

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ali ARI



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ali ARI
<https://orcid.org/0000-0003-2702-2982>

Prof. Dr. Ali BAYRAM
(Danışman)
<https://orcid.org/0000-0001-7311-8358>

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Ali ARI tarafından hazırlanan ‘‘Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi’’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ali BAYRAM

Başkan : Prof. Dr. Ali BAYRAM İmza
0000-0001-7311-8358
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Hakan AYDIN İmza
0000-0001-7364-6281
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Abdil KUŞ İmza
0000-0002-4626-0719
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Harun MİNDİVAN İmza
0000-0003-3948-253X
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emre ESENER İmza
0000-0001-5854-4834
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././.....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../.../.....

Ali ARI

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Ali BAYRAM
Tarih

Ali ARI
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Doktora Tezi

POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ali ARI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali BAYRAM

Bu çalışmada, kırılmış cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli polipropilen, polietilen, poliamid 6 ve poliamid 12 kompozitlerinin mekanik özelliklerinin değerlendirmesi yapılmıştır. Aynı imalat yöntemi ve koşulları altında kompozit elemanların hacimsel oranları değiştirilerek kompozitlerde varyasyonlar elde edilmiştir. Takviye ve matris malzemeleri ekstrüzyon yöntemiyle karıştırıldıktan sonra pres kalıplama tekniği ile kompozit malzemeler plaka şeklinde üretilmiştir. Daha sonra üretilen kompozitlerin çekme, 3 nokta eğilme, düşme ağırlık ve sertlik testleri gerçekleştirilmiş ve kırık yüzeylerin yüzey morfolojisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Daha sonra her bir değişkenin (elyaf ve matris tipi, elyaf katkı içeriği) test sonuçları üzerindeki etkinliğini gözlemlemek için S/N değerleri kullanılarak ANOVA analizi ve F-Testi gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan F değerleri, kritik F değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür. Hedeflenen %95 güven seviyesini sağlanmıştır. Elde edilen deneysel verileri en küçük kareler optimizasyon yöntemiyle matematiksel model geliştirilmiştir. Son olarak deney sonuçlarına göre en uygun karışımın mekanik özellikleri kullanılarak, doğalgaz altyapısında kullanılan PE125 borunun sonlu elemanlar metodu ile numerik analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cam-karbon-aramid elyaf, Polimer matris, Mekanik özellikler, ANOVA analizi, Matematiksel Model, PE125 Boru

2022, xiv + 115 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS

Ali ARI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali BAYRAM

In this study, a comparative assessment of the mechanical properties of chopped carbon fiber reinforced polypropylene, polyethylene, polyamide 6, and polyamide 12 composites was performed. Variation on the composites was obtained by changing the volumetric ratios of the composite elements under the same manufacturing method and conditions. After blending reinforcement and matrix materials by using the extrusion method, the composite materials were manufactured in the shape of plates by the press molding technique. Then, tensile, 3-point bending, drop weight, and hardness tests of the manufactured composites were carried out, and surface morphology of the fractured surfaces was examined by Scanning Electron Microscope (SEM). ANOVA analysis using S/N values, and F-Test were performed to observe the effectiveness of each test factor (matrix, fiber, and additive content) on the test results. The calculated F values were greater than the critical F values and provided the targeted 95% confidence level. A mathematical model was developed using the least squares optimization method of the obtained experimental data. Finally, numerical analysis of the PE125 pipe used in the natural gas infrastructure was carried out using the finite element method, using the mechanical properties of the most suitable mixture according to the test results.

Key words: Glass-carbon-aramid fiber, Polymer-matrix composites, Mechanical properties, ANOVA analysis, polynomial- cubic model, PE125 Pipe

2022, xiv + 115 pages.

TEŐEKKÖR

Bu tez alıőmasının yűrűtűlmesinde; maddi ve manevi desteęini esirgemeyen deęerli hocam Prof. Dr. Ali Bayram'a, numunelerin hazırlanmasında ve testlerin yapılmasında destek veren; Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi Danıőmanı Prof. Dr. Mehmet Karahan ve Umur Gűngör'e, her anımda yanımda olan ve desteklerini bir an bile esirgemeyen deęerli eőim Amine'ye, hayat boyu bana yol gűsteren annem ve babama teőekkűrlerimi sunarım.

Ali ARI

19/07/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler.....	5
2.1.1. Termosetler.....	5
2.1.2. Termoplastikler.....	5
2.1.3. Takviye elemanları.....	6
2.1.4. Arayüzey Bağlanmsı.....	7
2.1.5. Mekanik bağ.....	8
2.1.6. Elektrostatik Bağlama.....	9
2.1.7. Kimyasal Bağ.....	10
2.1.8. Difüzyon Bağı.....	10
2.2. Elyaf Uzunluğu.....	10
2.3. Elyaf Yoğunluğu ve Yönelmesinin Etkisi.....	13
2.3.1. Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	13
2.3.2. Süreksiz (Kısa) Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	15
2.3.2.1. Yönlenmiş Elyaf Kompozitler.....	15
2.3.2.2. Rastgele Yönlenmiş Elyaf Kompozitler.....	15
2.4. Elyaf Fazı.....	16
2.4.1. Cam Elyaf.....	17
2.4.2. Karbon Elyaf.....	19
2.4.3. Aramid Elyaf.....	20
2.5. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Teknikleri.....	20
2.5.1. Enjeksiyon ile kalıplama yöntemi.....	21
2.5.2. Ekstrüzyon ile Kalıplama Yöntemi.....	22
2.6. Kompozitlerde Görülen Tipik Hatalar.....	22
2.6.1. Gözeneklilik.....	22
2.6.2. Elyaf/Matris Dağılımı.....	23
2.6.3. Elyaf Hacim Oranı.....	23
2.6.4. Elyaf Yönlendirme.....	24
2.6.5. Elyaf Dalgalanması.....	24
2.6.6. Delaminasyon.....	24
2.7. Kaynak Araştırması.....	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
3.1. Materyal.....	29
3.2. Yöntem.....	29
3.2.1. Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Plakaların Üretimi.....	29
3.2.2. Mekanik Testler.....	32

3.2.2.1. Çekme Testi	32
3.2.2.2. 3 Nokta Eğme Testi.....	35
3.2.2.3. Düşen Ağırlık Darbe Testi	36
3.2.2.4. Shore D Sertlik Testi	39
3.2.2.5. Taramalı Elektron Mikroskobu	40
3.2.3. Deneysel Tasarım ve ANOVA Analizi	41
3.2.3.1. Deneysel Tasarım.....	41
3.2.3.2. ANOVA Analizi.....	43
3.2.2.7.3. Matematiksel Model Oluşturma.....	45
3.2.4. Sonlu Elemanlar Metodu.....	46
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	48
4.1. Çekme Özellikleri ve Fractography	48
4.2. 3 Nokta Eğme Özellikleri.....	59
4.3. Düşen Ağırlık Darbe Özellikleri ve Fractography	61
4.4. Sertlik Özellikleri	68
4.5. Deneysel Sonuçların Analizi	71
4.6. Matematiksel Modelleme ve Regresyona Göre Veri Analizi	77
4.7. Kompozit Boruların Sonlu Elemanlar Analizi	90
4.7.1. Malzeme Tanımlama.....	91
4.7.2. 3D Model Oluşturma.....	91
4.7.3. Mesh Oluşturma	92
4.7.4. Sınır Şartlarının Tanımlanması	94
5. SONUÇ	101
6. KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	113

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
l_{kri}	Kritik elyaf boyu,
d	Elyaf çapı,
σ_e	Elyafın çekme dayanımı,
σ_k	Kompozitin çekme dayanımı
σ_m	Matrisin çekme dayanımı
σ_f	Eğilme gerilmesi
τ_c	Elyaf-matris ara yüzey bağ dayanımı veya matrisin akma dayanımıdır.
λ_e	Elyaf verim faktörü
V_e	Kompozitin elyaf hacim oranı
F	Çekme kuvveti
Δl	Numunede meydana gelen uzama,
b	Numunenin genişliği
L	Mesnetler arası uzunluk
E	Enerji
m	Vurucunun kütlesi
g	Yerçekimi
S/N	Sinyal/gürültü
y	Ölçüm değeri
n	Deney sayısı
η_i	Ölçülen değer üzerinden hesaplanan sinyal-gürültü oranı
η_m	Ölçülen değer üzerinden hesaplanan sinyal-gürültü oranlarının ortalaması
R	Korelasyon katsayısı
R^2	Belirleme katsayısı
ρ	Yoğunluk
T_g	Cam geçiş sıcaklığı
Kısaltmalar	Açıklama
PP	Polipropilen
PE	Polietilen
PA6	Poliamid 6
PA12	Poliamid 12
CE	Cam Elyaf
KE	Karbon Elyaf
AE	Aramid Elyaf
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EN	EuroNorm
ISO	International Organization for Standardization
ANOVA	Analysis of Variance
ANSYS	Analysis system
TS	Türk standartları
RTM	Reçine transfer kalıplama
RIM	Reaksiyon enjeksiyonlu kalıplama
FEM	Finite Element Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Ara yüzey bağlama mekanizmalarının şematik diyagramları: (a) mekanik bağlama (b) elektrostatik bağlama; (c) kimyasal bağlama (R ve X, uyumlu kimyasal grupları temsil eder); (d) bir silan bağlama maddesine uygulanan kimyasal bağlama; (e) polimerleri içeren reaksiyon bağlaması; (f) interdifüzyon tarafından oluşturulan arayüzey tabakası (S. J. Park ve Seo 2011).....	9
Şekil 2.2. Çekme gerilmesine maruz kalan bir elyafı saran matristeki şekil değişimi (Callister ve Rethwisch 2015)	11
Şekil 2.3. Elyaf takviyeli kompozite elyafın σ^* 'sine eşit bir çekme gerilmesi uygulanması durumunda elde edilen gerilme-konum değişimi, elyaf uzunluğu l a) kritik elyaf boyutunda l _{krt} b) kritik elyaf boyutundan uzun c) kritik elyaf boyutundan kısa (Callister ve Rethwisch 2015) ..	12
Şekil 2.4. Elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi a) Sürekli ve çekme doğrultusunda yönlenmiş b) Süreksiz ve çekme doğrultusunda yönlenmiş c) Süreksiz ve rastgele doğrultusunda yönlenmiş (Callister ve Rethwisch 2015)	13
Şekil 2.5. a) Gevrek elyaf ve sünek matrise ait gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin şematik gösterimi. Her iki bileşen için de kırılma gerilmesi ve birim şekil değişimi değerleri belirtilmiştir, b) yükün elyafın yönlendiği doğrultuda uygulandığı boylam (Callister ve Rethwisch 2015).....	14
Şekil 2.6. Enjeksiyon şematik görünümü (Osswald, Tim A, Gandhi 2020)	21
Şekil 2.7. Ekstrüzyon şematik görünümü	22
Şekil 2.8. Kompozit malzemenin gözenekliliği (Kers ve ark. 2007).....	23
Şekil 2.9. Kompozit malzemede elyaf dalgalanması (S. J. Park ve Seo 2011) ...	24
Şekil 2.10. Kompozit malzemede deleminasyon (S. J. Park ve Seo 2011)	25
Şekil 3.1. Polmak Plastik 22 mm Lab tipi araştırma ekstrüderi ile kompozit malzeme üretimi	30
Şekil 3.2. Granür haline getiren kompozitlerin sıcak preslemek için kalıba yerleştirilmesi	31
Şekil 3.3. Pres kalıplama metodu ile 500mmx500mm kompozit plakalar	31
Şekil 3.4. Çekme testi numunesi için EN ISO 527-2 geometrisi.....	33
Şekil 3.5. Besmak-BMT 100E marka Universal Çekme Test Cihazı.....	34
Şekil 3.6. Çekme testi numuneleri	34
Şekil 3.7. 3 Nokta Eğme Deneyi Düzeneği (Askeland ve Phule 2010)	35
Şekil 3.8. SHIMADZHU marka üç nokta eğme test cihazı.....	36
Şekil 3.9. Instron/CEAST 9340 marka darbe testi cihazı	38
Şekil 3.10. Hildebrand marka sertlik ölçüm cihazı.....	40
Şekil 4.1. a) PP, b) PE, c) PA6, d) PA12 matrisli kompozitlerin çekme deneyi sonuçları	51
Şekil 4.2. a) CE, b) KE, c) AE takviyeli kompozitlerin elyaf verim faktörleri ..	53
Şekil 4.3. Kompozit malzemenin deformasyon da oluşan matris-elyaf davranışları	54
Şekil 4.4. %30 elyaf takviyeli PP kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE	55

Şekil 4.5.	%30 elyaf takviyeli PE kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE.....	56
Şekil 4.6.	%30 elyaf takviyeli PA6 kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE.....	57
Şekil 4.7.	%30 elyaf takviyeli PA12 kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE.....	58
Şekil 4.8.	a) PP, b) PE, c) PA6, d) PA12 matrisli kompozitlerin 3 nokta eğme deneyi sonuçları.....	61
Şekil 4.9.	a) PP, b) PE, c) PA6, d) PA12 matrisli kompozitlerin düşen ağırlık darbe deneyi sonuçları.....	63
Şekil 4.10.	%30 elyaf takviyeli PP kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE.....	65
Şekil 4.11.	%30 elyaf takviyeli PE kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE.....	66
Şekil 4.12.	%30 elyaf takviyeli PA6 kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE.....	67
Şekil 4.13.	%30 elyaf takviyeli PA12 kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE.....	68
Şekil 4.14.	a) PP, b) PE, c) PA6, d) PA12 matrisli kompozitlerin Shore D sertlik deneyi sonuçları.....	71
Şekil 4.15.	Çekme Dayanımı için S/N Oranları.....	74
Şekil 4.16.	Eğilme Dayanımı için S/N Oranı.....	74
Şekil 4.17.	Düşen Ağırlık için S/N Oranı.....	75
Şekil 4.18.	Sertlik için S/N Oranı.....	75
Şekil 4.19.	Model 1 ve Model 2'nin çekme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PP matrisli kompozitler için).....	82
Şekil 4.20.	Model 1 ve Model 2'nin 3 nokta eğme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PP matrisli kompozitler için).....	83
Şekil 4.21.	Model 1 ve Model 2'nin düşen ağırlık deney sonuçları ile karşılaştırılması (PP matrisli kompozitler için).....	83
Şekil 4.22.	Model 1 ve Model 2'nin sertlik deney sonuçları ile karşılaştırılması (PP matrisli kompozitler için).....	84
Şekil 4.23.	Model 1 ve Model 2'nin çekme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PE matrisli kompozitler için).....	84
Şekil 4.24.	Model 1 ve Model 2'nin 3 nokta eğme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PE matrisli kompozitler için).....	85
Şekil 4.25.	Model 1 ve Model 2'nin düşen ağırlık deney sonuçları ile karşılaştırılması (PE matrisli kompozitler için).....	85
Şekil 4.26.	Model 1 ve Model 2'nin sertlik deney sonuçları ile karşılaştırılması (PE matrisli kompozitler için).....	86
Şekil 4.27.	Model 1 ve Model 2'nin çekme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA6 matrisli kompozitler için).....	86
Şekil 4.28.	Model 1 ve Model 2'nin 3 nokta eğme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA6 matrisli kompozitler için).....	87
Şekil 4.29.	Model 1 ve Model 2'nin düşen ağırlık deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA6 matrisli kompozitler için).....	87
Şekil 4.30.	Model 1 ve Model 2'nin sertlik deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA6 matrisli kompozitler için).....	88

Şekil 4.31.	Model 1 ve Model 2'nin çekme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA12 matrisli kompozitler için).....	88
Şekil 4.32.	Model 1 ve Model 2'nin 3 nokta eğme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA12 matrisli kompozitler için)	89
Şekil 4.33.	Model 1 ve Model 2'nin düşen ağırlık deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA12 matrisli kompozitler için)	89
Şekil 4.34.	Model 1 ve Model 2'nin sertlik deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA12 matrisli kompozitler için).....	90
Şekil 4.34.	Solidworks prgramında PE125 ölçülerinde boru çizimi	92
Şekil 4.35.	PE125 borunun mesh yapısı ve mesh kalite analizi a) Element Quality kriteri, b) Aspect Ratio kriteri ve c) Skewness kriteri	94
Şekil 4.36.	PP + %30 CE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı	94
Şekil 4.37.	PP + %30 KE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı	95
Şekil 4.38.	PP + %30 AE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı	95
Şekil 4.39.	PE + %30 CE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı	96
Şekil 4.40.	PE + %30 KE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı.....	96
Şekil 4.41.	PE + %30 AE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı.....	97
Şekil 4.42.	PA6 + %30 CE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı.....	97
Şekil 4.43.	PA6 + %30 KE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı	98
Şekil 4.44.	PA6 + %30 AE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı	98
Şekil 4.45.	PA12 + %30 CE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı	99
Şekil 4.46.	PA12 + %30 KE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı	99
Şekil 4.47.	PA12 + %30 AE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1.	Elyaf yönüne göre elyaf verim katsayısı 15
Çizelge 2.3.	Bazı elyaf takviye malzemelerin özellikleri (Callister ve Rethwisch 2015) 17
Çizelge 2.4.	E-Cam ve S-Cam Elyafının Kimyasal Bileşimi 18
Çizelge 2.5.	Kevlar Elyafının Özellikleri 20
Çizelge 3.1.	Matris ve elyaf malzemelerin mekanik özellikleri 29
Çizelge 3.2.	Ekstrüzyon üretim parametreleri 32
Çizelge 3.3.	Pres kalıplama üretim parametreleri 32
Çizelge 3.4.	Deney faktörleri ve seviyeleri 41
Çizelge 3.5.	Deneysel tasarımı 42
Çizelge 4.1.	Deney sonuçlarının S/N oranları 72
Çizelge 4.2.	Çekme Testi için ANOVA Tablosu 75
Çizelge 4.3.	3 Nokta Eğme Testi için ANOVA Tablosu 76
Çizelge 4.4.	Düşen Ağırlık Testi için ANOVA Tablosu 76
Çizelge 4.5.	Sertlik Testi için ANOVA Tablosu 76
Çizelge 4.6.	PP matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller 77
Çizelge 4.7.	PE matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller 78
Çizelge 4.8.	PA6 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller 79
Çizelge 4.9.	PA12 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller 81
Çizelge 4.10.	%30 takviyeli kompozit malzemelerin yoğunlukları 91
Çizelge 4.10.	Doğalgaz alt yapı çalışmalarında standart olarak kullanılan dış çap 125 mm boru ölçüleri 92

1. GİRİŞ

Polimer matrisli kompozit malzemelerin havacılık, otomotiv, inşaat ve silah sanayisi gibi çok çeşitli alanlarda mühendislik uygulamaları vardır (Materials 2010). Kırpılmış elyaf takviyeli polimer kompozitler, imalat kolaylığı, ekonomikliği ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle çok cazip hale gelmiştir. Kırpılmış elyaf takviyeli polimer kompozitlerin üretiminde ekstrüzyon birleştirme ve enjeksiyonla kalıplama işlemleri sıklıkla kullanılmaktadır (Siva ve ark. 2021). Genel olarak, yüksek performanslı bir kompozit elde etmek için yüksek elyaf oranı gerekir. Bu nedenle, elyaf oranı kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi özellikle önemlidir (Shao Yun Fu ve Lauke 1998b). Elyaf oranının artması mukavemet özelliklerini önemli derecede arttırmaktadır (Shao Yun Fu ve Lauke 1998a). Kompozitlerin mukavemet, elastisite modül ve tokluk gibi mekanik özellikleri genel olarak artan kırpılmış elyaf uzunluğu ile artar, bu nedenle kompozitin mekanik özelliklerini matris ve elyafın oranları belirlediği gibi kırpılmış elyafın boyutları da önemli bir etkidir (S. Y. Fu ve ark. 1999). Ayrıca elyafın ve matrisin kimyasal yapıları, ara yüzey yapışmasının derecesini belirler. Maksimum güçlendirme elde etmek için, elyaflara kimyasal işlem veya plazma işlemi uygulanması gerekmektedir (Saikrasun ve ark. 1999), (Zhao ve ark. 2012).

Kompozit malzemeleri oluşturan elyaf veya matris ile elde edilemeyen mekanik davranışlar gösterirler. Elyaf takviyeli kompozitler, tüm mühendislik uygulamaları için yıllar boyunca başarıyla kullanılmıştır (F. O. ve ark. 2013), (Mathew ve ark. 2007). Özellikle kırpılmış elyaf takviyeli kompozitler mühendislik çalışmalarında yaygındır (Tarani ve ark. 2016), (Weidenfeller ve ark. 2004), (Coleman ve ark. 2006). Ayrıca günümüzde, polietilen, polipropilen ve poliamid matris elemanları ile yapılan kompozitlerin birçok mühendislik uygulamaları vardır (Delli ve ark. 2021).

Cam elyaf takviyeli polimer kompozitler çok çeşitli alanlarda tercih edilmektedir (Sathishkumar ve ark. 2014). Cam elyaflar, yüksek mukavemet, esneklik, sertlik ve kimyasal direnç gibi özelliklere sahiptir (Sakin ve ark. 2008). Bununla beraber, her cam elyaf türü farklı özelliklere sahiptir ve polimer ile çeşitli uygulamaları vardır (Prasanna ve ark. 2019). Çeşitli cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik, tribolojik, termal ve titreşim özellikleri inceleyen çalışmalar vardır (López ve ark. 2012), (Erden ve

ark. 2010). Elyaf takviyeli kompozitin mekanik davranışı temel olarak elyafın mukavemetine, kimyasal kararlılığına, matris mukavemetine ve gerilim aktarılmasını sağlamak için elyaf ile matris arasındaki ara yüz bağına bağlıdır (Awan ve ark. 2009).

Sürekli cam elyaflar, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık gerektiren boru üretiminde kullanılmaktadır (Imes ve ark. 2018). Sürekli cam elyaflar ile güçlendirilmiş polipropilen kompozitler, elyafların sertleştirici etkisi nedeniyle saf polipropilen ile karşılaştırıldığında elastisite modülü daha yüksektir (Chen ve ark. 2018). Bununla birlikte, sürekli cam elyaflar, kompozitlerin işleme ve şekillendirme yeterliliğini kısıtlamaktadır. Rastgele yönlendirilmiş uzun (5 ila 25 mm) (Mallick 2017) arasında değişen) ve kısa (3 mm'den kısa) elyaf takviye edilmiş kompozitlerin üretiminde enjeksiyon yöntemi kullanımı yaygındır (Mallick 2017). Bu yöntem kısa cam elyaf takviyeli kompozitlerin üretilmesinde esneklik ve ayrıca önemli mukavemet değerleri sağlar (Harmia ve ark.), (Spahr ve ark. 1990). Bu nedenle, kısa elyaflar ile güçlendirilmiş polimer kompozitler, boru üretimde kullanılmaktadır (Mouzakis ve ark. 2000), (Xie ve ark. 2005). Bununla birlikte, elyaf uzunluğu, mekanik yükün polimer matristen elyafa aktarılması için gereken kritik uzunluktan daha düşük olduğunda polimer takviyesi başarısız olur. Ayrıca, yüksek elyaf oranı ve zayıf elyaf-matris etkileşimi, matris çatlaklarının genişlemesi (S. Y. Fu ve ark. 2000) ve bunun neticesinde düşük yük taşıma kapasitesi nedeniyle istenmeyen performans gösterir (Akindoyo ve ark. 2021).

Kırpılmış karbon elyaf polimer kompozitlerin uygulamaları da hızla artmaktadır ve bu malzemelerden yapılan kompozitlerin çoğu dinamik yüklemeye maruz kalmaktadır. Hafifliği, çekme dayanımı, sertliği, olağanüstü aşınma direnci, kısa kalıplama süreleri gibi yüksek mekanik özellikleri nedeniyle otomobil ve uçakların yapısal parçalarında kullanılır. Karbon elyaf takviyeli kompozitin üretiminde enjeksiyon ve ekstrüzyon yöntemi yaygındır. Kompozitler, kırpılmış karbon elyaf ve polimerin yüzdesine göre tatmin edici sonuçlar vermektedir (Choudhari ve Kakhandki 2020).

Son zamanlarda, aramid elyaf takviyeli polimer kompozitler çok tercih edilmektedir. Yüksek mukavemet değerleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle mühendislik alanlarında tercih edilme nedeni olmuştur (Day ve ark. 2002), (İçten ve ark. 2006). Elyaf ve matris

arasındaki ara yüzey yapışmasını iyileştirmek için aramid elyaf yüzeyini modifiye etmek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Qi ve ark. 2018). Aramid elyaf yüzey modifikasyonunun amacı, yüzeyin kimyasal aktivitesini iyileştirmek, yüzey pürüzlülüğünü arttırmak ve elyaf ile matris arasında mükemmel bir kimyasal bağ ve mekanik kenetlenme sağlamaktır (Vara Prasad ve Talupula 2018), (Yang ve ark. 2019).

Doğalgaz şebekesindeki 19 barlık iletim hatlarında mevcut çelik borular kullanılmaktadır (Arı ve Bayram 2021a). Ancak, çelik boruların üretiminde termin süresinin uzun olması, tasarımında birçok kısıt bulunması, sahadaki imalat aşamasında iş güvenliği, korozyon hasarı, kaynaktan çıkan sorunlar, imalat süresi ve bakım gibi birçok dezavantajları bulunmaktadır (Imes ve ark. 2018). Bu sebeplerden dolayı araştırmacılar iletim hatlarında farklı boru tasarımlarının uygulanabilirliğini araştırmaktadırlar (Canadian Association of Petroleum Producers 2017).

Bu çerçevede son yıllardaki çalışmalar çeşitli elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit borular üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak, uygulama hala sınırlıdır. Pek çok nedenden dolayı sahada kompozit boru henüz tam olarak kullanılamamıştır (Arı ve Bayram 2021b). Araştırmacılar polimer borunun mukavemet, sertlik, korozyon direnci, aşınma özellikleri ve uzun vadeli davranış özelliklerini belirlemeye çalışmaktadırlar (Lohmar 2006).

Literatürde çoğunlukla cam ve karbon elyaf kullanılarak filament sargı üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Fakat bu borular orta basınçlı şebekede kullanmak fayda-maliyet yönünden uygun değildir

Kompozit malzemeler dünya çapında boru hatlarında yaygın olarak kullanılarak işletme sorunlarının üstesinden gelmektedir. Kompozit borular, çeşitli uygulamalarda; su, petrol ve doğal gaz hatlarında önemli hale gelmektedir (Taheri 2013). Çelik boru hatlarında oluşan korozyon, boruların mekanik özelliklerini etkilemektedir (Beklemysheva ve ark. 2018). Hem korozyon hem de aşınma önemli kayıplara neden olur ve boru hatlarının yapısal bütünlüğünü zarar verir. Çelik boru hattındaki korozyon iki tipte sınıflandırılabilir. Bunlar dış ve iç korozyonlardır. Dış korozyon genellikle organik kaplama ve katodik koruma kullanılarak kısmen önlenir (Popoola ve ark. 2013). Uzun

vadede, mevcut teknoloji iç korozyonu engelleme konusunda yeterli değildir. Yüksek basınçlı hatlarda kompozit malzemelerin kullanımı petrol ve gaz endüstrisinde uzun yıllardır araştırma konusudur. Mevcut teknoloji, özellikle güvenilirliği ve dayanıklılığı artırmak için tamamen çelik veya kompozit borulara alternatiflerin arandığı daha yüksek basınçlarda ve daha ağır koşullarda (yani aşındırıcı ortamlar) dağıtım maliyeti açısından işletme hedeflerini tam olarak karşılamamıştır (Alabtah ve ark. 2021).

Bu çalışmanın temel amacı, doğal gaz hatlarında ki 19 bar basınçlı şebekede ki basınçlara dayanıklı hem üretimi kolay ve hızlı hem de maliyet açısından tercih edilebilir bir ürün geliştirilmesidir. Bunu için çalışmamızda kırılmış cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli polipropilen (PP), polietilen (PE), poliamid 6 (PA6) ve poliamid 12 (PA12) kompozitlerinin mekanik özelliklerini değerlendirmek için karşılaştırmalı bir çalışma yapmaktır. Bunu yapmak için odak noktası, kompozitlerin çekme, 3 noktalı eğilme, ağırlık düşürme ve sertlik özelliklerini derinlemesine araştırılmıştır. Bu kapsamda her bir PP, PE, PA6 ve PA12 matris elemanına elyaf hacimleri %10, %20 ve %30 oranlarında kırılmış elyaf takviye malzemesi ilave edilerek aynı imalat yöntemi ve koşullarında 36 farklı kompozit malzeme üretilmiştir. Test sonuçları, deneysel verilere uydurularak matematiksel ifade elde etmek için en küçük kareler optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Son olarak da sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tasarlanan borunun sayısal analizi yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitler, matris malzemesi ve takviye edici elyaflardan oluşan en az iki bileşenin kombinasyonu ile tanımlanan bir malzeme sınıfıdır. Kompozitler, matris ve elyafı bileşenlerin performansını ve yeteneklerini aşan gelişmiş özelliklere sahiptir (Kaw ve Group 2006).

Matrisler, elyafları birbirine bağlamayı, elyafları çevreden korumayı, darbeler karşı korumayı ve yükü elyaflara dağıtmayı sağlar. Matrisler genellikle elyaflarla karşılaştırıldığında düşük mekanik özelliklere sahip olsalar da kompozitlerin basma mukavemeti, kesme mukavemeti, termal genleşme katsayısı, termal direnç ve yorulma mukavemeti gibi birçok mekanik özelliğini etkiler (Şahin Yusuf 2022).

Matris malzemesi yüksek sıcaklıklardaki davranışına göre termoplastik ve termoset polimerler olarak sınıflandırılır.

2.1.1. Termosetler

Termoset reçine veya termoset polimerler olarak da adlandırılan termoset plastikler, tipik olarak oda sıcaklığında sıvıdır. Bu malzemeler ısıtılıp veya kimyasal bir ilave ile sertleşir. Genellikle reaksiyon enjeksiyonlu kalıplama (RIM) veya reçine transfer kalıplama (RTM) kullanılarak üretilirler ve kürleme işlemi sırasında kalıcı kimyasal bağlar oluştururlar. Malzeme içindeki monomer zincirleri arasındaki çapraz bağlar olarak adlandırılan bu kimyasal bağlar, molekülleri yerinde tutar ve malzemenin yapısını değiştirerek erimesini ve sıvı hale dönmesini engeller. Isıtıldıktan sonra termoset plastikler belirli bir forma dönüşür, ancak aşırı ısınma sıvı faza girmeden bozulmalarına neden olabilir (R. M. Wang ve ark. 2011).

2.1.2. Termoplastikler

Termoplastikler, oda sıcaklığında katı olan ancak ısıtıldığında yumuşayan ve sonunda kristal erimesi veya cam geçiş sıcaklığını (T_g) geçmesi sonucu akışkan hale gelirler.

Termoplastiklerin işlenmesinde kimyasal bağlanma yoktur ve soğuması ve istenen şekle katılması için bir kalıba dökülebilirler. Termoplastikler, malzeme özelliklerini etkilemeden yeniden ısıtılabilir, geri dönüştürülebilir ve yeniden kalıplanabilir. Sonuç olarak, bu malzemeler ekstrüzyon, ısıyla şekillendirme ve enjeksiyonla kalıplama gibi işlemlerde kullanılır (R. M. Wang ve ark. 2011).

Yaygın olarak kullanılan termoplastikler, polietilen (PE), polipropilen (PP), poliamid (PA) örnek olarak verilebilir. Termoplastikler, yüksek esneklik ve dayanıklılık sunar.

2.1.3. Takviye elemanları

Takviye elemanları kompoziti oluşturan önemli elemanlardan biri olup kompozit üzerine gelen yükün büyük bir kısmını taşımaktadır. Yükün elyaflara iletilebilmesi için fazlar arasında fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması, ara yüzey bağının güçlü olması gerekir. Takviye elemanı ile matrisin ısıl genleşme katsayıları arasında uyum, kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması yönünde önemlidir (Chung 2010).

Kompozit malzemeler üretilirken; takviye elemanlarını seçimi, üretim tekniği, üretim esnasında elyafların matris tarafından ıslatılabilmesi, yönlendirilmeleri ve takviye elemanı seçimi ve özellikleri iyi bilinmesi gerekir (Chung 2010).

Elyaf takviyeli kompozitler, daha yüksek dayanım, yorulma direnci, elastik modül (Young Modülü) ve birim ağırlığa göre dayanım oranı değerler olarak kompoziti teşkil eden fazlardan daha iyi özellikler verir. Bu, dayanımlı, sert ve kırılğan elyafın daha sünek ve yumuşak matrisle kombinasyonu ile gerçekleşir. Genel olarak kompozit yapı için, elyaf fazı dayanım ve sertlik sağlamaktadır. Buna karşın matris fazı elyaf ile birlikte yer almasını ve elyaflar arası yükün aktarılmasını sağlar. Elyaf takviyeli kompozitlerin tasarlanmasında pek çok parametre dikkate alınır. Bunlar şunlardır:

- Elyaf uzunluğu,
- Elyaf çapı,
- Elyaf yönlülüğü,
- Elyaf ve matris yüzdeleri,

-Elyaf ve matris bağları.

Polimer matrisli kompozitlerde yaygın olarak cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyafdır. Uygun maliyetlerden dolayı en çok cam elyaf tercih edilmektedir (Chung 2010).

Dört elyaf faktörü, kompozitlerin mekanik performansına etkiler;

•**Uzunluk:** Elyafların uzun veya kısa olabilir. Uzun, sürekli elyafların yönlendirilmesi ve işlenmesi kolaydır, kısa elyafların uygun yönlendirme için tam olarak kontrol edilemez. Uzun elyaflar, kısa elyaflar göre birçok fayda sağlar. Bunlar, darbe direnci, düşük büzülme, iyileştirilmiş yüzey kalitesi ve boyutsal stabiliteyi içerir. Bununla birlikte, kısa elyaflar düşük maliyet sağlar, işlenmesi kolaydır ve hızlı çevrim süresi fabrikasyon prosedürlerine sahiptir. Kısa elyaflar daha yüksek mukavemete sahiptir.

•**Oryantasyon:** Bir yönde yönlendirilen elyaflar, o yönde çok yüksek sertlik ve mukavemet verir. Elyaf, örneğin bir keçede olduğu gibi birden fazla yönde yönlendirilirse, elyaf yönelimlerinin yönlerinde yüksek sertlik ve mukavemet olacaktır. Bununla birlikte, kompozitin birim hacmi başına aynı hacimdeki elyaflar için, tek yönlü kompozitlerin sertliği ve mukavemeti ile eşleşemez.

•**Şekil:** Elyafların en yaygın şekli daireseldir çünkü bunları işlemek ve üretmek kolaydır. Altıgen ve kare şekilli elyaflar mümkündür, ancak mukavemet ve yüksek paketleme faktörlerinin avantajları, taşıma ve işlemedeki zorluklardan daha ağır basmaz.

•**Malzeme:** Elyafın malzemesi, bir kompozitin mekanik performansını doğrudan etkiler. Elyafların genel olarak yüksek elastik modül ve dayanımlara sahip olması beklenir (Kaw ve Group 2006).

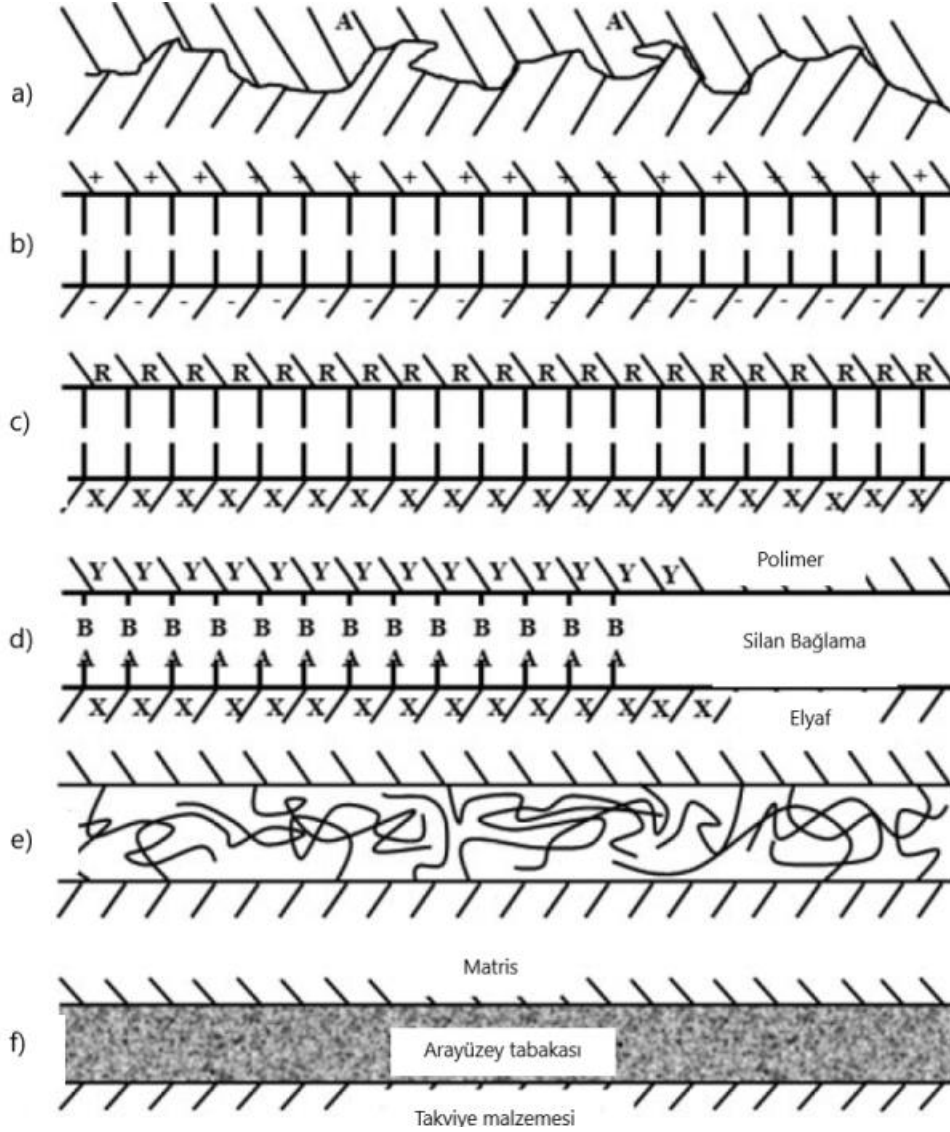
2.1.4. Arayüzey Bağlanması

Kimyasal ve mekanik bağlar ile matris-elyaf arasında bağlar oluşur. Bu bağlar matrisin yükü elyaflara ne kadar iyi aktardığını belirler. Çoğu durumda, birden fazla bağlanma türü oluşur.

Matris, elyafı ıslattığında ve dolayısıyla elyaf ile yakın temasta olduğunda, bağlanma meydana gelecektir. Bir dizi farklı türde bağ oluşturulabilir. Ayrıca, belirli bir sistem için, örneğin mekanik ve elektrostatik bağlama gibi birden fazla bağlama mekanizması aynı anda çalışabilir ve bağlama mekanizması çeşitli üretim aşamalarında değişebilir. Örneğin, elektrostatik bağ, reaksiyon bağına dönüşür. Bağlamanın türü sistemden sisteme değişir ve yüzey kirleticilerinin veya eklenen yüzey aktif maddelerin (bağlantı maddeleri) varlığı gibi ince ayrıntılara bağlıdır (R. M. Wang ve ark. 2011).

2.1.5. Mekanik bağ

Şekil 2.1 a'da gösterildiği gibi, iki yüzeyin mekanik olarak kilitlemesi ile güçlü bir bağa oluşabilir. Açıkça, arayüz ne kadar pürüzlü olursa, kilitleme o kadar iyi ve dolayısıyla mekanik bağlanma daha etkili olur. Ayrıca, matrisin takviye üzerine herhangi bir büzülmesi, bağlanma için uygundur. Mekanik bağ, kuvvet arayüze paralel olarak uygulandığında en etkilidir; başka bir deyişle, kesme mukavemeti önemlidir. Çoğu durumda, tamamen mekanik bir bağla karşılaşılmaz ve mekanik bağlama, başka bir bağlama mekanizması ile birlikte çalışır (R. M. Wang ve ark. 2011).



Şekil 2.1. Ara yüzey bağlama mekanizmalarının şematik diyagramları: (a) mekanik bağlama (b) elektrostatik bağlama; (c) kimyasal bağlanma (R ve X, uyumlu kimyasal grupları temsil eder); (d) bir silan bağlama maddesine uygulanan kimyasal bağlama; (e) polimerleri içeren reaksiyon bağlaması; (f) interdifüzyon tarafından oluşturulan arayüzey tabakası (S. J. Park ve Seo 2011).

2.1.6. Elektrostatik Bağlama

Bir yüzey pozitif, diğeri negatif yüklü olduğunda matris ve elyaf arasında bağlanma meydana gelir (Şekil 2.1 b). Bu, kompozitin bileşenleri arasında, yüzeylerindeki yük farkına bağlı olarak bir elektrostatik çekim ortaya çıkar.

Elektrostatik etkileşimler kısa mesafeli olup, atomik boyut mertebesindeki küçük mesafelerde etkilidir: bu nedenle matris ve takviyenin yakın temasın olmasının önemlidir ve yüzey kirliliğinin ve sıkışmış gazların bu bağlanma mekanizmasının etkinliğini azaltmaktadır (R. M. Wang ve ark. 2011).

2.1.7. Kimyasal Bağ

Kimyasal bağ, takviye yüzeyindeki kimyasal gruplar (Şekil 2.1 c'de X ile işaretlenmiştir) ve matris içindeki uyumlu gruplar (R ile işaretlenmiştir) arasında oluşan bağıdır. Kimyasal bağın kuvveti, birim alandaki bağ sayısına ve bağ tipine bağlıdır. Kimyasal bağlanmanın bazı birleştirme elemanlarında etkilidir. Örneğin silanlar, bir cam elyaf yüzey üzerindeki oksit gruplarını polimer matrisinin moleküllerine bağlamak için yaygın olarak kullanılır. Silan molekülünün bir ucunda (A) camdaki oksit (silanol) grupları bir hidrojen bağı oluşurken, diğer ucunda (B) polimerdeki uyumlu bir grupla da reaksiyona girer (Şekil 2.1 d) (R. M. Wang ve ark. 2011).

