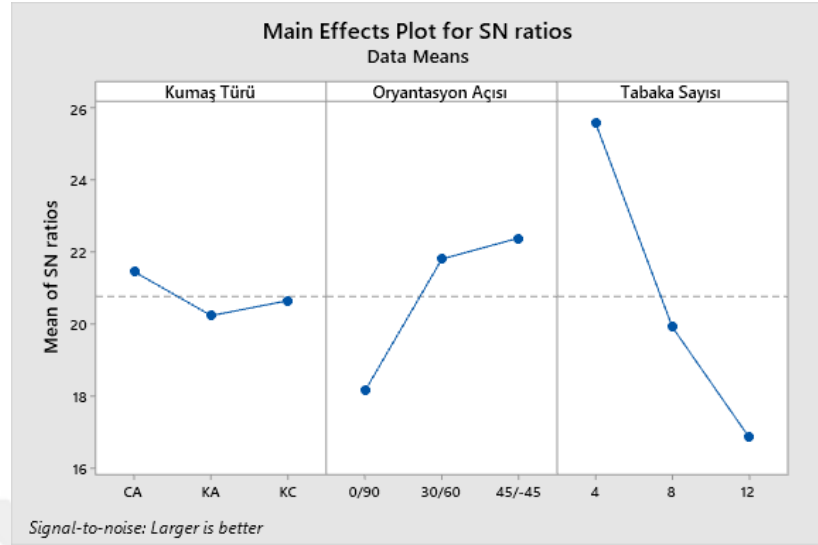
Seviye	Kumaş Türü	Oryantasyon Açısı	Tabaka Sayısı
1	24.92	27.99	19.24
2	26.14	24.12	26.78
3	24.46	23.41	29.49
Fark	1.68	4.58	10.26
Önem Sıralaması	3	2	1



Şekil 4.6. İntraply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. doğal frekans değerlerinin kumaş türü, yönelme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Çizelge 4.43. İntraply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönelme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu

Seviye	Kumaş Türü	Oryantasyon Açısı	Tabaka Sayısı
1	21.44	18.14	25.56
2	20.23	21.79	19.90
3	20.64	22.38	16.84
Fark	1.22	4.24	8.72
Önem Sıralaması	3	2	1



Şekil 4.7. İntraply üretim grubunda, ankastre- serbest sınır şartı için 1. sönüm oranı değerlerinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Intraply üretim grubunda CA, KA ve KC kumaş türleri, doğal frekans ve sönüm oranı açısından Çizelge 4.42-4.43 ve Şekil 4.6-4.7’de analiz edilmiştir. Buna göre hem doğal frekansta hem de sönüm oranında en etkili faktörler diğer iki üretim grubunda olduğu gibi sırasıyla tabaka sayısı, yönlenme açısı ve kumaş türüdür. En etkili seviyeler ise doğal frekansta K/A, 0°/90° ve 12 tabaka iken sönüm oranında ise CA, 45°/-45° ve 4 tabakadır.

4.9.2. Çekme testi analizleri

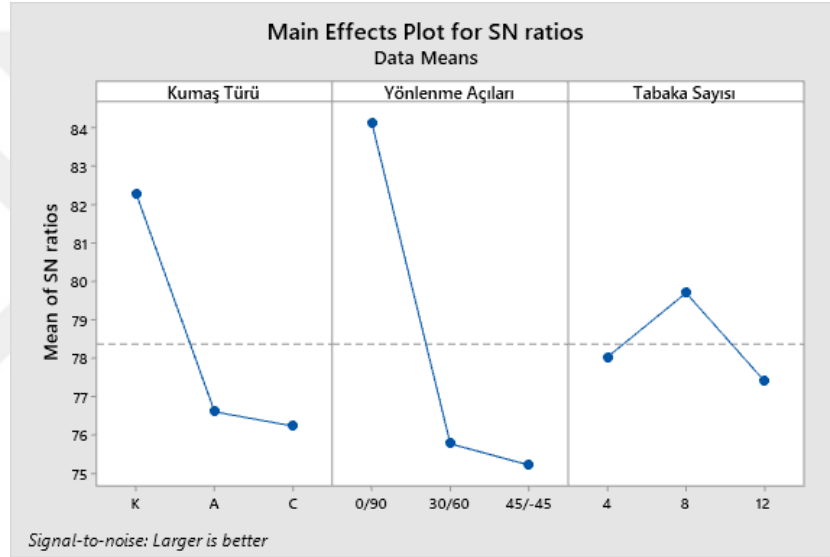
Bu bölümde her bir üretim grubu için X yönündeki numunelerin çekme testi sonuçlarından elde edilen veriler ile hesaplanan elastisite modülü değerleri analiz edilerek “daha büyük daha iyi” amacına yönelik en etkili faktör ve seviyeler belirlenmiştir.

- Tekil üretim grubu

Taguchi analizleri neticesinde tekil üretim grubuna ait elde edilen sonuçlar Çizelge 4.44 ve Şekil 4.11’de verilmiştir. Buna göre elastisite modülü için en etkili faktörler sırasıyla yönlenme açısı, kumaş türü ve tabaka sayısıdır. En etkili seviyeler ise sırasıyla 0°/90°, K ve 8 tabaka olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.44. Tekil Grup X yönünde elastisite modülünün, kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu

Seviye	Kumaş Türü	Yönlenme Açıları	Tabaka Sayısı
1	82.29	84.14	78.02
2	76.60	75.76	79.70
3	76.22	75.21	77.39
Fark	6.07	8.93	2.30
Önem Sıralaması	2	1	3



Şekil 4.8. Tekil Grup X yönünde elastisite modülünün, kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Bundan sonraki kısımlarda tek tek analizler sonucunda elde edilen çizelge ve grafikleri tek tek vermek yerine grafik ve şekillerin yorumlanması sonucu belirlenen en etkili faktör ve seviyeler aşağıdaki gibi doğrudan verilecektir.

- İnterply üretim grubu

Elastisite Modülü için; en etkili faktörler sırasıyla; Yönlenme Açısı, Kumaş Türü ve Tabaka Sayısıdır. En etkili seviyeler ise 0°/90°, K/A ve 8 tabakadır.

- İntraply üretim grubu

Elastisite Modülü için; en etkili faktörler sırasıyla; Yönlenme Açısı, Kumaş Türü ve Tabaka Sayısıdır. En etkili seviyeler ise 0°/90°, KA ve 8 tabakadır.

İnterply ve İntraply üretim grupları elastisite modülü açısından aynı içeriklere ve özelliklere sahip üretimler en yüksek değerleri vermektedir.

4.9.3. Düşük hızlı darbe testleri

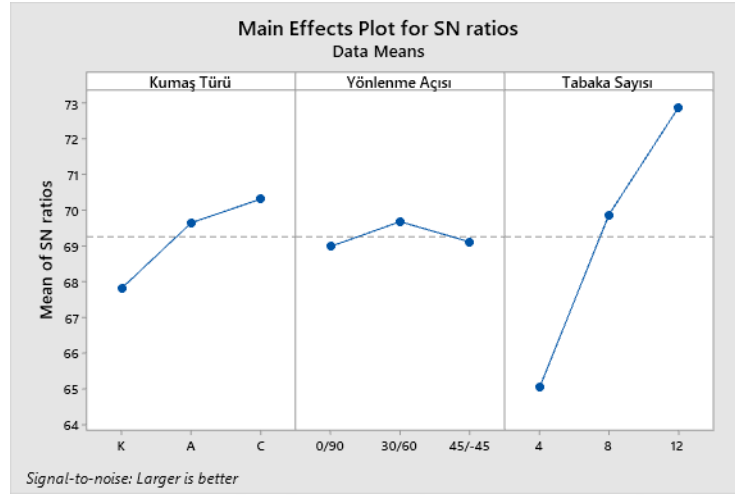
Bu bölümde farklı üretim grupları için deneysel olarak farklı seviyelerde (10j, 20j, 30j, 40j, 50j ve 60j) darbe etkisiyle yapılan düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen sonuçların Taguchi analizleri yapılmıştır. Burada, **Maksimum Temas Kuvveti, Eğilme Rijitliği ve Absorbe Edilen Enerji** miktarlarının **Kumaş Türü, Yönlenme Açısı ve Tabaka Sayısı** açısından “Daha Büyük Daha İyi” amacına göre Sinyal gürültü oranı cevapları değerlendirilmiştir. Böylece tabakalı kompozit üretiminde en etkili faktör ve seviyeler belirlenmiştir.

- Tekil üretim grupları

Maksimum temas kuvveti için en etkili faktörler sırasıyla Tabaka Sayısı, Kumaş Türü ve Yönlenme Açısı olarak belirlenmiştir. Buna göre en etkili seviyeler, C, 30°/60° ve 12 tabakadan oluşan üretimdir (Çizelge 4.45 ve Şekil 4.8).

Çizelge 4.45. Maksimum temas kuvvetinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu

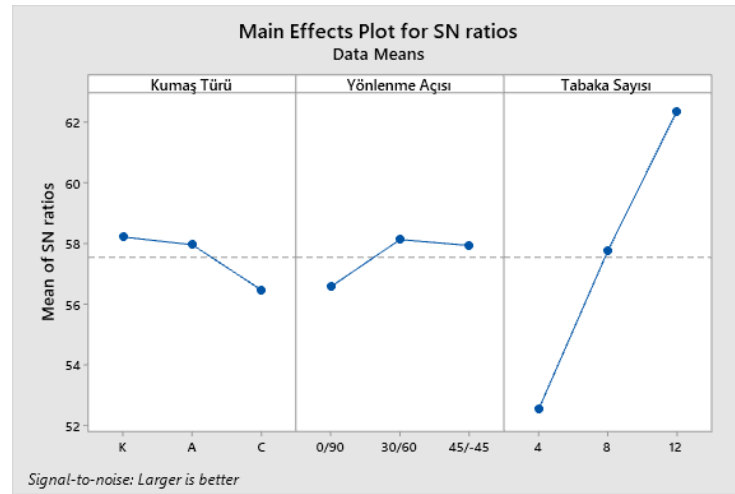
Seviye	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı
1	67.81	68.98	65.01
2	69.65	69.68	69.88
3	70.32	69.11	72.89
Fark	2.50	0.70	7.87
Önem Sıralaması	2	3	1



Şekil 4.9. Maksimum temas kuvvetinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Çizelge 4.46. Eğilme rijitliğinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu

Seviye	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı
1	58.21	56.57	52.51
2	57.96	58.13	57.75
3	56.46	57.93	62.37
Fark	1.76	1.56	9.86
Önem Sıralaması	2	3	1



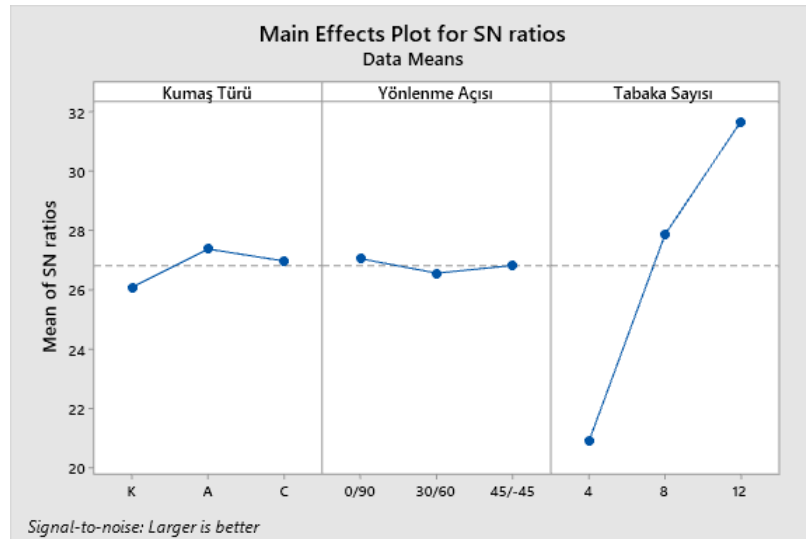
Şekil 4.10. Eğilme rijitliğinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Yukarıda verilen Çizelge 4.46 ve Şekil 4.9’da verilen tablo ve grafiğe göre Eğilme Rijitliği için en etkili faktörler sırasıyla Tabaka Sayısı, Kumaş Türü ve Yönlenme Açısıdır. En etkili seviyeler ise, K, 30°/60° ve 12 tabakadan oluşan üretimdir.

Aynı üretim grubu için farklı enerji seviyelerinde absorbe edilen enerji miktarları ile ilgili tablo ve grafikler benzer özellik gösterdiği için sadece 40j’lük darbe enerjisine karşı absorbe edilen enerjinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından “Daha Büyük Daha İyi” amacına göre Sinyal gürültü oranı cevap tablosu ve grafiği aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.47. 40j’lük darbe enerjisine karşı absorbe edilen enerjinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı cevap tablosu

Seviye	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı
1	26.08	27.05	20.87
2	27.37	26.56	27.86
3	26.97	26.82	31.69
Fark	1.29	0.49	10.82
Önem Sıralaması	2	3	1



Şekil 4.11. 40j’lük darbe enerjisine karşı absorbe edilen enerjinin kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısı açısından sinyal gürültü oranı grafiği

Çizelge 4.32 ve Şekil 4.2'deki grafiğe göre 40j'lük darbe enerjisine karşı Absorbe Edilen Enerjinin en yüksek olması için en etkili faktörler sırasıyla Tabaka Sayısı, Kumaş Türü ve Yönlenme Açısıdır. Bu faktörlerin en etkili seviyelerinin ise Aramid, 0°/90° ve 12 tabakalı üretimdir.

Bundan sonraki kısımlarda analizler sonucunda elde edilen çizelge ve grafikleri tek tek vermek yerine grafik ve şekillerin yorumlanması sonucu belirlenen en etkili faktör ve seviyeler aşağıdaki gibi doğrudan verilecektir.

- **İnterply üretim grubu**

Maksimum temas kuvveti için; en etkili faktörler sırasıyla; Tabaka Sayısı, Kumaş Türü, Yönlenme Açısıdır. En etkili seviyeler ise A/C, 0°/90°, 12 tabakadır.

Eğilme Rijitliği için; en etkili faktörler sırasıyla; Tabaka Sayısı, Kumaş Türü, Yönlenme Açısıdır. En etkili seviyeler ise A/K, 0°/90°, 12 tabakadır.

Absorbe edilen enerji miktarı (40j darbe etkisi için), en etkili faktörler sırasıyla; Tabaka Sayısı, Kumaş Türü, Yönlenme Açısıdır. En etkili seviyeler ise A/C, 0°/90°, 12 tabakadır.

- **İntraply üretim grubu**

Maksimum temas kuvveti için; en etkili faktörler sırasıyla; Tabaka Sayısı, Kumaş Türü, Yönlenme Açısıdır. En etkili seviyeler ise CA, 30°/60°, 12 tabakadır.

Eğilme Rijitliği için; en etkili faktörler sırasıyla; Tabaka Sayısı, Yönlenme Açısı, Kumaş Türüdür. En etkili seviyeler ise KA, 30°/60°, 12 tabakadır.

Absorbe edilen enerji miktarı (40j darbe etkisi için), en etkili faktörler sırasıyla; Tabaka Sayısı, Kumaş Türü, Yönlenme Açısıdır. En etkili seviyeler ise CA, 30°/60°, 12 tabakadır.

4.9.4. Üç nokta eğilme testi analizleri

Bu bölümde her bir üretim grubu için X yönünde, üç nokta eğilme testleri sonucunda elde edilen eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerleri analiz edilerek en etkili faktör ve seviyeler belirlenmiştir. Bu kısımda diğer testlerde verildiği grafik ve tablolar verilmeyip, analizler neticesinde “Daha Büyük Daha İyi” amacına göre Sinyal gürültü oranı tablo ve grafiklerinden çıkarılan en etkili faktör ve seviyeler verilmiştir.

- Tekil üretim grubu

Eğilme dayanımı; en etkili faktörler sırasıyla; yönlenme açısı, kumaş türü ve tabaka sayısıdır. En etkili seviyeler ise K, 0°/90°, 4 tabakadır.

Eğilme Modülü, en etkili faktörler sırasıyla; yönlenme açısı, kumaş türü ve tabaka sayısıdır. En etkili seviyeler ise K, 0°/90°, 8 tabakadır.

- İnterply üretim grubu

Eğilme dayanımı; en etkili faktörler sırasıyla; yönlenme açısı, kumaş türü ve tabaka sayısıdır. En etkili seviyeler ise K/C, 0°/90°, 4 tabakadır.

Eğilme Modülü, en etkili faktörler sırasıyla; yönlenme açısı, kumaş türü ve tabaka sayısıdır. En etkili seviyeler ise K/C, 0°/90°, 8 tabakadır.

- **İntraply üretim grubu**

Eğilme dayanımı; en etkili faktörler sırasıyla; yönlenme açısı, kumaş türü ve tabaka sayısıdır. En etkili seviyeler ise KC, 0°/90° ve 12 tabakadır.

Eğilme Modülü, en etkili faktörler sırasıyla; yönlenme açısı, kumaş türü ve tabaka sayısıdır. En etkili seviyeler ise KC, 0°/90° ve 12 tabakadır.

4.10. Tekil Üretim Gruplarında Kumaş Türü ve Tabaka Sayısının Etkisi

Tekil üretim grubunun 0°/90° yönlenme açısına sahip üretimlerden, kumaş türü ve tabaka sayısının değişiminde karşılaştırılacak numuneler Çizelge 4.48’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.48. Tekil üretim grubundan 0°/90° yönlenme açısına sahip numuneler

Numune Adı	Kumaş Türü	Tabaka Sayısı	Yönlenme Açısı
SC1	Karbon		
SG10	Cam	4	
SA11	Aramid		0°/90°
SA4	Aramid	8	
SG7	Cam	12	

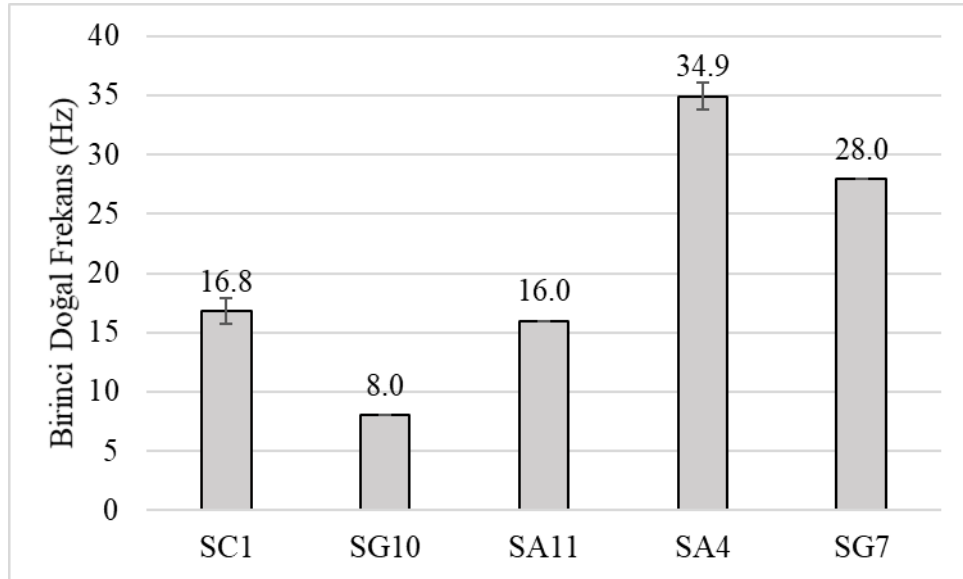
4.10.1. Titreşim testleri

Çizelge 4.49’da Tekil üretim grubunun 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin titreşim testi sonuçları verilmiştir.

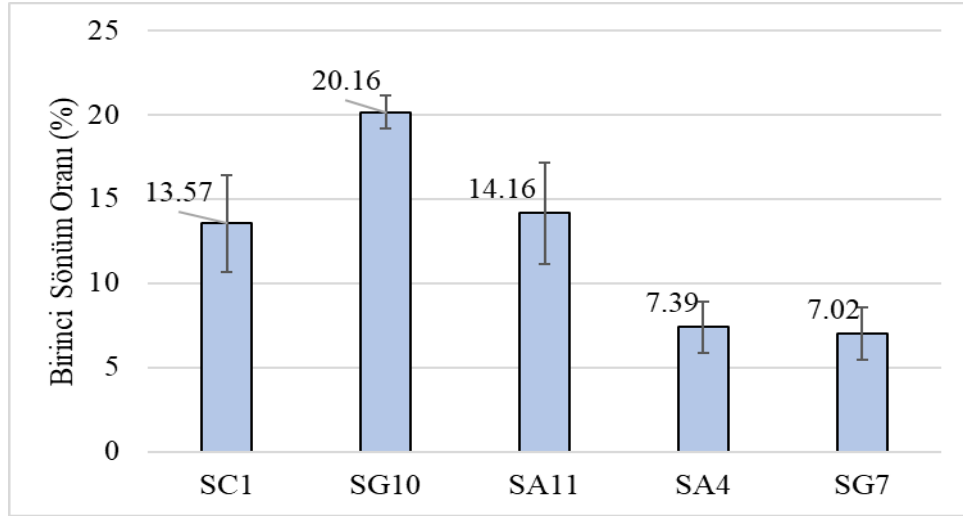
Çizelge 4.49. Tekil ürün grubu $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip numunelerin titreşim testi sonuçları

Numune Adı	Doğal Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
	1	2	3	1	2	3
SC1	16.8	105.1	294.1	13.572	2.345	1.168
SG10	8.0	51.6	144.1	20.163	4.574	1.843
SA11	16.0	107.1	300.0	14.162	2.413	1.860
SA4	34.9	214.8	602.5	7.389	1.629	1.371
SG7	28.0	169.5	475.6	7.025	1.501	0.953

Şekil 4.12’den de görüldüğü üzere 4 tabakalı numunelerde en yüksek frekans değerlerine sahip ürün karbon elyaf içerikli kompozitin olduğu, aramid kompozitinde karbona yakın bir frekans değerine sahip olduğu görülmüştür. Şekil 4.13’te 4 tabakalı numunelerde en yüksek sönüm değerlerine sahip ürünlerin cam elyaf içerikli kompozitler olduğu, bunu sırasıyla aramid ve karbon elyafli kompozitlerin takip ettiği görülmektedir. Ayrıca tabaka sayısının artması ile sönüm oranı değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. Tekil Grup, $0^\circ/90^\circ$ açılı, X yönündeki numunelerin doğal frekans değişimleri



