
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN SÜREKLİ FİBER TAKVİYELİ TERMOPLASTİK MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Fatih BULUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih BULUN
17/10/2024

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN SÜREKLİ FİBER TAKVİYELİ TERMOPLASTİK MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih BULUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Sürekli fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin eklemeli imalat ile üretimi, malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yeni imkanlar sunmaktadır. Bu tez, eklemeli imalat ile üretilen sürekli fiber takviyeli ULTEM 9085 malzemelerin mekanik özelliklerini incelemektedir. Temel amaç, farklı fiber oranları ve baskı parametrelerinin bu malzemelerin mekanik performansı üzerindeki etkilerini analiz etmektir. Yapılan çalışmada çekme, eğme ve darbe mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonuçlarında Taguchi metodu ve ANOVA yardımı ile çıktılar üzerinde etkisi en yüksek olan parametreler tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan ULTEM 9085 malzemesi ve sürekli karbon fiber takviyesi özellikle havacılık ve uzay uygulamalarında kullanım potansiyeli çok yüksek olan malzemelerdir. Bu sektör için büyük önem arz eden üretim süreleri ve maliyetler de çalışmada ele alınmıştır. Çalışmanın bulguları, yüksek performanslı fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin üretilmesi için eklemeli imalat süreçlerinin optimizasyonuna katkıda bulunmaktadır. Geleneksel kompozit malzemelerde karşılaşılan yüksek fiber oranlarına kıyasla %3 ila %10 arasında düşük fiber hacim oranı kullanılan çalışmada çekme mukavemetinin 2 kat eğme mukavemetinin 1,5 kat ve darbe dayanımının da 3,5 kat arttığı gözlemlenmiştir. Bu bilgiler, özellikle havacılık ve otomotiv gibi malzeme performansının kritik olduğu endüstriler için değerlidir. Sonuç olarak bu araştırma, eklemeli imalat ile üstün mekanik özelliklere sahip sürekli fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin optimum parametreler ile üretebileceğini göstermektedir. Gelecek çalışmalar, bu malzemelerin uzun vadeli dayanıklılığını ve çevresel etkilerini keşfetmeye odaklanacak olup, çeşitli yüksek talep gören sektörlerdeki uygulanabilirliklerini daha da artırmayı hedeflemektedir.

Bilim Kodu	:	91438
Anahtar Kelimeler	:	ANOVA, eklemeli imalat, sürekli fiber takviyesi, Taguchi, ULTEM 9085
Sayfa Adedi	:	107
Danışman	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONTINUOUS FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC MATERIALS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

(M. Sc. Thesis)

Fatih BULUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

The additive manufacturing of continuously fiber reinforced thermoplastic composites offers new opportunities to enhance the mechanical properties of these materials. This study investigates the mechanical properties of continuously fiber reinforced ULTEM 9085 materials produced by additive manufacturing. The primary objective is to analyze the effects of different fiber ratios and printing parameters on the mechanical performance of these materials. The study experimentally examines the tensile, flexural, and impact mechanical properties. Using the Taguchi method and ANOVA, the parameters with the highest impact on the outcomes were identified. The ULTEM 9085 material and continuous carbon fiber reinforcement used in this study are materials with high potential for aerospace and aviation applications. The study also addresses production times and costs, which are critical for these sectors. The findings contribute to the optimization of additive manufacturing processes for producing high-performance fiber-reinforced thermoplastic composites. Compared to traditional composite materials, which often use high fiber ratios, this study observed significant improvements with fiber volume ratios ranging from 3% to 10%. Specifically, tensile strength increased by 2 times, flexural strength by 1.5 times, and impact resistance by 3.5 times. These insights are particularly valuable for industries such as aerospace and automotive, where material performance is critical. In conclusion, this research demonstrates that additive manufacturing can produce continuously fiber reinforced thermoplastic composites with superior mechanical properties using optimized parameters. Future studies will focus on exploring the long-term durability and environmental impacts of these materials, aiming to further enhance their applicability in various high-demand sectors.

Science Code	:	91438
Key Words	:	ANOVA, additive manufacturing, continuous fiber reinforcement, Taguchi, ULTEM 9085
Page Number	:	107
Supervisor	:	Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde desteklerini ve katkılarını esirgemeyen tüm kişi ve kurumlara teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle, danışmanım Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e, bana her aşamada yol gösterdiği, bilgi ve tecrübelerini paylaştığı için sonsuz teşekkür ederim. Çalışmam boyunca göstermiş olduğu sabır, anlayış ve destek, bu tezin ortaya çıkmasında büyük rol oynamıştır.

Bu süreçte yanımda olan, manevi desteklerini her zaman hissettiren aileme ve arkadaşlarıma da içten teşekkürlerimi sunarım. Özellikle, anneme ve sevgili eşime, motivasyon ve moral desteği sağladıkları için minnettarım.

Deneysel çalışmalar için hazırlanan numuneler ve üretilen parçalar konusunda destek sağlayan Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Eklemeli İmalat Müdürlüğü çalışanlarına ve yöneticilerim Dr. Remzi Ecmel ECE ve Güneş GÜNGÖR'e her türlü teknik ve manevi destekleri için teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarımda ve deneylerimde bana yardımcı olan, teknik destek sağlayan Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Malzeme ve Proses bölümü çalışanlarına teşekkür ederim. Özellikle, Ümit AYTAR, Abdülcelil BAYAR ve Adem ATUK'a, deneylerimde verdikleri destek ve sağladıkları kaynaklar için minnettarım. Yine laboratuvar çalışmalarımda destek olan Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği laboratuvarı görevlileri ve Prof.Dr. Hakan GÜRÜN'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……. iv

TEŞEKKÜR…….. vi

İÇİNDEKİLER…….. vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ…… x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ……. xii

RESİMLERİN LİSTESİ……..... xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR……... xv

1. GİRİŞ…… 1

2. EKLEMELİ İMALAT……. 5

2.1. Eriyik Biriktirme ile Modelleme (FDM)…… 8

2.2. FDM Metodu ile Kompozit Malzeme Üretimi…… 10

2.3. FDM Yönteminde Kullanılan Malzemeler……. 12

2.3.1. ULTEM 9085……... 14

2.4. Proses Parametreleri……... 15

2.4.1. Üretim yönü…….. 17

2.4.2. Tarama açısı…….. 18

2.4.3. Katman kalınlığı……... 18

2.4.4. Hava boşluğu…… 19

2.4.5. İç dolgu oranı……... 19

2.4.6. İç dolgu tipi……..... 19

2.4.7. Duvar sayısı……. 20

3. LİTERATÜR TARAMASI…… 21

4. MALZEME VE METOD……..... 31

4.1. Test Standartları ve Numunelerin Belirlenmesi…….. 34

4.2. Numunelerin Modellenmesi (CAD Model)……. 35

Sayfa

4.3. Parametrelerin Belirlenmesi…… 37

4.4. Deney Tasarımı (DOE)…… 41

4.4.1. Çekme testi numuneleri…… 41

4.4.2. Eğme testi numuneleri……... 42

4.4.3. Darbe testi numuneleri…….. 43

4.5. Numunelerin Üretime Hazırlanması……... 44

4.5.1. Çekme testi numunelerinin üretime hazırlanması……..... 45

4.5.2. Eğme testi numunelerinin üretime hazırlanması…….. 46

4.5.3. Darbe testi numunelerinin üretime hazırlanması……... 47

4.6. Üretim…….…... 48

4.7. Testler…… 53

4.7.1. Çekme testleri…….. 53

4.7.2. Eğme testleri…… 54

4.7.3. Darbe testleri……... 55

4.8. Test Sonuçları…… 56

4.8.1. Çekme testi sonuçları……... 56

4.8.2. Eğme testi sonuçları……..... 62

4.8.3. Darbe testi sonuçları…… 65

4.9. Maliyet ve Üretim Süresi Analizleri…….. 67

4.9.1. Çekme numuneleri üretim süresi ve maliyet analizi…… 67

4.9.2. Eğme numuneleri üretim süresi ve maliyet analizi…….. 68

4.9.3. Darbe numuneleri üretim süresi ve maliyet analizi……. 71

4.10. Test Sonuçları Analizleri……. 73

4.10.1. Çekme testi sonuçları analizi……... 73

4.10.2. Eğme testleri sonuçları analizi……..... 77

4.10.3. Darbe testleri sonuçları analizi……..... 79

Sayfa

4.11. Kırılma Yüzeyi ve Mikroyapı İncelemesi……..... 79

4.11.1. Çekme testi numuneleri kırılma yüzeyi ve mikroyapı incelemesi…… 81

4.11.2. Eğme testi numuneleri kırılma yüzeyi ve mikroyapı incelemesi……. 84

4.11.3. Darbe testi numuneleri kırılma yüzeyi ve mikroyapı incelemesi……. 86

4.12. FTIR Testi……. 88

5. SONUÇ VE ÖNERİLER……. 93

KAYNAKLAR……... 97

EKLER……... 103

ÖZGEÇMİŞ…… 107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. FDM yönteminde yaygın olarak kullanılan malzemelerin özellikleri..... 13

Çizelge 2.2. Ultem 9085 mekanik ve fiziksel özellikleri..... 15

Çizelge 3.1. Sürekli fiber takviyeli FDM metodunda kullanılan malzemeler..... 21

Çizelge 3.2. Literatürde raporlanan CCFRP çekme özellikleri..... 27

Çizelge 3.3. Literatürde raporlanan CCFRP eğme özellikleri..... 29

Çizelge 4.1. Markforged FX20 makinesi teknik özellikleri..... 32

Çizelge 4.2. ULTEM 9085 ve karbon fiber filament mekanik özellikleri..... 33

Çizelge 4.3. Sabit üretim parametreleri..... 40

Çizelge 4.4. Parametreler ve seviyeleri..... 41

Çizelge 4.5. Çekme testi numuneleri listesi..... 42

Çizelge 4.6. Eğme testi numuneleri listesi..... 43

Çizelge 4.7. Darbe testi numuneleri listesi..... 44

Çizelge 4.8. Çekme testi numunelerinin üretim süreleri ve maliyetleri..... 46

Çizelge 4.9. Eğme testi numunelerinin üretim süreleri ve maliyetleri..... 47

Çizelge 4.10. Darbe testi numunelerinin üretim süreleri ve maliyetleri..... 48

Çizelge 4.11. Eğme testi parametreleri..... 54

Çizelge 4.12. Darbe testi cihazı parametreleri..... 56

Çizelge 4.13. Çekme testi sonuçları..... 57

Çizelge 4.14. Fiber oranı artırılmış çekme numuneleri test sonuçları..... 61

Çizelge 4.15. Eğme testleri sonuçları..... 62

Çizelge 4.16. Darbe testi sonuçları..... 66

Çizelge 4.17. Çekme testi numuneleri ortalama üretim süreleri..... 67

Çizelge 4.18. Çekme testi numuneleri ortalama maliyetler..... 67

Çizelge 4.19. Eğme testi numuneleri ortalama maliyetler..... 69

Çizelge 4.20. Eğme testi numuneleri ortalama üretim süreleri..... 70

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.21. Darbe testi numuneleri ortalama üretim süreleri..... 72

Çizelge 4.22. Darbe testi numuneleri ortalama maliyetler..... 72

Çizelge 4.23. Çekme testlerinde elde edilen gerilim çıktısı için varyans analizi..... 73

Çizelge 4.24. Çekme testlerinde elde edilen gerinim çıktısı için varyans analizi..... 74

Çizelge 4.25. Çekme testlerinde elde edilen elastisite modülü çıktısı için varyans analizi..... 75

Çizelge 4.26. Eğme testlerinde elde edilen maksimum eğme gerilmesi çıktısı için varyans analizi..... 77

Çizelge 4.27. Eğme testlerinde elde edilen maksimum eğme gerilmesindeki uzama çıktısı için varyans analizi..... 77

Çizelge 4.28. Eğme testlerinde elde edilen Young Modülü çıktısı için varyans analizi. 78

Çizelge 4.29. Darbe testleri sonucu elde edilen darbe dayanımı çıktısı varyans analizi. 79

Çizelge 4.30. Zeiss Smartzoom 5 teknik özellikler..... 79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri sınıflandırması..... 6

Şekil 2.2. Eklemeli imalat aşamaları..... 8

Şekil 2.3. FDM şematik gösterim..... 9

Şekil 2.4. "Çift Ekstrüzyon" ile sürekli fiber takviyeli FDM prosesi..... 11

Şekil 2.5. FDM sürekli fiber takviyesi ile üretim yöntemleri..... 11

Şekil 2.6. FDM yönteminde kullanılan polimer malzemeler..... 13

Şekil 2.7. FDM proses parametreleri katman içi şematik gösterim..... 16

Şekil 2.8. Üretim yönleri..... 17

Şekil 2.9. Katman kalınlığı..... 18

Şekil 2.10. İç dolgu tipleri: (a) doğrusal , (b) eş merkezli, (c) bal peteği..... 19

Şekil 3.1. Gerilme-gerinim grafiği: (a) ULTEM 9085, (b) ULTEM 9085 CF..... 24

Şekil 3.2. Ortalama etki grafikleri: (a) Çekme mukavemeti, (b) Kopma gerinimi, (c) Tokluk, (d) Elastisite Modülü, (e) Akma dayanımı, (f) Elastikiyet..... 26

Şekil 4.1. Çekme numunesi boyutları ve CAD modeli..... 35

Şekil 4.2. Eğme testi numunesi boyutları ve CAD modeli..... 36

Şekil 4.3. Izod darbe testi numunesi boyutları ve CAD modeli..... 37

Şekil 4.4. Fiber içeren katmanlar..... 38

Şekil 4.5. (a) fiber içermeyen katman, (b) 2 halka fiber içeren katman, (c) 4 halka fiber içeren katman..... 39

Şekil 4.6. (a) Tek çekme testi numunesi tablada yerleşimi, (b) üretime gönderilecek 8 numunenin tablada toplu yerleşimi..... 45

Şekil 4.7. Numunelerin tabla yerleşimi: (a) tek, (b) toplu..... 46

Şekil 4.8. (a) Tek darbe testi numunesi yerleşimi, (b) üretime gönderilen numunelerin tablada yerleşimi..... 47

Şekil 4.9. Takviyesiz ULTEM 9085 çekme numunesi gerilme-gerinim grafiği..... 57

Şekil 4.10. 5 numaralı çekme numunesi gerilme – gerinim grafiği..... 58

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.11. 14 numaralı çekme numunesi gerilme – gerinim grafiği..... 58

Şekil 4.12. 0,125 mm katman kalınlığına sahip numunelerin gerilme – gerinim grafiği..... 59

Şekil 4.13. 0,25 katman kalınlığında üretilen numunelerin gerilme – gerinim grafiği... 59

Şekil 4.14. 5 ve 14 numaralı çekme numunelerinin gerilme-gerinim grafiği..... 60

Şekil 4.15. Yüksek fiber oranına sahip çekme numuneleri gerilme-gerinim grafiği..... 61

Şekil 4.16. E9 numaralı eğme testi numunesi gerilme - uzama grafiği..... 63

Şekil 4.17. E1 numaralı eğme testi numunesi gerilme - uzama grafiği..... 63

Şekil 4.18. Ultem 9085, E1 ve E9 numaralı numuneler gerilme - uzama grafiği..... 64

Şekil 4.19. Eğme testi numuneleri gerilme - uzama grafiği..... 65

Şekil 4.20. Darbe Enerjisi; Fiber İçeren Katman – Fiber Halka Sayısı Grafiği..... 66

Şekil 4.21. Çekme testi numuneleri parametreleri ana etki grafiği: (a) üretim süresi, (b) maliyet..... 68

Şekil 4.22. Eğme testi numuneleri parametreleri ana etki grafiği: (a) maliyet, (b) üretim süresi..... 69

Şekil 4.23. Eğme testi numuneleri üretim süresi yüzey grafiği..... 71

Şekil 4.24. Darbe testi numuneleri parametreleri ana etki grafiği: (a) maliyet, (b) üretim süresi..... 71

Şekil 4.25. Darbe testi numuneleri maliyet yüzey grafiği..... 72

Şekil 4.26. Çekme testi çıktıları için Taguchi analizi grafiği: (a) gerilme, (b) gerinim, (c) elastisite modülü..... 76

Şekil 4.27. Eğme testi numuneleri parametre ana etki değerleri grafiği: (a) maksimum eğme gerilemesi, (b) uzama..... 78

Şekil 4.28. Shimadzu IRTracer-100 test cihazı..... 88

Şekil 4.29. ULTEM 9085 numune FTIR test sonucu..... 89

Şekil 4.30. ULTEM 9085 filament FTIR test sonucu..... 89

Şekil 4.31. ULTEM 9085 + karbon fiber numune FTIR test sonucu..... 90

Şekil 4.32. Karbon fiber filament FTIR test sonucu..... 91

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Markforged FX20 makinesi..... 31

Resim 4.2. Radwag MA 50.R nem ölçüm cihazı..... 49

Resim 4.3. FX20 makinesi malzeme kartuşları (a) polimer filament, (b) fiber filament..... 50

Resim 4.4. Mikroskop görüntüsü: (a) İlk katman, (b) son katman..... 51

Resim 4.5. Üretimden çıkan: (a) eğme testi numuneleri, (b) çekme testi numuneleri, (c) darbe testi numuneleri..... 52

Resim 4.6. Instron 5985 çekme testi cihazı..... 53

Resim 4.7. Instron 34TM- 30 eğme testi cihazı..... 54

Resim 4.8. Alarge ICJ-22 sarkaçlı darbe test cihazı..... 55

Resim 4.9. Darbe testi cihazı parametreleri..... 56

Resim 4.10. Zeiss Smartzoom 5 Mikroskop..... 80

Resim 4.11. Karbon fiber filament mikroskop görüntüsü..... 80

Resim 4.12. Ekstrüde edilmiş karbon fiber mikroskop görüntüsü..... 81

Resim 4.13. Tahribata uğramış 8 numaralı çekme numunesi..... 82

Resim 4.14. 8 numaralı çekme numunesi mikroskop görüntüsü..... 82

Resim 4.15. Takviyesiz ULTEM 9085 çekme numunesi mikroskop görüntüsü..... 83

Resim 4.16. 16 numaralı çekme numunesi kırılma yüzeyi gösterimi..... 83

Resim 4.17. 16 numaralı çekme numunesi mikroskop görüntüsü..... 84

Resim 4.18. Eğme testlerinde tahribata uğramayan E2 kodlu numune..... 85

Resim 4.19. E8 kodlu darbe numunesi mikroskop görüntüsü..... 85

Resim 4.20. E9 kodlu eğme testi numunesi mikroskop görüntüsü..... 86

Resim 4.21. Darbe testi sonrası tahribata uğrayan numuneler..... 86

Resim 4.22. D8 kodlu numune mikroskop görüntüsü..... 87

Resim 4.23. D4 kodlu numune mikroskop görüntüsü..... 87

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$	Dolar
%	Yüzde
°	Derece
µm	Mikrometre
C	Celcius
cm	Santimetre
cm3	Santimetre küp
dk	Dakika
g	Gram
GPa	Gigapaskal
Hz	Hertz
J	Joule
kg	Kilogram
KN	Kilo Newton
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Mega paskal
s	Saniye
V	Volt

Kısaltmalar	Açıklamalar
3D	3 Boyutlu
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AFP	Otomatik Fiber Yerleştirme
AM	Eklemeli İmalat
ANOVA	Değişkenlerin analizi
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım

Kısaltmalar	Açıklamalar
CCF	Sürekli karbon fiber
CCFRP	Sürekli fiber takviyeli polimer
DOE	Deney tasarımı
EBM	Elektron Işını ile Ergitme
FDM	Eriyik Biriktirme ile Modelleme
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
HSHT	Yüksek Dayanım - Yüksek Sıcaklık
ISO	International Organization for Standardization
LOM	Laminasyon Obje Üretimi
MJF	Multijet Füzyon
PA	Nylon
PC	Polikarbonat
PEEK	Polyether ether ketone
PEI	Polyetherimide
PET	Polyethylene Terephthalate
PLA	Polylactic Acid
SLA	Stereolitography
SLM	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
STL	Standart Üçgen Dili
TPU	Termoplastik Poliüretan
ULA	United Launch Alliance

1. GİRİŞ

Günümüzde, malzeme mühendisliği ve imalat teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, yeni nesil kompozit malzemelerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle sürekli fiber takviyeli termoplastik kompozitler, yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve üstün mekanik özellikler sunmaları nedeniyle havacılık, otomotiv ve savunma sanayii gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde büyük ilgi görmektedir. İlerleyen teknoloji ile kompozit ham malzemelerin eklemeli imalatta kullanılabilecek formda üretilebilmesi sağlanmıştır. Kompozit parçaların eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmesi, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha fazla tasarım esnekliği, malzeme tasarrufu ve karmaşık geometrilerin üretiminde üstünlük sağlamaktadır. Karmaşık ve uzun prosesler gerektirmediği için özellikle üretim süreleri açısından büyük avantaja sahiptir.

Şu ana kadar, eklemeli imalat endüstrisinin büyük bir kısmı büyük ölçüde tek malzeme ile üretime dayanmıştır. Bu sorun, ticari makinelerde kullanılan mevcut malzemelerin sınırlı seçenekleriyle birleştiğinde, 3D baskı ile üretilen parçaların fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki çeşitliliği ciddi şekilde sınırlamıştır. Bu kısıtlamalar, malzeme bileşimi ve özelliklerinde kısmi kontrol sağlayan, katmanlı kompozit malzemeler sunan çoklu malzeme ile üretim yapabilen yazıcılarının geliştirilmesine yol açmıştır. Dahası, birden fazla baskı kafası, işlevsel ve değişken özelliklere sahip karışık kompozitlerin basılmasına olanak tanımıştır. Fiber takviyeli kompozitlerin 3D baskısı şu anda stereolitografi (SL), eriyik biriktirme ile modelleme (FDM), seçici lazer sinterleme (SLS) ve ekstrüzyon yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Bu, eklemeli imalat alanındaki en popüler konulardan biridir ve yoğun ilgi görmektedir. Ayrıca, mekanik özelliklerde önemli bir iyileşme sağlamaktadır, ancak üretim için karmaşık bir prosedür gerektirmekte ve işlenmesi zor olmaktadır. Geleneksel kompozit imalat yöntemlerinin 3D baskıya uygulanması pratik değildir ve yeni teknolojilerin yeni 3D baskı yöntemlerinin geliştirilmesine yardımcı olması gerekmektedir [1].

Fiber takviyesi, polimerlerin özelliklerini iyileştirmek için en uygun takviye elemanı gibi görünmektedir. Kesikli fiberlerin katkı maddesi olarak kullanıldığı önceden karıştırılmış malzemeler, karmaşık ve maliyeti yüksek tasarımlara sahip çoklu nozula sahip yazıcılar

yerine uygun bir alternatif olarak yoğun bir şekilde araştırılmıştır. Bu katkı maddesi ile uygun mekanik, elektriksel veya termal özellikler ekonomik bir şekilde elde edilebilir [2].

Polimerler, özellikle üretim kolaylığı ve erişilebilirlikleri nedeniyle ilgi odağı olmuştur. 3D baskı endüstrisi sıvı çözeltiler ve termoplastik eriyikler gibi çeşitli formlardaki polimerleri içerir. Bu avantajlar, fiber takviyesi ile birleşerek, 3D baskı teknolojisinin gelecekteki gelişimi için uygun bir kombinasyon sunar. Ayrıca, mevcut neredeyse tüm 3D baskı yöntemleri, fiber takviyesinden faydalanabilir [3].

ULTEM 9085 malzemesi masaüstü 3d yazıcı sistemlerinde sıklıkla kullanılan ABS,PLA vb. malzemelere kıyasla sahip olduğu üstün özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. İleri seviye mühendislik polimerleri arasında da havacılık ve ulaştırma otoriteleri tarafından kabul görmüş yanmazlık, duman çıkarmama ve toksik olmama gibi özellikleri ile ayrışmaktadır. Aynı zamanda yüksek kimyasal dayanım ve sıcaklık dayanımı ile havacılık sektöründe kalıptan uçan parçaya kadar birçok kullanım alanı mevcuttur.

Problem durumu / konunun tanımı

Eklemeli imalat teknolojileri, son yıllarda endüstrinin birçok alanında artan bir ilgi ve kullanım oranıyla dikkat çekmektedir. Özellikle karmaşık ve detaylı geometrilere sahip parçaların üretilmesinde sağladığı esneklik, tasarım ve üretim süreçlerini köklü bir şekilde değiştirmektedir. Sürekli fiber takviyeli termoplastik malzemelerin eklemeli imalat yoluyla üretilmesi, sadece yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gibi yapısal avantajlar sunmakla kalmaz, aynı zamanda maliyet ve üretim sürelerinde de verimlilik artışı sağlar. Bu malzemeler, havacılık ve otomotiv gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde, dayanıklılık ve performans gereksinimlerini karşılayarak, daha önce mümkün olmayan tasarımların gerçekleştirilmesine olanak tanır. Ayrıca, eklemeli imalat teknolojisi, malzeme israfını minimize ederek sürdürülebilir üretim yöntemlerine de katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, sürekli fiber takviyeli termoplastiklerin eklemeli imalat ile üretimi, geleceğin mühendislik çözümleri için kritik bir rol oynamaktadır.

Sürekli fiber takviyeli termoplastik malzemelerin mekanik özelliklerinin ve üretim süreçlerinin tam olarak anlaşılması ve optimize edilmesi gerekmektedir. Bu malzemelerin

araştırılması havacılık ve uzay sektörü özelinde büyük önem arz etmektedir. Havacılık ve uzay sektörünün yüksek mukavemet, kompleks geometrilerin üretilebilirliği, yanmazlık, alev almazlık vb. özellikleri sağlama potansiyeli olan bu konuda yeterli araştırma bulunmamaktadır. Özellikle proses parametrelerinin mukavemet üzerinde etkisi ve buna bağlı olarak tasarımların ve parametrelerin optimize edilmesinin araştırılması ihtiyacı bulunmaktadır.

Araştırmanın amacı

Bu çalışmanın temel amacı, sürekli fiber takviyeli termoplastik malzemelerin eklemeli imalat ile üretilmesi sürecinde mekanik özelliklerin belirlenmesi ve optimize edilmesidir. Bu kapsamda, farklı üretim baskı parametreleri üzerinde sistemli deneysel çalışmalar yürütülmüş ve elde edilen verilerin detaylı bir analizi gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Araştırmanın birincil hedefi, sürekli fiber takviyeli termoplastik malzemelerin eklemeli imalat sürecinde karşılaşılan mekanik zorlukları ve bu zorlukların üstesinden gelmek için geliştirilen çözümleri anlamaktır. Bu bağlamda, farklı fiber oranlarının ve baskı parametrelerinin, parçaların mekanik performansı üzerindeki etkisini belirlemek ve optimize etmek önemli bir odaktır.

Ayrıca, çalışmanın diğer bir amacı da endüstriyel uygulamalarda kullanılan parçaların dayanıklılığını artırmak için proses optimizasyonu ve malzeme seçimi süreçlerine katkı sağlamaktır. Bu amaca ulaşmak için, elde edilen deneysel sonuçlar, endüstriyel ortamlarda kullanılabilen gerçekçi ve güvenilir girdiler olarak kullanılabilmesi hedeflenmiştir.

Son olarak, bu çalışmanın sonuçları, eklemeli imalat teknolojilerinin sürekli fiber takviyeli termoplastik malzemelerin üretimindeki potansiyelini daha iyi anlamamıza yardımcı olacak ve bu alandaki araştırmalara önemli bir katkı sağlayacaktır. Elde edilen bulgular, endüstrinin bu alandaki en son gelişmelerden tam anlamıyla yararlanmasına ve daha dayanıklı, hafif ve karmaşık parçaların üretimine olanak tanıyan eklemeli imalat teknolojilerinin benimsenmesine olanak sağlaması amaçlanmıştır.

Araştırmanın önemi

Bu çalışmanın önemi, sürekli fiber takviyeli termoplastik malzemelerin eklemeli imalat ile üretilmesi sürecinde mekanik özelliklerin belirlenmesi ve optimize edilmesine yönelik sağlayacağı katkıdır. Sürekli fiber takviyeli termoplastik malzemeler, hafif, yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu parçaların üretiminde büyük bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle, bu alanda yapılacak araştırmalar, endüstriyel uygulamalarda kullanılan parçaların dayanıklılığını artırmak, üretim süreçlerini optimize etmek ve malzeme seçimini geliştirmek için kritik öneme sahiptir.

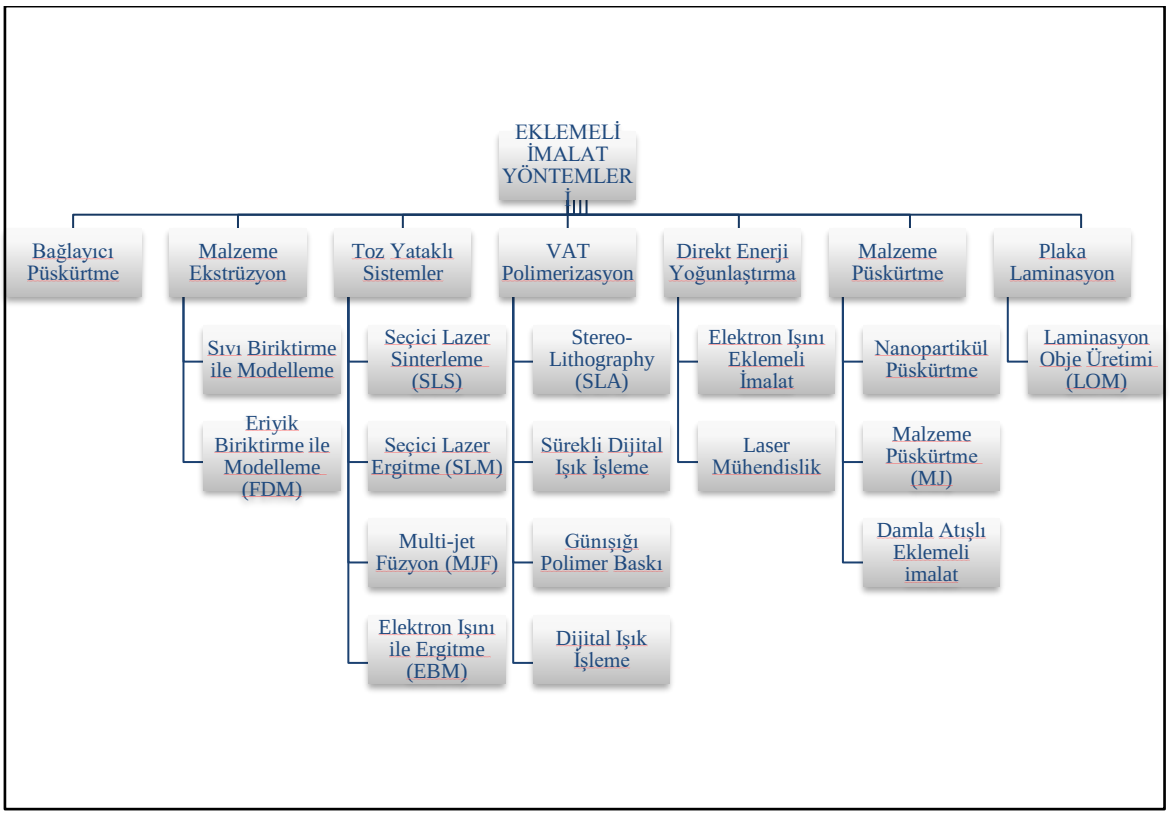
Bu çalışmanın sonuçları, endüstriyel uygulamalarda kullanılan parçaların mekanik performansını artırarak, daha dayanıklı ve güvenilir ürünlerin üretimine olanak tanıyacaktır. Ayrıca, sürekli fiber takviyeli termoplastik malzemelerin eklemeli imalat ile üretimindeki potansiyeli daha iyi anlamamıza yardımcı olacak ve bu alandaki araştırmalara önemli bir katkı sağlayacaktır. Elde edilecek bulgular, endüstrinin bu yenilikçi teknolojiden tam anlamıyla yararlanmasına ve daha karmaşık, hafif ve dayanıklı parçaların üretimine olanak tanıyan eklemeli imalat yöntemlerinin benimsenmesine katkıda bulunacaktır. Bu nedenle, bu araştırma alanındaki bilgi boşluğunu dolduracak ve endüstriyel uygulamalarda sürekli fiber takviyeli termoplastik malzemelerin kullanımını genişletecek önemli bir adım olacaktır.

2. EKLEMELİ İMALAT

Genellikle üç boyutlu (3D) baskı olarak adlandırılan Eklemeli İmalat , endüstriyel üretim için yeni bir çağ başlatıyor. Geleneksel üretim metodolojisinin aksine katmanlar halinde ekleme yöntemi ile parçayı şekillendirerek nihai ürünün elde edildiği bir üretim yöntemidir. Günümüzde gelişen eklemeli imalat teknolojisi ile 1990'ların aksine yalnızca prototip veya görsel amaçlı parçalar dışında birçok kullanım alanı mevcuttur [4, 5].

Eklemeli imalat teknolojisinin temel prensibi, başlangıçta 3D Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) kullanılarak üretilen bir modelin, birçok işlem planlamasını gerektirmeden doğrudan üretilebilmesidir. Eklemeli imalat teknolojisi kesinlikle karmaşık 3D nesnelerin CAD verilerinden doğrudan üretim sürecini önemli ölçüde basitleştirir. Diğer imalat süreçleri, farklı özelliklerin hangi sırayla üretileceğini, hangi araçların ve işlemlerin kullanılması gerektiğini ve parçanın tamamlanması için hangi ek parçaların gerektiğini belirlemek için parça geometrisinin dikkatli ve detaylı bir şekilde analiz edilmesini gerektirir. Buna karşılık, eklemeli imalat yalnızca bazı temel boyutsal detaylar ve makinenin nasıl çalıştığına dair temel bilgiler yeterlidir [6].

Eklemeli İmalat yöntemleri ASTM ve ISO tarafından ISO/ASTM 52900 [7] standardına göre Şekil 2.1'de gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma yapılırken üretim yöntemi, kullanılan enerji kaynağı, kullanılan malzeme, malzemenin faz durumu gibi değişkenler göz önünde bulundurulmuştur [8].



Şekil 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri sınıflandırması [7]

Eklemeli imalat, CAD modelden fiziksel parçaya giden bir dizi adım içerir. Farklı ürünler, eklemeli imalattan farklı biçimlerde ve farklı süreçlerde yararlanmaktadır. Küçük, göreceli olarak basit parçalar için eklemeli imalattan yararlanabilir. Daha büyük, daha karmaşık ve daha fazla mühendislik çalışması ile geliştirilen parçaların da geliştirme ve üretim süreçleri boyunca çeşitli aşamalarda ve iterasyonlarda eklemeli imalat kullanabilir. Ürün geliştirme sürecinin erken aşamalarında, hızlı bir şekilde üretim yapılabileceği için prototipleme amacı ile eklemeli imalattan yararlanılabilir. Sürecin daha sonraki aşamalarında, nihai ürün olarak kullanılacak parçalar için de eklemeli imalat kullanılmaktadır. Bu aşamalarda parçalar kullanılmadan önce dikkatli bir temizlik ve ardıl işlem (zımparalama, yüzey hazırlığı ve boyama) gerektirebilir. Bu noktada eklemeli imalat, özellikle kalıp gerektirmediği için karmaşık geometriye sahip parçalarda yararlı olabilir. Çoğu eklemeli imalat süreci en azından aşağıdaki sekiz adımı içerir (Şekil 2.2) [9];

- CAD: Tüm parçalar, dış geometriyi tam olarak tanımlayan bir yazılım modelinden başlamalıdır. Bu, herhangi bir profesyonel CAD katı modelleme yazılımının kullanımını içerebilir, ancak çıktı 3 boyutlu bir katı veya yüzey temsili olmalıdır.

- STL dönüştürme: Hemen hemen her 3 boyutlu baskı makinesi, artık bir standart haline gelen STL dosya formatını kabul eder ve günümüzde neredeyse her CAD yazılımı bu dosya formatını çıktı olarak verebilir. Bu dosya, orijinal CAD modelinin dış kapalı yüzeylerini tanımlar ve dilimleme hesaplanmasının temelini oluşturur.