2.1.8. Difüzyon Bağı

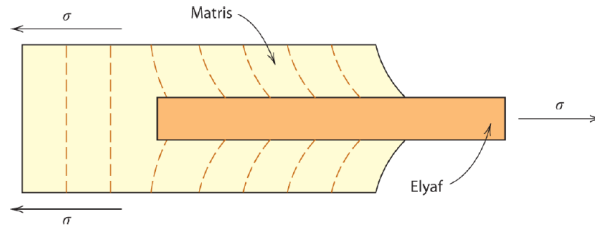
Kompozitdeki elyaf ve matrisin atomları, arayüzde birbiri içinde dağılıbilir. Polimerleri içeren arayüzler için bu tip bir bağlanma, basit bir ifadeyle, moleküllerin iç içe geçmesidir (Şekil 2.1 e). Moleküllerin birbirine dolandığı mesafe ve moleküllerin dolaşıklığının boyutu ve arayüz biriminin birim alanı başına molekül sayısı dahil olmak üzere birçok faktör bu arayüzün bağlanma kuvvetini etkiler (R. M. Wang ve ark. 2011).

2.2. Elyaf Uzunluğu

Bir kompozitteki elyaf uzunluğu, termoplastik kompozitleri sürekli ve süreksiz elyaf tiplerine ayırmak için kullanılabilir. Termoplastik kompozitler, elyaf uzunluğuna veya en boy oranına (uzunluk/çap) göre sınıflandırılabilir. Bir elyaf bir matrise gömüldüğünde ve elyafa paralel bir çekme yüküne maruz kaldığında, matris üzerine uygulanan gerilme arayüz boyunca elyafa aktarılacaktır. Elyaftaki çekme gerilimi elyaf uçlarında sıfırdır ve elyaf uzunluğu boyunca merkezde en yüksek değeri alır; tersine, ara yüzdeki kesme

gerilimi için elyaf uçlarında en yüksek değeri alır ve merkezde neredeyse sıfıra düşer (Callister ve Rethwisch 2015).

Elyafın uzunluğu boyunca oluşan gerilimin değeri, elyaf ile matris arasındaki yapışmaya ve kompozitin elastik özelliklerine bağlıdır. En-boy oranına bağlı olarak, termoplastik kompozitler kritik elyaf uzunluğuna göre sürekli (continuous) veya süreksiz (short) (uzun ve kısa elyaflar) olarak sınıflandırılır. Denklem 2.1, kritik elyaf uzunluğu ile elyaf üzerinde etkili olan çekme gerilimi ve elyaf/matris ara yüzey kesme mukavemeti arasındaki ilişkiyi gösterir. Şekil 2.2'de kritik elyaf uzunluğunun altında, üstünde ve üstünde tek bir elyaf için çekme ve kesme gerilimini göstermektedir. Bu nedenle, elyafın en yüksek gerilmeye kadar yüklenebilmesi için elyaf uzunluğu kritik uzunluğa eşit veya daha büyük olmalıdır. Elyaf uzunluğu kritik uzunluktan daha kısa ise matris elyafın etrafında akacaktır ve elyaf maksimum gerilime kadar yüklenemeyecektir (Callister ve Rethwisch 2015).



Şekil 2.2. Çekme gerilmesine maruz kalan bir elyafı saran matristeki şekil değişimi (Callister ve Rethwisch 2015)

$$\frac{l_{kri}}{d} = \frac{\sigma_e}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Burada;

l_{kri} , Kritik elyaf boyu,

d , Elyaf çapı,

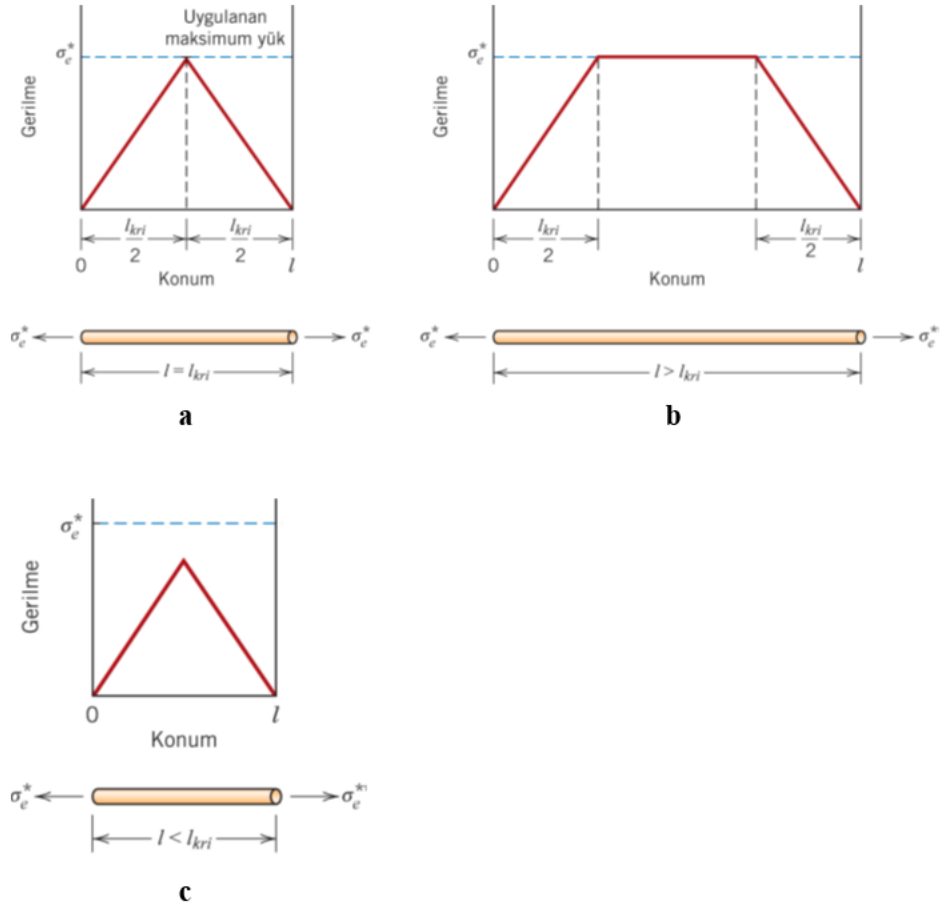
σ_e , Elyafın çekme dayanımı,

τ_c , Elyaf-matris ara yüzey bağ dayanımı veya matrisin akma dayanımıdır.

Kritik elyaf uzunluğuna sahip bir kompozite σ_e 'ye eşit gerilme uygulandığında, Şekil 2.3 a'da gösterilen gerilim-konum profili ortaya çıkar, yani maksimum elyaf yükü yalnızca

elyafın eksenel merkezinde elde edilir. Elyaf uzunluğu l arttıkça, elyaf takviyesi daha etkili hale gelir. Uygulanan gerilme elyafın çekme mukavemetine eşit olduğunda $l > l_{kri}$ için gerilme-konum profili Şekil 2.3 b'de gösterilmektedir. Şekil 2.3 c'de, $l < l_{kri}$ için gerilim-konum profilini gösterir.

$l \gg l_{kri}$ (normalde $l > 15l_{kri}$) sürekli olarak adlandırılan elyaflardır. Bundan daha kısa olanlar ise süreksiz veya kısa elyaftır. l_{kri} 'den önemli ölçüde daha kısa uzunluktaki süreksiz elyaflar için, matris elyafın etrafında deforme olur, öyle ki neredeyse hiç gerilme aktarımı olmaz (Callister ve Rethwisch 2015).

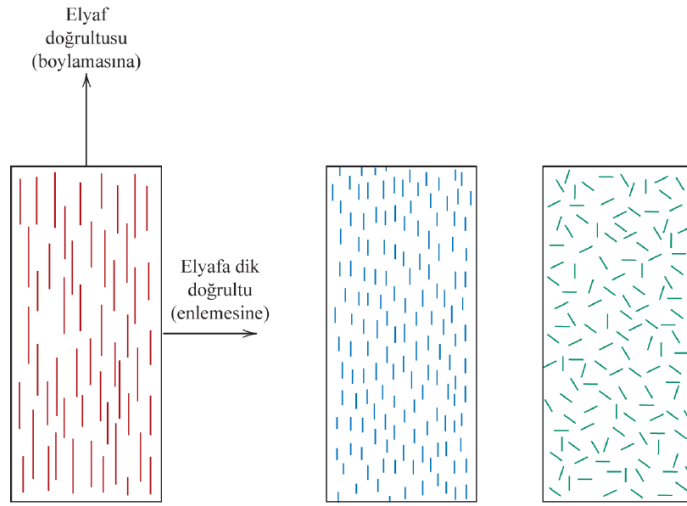


Şekil 2.3. Elyaf takviyeli kompozite elyafın σ_e^* 'sine eşit bir çekme gerilmesi uygulanması durumunda elde edilen gerilme-konum değişimi, elyaf uzunluğu l a) kritik elyaf boyutunda l_{kri} b) kritik elyaf boyutundan uzun c) kritik elyaf boyutundan kısa (Callister ve Rethwisch 2015)

2.3. Elyaf Yoğunluğu ve Yönelmesinin Etkisi

Elyafaların birbirine göre yönelmesi, elyaf yoğunluğu ve dağılımı elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini belirleyen parametrelerdir. Yönlendirme ile ilgili olarak, (1) elyafın gerilme yönünde paralel hizalaması (Şekil 2.4 a) ve (2) tamamen rastgele bir hizalama (Şekil 2.4 b ve Şekil 2.4 c).

Sürekli elyaflar, çekme doğrultusunda (Şekil 2.4 a), süreksiz elyaf, çekme doğrultusunda (Şekil 2.4 b) veya rastgele yönlendirilebilir (Şekil 2.4 c). Elyaf dağılımı tek tipde olduğunda kompozit özellikler daha yüksek olur (Callister ve Rethwisch 2015).

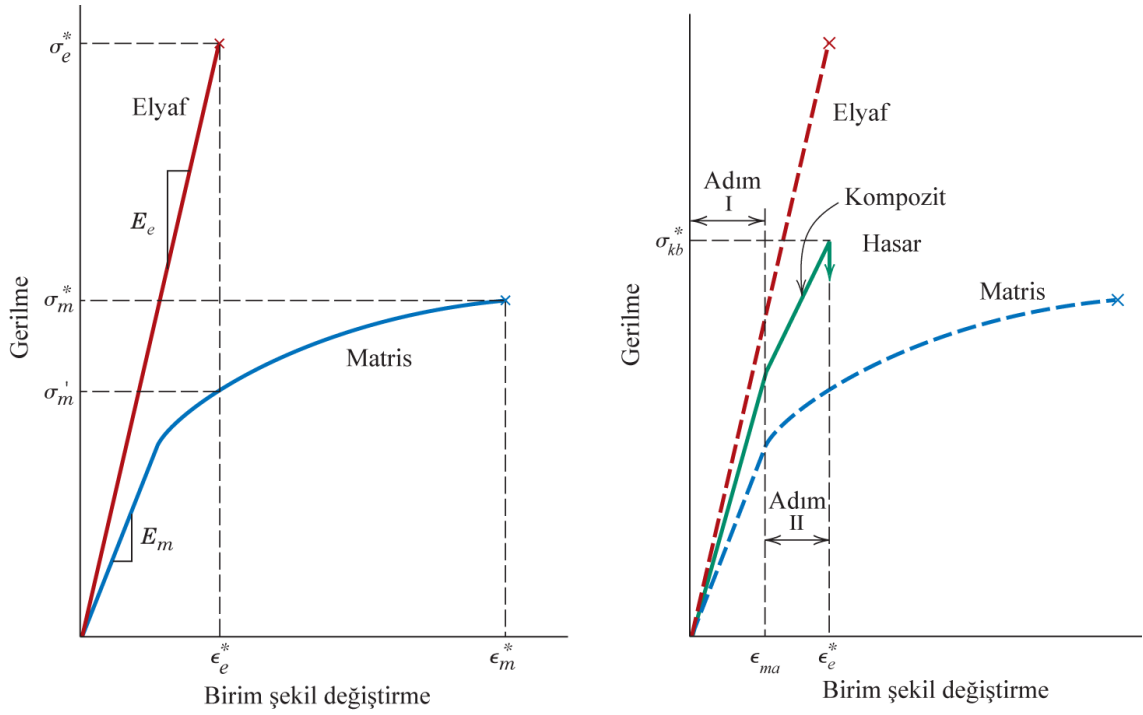


Şekil 2.4. Elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi a) Sürekli ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş b) Süreksiz ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş c) Süreksiz ve rastgele doğrultusunda yönlendirilmiş (Callister ve Rethwisch 2015)

2.3.1. Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitler

Bu tip kompozitin mekanik özellikleri, elyaf ve matris fazlarının gerilme-birim şekil değiştirme, elyaf hacim oranlarına ve yükün uygulandığı yön gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Ayrıca, sürekli elyafların özellikleri oldukça anizotropiktir. Şekil 2.4 a'da gösterilen boylamsal yön olan hizalama yönü boyunca gerilimin uygulandığı durumdaki gerilim-gerinim davranışı Şekil 2.5 a'da verilmiştir.

Şekil 2.5 b'deki Adım I bölgesinde hem elyaf lar hem de matris elastik olarak deforme olur. Bu tip bir kompozit için, elyaf elastik olarak uzamaya devam ederken matris plastik deformasyona uğrar ve akıp deforme olur. Bu süreç, şekilde belirtildiği gibi Adım II'yi oluşturur; bu aşama tipik olarak doğrusala yakındır fakat Aşama I'e göre eğimi azalır. Aşama I'den Aşama II'ye geçerken, elyafların taşıdığı yükün oranı artar (Callister ve Rethwisch 2015).



Şekil 2.5. a) Gevrek elyaf ve sünek matrise ait gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin şematik gösterimi. Her iki bileşen için de kırılma gerilmesi ve birim şekil değişimi değerleri belirtilmiştir, b) yükün elyafın yönlendiği doğrultuda uygulandığı boylam (Callister ve Rethwisch 2015)

Kompozitlerin hasarının başlangıcı, Şekil 2.5 b 'de belirtildiği gibi yaklaşık olarak ϵ_e^* 'deki bir gerilime karşılık gelen değerde elyaflar kırılmaya başlar. Tüm elyaflar aynı anda kırılmaz, çünkü elyaf malzemelerinin kırılma mukavemetinde her zaman farklılıklar olacaktır. Ek olarak, elyaf kırıldıktan sonra bile matris, $\epsilon_m^* > \epsilon_e^*$ değerine kadar bozulmadan kalır. Bu nedenle, kırık olan elyaflar, bozulmamış matrisin içine gömülüdür ve matris plastik olarak deforme olmaya devam ettikçe yük taşıyabilirler (Callister ve Rethwisch 2015).

2.3.2. Süreksiz (Kısa) Elyaf Takviyeli Kompozitler

2.3.2.1. Yönlenmiş Elyaf Kompozitler

Süreksiz elyafların kompozit malzeme üzerine etkisi sürekli elyaflar kadar olamasa da ticari pazarda giderek daha önemli hale gelmektedir. Kırpılmış cam, karbon ve aramid elyafları en yaygın olanlarıdır. Bu tip kompozitler, sürekli elyaflar ile karşılaştırıldığında çekme mukavemetinin %90'mı ve elastisite modülünün ise %50'sine yakındır (Osswald, Tim A, Gandhi 2020).

2.3.2.2. Rastgele Yönlenmiş Elyaf Kompozitler

Elyaf oryantasyonu rastgele olduğunda, kısa ve süreksiz elyaflar kullanılır; bu tip kompozitlerin uygulaması Şekil 2.4 c'de gösterilmiştir. Bu kompozitlerdeki elyafların matris malzemeler üzerindeki verimi Kelly–Tyson modeli (denklem 2.2) kullanılarak hesaplanabilir (S. Y. Fu ve ark. 2000), (Delli ve ark. 2021).

Bu koşullar altında,

$$\sigma_k = \lambda_e \sigma_e V_e + \sigma_m (1 - V_e) \quad (2.2)$$

Burada σ_k , σ_e ve σ_m sırasıyla kompozitin, takviye elemanın ve matrisin çekme dayanımlarıdır. V_e kompozitin elyaf hacim oranı ve λ_e elyaf verim faktörüdür. λ_e , σ_e/σ_m oranına bağlı bir elyaf verimlilik parametresidir. Büyüklüğü birden küçüktür, genellikle 0,1 ila 0,6 aralığındadır (Çizelge 2.1) (Osswald, Tim A, Gandhi 2020).

Çizelge 2.1. Elyaf yönüne göre elyaf verim katsayısı

Elyaf Yönü	Gerilme Yönü	Elyaf Verimi (λ_e)
Bütün elyaf paralel	Elyafa paralel	1
	Elyafa dik	0
Elyaf bir düzlem içinde rastgele ve homojen şekilde dağılmış	Elyaf düzleminde herhangi bir yönde	3/8
Elyaf bir düzlem içinde rastgele ve homojen şekilde dağılmış	Herhangi bir yönde	1/5

2.4. Elyaf Fazı

Çoğu malzemenin, özellikle kırılğan olanların önemli bir özelliği, küçük çaplı bir elyafın kütlese malzemeye daha mukavemetli olmasıdır. Numune hacmi azaldıkça kırılmaya yol açabilecek kritik yüzey kusurunun olasılığı azalır ve bu özellik elyaf takviyeli kompozitlerde avantaj sağlamak için kullanılır. Ayrıca elyafları güçlendirmek için kullanılan malzemeler yüksek çekme dayanımlarına sahiptir (Callister ve Rethwisch 2015).

Çap ve karakter bazında elyaflar üç farklı sınıfa ayrılır: visker (sakalcık), elyaf ve tel. Visker, uzunluk-çap oranlarını yüksek çok ince tek kristallerdir. Küçük boyutlarının bir sonucu olarak, yüksek derecede kristalin mükemmelliğe sahiptirler ve olağanüstü yüksek mukavemete sahiptirler. Bu yüksek mukavemetlerine rağmen, viskerler pahalı oldukları için takviye malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmazlar. Ayrıca, viskerler matrise dahil etmek zordur ve çoğu zaman pratik değildir. Visker malzemeleri arasında grafit, silisyum karbür, silisyum nitrür ve alüminyum oksit bulunur; bu malzemelerin bazı mekanik özellikleri Çizelge 2.3'de verilmiştir (Osswald, Tim A, Gandhi 2020).

Elyaflar, kristal veya amorf yapıdadırlar ve küçük çaplara sahiptir; Elyaflar genellikle polimerler veya seramiklerdir (polimer aramidler, cam, karbon, bor, alüminyum oksit ve silisyum karbür).

İnce teller nispeten büyük çaplara sahiptir; tipik malzemeler arasında çelik, molibden ve tungsten bulunur. Teller, otomobil lastiklerinde radyal çelik takviye olarak, filament sargılı roket kasalarında ve tel sargılı yüksek basınç hortumlarında tel sarma ile hazırlanarak kullanılır (Callister ve Rethwisch 2015).

Çizelge 2.3. Bazı elyaf takviye malzemelerin özellikleri (Callister ve Rethwisch 2015)

Malzeme	Özgül Ağırlık	Çekme Dayanımı [GPa]	Özgül Dayanım [GPa]	Elastiklik Modülü [GPa]	Özgül Modül [Gpa]
Viskerler					
Grafit	2,2	20	9,1	700	318
Silisyum nitrür	3,2	5,7	1,56-2,2	350-380	109-118
Alüminyum oksit	4,0	10-20	2,5-5,0	700-1500	175-375
Silisyum karbür	3,2	20	6,25	480	150
Elyaf					
Alüminyum oksit	3,95	1,38	0,35	379	96
Aramid	1,44	3,6-4,1	2,5-2,85	131	91
Karbon	1,78-2,15	1,5-4,8	0,70-2,70	228-724	106-407
E-cam	2,58	3,45	1,34	72,5	28,1
Bor	2,57	3,6	1,40	400	156
Silisyum karbür	3,0	3,9	1,30	400	133
UHMWPE	0,97	2,6	2,68	117	121
Metalik Teller					
Yüksek dayanımlı çelik	7,9	2,39	0,30	210	26,6
Molibden	10,2	2,2	0,22	324	31,8
Tungsten	19,3	2,89	0,15	407	21,1

2.4.1. Cam Elyaf

Cam elyaf esasını; silis-kum (SiO_2) meydana getirmekle beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinde oluşur. Polimer esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan ve en ucuz olan takviye elemanlarıdır. Silis atomları üç boyutlu rastgele bağlanmış polihedra ağını oluşturmak için oksijen atomlarına kovalent bağla bağlanır. Farklı valansın katyonları oksijen atomlarına bazıları ile iyoniksel olarak bağlanır (Şahin Yusuf 2022).

Cam elyaf, toz formunda çeşitli B_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , Mg O veya Ca O kombinasyonlarına sahiptir. Bu kombinasyonlar $1300\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa ısıtılıp, ergitilir ve daha sonra 9 ila $17\text{ }\mu\text{m}$ arasında değişen çaplarda filament haline getirilir. Karbon elyaf ve aramid elyaf gibi diğer elyaf malzemelerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde ucuz ve kolayca temin edilebilir.

Cam elyafın tek dezavantajı, karbon elyafı gibi daha fazla sıcaklığa dayanamamasıdır (Şahin Yusuf 2022).

Cam elyaf, polimer matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan elyafıdır. Yüksek mukavemeti, düşük maliyeti, yüksek kimyasal direnci ve iyi yalıtım özellikleri avantajlı kılmıştır. Dezavantajları arasında ise düşük elastik modüllü, polimerlere zayıf yapışma, yüksek özgül ağırlık, aşınmaya duyarlılık (gerilme mukavemetini azaltır) ve düşük yorulma mukavemeti yer alır (Baykara 2020).

Ana tipler E-cam ve S-camdır. E-camdaki "E", elektrik uygulamaları için tasarlandığından elektrik anlamına gelir. Bununla birlikte, dekorasyon ve yapısal uygulamalar gibi birçok başka amaç için kullanılmaktadır. S-camdaki "S", daha yüksek silika içeriği anlamına gelir. E glass'a göre yüksek sıcaklıklarda mukavemetini korur ve daha yüksek yorulma mukavemetine sahiptir. Esas olarak havacılık uygulamaları için kullanılır. Bazı özellik farklılıkları Çizelge 2.4 'de verilmiştir. Özelliklerdeki fark, E-cam ve S-cam elyaflarının bileşimlerinden kaynaklanmaktadır. İki elyaf türündeki birleşenler Tablo 1 'de verilmiştir. Ticari olarak temin edilebilen diğer tipler, depolama tankları gibi kimyasal ortamlarda kullanılan C-camdır ("C" korozyon anlamına gelir); İnşaat gibi yapısal uygulamalarda kullanılan R-cam; Düşük dielektrik sabitleri gerektiren uygulamalar için kullanılan D-glass (dielektrik); ve yüzey görünümünü iyileştirmek için kullanılan A-cam (görünüm). E-CR cam ("E-CR" elektrik ve korozyon direnci anlamına gelir) ve AR cam (alkali dirençli) gibi kombinasyon türleri de mevcuttur (Şahin Yusuf 2022).

Çizelge 2.4. E-Cam ve S-Cam Elyafların Kimyasal Bileşimi

İçerikler	E-cam (%)	S-Cam (%)
Silikon Oksit	54	64
Aluminyum Oksit	15	25
Kalsiyum Oksit	17	0.01
Magnezyum Oksit	4.5	10
Bor Oksit	8	0.01
Diğerleri	1.5	0.8

2.4.2. Karbon Elyaf

Karbon, birçok ileri polimer matrisli kompozitte en çok kullanılan yüksek performanslı elyaf malzemesidir. Karbon elyafların yapısal önemi, yüksek mukavemetleri, yüksek özgül modül ve düşük yoğunluklarından kaynaklanmaktadır. Karbon elyafların fonksiyonel önemi, yüksek elektriksel iletkenliklerinden kaynaklanmaktadır (Şahin Yusuf 2022).

Karbon elyaf oda sıcaklığında nem, çözücü, asit ve baz gibi pek çok kimyasala karşı dayanıklıdır ayrıca pek çok özel mühendislik problemini çözmek amacıyla, değişik fiziksel ve mekanik özelliklerde üretilebilir.

Karbon elyafın sınıflandırma şekli, çekme elastiklik modülüne göre, Buna göre, standart, orta, yüksek ve ultra yüksek modül olmak üzere dört farklı sınıf mevcuttur. Elyaf çapları da ortalama 4 ile 10 µm aralığında olup, sürekli ve kırılmış şeklinde bulunur. Karbon organik maddelerden üretildiği için organik elyaf olarak da adlandırılır. Ham madde olarak poli-akro-nitil (PAN), Selülöz ve Zift kullanılır. Dolayısıyla üretildikleri maddelere göre isim alırlar. PAN esaslı karbon elyaflar %93-95 arasında karbon içerir (Chung 2010).

Ticari olarak PAN karbon elyafın iki tipi mevcut olup bunlar yüksek elastik modüllü (Tip 1) yüksek dayanım (Tip 2) olanıdır. Organik matrislerle en iyi yapışma sağlanması ve elyaf özelliklerini muhafaza etmesi için bir kaplama uygulanmalı veya bitmiş elyaf yüzeyi oksidasyon işlemine tabi tutulmalıdır. Azot atmosferinde kararlı olmasına rağmen 400 °C üzerinde oksitlenir (Callister ve Rethwisch 2015).

Karbon elyafın yapısal özellikleri elyaf doğruluğu, kristalliği ve kusurların etkisidir. Karbon elyaf takviyeli kompozitler günümüzde yaygın olarak otomatik ve savunma sanayiinde yapısal eleman olarak kullanılmaktadır (Callister ve Rethwisch 2015).

2.4.3. Aramid Elyaf

Aramidin (aromatik polyami) moleküler yapısında altı karbon atomu hidrojen atomu ile bağlıdır. Aramid elyaf, karbon, hidrojen, oksijen ve nitrojenden oluşan aromatik bir organik bileşiktir (Şahin Yusuf 2022).

Aramid elyafı, düşük yoğunluk, yüksek çekme mukavemeti, düşük maliyet ve yüksek darbe direnci öne çıkaran özellikleridir. Dezavantajları arasında ise düşük sıkıştırma özellikleri ve güneş ışığında bozulma yer alır (Şahin Yusuf 2022).

İki ana aramid elyaf türü Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur (Çizelge 2.5). Her iki Kevlar elyaf türü de benzer özgül güçlere sahiptir, ancak Kevlar 49 daha yüksek bir özgül sertliğe sahiptir. Kevlar 29, ağırlıklı olarak kurşun geçirmez yeleklerde, halatlarda ve kablolarda kullanılmaktadır. Uçak endüstrisindeki yüksek performanslı uygulamalar da Kevlar 49 kullanır. Çizelge 2.5'de Kevlar 29 ve Kevlar 49'un özellikleri verilmiştir (Wardle 2000).

Aramid elyaf, tescilli polimerler ve sülfürik asit gibi güçlü asitlerin bir çözeltisi yapılarak üretilir. Çözelti daha sonra 392 °F'de (200 °C) sıcak silindirlere ekstrüde edilir, yıkanır ve makaralar üzerinde kurutulur. Elyaf daha sonra mukavemetini ve sertliğini arttırmak için gerilir ve çekilir (Wardle 2000).

Çizelge 2.5. Kevlar Elyafın Özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modül (GPa)
Kevlar 29	1.44	2860	64
Kevlar 49	1.44	3750	136

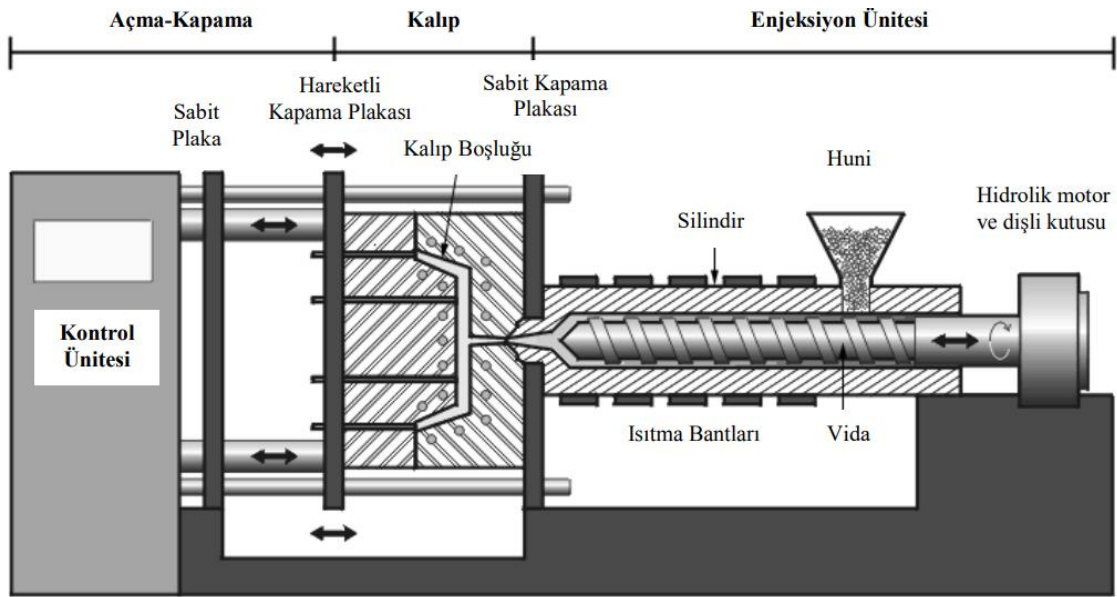
2.5. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Teknikleri

Kompozit işleme teknolojisi, kompozit endüstrisinin gelişiminin temel ve ön koşuludur. Kompozitin uygulama alanı genişledikçe kompozit endüstrisi hızla gelişmektedir. Eski işleme teknolojileri giderek olgunlaşıyor ve çok sayıda yeni yöntemler ortaya çıkıyor. Şimdiye kadar, termoplastik ve termoset kompozitlerin işlenmesi için uygun olan polimer matrisli kompozitlerin hazırlanması için yirmiden fazla işleme yöntemi olmuştur.

Sürekli elyaf takviyeli termoplastiklerin üretiminde, enjeksiyon ve ekstrüzyon ile kalıplama yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Osswald, Tim A, Gandhi 2020).

2.5.1. Enjeksiyon ile kalıplama yöntemi

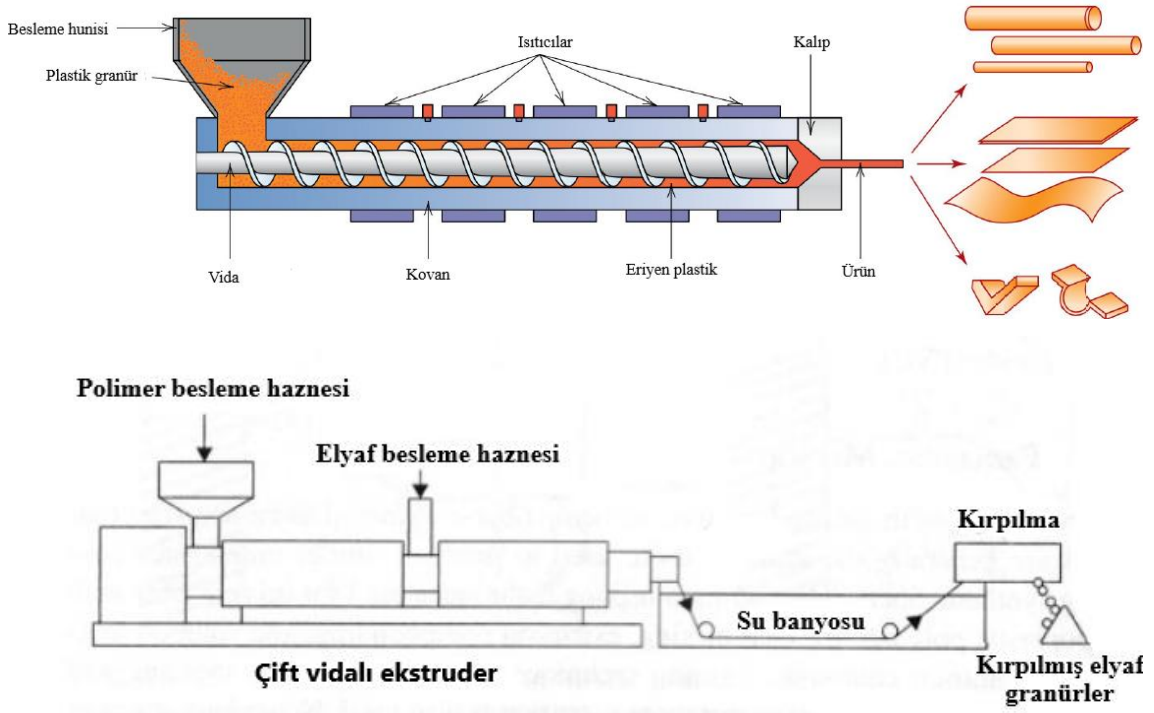
Enjeksiyon kalıplama yöntemi, plastik ürünlerin üretiminde kullanılan en önemli işlemdir. Bugün, tüm termoplastik malzemelerin üçte birinden fazlası enjeksiyonla kalıplanıyor ve tüm polimer işleme ekipmanlarının yarısından fazlası enjeksiyonla kalıplanıyor. Enjeksiyon kalıplama işlemi, hassas boyutlar gerektiren karmaşık şekillerde seri üretilen parçaların üretimi için idealdir. Süreç, Hyatt kardeşlerin kalıplara selüloz enjekte etmek için doldurma makinelerinin patentini aldıkları 1872 yılına kadar uzanıyor. Bununla birlikte, günümüzün enjeksiyon kalıplama makineleri esas olarak 1956'da patenti alınan vidalı enjeksiyon kalıplama makinesi ile ilgilidir (Şekil 2.6). En önemli unsurları ile modern bir enjeksiyon kalıplama makinesi Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Osswald, Tim A, Gandhi 2020).



Şekil 2.6. Enjeksiyon şematik görünümü (Osswald, Tim A, Gandhi 2020)

2.5.2. Ekstrüzyon ile Kalıplama Yöntemi

Ekstrüzyon işlemi, viskoz termoplastiğin basınç altında açık uçlu bir kalıptan, basınç altında geçirilmesiyle gerçekleştirilen bir kalıplama yöntemidir (Şekil 2.7). Bir mekanik vida veya helezon yardımıyla ilerleyen malzeme, sırasıyla sıkıştırma ve eritme ile sürekli bir viskoz akışkan elde edilmesini sağlar. Ekstrüzyon ise erimiş sıvının itildiği kalıp açıklığında gerçekleşir. Ekstrüzyondan geçen parçanın katılaşması hava üfleme, su spreyi veya su banyosu ile hızlandırılabilir. Bu yöntem, özellikle sabit kesitli, sürekli üretimin gerektiği uzun parçalarda, örneğin çubuk, boru, hortum, kanal, kalın filim ve uzun elyafların üretiminde tercih edilir (Chung 2010).



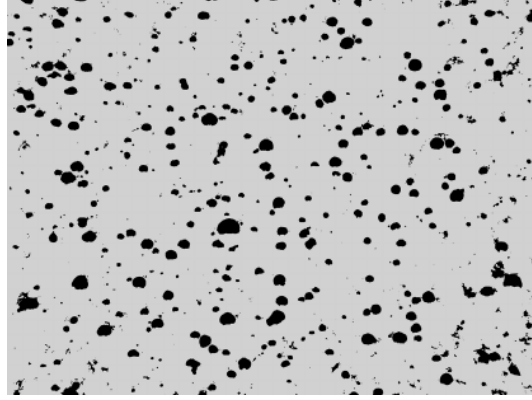
Şekil 2.7. Ekstrüzyon şematik görünümü

2.6. Kompozitlerde Görülen Tipik Hatalar

2.6.1. Gözeneklilik

Gözeneklilik, polimer kompozitler gibi lamine yapılar için kompozit üretiminde çok yaygın bir problemdir (Şekil 2.8). Gözeneklilik terimi, genellikle, kürleme işlemi

sırasında serbest kalan uçucu gazın veya hapsolmuş havanın neden olduğu boşlukları ifade eder. Boşlukların boyutu, şekli ve dağılımı kompozitlerin yapısına bağlıdır (R. M. Wang ve ark. 2011).



Şekil 2.8. Kompozit malzemenin gözenekliliği (Kers ve ark. 2007)

2.6.2. Elyaf/Matris Dağılımı

Elyaf ve matris dağılımı, kompozitin performansı için kritik öneme sahiptir. Elyaf açısından zengin ve zayıf bölgelerin performans etkilerini hesaplamak için sonlu eleman kodlarında kullanılacak önemli bilgiler sağlar (R. M. Wang ve ark. 2011).

2.6.3. Elyaf Hacim Oranı

Kompozitlerin mukavemetleri, büyük ölçüde elyaf ve matris arasındaki etkileşim tarafından belirlenir. Matris, yükü lifler üzerine ve lifler arasında dağıttığından, elyaf ve matrisin ilgili hacim miktarlarını (hacim oranı) bilmek önemlidir.

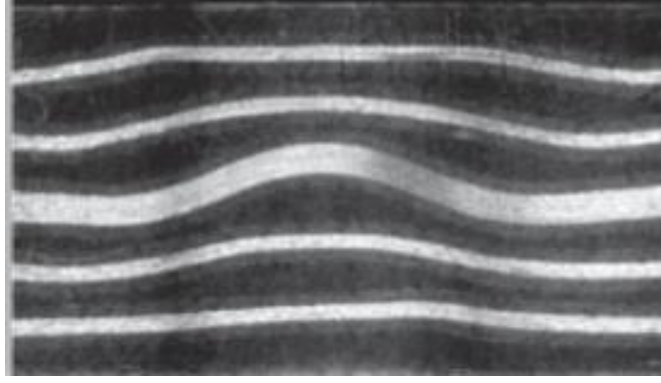
Kompozitleri ekstrüzyon ve enjeksiyon ile üretildiğinde, elyaf hacmi içeriği arttıkça, ortalama elyaf uzunluğu azalır. Bunlar, daha yüksek elyaf oranı, elyaf uzunluğuna daha fazla zarar verdiğini gösterir. Daha yüksek bir elyaf hacmi içeriği için elyaf uzunluğundaki artan hasar, esas olarak daha yüksek elyaf- elyaf etkileşimine bağlanır (R. M. Wang ve ark. 2011).

2.6.4. Elyaf Yönlendirme

Elyaf takviyeli kompozitler için kalıplama işleminden tam olarak yararlanmak için elyafların yönelimi bilinmeli ve dikkatlice kontrol edilmelidir. Yönelimdeki küçük bir değişiklik, kompozit sertliğinde bir azalmaya neden olmaktadır (R. M. Wang ve ark. 2011).

2.6.5. Elyaf Dalgalanması

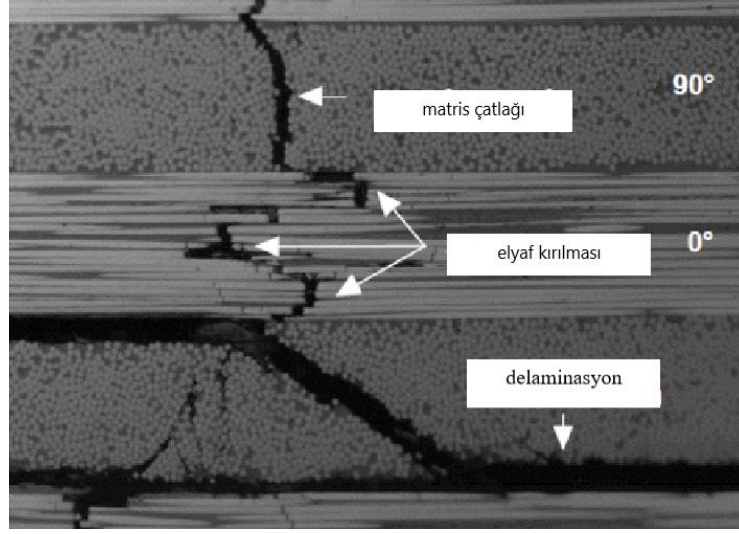
Elyaf dalgalanması, genellikle üretim sürecinde ortaya çıkan bir kusurdur (Şekil 2.9) (R. M. Wang ve ark. 2011).



Şekil 2.9. Kompozit malzemede elyaf dalgalanması (S. J. Park ve Seo 2011)

2.6.6. Delaminasyon

Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler, birçok farklı endüstrideki uygulamalar için kritik yapısal bileşenler olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamaların çoğunda, elyaf katları arasındaki delaminasyon, meydana gelebilecek en ciddi kusur türlerinden biridir. Delaminasyon, basınç dayanımını ve mekanik sertliği azaltarak kompozitlerin yapısal bütünlüğünü etkiler. Delaminasyon yayılarak kompozit malzemelerin kırılmasına neden olur (Şekil 2.10) (R. M. Wang ve ark. 2011).



Şekil 2.10. Kompozit malzemede delemantasyon (S. J. Park ve Seo 2011)

2.7. Kaynak Araştırması

Literatürde elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine pek çok araştırma yapılmıştır.

Abdulrahman Al-Shahrani (2013), doktora çalışmasında 150 mm iç çaptaki termoset boruyu cam elyaf filament sargıyla güçlendirilmiş kompozit boru tasarlamıştır. Daha sonra düşük hızlarda sayısal ve deneysel ortamlarda analiz etmiştir. Farklı çarpma enerjileri (12, 35, 80 ve 110 J) ve farklı boru et kalınlıkları (4,5 ve 6,0 mm) için yük, gerilme ve enerji verileri elde edilmiştir. Bu çalışma sayısal ve deneysel sonuçlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Sonlu Elemanlar Metodu'nun (FEM) bir sonraki arızayı yakından tahmin ederek kompozit boru yapıları üzerindeki düşük hız etki senaryosunu simüle etmek için etkili bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Al-Shahrani 2013).

Ana Nieto Bernal (2015), yüksek lisans çalışmasında farklı geometrik parametrelere sahip bir dizi boruda düşük hız etkisinin neden olduğu hasarın etkisini incelemek için bir simülasyon aracı geliştirdi. Sayısal ortamda yaptığı analiz sonucunda, büyük çaplı boruların daha az hasar alabileceği görülmüştür. Çalışmada hasarın meydana geldiği sınırlar tanımlanmıştır. Kalınlık ile ilgili olarak, katman sayısı ile sertlik arasındaki

doğrudan ilişki analiz edilmiştir, hasar oluşmadan önce aralarında doğrusal bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak, uzunluğun etkisi analiz edilmiştir. Daha uzun boruların daha yüksek bükülme gerilmelerine maruz kaldığı görülmüştür (Bernal 2015).