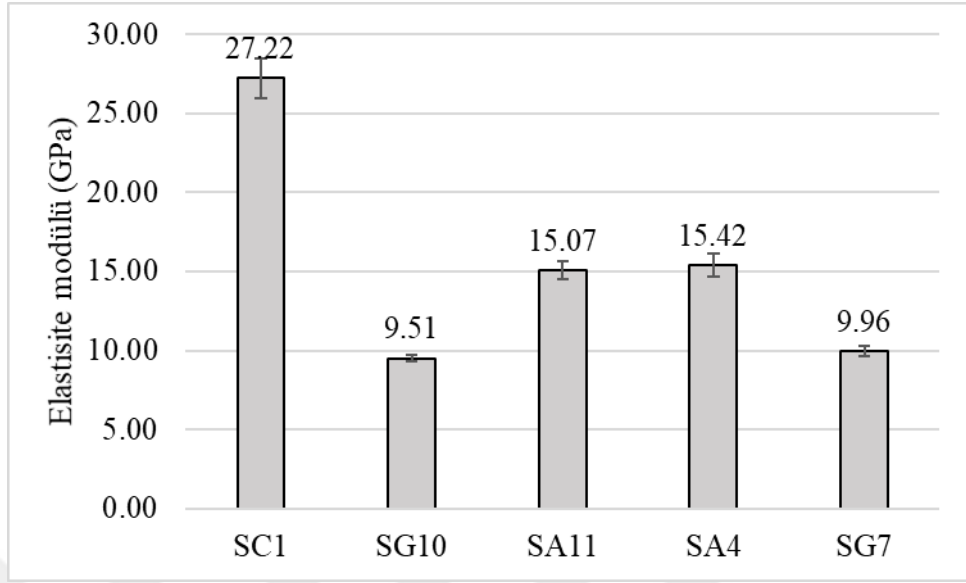
Şekil 4.13. Tekil Grup, 0°/90° açılı, X yönündeki numunelerin sönüm oranı değişimleri

4.10.2. Çekme testleri

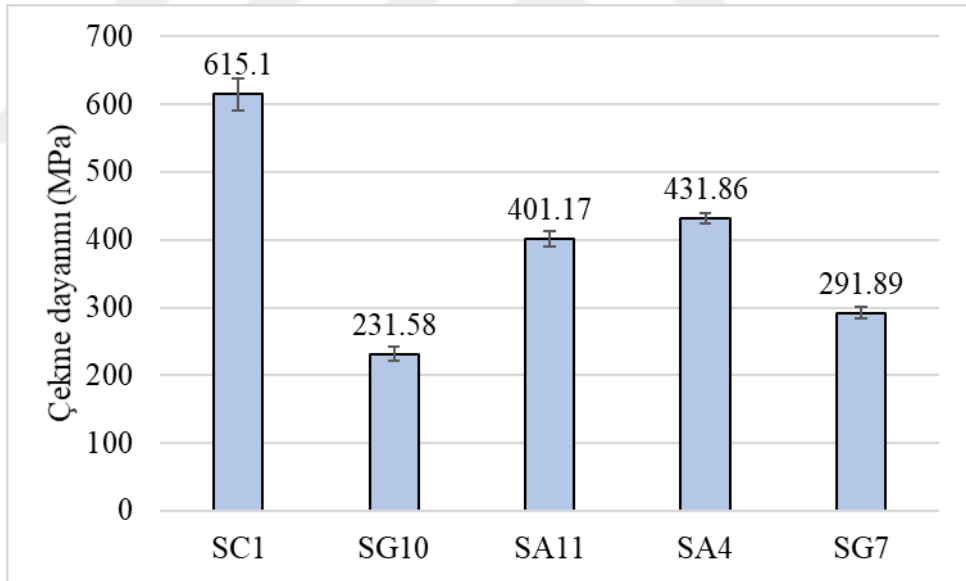
Çizelge 4.50’de 0°/90° yönlenme açısına sahip tekil üretim numunelerin çekme testi sonuçları %95 güven aralığı değerleri ile beraber verilmiştir. Şekil 4.14’te Tekil Üretim Grubu, X yönündeki elastisite modülünün, elyaf kumaş türü ve tabaka sayısı açısından değişimi gösterilmiştir. Burada; 0°/90° yönlenme açılı, 4 tabakalı, karbon, aramid, camın yanı sıra 8 tabakalı aramid ve 12 tabakalı cam elyaf takviyeli kompozitlerin elastisite modülleri verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü üzere tabaka sayısının artması ile elastisite modülü değerlerinde çok az bir değişiklik olmuştur. Şekil 4.15’te ise aynı numunelere ait çekme dayanımı değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.50. Tekil ürün grubu 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Çekme Dayanımı (MPa)	%95 GA	Elastisite Modülü (GPa)	%95 GA
SC1	K	0/90	4	615.1	23.481	27.2207	1.2328
SG10	C	0/90	4	231.58	10.588	9.5107	0.2393
SA11	A	0/90	4	401.17	11.723	15.0693	0.5925
SA4	A	0/90	8	431.86	8.031	15.4200	0.7194
SG7	C	0/90	12	291.89	8.41	9.9595	0.3465



Şekil 4.14. Tekil grup, 0°/90° açılı, X yönündeki numunelerin elastisite modülü değerleri



Şekil 4.15. Tekil grup, 0°/90° açılı, X yönündeki numunelerin çekme dayanımları değerleri

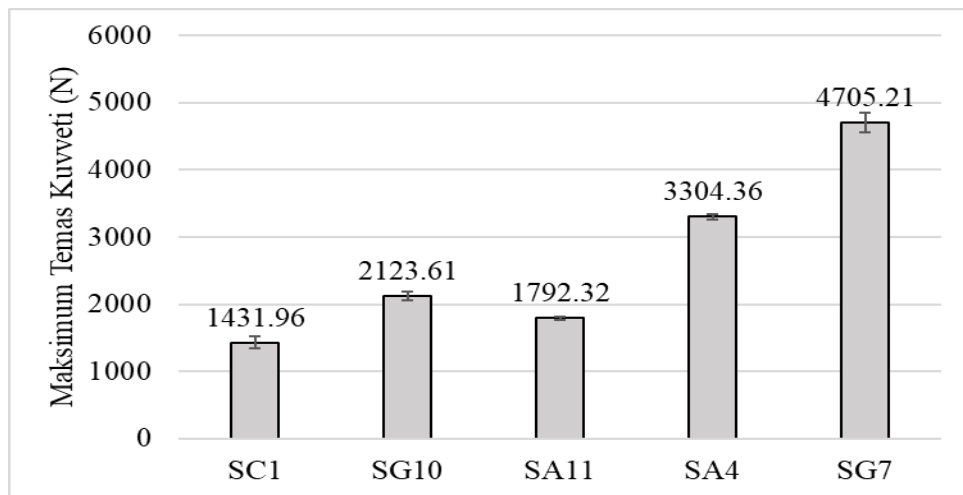
4.10.3. Düşük hızlı darbe testleri

Tekil ürün grubu 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin maksimum temas kuvveti, eğilme rijitliği ve 40j enerjiye maruz kalan numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarı

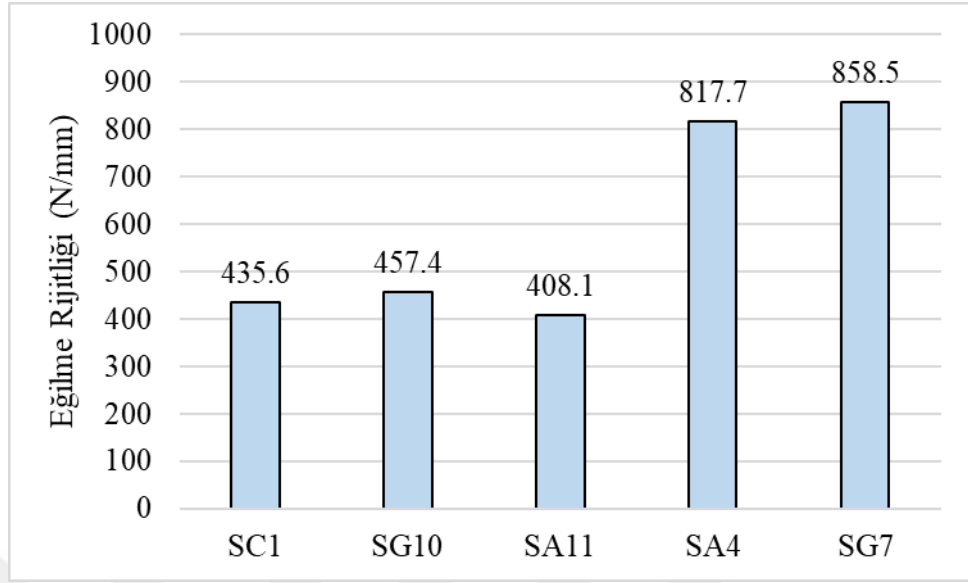
sonuçları Çizelge 4.51’de verilmiştir. Bu numunelere ait maksimum temas kuvveti, eğilme rijitliği ve 40J’lük darbe enerjisine karşı absorbe edilen enerji miktarı grafikleri sırasıyla Şekil 4.16-4.18’de verilmiştir. Temas kuvveti deformasyon grafiklerinde eğrinin yükselen kısmı darbe testi esnasında vurucu ucun test numunesine temas ettiği andaki tepkiyi gösterir. Aynı zamanda grafikte yükselen bölgenin eğimi **eğilme rijitliği** olarak da isimlendirilmektedir. Eğride pikten sonra düşen bölge, vurucu ucun, numuneye çarpıp geri sekmesi, numuneye saplanıp kalması veya numuneyi delip geçmesine göre farklı şekiller alabilmektedir. Temas kuvveti-deformasyon grafiğinin altında kalan alan ise **absorbe edilen enerjiyi** vermektedir (Al-Shamary *et al.* 2016).

Çizelge 4.51. Tekil ürün grubu 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin darbe testi sonuçları

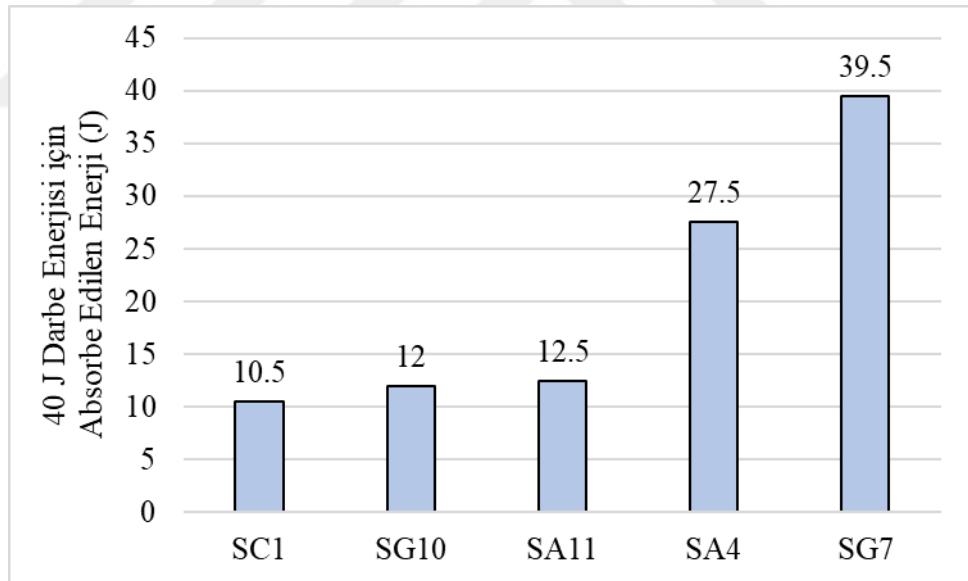
Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Maksimum Temas Kuvveti (N)	Eğilme Rijitliği (N/mm)	40J darbe için absorbe edilen enerji (J)
SC1	K	0/90	4	1431.964	435.6	10.5
SG10	C	0/90	4	2123.615	457.4	12
SA11	A	0/90	4	1792.317	408.1	12.5
SA4	A	0/90	8	3304.359	817.7	27.5
SG7	C	0/90	12	4705.212	858.5	39.5



Şekil 4.16. Tekil ürün grubu, 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin, maksimum temas kuvveti grafiği



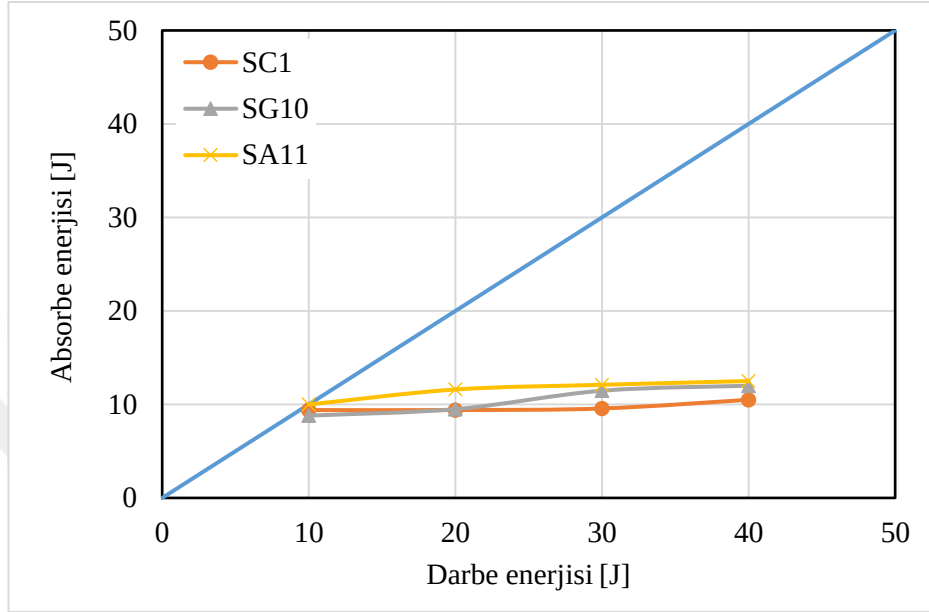
Şekil 4.17. Tekil ürün grubu, 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin, eğilme rijitliği grafiği



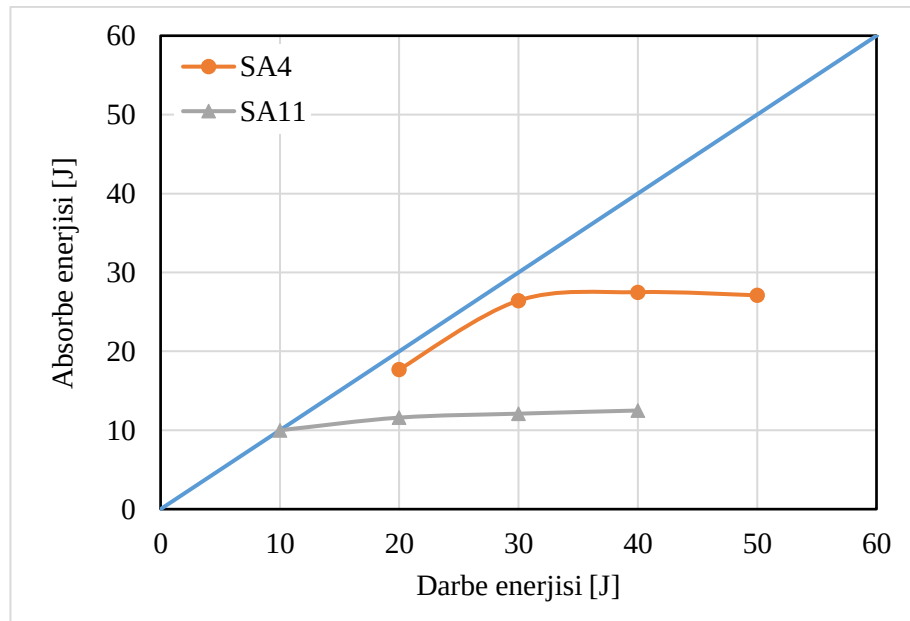
Şekil 4.18. Tekil ürün grubu, 0°/90° yönlenme açısına sahip numunelerin, absorbe edilen enerji grafiği

Dört tabakalı tekil karbon, aramid ve cam kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı seviyeleri Şekil 4.19’da verilmiştir. Şekil 4.20-4.21’de farklı enerji seviyelerinde darbeye maruz kalan aramid ve cam elyafı kompozitlerde tabaka sayısının artması ile absorbe edilen enerji miktarları gösterilmiştir. Bu grafiklerden de görüldüğü üzere, düşük hızlı

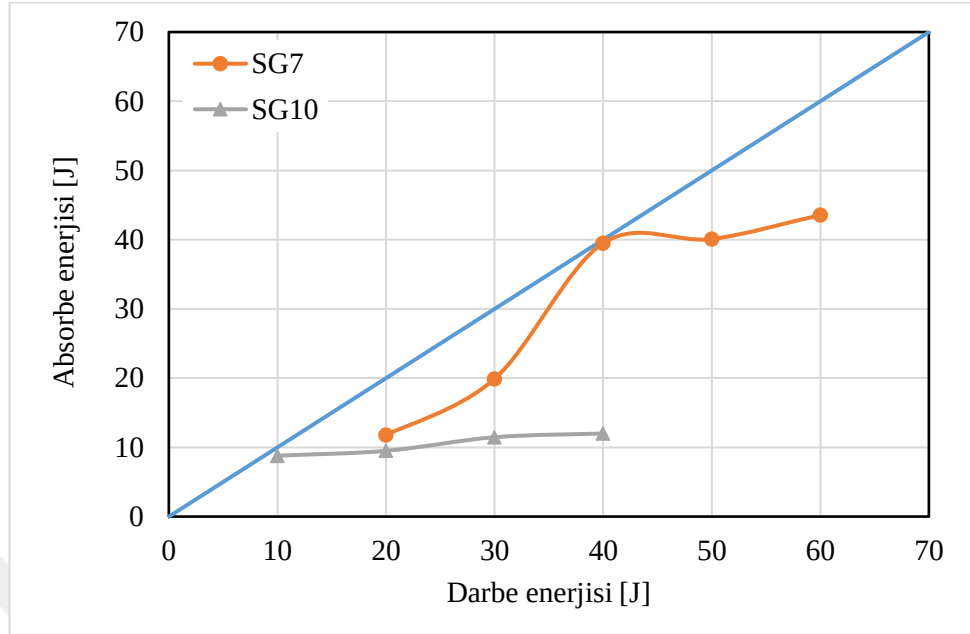
darbe testleri için en önemli parametre kalınlık olmakla birlikte absorbe edilen enerji seviyesi tabaka sayısının artması ile doğru orantılı bir şekilde artmaktadır.



Şekil 4.19. 0°/90° yönlenme açısına sahip 4 tabakalı tekil karbon, aramid ve cam kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı

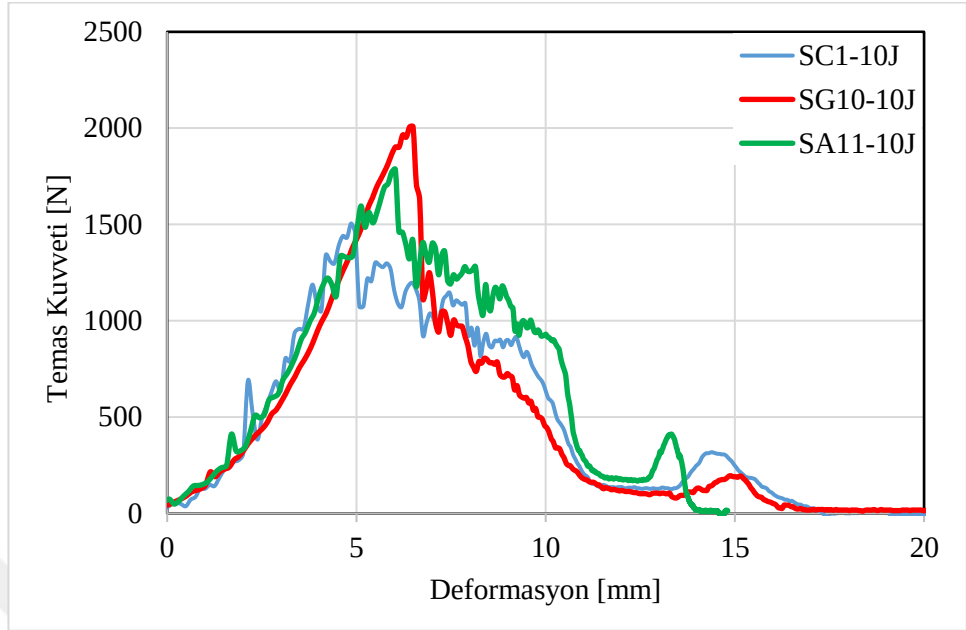


Şekil 4.20. 0°/90° yönlenme açısına sahip 4 ve 8 tabakalı tekil aramid kompozitlerin absorbe ettikleri enerjiler açısından kıyaslanması

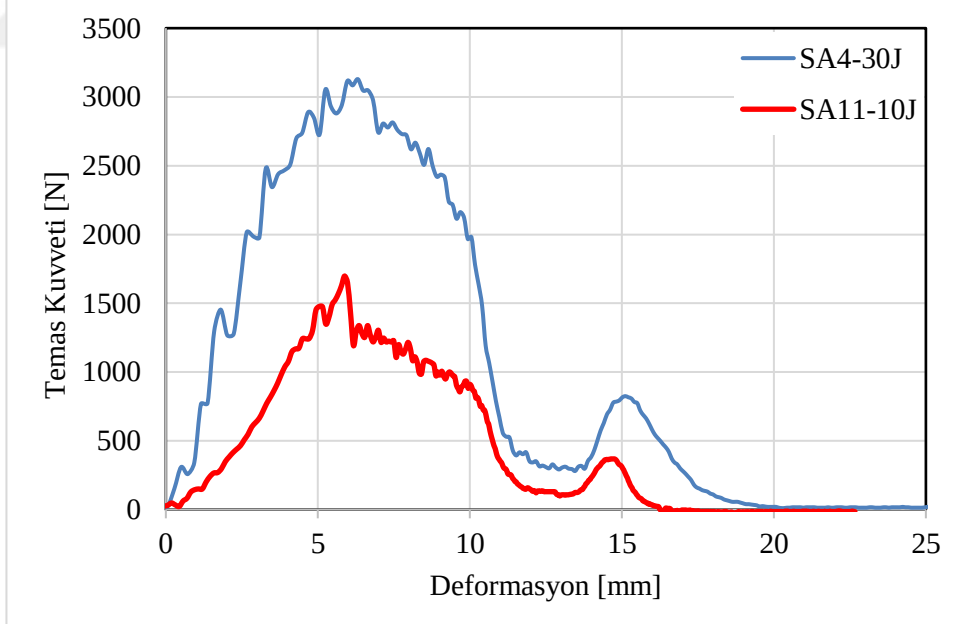


Şekil 4.21. $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip 4 ve 12 tabakalı tekil cam kompozitlerin absorbe ettikleri enerjiler açısından kıyaslanması

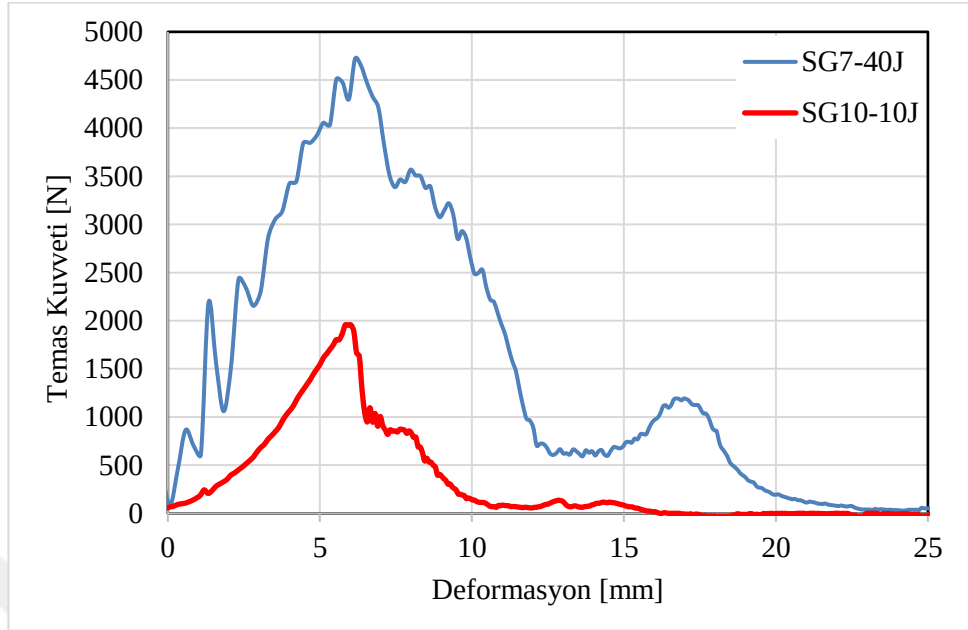
Şekil 4.22’de gösterilen 10j’lük darbe enerjisine maruz bırakılan $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip 4 tabakalı karbon, aramid, cam elyafı tekil kompozitlerin Temas Kuvveti-Deformasyon grafiklerine bakılacak olursa en yüksek temas kuvvetine sahip tekil kompozitin cam elyafı kompozit olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.23’de 4 ve 8 tabakalı aramid elyafı kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde temas kuvvetindeki değişim grafikleri verilmiştir. Aynı yaklaşım ile 4 ve 12 tabakalı cam elyafı kompozitlerde farklı darbe enerjisi seviyelerinin temas kuvveti üzerindeki etkisi gösterilmiştir (Şekil 4.24).