- Makineye transfer: Parçayı tanımlayan STL dosyası 3D baskı makinesine aktarılmalıdır. Burada dosyanın, yapının oluşturulması için doğru boyutta, konumda ve yönde olması için genel bir düzenleme yapılabilir.

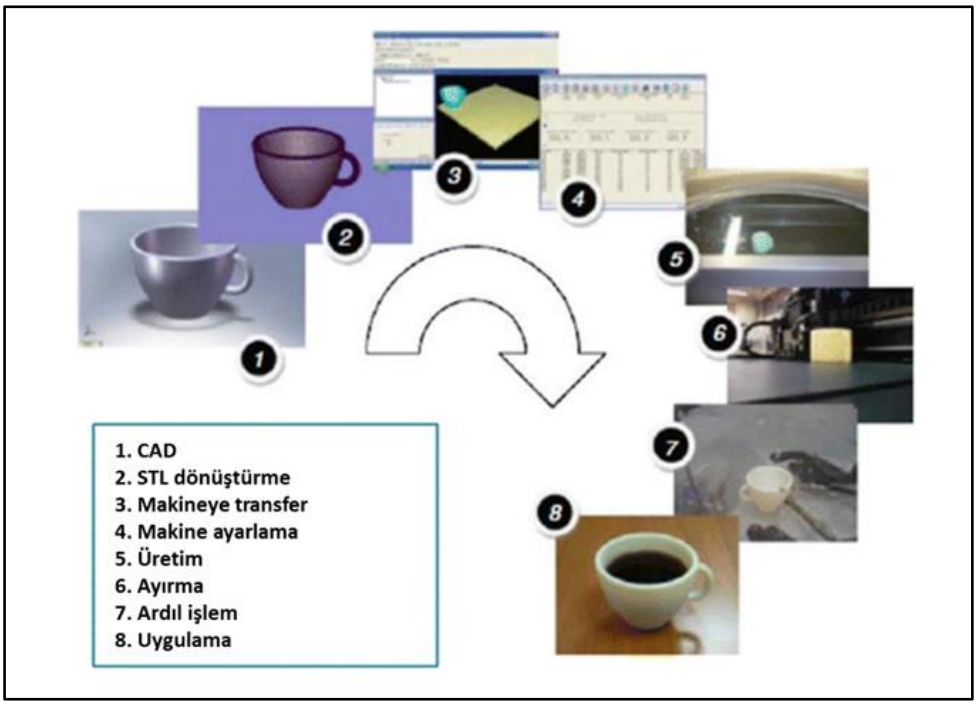
- Makine ayarlama: Üretime başlamadan önce 3D baskı makinesi düzgün şekilde kurulmalıdır. Bu ayarlar, malzeme kısıtları, enerji kaynağı, katman kalınlığı, zamanlamalar vb. gibi yapı parametreleri ile ilgilidir.

- Üretim: Parçanın üretimi genellikle otomatik bir süreçtir ve makine büyük ölçüde gözetimsiz devam edebilir. Bu aşamada, malzeme, güç kaynağı veya yazılım sorunları gibi hataların meydana gelmediğinden emin olmak için makinenin yüzeysel olarak izlenmesi yeterlidir.

- Ayırma: 3D baskı makinesi üretimi tamamladığında, parçalar çıkarılmalıdır. Bu, makine ile etkileşim gerektirebilir ve sıcaklıklarının yeterince düşük olduğundan veya aktif olarak hareket eden parçaların olmadığından emin olmak için ,baskı makinesi, güvenlik kilitlerine sahip olabilir.

- Ardıl işlem: Makineden çıkarıldıktan sonra, parçaların kullanıma hazır hale gelmesi için belirli bir düzeyde ek işlem gerekebilir. Bu aşamada parçalar zayıf olabilir veya sökülmesi gereken destek malzemelerine sahip olabilir. Bu nedenle genellikle dikkatli, deneyim gerektiren manuel işlemler uygulanır.

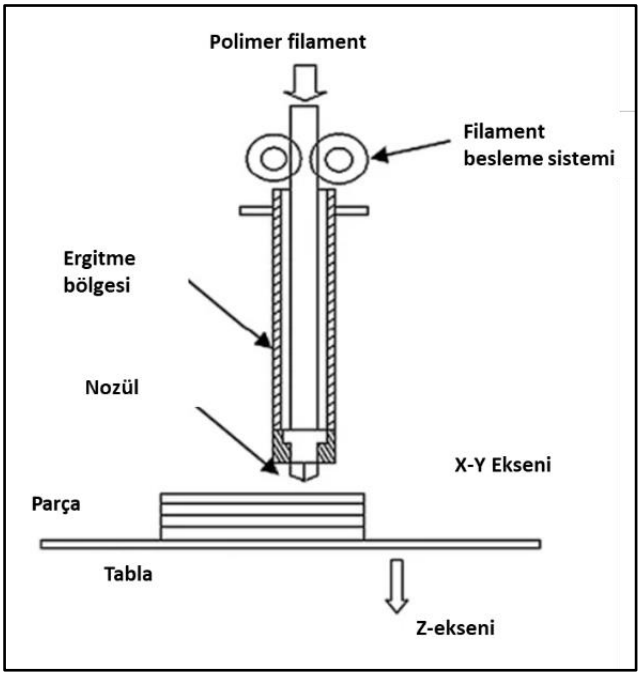
- Uygulama: Parçalar bu aşamalardan sonra kullanıma hazır olabilir, ancak kullanıma uygun hale gelmeden önce ek işlemler gerekebilir. Örneğin, kabul edilebilir bir yüzey dokusu ve pürüzsüzlük sağlamak için astarlama ve boyama gerekebilir. Ayrıca, son bir model veya ürün oluşturmak için diğer mekanik veya elektronik bileşenlerle bir araya getirilmeleri gerekebilir.



Şekil 2.2. Eklemeli imalat aşamaları [9]

2.1. Eriyik Biriktirme ile Modelleme (FDM)

Dünyadaki en yaygın ve en ucuz eklemeli imalat yöntemlerinden biri Eriyik Biriktirme ile Modelleme (FDM)'dir. Bir filament makarası 3D baskı makinesine yerleştirilir ve ardından ekstrüzyon kafasına ve yazıcı nozulüne beslenir. Bu yazıcı nozulu gerekli sıcaklığa ısıtılır ve eritir motor nozul boyunca filamenti iterek oluşan basınç ile malzemenin nozuldan çıkmasını sağlar. Ekstrüzyon nozulu belirtilen koordinatlara uygun olarak hareket ederek malzemeyi plaka üzerine yerleştirir ve malzeme katılaşır. Bu kesit baskı döngüsü, nesne tamamen oluşturulana kadar katmanlar halinde devam eder [10]. Şekil 2.3'de FDM yönteminde kullanılan kafa sistemi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.3. FDM şematik gösterim [11]

FDM sistemi adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir [11, 12];

- Malzemenin yüklenmesi
- Malzemenin akışkan hale getirilmesi (yarı-sıvılaştırma)
- Malzemenin nozul aracılığıyla hareket ettirilmesi için basınç uygulanması
- Ekstrüzyon
- Önceden belirlenmiş bir yol üzerinde ve kontrol edilen bir şekilde tarama yapılması
- Malzemenin kendisiyle veya ikincil yapı malzemeleriyle birleştirilerek tutarlı bir katı yapı oluşturulması
- Karmaşık geometrik özellikleri mümkün kılmak için destek yapıların eklenmesi

FDM yönteminde çoğunlukla termoplastik polimer filament kullanarak üretim yapılır. Nozulun ısınması ile, yarı sıvı filament platforma veya önceden basılmış katmanların üstüne ekstrüde edilebilir hale gelir. Polimer filament termoplastik olduğu için, baskı sonrasında oda sıcaklığına soğuduğunda sertleşir [13].

FDM, hızlı, kullanımı kolay ve ucuz olduğu için sıklıkla başvurulan bir eklemeli imalat yöntemidir. Ancak, FDM 3 boyutlu baskı bazı problemlere sahiptir ve bu da diğer yöntemlere kıyasla kullanışlılığını azaltır. Düzeltilmesi gereken en önemli sorunlar arasında

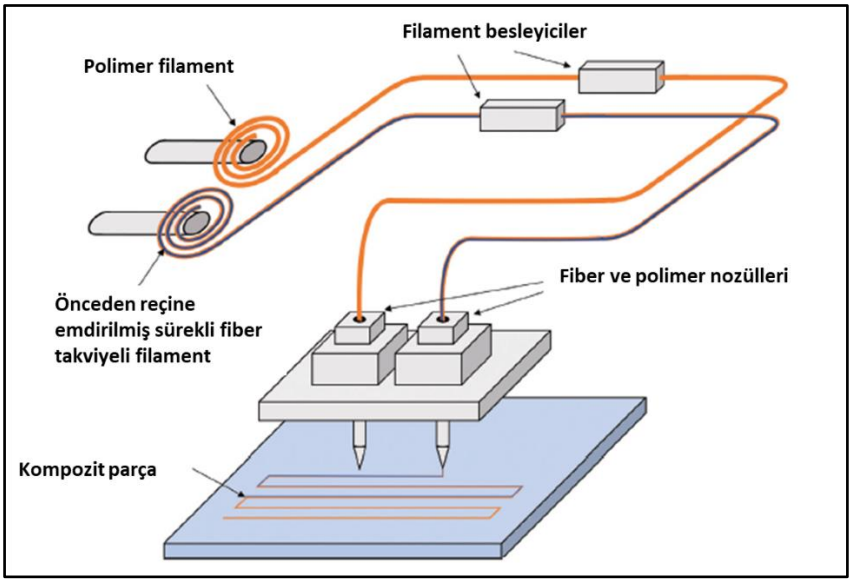
mekanik kusurlar, katmanlama nedeniyle farklı görünümler ve pürüzlü yüzeyler bulunmaktadır. FDM ile üretim sırasında, 3 boyutlu baskı nesnelerinin mekanik özellikleri fiber takviyesi ekleyerek iyileştirilebilir [14].

2.2. FDM Metodu ile Kompozit Malzeme Üretimi

FDM yöntemi için kullanılacak filamentlerin güçlendirilmesi veya fonksiyonel hale getirilmesi için literatürde en popüler yaklaşım, ergitme birleştirme tekniği ile dolgu maddelerinin eklenmesidir. Bu şekilde, dolgu maddesi erimiş matris içine entegre edilebilir. Karıştırma işlemi, filament üreten ekstrüder içinde doğrudan gerçekleştirilebilir. Kompozit filament, dolgu maddesi dağılımını homojenleştirmek ve kabarcıkları gidermek için, bazen tekrar tekrar ekstrüdere beslenebilir, bununla birlikte, bu polimer matrisinin moleküler bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyebilir. Yüksek dolgu miktarları için, filament hazırlama işlemi iki aşamaya bölünebilir: (1) uygun bir karıştırıcı veya çift vidalı ekstrüder kullanılarak dolgu maddesinin ergimiş matrise ön karışımı ve (2) son olarak iyi karıştırılmış bileşenlerin ekstrüder aracılığıyla filament haline getirilmesidir [15].

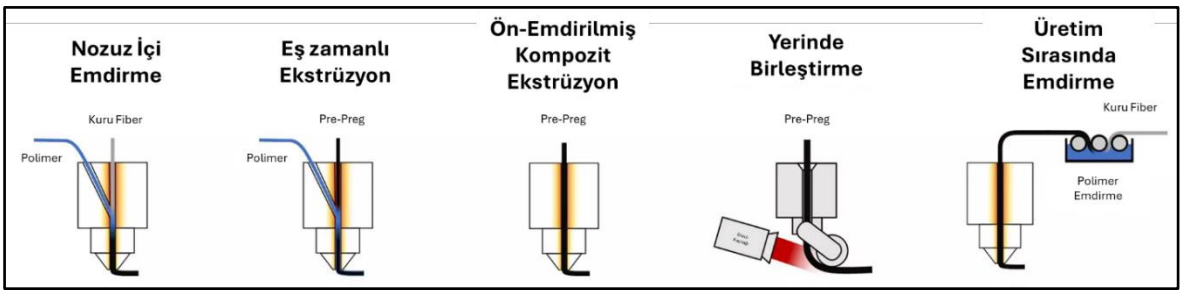
Ancak, bu yöntemler sürekli fiber takviyesi ile uyumlu değildir. Genel olarak, uzun veya sürekli fiberler, yüksek en boy oranına sahip olduklarından, yoğun kayma gerilmeleri nedeniyle hasar görmesi veya hatta kırılması beklenen bir durumdur. Bu nedenle yaygın karıştırma yöntemleri ile üretilemezler ve sürekli fiberler yerine kısa fiber takviyeleri tercih edilir [16].

Bu sınırlamaları aşmak için, sürekli fiber takviyeli termoplastikleri işlemek için özel yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar: bileşen seviyesinde matris içine yerleştirilmiş sürekli elyafların "çift ekstrüzyon **(**Şekil 2.4**)"** yöntemiyle veya sürekli fiber malzeme, "nozul içi emdirme" işlemi ile doğrudan ergitme ile matris içine gömülür [17].



Şekil 2.4. "Çift Ekstrüzyon" ile sürekli fiber takviyeli FDM prosesi [18]

Bu yaklaşıma dayalı bir ticari çift nozullu 3D baskı sistemi 2014 yılında Markforged Şirketi tarafından piyasaya sürülmüştür. Markforged Mark One Professional sistemi resmi olarak 2015 yılında piyasaya sürülmüştür. Yaklaşık bir buçuk yıl sonra yeni Markforged Mark Two bu makinenin yerini almıştır. Çift ekstrüzyon teknolojisi, sürekli elyafların ön-emdirme ile bir polimer bağlayıcıyla birleştirilmiş kompozit filamenti beslemek için bir nozul içerir; bu genellikle naylon malzemedir. İkinci bir nozul ise saf naylon matrisini beslemek içindir. Bu sistemde dört çeşit kompozit filament bulunmaktadır; bunlar: karbon, cam, yüksek mukavemetli yüksek sıcaklık cam elyafı (HSHT) ve Kevlar'dır. Kompozit filament için takviyenin hacim oranı, genellikle özel bileşimden bağımsız olarak yaklaşık %34,5 olarak rapor edilmektedir. Baskı yapılan parçadaki takviyenin hacim fraksiyonu açıkça bu değeri aşamaz ve genellikle seçilen yapı parçaları saf naylonla birlikte basılabilir [18].



Şekil 2.5. FDM sürekli fiber takviyesi ile üretim yöntemleri [19]

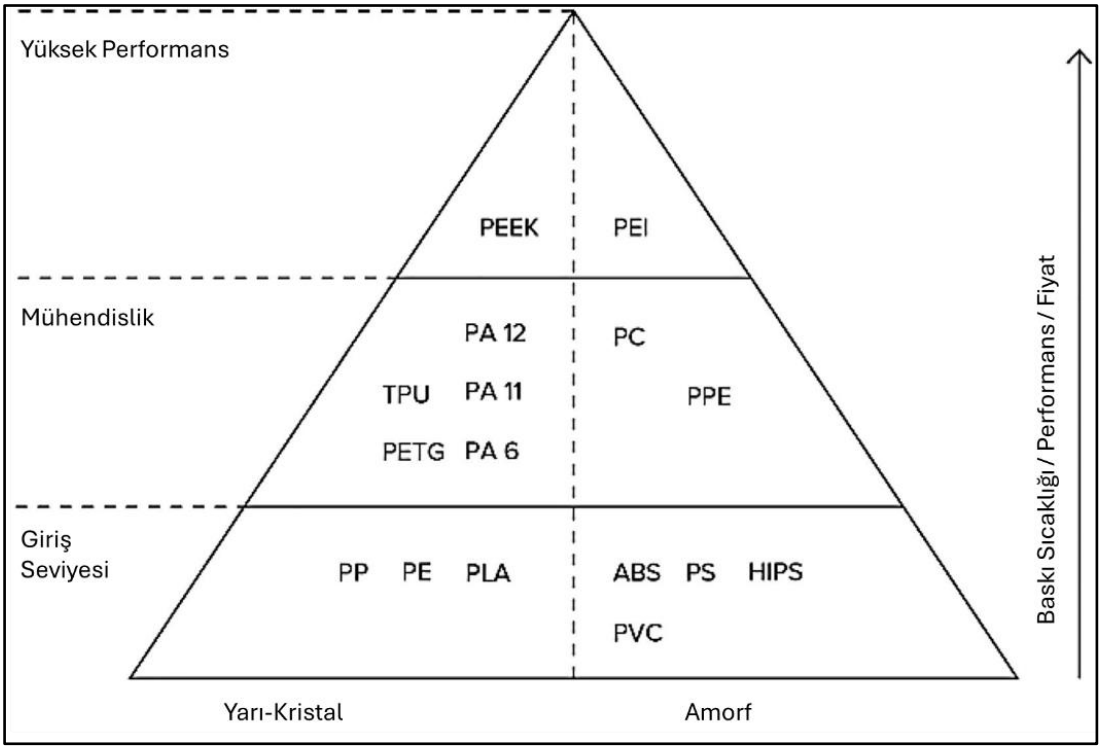
Şekil 2.5'de gösterilen sürekli fiber takviyesi ile eklemeli imalat yöntemleri aşağıdaki gibidir [19];

- Nozul içi emdirme: Kuru fiber ve matris malzemesi görevi yapacak olan polimer malzeme iki ayrı hattan aynı nozula beslenir ve birleşme nozul içinde gerçekleşir.
- Eş zamanlı ekstrüzyon: Önceden reçine emdirilmiş sürekli fiber ve polimer malzeme aynı nozul içinde birleştirilerek ekstrüde edilir.
- Ön-emdirilmiş kompozit ekstrüzyon: Önceden reçine emdirilmiş sürekli fiber malzeme nozula beslenir ve burada ısıtılarak parça üretimi nozuldan ekstrüde edilir.
- Yerinde birleştirme: Termoplastik otomatik fiber yerleşimi (AFP) metodunun ölçeklenmiş bir versiyonu olan yöntemde yığma yapılan sürekli fiber takviyeli malzeme yığma sonrası entegre bir enerji kaynağı ile kürlenir.
- Üretim sırasında emdirme: Emdirme işlemi malzeme baskı kafasına aktırılırken gerçekleştirilir.

2.3. FDM Yönteminde Kullanılan Malzemeler

Eklemeli imalat yönteminde kullanılan malzeme çeşitliliği oldukça geniştir. Malzeme ekstrüzyon temelli FDM yönteminde kullanılacak malzemeler bir nozuldan akabilen ve akış sonrası şeklini koruyan ve özelliklerini geri kazanan bir yapıda olduğu sürece teoride üretilebilmektedir. Genellikle FDM yazıcılar, uygun sıcaklıklarda nozuldan çıkarılan polimer filamentler kullanır. Bu filament malzemeleri, termoplastik polimerlerden oluşur, bu da ısıtılarak eritilebileceği ve yumuşayabileceği anlamına gelir ve soğutulduktan sonra özelliklerini yeniden kazanır [20].

Malzeme ekstrüzyon yöntemi ile metal, polimer, seramik ve kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Günümüzde malzeme ekstrüzyon eklemeli imalatın en yaygın kullanılan alt dalı olan FDM yönteminde en sık kullanılan malzemeler termoplastik polimerlerdir. En yaygın olarak kullanılan polimer malzemeler Şekil 2.6'da gösterilmiştir. En yaygın olarak kullanılan malzemelerin özellikleri de Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [21, 22].



Şekil 2.6. FDM yönteminde kullanılan polimer malzemeler [23]

Çizelge 2.1. FDM yönteminde yaygın olarak kullanılan malzemelerin özellikleri [20]

MALZEME	ÖZELLİKLER	UYGULAMA ALANLARI	NOTLAR
Polylactic Acid (PLA)	Üretimi kolay, İyi katman birleşmesi, Yüksek mekanik dayanım	Elektrik ve Elektromanyetik, Otomotiv, Prototipleme	Kırılgan Düşük tokluk
Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	Yüksek sıcaklık dayanımı, Yüksek darbe dayanımı, İyi aşınma direnci	Otomotiv, Borulama, Prototipleme	UV hassas Aseton ile yüksek tepkime
Polyethylene terephthalate (PET)	Kimyasal ve nem dayanımı, Biyouyumlu	Yiyecek, Biyomedikal	Üretim esnasındaki sıcaklık kaynaklı kırılgan
Nylon, Polyamide (PA)	Yüksek çekme dayanımı, Darbe dayanımı, Sıcaklık dayanımı	Endüstriyel parçalar, Üretim takımları	Neme duyarlı

Çizelge 2.1. (devam) FDM yönteminde yaygın olarak kullanılan malzemelerin özellikleri

Thermoplastic polyurethane (TPU)	İyi aşınma direnci, Yağlayıcılar ile çalışabilme	Biyomedikal prototip, Sızdırmazlık elemanları,	Elastomer davranış
Polycarbonate (PC)	Yüksek sıcaklık dayanımı, İyi mekanik özellikler, Sterilize edilebilir	Fonksiyonel parçalar, Biyomedikal	
Polyetherimide (PEI)	Yüksek sıcaklık dayanımı, Stres dayanımı, Kimyasal direnç, Dielektrik	Medikal, Havacılık ve uzay, Otomotiv	Ticari polimerlerden üstün
Polyether-ether-ketone (PEEK)	Sıcaklık ve aşınma direnci, Kimyasal dayanım	Medikal İmplantlar, Yüksek performanslı ürünler	

2.3.1. ULTEM 9085

ULTEM™ 9085 malzemesi, yüksek gereksinimli ve özel uygulamalar için FDM teknolojisi kullanılarak üretilen mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklere sahip yüksek performanslı bir termoplastiktir. ULTEM 9085 FDM malzemeleri arasında en iyi özelliklere sahip malzemelerden birisidir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı, mukavemet-ağırlık oranında yüksek değerlere ihtiyaç duyulan uygulamalar için çok uygudur. Ayrıca, ULTEM 9085 malzemesi yüksek darbe direncine ve çok iyi kimyasal dayanıklılığa sahiptir ve alev, duman ve toksisite gereksinimlerini endüstri standartlarında karşılamaktadır [24] .

Üstün özellikleri, ULTEM PEI'nin özellikle ulaşım, askeri ve havacılık sektörlerindeki uygulamalar için uygun olmasını sağlar. Şu anda, United Launch Alliance (ULA), uzay fırlatma araçlarında ULTEM™ 9085 kullanılarak Çevre Kontrol Sistemi (ECS) kanallarını katkılı olarak üretmiştir. Ayrıca, İspanyol şirketi Indaero, Airbus helikopterlerinde ULTEM 9085 kullanılarak özel tasarım araçlar ürettiğini göstermiştir [25].

ULTEM 9085 malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de gösterilmektedir. Stratasys firması tarafından gerçekleştirilen test sonuçlarını içeren tablodan elde edilen veriler diğer üreticilerin sağladığı özellikler ile benzerlik göstermektedir.

Çizelge 2.2. Ultem 9085 mekanik ve fiziksel özellikleri [24]

Özellik	Birim	Test Standardı (ASTM)	Değer (XZ Yönü)
Çekme Mukavemeti	MPa	D638	69,2
Elastisite Modülü	GPa	D638	2,52
Kopma Uzaması	%	D638	5,4
Eğme Mukavemeti	MPa	D790	104
Eğme Modülü	GPa	D790	2,4
Eğme Kopma Uzaması	%	D790	-
Basma Mukavemeti	MPa	D695	139
Basma Modülü	GPa	D695	2,22
Izod Darbe – Çentikli	J/m	D256-10A	88,5
Yoğunluk	g/cm^3	-	1.27
HDT (68 psi)	C°	D648 B	175
HDT(264 psi)	C°	D648 B	173

Çoğu araştırma, masaüstü yazıcıda kolaylıkla üretilebilir olan ABS ve PLA gibi temel termoplastiklere odaklanmaktadır, ancak mühendislik termoplastikleri hakkında sınırlı çalışma bulunmaktadır. ULTEM 9085, Polikarbonat (PC) ve Polieterimid (PEI) içeren özel bir karışımıdır ve bu termoplastiğe birçok uygulamada gereken dayanıklılığı ve sertliği sağlar. 153 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklerini koruyabilir [26].

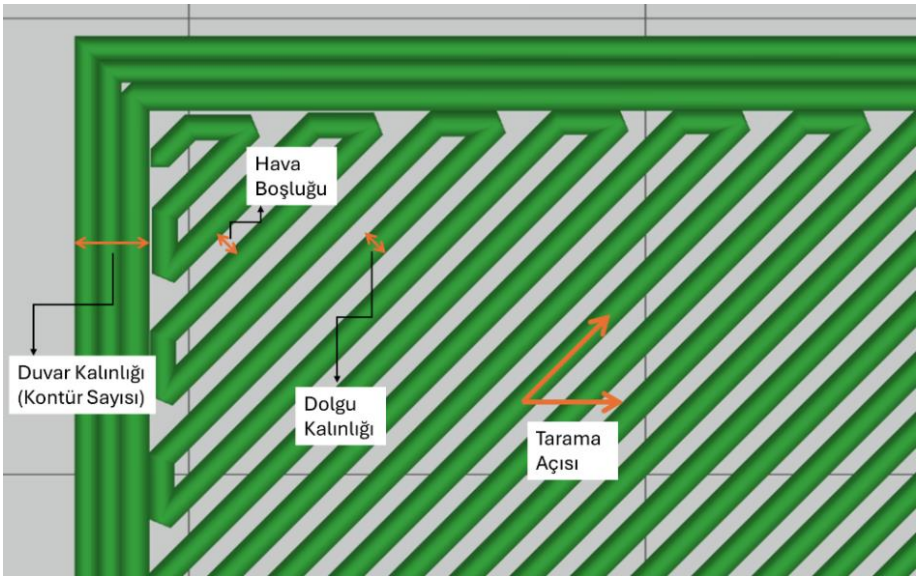
2.4. Proses Parametreleri

FDM, farklı roller üstlenen birçok parametreye sahip olan karmaşık bir süreçtir. Kaliteli ürünler üretmek ve malzeme davranışı gereksinimlerini karşılamak için bu parametrelerin etkilerini değerlendirmek gereklidir. Bugüne kadar, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk, sertlik [27], üretim süresi ve mekanik özellikler [28, 29] dahil olmak üzere farklı kontrol edilebilir parametreleri analiz etmek için birçok çalışma yapılmıştır. Açıkça, mekanik

özellikler FDM baskı parçalarının en temel karakteristikleridir. Bu özellikler arasında gerilme, basma ve eğme dayanımları üreticiler ve kullanıcılar için en önemli özelliklerdir [30].

FDM, parametreleri üç ana sınıfta incelenebilir: proses parametreleri (tarama açısı, katman kalınlığı, üretim yönü, baskı hızı, iç dolgu oranı, hava boşluğu, dolgu tipi, ekstrüzyon sıcaklığı); çevresel parametreler (platform sıcaklığı, üretim hacmi sıcaklığı, nem, vb.); diğer baskı parametreleri (nozul çapı, malzeme rengi, filament çapı, vb.). Bu parametrelerin hepsi FDM ile üretilen parçanın kalitesini etkiler, ancak etkileri farklıdır. Proses parametreleri, mekanik performans üzerindeki önemli etkilerinden dolayı genellikle analiz edilenlerdir [30].

En çok araştırılan proses parametreleri arasında hava boşluğu (Şekil 2.7), üretim yönü, ekstrüzyon sıcaklığı, iç dolgu oranı, dolgu tipi, katman kalınlığı, tarama açısı ve baskı hızı bulunmaktadır. Bu parametreler, filamentin katman içi ve katmanlar arası bağlanmasında önemli etkilere sahiptir ve dolayısıyla FDM ile üretilen parçaların mekanik performansını etkiler. Ayrıca, bu parametrelerin etkileşimleri mekanik özellikler açısından önemli bir rol oynar [31].

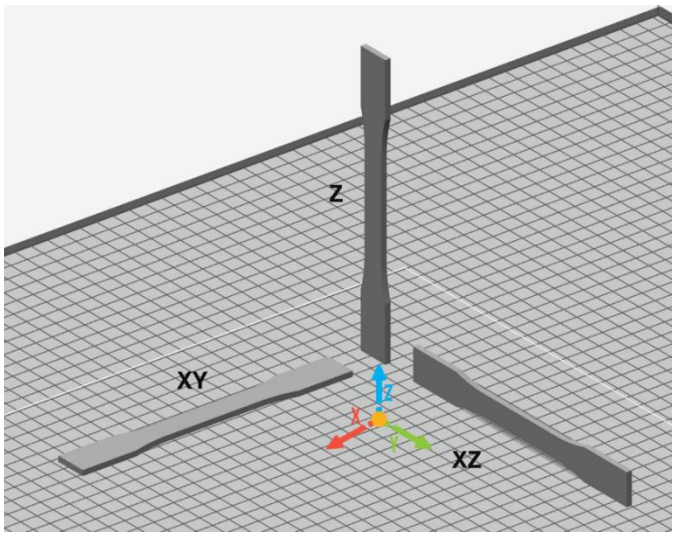


Şekil 2.7. FDM proses parametreleri katman içi şematik gösterim

Şekil 2.7'de FDM yöntemi ile üretilen bir parçada katman içi proses parametrelerinden; tarama açısı, dolgu kalınlığı, duvar kalınlığı ve hava boşluğu şematik olarak gösterilmiştir.

2.4.1. Üretim yönü

Üretim yönü (katman yönelimi), parçanın baskı tablası üzerinde nasıl ve hangi yönde üretildiğini temsil eder. Aslında, üretim yönü herhangi bir değere sahip herhangi bir açıyı temsil edebilir, ancak çoğu zaman, X, Y ve Z eksenlerine göre belirli bir açı olarak kabul edilir. Genellikle, test numuneleri yatay, dikey ve yan olarak yerleştirildiğinde, üretim yönü sırasıyla düz, dik ve yan olarak adlandırılır ki bu da Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Düz ve yan, baskı tablasına paralel olarak kabul edilirken, dik, baskı tablasının normali yönünde olur [32, 33].



Şekil 2.8. Üretim yönleri

Üretim yönü mekanik özellikleri önemli ölçüde etkiler ve genellikle diğer parametrelerle karşılaştırıldığında baskın bir rol oynamaktadır. Diğer parametreler sabit tutulduğunda, örneğin hava boşluğu ve tarama açısı gibi, maksimum gerilme dayanımı, basma dayanımı ve eğilme dayanımı için en yüksek değerler xy üretim oryantasyonunda elde edilir. Düz veya yan yönlerinde üretimler genellikle daha yüksek rijitlik ve dayanım performansı gösterir. Öte yandan, baskı tablası ile olan açıyı artırmak, daha düşük mukavemet ile sonuçlanan mikroyapılara yol açar. Bu nedenle, dik yönlü örnekler daha düşük rijitlik ve dayanım performansı ile katmanlar arası kopma gösterir [34].

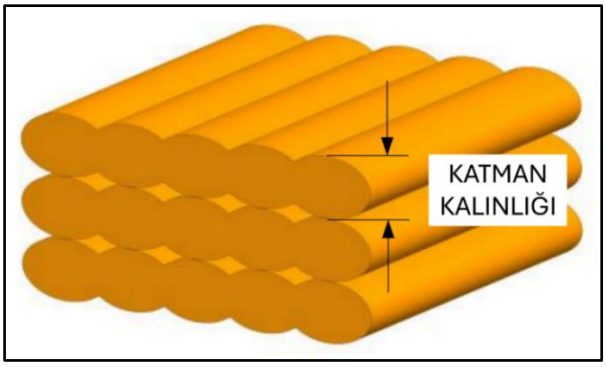
2.4.2. Tarama açısı

Tarama açısı platformun X eksenine (genellikle yük yönü) göre filament yöneliminin açısını temsil eder (Bkz. Şekil 2.7). İzin verilen izdüşüm açıları -90° ila 90° arasında değişebilir ve genellikle kullanılan değerler 0° (eksenel), 45° (çapraz), 90° (enine) ve bunların kombinasyonudur. Örneğin, -45°/45° (çapraz) tarama yönü farklı katmanlar için sırayla -45° ve 45° olarak kullanılır [35].

Liflerin göreceli konumu ve eksenel yük, numunelerin farklı şekilde tepki vermesine neden olur. Yük eksenine doğru yönlendirilmiş numuneler (örneğin, 0° yönelim), parçanın gerilme ve basma dayanımını artırırken, açılı olanlar (örneğin, 90° yönelim) mekanik performansta azalmalar gösterir. 0° yönünde, lifler kendileri uygulanan yükün çoğunu taşıdığından, katman içi kopma meydana gelir. Ancak, 90°, bitişik katmanlar arasındaki birleşme yüzeyi yükü taşır ve bu, çok daha zayıf olan katmanlar arası kopmaya neden olur. Benzer bir eğilim, yüklenirken bir yüzeyin basma ve diğer yüzeyin çekme gerilimine maruz kaldığı eğilme numunesi için de geçerlidir [36].

2.4.3. Katman kalınlığı

Katman kalınlığı, nozul ucu tarafından üretilen katmanın kalınlığını temsil eder, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi. Genel olarak, malzeme ve nozul çapına bağlı olarak, ekstrüzyon nüzulünün çapından daha küçüktür (genellikle yarısı). Katman kalınlığı, üretilen katman sayısı ve dolayısıyla baskı süresi ile doğrudan ilişkilidir. Daha düşük katman kalınlığı ayarlanarak parçanın daha iyi çözünürlükte elde edilebileceği doğrulanmıştır [37].



Şekil 2.9. Katman kalınlığı [30]

2.4.4. Hava boşluğu

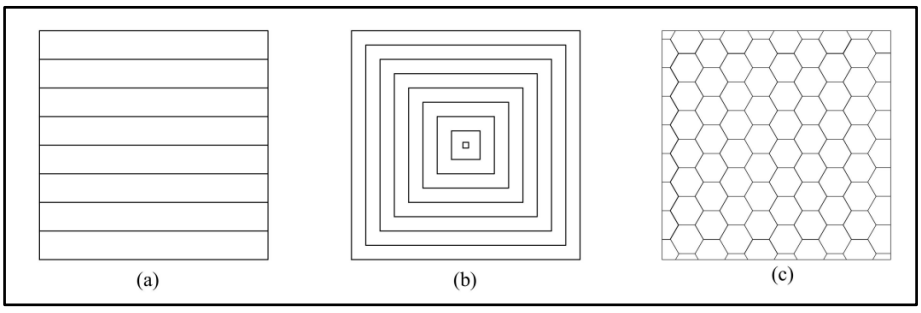
Üretilmiş numunedeki hava boşluğu, aynı katmanın iki bitişik lifi arasındaki boşluktur. Ayrıca lif-lif boşluğu olarak da bilinen bu parametre, basılacak parçanın tarama açısı ve dolgu kalınlığı gibi diğer parametrelerden doğrudan etkilenir [23].

2.4.5. İç dolgu oranı

Eklemeli imalat ile üretilen parçanın dış bölgesi genellikle katıdır, ancak dolgu olarak tabir edilen iç bölge, farklı geometri ve boyutlara sahip olan iç dolgu tipi tarafından kaplanmış olabilir. Dolgu oranı, parçada basılan filament malzemesinin yüzde oranını ifade eder, %0 kabuk ve %100 katı olarak belirtilir. FDM ile üretilen parçaların kütlesi ve dayanımı, dolgu oranına bağlıdır. Daha düşük yoğunluk daha az baskı süresi ve malzeme gerektirir, dolayısıyla maliyet tasarrufu sağlar ve ağırlığı azaltır. Ancak, aynı anda yapı içinde daha fazla boşluk oluşur, bu da artan gözenekliliğe neden olur. Sonuç olarak, filamentler arasındaki bağlanma bölgesinin boyutu azalır ve mekanik özellikler de azalır. Buna karşılık, daha yoğun bir bileşen daha iyi mekanik özelliklere sahiptir, ancak tamamlanması çok daha uzun zaman alır [38].