Benjamin William Imes (2018) çalışmasında 6" HDPE boruyu 70 bar, 10" Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) boruyu 20 bar hidrostatik basınç altında test etmiştir. İnce cidarlı filament sargılı boruyu 275-360 bar basınçları arasında hidrostatik basınç altında test etmiştir. Filament sargılı borunun 275 bar hidrostatik basınç altında testte başarısız olmuştur. 50 bara kadar bu borunun kullanılabilceği sonucuna varmıştır (Imes ve ark. 2018).

J. Lohmar (2006), çalışmasında PA12 malzemesinden boru üretilmiş ve testler sonucu 20 bara kadar mukavemetli olduğu görülmüştür. Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) ve Orta Yoğunluklu Polietilen (MDPE) borularıyla PA12 borusunun mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve PA12'nin yüksek basınca mukavemetli olduğu görülmüştür (Lohmar 2006).

Kara (2012), doktora çalışmasında filament sarım metoduyla imal edilen ($\pm 55^\circ$)₃ sarımaçısına sahip E-camı/epoksi kompozit borular kullanılmış ve 32 bar işletme basınç altında 5, 10 ve 15 Joule enerji seviyelerinde darbe testine tabi tutmuştur. Bu çalışmada, ön gerilmeli CTP borulara yapılan tüm enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbeye oluşan hasarlar incelendiğinde elyaf kopmaları gözlenmemiştir. Buna bağlı olarak darbe hasarlı ve darbe hasarsız boruların iç basınca karşılık çap değişimleri aynı olmuştur (Metin 2008).

Rafiee ve Mazhari (2016) çalışmasında, Cam Elyaf Takviyeli Plastik borular üzerinde uzun süreli hidrostatik testleri simüle etmektir. Deneysel veriler ve teorik modelleme arasında bir karşılaştırma sunulmaktadır. 50 yıllık hidrostatik basınç ile deneysel veriler arasında çok iyi bir uyum vardır buda geliştirilen modellemenin yeterliliği anlamına gelir. Geliştirilen modelleme, saf reçine ile ilgili kısa süreli deneysel verilere ihtiyaç duyduğundan, endüstriyel merkezler için uygun bir mühendislik aracı olarak kullanılabilir (Rafiee ve Mazhari 2016).

Marjan (2017), doktora çalışmasında HDPE ile PE4710 boruların yorulma etkisini incelemiştir. 16 inç HDPE boru, 8-9 bar basınçta 2 milyon devir ile 17 bar basınçta 50 bin devir testler tabii tutulmuştur: PE4710 kopma uzaması %20, gerilme mukavemeti %2, yorulma ömrü yaklaşık %20 oranında artmıştır.

Nima ve arkadaşları (2017), PP ve PA6'ya %30 oranında kesikli cam elyaf (GF) eklemiştir. PA+%30 Cam Elyaf'ın (GF) mekanik özellikleri daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile çeşitli boyutlarında kırılma mekanizması incelenmiş. PA +%30 GF'nin gerilme mukavemeti, gerilme modülü, darbe mukavemeti ve sertliğinin PP +%30 GF'den daha yüksek olduğunu görülmüştür (Khademian ve ark. 2017).

Sebaey (2019), Cam Elyaf Takviyeli Plastik (GFRP) kompozit borunun filament sarım açısını optimize ederek mukavemet ve sertlik özelliklerini analiz etmiştir. Sarım açısının farklı çalışma koşullarına göre farklı borular tasarlama konusunda ekstra esneklik sağladığını belirtmiştir (Sebaey 2019).

Robenson Cherizol (2016), doktora çalışmasında PA11 malzemesinin ve Yüksek Verimli Pulp (HYP) takviyeli PA11 kompozit malzemesinin mikro yapısını incelemiştir. Pulp takviyesinin kompozit malzemenin mikro yapısını iyileştirdiği gözlenmiştir. (HYP)/PA11'in deneysel ve teorik test sonuçları, artan kayma oranıyla birlikte belirgin viskozitede bir düşüş gösterdi; bu eriyik akış karakteristiği HYP / PA11'deki kayma inceltme davranışına karşılık geldiği belirtilmiştir. HYP / PA11'in reolojik davranışını tahmin etmek için doğrusal olmayan matematiksel model, deneysel olarak 200°C ve 5000S-1 kayma hızında doğrulanmıştır (Cherizol 2016).

Sathishkumar ve arkadaşları (2018), bazalt elyaf takviyeli polimer kompozitlerle ilgili çalışmaları incelemişler ve araştırmaları sonucunda kompozitlerdeki elyaf oranı arttıkça kompozitlerin darbe özelliklerinin iyileştiğini ve aşınma dayanımlarının arttığını belirlemişlerdir (Sathishkumar ve ark. 2018).

Sathishkumar ve arkadaşları (2014), cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerin mekanik, dinamik, tribolojik, termal ve su emme özelliklerini incelenmiştir. Kompozitlerin özelliklerini geliştirmek için, elyaflar çeşitli kimyasallarla işleminden geçirildi ve cam elyaf takviyeli kompozitlerini yapmak için uygun kimyasallarla matris harmanı karıştırıldı. Bu şekilde ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik, termal, tribolojik özelliklerinin iyileştirebileceği görülmüştür (Sathishkumar ve ark. 2014).

Tang ve arkadaşları (2015), Çok Duvarlı Karbon Nanotüp takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen kompozit filmlerin eritme işlemi kullanarak mekanik özelliklerini incelemişleridir. Malzemeyi eritip karıştırdıktan sonra ufak parçalarda kesip çift vidalı ekstruder ile karıştırıp kalıplamışlardır ve küçük punç testi ile kompozit film içeriğindeki Çok Duvarlı Karbon Nanotüp oranının artmasıyla sertliğinin, akma mukavemetinin ve kırılma tokluğunun arttığını gözlemlemişlerdir.

Zou ve arkadaşları (2012), Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerle Yüksek Yoğunluklu Polietilen Nanokompozitlerinin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Buradaki çalışmalarında mekanik özelliklerini iyileştirmek için SiO₂ ve Çok Duvarlı Karbon Nanotüp karışımı kullanmışlardır ve %1'lik bir karışımda kompozitlerin üzerinde olumlu etkisi olduğunu görmüşlerdir.

Zhang ve arkadaşları (2004), polietilen matrise kısa karbon fiber, grafit, politetraflorüretilen ve nano-TiO₂ gibi çeşitli dolgular ekleyerek aşınma özelliklerini blok on ring cihazında incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda epoksiye takviye ettikleri dolguların aşınma dayanımını arttırdığını görmüşlerdir. Ayrıca polimer kompozitlerde kısa karbon fiberlerin aşınma dayanımında önemli etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır.

Zum ve arkadaşları (1987), fiber tip takviyeli ve polimer matrisli kompozitlerin sürtünme ve aşınma özellikleri, büyük ölçüde polimer kompozitleri oluşturan bileşenlerin (matris ve fiber) özelliklerine ve aralarında oluşan ara yüzey özelliklerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bunlar polimer matrisin türü, takviye malzemesi türü, takviye elemanın yapı içerisindeki dağılımı, fiberin şekli, fiberin hacim oranı, fiberin kalınlığı, fiberin matris içerisindeki yönlenmesi, karşı yüzey malzemenin özellikleri ve takviye malzemesinin matrise göre sertliği gibi özelliklerin etkili olduğunu göstermiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda matris malzemesi olarak PP, PE, PA6 ve PA12 ve takviye malzemesi olarak cam (Owens Corning), karbon (Dowaksa) ve aramid (Twaron) elyafları kullanılmıştır. Elyaf lar 6 mm uzunluğunda kırılmıştır. Elyaf hacim oranları %10, %20 ve %30 şeklinde belirlenmiştir. Matris ve elyaf malzemelerin mekanik özellikleri katalog değerlerinden alınmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Matris ve elyaf malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Gerilme Dayanımı (MPa)	Gerilme Modülü (GPa)	Kopma Uzaması %
Polipropilen	0,9	38	1,3	> 50
Polietilen	0,95	19	1,1	> 50
Poliamid 6	1,13	85	3,2	> 50
Poliamid 12	1,02	60	1,44	> 50
Cam Elyaf	2,6	3400	85	4,5-5,8
Karbon Elyaf	1,76	4200	250	0,7-2,1
Aramid Elyaf	1,44	2800	70	2,3-4,2

3.2. Yöntem

3.2.1. Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Plakaların Üretimi

Kompozitlerin üretiminde çift vidalı ekstrüder (Polmak Plastik 22 mm Lab tipi araştırma ekstrüderi) kullanılmıştır (Şekil 3.1). Literatüre baktığımızda Sivas ve ark. enjeksiyon ve ekstrüzyon üretim yöntemleri ile elyaf takviyeli termoplastik kompozit üretmiştir. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilen numunelerin, enjeksiyon yöntemine göre daha yüksek mekanik mukavemete ve matris ile daha iyi yapışmaya sahip olduğu ve mekanik özelliklerinin yaklaşık %17 oranında üstün performans gösterdiği tespit etmişlerdir (Siva ve ark. 2021). Ekstrüzyon makinesindeki beş bölge için sıcaklık değerleri literatür ve malzemelerin üretim kataloğundan faydalanarak belirlenmiştir (Çizelge 3.2) (Crabtree ve ark. 2008), (da Costa ve ark. 2007). Kompozitler elde edildikten sonra kesici ile granül

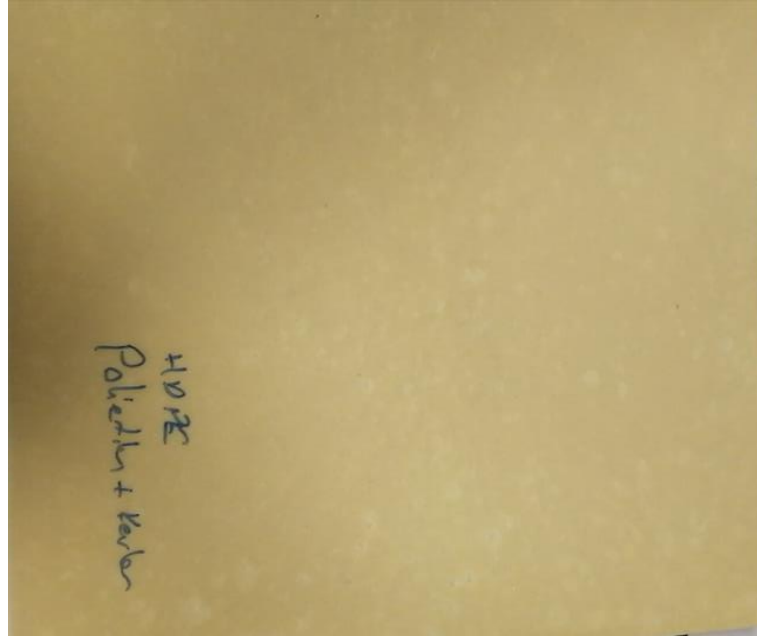
haline getirilmiştir (Şekil 3.2). Granüller pres kalıplama metodu ile 500mmx500mm kompozit plakalar elde edilmiştir (Şekil 3.3). Çizelge 3.3’de her matris ile yapılan kompozitlerin üretim parametreleri gösterilmiştir. Kalıplama 3 kademededen oluşmakta ve tüm numuneler birinci kademedede 120 sn., ikinci kademedede 180 sn. ve üçüncü kademedede 60 sn. tutulmuştur. Test numuneleri, ilgili kalıplardan standart ölçülerde CNC tezgahında kesilerek hazırlandı.



Şekil 3.1. Polmak Plastik 22 mm Lab tipi araştırma ekstrüderi ile kompozit malzeme üretimi



Şekil 3.2. Granür haline getiren kompozitlerin sıcak preslemek için kalıba yerleştirilmesi



Şekil 3.3. Pres kalıplama metodu ile 500mmx500mm kompozit plakalar

Çizelge 3.2. Ekstrüzyon üretim parametreleri

Matris Malzemesi	Ekstrüder sıcaklık (°C)	Vida dönüş hızı (rpm)
Polipropilen (PP)	195-215-225-225-240	30
Polietilen (PE)	170-195-220-220-230	30
Poliamid 6 (PA6)	240-240-250-260-285	30
Poliamid 12 (PA12)	190-200-210-220-230	30

Çizelge 3.3. Pres kalıplama üretim parametreleri

Matris	Pres sıcaklık (°C)			Pres basınç (ton)			Pres süresi (sn)		
	1. kademe	2. kademe	3. kademe	1. kademe	2. kademe	3. kademe	1. kademe	2. kademe	3. kademe
PP	160	160	180	15	20	30	120	180	60
PE	190	200	220	15	20	30	120	180	60
PA6	170	180	180	15	20	30	120	180	60
PA12	180	190	190	15	20	30	120	180	60

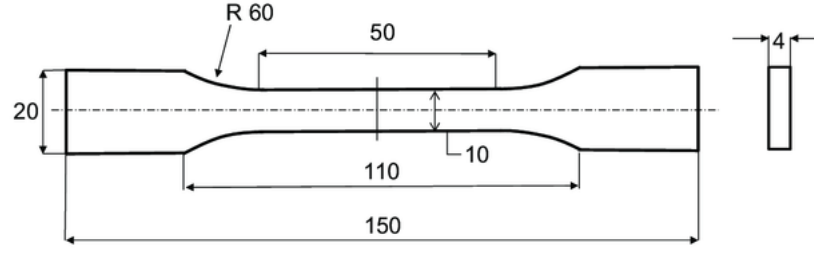
3.2.2. Mekanik Testler

3.2.2.1. Çekme Testi

Çekme testi, malzemelerin mekanik davranışlarıyla ilgili elastik ve plastik değişkenleri karakterize etmek için standart mühendislik prosedürüdür. Çekme testi, malzemenin çekme dayanımı, akma dayanımı ve sünekliği hakkında bilgi sağlayan tahribatlı bir test sürecidir (Taşdemir 2018).

Test, bir çekme test makinesinde uygun şekilde hazırlanmış standart bir test parçasının uçlarının kavranması ve ardından malzeme kırıma meydana gelene kadar sürekli artan tek eksenli bir yük uygulanmasıyla yapılmıştır (Jabbar ve ark. 2016).

Çekme numunesi, standartlaştırılmış numune kesitidir. Numunenin kesiti genellikle dikdörtgendir. İki omuz ve arada bir kesit vardır. Omuzlar, kolayca kavranabilmeleri için büyüktür, kesit bölümü daha küçüktür, böylece deformasyon ve kırılma bu alanda meydana gelebilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Çekme testi numunesi için EN ISO 527-2 geometrisi (Bajpai ve ark. 2019)

Çekme deneyinde elde edilen çekme gerilme ve birim uzama değerleri;

$$\text{Çekme gerilmesi; } \sigma = F/A_0 \quad (3.1)$$

$$\text{Birim uzama; } \varepsilon = \Delta l / l_0 \quad (3.2)$$

eşitlikleriyle bulunur. Burda F çekme kuvveti, A_0 deney numunesi, Δl numunede meydana gelen uzama, l_0 numunede meydana gelen uzama miktarını gösterir (T. Savaşkan 2018)

Çalışmamızda çekme testleri Besmak-BMT 100E marka Universal Çekme Test Cihazı (100 kN) ile yapılmıştır (Şekil 3.5). Çekme testi için numuneler TS EN ISO 527-2 tip 2 standartlarına göre hazırlanmıştır (Şekil 3.6). Çekme hızı ve ön gerilim değeri sırasıyla 2 mm/dk ve 10 N olarak ayarlandı. Ölçüm uzunluğu 50 mm video ekstansometre ve test koşulları 21 °C'de gerçekleştirildi.



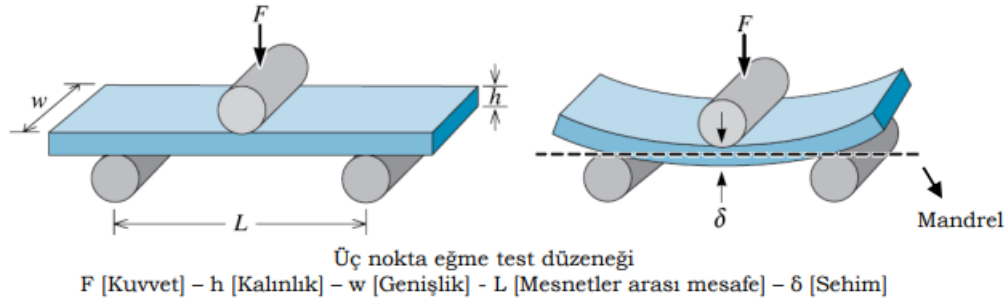
Şekil 3.5. Besmak-BMT 100E marka Universal Çekme Test Cihazı



Şekil 3.6. Çekme testi numuneleri

3.2.2.2. 3 Nokta Eğme Testi

Eğme testi, basit kiriş yüklemesine maruz kalan malzemelerin davranışını ölçer (Plastik Malzemelerin Test Teknikleri). 3 nokta eğilme testinde, numunelerin dışbükey tarafı gerilime maruz bırakılır ve dış lifler maksimum gerilmeye maruz bırakılır (Şekil 3.7). Gerilme, malzemenin sınır değerini aştığında kırılma meydana gelir. Kırılma tokluğu, üç noktalı bir eğilme testi kullanılarak belirlenebilir. Eğilme testi ile eğilme modülü, gerilme-gerinim davranışı ve eğilme limitlerinin tümü elde edilir. Deney sırasında kullanılan numuneler, hem gerilme hem de basma kuvvetlerine maruz kalmaktadır (Karahana ve ark. 2013).



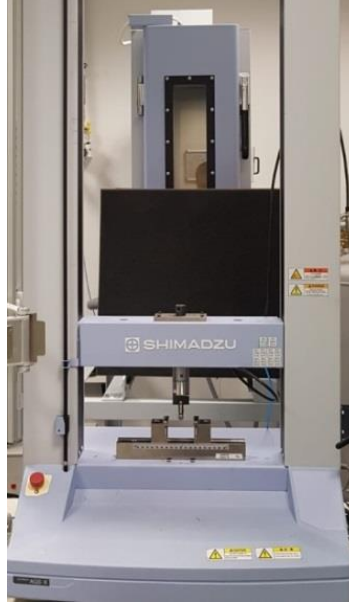
Şekil 3.7. 3 Nokta Eğme Deneyi Düzeneği (Askeland ve Phule 2010)

Eğilme gerilmesi (σ_f) deney numunesinin orta noktasının dış yüzeyinde meydana gelen anma gerilmesidir. Aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\sigma_f = 3FL/2bh^3 \quad (3.3)$$

Burada σ_f eğilme gerilmesi, F uygulanan yük, L mesnetler arası uzunluk, b numunenin genişliği, d numunenin kalınlığıdır (Taşdemir 2018).

Çalışmamız Shimadzu marka üç nokta eğme test cihazında yapılmıştır (Şekil 3.8). Polimer matrisli kompozit numuneleri TS EN ISO 178-3 üç nokta eğme standartlarına göre hazırlanmıştır. Destekler arası mesafe 64 mm, test hızı 2 mm/dk ve test edilen ortam sıcaklığı 21 °C olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.8. SHIMADZHU marka üç nokta eğme test cihazı

3.2.2.3. Düşen Ağırlık Darbe Testi

Düşen ağırlık darbe testi malzemenin ani bir dış kuvvete karşı direncini ölçer. Test, tanımlanmış bir ağırlığın belirli yükseklikten numune üzerine serbest bırakıldığı mekanik testtir. Testinin ardından kırılma yüzeylerinin görünümü değerlendirilir. Burada deformasyon kırılma yüzeyi ve kırılma kırılma yüzeyinin oranları görsel olarak belirlenir (Khan ve ark. 2021).

Düşen ağırlık darbe testi yönteminde, serbest düşüş sırasında kılavuzluk etmesi için raylarla bir ağırlığı dikey yönde düşürmekti. Yine yükseklik ve ağırlık bilindiği için darbe enerjisi hesaplanabilir.

Malzemeye darbe enerjisi iletildiğinde momentum kazanılır deforme olurken gerinim enerjisine dönüştürülen kinetik enerji kazanır. Darbeye dayanıklı malzemenin en önemli özelliği, malzemede hasara neden olmadan darbe enerjisini sönmümesidir.

Mekanikte çarpma, iki veya daha fazla cisim çarpıştığında kısa bir süre boyunca uygulanan yüksek kuvvet veya şoktur. Böyle bir kuvvet veya ivme genellikle orantılı

olarak daha uzun bir zaman periyodu boyunca uygulanan daha düşük bir kuvvetten daha büyük bir etkiye sahiptir. Etki, kritik olarak cisimlerin birbirine göreli hızına bağlıdır. Normal hızlarda, tamamen esnek olmayan bir çarpışma sırasında, bir merminin çarptığı bir nesne deforme olur ve bu deformasyon çarpışma kuvvetinin çoğunu veya hatta tamamını emer. Enerjinin korunumu perspektifinden bakıldığında, merminin kinetik enerjisi, vurulan cisimde meydana gelen deformasyonlar ve titreşimler sonucunda ısı ve ses enerjisine dönüşür (Abbood ve ark. 2021).

Ancak bu deformasyonlar ve titreşimler bir anda oluşamaz. Yüksek hızlı bir çarpışma (darbe), bu deformasyonların ve titreşimlerin oluşması için yeterli zaman sağlamaz. Böylece, vurulan malzeme olduğundan daha kırılgenmiş gibi davranır ve uygulanan kuvvetin büyük kısmı malzemeyi kırmaya gider (Ku ve ark. 2005).

Farklı malzemeler, statik yükleme koşullarıyla karşılaştırıldığında, darbeye oldukça farklı şekillerde davranabilir. Çelik gibi sünek malzemeler, yüksek yükleme hızlarında daha kırılgen hale gelme eğilimindedir ve penetrasyon gerçekleşmezse çarpmanın ters tarafında parçalanma meydana gelebilir (Karahan ve ark. 2015).

Ağırlık düşürme testinden çıkan enerji;

$$E = mgh - l \quad (3.4)$$

burada E enerjidir (J), m vurucunun kütesidir (kg), g yerçekimidir (m/s^2), h yüksekliktir (m) ve l sürtünme ve diğer kaynaklardan kaynaklanan kayıplardır (J). Testte kayıp önemsizdir.

Bu test sistemlerinde istenilen darbe enerjisini elde etmek için ayarlanabilir düşen ağırlık kontrol edilebilir bir yükseklikten düşürülür. Darbe hızı, fotodiyot/dedektör tertibatları kullanılarak ölçülür. Numune, çarpma sırasında numuneyi destekleyen bir plaka üzerine yerleştirilir. Düşen ağırlık, aletli bir forvet (tup) ile donatılmıştır. Vurucu, düşen ağırlık ile numune arasındaki darbe kuvveti değişimini ölçen bir kuvvet dönüştürücü içerir. Ağırlık düşürme darbe testinin avantajlarından biri, deformasyon ve enerji absorpsiyon

zaman geçmişlerini ayrıca Newton mekaniği kullanılarak hesaplanabileceği kuvvet zaman alanını ölçebilmektedir (Chung 2010).

Bu kapsamda çalışmamızda deney numuneleri Instron/CEAST 9340 marka darbe test cihazı kullanılmıştır (şekil 3.9). Düşen ağırlık darbe testi TS EN ISO 6603 standartlarına göre boyutları 60x60 mm et kalınlığı 2.5 mm olarak hazırlanmıştır ve test edilen ortam sıcaklığı 21 °C'ye ayarlanmıştır. Her numune için darbe enerjisi 1500 J ve çarpma hızı 3 m/s olarak belirlenmiştir.



şekil 3.9. Instron/CEAST 9340 marka darbe testi cihazı

3.2.2.4. Shore D Sertlik Testi

Sertlik, bir malzemenin, aşınma, çizilme gibi kalıcı deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Sertlik testinin önemi, sertlik ile malzemenin diğer özellikleri arasındaki ilişki kurmasıdır. Örneğin hem sertlik testi hem de çekme testi, bir malzemenin plastik akışa karşı direncini ölçer ve bu testlerin sonuçları birbirine paralellik gösterebilir. Sertlik testi basit, kolay ve nispeten tahribatsız olduğu için tercih edilir (Callister ve Rethwisch 2015).

Polimer kompozitlerin sertlik değerini ölçmek için Shore sertlik yöntemi kullanılır. Polimerlerin, elastomerlerin, ve kompozitlerin sertliği bu yöntem ile ölçülür. Ölçümde en sık Shore A ve Shore D kullanılmaktadır. Bu metotla, belirli şartlarda malzemeye batırılan belirli ucun batma miktarı ölçülür. Sertlik ile batma miktarı ters orantılıdır ve maddenin esneklik modülü ile viskoelastik özelliklerine bağlıdır. A tipi durometre için uygulanan kuvvet 1 kg'dır. D tipi durometreler ise sert plastikler için kullanılır. Uygulanan yük ise 5 kg'dır (Taşdemir 2018).

Bu kapsamda çalışmamızda Shore D sertlik deneyleri Hildebrand marka sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.10). Sertlik testi numuneleri TS EN ISO 868 standartlarına göre hazırlanmıştır ve test edilen ortam sıcaklığı 23 °C olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.10. Hildebrand marka sertlik ölçüm cihazı

3.2.2.5. Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), odaklanmış bir elektron demeti ile yüzeyi tarayarak numunenin görüntülerini üreten bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşir ve numunenin yüzey topografyası ve bileşimi hakkında bilgi içeren çeşitli sinyaller üretir. Elektron ışını bir raster tarama modelinde taranır ve görüntü üretmek için ışının konumu algılanan sinyalin yoğunluğu ile birleştirilir (Callister ve Rethwisch 2015).

Çalışmamızda, %30 elyaf takviyeli numunelerin kırık yüzey görüntüleri Hitachi TM3000 marka SEM ile incelenmiştir.

3.2.3. Deneysel Tasarım ve ANOVA Analizi

3.2.3.1. Deneysel Tasarım

İstatistiksel çalışmalar için veriler, deneyler veya anketler yapılarak elde edilir. Deneysel tasarım, deneylerin tasarımı ve analizi ile ilgilenen istatistik bilimin dalıdır. Deneysel tasarım yöntemleri endüstriyel üretim alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (T. Fu ve ark. 2017).

Deneysel bir çalışmada, ilgili değişkenler belirlenir. Çalışmanın faktörleri olarak adlandırılan bu değişkenlerden bir veya daha fazlası, faktörlerin yanıt değişkeni olarak adlandırılan başka bir değişkeni nasıl etkilediği kontrol edilir (Özçelik ve Özbay 2011).

Bu çalışmada Tablo 3.4'de belirtilen değişiklikler yapılarak tepki değişkeni üzerindeki etkilerinin yorumlanabilmesi için deneysel faktörlerin ve düzeylerinin belirlenmesi gerekmektedir (M. Savaşkan ve ark. 2004). Bu çalışmada Çizelge 3.4 'de belirtilen deneysel faktörleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Deney faktörleri ve seviyeleri

Faktörler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
A- Matris Cinsi	PP	PE	PA6	PA12
B- Elyaf Cinsi	Cam	Karbon	Aramid	-
C- Elyaf Yüzdesi %	0*	10	20	30

Yok ile 0 aynı seviyeleri ifade eder*

Bu süreçte girdi değişkenleri üzerinde istenilen değişikliklerin yapılmasıyla cevap değişkeni üzerindeki etkilerinin gözlenmesi, elde edilmesi ve yorumlanması için Çizelge 3.5'de belirtilen deney matrisi kullanılmıştır (Suresh ve ark. 2020).

Çizelge 3.5. Deneysel tasarımı

Deney No	A-Matris Cinsi	B-Elyaf Cinsi	C-Elyaf Yüzdesi %
1	1	4	1
2	2	4	1
3	3	4	1
4	4	4	1
5	1	1	2
6	1	1	3
7	1	1	4
8	2	1	2
9	2	1	3
10	2	1	4
11	3	1	2
12	3	1	3
13	3	1	4
14	4	1	2
15	4	1	3
16	4	1	4
17	1	2	2
18	1	2	3
19	1	2	4
20	2	2	2
21	2	2	3
22	2	2	4
23	3	2	2
24	3	2	3
25	3	2	4
26	4	2	2
27	4	2	3
28	4	2	4
29	1	3	2
30	1	3	3
31	1	3	4
32	2	3	2
33	2	3	3
34	2	3	4
35	3	3	2
36	3	3	3
37	3	3	4
38	4	3	2
39	4	3	3
40	4	3	4

3.2.3.2. ANOVA Analizi

Deneysel bir çalışmadan elde edilen verileri analiz etmek için varyans analizi olarak bilinen istatistiksel bir prosedür kullanır. Tek faktörlü bir deney için, bu prosedür, faktörün yanıt değişkeni üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olup olmadığını belirler. Ayrıca bu yöntemle birden fazla faktörü içeren deneysel tasarımlar için, ortak hareket eden bir veya daha fazla faktörün neden olduğu etkileşim etkilerinin yanı sıra her bir faktörün etki derecesi de belirlenir (Hirotso 2017).

Varyans analizi (ANOVA), bir veri setinde bulunan gözlemlenen değişkenleri sistematik faktörler ve rastgele faktörler olmak üzere iki bölüme ayırır. Sistematik faktörlerin, verilen veri seti üzerinde istatistiksel bir etkisi varken, rastgele faktörlerin yoktur. Regresyon çalışmasında bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini belirlemek için ANOVA testi kullanır (Hirotso 2017).

ANOVA testi, belirli bir veri setini etkileyen faktörleri analiz etmenin ilk adımıdır. Test bittiğinde, veri setinin tutarsızlığına ölçülebilir şekilde katkıda bulunan metodik faktörler üzerinde ek testler gerçekleştirilir. Önerilen regresyon modelleriyle uyumlu ek veriler oluşturmak için f-testinde ANOVA test sonuçlarını kullanır (Soumare 2020).

Ayrıca ANOVA, aralarında bir ilişki olup olmadığını belirlemek için aynı anda ikiden fazla grubun karşılaştırılmasına izin verir. ANOVA formülünün sonucu olan F istatistiği (F oranı olarak da adlandırılır), numuneler arasındaki ve numuneler içindeki değişkenliği belirlemek için birden fazla veri grubunun analizine izin verir (Khaled 2013)

Test edilen gruplar arasında sıfır hipotezi olarak adlandırılan gerçek bir fark yoksa, ANOVA'nın F oranı 1'e yakın olacaktır. F istatistiğinin tüm olası değerlerinin dağılımı F dağılımıdır. Bu aslında, pay serbestlik dereceleri ve payda serbestlik dereceleri olarak adlandırılan iki karakteristik sayıya sahip bir dağılım fonksiyonları grubudur (Hirotso 2017).

Sinyal değeri (S), sistem tarafından verilen ve ölçülmesi amaçlanan gerçek değeri temsil eder. Gürültü faktörü (N), ölçülen değerde istenmeyen faktörlerin payını temsil eder. Bu yaklaşıma göre, S/N oranını hesaplamak için aşağıdaki denklem (3.5) kullanılır (Ravi Kumar ve ark. 2017) (Özçelik ve Özbay 2011), (Somashekhar ve ark. 2019).

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3.5)$$

burada y ölçüm değeri ve n deney sayısıdır.

Varyans analizi, incelenen faktörlerin kaliteyi ölçmek için kullanılan çıktı değerini ne kadar etkilediğini ve farklı seviyelerin ne gibi etkileri olduğunu ortaya çıkarır. Ayrıca, elde edilen sonuçların istatistiksel güvenilirliği incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle sinyal/gürültü (S/N) oranının genel değişkenliğini temsil eden SS_T değeri (toplam karelerin toplamı) denklem (3.6)'e göre hesaplanır (Kumar ve Balachander 2020).

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2 \quad (3.6)$$

burada η_i ölçülen değer üzerinden hesaplanan sinyal-gürültü oranı, η_m ölçülen değer üzerinden hesaplanan sinyal-gürültü oranlarının ortalaması ve n toplam deney sayısıdır (T. Fu ve ark. 2017). SS_T değeri SS_A (faktör A'nın karelerinin toplamı) ve SS_B 'nin (faktör B'nin karelerinin toplamı) iki faktörünün karelerinin toplamı ve SS_E değeri, hata payının karelerinin toplamıdır. Her bir faktörün karelerinin toplamı, denklem (3.7) kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$SS_j = \sum_{i=1}^{k_j} [n_{ji} x (\eta_{ji} - \eta_m)^2], \quad j = A \text{ veya } B \quad (3.7)$$

burada k_j , A veya B faktörünün düzey sayısını temsil eder, n_{ji} , A veya B faktörünün i düzeyindeki deney sayısıdır, η_{ji} , i düzeyinde A veya B faktörünün S/N oranı ve η_m ortalama S/N oranı (Somashekhar ve ark. 2019).

Bir sonraki adım için, her bir deneysel faktörün test sonuçlarını ne kadar etkilediğini göstermek için denklem (3.8) ile hesaplanarak F-Testi gerçekleştirilir.

$$F = \frac{SS_j/k - 1}{SS_E/N - k} \quad (3.8)$$

burada $k-1$, grup sayısından bir çıkarılarak serbestlik derecesi payıdır, $N - k$, paydanın serbestlik derecesidir; tüm gruplar için, N grup sayısının, gözlem sayısından çıkarılmasıyla belirlenir (Özçelik ve Özbay 2011).

3.2.2.7.3. Matematiksel Model Oluşturma

Regresyon analizinde model oluşturma, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi en iyi tanımlayan olasılıklı bir model geliştirme sürecidir. Burada asıl önemli nokta uygun formu (doğrusal veya eğrisel) bulmak ve hangi bağımsız değişkenlerin dahil edileceğini seçmektir (Junaedi ve ark. 2021), (Manikandan ve Rajkumar 2016).

Girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Matematiksel modelleri oluşturmak için çekme dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı ve sertlik çıktı değerleri kullanılmıştır.

Bu çalışmada verileri uydurmak için ikinci dereceden polinom (kuadratik) regresyon kullanılmıştır. Model sabitleri en küçük kareler optimizasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Modelde, elyaf hacim oranı (b), bağımlı değişkenlerden ($y(b)$ =kompozitlerin mekanik özellikleri) elde edilen bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Denklemin genel temsili denklem (3.9)'da gösterilmiştir (Manikandan ve Rajkumar 2016).

$$y(b) = a_0 + a_1 \times b + a_2 \times b^2 \quad (3.9)$$

burada y , modelin tahmin edilen sonuçlarıdır, a_1, a_2 model katsayılarıdır (veri uydurma işlemi tarafından belirlenir) ve a_0 , model denkleminin kesişimimidir.

İkinci mertebeden polinom modeline alternatif olarak, Karışım Tasarım Analizi ile oluşturulan doğrusal olmayan (kübik) model de girdi parametrelerine karşılık gelen çıktı tepkisini tahmin etmek için kullanılır. Model denkleminin genel formu denklem (3.10) 'da gösterilmiştir (Junaedi ve ark. 2021).

$$y(a, b) = \beta_1 \times a + \beta_2 \times b + \beta_3 \times a \times b + \beta_4 \times a \times b \times (a - b) \quad (3.10)$$

y 'nin model tahmin sonuçları olduğu yerde, model katsayıları, a ve b sırasıyla polimer ve elyaf hacim fraksiyonlarıdır.

3.2.4. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), problemin alanını sonlu elemanlar adı verilen daha küçük parçalara bölmeyi, ardından her eleman için sınır probleminin diferansiyel veya integral denklemlerini çözmeyi ve son olarak bir araya getirerek tam çözümü elde etmeyi içeren sayısal bir yöntemdir (Rao 2011).

Hesaplamalı modellerin çözümü için FEM uygulaması aşağıdaki adımlardan oluşur:

1. Geometrinin, genellikle düz çizgiler veya düz yüzeylerle yaklaşık olarak modellenmesi. Temsilin doğruluğu, kullanılan eleman sayısı ile artar.
2. Malzeme özelliklerinin tanımı. Malzemenin türüne (izotropik, kompozit...) bağlı olarak Çekme Mukavemeti, Young Modülü, Poisson oranları vb. gibi farklı parametreler sağlanmalıdır.
3. Uygulanan yük türlerinin tanımı ve sınır koşulları.
4. Ağ oluşturma olarak da bilinen geometrinin ayrıklaştırılması.

5. Simülasyon, kuvveti elemanların düğümlerinin yer değiştirmesi ile ilişkilendiren denklemlerin aynı anda uygulanması ve çözümlmesinden oluşur (Rao 2011).

Bu çalışma için ANSYS 2021 R2 Öğrenci versiyonu kullanıldı. ANSYS, çok çeşitli ve kapsamlı mühendislik problemlerini çözmek için çok yönlü bir araç haline getiren çeşitli elemanlar, malzeme modelleri ve prosedürler sunar (Ovalı ve Esen 2011).

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Çekme Özellikleri ve Fractography

Hazırlanan numunelerin çekme testi sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir. Takviye malzemesi oranı artıkça tüm kompozitlerin çekme mukavemetlerinin arttığı gözlenmiştir. Şekil 4.2’de belirtildiği gibi matris malzemeleri birbirleri ile karşılaştırıldığında en iyi performansı PA6 gösterirken en kötü performans PE’de görülmüştür. Ayrıca PA6 diğer matris malzemeleriyle kıyaslandığında üç elyafı en yüksek oranda elyaf verimi göstermiştir.

Fu ve ark., kırılmış cam elyaf ve kırılmış karbon elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerde elyaf verimliliğini araştırmışlardır. Ağırlıkça %8, %16 ve %25 oranlarında takviye malzemeleri ile üretmiş oldukları kompozit malzemelerin çekme testi yapılmış ve cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitler içinde elyaf verimliliği, elyaf oranı artıkça azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca karbon elyafın, cam elyafa göre elyaf verimliliği daha düşük olduğu belirtilmiştir (S. Y. Fu ve ark. 2000). Choudhari ve Kakhandki, ise kırılmış karbon elyaf takviyeli PA66 kompozitin mekanik özelliklerini incelemiştir. %10, %20 ve %30 oranlarında takviye malzemelerinin çekme gerilmesi değerlerinin, elyaf oranı artıkça matris malzeme üzerindeki etkisinin azaldığını göstermiştir. Ayrıca %30 takviyeli kompozitin sem görüntüleri incelenmiş ve elyafların çoğunluğu sıyrıldığı (pull-out) belirtilmiştir (Choudhari ve Kakhandki 2020). Karsli ve Aytac ise çalışmalarında, karbon elyaf takviyeli PA6 kompozit malzemenin mekanik özelliklerini incelemişler. Matris malzeme içindeki elyaf çubuk sayısının artması ile matris içindeki deformasyon miktarının arttığı ve bu yüzden elyafların daha kolay sıyrılmasına sebep olduğunu tespit etmişlerdir (Karsli ve Aytac 2013).

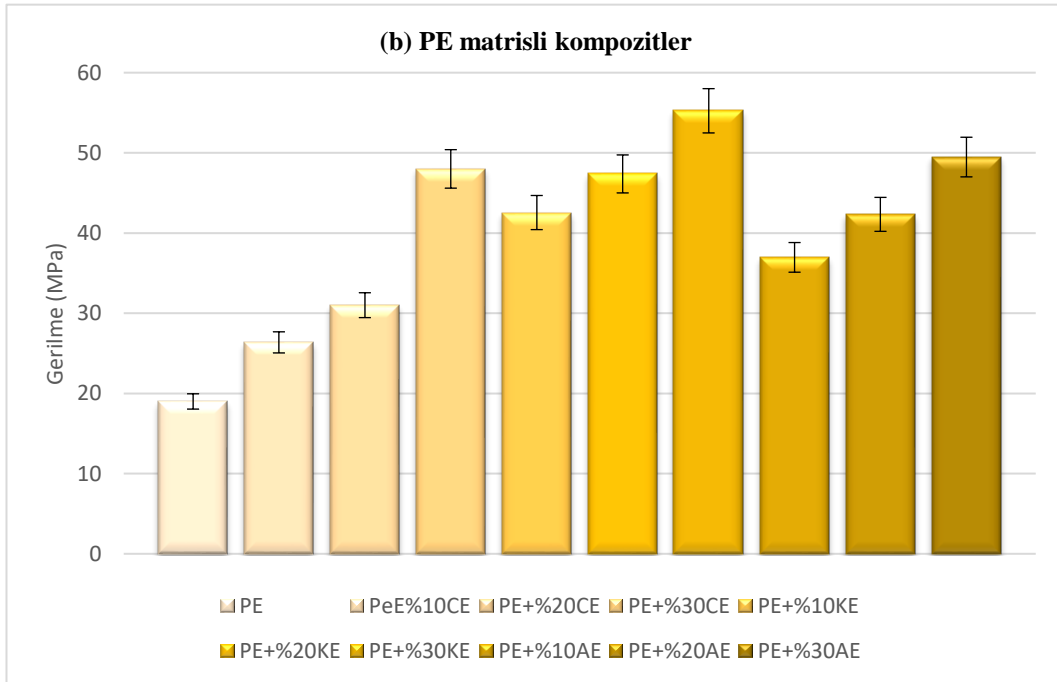
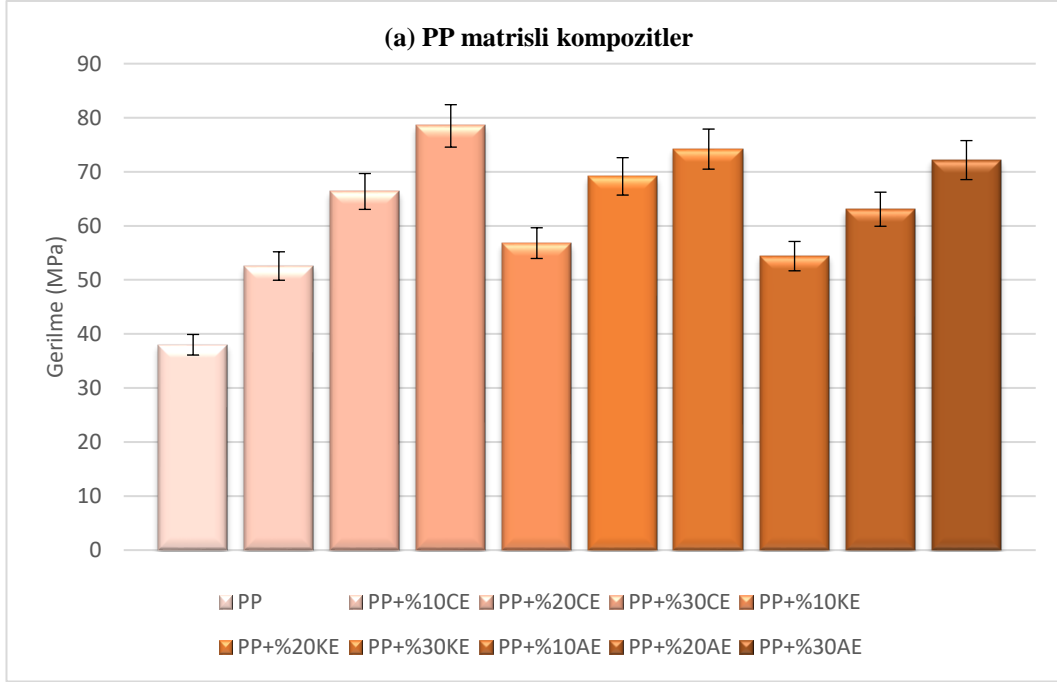
Dorigato ve Fambri elyaf hacim oranları %10, %20, %30 olan kırılmış aramid elyaf takviyeli PA12 kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemiştir. %10 aramid elyaf takviyeli kompozit en yüksek çekme dayanımı göstermiştir. Elyaf oranı artıkça çekme dayanımının azalmasını, elyafların bükülmesi ve elyafın pürüzsüz yüzeyinden dolayı matris ile iyi bir ara yüz oluşturamadığı bu yüzden de elyafların matristen sıyrılmasına neden olduğu şekilde yorumlamışlardır (Dorigato ve Fambri 2013).