Şekil 4.22. $0^{\circ}/90^{\circ}$ yönlenme açısına sahip 4 tabakalı karbon, aramid, cam elyafı tekil kompozitler için 10j'lük darbe karşısında Temas Kuvveti-Deformasyon grafikleri



Şekil 4.23. $0^{\circ}/90^{\circ}$ yönlenme açısına sahip 4 ve 8 tabakalı aramid elyafı tekil kompozitler için 10j ve 30j'lük darbe karşısında Temas Kuvveti-Deformasyon grafikleri



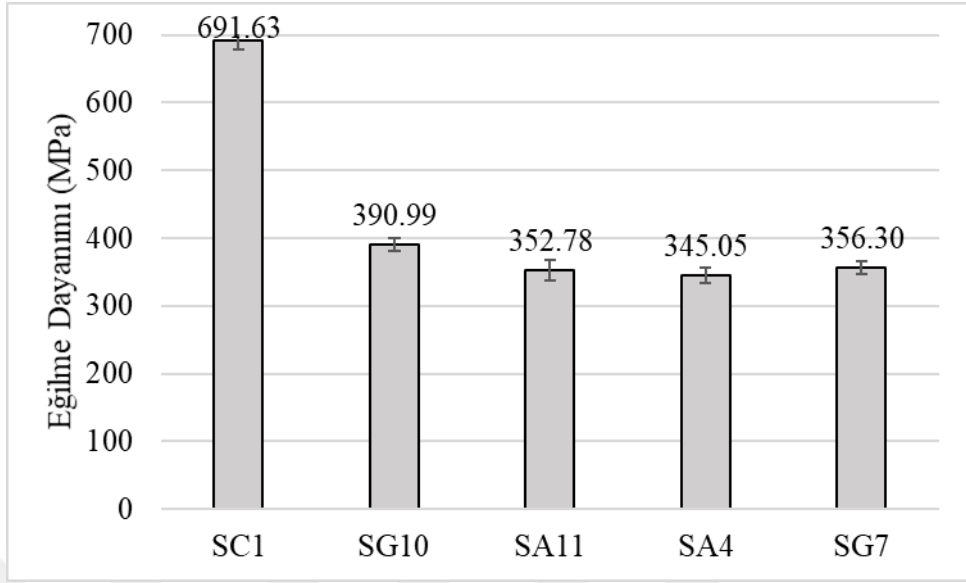
Şekil 4.24. $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip 4 ve 12 tabakalı cam elyafı tekil kompozitler için 10j ve 40j'lük darbe karşısında Temas Kuvveti-Deformasyon grafikleri

4.10.4. Üç nokta eğilme testleri

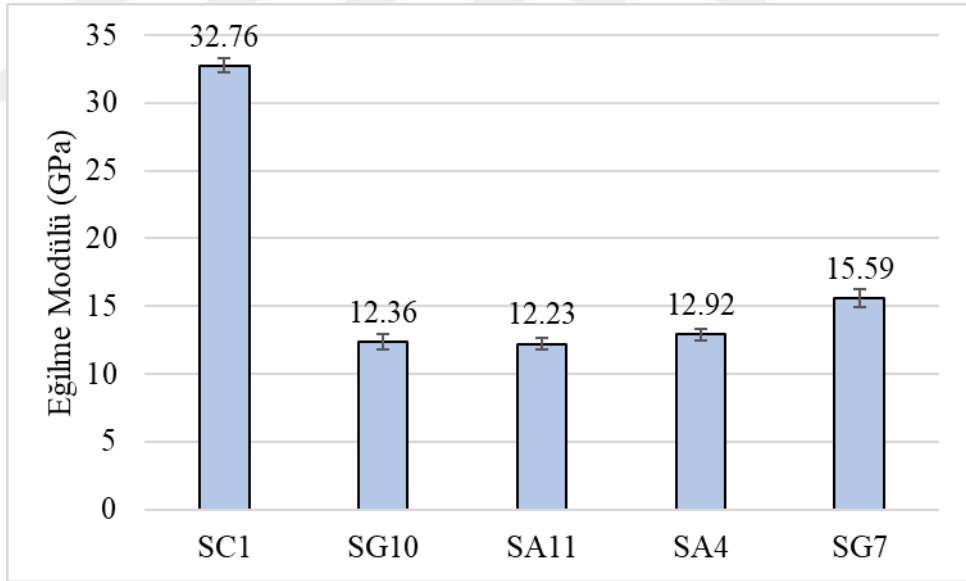
Çizelge 4.52'de tekil üretim grubundan $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip numunelerin üç nokta eğilme testi sonuçları verilmiştir. Buna göre eğilme modülü ve eğilme dayanımı açısından büyükten küçüğe K, C, A sıralaması mevcuttur. Ayrıca Şekil 4.25-4.26'da aynı numunelere ait eğilme dayanımı ve eğilme modülü diyagramları verilmiştir.

Çizelge 4.52. Tekil üretim grubundan $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip numunelerin üç nokta eğilme testi sonuçları

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Eğilme Dayanımı (MPa)	%95 GA	Eğilme Modülü (GPa)	%95 GA
SC1	K	$0/90$	4	691.633	13.087	32.764	0.503
SG10	C	$0/90$	4	390.987	10.024	12.357	0.585
SA11	A	$0/90$	4	352.779	15.702	12.231	0.468
SA4	A	$0/90$	8	345.046	11.336	12.917	0.451
SG7	C	$0/90$	12	356.297	9.001	15.592	0.693



Şekil 4.25. Tekil ürün grubu $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip numunelerin, eğilme dayanımı grafiği



Şekil 4.26. Tekil ürün grubu $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip numunelerin, eğilme modülü grafiği

4.11. İnterply-İnterply Hibrit Kompozitlerin Mekanik ve Dinamik Özellikleri

Bu bölümde elyaf içerikleri, yönlenme açıları ve tabaka sayıları aynı olan interply ve intraply hibrit kompozitlerin, farklı yükleme durumları için (titreşim, çekme, darbe ve

eğilme) elde edilen mekanik ve dinamik özellikleri verilecektir. Çizelge 4.53'te karşılaştırma açısından önemli arz eden elyaf içerikleri, yönlenme açıları ve tabaka sayıları aynı olan üretim grupları aynı satırda verilmiştir.

Çizelge 4.53. İnterply ve intraply üretimlerden kumaş türü, oryantasyon açısı ve tabaka sayısı açısından karşılaştırılan eşdeğer içeriğe sahip numuneler

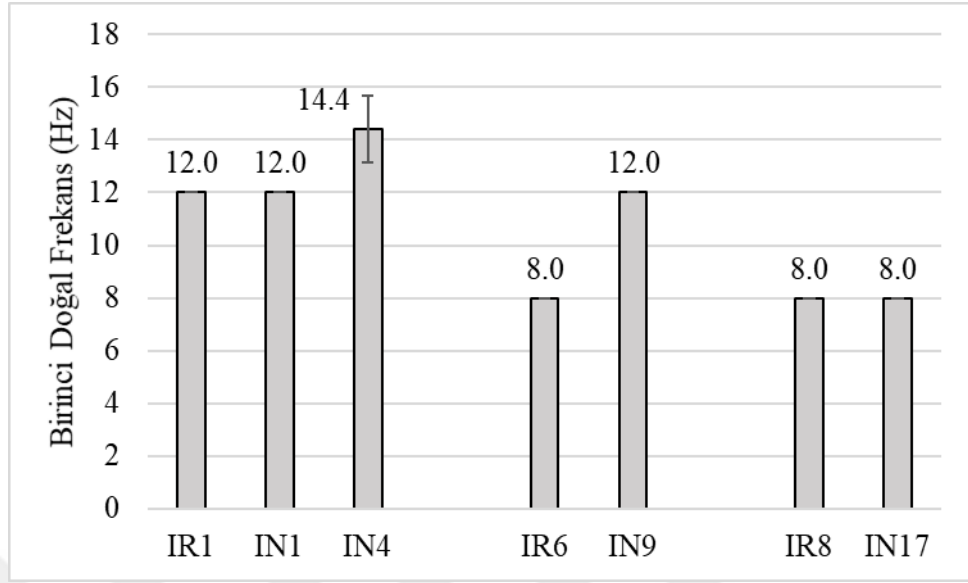
Elyaf Kumaş İçerikleri	Yön. Açısı	Tabaka Sayısı	Numune Adı	Numune Adı	Numune Adı
C-A	0/90	4	IR1	IN1	IN4
C-A	30/60	8	IR2	IN2	IN5
C-A	45/-45	12	IR3	IN3	IN6
K-A	0/90	8	IR4	IN7	
K-A	30/60	12	IR5	IN8	
K-A	45/-45	4	IR6	IN9	
K-C	0/90	12	IR7	IN16	
K-C	30/60	4	IR8	IN17	
K-C	45/-45	8	IR9	IN18	

4.11.1. Titreşim testi sonuçları

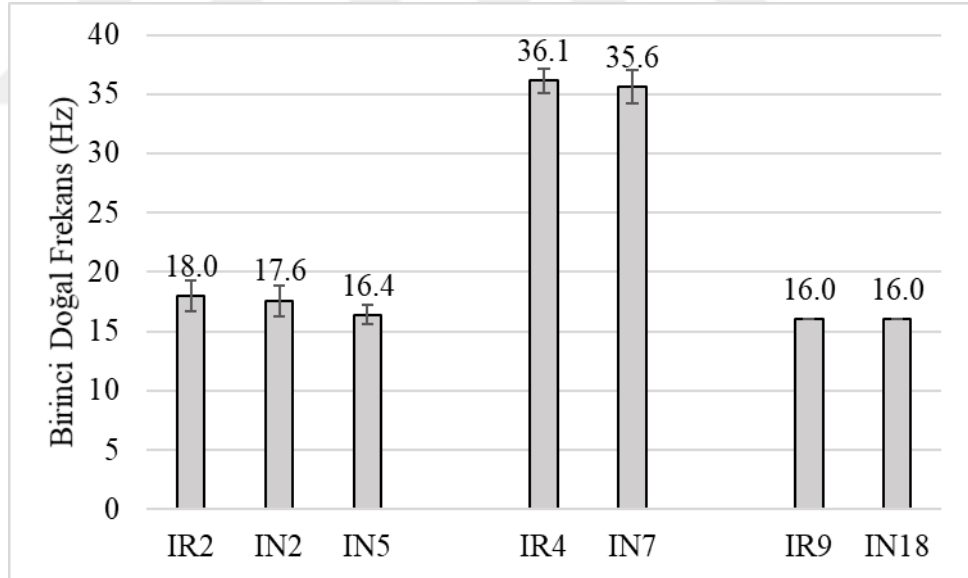
Aynı tabaka sayısı, yönlenme açısı ve elyaf içeriklerine sahip interply ve intraply hibrit kompozitlerin ilk üç doğal frekans ve sönüm oranı değerleri Çizelge 4.54'te sunulmuştur. Bu sayede Çizelge 4.53'te aynı satırda verilen interply ve intraply hibrit kompozit numunelerin karşılaştırması mümkün olmuştur. Şekil 4.27-4.29'da aynı içeriğe sahip 4, 8 ve 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin birinci doğal frekans değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.54. Eşdeğer özelliklere sahip interply ve intraply hibrit kompozitlerin doğal frekans ve sönüm oranı değerleri

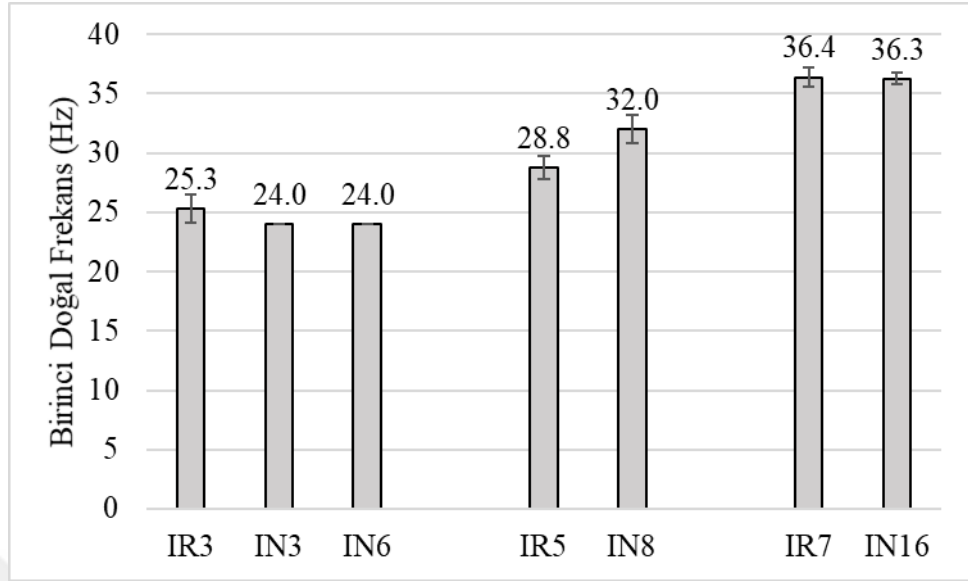
Numune	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Doğal Frekans (Hz)			Sönüm Oranı (%)		
				1	2	3	1	2	3
IR1	CA	0/90	4	12.0	75.0	213.6	13.427	3.392	1.319
IN1	C/A	0/90	4	12.0	74.7	207.5	12.507	3.302	1.585
IN4	A/C	0/90	4	14.4	88.0	245.5	21.607	2.508	1.790
IR2	CA	30/60	8	18.0	113.2	323.2	14.894	2.532	1.468
IN2	C/A	30/60	8	17.6	112.4	319.2	17.803	2.505	1.577
IN5	A/C	30/60	8	16.4	110.4	315.5	17.223	2.486	1.819
IR3	CA	45/-45	12	25.3	160.8	454.7	8.225	1.739	1.322
IN3	C/A	45/-45	12	24.0	154.0	436.9	9.329	1.784	1.247
IN6	A/C	45/-45	12	24.0	152.7	433.6	6.713	1.926	1.391
IR4	KA	0/90	8	36.1	222.3	619.3	6.244	1.317	0.826
IN7	K/A	0/90	8	35.6	222.4	620.7	6.912	1.269	1.071
IR5	KA	30/60	12	28.8	182.1	522.5	6.512	1.677	1.190
IN8	K/A	30/60	12	32.0	201.1	570.7	6.080	1.341	1.049
IR6	KA	45/-45	4	8.0	57.2	165.1	26.580	3.741	1.810
IN9	K/A	45/-45	4	12.0	68.4	196.7	16.697	3.090	1.674
IR7	KC	0/90	12	36.4	231.2	646.5	6.271	1.151	0.714
IN16	C/K	0/90	12	36.3	228.8	640.4	6.307	1.434	0.975
IR8	KC	30/60	4	8.0	50.4	143.5	19.147	4.268	2.090
IN17	C/K	30/60	4	8.0	51.6	145.5	19.050	4.217	2.253
IR9	KC	45/-45	8	16.0	102.8	292.0	10.392	2.515	1.361
IN18	C/K	45/-45	8	16.0	102.4	289.2	9.976	2.144	1.491



Şekil 4.27. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci doğal frekanslar

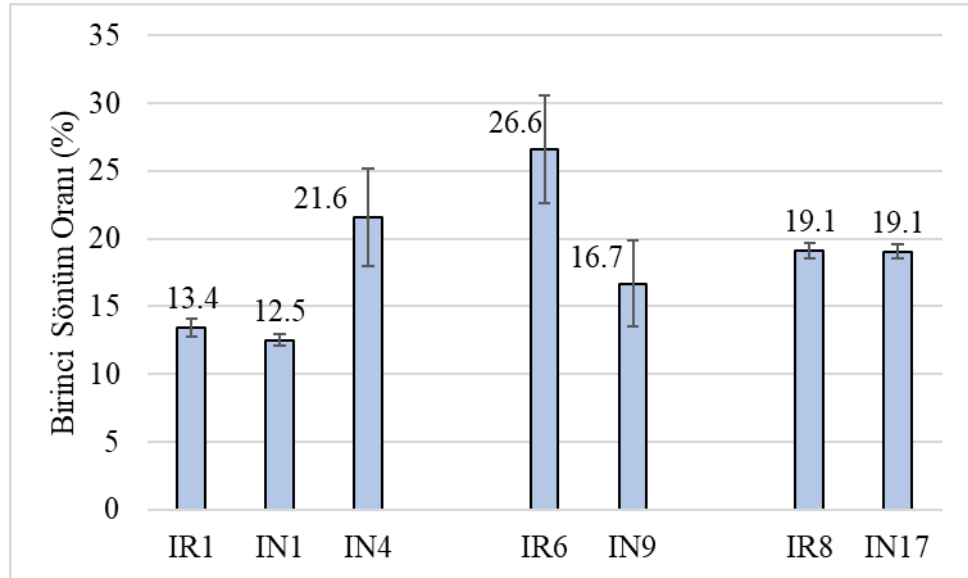


Şekil 4.28. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci doğal frekanslar

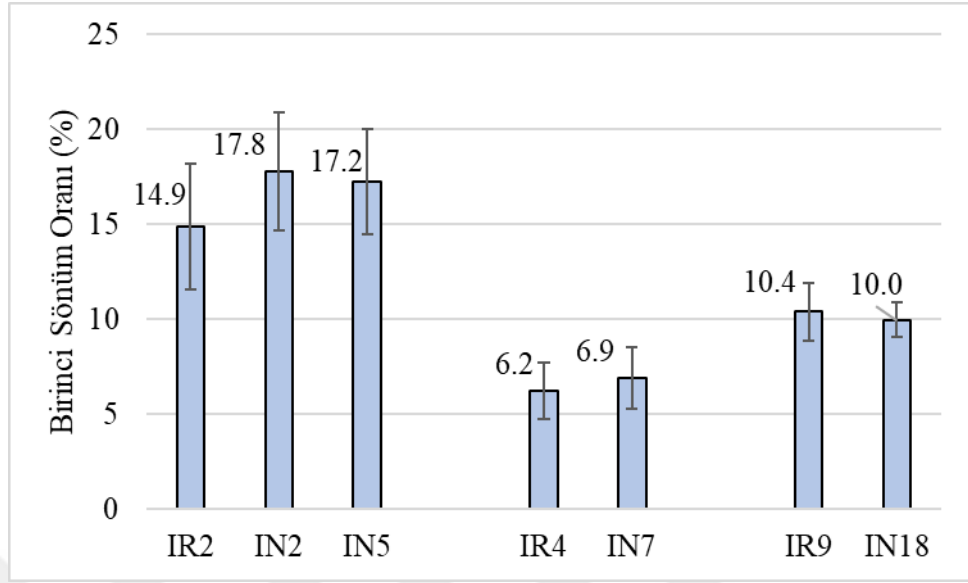


Şekil 4.29. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci doğal frekanslar

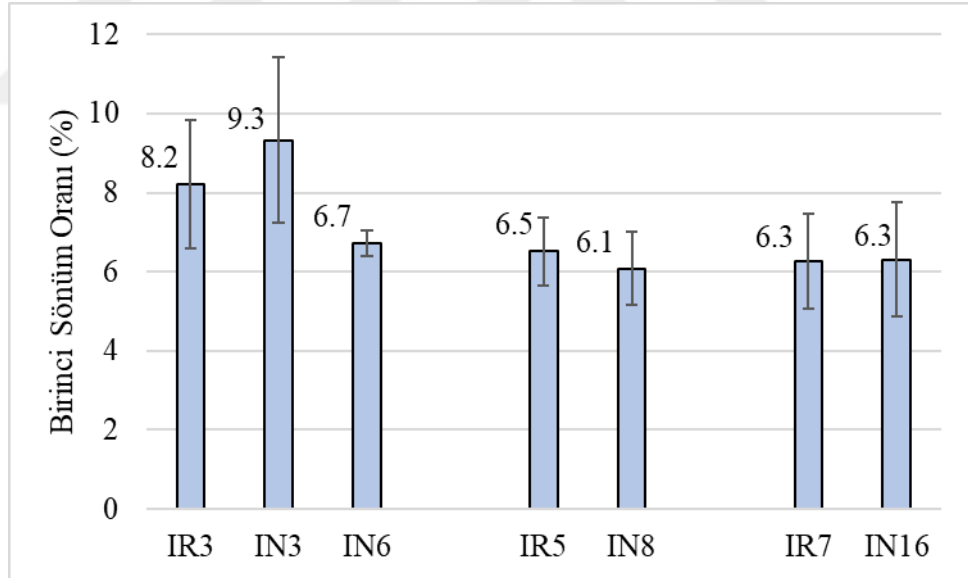
Şekil 4.27-4.29’da aynı içeriğe sahip 4, 8 ve 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin birinci sönüm oranı değerleri verilmiştir.