2.4.6. İç dolgu tipi

İç dolgu tipi, filamentlerin basılı parçanın iç kısmını doldururken ve çapraz geçişlerini oluştururken kullandığı yolun şeklini ifade eder. Şekil 2.10'da sık kullanılan dolgu tipleri gösterilmiştir. Farklı dolgu desenleri genellikle farklı geometrik düzenlere ve karmaşıklığa sahiptir, bu da baskı süresini ve kullanılan malzemeyi etkilemektedir.



Şekil 2.10. İç dolgu tipleri: (a) doğrusal , (b) eş merkezli, (c) bal peteği [30]

İç dolgu tipi, FDM ile üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde karmaşık bir etkiye sahiptir. Örneğin, altıgen desende her katman bir önceki katmanın üstüne yerleştirilir. Bununla birlikte, düz çizgili desende, sonraki katman önceki katmana yalnızca noktalarda temas eder. Ancak, düz çizgili desenlerin %100 dolgu oranında kullanılması durumunda, bal peteği desenine kıyasla daha yüksek gerilme dayanımı gösterir [38].

2.4.7. Duvar sayısı

Duvar sayısı (Bkz. Şekil 2.7) , parçanın dış geometrisi boyunca biriktirilen kapalı yolların sayısını ifade eder. Bu sayı birden, ekstrüde edilen filament sayısından kadar değişebilir. Duvar sayısı, üretilen parçanın mekanik özelliklerini etkiler. Kontur sayısı arttıkça, doğrudan dayanımda artış etkisi görülür. Bunun nedeni, yükün rastgele değil, doğrudan duvara uygulanmasıdır [39].

3. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde sürekli fiber takviyesi ile FDM yöntemi kullanılarak üretilen parçaların mekanik özelliklerini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle PLA, ABS ve Poliamid malzemeleri kullanılmaktadır. ULTEM 9085 malzemesi ile sürekli fiber takviyesinin kullanıldığı ve mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışma, malzemenin üretim zorlukları ve prosese uygun makinelerin 2023 yılı itibari ile henüz piyasaya sürülmesi nedeniyle, sayısı çok limitlidir.

Zhang ve Moon (2021), FDM yöntemi ile üretilen parçalarının mekanik özelliklerinin, ekstrüde edilen malzemenin bir önceki katmandaki malzeme ile ne kadar iyi bağlandığına bağlı olarak değiştiğini belirtmektedir. Bağlanmayı ve mekanik performansı artırmak için, işlem parametrelerinin optimize edilmesi, baskı sürecinde değişiklikler yapılması veya baskı sonrası termal işlemlerin uygulanması yoluyla sağlanabildiğini vurgulamaktadır [26].

Cheng ve arkadaşları (2023) yaptıkları çalışmada literatürde sürekli fiber takviyesi kullanılarak yapılan çalışmaları proses tipi, fiber malzemesi ve matris malzemesine göre sınıflandırarak özetlemektedir [40]. Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi çalışmalarda çoğunlukla karbon fiber takviyesi ve matris malzemesi olarak PLA polimeri kullanılmaktadır.

Çizelge 3.1. Sürekli fiber takviyeli FDM metodunda kullanılan malzemeler [40]

Proses Tipi	Fiber Malzemesi	Matris Malzemesi
Nozul İçi Emdirme	Karbon	PLA
	Karbon	PA
	Karbon	PLA/TPU
	Karbon	PLA/TPU/CNT
	Karbon	Alaşım
	Karbon	Pyrolytic Seramik
	Kevlar	PLA
Üretim Sırasında Emdirme	Karbon	Epoksi
Ön-Emdirilmiş Kompozit Ekstrüzyon	Karbon	PA
	Karbon	Epoksi
	Cam	PA
Eş zamanlı Ekstrüzyon	Karbon	PLA
	Karbon	PA
Yerinde Birleştirme	Karbon	PLA
	Karbon	PA
	Karbon	Epoksi

Chacon ve arkadaşları (2019), FDM ile farklı parametreler kullanılarak üretilen Cam, karbon ve kevlar fiber takviyeli naylon matrisli kompozit parçalar üzerinde çekme ve üç nokta eğme testleri gerçekleştirmişlerdir. Üç temel parametre üzerinde durulan çalışmada 0,1 – 0,125 – 0,2 mm katman kalınlıkları; düz ve yatay üretim oryantasyonları ve üç seviyeli fiber hacim oranı değişken olarak kullanılmıştır. 0° fiber açısı ve izotropik fiber dolgu tipi ile üretilen numunelerde iç dolguda %100 fiber oranına sahip karbon fiber takviyeli ve yatay oryantasyonda çekme mukavemetinde 436 MPa ve eğme mukavemetinde de 423 MPa değerlerinde ulaşılabilmiştir. Aynı fiber oranı ve oryantasyonda Kevlar ile 305 MPa ve cam elyaf ile 381 MPa çekme mukavemeti değerlerine ulaşılmıştır [41].

Chacon ve arkadaşları (2019) ,aynı çalışmada, mekanik performans üzerinde katman kalınlığının etkisinin düşük olduğu göstermiştir. Çoğu durumda, yatay yönde en yüksek maksimum gerilme ve eğilme dayanımı ile sertlik değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, takviyeli naylon numunelerin mekanik performansı üzerinde fiber yönelimi, takviye malzemesi ve fiber hacim oranının etkilerinin önemi gösterilmiştir. Yatay numuneler, genellikle uzun kenar üzerinde konumlandırılan numunelerden daha yüksek dayanım değerleri göstermektedir. Dahası, karbon elyaf takviyeli kompozitler daha yüksek sertlikle birlikte en iyi çekme ve eğilme dayanım performansını göstermiştir. Öte yandan, Kevlar takviyeli kompozitler en düşük mekanik performansa sahipti. Kevlar fiberin anizotropik doğası nedeniyle, basınç dayanımı cam ve karbon liflerininkinden çok daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir [41].

Araya-Calvo ve arkadaşları (2018), Markforged Mark Two makinesinde PA6 malzeme ve Karbon fiber takviyesi kullanarak basma ve eğme mukavemeti için testler gerçekleştirmişlerdir. Fiber takviye tipi, dağılımı ve üretim oryantasyonu parametreleri üzerinde durulan çalışmada maksimum basma dayanımı eş merkezli takviye tipinde ve eşit dağılımda elde edilmiştir. Maksimum basma dayanımının elde edildiği numunede fiber oranı %24,44 ve elde edilen basma modülü değeri 2,101 GPa'dır. Eğme testlerinde elde edilen maksimum eğme modülü 14.17 MPa ve eğme dayanımı 231 MPa'dır. Bu değerlerin elde edildiği numunelerde eş merkezli takviye tipi ve xy üretim oryantasyonu kullanılmıştır [42].

Goh ve arkadaşları (2018), çalışmalarında Markforged firmasının sağlayıcısı olduğu karbon fiber filamentinin 370 μm çapında ve 1,30 g/cm^3 yoğunluğunda olduğunu raporlamıştır. Cam

elyaf çapı işe 290 μm ve yoğunluğu 1,45 g/cm^3'tür. Çalışmada hem karbon fiber hem de cam elyaf için, gerilmenin kırılana kadar neredeyse doğrusal olarak arttığı ve ardından ani bir şekilde kırıldığı gözlemlenmiştir. Bu davranış kompozitin kırılgan doğasını işaret etmektedir. Karbon fiber içeren numuneler için kaydedilen maksimum çekme dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla 600 MPa ve 12.99 GPa iken, cam fiber için kaydedilen maksimum çekme dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla 450 MPa ve 7.20 GPa'dır. Cam fiberlerin kırılmadan önceki daha uzun uzama miktarı, cam fiberlerin karbon fiberlere göre daha esnek olduğunu göstermektedir. İki tür numunede de gerilme-uzama eğrisinde hafif bir düşüş gözlemlenmiştir [43].

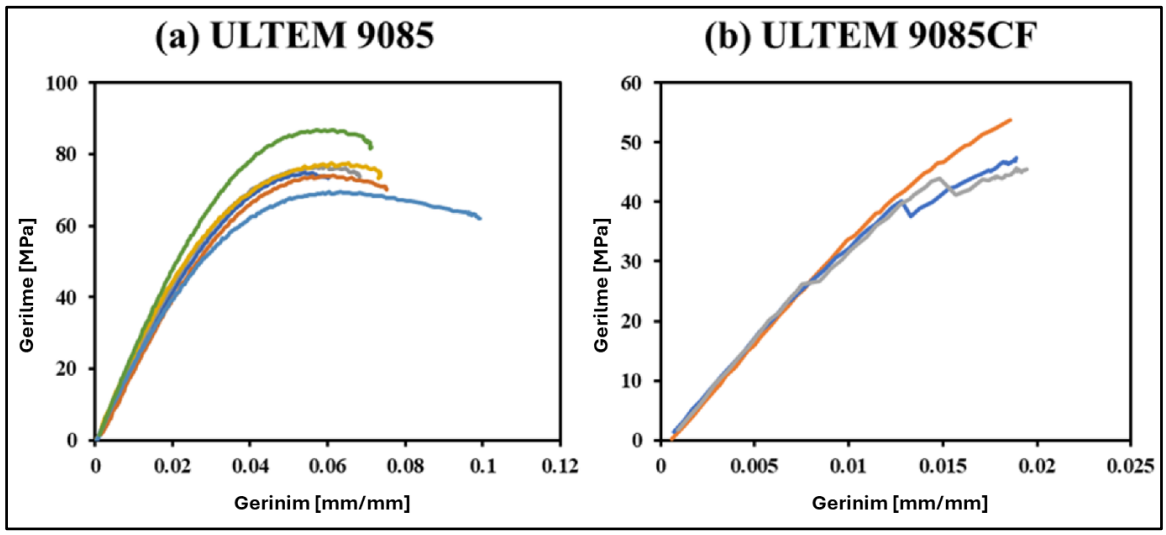
Goh ve arkadaşları (2018), aynı çalışmada eğme dayanımı için karbon fiber ve cam elyaf içeren numunelerde %1 uzamaya kadar lineer gerilme değeri okurken bu değere ulaşıldığında ani bir düşüş gözlemlemiştir. Bu ani düşüş sonrası iki numune tipi farklı davranışalar sergilemiştir. Karbon fiberli numunelerde gerilme artışı devam etmiş ve %1,5 uzama değerinde kopma gerçekleşmiştir. Karbon fiber içeren numuneler için kaydedilen maksimum eğilme dayanımı ve eğilme modülü sırasıyla 430 MPa ve 38.1 GPa'dır. Cam fiber için, eğilme stresi %2,5 uzama noktasına kadar kademeli olarak yükselmeye devam eder, ardından kademeli olarak azalmaya başlar. Cam fiber numunesi için ani bir kopma gözlemlenmemiştir. Cam fiber için kaydedilen maksimum eğilme dayanımı ve eğilme modülü sırasıyla 149 MPa ve 14.7 GPa idi, bu değerler karbon fiberin dayanımı ve modülünün yaklaşık %40'ı civarındadır [43].

Li ve arkadaşları (2016), PLA malzemesi kullanarak üretilen karbon fiber takviyeli numunelerde çekme özelliklerini incelemiştir. Goh ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında yaşanan gerilme-uzama eğrisindeki düşüşün benzeri bu çalışmada da bulunmaktadır. Elastik deformasyon aşamasında, iki karbon fiber takviyeli örnekte de eğimde hafif bir düşüş gözlenir. Bunun nedeni; yük, arayüz mukavemet sınır değerine ulaştığında, fiber-matris arayüzünün bir kısmının ayırılması olabilir, şeklinde yorumlanmıştır. Yapılan çalışmada 28 MPa standart çekme dayanımına sahip olan PLA malzemesi, karbon fiber takviyesi ile 80 MPa değerine ulaşmıştır Aynı zamanda, 53 MPa eğme mukavemeti değerine sahip olan malzemenin mukavemeti takviye ile yalnızca 59 MPa değerine yükselmiştir. [44].

El Essawi ve arkadaşları (2024), çalışmalarında sürekli karbon fiber takviyeli Onyx (PA6+CCF) malzemesinin çekme özellikleri üzerinde iç dolgu oranı, fiber açısı ve fiber

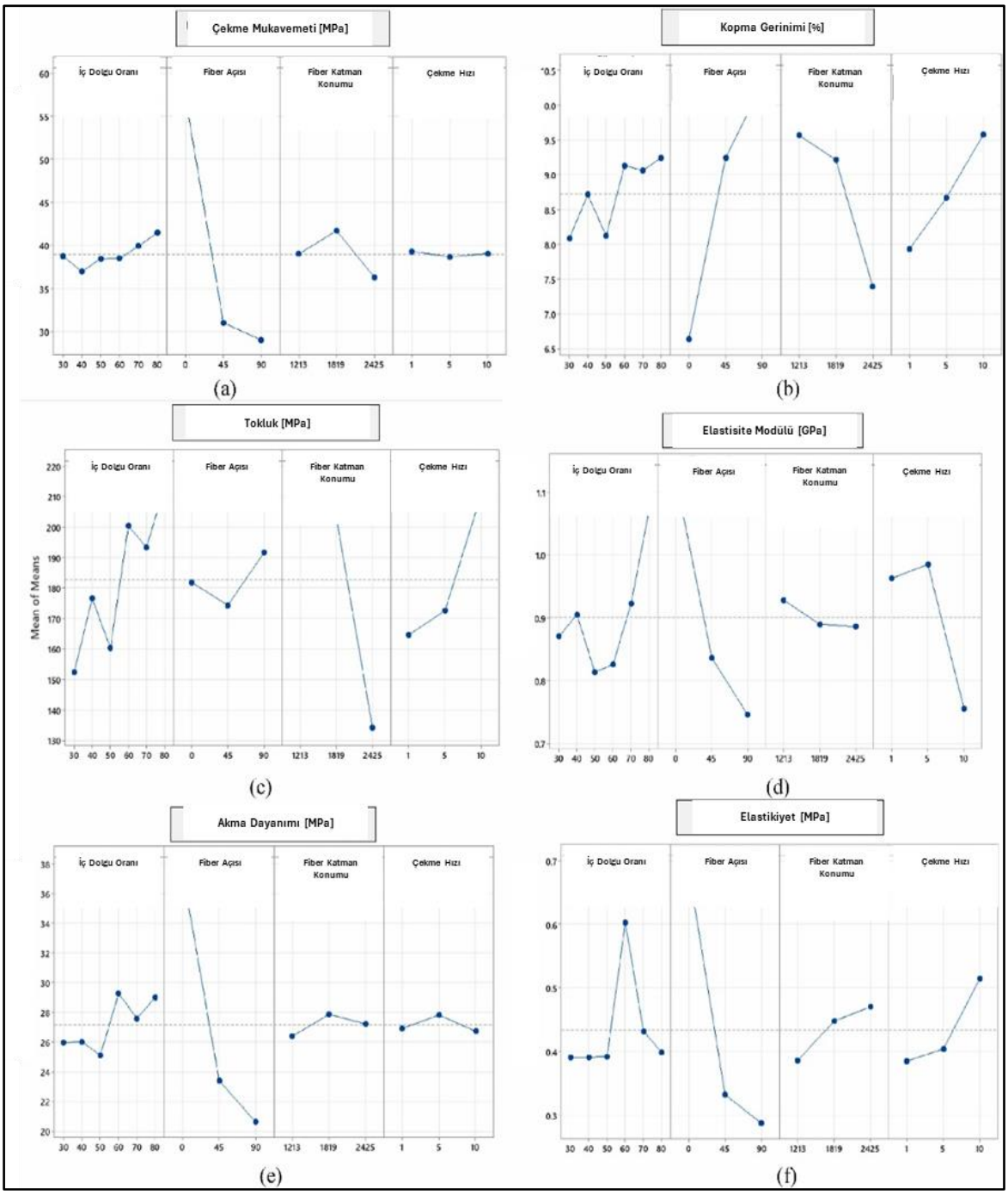
katman konumlandırması parametrelerinin etkisini incelemiştir. Dolgu oranları sırasıyla %30, %40, %50, %60, %70 ve %80 kullanılmış, fiber açılar 0, 90 ve ±45° arasında değişmiş ve karbon lifleri 12. ve 13. katmanlar, 18. ve 19. katmanlar veya 24. ve 25. katmanlar üzerine yerleştirilmiştir. Katman kalınlığı, baskı sıcaklıkları ve üretim hızları gibi diğer baskı parametreleri sabit tutulmuştur. Testlerin maliyet etkin ve zaman açısından verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi için Taguchi deney tasarımını kullanmışlardır. Çalışmada, fiber açısının %54,13 katkı oranı ile en etkili parametre olduğu bulunmuştur. İç dolgu oranı ise %16,25 katkıyla ikinci en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Şekil 3.2'de yapılan analizler sonucu elde edilen grafikler gösterilmiştir. Ayrıca, karbon fiber katmanının konumunun , %10,12 katkı ile, 3D baskılı parçaların mukavemet özellikleri üzerinde göreceli olarak daha az etkisi olduğu bulunmuştur. [45].

Vakharia ve arkadaşları (2023), ULTEM 9085 ve kırpık karbon fiber takviyesi içeren ULTEM 9085CF malzemeleri kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kırpık fiber katkısı çekme mukavemeti değerini düşürmekle birlikte numunelerin daha kırılgan bir davranış sergilemesine neden olmuştur. Şekil 3.1'de gerilim-gerinim grafikleri gösterilmiştir. ULTEM 9085 CF malzemesi ile üretilen numunelerde saf ULTEM 9085'e göre çok daha yüksek oranda porozite gözlemlenmiştir. Bu porozite nedeniyle katmanlar arası birleşme istenilen seviyede değildir ve mukavemet de bu nedenle etkilenmektedir. Kırpık fiber takviyesi sürekli fiber takviyesine kıyasla ters bir etki göstermiştir [46].



Şekil 3.1. Gerilme-gerinim grafiği: (a) ULTEM 9085, (b) ULTEM 9085 CF

Pandelidi ve arkadaşları (2022), sürekli fiber takviyeli yüksek performans polimerlerinin FDM yöntemi ile üretilebilirliğini araştırmıştır. Özel bir ısıtma bloğunun kullanımı ile, numunelerinin imalatının gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Sürekli fiber boyutlandırmasının özel olarak geliştirilmesinin, kompozit bileşenlerin yüksek sıcaklıklarda başarılı bir şekilde üretilebilmesi için gerekliliği belirlenmiştir. Bu nedenle, 500 fiber telini boyutlandırmak için üç farklı ULTEM 1010 bazlı reçine kullanılmıştır. Yüzey işlemi uygulamanın lifler üzerine PEI polimer reçinenin yapışması için önemli olduğu bulunmuştur. Tekli kompozit filamentler başarıyla imal edilmiş ve test edilmiştir. Kompozit filamentlerin, takviyesiz PEI'ye kıyasla gelişmiş mekanik performansa sahip olduğu bulunmuştur, ancak sürekli fiber filamentinin mekanik performansına ulaşmamıştır. Bu durumun, yetersiz fiber/matris yapışmasına ve FDM işleminden sonra gözlemlenen lif kırılmasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir [47].



Şekil 3.2. Ortalama etki grafikleri: (a) Çekme mukavemeti, (b) Kopma gerinimi, (c) Tokluk, (d) Elastisite Modülü, (e) Akma dayanımı, (f) Elastikiyet

Diaz-Rodriguez ve arkadaşları (2021), FDM ile Markforged makinesi kullanılarak üretilen sürekli fiber takviyeli polimer (CCFRP) numunelerin mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmaların verilerini derlemiş ve analizleriyle incelemiştir. Bir literatür özeti niteliğinde çalışmada sürekli karbon fiber takviyesi için elde edilen çekme testi verileri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Çizelge 3.3'te ise literatürde raporlanan eğme özellikleri bulunmaktadır [48].

Çizelge 3.2. Literatürde raporlanan CCFRP çekme özellikleri [48]

KAYNAK	Fiber Hacim Oranı [%]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Elastisite Modülü [GPa]	Kullanılan Test Standardı
Blok [49]	0,27	726	46,90	ASTM D3039
Azarov [50]	0,25	446	38,60	-
Dutra [51]	0,33	634,3	50	ASTM D638-I
Dickson C [52]	0,11	61	0,53	ASTM D3039
Justo [53]	0,40	701,4	68,08	ASTM D3039
Al Abadi [54]	0,40	340	37	ASTM D3039
Goh [43]	0,41	600	13	ASTM D3039
Fidan 2RC [55]	-	250	43,48	ASTM D638-I
Fidan 4RC [55]	-	230	35,38	ASTM D638-I
Fidan 5RC [55]	-	250	44,64	ASTM D638-I
Fidan 0Ri [55]	-	340	48,57	ASTM D638-I
Fidan 2Ri [55]	-	419	49,29	ASTM D638-I
Fidan 4Ri [55]	-	395	50,64	ASTM D638-I
Fidan 5Ri [55]	-	358	44,75	ASTM D638-I
Todoroki [56]	0,30	701	60,90	-
Gonzalez [57]	-	104	4,40	ASTM D638-I
Pertuz [48]	0,09	165	14,40	ASTM D638-I

Çizelge 3.2. (devam) Literatürde raporlanan CCFRP çekme özellikleri [48]

KAYNAK	Fiber Hacim Oranı [%]	Çekme Mukavemeti [MPa]	Elastisite Modülü [GPa]	Kullanılan Test Standardı
Mei Rec 4,4 [58]	-	72	2,57	-
Mei Rec 6,6 [58]	-	98	3,49	-
Mei Hex 6,6 [58]	-	83	3,06	-
Mei Tri 6,6 [58]	-	88	3,37	-
Naranjo 1R 6L [59]	0,04	61	50,80	ASTM D638-I
Naranjo 3R 2L [59]	0,04	31	17,20	ASTM D638-I
Naranjo 1R 12L [59]	0,07	52	32,50	ASTM D638-I
Naranjo 3R 4L [59]	0,07	52,30	40,80	ASTM D638-I
Naranjo 1R 18L [59]	0,11	29	15,30	ASTM D638-I
Naranjo 3R 6L [59]	0,11	82	45,60	ASTM D638-I
Naranjo 3R 18L [59]	0,32	150	10	ASTM D638-I
Naranjo 5R 18L [59]	0,54	304,28	23,70	ASTM D638-I

Çizelge 3.3. Literatürde raporlanan CCFRP eğme özellikleri [48]

KAYNAK	Fiber Hacim Oranı [%]	Mukavemet [MPa]	Young Modülü [GPa]	Kullanılan Test Standardı
Blok [49]	0,27	485	41,60	ASTM D7264
Goh [43]	0,41	430	38,10	ASTM-D790
Araya C. 17% [42]	0,17	83,5	5,10	ASTM D695
Araya C. 32% [42]	0,33	143,3	8,89	ASTM D790
Araya C. 49% [42]	0,49	231,1	14,17	ASTM D790

4. MALZEME VE METOD

Bu çalışmada Markforged firmasına ait yüksek sıcaklık için üretilmiş karbon fiber ve matris malzemesi olarak yanmazlık, alev almazlık ve toksisite özellikleri olan ULTEM™ 9085 malzemesi kullanılmıştır. Bu malzemeler ileri seviye mühendislik polimerleri olarak bilinir ve havacılık sektöründe de nihai parça üretiminde kullanılmaktadır. Üretimleri gerçekleştirmek için TUSAŞ, Eklemeli İmalat Müdürlüğü bünyesinde bulunan Markforged ® FX20 makinesi kullanılmıştır. Bu makine sürekli fiber takviyesi ile ULTEM 9085 malzemesinin üretimini gerçekleştirebilen tek endüstriyel tezgahtır. Makine kafasında üç nozul bulundurmaktadır. Bu nozullardan birisi fiber birisi polimer bir diğeri de destek malzemesi için kullanılmaktadır. Resim 4.1'de kullanılan makine gösterilmiştir. Çizelge 4.1'de makinenin teknik özellikleri belirtilmiştir.



Resim 4.1. Markforged FX20 makinesi

Çizelge 4.1. Markforged FX20 makinesi teknik özellikleri [60]

MAKİNE ÖZELLİKLERİ	TİP	Eriyik Biriktirme ile Modelleme, Sürekli Fiber Takviyesi
	ÜRETİM HACMİ	Tek-nozul üretim: 525 x 400 x 400 mm (20.6 x 15.7 x 15.7 in) Çoklu-nozul üretim: 500 x 400 x 400 mm (19.7 x 15.7 x 15.7 in)
	AĞIRLIK	530 kg
	SICAKLIK	200°'ye kadar
	BASKI SİSTEMİ	Direkt beslemeli 3 nozullu
	GÜÇ	200-240 VAC 2W+PE 40A // 200-240 VAC 3Ø+PE 24A // 347-415 VAC 3Ø+N+PE 14A; 50-60 Hz
MALZEME	POLİMER	Vega, ULTEM 9085 filament, Onyx, Onyx FR
	FİBER	Karbon fiber, Cam Elyaf, Aramid, Yüksek Sıcaklık Karbon Fiberi, Karbon Fiber FR
PARÇA ÖZELLİKLERİ	KATMAN KALINLIĞI	50 µm minimum, 250 µm maksimum
	TOLERANS	+/- 125 µm or +/- 0.0015 mm/mm
YAZILIM	EIGER	Online /Offline dilimleme programı
	BAĞLANTI	İki faktörlü doğrulama

FX20 makinesi, Markforged firmasının ürettiği en büyük ve en hassas makinedir. Bu büyük formatlı makine, 84L'lik ısıtmalı bir baskı odası ve düzlemselliği doğrulanmış vakumlu bir tablaya sahiptir. Hareket kontrol sistemi, hassas doğrusal kodlayıcılar aracılığıyla kapalı döngü kontrolü sağlamaktadır ve 3kg'lık baskı kafasını hızlı ve doğru bir şekilde hareket ettirmek için ayarlanmıştır [60].

Bir kartuşunda hacimce 3200 cm^3'lük malzeme bulunan ULTEM 9085 filamentler ile üretim yapılmaktadır. Bu filamentler üretim esnasında ve üretim sonrasında vakumlu haznelerde tutulurlar. Karbon fiber filamentler 150 cm^3'lük makaralar halinde kullanılır. Çizelge 4.2'de ULTEM 9085 ve karbon fiber filamentin mekanik özellikleri gösterilmiştir. ULTEM filamentler ve karbon fiber filamentler makinenin farklı bölgelerinden 2 farklı kafaya beslenir. Bu sayede önceki bölümlerde bahsi geçen çift nozul beslemeli üretim yöntemi ile kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Çift nozul beslemeli üretim yöntemi

ile üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin araştırılması amacını taşıyan çalışmada, test standartları ve numune belirlemenin ardından, birçok eklemeli imalat prosesinde ortak olarak takip edilen sıralamada olduğu gibi CAD model oluşturulması ile sürece başlanmıştır.

Çizelge 4.2. ULTEM 9085 ve karbon fiber filament mekanik özellikleri [61]

ULTEM 9085				Karbon Fiber Filament	
Özellik	Birim	Test Standardı (ASTM)	Değer (XZ Yönü)	Test Standardı (ASTM)	Değer
Çekme Mukavemeti	MPa	D638	68	D3039	760
Elastisite Modülü	GPa	D638	2,52	D3039	57
Kopma Uzaması	%	D638	5,5	D3039	1,6
Eğme Mukavemeti	MPa	D790	105	D790	540
Eğme Modülü	GPa	D790	2,45	D790	50
Eğme Kopma Uzaması	%	D790	-	D790	1,6
Basma Mukavemeti	MPa	D695	-	D695	300
Basma Modülü	GPa	D695	-	D695	59
Izod Darbe – Çentikli	J/m	D256-10A	70	D256-10A	810
Yoğunluk	g/cm^3	-	1,27	-	1,2
HDT (68 psi)	C°	D648 B	175	D648 B	190
HDT(264 psi)	C°	D648 B	173	D648 B	190

4.1. Test Standartları ve Numunelerin Belirlenmesi

Bu çalışmada, mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testi, eğme testi ve Izod darbe testi yapılmıştır. Numuneler, bu testler için ASTM tarafından belirlenen standartlara uygun olarak hazırlanmıştır.

Çekme testi

Çekme testi için numuneler, ASTM D3039 [62] standartlarına göre belirlendi. Bu standart, çekme testi için standart boyutlara ve geometriye sahip sabit kesitli dikdörtgen şeklinde numunelerin hazırlanmasını önermektedir. Bu standarda göre yapılan çekme testleri sonucunda malzemenin çekme dayanımı, elastisite modülü, yüzde uzama değeri elde edilmiştir. Arzu edilirse bu testler ile poisson oranı, elastik davranış vb. özellikler de elde edilebilir.

Eğme testi

Eğme testleri için numuneler ASTM D790 [63] standardına göre belirlenmiştir. Bu standarda göre, eğme testi için standart boyutlara ve geometriye sahip sabit kesitli dikdörtgen formunda numuneler hazırlanması tavsiye edilmektedir. Bu standarda göre numuneye üç nokta eğme testi uygulanır ve test sonucunda amaç, malzemenin eğme dayanımı ve eğme modülü değerlerini elde edebilmektir.

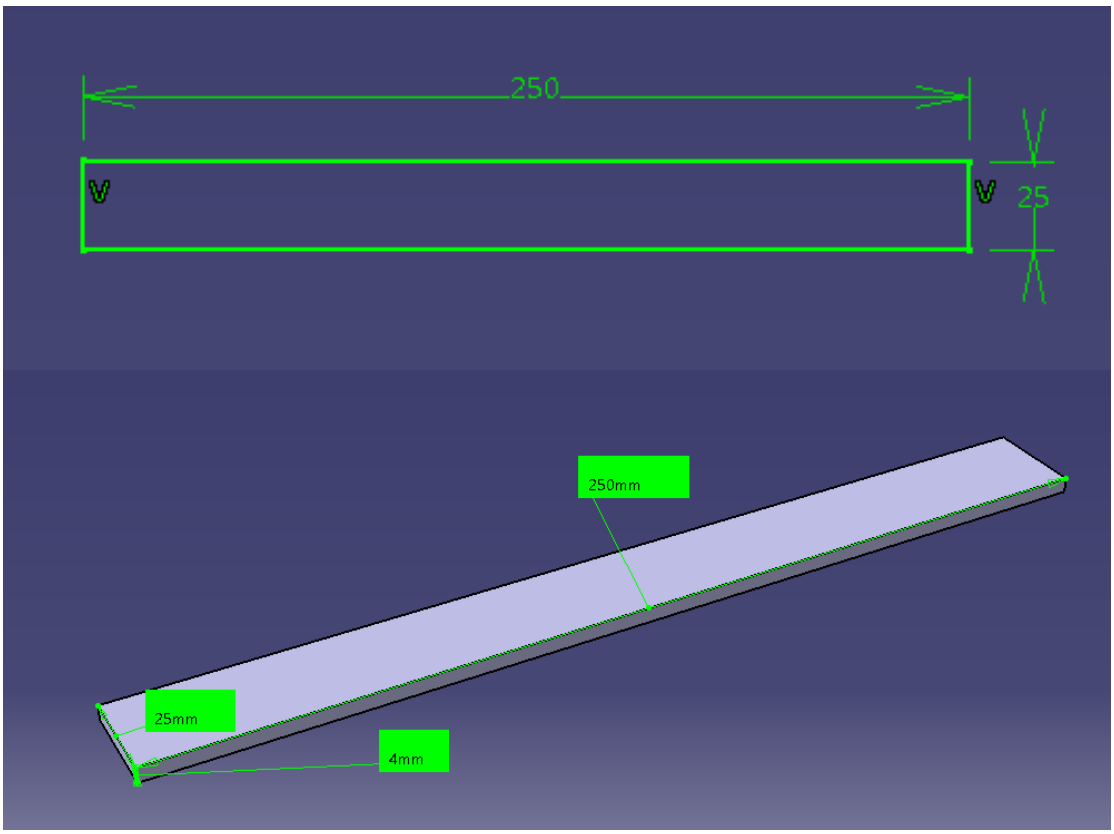
Darbe testi

Darbe testi için numuneler ASTM D256 [64] standardına göre belirlenmiştir. Darbe dayanımı ve çentik hassasiyeti özelliklerini belirlemek için uygulanır. Bu standarda göre numuneler dikdörtgen veya kare kesitli ve çentikli veya çentiksiz olarak metoda göre değişiklik gösterebilir. Bu çalışmada kare kesitli çentikli numuneler kullanılmıştır.

4.2. Numunelerin Modellenmesi (CAD Model)

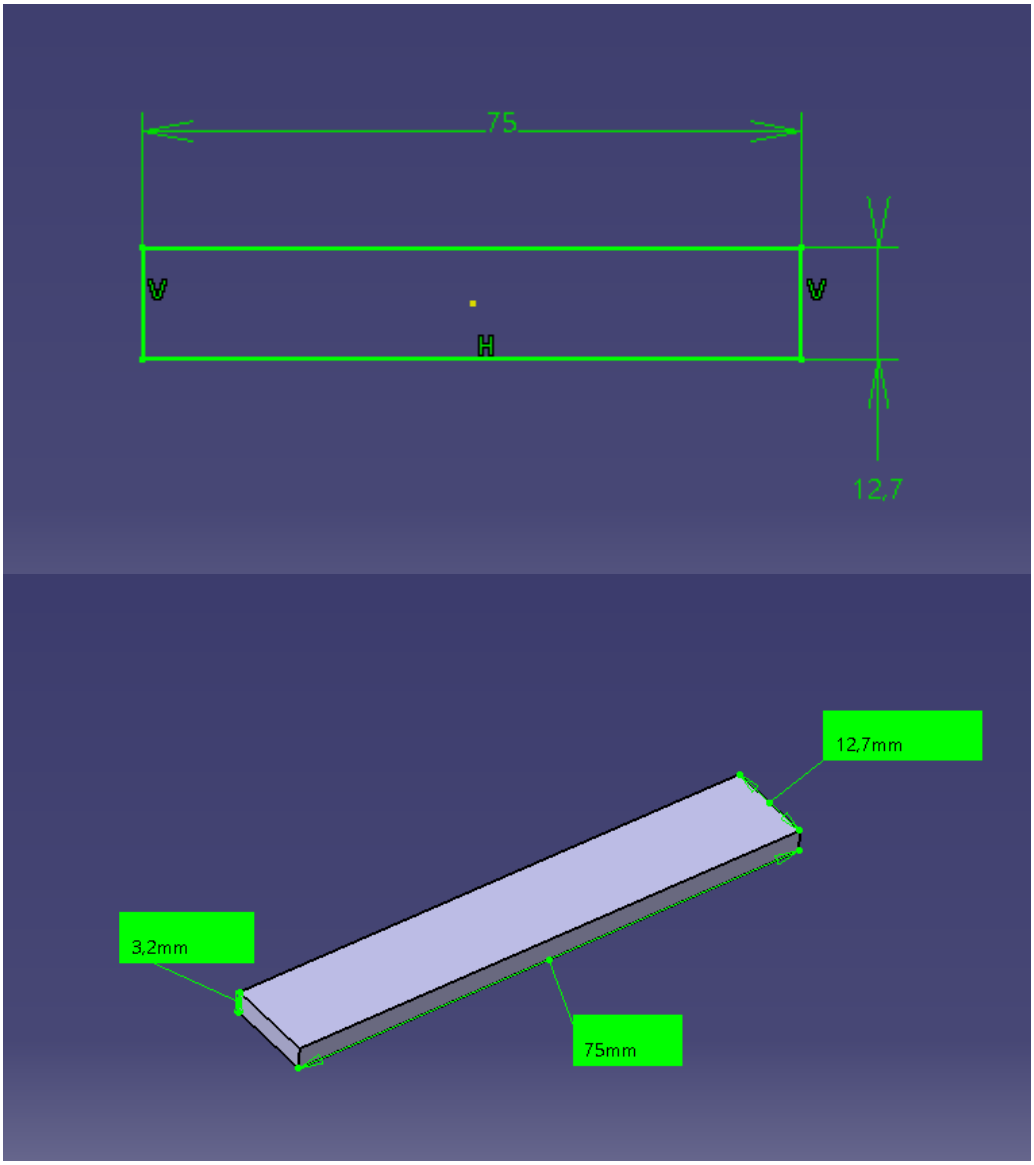
Numunelerin üç boyutlu modelleri CATIA V5 R21 programı kullanılarak hazırlanmıştır. Yukarıda bahsi geçen test standartlarına göre numune geometrileri ve boyutları aşağıdaki gibidir;

- Çekme testi: Numuneler Şekil 4.1'de gösterildiği gibi sabit dikdörtgen kesitli ve 250 x 25 x 4 mm boyutlarındadır.