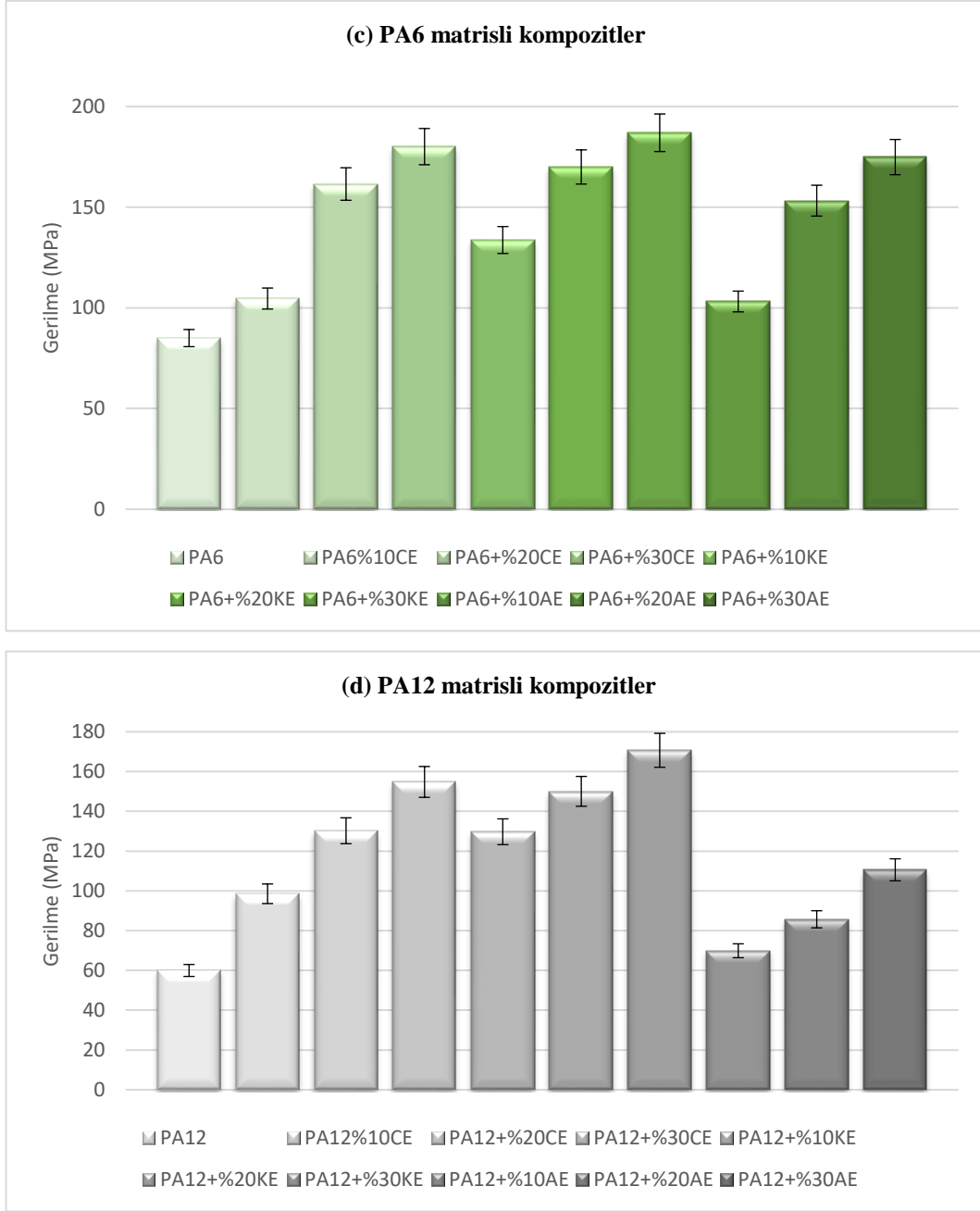
Elyafların matris malzemeler üzerindeki verimi Kelly–Tyson modeli (denklem (2.2)) kullanılarak hesaplanabilir (S. Y. Fu ve ark. 2000), (Delli ve ark. 2021).

Çekme test sonuçları incelendiğinde matris malzemelerine elyaf ilave edilmesiyle mekanik özelliklerinin önemli miktarda iyileştiği görülmüştür (Şekil 4.1). Fakat elyaf verim faktörleri (Şekil 4.2) artan elyaf oranları ile azalmıştır. Elyaf oranı arttıkça matris ile elyaf arasında deformasyon oranının artması ve ara yüzey yapışmanın zayıflaması bu neticeyi vermiştir. Dört matris ile en düşük performansı gösteren karbon elyaf olmuştur. Bunun sebebi karbon elyaf ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin ara yüzey yapışması zayıf, çünkü karbon elyaf kimyasal olarak inert ve yüzeyi pürüzsüzdür (Feng ve ark. 2021), (He ve ark. 2021). Ayrıca oksijen içeren fonksiyonel gruplar çok azdır. Bu da karbon elyafın kompozit üzerindeki verimini düşürmüştür.

Hao ve ark. sıvı damlacık yöntemini kullanarak KE ve AE'in yüzey enerjisini ölçtüler. Bu çalışma sonucunda; AE'in yüzey enerjisi $34,9 \text{ mJ m}^{-2}$ ve KE'in yüzey enerjisi $42,1 \text{ mJ m}^{-2}$ (Hao ve ark. 2013). Park ve ark. CE'in yüzey enerjisini $32,5 \text{ mJ m}^{-2}$ olarak ölçmüştür (J. M. Park ve ark. 2009). Verimli bir bağlanma elde etmek için, yapıştırılacak alt tabakanın yüzey enerjisi, yapıştırıcının yüzey geriliminden daha yüksek olmalı, böylece iyi bir ıslanabilirlik veya ıslanma elde edilir (Lu ve ark. 2019); sıcak eriyik yapıştırıcının ıslanmasına yardımcı olmak için alt tabakaların yüzey enerjisinden daha düşük yüzey gerilimine sahip olması gerekir (Fenouillot ve ark. 2009). Bundan dolayı KE en yüksek yüzey enerjisine sahip olduğundan, performansının diğer elyaflardan daha yüksek olması beklenir. Şekil 4.2 b'de görüldüğü gibi, beklenenin tam tersine KE oranı arttıkça elyaf performansı belirgin şekilde düşmüştür. Yukarıda açıklandığı gibi, bunun nedeni KE'in yüzeyinin pürüzsüz olması ve KE 'in matris içinde homojen olarak dağılmamasıdır. Elyaf hacim oranı %30 olan KE takviyeli PP incelendiğinde, PP'deki katkı maddesi içeriği arttıkça elyaf verimi düşmüştür. Şekil 4.4 b incelendiğinde KE 'nin PP matrisinde homojen olarak dağılmadığı görülmektedir. Wang et al. (2008), elyaf dağılımının karbon elyaf takviyeli numunelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış ve elyaf dağılımının homojen olmamasının kompozitin mukavemetini olumsuz etkilediği sonucuna varmıştır (C. Wang ve ark. 2008). Bizim çalışmamızda da KE takviyeli numunelerin elyaf verimindeki düşüşün bir nedeni, bu elyaf oranının artmasıyla homojen

dağılımın bozulmasıdır. Ancak en yüksek KE verimine baktığımız zaman, hacimce %10 takviyeli PP ile yapıldığında görülmektedir. Bu, KE içeriği ile matris deformasyonunun arttığı ve elyafların matrise istenen düzeyde yapışma sağlamadığı anlamına gelir (Delli ve ark. 2021).





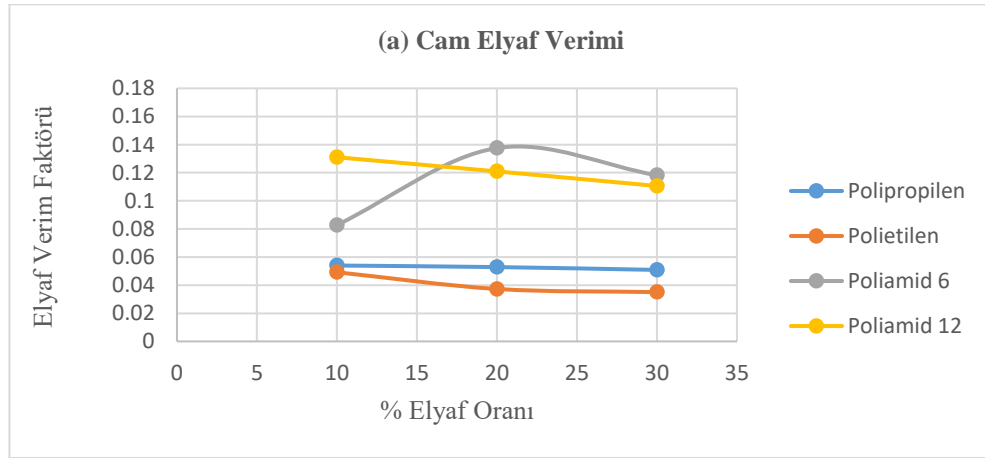
Şekil 4.1. a) PP, b) PE, c) PA6, d) PA12 matrisli kompozitlerin çekme deneyi sonuçları

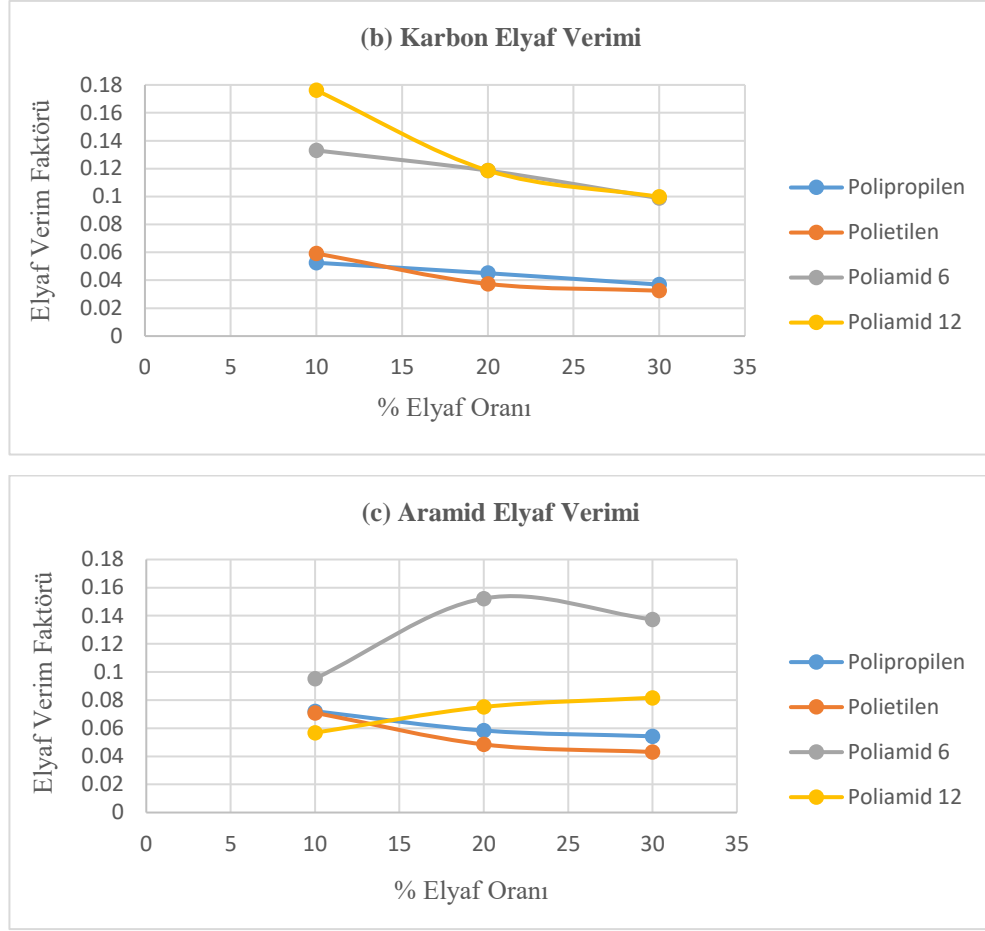
Ayrıca, F_u ve ark. elyaf verimliliğindeki bu düşüşü şu şekilde açıklamıştır; elyaf hacim içeriği arttıkça, ortalama elyaf uzunluğu azalır. Bunun sebebi, elyaf oranının artması, elyaf uzunluğuna daha fazla zarar vermesinden kaynaklanmaktadır. Bu hasar, esas olarak daha yüksek elyaf-elyaf etkileşimine bağlanır. Ortalama KE uzunluğunun, ortalama CE ve AE uzunluğundan daha az olduğu da not edilmiştir. Bu, KE'in daha kırılkan olması ve bu nedenle işlem sırasında kolayca kırılmasıyla açıklanmaktadır (S. Y. Fu ve ark. 2000).

Çalışmamızda da KE içeriği artmasıyla kompozitlerin elyaf verimliliğindeki azalmasını, KE'in yüksek kırılabilirliği ile ilişkilendirilebilir.

Dört matris ile en yüksek performans gösteren AE olmuştur. AE'nin en yüksek verimi PA6, en düşük verimi PE ile yaptığı kompozitlerde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.2 c). Ayrıca PA6 diğer matris malzemeleriyle kıyaslandığında üç elyaf ile en yüksek oranda elyaf verimi göstermiştir. Bu sonuçlardan PA6'nın üç elyaf ile en iyi ara yüzey bağlantısı gerçekleştirmiş olduğu anlaşılmaktadır. Tüm numunelerin gevrek kırıldığı görülmüştür. Bu da elyaf kırılması ile hasar oluştuğunu göstermektedir (Ari ve ark. 2022).

Şekil 4.2 b incelendiğinde en yüksek elyaf verimi %10 karbon elyaf katkı PA12 ile yapılan kompozitin olduğu görülmektedir. Bu da karbon elyaf oranı arttıkça matristeki deformasyon miktarının arttığını göstermektedir. PA6, %20 katkı cam ve aramid elyaf ile en yüksek performans göstermiştir (Şekil 4.2 a,c). AE, en yüksek veriminin PA6 ile, en düşük verimin ise PE ile yapılan kompozitlerde olduğu görülmüştür.



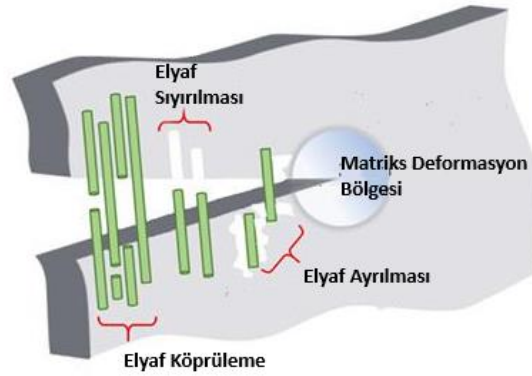


Şekil 4.2. a) CE, b) KE, c) AE takviyeli kompozitlerin elyaf verim faktörleri

%30 elyaf takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.4-4.7’de görülmektedir. SEM görüntüler incelendiğinde kompozit malzemelerde hasar mekanizması üç aşamada gerçekleşmektedir (Şekil 4.3) (Bingöl ve Çavdar 2016). İlk aşamada matris malzemesinde mikro çatlaklar oluşmuş daha sonra elyaf ile matris arasında ayrılma en son ara yüzeyde ayrılma ve elyafların kırılması ile hasar oluştuğu görülmüştür (Huang ve Zhao 2012).

Elyaf lar ve polimer matrisler arasındaki fiziksel yapışma ve bu iki malzeme arasındaki arayüzde boşlukların oluşumu çoğunlukla elyafların ıslatma özellikleri tarafından kontrol edilir. İyi ıslanabilirlik matrisin pürüzlü yüzeyini tamamen kaplayan takviye malzemesinin üzerine akacağı ve tüm havayı alacağı anlamına gelir (J. Wang ve ark. 2017). Eğer matris ile elyaf arasında iyi bir ıslanma oluşmazsa, kompozitlerde sıyrılm (pull-out) gözükme ktedir (J. Wang ve ark. 2017). SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil

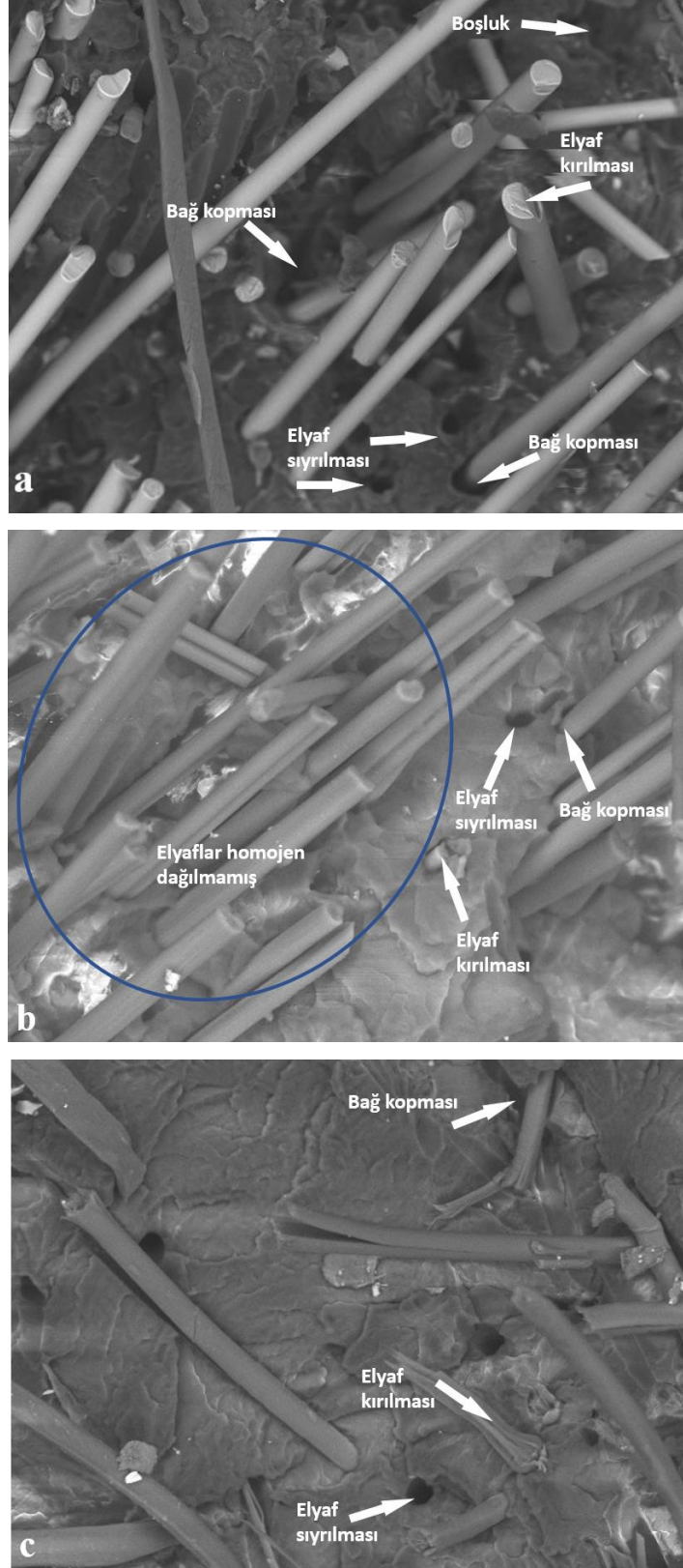
4.4-4.7) elyaflarda sıyrılma oluştuğu ve sıyrılan elyafların yzeyine bakıldığında polimerik matrisle kaplanmadığı g3r3lm3řt3r. Bu elyaf ile matris arasındaki zayıf ara yzeyde yapışma olduğunu anlamına gelmektedir. Elyafların etrafında koyu halkalar ise elyaf etrafındaki matrisle yerel deformasyon olduğunu g3stermektedir (Lozano ve Barrera 2001). Ayrıca, ara yzeyde oluşan bu koyu halkalar, elyafların matrisle bağlarının g3z3ld3đ3n3 g3sterir. Koyu halka, elyafların matristen ayrıldıktan sonra matrisin elyaf etrafındaki lokal deformasyonundan kaynaklanmaktadır (Hao ve ark. 2013), (Delli ve ark. 2021).



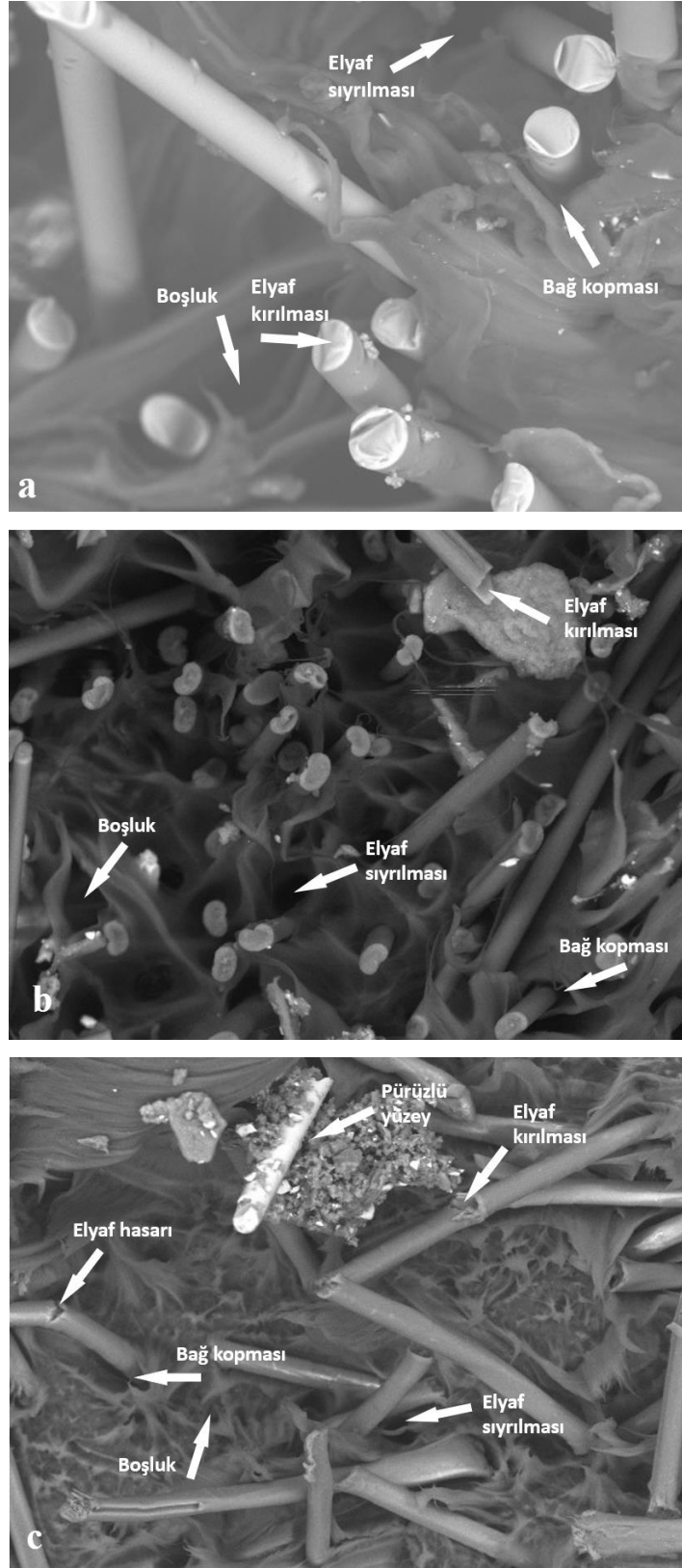
şekil 4.3. Kompozit malzemenin deformasyon da oluşan matris-elyaf davranışları

şekil 4.4 c- 4.5 c- 4.6 c- 4.7 c'de hacim oranı %30 olan aramid elyaf takviyeli kompozitlerin kırılma yzeyleri verilmiştir. G3r3nt3ler incelendiğinde elyaf oranı artmasıyla elyaflarda b3k3lme ve g3aprazlama oluşmuştur. Bu durum, elyaf performansını olumsuz etkilemiştir.

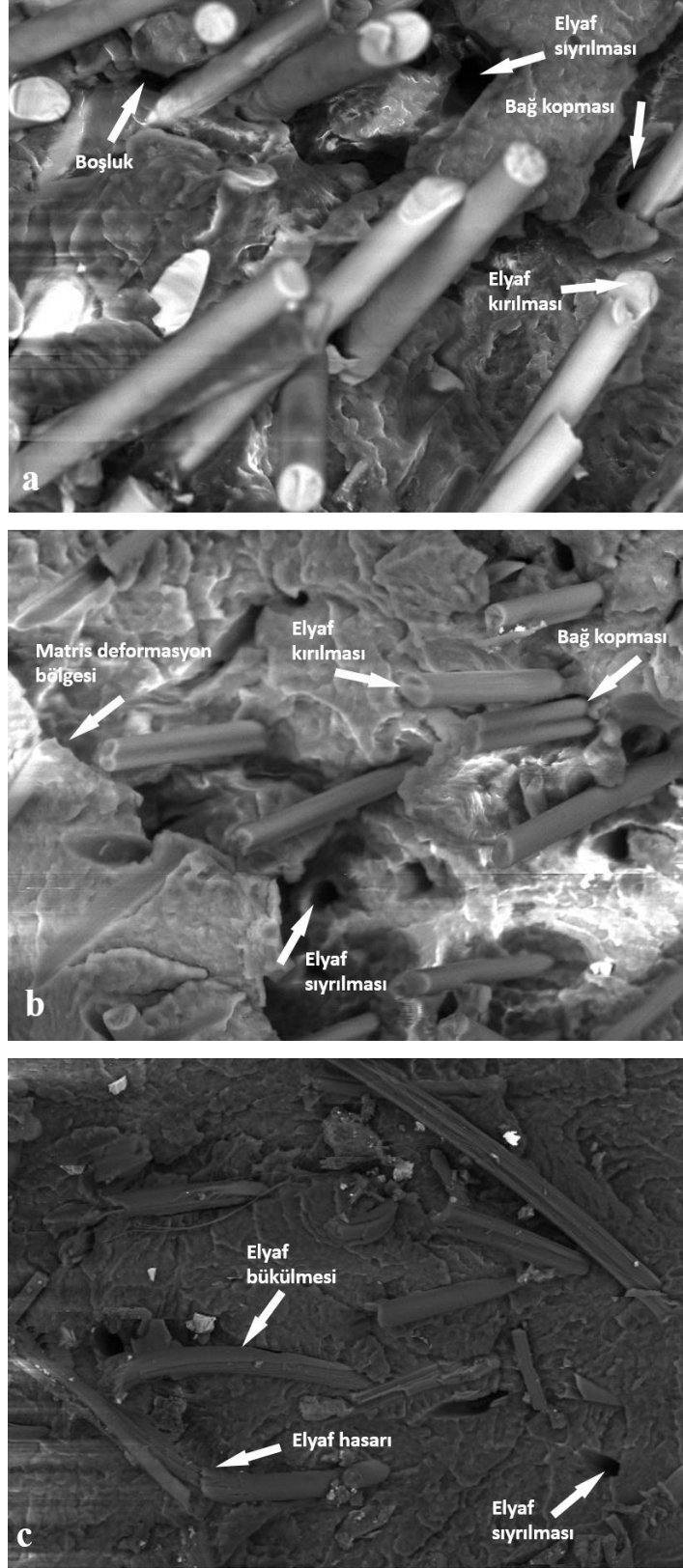
şekil 4.4 b- 4.5 b- 4.6 b- 4.7 b'de %30 karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kırılma yzeyleri incelendiğinde sıyrılan elyafların yzeyinin temiz ve p3r3zs3z olduğu g3r3lm3řt3r. Bunun neticesinde yukarıda belirtildiği gibi en d3ř3k performans karbon elyaf ile yapılan kompozitlerde g3r3lm3řt3r.



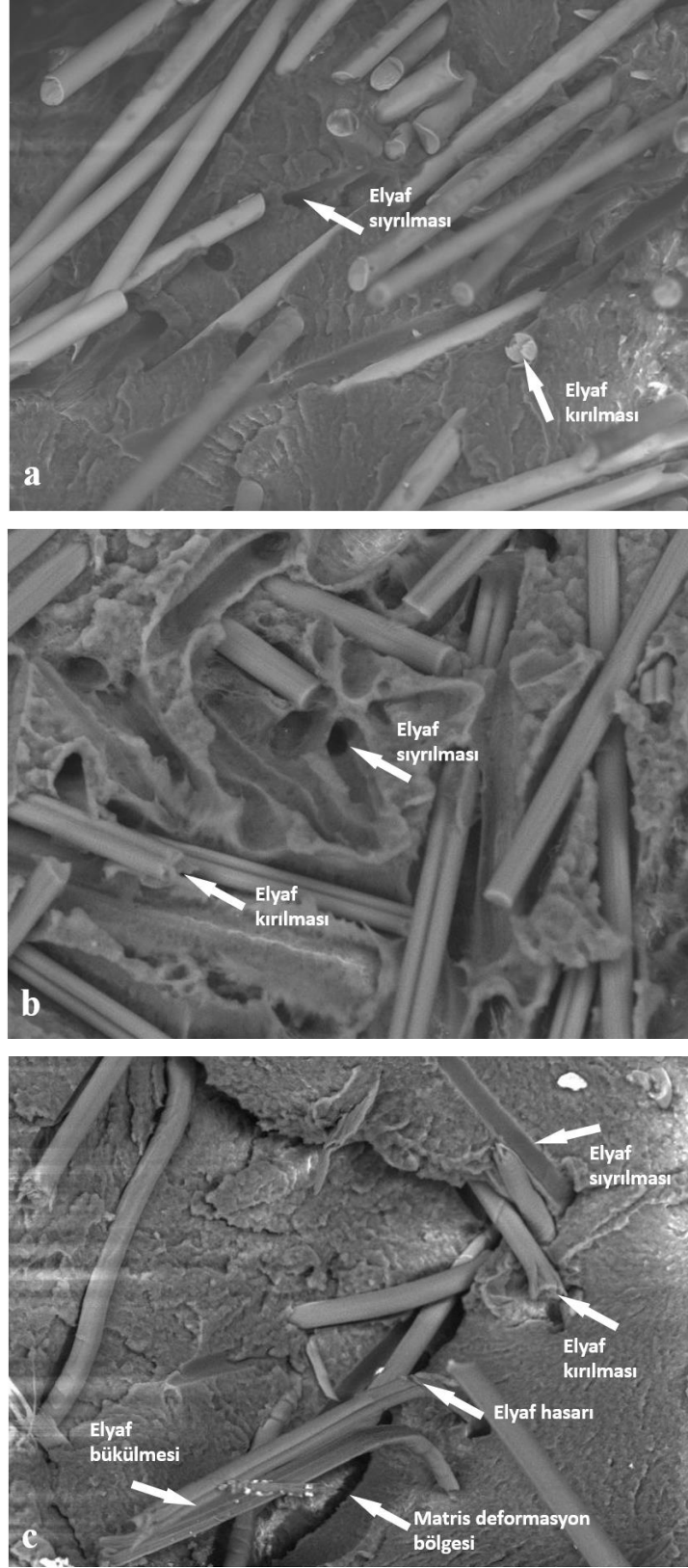
Şekil 4.4. %30 elyaf takviyeli PP kompozitlerin çekme deneyi kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE



Şekil 4.5. %30 elyaf takviyeli PE kompozitlerin çekme deneyi kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE



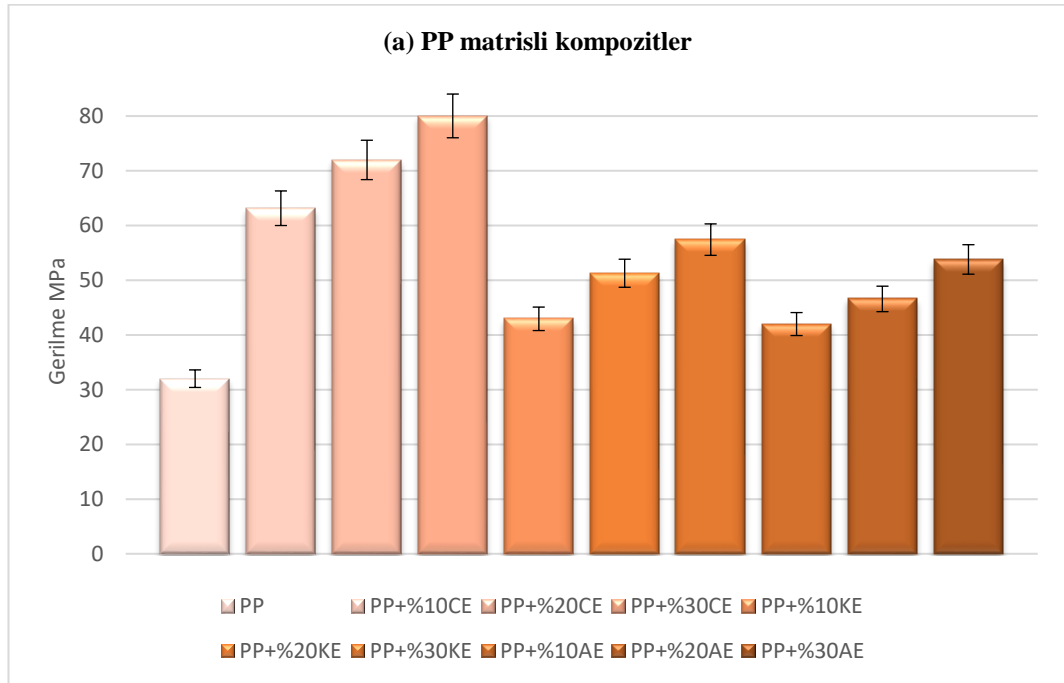
Şekil 4.6. %30 elyaf takviyeli PA6 kompozitlerin çekme deneyi kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE

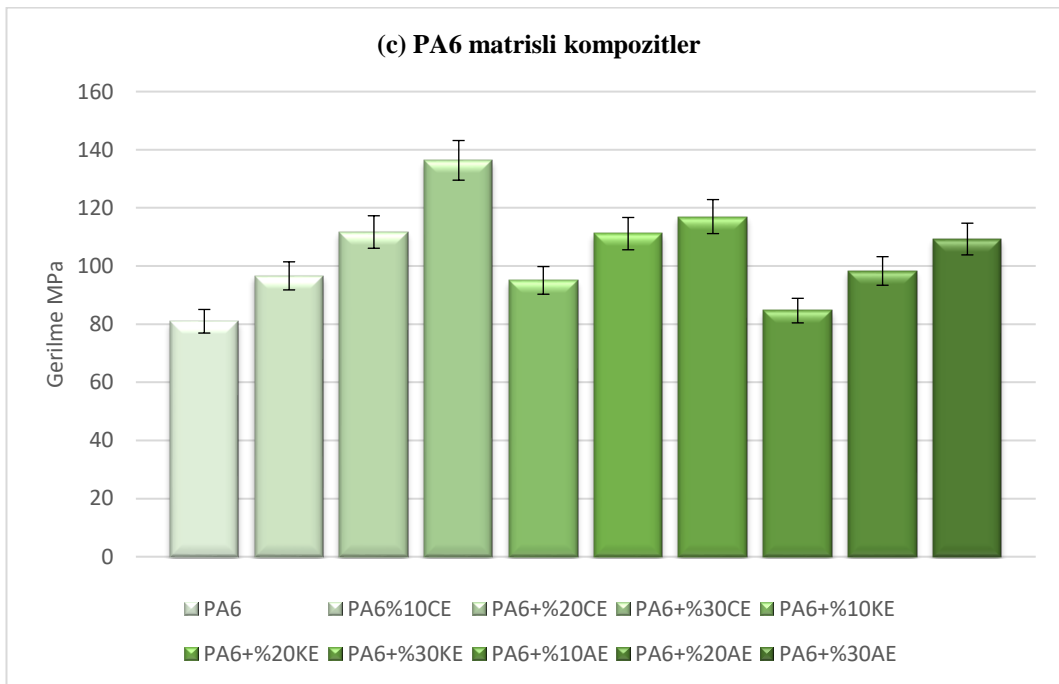
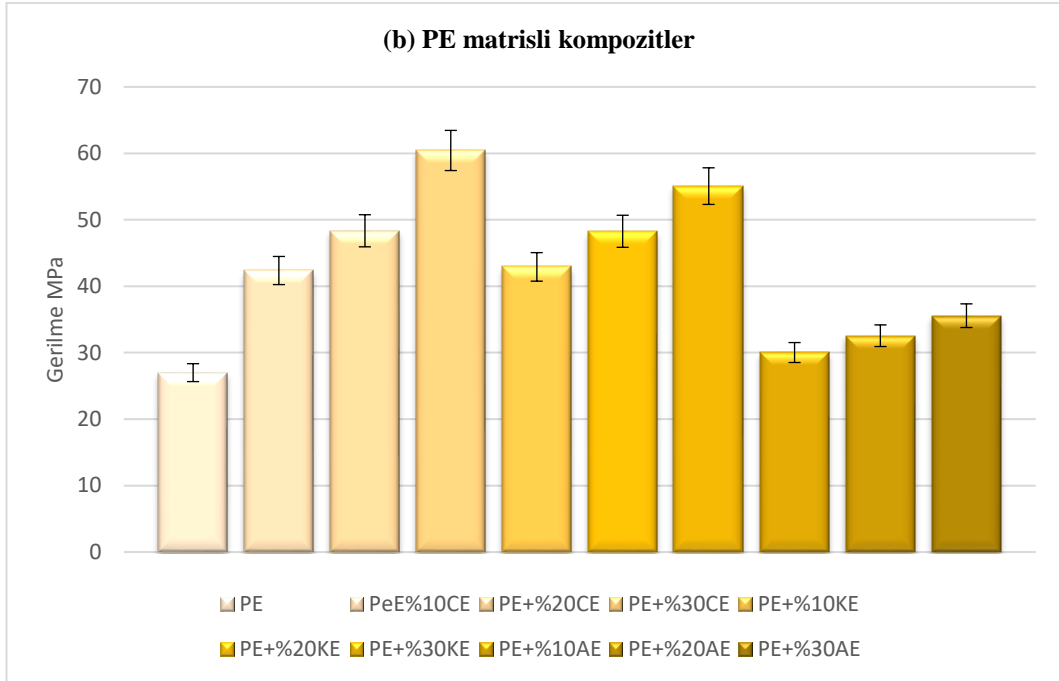


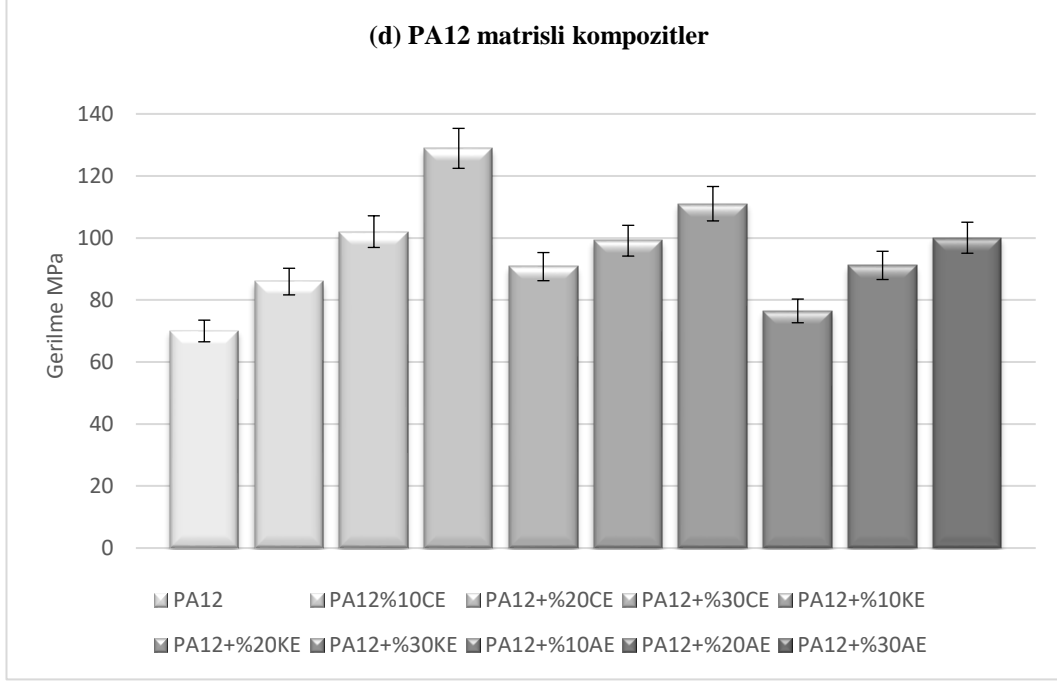
Şekil 4.7. %30 elyaf takviyeli PA12 kompozitlerin çekme deneyi kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE

4.2. 3 Nokta Eğme Özellikleri

3 noktalı eğme test sonuçları Şekil 4.8’de görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde elyaf oranları arttıkça kompozitlerin eğilme gerilmesinin arttığı ve sünekliliğinin azaldığı görülmüştür. Fakat elyaf ile matris ara yüzey yapışma sorunu ve elyafların rastgele dağılımları mekanik özellikleri olumsuz etkilemiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin daha dayanıklı olması beklenirken cam elyaf takviyeli kompozitlerin daha dayanıklı olması bu sonucu doğrulamaktadır (Choudhari ve Kakhandki 2020), (Karahan ve ark. 2013).