Şekil 4.30. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci sönüm oranları



Şekil 4.31. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci sönüm oranları



Şekil 4.32. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlere ait birinci sönüm oranları

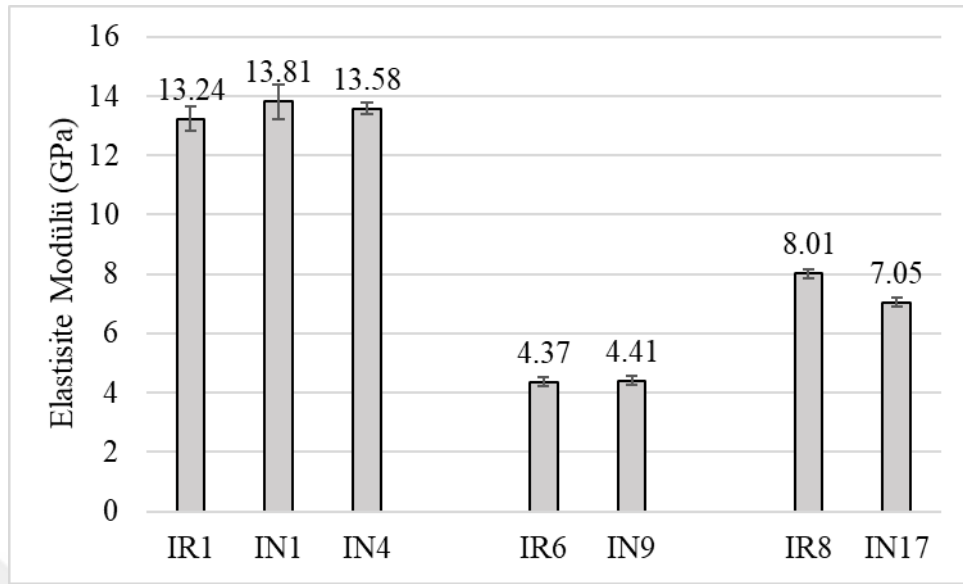
4.11.2. Çekme testi sonuçları

Bu bölümde aynı tabaka sayısı, yönlenme açısı ve elyaf içeriklerine sahip interply ve intraply hibrit kompozitlerin X yönündeki maksimum çekme dayanımı ve elastite

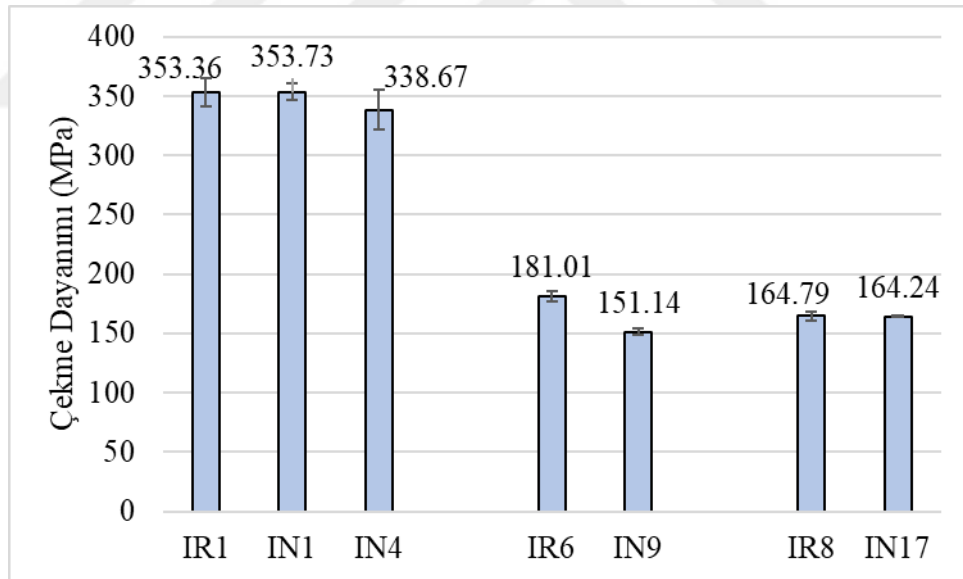
modülü değişimleri %95 güven aralıkları ile beraber Çizelge 4.55’de sunulmuştur. Şekil 4.33-4.38’de aynı içeriğe sahip 4, 8 ve 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin elastisite modülü ve çekme dayanımı değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.55. Eşdeğer özelliklere sahip interply ve intraply hibrit kompozitlerin çekme testi sonuçları (X yönünde)

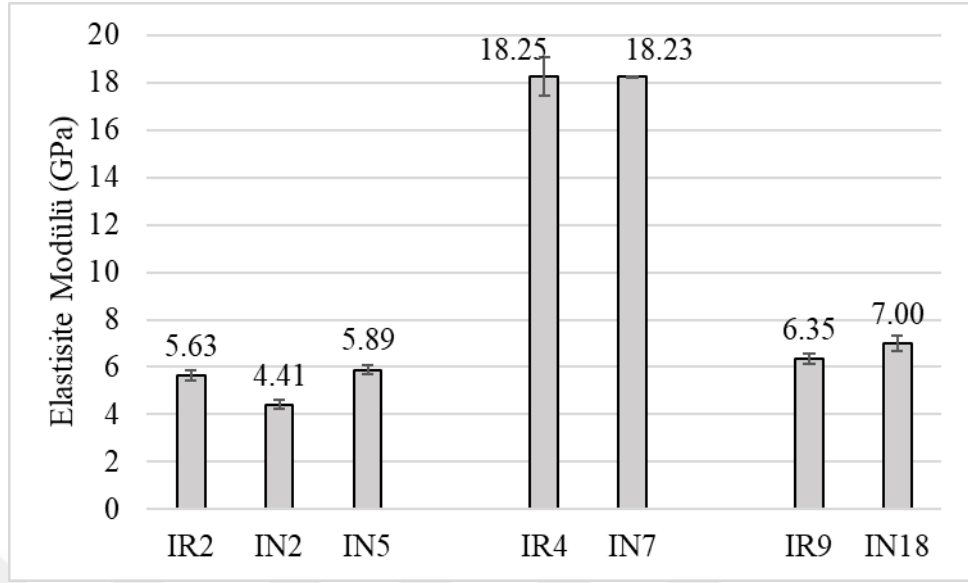
Numune	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Çekme Day.(MPa)	%95 GA	Elastisite Mod.(GPa)	%95 GA
IR1	CA	0/90	4	353.36	12.243	13.2395	0.4164
IN1	C/A	0/90	4	353.73	6.921	13.8127	0.598
IN4	A/C	0/90	4	338.67	16.415	13.583	0.1951
IR2	CA	30/60	8	173.22	7.206	5.6293	0.2134
IN2	C/A	30/60	8	166.37	4.118	4.4115	0.1974
IN5	A/C	30/60	8	168.17	3.997	5.8883	0.203
IR3	CA	45/-45	12	168.025	1.949	4.184	0.1762
IN3	C/A	45/-45	12	188.86	3.95	4.344	0.1756
IN6	A/C	45/-45	12	172.49	2.955	4.7445	0.2126
IR4	KA	0/90	8	547.5	25.491	18.247	0.8034
IN7	K/A	0/90	8	460.59	14.425	18.227	0.0396
IR5	KA	30/60	12	192.41	5.32	6.352	0.1645
IN8	K/A	30/60	12	218.18	7.311	6.5813	0.2419
IR6	KA	45/-45	4	181.01	4.405	4.3652	0.1458
IN9	K/A	45/-45	4	151.14	2.54	4.406	0.1636
IR7	KC	0/90	12	521.015	22.134	18.0767	0.2509
IN16	C/K	0/90	12	444.01	7.372	15.8717	0.668
IR8	KC	30/60	4	164.79	3.79	8.0105	0.1698
IN17	C/K	30/60	4	164.24	0.751	7.0477	0.1605
IR9	KC	45/-45	8	180.68	8.522	6.3478	0.1964
IN18	C/K	45/-45	8	149.1	4.154	6.9968	0.33



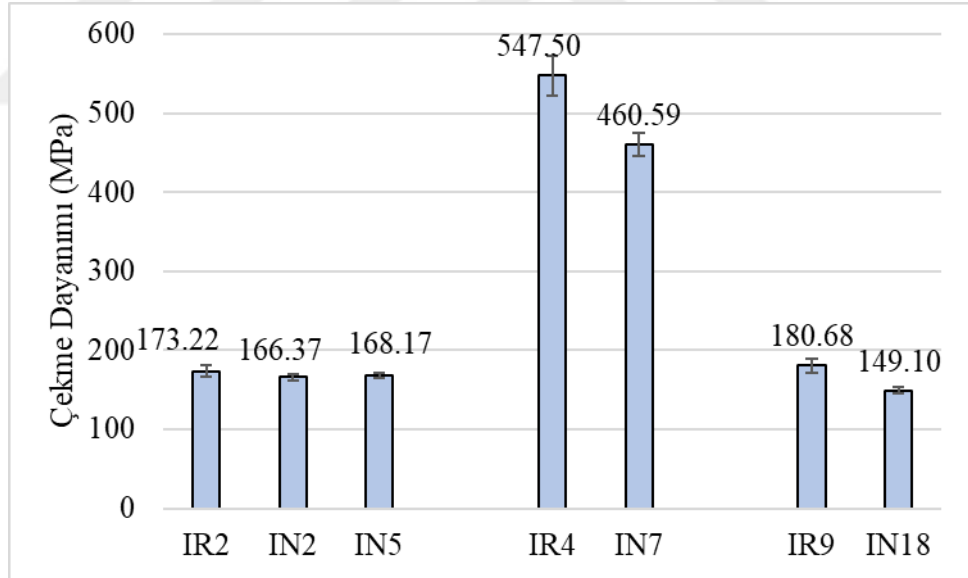
Şekil 4.33. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin elastisite modülü değerleri



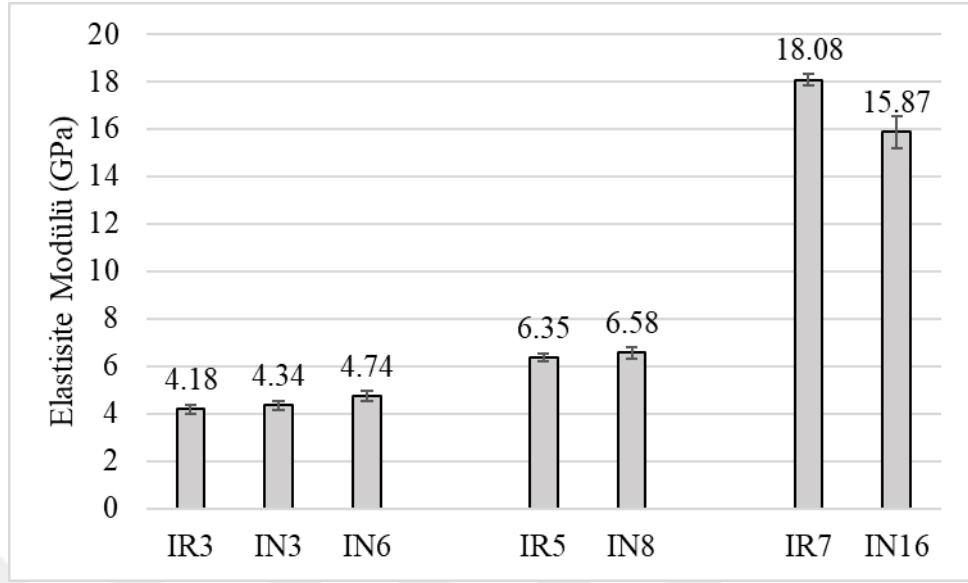
Şekil 4.34. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri



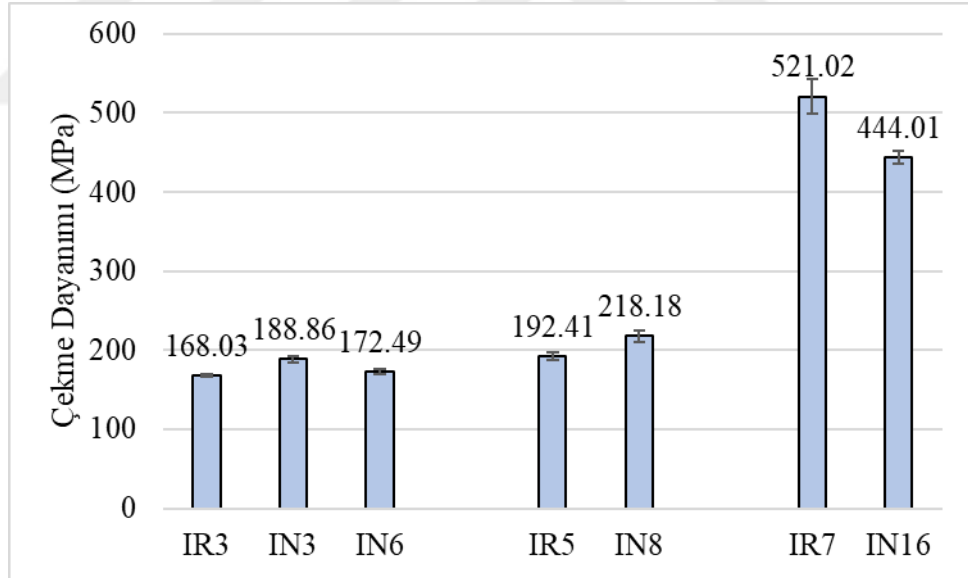
Şekil 4.35. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin elastisite modülü değerleri



Şekil 4.36. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri



Şekil 4.37. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin elastisite modülü değerleri



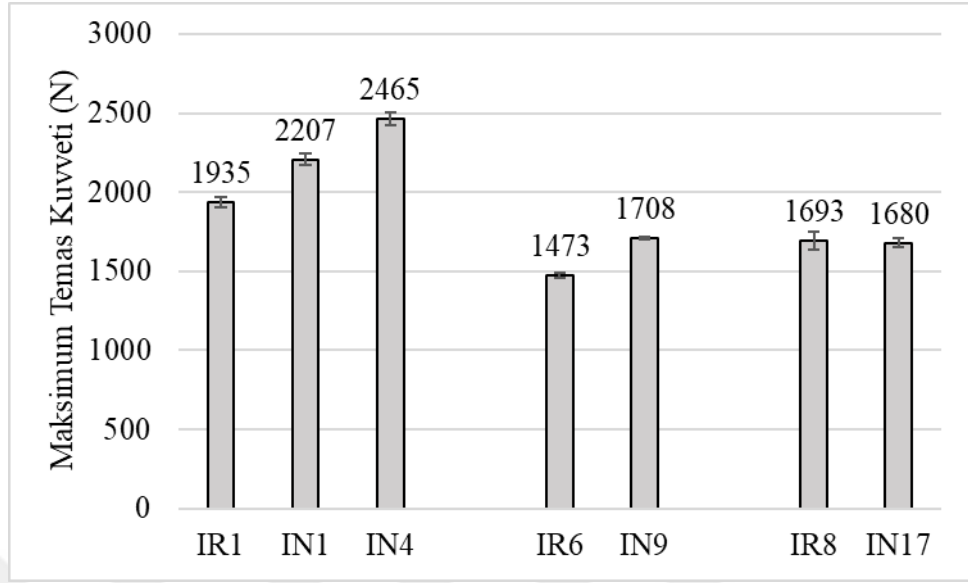
Şekil 4.38. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin çekme dayanımı değerleri

4.11.3. Düşük hızlı darbe testi sonuçları

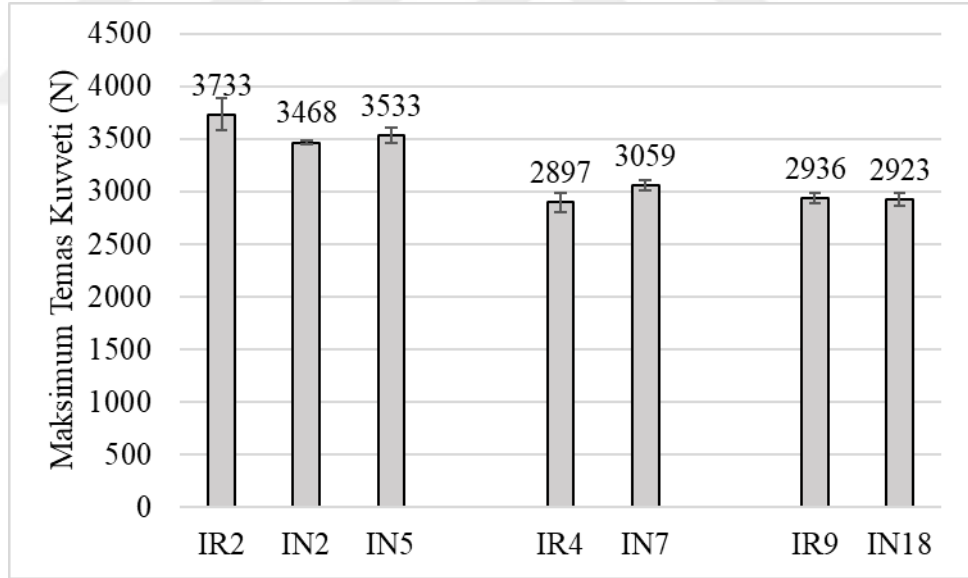
Eşdeğer elyaf içeriği, yönlenme açısı ve tabaka sayısına sahip interply ve intraply hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe testi sonuçları Çizelge 4.56’da verilmiştir. Şekil 4.39-4.41’de aynı içeriğe sahip 4, 8 ve 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin sırasıyla maksimum temas kuvveti grafikleri verilmiştir.

Çizelge 4.56. Eşdeğer özellikli interply ve intraply hibrit kompozitlerin darbe testi sonuçları

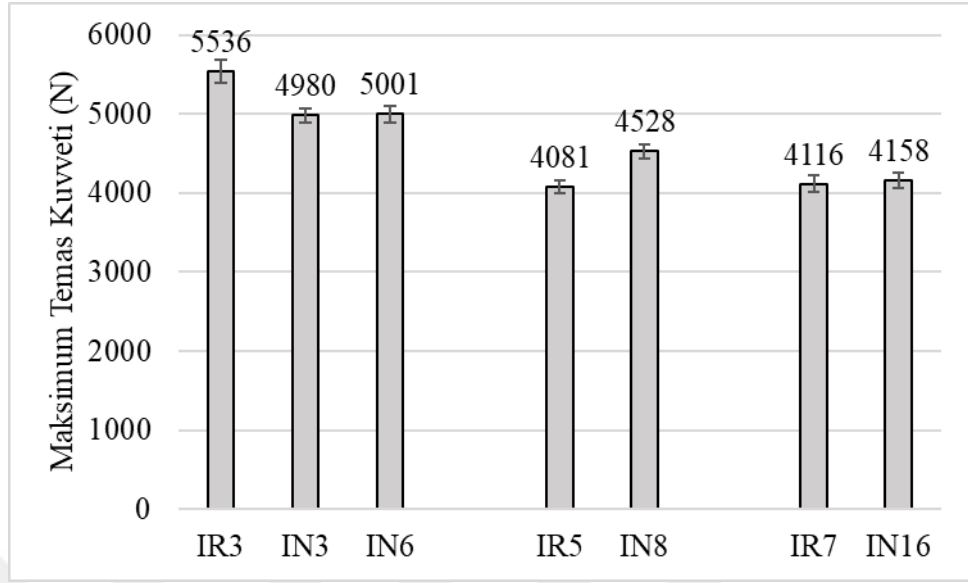
Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Maksimum Temas Kuvveti (N)	Eğilme Rijitliği (N/mm)	40j darbeye karşı absorbe edilen enerji (J)
IR1	CA	0/90	4	1935.112	433	11.8
IN1	C/A	0/90	4	2207	439.3	12.5
IN4	A/C	0/90	4	2465.07	496.7	12.9
IR2	CA	30/60	8	3733.216	738.9	28.8
IN2	C/A	30/60	8	3467.941	665.5	25.4
IN5	A/C	30/60	8	3532.901	610.1	24.8
IR3	CA	45/-45	12	5536.044	1276.5	40.0
IN3	C/A	45/-45	12	4980.172	1243.7	39.6
IN6	A/C	45/-45	12	5000.581	535.1	39.9
IR4	KA	0/90	8	2896.998	805.2	21.6
IN7	K/A	0/90	8	3059.416	712.4	20.0
IR5	KA	30/60	12	4081.026	1490.9	37.5
IN8	K/A	30/60	12	4528.048	2013.9	33.3
IR6	KA	45/-45	4	1472.719	348.5	9.1
IN9	K/A	45/-45	4	1708.341	348	8.7
IR7	KC	0/90	12	4115.608	1182.7	34.6
IN16	C/K	0/90	12	4157.844	1512.9	38.2
IR8	KC	30/60	4	1692.75	442	8.5
IN17	C/K	30/60	4	1679.994	465.3	8.1
IR9	KC	45/-45	8	2936.447	617.5	20.2
IN18	C/K	45/-45	8	2922.51	688.7	25.6



Şekil 4.39. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin maksimum temas kuvveti

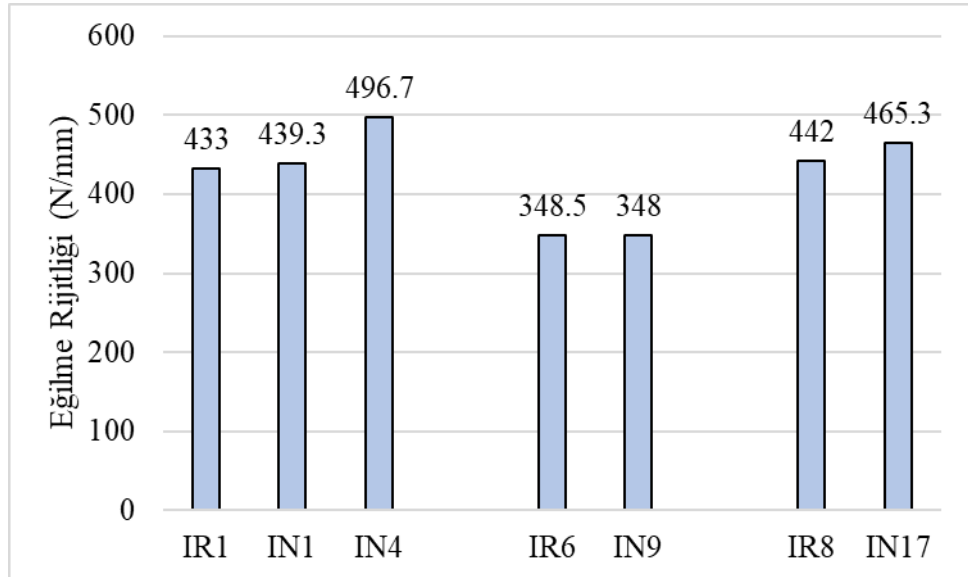


Şekil 4.40. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin maksimum temas kuvveti

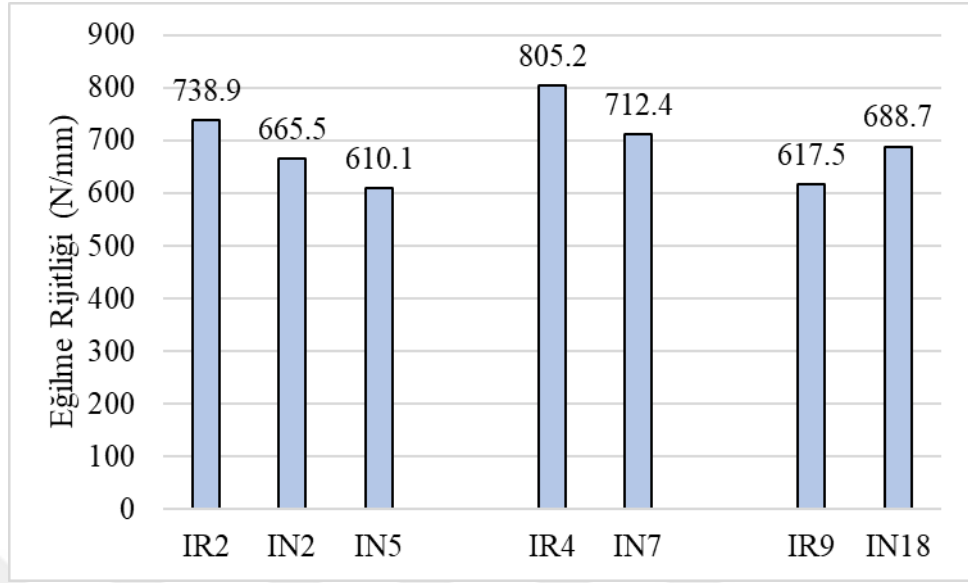


Şekil 4.41. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin maksimum temas kuvveti