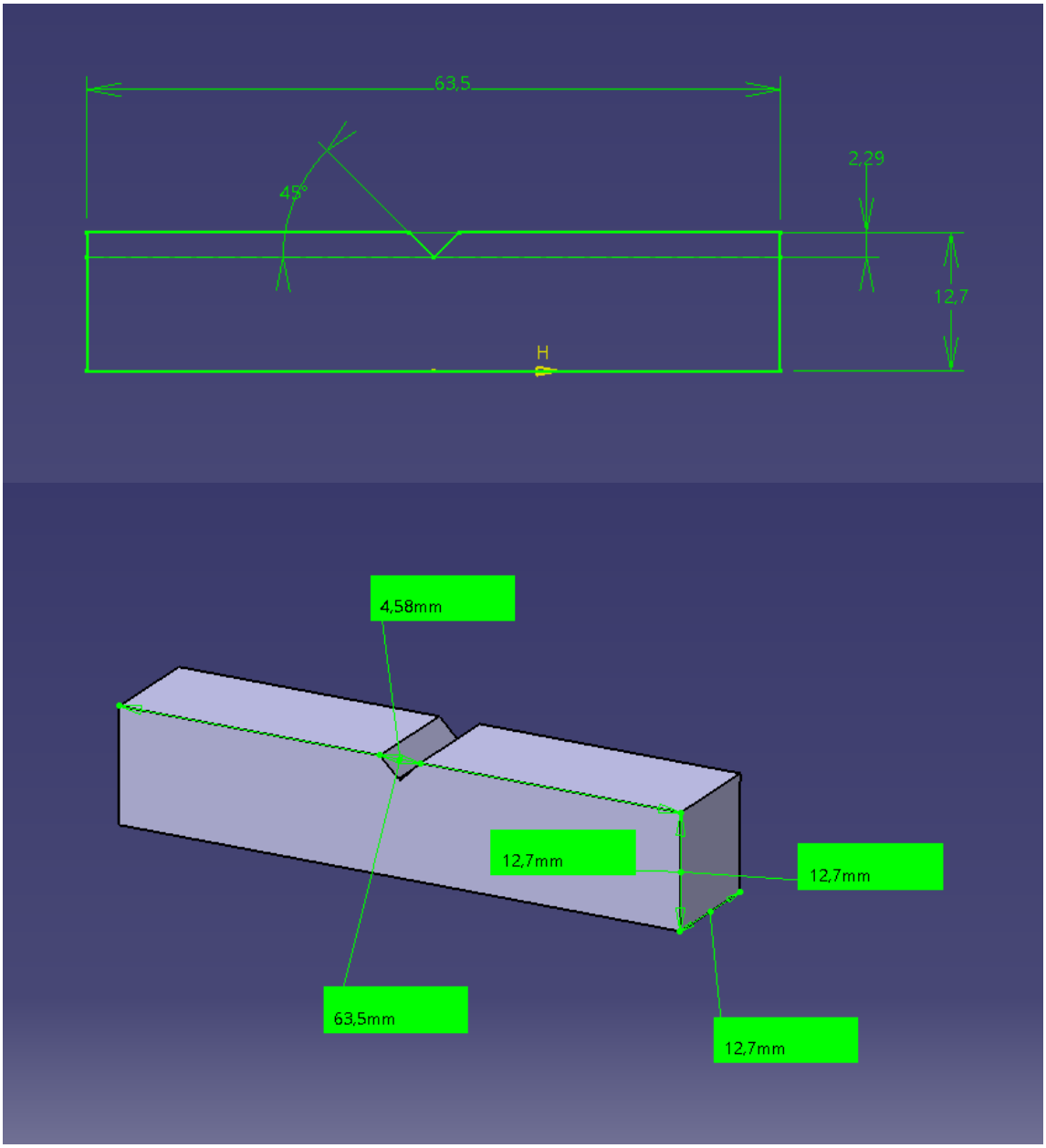
Şekil 4.1. Çekme numunesi boyutları ve CAD modeli

- Eğme testi: Şekil 4.2’de gösterildiği gibi sabit kesitli dikdörtgen geometriye sahiptir. Numune boyutları 75 x 12,7 x 3,2 mm’dir.



Şekil 4.2. Eğme testi numunesi boyutları ve CAD modeli

- Darbe testi: Şekil 4.3’de gösterildiği gibi darbe testi için kullanılan numuneler kare kesitli bir geometriye sahiptir ve numunenin orta üst kısmında bir çentik yer alır. Numune boyutları 63,5 x 12,7 x 12,7 mm’dir. Çentik ise 2,29 mm derinlikte ve 45°’lik açı ile oluşturulmuştur.



Şekil 4.3. Izod darbe testi numunesi boyutları ve CAD modeli

4.3. Parametrelerin Belirlenmesi

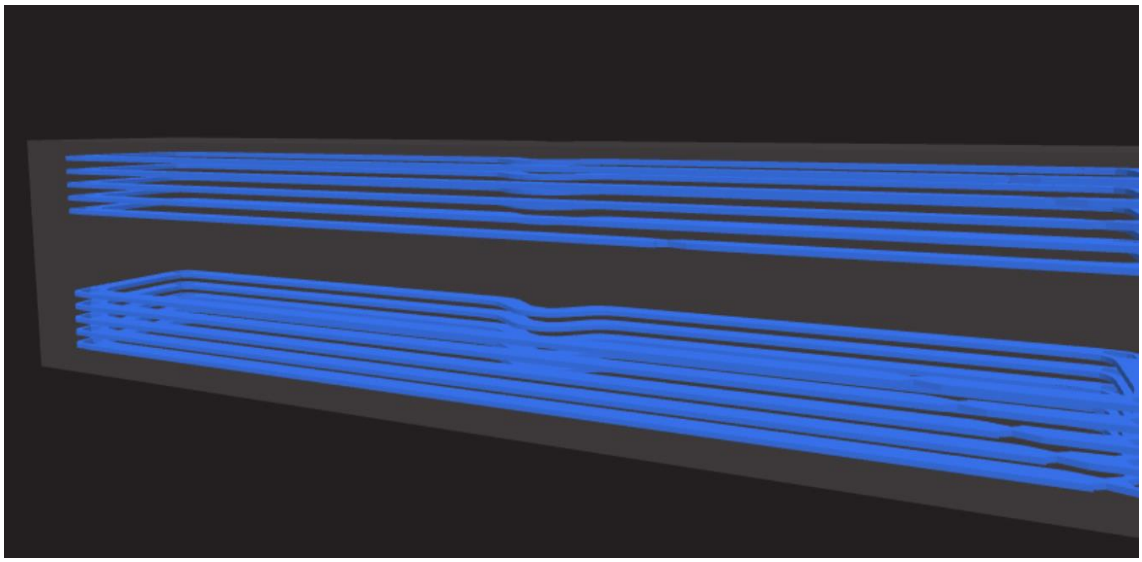
Bu çalışmanın amaçlarından birisi de farklı parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemektir. Bu doğrultuda yapılan literatür araştırması da dikkate alınarak 3 temel parametre belirlenmiştir. Bu parametreler: fiber içeren katman sayısı, fiber halka sayısı ve katman kalınlığıdır.

Fiber içeren katman sayısı

Fiber içeren katman sayısı parametresi, üretilen numunelerde bulunan katmanlardan kaç tanesinde sürekli fiber takviyesi bulunduğunu göstermektedir. Makine kabiliyetindeki limitler, üretim süresinde yaşanacak artış ve maliyet kaygıları nedeniyle bütün katmanlarda fiber takviyesi kullanımı mümkün değildir.

Fiber içeren katman sayısı doğrudan fiber hacim oranını ve uygulanan yüklerin transfer ediliş şekli ve yönünü belirlediği için mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Literatürde başka malzemeler üzerinde yapılan benzer çalışmalarda fiber katman konumlandırmasını direkt konu alan çalışma sayısı sınırlıdır.

Şekil 4.4'de fiber içeren katman sayısı parametresi gösterilmektedir. Parçanın iç yapısının gösterildiği şekilde mavi bölgeler fiber ve gri bölgeler matris malzemesidir.

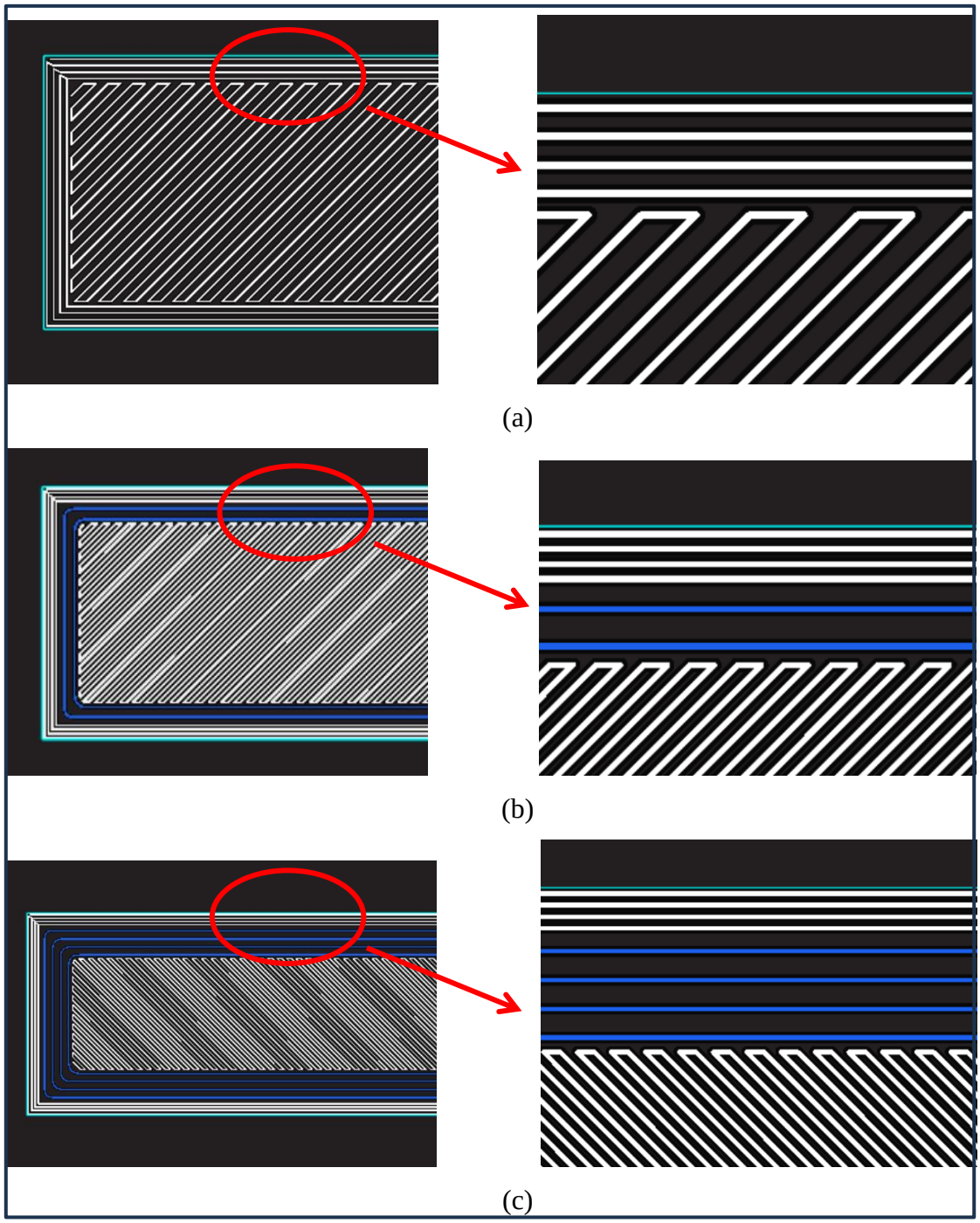


Şekil 4.4. Fiber içeren katmanlar

Fiber halka sayısı

Fiber halka sayısı, fiber içeren katman sayısı parametresine benzer olarak fiber hacim oranını doğrudan etkilediği için incelenmesi gereken bir diğer parametredir. Tezgah kabiliyeti limitleri nedeniyle bir katmandaki fiber yerleşimi yalnızca eş merkezli yani dış geometriyi takip edecek şekilde oluşturulabilmektedir. Bu nedenle 0°,45°,90° gibi fiber serim yönlerini

oluşturmak mümkün değildir. Şekil 4.5'de fiber içermeyen, 2 halka fiber içeren ve 4 halka fiber içeren katmanlar gösterilmiştir.



Şekil 4.5. (a) fiber içermeyen katman, (b) 2 halka fiber içeren katman, (c) 4 halka fiber içeren katman

Katman kalınlığı

Katman kalınlığı değerleri Markforged firmasının dilimleme programı olan Eiger'da sunulan seçenekler olan 0,125 mm ve 0,25 mm olarak seçilmiştir. Farklı numunelerde parametrelerin mekanik özelliklerine etkisini incelemek için oluşturulan konfigürasyonlarda bu iki katman kalınlığı seviyesi kullanılmıştır. Katmanlar arası birleşme ve bu birleşmeden doğacak hatalar neticesinde mekanik özelliklere ne seviyede katkıda bulunduğu incelenmiştir.

Diğer parametreler

Değişken olarak belirlenen parametreler dışında kalan üretim ve malzeme parametreleri bütün numuneler için aynıdır. Çizelge 4.3'te gösterilen önemli parametreler bütün üretimlerde ve numunelerde sabittir.

Çizelge 4.3. Sabit üretim parametreleri

PARAMETRE	DEĞER
Polimer nozul sıcaklığı	370°C
Fiber nozul sıcaklığı	360°C
Baskı hacmi iç sıcaklığı	170°C
Ultem Filament çapı	1,75 mm
Nozul Çapı	0,4 mm
Fiber dolgu tipi	İzotropik
Dolgu tipi	Katı
Doluluk oranı	100%
Polimer tarama açısı	+/- 45°
Duvar sayısı	4
Bir duvar ve tarama kalınlığı	0,4 mm

4.4. Deney Tasarımı (DOE)

4.4.1. Çekme testi numuneleri

Kullanılacak numuneler, gerçekleştirilecek testler ve parametrelerin belirlenmesinin ardından deney tasarımı kısmına geçilmiştir. Deney tasarımı için Minitab 18 yazılımı kullanılmıştır.

Taguchi yöntemi, özellikle birden fazla faktörün performansı etkileyebileceği durumlarda optimizasyon için güvenilir ve maliyet-etkin bir yaklaşımdır. Taguchi, güvenilirliği ve diğer yöntemlere göre daha az deney gerektirmesi nedeniyle optimizasyon yöntemi olarak seçilmiştir. Örneğin, tam faktöriyel tasarım gibi yöntemler zaman alıcı ve pahalı olabilir [65].

Bu nedenle, bu çalışma için Taguchi en uygun optimizasyon yöntemi olarak seçilmiştir çünkü gerekli deney sayısını azaltmaya ve kullanılan malzeme miktarını minimize etmeye yardımcı olmuş ve yine de güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada, farklı seviyelerde üç parametre (Çizelge 4.4'de gösterildiği gibi) çekme özellikleri üzerindeki etkileri açısından incelenmiştir. Hangi parametrelerin performans üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu ve diğerlerinden daha önemli olduğunu belirlemek için Minitab yazılımı aracılığıyla Taguchi'nin ortogonal diziliş (L16) yöntemi, genel kesirli faktöriyel tasarım türlerinden biri, seçilmiştir.

Çizelge 4.4. Parametreler ve seviyeleri

Parametre	Seviye			
	1	2	3	4
Katman kalınlığı[mm]	0,125	0,25	-	-
Fiber içeren katman sayısı	1	2	3	4
Fiber halka sayısı	1	2	3	4

Çizelge 4.5'te belirlenen parametrelere göre oluşturulan numuneler ve numunelerin sahip olduğu parametreler gösterilmiştir. Katman kalınlığı iki seviye, fiber içeren katman sayısı ve fiber halka sayısı ise dört seviyede kullanılmıştır.

Çizelge 4.5. Çekme testi numuneleri listesi

Numune	Fiber İçeren Katman Sayısı	Fiber Halka Sayısı	Katman Kalınlığı
1	1	1	0,125
2	1	2	0,125
3	1	3	0,250
4	1	4	0,250
5	2	1	0,125
6	2	2	0,125
7	2	3	0,250
8	2	4	0,250
9	3	1	0,250
10	3	2	0,250
11	3	3	0,125
12	3	4	0,125
13	4	1	0,250
14	4	2	0,250
15	4	3	0,125
16	4	4	0,125

4.4.2. Eğme testi numuneleri

Eğme testi numunelerinde katman kalınlığı parametresi kullanılmamıştır. Çekme testi numunelerinde yapılan ilk gözlemler sonucu elde edilen katman kalınlığı parametresinin düşük etkisi nedeniyle diğer parametrelere yoğunlaşılmıştır. Bütün numuneler 0,25 mm katman kalınlığında üretilmiştir.

Numune kalınlığı nedeniyle fiber içerebilen katman sayısı maksimum üçtür. Bununla beraber fiber halka sayısı da numune kesit alanı nedeniyle maksimum beştir. Fiber içeren katman sayısı parametresi için 1,2,3 olmak üzere üç seviye ve fiber halka sayısı parametresi için de 3,4,5 olmak üzere üç seviye belirlenmiştir.

Belirlenen parametreler ve seviyeler ile Taguchi ortogonal diziliş 3^2 (L9) yöntemi kullanılmış ve Çizelge 4.6'da gösterilen 9 numune tipi oluşturulmuştur.

Çizelge 4.6. Eğme testi numuneleri listesi

Numune	Fiber İçeren Katman Sayısı	Fiber Halka Sayısı
E1	1	3
E2	1	4
E3	1	5
E4	2	3
E5	2	4
E6	2	5
E7	3	3
E8	3	4
E9	3	5

4.4.3. Darbe testi numuneleri

Darbe testi için numune belirleme esnasında fiber içeren katman sayısı ve fiber halka sayısı parametrelerine yoğunlaşabilmek adına katman kalınlığı parametresi değişken olarak kullanılmamıştır. Bütün numunelerde 0,25 mm katman kalınlığı kullanılmıştır.

Numune boyutları nedeniyle çekme testlerinde belirlenen seviyeler; örneğin fiber içeren katman sayısı için 1,2,3,4 seçilmiş olsaydı, çok düşük fiber hacim oranları elde edileceği için sağlıklı sonuçlar elde edilemeyebilirdi. Bu nedenle fiber içeren katman sayısı yine 4 seviye olarak 4,6,8 ve 10 olarak belirlendi. Bu doğrultuda Taguchi ortogonal diziliş (L16) yöntemi ile 16 numune tipi (Çizelge 4.7) oluşturulmuştur.

Çizelge 4.7. Darbe testi numuneleri listesi

Numune	Fiber Halka Sayısı	Fiber İçeren Katman Sayısı
D1	4	4
D2	4	6
D3	4	8
D4	4	10
D5	3	4
D6	3	6
D7	3	8
D8	3	10
D9	2	4
D10	2	6
D11	2	8
D12	2	10
D13	1	4
D14	1	6
D15	1	8
D16	1	10

4.5. Numunelerin Üretime Hazırlanması

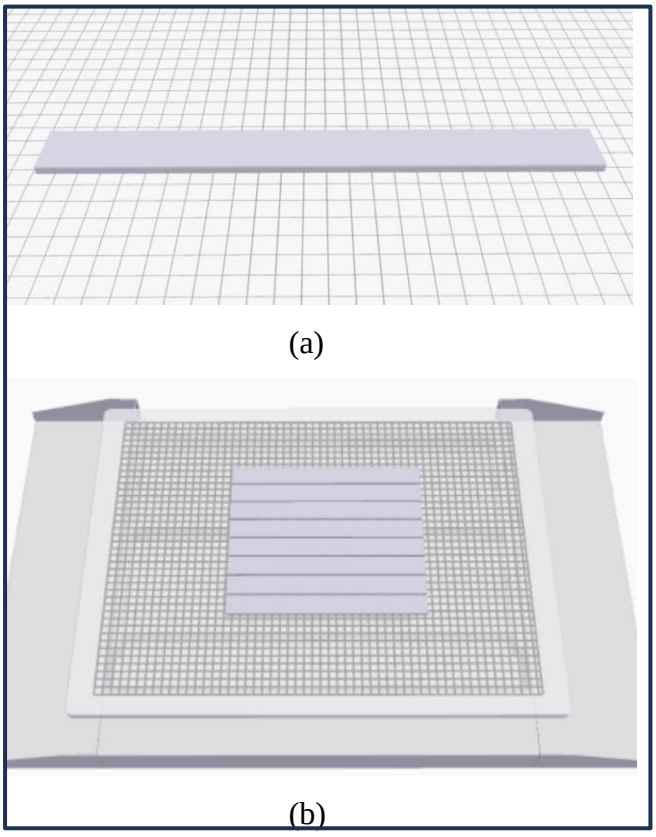
Parametreleri belirlenen numunelerin üretime hazırlanması için Markforged Eiger dilimleme yazılımı kullanılmıştır. Yazılım limitleri, teknoloji yetersizliği ve makine kabiliyetleri nedeniyle aşağıdaki kısıtlar göz önüne alınarak dilimleme ayarları yapılmıştır;

- İlk 4 katman ve son 4 katman tamamen katı ve matris malzemesi ile üretilmelidir.
- Dış geometrinin doğruluğundan emin olmak için malzeme ve numuneye bağlı olarak minimum 2 veya 4 duvar sayısı bulunmalıdır.
- İki fiber katman arka arkaya üretilememektedir. Mutlaka bir fiber içeren katman üstüne tamamen matris olan bir katman gelmelidir.
- İzotropik fiber yerleşimi, ULTEM 9085 malzeme ve karbon fiber konfigürasyonu için, yazılım tarafından sunulmamaktadır.
- Yalnızca 0,125 mm ve 0,25 mm katman kalınlıklarında üretim yapılabilmektedir.

- Fiber kafasında bulunan kesici nedeniyle kullanılabilecek minimum fiber uzunluğu 45 mm'dir. Bu nedenle, fiber takviyesi kullanılabilecek en küçük alan 90 mm^2'dir. Dikey numuneler bu şartı sağlamayıp fiber kullanımı mümkün olmadığı için parametreler arasına üretim oryantasyonu eklenmemiştir.
- Bir fiber katman 0,125 mm olduğu için 0,250 mm katman kalınlığında yapılan üretimlerde fiber içeren katman iki adet 0,125 mm'lik katman ile oluşturulur.

4.5.1. Çekme testi numunelerinin üretime hazırlanması

Çekme numuneleri xy (düz) yerleşiminde üretilmiştir. Önceki bölümde bahsedilen kısıtlar nedeniyle dikey üretim mümkün değildir. Kenar üzerinde konumlandırma ile üretimde ise yalnızca bir halka fiber kullanılabilmektedir. Şekil 4.6 (a)'da dilimleme programında bir numunenin yerleşimi ve Şekil 4.6 (b)'de ise üretime gönderilecek olan toplu yerleşim görülmektedir. Çizelge 4.8'de numunelerin üretim süreleri ve maliyetleri gösterilmiştir.



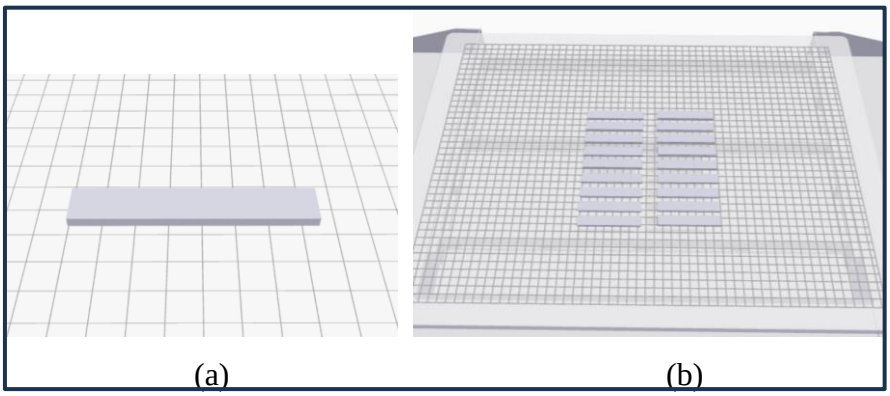
Şekil 4.6. (a) Tek çekme testi numunesi tablada yerleşimi, (b) üretime gönderilecek 8 numunenin tablada toplu yerleşimi

Çizelge 4.8. Çekme testi numunelerinin üretim süreleri ve maliyetleri

Numune	Üretim Süresi [dk]	Maliyet [$]
1	79	12,11
2	75	11,70
3	88	12,95
4	95	13,77
5	77	11,85
6	88	13,12
7	80	12,20
8	94	13,90
9	177	11,11
10	172	10,86
11	182	12,57
12	190	14,03
13	184	13,22
14	180	11,53
15	187	13,18
16	174	11,07

4.5.2. Eğme testi numunelerinin üretime hazırlanması

Eğme testi numuneleri Şekil 4.7 (a)'da gösterildiği gibi üretime hazırlanmıştır. Numune boyutları ve makinenin maksimum üretim hacminin büyük olması sebebiyle numunelerin tamamı ikişer adet olacak şekilde tek bir tablada üretilmiştir(Şekil 4.7 (b)). Bu numunelerin üretim süreleri ve maliyetleri Çizelge 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Numunelerin tabla yerleşimi: (a) tek, (b) toplu

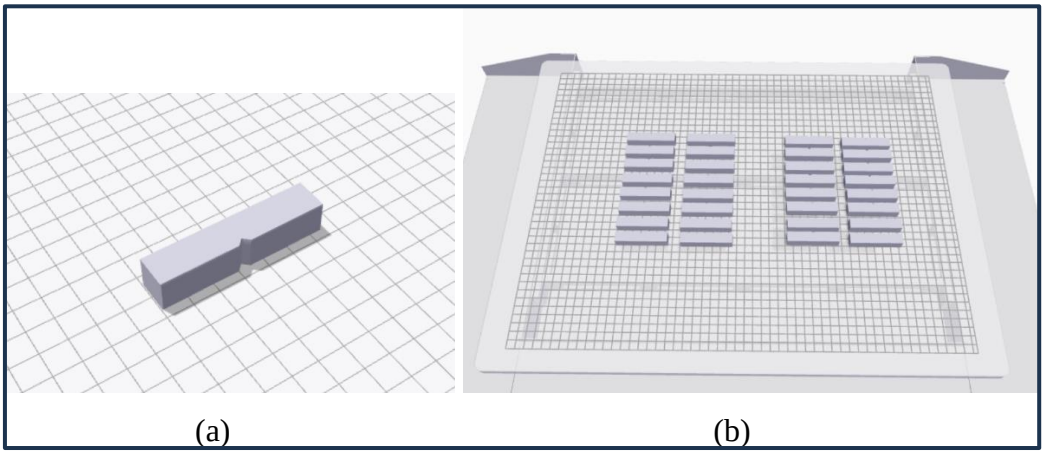
Çizelge 4.9. Eğme testi numunelerinin üretim süreleri ve maliyetleri

Numune	Üretim Süresi [dk]	Maliyet [$]
E1	19	1,73
E2	20	1,84
E3	21	1,95
E4	23	2,17
E5	25	2,39
E6	27	2,60
E7	27	2,61
E8	31	2,94
E9	34	3,26

4.5.3. Darbe testi numunelerinin üretime hazırlanması

Darbe testi için hazırlanan numunelerde üretim oryantasyonu çentik geometrisinin en doğru elde edilebileceği yönde Şekil 4.8 (a)'da gösterildiği gibi seçilmiştir. Çizelge 4.10'da numunelerin üretim süreleri ve maliyetleri gösterilmiştir.

Şekil 4.8 (b)'de numunelerin üretime gönderilecek halde tablaya yerleşimi görülmektedir. Numune boyutlarının küçük olması ve makine tablasının boyutlarının büyük olması sayesinde her numuneden 2 adet toplam 32 numune tek bir tablada üretilebilmiştir.



Şekil 4.8. (a) Tek darbe testi numunesi yerleşimi, (b) üretime gönderilen numunelerin tablada yerleşimi

Çizelge 4.10. Darbe testi numunelerinin üretim süreleri ve maliyetleri

Numune	Üretim Süresi [dk]	Maliyet [$]
D1	69	6,16
D2	72	6,59
D3	89	8,19
D4	99	9,21
D5	64	5,76
D6	72	6,57
D7	80	7,37
D8	87	8,18
D9	60	5,35
D10	65	5,96
D11	71	6,56
D12	76	7,17
D13	55	4,92
D14	58	5,31
D15	61	5,70
D16	64	6,09

4.6. Üretim

Bütün numunelerde üretimlere başlamadan önce ortam kontrolü gerçekleştirilmiştir. Makinenin bulunduğu atölye ortamı şartlandırılmış bir ortam olduğu için tezgahın optimum çalışma ortamı aralığından çıkmamaktadır. Üretimler gerçekleştirildiği zamanlarda da ölçüm cihazlarından kontrol edilen sıcaklık ve nem değerleri sırası ile 22-26 °C ve %40 - %50'dir.

Tezgâhın optimum çalışma şartlarını sağladığının çevre kontrolü ile emin olunmasının ardından kullanılacak olan ham malzemelerin durumu kontrol edilmiştir. Üretimlerde daha önceden kullanılmamış ve vakumlu poşetlerde muhafaza edilmiş sıfır kartuşlar kullanılmıştır. Malzemeler makineye yerleştirilmeden önce nem kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Nem kontrolü için Radwag MA 50.R nem tayin cihazı (Resim 4.2) kullanılmıştır. Binde bir oranında hassasiyet ile ölçüm gerçekleştirebilen cihazda ölçümü yapılan ham malzemelerden ağırlıkça %0,1 oranında veya daha yüksek nem oranına sahip olan malzemeler kullanılmamıştır. Özellikle ULTEM 9085 malzemesinin neme duyarlı olması nedeniyle yüksek nem oranlarında üretimde birçok hataya neden olmaktadır. %0,1'den düşük nem oranlarında üretimde herhangi bir sorun yaşanmamıştır.

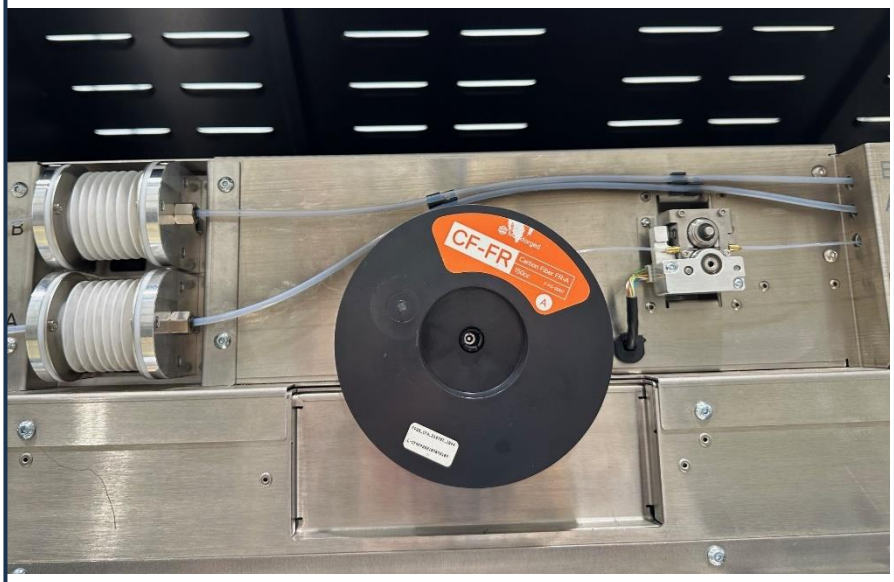


Resim 4.2. Radwag MA 50.R nem ölçüm cihazı

Ham malzemeler üretime uygun bulunduktan sonra makinenin nem almayan haznelerine yerleştirilir. Polimer model malzemesi için iki kartuş destek malzemesi için iki kartuş ve fiber takviye malzemesi için bir kartuş olmak üzere 5 malzeme haznesi (Resim 4.3) bulunmaktadır. Malzemeler bu haznelere yerleştirilir. Test numuneleri için yapılan üretimlerde destek malzemesi kullanılmamıştır.



(a)



(b)

Resim 4.3. FX20 makinesi malzeme kartuşları (a) polimer filament, (b) fiber filament

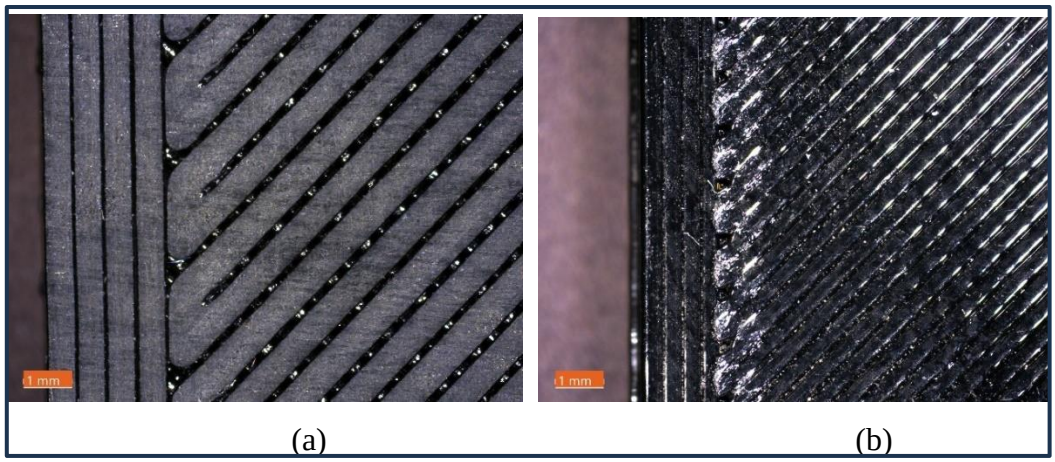
Malzemeler üretime hazır bir şekilde yerleştirildikten sonra makinenin durumu kontrol edilir. Makinenin üretime hazır hale gelebilmesi için z-ekseni kalibrasyonu, fiber nozul kalibrasyonu, iç ortam sıcaklığı stabilizasyonu ve vakumlu tablanın üstüne üretim plakasının yerleştirilmesi gerekmektedir. Plaka üstüne özel bir yapıştırıcı uygulanır. Yapıştırıcı uygulanmasının nedeni ilk katmanda yapışmanın maksimum seviyede olduğundan emin olmaktır.

Üretime hazırlık adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Ortam kontrolü
- Ham malzeme nem kontrolü
- Ham malzemenin makineye yerleştirilmesi ve nozul akış kontrolü
- Makinenin z-eksen ve fiber nozul kalibrasyonu
- Makine iç ortamı sıcaklık stabilizasyonu
- Vakumlu tablaya plakanın yerleştirilmesi ve vakuma alındığından emin olunması
- Tablaya yapıştırıcı uygulanması

Bahsedilen adımlardan gerekli olanların tamamı bütün numune üretimlerinden önce uygulanmıştır. Çekme numuneleri üretimleri aynı kartuş malzeme ile arka arkaya 4 üretimde gerçekleştirilmiştir. Eğme ve darbe testi numuneleri de aynı malzeme ile her biri tek tablaya sığacak şekilde birer üretimde gerçekleştirilmiştir. Üretimi tamamlanan numuneler üzerine markalama yapılmıştır. Resim 4.5'te üretimden çıkan numuneler gösterilmiştir.

Üretilen çekme testi numunelerinin mikroskop altında ilk katmanı (tabla ile temas eden yüzey**)** Resim 4.4 (a) ve en üst katmanı da Resim 4.4 (b)'de gösterilmiştir. Mikroskop görüntülerinden de anlaşılabileceği gibi ilk katmanda üretim tablası ile maksimum adhezyonu sağlamak ve çarpılmaları minimize etmek için hava boşlukları fazladır. En üst katmanda ise duvarlar ve iç dolgu arasında minimum boşluk ve maksimum yapışma görülmektedir.