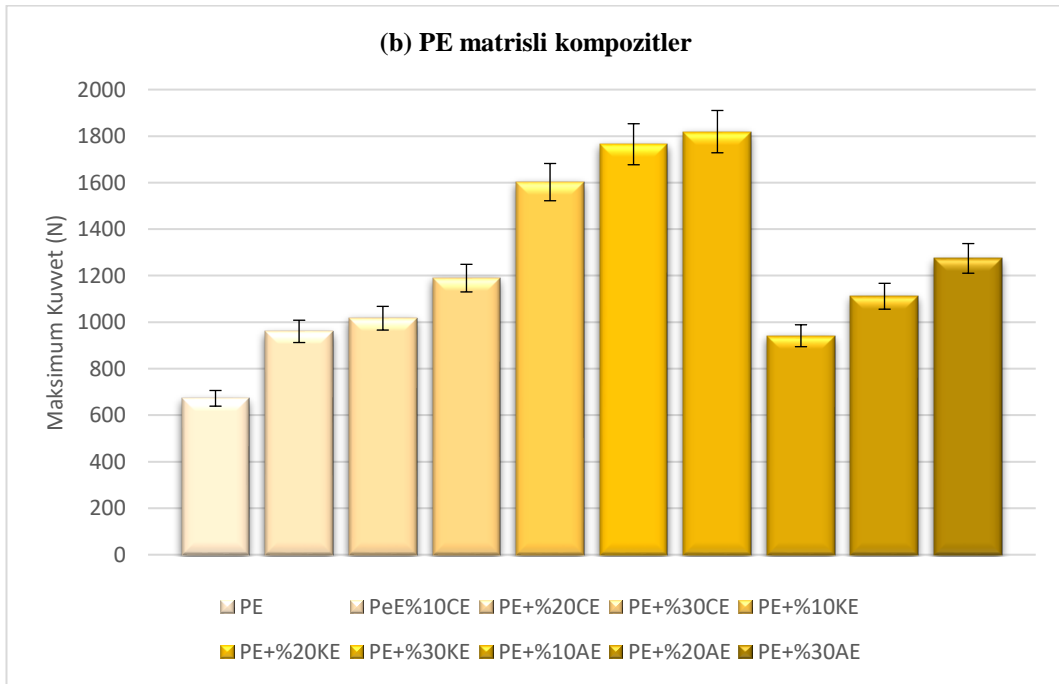
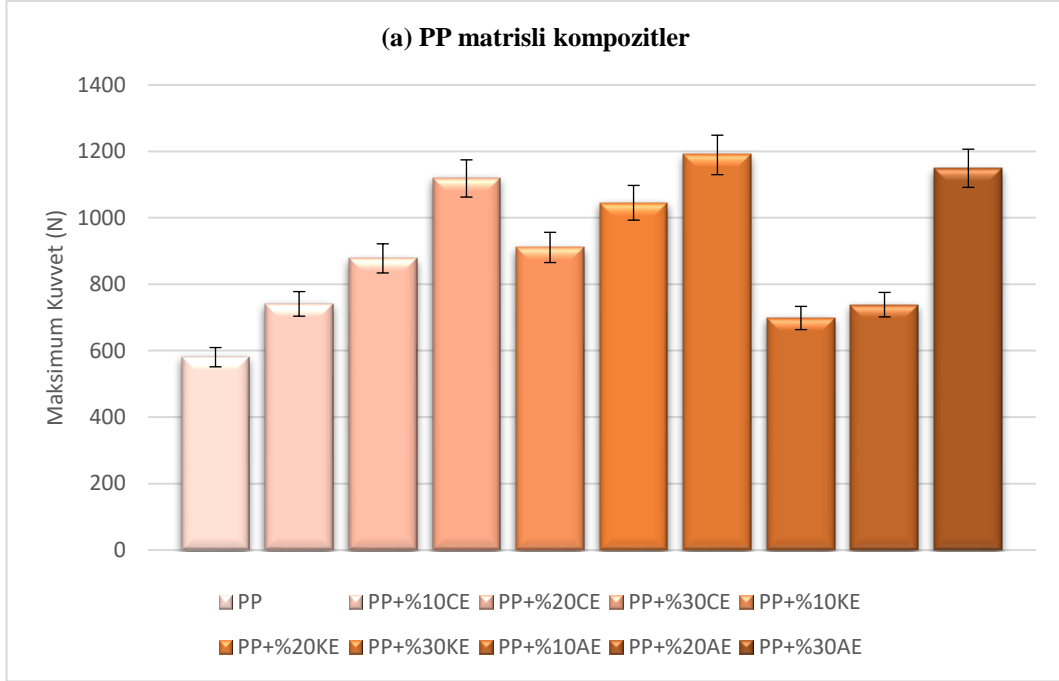
Şekil 4.8. a) PP, b) PE, c) PA6, d) PA12 matrisli kompozitlerin 3 nokta eğme deneyi sonuçları

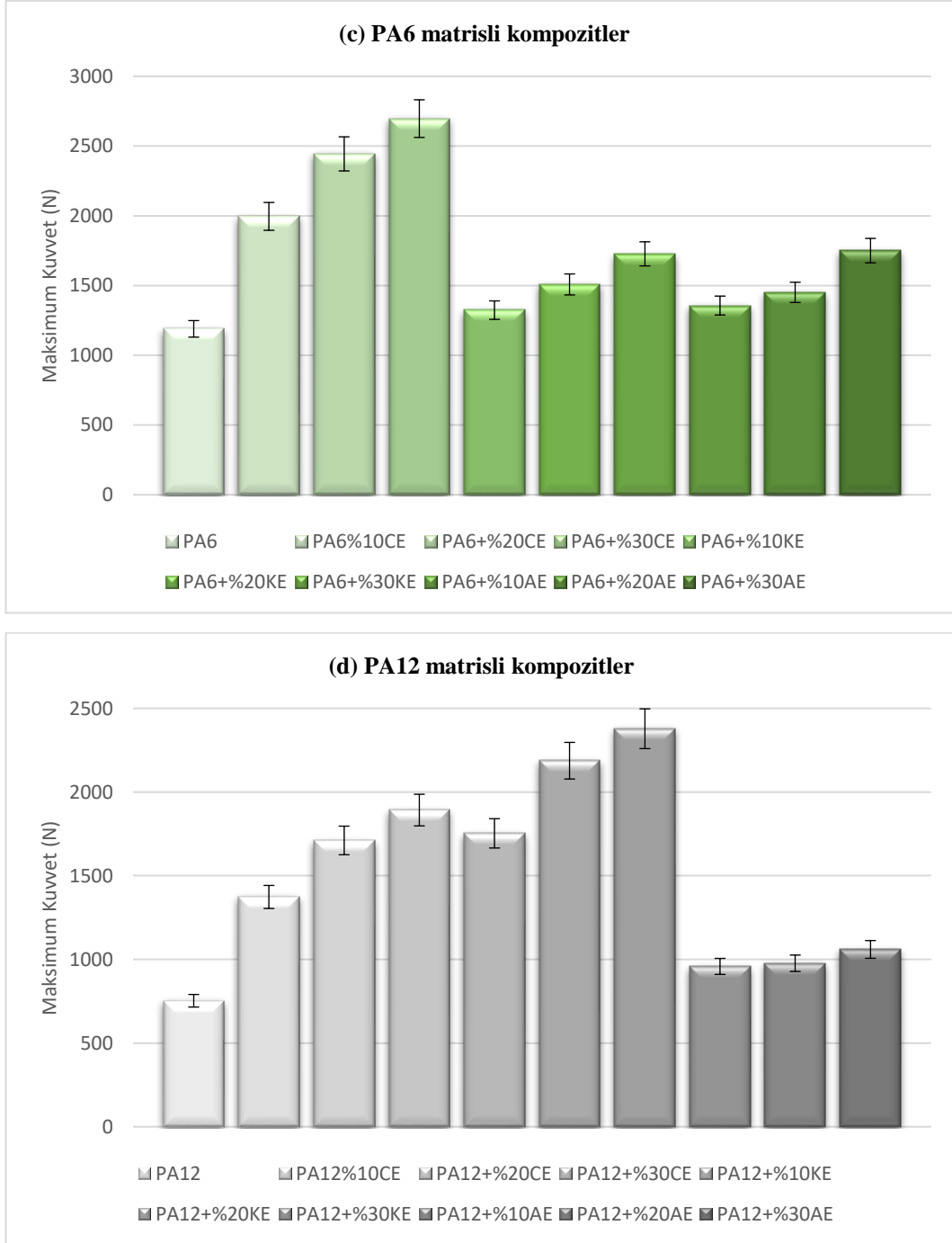
4.3. Düşen Ağırlık Darbe Özellikleri ve Fractography

Test sonuçları Şekil 4.9’da görülmektedir. Temas eden en büyük kuvvetler karşılaştırıldığında artan elyaf oranları ile kuvvetin arttığı gözlenmiştir.

Yapılan düşen ağırlık testinin sonucunda tüm numuneler delinmiştir. Şekil 4.9’daki kompozitlerin darbe sonuçlarına baktığımızda elyaf oranı arttıkça darbe kuvvetinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, KE, CE ve AE'dan daha yüksek darbe dayanımına sahip olmasına rağmen, numuneler benzer özellikler sergilemiştir.

Şekil 4.9 c incelendiğinde PA6+CE, PA6+KE takviyeli kompozitden daha iyi bir sonuç vermiş olduğu gözükmemektedir. Bu da KE ile PA6 matrisin ara yüzey yapışmasının zayıf olduğunu göstermektedir. Karbon elyaf kimyasal olarak inert ve pürüzsüz bir yüzeye sahip ve oksijen içeren fonksiyonel gruplar çok az olduğu için karbon elyaf ile güçlendirilmiş kompozitlerin ara yüzey yapışması zayıftır. Bu yüzden karbon elyafın kompozit üzerindeki verimini düşürmüştür (J. Li ve Cai 2011).





Şekil 4.9. a) PP, b) PE, c) PA6, d) PA12 matrisli kompozitlerin düşen ağırlık darbe deneyi sonuçları

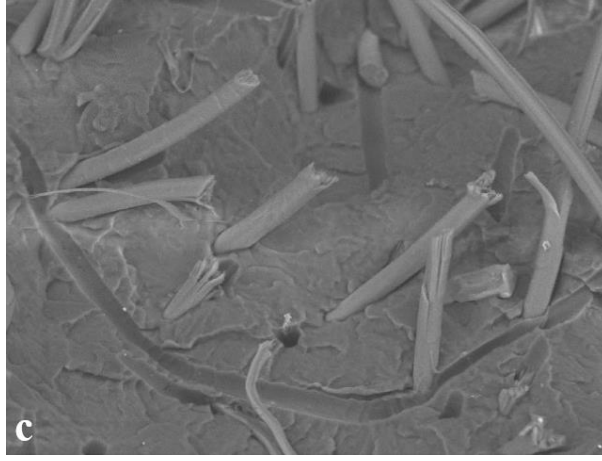
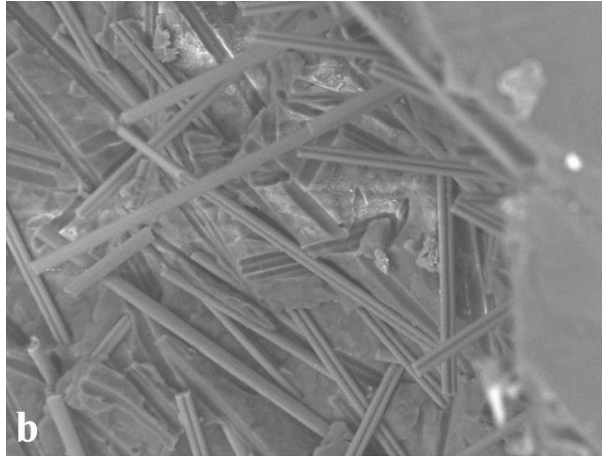
%30 elyaf takviyeli kompozitlerin ağırlık düşürme testi sonucu kırılan yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde elyaflarda gevrek kırılma olduğu görülmüştür (Şekil 4.10-4.13). Kompozit malzemelerin darbeye karşı verdikleri cevap çok karmaşıktır. Darbe yüklemesi altında çarpan cismin gözle görülemeyen veya zayıf şekilde seçilebilen hasar

modları vardır. Düşük hızdaki darbeler gözle görülür hasar oluşturmayabilirler. Kompozitlerin darbeye uğraması ile meydana gelen darbe hasarları matris çatlağı, delaminasyon ve elyaf hasarlarıdır. Düşük hızlı darbelerde matris çatlağı ile başlayan hasar, delaminasyon oluşmasına sebep olmuş ve kompozite uygulanan ve artarak devam eden darbe enerjisi nedeniyle elyaf hasarları meydana gelerek, vurucunun numuneye saplandığı ve numuneyi deldiği gözlenmiştir (Guo ve ark. 2020), (T. Li ve ark. 2021).

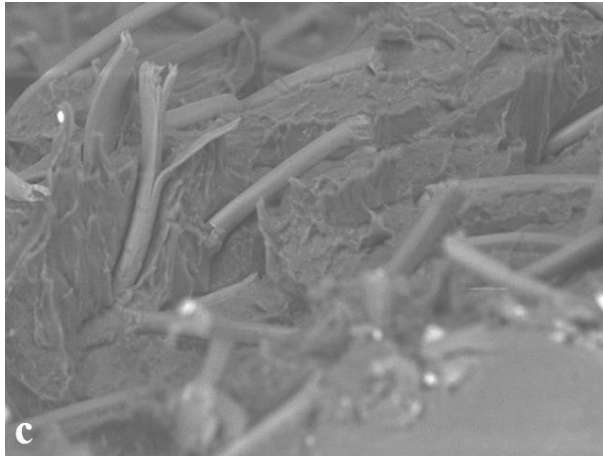
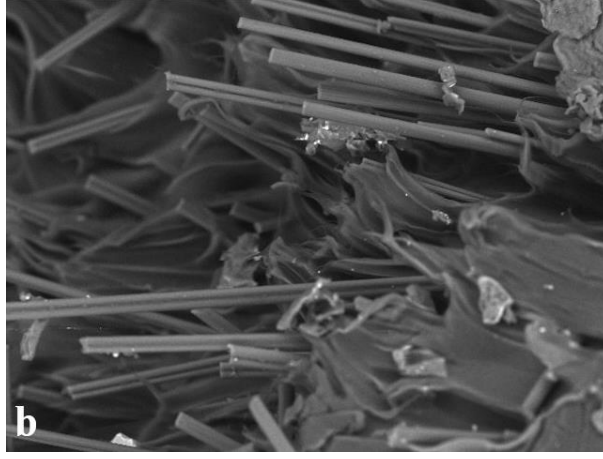
Kompozitlerde sıyırılma (pull-out) gözükmemektedir. Sıyrılan elyafların yüzeyine bakıldığında polimerik matrisle kaplanmadığı yerler görülmüştür ve yüzeyi temizdir. Bu, elyaf ile matris arasında zayıf ara yüzey yapışma olduğunu gösterir (Choudhari ve Kakhandki 2020). Elyafların etrafında koyu halkalar ise elyaf etrafındaki matriste yerel deformasyon olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.10 a,b- 4.13 a,b'deki %30 CE ve KE takviyeli kompozitlerin kırılma yüzeyi incelendiğinde sıyrılan elyafları yüzeyi temiz olduğu görülmüştür. Bu durum elyaf ile matris ara yüzey yapışma performansının iyi olmadığını göstermiştir.

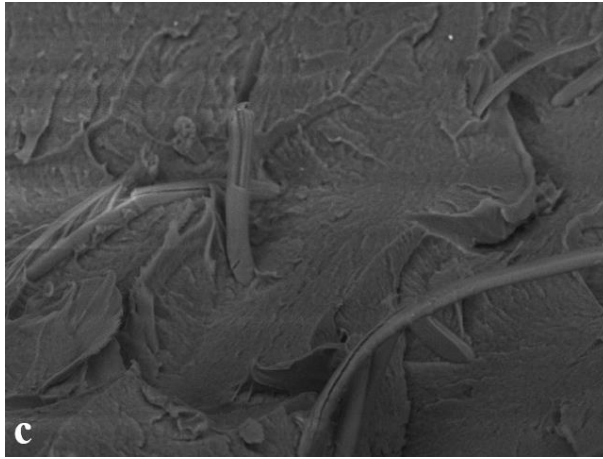
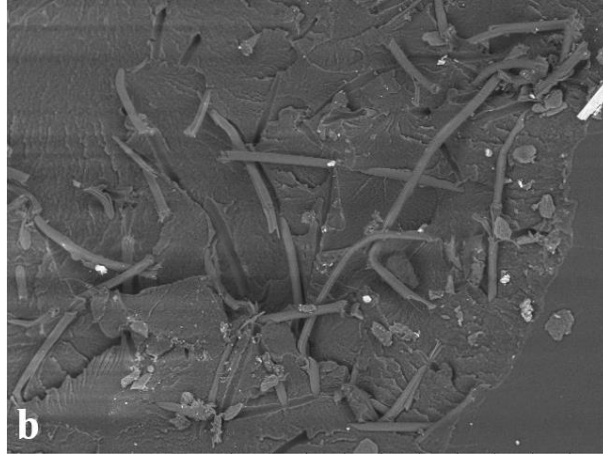
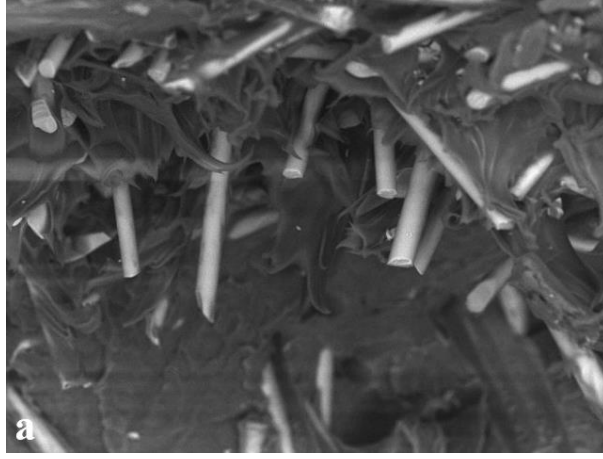
Şekil 4.10 c- 4.13 c'deki %30 aramid elyaf takviyeli kompozitlerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde elyaf oranı artmasıyla elyaflarda bükülme ve çaprazlama görülmüştür. Bu, elyaf performansını olumsuz etkilemiştir (Ari ve ark. 2022) (Laura ve ark. 2000).



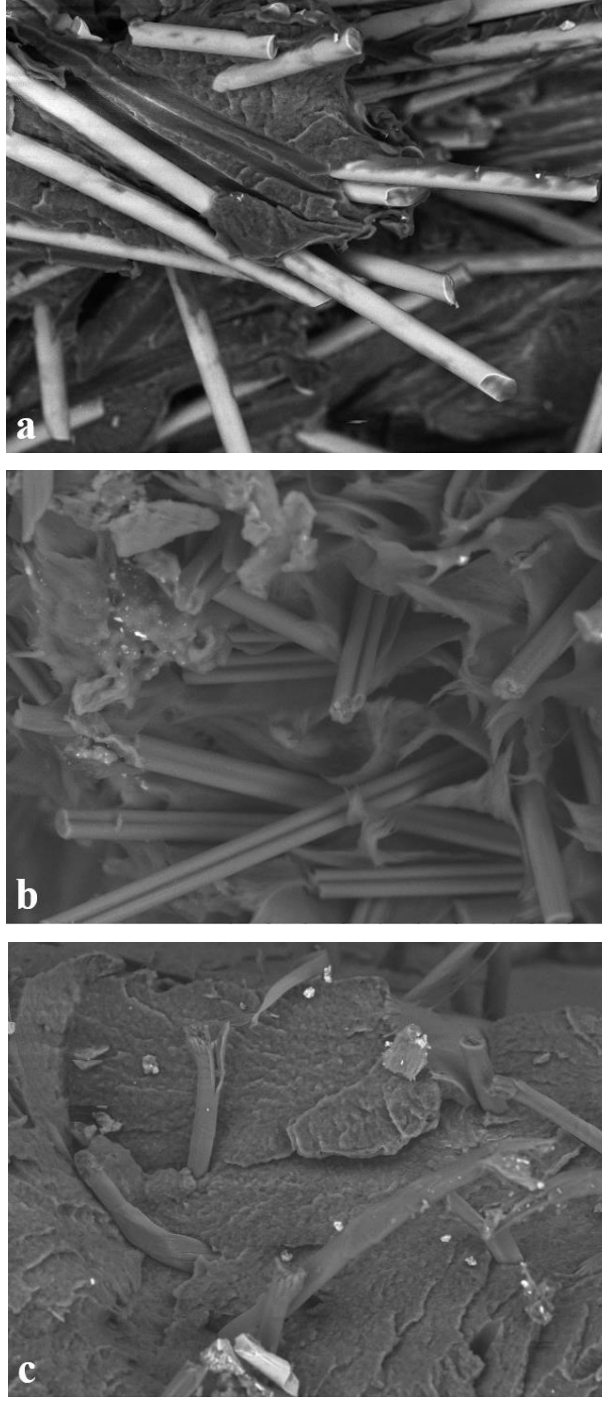
Şekil 4.10. %30 elyaf takviyeli PP kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE



Şekil 4.11. %30 elyaf takviyeli PE kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE



Şekil 4.12. %30 elyaf takviyeli PA6 kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE



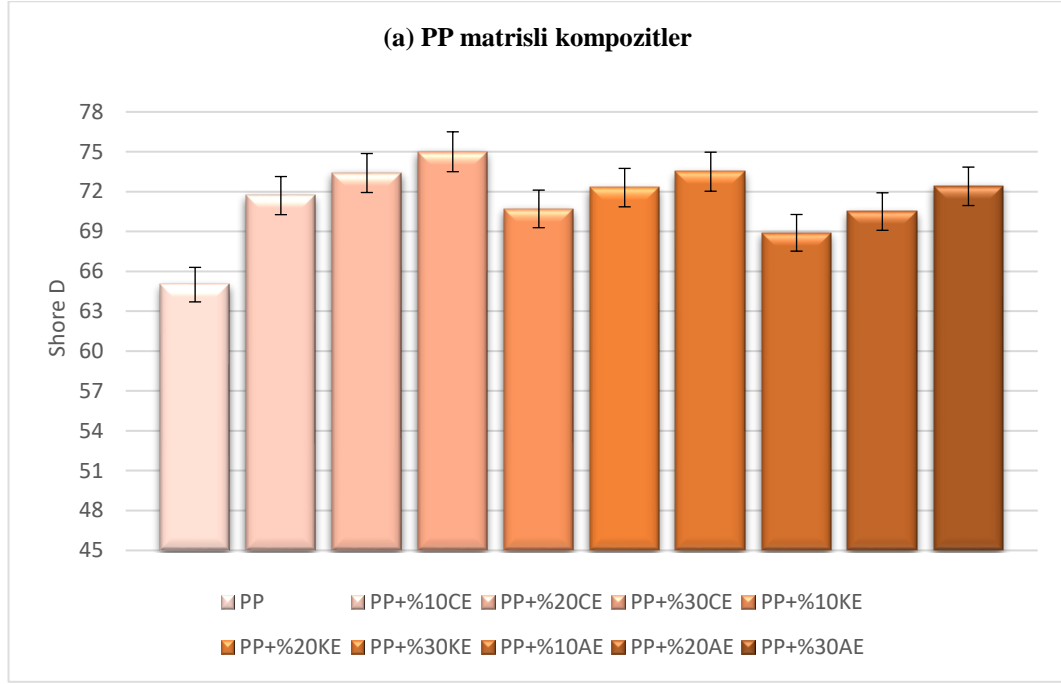
Şekil 4.13. %30 elyaf takviyeli PA12 kompozitlerin SEM görüntüleri (a) CE, (b) KE, (c) AE

4.4. Sertlik Özellikleri

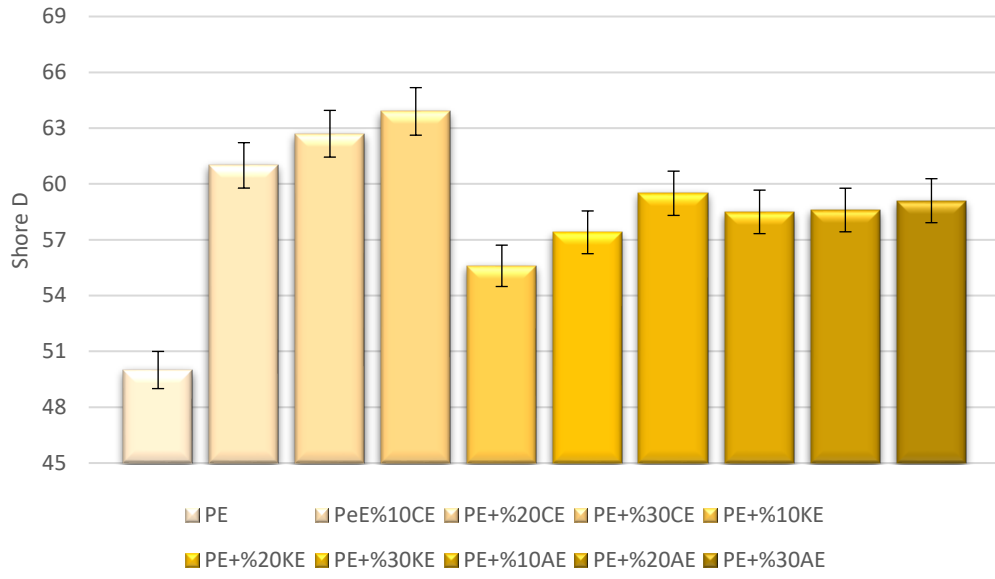
Sertlik deney sonuçları Şekil 4.14'de verilmiştir. Elyaf oranlarının artmasıyla kompozitlerin sertlik değerlerinin arttığı ve takviye elemanın çeşidi ve elyaf oranı matris

üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. En yüksek sertlik değeri karbon elyaf takviyeli PA12’de görülmüştür.

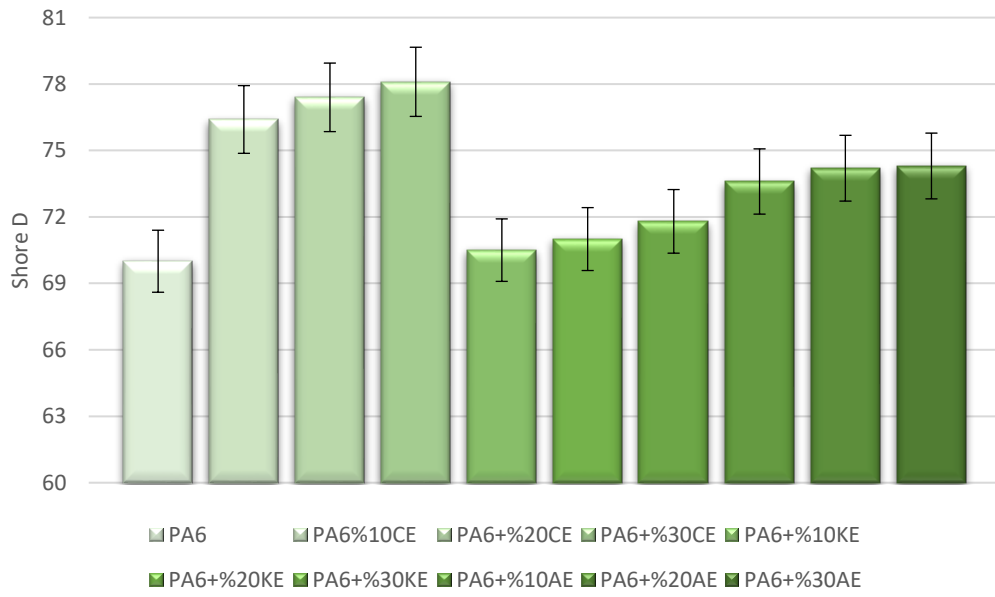
Kompozitlerin sertliğindeki bu artış, malzeme üzerine basınç uygulandığında matris ve elyaf birbirine preslenir ve bir direnç oluşur (Hu ve ark. 2019). Bu davranış nedeniyle, elyaf ve matris arasında bağ oluşur; yükü ara yüze daha etkin bir şekilde aktarır ve kompozitin sertliği artar (Suresha ve ark. 2010), (Abasi ve Aabass 2018). Elyaf oranı artmasıyla, bağlantı noktalarının sayısı artmış ve bir bütün olarak iskelet yapısı, kompozitin hareketini engelleyerek malzemenin dış basınca direnme yeteneğini geliştirmiştir (Andó ve ark. 2009), (Ozkoc ve ark. 2005).

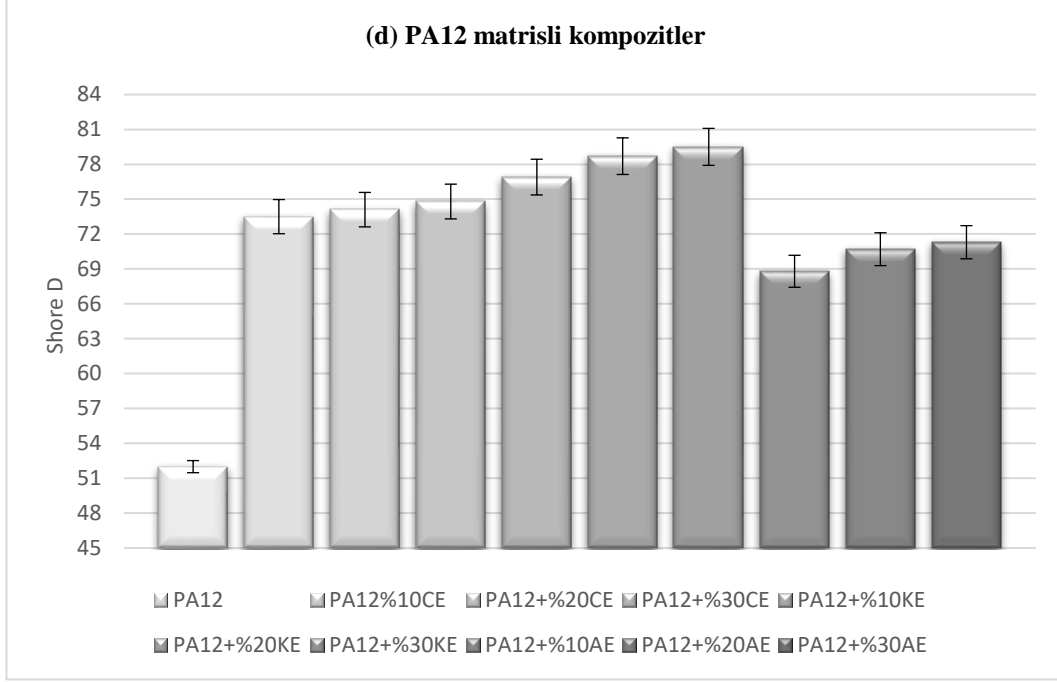


(b) PE matrisli kompozitler



(c) PA6 matrisli kompozitler





Şekil 4.14. a) PP, b) PE, c) PA6, d) PA12 matrisli kompozitlerin Shore D sertlik deneyi sonuçları

4.5. Deneysel Sonuçların Analizi

Sinyal değeri (S) sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü (N) ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil etmektedir. Bu çalışmada hedef olarak en yüksek değere ulaşmaktır (büyük değer iyi). Bu yaklaşıma göre S/N oranını hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılır. Deney sonuçlarının S/N oranları Çizelge 4.1’de verilmiştir (Kumar ve Balachander 2020).

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)’de y ölçüm değeri, n deney sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 4.1. Deney sonuçlarının S/N oranları

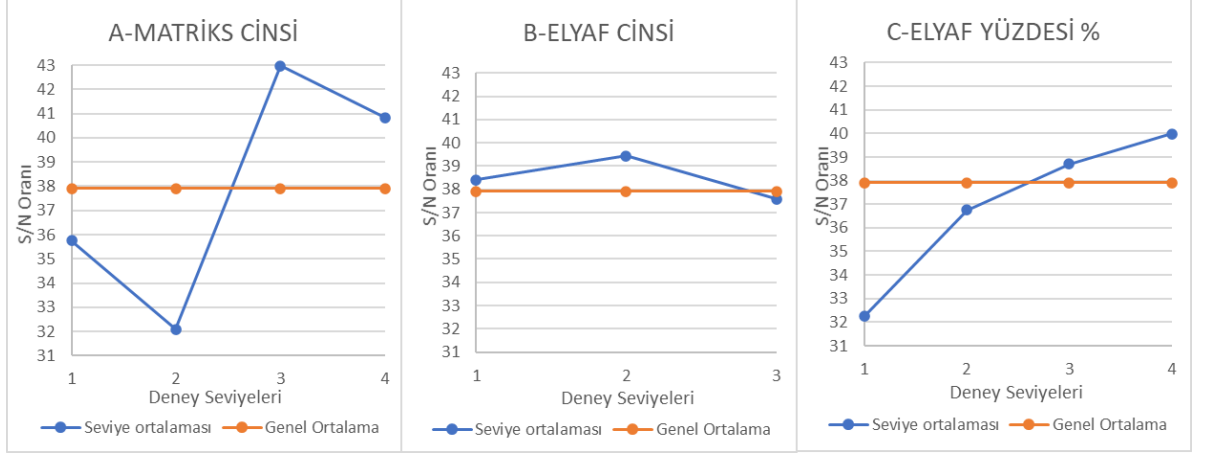
Deney No	Çekme		3 Nokta		Düşen Ağırlık		Sertlik	
	(MPa)	S/N	Eğme (N)	S/N	(N)	S/N	(Shore D)	S/N
1	38,00	31,60	32,00	30,10	580,46	55,28	65	36,26
2	19,00	25,58	27,00	28,63	672,48	56,55	50	33,98
3	85,00	38,59	81,00	38,17	1189,23	61,51	70	36,90
4	60,00	35,56	70,00	36,90	752,70	57,53	52	34,32
5	52,56	34,41	63,15	36,01	740,91	57,40	71,7	37,11
6	66,36	36,44	71,98	37,14	877,76	58,87	73,4	37,31
7	78,49	37,90	80,03	38,07	1118,40	60,97	75	37,50
8	33,82	30,58	42,37	32,54	960,35	59,65	61	35,71
9	40,57	32,16	48,35	33,69	1017,00	60,15	62,7	35,95
10	49,06	33,82	60,43	35,63	1189,20	61,51	63,9	36,11
11	104,65	40,39	96,6	39,70	1996,20	66,00	76,4	37,66
12	161,53	44,17	111,7	40,96	2444,50	67,76	77,4	37,77
13	180,08	45,11	136,4	42,70	2697,00	68,62	78,1	37,85
14	98,55	39,87	85,93	38,68	1373,30	62,76	73,5	37,33
15	130,24	42,29	102	40,17	1710,70	64,66	74,1	37,40
16	154,79	43,79	128,9	42,21	1892,40	65,54	74,8	37,48
17	56,80	35,09	42,94	32,66	910,80	59,19	70,7	36,99
18	69,15	36,80	51,28	34,20	1045,30	60,38	72,3	37,18
19	74,19	37,41	57,41	35,18	1189,20	61,51	73,5	37,33
20	42,56	32,58	42,91	32,65	1602,20	64,09	55,6	34,90
21	47,37	33,51	48,28	33,67	1765,00	64,93	57,4	35,18
22	55,25	34,85	55,07	34,82	1819,20	65,20	59,5	35,49
23	133,71	42,52	95,06	39,56	1323,70	62,44	70,5	36,96
24	169,99	44,61	111,1	40,91	1507,80	63,57	71	37,03
25	186,99	45,44	117	41,36	1727,20	64,75	71,8	37,12
26	129,72	42,26	90,75	39,16	1753,20	64,88	76,9	37,72
27	150,06	43,53	99,12	39,92	2187,30	66,80	78,7	37,92
28	170,70	44,64	111	40,91	2378,50	67,53	79,5	38,01
29	54,39	34,71	41,98	32,46	698,43	56,88	68,9	36,76
30	63,07	36,00	46,58	33,36	738,55	57,37	70,5	36,96
31	72,16	37,17	53,79	34,61	1149,10	61,21	72,4	37,19
32	36,97	31,36	30,02	29,55	941,47	59,48	58,5	35,34
33	42,33	32,53	32,55	30,25	1111,40	60,92	58,6	35,36
34	49,48	33,89	35,57	31,02	1274,20	62,10	59,1	35,4

Çizelge 4.1. Deney sonuçlarının S/N oranları (devam)

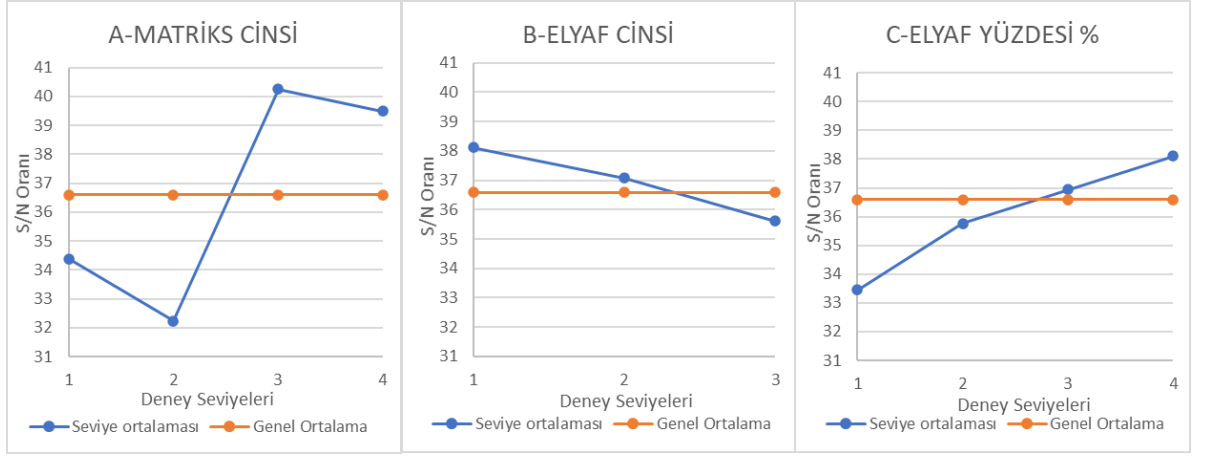
35	103,18	40,27	84,65	38,55	1356,80	62,65	73,6	37,34
36	153,27	43,71	98,3	39,85	1451,10	63,23	74,2	37,41
37	174,90	44,86	109,3	40,77	1750,80	64,86	74,3	37,42
38	69,90	36,89	76,47	37,67	957,99	59,63	68,8	36,75
39	85,73	38,66	91,15	39,20	976,86	59,80	70,7	36,99
40	110,60	40,88	100,10	40,01	1059,40	60,50	71,3	37,06

Bir sonraki adımda, her bir faktörün her düzeydeki etkisinin değerlendirilmesi gerekir. Bu nedenle Çizelge 4.1'de hesaplanan S/N oranlarının ortalaması her bir faktörün her düzeyi için ayrı ayrı alınmıştır. En büyük sinyal-gürültü oranı, en iyi deneysel sonucu verir. Bu değerler Şekil 4.15-18'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Elyaf oranı arttıkça S/N oranı artar.

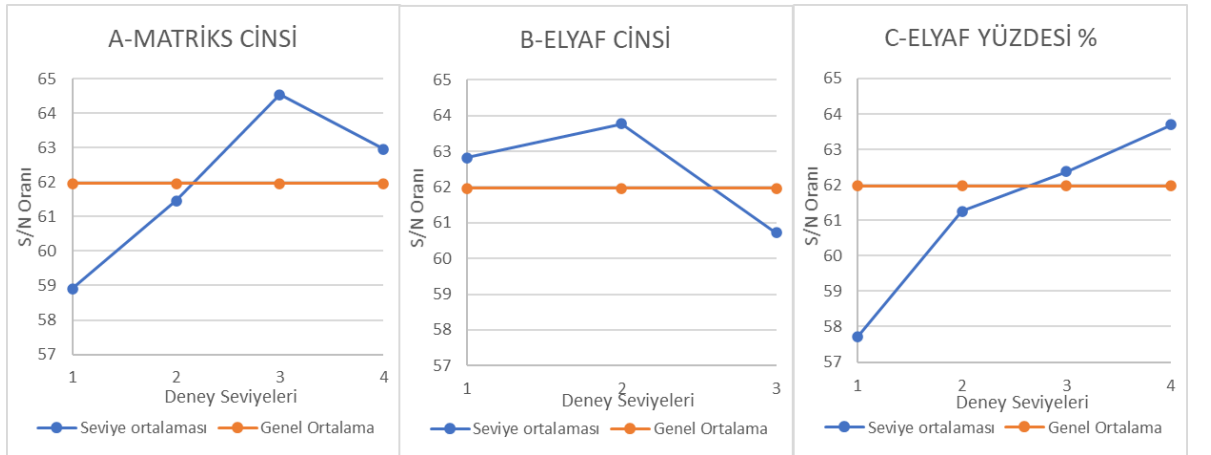
Çekme, 3 nokta eğilme, ağırlık düşürme ve sertlik deneylerinin S/N oranları incelendiğinde, elyaf oranı arttıkça mekanik özelliklerin arttığı görülmektedir. Ancak elyaf oranı arttıkça etkinin azaldığı gözlemlendi. Bunun nedeni, elyaf oranı arttıkça kompozitin deformasyon enerjisinin artması ve matris ile elyaf arasındaki bağ kuvvetlerinin zayıflamasıdır. Çekme ve düşen ağırlık testlerine bakıldığında kompozitler üzerinde en yüksek etkiyi KE'in gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.15,4.17). Bunun temel nedeni, KE'in mekanik özelliklerinin üstün olmasıdır. Ancak bu yüksek yüzey enerjisi ve yüksek mukavemet özelliklerine rağmen KE'in, CE ve AE'den daha düşük performans göstermiştir. Yani KE'nin mukavemet değerleri CE ve AE'den yaklaşık 1,5 kat fazla olmasına rağmen, kompozitler üzerinde bu etkiyi gösterememiştir.



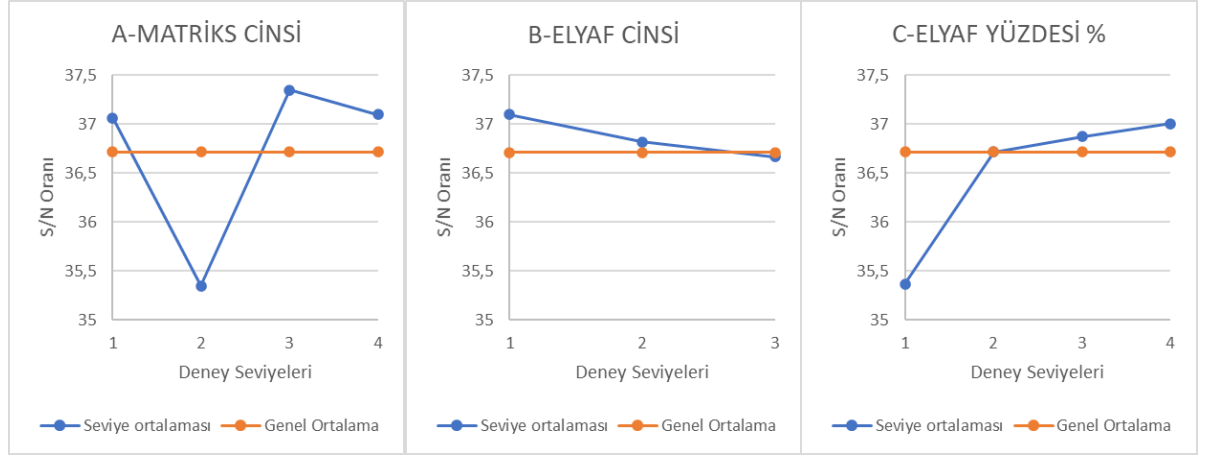
Şekil 4.15. Çekme Dayanımı için S/N Oranları



Şekil 4.16. Eğilme Dayanımı için S/N Oranı



Şekil 4.17. Düşen Ağırlık için S/N Oranı



Şekil 4.18. Sertlik için S/N Oranı

Her deney faktörünün deney sonuçlarını ne ölçüde etkilediğini gösterebilmek için hesaplanan F-değerleri, A ve C faktörleri için 3, B faktörü için 2 ve hata terimi için ise 29 olan serbestlik dereceleri kritik F tablosundan alınan $F_{0.05;2;29}(3)$ ve $F_{0.05;3;29}(2,60)$ değeri ile karşılaştırılır. Hesaplanan F değerleri, kritik F değerlerinden büyüktür ve hedeflenen %95’lik güvenilirlik seviyesini sağlamıştır (Somashekhar ve ark. 2019).

Çizelge 4.2-4.5 incelendiğinde, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini en fazla etkileyen faktör matris tipi olduğu görülmüştür. İkinci önemli faktör ise elyaf katkı oranlarıdır. Elyaf katkı oranı arttıkça matris malzeme üzerindeki etkisinin arttığı görülmüştür.

Çizelge 4.2. Çekme Testi için ANOVA Tablosu

S/N ratio: 37,91		Ortalama S/N Değerleri							
	Serbestlik Derecesi	1.Seviye	2.Seviye	3. Seviye	4.Seviye	Karelerin Toplamı	Varyans	F	Faktör Etkisi (%)
A-Matris Tipi	3	35,75	32,09	42,97	40,84	727,34	242,45	382,94	76,09
B-Elyaf Tipi	2	38,41	39,44	37,58	-	32,27	16,14	25,49	5,06
C-Elyaf Yüzdesi %	3	32,83	36,75	38,70	39,98	178,29	59,43	93,87	18,65
Hata	29					18,36	0,63		0,20
Toplam	37					956,27			100,00

Çizelge 4.3. 3 Nokta Eğme Testi için ANOVA Tablosu

S/N ratio: 36,59		Ortalama S/N Değerleri							
	Serbestlik	1.Seviye	2.Seviye	3. Seviye	4.Seviye	Karelerin	Varyans	F	Faktör Etkisi (%)
	Derecesi					Toplamı			
A-Matris Tipi	3	34,38	32,24	40,25	39,48	455,58	151,86	256,14	76,17
B-Elyaf Tipi	2	38,12	37,08	35,61	-	42,70	21,35	36,01	10,71
C-Elyaf Yüzdesi %	3	33,45	35,77	36,94	38,11	76,68	25,56	43,11	12,82
Hata	29					17,19	0,59		0,30
Toplam	37					592,16			100,00

Çizelge 4.4. Düşen Ağırlık Testi için ANOVA Tablosu

S/N ratio: 61,97		Ortalama S/N Değerleri							
	Serbestlik	1.Seviye	2.Seviye	3. Seviye	4.Seviye	Karelerin	Varyans	F	Faktör Etkisi (%)
	Derecesi					Toplamı			
A-Matris Tipi	3	58,90	61,46	64,54	62,96	172,42	57,47	21,02	43,49
B-Elyaf Tipi	2	62,82	63,77	60,72	-	66,59	33,30	12,18	25,19
C-Elyaf Yüzdesi %	3	57,72	61,25	62,37	63,69	115,98	38,66	14,14	29,25
Hata	29					79,29	2,73		2,07
Toplam	37					434,29			100,00

Çizelge 4.5. Sertlik Testi için ANOVA Tablosu

S/N ratio: 36,71		Ortalama S/N Değerleri							
	Serbestlik	1.Seviye	2.Seviye	3. Seviye	4.Seviye	Karelerin	Varyans	F	Faktör Etkisi (%)
	Derecesi					Toplamı			
A-Matris Tipi	3	37,06	35,34	37,35	37,10	25,43	8,48	50,47	67,97
B-Elyaf Tipi	2	37,10	36,82	36,67	-	1,95	0,97	5,80	7,81
C-Elyaf Yüzdesi %	3	35,36	36,71	36,87	37,00	8,56	2,85	16,98	22,87
Hata	29					4,87	0,17		1,35
Toplam	37					40,80			100,00

4.6. Matematiksel Modelleme ve Regresyona Göre Veri Analizi

Kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmeye yönelik matematiksel modeller, korelasyon katsayısı (R) ve belirleme katsayısı (R²) değerleriyle birlikte Tablo 6'da gösterilmektedir. Optimizasyon çalışmaları, ikinci dereceden polinom modelleri (Model 1) ve doğrusal olmayan (kübik) modeller (Model 2) katsayılarını bulmak için yapılır. Korelasyon katsayısı, iki değişkenin birbirine ne kadar yakın hareket ettiğini gösterir. Korelasyon katsayısı (R), girdi ve çıktı değişkenleri arasında güçlü bir korelasyon olduğunu gösterir. Uyum iyiliğinin bir göstergesi olan determinasyon katsayısının (R²) %95'in üzerinde olduğu görülmektedir (Junaedi ve ark. 2021).

Çizelge 4.6. PP matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller

Numune		Model	R	R ²
PP+CE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 38 + 153.483 \cdot b - 60.75 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 38 \cdot a + 40.785 \cdot b + 218.95 \cdot a \cdot b - 75.33333 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 32 + 326.17 \cdot b - 577.5 \cdot b^2$	0,99	0,98
		$y(a, b) = 32 \cdot a + 671.7257 \cdot b - 990.9769 \cdot a \cdot b + 751.3678 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	0,99
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 580.455 + 1149.297 \cdot b + 2004.625 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 580.455 \cdot a + 8214.306 \cdot b - 9900.933 \cdot a \cdot b + 3833.97 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
Shore D	$y(b) = 65 + 69.95 \cdot b - 127.5 \cdot b^2$	0,99	0,98	
	$y(a, b) = 65 \cdot a + 495 \cdot b - 730 \cdot a \cdot b + 408.3333 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00	
PP+KE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 38 + 224.087 \cdot b - 343.85 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 38 \cdot a - 167.93 \cdot b + 495.4 \cdot a \cdot b - 72.16667 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 32 + 120.645 \cdot b - 120.25 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 32 \cdot a + 71.2 \cdot b + 52 \cdot a \cdot b + 32.5 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 580.455 + 3359.072 \cdot b - 4661.125 \cdot b^2$	1,00	0,99	

Çizelge 4.6. PP matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller (devam)

		$y(a, b) = 580.455 \cdot a + 7543.573 \cdot b - 9900.879 \cdot a \cdot b + 7043.787 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Shore D	$y(b) = 65 + 60.85 \cdot b - 112.5 \cdot b^2$	0,99	0,98
		$y(a, b) = 65 \cdot a + 381.5 \cdot b - 535 \cdot a \cdot b + 308.3333 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
PP+AE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 38 + 165.914 \cdot b - 182.5 \cdot b^2$	1,00	0,99
		$y(a, b) = 38 \cdot a + 688.55 \cdot b - 990.999 \cdot a \cdot b + 559.3079 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 32 + 90.7158 \cdot b - 69.11 \cdot b^2$	0,99	0,99
		$y(a, b) = 32 \cdot a + 656.24 \cdot b - 990.999 \cdot a \cdot b + 505.5038 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 580.45 - 448.2575 \cdot b + 7314.375 \cdot b^2$	0,97	0,95
		$y(a, b) = 580.45 \cdot a + 8866.155 \cdot b - 9900.914 \cdot a \cdot b + 1620.729 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	0,97	0,95
	Shore D	$y(b) = 65 + 38.8 \cdot b - 50 \cdot b^2$	0,99	0,99
		$y(a, b) = 65 \cdot a + 312.5 \cdot b - 405 \cdot a \cdot b + 216.6667 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00

Çizelge 4.7. PE matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller

Numune		Model	R	R ²
PE+CE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 19,49 + 144,41 \cdot b - 158,25 \cdot b^2$	0,99	0,99
		$y(a, b) = 19 \cdot a + 981,25 \cdot b - 1558,50 \cdot a \cdot b + 817,50 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 27,77 + 130,95 \cdot b - 82,25 \cdot b^2$	0,99	0,98
		$y(a, b) = 27 \cdot a + 1616,95 \cdot b - 2628,50 \cdot a \cdot b + 1290,83 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 689,82 + 2474,34 \cdot b - 2891,75 \cdot b^2$	0,98	0,96
		$y(a, b) = 672,48 \cdot a + 34760,00 \cdot b - 57790,00 \cdot a \cdot b + 28900 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Shore D	$y(b) = 50,44 + 116,90 \cdot b - 245 \cdot b^2$	0,98	0,97
		$y(a, b) = 50 \cdot a + 797,5 \cdot b - 1295 \cdot a \cdot b + 733,33 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00

Çizelge 4.7. PE matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller (devam)

PE+KE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 20,09 + 231,16 \cdot b - 392,00 \cdot b^2$	0,98	0,97
		$y(a, b) = 19 \cdot a - 2029,25 \cdot b - 3426,50 \cdot a \cdot b + 1818,33 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 27,60 + 157,97 \cdot b - 228,01 \cdot b^2$	0,99	0,98
		$y(a, b) = 27 \cdot a + 1149,56 \cdot b - 1869,53 \cdot a \cdot b + 998,83 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 705,4 + 10170 \cdot b - 21890 \cdot b^2$	0,98	0,97
		$y(a, b) = 672,48 \cdot a + 54460 \cdot b - 93320 \cdot a \cdot b + 54860 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
Shore D	$y(b) = 50,21 + 56,55 \cdot b - 87,5 \cdot b^2$	0,99	0,98	
	$y(a, b) = 50,00 \cdot a + 427,00 \cdot b - 630,00 \cdot a \cdot b + 341,67 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00	
PE+AE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 19,72 + 177,95 \cdot b - 270,50 \cdot b^2$	0,99	0,98
		$y(a, b) = 19 \cdot a + 1359,25 \cdot b - 2249,50 \cdot a \cdot b + 1200,00 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 27,05 + 28,24 \cdot b - 0,00 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 27 \cdot a + 152,75 \cdot b - 171,50 \cdot a \cdot b + 81,67 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 677,08 + 2771,52 \cdot b - 2654,75 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 672,48 \cdot a + 9936,28 \cdot b - 13430 \cdot a \cdot b + 7660,83 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
Shore D	$y(b) = 50,44 + 87,40 \cdot b - 200 \cdot b^2$	0,97	0,95	
	$y(a, b) = 50 \cdot a + 813 \cdot b - 1340 \cdot a \cdot b + 733,33 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00	

Çizelge 4.8. PA6 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller

Numune		Model	R	R ²
PA6+CE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 81,22 + 350,37 \cdot b - 27,50 \cdot b^2$	0,97	0,95
		$y(a, b) = 85 \cdot a - 7110,35 \cdot b + 13250 \cdot a \cdot b - 6296,67 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 81,51 + 113,05 \cdot b + 227,50 \cdot b^2$	1,00	1,00

Çizelge 4.8. PA6 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller (devam)

		$y(a, b) = 81 \cdot a + 1426.5 \cdot b - 1995 \cdot a \cdot b + 841.67 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 1197.37 + 9130.14 \cdot b - 13860 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 1189.23 \cdot a + 12660 \cdot b - 14640 \cdot a \cdot b + 13570 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Shore D	$y(b) = 70.26 + 68.05 \cdot b - 142.50 \cdot b^2$	0,98	0,97
		$y(a, b) = 70 \cdot a + 503 \cdot b - 750 \cdot a \cdot b + 425 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
PA6+KE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 84.66 + 580.08 \cdot b - 792.75 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 85 \cdot a - 809.25 \cdot b + 1991.5 \cdot a \cdot b - 570.83 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 80.39 + 185.24 \cdot b - 204 \cdot b^2$	0,99	0,99
		$y(a, b) = 81 \cdot a - 1143.70 \cdot b + 2325 \cdot a \cdot b - 1010 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 1188.51 + 1161.04 \cdot b + 2123.25 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 1189.23 \cdot a + 3047.68 \cdot b + 384.5 \cdot a \cdot b - 1194.17 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Shore D	$y(b) = 70.02 + 3.65 \cdot b + 7.50 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 70 \cdot a + 111 \cdot b - 60 \cdot a \cdot b + 25 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
PA6+AE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 81.98 + 293.92 \cdot b + 86.25 \cdot b^2$	0,98	0,97
		$y(a, b) = 85.00 \cdot a - 5541.65 \cdot b + 10480 \cdot a \cdot b - 5030.83 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 80.37 + 43.43 \cdot b + 183.75 \cdot b^2$	0,99	0,98
		$y(a, b) = 81 \cdot a - 950.50 \cdot b + 2030.00 \cdot a \cdot b - 1054.17 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 1203.16 + 788.04 \cdot b + 3303.25 \cdot b^2$	0,99	0,98
		$y(a, b) = 1189.23 \cdot a + 33010 \cdot b - 52070 \cdot a \cdot b + 23220 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Shore D	$y(b) = 70.13 + 39.75 \cdot b - 87.50 \cdot b^2$	0,98	0,97
		$y(a, b) = 70 \cdot a + 271 \cdot b - 350 \cdot a \cdot b + 208.33 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00

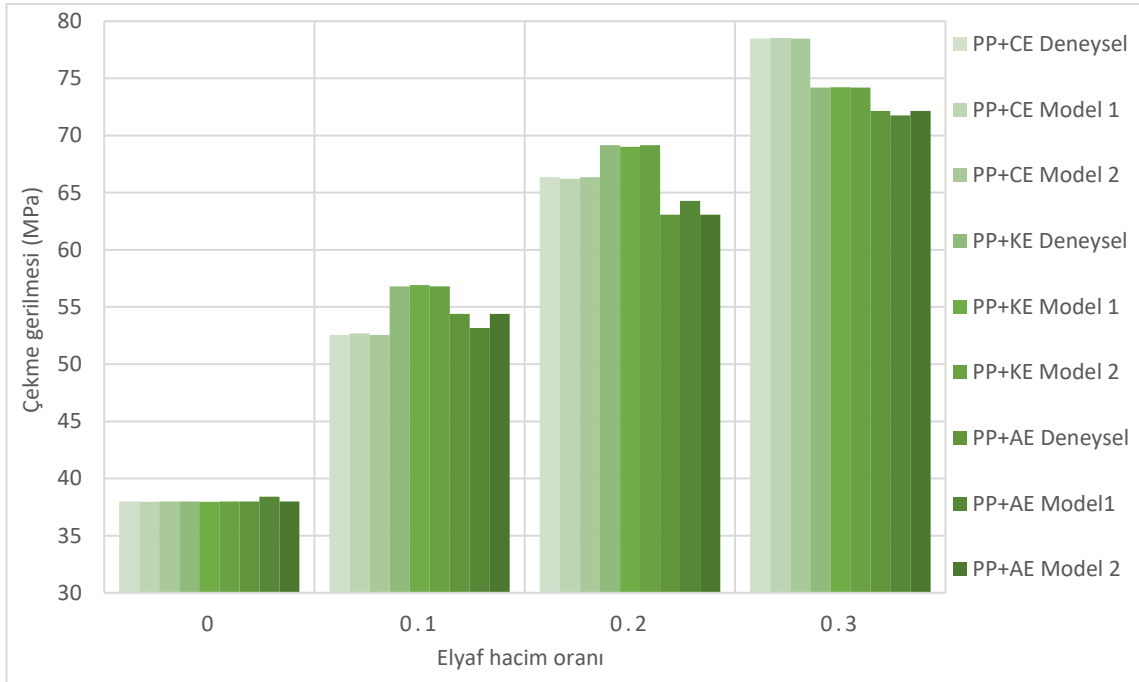
Çizelge 4.9. PA12 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller

Numune		Model	R	R ²
PA12+CE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 60 + 421,06 \cdot b - 350 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 60 \cdot a + 103,20 \cdot b + 399 \cdot a \cdot b - 23,33 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 70,53 + 110,50 \cdot b + 274,25 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 70 \cdot a + 1518,4 \cdot b - 2145 \cdot a \cdot b + 890,83 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 759,08 + 7048,25 \cdot b - 10970 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 752,7 \cdot a + 9514,7 \cdot b - 11340 \cdot a \cdot b + 10630 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Shore D	$y(b) = 53,05 + 225 \cdot b - 520 \cdot b^2$	0,97	0,94
		$y(a, b) = 52 \cdot a + 1846,5 \cdot b - 3155 \cdot a \cdot b + 1750 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
PA12+KE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 62,48 + 720,54 \cdot b - 1227 \cdot b^2$	0,99	0,98
		$y(a, b) = 60,94 \cdot a + 2302,22 \cdot b - 3609,63 \cdot a \cdot b + 2311 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 70,79 + 197,90 \cdot b - 221,75 \cdot b^2$	0,99	0,99
		$y(a, b) = 70 \cdot a + 1627,2 \cdot b - 2559 \cdot a \cdot b + 1324,17 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 768,88 + 11380 \cdot b - 20230 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 752,70 \cdot a + 24090 \cdot b - 36380 \cdot a \cdot b + 26960 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Shore D	$y(b) = 53,11 + 265,05 \cdot b - 602,5 \cdot b^2$	0,97	0,95
		$y(a, b) = 52 \cdot a + 1913,50 \cdot b - 3265 \cdot a \cdot b + 1841,67 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
PA12+AE	Çekme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 60,16 + 55,36 \cdot b + 374,25 \cdot b^2$	1,00	1,00
		$y(a, b) = 60 \cdot a + 799,05 \cdot b - 918,50 \cdot a \cdot b + 259,17 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Eğilme gerilmesi (MPa)	$y(b) = 69,30 + 86,38 \cdot b + 62 \cdot b^2$	0,99	0,98
		$y(a, b) = 70 \cdot a - 1168,65 \cdot b + 2377,50 \cdot a \cdot b - 1161,67 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Tepe Kuvveti (N)	$y(b) = 765,20 + 1859,60 \cdot b - 3068,75 \cdot b^2$	0,97	0,94

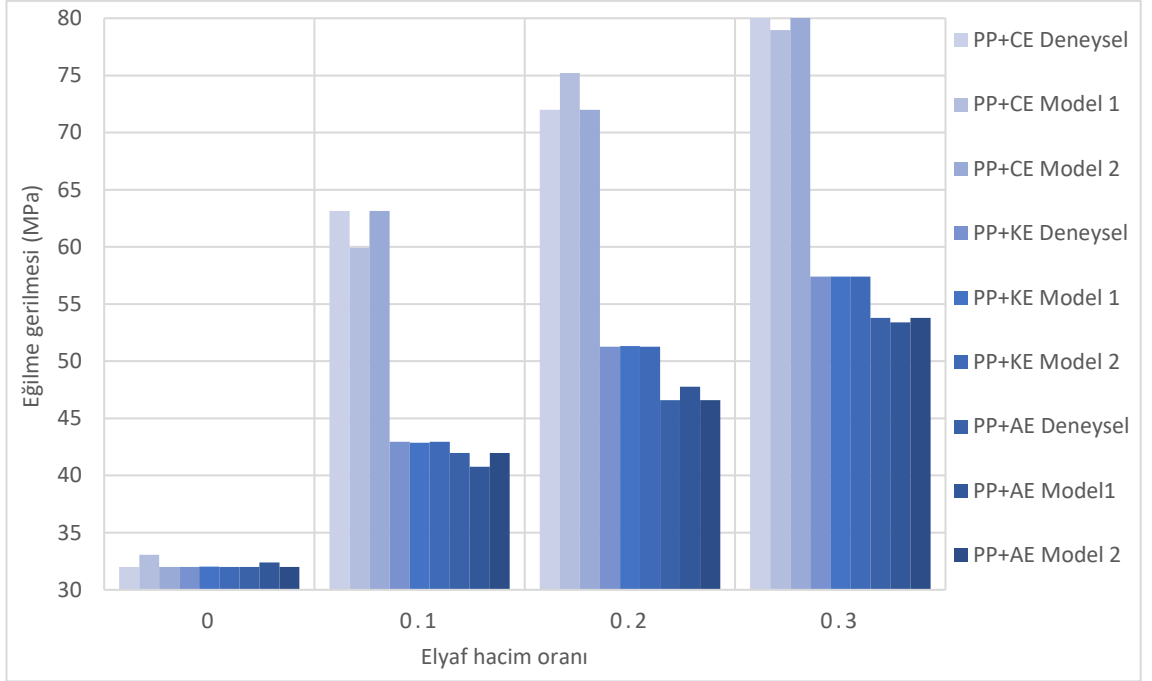
Çizelge 4.9. PA12 matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek için matematiksel modeller (devam)

		$y(a,b) = 752,7 \cdot a + 24430 \cdot b - 40700 \cdot a \cdot b + 20840 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00
	Shore D	$y(b) = 53,11 + 265,05 \cdot b - 602,5 \cdot b^2$	0,97	0,95
		$y(a,b) = 52 \cdot a + 1913,50 \cdot b - 3265 \cdot a \cdot b + 1841,67 \cdot a \cdot b \cdot (a - b)$	1,00	1,00

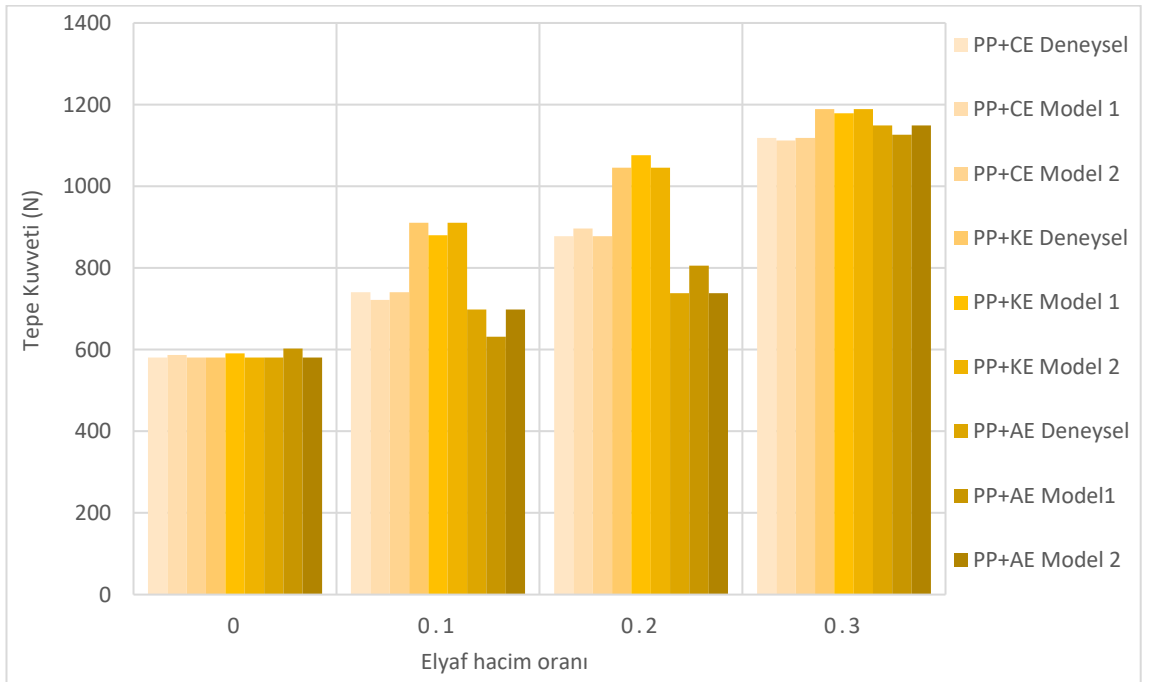
Şekil 4.19-4.34 incelendiğinde, deneysel sonuçları ile matematiksel model 1 ve model 2'nin sonuçlarının tutarlı olduğu görülmüştür. Buradan deney sonuçlarının ve matematiksel modellemelerin güvenilir olduğu sonucuna varılır.



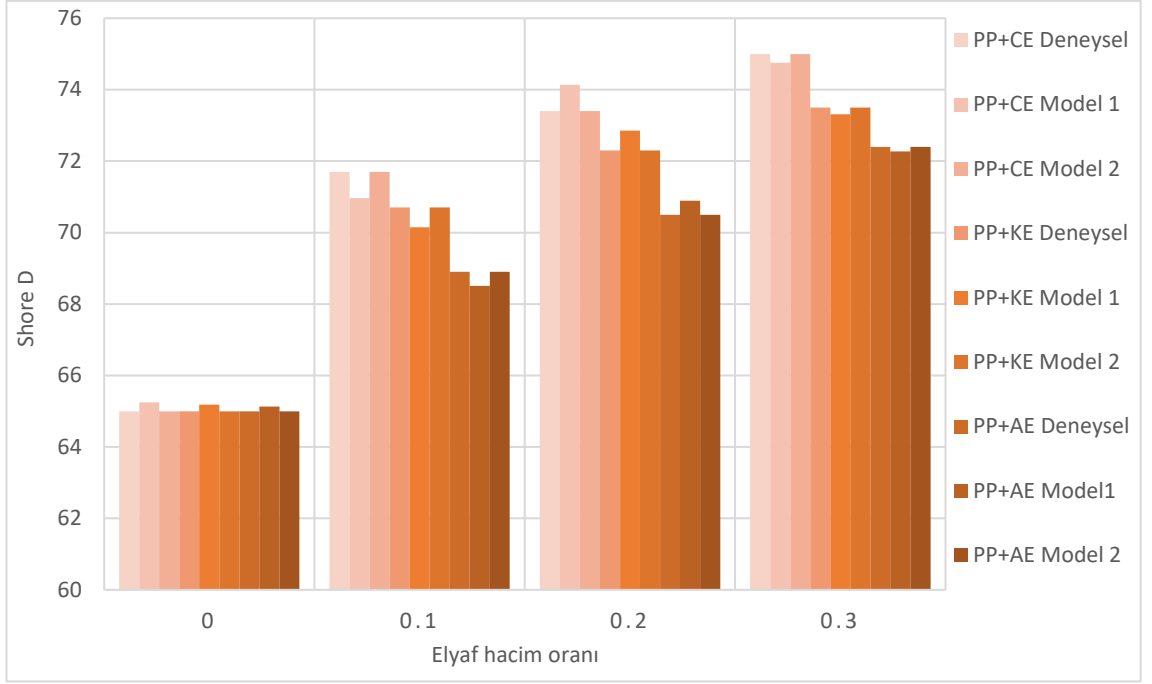
Şekil 4.19. Model 1 ve Model 2'nin çekme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PP matrisli kompozitler için)



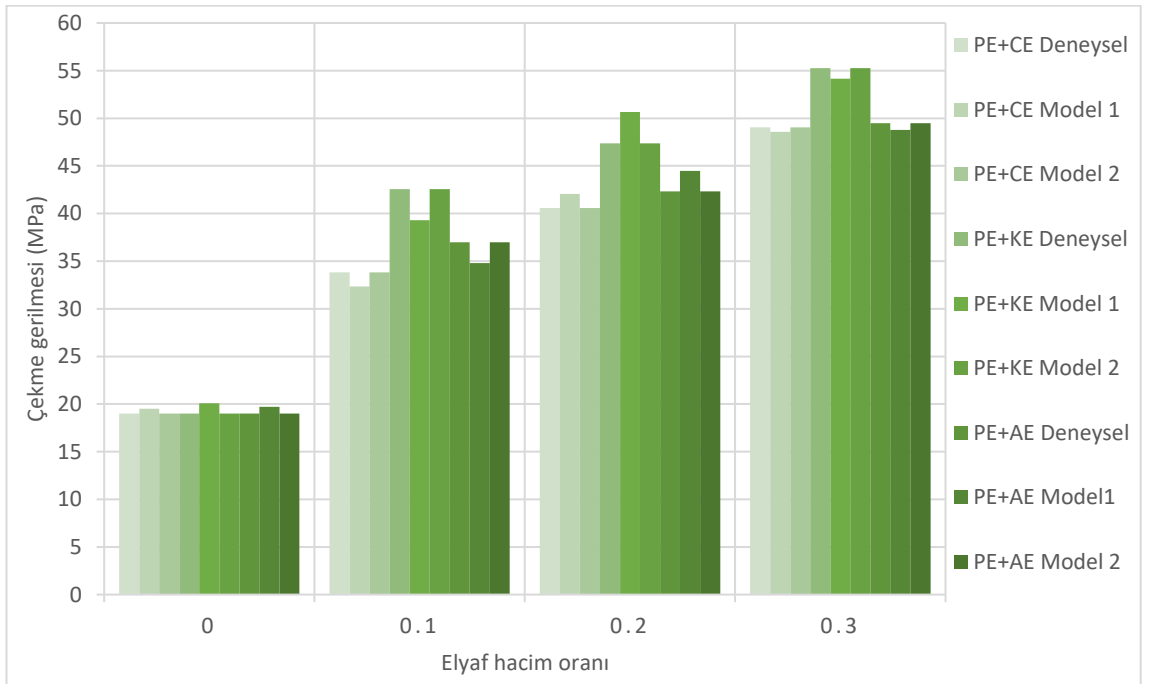
Şekil 4.20. Model 1 ve Model 2'nin 3 nokta eğme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PP matrisli kompozitler için)



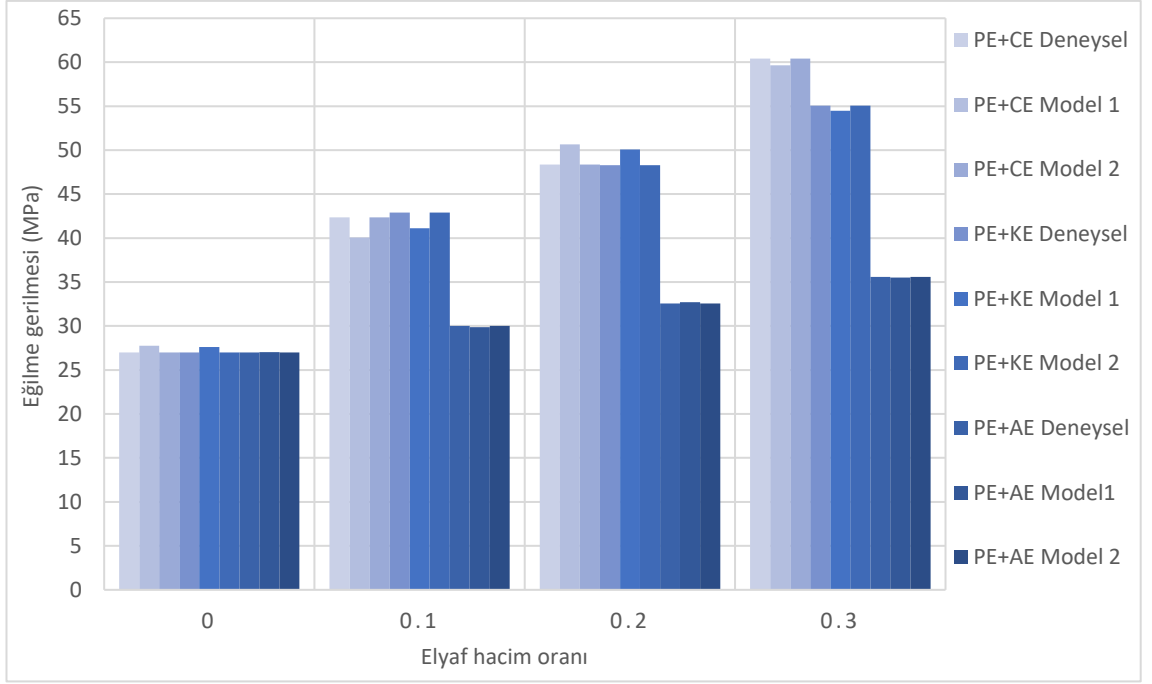
Şekil 4.21. Model 1 ve Model 2'nin düşen ağırlık deney sonuçları ile karşılaştırılması (PP matrisli kompozitler için)



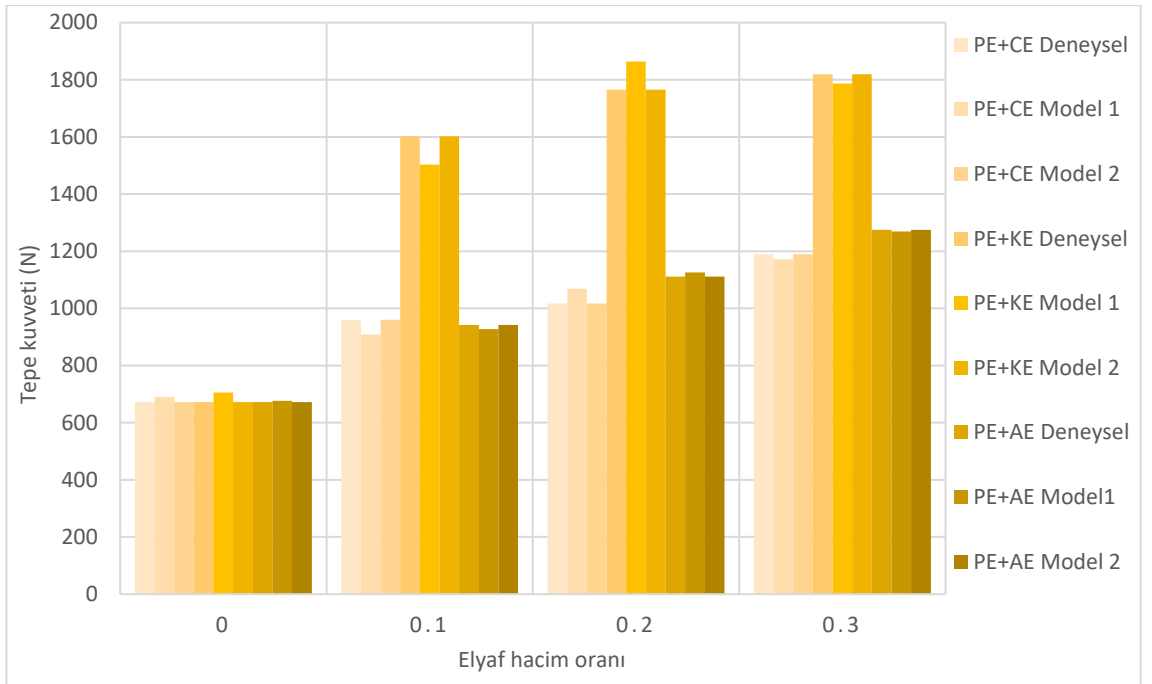
Şekil 4.22. Model 1 ve Model 2'nin sertlik deney sonuçları ile karşılaştırılması (PP matrisli kompozitler için)



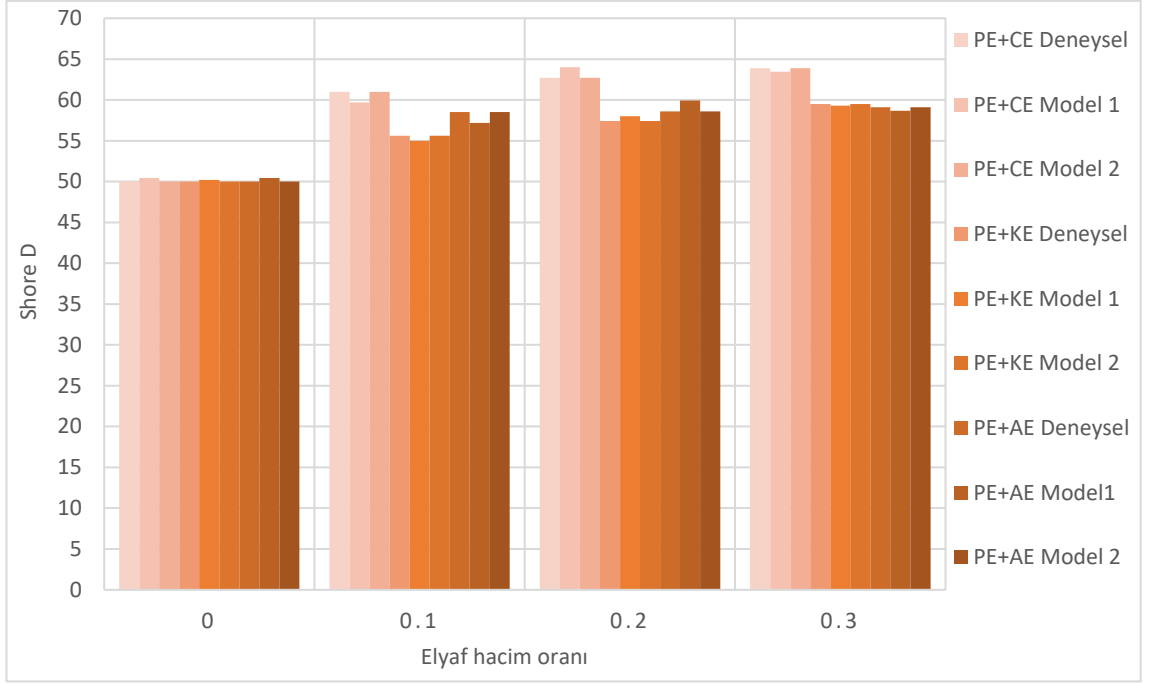
Şekil 4.23. Model 1 ve Model 2'nin çekme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PE matrisli kompozitler için)



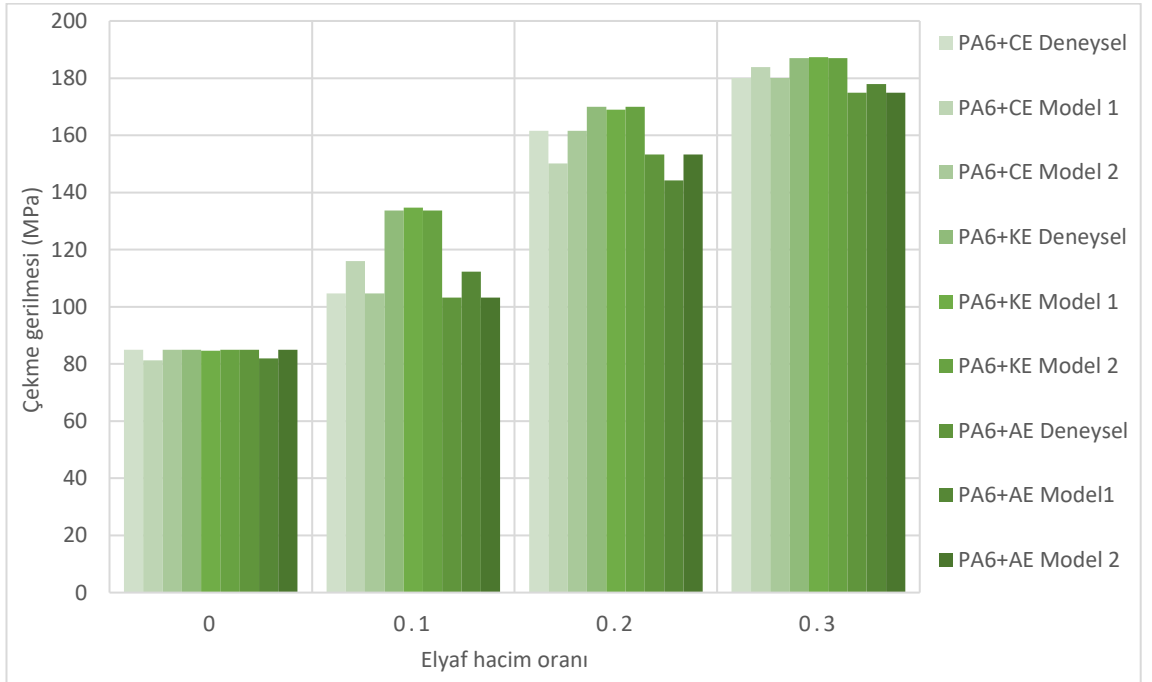
Şekil 4.24. Model 1 ve Model 2'nin 3 nokta eğme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PE matrisli kompozitler için)



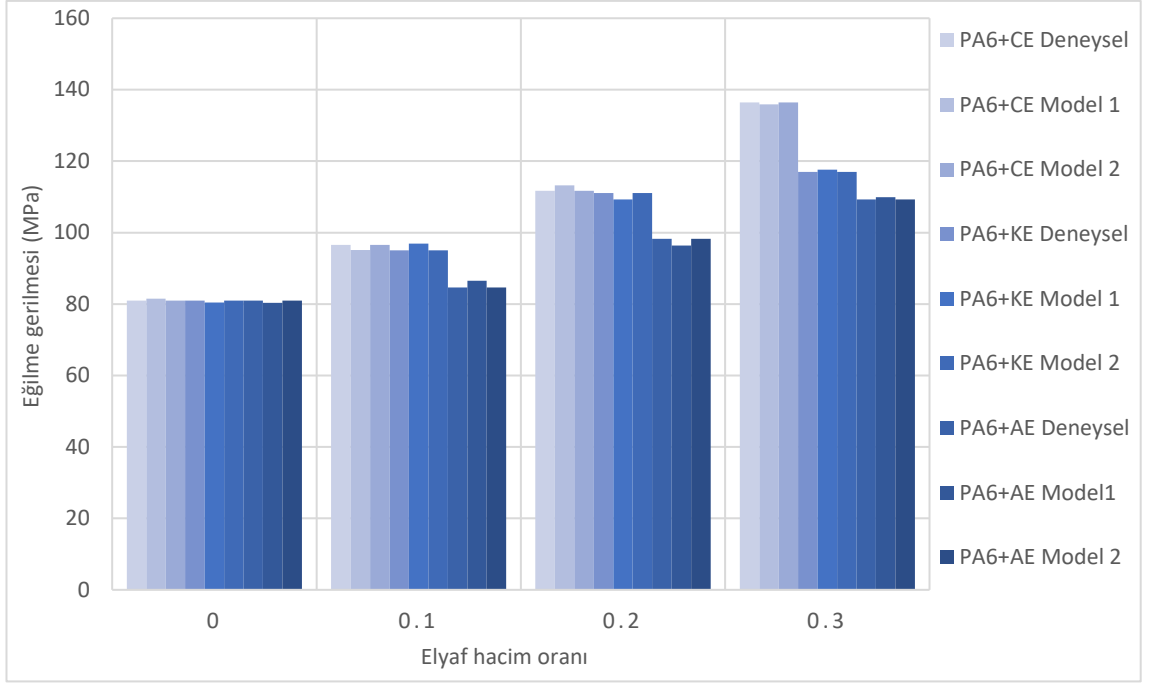
Şekil 4.25. Model 1 ve Model 2'nin düşen ağırlık deney sonuçları ile karşılaştırılması (PE matrisli kompozitler için)



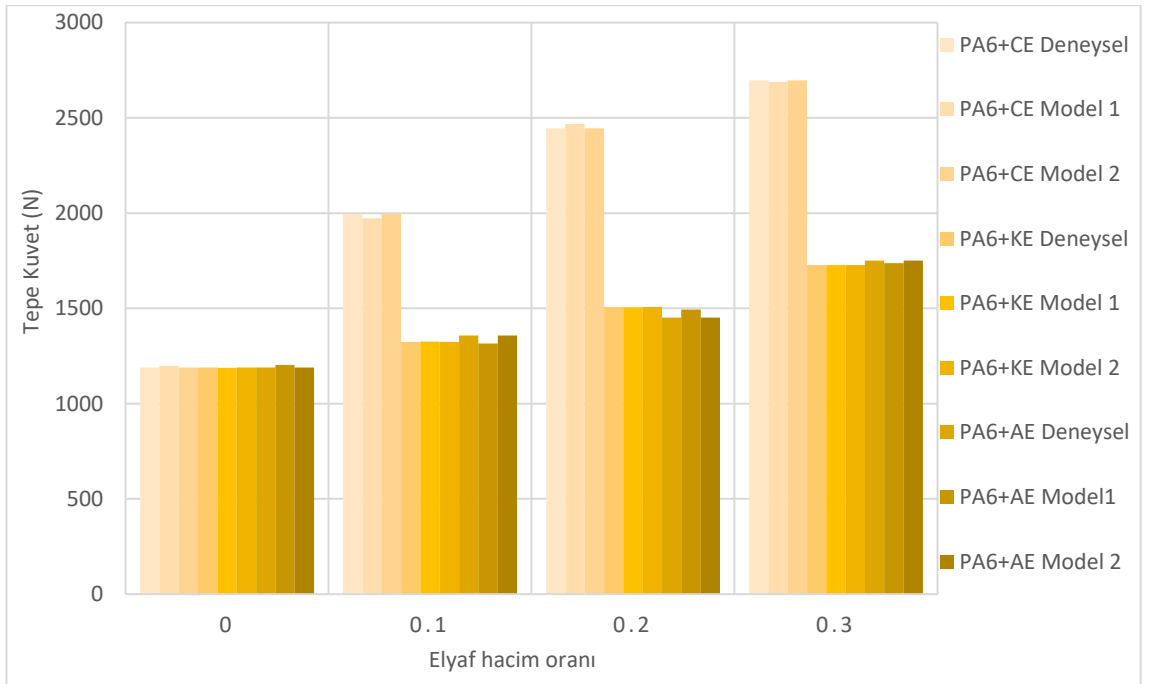
Şekil 4.26. Model 1 ve Model 2'nin sertlik deney sonuçları ile karşılaştırılması (PE matrisli kompozitler için)



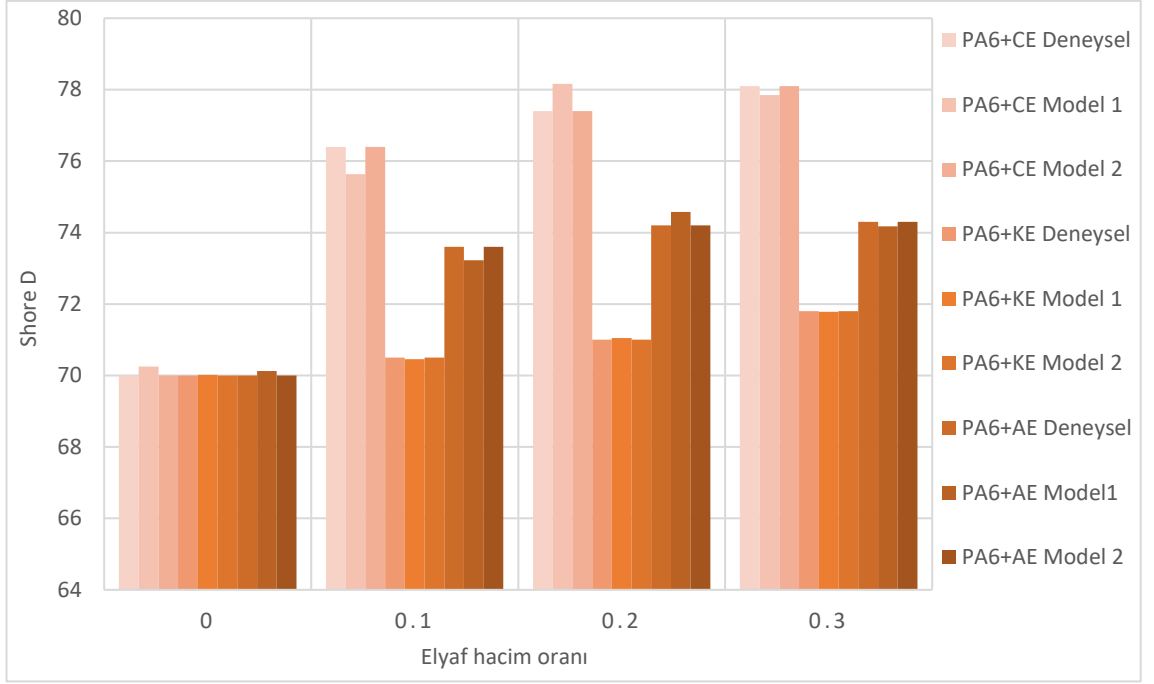
Şekil 4.27. Model 1 ve Model 2'nin çekme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA6 matrisli kompozitler için)



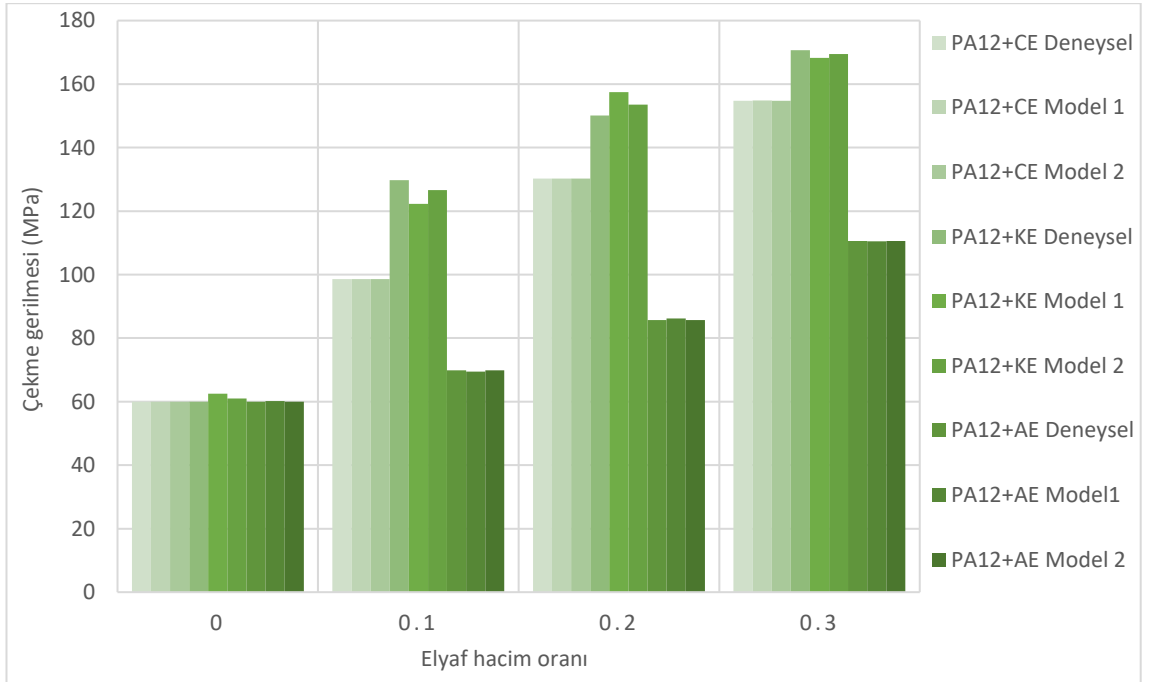
Şekil 4.28. Model 1 ve Model 2'nin 3 nokta eğme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA6 matrisli kompozitler için)



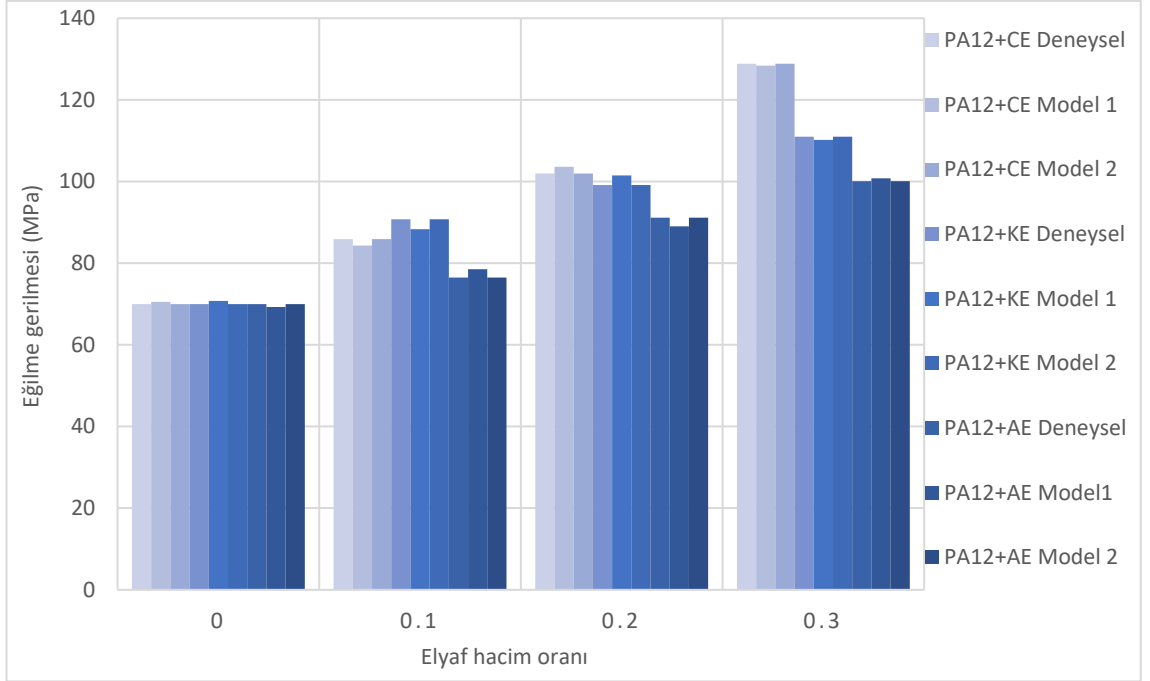
Şekil 4.29. Model 1 ve Model 2'nin düşen ağırlık deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA6 matrisli kompozitler için)



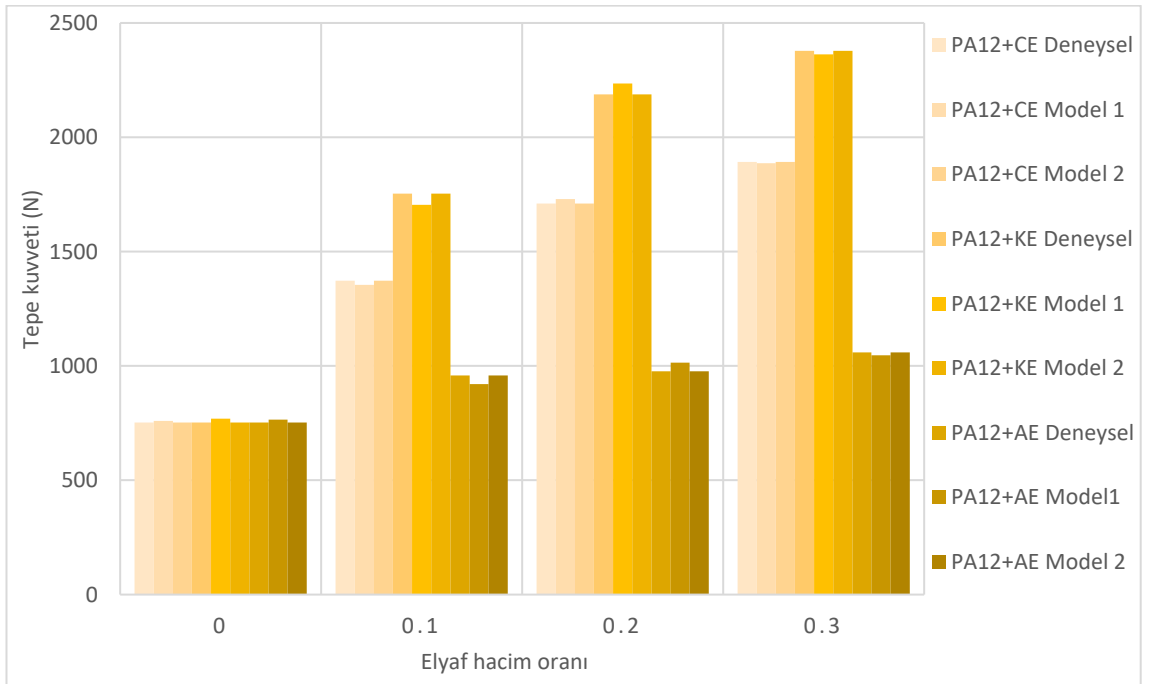
Şekil 4.30. Model 1 ve Model 2'nin sertlik deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA6 matrisli kompozitler için)



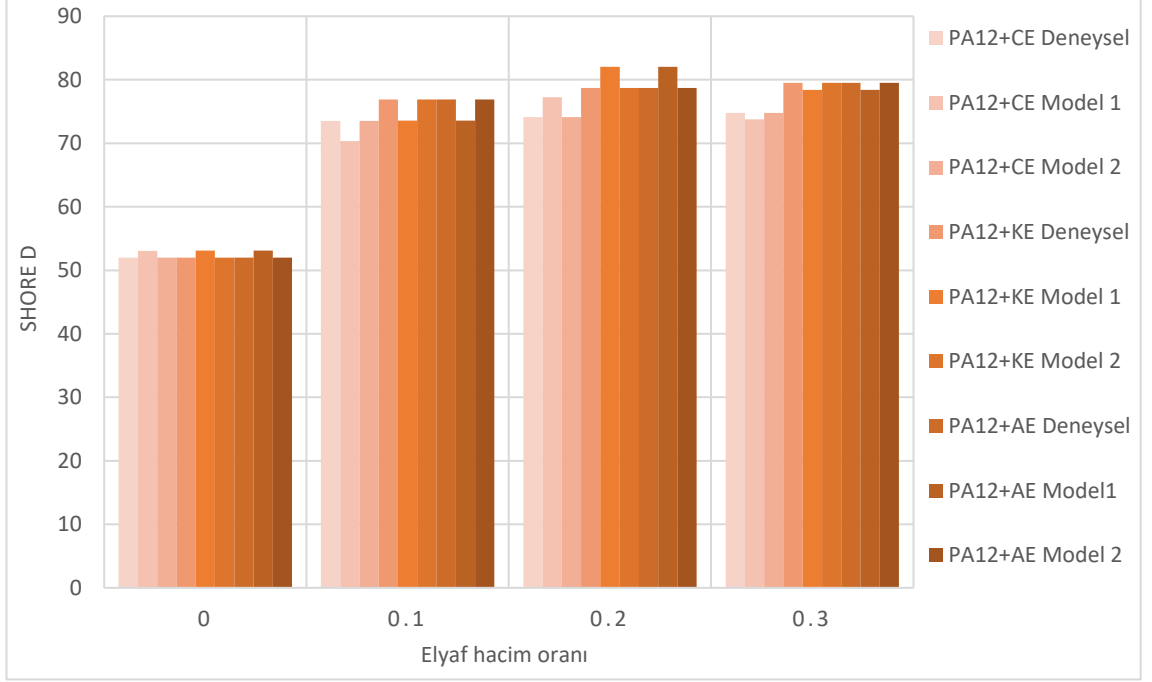
Şekil 4.31. Model 1 ve Model 2'nin çekme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA12 matrisli kompozitler için)



Şekil 4.32. Model 1 ve Model 2'nin 3 nokta eğme deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA12 matrisli kompozitler için)



Şekil 4.33. Model 1 ve Model 2'nin düşen ağırlık deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA12 matrisli kompozitler için)



Şekil 4.34. Model 1 ve Model 2'nin sertlik deney sonuçları ile karşılaştırılması (PA12 matrisli kompozitler için)

4.7. Kompozit Boruların Sonlu Elemanlar Analizi

Kompozit malzemelerin basınç testinin nümerik analizi ANSYS programının 2021 R2 öğrenci sürümü kullanılmıştır. Malzemelerin mekanik özellikleri deney sonuçlarından alınmıştır.

En temel haliyle ANSYS'de analiz yaparken izlenen adımları sıralayacak olursak,

- ▶ Malzeme Tanımlama
- ▶ 3D Model Oluşturma
- ▶ Mesh Oluşturma
- ▶ Sınır Şartlarının Tanımlanması
- ▶ Problem Çözümü
- ▶ Sonuçlar

4.7.1. Malzeme Tanımlama

Deney sonuçlarına bakıldığında da artan elyaf oranı malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Bundan dolayı %30 elyaf katkılı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri göz önüne alınarak boru tasarlanmıştır.

Malzemelerin yoğunlukları teorik olarak hesaplandığında;

Elyaf hacim oranı V_f , matris hacim oranı V_m ve yoğunlukları ρ olarak tanımlanmıştır. Buna göre aşağıdaki eşitlikten kompozit malzemelerin teorik yoğunluk hesabı yapılabilir (denkelem (4.2)).

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (4.2)$$

Çizerge 4.10. %30 takviyeli kompozit malzemelerin yoğunlukları

Kompozit malzeme	Matris malzeme yoğunluğu (gr/cm ³)	Elyaf malzeme yoğunluğu (gr/cm ³)	Toplam yoğunluk (gr/cm ³)
PP + CE	0,90	2,60	1,41
PP + KE	0,90	1,76	1,16
PP + AE	0,90	1,44	1,06
PE + CE	0,95	2,60	1,45
PE + KE	0,95	1,76	1,19
PE + AE	0,95	1,44	1,10
PA6 + CE	1,13	2,60	1,57
PA6 + KE	1,13	1,76	1,32
PA6 + AE	1,13	1,44	1,22
PA12 + CE	1,02	2,60	1,49
PA12 + KE	1,02	1,76	1,24
PA12 + AE	1,02	1,44	1,15

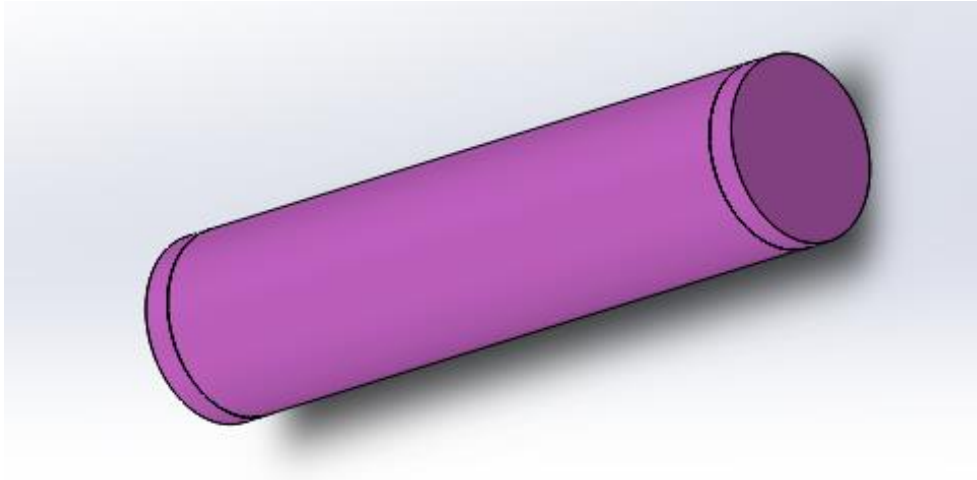
4.7.2. 3D Model Oluşturma

Basınç testi yapılacak kompozit borunun tasarımı ISO 1167 standartlarına göre Solidworks programında tasarlanmıştır (Şekil 4.34) (British Standards 2008). Boru,

doğalgaz alt yapı çalışmalarında standart olarak kullanılan dış çap 125 mm boru ölçüleri referans alınmıştır (Trainings ve ark. 2016).

Çizerge 4.10. Doğalgaz alt yapı çalışmalarında standart olarak kullanılan dış çap 125 mm boru ölçüleri

Dış çap (mm)	İç çap (mm)	Et kalınlığı (mm)	Boru boyu (mm)
125	102,6	11,2	500



Şekil 4.34. Solidworks prgramında PE125 ölçülerinde boru çizimi

En az 19 bar basınca dayanabilmesi için test basıncını hesaplamak için ISO 1167 göre aşağıdaki denklem (4.3) kullanılmaktadır (British Standards 2008).

$$p = 10 \times \sigma \frac{2xe}{d - e} \quad (4.3)$$

burada e, boru et kalınlığı ve d, boru dış çapını ifade etmektedir.

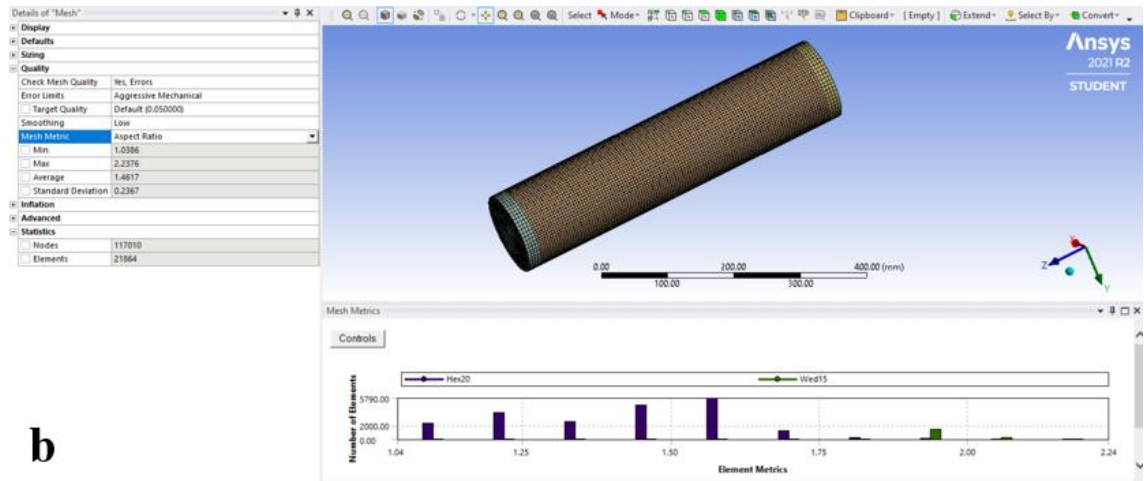
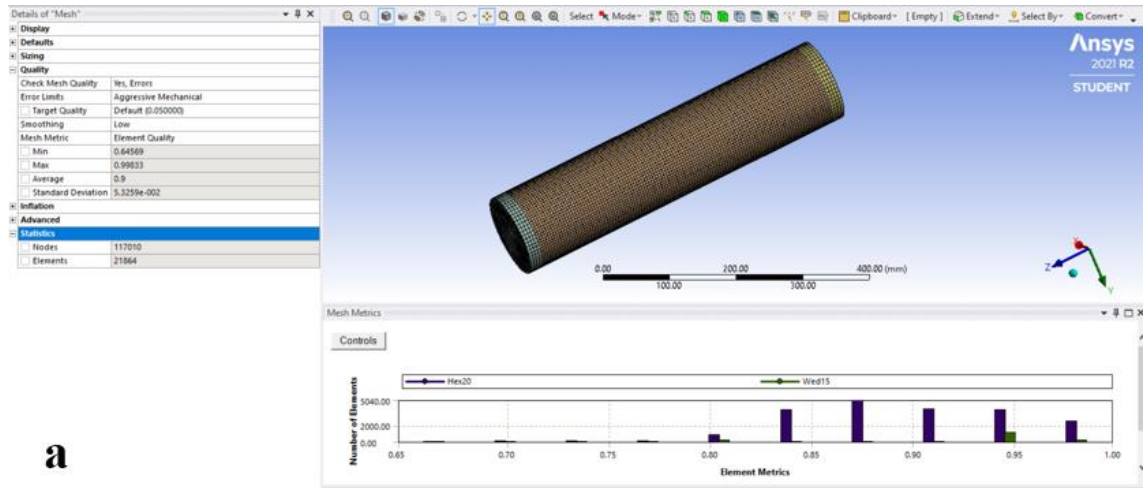
$$p = 10 \times 19 \frac{2 \times 11,2}{125 - 11,2} = 37,5 \text{ bar}$$

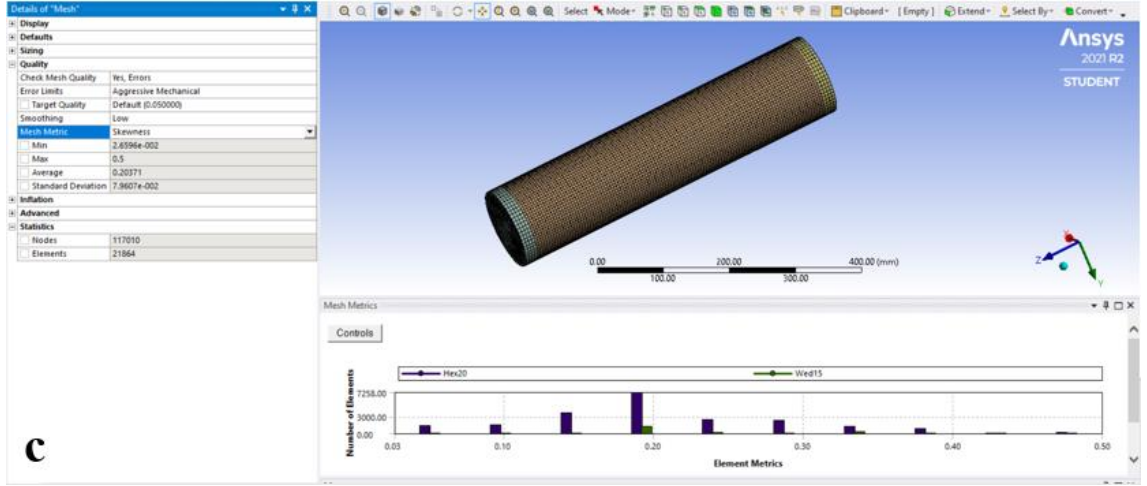
4.7.3. Mesh Oluşturma

Analiz edilecek borunun genel ve bölgesel meshleme ayarlarından sonra meshlemenin uygunluk düzeyinin belirlenmesi amacıyla ANSYS tarafından kullanılan belirli mesh

değerlendirme kriterleri bulunmaktadır. Yapılan meshlemenin bu kriterlere göre değerlendirilmesi gerekmektedir.

Şekil 4.35’de görüldüğü gibi Aspect Ratio kriteri 1, Skewness kriteri 0,2 ve Element Quality kriteri 0,95 değerlerinde olduğu görülmüştür. Bu değerler meshlemenin çok iyi olduğunu bize göstermektedir (Ovalı ve Esen 2011), (Rao 2011) . Ayrıca analiz modelinde 102982 düğüm ve 18924 eleman bulunmaktadır.



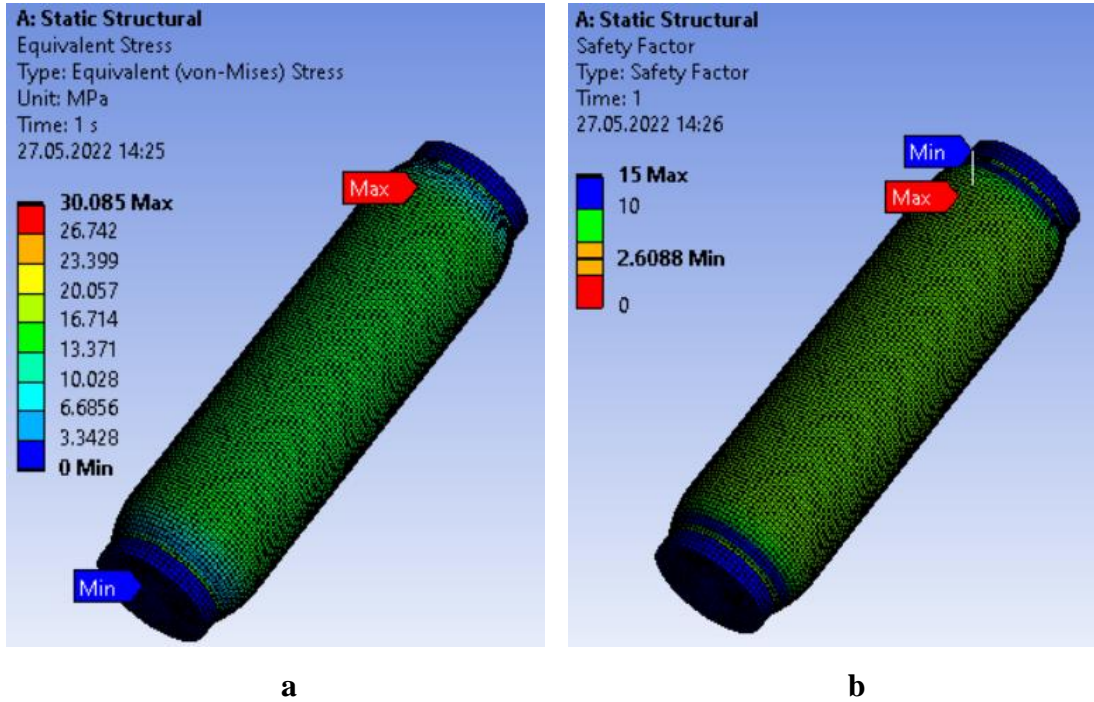


Şekil 4.35. PE125 borunun mesh yapısı ve mesh kalite analizi a) Element Quality kriteri, b) Aspect Ratio kriteri ve c) Skewness kriteri

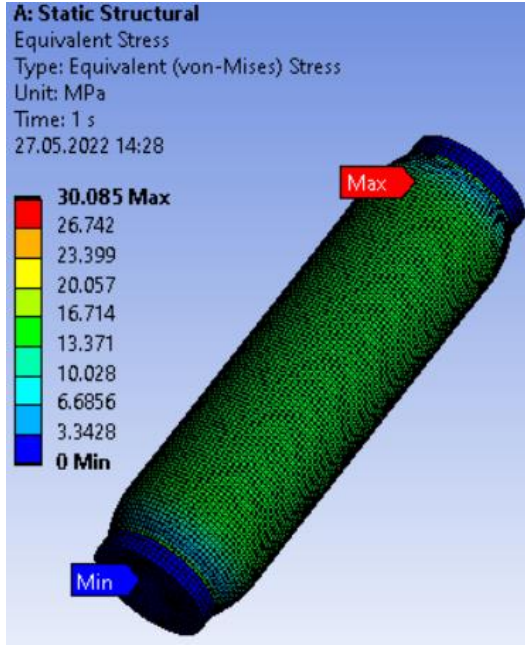
4.7.4. Sınır Şartlarının Tanımlanması

Test edilecek kompozit borunun iki ucu çelik kapak ile kapatılıp 37,5 bar basınç da malzemenin mekanik davranışı incelenmiştir.

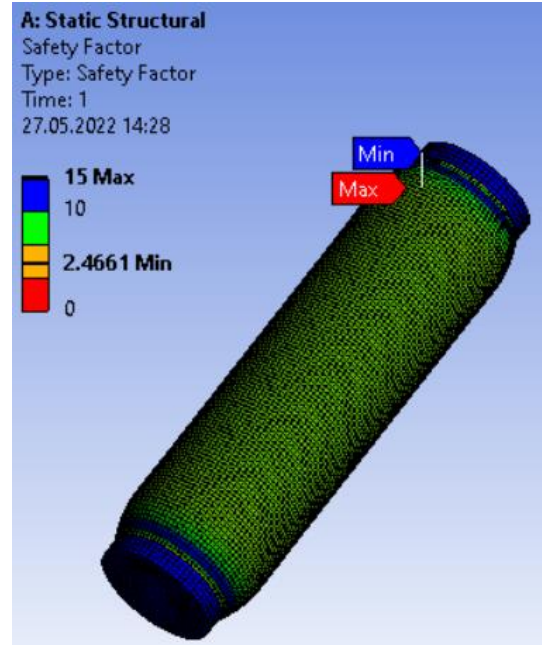
4.7.5. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları



Şekil 4.36. PP + %30 CE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı

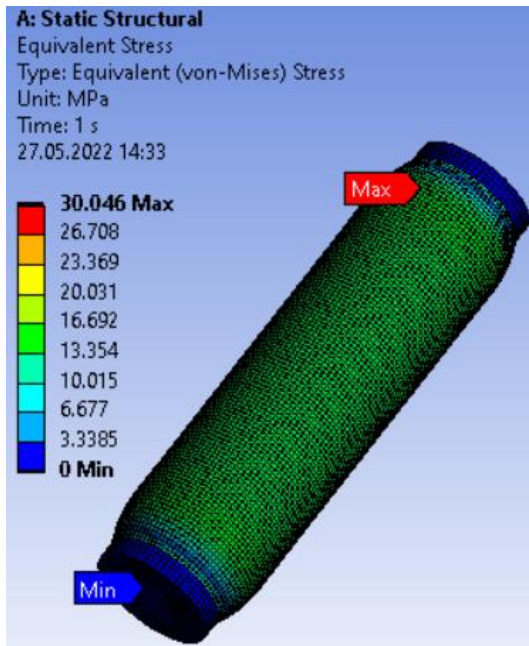


a

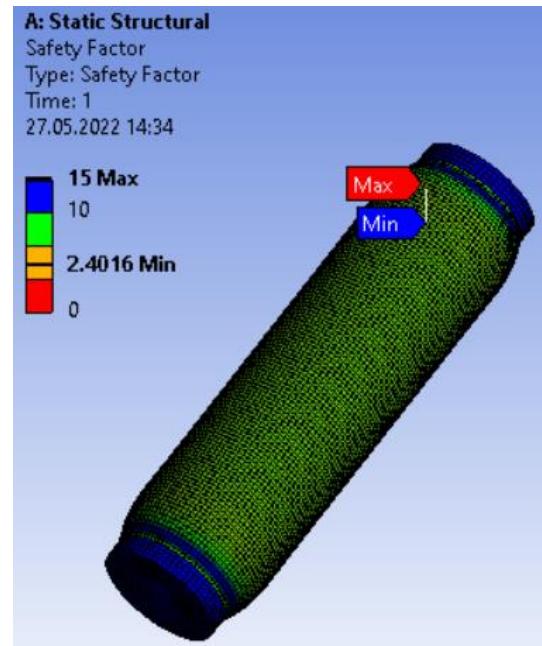


b

Şekil 4.37. PP + %30 KE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı

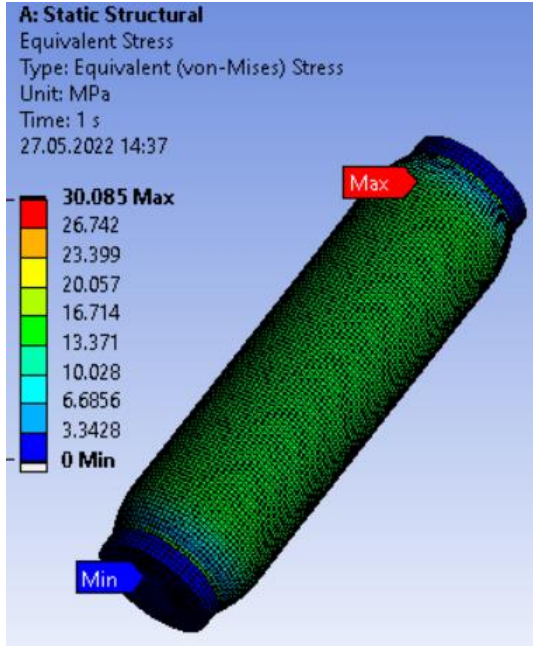


a

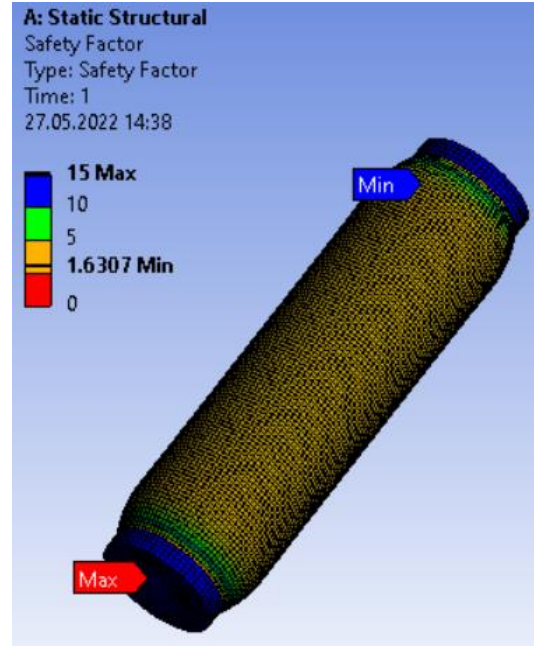


b

Şekil 4.38. PP + %30 AE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı

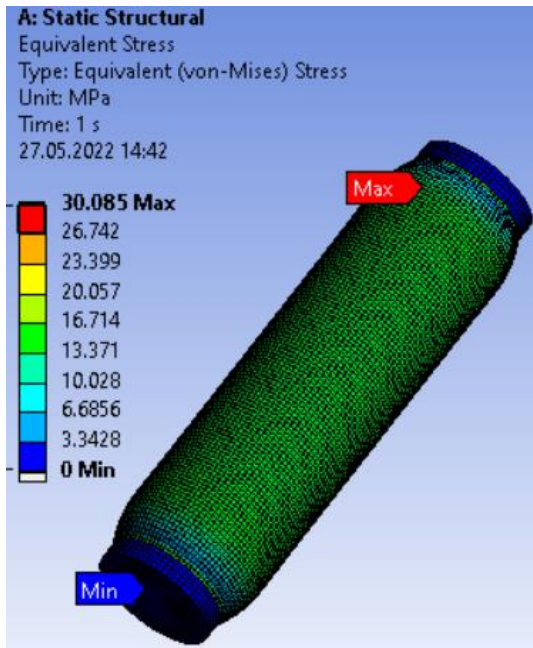


a

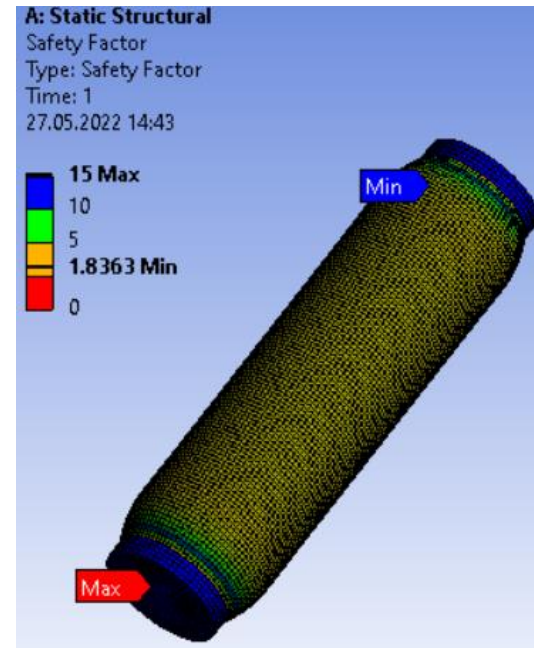


b

Şekil 4.39. PE + %30 CE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı

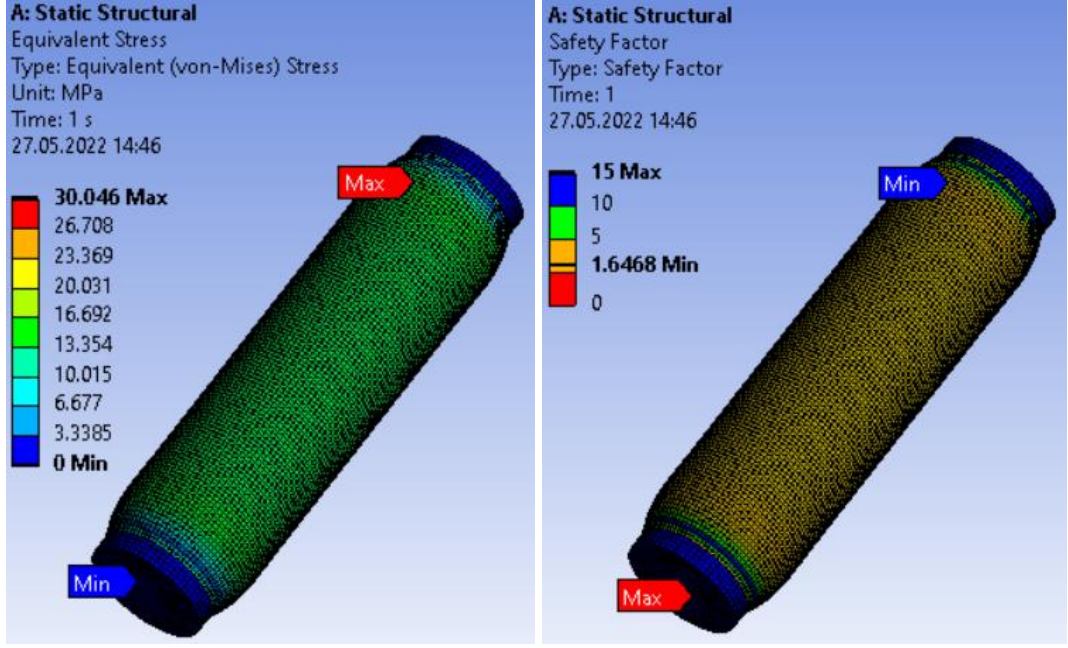


a



b

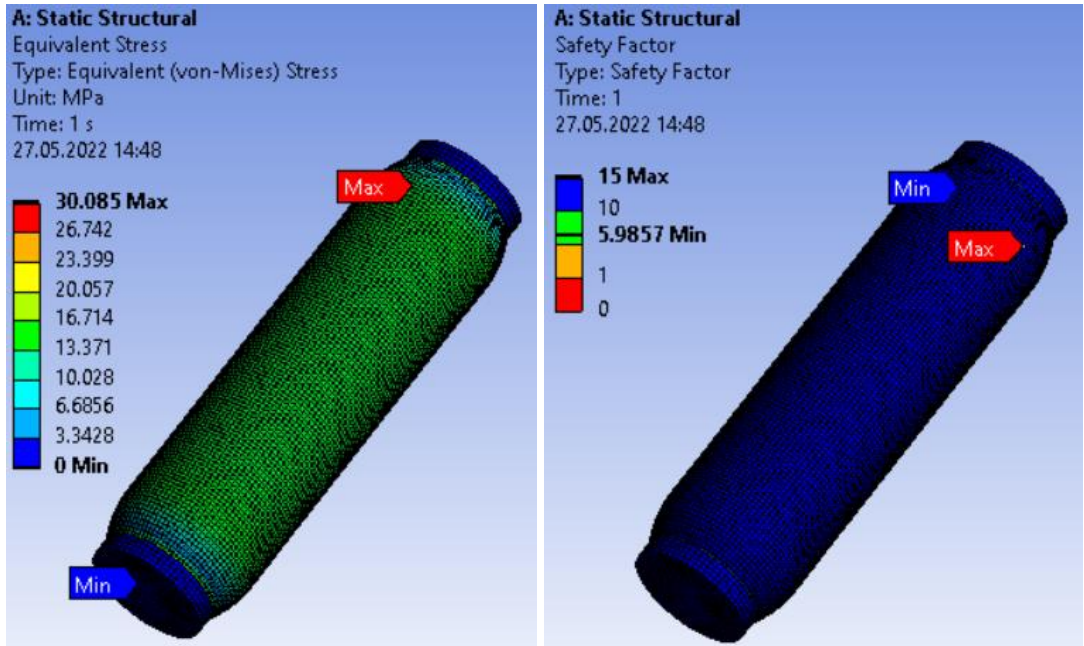
Şekil 4.40. PE + %30 KE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı



a

b

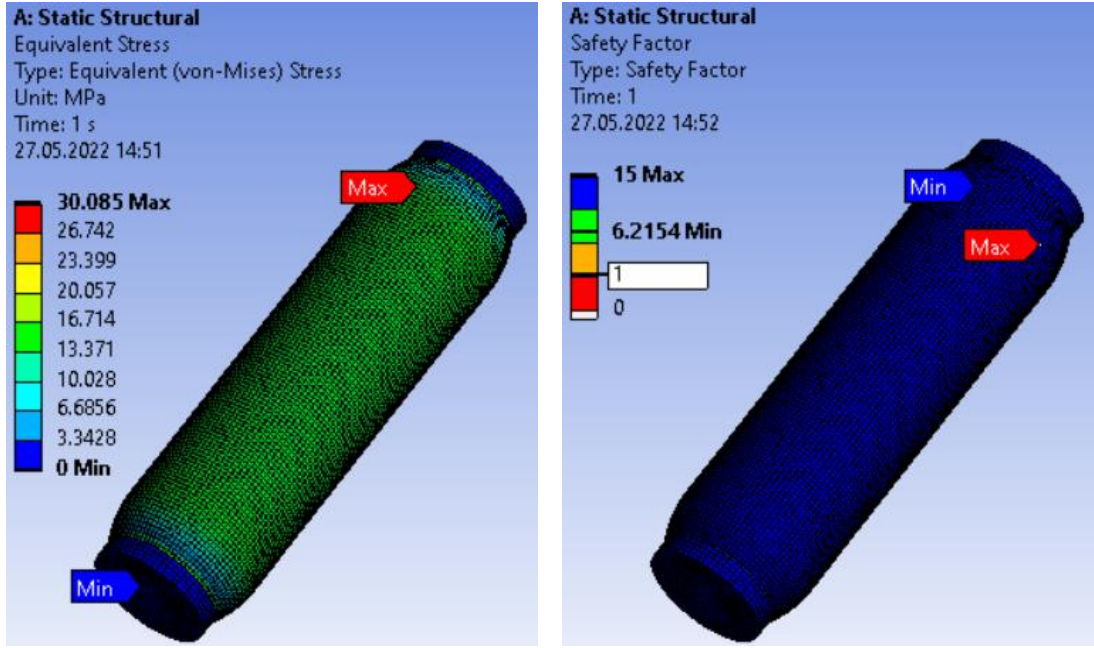
Şekil 4.41. PE + %30 AE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı



a

b

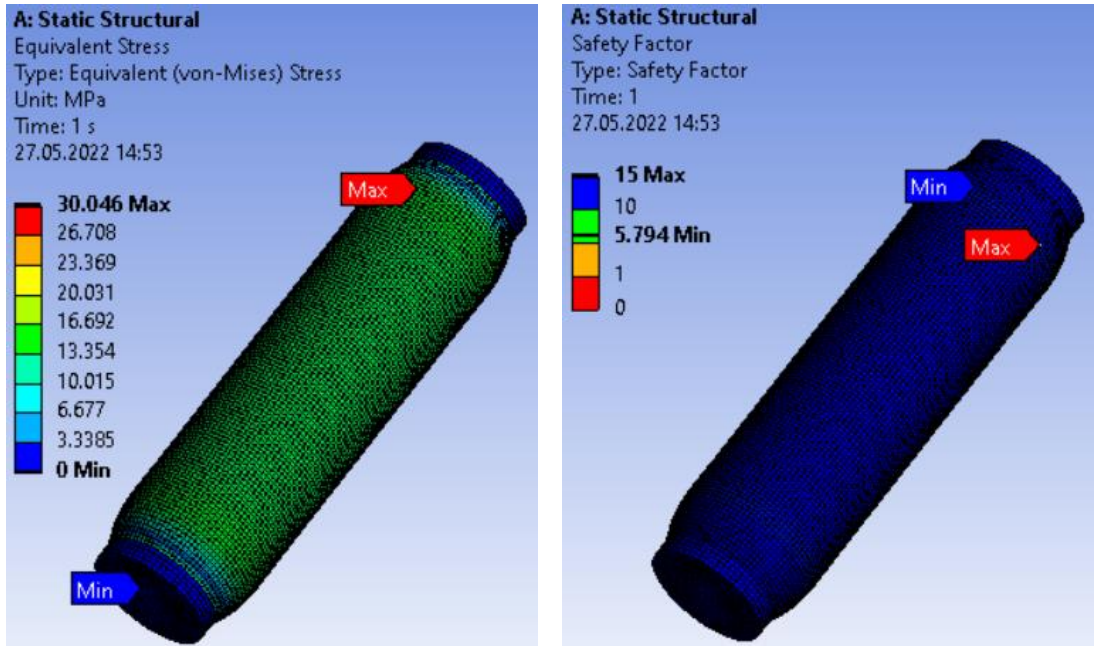
Şekil 4.42. PA6 + %30 CE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı



a

b

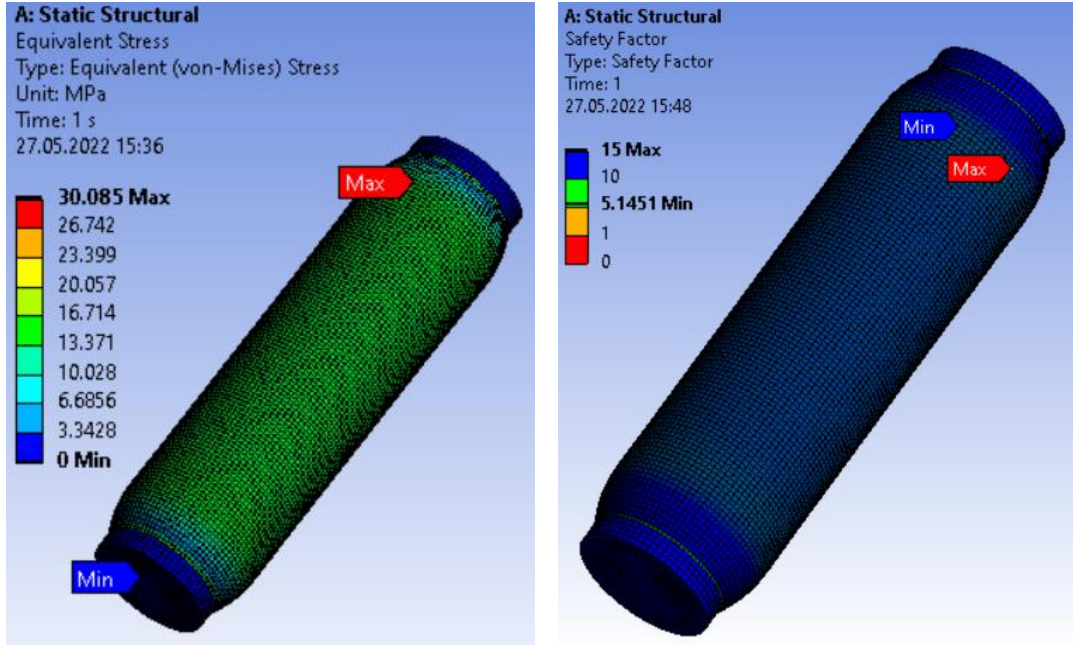
Şekil 4.43. PA6 + %30 KE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı



a

b

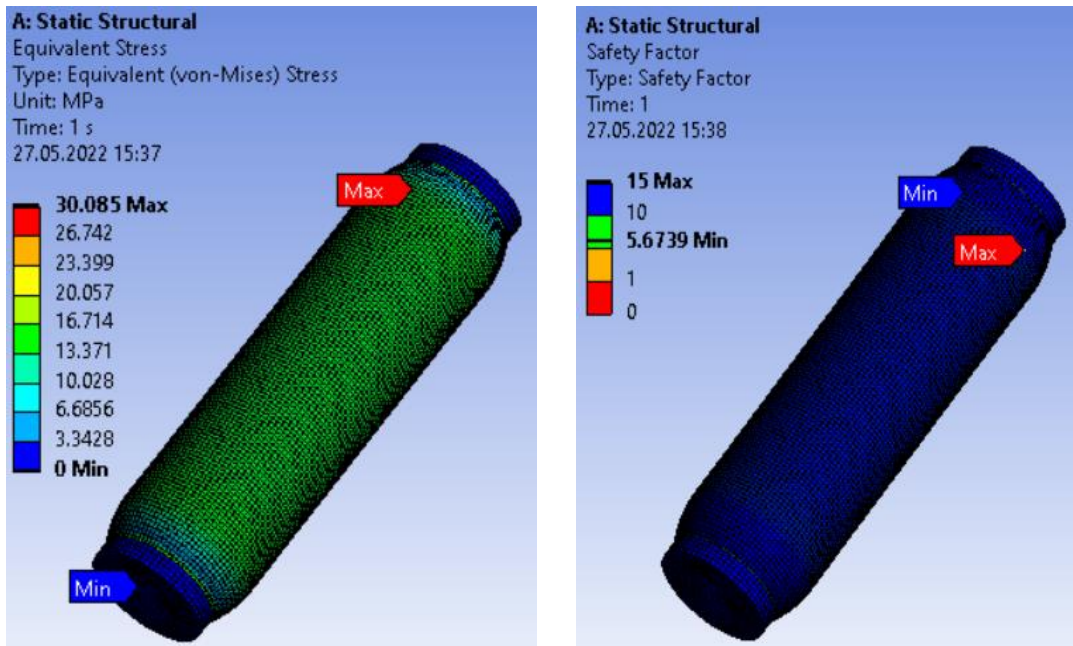
Şekil 4.44. PA6 + %30 AE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı



a

b

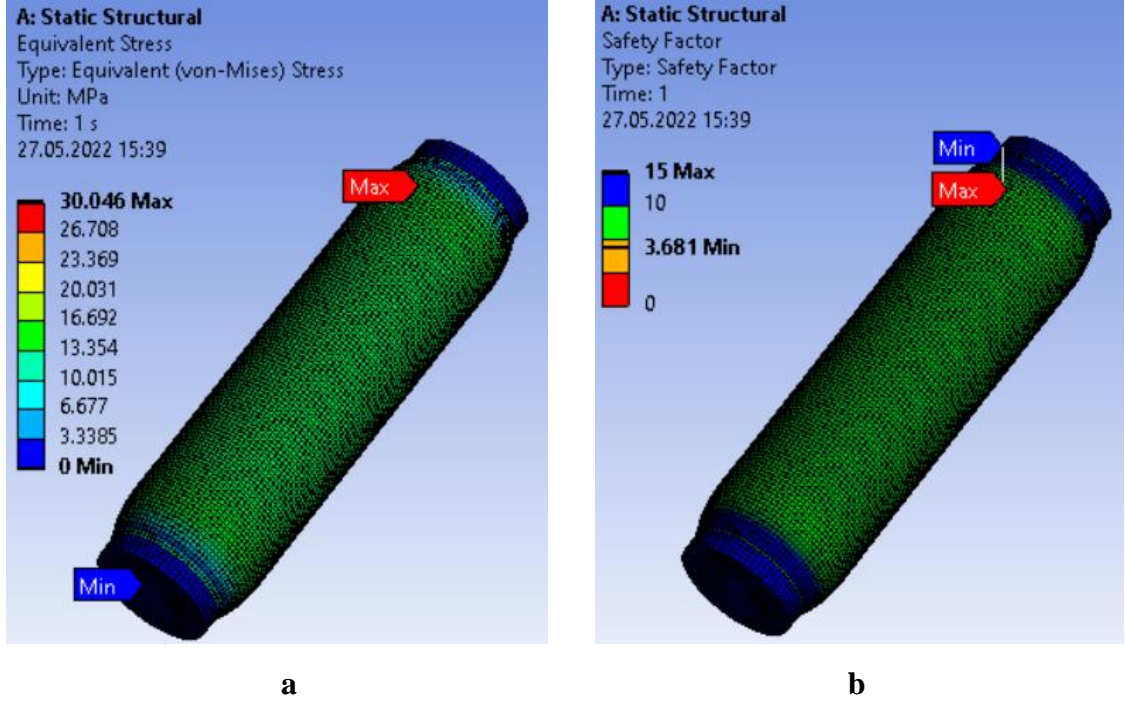
Şekil 4.45. PA12 + %30 CE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı



a

b

Şekil 4.46. PA12 + %30 KE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı



Şekil 4.47. PA12 + %30 AE a) eşdeğer gerilme, b) emniyet katsayısı

Her matris elemanına 6mm uzunluğunda kırılmış %30 cam, %30 karbon ve %30 aramid elyaf takviye edilmiş kompozit malzemelerin deney sonuçlarına göre ISO 1167 standartlarında 37,5 bar basınç altında analizi yapılmıştır. Tüm sonuçlar emniyetli bölge içerisinde kalmaktadır. PA6 + %30 karbon elyaf malzemesinin güvenlik katsayısı 6,2 ile en emniyetli kompozit malzeme olduğu görülmüştür.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, kırılmış cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli polipropilen, polietilen, poliamid 6 ve poliamid 12 kompozitlerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmıştır. Takviye malzemesi ve matris tipi, matris ve arayüz arasındaki yapışma derecesi, matris/elyaf oranı, matris içindeki dağılımı ve yöneliminin kompozitlerin mekanik davranışında etkili parametreler olduğu sonucuna varılmıştır.

Testlerin sonuçları, elyaf takviyesi matris malzemesinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Öte yandan, elyaf yüzdesi arttıkça elyaf performansının azaldığı görülmektedir; fakat sadece aramid elyaf takviyeli PA12 numunelerinde elyaf oranı arttıkça elyaf performansı artmıştır. Cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli kompozitler arasında en yüksek elyaf verimini PA6 ile yapılan kompozitler göstermiştir.

S/N oranları ve ANOVA analizi sonuçlarından matris ve elyaf katkı oranlarının kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin yüzdesi çeşitli olduğu görülmektedir. Düşen ağırlık deneyi dışında, matris türünün mekanik özellikler üzerinde baskın etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Son olarak, deneysel verilere uyacak şekilde doğrusal olmayan matematiksel modeller geliştirildi. Önerilen ikinci dereceden polinom modeli (Model 1) ve doğrusal olmayan kübik model (Model 2), deneysel verileri iyi bir uyum içinde temsil etmektedir. Bu nedenle, önerilen modellerin polimer kompozitlerin deneysel tepkisini ilişkilendirmek için yeterince sağlam olduğu sonucuna varılmaktadır.

Elde edilen veriler ile PE125 standartlarında boru tasarlandı ve numerik analizi yapıldı. Simülasyon sonuçlarına göre en iyi boru malzemesi %30 karbon elyaf takviyeli PA6 matrisli kompozitlerin olduğu sonucuna varılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Abasi, F. O., Aabass, R. U. (2018). Thermo-mechanical behavior of epoxy composite reinforced by carbon and Kevlar fiber. *MATEC Web of Conferences*, 225, 1–8. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822501022>
- Abbood, I. S., Odaa, S. A., Hasan, K. F., Jasim, M. A. (2021). Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures - A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1003–1008. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.636>
- Akindoyo, J. O., Beg, M. D. H., Ghazali, S., Hei"m, H. P., Feldmann, M., Mariatti, M. (2021). Simultaneous impact modified and chain extended glass fiber reinforced poly(lactic acid) composites: Mechanical, thermal, crystallization, and dynamic mechanical performance. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(5), 1–14. <https://doi.org/10.1002/app.49752>
- Alabtah, F. G., Mahdi, E., Eliyan, F. F. (2021). The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review. *Composite Structures*, 276, 114595. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114595>
- Andó, M., Kalácska, G., Czigány, T. (2009). Shore D Hardness of Cast PA6 Based Composites, 23, 15–19.
- Ari, A., Bayram, A., Karahan, M. (2022). Comparison of the mechanical properties of chopped glass , carbon , and aramid fiber reinforced polypropylene. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 1–13. <https://doi.org/10.1177/09673911221098570>
- Ari, A., Bayram, A. (2021, 18-20 November). High Pressure Resistant Glass Fiber Reinforced Polyamide Matrix Composite Pipe Design. *International Conference on Engineering Technologies*, 98–98. https://icente.selcuk.edu.tr/uploads/files2/ICENTE21_Abstract_Book_v1.pdf
- Ari, A., Bayram, A. (2021, 5-6 November). High-Pressure Resistant Aramid Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Pipe Design. V. *International Ege Composite Materials Symposium*. 287-302. <https://www.kompege.com/gorseller/files/kompege2021-bildirikitabi-revize.pdf>
- Awan, G. H., Ali, L., Ghauri, M., Ramzan, E., Ehsan, E. (2009). Effect of Various Forms of Glass Fiber Reinforcements on Tensile Properties of Polyester Matrix Composite. *Journal of Faculty of Engineering & Technology*.
- Bajpai, A., Martin, R., Faria, H., Ibarboure, E., Carlotti, S. (2019). Epoxy based hybrid nanocomposites: Fracture mechanisms, tensile properties and electrical properties. *Materials Today: Proceedings*, 34(March), 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.797>

- Baykara, T. (2020). İleri Malzemeler - Bilim ve Teknolojiler. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Beklemysheva, K. A., Vasyukov, A. V., Golubev, V. I., Zhuravlev, Y. I. (2018). On the Estimation of Seismic Resistance of Modern Composite Oil Pipeline Elements. *Doklady Mathematics*, 97(2), 184–187. <https://doi.org/10.1134/S1064562418020011>
- Bernal, A. N. A. N. (2015). The Petroleum Institute Simulation Of The Low-Velocity Impact Behavior Of Glass Reinforced Composite (ProQuest Number: 1602275). [Master of Science, The Petroleum Institute]. PQDT Open <https://www.proquest.com/docview/1732133839/E54DC0627C284FE5PQ/1?accountid=191758>
- Bingöl, M., Çavdar, K. (2016). Effects of Different Reinforcements for Improving Mechanical Properties of Composite Materials. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(2), 123. <https://doi.org/10.17482/uujfe.35051>
- British Standards (2008). BS EN 1167-1 2007 Thermoplastics pipes , fittings and assemblies for the conveyance of fluids — Determination of the resistance to internal pressure. 3.
- Callister, D. W., Rethwisch, G. D. (2015). *Materials Science and Engineering*, New York, WILEY.
- Canadian Association of Petroleum Producers (2017). Use of Reinforced Composite Pipe (Non-Metallic Pipelines).
- Chen, H., Wang, J., Ni, A., Ding, A., Sun, Z., Han, X. (2018). Effect of novel intumescent flame retardant on mechanical and flame retardant properties of continuous glass fibre reinforced polypropylene composites. *Composite Structures*, 203(March), 894–902. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.071>
- Cherizol, R. 2016. Rheological Characteristics of Pulp-Fibre-Reinforced Polyamide Composite (ProQuest Number:10190976)[Doctoral dissertation, University of Toronto]. <https://www.proquest.com/docview/1884632421/D23B785E3ED84297PQ/1?accountid=191758>
- Choudhari, D. S., Kakhandki, V. J. (2020). Comprehensive study and analysis of mechanical properties of chopped carbon fibre reinforced nylon 66 composite materials. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4596–4601. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.828>
- Chung, D. D. L. 2010. *Composite Materials*, London, : Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-831-5>
- Coleman, J. N., Khan, U., Blau, W. J., Gun'ko, Y. K. (2006). Small but strong: A review

- of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites. *Carbon*, 44(9), 1624–1652. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.02.038>
- Crabtree, S. L., Spalding, M. A., Pavlicek, C. L. (2008). Single-screw extruder zone temperature selection for optimized performance. *Technical Papers, Regional Technical Conference - Society of Plastics Engineers*, 3(September), 1406–1411.
- da Costa, H. M., Ramos, V. D., de Oliveira, M. G. (2007). Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. *Polymer Testing*, 26(5), 676–684. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.04.003>
- Day, R. J., Hewson, K. D., Lovell, P. A. (2002). Surface modification and its effect on the interfacial properties of model aramid-fibre/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 62(2), 153–166. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00135-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00135-X)
- Delli, E., Giliopoulos, D., Bikiaris, D. N., Chrissafis, K. (2021). Fibre length and loading impact on the properties of glass fibre reinforced polypropylene random composites. *Composite Structures*, 263(January): <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113678>
- Dorigato, A., Fambri, L. (2013). Effect of aramid regenerated fibers on thermo-mechanical behaviour of polyamide 12 composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(17), 1243–1256. <https://doi.org/10.1177/0731684413486528>
- Erden, S., Sever, K., Seki, Y., Sarikanat, M. (2010). Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification. *Fibers and Polymers*, 11(5), 732–737. <https://doi.org/10.1007/s12221-010-0732-2>
- F. O., A., P. O., A., O. O., O. (2013). Mechanical Properties of a Polyester Fibre Glass Composite. *International Journal of Composite Materials*, 2(6), 147–151. <https://doi.org/10.5923/j.cmaterials.20120206.06>
- Fay, D. L. (2011). Finite Element Modeling of Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes Under Impact Loading. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Feng, P., Song, G., Zhu, X., Lv, D., Zhao, Y., Yang, X., Li, N., Zhang, L., Ma, L. (2021). Enhanced interfacial adhesion of carbon fiber/epoxy composites by synergistic reinforcement with multiscale “rigid-flexible” structure at interphase. *Composites Part B: Engineering*, 225, 109315. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2021.109315>
- Fenouillot, F., Cassagnau, P., Majesté, J. C. (2009). Uneven distribution of nanoparticles in immiscible fluids: Morphology development in polymer blends. *Polymer*, 50(6), 1333–1350. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.12.029>

- Flemings, M. C. (1986). *Materials Science and Engineering - Its Past and Its Future*. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 26(2), 93–100. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.26.93>
- Fu, S. Y., Lauke, B., Mäder, E., Hu, X., Yue, C. Y. (1999). Fracture resistance of short-glass-fiber-reinforced and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene under Charpy impact load and its dependence on processing. *Journal of Materials Processing Technology*, 89–90, 501–507. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00065-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00065-5)
- Fu, S. Y., Lauke, B., Mäder, E., Yue, C. Y., Hu, X. (2000). Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(10), 1117–1125. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00068-3)
- Fu, Shao Yun, Lauke, B. (1998a). Characterization of tensile behaviour of hybrid short glass fibre/calcite particle/ABS composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(5–6), 575–583. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(97\)00117-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(97)00117-6)
- Fu, Shao Yun, Lauke, B. (1998b). Fracture resistance of unfilled and calcite-particle-filled ABS composites reinforced by short glass fibers (SGF) under impact load. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29(5–6), 631–641. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(97\)00111-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(97)00111-5)
- Fu, T., Haworth, B., Mascia, L. (2017). Analysis of process parameters related to the single-screw extrusion of recycled polypropylene blends by using design of experiments. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 33(2), 168–190. <https://doi.org/10.1177/8756087916649006>
- Guo, Q., Xiao, B., Ohsawa, I., Takahashi, J. (2020). Fracture mechanism characteristics of ultra-thin chopped carbon fiber tape-reinforced thermoplastics hat-shaped hollow beam under transverse static and impact loadings. *Carbon Letters*, 30(3), 271–280. <https://doi.org/10.1007/s42823-019-00095-z>
- Hao, W., Yao, X., Ke, Y., Ma, Y., Li, F. (2013). Experimental characterization of contact angle and surface energy on aramid fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(9), 1012–1022. <https://doi.org/10.1080/01694243.2012.727172>
- Harmia, T., Hartikainen, J., Lindner, M. (2005) *Long Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites in Automotive Applications in Automotive Applications*. Polymer Composites From Nano- to Macro-Scale, Springer.
- He, Y., Chen, Q., Wu, D., Zhou, M., Wang, T., Lu, C., Zhang, L., Liu, H., Liu, C. (2021). Effect of multiscale reinforcement by fiber surface treatment with polyvinyl alcohol/graphene oxide/oxidized carbon nanotubes on the mechanical properties of reinforced hybrid fiber composites. *Composites Science and Technology*, 204, 108634. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2020.108634>

- Hirotsu, C. (2017). *Advanced Analysis of Variance (AANOVA)*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Hu, C., Liao, X., Qin, Q. H., Wang, G. (2019). The fabrication and characterization of high density polyethylene composites reinforced by carbon nanotube coated carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121(February), 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.03.027>
- Huang, B. Z., Zhao, L. J. (2012). Bridging and toughening of short fibers in SMC and parametric optimum. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3146–3152. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.016>
- İçten, B. M., Karakuzu, R., Toygar, M. E. (2006). Failure analysis of woven kevlar fiber reinforced epoxy composites pinned joints. *Composite Structures*, 73(4), 443–450. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.02.016>
- İstanbul Büyükşehir Belediyesi (2016). Ugetam hizmetler kataloğu.
- Imes, B. W., Halabe, U., Skidmore, M., Virginia, W. (2018). *Glass-Polymer Composite Pipes and Joints : Manufacturing , Testing , and Characterization* (ProQuest Number 10793813) [Master dissertation, West Virginia University]. PQDT Open. <https://www.proquest.com/docview/2042869140/12464FEDFD754C02PQ/1?accountid=191758>
- Jabbar, A., Militký, J., Wiener, J., Karahan, M. (2016). Static and dynamic mechanical properties of novel treated jute/green epoxy composites. *Textile Research Journal*, 86(9), 960–974. <https://doi.org/10.1177/0040517515596936>
- Junaedi, H., Baig, M., Dawood, A., Albahkali, E., Almajid, A. (2021). Modeling analysis of the tensile strength of polypropylene base Short Carbon Fiber reinforced composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1611–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.010>
- Karahan, M., Gul, H., Karahan, N., Ivens, J. (2013). Static behavior of three-dimensional Integrated core sandwich composites subjected to three-point bending. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(9), 664–678. <https://doi.org/10.1177/0731684412474857>
- Karahan, M., Jabbar, A., Karahan, N. (2015). Ballistic impact behavior of the aramid and ultra-high molecular weight polyethylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(1), 37–48. <https://doi.org/10.1177/0731684414562223>
- Karsli, N. G., Aytac, A. (2013). Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. *Composites Part B: Engineering*, 51, 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.03.023>
- Kaw, A. K., Group, F. (2006). *Composite*.

- Kers, J., Kulu, P., Goljandin, D., Mikli, V. (2007). Reprocessing technology of composite plastic scrap and properties of materials from recycled plastics. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 13(2), 105–116.
- Khademian, N., Asiabi, M., Vahidi, D. (2017). Mechanical behavior and nano fracture patterns in PP / short glass fiber and PA / short glass fiber composites. *Ultrafine Grained and Nanostructured Materials (UFGNSM2017)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28673.35688>
- Khaled, A. (2013). Effects Of Machining System Parameters And Dynamics On Quality Of High-Speed Milling (ProQuest Number: 10180782107) [Doctoral dissertation, Missouri University]. PQDT Open. <https://www.proquest.com/docview/1840198710/53586B581D044CEAPQ/1?accountid=191758>
- Khan, M. I., Umair, M., Hussain, R., Karahan, M., Nawab, Y. (2021). Investigation of impact properties of para-aramid composites made with a thermoplastic-thermoset blend. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1-28. <https://doi.org/10.1177/08927057211021464>
- Ku, H., Cheng, Y. M., Snook, C., Baddeley, D. (2005). Drop weight impact test fracture of vinyl ester composites: Micrographs of pilot study. *Journal of Composite Materials*, 39(18), 1607–1620. <https://doi.org/10.1177/0021998305051111>
- Kumar, S., Balachander, S. (2020). Studying the effect of reinforcement parameters on the mechanical properties of natural fibre-woven composites by Taguchi method. *Journal of Industrial Textiles*, 50(2), 133–148. <https://doi.org/10.1177/1528083718823292>
- Laura, D. M., Keskkula, H., Barlow, J. W., Paul, D. R. (2000). Effect of glass fiber and maleated ethylene-propylene rubber content on tensile and impact properties of Nylon 6. *Polymer*, 41(19), 7165–7174. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00049-5)
- Li, J., Cai, C. L. (2011). The carbon fiber surface treatment and addition of PA6 on tensile properties of ABS composites. *Current Applied Physics*, 11(1), 50–54. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.06.017>
- Li, T., Wang, Z., Zhang, H., Hu, Z., Yu, J., Wang, Y., Zhu, J. (2021). Non-destructive modification of aramid fiber by building nanoscale-coating solution to enhance the interfacial adhesion properties of the fiber-reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, 55(13), 1823–1834. <https://doi.org/10.1177/0021998320962845>
- Lohmar, J. (2006). Polyamide-12 for high pressure gas installations. *World Gas Conference*.

- López, F. A., Martín, M. I., Alguacil, F. J., Rincón, J. M., Centeno, T. A., Romero, M. (2012). Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass-ceramic material. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 93, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.10.003>
- Lozano, K., Barrera, E. V. (2001). Nanofiber-reinforced thermoplastic composites. I. Thermoanalytical and mechanical analyses. *Journal of Applied Polymer Science*, 79(1), 125–133. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010103\)79:1<125::AID-APP150>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010103)79:1<125::AID-APP150>3.0.CO;2-D)
- Lu, C., Wang, J., Lu, X., Zheng, T., Liu, Y., Wang, X., Zhang, D., Seveno, D. (2019). Wettability and Interfacial Properties of Carbon Fiber and Poly(ether ether ketone) Fiber Hybrid Composite. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(34), 31520–31531. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b09735>
- Mallick, P. K. (2017). Particulate filled and short fiber reinforced polymer composites. *Comprehensive Composite Materials II*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03837-6>
- Manikandan, A., Rajkumar, R. (2016). Evaluation of mechanical properties of synthetic fiber reinforced polymer composites by mixture design analysis. *Polymers and Polymer Composites*, 24(7), 455–462. <https://doi.org/10.1177/096739111602400702>
- Materials, E. (2010). *Composite Materials*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-831-5>
- Mathew, M. T., Padaki, N. V., Rocha, L. A., Gomes, J. R., Alagirusamy, R., Deopura, B. L., Fanguero, R. (2007). Tribological properties of the directionally oriented warp knit GFRP composites. *Wear*, 263(7-12), 930–938. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.001>
- Metin, M. (2008). E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Mouzakis, D. E., Harmia, T., Karger-Kocsis, J. (2000). Fracture behaviour of discontinuous long glass fibre reinforced injection moulded polypropylene. *Polymers and Polymer Composites*, 8(3), 167–175.
- Osswald, Tim A, Gandhi, S. (2020). *Discontinuous Fiber-Reinforced Composites Fundamentals and Applications*, Hanser Publications.
- Ovalı, İ., Esen, C. (2020). *Ansys Workbench (C. 4)*, İstanbul, Kodlab.
- Özçelik, B., Özbay, B. (2011). Plastik Enjeksiyon Kalıp Malzemelerinin Polipropilen Ürünün Mekanik Özelliklerine Etkisinin Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi. *Sigma* 29, (262), 289–300.

- Ozkoc, G., Bayram, G., Bayramli, E. (2005). Short glass fiber reinforced ABS and ABS/PA6 composites: Processing and characterization. *Polymer Composites*, 26(6), 745–755. <https://doi.org/10.1002/pc.20144>
- Park, J. M., Wang, Z. J., Jang, J. H., Gnidakoung, J. R. N., Lee, W. Il, Park, J. K., Lawrence DeVries, K. (2009). Interfacial and hydrophobic evaluation of glass fiber/CNT-epoxy nanocomposites using electro-micromechanical technique and wettability test. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(11), 1722–1731. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.08.006>
- Park, S. J., Seo, M. K. (2011). Composite Characterization. *Interface Science and Technology*, 18, 631-738. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375049-5.00008-6>
- Taşdemir, M. (2018). Plastik Malzemelerin Test Teknikleri. Seçkin.
- Popoola, L. T., Grema, A. S., Latinwo, G. K., Gutti, B., Balogun, A. S. (2013). Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation. *International Journal of Industrial Chemistry*, 4(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/2228-5547-4-35>
- Prasanna, S. M., Yogesha, K. B., Mruthunjaya, M., Shivakumar, B. P., Siddappa, P. N., Raju, B. R. (2019). Mechanical and Tribological Characterization of Hybrid Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 22, 2351–2358. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.357>
- Qi, G., Zhang, B., Du, S. (2018). Assessment of F-III and F-12 aramid fiber/epoxy interfacial adhesions based on fiber bundle specimens. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 112, 549–557. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.06.001>
- Rafiee, R., Mazhari, B. (2016). Simulation of the long-term hydrostatic tests on Glass Fiber Reinforced Plastic pipes. *Composite Structures*, 136, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.058>
- Rao, S. S. (2011). *The finite element method in engineering*. 5, Elsevier/Butterworth Heinemann.
- Ravi Kumar, N., Srikant, P., Ranga Rao, C. H., Meera Saheb, K. (2017). Statistical analysis of mechanical properties of vakka fiber reinforced polypropylene composites using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3361–3370. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.224>
- Yusuf Ş. (2022). Kompozit Malzemelerine Giriş (4. baskı). Seçkin.
- Saikrasun, S., Amornsakchai, T., Sirisinha, C., Meesiri, W., Bualek-Limcharoen, S. (1999). Kevlar reinforcement of polyolefin-based thermoplastic elastomer. *Polymer*, 40(23), 6437–6442. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00853-2](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00853-2)

- Sakin, R., Ay, I., Yaman, R. (2008). An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials. *Materials and Design*, 29(1), 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.006>
- Sateshkumar, S. K., Awoyera, P. O., Kandasamy, T., Nagaraj, S., Murugesan, P., Ponnusamy, B. (2018). Impact resistance of high strength chopped basalt fibre-reinforced concrete. *Revista de la Construccion*, 17(2), 240–249. <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.2.240>
- Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258–1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>
- Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M. (2004). Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *Itüdergisi/D*, (535), 117–128.
- Savaşkan, T. (2018). *Metallere Plastik Şekil Verme Yöntemleri*, İstanbul, : Papatya Bilim.
- Sebaey, T. A. (2019). Design of oil and gas composite pipes for energy production. *Energy Procedia*, 162, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.016>
- Siva, R., Sundar Reddy Nemali, S., Kishore Kunchapu, S., Gokul, K., Arun Kumar, T. (2021). Comparison of Mechanical Properties and Water Absorption Test on Injection Molding and Extrusion - Injection Molding Thermoplastic Hemp Fiber Composite. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4382–4386. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.189>
- Somashekhar, S., Shanthakumar, G. C., Nagamadhu, M. (2019). Influence of Fiber content and screw speed on the Mechanical characterization of Jute fiber reinforced Polypropylene composite using Taguchi Method. *Materials Today: Proceedings*, 24, 2366–2374. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.766>
- Soumare, I. (2020). Comparing Performance Of Anova To Poisson And Negative Binomial Regression When Applied To Count Data (ProQuest Number: 27835861) [Doctoral dissertation, North Dakota State University]. PQDT Open. <https://www.proquest.com/docview/2409102343/360D42FA621A4ED8PQ/1?accountid=191758>
- Spahr, D. E., Friedrich, K., Schultz, J. M., Bailey, R. S. (1990). Microstructure and fracture behaviour of short and long fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Science*, 25(10), 4427–4439. <https://doi.org/10.1007/BF00581104>
- Suresh, N., Balamurugan, L., Vasantha Geethan, K. A., Sathish Kumar, M. (2020). Statistical analysis of mechanical properties of Al-SiC-WC and Al-SiC-Al₂O₃ hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 42, 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.211>

- Suresha, B., Ravi Kumar, B. N., Venkataramareddy, M., Jayaraju, T. (2010). Role of micro/nano fillers on mechanical and tribological properties of polyamide66/polypropylene composites. *Materials and Design*, 31(4), 1993–2000. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.031>
- Taheri, F. (2013). Advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites for the manufacture and rehabilitation of pipes and tanks in the oil and gas industry. <https://doi.org/10.1533/9780857098641.4.662>
- Tarani, E., Wurm, A., Schick, C., Bikiaris, D. N., Chrissafis, K., Vourlias, G. (2016). Effect of graphene nanoplatelets diameter on non-isothermal crystallization kinetics and melting behavior of high density polyethylene nanocomposites. *Thermochimica Acta*, 643, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.09.018>
- Taşdemir, M. (2018). *Plastik Malzemelerin Test Teknikleri*. Ankara, Seçkin.
- Vara Prasad, V., Talupula, S. (2018). A Review on Reinforcement of Basalt and Aramid (Kevlar 129) fibers. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5993–5998. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.202>
- Wang, C., Li, K. Z., Li, H. J., Jiao, G. S., Lu, J., Hou, D. S. (2008). Effect of carbon fiber dispersion on the mechanical properties of carbon fiber-reinforced cement-based composites. *Materials Science and Engineering A*, 487(1–2), 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.073>
- Wang, J., Fuentes, C. A., Zhang, D., Wang, X., Van Vuure, A. W., Seveno, D. (2017). Wettability of carbon fibres at micro- and mesoscales. *Carbon*, 120, 438–446. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2017.05.055>
- Wang, R. M., Zheng, S. R., Zheng, Y. P. (2011). *Polymer matrix composites and technology*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857092229>
- Wardle, M. W. (2000). Aramid Fiber Reinforced Plastics—Properties. *Comprehensive Composite Materials*, 199–229. <https://doi.org/10.1016/b0-08-042993-9/00182-0>
- Weidenfeller, B., Höfer, M., Schilling, F. R. (2004). Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(4), 423–429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.11.005>
- Xie, H. Q., Zhang, S., Xie, D. (2005). An efficient way to improve the mechanical properties of polypropylene/short glass fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 96(4), 1414–1420. <https://doi.org/10.1002/app.21575>
- Yang, G., Park, M., Park, S. J. (2019). Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: A review. *Composites Communications*, 14(May), 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.05.004>

Zhao, S., Cheng, L., Guo, Y., Zheng, Y., Li, B. (2012). PA6 and Kevlar fiber reinforced isotactic polypropylene: Structure, mechanical properties and crystallization and melting behavior. *Materials and Design*, 35, 749–753. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.039>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali ARI

Doğum Yeri ve Tarihi : Mersin / 1988

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Turhan Tayan Anadolu Lisesi / 2006

Lisans : Karadeniz Teknik Üniversitesi / 2012

Yüksek Lisans : Karadeniz Teknik Üniversitesi / 2016

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : OSTİM Teknik Üniversitesi 2021- devam ediyor

İletişim (e-posta) : ali.ari@ostimteknik.edu.tr;
a.ari.33@gmail.com

Yayımları :

Ari, A., Bayram, A., Karahan, M. and Karagöz, S. (2023). Evaluation of the mechanical properties of chopped carbon fiber reinforced polypropylene, polyethylene, polyamide 6, and polyamide 12 composites. *Industria Textila*, 74(2), doi: 10.35530/IT.074.02.202214

Ari, A., Bayram, A., Karahan, M. (2022). Comparison of the mechanical properties of chopped glass , carbon , and aramid fiber reinforced polypropylene. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 1–13. <https://doi.org/10.1177/09673911221098570>

Arı, A., Bayram, A. (2021, 18-20 November). High Pressure Resistant Glass Fiber Reinforced Polyamide Matrix Composite Pipe Design. *International Conference on Engineering Technologies*, 98–98. https://icente.selcuk.edu.tr/uploads/files2/ICENTE21_Abstract_Book_v1.pdf

Arı, A., Bayram, A. (2021, 5-6 November). High-Pressure Resistant Aramid Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Pipe Design. *V. International Ege Composite Materials Symposium*. 287-302. <https://www.kompege.com/gorseller/files/kompege2021-bildirikitabi-revize.pdf>

Ari, A., Gümüşel, L. and Karagöl, M. (2017). Beş Parmaklı Protez KTÜ El. 18. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu. 409-415

Ari, A. (2016). Beş Parmaklı Protez Robot El. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.