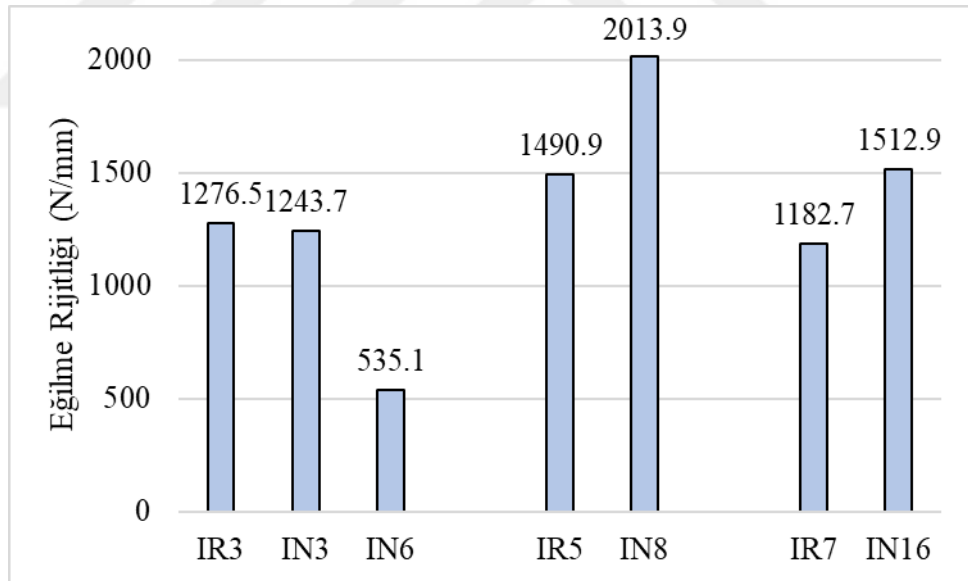
Şekil 4.42-4.44'te aynı içeriğe sahip 4, 8 ve 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme rijitliği grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.42. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme rijitliği grafikleri

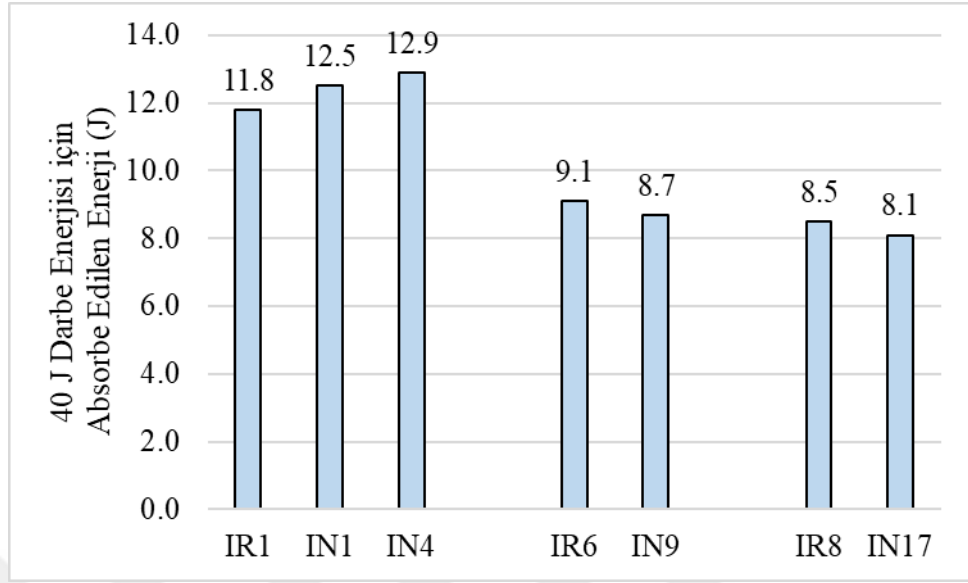


Şekil 4.43. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme rijitliği grafikleri

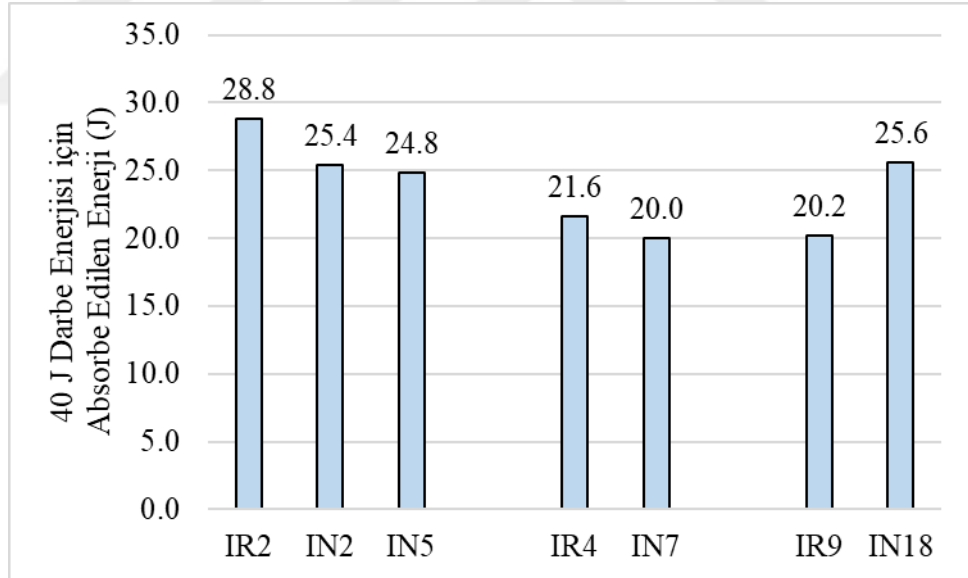


Şekil 4.44. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme rijitliği grafikleri

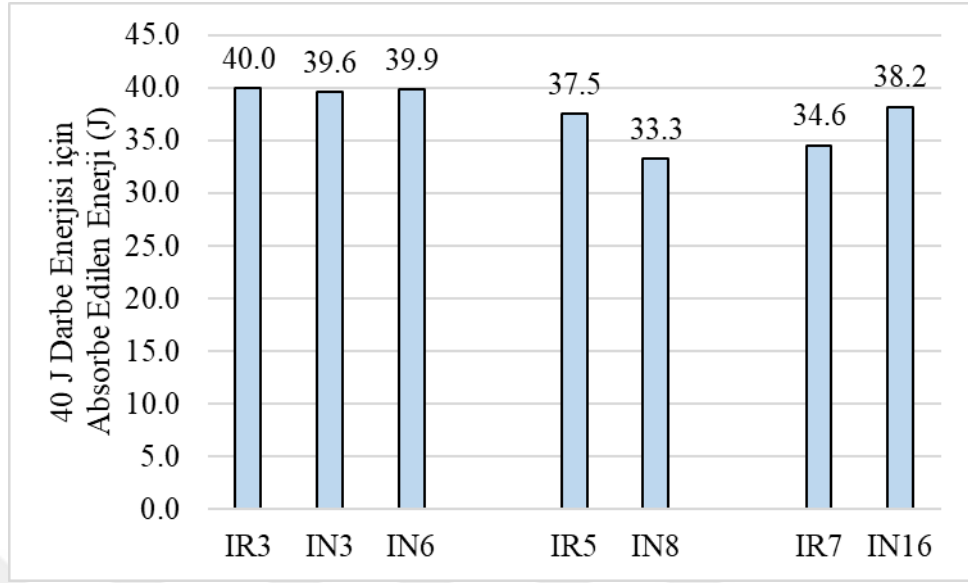
Şekil 4.45-4.47’de aynı içeriğe sahip 4, 8 ve 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin 40j’lük darbe enerjisine karşı absorbe edilen enerji miktarlarına ait grafikler verilmiştir.



Şekil 4.45. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin 40J darbe enerjisi karşısında absorbe ettikleri enerji grafikleri

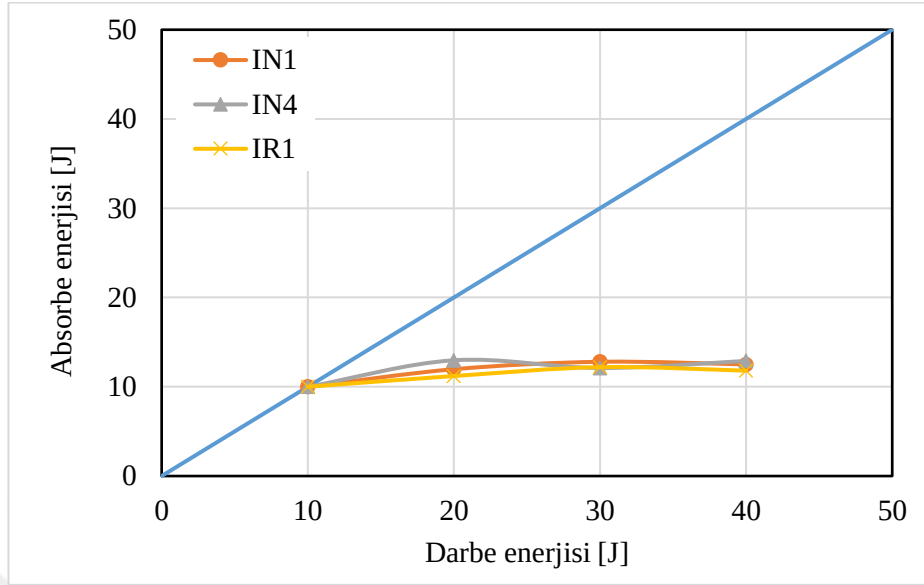


Şekil 4.46. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin 40J darbe enerjisi karşısında absorbe ettikleri enerji grafikleri

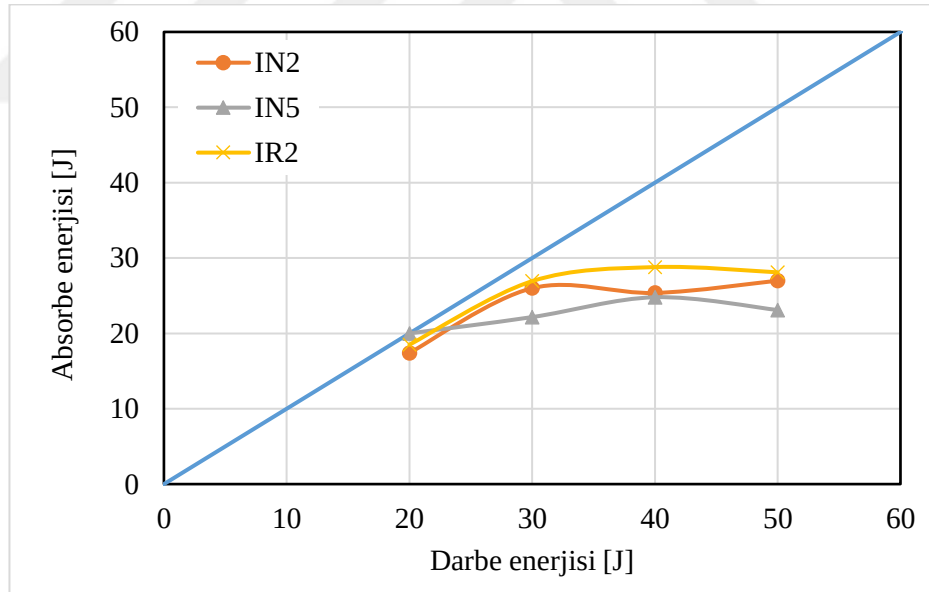


Şekil 4.47. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin 40J darbe enerjisi karşısında absorbe ettikleri enerji grafikleri

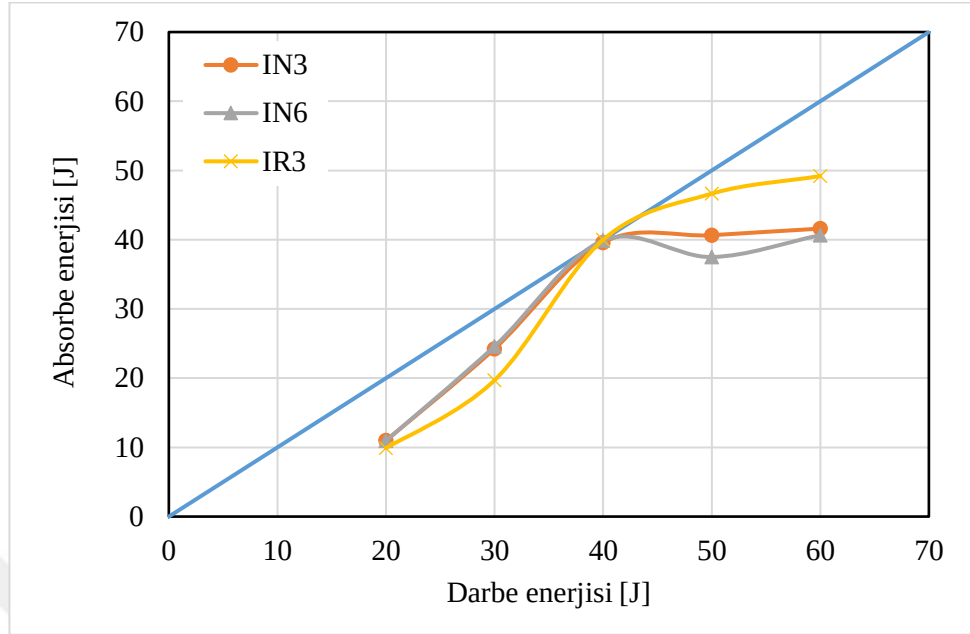
0°/90° yönlenme açısına sahip, 4 tabakalı, aramid ve cam elyaf takviyeli interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarları Şekil 4.48’de gösterilmiştir. 30°/60° yönlenme açısına sahip 8 tabakalı, aramid ve cam elyaf takviyeli interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarları Şekil 4.49’da gösterilmiştir. 45°/-45° yönlenme açısına sahip 12 tabakalı aramid ve cam elyaf takviyeli interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarları Şekil 4.50’de gösterilmiştir. Şekil 4.48-4.50’de verilen grafiklerden de görüldüğü üzere cam ve aramid içeren hibrit kompozitlerde 4 tabakalı numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarları hemen hemen aynı iken tabaka sayısının artması ile 8 ve 12 tabakalı numunelerde intraply kompozitlerin interply kompozitlerden daha fazla enerji absorbe ettikleri görülmektedir.



Şekil 4.48. 0/90 yönlenme açısına sahip 4 tabakalı aramid ve cam elyaf takviyeli interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri

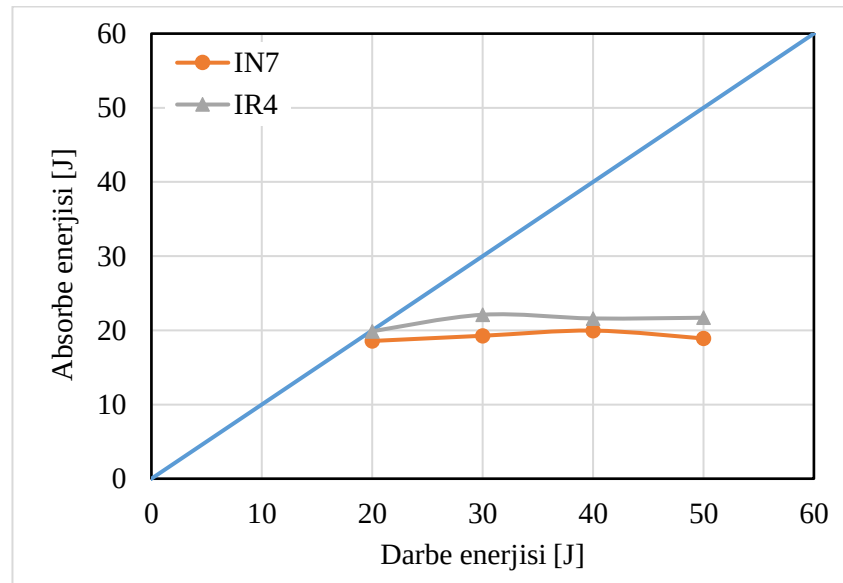


Şekil 4.49. 30/60 yönlenme açısına sahip 8 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri

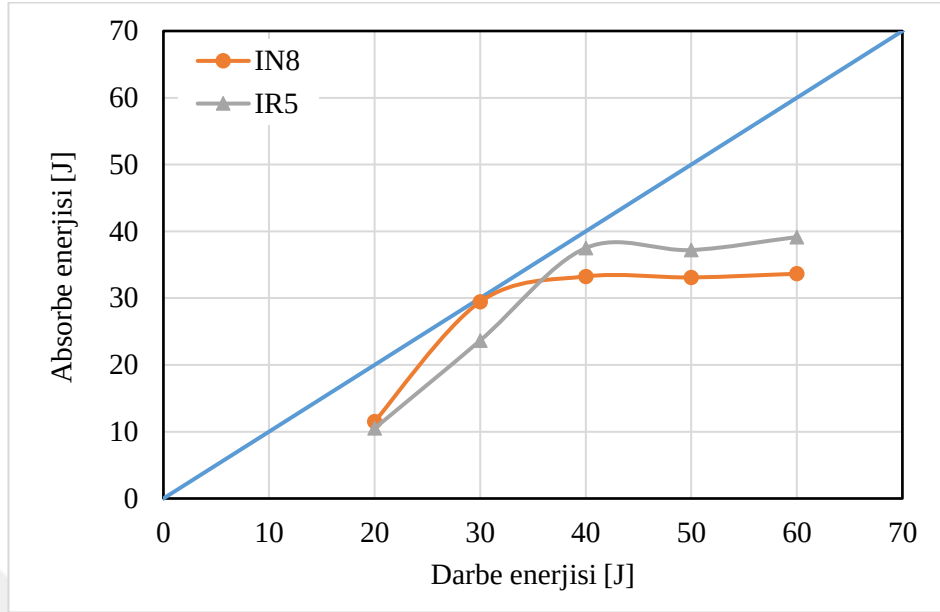


Şekil 4.50. 45/-45 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri

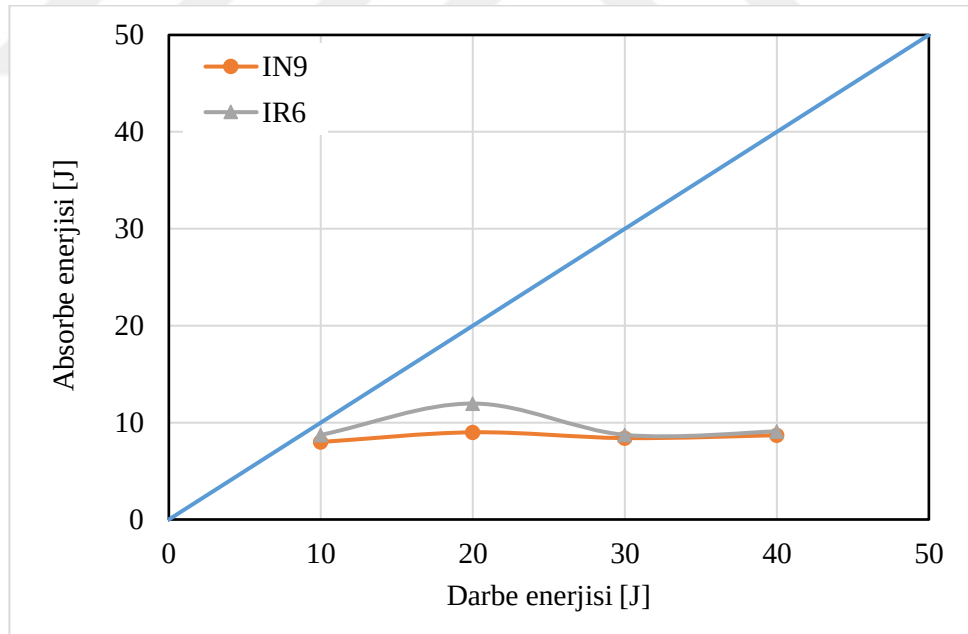
Aşağıda, Şekil 4.51-53’de görüldüğü üzere aynı elyaf içeriği, tabaka sayısı ve yönlenme açısına sahip karbon ve aramid içeren hibrit kompozitlerde de intraply hibrit kompozitlerin interply hibrit kompozitlere göre absorbe ettiği enerji miktarı daha fazladır.