Resim 4.4. Mikroskop görüntüsü: (a) İlk katman, (b) son katman



(a)



(b)



(c)

Resim 4.5. Üretimden çıkan: (a) eğme testi numuneleri, (b) çekme testi numuneleri, (c) darbe testi numuneleri

4.7. Testler

4.7.1. Çekme testleri

Markforged FX20 makinesi ile üretilen çekme numuneleri Instron 5985 (Resim 4.6) çekme cihazı ile test edilmiştir. 250 KN kapasiteye sahip olan cihaz tam otomatik ekstansometre ile gerinim ölçümü gerçekleştirmektedir.



Resim 4.6. Instron 5985 çekme testi cihazı

Testler kontrollü bir ortamda 25°C sıcaklık ve %50 nem şartlarında gerçekleştirilmiştir. Üretilen test kuponlarının nemden etkilenme ve yaşlanma nedenleri ile sonuçlarının sapmasını önlemek amacı ile üretimden sonra testler gerçekleşene kadar kontrollü bir şekilde saklanmıştır.

ASTM D3039 [62] standardına göre gerçekleştirilen testlerde 2 mm/dk çekme hızı uygulanmış ve uzama miktarları Instron Autox750 otomatik temaslı ekstansometre ile ölçülmüştür. Bu ekstansometre sayesinde binde birlik hassasiyetler ile uzama miktarları ölçülerek elastisite modülü değerleri de elde edilebilmiştir.

Testler neticesinde elde edilmesi hedeflenen değerler; çekme dayanımı, kopma uzaması, elastisite modülü ve testler sırasında takibini gerçekleştirmek ve sonrasında yorumlama yapabilmek adına gerilme – gerinim grafiğidir.

4.7.2. Eğme testleri

Malzemenin eğme dayanımı, eğme uzaması ve modülünü bulabilmek için 3 nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler Instron 34 TM-30 test cihazı (Resim 4.7) ile gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.7. Instron 34TM- 30 eğme testi cihazı

Test cihazında kullanılan parametreler üretilen numune boyu ve kalınlığına bağlı olarak ASTM D790 [63] standardına göre oluşturulmuş ve Çizelge 4.11'de listelenmiştir.

Çizelge 4.11. Eğme testi parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Destekler Arası Mesafe	51,2	mm
Yükleme Burnu Yarıçapı	3,2	mm
Destek Burun Yarıçapı	5	mm
İlerleme Hızı	1,36	mm/dk

Testler sırasında kullanılan parametreler standartta belirtilen ve aşağıda gösterilen formüller kullanılarak elde edilmiştir;

Destekler arası mesafe = 16 x numune kalınlığı (4.1)

İlerleme hızı = 0,01 x (destekler arası mesafe)^2 / 6 x numune kalınlığı (4.2)

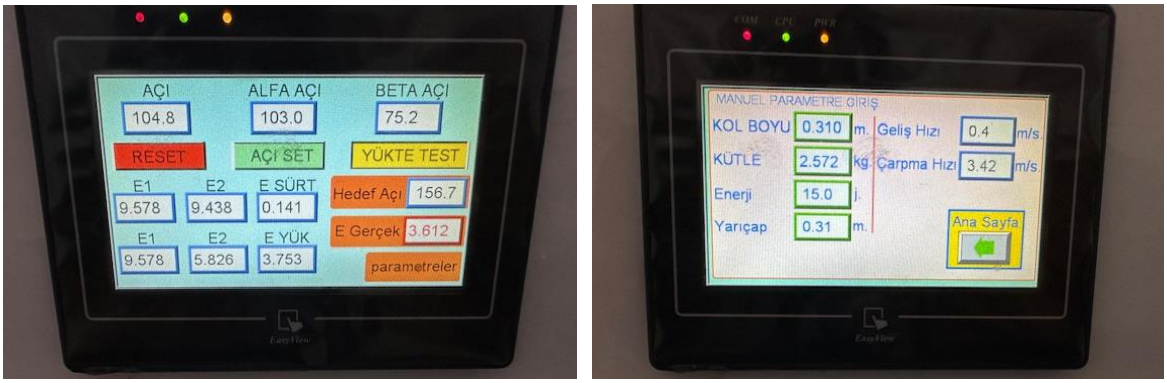
4.7.3. Darbe testleri

Darbe testleri de diğer testlerde olduğu gibi kontrollü bir ortamda ve kontrollü bir şekilde muhafaza edilmiş numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Testlerde Resim 4.8'de gösterilen, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi malzeme laboratuvarında bulunan, alarga firmasının ICJ-22 model sarkaçlı darbe test cihazı kullanılmıştır.



Resim 4.8. Alarge ICJ-22 sarkaçlı darbe test cihazı

Kullanılan test cihazı Izod ve Charpy test standartlarına uygun aparatlara ve sarkaçlara sahiptir. Farklı konfigürasyonlarda kullanılabilmektedir. Gerçekleştirilen testlerde kullanılan parametreler cihazın arayüzünde Resim 4.9'da gösterildiği şekilde ayarlanmıştır.



Resim 4.9. Darbe testi cihazı parametreleri

Çizelge 4.12'de gösterilen; kullanılan sarkaç tipi ve test yöntemine göre ağırlığın bırakıldığı yükseklik ve kullanılan sarkacın enerji değeri, kolun boyu ve salınım yarıçapı gibi parametreler seçildikten sonra sürtünme nedeniyle kaybedilen enerjiyi hesaplamak için cihaz numune olmadan boşta çalıştırılarak sürtünme nedeniyle kaybedilen enerji Eş. 4.3'e göre hesaplanarak gerçekleştirilen testlerde elde edilen sonuçtan çıkartılarak gerçek enerji değerleri bulunmuştur.

$$E_{çekiç,başlangıç} - E_{çekiç,son} = E_{sürtünme} \quad (4.3)$$

Çizelge 4.12. Darbe testi cihazı parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Kol Boyu	0,310	m
Kütle	2,572	kg
Enerji	15	J
Yarıçap	0,310	m
Çarpma Hızı	3,42	m/s

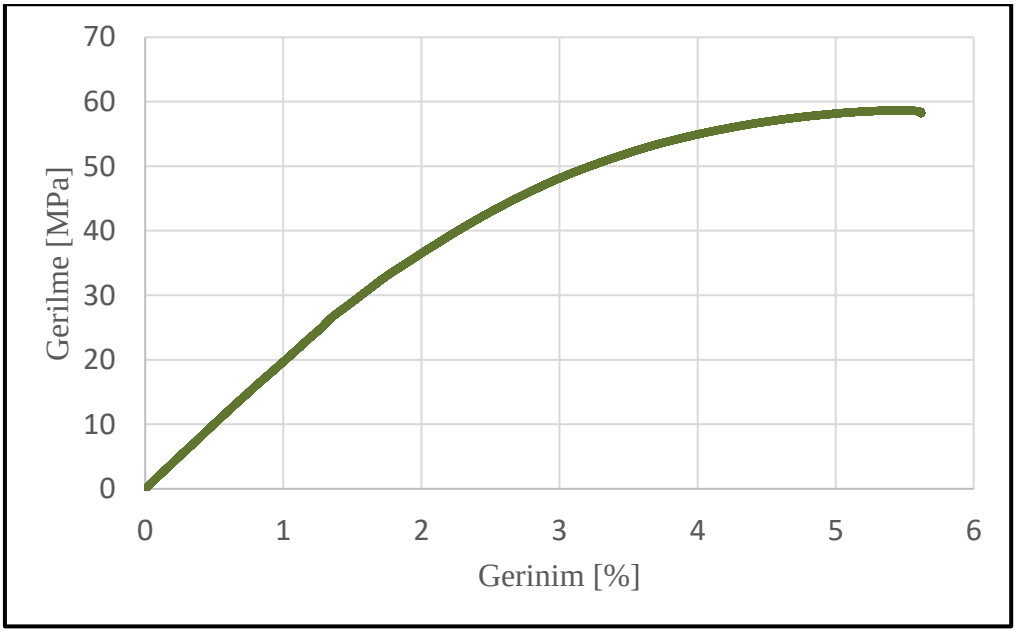
4.8. Test Sonuçları

4.8.1. Çekme testi sonuçları

Çekme testleri sonucu elde edilen maksimum gerilme, gerinim ve elastisite modülü değerleri Çizelge 4.13'de gösterilmiştir. Ayrıca numunelerin gerilme – gerinim grafikleri de testler sonucunda elde edilmiştir.

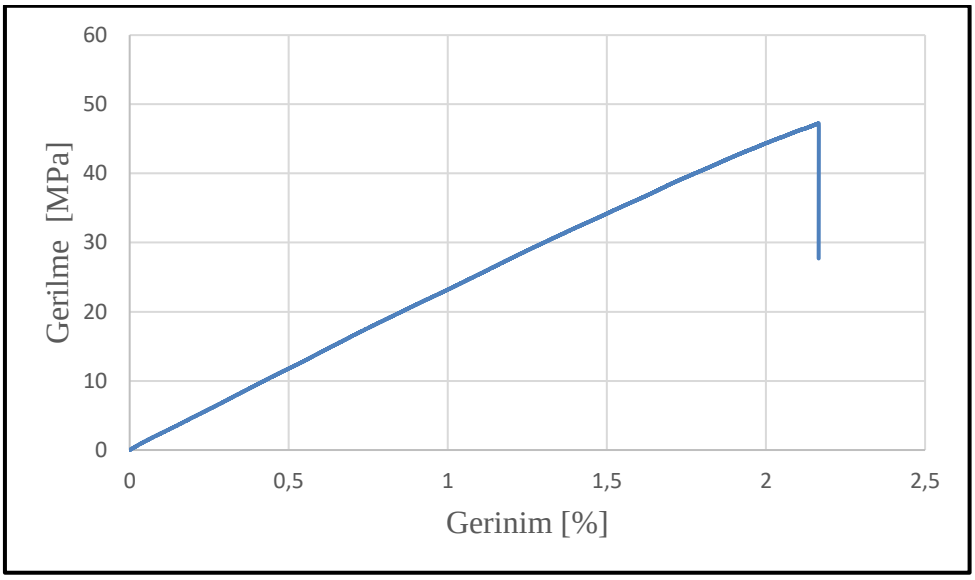
Çizelge 4.13. Çekme testi sonuçları

Numune	Maksimum Gerilme [MPa]	Gerinim [%]	Elastisite Modülü [MPa]
ULTEM 9085	58,60	5,60	2081,45
1	51,10	2,73	2318,34
2	47,80	2,09	2561,45
3	54,10	1,81	3119,95
4	61,10	1,75	3705,87
5	47,20	2,17	2316,64
6	49,90	1,96	2724,57
7	67,10	1,79	3835,21
8	72,90	1,61	4472,48
9	57,60	1,82	3295,66
10	65,10	1,67	3794,77
11	56,60	1,71	3369,85
12	68,90	1,81	3887,38
13	56,60	1,80	3272,3
14	77,30	1,72	4537,42
15	63,40	1,70	3716,71
16	75,50	1,71	4330,46

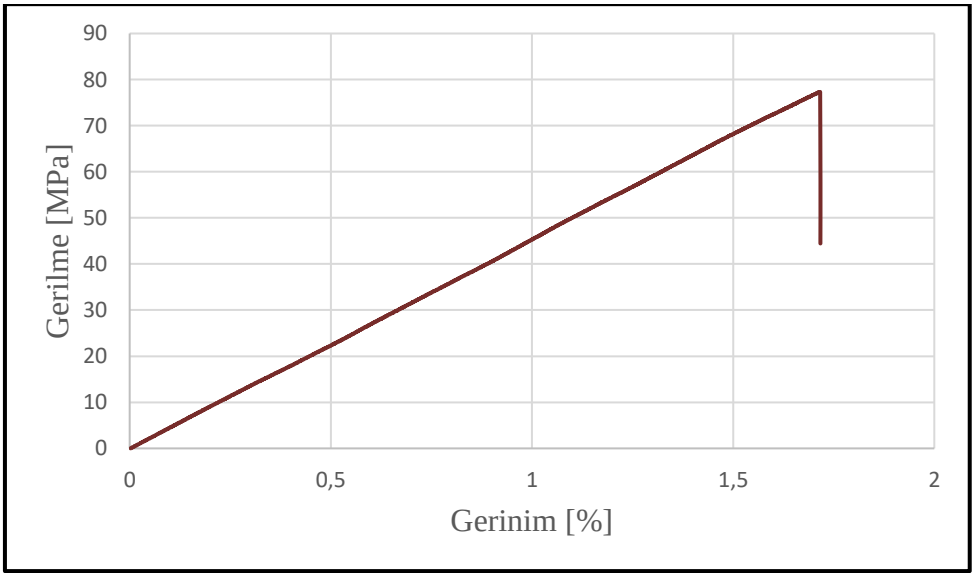


Şekil 4.9. Takviyesiz ULTEM 9085 çekme numunesi gerilme-gerinim grafiği

Şekil 4.9'da takviyesiz ULTEM 9085 ve Şekil 4.10'da ise en düşük maksimum gerilme değeri (47,2 MPa) elde edilen 5 numaralı numunenin gerilme-gerinim grafiği verilmiştir. Bu numune 8. ve 26. katmanlarda 1'er halka fiber takviyesi içermektedir ve 0,125 mm katman kalınlığı ile üretilmiştir. En düşük fiber oranlarından birisine sahip olan numunede dahi grafikler kırılgan bir malzeme davranışına yakındır. Fiber oranının düşük olması nedeniyle diğer numunelere kıyasla mukavemet değeri düşük ve uzama değeri yüksek gözlemlenmiştir.

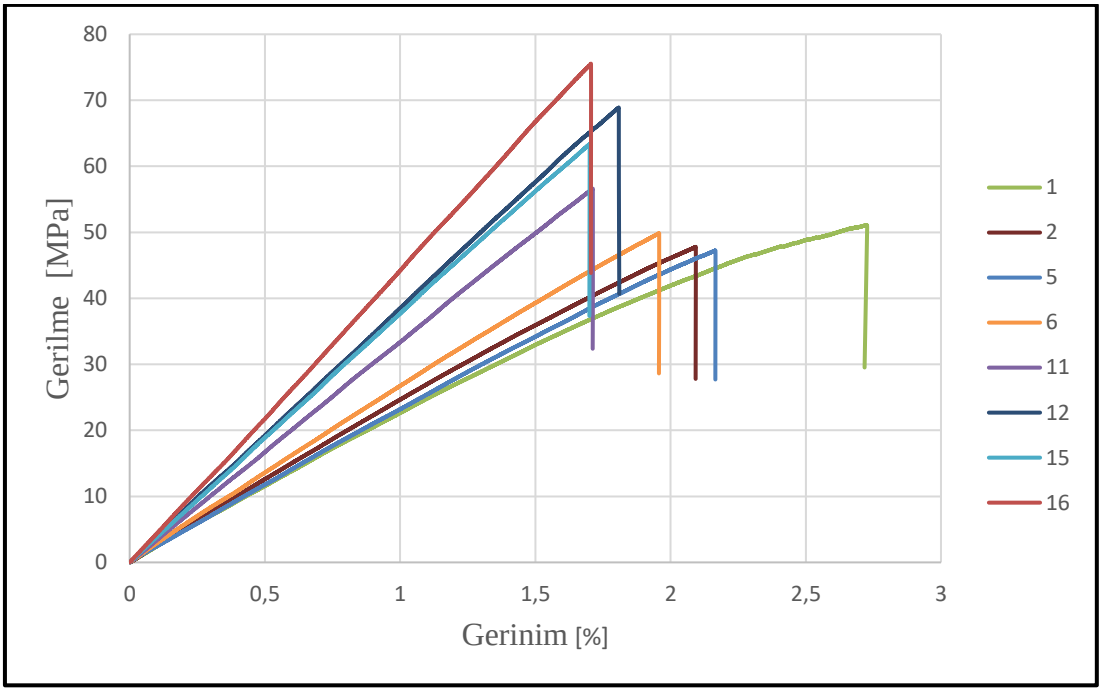


Şekil 4.10. 5 numaralı çekme numunesi gerilme – gerinim grafiği

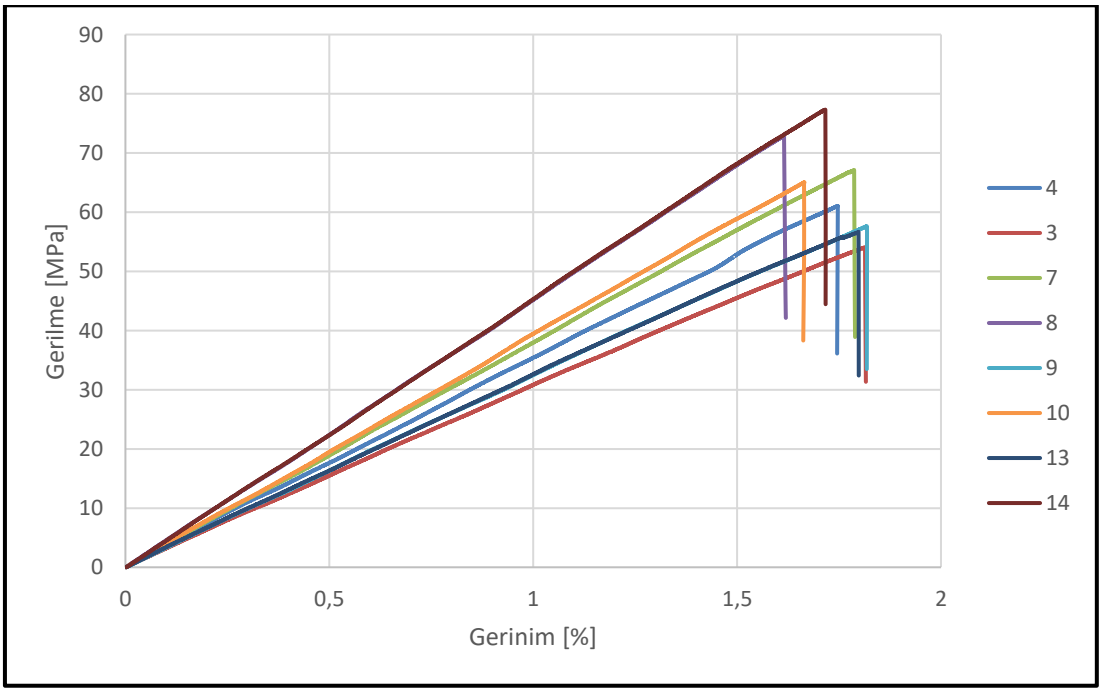


Şekil 4.11. 14 numaralı çekme numunesi gerilme – gerinim grafiği

Şekil 4.11'de 14 numaralı numunenin grafiği gösterilmiştir. Bu numune 0,25 mm katman kalınlığında 4 katmanda 2'şer halka fiber içermektedir. 77,3 MPa maksimum gerilme ve %1,72 kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Bu değerler ve elde edilen grafik doğrultusunda elastisite modülü 4537,42 MPa olarak hesaplanmıştır.

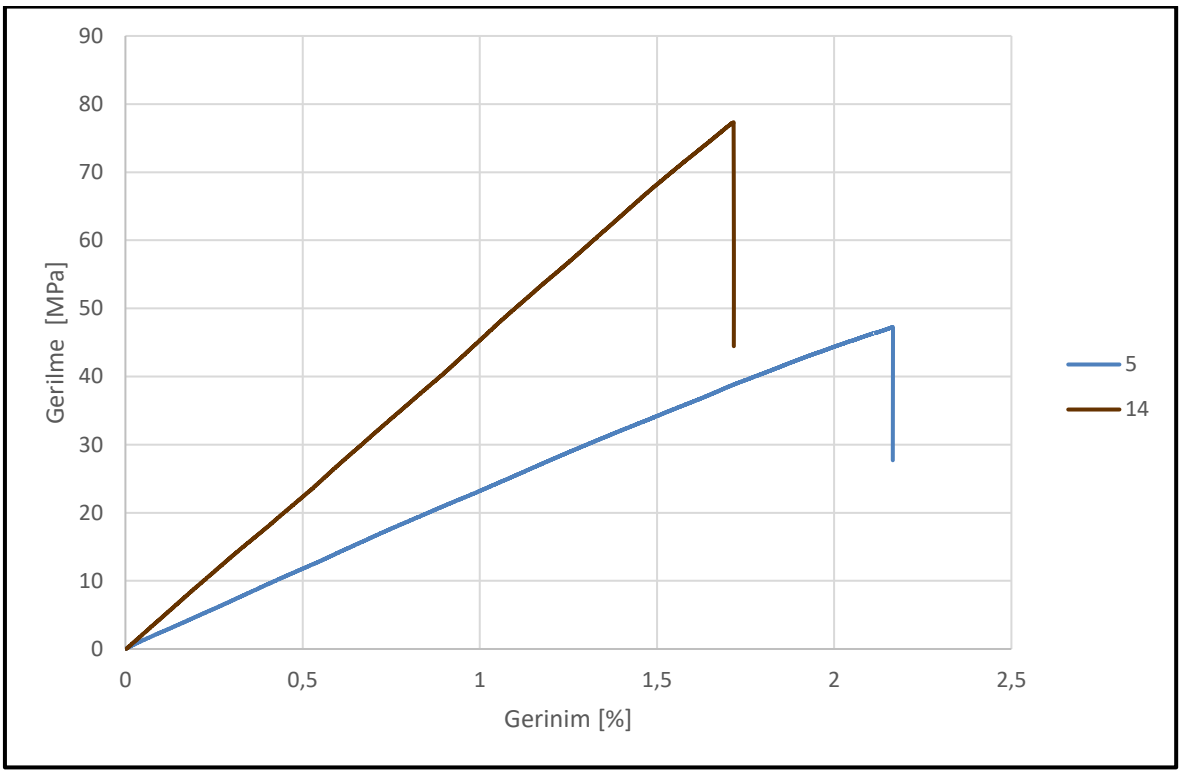


Şekil 4.12. 0,125 mm katman kalınlığına sahip numunelerin gerilme – gerinim grafiği



Şekil 4.13. 0,25 katman kalınlığında üretilen numunelerin gerilme – gerinim grafiği

En düşük ve en yüksek maksimum gerilme değerine sahip 5 ve 14 numaralı numunelerin grafikleri karşılaştırıldığında **(**Şekil 4.14**)** 14 numaralı numunenin grafiğinin eğiminin daha yüksek olduğu ve tamamen doğrusal bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. 5 numaralı numunede ise bu grafik eğimi belirli bir noktadan sonra azalma eğiliminde olsa da saf polimer malzeme grafikleri ile kıyaslandığında fiber katkısının etkisi ile eğimdeki azalmanın düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

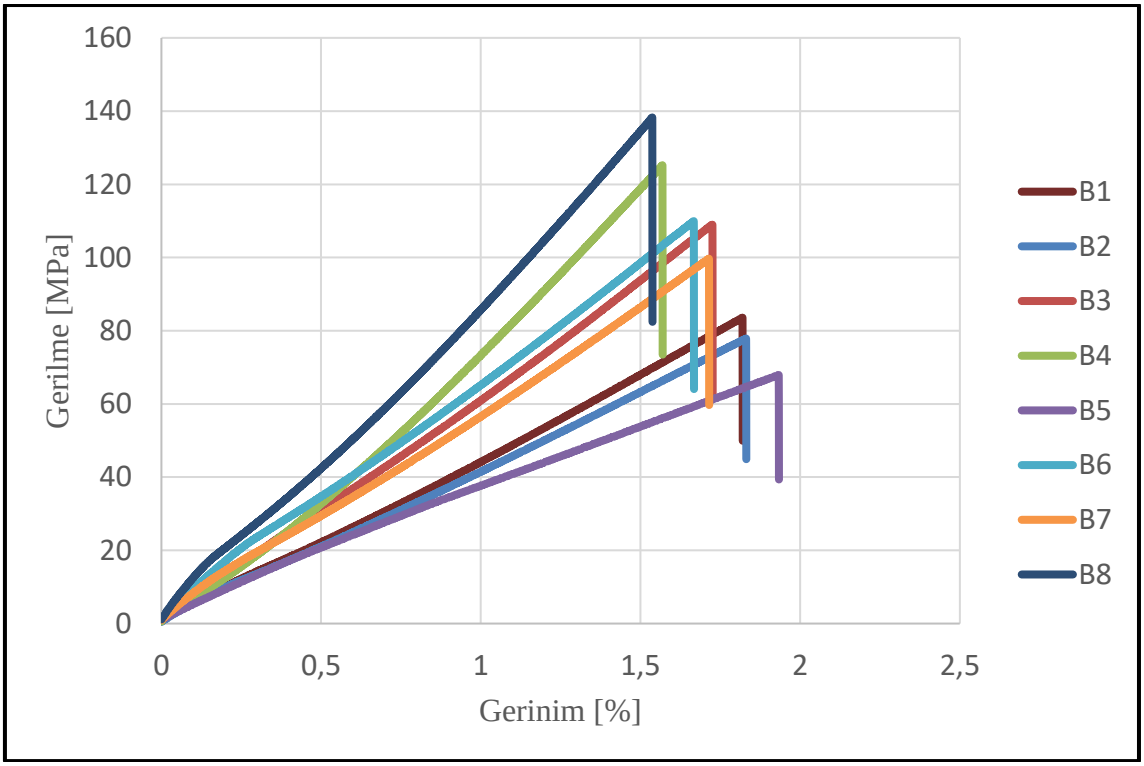


Şekil 4.14. 5 ve 14 numaralı çekme numunelerinin gerilme-gerinim grafiği

Gerçekleştirilen ilk test sonuçları ardından elde edilen maksimum mukavemet artışı %32 ve maksimum elastisite modülü artışı ise %218'dir. Yapılan ilk değişken analizleri sonucu katman kalınlığı etkisinin düşük olması nedeniyle katman kalınlığı değişkeni olmadan ve bir önceki L16 ortogonal dizininden elde edilen numunelerde yalnızca 0,25 mm katman kalınlığına sahip numunelerde halka sayısı ve fiber içeren katman sayısı artırılarak yeni testler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.14'de gösterilen test sonuçlarında takviyesiz ULTEM 9085 çekme numunesinden elde edilen sonuca göre %245'e kadar artış gözlemlenmiştir. Şekil 4.15'de bu numunelerin gerilme – gerinim grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Fiber oranı artırılmış çekme numuneleri test sonuçları

Numune	Fiber İçeren Katman Sayısı	Fiber Halka Sayısı	Maksimum Gerilme [MPa]	Gerinim [%]	Elastisite Modülü [MPa]
B1	2	6	83,6	1,78	7452
B2	2	4	77,9	1,81	7325
B3	4	6	109	1,68	9240
B4	6	4	125	1,58	9418
B5	4	4	67,9	1,91	6601
B6	6	10	110	1,60	12870
B7	8	8	99,7	1,67	9025
B8	8	10	138	1,55	16520



Şekil 4.15. Yüksek fiber oranına sahip çekme numuneleri gerilme-gerinim grafiği

4.8.2. Eğme testi sonuçları

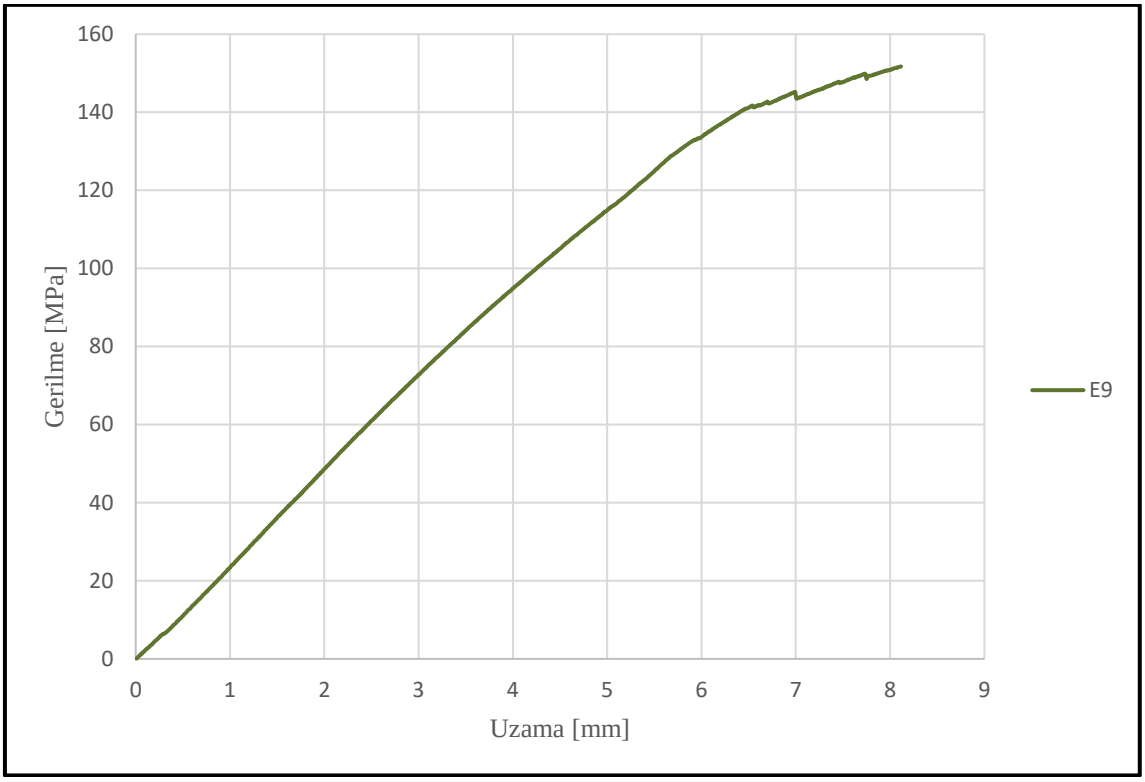
Gerçekleştirilen eğme testleri sonucunda elde edilen maksimum eğme gerilmesi, uzama miktarı ve Young modülü değerleri Çizelge 4.15'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Eğme testleri sonuçları

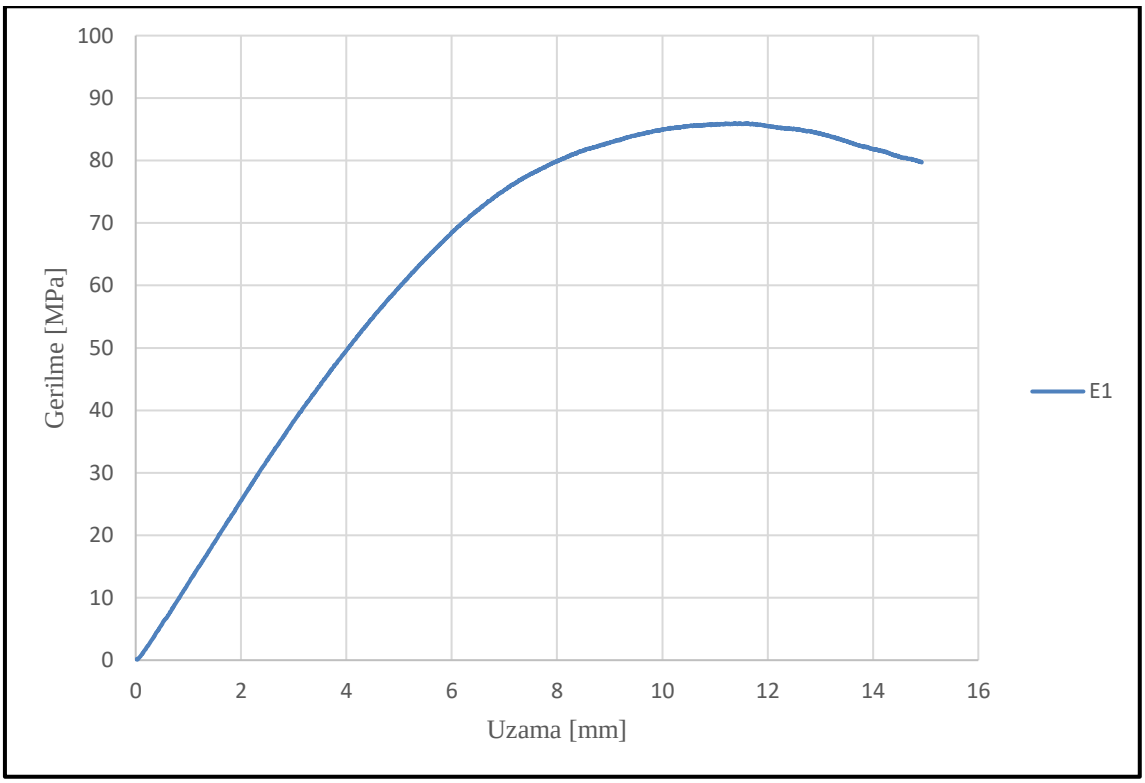
Numune	Maksimum Eğme Gerilmesi [MPa]	Uzama[mm]	Young Modülü [MPa]
E1	88,96	14,88	1862,45
E2	91,05	15,22	1987,20
E3	96,59	14,94	2014,24
E4	98,14	11,86	2068,31
E5	108,25	12,55	2265,37
E6	109,68	11,61	2118,75
E7	125,04	11,50	2498,63
E8	143,92	8,49	3267,97
E9	151,75	8,12	3485,32

En yüksek maksimum gerilmenin elde edildiği E9 numaralı numunede 3 katmanda 5'er halka fiber kullanılmıştır. En düşük uzama miktarı ve maksimum Young modülü de bu numunede elde edilmiştir. E9 numaralı numuneye ait gerilme - uzama grafiği Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

En düşük maksimum gerilmenin elde edildiği numune ise E1 numaralı numunedir. E1 numaralı numunenin gerilme - uzama grafiği Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Bu numune 1 katmanda 3 halka fiber içermektedir. Fiber içermeyen numune ile kıyaslandığında maksimum eğme gerilmesi değeri %20 oranında daha düşüktür. Fiber katkısı sayesinde gelen dayanım artışının, fiber ile matris malzemesi arasındaki kusurlar nedeniyle yaşanan kayıplardan daha düşük olması nedeniyle bir düşüş gözlemlenmiştir. Benzer şekilde E2,E3 ve E4 numaralı numunelerde de saf ULTEM 9085'e kıyasla daha düşük maksimum eğme gerilmesi değerleri gözlemlenmiştir.

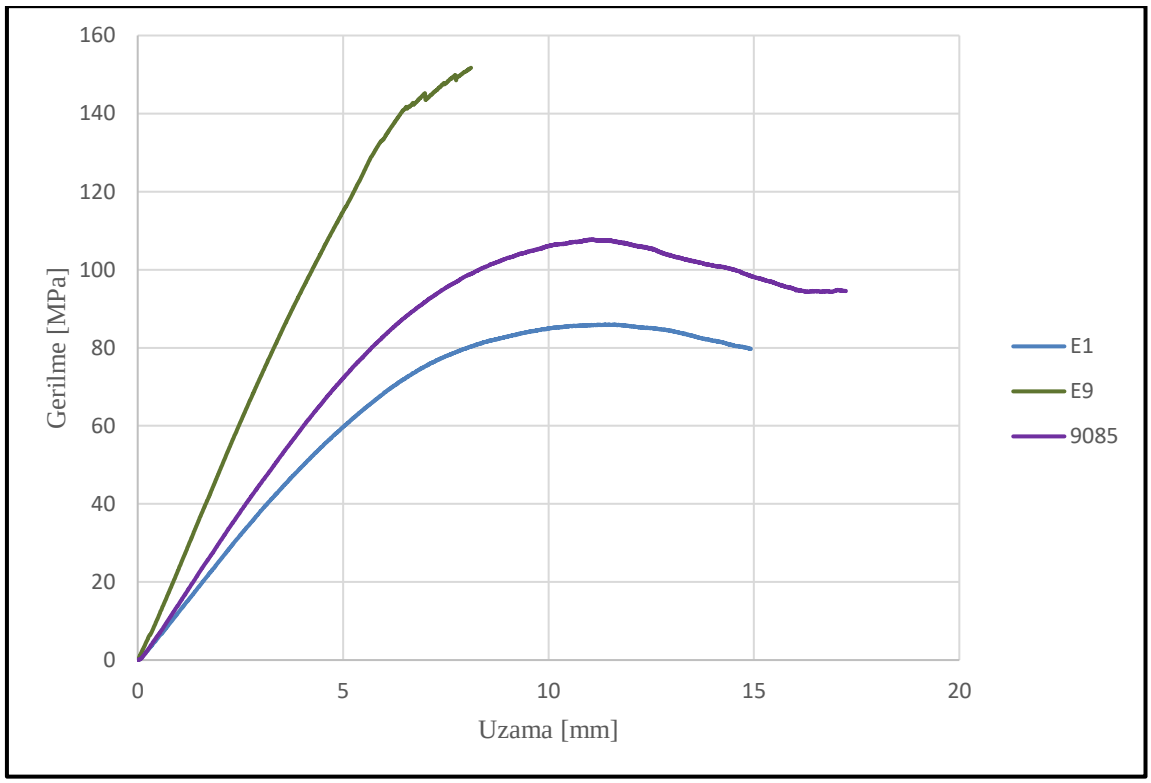


Şekil 4.16. E9 numaralı eğme testi numunesi gerilme - uzama grafiği



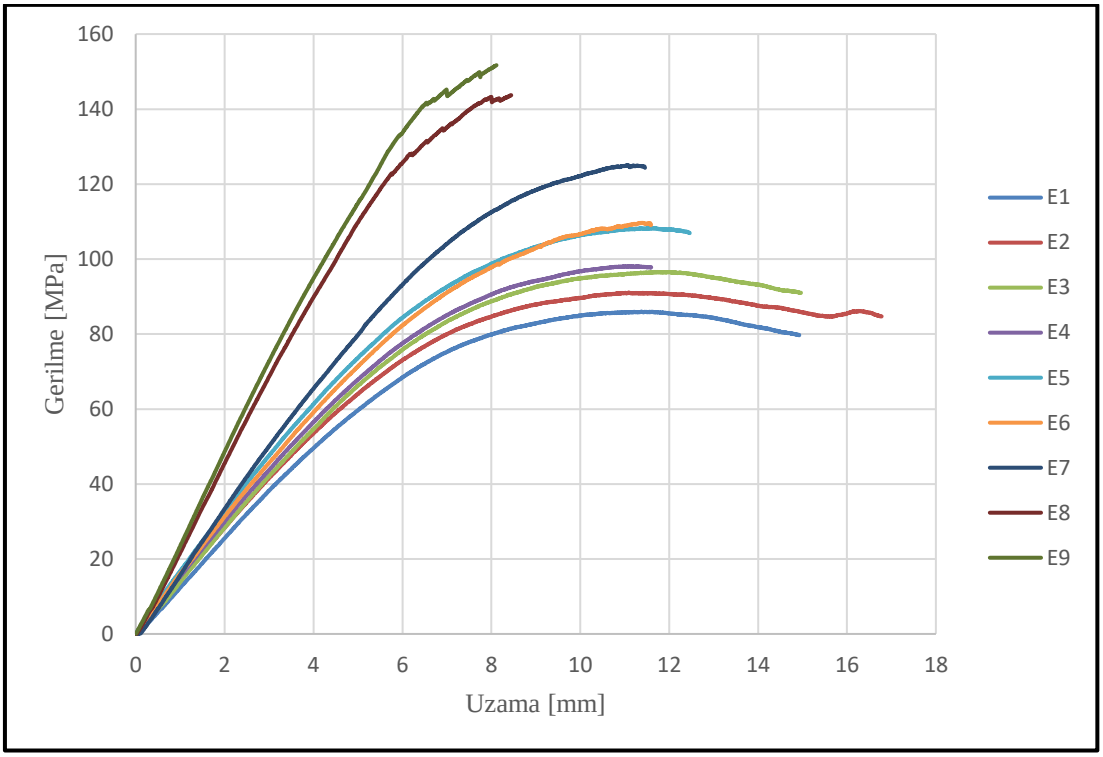
Şekil 4.17. E1 numaralı eğme testi numunesi gerilme - uzama grafiği

En düşük fiber oranına sahip 1 numaralı numune saf ULTEM 9085 numuneye benzer bir davranış gösterirken, en yüksek fiber oranına sahip 9 numaralı numune kırılgan malzemeye yakın bir davranış göstermektedir**.** Şekil 4.18'de E1,E9 ve takviye içermeyen ULTEM 9085 numunelerin gerilme - uzama grafikleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.18. Ultem 9085, E1 ve E9 numaralı numuneler gerilme - uzama grafiği

Numune E8 ve E9'da gözlemlenen ani düşüş bölgeleri yük taşıyan fiberlerde meydana gelen kopmalar nedeniyle oluşmaktadır. Ani düşüşler ardından yaşanan yükselmeler kopan fiberler yerine sağlam fiberlerin yükü taşımaya devam etmesi nedeniyle oluşmaktadır.



Şekil 4.19. Eğme testi numuneleri gerilme - uzama grafiği

Şekil 4.19'da bütün numunelerin gerilme - uzama grafiği bir arada verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere fiber miktarı arttıkça eğrilerin eğimi artmakta ve gerilme artarken uzama azalmaktadır.

4.8.3. Darbe testi sonuçları

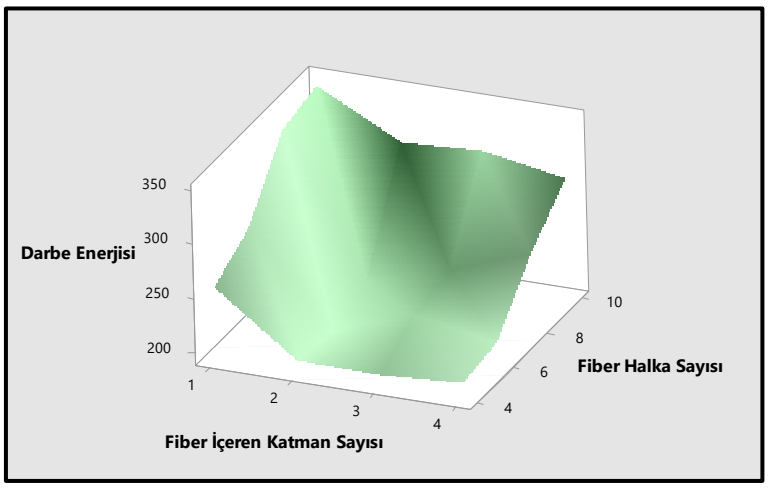
Darbe testi sonucunda numuneler tarafından sönümlenen enerji, yani darbe enerjisi, değerleri "$E_{gerçek}$" çıktısı olarak elde edilmiştir. Elde edilen $E_{gerçek}$ değerleri ve Eş. 4.4 ile hesaplanan J/m cinsinden darbe enerjisi değerleri
Çizelge 4.16'da gösterilmiştir.

Darbe Enerjisi [J/m] = $E_{gerçek}$ [J] / Numune Genişliği [m] (4.4)

Çizelge 4.16. Darbe testi sonuçları

Numune	Darbe Enerjisi [$E_{gerçek}$]	Darbe Enerjisi [J/m]
D1	2,147	169,055
D2	2,195	172,835
D3	2,719	214,094
D4	3,098	243,937
D5	2,099	165,276
D6	2,338	184,094
D7	2,433	191,575
D8	3,239	255,039
D9	2,061	162,283
D10	2,111	166,220
D11	2,195	172,835
D12	3,192	251,339
D13	2,687	211,575
D14	2,910	229,134
D15	3,519	277,087
D16	3,621	347,830

En yüksek darbe enerjisine D16 kodlu 10 katmanda 4'er halka fiber içeren numune ile ulaşılmıştır. Elde edilen bu maksimum değer takviye elemanı içermeyen ULTEM 9085 malzemeye kıyasla yaklaşık olarak 5 kat yüksektir. Şekil 4.20'de parametrelerin darbe enerjisine etkisi grafiği verilmiştir.



Şekil 4.20. Darbe Enerjisi; Fiber İçeren Katman – Fiber Halka Sayısı Grafiği

4.9. Maliyet ve Üretim Süresi Analizleri

4.9.1. Çekme numuneleri üretim süresi ve maliyet analizi

Çekme numunelerinde kullanılan katman kalınlığı, fiber içeren katman sayısı ve fiber halka sayısı parametrelerinin maliyete ve üretim süresine olan etkisi Minitab 18 programı ile Taguchi analizi kullanılarak incelenmiştir. Yapılan analiz sonucunda Şekil 4.211 (a)'da üretim süresi ve Şekil 4.211 (b)'de maliyet ortalamalarına etkileri grafik halinde gösterilmiştir. Çizelge 4.17 ve Çizelge 4.18'de sırası ile ortalama üretim süreleri ve ortalama maliyet değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.17. Çekme testi numuneleri ortalama üretim süreleri

Seviye	Fiber İçeren Katman Sayısı	Fiber Halka Sayısı	Katman Kalınlığı
1	125,00	126,50	180,75
2	135,00	134,00	84,50
3	133,50	132,25	
4	137,00	137,75	
Fark	12,00	11,25	96,25
Sıralama	2	3	1

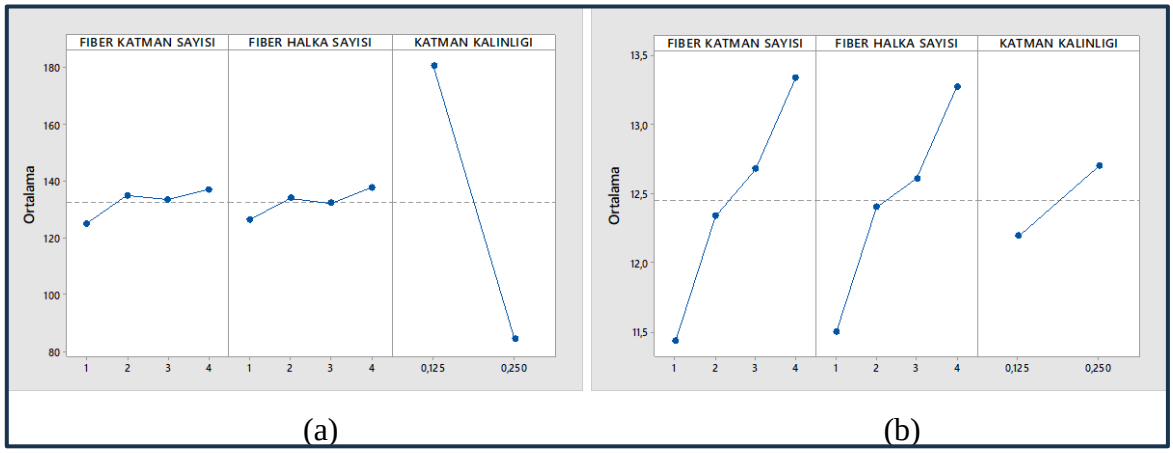
Çizelge 4.18. Çekme testi numuneleri ortalama maliyetler

Seviye	Fiber İçeren Katman Sayısı	Fiber Halka Sayısı	Katman Kalınlığı
1	11,43	11,50	12,20
2	12,34	12,40	12,70
3	12,68	12,61	
4	13,34	13,27	
Fark	1,90	1,77	0,50
Sıralama	1	2	3

Analiz tablolarında verilen fark değerleri Eş. 4.5'e göre hesaplanmıştır. İlgili parametrenin ilgili seviyesi için elde edilen sonuçların ortalama değerlerinin maksimumu ile minimumu arasındaki farktır.

Fark (Δ) = Maksimum Ortalama Değer – Minimum Ortalama Değer (4.5)

Sıralama ise fark değerlerinin büyükten küçüğe sıralanması ile elde edilmiştir. Sıralama değeri ilgili parametrenin etki sıralamasını göstermektedir. Sıralama değeri 1 olan parametre en etkili parametre olarak yorumlanabilir fakat tek başına bu tablolar ile bu yargıya varmak mümkün değildir.

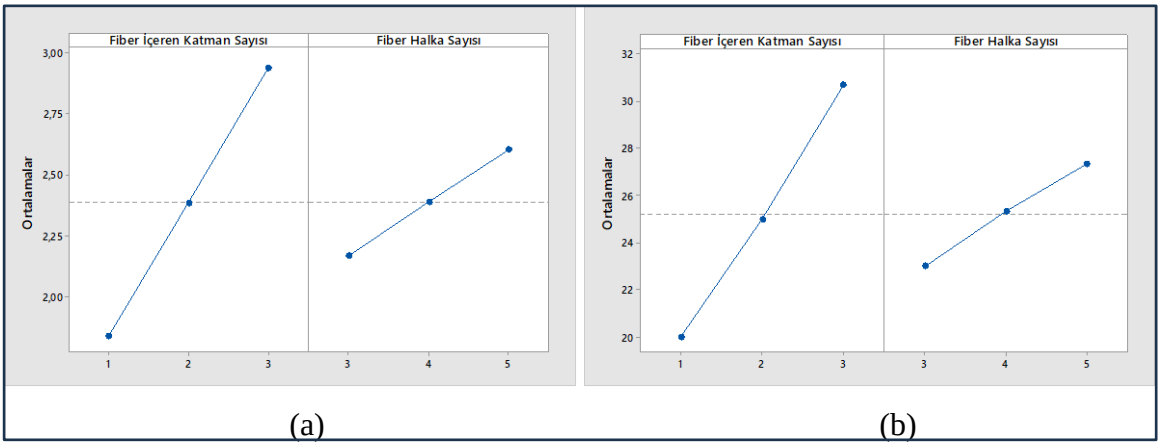


(a) (b)

Şekil 4.21. Çekme testi numuneleri parametreleri ana etki grafiği: (a) üretim süresi, (b) maliyet

4.9.2. Eğme numuneleri üretim süresi ve maliyet analizi

Eğme testi için üretilen numunelerde kullanılan temel iki parametre olan fiber halka sayısı ve fiber içeren katman sayısı parametrelerinin üretim süresi ve maliyet üzerindeki etkisi analiz edilmiştir ve parametrelerin ana etki grafikleri Şekil 4.222'de verilmiştir.



Şekil 4.22. Eğme testi numuneleri parametreleri ana etki grafiği: (a) maliyet, (b) üretim süresi

Şekil 4.22'den de görülebileceği gibi iki grafik birbiri ile neredeyse aynıdır. Bu da üretim süresi ve maliyetin paralel bir şekilde aynı değişkenlere bağlı olarak artıp azaldığını göstermektedir.

Çizelge 4.19'da parametreye bağlı olarak ortalama maliyet ve Çizelge 4.20'de yine parametreye bağlı olarak ortalama üretim süresi değerleri verilmiştir. Fiber içeren katman sayısının maliyete ve üretim süresine etkisinin daha yüksek olduğu çizelgede görülmektedir.

Çizelge 4.19. Eğme testi numuneleri ortalama maliyetler

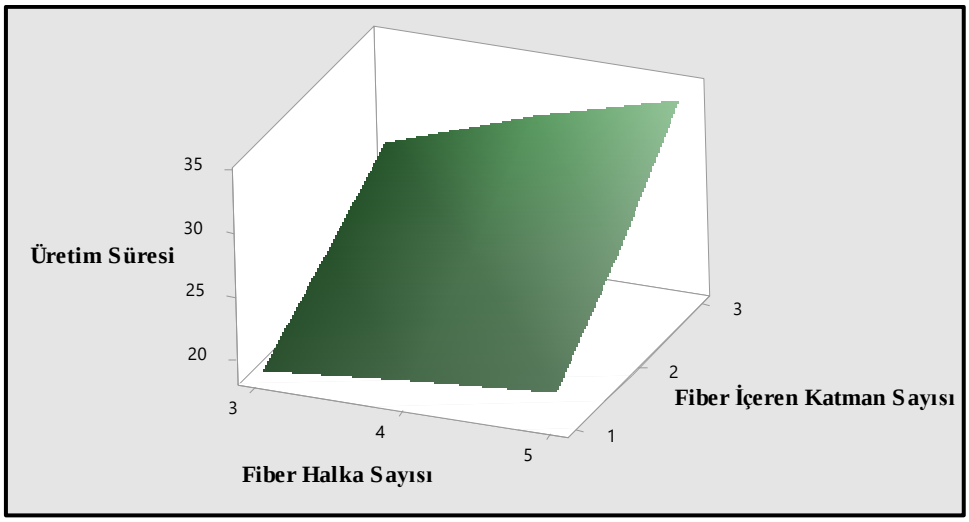
Seviye	Fiber İçeren Katman Sayısı	Fiber Halka Sayısı
1	1,840	2,170
2	2,387	2,390
3	2,937	2,603
Fark	1,097	0,433
Sıralama	1	2

Çizelge 4.20. Eğme testi numuneleri ortalama üretim süreleri

Seviye	Fiber İçeren Katman Sayısı	Fiber Halka Sayısı
1	20,00	23,00
2	25,00	25,33
3	30,67	27,33
Fark	10,67	4,33
Sıralama	1	2

Şekil 4.233'de üretim süresi – fiber halka sayısı; fiber içeren katman sayısı yüzey grafiği verilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi halka sayısı ve katman sayısı ne kadar düşükse üretim süresi o kadar düşük olmaktadır. Maksimum üretim süresine ulaşılan katman sayısı 3 ve halka sayısı 5 parametreleri ile üretilen numunedir. Parametrelere bağlı maliyet yüzey grafiği bu grafik ile aynıdır.

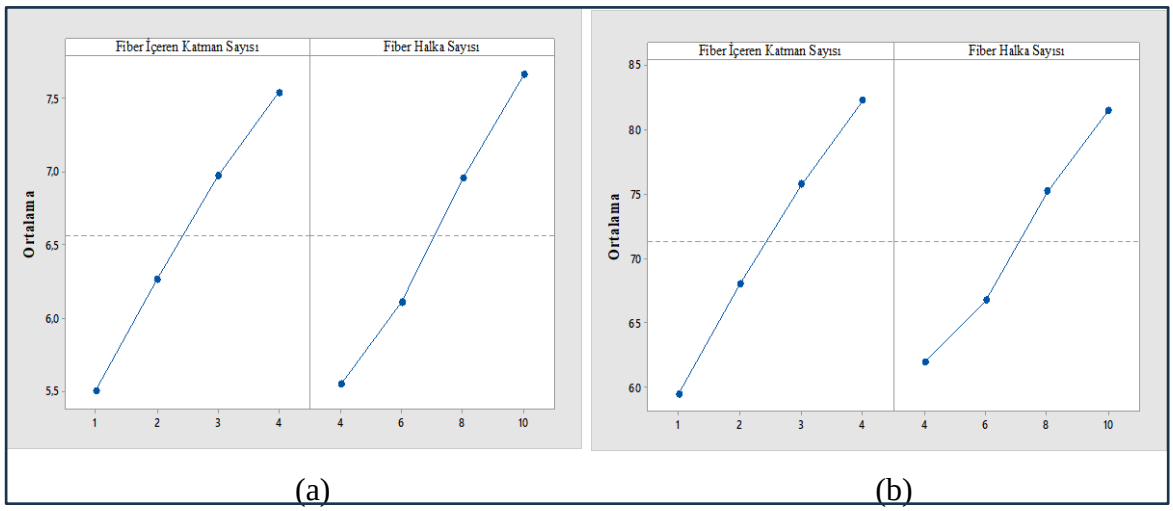
Fiber nozul ile üretim yapılırken makinenin x ve y ekseni hareketleri polimer nozula kıyasla çok daha yavaş olduğu için daha çok fiber içeren katman ve daha çok fiber halkası bulunan numunelerde daha uzun üretim sürelerine neden olmaktadır. Ek olarak fiber miktarı artışı maliyeti arttırdığı için parametrelerdeki artış maliyette de artışa yol açmaktadır. Fiber filament ULTEM 9085 filamente kıyasla yaklaşık 8 kat daha pahalı olduğu için maliyet artışı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.23. Eğme testi numuneleri üretim süresi yüzey grafiği

4.9.3. Darbe numuneleri üretim süresi ve maliyet analizi

Çekme ve eğme testi numunelerinde gerçekleştirilen Taguchi analizi darbe testi numuneleri için de gerçekleştirilmiş ve elde edilen ortalama maliyet ve üretim süreleri Çizelge 4.21 ve Çizelge 4.22'de ; parametrelerin etkisi grafikleri ise Şekil 4.244'te verilmiştir.



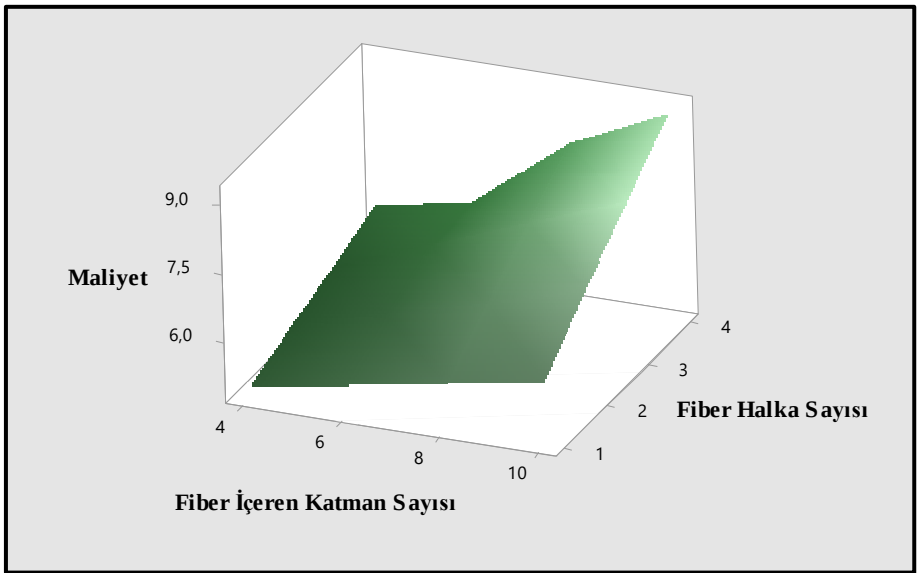
Şekil 4.24. Darbe testi numuneleri parametreleri ana etki grafiği: (a) maliyet, (b) üretim süresi

Çizelge 4.21. Darbe testi numuneleri ortalama üretim süreleri

Seviye	Fiber İçeren Katman Sayısı	Fiber Halka Sayısı
1	59,50	62,00
2	68,00	66,75
3	75,75	75,25
4	82,25	81,50
Fark	22,75	19,50
Sıralama	1	2

Çizelge 4.22. Darbe testi numuneleri ortalama maliyetler

Seviye	Fiber İçeren Katman Sayısı	Fiber Halka Sayısı
1	5,505	5,548
2	6,260	6,107
3	6,970	6,955
4	7,537	7,662
Fark	2,032	2,115
Sıralama	2	1



Şekil 4.25. Darbe testi numuneleri maliyet yüzey grafiği

Şekil 4.255'de darbe testi numuneleri parametrelere bağlı değişen ortalama üretim süresi değerlerinin yüzey grafiği verilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi fiber halka sayısı 6 ve fiber içeren katman sayısı 3 üzerinde üretim sürelerinin artış oranı yükseliş göstermektedir. Bunun nedeni 6 katmanda 4'er halka fiber içeren numuneden 8 katmanda 4'er halka içeren numuneye geçişte fiber artış oranı %68 iken; 6 katmanda 3'er halka fiber içeren numuneden 8 katmanda 3'er halka içeren numuneye geçişte %29 olmasıdır.

4.10. Test Sonuçları Analizleri

Testler sonucu elde edilen değerlerin parametrelere bağlı olarak değerlendirmesinde varyans analizi kullanılmıştır. Varyans analizinde Taguchi modeli %95'lik bir güven aralığında oluşturulmaktadır. Bu nedenle varyans analizinde elde edilen P değeri 0,05'ten küçük olan parametrelerin test sonucu elde edilen değer üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

4.10.1. Çekme testi sonuçları analizi

Gerçekleştirilen çekme testi sonucunda elde edilen gerilme, gerinim ve elastisite modülü değerleri Minitab 18 programında analiz edilmiştir. Çizelge 23'de elde edilen maksimum gerilme çıktısı için yapılan varyans analizi gösterilmiştir.

Çizelge 4.23. Çekme testlerinde elde edilen gerilim çıktısı için varyans analizi

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Fiber Katman Sayısı	3	446,30	31,37%	148,76	4,53	0,039
Fiber Halka Sayısı	3	548,80	38,57%	182,92	5,58	0,023
Katman Kalınlığı	1	165,10	11,61%	165,12	5,03	0,055
Hata	8	262,50	18,45%	32,81		
Toplam	15	1422,60	100,00%			

Çizelge 4.23'de gösterilen P-değerleri incelendiğinde fiber katman sayısı ve fiber halka sayısı parametrelerinin test sonucu elde edilen gerilme değerleri üzerinde etkili olduğu

anlaşılmaktadır. 0,055 değeri ile katman kalınlığı parametresi, belirlenen güven aralığı değerinin dışına çıkmaktadır. 0,005 fark ile bu aralığın dışına çıktığı için yine de değerlendirmeye alınmıştır.

%38,57 katkı oranı ile gerilme üzerindeki en etkili parametre fiber halka sayısı olarak hesaplanmıştır. İkinci etkili parametre ise %31,37 katkı oranı ile fiber katman sayısıdır. %11,61 ile en az katkı oranına sahip ve sonuçlar üzerinde en az etkisi olan parametre katman kalınlığı olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.24'de çekme testleri sonucu elde edilen gerinim değerleri için varyans analizi gösterilmiştir. Gerilme çıktısı için yapılan varyans analizi tablosunda olduğu gibi P-değeri incelendiğinde %36,74 katkı oranı ile en etkili parametrenin fiber halka sayısı olduğu görülmektedir. Gerilme çıktısı analizinin aksine katman kalınlığı parametresinin P-değeri güven aralığı içinde ve parametreler içinde en düşük değere sahiptir. Bu değerler gösteriyor ki katman kalınlığı parametresinin gerinim üzerindeki etkisi gerilme üzerindeki etkisine göre daha yüksektir.

Çizelge 4.24. Çekme testlerinde elde edilen gerinim çıktısı için varyans analizi

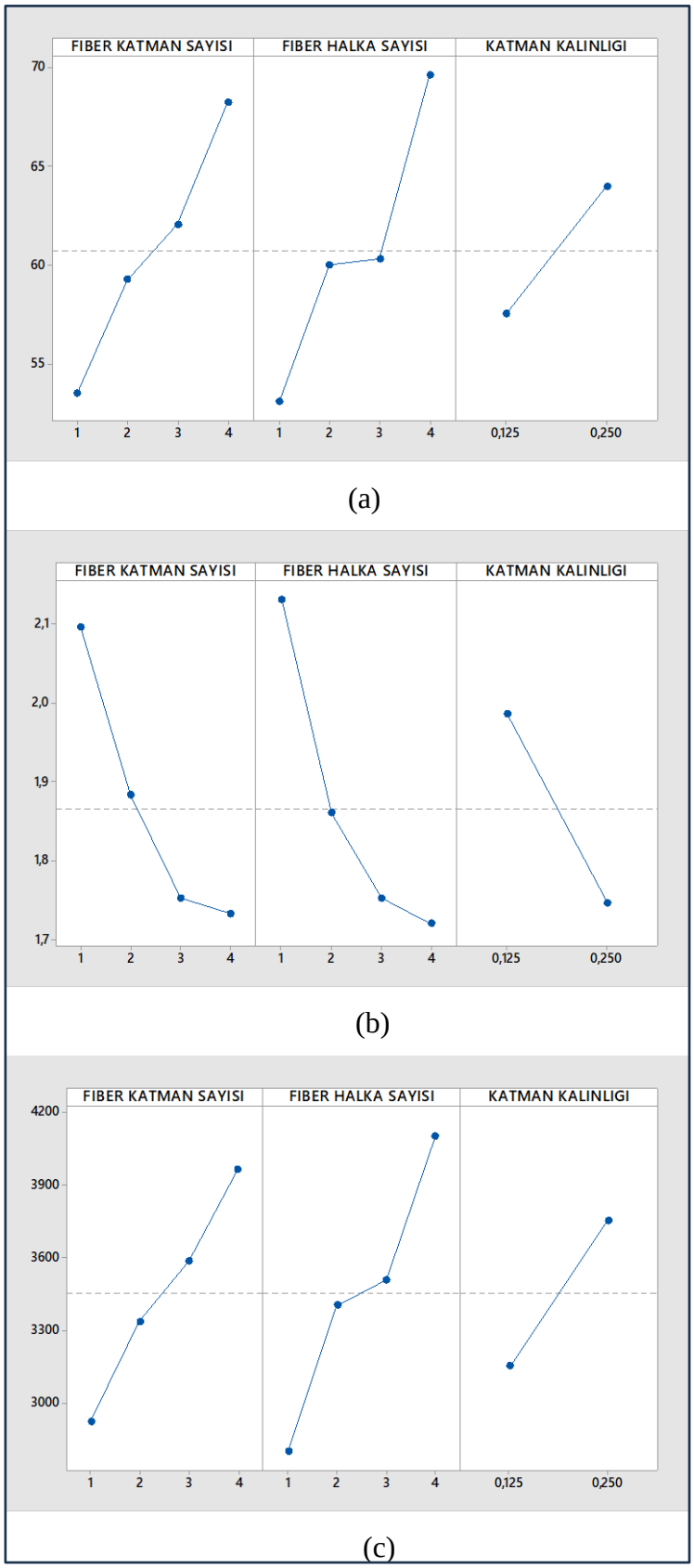
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Fiber Katman Sayısı	3	0,3337	29,49%	0,11122	5,78	0,021
Fiber Halka Sayısı	3	0,4157	36,74%	0,13857	7,20	0,012
Katman Kalınlığı	1	0,2280	20,15%	0,22801	11,84	0,009
Hata	8	0,1540	13,61%	0,01925		
Toplam	15	1,1314	100,00%			

Çizelge 4.25'de çekme testi sonucu elde edilen elastisite modülü çıktısının varyans analizi gösterilmiştir. Elastisite modülüne en çok etki eden parametre %44,34 katkı oranı ile fiber halka sayısı olduğu görülmektedir. Gerilme ve gerilim değerlerinde olduğu gibi en düşük etkiye sahip parametre ise katman kalınlığıdır.

Çizelge 4.25. Çekme testlerinde elde edilen elastisite modülü çıktısı için varyans analizi

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Fiber Katman Sayısı	3	2283943	29,84%	761314	11,44	0,003
Fiber Halka Sayısı	3	3393543	44,34%	1131181	16,99	0,001
Katman Kalınlığı	1	1443158	18,86%	1443158	21,68	0,002
Hata	8	532587	6,96%	66573		
Toplam	15	7653231	100,00%			

Şekil 4.266'da gerilme, gerinim ve elastisite modülü çıktıları için yapılan Taguchi analizi sonucu elde edilen grafikler gösterilmiştir. Grafiklerde test sonucu elde edilen çıktıların ortalama değerleri için parametre etkileri gösterilmektedir. Gerilme değeri için oluşturulan grafik incelendiğinde ortalama değerlerin fiber içeren katman sayısı ve fiber halka sayısı parametrelerinin 2 ve 3 değerleri civarında bulunduğu söylenebilir. Gerinim değerleri için oluşturulan grafik incelendiğinde ise iki parametrenin 2. Seviyesi civarında bir ortalama mevcuttur ve dağılım gerilme değerine kıyasla farklıdır. Elastisite modülü değerleri için oluşturulan grafik gerilme için oluşturulan grafik ile yakınlık göstermektedir.



Şekil 4.26. Çekme testi çıktıları için Taguchi analizi grafiği: (a) gerilme, (b) gerinim, (c) elastisite modülü

4.10.2. Eğme testleri sonuçları analizi

Eğme testleri sonucunda elde edilen maksimum eğme gerilmesi, maksimum gerilmedeki uzama ve Young Modülü çıktıları Minitab 18 programında değişken analizi yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Çizelge 4.26'da değişkenlerin maksimum eğme gerilmesi değeri üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

Çizelge 4.26. Eğme testlerinde elde edilen maksimum eğme gerilmesi çıktısı için varyans analizi

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Fiber Katman Sayısı	2	3697,20	88,35%	1848,62	60,74	0,001
Fiber Halka Sayısı	2	365,60	8,74%	182,78	6,01	0,062
Hata	4	121,70	2,91%	30,44		
Toplam	8	4184,50	100,00%			

Çizelge 4.26'da gösterildiği gibi fiber katman sayısı parametresinin maksimum eğme gerilmesi değeri üzerindeki katkı oranı %88,35'dir. Fiber halka sayısı %8,74 katkı oranına sahiptir fakat P değeri 0,062 olduğu için güven aralığının dışında kalmaktadır. Bu nedenle fiber halka sayısı parametresi maksimum eğme gerilmesi çıktısı üzerinde etkili değildir.

Çizelge 4.27. Eğme testlerinde elde edilen maksimum eğme gerilmesindeki uzama çıktısı için varyans analizi

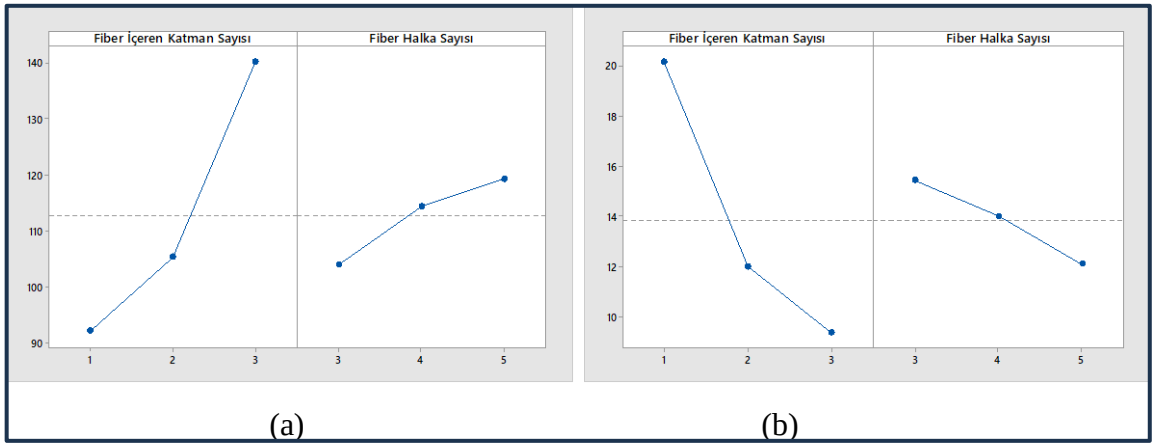
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Fiber Katman Sayısı	2	190,61	86,86%	95,306	31,89	0,003
Fiber Halka Sayısı	2	16,88	7,69%	8,442	2,83	0,172
Hata	4	11,95	5,45%	2,988		
Toplam	8	219,45	100,00%			

Çizelge 4.27‘de maksimum eğme gerilmesindeki uzama çıktısı için elde edilen analiz verileri gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en etkili parametre %86,86 ile fiber içeren katman sayısıdır. Gerilme değerinde olduğu gibi, uzama çıktısı için yapılan analiz sonucunda da fiber halka sayısı parametresi için P-değeri güven aralığı dışında kaldığı için çıktı üzerinde etkili bir parametre değildir.

Çizelge 4.28. Eğme testlerinde elde edilen Young Modülü çıktısı için varyans analizi

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Fiber Katman Sayısı	2	2184697	79,26%	1092348	15,54	0,013
Fiber Halka Sayısı	2	290411	10,54%	145205	2,07	0,242
Hata	4	281219	10,20%	70305		
Toplam	8	2756327	100,00%			

Çizelge 4.28‘de Young modülü çıktısı için yapılan varyans analizi sonuçları gösterilmiştir. Gerilme ve uzama çıktılarında olduğu gibi Young modülü değeri için de fiber halka sayısı parametresinin P-değeri güven aralığı dışında kaldığı için bu parametre çıktı üzerinde etkili değildir. Fiber katman sayısı parametresinin ise katkı oranı %79,26 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.27’de parametrelerin ana etki değerleri grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Eğme testi numuneleri parametre ana etki değerleri grafiği: (a) maksimum eğme gerilemesi, (b) uzama

4.10.3. Darbe testleri sonuçları analizi

Darbe testlerinden elde edilen çıktı darbe enerjisidir. Fiber içeren katman sayısı ve fiber halka sayısı parametrelerinin darbe enerjisi üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve elde edilen çıktılar Çizelge 4.29'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.29. Darbe testleri sonucu elde edilen darbe dayanımı çıktısı varyans analizi

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Katkı Oranı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Fiber Katman Sayısı	3	9365	34,75%	3121,50	15,75	0,001
Fiber Halka Sayısı	3	15802	58,63%	5267,30	26,58	0,000
Hata	9	1783	6,62%	198,20		
Toplam	15	26950	100,00%			

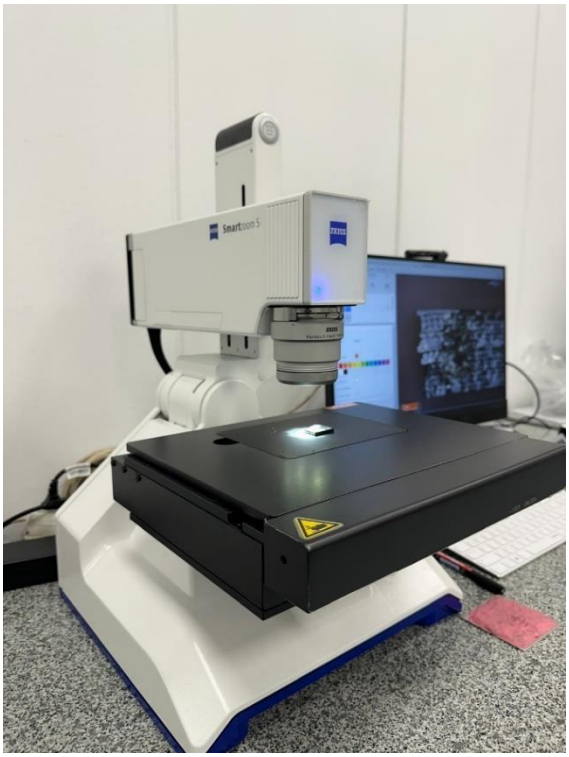
Çizelge 4.19'da görüldüğü gibi P değeri fiber halka sayısı için 0 ve fiber katman sayısı için 0,001 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler neticesinde iki parametrenin de darbe enerjisi çıktısı üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Fiber halka sayısı %58,63 katkı oranı ile en etkili parametre olarak hesaplanmıştır. Fiber katman sayısı ise %34,75 katkı oranına sahiptir.

4.11. Kırılma Yüzeyi ve Mikroyapı İncelemesi

Gerçekleştirilen testlerin ardından numunelerin kırılma davranışları ve kırılma yüzeyleri Zeiss Smartzoom 5 (Resim 4.10) mikroskobu ile incelenmiştir. Çizelge 4.30'da mikroskobun teknik özellikleri gösterilmiştir.

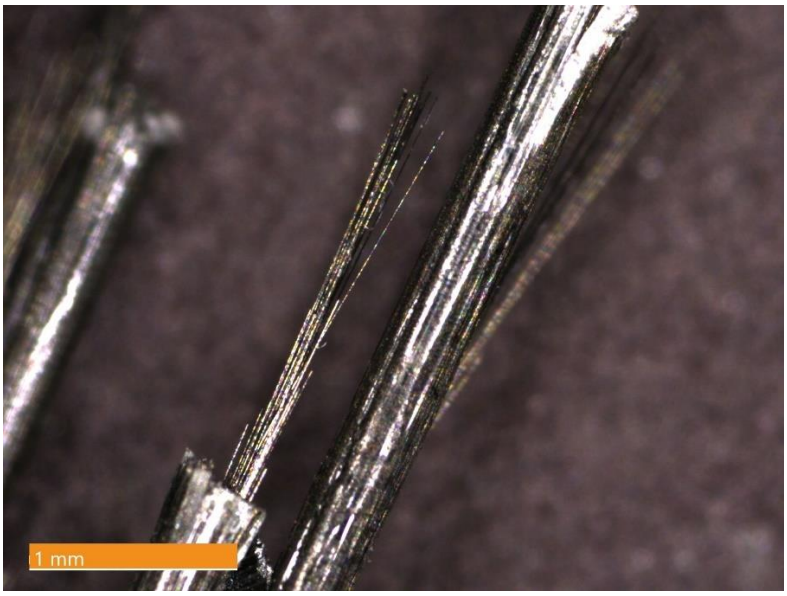
Çizelge 4.30. Zeiss Smartzoom 5 teknik özellikler [66]

Maksimum Çözünürlük	0,56 µm
Maksimum Büyütme	2020x
Sensör Boyutu	1 inç, 4.2 megapiksel
Toplam Piksel	2048 x 2048

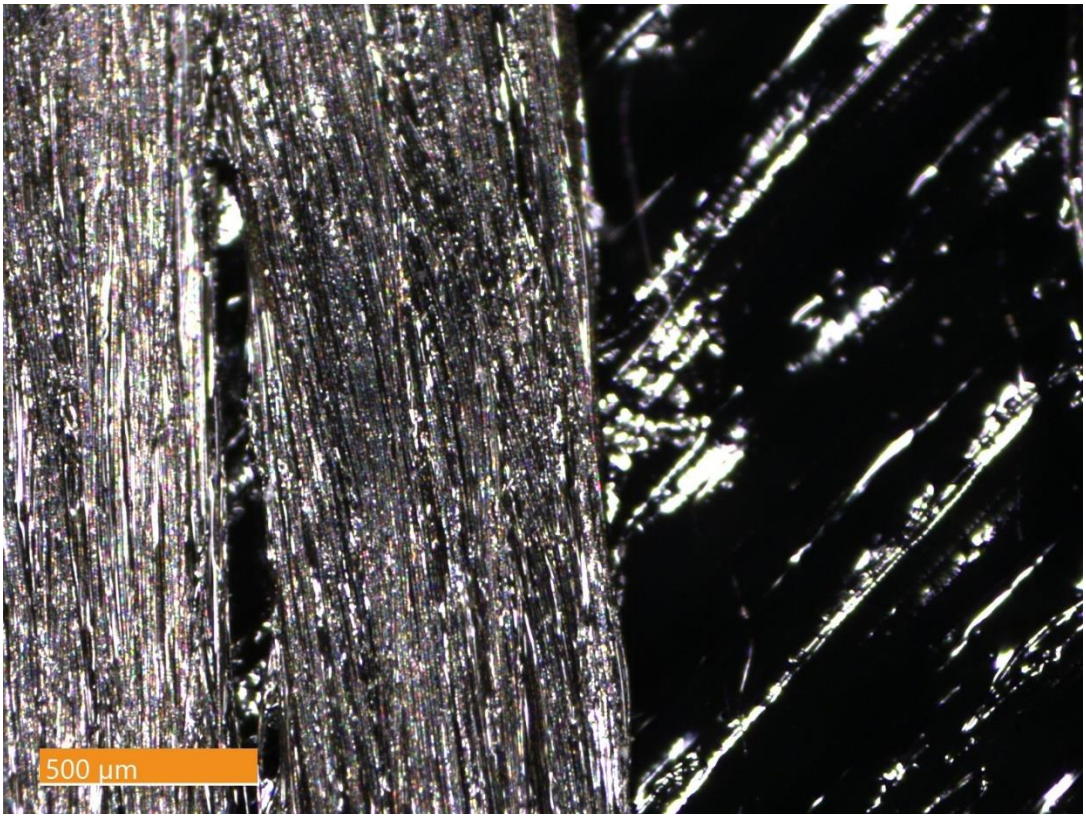


Resim 4.10. Zeiss Smartzoom 5 Mikroskop

Resim 4.11'de sürekli fiber takviye malzemesi olan karbon fiber filamentin mikroskop görüntüsü verilmiştir. Dışındaki matris malzemesinden sıyrılmış halde fiber lifleri gözlemlenmiştir. Bir filamentte 1000 adet karbon lif bulunmaktadır. Resim 4.12'de ise ekstrüzyon yapılmış karbon fiberin mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Resim 4.11. Karbon fiber filament mikroskop görüntüsü

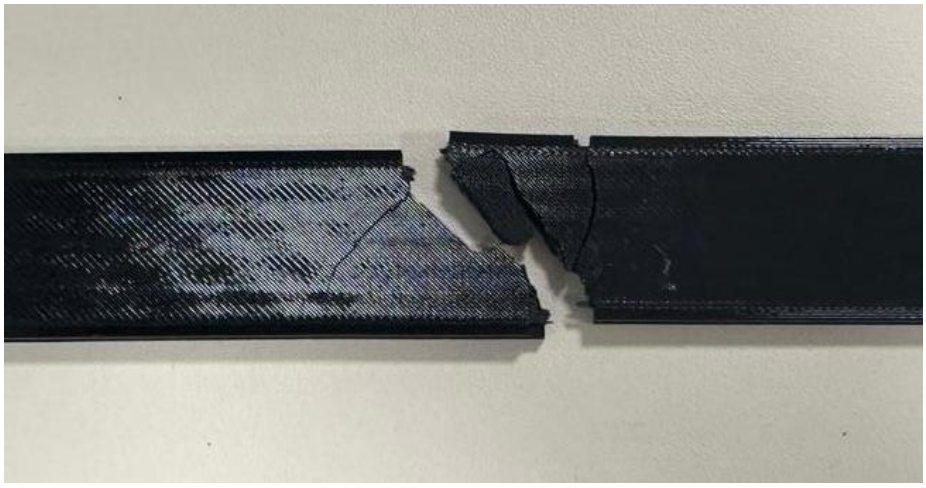


Resim 4.12. Ekstrüde edilmiş karbon fiber mikroskop görüntüsü

Resim 4.12'de görüldüğü gibi filament halinde silindirik bir yapıya sahip olan karbon fiber ekstrüzyon sırasında nozulun baskısı ile yassı bir şekil almakta ve bir önceki katmanda bulunan ULTEM 9085 malzeme ile birleşmesi sağlanmaktadır. Siyah olarak görünen bölgeler bir önceki katmandaki ULTEM 9085 malzemedir.

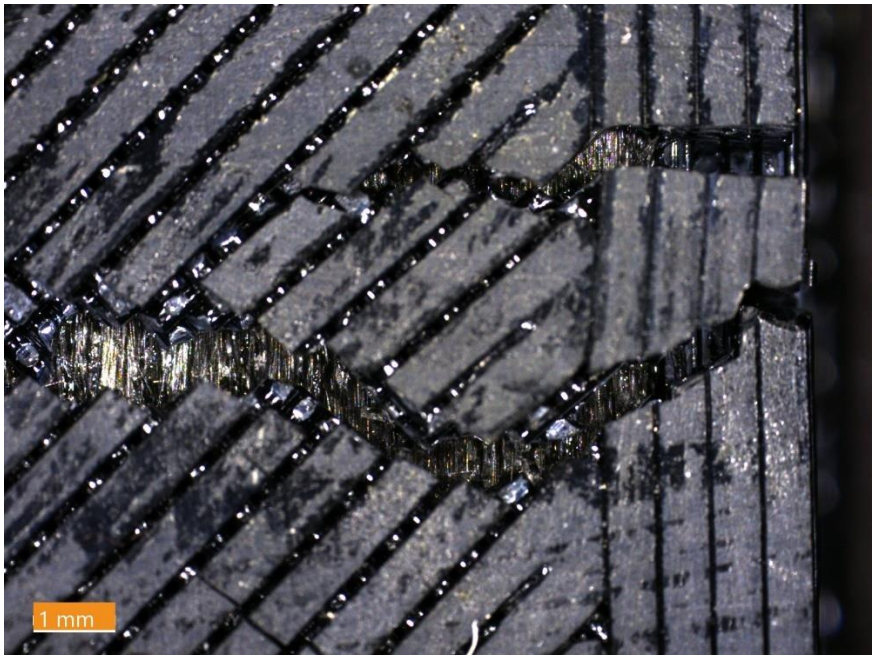
4.11.1. Çekme testi numuneleri kırılma yüzeyi ve mikroyapı incelemesi

Çekme testleri sonucunda tahribata uğrayan numunelerin kırılma davranışı incelendiğinde, kırılgan malzeme özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir. Gerilme – Gerinim grafiklerinden de elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında numunelerin boyun vermeden direkt kırıldığı gözlemlenmiştir.



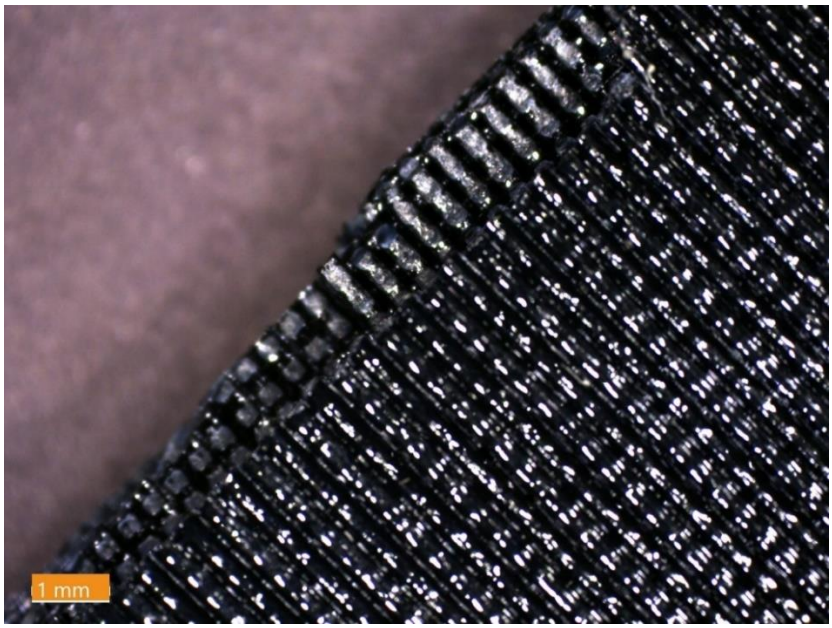
Resim 4.13. Tahribata uğramış 8 numaralı çekme numunesi

Resim 4.13'de 8 numaralı çekme numunesinin kopma davranışı gösterilmiştir. Parçalı bir şekilde kopma gerçekleşmiştir. Sürekli fiber takviyesine aktarılan kuvvete dayanıp numuneyi bir arada tuttuğu esnasında ULTEM 9085 matriste birden çok bölgede kırılmaların gerçekleştiği gözlemlenmiştir. 2 katmanda 4'er halka fiber içeren bu numunede yaşanan kırılmanın mikroskop görüntüsü Resim 4.14'te gösterilmiştir. Mikroskop görüntüsünden de anlaşılacağı gibi fiber ile Ultem polimer katmanlar arasında ayrılma yaşanmıştır.

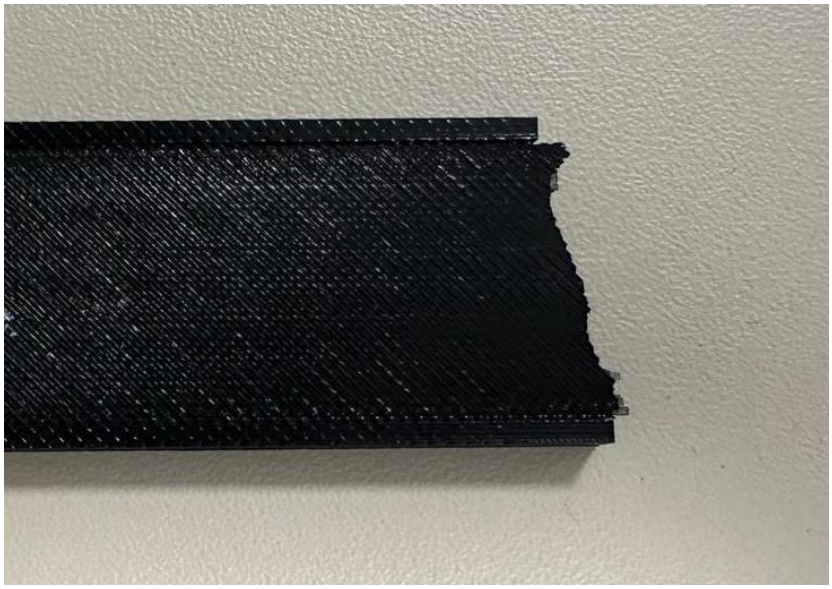


Resim 4.14. 8 numaralı çekme numunesi mikroskop görüntüsü

Takviye malzemesi içermeyen ULTEM 9085 malzemesinin kırılma davranışı Resim 4.15'de gösterilmiştir. Önceki bölümlerde anlatılan tarama açısı değeri varsayılan olarak +/-45° olarak üretilen numunede kopma yüzeyindeki açı 45°'dir. Düşük fiber yoğunluğuna sahip numunelerde de kırılma yüzeyinde açılar benzer özellikler gösterir. Yüksek fiber oranına sahip numunelerde ise kırılma yüzeyinde açı ,fiberlerin oryantasyonu ve bu fiberlerin yükü taşıması nedeniyle, çekme yönüne diktir.

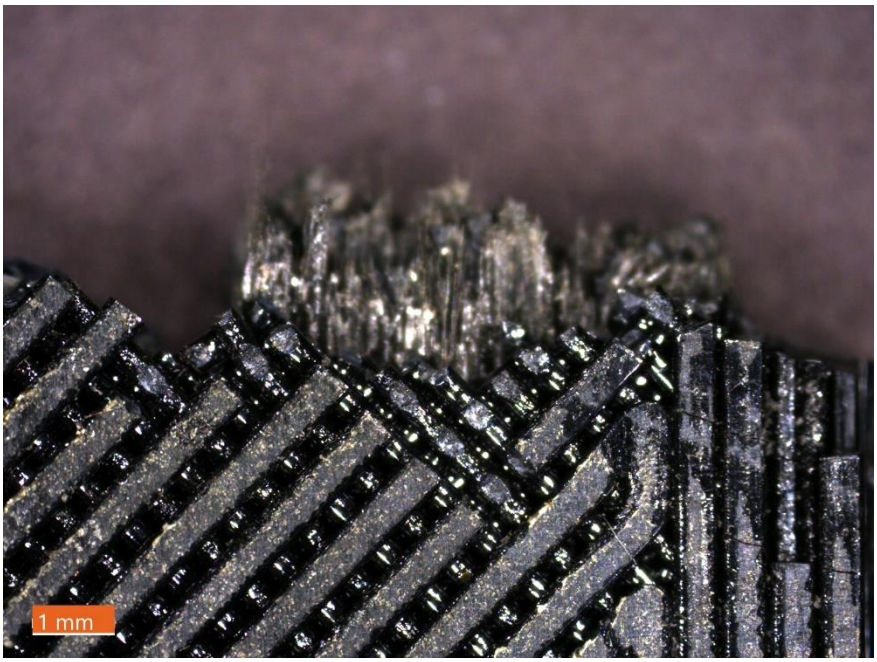


Resim 4.15. Takviyesiz ULTEM 9085 çekme numunesi mikroskop görüntüsü



Resim 4.16. 16 numaralı çekme numunesi kırılma yüzeyi gösterimi

Resim 4.16'da gösterilen numune 4 katmanda 4'er halka fiber içermektedir. Çekme numuneleri arasında en yüksek fiber hacim oranlarından birisine sahip olan 16 numaralı bu numunede kopma ULTEM 9085 numuneye kıyasla çok daha düşük açılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Resim 4.17'de bu numunenin mikroskop görüntüsü verilmiştir. Fiber ile polimer matris arasındaki kırılma farkı bu görüntüde gösterilmiştir.



Resim 4.17. 16 numaralı çekme numunesi mikroskop görüntüsü

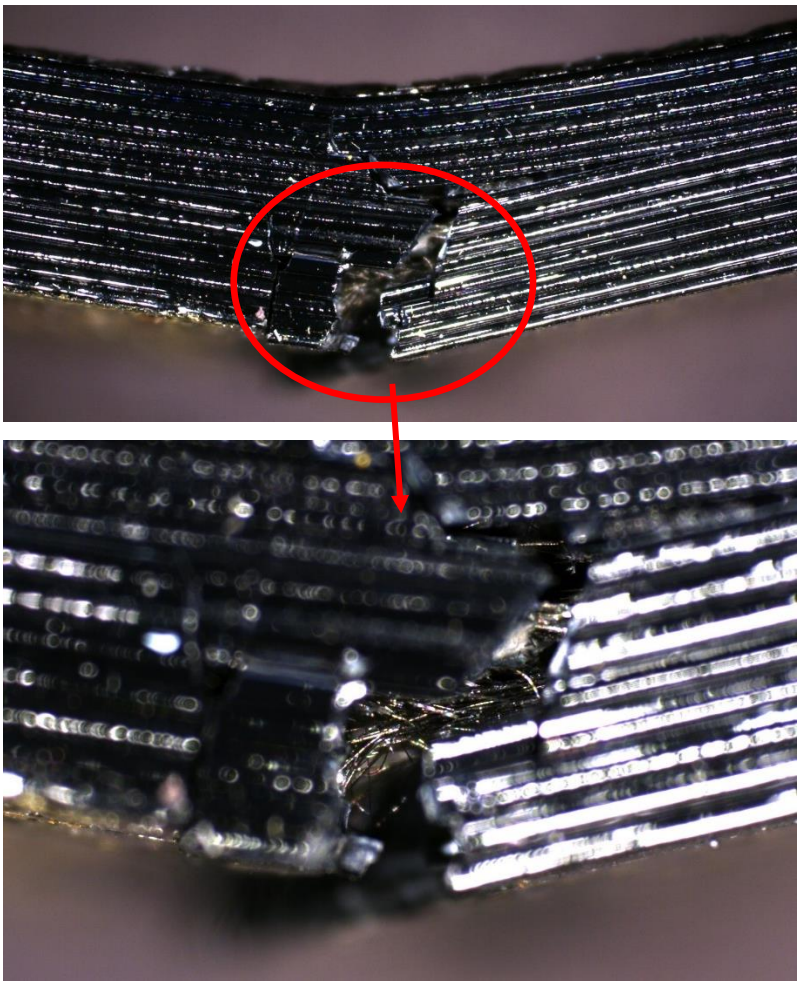
4.11.2 Eğme testi numuneleri kırılma yüzeyi ve mikroyapı incelemesi

Eğme testleri sonucunda yapılan ilk değerlendirmede düşük fiber oranına sahip numunelerin tahribata uğramadığı gözlemlenmiştir. Bu davranış katkısız ULTEM 9085 numunedekine benzerdir. Tahribata uğramayan Numune E1,E2 ve E3 tek katmanda sırası ile 3,4 ve 5 halka fiber içermektedir. Numuneler kırılmadan eğilmeye devam ettiği için test esnasında okunan kuvvet değerinde belirli bir miktar düşüş gözlendikten sonra testler durdurulmuştur. Resim 4.18'de eğme testi sonrasında tahribata uğramayan düşük fiber oranına sahip numune örneği gösterilmiştir.

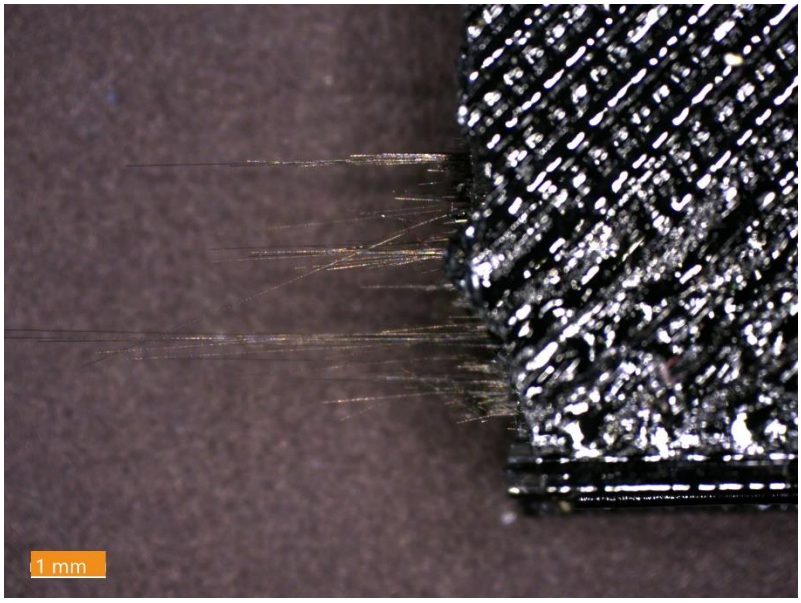


Resim 4.18. Eğme testlerinde tahribata uğramayan E2 kodlu numune

Resim 4.19'da E8 numunesinin mikroskop görüntüsü gösterilmiştir. Eğme testi sırasında çekmeye maruz kalan bölgeden kırılmanın yaşandığı gözlemlenmektedir. Kuvvetin uygulandığı yüzeyde basma ve alt yüzeyde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Çekme gerilmelerinin oluştuğu alt yüzeyde resimde gösterildiği gibi kırılmalar yaşanmıştır.



Resim 4.19. E8 kodlu darbe numunesi mikroskop görüntüsü



Resim 4.20. E9 kodlu eğme testi numunesi mikroskop görüntüsü

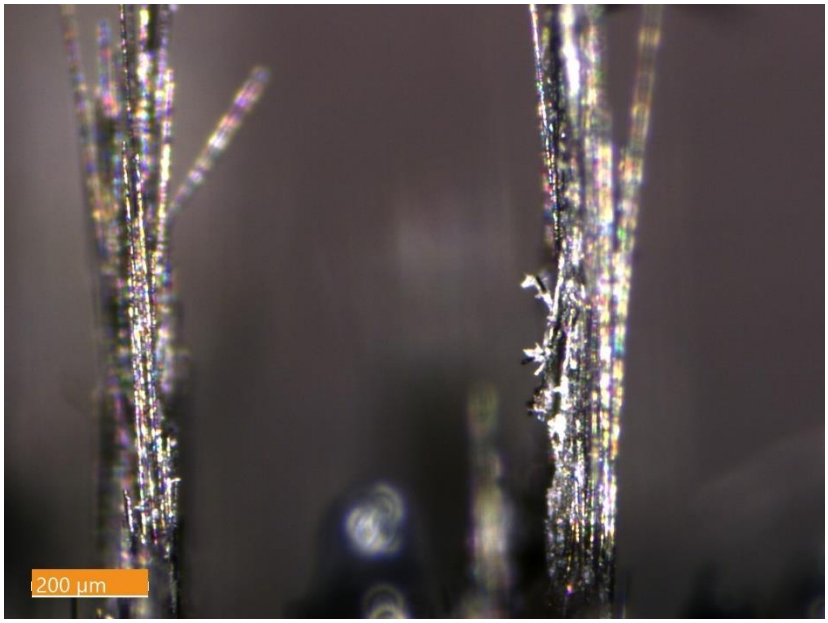
Resim 4.20'de E9 kodlu eğme testi numunesinin mikroskop görüntüsü verilmiştir. Fiber ile ULTEM 9085 katmanlar arasında ayrılmanın yanı sıra fiber lifleri de matris malzemeden ayrılmıştır. Diğer numunelerde de kırılma davranışları benzer şekilde gözlemlenmiştir.

4.11.3 Darbe testi numuneleri kırılma yüzeyi ve mikroyapı incelemesi

Resim 4.21'de bazı darbe testi numunelerin test sonrası durumları gösterilmiştir. Darbe testleri sonucunda tahribata uğrayan numunelerde çentik hizasında düz kırılmalar gözlemlenmiştir. Numune üretilirken kullanılan matris malzemesi tarama açısı değer +/- 45° olması rağmen çekme testinde gözlenen açılı kırılmalar burada gözlemlenmemiştir.

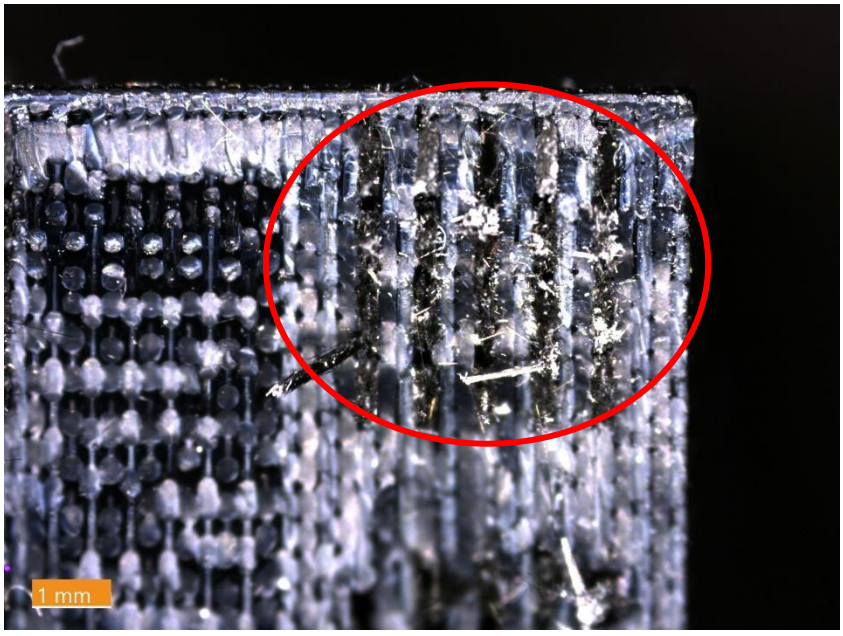


Resim 4.21. Darbe testi sonrası tahribata uğrayan numuneler



Resim 4.22. D8 kodlu numune mikroskop görüntüsü

Resim 4.22'de D8 kodlu numunenin mikroskop görüntüsü verilmiştir. Darbe etkisi ile fiber malzemenin ULTEM 9085 katmandan ayrılma davranışı çekme testi numunelerinden daha belirgin ve bazı eğme testi numunelerine benzerdir. Resim 4.23'de D4 kodlu numunenin mikroskop görüntüsünde kırmızı ile işaretli bölge fiber içeren katmanlardır. Numunenin orta kısmında görünen desen düz kırılma yaşanması fakat tarama açısının 45° olması nedeniyle oluşmuştur.



Resim 4.23. D4 kodlu numune mikroskop görüntüsü

4.12. FTIR Testi

Şekil 4.28'de gösterilen Shimadzu IRTracer-100 test cihazı kullanılarak Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) testi gerçekleştirilmiştir. Tarama sayısı 32 ve çözünürlük 4 cm^{-1} olarak ayarlanmıştır. Testler 400 – 4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucu elde edilen grafikler Şekil 4.29, 4.30, 4.31 ve 4.32'de gösterilmiştir.

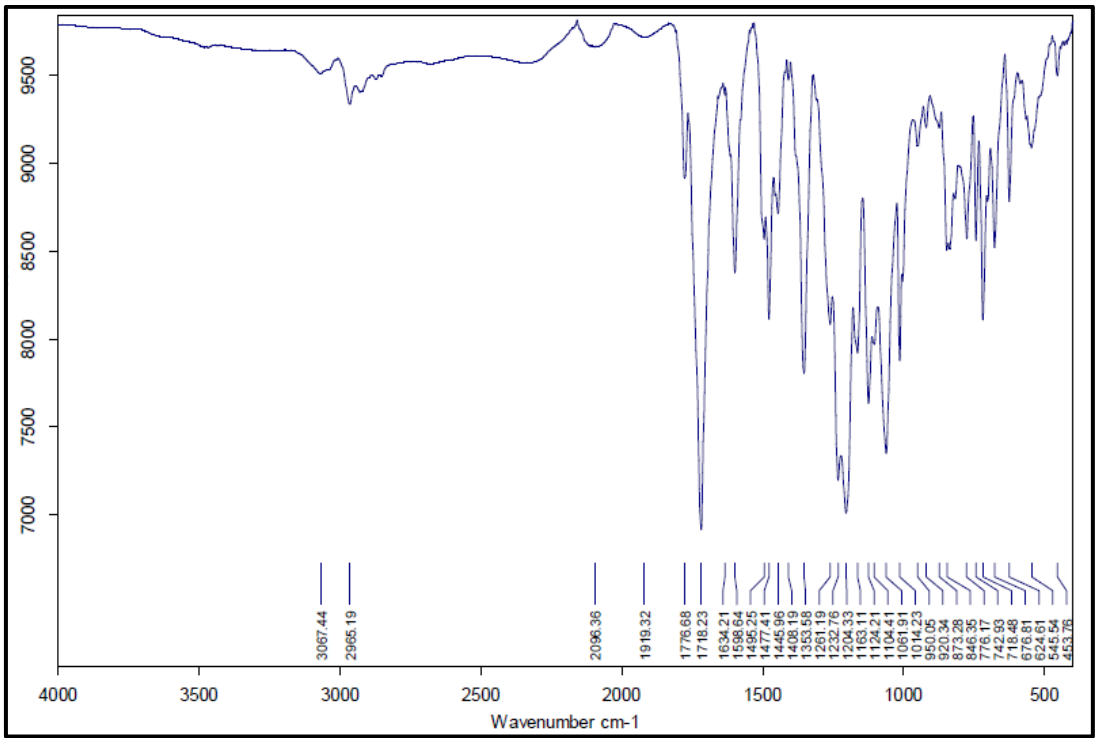


Şekil 4.28. Shimadzu IRTracer-100 test cihazı

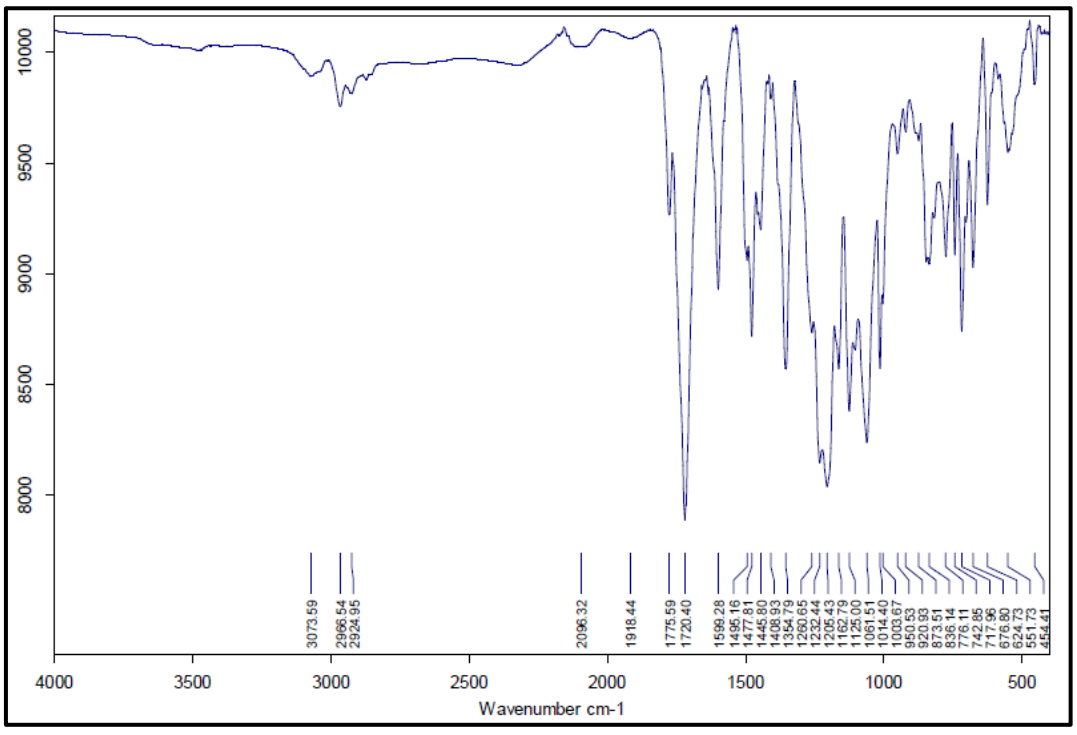
FTIR testleri kapsamında 4 farklı numune kullanılmıştır. Bu numuneler; ULTEM 9085 filament formu, ULTEM 9085 filament kullanılarak üretilmiş katı blok, ULTEM 9085 ile kullanılan karbon fiber malzemenin filament formu ve ULTEM 9085 filament ve karbon fiber filament kullanılarak üretilmiş olan katı bloktur.

Sonuçlara taban çizgisi (baseline) düzeltmesi ve yumuşatma (smoothing) yapılmıştır. 2300-1800 cm^{-1} aralığında görünür olan küçük peakler ATR kristaline ait olup numune için değerlendirilmemiştir. 1500 cm^{-1} altında kalan bölge ise "fingerprint" bölgesi olarak değerlendirilip dikkate alınmamıştır [67].

ULTEM 9085 malzemesi PEI ve PC polimerlerinin karışımı ile elde edilen bir malzemedir. ULTEM 9085'in IR spektrumlarının fonksiyonel grup analizinin sonuçları her iki polimerde de bulunan C - H bağlarından kaynaklanan katkıları ortaya koymaktadır. Ayrıca, her iki polimerde de bulunan çift C = O, çift C = C ve tek C - O bağlarından güçlü bir katkı vardır. Tek C-N bağı sadece PEI'de mevcuttur [68].



Şekil 4.29. ULTEM 9085 numune FTIR test sonucu

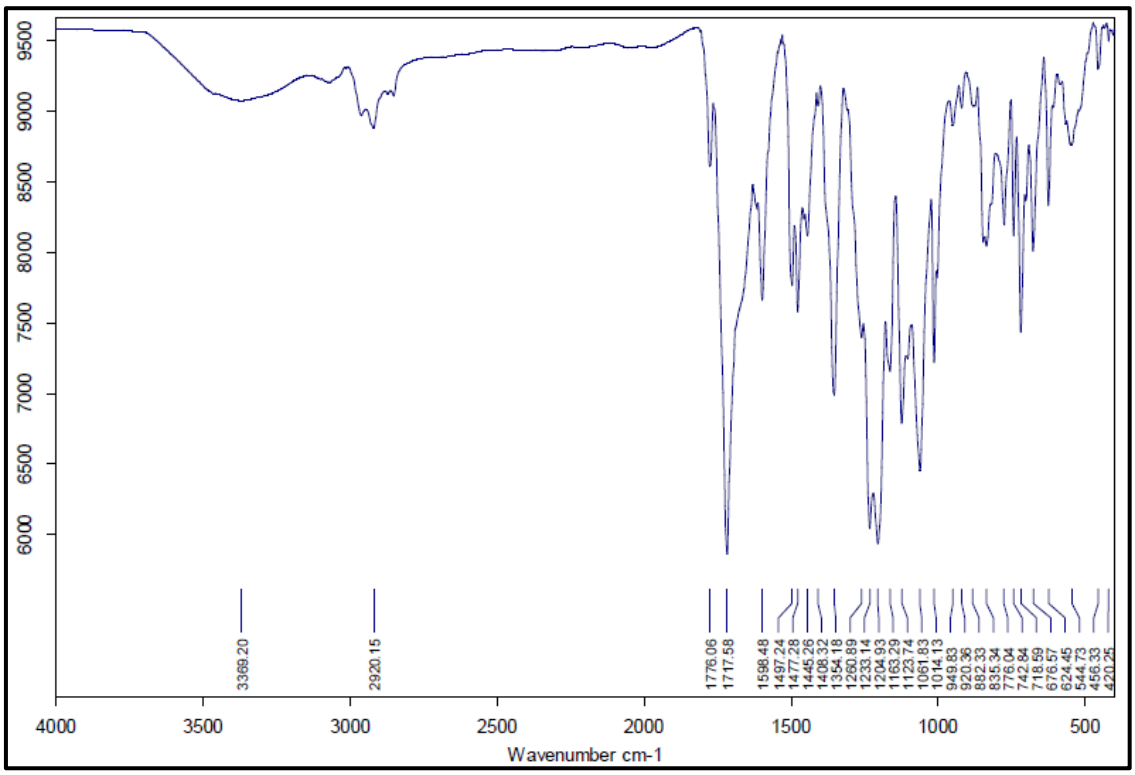


Şekil 4.30. ULTEM 9085 filament FTIR test sonucu

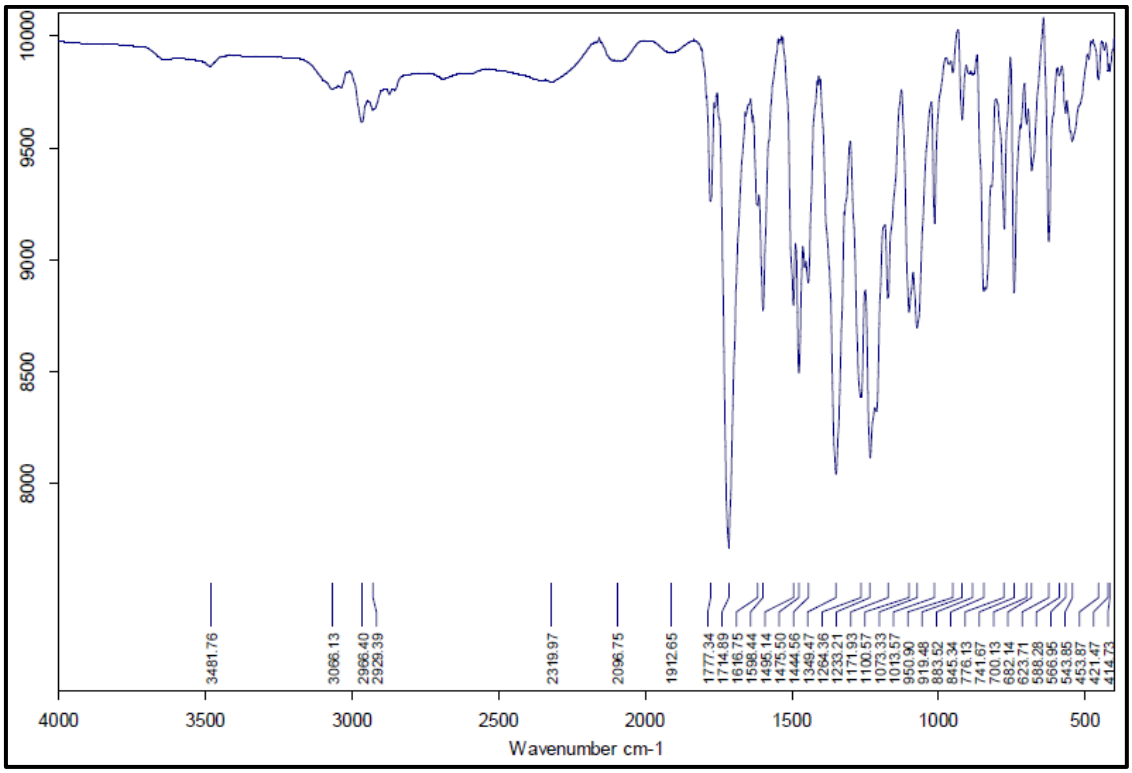
Şekil 4.29'de gösterilen ULTEM 9085 numune FTIR test sonucunda 1718 cm^{-1} dalga boyunda çift bağ bölgesinde görünen sinyal C = O bağını göstermektedir. ULTEM 9085

blokta görünen bu sinyale benzer şekilde ULTEM 9085 filamentte 1720 cm^{-1} dalga boyunda, ULTEM 9085 + CF numunede 1717 cm^{-1} dalga boyunda ve karbon fiber filamentte 1714 cm^{-1} dalga boyunda sinyaller görülmektedir.

4 numunenin de benzer şekilde 3000 cm^{-1} dalga boyu bölgesinde vermiş olduğu sinyaller de Polikarbonat ve Polieterimid polimerlerinin zincirlerinde bulunan bağlar ile eşleşmektedir. Hem 1720 hem de 3000 bölgesinde görünen benzer sinyaller bize karbon fiber filamentin de ULTEM 9085 malzeme ile kaplı olduğunu göstermektedir. Şekil 4.31 ve 4.32'de verilen grafikler Şekil 4.29 ve 4.30'da verilen grafikler ile benzerdir.



Şekil 4.31. ULTEM 9085 + karbon fiber numune FTIR test sonucu



Şekil 4.32. Karbon fiber filament FTIR test sonucu

Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de 3400 cm cm^{-1} dalga boyu civarında görülen sinyaller karbon fiber katkısını göstermektedir. ULTEM 9085 + CF blok numunenin sonucunda bu bölgede keskin bir sinyal yerine çanak formunda bir sinyal görülmektedir. Bu da malzemenin üretim sırasında nem almış olma ihtimalini göstermektedir fakat kesin bir yorum yapılamamaktadır.

Yapılan testler sonucunda elde edilen grafikler bize gösteriyor ki takviye malzemesi olarak kullanılan filament ile matris malzemesi olarak kullanılan filamentin yapıları aynıdır. Farklı bir yapıda olması durumunda fiber takviyesi bulunan katmanlar ile sadece polimer içeren katmanlar arasında yapışmanın doğruluğu konusunda şüpheler oluşabilirdi. Testler sonucunda malzeme yapıları doğrulanmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sürekli karbon fiber takviyeli ULTEM 9085 malzemesinin çekme, eğme ve darbe mekanik özelliklerine etki eden parametreler incelenmiştir. Fiber halka sayısı, fiber içeren katman sayısı ve katman kalınlığı parametreleri kullanılarak Minitab 18 programı ile hazırlanan numune setleri için elde edilen çekme testi, eğme testi ve darbe testi numunelerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çekme testleri sonucunda elde edilen değerler analiz edildiğinde çekme mukavemetine ve gerinime en çok etki eden parametrenin fiber halka sayısı olduğu tespit edilmiştir. Fiber halka sayısından sonra en çok etki eden parametre fiber katman sayısı ve bu üç parametreden en az etkisi olan da katman kalınlığı olarak tespit edilmiştir. Gerilme -Gerinim grafiği elde edilen testler sonucunda grafiklerdeki davranışlar incelenmiş ve fiber içeren numunelerin saf ULTEM 9085'e kıyasla kırılgan davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Belirli fiber oranlarının altında bulunan numunelerin çekme mukavemetinde artış gözlemlenmemiştir.

Eğme testleri sonucunda elde edilen çıktılar çekme testlerinde olduğu gibi değişken analizi yöntemi ile analiz edilmiş ve maksimum eğme gerilmesi değerine en çok etki eden parametrenin fiber içeren katman sayısı olduğu gözlemlenmiştir. Çekme özelliklerine kıyasla bu parametrenin etkisi eğme mekanik özelliği üzerinde %88,35 gibi yüksek bir etki oranına sahiptir. Maksimum eğme gerilmesi, maksimum eğme gerilmesindeki uzama ve Young modülü çıktıları için yapılan analizler sonucunda fiber halka sayısı parametresi için elde edilen P-değerleri güven aralığı dışında kaldığı için bu parametre çıktılar üzerinde etkili değildir.

Darbe testleri sonucu elde edilen değerler diğer testlerde elde edilen dayanım artışlarına kıyasla daha yüksektir. En yüksek fiber oranına sahip numunede elde edilen darbe dayanımı takviyesiz ULTEM 9085 malzemeye kıyasla 5 kat daha yüksektir.

Yapılan çalışmalar havacılık ve uzay sektöründe kullanılan ULTEM 9085 malzemesini ve mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanım potansiyeli bulunan sürekli karbon fiber takviyesini konu aldığı için üretim süreleri ve maliyetler de göz önünde bulundurulmuştur.

Elde edilen sonuçlar bu sektöre katkıda bulanacağı için sektör açısından büyük öneme sahip olan maliyet ve üretim süreleri çıktıları da analiz edilmiştir.

Üretim süresine en çok etki eden parametre katman kalınlığıdır. Katman kalınlığı değerinin 0,250 mm'den 0,125 mm değerine düşürülmesi üretim sürelerini ters orantılı olarak yaklaşık 2 katına çıkarmaktadır. Diğer parametrelerden fiber içeren katman sayısı üretim süresine halka sayısına göre daha çok etki etmektedir. Maliyet ise direkt olarak kullanılan fiber malzemesi ile doğru orantılı olduğu için fiber malzeme artışı ile maliyetler artmaktadır.

Elde edilen sonuçlar alüminyum malzeme ile kıyaslandığında 1000 serisi alüminyum malzemelerden daha yüksek mukavemet gösterdiği gözlemlenmiştir. Endüstride sıklıkla kullanılan 6000 serisi alüminyum ile kıyaslandığında ise çekme mukavemetinde benzer değerler gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada ele alınan ULTEM 9085 malzemesi halihazırda havacılık, uzay ve otomotiv alanında kullanılan bir malzeme olması ve kullanılan karbon fiber takviyesi ile bu alanda kullanılan alüminyum malzemelerin yerini alma potansiyeli olması nedeniyle 2000 ve 7000 serisi alüminyumlar ile kıyaslanması daha doğru olacaktır. Çalışmada kullanılan artırılmış fiber oranlı çekme numunelerinden elde edilen sonuçlar 2000 serisi alüminyum malzemelerin ortalama çekme mukavemeti değerleri ile kıyaslandığında yaklaşık 2 kat fark görülmektedir fakat iki malzeme arasında yaklaşık 2 kat özgün ağırlık farkı olduğu göz önüne alındığında neredeyse aynı özgül mukavemet değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Çekme testlerinde kopma yüzeylerindeki açılar yükün nasıl aktarıldığı konusunda bir fikir vermektedir. Mikro yapı incelemeleri ve gerilme-gerinim grafikleri incelendiğinde kırılgan bir malzeme kopma davranışı ile benzerlikler gözlemlenmiştir. Çekme, eğme ve darbe testleri sonucunda da elde edilen ortak davranış matris malzemesi ile fiber malzemesinin ayrılma davranışıdır. Bu da gösteriyor ki katmanlar arasındaki birleşme artırıldığı durumda elde edilen dayanım değerleri de artacaktır.

Yapılan testler ve analizler sonucunda elde edilen çekme dayanımlarına göre yüksek mukavemet isteri olan parçalar için üretim süreleri ve maliyetler de göz önünde

bulundurulduğunda 0,25 mm katman kalınlığının uygun olduğu bulunmuştur. Mukavemet isterinin maksimumda olduğu, maliyet ve üretim sürelerinin dikkate alınmadığı durumlarda hacim olarak maksimum fiber oranına erişilecek kombinasyon tercih edilebilir. Elde edilen en yüksek çekme dayanımına sahip numunede hacimsel olarak %8 karbon fiber filament bulunmaktadır. Bu oranda fiber katkısı ile çekme mukavemeti %218 artmıştır.

Fiber içeren katman sayısı ve fiber halka sayısı mukavemeti artırdığı gibi doğru orantılı olarak üretim süreleri ve maliyetleri de artırmaktadır. Yapılan analizler ve test sonuçları göz önüne alındığında, üretilecek parçada istenilen dayanım türü, bütçe ve teslim süreleri göz önünde bulundurularak optimum parametreler belirlenebilir.

Gelecek araştırma önerileri

Eklemeli imalat ile üretilen sürekli fiber takviyeli ULTEM 9085 malzemeler halihazırda yapısal parça olarak kullanılmadığı için birçok özelliği araştırılmamış ve gelecekte kullanılacak olması nedeniyle araştırılması endüstriye ve literatüre büyük katkı sağlayacaktır. Örnek vermek gerekirse bu malzemelerin yorulma davranışları ilerleyen dönemde önem kazanacak ve davranışı ile ilgili yapılacak araştırmalara ihtiyaç duyacaktır.

Havacılık ve Uzay, Otomotiv gibi sektörlerde parçaların birçoğu hem yüksek sıcaklık hem düşük sıcaklıklara belirli periyotlarda maruz kalmaktadır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık davranışlarının incelenmesi ve gereksinimleri sağlayabilecek verilerin olduğu kanıtlanması ile kullanım alanları çok daha fazla artabilir.

Çalışmada sabit bırakılan birçok parametre mekanik özelliklere etki etme potansiyeline sahiptir. Örneğin; iç dolgu tipi, nozul sıcaklıkları, tarama açıları vb. parametrelerinin de mekanik özellikleri incelebilecek bir diğer konudur.

Mekanik özelliklerin belirlenmesi malzeme karakterizasyonunun yalnızca bir ayağıdır. Fizikokimyasal özellikler (sıcaklık dayanımı, viskozite, camsı geçiş sıcaklığı, kristalizasyon vb.) karakterizasyon için önem arz etmektedir. Malzemenin kullanım alanlarını artırmak ve karakterizasyonu tamamlamak adına gelecek araştırma önerilerinden en önemlilerinden birisi de bahsedilen özellikleri belirlemek adına yapılacak olan çalışmalardır.

KAYNAKLAR

1. Kumar, S. ve Kruth, J. P. (2010). Composites by rapid prototyping technology. *Material & Design*, 31(2), 850–856.

2. Kalsoom, U., Nesterenko, P. N. ve Paull, B. (2016) Recent developments in 3D printable composite materials. *RSC Advances*, 6(65), 60355–60371.

3. Hofmann, M. (2014). 3D Printing Gets a Boost and Opportunities with Polymer Materials. *ACS Macro Letters*, 3(4), 382–386.

4. Dipaola, M., Wodajo, F. M. (Editörler). (2019). *3D Printing in Orthopaedic Surgery*. (1. Baskı). Elsevier, 1–15.

5. Manoj Prabhakar, M., Saravanan, A. K., Haiter Lenin, A., Jerin leno, I., Mayandi, K., Sethu Ramalingam, P. (2021). A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6108–6114.

6. Rasiya, G., Shukla, A., Saran, K. (2021). Additive Manufacturing-A Review. *Materials Today: Proceedings*, 47, 6896–6901.

7. International Organization for Standardization, American Society for Testing and Materials. (2015). ISO/ASTM 52900:2015 Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. West Conshohocken, PA, 1-4.

8. Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I. A., Espinosa, M. del M., Domínguez, M. (2019). Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. *Complexity*, 2019, 9656938.

9. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). Generalized Additive Manufacturing Process Chain. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 43–61.

10. Shahrubudin, N., Lee, T. C., Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286–1296.

11. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015). Extrusion-Based Systems. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 147–173.

12. Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., Dutta, N. K. (2021). Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges. *Polymers*, 13(5), 753.

13. Al Rashid, A., Khan, S. A., G. Al-Ghamdi, S. ve Koç, M. (2020). Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment. *Automation in Construction*, 118, 103268.

14. Kharat, V. J., Singh, P., Sharath Raju, G., Kumar Yadav, D., Satyanarayana.Gupta, M., Arun, V., Hussein Majeed, A., Singh, N. (2023). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Materials Today: Proceedings*. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

15. Sakunphokesup, K., Kongkrengkri, P., Pongwisuthiruchte, A., Aumnate, C., Potiyaraj, P. (2019). Graphene-enhanced ABS for FDM 3D printing: effects of masterbatch preparation techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 600(1), 012001.

16. El Moumen, A., Tarfaoui, M., Lafdi, K. (2019). Additive manufacturing of polymer composites: Processing and modeling approaches. *Composites Part B: Engineering*, 171, 166–182.

17. Zhang, H., Huang, T., Jiang, Q., He, L., Bismarck, A., Hu, Q. (2021). Recent progress of 3D printed continuous fiber reinforced polymer composites based on fused deposition modeling: a review. *Journal of Materials Science*, 56(23), 12999–13022.

18. Sola, A., Trinchi, A. (2023). Chapter 9 - Fused deposition modeling of continuous fiber-reinforced composites and sandwich structures. *Fused Deposition Modeling of Composite Materials*, 211–248.

19. İnternet: 3D printing with continuous fiber: A landscape, URL: https://www.compositesworld.com/articles/3d-printing-with-continuous-fiber-a landscape/ Son Erişim Tarihi: 20.05.2024

20. Khan, S., Joshi, K., Deshmukh, S. (2022). A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2119–2127.

21. Wu, Y., Fang, J., Wu, C., Li, C., Sun, G., Li, Q. (2023). Additively manufactured materials and structures: A state-of-the-art review on their mechanical characteristics and energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*, 246, 108102.

22. Islam, M. A., Mobarak, M. H., Rimon, M. I. H., Al Mahmud, M. Z., Ghosh, J., Ahmed, M. M. S., Hossain, N. (2024). Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications. *Polymer Testing*, 132, 108364.

23. Redwood, B., Schffer, F., Garret, B. (2017). *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs B.V., 27-53.

24. İnternet: ULTEM™ 9085 Resin URL: https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/fdm-materials/ultem-9085/mds_fdm_ultem9085_0921a.pdf, Son Erişim Tarihi:15.04.2024.

25. Zhang, Y., Yuan, L., Luo, C., Ren, X., Gao, Q., Chen, J., Yu, Q., Cheng, Y., Sun, A., Xu, G., Guo, J. (2024). Additive manufacturing of ULTEM 9085: Weak interface-enriched multi-toughening mechanisms and fracture resistance optimization. *Engineering Fracture Mechanics*, 297, 109885.

26. Zhang, Y., Moon, S. K. (2021). The Effect of Annealing on Additive Manufactured ULTEM 9085 Mechanical Properties. *Materials*, 14(11), 2907.

27. Raju, M., Gupta, M. K., Bhanot, N., Sharma, V. S. (2019). A hybrid PSO–BFO evolutionary algorithm for optimization of fused deposition modelling process parameters. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(7), 2743–2758.

28. de Toro, E. V., Sobrino, J. C., Martínez, A. M., Eguía, V. M. (2019). Analysis of the influence of the variables of the Fused Deposition Modeling (FDM) process on the mechanical properties of a carbon fiber-reinforced polyamide. *Procedia Manufacturing*, 41, 731–738.

29. Mohamed, O. A., Masood, S. H., Bhowmik, J. L., Nikzad, M., Azadmanjiri, J. (2016). Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(7), 2922–2935.

30. Gao, G., Xu, F., Xu, J., Tang, G., Liu, Z. (2022). A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Micromachines*, 13(4), 553.

31. Li, H., Wang, T., Yu, Z. (2017). The Quantitative Research of Interaction between Key Parameters and the Effects on Mechanical Property in FDM. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 9152954.

32. Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143–157.

33. Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., Guzman, A. (2017). Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791–803.

34. Uddin, M. S., Sidek, M. F. R., Faizal, M. A., Ghomashchi, R., Pramanik, A. (2017). Evaluating Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Fused Deposition Modeling Acrylonitrile Butadiene Styrene Parts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(8).

35. Rodríguez-Panes, A., Claver, J., Camacho, A. M. (2018). The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *Materials*, 11(8), 1333.

36. Casavola, C., Cazzato, A., Moramarco, V., Pappalettere, C. (2016). Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory. *Materials & Design*, 90, 453–458.

37. Rajpurohit, S. R., Dave, H. K. (2019). Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5), 1525–1536.

38. Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., Conejero, A. (2016). Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 183–192.

39. Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., Martorelli, M. (2015). The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 604–617.

40. Cheng, P., Peng, Y., Li, S., Rao, Y., Le Duigou, A., Wang, K., Ahzi, S. (2023). 3D printed continuous fiber reinforced composite lightweight structures: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, 250, 110450.

41. Chacón, J. M., Caminero, M. A., Núñez, P. J., García-Plaza, E., García-Moreno, I., Reverte, J. M. (2019). Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 181, 107688.

42. Araya-Calvo, M., López-Gómez, I., Chamberlain-Simon, N., León-Salazar, J. L., Guillén-Girón, T., Corrales-Cordero, J. S., Sánchez-Brenes, O. (2018). Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing*, 22, 157–164.

43. Goh, G. D., Dikshit, V., Nagalingam, A. P., Goh, G. L., Agarwala, S., Sing, S. L., Wei, J., Yeong, W. Y. (2018). Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics. *Materials & Design*, 137, 79–89.

44. Li, N., Li, Y., Liu, S. (2016). Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 218–225.

45. El Essawi, B., Abdallah, S., Ali, S., Nassir Abdo Mohammed, A., Susantyoko, R. A., Pervaiz, S. (2024). Optimization of infill density, fiber angle, carbon fiber layer position in 3D printed continuous carbon-fiber reinforced nylon composite. *Results in Engineering*, 21, 101926.

46. Vakharia, V. S., Leonard, H., Singh, M., Halbig, M. C. (2023). Multi-Material Additive Manufacturing of High Temperature Polyetherimide (PEI)–Based Polymer Systems for Lightweight Aerospace Applications. *Polymers*, 15(3), 561.

47. Pandelidi, C., Bateman, S., Maghe, M., Piegert, S., Brandt, M. (2022). Fabrication of continuous carbon fibre-reinforced polyetherimide through fused filament fabrication. *Progress in Additive Manufacturing*, 7(5), 1093–1109.

48. Díaz-Rodríguez, J. G., Pertúz-Comas, A. D., González-Estrada, O. A. (2021). Mechanical properties for long fibre reinforced fused deposition manufactured composites. *Composites Part B: Engineering*, 211, 108657.

49. Blok, L. G., Longana, M. L., Yu, H., Woods, B. K. S. (2018). An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*, 22, 176–186.

50. Azarov, A. V, Antonov, F. K., Golubev, M. V, Khaziev, A. R., Ushanov, S. A. (2019). Composite 3D printing for the small size unmanned aerial vehicle structure. *Composites Part B: Engineering*, 169, 157–163.

51. Dutra, T. A., Ferreira, R. T. L., Resende, H. B., Guimarães, A. (2019). Mechanical characterization and asymptotic homogenization of 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(3), 133.

52. Dickson, A. N., Ross, K.-A., Dowling, D. P. (2018). Additive manufacturing of woven carbon fibre polymer composites. *Composite Structures*, 206, 637–643.

53. Justo, J., Távara, L., García-Guzmán, L., París, F. (2018). Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites. *Composite Structures*, 185, 537–548.

54. Al Abadi, H., Thai, H.-T., Paton-Cole, V., Patel, V. I. (2018). Elastic properties of 3D printed fibre-reinforced structures. *Composite Structures*, 193, 8–18.

55. Imeri, A., Fidan, I., Allen, M., Wilson, D. A., Canfield, S. (2018). Fatigue analysis of the fiber reinforced additively manufactured objects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(9), 2717–2724.

56. Todoroki, A., Oasada, T., Mizutani, Y., Suzuki, Y., Ueda, M., Matsuzaki, R., Hirano, Y. (2020). Tensile property evaluations of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Advanced Composite Materials*, 29(2), 147–162.

57. González-Estrada, O. A., Pertuz, A., Quiroga Mendez, J. E. (2018). Evaluation of Tensile Properties and Damage of Continuous Fibre Reinforced 3D-Printed Parts. *Key Engineering Materials*, 774, 161–166.

58. Mei, H., Ali, Z., Ali, I., Cheng, L. (2019). Tailoring strength and modulus by 3D printing different continuous fibers and filled structures into composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2(2), 312–319.

59. Naranjo-Lozada, J., Ahuett-Garza, H., Orta-Castañón, P., Verbeeten, W. M. H., Sáiz-González, D. (2019). Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 26, 227–241.

60. İnternet: Markforged FX20 URL: https://markforged.com/3d-printers/fx20, Son Erişim Tarihi: 08.06.2024.

61. İnternet: ULTEM™ 9085 Filament and Carbon Fiber for ULTEM™ Filament URL: https://s3.amazonaws.com/mf.product.doc.images/Datasheets/Material+Datasheets/ULTEM%E2%84%A2_9085_Filament_Material_Datasheet.pdf, Son Erişim Tarihi: 10.05.2024.

62. American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D3039/D3039M-17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. *ASTM*. West Conshohocken, PA, 1-13.

63. American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. *ASTM*. West Conshohocken, PA, 1-12.

64. American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM D256-23e1 Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. *ASTM* . West Conshohocken, PA, 1-20.

65. Hiwa, B., Ahmed, Y. M., Rostam, S. (2023). Evaluation of tensile properties of Meriz fiber reinforced epoxy composites using Taguchi method. *Results in Engineering*, 18, 101037.

66. İnternet: Zeiss Smartzoom 5 URL: https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/industrial-microscopy/smartzoom-5.html, Son Erişim Tarihi: 05.06.2024.

67. K, David. (2020). *Organic chemistry*. (4. Baskı). Wiley, 671-713.

68. Luchinsky, D. G., Hafiychuk, H., Hafiychuk, V., Wheeler, K. R. (2018). Molecular dynamics of ULTEM 9085 for 3D manufacturing: spectra, thermodynamic properties, and shear viscosity. NASA. Santa Clara County, CA, 8-12.

EKLER

EK-1. ULTEM 9085 malzeme bilgi formu

MATERIAL DATASHEET

Markforged

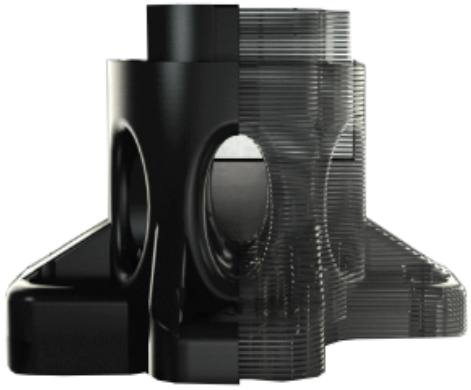
ULTEM™ 9085 Filament and Carbon Fiber for ULTEM™ Filament

AEROSPACE-READY MATERIALS

ULTEM™ 9085 Filament is a high performance thermoplastic that exhibits excellent flame, smoke, and toxicity (FST) characteristics. Optimized for production aerospace applications, ULTEM™ Filament brings Markforged's CFR technology to a new realm of parts. ULTEM™ Filament is available in Markforged's new 3200cc XL spool — four times larger than our standard spools.

Carbon Fiber for ULTEM™ Filament is a specialized variant of Markforged's Continuous Carbon Fiber designed for use with ULTEM™ Filament. Capable of yielding aluminum strength parts, it can be precisely laid down in a wide variety of geometries. Users can trace curved features, reinforce holes, and mimic unidirectional fiber layups — all within a few clicks.

ULTEM™ 9085 Filament and Carbon Fiber for ULTEM™ Filament are only printed on the Markforged FX20. ULTEM™ 9085 Filament parts are compatible with Support for ULTEM™ Filament, a dedicated support material printed out of a second nozzle.



Physical Properties	Unit	Test	Ultem 9085™ Filament XZ Orientation	Test	Carbon Fiber for Ultem 9085™ Filament
Tensile strength	MPa (ksi)	D638	88 (0.9)	D3039	760 (110)
Tensile modulus	GPa (ksi)	D638	2.52 (365)	D3039	57 (8280)
Tensile strain at break	%	D638	5.5	D3039	1.6
Flexural strength	MPa (ksi)	D790	105 (15.2)	D790	540 (78.3)
Flexural modulus	GPa (ksi)	D790	2.45 (355)	D790	50 (7250)
Flexural strain at break	%	D790	—	D790	1.6
Compressive strength	MPa (ksi)	D695	—	D695	300 (43.5)
Compressive modulus	GPa (ksi)	D695	—	D695	59 (8557)
Izod Impact - notched	J/m (ftHb/in)	D256-10A	70 (1.3)	D256-10A	810 (15.2)
Density	g/cm^3	—	1.27	—	1.2
HDT (66 psi)	deg C (deg F)	D648 B	175 (347)	D648 B	190 (374)
HDT (264 psi)	deg C (deg F)	D648 B	173 (348)	D648 B	190 (374)

These representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement; and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

© 2023 Markforged, Inc. All rights reserved.

EK-1. (devam) ULTEM 9085 malzeme bilgi formu

Printer & Material Compatibility

ULTEM™ 9085 Filament

Available for use on the FX20 and compatible with Support for ULTEM™ Filament.

Can only be reinforced with Carbon Fiber for ULTEM™ Filament.

Carbon Fiber for ULTEM™ Filament

Available for use on the FX20.

Only compatible as a reinforcement for ULTEM™ 9085 Filament.

Future Data

ULTEM™ 9085 Filament and Carbon Fiber for ULTEM™ Filament are undergoing more tests which will provide additional results after completion, including:

Full mechanical data

Glass transition temperature

Coefficient of thermal expansion (CTE)

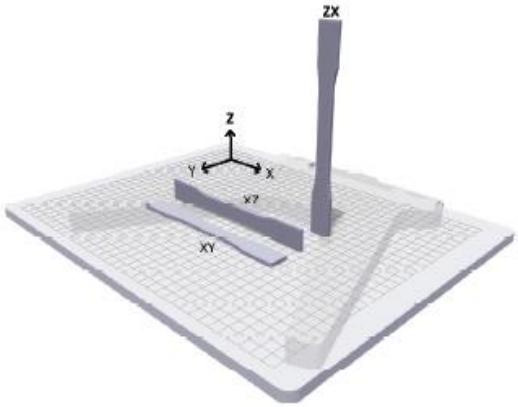
UV exposure

Fluid sensitivity to common aerospace fluids including fuels, lubricants, and cleaning agents



Directional Mechanical Properties of ULTEM™ 9085 Filament

The mechanical properties of 3D printed materials may vary with print orientation. In tension, most parts are strongest when the print orientation and loading direction are parallel, and weakest when the print orientation and loading direction are perpendicular.



Property	Print orientation	Average
Yield Strength (MPa)	XY	62
	XZ	69
	ZX	49
Tensile strength (MPa)	XY	61
	XZ	67
	ZX	49
Tensile modulus (GPa)	XY	2.32
	XZ	2.52
	ZX	2.11
Elongation at break (%)	XY	5.3
	XZ	5.6
	ZX	2.1

*The ULTEM™ and 9085 trademarks are used under license from SABIC, its affiliates or subsidiaries.

To learn more about specific testing conditions or to request test parts for internal testing, contact a Markforged representative. All customer parts should be tested in accordance to customer's specifications.

This data sheet is preliminary and includes some estimated values. Values will be updated when full material testing is complete.

Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement; and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

EK-2. Markforged FX20 makine bilgi formu

Markforged

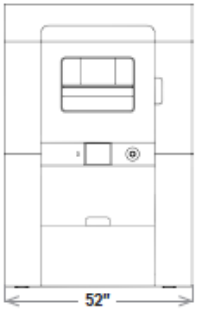
PRODUCT SPECIFICATIONS

FX20

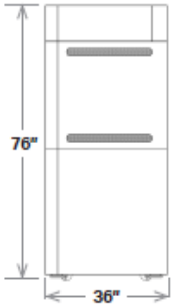
FX20 is the biggest, fastest, smartest printer in the Markforged lineup. Engineered to deliver strength, accuracy, and consistency, FX20 produces mission-critical parts for the most demanding applications, from the factory floor to the skies and beyond. Replace long lead-time metals with high-temperature thermoplastics and continuous fiber reinforced composites—with FX20 and the cloud-connected, continuously learning Digital Forge platform, globally distributed production at the click of a button is now a reality.

Printer Properties	**Process**	Fused Filament Fabrication, Continuous Fiber Reinforcement
	Build Volume	Single-nozzle builds: 525 x 400 x 400 mm (20.6 x 15.7 x 15.7 in) Multi-nozzle builds: 500 x 400 x 400 mm (19.7 x 15.7 x 15.7 in)
	Weight	530 kg (1170 lbs)
	Machine Footprint	1325 x 900 x 1925 mm (52.2 x 35.5 x 75.75 in)
	Temperature Control	Up to 200°C steady-state
	Print System	Direct-drive print head with three nozzles (two plastic, one fiber)
	Power	200-240 VAC 2W+PE 40A // 200-240 VAC 3Ø+PE 24A // 347-415 VAC 3Ø+N+PE 14A; 50-60 Hz
	Safety	IEC/UL/CSA 62368-1 certified, CE Marked, EU Machinery Directive compliant
Materials	**Plastics**	Vega™, ULTEM™ 9085 filament, Onyx®, Onyx FR
	Continuous Fibers	Carbon Fiber, Fiberglass*, Aramid Fiber (Kevlar®)*, High Temperature Carbon Fiber, Carbon Fiber FR
Part Properties	**Layer Height**	50 µm minimum, 250 µm maximum
	Accuracy	+/- 125 µm or +/- 0.0015 mm per mm (whichever is greater)
Software	**Eiger**	Secure digital library, powerful slicer, and printer management (premium options available at cost)
	Security	Two-factor authentication, org admin access, single sign-on, MFP print files encrypted by default and tamper resistant
	Connectivity	Eiger connection and over-the-air updates via Ethernet

FRONT VIEW



SIDE VIEW



All specifications approximate and subject to change without notice. The ULTEM™ and 9085 trademarks are used under license from SABIC, its affiliates or subsidiaries. Dupont™ and Kevlar® are trademarks and registered trademarks of E.I. du Pont de Nemours and Company.

*Material committed, but not yet compatible with FX20. Support for Markforged plastic and fiber materials will be added over time, although not every combination.



Gazili olmak ayrıcalıktır