Şekil 4.51. Karbon ve aramid içeren 0/90 yönlenme açısına sahip 8 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri

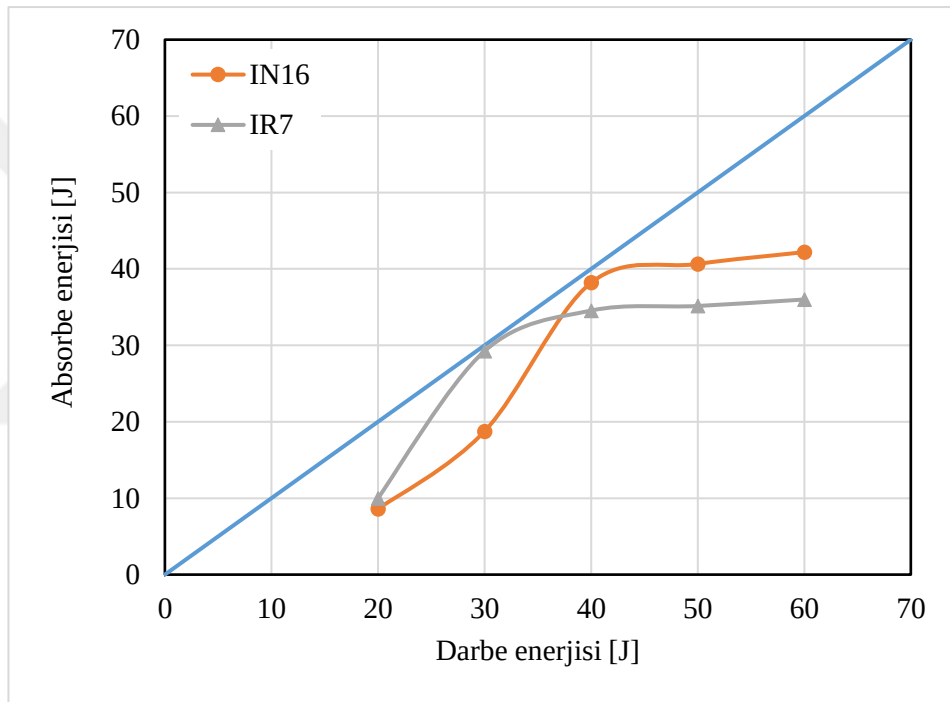


Şekil 4.52. Karbon ve aramid içeren 30/60 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri

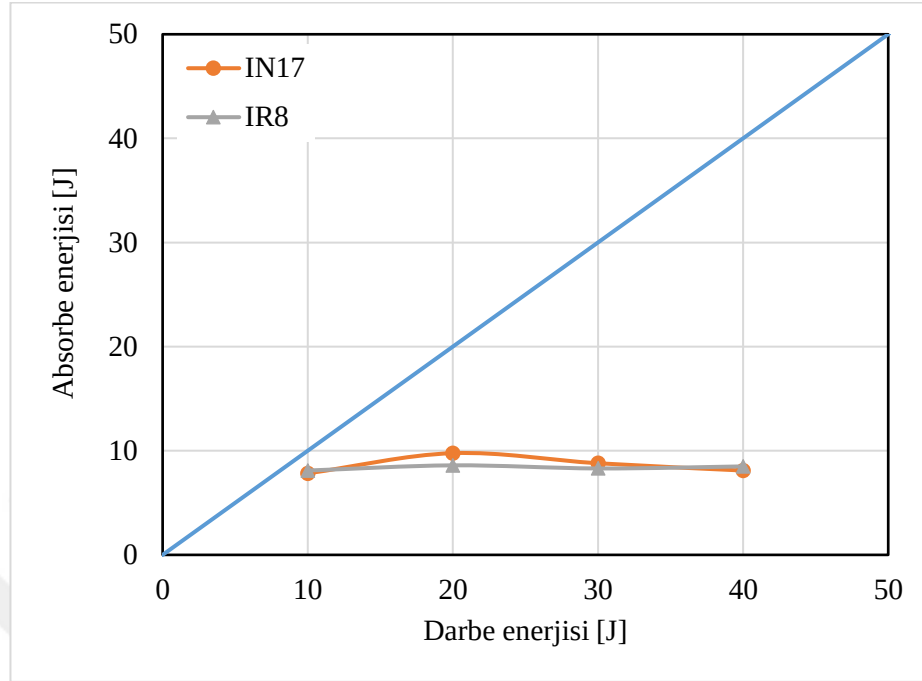


Şekil 4.53. Karbon ve aramid içeren 45/-45 yönlenme açısına sahip 4 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri

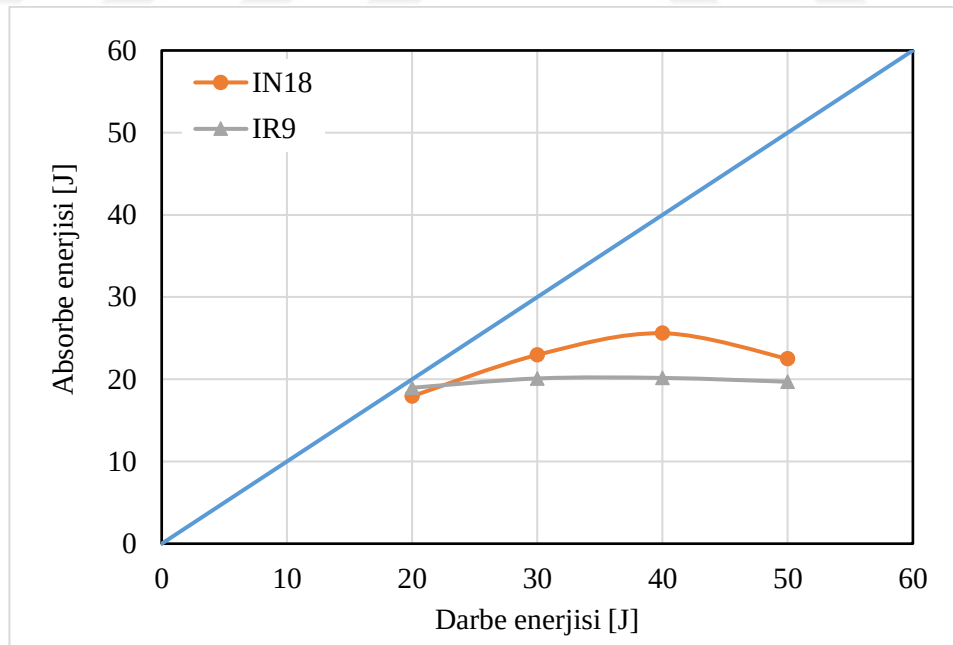
Şekil 4.54-4.56'da, aynı tabaka sayısına ve yönlendirme açısına sahip karbon ve cam içeren hibrit kompozitler kendi aralarında karşılaştırıldığında, aramid-cam ve aramid-karbon içeren numunelerin aksine interply hibritlerin intraply hibritlere göre absorbe ettiği enerji miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı zamanda grafiklerden görüldüğü üzere 4 tabakalı hibrit kompozitlerde belirgin bir fark gözükmezken 8 ve 12 tabakalı hibrit kompozitlerde interply hibritleşmenin intraply hibritleşmeye göre daha avantajlı olduğu söylenebilir.



Şekil 4.54. Karbon ve cam içeren 0/90 yönlendirme açısına sahip 12 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri

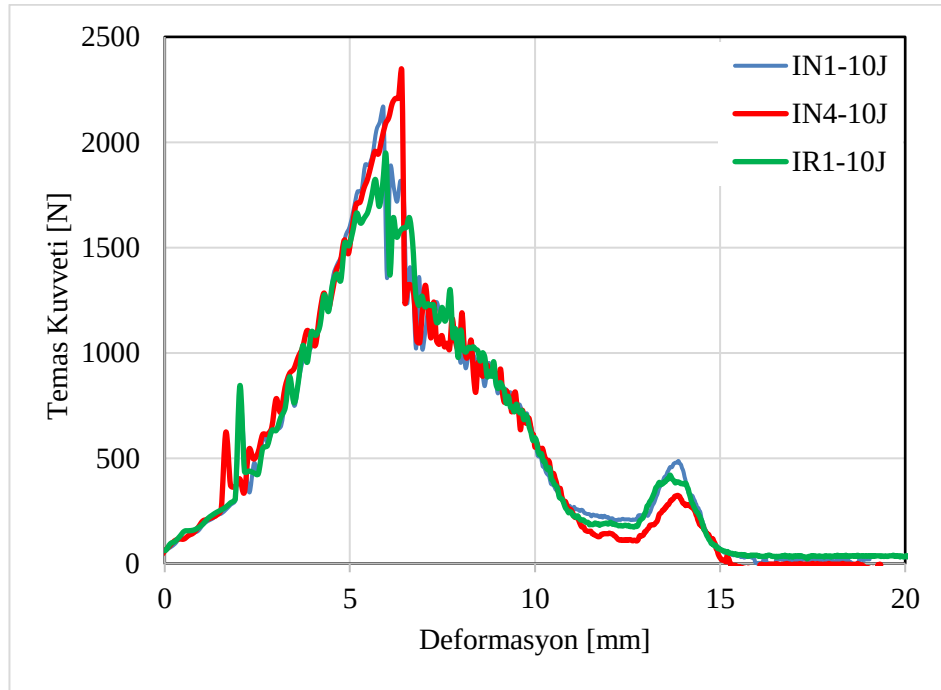


Şekil 4.55. Karbon ve cam içeren 30/60 yönlenme açısına sahip 4 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri

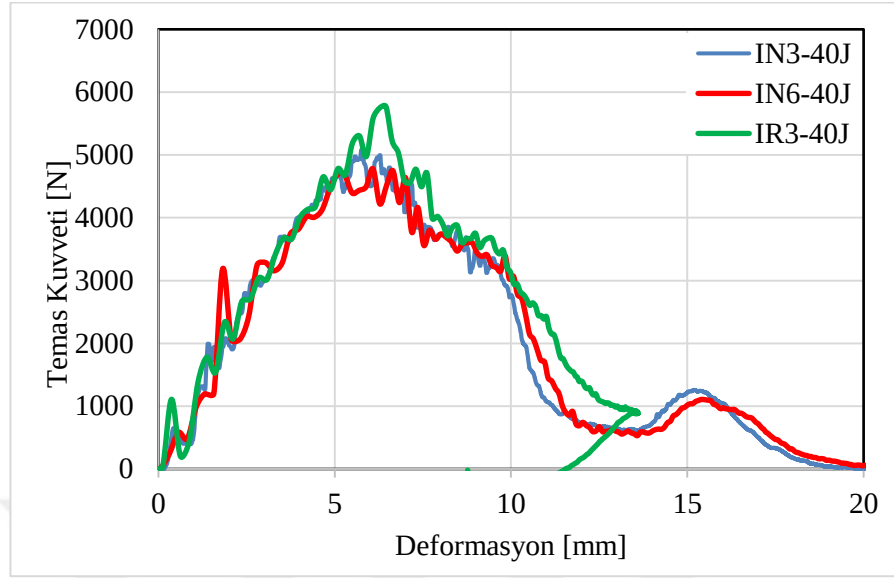


Şekil 4.56. Karbon ve cam içeren 45/-45 yönlenme açısına sahip 8 tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin absorbe ettikleri enerji miktarı grafikleri

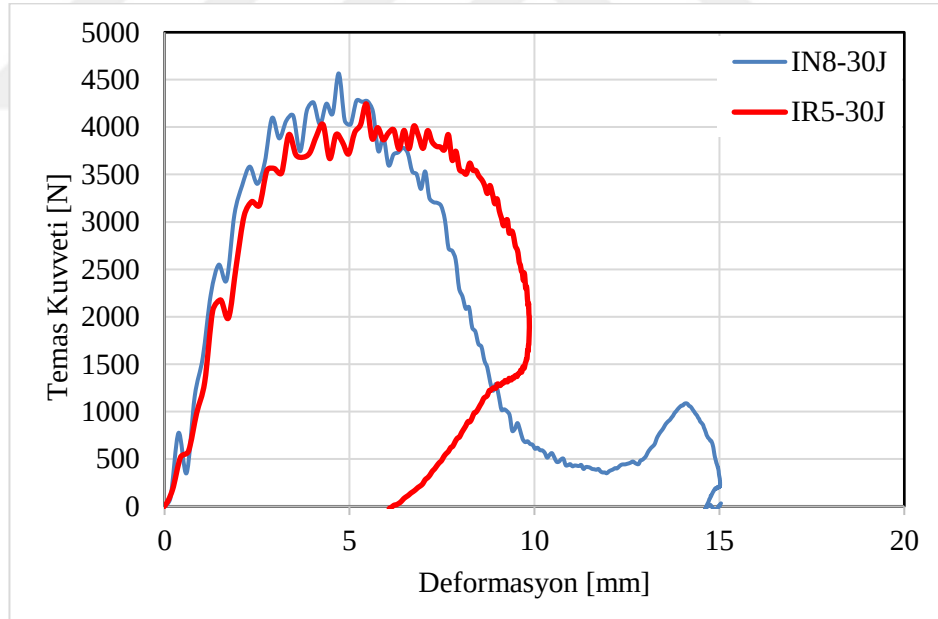
Şekil 4.57’de aynı içeriğe sahip hibrit kompozitlerden aramid elyaf kumaşın üst yüzeyde olduğu kombinasyonda (IN4), temas kuvveti değerlerinin diğer hibrit kompozitlere göre daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.58’de gösterilen 45/-45 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı cam ve aramiddan oluşan hibrit kompozitler için 40j’lük darbe karşısında intraply hibrit kompozitin maksimum temas kuvveti değerlerinin diğer interply kompozitlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 4.59’da, 30/60 yönlenme açısına sahip, 12 tabakalı karbon ve aramiddan oluşan hibrit kompozitlerin 30j’lük darbe karşısında temas kuvveti-deformasyon grafikleri verilmiştir. Burada intraply hibrit kompozit numuneyi temsil eden grafik darbe enerjisinin tamamını absorbe ederek vurucu ucun sekmesine sebep olmuştur. Ancak interply hibrit kompozit numune ise darbe enerjisinin etkisi ile delinmiştir. Şekil 4.60’da 45/-45 yönlenme açısına sahip 8 tabakalı cam ve karbondan oluşan hibrit kompozitlerin 10j’lük darbe karşısında temas kuvveti-deformasyon grafikleri gösterilmiştir. Bu grafikte ise bir önceki grafiğin tersine interply numune tam olarak delinmeden vurucu ucun sekmesine sebep olmuşken intraply hibrit numune delinmiştir.



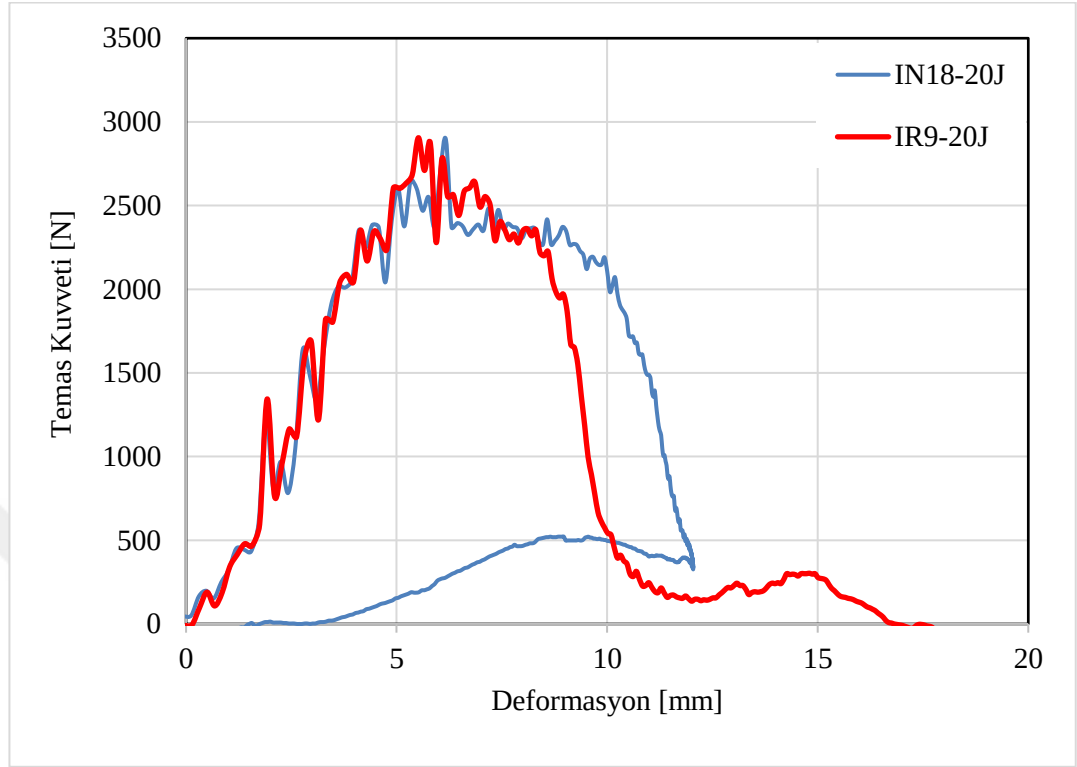
Şekil 4.57. 0/90 yönlenme açısına sahip 4 tabakalı cam ve aramiddan oluşan hibrit kompozitler için 10j’lük darbe karşısında Temas Kuvveti-Deformasyon grafikleri



Şekil 4.58. 45/-45 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı cam ve aramidden oluşan hibrit kompozitler için 40j'lük darbe karşısında temas kuvveti-deformasyon grafikleri



Şekil 4.59. 30/60 yönlenme açısına sahip 12 tabakalı karbon ve aramidden oluşan hibrit kompozitler için 30j'lük darbe karşısında temas kuvveti-deformasyon grafikleri



Şekil 4.60. 45/-45 yönlenme açısına sahip 8 tabakalı cam ve karbondan oluşan hibrit kompozitler için 10j'lük darbe karşısında temas kuvveti-deformasyon grafikleri

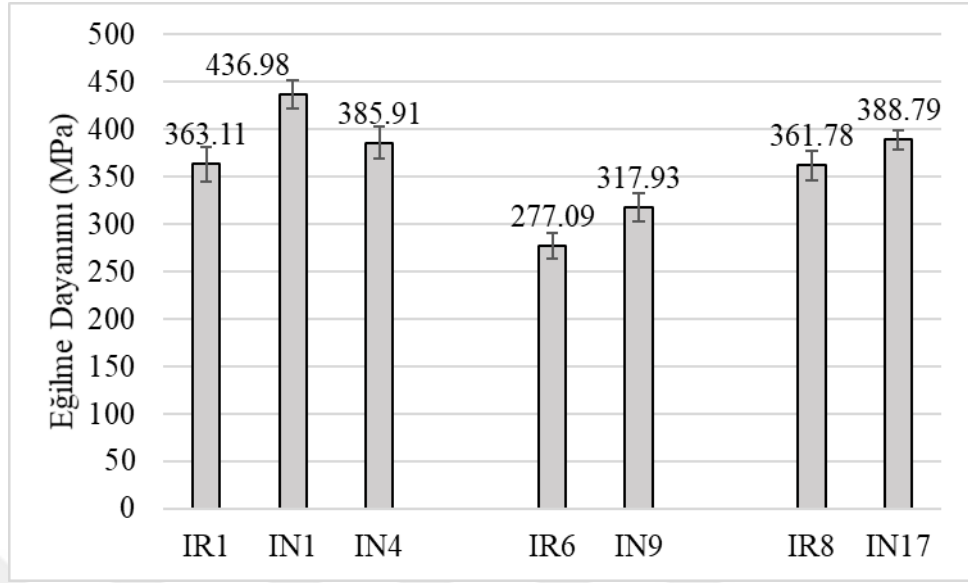
4.11.4. Üç nokta eğilme testi sonuçları

Üç nokta eğilme testi sonuçlarından elde edilen eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerleri interply-intraply karşılaştırması için %95 güven aralığı değerleri ile beraber Çizelge 4.57'de verilmiştir.

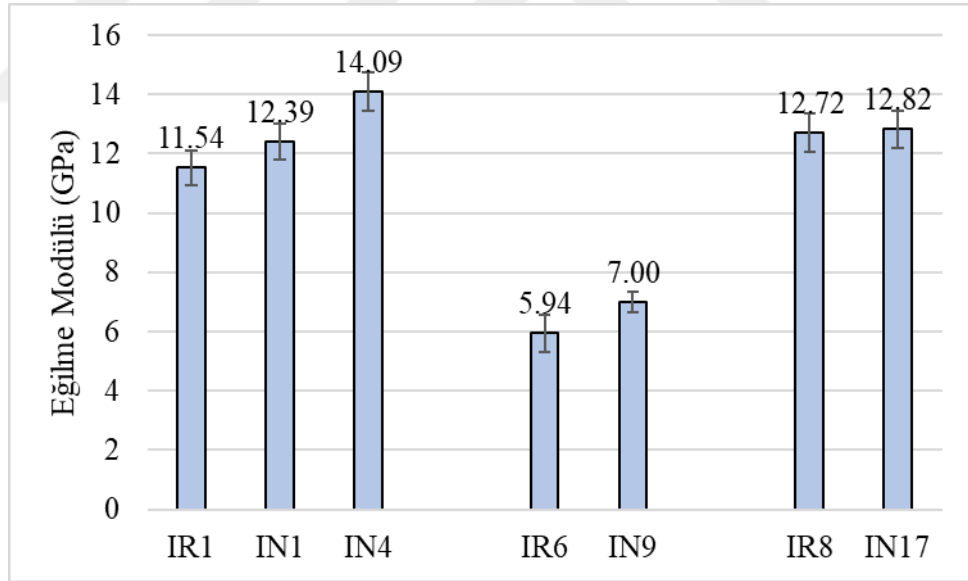
Çizelge 4.57. Eşdeğer özellikli interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme testi sonuçları

Numune Adı	Kumaş Türü	Yönlenme Açısı	Tabaka Sayısı	Eğilme Dayanımı (MPa)	%95 GA	Eğilme Modülü (GPa)	%95 GA
IR1	CA	0/90	4	363.106	18.116	11.535	0.576
IN1	C/A	0/90	4	436.982	14.642	12.392	0.61
IN4	A/C	0/90	4	385.913	16.959	14.09	0.641
IR2	CA	30/60	8	195.694	8.667	6.695	0.321
IN2	C/A	30/60	8	243.379	9.292	8.303	0.389
IN5	A/C	30/60	8	222.714	9.185	7.955	0.343
IR3	CA	45/-45	12	207.696	4.274	5.943	0.162
IN3	C/A	45/-45	12	217.97	1.901	5.193	0.171
IN6	A/C	45/-45	12	215.915	4.193	5.417	0.104
IR4	KA	0/90	8	555.973	12.176	33.183	1.655
IN7	K/A	0/90	8	591.382	16.552	39.383	0.961
IR5	KA	30/60	12	307.907	8.246	9.502	0.357
IN8	K/A	30/60	12	291.044	8.182	9.665	0.405
IR6	KA	45/-45	4	277.094	13.344	5.943	0.617
IN9	K/A	45/-45	4	317.929	15.132	7	0.333
IR7	KC	0/90	12	678.446	10.347	30.902	0.382
IN16	C/K	0/90	12	570.418	10.312	27.167	1.332
IR8	KC	30/60	4	361.775	15.562	12.721	0.639
IN17	C/K	30/60	4	388.785	9.823	12.823	0.617
IR9	KC	45/-45	8	288.488	10.318	7.772	0.353
IN18	C/K	45/-45	8	331.847	14.923	9.169	0.421

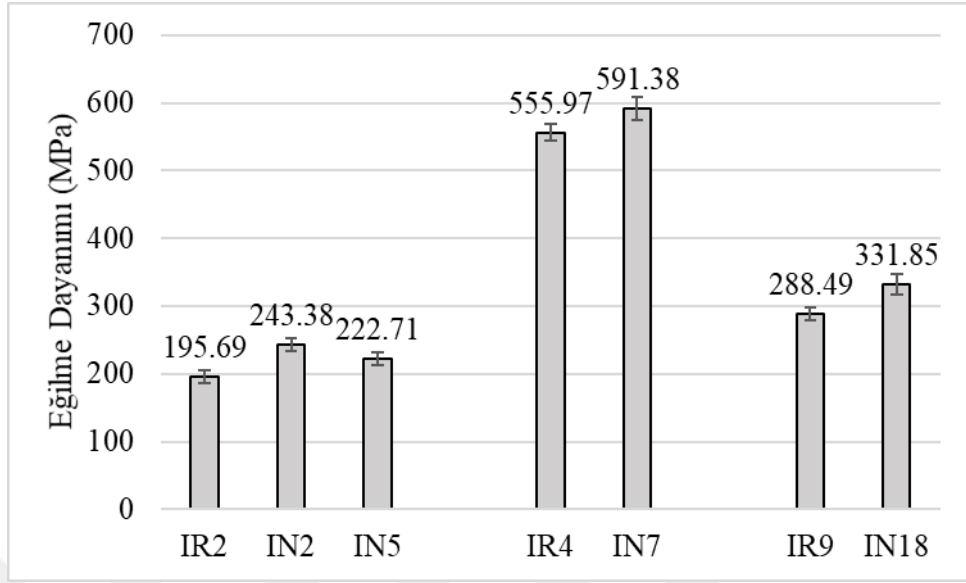
Şekil 4.59-4.64’de eşdeğer elyaf içeriği, yönlenme açısı ve tabaka sayısına sahip hibrit kompozitlerin eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerleri 4 tabakalı, 8 tabakalı ve 12 tabakalı gruplar halinde verilmiştir.



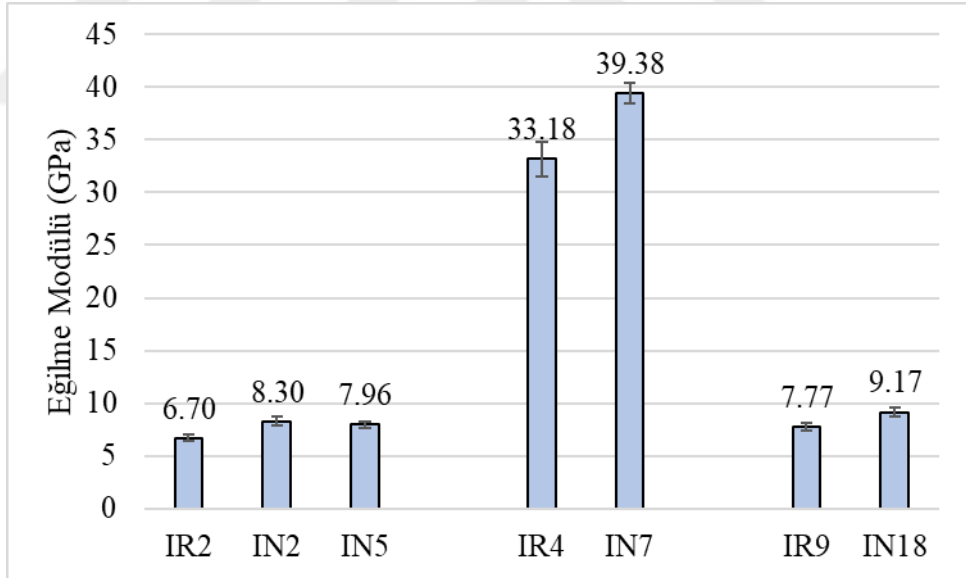
Şekil 4.61. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme dayanımı grafikleri



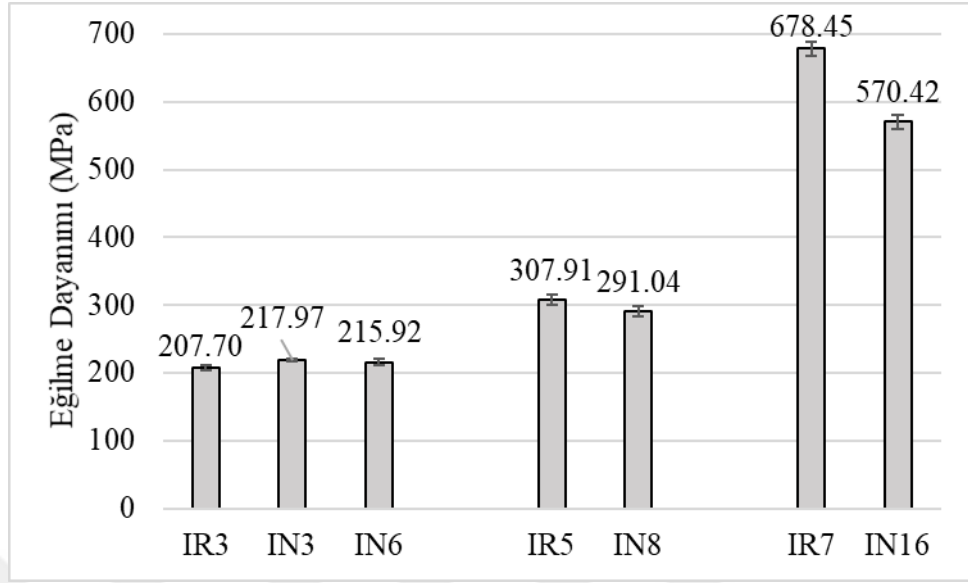
Şekil 4.62. Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme modülü grafikleri



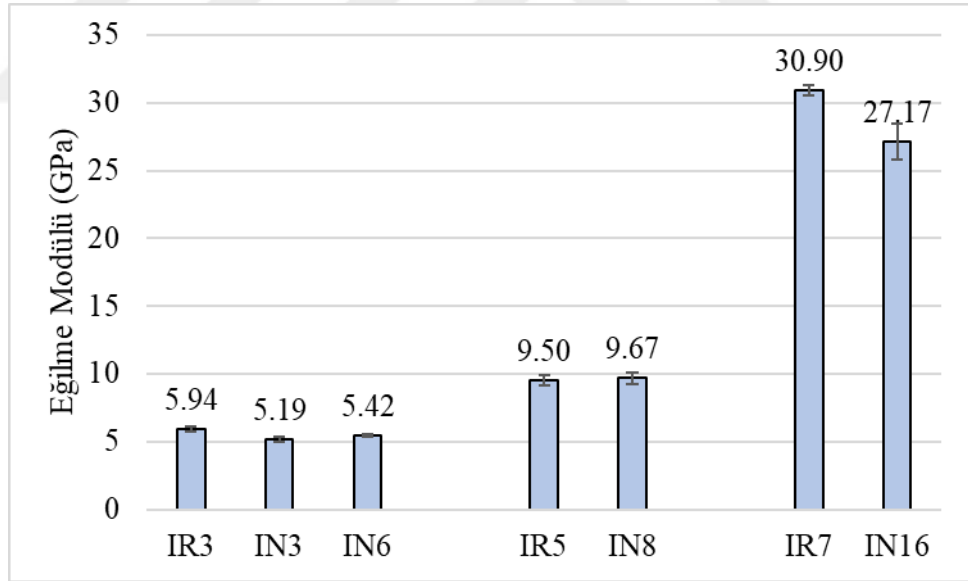
Şekil 4.63. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme dayanımı grafikleri



Şekil 4.64. Sekiz tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme modülü grafikleri



Şekil 4.65. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme dayanımı grafikleri



Şekil 4.66. On iki tabakalı interply ve intraply hibrit kompozitlerin eğilme modülü grafikleri

4.12. İnterply ve İntraply Karşılaştırması

Önceki bölümde; elyaf içeriği, tabaka sayısı ve yönlenme açısı aynı olan interply ve intraply hibrit kompozitlere ait deneysel sonuçlar kendi aralarında dört farklı yükleme durumuna (titreşim, çekme, darbe ve eğilme) göre aşağıdaki gibi karşılaştırılmıştır.

- **IR1 ve IN1-IN4 (Cam ve aramid elyaf içeren 4 tabakalı 0/90 açılı hibrit kompozitler)**

- Aramid elyafın dış yüzeyde olduğu interply üretimlerde doğal frekans ve sönüm oranı değerleri daha büyüktür.
- Her üç numune grubunun çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri birbirine çok yakındır.
- Dış yüzeyinde aramid bulunan IN4'ün maksimum temas kuvveti, eğilme rijitliği ve absorbe edilen enerji değerleri daha yüksektir.
- Interply yapıların hem eğilme dayanımları hem de eğilme modülleri daha büyüktür.

- **IR2 ve IN2-IN5 (Cam ve aramid elyaf içeren 8 tabakalı 30/60 açılı hibrit kompozitler)**

- İntraply hibrit yapının ilk doğal frekans değeri daha yüksek, sönüm oranı değeri daha düşüktür.
- Her üç numune grubunun elastisite modülü değerleri birbirine çok yakındır.
- İntraply hibrit yapının maksimum temas kuvveti, eğilme rijitliği ve absorbe ettiği enerji değerleri daha yüksektir.
- İnterply yapıların hem eğilme dayanımları hem de eğilme modülleri daha büyüktür.

- **IR3 ve IN3-IN6 (Cam ve aramid elyaf içeren 12 tabakalı 45/-45 açılı hibrit kompozitler)**

- İntraply yapının ilk doğal frekans değeri daha yüksek iken sönüm oranı değeri daha düşüktür.
- İnterply hibrit yapıların elastisite modülü ve çekme dayanımları daha büyüktür.

- İntraply yapının maksimum temas kuvveti, eğilme rijitliği ve absorbe ettiği enerji değerleri daha yüksektir.
- İntraply IR3 numunesinin eğilme modülü değeri daha büyüktür.

- **IR4 ve IN7 (Karbon ve aramid elyaf içeren 8 tabakalı 0/90 açılı hibrit kompozitler)**

- Her iki yapının frekans değerleri birbirine oldukça yakındır. İntraply yapının ilk doğal frekans değeri daha yüksek, sönüm oranı değeri daha düşüktür.
- İntraply yapının çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri daha büyüktür.
- İnterply yapının (IN7) maksimum temas kuvveti daha büyük iken eğilme rijitliği ve absorbe ettiği enerji miktarı daha düşüktür.
- Dış tabakada karbon içeren interply IN7 numunesinin eğilme dayanımı ve eğilme modülü değeri daha büyüktür.

- **IR5 ve IN8 (Karbon ve aramid elyaf içeren 12 tabakalı 30/60 açılı hibrit kompozitler)**

- Dış yüzeyinde karbon bulunan interply yapının doğal frekans değeri daha yüksek iken sönüm oranı değeri daha düşüktür.
- İnterply yapının çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri daha büyüktür.
- İnterply yapının (IN8) maksimum temas kuvveti ve eğilme rijitliği değerleri daha yüksek iken absorbe ettiği enerji miktarı daha düşüktür.
- Her iki yapının eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerleri birbirine oldukça yakındır.

- **IR6 ve IN9 (Karbon ve aramid elyaf içeren 4 tabakalı 45/-45 açılı hibrit kompozitler)**

- Dış yüzeyinde karbon bulunduran interply yapının doğal frekans değerleri daha yüksek, sönüm oranı değerleri daha düşüktür.
- İntraply yapının çekme dayanımı değeri daha yüksek iken elastisite modülü değeri birbirine çok yakındır.

- İnterply yapının (IN9) maksimum temas kuvveti daha büyük iken eğilme rijitliği ve absorbe ettiği enerji miktarları daha düşüktür.

- İnterply hibrit yapının eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerleri daha büyüktür.

- **IR7 ve IN16 (Karbon ve cam elyaf içeren 12 tabakalı 0/90 açılı hibrit kompozitler)**

- Dış yüzeyinde cam elyaf bulunana interply kompozitlerin doğal frekans ve sönüm oranı değerleri birbirine çok yakındır.

- İnterply yapının çekme dayanımı ve elastisite modülü değeri daha büyüktür.

- Her iki yapının maksimum temas kuvveti birbirine çok yakın iken interply yapının eğilme rijitliği ve absorbe ettiği enerji miktarı daha fazladır.

- İnterply yapının eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerleri daha büyüktür.

- **IR8 ve IN17 (Karbon ve cam elyaf içeren 4 tabakalı 30/60 açılı hibrit kompozitler)**

- Her iki yapının doğal frekans ve sönüm oranı değerleri birbirine çok yakındır.

- İnterply hibrit yapının elastisite modülü değerleri daha büyüktür.

- Her iki yapının maksimum temas kuvveti, eğilme rijitliği ve absorbe ettikleri enerji miktarları birbirine oldukça yakındır.

- Her iki yapının eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerleri birbirine oldukça yakındır.

- **IR9 ve IN18 (Karbon ve cam elyaf içeren 8 tabakalı 45/-45 açılı hibrit kompozitler)**

- Doğal frekans değerleri aynıdır. Sönüm oranı değerleri birbirine çok yakındır.

- İnterply yapının çekme dayanımı değerleri daha yüksek iken elastisite modülü değeri daha düşüktür.

- Her iki yapının maksimum temas kuvveti birbirine çok yakın iken interply yapının eğilme rijitliği ve absorbe ettiği enerji miktarları daha büyüktür.

- Dış yüzeyinde cam elyaf bulunan interply yapının eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerleri daha yüksektir.

İnterply-intraply karşılaştırmasından elde edilen sonuçlar aşağıda herbir yükleme durumu için ayrı bir başlık altında yorumlanmıştır. Literatürde benzer veya ilişkili sonuç elde edilen çalışmalar parantez içerisinde belirtilmiştir.

Titreşim testleri

- Doğal frekans değerleri, yapının rijitliği ile doğrudan ilgilidir. Hibrit yapıların elastisite modülü değerlerinde en etkili parametre “yönlenme açısı” iken bu parametre doğal frekans için tabaka sayısından sonra gelmektedir.
- Karşılaştırılan numune gruplarında doğal frekans ile sönüm oranı değerleri arasında zıt orantı olduğu görülmüştür. En yüksek frekans değerlerine sahip numunelerin sönüm oranı değerleri daha düşük çıkmıştır.
- Cam ve aramid elyaf içeren $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip hibrit kompozitlerde cam elyafın dışyüzeyde olduğu IN1 kodlu interply hibrit kompozit ile IR1 kodlu intraply hibrit kompozitin doğal frekans ve sönüm oranı değerleri birbirine oldukça yakındır. Fakat aynı içeriklere sahip olup dış yüzeyinde aramid elyaf bulunan IN4 kodlu interply yapının hem doğal frekans hem de sönüm oranı değerleri daha yüksektir. Özellikle dış yüzeyinde daha rijit ve elastisite modülü daha yüksek elyaf kumaş bulunan tabakalı interply hibrit kompozit yapıların doğal frekans değerlerinin, intraply hibrit yapılara göre daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Karbon ve aramid elyaf içeren $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip interply (IN7) hibrit kompozitler ile intraply (IR4) hibrit kompozitlerin doğal frekans ve sönüm oranı değerleri birbirine oldukça yakındır. Fakat $30^\circ/60^\circ$ ve $45^\circ/-45^\circ$ yönlenme açısına sahip dış yüzeyinde karbon elyaf bulunan interply hibrit yapılar (IN8-IN9), daha büyük frekans değerleri ve daha düşük sönüm oranı değerleri almıştır.
- Özellikle cam ve karbon elyaf içeren, dış yüzeyinde cam elyaf bulunan interply (IN16-IN18) hibrit kompozitler ile hibrit elyaf kumaşlar kullanılarak oluşturulan intraply (IR7-IR9) hibrit kompozitlerin doğal frekans ve sönüm oranı değerleri birbirine oldukça yakındır.
- Artan frekans sayıları (birinci, ikinci ve üçüncü doğal frekanslar) ve değerlerine karşı sönüm oranı değerlerinde düşme olduğu gözlenmiştir (Thakare *et al.* 2019).

- Dört tabakalı interply ve intraply hibrit kompozit yapılar incelendiğinde en yüksek sönüm oranı değerlerinin cam ve aramidden oluşan hibrit yapılarda olması beklenirken karbon ve aramid elyaftan oluşan intraply hibrit (IR6) yapıda görülmüştür. Bu durumun, intraply hibrit yapılarda oluşan matris-elyaf ve elyaf-elyaf sürtünmesinden kaynaklı enerji kayıplarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Chandra *et al.* 1999, Samal *et al.* 2009).

Çekme testleri

- $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip intraply ve interply yapıların elastite modülü ve çekme dayanımı değerleri diğer yönlenme açılarına sahip hibrit kompozitlere göre daha yüksektir.
- Cam-aramid ve karbon-aramid elyaf içeren $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip intraply ve interply yapıların elastite modülü değerleri kendi aralarında birbirine oldukça yakın iken karbon-cam elyaf içeren intraply hibrit yapıların elastisite modülü değerleri interply hibrit yapılara göre daha yüksektir.
- Karbon ve aramid içeren interply hibrit kompozitlerde, karbon elyafların orta tabakada olduğu (IN10) numuneler diğer kombinasyonlara göre (IN7) daha yüksek çekme dayanımına sahiptir (Wang *et al.* 2018).

Darbe testleri

- Karbon ve aramid elyaf içeren interply hibrit kompozit yapıların maksimum temas kuvveti açısından intraply hibrit kompozitlerden daha avatajlı olduğu görülmektedir. Dış yüzeyinde karbon elyafların olması maksimum temas kuvvetini arttırmıştır (Ying *et al.* 2017).
- Karbon ve cam elyaf içeren hibrit kompozitlerden intraply hibrit kompozitlerin (IR8) darbe dayanımı interply hibrit kompozitlere (IN17) göre daha yüksektir. Bu durum, Zhang *et al.* (2018) tarafından yapılan ve 1:1 oranında karbon-cam içeriğine sahip intraply hibrit kompozitlerin daha iyi darbe direncine sahip olduğunu ifade ettikleri çalışma ile uyushmaktadır.

- Tekil olarak ayrı ayrı, enerji absorbe etme özelliği yüksek olan aramid ve cam elyaflar ile oluşturulan hibrit yapıların karbon içeren diğer hibrit yapılara göre daha iyi enerji absorbe ettikleri görülmektedir.
- Aynı darbe enerjisine maruz bırakılan cam-aramid, aramid-karbon elyaflı numunelerden intraply numunelerde (IR3 ve IR5) delinme olmazken interply numuneler (IN3-IN6 ve IN8) delinmiştir. Genel olarak, aramid-cam ve aramid-karbon içeren intraply hibrit yapılar interply hibrit yapılara göre daha fazla enerji absorbe etmektedir. Sönüm oranında izah edildiği gibi intraply hibrit yapılarda oluşan matris-elyaf ve elyaf-elyaf sürtünmesinden kaynaklı enerji kayıplarının, enerjinin daha fazla absorbe edilmesine sebep olduğu düşünülmektedir (Chandra *et al.* 1999, Samal *et al.* 2009).
- Aynı enerji seviyesi (20j) ile darbe testine maruz bırakılan cam ve karbon içeren interply (IN18) numunelerde delinme olmazken intraply (IR9) hibrit numuneler delinmiştir. Bu da enerji absorbe etme özelliği daha yüksek olan elyaf kumaşların dış yüzeyde kullanılmasının enerji absorbe etme özellikleri açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir.

Eğilme testleri

- Çekme testlerinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde eğilme testi sonuçlarında da, 0°/90° yönlenme açısına sahip intraply ve interply yapıların eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerleri diğer yönlenme açılarına sahip hibrit kompozitlere göre daha yüksektir.
- Karbon ve cam elyaf içeren intraply hibrit kompozitlerin (IR7), dış yüzeyinde cam elyaf bulunan interply hibrit kompozitlere (IN16) göre eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerleri daha yüksektir (Wu *et al.* 2018).
- Dış yüzeyinde daha rijit, eğilme modülü ve eğilme dayanımı daha yüksek olan elyaf türü içeren interply hibrit yapıların eğilme modülü değerleri intraply hibrit yapılara göre daha yüksektir.
- Darbe testlerinde olduğu gibi eğilme testlerinde de tabaka diziliş sırası önemli bir parametredir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapılarda, interply ve intraply hibrit yapıların kullanım amaçlarına yönelik üstün taraflarını belirleyebilmek ve üretim tasarımında elyaf kumaş türü, elyaf yönlenme açısı ve tabaka sayısı gibi faktörlerin en etkili seviyelerini tespit etmek amacıyla deneysel ve sayısal analizler yapılmıştır. İlgilenilen parametre sayısının çok fazla olmasından dolayı Taguchi yöntemiyle üretim tasarımı yapılarak tam faktöriyel tasarıma göre üretilmesi gereken kompozit plaka sayısı 1/3 oranında, sistematik bir şekilde azaltılmıştır. İnterply ve intraply karşılaştırması açısından önem arz eden, eşit yoğunluk (200 g/m^2) ve aynı dokuma türüne (plain-düz) sahip tekil ve hibrit elyaf kumaşlar, özel sipariş olarak temin edilmiştir. Tekrarlanabilirlik ve güven aralığı açısından her bir üretim grubuna ait plakadan ikişer adet üretilmiştir. Üretimlerde diğer birçok üretim metoduna göre daha avantajlı olan VARTM yöntemi kullanılmıştır. Karşılaştırma açısından üretim parametreleri standardize edilmiştir. Plakalardan, ilgili ASTM standartlarına göre yoğunluk, çekme, eğilme, darbe ve titreşim test numuneleri, CNC router ve su jeti ile kesilerek elde edilmiştir. Dinamik (titreşim) ve mekanik (çekme, darbe ve eğilme) yükleme durumları için yapılan testlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. $0^\circ/90^\circ$ yönlenme açısına sahip tekil üretim grupları ve eşdeğer yönlenme açısı, tabaka sayısı ve elyaf içeriğine sahip interply-intraply hibrit üretim gruplarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca; sonlu elemanlar ile çözüm üreten ANSYS® paket programı vasıtasıyla her bir numune grubuna ait ankastre-serbest sınır şartına uygun sayısal modeller oluşturulmuştur. Deneysel olarak elde edilen mekanik ve malzeme özellikleri sayısal modelde kullanılarak, ilk üç doğal frekans değerleri belirlenmiştir. Her bir numune grubu için yapılan sayısal analizler neticesinde elde edilen değerler, deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sayısal modelin kabul edilebilir bir yakınlıkta sonuçlar vermesi ile ileriye yönelik çalışmalarda yeniden ilave üretimlere gerek duyulmadan hibrit kompozit yapıların doğal frekansları ile ilgili en uygun kombinasyonların tespiti yapılabilecektir. Bunlara ek olarak üretim gruplarına (tekil, interply ve intraply) ait farklı testlerden (titreşim, çekme, darbe ve eğilme) elde edilen deneysel sonuçlar Taguchi analizlerinde kullanılarak her bir yükleme durumu için amaca uygun (daha büyük daha iyidir) en etkili parametreler belirlenmiştir.

Üretilen plakaların elyaf-ağırlık oranları 0.5-0.59 arasında değişmektedir. En düşük oran aramid elyaf takviyeli kompozitlerde görülürken en yüksek oran karbon elyaf takviyeli ürünlerden elde edilmiştir.

Üretim kalitesi açısından önemli bir parametre olan plaka kalınlık değerleri, %95 güven aralığına göre değerlendirildiğinde elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, üretimlerin titizlikle, hassas bir şekilde yapılması ve üretim parametrelerinin standart tutulmasının bir sonucudur.

Her bir üretim grubuna ait yoğunluk değerleri ASTM D792 standardına göre belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar %95 güven aralığına göre oldukça tutarlıdır.

Ankastre-serbest sınır şartında, ilk üç doğal frekans için ANSYS® analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında makul bir uyum görülmüştür. Birkaç numune türü hariç diğer bütün numune gruplarında oldukça yakın değerler elde edilmiştir.

Taguchi analizleri;

- Titreşim testlerinde her üç üretim grubunda hem 1. doğal frekans hem de 1. sönüm oranı değerleri için en etkili faktörler; sırasıyla tabaka sayısı, yönlenme açısı ve kumaş türüdür. Ancak en etkili seviyeler ise sırasıyla tekil, interply, intraply üretim grupları için doğal frekansta K, K/A, KA, 12 tabaka, 0°/90° iken sönüm oranında C, A/C, CA, dört tabaka, 30°/60° ve 45°/-45° yönlenme açıları en etkili seviyeler olarak görülmektedir.
- Çekme testlerinden elde edilen elastisite modülü değerleri karşılaştırılmıştır. En etkili faktörler sırasıyla yönlenme açısı, kumaş türü ve tabaka sayısıdır. En etkili seviyeler ise tekil grupta; 0°/90°, K ve 8 tabaka, interplyda 0°/90°, K/C ve 8 tabaka, intraplyda 0°/90°, KC ve 8 tabakadır.
- Üç nokta eğilme testlerinde her üç üretim grubunda eğilme dayanımı için en etkili faktörler; yönlenme açısı, kumaş türü ve tabaka sayısıdır. Yönlenme açısında en etkili seviye, tüm üretim grupları için 0°/90°'dir. Kumaş türü ve tabaka sayısı ise sırasıyla tekil grupta K, 4 tabaka; interply grupta K/C, 4 tabaka; intraply grupta ise KC ve 12 tabakadır.

- Darbe testlerinde absorbe edilen enerji açısından; tüm üretim grupları için en etkili faktörler; tabaka sayısı, kumaş türü ve yönlenme açısıdır.

- Tekil üretim grubu en etkili seviyeler; A, 0°/90° ve 12 tabakadır.
- İnterply grup için sırasıyla en etkili seviyeler; A/C, 0°/90°, 12 tabakadır.
- İntraply grup için sırasıyla en etkili seviyeler ise CA, 30°/60°, 12 tabakadır.

Tekil üretim grubu, 0°/90° yönlenme açısına göre yapılan karşılaştırmalar;

- Titreşim Testleri; dört tabakalı numunelerde doğal frekansı en yüksek K iken en düşük olan C'dir. Sönüm oranı değerleri için ise durum tam tersidir. Aynı zamanda kalınlığın artması doğal frekans değerlerini yükseltirken sönüm oranı değerlerini düşürmüştür.
- Çekme Testleri; elastisite modülü değerlerinde büyükten küçüğe K, A, C sıralaması mevcuttur. Ayrıca deneysel sonuçlara göre göre tabaka sayısının artması elastisite modülü değerlerini çok az miktarda etkilemiştir.
- Darbe Testleri, enerji absorbe etme kabiliyeti açısından büyükten küçüğe A, C, K elyaf takviyeli kompozitler şeklinde sıralanmaktadır. Tabaka sayısının artması ile absorbe edilen enerji miktarı artmıştır.
- Üç Nokta Eğilme Testleri, eğilme dayanımı ve eğilme modülü açısından bakıldığında büyükten küçüğe K, C, A sıralaması görülmektedir. Aynı zamanda tabaka sayısının artması ile eğilme dayanımı değerlerinde düşüş görülürken eğilme modülü değerlerinde artış kaydedilmiştir.

Ayrıca bir üst bölümde (4.12. İnterply ve İntraply Karşılaştırması); eşdeğer elyaf içerikleri, aynı yönlenme açısı ve eşit tabaka sayısına sahip interply ile intraply hibrit kompozitler, farklı yükleme özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Her bir durum için daha avantajlı olan hibrit yapılar belirlenmiştir.

Hibrit kompozitlerin kullanılması düşünülen yer ve kullanım esnasında maruz kalacağı yükler göz ardı edilerek tekil kompozitlerden üstün veya yetersiz olduğuna karar vermek

doğru bir yaklaşım değildir. Hibrit bir kompozit yapı, tek elyafli bir kompozit yapının yerine alternatif olarak düşünülmeden önce, aşağıda belirtilen özelliklerden, kullanım alanına göre ilgili olanlarının beraber değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu özellikler kompozitlerin tercih edilmesinde de dikkate alınan aşağıdaki parametrelerdir.

- Hafiflik,
- Rijitlik,
- Dayanıklılık (eğilme, darbe, aşınma, korozyon,...),
- Yorulma ömrü,
- Hasara zorlanma, hasar sonrası davranış,
- İletkenlik (elektrik, ısı),
- Yalıtım,
- Termal özellikler,
- Estetiklik,
- Üretim kolaylığı ve süresi,
- Maliyet,
- Kullanım alanına göre diğer spesifik gereksinimler.

Gelişmiş kompozit malzemelerin hem ekonomik açıdan hem de yapısal olarak daha verimli tasarlanabilmesi için hibritleştirme çalışmaları oldukça önemlidir. Kompozit yapı, kullanım yerinde eksenel yüklere maruz kalacaksa 0° veya 90° 'lik (kuvvet doğrultusunda), kesme yüklerine maruz kalacaksa açılı (45° /- 45° veya $30/60^\circ$ 'lik) yönlenme açılarına sahip elyaf kumaşların kullanılması mantıklı bir yaklaşımdır. Ayrıca kullanım amacı ve yükleme durumlarına göre; darbe yükü için dış tabakada enerji absorbe etme özelliğine sahip elyaf kumaş türleri; eğilmeye maruz kalacaksa uygun elyaf diziliş sırası; doğal frekans ve sönüm özellikleri için uygun miktarda tabaka sayısı; çekme kuvvetine maruz kalacaksa merkezde daha rijit özellikli elyaf kumaş türleri tercih edilebilir. Ayrıca kullanım amacına göre etkili bir tasarım parametresinin intraply hibritleşme olduğu unutulmamalıdır. Dayanıklılık ve etkili kullanım ömrü açısından yapısal kısıtların dikkate alınarak, kumaş türü, yönlenme açısı ve tabaka sayısının doğru seçilmesi oldukça önemlidir.

KAYNAKLAR

- Adams, R. and Bacon, D., 1973. Effect of fibre orientation and laminate geometry on the dynamic properties of CFRP. *Journal of Composite Materials*, 7(4), 402-428.
- Anonymous 2012. Federal Aviation Administration “Chapter 7”. *Advanced Composite Materials Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe*, Volume 1, USA: U.S. Department of Transportation, Flight Standards Service.
- ASTM D3039/D3039M-14, 2013. *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM D790-10, 2010. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM International, PA 19428-2959. United States.
- ASTM D792-13, 2013. *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*, ASTM International, PA 19428-2959. United States.
- ASTM D3763-18, 2018. *Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors*, ASTM International, West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM E756-05, 2010. *Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. United States.
- Athreya, S. and Venkatesh Y.D., 2012. Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters In Improving The Surface Roughness Of Lathe Facing Operation. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 1(3), 13-19.
- Aveston J. and Sillwood J.M., 1976. Synergistic fiber strengthening in hybrid composites. *J Mater Sci*, 11(10), 1877-1883.
- Aydin, M.R. and Gundogdu, O., 2018. Vibration analysis of honeycomb sandwich composites filled with polyurethane foam by Taguchi Method. *Steel and Composite Structures*, 28(4), 461-470.
- Baburaj, V. and Matsuzaki, Y., 1993. Micromechanics and materials damping analysis of an intraply hybrid composite lamina (Conference Paper). *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, Volume 2040, 473-485.
- Baburaj, V. and Matsuzaki, Y., 1994. Material Damping Analysis of a Smart Hybrid Composite Lamina. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5(5), 647-653.
- Barbero E.J., 2017. *Introduction to Composite Materials Design*, Third Edition, CRC Press, 570 p, Broken Sound Parkway NW, USA.
- Benchechou, B. Coni, M. Howarth, H. and White, R., 1998. Some aspects of vibration damping improvement in composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 29, 809-817.
- Berthelot, J.M. and Sefrani, Y., 2004. Damping analysis of unidirectional glass and kevlar fibre composites. *Composites Science and Technology*, 64(9), 1261-1278.

- Berthelot, J.M. Assarar, M. Sefrani, Y. and Mahi, A.E., 2008. Damping analysis of composite materials and structures. *Composite Structures*, 85, 189-204.
- Boopalan, M. Niranjanaa, M. and Umapathy, M.J., 2013. Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 51, 54-57.
- Bulut, M. Bozkurt, Ö.Y. and Erklığ, A., 2016. Damping and vibration characteristics of basalt-aramid/epoxy hybrid composite laminates. *Journal of Polymer Engineering*, 36(2), 173–180.
- Bulut, M. Erklığ, A. and Yeter, E., 2016. Experimental investigation on influence of Kevlar fiber hybridization on tensile and damping response of Kevlar/glass/epoxy resin composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 50(14), 1875–1886.
- Bunsell, A.R. and Harris, B., 1974. Hybrid carbon and glass fibre composites. *Composites*, 5(4), 157–164.
- Callister, W.D. and Rethwisch, D.G., 2014. Chapter 16 Composites. *Materials. Science and Engineering An Introduction*, (9th Edition), Wiley, United States of America.
- Chamis, C.C. Lark, R.F. and Sinclair, J.H., 1981. Mechanical property characterisation of intraply hybrid composites. In *STP734-EB, Test methods and design allowables for fibrous composites*, ed. Chamis, C.C. West Conshohocken, PA, ASTM International, 261–80.
- Chandra R., Singh S.P., Gupta K., 1999. Damping studies in fiber-reinforced composites- a review, *Compos Structure*, 46, 41–51.
- Chung, D., 2003. Structural composite materials tailored for damping. *Journal of Alloys and Compounds*, 355, 216-223.
- Crane, R. and Gillespie, J., 1991. Characterization of the vibration damping loss factor of glass and graphite fiber composites. *Composites Science and Technology*, 40(4), 355-375.
- Davies, I.J. and Hamada, H., 2001. Flexural properties of a hybrid polymer matrix composite containing carbon and silicon carbide fibres. *Advanced Composite Materials*, 10(1), 77-96.
- De Rosa, I.M. Marra, F. Pulci, G. Santulli, C. Sarasini, F. Tirillo, J. and Valente M., 2011. Post-impact mechanical characterisation of E-glass/basalt woven fabric interply hybrid laminates. *Exp Polym Lett*, 5(5), 449–459.
- Dehkordi, M.T. Nosraty, H. Shokrieh, M.M. Minak, G. and Ghelli, D., 2013. The influence of hybridization on impact damage behavior and residual compression strength of intraply basalt/nylon hybrid composites. *Materials & Design*, 43, 283–290.
- Doebling, S. Farrar, C. Prime, M. and Shevitz, D., 1996. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics A literature review. *Tech. Rep.*, Los Alamos National Laboratory.
- Dong, C. and Davies, I.J., 2012. Optimal design for the flexural behaviour of glass and carbon fibre reinforced polymer hybrid composites. *Material Design*, 37, 450–457.
- Dong, C.S. Duong, J. and Davies, I.J., 2012. Flexural properties of S-2 glass and TR30S carbon fiber-reinforced epoxy hybrid composites. *Polym Compos*, 33(5), 773–781.

- Dong, C.S., 2008. Development of a model for predicting the transverse coefficients of thermal expansion of unidirectional carbon fibre reinforced composites. *Appl Compos Mater*, 15(3), 171–182.
- Duratek A.Ş. 2018, <http://www.duratek.com.tr/tr/urunler/kompozit-icin-urunler/laminasyon-recineleri>, (31.08.2019).
- Enfedaque, A. Molina-Aldareguia, J.M. Galvez, F. Gonzalez, C. and Llorca, J., 2010. Effect of glass fiber hybridization on the behavior under impact of woven carbon fiber/epoxy laminates. *J Compos Mater*, 44(25), 3051–3068.
- Finegan, I. and Gibson, R., 2000. Analytical modeling of damping at micromechanical Seviye in polymer composites reinforced with coated fibers. *Compos Sci Technol*, 60, 3-8.
- Giancaspro, J.W. Papakonstantinou, C.G. and Balaguru, P.N., 2010. Flexural response of inorganic hybrid composites with E-glass and carbon fibers. *J Eng Mater Technol*, 8, 021005.
- Gibson, R. Chaturvedi, S. and Sun, C., 1982. Complex moduli of aligned discontinuous fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Materials Science*, 17, 3499-3509.
- Gibson, R., 2011. *Principle of composite material mechanics*. 3rd ed. USA, McGraw-Hill.
- Gürkan, I. and Cebeci, H., 2016. An approach to identify complex CNT reinforcement effect on the interlaminar shear strength of prepreg composites by Taguchi method. *Composite Structures*, 141, 172–178.
- Haneefa, A. Bindu, P. Aravind, I. and Thomas, S., 2008. Studies on tensile and flexural properties of short banana/glass hybrid fiber reinforced polystyrene composites. *J Compos Mater*, 42(15), 1471–1489.
- Harris, B. and Bunsell, A.R., 1975. Impact properties of glass fibre/carbon fibre hybrid composites. *Composites*, 6(5), 197–201.
- Hayashi, T., 1972. On the improvement of mechanical properties of composites by hybrid composition. In: *Proc 8th int reinforced plastics conference*, 149–152.
- Hedgepeth, J.M. and Van Dyke, P., 1967. Local stress concentrations in imperfect filamentary composite materials. *J Compos Mater*, 1(3), 294–309.
- Hedgepeth, J.M., 1961. Stress concentrations in filamentary structures. *NASA TN*, 1–36, D-882.
- Ikbāl, M. H., Ahmed, A., Qingtao, W., Shuai, Z., Wei, L., 2017. Hybrid composites made of unidirectional T600S carbon and E-glass fabrics under quasi-static loading. *Journal of Industrial Textiles*, 46(7), 1511–1535.
- Jang, B.Z. Chen, L.C. Wang, C.Z. Lin, H.T. Zee, R.H., 1989. Impact resistance and energy absorption mechanisms in hybrid composites. *Compos Sci Technol*, 34(4), 305–335.
- Jawaid, M. and Khalil, H., 2011. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites a review. *Carbohydr Polym*, 86(1), 1–18.
- Ji, X. Liu, X.R. and Chou, T.W., 1985. Dynamic stress concentration factors in unidirectional composites. *J Compos Mater*, 19(3), 269–275.
- Jones, R.M., 1999. *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition, Taylor and Francis, 538 p, Boca Raton, USA.

- Khanam, P.N. Reddy, G.R. Raghu, K. and Naidu, S.V., 2010. Tensile flexural, and compressive properties of coir/silk fiber-reinforced hybrid composites. *J Reinf Plast Compos*, 29(14), 2124–2127.
- Kowsika, M.V. and Mantena, P.R., 1999. Static and low-velocity impact response characteristics of pultruded hybrid glass-graphite/epoxy composite beams. *J Thermoplast Compos Mater*, 12(2), 121–132.
- Kretsis, G., 1987. A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of hybrid fibre-reinforced plastics. *Composites*, 18(1), 13–23.
- Kulkarni, R. and Ochoa, O., 2006. Transverse and longitudinal CTE measurements of carbon fibers and their impact on interfacial residual stresses in composites. *J Compos Mater*, 40(8), 733–754.
- Landis, C.M. and McMeeking, R.M., 1999. Stress concentrations in composites with interface sliding, matrix stiffness and uneven fiber spacing using shear lag theory. *Int J Solids Struct*, 36(28), 4333–4361.
- Lee, S. M., 1991. *International Encyclopedia of Composites. Reinforcements*, volume 5. VCH, New York.
- Li, J. and Narita, Y., 2013. Analysis and optimal design for the damping property of laminated viscoelastic plates under general edge conditions. *Compos Part B: Eng*, 45(1), 972–980.
- Maheri, M. and Adams, R., 2002. Modal Vibration Damping Of Anisotropic Frp Laminates Using The Rayleigh–Ritz Energy Minimization Scheme. *Journal of Sound and Vibration*, 259, 17–29.
- Maheri, M.R., 2010. The effect of layup and boundary conditions on the modal damping of FRP composite panels. *Journal of Composite Materials*, 45, 1411–1422.
- Mahi, A.E., Assarar, M., Sefrani, Y. and Berthelot, J-M. 2008. Damping analysis of orthotropic composite materials and laminates. *Composites Part B: Engineering*, 39, 1069–1076.
- Mallick, P.K., 2007. *Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, Third Edition, CRC Press, 638 p, Boca Raton, USA.
- Manders, P.W. and Bader, M.G., 1981. The strength of hybrid glass/carbon fibre composites. Part 1. Failure strain enhancement and failure mode. *J Mater Sci*, 16(8), 2233–2245.
- Manders, P.W. and Bader, M.G., 1981. The strength of hybrid glass/carbon fibre composites. Part 2. A statistical model. *J Mater Sci*, 16(8), 2246–2256.
- Marom, G., Fischer, S. Tuler, F.R. and Wagner, H.D., 1978. Hybrid effects in composites: conditions for positive or negative effects versus rule-of-mixtures behavior. *J Mater Sci*, 13(7), 1419–1426.
- Motoc, D.L. Ivens, J. and Dadirlat, N., 2013. Coefficient of thermal expansion evolution for cryogenic preconditioned hybrid carbon fiber/glass fiber-reinforced polymeric composite materials. *J Therm Anal Calorim*, 112(3), 1245–1251.
- Naik, N.K. Ramasimha, R. Arya, H. Prabhu, S.V. and Shama R.N., 2001. Impact response and damage tolerance characteristics of glass–carbon/epoxy hybrid composite plates. *Compos B Eng*, 32(7), 565–574.
- Nanubala, N. Yadav, M.J. Danduk, C. and Subbu, S.K., 2016. Optimization of drilling parameters of fabricated GFRP composite using Taguchi method. *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, 881–885.

- Ni, R. and Adams, R., 1984. A rational method for obtaining the dynamic mechanical properties of laminae for predicting the stiffness and damping of laminated plates and beams. *Composites*, 15(3), 193-199.
- Nosraty, H. Tehrani-Dehkordi, M. Shokrieh, M.M. and Minak, G., 2015. Intraply Hybrid Composites Based On Basalt and Nylon Woven Fabrics: Tensile and Compressive Properties. *IJMSE*, 12 (1), 1-11.
- Park, R. and Jang, J., 2000. Effect of laminate geometry on impact performance of aramid fiber/polyethylene fiber hybrid composites. *J Appl Polym Sci*, 75(7), 952-959.
- Park, R. and Jang, JS., 2001. Impact behavior of aramid fiber glass fiber hybrid composite: evaluation of four-layer hybrid composites. *J Mater Sci*, 36(9), 2359-2367.
- Pegoretti, A. Fabbri, E. Migliaresi, C. and Pilati, F., 2004. Intraply and interply hybrid composites based on E-glass and poly(vinyl alcohol) woven fabrics: tensile and impact properties. *Polymer International*, 53, 1290-1297.
- Petrucci, R. Santulli, C. Puglia, D. Sarasini, F. Torre, L. and Kenny, J.M., 2013. Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion. *Material & Design*, 49, 728-735.
- Phillips, L.N., 1976. The hybrid effect – does it exist?. *Composites*, 7(1), 7-8.
- Phillips, M.G., 1981. Composition parameters for hybrid composite materials. *Composites*, 12(2), 113-116.
- Phillips, M.G., 1982. On composition parameters for hybrid composite materials. *Composites*, 13(1), 18-20.
- Pimenta, S. and Pinho, S.T., 2013. Hierarchical scaling law for the strength of composite fibre bundles. *J Mech Phys Solids*, 61(6), 1337-1356.
- Rajesh, M. and Pitchaimani, J., 2016. Dynamic mechanical analysis and free vibration behavior of intra-ply woven natural fiber hybrid polymer composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(3), 228-242.
- Rao, SS., 2011. *Mechanical Vibration*, Fifth Edition, Pearson, 1104 p, New York, USA.
- Ren, PG. Zhang, ZP. Xie, L. Ren, F. Jin, YL. Di, YY. and *et al.*, 2010. Hybrid effect on mechanical properties of M40-T300 carbon fiber reinforced Bisphenol A Dicyanate ester composites. *Polym Compos*, 31(12), 2129-2137.
- Rosen, BW., 1964. Tensile failure of fibrous composites. *AIAA J*, 2(11), 1985-1991.
- Samal, S.K., Mohanty, S. Nayak, S.K., 2009. Banana/Glass Fiber-Reinforced Polypropylene Hybrid Composites: Fabrication and Performance Evaluation, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 48(4), 397-414.
- Sayer, M. Bektas, N.B. and Sayman, O., 2010. An experimental investigation on the impact behavior of hybrid composite plates. *Compos Struct*, 1256-1262.
- Sevkat, E. Liaw, B. Delale, F. and Raju, BB., 2009. Drop-weight impact of plain-woven hybrid glass-graphite/toughened epoxy composites. *Compos A Appl Sci Manuf*, 40(8), 1090-1110.
- Sevkat, E. Liaw, B. Delale, F. and Raju, BB., 2010. Effect of repeated impacts on the response of plain-woven hybrid composites. *Compos Part B – Eng*, 41(5), 403-413.
- Shindo, A., 1964. On the carbonization of polyacrylonitrile fiber. *Carbon*, 1(3), 391-392.
- Sutharson, B. Rajendran, M. and Karapagaraj, A., 2012. Optimization of natural fiber/glass reinforced polyester hybrid composites laminate using Taguchi

- methodology. *International Journal of Materials and Biomaterials Applications*, 2(1), 1-4.
- Swolfs, Y. Gorbatiikh, L. and Verpoest, I., 2014. Fibre hybridisation in polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 67, 181–200.
- Talbot, J. and Woodhouse, J., 1997. The vibration damping of laminated plates. *Compos Part A, Appl Sci Manuf*, 97, 1007-1012.
- Tang, M.M. and Bacon, R., 1964. Carbonization of cellulose fibers – 1. Low temperature pyrolysis. *Carbon*, 2(3), 211–220.
- Thakare, P. Kumar, N. Ugale, V., 2019. The effect of hybridization on mechanical behaviour of kevlar and natural fiber reinforced composite, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 9(3), 507-516.
- Vazquez, A. Ambrustolo, M. Moschiar, S. Reboredo, M. and Gerard, J., 1998. Interphase modification in unidirectional glass-fiber epoxy composites. *Compos Sci Technol*, 58, 549-558.
- Vinay, H.B. Govindaraju, H.K. and Banakar, P., 2014. Review Paper A Review on Investigation on the Influence of Reinforcement on Mechanical Properties of Hybrid Composites. *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol*, 24(2), 39-48.
- Wisnom, M.R. Atkinson, J.W. and Jones, M.I., 1997. Reduction in compressive strain to failure with increasing specimen size in pin-ended buckling tests. *Compos Sci Technol*, 57(9–10), 1303–1308.
- Wisnom, M.R., 1991. The effect of specimen size on the bending strength of unidirectional carbon fibre-epoxy. *Compos Struct*, 18(1), 47–63.
- Wonderly, C. Grenestedt, J. Fernlund, G. and Čepus, E., 2005. Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites. *Compos B Eng*, 36(5), 417–426.
- Wu, W. Wang, Q. Ichenihi, A. Shen, Y. Li, W., 2018. The Effects of Hybridization on the Flexural Performances of Carbon/Glass Interlayer and Intralayer Composites. *Polymers*, 10, 549, 1-18.
- Xia, Y. and Ruiz, C., 1991. Analysis of damage in stress wave loaded unidirectional composites. *Comput Struct*, 38(3), 251–258.
- Xing, J. Hsiao, G.C. and Chou, T.W., 1981. A dynamic explanation of the hybrid effect. *J Compos Mater*, 15(SEP), 443–461.
- Yeter, E. Erklığ, A. and Bulut, M., 2014. Hybridization effects on the buckling behavior of laminated composite plates. *Composite Structures*, 118, 19–27.
- Ying, S., Mengyun, T., Zhijun, R., Baohui, S., Li, C., 2017. An experimental investigation on the low-velocity impact response of carbon–aramid/epoxy hybrid composite laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(6), 422–434.
- Zhang, C. Rao, Y. Li, Z. Li, W., 2018. Low-Velocity Impact Behavior of Interlayer/Intralayer Hybrid Composites Based on Carbon and Glass Non-Crimp Fabric. *Materials*, 11, 2472, 1-12.
- Zhang, J. Chaisombat, K. He, S. and Wang, CH., 2012. Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. *Mater Des*, 36, 75-80.

- Zhang, Y. Li, Y. Ma, H. and Yu, T., 2013. Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites. *Compos Sci Technol*, 88, 172–177.
- Zweben, C., 1977. Tensile strength of hybrid composites. *J Mater Sci*, 12(7), 1325–1337.



ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Van'ın Çatak ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini doğduğu ilçede tamamladı. 1998 yılında başladığı Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünden 2002 yılında mezun oldu. 2010 yılına kadar özel sektörde çalıştı. 2010 yılında Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde ÖYP kapsamında Arş. Gör. olarak göreve başladı. 2011-2013 yıllarında Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Teorisi ve Dinamiği Anabilim dalında yüksek lisans yaptı. 2013 yılında aynı anabilim dalında doktora programına başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır.