



**FDM 3B YAZICI İLE KOMPOZİT PARÇA TASARIMI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Oğulcan EREN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2017

Oğulcan EREN tarafından hazırlanan “FDM 3B YAZICI İLE KOMPOZİT PARÇA TASARIMI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. H. Kürşad SEZER

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Hüseyin Rıza BÖRKLÜ

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Bedri TUÇ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Başkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 13/12/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Oğulcan EREN

13/12/2017

FDM 3B YAZICI İLE KOMPOZİT PARÇA TASARIMI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Oğulcan EREN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2017

ÖZET

Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojileri bir çok farklı alanda başarılı bir şekilde uygulanmıştır ve geleneksel yöntemlere kıyasla kompleks formdaki 3B parçaların daha kolay, düşük maliyetli ve hızlı üretimini sağlamıştır. Eİ teknolojileri arasında en popüler ve ucuz yöntem Eriyik Biriktirme Yöntemidir (Fused Deposition Modeling - FDM). Bu teknoloji ile son kullanıma hazır parçaların doğrudan imalatına ilgi giderek artmaktadır. Ancak düşük mekanik özellikleri, FDM baskılı parçaların yaygın uygulamasını önleyen temel bir problemdir. Dolayısıyla bu teknoloji için, mevcut malzemelerde yük taşıyan bileşenlere ait mekanik gereksinimleri karşılayacak düzeyde bir iyileştirilme yapılması gerekmektedir. Bu tezde, karbon elyaf takviyesiyle 3B baskılı Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) polimer kompozit parçaların üretimi ve mekanik özelliklerindeki muhtemel iyileştirme araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ümit verici olup, 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyesi ile parça mukavemetinin önemli ölçüde iyileştirilebileceği gösterilmiştir. Ancak esneklik ve işlenebilirliğin artan takviye içeriği ile azaldığı bulguları da not edilmiştir. Ayrıca yazdırma deseninin mekanik özellikleri önemli derecede etkilediği saptanmıştır.

Bilim Kodu : 91417

Anahtar Kelimeler : Hızlı Prototip Oluşturma, Eklemeli İmalat, 3B baskı, Kompozit Filament, Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP)

Sayfa Adedi : 116

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Kürşad SEZER

COMPOSITE PART DESIGN WITH FDM 3D PRINTER AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES

(M. Sc. Thesis)

Oğulcan EREN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2017

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) has been successfully applied in various applications and allows easy, cost effective and rapid manufacture of complex shaped 3D models as compared to conventional methods. Among the AM technologies, the most popular and inexpensive method is Fused Deposition Modelling (FDM). There is a growing interest in direct manufacturing of end-use parts with this technology. However mechanical properties of the FDM printed parts are the main constraint preventing the widespread application of FDM printed parts. FDM technology needs to make improvements in existing materials to meet the mechanical requirements of the load bearing components. This thesis investigated the production of carbon fiber reinforced 3D printed Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) polymer composite parts with possible improvement in mechanical properties. The obtained results are promising such that the part strength is shown to be significantly improved with 6 mm long carbon fibre reinforcement. However the fact that the flexibility and processability of the fibres is diminishing with increasing reinforcement content is also noted. It has also been determined that the print pattern significantly affects the mechanical properties.

Science Code : 91417

Key Words : Rapid Prototyping, Additive Manufacturing, 3D Printing, Composite Filament, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

Page Number : 116

Supervisor : Assist. Prof. Hüseyin Kürşad SEZER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında desteğini eksik etmeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Kürşad SEZER'e ve yüksek lisans öğrenimim boyunca kıymetli yönlendirmeleri ile bana yol gösteren Prof. Dr. Hüseyin Rıza BÖRKLÜ'ye maddi manevi tüm katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Yine ODTÜ Kimya laboratuvarlarında Dr. Ümit Tayfun'a deney cihazlarını kullanmamda içtenlikle yardımcı olduğu için teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca deney cihazları ve sarf malzemelerinin tedariki konusunda yardımcı olan tüm resmi ve özel kuruluşlar ile çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen tüm hocalarıma teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca yanımda bulunarak beni destekleyen sevgili aileme minnet ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	5
2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	6
2.1.1. Polimer matris kompozitler.....	6
2.1.2. Metal matris kompozitler	8
2.1.3. Seramik matris kompozitler	9
2.1.4. Parçacık kompozitler	9
2.1.5. Pul kompozitler.....	9
2.1.6. Elyaf kompozitler.....	9
2.1.7. Nanokompozitler.....	10
2.2. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	10
2.2.1. Sürekli elyaf takviyeli kompozitler.....	11
2.2.2. Kısa elyaf takviyeli kompozitler	12
2.3. Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	12
2.4. Tabakalı Kompozit Malzemeler	13
2.5. Kompozitlerde Takviye Elamanları ve Özellikleri	13

	Sayfa
2.5.1. Karbon elyaf.....	15
2.5.2. Cam elyaf.....	17
2.5.3. Organik elyaflar	18
2.6. Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	20
2.6.1. Elyaf özelliklerinin kompozitin mekanik performansına etkisi.....	22
3. HIZLI PROTOTİP OLUŞTURMA	25
3.1. Üretim Metodu.....	26
3.2. Hızlı Prototip Oluşturma Teknolojileri.....	29
3.2.1. Eriyik biriktirme tekniği	29
3.2.2. Seçici lazer sinterleme	32
3.2.3. Tarayarak ışıkla kürleme.....	33
3.2.4. Tabaka yapıştırırmalı parça imalatı.....	35
3.2.5. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi	37
3.2.6. Elektron ışınlı eritme.....	39
3.2.7. PolyJet teknolojisi.....	41
3.3 Hızlı Prototip Oluşturma Teknolojilerinin Genel Bir Karşılaştırılması.....	42
4. ÇEKME TESTİ VE MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ...	45
4.1. Gerilme – Şekil Değiştirme Diyagramı	47
4.2. Mazlemelerin Sünek - Gevrek Davranışı.....	49
4.3. Mazlemelerin Elastik – Plastik Davranışı.....	51
4.4. Mazlemelerin Dayanımını Etkileyen Faktörler.....	52
4.4.1. Dislokasyon.....	53
4.4.2. Sürünme	54
4.4.3. Pekleşme	56
4.4.4. Yorulma	57
4.4.5. Boyun verme	58

	Sayfa
4.4.6. Çentik etkisi	59
4.5. Gerçek Gerilme ve Şekil Değişirme	60
4.6. Mazlemelerin Karakteristik Özellikleri	62
4.6.1. Hooke kanunu; elastisite modülü.....	62
4.6.2. Possion oranı.....	64
4.6.3. Tokluk	65
4.6.4. Rezilyans.....	66
4.7. Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Çekme Testi	67
5. KOMPOZİT MALZEMELERİN FDM 3B BASKISI	69
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	77
6.1. Kompozit Filament İçin Optimum Oranının Belirlenmesi	77
6.2. Malzeme ve Ekipmanlar	79
6.3. Kompozit Filamentin Hazırlanışı.....	86
7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	91
7.1. Karbon Elyaf Takviyesinin Mekanik Özelliklere Etkisi.....	91
7.2.1. Çekme dayanımına etkisi	93
7.2.2. Sünekliğe etkisi.....	94
7.2.3. Elastisite modülüne etkisi	96
7.2.4. Tokluğa etkisi.....	97
7.3. Karbon Elyaf Takviyesinin Poroziteye Etkisi.....	98
7.4. Karbon Elyaf Takviyesinin Eriyik Akış Hızına (MFI) Etkisi.....	103
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kompozitlerde kullanılan bazı seramik elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri.....	14
Çizelge 2.2. Cam türleri ve özellikleri	18
Çizelge 2.3. Elyaf takviyelerin kullanım alanlarına göre özellikleri	19
Çizelge 2.4. Bazı elyaf, kompozit ve metallerin özgül modül ve mukavemet değerleri	22
Çizelge 3.1. HPO'nun genel avantajları ve dezavantajları	26
Çizelge 3.2. FDM'de kullanılan bazı malzemelerin özellikleri	31
Çizelge 3.3. FDM tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları.....	31
Çizelge 3.4. SLS tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları	33
Çizelge 3.5. SLA tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları.....	35
Çizelge 3.6. LOM tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları	37
Çizelge 3.7. 3DP tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları	38
Çizelge 3.8. EBM tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları.....	40
Çizelge 3.9. Polyjet tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları	42
Çizelge 3.10. HPO teknolojilerinin karşılaştırılması	43
Çizelge 3.11. HPO teknolojilerinin genel problemleri ve çözüm önerileri	44
Çizelge 5.1. Demir/naylon kompozit filament çekme özellikleri.....	71
Çizelge 6.1. ABS matris özellikleri	79
Çizelge 6.2. Karbon elyaf takviye edici malzeme özellikleri	80
Çizelge 6.3. Üretilen filament numunelerinin malzeme içerikleri.....	86
Çizelge 6.4. Çift vidalı mikro karıştırıcı işlem parametreleri	87
Çizelge 6.5. Tek vidalı mikro karıştırıcı işlem parametreleri	87
Çizelge 6.6. FDM 3B yazıcı işlem parametreleri	88
Çizelge 6.7. MFI test cihazı işlem parametreleri	89

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Geleneksel ve kompozit malzemelerin karşılaştırılması	6
Şekil 2.2. Kompozitlerin sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.3. Takviye şekline göre kompozit türleri.....	10
Şekil 2.4. Elyafların kompozit içerisine farklı geometrilerde yerleştirilmesi.....	11
Şekil 2.5. Tabakalı kompozit yapısı.....	13
Şekil 2.6. Grafit düzleminde bulunan karbon atomlarının dizilimi	15
Şekil 2.7. Isıl işlem sıcaklığının PAN precursor karbon elyafının dayanımına ve elastisite modülüne etkisi.....	16
Şekil 2.8. Sodyum silikat camı yapısının iyi boyutta gösterilmesi	17
Şekil 2.9. Bazı elyafların tipik çekme gerilmesine karşı uzama miktarları	19
Şekil 2.10. Malzemelerin özgül mukavemet değerlerinin zamana bağlı değişimi	21
Şekil 3.1. Ürün oluşturma döngüsü.....	26
Şekil 3.2. Hızlı prototip oluşturmada temel işlem basamakları	27
Şekil 3.3. STL formatına çevrilmiş konsantrik daireler içeren yüzey örneği	27
Şekil 3.4. HPO teknolojilerinin tasnif şeması.....	29
Şekil 3.5. FDM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar	30
Şekil 3.6. SLS sisteminin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen parçalar.....	32
Şekil 3.7. SLA sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar	34
Şekil 3.8. LOM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar	36
Şekil 3.9. 3D printing sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar	38
Şekil 3.10. EBM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar	39
Şekil 3.11. PolyJet sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar	41
Şekil 4.1. Hidrolik çekme deney cihazı	46
Şekil 4.2. Tipik silindirik çekme numunesi.	47
Şekil 4.3. Gerilme deneyinde ki kuvvet-uzama eğrisi ve mühendislik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Farklı kesit alanlarına sahip ve farklı yüklere maruz bırakılan çubuklarda meydana gelen deformasyon.	48
Şekil 4.5. Sünek ve gevrek malzemelere ait gerilme – yer değiştirme diyagramı ve numune deformasyonları.	49
Şekil 4.6. Sünek malzemede boyun oluşumu.	50
Şekil 4.7. Gerilme – şekil değiştirme diyagramı.....	51
Şekil 4.8. Gerilim-Şekil değiştirme grafiğinde akma noktasının öteleme yöntemi ile bulunması	52
Şekil 4.9. İki kenar dislokasyonunun birbirini kesmesi.....	54
Şekil 4.10. Sürünme için şekil değiştirme/zaman grafiği	55
Şekil 4.11. Soğuk şekil değişimi oranının metallerin gerilme-birim şekil değişimi diyagramına etkisi	57
Şekil 4.12. Malzeme yorulmasının tespiti için kullanılan Wöhler diyagramı	58
Şekil 4.13. Mühendislik gerilim şekil değiştirme eğrisi ve boyun oluşumu.....	59
Şekil 4.14. Farklı numuneler için çentik etkisi ve oluşan gerilmeler.....	59
Şekil 4.15. Gerçek ve mühendislik gerilim-gerinim eğrileri arasında oluşan fark	61
Şekil 4.16. Gerilme-şekil değiştirme diyagramında elastisite modülünün tespiti	62
Şekil 4.17. Demir ve farklı üç çelik için gerilim-sekil değiştirme grafiği	63
Şekil 4.18. Eksenel kuvvetin etkisi ile oluşan kesit daralması	64
Şekil 4.19. Malzeme tokluğunun belirlenmesi	65
Şekil 4.20. Gerilim-şekil değiştirme eğrilerinin dayanım süneklik ve tokluk ifadeleri..	66
Şekil 4.21. Yay çeliği ve basit karbonlu çelik için rezilyansın belirlenmesi	67
Şekil 4.22. Tek eksenli gerilme yükü altında elyaf takviyeli kompozit malzeme	68
Şekil 5.1. Basınç kalıplama ve FDM yöntemleri ile üretilen kompozit parçanın çekme özellikleri.....	72
Şekil 5.2. FDM Kompozit uygulamaları.....	73
Şekil 5.3. %28 TCLP ve %72 PP karışımı çekme dayanımı	73
Şekil 5.4. SGF/PP ve SCF/PP Dayanımı ve modülü için elyaf etkinlik faktörü	74

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. Sürekli çekirdek güçlendirmeli filament kullanan 3B yazıcının şematik gösterimi.....	75
Şekil 5.6. Çeşitli nozul başlıkları	75
Şekil 5.7. Takviyeli elyaf biriktirebilen karma stereolitografi 3B yazıcı	76
Şekil 6.1. Çekme testi numunelerinin parlatılmış görüntüleri a) saf ABS, b) %10 karbon elyaf, c) %20 karbon elyaf, d) %30 karbon elyaf	78
Şekil 6.2. Granül haldeki ABS matris polimeri	79
Şekil 6.3. 6 mm uzunluğundaki poliüretan bazlı karbon elyaf	80
Şekil 6.4. Çift vidalı ekstrüdere ait a) görsel ve b) şematik gösterim.....	81
Şekil 6.5. Çift vidalı mikro karıştırıcıya ait a) görsel ve b) şematik gösterim.....	81
Şekil 6.6. Tek vidalı filament ekstrüdere ait a) görsel ve b) şematik gösterim.....	82
Şekil 6.7. FDM 3B yazıcı ait a) görsel ve b) şematik gösterim	82
Şekil 6.8. Çekme test cihazına ait a) görsel ve b) şematik gösterim.....	83
Şekil 6.9. Ters optik mikroskoba ait a) görsel ve b) şematik gösterim.....	83
Şekil 6.10. MFI test cihazına ait a) görsel ve b) şematik gösterim.....	84
Şekil 6.11. ASTM 412 A standartlarında bulunan numuneye ait teknik resim ve CAD görseli	84
Şekil 6.12. Çekme testi numunesi a) .stl dosya formatındaki katı modeli b) program arayüzündeki yazdırma ön izlemesi c) 3B yazıcıda basılmış hali.....	85
Şekil 6.13. Kompozit filament üretiminde kullanılan metot.....	86
Şekil 6.14. Çekme testi numunesinin yazdırma ön izlemesi a) doğrusal [0, 90] b) çapraz [-45, 45].....	88
Şekil 7.1. Doğrusal desende [0, 90] yazdırılmış farklı karbon elyaf takviye oranına sahip numunelerin gerilme/şekil değiştirme eğrileri	92
Şekil 7.2. Çapraz desende [-45, 45] yazdırılmış farklı karbon elyaf takviye oranına sahip numunelerin gerilme/şekil değiştirme eğrileri	92
Şekil 7.3. Farklı karbon elyaf oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin çekme dayanımları.....	94
Şekil 7.4. ABS ve %20 karbon elyaf takviyeli numunelere ait kopma yüzeyleri ve boyun oluşumu	95

Şekil	Sayfa
Şekil 7.5. Farklı karbon elyaf oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin şekil değiştirme grafiği.....	95
Şekil 7.6. Farklı karbon elyaf oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin elastisite modülleri	96
Şekil 7.7. Farklı karbon elyaf oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin toklukları	97
Şekil 7.8. Farklı oranlarda karbon elyaf takviyesi içeren ABS polimer kompozitlere ait eriyik akış hızı	103



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Üretilen kompozit filament ve optik mikroskop görüntüsü.....	87
Resim 7.1. FDM 3B yazıcı ile üretilen elyaf-polimer numunenin SEM görüntüsü a) kırılma yüzeyi, b) katman yapısı.....	99
Resim 7.2. Ticari ABS filament kesiti ve gözenek oluşumu	99
Resim 7.3. %5 Kısa karbon elyaf içeren filament kesiti ve gözenek oluşumu.....	100
Resim 7.4. %5 Kısa karbon elyaf içeren numune dik kesiti	100
Resim 7.5. %10 Kısa karbon elyaf içeren filament kesiti ve gözenek oluşumu.....	100
Resim 7.6. %10 Kısa karbon elyaf içeren numune dik kesiti	101
Resim 7.7. %15 Kısa karbon elyaf içeren filament kesiti ve gözenek oluşumu.....	101
Resim 7.8. %15 Kısa karbon elyaf içeren numune dik kesiti	102
Resim 7.9. %20 Kısa karbon elyaf içeren filament kesiti ve gözenek oluşumu.....	102
Resim 7.10. %20 Kısa karbon elyaf içeren numune dik kesiti	102

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alüminyum oksit
Cu	Bakır
E	Elastikiyet modülü (Mpa)
GPa	Giga Paskal
Mg	Magnezyum
Mm	Milimetre
MPa	Mega paskal
Si₃N₄	Silikon nitrit
Zn	Çinko
σ	Gerilim
ε	Gerinim
δ	Deformasyon
°C	Santigrat derece
Kısaltmalar	Açıklamalar
3B	3 Boyut
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
FDM	Fused Deposition Modeling (Eriyik Biriktirme Tekniği)
HDPE	High Density Polyethylene (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
HIPS	High Impact Polystyrene (Yüksek Dayanımlı Polistiren)

Kısaltmalar**Açıklamalar****HPO**

Hızlı Prototip Oluşturma

LDPE

Low Density Polyethylene (Düşük yoğunluklu polietilen)

LLDPE

Linear Low-Density Polyethylene (Lineer Bağlı Düşük Yoğunluklu Polietilen)

LOM

Laminated Object Manufacturing (Tabaka Yapıştırırmalı İmalatı)

SLA

Stereolithography Apparatus (Tarayarak Işıklı Kürleme)

SLS

Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)

STL

Stereolitografi

PA

Poliamid

PC

Polikarbonat

PLA

Polilaktik Asit

UV

Ultraviyole (Mor Ötesi)

1. GİRİŞ

Malzeme, yararlı bir şey ortaya koymada kullanılan herhangi bir maddedir. Örneğin bir matematik formülü veya su tek başlarına malzeme değilken Eskimolar tarafından iglo yapmak amacıyla buz blokları olarak kullanıldığında bir malzemedir [1]. Teknoloji alanındaki gelişmelerin malzeme alanındaki ilerlemeye bağlı olduğu herkes tarafından bilinmektedir. Örneğin tasarlanan bir türbin veya uçak kanadında kullanılan malzeme; gerekli mekanik özellikleri ve çalışma ortamı şartlarını sağlamıyorsa bu tasarım kullanışlı değildir [2].

Konunun tanımı

İlerleme konusundaki nihai sınırlandırmanın malzemeye bağlı olması ve geleneksel malzemelerin gelişen teknolojinin ihtiyaçlarına tek başına cevap veremez hale gelmesi ile kompozit malzemeler araştırma konusu olmuştur. Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla malzemenin, iyi özelliklerini bir araya getirmek veya ortaya farklı bir özellik çıkarma gayesi ile, makro veya mikro boyutta birleştirilmesiyle oluşan yeni malzemelerdir [3]. İlk kompozit malzeme örneği olarak M.Ö. 1500'lü yıllarda Mısırlıların evlerinde kullandığı bambu ile takviye edilmiş çamur duvarlar, tabakalı tahtalar ve dövme kılıçlar gösterilse de; 20. yüzyıl başlarında modern kompozitler, reçinelerin cam elyaf ile takviye edilmesi ile kullanılmaya başlanmıştır. 1970'lerden itibaren karbon, baron ve aramid gibi elyafların ve metal, seramik gibi matrislerin kullanıldığı yeni kompozit uygulamaları artmıştır [2]. Bilimsel anlamda 1930'lu yıllarda ortaya çıkan polimerler; metallere göre daha düşük yoğunlukta olmaları, kolay biçimlendirilebilir olmaları, korozyona karşı dayanımları ve yüzey kaliteleri gibi üstün özelliklerine rağmen dayanımları ve sertliklerinin düşük olmalarından dolayı bazı uygulamalar için elverişli değildir. Polimerlerin bahsedilen eksikliklerini gidermek ve uygulama alanını genişletmek üzere 1950'lerde polimer esaslı kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Son yıllarda polimer kompozit malzemeler, malzeme bilimi ve teknolojisinin ihtiyaçlarına yönelik en uygun malzeme tasarımını ve üretebilirliğini sağladığı için çok önemli bir boşluğu doldurmuştur. Polimer kompozitler; yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü, termal kararlılık, sertlik, aşınma direnci ve hafiflik gibi özellikleriyle pek çok avantaj sunar [3-5].

Hızlı prototip oluşturma bir sistem ya da parçanın son ürün aşamasına geçmeden hızlı bir şekilde katı modellenmesini ifade eder. Bir başka ifadeyle, CAD (Computer Aided Design - Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımları sayesinde üç boyutlu modeller tasarlanabilir. Genelde çok karmaşık olmayan modellerin tasarım sürecinde, muhtemel hatalar görülerek gerekli düzenlemeler yapılabilir. Fakat karmaşık yapıya sahip olan 3B modellerdeki hatalar veya çok parçalı montaj gruplarının uygulanabilirliği ve sistemin çalışabilirliğinin tasarım sürecinde belirlenmesi oldukça zordur [6]. Hızlı prototip oluşturma, bu alandaki tasarımcı ihtiyaçlarına cevap vermektedir. Prototip oluşturma'nın amacı imalat öncesi, modelin üretilebilirliğini, tasarımın doğruluğunu, estetikliğini, işlevsel yönden yeterliliğini, montaj edilebilme olanaklarını değerlendirebilmektir [6-7]. Hızlı prototip oluşturma son yıllarda başta uzay [8], otomotiv [9], medikal [10-11] olmak üzere mimari [12], eğitim [13] ve tekstil [14] vb. gibi birçok alanda kullanımı hızla artmaktadır. Birçok farklı eklemeli imalat yöntemi mevcuttur ve bu yöntemler arasında; plastik filament yarı eriyik halde biriktiren FDM (Fused deposition modelling) [15], foto polimer reçineyi katılaştıran SLA (Stereolithography Apparatus) [16], metal tozları sinterleyen SLS (Selective Laser Sintering) [17] ve kağıt/plastik/metal tabakaları bağlayan LOM (Laminated object manufacturing) [18] bulunmaktadır. Bunlardan plastik malzeme kullanan en uygun teknoloji olarak ise düşük maliyet, minimum atık ve çok malzeme çeşidi içeren FDM'dir [19-20]. FDM tekniği ile parça üretimi bilgisayar ortamındaki CAD modelin STL dosyasına dönüştürülmesi ile başlar (yatay dilimler oluşturulur). Katman kalınlıkları, geometrik hassasiyet ve işlem hızına göre belirlenir. Daha sonra program işlenmiş verileri nümerik kontrol kod olarak (g-code) FDM prototip oluşturma makinesine aktarır. Burada nozul ısıtılarak plastik filament yarı eriyik hale getirilir ve tabaka şeklinde tablaya serilir. FDM teknolojisi ile çalışan 3B baskı makinelerinin kullandığı malzemeler genel olarak; ABS (Akrilonitril bütadien stiren), PC (Polikarbonat), PLA (Polilaktik asit), PA (Poliamid) ve bu malzemelerden ikisine ait çeşitli karışımlardır [21-22].

Araştırmanın amacı

FDM teknolojilerinde kullanılan ABS filament dayanımları düşüktür. Bu durum FDM ile son parça imalatını engellemektedir. FDM ile oluşturulan parça dayanımını arttırmak için polimer malzeme içine karbon elyaf vb. malzemeler eklenerek polimer kompozitler oluşturulabilir [23-24].

Araştırmanın konusu

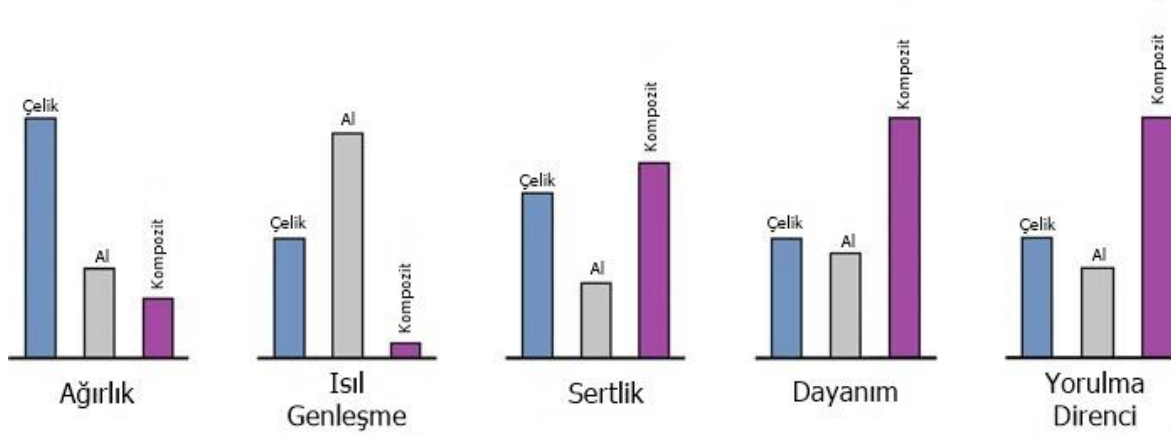
Bu çalışmada, farklı karbon elyaf takviye oranlarında kompozit filament üretilerek FDM 3B yazıcı ile kompozit numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan çekme testi numunelerinin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca yazdırma açısının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Yazdırma açısı, tablanın x eksenine göre yazdırma deseninin yönünü belirtir. Numunelerde $[0, 90]$ ve $[-45, 45]$ olmak üzere iki yazdırma açısı kullanılmıştır. Ayrıca kısa karbon elyaf takviyeli filamentin mikro yapısı incelenerek elyaf miktarının; poroziteye, karbon elyaf uzunluğuna ve karbon elyaf yönlendirilmesine etkisi incelenmiştir.



2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, aynı ya da farklı gruptaki iki veya daha fazla malzemenin en iyi özelliklerini, makro düzeyde birleştirerek yeni ve tek bir malzemede toplanması ile oluşturulan malzemelerdir [3]. Karbon elyafı plastik, çelikle takviye edilmiş beton bunlara örnek olarak verilebilir. Doğal olarak bulunan kompozitlere ise lignin matrisin selüloz elyaflarla takviye edildiği tahta örnek olarak verilebilir. Kompozit malzeme genellikle düşük dayanıma ve modüle sahip metalik matris veya reçine içine homejen olarak dağılmış daha az orandaki takviye elemanından oluşmaktadır. Ancak, atomsal veya molekül boyutta birleştirilen malzemeler mikroskopik olarak homojen olduklarından dolayı kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar. Örneğin çelikte bulunan vanadyum ve krom karışımı mikroskobik olarak homojen yapıda olduğundan dolayı kompozit malzeme olarak sınıflandırılmaz [3]. Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan malzemelerin özellikleri taşımaları yanı sıra; hafiflik, yüksek mukavemet, korozyon dayanımı, yüksek ısıl dayanım, yüksek kimyasal direnç, boyutsal stabilite, yüksek dielektrik direnimi, kalıplama kolaylığı, titreşim sönümlendirme, şeffaflık özelliği, tasarım esnekliği, yüzey uygulamaları, akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu gibi avantajları sağlar [25].

Bu özellikleri sağlanmak için; matris ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, optimizasyonu, bileşenlerin özellikleri vb. faktörler göz önüne alınmalıdır. Uygun matris/takviye elamanı seçimi, mekanik ve fiziksel özelliklerin sağlanmasında son derece önemlidir. Çünkü yükün takviye elamanlarına iletilebilmesi, matris ve takviye elamanı ara yüzey bağının kuvvetine bağlıdır. Kuvvetli ara yüzey bağının oluşması ise bileşenlerin uyumuna ve matrisin ıslatılabilirlik özelliğine bağlıdır. Bununla beraber, takviye elamanlarının matris içerisinde homojen dağılması da matris ve takviye malzemelerinin uygun seçimine bağlıdır [3]. Kompozit malzemeler istenilen özellikleri belirlemede mühendislik tasarımı adına büyük esneklik sağlamıştır. Tasarımcılar kompozit malzemelerle istedikleri mekanik özellikleri elde ederken ağırlık ve maliyetten tasarruf edebilirler. Şekil 2.1’de geleneksel malzemeler ve kompozit malzemeler arasında karşılaştırma yapılarak mekanik özelliklere etkisi gösterilmiştir [2].

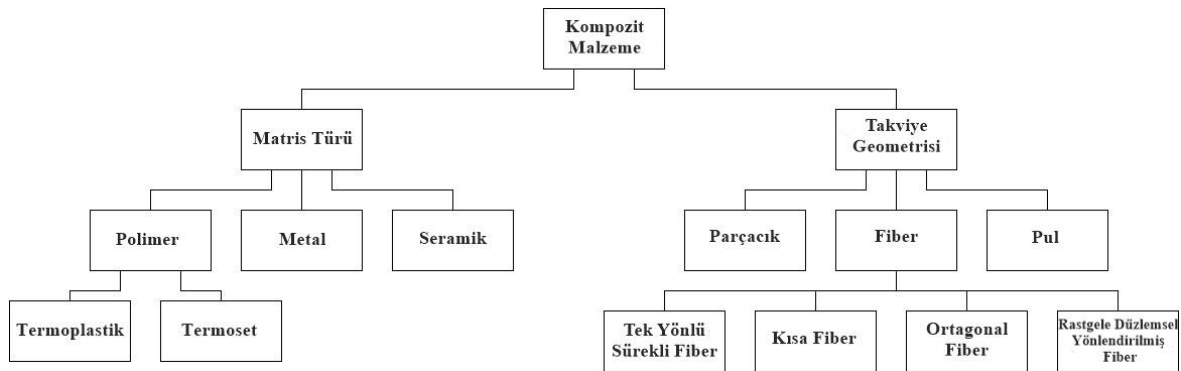


Şekil 2.1. Geleneksel ve kompozit malzemelerin karşılaştırılması [2]

Kompozit malzemeler önemli avantajları yanı sıra, üretiminin güçlüğü, pahalı olması, işlenmesinin güç olması, kırılma uzamasının az olması, geri dönüşümünün olmaması gibi dezavantajlarına da sahiptir [3].

2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler takviye geometrisi (parçacık, pul ve elyaf) veya matris türlerine (polimer, metal, seramik ve karbon) göre sınıflandırılır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Kompozitlerin sınıflandırılması

2.1.1. Polimer matris kompozitler

Yoğunlukları düşük olan polimerler kullanılarak karmaşık şekilli parçaları üretmek kolaydır. Ayrıca polimerler birbirleriyle ve diğer malzemelerle birleştirilebilirler. Bunun yanı sıra polimerlerin talaş kaldırma işlemleri kolaydır. Fakat genel olarak mekanik özellikleri ve termal dayanımları düşüktür. Kompozitler malzemelerin üretilmesinde büyük oranda

(yaklaşık % 90) polimer esaslı matrisler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde polimer matris olarak kullanılan polimerler; termosetler ve termoplastiklerdir [3-5].

Termoplastikler

Birçok çeşit termoplastik olmasına rağmen, matris olarak kullanılabilenler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda katı halde bulunurlar iken ısıtıldıklarında yumuşarlar. Uzun raf ömrü, üstün tokluk, yüksek geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme sürecinde organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca termoplastik parçalar ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde oldukları için termoplastikler soğutucuya ihtiyaç duymadan depolanabilir. Yine termoplastikler yüksek çarpma dayanımı ve sertlik özelliğine sahiptirler [3-5]. FDM 3B yazıcılar için üretilen filamentlerde kullanılan ticari termoplastikleri kısaca açıklamak gerekirse;

Akrilonitril bütadien stiren (ABS): ABS termoplastik sınıfında bulunan bir kopolimeridir ve akrilonitril, bütadien ve stiren monomerlerinden oluşur. İçerdiği monomerler genel olarak % 15–35 arası akrilonitril, %5–30 bütadien, %40–60 arası ise stirendir. Akrilonitril malzemenin ısı dayanımını artırır çevre koşullarına karşı direnç kazandırır. Stiren rijitlik, sertlik ve kolay işlenebilirlik özelliklerini kazandırırken bütadien ise düşük ortam sıcaklıklarında darbe dayanımını artırır. ABS yüksek darbe dayanımına sahip, kolay işlenebilen, çeşitli sektörlerde sıkça kullanılan metal ve ahşaba alternatif oluşturabilecek bir plastik çeşididir. [27].

Poliamid (PA): Düşük nem aktivitesi, yüksek mol kütlesi ve kristalliliğine sahip sentetik bir termoplastik olan poliamid mühendislik plastiklerinin en önemli gruplarından birini oluşturmaktadır. Birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmakta olan poliamidler; cam elyaf ve benzeri elyaflar ile kuvvetlendirilmiş, ısıl dayanımı yüksek, çeşitli viskozite değerlerinde, mineral dolgulu, kauçuklu, alev geciktiricili ve UV dayanımlı olmak üzere çok geniş bir ürün çeşitliliği sunmaktadır [28].

Polyester: Polimerlerin bir alt kategorisi olan polyesterler ana bağları içinde fonksiyonel ester grupları içeren yoğunlaşma polimerleridir. Termoplastik polyesterlerin en tanınmış PET'dir [29].

Polietilen (PE): Polietilen monomer haldeki etilenin polimerizasyonu ile üretilir. Başlıca özellikleridir düşük nem emme kapasitesi, yüksek deformasyon direnci, düşük maliyet, kimyasal kararlılık ve kolay işlenebilirliktir. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) olmak üzere temelde ikiye ayrılır [3].

Termosetler

Sıvı halde bulunan termosetler, ısıtılarak veya kimyasal tepkimeler ile katılaşırlar ve sağlamlaşırlar. Matris olarak termoplastiklere göre daha fazla kullanılan termosetler için polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Termosetler yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Termoset matrisler küçük monomer moleküllerin kimyasal reaksiyon sonucu aralarında kuvvetli ve uzun bağlar bulunan polimer molekülleri haline gelmesi sonucu oluşur. Termosetler izotropik özellik gösterirler. Termosetlerin avantajları; termal stabilite, kimyasal direnç, düşük yoğunluk olarak sıralanabilir. Sınırlı çalışma zamanı, uzun katılma ve uzun fabrikasyon zamanı, kopma anındaki düşük uzama (düşük süneklik) ise dezavantajlarıdır [25, 30].

2.1.2. Metal matris kompozitler

Metallürji ve makine mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılan malzeme türü olan metaller, kompozitler için önemli bir matris malzemesidir. Metaller, plastiklerden daha yüksek elastisite modülüne, dayanımına ve tokluğa sahiptir. Metal malzemeler, yüksek zorlamalara maruz kaldığı zaman kırılmazlar, sadece akarlar ve yükü bütün sisteme dağıtırlar bu durum kullanımda güvenilirlik sağlar. Ayrıca metaller kolayca dökülebilir veya plastik deformasyon oluşturularak şekillendirilebilir. Ayrıca karmaşık montajlarda vida ve kaynak ile birleştirmeye elverişlidir. Ağır ve korozif olmaları kullanımda zorluk yaratan özellikleridir. Bazı metaller, lifler veya tanecikler ile takviye edilerek kompozit malzeme elde edilebilir. Örneğin, tungsten alaşımlı lifler ile takviye edilen metal alaşım kompozitler, 1000 °C'ye varan sıcaklıklara dayanabilmektedir ve bu kompozitler jet motoru yapımında kullanılmaktadır. Genellikle Ti, Al, Ni, Mg, Zn ve Cu matris malzemesi olarak kullanılır. Saf alüminyum korozyona karşı direncin arandığı alanlarda, alüminyum alaşımları ise birim kütle başına yüksek dayanımın arandığı alanlarda yararlıdırlar. Metal matrisler tüm takviye edici malzemeler ile iyi ara yüzey bağı oluşturmazlar. Metaller ile en kolay ara yüzey bağı

oluşturan silisyum karbür ile kaplanmış boron elyafıdır. Metal matrisli kompozitlerin üretimi zordur ve maliyeti oldukça yüksektir [3-5].

2.1.3. Seramik matris kompozitler

İnorganik bileşiklerden oluşan seramikler doğada kayaların dış etkenler ile parçalanması sonucu oluşan kil kaolen vb. maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilirler. Seramikler yüksek dayanımlı, düşük yoğunluklu, yalıtkan ve sert olmalarına rağmen oldukça gevreklerdir. Seramikler kimyasal ve termal etkilere karşı yüksek direnç gösterirler. Ancak yüksek erime sıcaklıkları ve sertlikleri nedeniyle işlenmeleri zordur. Kırılgan yapıları seramikleri potansiyel olarak güvensiz yapmaktadır. Metallerle karşılaştırıldığında, çok gevrek olduklarından plastik olarak akamazlar. Bu malzemeler ile yapılan parçalar çok dikkatli ve doğru tasarlanmalıdır. Seramik kompozitler Al_2O_3 , Li_2O_2 , SiO_2 gibi seramik matrislerden hazırlanır. Takviye edici olarak ise genellikle SiC, Al_2O_3 , Si_3N_4 kullanılır [3].

2.1.4. Parçacık kompozitler

Parçacık kompozitlerde, seramik ve alaşım gibi matrislerin içinde parçacıklar yer alır. Parçacıklar rastgele dağıldığı için genellikle izotropiktir. Parçacık kompozitler yüksek mukavemet, arttırılmış çalışma sıcaklığı, oksidasyon direnci gibi avantajlara sahiptir. Tipik örnekler olarak kauçuk içinde alüminyum parçacıkları, alüminyum içinde silisyum karbür parçacıkları ve betonarme yapımında kullanılan kum, çakıl ve çimento sıralanabilir [26].

2.1.5. Pul kompozitler

Pul kompozitler, matris içine düz pul şeklindeki takviye malzemelerin eklenmesi ile oluşur. Tipik pul malzemeleri cam, mika, gümüş, alüminyum olarak sıralanabilir. Pul kompozitler; yüksek mukavemet, yüksek düzlem dışı eğilme modülü ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptirler. Ancak kolay yönlendirilemezler ve kullanılacakları malzemeler sınırlıdır [26].

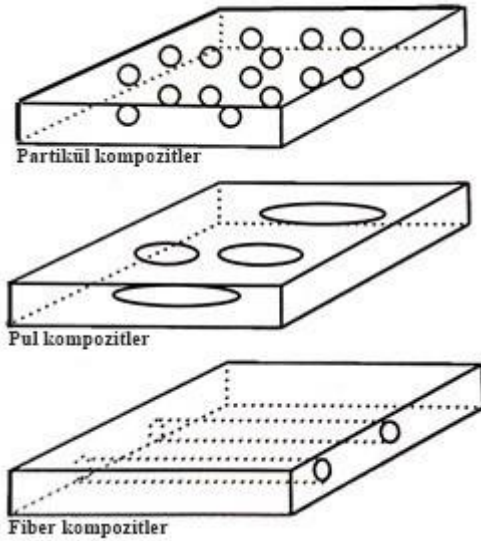
2.1.6. Elyaf kompozitler

Elyaf kompozitler kısa (süreksiz) veya uzun (sürekli) elyaf takviyeli matrislerden oluşur. Elyaf lar genellikle anizotropik özellik gösterirler. Elyaf kompozitler kolay yönlendirilebilir. Böylece, istenilen doğrultularda farklı özelliklerin ortaya çıkması sağlanabilir. Yaygın

olarak karbon ve aramid gibi elyaflar takviye elamanı olarak kullanılmaktadır. Matris örnekleri olarak ABS gibi polimerler, alüminyum gibi metaller ve kalsiyum alümina silikat gibi seramikler verilebilir [26].

2.1.7. Nanokompozitler

Nanokompozitler, en az biri nano boyutta (10^{-9} m) olan iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesi ile üretilirler. Mikro partiküllerden nano boyuttaki partiküller oluştururken mekanik özellikler önemli derecede değişir. Nanomalzemeler, mikro yapı malzemeler ile aynı kompozisyonda olsalar bile farklı özellikler gösterebilirler. Çünkü nano boyutlu malzemelerin yüzey alanı oldukça geniştir ve kimyasal/fiziksel özellikler yüzey veya yüzey özellikleri tarafından kontrol edilmektedir. Nanokompozit araştırmaları veri depolama, elektronik ve bilgisayar, uzay ve uçak, iletişim, sağlık, çevre ve enerji gibi birçok alanı kapsamaktadır. Nanokompozitler ile çekme dayanımı, elastisite modülü, elektrik iletkenliği, ısı kaybı ve oksijen iletim hızları gibi özelliklerde geliştirilebilir [26]. Şekil 2.3’de takviye geometrisine göre sınıflandırma görülmektedir.

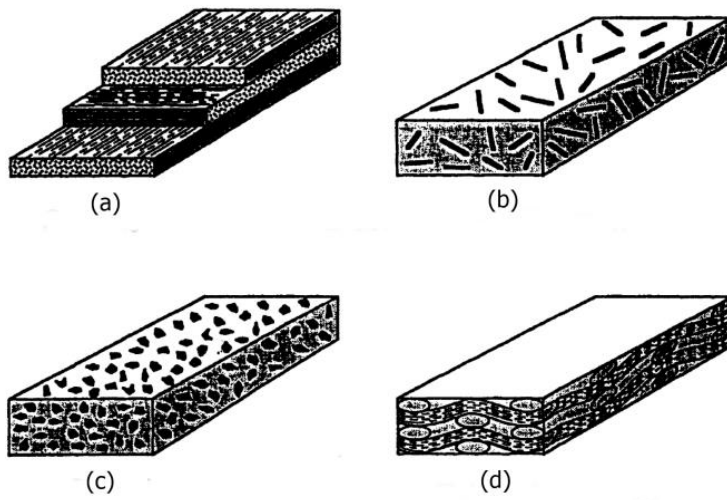


Şekil 2.3. Takviye şekline göre kompozit türleri [26]

2.2. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Sünek ve yumuşak matrisler içerisine dayanıklı, elastikliği yüksek ve sert elyaflar ilave edilerek çekme dayanımı, özgül modülü, özgül dayanımı ve yorulma dayanımı gibi özellikler geliştirilebilir [26, 30]. Matris malzemesi yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlarken

kuvveti elyaflara transfer etmektedir. Uygulanan yükün çoğunu elyaf taşımaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaflar; şerit fitil, örme ve tabaka halinde olabilirler. Elyafların kompozit içerisine belli doğrultularda yerleştirilebilmeleri büyük bir avantaj sağlar. Elyaf lar matris içerisine farklı doğrultularda yerleştirilerek, kompozitin farklı yönlerden gelen yüklemelere farklı tepkiler vermesi sağlanabilir (Şekil 2.4). Örneğin kompozitin kopma dayanımı, liflerin yönlendirildiği eksene 90° lik açı ile yapılan yüklemelerde en büyük olacaktır. Benzer şekilde darbe dayanımı, ısı genleşme ve ısı iletkenlik gibi özelliklerde liflerin yönlendirilmesine bağlıdır.



Şekil 2.4. Elyafların kompozit içerisine farklı geometrilerde yerleştirilmesi a) sürekli elyaf, b) kısa elyaf, c) partikül, d) tabakalı [31].

2.2.1. Sürekli elyaf takviyeli kompozitler

Sürekli elyaflar, yönlendirilme özellikleri ile diğer takviye elemanlarına göre daha yüksek mekanik özellik gösterirler. Yönlendirme doğrultusuna bağlı olarak basma, çekme ve eğilme gerilmeleri için yüksek dayanım sağlarlar. Tek eksen de çekme dayanımına maruz kalan bölgeler, elyaf doğrultusunda maksimum performans gösterirlerken elyaf eksenine dik doğrultuda düşük mekanik özellikler gösterirler. Çünkü bu durumda matris malzeme esas gerilmeye maruz kalmaktadır. Elyaf eksenine hem paralel, hem de dik kuvvetler uygulandığında mekanik özellikleri geliştirmek için elyaflar farklı açılarda takviye edilerek yüksek özelliklerin elde edilebilir [3-5].

2.2.2. Kısa elyaf takviyeli kompozitler

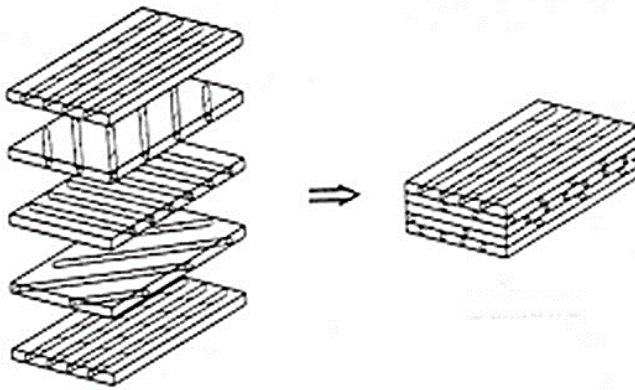
Kısa elyaflar genellikle 0,5-6 mm uzunluğunda ve 1-5 μm çapında üretilirler. Kısa elyaflı kompozitlerin üretiminde kullanılan en uygun yöntem sıkıştırırmalı döküm tekniğidir. Bunun yanında plazma püskürtmeli çökeltme yöntemleri ve toz metalurjisi ile de kısa elyaflı kompozitler üretilebilmektedir. Toz metalurjisi yönteminde oluşan mekanik kuvvetlerden dolayı elyaflar hasar görebilmekte iken plazma püskürtme yönteminde ise ölçü ve şekil etkenlerinin sınırlı olmasından dolayı üretilen kompozitler düşük mekanik özellik gösterebilmektedirler. Kısa elyaflı kompozitlerin; maliyetinin düşük, üretim işleminin hızlı ve şekil verme yeteneğinin yüksek olmasından dolayı sürekli elyaflara göre tercih edilirler [3-5].

2.3. Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

Partikül takviyeli kompozitler, matris malzeme içerisine parçacık halinde ki başka bir malzemesinin takviye edilmesi ile üretilirler. Elde edilen kompozit malzemenin mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın kullanılan kompozit tipi ise metal parçacık takviyeli plastik kompozitlerdir. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Bir diğer partikül takviyeli kompozit türü olan; metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların sıcaklık dayanımları ve sertlikleri yüksektir. Bu tip kompozitler boyutsuz olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin ya da tek veya iki boyutlu makroskopik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemeler olup, ortalama gömülmüş parçacık boyutu 1 μm 'den küçük ve elyaf hacim oranları genellikle %25'den azdır. En çok tercih edilen parçacıklar ise Al_2O_3 ve SiC 'den oluşan seramiklerdir. Burada yük, matris ve elyaf ile birlikte taşınır ve izotropik özellik gösterirler. Bu kompozitler dayanımı geliştirmekten ziyade alışılmışın dışında farklı özellikleri elde etmek için tasarlanmışlardır. Genellikle döküm yolu ile elde edilen bu kompozitlerde, parçacık ilave edildiğinde tozların homojen karışma zorluğu ve eriyik viskozitenin düşmesi sorunu vardır [3]. Bu kompozitlerin dayanımı, parçacık büyüklüğüne, homojen dağılıma, matrisin özelliğine, parçacık özelliğine bağlı olarak değişir. Bu tip kompozitlerde artan takviye elamanı eklentisi ile yapı içerisinde poroziteler oluşur [3]. Bu nedenle haddeleme gibi fiziksel bir işlem ya da takviye edici ve matrisin birbirine tutunmasını sağlayan uyumlaştırıcı gibi kimyasal malzemeler gerekmektedir.

2.4. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabaka; matris içinde örülmüş lifler ya da tek yönlü lif düzlemidir. Tek yönlü lif düzlemine, tek yönlü lamina da denilmektedir. Tabakalı kompozitler, yapısal yönden partikül ve elyaf takviye edilmiş kompozit malzemeden farklıdır. Tabakalı kompozitler, malzeme eksenleri boyunca farklı yönlerdeki katmanların üst üste dizilerek bir araya getirilmesi ile elde edilirler (Şekil 2.5). Farklı kombinasyonlar kullanılarak tabakalı kompozitler üretilebilir. Tabakalı kompozitler, farklı özelliklerde ki en az iki tabakanın birleştirilmesi ile oluşturulurlar. Yumuşak malzemeler ile sert malzemelerin birleştirilmesiyle aşınma direncinin ve sertlik, sayıf korozyon direncine sahip metallerin üzerinin daha yüksek dirençli metaller veya plastiklerle kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, farklı elyaf yönlenmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin sağlanması mümkündür [25,30]. Tabakalar, matris içerisine gelişigüzel, tek yönlü veya farklı yönlü olarak konumlandırılabilir. Her tabaka tasarım amaçlarına göre farklı elyaf yönlendirilmesi ile oluşturularak istenilen özellikler elde edilebilir. Genellikle her katman çok ince olup 0.1 mm kalınlığındadır. Her katmandaki kompoziti oluşturan elemanlar aynı ise izotropik olarak adlandırılır. Çok katlı kompoziti oluşturan katmanlar farklı malzemelerden oluşuyor ise ortotropik olarak adlandırılır. Örneğin bir ortotropik katmanlı kompozitin bir katmanı grafit elyaf takviyeli epoksi iken diğer katmanı ise cam elyaf takviyeli epoksi olabilmektedir [3].



Şekil 2.5. Tabakalı kompozit yapısı [32]

2.5. Kompozitlerde Takviye Elamanları ve Özellikleri

Mühendislikte kullanılan takviye elamanlarının pek çoğu elyaf şeklinde üretildiklerinde, katı haldeki konumlarına göre dayanımları 30-50 kat ve rijitlikleri 3 kat artarak yüksek

performans gösterirler. Örneğin karbon elyaf, kütle halinde bulunan grafitte göre yaklaşık 50 kat daha fazla dayanım gösterir. Çapları genellikle 5-20 μm olan elyafların mekanik özellikleri elyafın boyu, yüzeyi, yönlendirilmesine bağlıdır. Ayrıca elyaf ile matris arasındaki ara yüzey bağı arttıkça mekanik özellikler önemli derecede artar. Takviye elamanı kompozit parça üzerine gelen kuvvetin önemli kısmını taşır. Kuvvetin elyaflara iletilmesi için ara yüzey bağlarının güçlü ve fazlar arasındaki kimyasal/fiziksel uyumun iyi olması gerekmektedir. Kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması için ise matris ile takviye elamanının ısı işlem genleşme katsayıları arasındaki uyum önemlidir [3]. Kompozit malzemelerin üretiminde elyaf içeriği, üretimin tekniği, elyafların matris tarafından ıslatılabilmesi ve elyafın yönlendirilebilirliği kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Bu sebeple matris ve takviye elamanının özelliklerinin doğru bilinmesi gerekmektedir. Elyaflar, yüksek dayanım ve modül, düşük yoğunluk, üretim kolaylığı, kimyasal uyumluluk, ısıl direnç gibi kriterlere göre seçilmelidir [3].

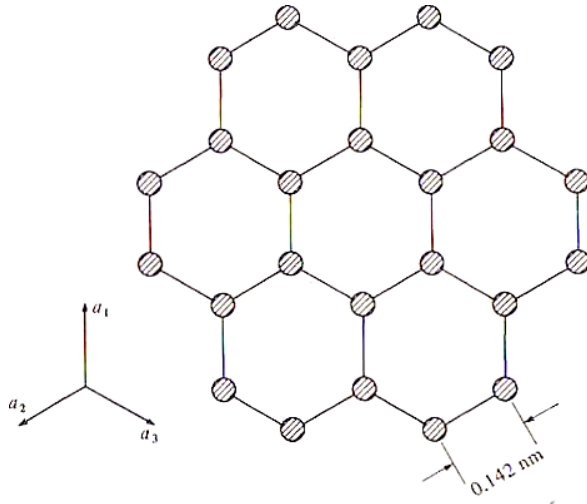
Buna ek olarak, özellikle seramik ve metal matrisli kompozitler için elyafların sıcaklık dayanımları, takviye elamanının morfolojisi, mikro yapısı, kimyası ve fiziksel özellikleri yanı sıra maliyet gibi diğer faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir [3]. Son zamanlarda takviye elemanı olarak kullanılan başlıca seramikler; karbon, cam, boron, silisyum karbür, alümina ve metalik cam olarak sıralanabilir. Bu seramiklerin özgün özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Kompozitlerde kullanılan bazı seramik elyafların fiziksel ve mekanik özellikleri [3]

Malzeme cinsi	Yoğunluk (kg/m^3)	Elyaf çapı (μm)	Elastisite modülü (GPa)	Çekme dayanımı (GPa)
E-camı	2500	12	70	1,5-2
S-cam	2600	10	90	4,6
Karbon (PAN)	1800	7-10	400	2-2,8
Karbon (YD)	1700	7-10	200	3-3,5
Karbon (mesafaz)	1900	7-10	220	3,2
Boron	2600	140-160	400	3,4
Al_2O_3 (FP)	3950	20	380	1,4-2,1
Al_2O_3	3300	3	300	2
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$	3100	10	206	1,7
Silisyum karbür	320	1-50	480	7,0
SiC	2250	12	200	2,5

2.5.1. Karbon elyaf

Yüksek dayanım ve yüksek elastisite modülüne sahip olan karbon elyaflar 7-8 μm çaplı ve karbonun alotropik formu olan turbostratik grafit kristallerinden oluşmaktadır. Grafitte tek kristalin atom yapısı Şekil 2.6’da görüldüğü gibi altıgen formdadır.

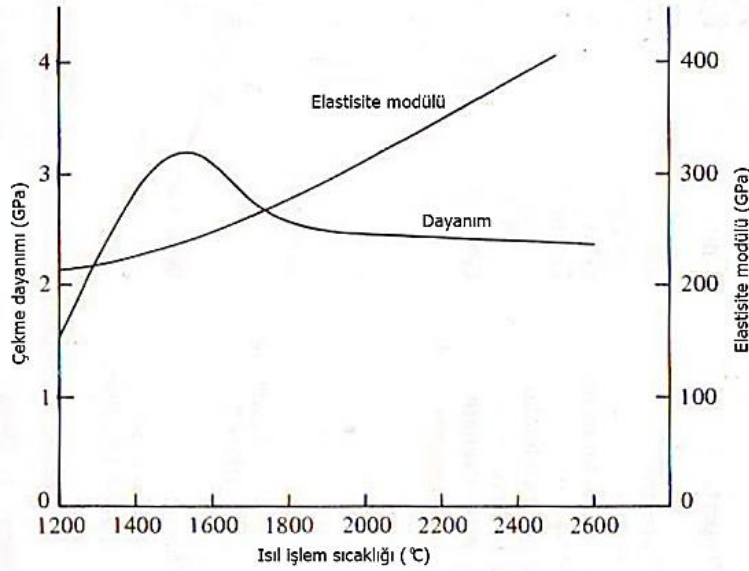


Şekil 2.6. Grafit düzleminde bulunan karbon atomlarının dizilimi [26]

Katman veya taban düzleminde yer alan atomlar birbirlerine güçlü kovalent bağlar ile bağlı iken katmanlar arasında zayıf van der Waals bağı bulunur. Bu temel kristal ünitelerin son derece anizotropik olduğu anlamına gelir. Eksenler arasındaki anizotropiden dolayı elastisite modülü 910 GPa ile 30 GPa arasında değişir [26]. Organik maddelerden üretilen karbon ve grafit elyaflar organik elyaf olarakta adlandırılabilirler. Karbon elyaflar hammadde olarak selüloz (rayon), poliakronitril (PAN) ve zift (pitch) kullanabilirler ve üretildikleri hammaddeye göre isimlendirilirler. Öncü polimer ıslak ip şeklinde liflendirme veya eriyik liflendirme ile ekstrüzyon işleminden geçerek elyaf şekline dönüşür [3]. Karbon elyafın özelliklerini üretim yönteminde belirler. Endüstriyel bazda karbon elyaf üretiminde termal oksidasyon ve organik precursor kullanarak grafitleme işlemi yapılmaktadır. Bu işlemler üç seviyede gerçekleşir. Bunlar;

- Havada düşük oksitleme sıcaklığı (200-400 $^{\circ}\text{C}$)
- Soygaz atmosferi altında karbonlama (1000-1500 $^{\circ}\text{C}$)
- Soygaz atmosferi altında grafitleme (2000-2500 $^{\circ}\text{C}$)

Daha yüksek elastisite modülü veya kristallığı sağlamak için 2000 °C'nin üzerinde kimi zaman 3000 °C'de son bir ısıtma işlemi uygulanır. Şekil 2.7'de standart bir grafitleme çevrimi ve sıcaklığın elastisite modülüne ve çekme dayanımına etkisi gösterilmiştir [26].



Şekil 2.7. Isıl işlem sıcaklığının PAN precursor karbon elyafların dayanımına ve elastisite modülüne etkisi [26]

Ticari PAN karbon elyafın yüksek elastik modüllü (Tip 1) ve yüksek dayanımlı (Tip 2) olmak üzere iki tipi mevcuttur. En yüksek modül elde etmek için işlem sıcaklığı 2500-3000 °C olmalıdır. Ancak, dayanım çatlakların dağılımı ve ince yapı ile ilgilidir. Elyafın sıcaklığı yüksek matrislerde kullanmak için seramik veya metal koruyucu filmleri ile de kaplanabilir. Elyaf 400 °C üzerindeki havada oksitlenirken azot atmosferinde kararlılaştırılır [33]. Bahsedebildiği üzere karbon elyafın yapısal özellikleri bazı etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Bunlar, kristallığı, elyaf doğrultusu, kusurların etkisi olarak sıralanabilir. Yönlendirilmiş elyaf doğrultusunda; boyuna çekme dayanımı, elastisite modülü, ısı ve elektrik iletkenliği ve boyuna negatif ısı genleşme katsayısı artmasına rağmen enine çekme dayanımı ve modülü azalmaktadır. Kristallığı geliştirildiğinde ise elektrik ve ısı iletkenliği, oksidasyon direnci ve boyuna negatif ısı genleşme katsayısı artar. Ancak malzemenin çekme ve basma dayanımı ile kayma modülü azalır. Kusurların azalması ise çekme dayanımı, ısı ve elektrik iletkenliğini ve oksidasyon direncini artırır. Kısacası; karbon elyafların yapısı kontrol edilirken, elyaflar eksen doğrultusunda yönlendirilirler. Böylece, ısıtma işlemi sırasında kısılma olmaz. Ayrıca prekürsörün tipi karbon elyaf doğrultusunu belirlemede önemlidir [3, 33].

Karbon elyafların bir diğer önemli özellikleri ise Hook'un elastik davranışlarına uymama özelliğidir. Tek bir elyaf ya da düzenlenmiş kompozit çekildiğinde, modülü uzama miktarı ile artar. Ampirik ilişki Eş. 2.1'de ki gibidir.

$$E_s = E_0(1 + f_s) \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte,

E_s : s uzamasındaki çekme modülü,

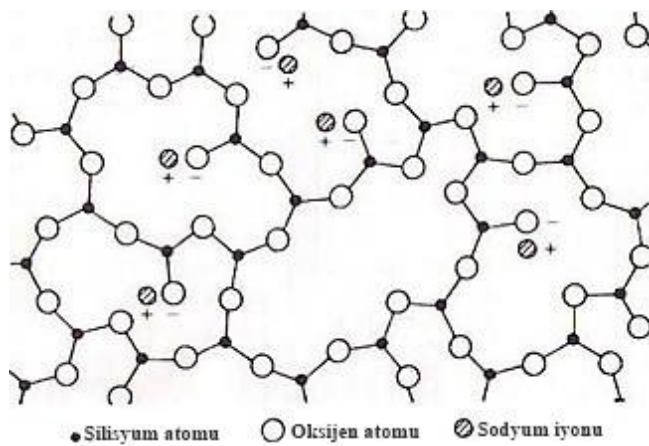
E_0 : başlangıç anında çekme modülü,

f : elyaf türüne göre belirlenen faktördür.

Kompozitin rijitliği, kırılma noktasına yaklaşıldığında %20'ye kadar artabilir. Kritik yapılar tasarlanırken, verilen modüldeki uzama miktarını bilmek oldukça önemlidir [3].

2.5.2. Cam elyaf

Farklı cam minerallerinin birleşimi ile elyaflar üretilebilir. En yaygın olarak kullanılan ise silisin (SiO_2) belirli oranlarda kalsiyum, sodyum, bor, demir ve alüminyum gibi elementlerin oksitleri ile meydana gelir. Polimer esaslı kompozitler içinde cam elyaf, en ucuz ve en yaygın kullanılan takviye elemanıdır. Silis atomları, oksijen atomlarına kovalent bağ ile rastgele bağlanarak üç boyutlu polihedra ağını oluştururlar. Değişik valansın katyonları bazı oksijen atomlarına iyonik bağlanmaktadır. Bu nedenle dengeyi daha küçük birimlere ayırmaktadır. Şekil 2.8'de sodyum silikat camının iki boyutlu yapısı görülmektedir.



Şekil 2.8. Sodyum silikat camı yapısının iyi boyutta gösterilmesi [26].

Camlar genellikle amorf olmasına rağmen bazen kristalizasyon için yüksek sıcaklığın uzun süre uygulanması gerekebilir. Bu durum genellikle dayanımın düşmesine sebebiyet verir. Çizelge 2.2’de, kompozit malzemelerde cam elyafı olarak kullanılan en yaygın üç camın tipik birleşimleri verilmiştir.

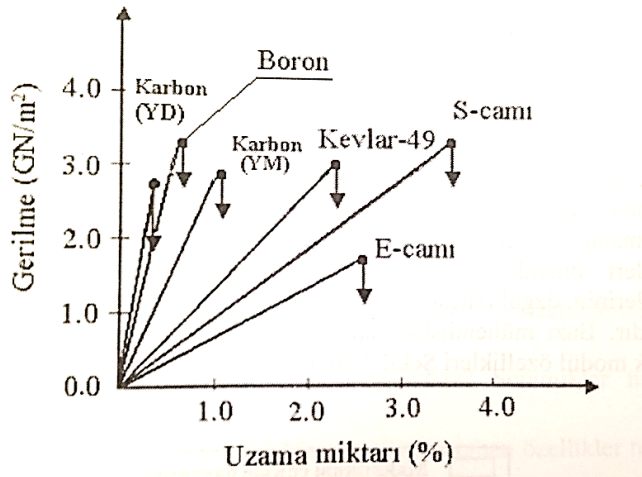
Çizelge 2.2. Cam türleri ve özellikleri [26]

Formülü	E camı	S camı	C camı
SiO ₂	52,4	64,4	64,4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	14,4	4,1	25,0
CaO	17,2	13,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
Na ₂ O ₃ , K ₂ O	0,8	9,6	0,3
Ba ₂ O ₃	10,6	4,7	-
BaO	-	0,9	-

E camı elektriksel özellikleri ön plana çıkan ve en yaygın kullanılan camdır. E camı yüksek dayanım, sertlik ve elektrik yalıtım özelliklere sahiptir. S camı, daha yüksek modüle sahiptir fakat daha pahalıdır. C camı ise iyi korozyon direnci ile ön plana çıkar fakat mekanik özellikleri düşüktür. Camların dayanımı, yüzey üzerindeki kusurlara ve mikro çatlaklara bağlıdır. Üstün kaliteli elyafın üretilmesi için saflığı yüksek malzemelerin homojen biçimde erimesi, yüksek sıcaklıkta çekilmesi ve koruyucu ile kaplanması gerekmektedir [3,26].

2.5.3. Organik elyaflar

Organik moleküllerden oluşan bu elyaflar tam uyumlu yapıya sahip olmaları durumunda yüksek dayanım ve sertliğe sahip olurlar. Üstün eksenel özellikleri sağlamak için çekilip uzatılarak halkalı zincir dizilimi elde edilir. Buna en iyi örnek olarak aromatik poliamid (ticari adı ile kevlar) verilebilir. Kevların iki versiyonu mevcuttur. Bunlar; kevlar 29 ve kevlar 49 olarak adlandırılır. Kevlar 29, genelde dokuma veya örme şeklinde üretilerek kurşun geçirmez yelek, halat ve lastiklerde kullanılır. Kevlar 49 ise yüksek modüle sahip olduğundan takviye elamanı olarak yorulma ve kimyasal etkilere karşı direnci geliştirmek için kullanılır. Organik elyafların dezavantajları ise suya ve UV ışığına uzun süre maruz kalmaları halinde mekanik özellikleri azalır.



Şekil 2.9. Bazı elyafların çekme gerilmesine karşı uzama miktarları [3]

Şekil 2.9'da görüldüğü üzere yüksek modüllü elyafların uzamaları %1 veya daha azdır. Kevlar ve cam elyaflar ise %3-4'e kadar uzayabilmektedirler. Takviye elemanı olarak kullanılan elyafların kullanım alanlarına göre özellikleri Çizelge 2.3 'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Elyaf takviyelerin kullanım alanlarına göre özellikleri ([3]'den uyarlanmıştır)

Takviye Elemanı	Özellikleri
E Camı	Düşük maliyet ile yüksek elastisite ve yorulma dayanımı gerektiren parçalar
S Camı	Büyük yüklere maruz kalan hafif parçalar
Yüksek modüllü karbon	Minimum ağırlık, yüksek rijitlik ve orta dayanım
Yüksek dayanımlı karbon	Minimum ağırlık, yüksek dayanım ve orta rijitlik
Kevlar	Yüksek şok direnci, üstün çekme dayanımı, orta rijitlik ve düşük basma dayanımı
Boron	Yüksek özgül ağırlık, yüksek dayanım
Silisyum karbür	Yüksek sıcaklık dayanımı, ekonomik
Alüminyum oksit	Yüksek dayanımı ve yüksek elastisite modülü

2.6. Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Eksenel P yüküne maruz kalan prizmatik bir çubuktaki eksenel uzama u ,

$$u = \frac{PL}{AE} \quad (2.2)$$

L: Çubuk boyu

E: Çubuk malzemesinine ait elastisite modülü (Young modülü)

A: Kesit alanı

Çubuk kütlesi M ile gösterilirse

$$M = \rho AL \quad (2.3)$$

ρ : Çubuk malzemesinin yoğunluğu

$$M = \frac{PL^2}{u} \frac{1}{E/\rho} \quad (2.4)$$

Eş. 2.4'de görülebileceği üzere belirli bir yük altında ki dayanım için gerekli olan en hafif kiriş en yüksek E/ρ değerine sahip kiriştir.

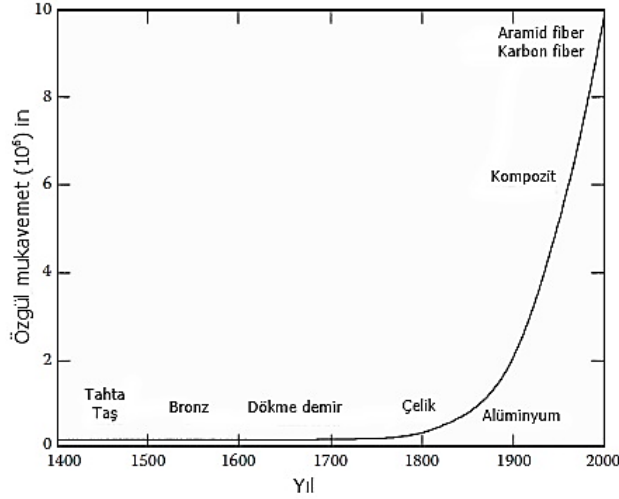
Mekanik üstünlüğü ölçmek için özgül modül adı verilen (E/ρ) değeri hesaplanır (Eş. 2.5). Diğer parametre özgül mukavemet (Eş. 2.6) olarak adlandırılır ve malzeme mukavemetinin (σ_{maks}), malzeme yoğunluğuna (ρ) oranı olarak tanımlanır [26].

$$\text{Özgül modül} = \frac{E}{\rho} \quad (2.5)$$

$$\text{Özgül mukavemet} = \frac{\sigma_{maks}}{\rho} \quad (2.6)$$

Kompozit malzemelerde her iki oran da yüksektir. Örneğin tek yönlü bir grafit/epoksi kompozitin mukavemeti çelikle aynı olabilir ama özgül mukavemeti çeliğinkinden üç kat fazladır. Bu durum sabit eksenel yükü taşımak için tasarlanmış bir çubuk ele aldığımızda; çelik çubuk ve grafit/epoksi çubuk kesit alanları eşit olduğunda, grafit/epoksi çubuğun kütlesinin çelik çubuğun kütlesinin üçte biri olacağı anlamına gelir. Kütledeki bu azalma,

malzeme ve enerji maliyetlerinin azalması anlamına gelir. Şekil 2.10, farklı zaman dilimlerinde kullanılan geleneksel malzemeler ve kompozitlerin özgül mukavemet değerlerini göstermektedir [26].



Şekil 2.10. Malzemelerin özgül mukavemet değerlerinin zamana bağlı değişimi [26]

Burada özgül mukavemet birimi inç olarak verilmiştir. Çünkü mukavemet ve özgül modül aynı zamanda aşağıdaki gibi de tanımlanabilir (Eş. 2.7 ve Eş. 2.8).

$$\text{Özgül modül} = \frac{E}{\rho g} \quad (2.7)$$

$$\text{Özgül mukavemet} = \frac{\sigma_{maks}}{\rho g} \quad (2.8)$$

Burada g, yer çekimi ivmesidir (32.2 ft/s² veya 9.81 m/s²).

Çizelge 2.4. Bazı elyaf, metal ve kompozitlerin mukavemet değerleri ve özgül modülleri [26]

Malzeme	Özgül ağırlık	Elastisite modülü (GPa)	Maksimum mukavemet (MPa)	Özgül modül (GPa*m ³ /kg)	Özgül mukavemet (MPa*m ³ /kg)
Grafit elyaf	1,8	230	2067	0,1278	1,1480
Aramid elyaf	1,4	124	1379	0,0885	0,9850
Cam elyaf	2,5	85	1550	0,0340	0,6200
Tek yönlü grafit/epoksi	1,6	181	1500	0,1131	0,9377

Çizelge 2.4. (devam) Bazı elyaf, metal ve kompozitlerin mukavemet değerleri ve özgül modülleri [26]

Malzeme	Özgül ağırlık	Elastisite modülü (GPa)	Maksimum mukavemet (MPa)	Özgül modül (GPa*m ³ /kg)	Özgül mukavemet (MPa*m ³ /kg)
Tek yönlü cam/epoksi	1,8	38,60	1062	0,0214	0,5900
Çapraz tabakalı grafit/epoksi	1,6	95,98	373	0,0600	0,2331
Çapraz tabakalı cam/epoksi	1,8	23,58	88,25	0,0131	0,0490
Yarı izotropik grafit/epoksi	1,6	69,64	276,48	0,0435	0,1728
Yarı izotropik cam/epoksi	1,8	18,96	73,08	0,0105	0,0406
Çelik	7,8	206,84	648,1	0,0265	0,0830
Alüminyum	2,6	68,95	275,8	0,0265	0,1061

Çizelge 2.4’de görüldüğü üzere aramid, grafit ve cam elyafın özgül mukavemeti, alüminyum ve çelik gibi metallerin özgül mukavemetinden oldukça büyüktür. Bu durum kompozit malzemelerin mekanik özellikleriyle ilgili yanılığa neden olabilmektedir. Ancak kompozitlerin yalnızca elyaf değil; genel olarak elyaflara göre daha düşük özgül mukavemet ve elastisite modülüne sahip olan matrislerde içerdiği unutulmamalıdır. Ayrıca Çizelge 2.4’de bahsedilen tek yönlü kompozitler sadece basit eğilme ve eksenel çeki gibi basit yüklemelerde kullanılır. Karmaşık yüklemelerde ise farklı açılı tabakalara sahip kompozitlerin kullanılması gerekmektedir [26].

2.6.1. Elyaf özelliklerinin kompozitin mekanik performansına etkisi

Kompozit malzemeler oluşturulurken elyaf özellikleri mekanik özelliklerin belirlenmesinde çok önemli rol oynamaktadır. Elyaf özelliklerinin kompozitin mekanik performansına etkisi şu şekilde sıralanabilir:

Elyafın boyu: Uzun elyaflar kısa elyaflarla kıyaslandığında; darbe direnci, boyutsal stabilite gibi avantajlar sağlar. Ancak kısa elyaflar düşük maliyet ve düşük imalat süreleri ile tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra kısa elyaflar daha az kusur içerdikleri için daha yüksek mukavemete sahiptirler [1].

Oryantasyon: Elyaf lar dizildiği yönlerde daha yüksek rijitliği ve mukavemet gösterirler. Eğer elyaf lar iki ya da daha çok yönde ise, bu yönlerdeki mukavemet ve rijitlikleri daha yüksek olacaktır [1].

Elyaf ın şekli: Elyaf lar üretim kolaylığı sebebiyle çoğunlukla dairesel kesite sahiptirler. Kare ve altıgen kesitli elyaf lar ın sağladığı avantaj ise üretimindeki zorluklar dikkate alındığında tercih edilmez [1].

Elyaf ın malzemesi: Elyaf ın malzemesi kompozitin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Genellikle elyaf lar ın yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahip olması beklenir. Bu beklenti ve maliyetler doğrultusunda kompozitlerde genellikle aramid, grafit ve cam gibi elyaf lar tercih edilir [1].

Kompozit malzemelerin mekanik performansını etkileyen bir diğer faktör ise elyaf -matris ara yüzeyidir. Kompozit  zerine etkiyen kuvvet takviye elemanlarına ara yüzey aracılığı ile iletilir. Bu sebeple takviye elemanları matrise sıkıca tutunmalılardır. Kuvvetli bağ yapısına sahip kompozitte yüksek mukavemet fakat kırılğan davranış görülür. Matris ile takviye elemanı arasındaki bağın zayıf olması durumunda ise düşük mukavemetli fakat kırılmaya karşı yüksek dirençli kompozitler elde edilir. Yorulma, korozyon ve sürünme direnci gibi diğer özelliklerde ara yüzeyden etkilenmektedir [26].



3. HIZLI PROTOTİP OLUŞTURMA

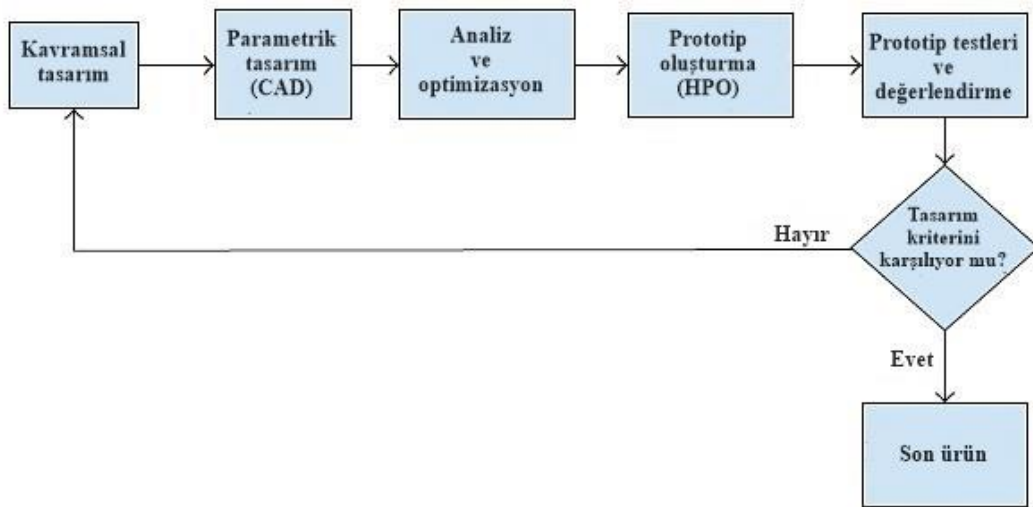
Dünya tarihinde, insanoğlu ihtiyaçlarını karşılamak için doğada bulunan kaynakları kullanmıştır. İnsanlığın ihtiyaçları geliştikçe kaynaklar yetersiz kalmış ve üretim sistemlerinin doğmasına neden olmuştur. Her geçen gün artan ihtiyaçlar üretim sistemlerinin de gelişmesine sebep olmuştur. Bu gelişmeler, ihtiyaçları daha iyi ve daha hızlı karşılamak amacıyla yoğunlaşarak teknoloji kavramını doğurmuştur. Geçmişte başlayan bu zincirleme reaksiyonlar, günümüz çalışmalarında üretilebilirlik, verimlilik, maliyet kalite ve zaman gibi kavramları önemli hale getirmiştir [34]. Günümüz teknolojisinde, ürün geliştirme (Ür-Ge) araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri ile ihtiyaçları karşılayan ürünler veya parçalar tasarlanmaktadır. Tasarım süreçlerinde dikkate alınan konular arasında, tasarımına devam edilen parçanın ihtiyaca uygun cevap verebilmesinin yanında, tasarım aşaması sona erdiğinde üretilebilir olması ve bu üretilebilir tasarımın ihtiyaç arz ederek tasarım sürecinin başlamasına neden olan insanlara yani pazara sunulduğunda ulaşılabilir olması yer almaktadır. Bu noktada üretim ve Ar-Ge faaliyetlerini hızlandırmak ile birlikte bu faaliyetlerde görülen maliyetleri düşürmek önemi artan değerler haline gelmiştir [35]. Bilimsel öğrenme yöntemleri arasında yer almakta olan deneme-yanılma yöntemi üretim sistemlerine uyarlandığında, tasarlanan üretimin amaca uygunluğunu öğrenmek için deneme ihtiyacı bulunmaktadır. Bu deneme ihtiyacı, teknolojik olanaklar çerçevesinde üretilen prototipler ile karşılanmaktadır. Prototip üretimi mevcut seri üretim teknikleri ile birlikte gerçekleştirildiğinde maliyet ve üretim zamanı bakımından verimsizdir. Bu manada, gereksinimleri karşılamak için geliştirme çalışmaları devam eden Hızlı Prototip Oluşturma Teknolojileri (HPO) olarak adlandırılan teknolojiler, model üretim sistemlerinin önemli teknolojileri arasında yer almaktadır [36]. HPO teknolojilerinin geleneksel yöntemlere nazaran avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir HPO teknolojilerinde üretilmesi istenilen parçaların öncelikle bilgisayar desteği ile üç boyutlu modelleri oluşturulur. Üç boyutlu tasarım, endüstriyel tasarım teknikleri ile bilgisayar yazılımları kullanılarak yapılabileceği gibi hazır bir model üzerinden üç boyutlu dijital veya optik tarayıcılar kullanılarak da elde edilebilir. Üretilmesi istenen parçanın tasarımı modelin sınırlarını, iç ve dış yüzeylerini içermelidir. Bu üç boyutlu tasarım verisi Stereolithography (STL) veri formatına dönüştürülerek HPO tekniklerinde kullanılabilir hale getirilir. STL veri formatında model üçgenlerden oluşmuş yüzeylerden ibarettir. Üçgenlerden oluşmuş model verisi dilimlere ayrılır. Dilimler sistematik bir şekilde kullanılarak katman katman yazdırılırlar [37].

Çizelge 3.1. HPO'nun genel avantajları ve dezavantajları [38-40]

Avantajlar	Hemen her tasarıma uygulanabilir ve tam otomatik yapılabilir.
	Kullanımı oldukça kolaydır.
	Prototip maliyeti az olur ve farklı tasarım seçenekleri kolay elde edilebilir.
	Gerçek model hataları kolay kontrol edilebilir.
Dezavantajlar	Büyük boyuttaki prototipler için elverişli değildir.
	Malzeme özelliklerine bağlı olarak mekanik özellikleri zayıftır ve bazen de son işlem gerekir.

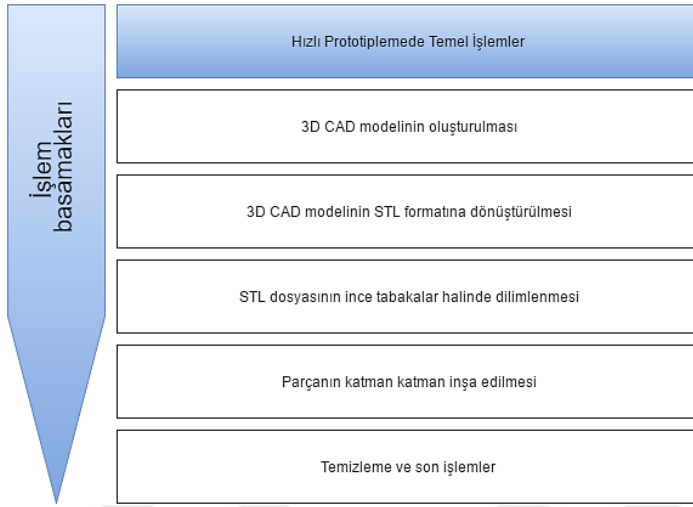
3.1. Üretim Metodu

Hızlı prototip oluşturma teknolojisi, imalat, kavramsal modellemede, medikal ve dental uygulamalarda, hassas döküm tekniği ile metal parça ve prototip üretiminde, doğrudan döküm kalıbı ve parça üretiminde, mimari uygulamalarda, hızlı kalıp imalatında, uzay/otomotiv sanayinde, eğitim ve takı gibi bir çok sektörde geniş kullanım alanı sunamaktadır [6]. Şekil 3.1'de HPO teknolojisi ile ürün geliştirme sürecini göstermektedir. Burada, model oluşturma süreci hızla gerçekleştirilirken zaman ve maliyetten tasarruf edilir. Gelişen HPO teknolojisi sadece model oluşturmak için değil nihai parça imalatı için de kullanılmaya başlamıştır [20].



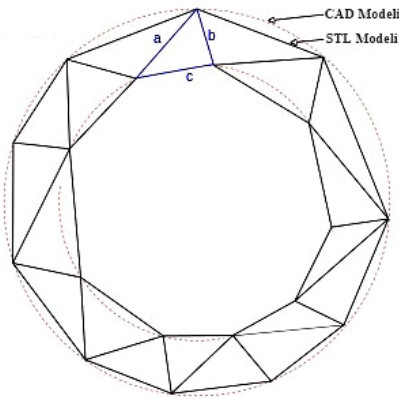
Şekil 3.1. Ürün oluşturma döngüsü [6]

Hızlı prototip oluşturmada kullanılan temel işlem basamakları ise Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Hızlı prototip oluşturmada temel işlem basamakları [6]

Hızlı prototip oluşturmada ilk olarak bir CAD yazılımı veya bir optik ya da lazer tarayıcı yardımı ile katı parça taranarak 3B CAD modeli oluşturulur. CAD yazılımları ile hızlı prototip oluşturma makineleri arasındaki veri iletimini sağlamak için STL (Stereolithography) denilen bir veri ara yüz formatına ihtiyaç duyulmaktadır. Hızlı prototip oluşturmada yaygın olarak kullanılan ve CAD yazılımları tarafından kolayca oluşturulabilen STL dosyaları; Üçgen yüzeyler kullanarak sadece 3B nesnenin yüzey geometrisini tanımlar ve renk, doku veya diğer özniteliklerini temsil etmez (Şekil 3.3). Düz yüzeyleri tanımlamakta az sayıda üçgen yeterli olurken, kıvrımlı yüzeyleri tanımlamak için çok sayıda küçük üçgen gerekmektedir. CAD programları ile oluşturulduktan sonra STL dosya formatına dönüştürülen dosya, hızlı prototip sistemlerinin kullandığı yazılımlarına aktarılır. STL dosya formatına dönüştürürken modelde oluşabilecek olası hatalar kontrol edilir [6].



Şekil 3.3. STL formatına çevrilmiş konsantrik daireler içeren yüzey örneği [20]

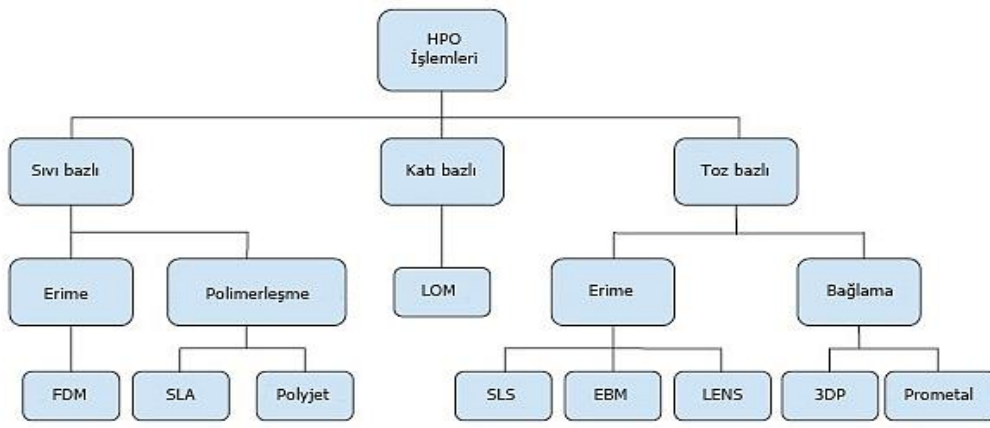
STL formatı kullanımı birçok önemli avantaj sağlamaktadır. İlk olarak 3B CAD verilerini basitçe temsil eder. İkinci olarak neredeyse her HP ve CAD sistemi tarafından desteklenmektedir. Diğer bir avantajı ise geometrik şekiller veri aktarımı için basit dosyalar sağlamaktadır [43]. Bunun yanında STL formatı bu avantajları ile birlikte birçok da dezavantajı barındırır. İlk olarak STL formatı genellikle orijinal CAD dosyasından daha fazla yer kaplamaktadır. STL formatı birçok gereksiz bilgiyi içerebilmektedir. İkinci olarak STL formatında olası geometri kusurları bulunabilmektedir. Bunun nedeni ticari CAD programları tarafından kullanılmakta olan dönüştürme algoritmalarının yetersiz kalmasıdır. Bu kusurlar nedeniyle bir STL onarım yazılımına ihtiyaç duyulmaktadır. Son olarak ise büyük STL dosyaların dilimlenmesi çok uzun zaman almaktadır [43].

STL dosya formatında karşılaşılan problemler; boşluklar (çatlaklar ve delikler), kayıp üçgen yüzeyler, tahrip olmuş yüzeyler, üst üste binmiş yüzeyler, ortak noktalı yüzeyler olarak sıralanabilir [44].

Üçüncü adımda model, parça hassasiyetine ve HP cihazının özelliğine bağlı olarak dilimlere ayrılır. Her bir dilim, modelin ilgili katmanını temsil eder. Dolayısıyla iki kesit arasındaki mesafe bir dilim kalınlığı kadardır. Bu kesit alanları bağımsızdır. Farklı tarama yöntemleri kullanılarak, ardışık bir şekilde tarama yolları hesaplanır. Birçok farklı tarama yöntemi mevcuttur. Modelin herhangi bir kenarına açılı veya paralel olarak ya da belirli bir eksene paralel hatlardan oluşan veya modelin dış konturunun referans alınması ile merkez noktasına doğru spiral bir yol takip eden hatlardan oluşan tarama yöntemleri mevcuttur. Fakat farklı tarama yöntemlerinin ortak noktası, dış konturu takip eden hat taranıp çevrelendikten sonra ortada kalan açıklığın arzu edilen tarama yöntemiyle taranmasıdır. Dış konturları tarama şekli, ölçüsel tamlığı ve yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Çünkü inşa aşamasında dilimler dikkate alınmaktadır [45]. Dördüncü adımda ise parça inşa edilmektedir. Birçok farklı teknikten birini seçilerek, hızlı prototip oluşturma cihazları katman katman modeli inşa ederler. Kullanılmakta olan malzemeler başlangıçta, katı, sıvı, veya toz halinde olabilir. Beşinci ve son adım ise parçanın makineden çıkarılması, varsa destek malzemelerinin ayrılmasını, yüzeyinin temizlemesi ve işlenmesi, boyama vs. gibi ardıl işlemleri kapsamaktadır [6].

3.2. Hızlı Prototip Oluşturma Teknolojileri

Dünya'da ve ülkemizde kullanılan HPO cihazlarının çalışma prensiplerindeki ortak nokta, parçaların katmanlar halinde inşa edilmesidir. İnşa hammaddeleri ve katmanları inşa etme yöntemlerindeki değişiklikler HPO teknolojileri arasındaki farklılıkları belirlemektedir. HPO cihazları, kullandıkları teknolojiye göre harç yığma, ışıkla kürleme, toz bağlama ve tabaka yığma olmak üzere dört ana kategori altında toplanırlar. Şekil 3.4'de HPO teknolojilerinin katman inşa tekniğine göre sınıflandırılması görülmektedir.

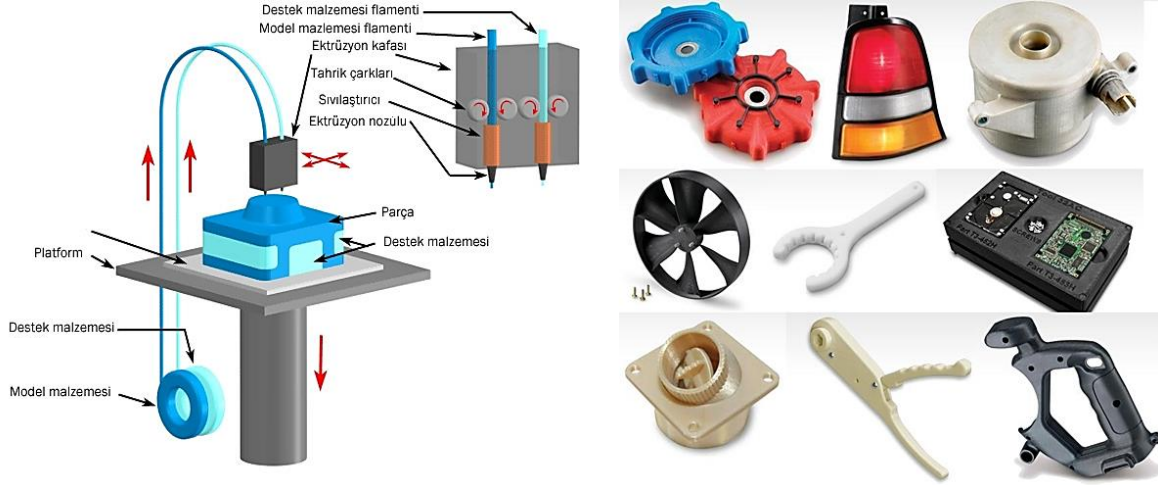


Şekil 3.4. HPO teknolojilerinin tasnif şeması [20]

3.2.1. Eriyik biriktirme tekniği

Eriyik biriktirme tekniğinin literatürdeki İngilizce adı Fused Deposition Modeling (FDM) olarak bilinmektedir. Bu teknikte, makara üzerine sarılı olarak cihaza yüklenebilen tel formunda hammaddeler (filamentler) kullanılmaktadır. Hammadde ekstrüzyon başlığında ısıtılarak sıvı veya macun kıvamında 0,2 - 1 mm çapındaki nozuldan geçirilerek gerekli noktalara serilir. Serme işlemi platformun katman kalınlığı kadar aşağı inmesi ile yeniden başlar ve parça inşa edilene kadar bu çevrim devam eder. FDM tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilmiş deney modeli Şekil 3.5' de görülmektedir. Eriyik biriktirme tekniği inşa aşamasında, termoplastik malzeme katılma noktasının hemen üstündeki bir sıcaklıktadır. Her tabaka, bir önceki tabakaya yarı eriyik halde yapıştırılır. Plastik liflerin (filamentlerin) beslenme hızları kontrol edilebilmektedir. Bu sayede, herhangi bir anda ekstrüde edilen malzeme miktarı kontrol edilerek hassas parçalar oluşturulabilir. Katman kalınlığı kullanılan sarf malzemenin fiziksel özelliğine, nozul çıkış çapına, hareketli kafanın hızına ve ekstrüzyon basıncına göre değişiklik gösterebilmektedir. Katman kalınlığı, meme

çapına göre genel olarak olarak 0,15 mm ile 0,5 mm arasında değişmektedir. Yol genişliği ise 0,20 mm ile 6 mm arasında değişmektedir. Rulolara sarılı halde kullanılan termoplastik malzeme lifi (filament) genel olarak 1,75 mm veya 3.00 mm çapındadır [6, 38, 46].



Şekil 3.5. FDM yazıcı sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilmiş parçalar [47]

İnşa aşamasında sıvanan hammadde, yerçekimi gibi fiziksel etkiler sebebi ile hedeflenen modeli oluşturmakta hatalar ile karşılaşabilmektedir. Bu nedenle, inşa hammaddesi haricinde farklı bir hammadde kullanılarak destek yapısı, söz konusu hatalar ile karşılaşmamak amacı ile, ayrıca inşa edilir. Destek yapıları inşa aşamasında parça inşası ile eş zamanlı olarak inşa edilir. Eriyik biriktirme tekniğinde destek yapısı hammaddesi olarak kolay kırılabilir destek sistemi “BASS – Break Away Support System” olarak adlandırılan, iş parçasını oluşturan ana hammaddeden kolayca kırılabilen hammadde kullanılabilir. Bir diğer destek yapısı hammaddesi ise kimyasal yapısı nedeni ile su içerisinde çözünebilen (Water Works) malzemelerdir. Bu malzeme kullanılarak manuel olarak ulaşması imkansız, küçük boyutlu bölgeler rahatlıkla temizlenebilir. Ayrıca bu malzeme kullanıldığında inşa sonrası işlemler aşamasında zaman tasarrufu sağlamaktadır [36].

Kullanılan malzemeler, avantajlar ve dezavantajları

Eriyik biriktirme tekniğinde, hassas döküm mumu ve poliamidin (termoplastik elastomerler) yanı sıra ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) gibi yüksek erime sıcaklığına sahip mühendislik plastikleri de inşa malzemesi olarak kullanılabilir (Çizelge 3.2). Bu yöntemde parça üretilirken bazen destek malzemesine ihtiyaç duyulur ve destek malzemesi kullanabilmek amacıyla sisteme ikinci bir nozul ilave edilebilir. Bu teknoloji ile üretilen parçalar kırılmaya,

bükülmeye, esnemeye, neme karşı yüksek direnç, uzamaya karşı yüksek dayanım ve uygun maliyetli üretim imkanı sunarlar. Ayrıca FDM teknolojisi fonksiyonel parçaların üretimi için de uygundur [44].

Çizelge 3.2. FDM’de kullanılan bazı malzemelerin özellikleri [48]

Malzeme	PLA	ABS	HIPS	FLEXIBLE	PVA	WOOD	PA
Baskı sıcaklığı	190-220°C	220-240°C	220-240°C	190-210°C	190-210°C	190-220°C	235-270°C
Özkütle	1.25±0.05g/cm ³	1.04±0.2g/cm ³	1.04±0.2g/cm ³	1.25±0.05g/cm ³	1.25±0.05g/cm ³	1.25±0.05g/cm ³	1.20±0.05g/cm ³
Eriyik akış hızı	5~7g/10min (190°C, 2.16Kg)	2~4g/10min (190°C, 2.16Kg)	2~5g/10min (200°C, 5Kg)	3~6g/10min (190°C, 2.16Kg)	2~4g/10min (190°C, 2.16Kg)	5~7g/10min (190°C, 2.16Kg)	19~21g/10min
Su absorpsiyonu	0.50%	1.00%	1.00%	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
Çekme dayanımı	≥60MPa	≥43MPa	≥30MPa	≥35MPa	≥10MPa	≥60MPa	≥60MPa
Eğme modülü	≥60MPa	≥60MPa	≥60MPa	≥35MPa	≥15MPa	≥60MPa	≥2200MPa
Kopma uzaması	≥3.0%	≥10.0%	≥50%	≥500%	≥11%	≥2.0%	≥50%

Çizelge 3.3’de FDM teknolojinin diğer eklemeli imalat ve geleneksel yöntemlere karşı avantajı ve dezavantajı verilmiştir.

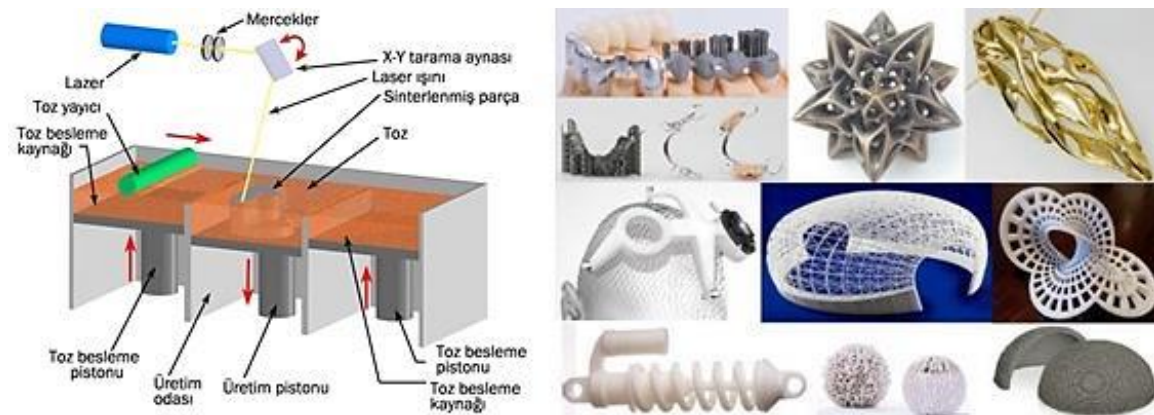
Çizelge 3.3. FDM tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları [49]

Avantajlar	Üretim kolaylığı
	Yüksek doğruluk
	Güvenli olması, zehirsiz maddelerin kullanılması, ofis ortamında çalışılabilmesi
	Ek tesisatlara ve özel parçalara ihtiyaç duymaması
	Ardıl işlemin gerekli olmaması
	Hassas döküm mumu, işlenebilir mum ve naylon benzeri plastik malzemelerin kullanılabilmesi
	Düşük maliyeti
	Hızlı, tek adımlı işlem, kısa işlem süresi
Dezavantajlar	Tek ekstrüzyon ünitesi ile yoğunluğu yüksek parçaların üretim süresinin uzunluğu
	Düşük yüzey kalitesi
	Düşük ve değişken parça yoğunluğu
	Z yönünde zayıf parça
	Nozul kesiti dairesel olduğu için keskin dış yüzeylerin yapılması zordur

3.2.2. Seçici Lazer Sinterleme

Isıtarak toz bağlama tekniği İngilizce literatürde Selective Laser Sintering (SLS) adı ile yer almaktadır. Bu teknoloji ilk olarak Texas Üniveristesindeki bir doktora çalışması çerçevesinde Carl Decard tarafından geliştirilmiştir. Isıtarak toz bağlama teknolojisi, Nova Automation ismi ile 1987 yılında kurulan Direct Tolling Manufacture Corp. tarafından 1992’de ticari hale getirilmiştir. 2001 yılında ısıtarak toz bağlama teknolojisi, bu firmayı satın almasıyla 3D Systems firmasının ürün yelpazesine dahil olmuştur [44]. Isıtılması halinde birbirine kaynaşabilen toz taneciklerini inşa hammaddesi olarak kullanan bu teknikte, toz formunda bulunan malzeme düzgün ve ince bir düzlemsel katman halinde serilir. İstenilen bölgeler lazer ışını ile taranır. Lazer ışını yüzeye temas ettiği noktalardaki sıcaklığı arttırarak, toz taneciklerinin ısınmasını ve kısmen eriyerek/sinterlenerek birbirleri ile kaynaşmasını sağlar. Bu işlemlerin ardından inşa bölgesini taşıyan platform katman kalınlığı kadar aşağıya taşınır ve çevrim tekrarlanarak katmanlar halinde inşa aşaması devam ettirilir. İnşa aşaması son katmana kadar devam ederken lazer etkisi ile sinterlenmeyen tozlar doğal bir destek yapısı oluşturur. İnşa aşaması tamamlandığında destek yapısını teşkil eden serbest tozlar fırça veya vakumlu emici ile ortamdan uzaklaştırılarak üretilen parça veya parçalar cihaz platformundan alınır [46].

Şekil 3.6' da ısıtarak toz bağlama tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilmiş parça örneği görülmektedir.



Şekil 3.6. SLS sisteminin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilen parça [6]

Kullanılan malzemeler, avantajlar ve dezavantajları

SLS yöntemi basta paslanmaz çelik, titanyum, nikel krom, kobalt krom gibi metal alaşımları olmak üzere polistren, poliamid (naylon), alüminyum katkılı poliamid ve karbon elyaf gibi plastik malzemeleri ayrıca kalıp uygulamaları için kalıp kumu (alüminyum silikat) gibi seramik malzemeleri kullanabilir. SLS yöntemi ile mukavemetli parçalar üretilebilir. Bu yüzden fonksiyonel parça üretiminde, kavramsal model üretiminde, hızlı kalıp ve hızlı döküm için gerekli parçaların üretimlerinde kullanılabilirler. SLS teknolojisi ile parça üretilirken özel destek yapılarına gerek yoktur. Çünkü her katmanda sinterlenen tozun dışında kalan artık toz, sinterlenmekte olan bölüm için destek görevi görür. Lazerle sinterlenmiş parça rijittir ve kütleme gibi bir işleme ihtiyaç duymaz. Üretilen modellerin çarpılmaması için üretim bittikten sonra parça soğumaya bırakılmalıdır. Bu durum sistemin dezavantajdır (Çizelge 3.4) [6, 49].

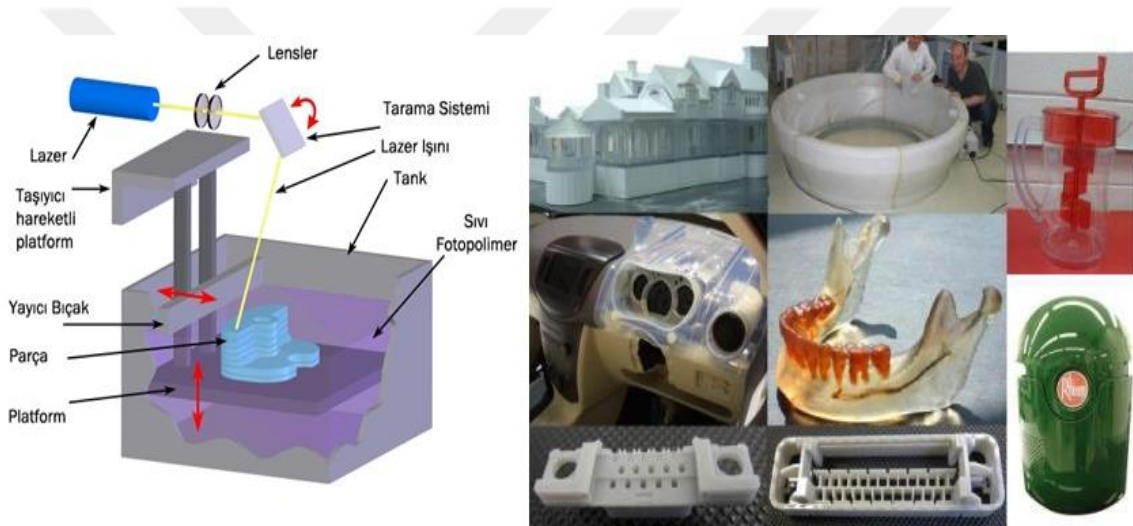
Çizelge 3.4. SLS tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları [6, 49]

Avantajlar	Mukavemetli parçaların üretilebilirliği
	Özel destek yapısı gertirmemesi
	Üretilen parça rijittir, kürmeye ihtiyaç duyulmaması
Dezavantajlar	Yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için kumlama gerekebilir
	Parça çarpılabilir
	Üretim bittikten sonra uzun soğuma süresi

3.2.3. Tarayarak ışıkla kütleme

Tarayarak ışıkla kütleme tekniği İngilizce literatürde Stereolithography (SLA) adı ile yer almaktadır. 1986 yılında kurulan 3D System firmasının 1988 yılında ticari kullanıma sunması ile birlikte ilk defa ticari kullanıma sunulmuş HP teknolojisi olmuştur. Bu teknik, fotopolimer esaslı sıvı haldeki malzemenin lazer ışını ile kürlenerek katı hale getirilmesi prensibi ile inşa aşamasını gerçekleştirir. Kullanılan sıvı polimer, mor ötesi (UV-Ultraviolet) ışık altında kimyasal tepkime göstererek katı hale dönüşen bir fotopolimer malzemedir. Lazer ışını bilgisayar desteği ile inşa hazırlık aşamasında belirlenmiş bölgelere noktasal olarak uygulanır ve sıvı malzemenin üst bölgeleri kürlenerek katılaştırılır. Katman inşası tamamlandığında platform bir katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve bir aparat

yardımları ile yeni bir kat sıvı polimer yayılır. Malzemenin yapışkan özelliği sayesinde katmanlar birbirine yapışırlar. Parça inşası tamamlanınca kadar çevrim devam ettirilir. İnşa hazırlık aşamasında, önceden tasarlanmış destek yapıları tespit edilerek inşa aşamasında bu yapılar dahil edilmektedir. Bu destek yapıları inşa aşaması tamamlandığında cihazdan alınan parça üzerinden kırma, koparma, kesme yolu ile temizlenir. İnşa aşamasında uygulanan kür derecesi çoğunlukla yeterli görülmediğinden parça UV lamba altında ilaveten bir süre daha kürlenir. Tarayarak ışıqla kür tekniğı ile çalışan HPO cihazlarında küçük farklılıklar olsa bile tüm cihazlar aynı prensipte çalışmaktadır. Şekil 3.7' de tarayarak ışıqla kür tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilmiş deney modeli görülmektedir [38].



Şekil 3.7. SLA sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilmiş parçalar [6]

Kullanılan malzemeler, avantajlar ve dezavantajları

Fotopolimerler 1960’larda geliştirilmiştir. Bugün SLA reçinelerinin çoğu akrilik/epoksi karışımı reçinelerdir. Bu karışımın içinde fotobaşlatıcılar, reaktif seyrelticiler, stabilizörler ve sıvı monomerler bulunur. Uv radyasyonu ile fotobaşlatıcılar sıvı monomerler ile reaktif hale gelir ve polimer zincirini ve sonrada çapraz bağlar (kovalent bağlar) oluştururlar [39]. En yaygın olarak kullanılan reçineler ise akrilik esaslı ve epoksi esaslı SLA reçineleridir.

Çizelge 3.5’de SLA teknolojisinin diğer eklemeli imalat ve geleneksel yöntemlere karşı avantajı ve dezavantajı verilmiştir.

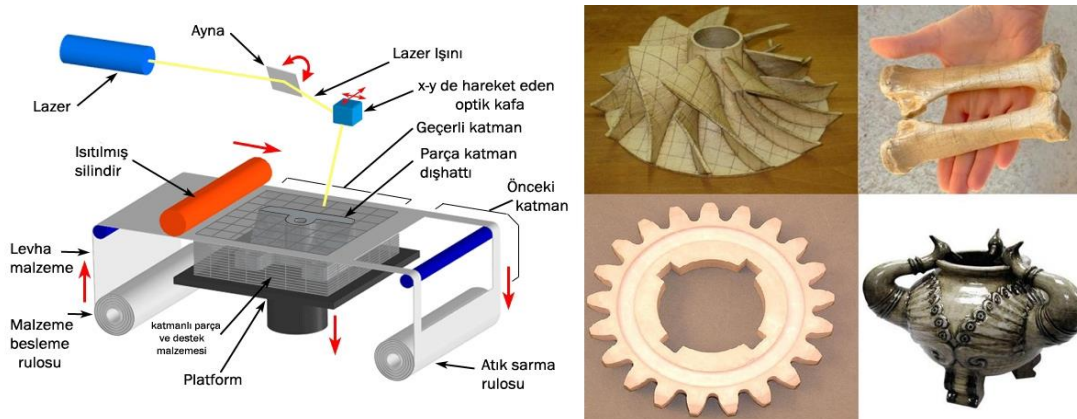
Çizelge 3.5. SLA tekniğinin genel avantajları ve deavantajları [39]

Avantajlar	İyi yüzey kalitesi çözünürlük ve ölçüsel doğruluk
	Tüm geometrik şekiller aynı kalitede üretilebilir.
	Epoksi reçinelerin diğer malzemelere göre çok daha azdır.
Dezavantajlar	Kullanılan malzemenin doğal hali sıvı olduğu için oluşan parçanın tam katılığı ve sağlamlığı yakalayabilmesi için ikinci bir kürleme gerekebilir.
	Destek yapısı kullanma zorunluluğu vardır.
	Ardıl işlem gerektirir.
	Fotopolimer malzeme dışında başka malzeme kullanılamaz.

3.2.4. Tabaka yapıştırırmalı parça imalatı

Tabakalı yapıştırırmalı parça imalatı İngilizce literatürde Laminated Object Manufacturing (LOM) adı ile yer almaktadır. Helisys firması tarafından geliştirilen bu yöntem, tabakaların kesilmesi ve yapıştırılması prensibine dayanmaktadır (Şekil 3.8). Sistem tabakaların alt yüzeylerinde bulunan yapıştırıcının önceden ısıtılmış bir silindir ile basınç uygulama suretiyle bir önceki tabakaya yapıştırılmasına dayanmaktadır. Sonrasında üst tabaka parça geometrisi doğrultusunda dilim hatları referans alınarak bir lazer veya bıçak tarafından kesilir. Parçanın üretimi esnasında, fazla malzemelerin kolay ayrılabilmesi için iç kısımlarıda taranır. Tabakanın kalınlığının sabit olmaması durumunda bir hassasiyet elemanı ile gerçek tabaka kalınlığı ölçülür ve model buna göre dilimlenir. LOM teknolojisi ile klasik metotlara göre daha doğru ve düşük maliyetli modeller daha kısa sürelerde oluşturulur. LOM teknolojisi ile üretilecek parçanın bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelinden başka hiçbir yan elemana ihtiyaç duyulmaksızın prototip üretilebilir. LOM teknolojisinde de diğer eklemeli imalat teknolojilerinin çoğunda kullanılan STL veri formatı kullanılmaktadır. Sistem minimum üretim zamanı ve yüksek dayanım için optimize edilebilir. Sistem aynı zaman diliminde farklı parçaların üretimine imkan tanıyabilmektedir. CAD verisi STL veri formatında LOM teknolojisine dayanan HP cihazına yüklendikten sonra ilk olarak; sarf malzeme, tabakanın bir önceki katmana yapıştırılabilmesi için işleme bölümüne beslenir. Daha sonra önceden ısıtılmış silindirin tabakalanmış kısmın üzerinden geçerek ile ısıtma ve sıkıştırma işlemleri yapılır. İşlem bittikten sonra, önceden ısıtılmış silindir ilk pozisyonuna döner. Ardından bir CO₂ lazer ışını veya kesici bıçak yardımıyla en üst tabaka, STL verisinde

o katmana tekabül eden kesitteki iç ve dış profillerin elde edilebileceği şekilde kesilir. Kesme işleminin tamamlanması ile platform z ekseninde bir katman kalınlığı aşağıya iner. İşlem, tüm bu işlem adımlarının parça bitimine kadar tekrarlanmasıyla tamamlanır. Çevrim adımlarını sıralamak gerekirse; ilk olarak dilimleyici yazılım ile 3B model yatay düzlemde dilimlenerek parçanın o katmana ait kesiti oluşturulur. Yazılım, parça çevresindeki fazlalıkları destek yapısına çevirir. Yazılım ile kesitteki dış hatların ardından da iç kısımların tarayabilmesi için lazer ışınının odaklanma bilgileri belirlenir. Lazer ışınının gücü bir katman kalınlığında bir kesme derinliği meydana getirecek şekilde ayarlanmalıdır. Aksi takdirde önceki katmanlarda deformasyonlara sebebiyet vererek parça bütünlüğünü bozar. Tabakalar işlendikten sonra platform alçalarak yeni tabaka malzemenin serilebileceği konuma gelir. Yeni tabakanın serilmesinin ardından ısıtılmış bir silindir ile tabakanın üzerinden geçilerek, basınç ve sıcaklık yardımıyla tabakanın bir önceki tabakaya yapışması sağlanır. Ardından bir düşey konum ölçücü ile tabakaların yüksekliği belirlenir ve bu bilgi yazılıma iletilir. Tabaka yüksekliğinin yazılımda önceden belirlenen yükseklikle aynı olmaması durumunda, yazılım tekrar katmanları dilimler ve sonraki aşamalar için uygun profili oluşturur. Tabaka yüksekliğinin yazılımda önceden belirlenen yükseklikle aynı olmaması durumuna, sabit olmayan sarf malzemesi kalınlıkları veya biriken yapıştırıcı kalıntıları sebebiyet vermektedir. Bu döngü parça bitinceye kadar devam eder. Parça tamamlandığında dikdörtgen bir blok içerisindeydir. Bu aşamada parçadaki destek malzemeleri temizlenir. Parçanın belirli kısımlarında arta kalan malzemeler ağaç işleme aletleri ile temizlenebilir. Parça tamamlandıktan sonra, boyama, parlatma kumlama gibi işlemler uygulanabilir. Nem tutmaması için parça epoksi, üretan veya silikon ile kaplanabilir. LOM parçalarında tornalama, frezeleme veya delme işlemleri uygulanabilir [20, 39, 50].



Şekil 3.8. LOM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar [6]

Kullanılan malzemeler, Avantajlar ve Dezavantajları

LOM teknolojisinde sarf malzeme olarak genellikle kaplanmış kağıt ve plastik köpük yanı sıra metal veya seramik tozu emdirilmiş malzemeler de kullanılabilir. Şerit döküm yöntemleriyle elde edilmiş toz ana malzeme (SIC, alumina) ve polimer bağlayıcı içerikli şeritlerde LOM'da kullanılabilir. Çizelge 3.6'da LOM teknolojinin diğer eklemeli imalat ve geleneksel yöntemlere karşı avantajı ve dezavantajı verilmiştir.

Çizelge 3.6. LOM tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları [20, 39]

Avantajlar	Malzemenin kolay ve ucuz temin edilebilirliği
	Düşük işlem maliyeti
	Her boyutta yüksek hassasiyete sahip parçaların üretilmesi imkânı
	Büyük hacimli parçaların yüksek hızla işlenebilmesi
Dezavantajlar	Kağıt malzeme için nem emilimi
	Z yönünde parça doğruluğu zayıftır.
	Homojen olmayan mekanik ve ısı özellikler

3.2.5. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi İngilizce literatürde 3D Printing (3DP) adı ile yer almaktadır. MIT tarafından geliştirilen sistem mürekkep püskürtmeli yazıcıya çok benzediği için üç boyutlu yazıcı olarak adlandırılmıştır. Üç boyutlu yazıcıda mürekkep yerine sıvı yapıştırıcı püskürtülür. Platformun üzerine ince bir toz tabakası serildikten sonra yapıştırıcının belirli yerlere püskürtülmesi ile toz malzeme birbirine yapışarak katılaşır. İşlem aşamaları şöyle sıralanabilir; platform üzerine toz malzeme bir katman kalınlığında olacak şekilde silindir yardımıyla serilir. Bir katman kalınlığındaki toz malzeme, sıvı yapıştırıcı malzeme püskürten bir yazıcı kafa tarafından ilgili kesit alanın şeklini alacak şekilde taranır. Tarama birbirini paralel takip eden hatlar şeklinde olur. Toz malzeme üzerine püskürtülen yapıştırıcı sayesinde toz malzemeler birbirlerine yapışırlar. Platform bir miktar aşağı indirilerek bir katman kalınlığındaki toz malzeme tekrar serilir ve bir sonraki kesit alanı oluşturulur. Yeni katman da aynı şekilde yapıştırıcı püskürtülen yazıcı kafa tarafından taranarak hem toz malzemeyi birbirine hem de yeni oluşan katmanı bir önceki katmana yapıştırmış olur.

Yapıştırıcı maddenin temas etmediği kısımlar katılaşmaz. Bu artık toz malzemeler parçanın üst kısımları için doğal destek yapısı görevi görürler. Bütün katmanların aynı şekilde katılaştırılarak bitirilmesi ile bütün bir parçanın üretimi tamamlanmış olur ve parça platformdan çıkarılır. Katı modelin etrafını çevreleyen artık toz malzemeler vakum yoluyla temizlenerek parça son işlemlere tabi tutulur [51]. Şekil 3.9' da üç boyutlu yazıcı tekniğinin çalışma prensibi ve bu teknik ile inşa edilmiş parça örneği görülmektedir.



Şekil 3.9. 3D printing sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar [6]

Kullanılan malzemeler, avantajlar ve dezavantajları

3DP türü baskı cihazları iki tip malzeme çeşidi kullanılabilir. Birincisi özellikle yüksek dayanım ve detaylı parça üretimi için yapışkan/sıva bazlı malzeme, ikicisi ise düşük maliyet, yüksek hız ve özellikle hassas kalıp işlemleri için tavsiye edilen nişasta-selüloz karışımı malzemedir [51]. Çizelge 3.7’de 3DP teknolojisini diğer eklemeli imalat ve geleneksel yöntemlere karşı avantajı ve dezavantajı verilmiştir.

Çizelge 3.7. 3DP tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları [20, 39, 53]

Avantajlar	İşlem çok basit ve hızlıdır.
	Yatırım ve işletme maliyetleri düşüktür.
	Renkli parça üretimine olanak verirler.
	Herhangi bir destek yapısına ihtiyaçları yoktur.
	Farklı proseslerde olmak kaydıyla geniş bir malzeme kullanım alanına sahiptirler

Çizelge 3.7. (devam) 3DP tekniğinin genel avantajları ve deavantajları [20, 39, 53]

Dezavantajlar	Genelde son işlem uygulamaları gerekmektedir.
	Birbirine paralel hatlar üzerinde tarama yaptığından dolayı merdiven yapısı etkisi görülmektedir.
	Toz malzemeleri bir arada tutmak için plastik malzeme kullanıldığından dolayı özellikle son işlem olarak ısı işlemi gören parçalarda oluşan çekme miktarı çok olmaktadır

3.2.6. Elektron ışınli eritme

Elektron ışınli eritme teknolojisi İngilizce literatürde Electron Beam Melting (EBM) adı ile yer almaktadır. EBM teknolojisi, metal tozlarının güçlü elektron ışını ile eritilerek katman katman inşasına dayanan bir işlemdir (Şekil 3.10). Her katman, CAD modelinden elde edilen geometriye uygun eritilmektedir. Bu teknoloji; yüksek erime kapasitesi ve yüksek verimlilik için gerekli olan enerjiyi üretebilen yüksek güçlü bir elektron ışınına ihtiyaç duymaktadır. Elektronlar, 2500 °C'ye kadar ısıtılabilen bir filamandan yayılırlar. Elektronlar toza temas ettiğinde kinetik enerjileri ısıya dönüşür. Bu ısı metal tozunu eritir. EBM 3B baskı cihazlarında elektronlar anota ilerlerken hızları ışık hızının yarısı kadardır. Elektron ışınları son derece hızlı ve hassas bir şekilde ışın kontrolü sağlayan elektromanyetik bobinler tarafından yönlendirilmektedir. Ergitme işlemi bittikten sonra platform z yönünde aşağı hareket eder ve yeni metal tozu serilir. Bu işlem adımları model tamamlanıncaya kadar tekrarlanır. Vakum ve yüksek sıcaklıkta işlem yapan EBM teknolojisi ile döküm ve dövme gibi geleneksel yöntemlere nazaran daha iyi malzeme özelliklerine sahip parçalar üretilebilir. Vakum sistemi üretim sürecinde 10^{-5} mbar civarında vakum basıncı oluşturur. [6].



Şekil 3.10. EBM sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar [6, 47]

Kullanılan malzemeler, avantajlar ve dezavantajları

Bu yöntemde seramik ve metal (kobalt, krom ve titanyum alaşımlar) malzemeler kullanılabilir. Titanyum ve alaşımları; üstün mukavemet, üstün korozyon direnci ve düşük yoğunluk ile tıp, otomotiv, havacılık, enerji üretimi, kimya tesisi, spor vb. endüstrilerde kullanılmaktadır. Bu yöntemle üretilen parçalar nihai ürün olarak kullanılabilirler [6]. Bu teknolojiye, EBM cihazları kolay ve güvenli kullanım için yardımcı donanımlara ihtiyaç duyarlar. Bunlar; toz taşıma arabaları, patlamaya karşı korumalı elektrikli süpürge ve toz geri kazanım sistemi olarak sıralanabilir. Lazerle sinterleme sistemlerinde melez parça üretimi imkanı yoktur. Çünkü lazerli sinterleme sistemlerinde malzeme katman katman bir kaplayıcı vasıtasıyla baştan sona aynı malzeme karışımı ile kaplanır ve bütün katmanlar da bu şekilde devam eder. Yapılabilecek tek şey katmanlar arasında farklı malzeme çeşitliliğini sağlamak olabilir. O da tam olarak melez yapının yapılabilmesine olanak tanımayacaktır. Fakat lazerli yığma sistemlerinde malzeme hem lazerle aynı anda parçaya enjekte edilmekte, hem de kullanılacak malzeme karışımı enjekte edilirken hazırlanmaktadır. Dolayısıyla anında malzeme değişimi ve farklı malzeme karışımı elde etmek ve bunu neredeyse her noktada ayarlayabilmek melez bir parça üretimi için çok büyük bir avantajdır [51]. Çizelge 3.8’de EBM teknolojinin diğer eklemeli imalat ve geleneksel yöntemlere karşı avantajı ve dezavantajı verilmiştir.

Çizelge 3.8. EBM tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları [20, 38-39, 46]

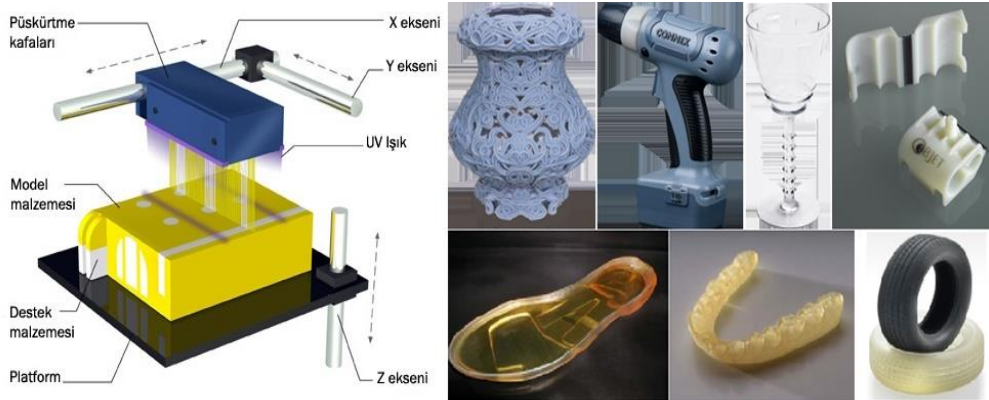
Avantajlar	Metal parçalar plastik enjeksiyon kalıbı, döküm kalıbı ve hatta dövme kalıbı olarak da kullanılabilir.
	Bir tek proste parça tam yoğunluğu elde edebilmektedir.
	Elde edilen metal kalıp ile 100.000 adet plastik enjeksiyon parçası basabilme
	Form, uygunluk ve fonksiyonel test için prototip üretimi
	Yüksek ısı ve kimyasallara karşı dayanıklılık
	Vakum kalıplama işlemleri için örnek plastik model üretimi
	Çeşitli fonksiyonelliğe sahip metal parçaların direk üretimi
	Döküm kumu kullanımıyla döküm kum kalıbı ve maça üretimi
	İşlem esnasında lazerle katılaşmayan toz malzeme doğal bir destek yapısı görevi görmektedir.
	Parçalar cihazdan kolaylıkla çıkarılan bir plaka üzerinde sinterlendiğinden işlemten hemen sonra parça cihazdan çıkarılabilir.

Çizelge 3.8. (devam) EBM tekniğinin genel avantajları ve deavantajları [20, 38-39, 46]

Avantajlar	Çok geniş çeşitlilikte malzeme kullanılabilir.
	Lazerin katılaştırmadığı malzeme tekrar kullanılabilir.
	Bir işlemde birden fazla parça aynı anda üretilebilir
Dezavantajlar	Çok güçlü lazer gereksinimi
	İşletme giderlerinin yüksek olması
	Üstün yüzey kalitesi için ardıl işlem gerektirebilir.

3.2.7. PolyJet teknolojisi

Polyjet teknolojisi, Stereolitografi (SLA) ve mürekkep püskürtme (MJM) tekniklerini bir arada kullanan bir süreçtir. Polyjet teknolojisinde katmanları oluşturmak için püskürtme başlıkları (kafaları) kullanılmaktadır. İşlem boyunca, model ve destek malzemeleri bu mikro çaplı kafalardan püskürtülür. Püskürtülen malzemeler, bir merdane yardımıyla düzleştirildikten sonra UV ışığı ile sertleştirilir (Şekil 3.11). Sistemin önemli avantajlarından biri malzeme kartuşlarının üretim süreci devam ederken değiştirilebilmesidir. 2 boyutlu kesit alanı UV ışığıyla kürlendikten sonra tabla, katman kalınlığı kadar (16 μm 'a kadar) alçalır. Bu döngüsel işlem adımları parça tamamlanana kadar devam eder. Prototip tamamlandıktan sonra destek malzemelerini temizlemek için su jeti kullanılabilir. Polyjet teknolojisinde 100'ün üzerinde farklı malzeme kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı ve sıcaklığa dayanıklı plastik malzeme, kauçuk ve sert malzeme, mat veya şeffaf malzeme, medikal ve dental uygulamalar için biyoyumlu malzemeler gibi farklı malzeme seçenekleri Polyjet teknolojisinde kullanılabilir [51].



Şekil 3.11. PolyJet sisteminin çalışma prensibi ve bu yöntem ile üretilmiş parçalar [6]

Kullanılan malzemeler, avantajlar ve dezavantajları

Polyjet teknolojisinde kullanılan malzeme, akrilik bazlı fotopolimer malzemelerdir. Fullcure M (Model) ve Fullcure S (destek) olarak ticarileşen malzemelerin her ikisi de mor ötesi lamba ile kür edilebilir niteliktedir. Polyjet teknolojisinde SLA' da olduğu gibi destek yapısına ihtiyaç vardır. Fakat Polyjet teknolojisinde SLA prosesindeki gibi bir destek yapısından daha farklı bir sistem mevcuttur. İlk olarak, Polyjet teknolojisinde destek yapısı su ile çözünebilir bir malzeme ile gerçekleştirilir, ikinci olarak, destek yapısının oluşturulması için ek bir işleme gerek yoktur. Parça oluşturma işlemi bittikten sonra destek yapısı hafif basınçlı bir su ile rahatlıkla çıkarılabilir. Model malzemesinin karakteristik özellikleri bu işlem için dayanıklı olmasını sağlasa bile çok küçük ve ince özellikteki yapılar bu işlemde, zarar görebilirler. [51]. Çizelge 3.9'da Polyjet teknolojinin diğer eklemeli imalat ve geleneksel yöntemlere karşı avantajı ve dezavantajı verilmiştir.

Çizelge 3.9. Polyjet tekniğinin genel avantajları ve dezavantajları [51]

Avantajlar	Çok fazla son işlem operasyonu yoktur. Sadece destek yapısının çıkarılması için hafif basınçlı su kullanılır
	Çok ince katman kalınlığından dolayı özellikle dikey çözünürlüğü diğerler tekniklere göre daha iyidir.
	Herhangi bir geometrik sınırlama olmaksızın her türlü parça üretilebilir.
	İşletme giderleri düşüktür.
	Kullanımı çok kolay ve pratiktir.
Dezavantajlar	Oluşturulan parçalar ısıya, neme ve kimyasal maddelere karşı duyarlıdır.
	Sadece fotopolimer malzemelerin kullanımı ile sınırlıdır.
	Küçük parça üretim kapasitesine sahiptir.
	Çoklu parça üretimi için uygun değildir.
	İşlem hızı yavaştır.

3.3 Hızlı Prototip Oluşturma Teknolojilerinin Genel Bir Karşılaştırılması

Uygulamalarda en sık kullanılan teknolojilerden biri SLA'dır. Bu yöntem renkli parçaları yüksek doğrulukta üretebilmektedir. Ayrıca işlem hızı (litre/saat) olarak en hızlı yöntemdir. Ancak parçalarda çarpılma ve büzülme olabilmektedir. Ayrıca metal modeller

üretilememektedir. Fonksiyonel ve mukavemetli parçalar için SLS, EBM, FDM, teknolojileri tercih edilebilir. Özellikle SLS ile çok hassas toleranslar elde edilebilir. EBM ile çekme dayanımı en yüksek parçalar oluşturulabilir. Büyük boyuttaki modellerin üretimi için LOM tercih edilebilir. Ancak LOM ile üretilen parçaların mekanik özellikleri düşüktür. FDM ve 3DP sistemlerinin kullanımı kolay olup üretim hızları yüksektir. 3DP, FDM ve Polyjet sistemleri ofis ortamında kullanılabilir. SLA, FDM, 3DP teknolojilerinin ürün maliyetleri SLS ve EBM gibi sistemlere nazaran ucuzdur [6, 40]. HPO teknolojilerinin genel bir karşılaştırması Çizelge 3.10’de verilmiştir. Çizelge 3.11’de ise farklı HPO teknolojilerinde karşılaşılan temel problemler ayrıntılı bir şekilde belirtilerek bu problemlere karşı çözüm önerileri oluşturulmuştur [40].

Çizelge 3.10. HPO teknolojilerinin karşılaştırılması [40]

Eklemeli İmalat/Hızlı Prototip Oluşturma Teknolojilerinin Karşılaştırılması							
Kriter / Teknik	SLA	SLS	FDM	3DP	LOM	MJM	EBM-LENS
Kullanılan Malzeme	UV işlemlili fotopolimer	Lazer işlemlili naylon	Plastik, ABS, PC, PPSF vb.	Alçı toz + sıvı yapışkan	Kağıt, plastik vb.	UV işlemlili fotopolimer	Çelik, bakır, ali. titan. vb.
Çekme Dayanımı	Vasat	Zayıf	Vasat	Zayıf	Zayıf	Vasat	İyi
Çözünürlük	İyi	Vasat	Zayıf	Vasat	Vasat	İyi	İyi
İnce cidar	Vasat	Vasat	Zayıf	Vasat	Zayıf	Vasat	İyi
Tolerans	İyi	Vasat	İyi	Vasat	Vasat	İyi	İyi
Yüzey Kalitesi	Ek yüzey işlemi	Ek yüzey işlemi	Sınırlı	Ek yüzey işlemi	Ek yüzey işlemi	Ek yüzey işlemi	İyi
İkinci Yüzey Kalitesi	Boyama Tampon baskı Kaplama	Boyama Tampon baskı Kaplama	Boyama Tampon baskı Kaplama	Boyama İnfiltrasyon (reçine emdirme)	Boyama Kaplama	Boyama Tampon baskı Kaplama	Zımpara Kaplama
İşlevsel Örnekler	Yok	Yok	Sınırlı	Yok	Yok	Yok	Var
Tasarım Kanıtlama	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Metale Uygulanabilme	Yok	Yok	Yok	Var	Var	Yok	Var
Çok Malzemeli Parça	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var	Var
Kalıp Gerektirme	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok
Seri Üretim İşi	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
Üretim Günü	1-3	1-3	1-3	0,5-1	1-3	1-3	1-2
Parça Maliyeti	\$\$	\$\$\$	\$\$\$	\$\$	\$\$\$	\$\$\$	\$\$\$\$

Çizelge 3.11. HPO teknolojilerinin genel problemleri ve çözüm önerileri [40]

El/HPO Teknolojilerinin Genel Problemleri ve Çözüm Önerileri		
T	Karşılaşılan Problemler	Çözüm Önerileri
SLA	Zayıf/kırılgan olduğu için işlevsel testler yapılamaz	Model yapısını güçlendirecek malzeme geliştirilmeli
	Katılaşma süresi ve güneşe maruz kalmaya bağlı parçalar bozulabilir	Katılaşma süresini kısaltacak karışımlar geliştirilmeli ve mevcut ürünler güneşte fazla bırakılmamalı veya kaplama yapılmalı
	Karmaşık modeller yapılır ama üretilmeyebilir	İmal durumunu değerlendirecek yazılım geliştirilmeli
	Alternatifi malzeme kullanımı sınırlıdır	Alternatif malzeme geliştirilmeli
	Destek yapıları ve ek işlemler gerekir	Malzeme alanında iyileştirmeler yapılmalı
	Katılaşmayan malzeme zehirli olabilir	Malzeme ile direk temas edilmemeli ve ortam temiz tutulmalı
SLS	Toza dayalı olduğundan parça yüzeyleri pürüzlü olur	Hassas yüzeyli parçalarda tercih edilmemeli veya yeni işlemler (yüzeyi iyileştirecek) geliştirilmeli
	Zayıf mekanik özellikleri olduğu için (konuma bağlı) işlevsel testler yapılamaz	Model yapısını güçlendirecek malzeme geliştirilmeli veya uygun model yapım konumu seçilmeli
	Toz şeklinde fazla reçine çeşidi yoktur	Malzeme alanında araştırmalar yapılmalı
	Model ve imalat parçaları arasında fark olabilir	Modeli imalat için değerlendirecek yazılım gerekli
	Tozu ısıtmak parçayı soğutmak gerekir	Isıtma/soğutma dengesi iyi ayarlanmalı
	Zehirli gaz oluşabilir	Ortam temiz tutulmalı
FDM	İşlem yavaş ve yüzey kalitesi kötüdür	İşlem hızı, katman kalınlığı (yüzey kalitesi) ve malzeme alanında iyileştirmeler yapılmalı
	Model ve imalat parçaları arasında fark olabilir	Modeli imalat için değerlendirecek yazılım gerekli
	Kırılgan unsurlar için parça konumu önemlidir	Uygun model yapım konumu seçilmeli
	Düşey doğrultuda dayanım zayıftır	Uygun konum seçilmeli
	Mevcut malzeme termoplastiklerle sınırlıdır	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
3DP	Malzeme çeşidi sınırlı	Malzeme alanında araştırmalar yapılmalı
	Çözünürlük düzeyi kötü (en kötü)	Malzeme püskürtme meme sık ve fazla olmalı
	Yetersiz mekanik özellikler	Malzeme alanında araştırmalar yapılmalı
LOM	Genelde kâğıt malzeme kullanılır ve karmaşık parçalar zor yapılır	Karmaşık model yapımında kullanılmamalı ve malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	Model kısa zamanda bozulabilir	Ek işlem hemen yapılmalı
	Genelde ateş zarar verebilir	Ateş veya sıcak ortamlardan uzak durulmalı
	Atık malzemeyi çıkartmak zor olur	Model yapım aşamasında işlem planlama yapılmalı
	Düşey oluşum diğer teknolojiler kadar iyi değil	Uygun konum seçilmeli
	Alternatif malzeme çeşidi sınırlı	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	Rutubette karşı sızdırmazlık önlemi gerekli	Model kaplanmalı veya boyanmalı
MJM	Zayıf dayanımlı plastik malzeme	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	İmalatı değerlendirme mümkün değildir	Malzeme püskürtme meme sık ve fazla olmalı
	Damlacık malzeme birikmesi kontrolü	Yüzey gerilimi artırıcı malzeme geliştirilmeli
LENS	Yüzey kalitesi kötüdür ve genelde ek işlem gerekir	İnce malzeme toz tanecikleri geliştirilmeli
	Mekanik özellikler zayıftır	Malzeme geliştirme amaçlı araştırma yapılmalı
	Maliyet yüksektir	Maliyeti azaltma çalışmaları yapılmalı

4. ÇEKME TESTİ VE MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

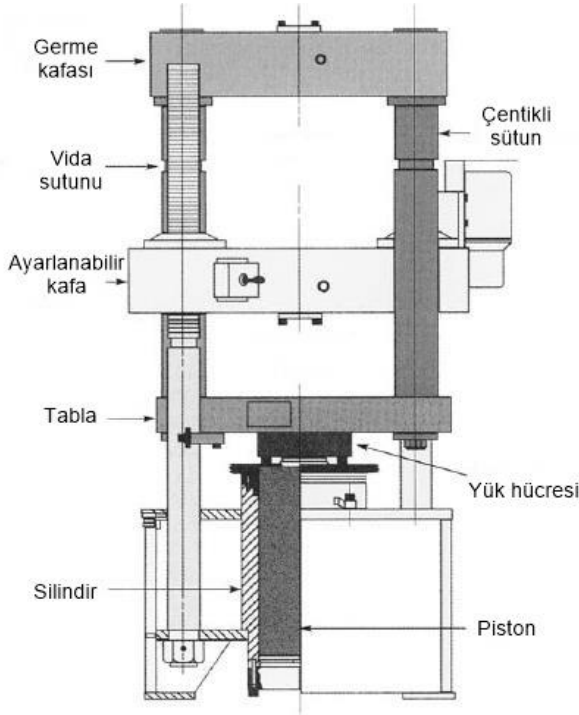
Malzeme biliminde, malzeme üzerinde belirli bir şekil değiştirme oluşturmak için uygulanması gereken kuvvetin belirlenmesi ya da malzemeye belirli bir kuvvet ile etki edildiğinde oluşacak şekil değişiminin belirlenmesi oldukça önemlidir. Şekil değiştirme ve şekil değiştirmeye neden olan kuvvet arasındaki ilişki, malzemenin hangi koşullar altında şekillendirilebileceğini ya da hangi koşullarda çalışabileceğini belirlemektedir [52].

Kuvvet ile şekil değiştirme arasındaki ilişkileri incelenmek için yapılan en basit deney çekme deneyidir. Çekme deneyi; malzemenin statik yük altındaki plastik ve elastik davranışlarının yani mekanik özelliklerinin belirlenmesi, mekanik özelliklerine göre sınıflandırılması ve doğru malzeme seçimi amacıyla yapılır. Bu deneyde belli standartlardaki çekme numunelerinin mukavemet değerleri belirlenir. Elde edilen bu değerler malzemelerin mekanik özelliklerini belirler [52].

Endüstriyel tasarımda en önemli konulardan biri malzeme dayanımıdır. Malzeme dayanımını belirlemek için yapılan çekme testi; bir numunenin kopana denk tek eksende çekme kuvvetlerine maruz bırakıldığı temel bir malzeme bilimi testidir [52]. Çekme testi ile parçanın; maksimum gerilme mukavemeti, azami uzama ve alan daralması özellikleri belirlenebilir. Ayrıca çekme testi ile malzemenin Young (elastisite) modülü, Poisson oranı, akma dayanımı ve gerinim sertleşmesi (pekleşme) gibi karakteristik özellikleri belirlenebilir. Çekme testi ile malzemenin plastik deformasyona neden olabilecek ya da dayanabileceği maksimum gerileme değeri belirlenebilir. Bu değerler mühendislik tasarımında dikkat edilmesi gereken (güvenlik faktörleri şeklinde) hususlardan biridir. Ayrıca çekme testi ile malzemenin sünekliği belirlenebilir. Süneklik; malzemenin kopmadan önce ne kadar deforme olabileceğinin bir ölçüsüdür. Süneklik doğrudan tasarıma nadiren dahil edilir, daha ziyade kalite ve tokluğun sağlanması için malzeme özelliklerine dahil edilir. Çekme testindeki düşük süneklik kırılmaya karşı düşük direncin göstergesidir [53].

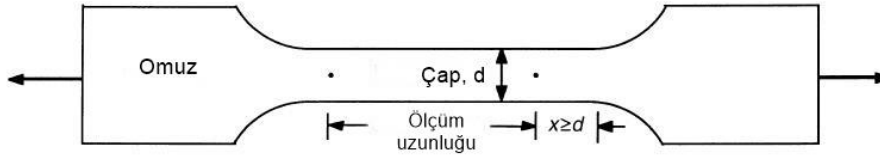
Çekme test cihazı, deney parçasının bağlandığı aşağı ve yukarı hareket edebilen iki çene ve çenelere kuvvet veya hareket veren ve bu büyüklükleri ölçen ünitelerden oluşmaktadır. Çenelerden biri sabit hızla hareket ettirilerek numuneye değişen miktarlarda çekme kuvveti uygular. Bu kuvvetlere karşılık gelen uzamalar kaydedilir. Çekme testinde standart boyutlardaki daire veya dikdörtgen kesitli numuneler kullanılır [54].

Çekme testi cihazları yükün uygulandığı yönteme göre elektromekanik veya hidrolik olarak ikiye ayrılırlar. Elektromekanik çekme testi cihazları değişken hızlı elektrik motoruna dayanmaktadır. Hidrolik test cihazları (Şekil 4.1.), çeneyi yukarı veya aşağı doğru hareket ettiren tekli veya çift etkili pistonlara dayanır. Genel olarak, elektromekanik test cihazları, daha geniş hız aralığına ve daha uzun çene hareket alanına sahipken, hidrolik makineler daha yüksek kuvvetler üretmek için daha uygundur [52].



Şekil 4.1. Hidrolik çekme deney cihazı [53]

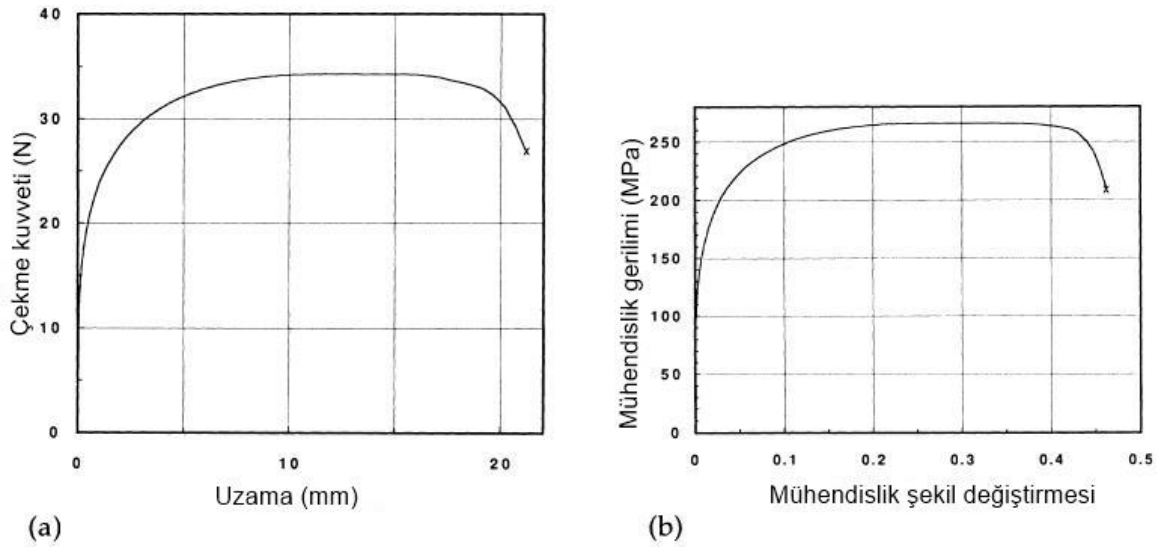
Tipik çekme testi numunesi Şekil 4.2’de gösterildiği şekilde çene tarafından rahatça kavranması için geniş omuzlara sahiptir. Numunenin önemli kısmı ölçüm (gage) bölümüdür. Ölçüm uzunluğu, ölçümlerin yapıldığı alan olup, omuz kısımları arasında ortalanmıştır. Ölçüm kesitinin kesit alanı, numunenin geri kalan kısmınıninkine (omuz) göre azaltılır, böylece deformasyon ve kopma bu bölgede meydana gelir. Klasik çekme testi numuneleri ve çekme testi cihazları ile tek boyutta dayanım ölçüldüğü için çekme testi numuneleri kompleks gerilimlerden kaçılacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu durumun önüne geçmek için bazı standart çekme testi numuneleri (ASTM, TS, vb.) oluşturulmuştur [53]. Çekme deney numuneleri hazırlanırken; içi dolu çubuk, profil, köşebent, boru veya levha şeklinde genellikle talaşlı işleme ile ilgili standartlara göre hazırlanır [52].



Şekil 4.2. Tipik silindirik çekme numunesi. Omuzlardan kaynaklanan nihai etkileri önlemek için, geçiş bölgesinin uzunluğu en az çap kadar büyük olmalı ve azaltılmış kesitin toplam uzunluğu çapın en az dört katı olmalıdır [54].

4.1. Gerilme – Şekil Değiştirme Diyagramı

Çekme testi, numunenin çekme cihazına monte edilmesini ve gerilmeye maruz bırakılmasını içerir. Çekme kuvveti, ölçüm kısmının (gage length) uzunluğundaki artışa bağlı bir fonksiyon olarak kaydedilir. Şekil 4.3 sünek malzeme için tipik bir diyagramını göstermektedir.



Şekil 4.3. a) Gerilme deneyindeki kuvvet-uzama eğrisi ve b) mühendislik gerilme-şekil değiştirme eğrisi. Numune çapı, 12.5 mm; ölçüm uzunluğu, 50 mm [53].

Mühendislik gerilimi veya nominal gerilim (σ) Eş. 4.1'deki gibi ifade edilir.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.1)$$

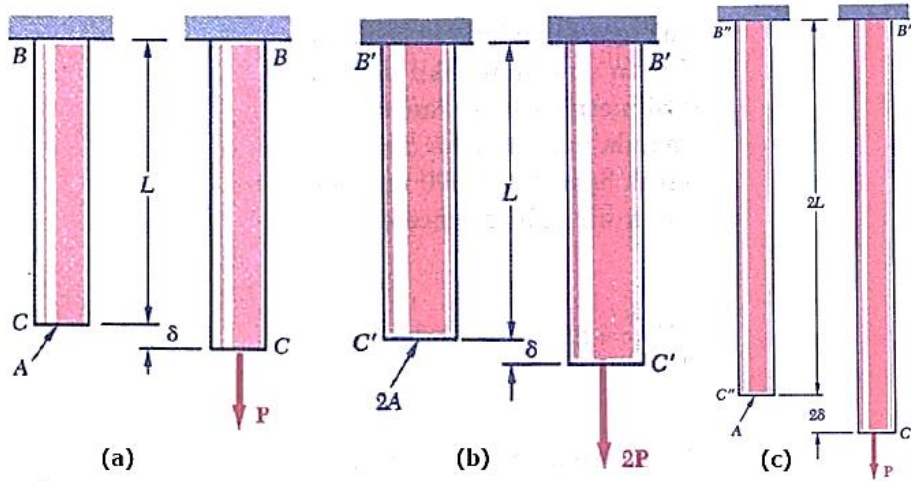
Burada; F Çekme kuvveti ve A_0 ölçüm bölgesinin başlangıç kesit alanıdır.

Mühendislik gerinimi (şekil değiştirmesi) (ε) ise Eş. 4.2’de ki gibi tanımlanır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2)$$

Burada; L_0 ölçüm bölgesinin başlangıç uzunluğu ve ΔL ise ölçüm bölgesinde ki değişimdir ($\Delta L = L - L_0$).

Kuvvet-uzama verileri mühendislik gerilimi ve gerinimine dönüştürüldüğünde, kuvvet-uzama eğrisine eşdeğer gerilme-gerinim (şekil değiştirme) eğrisi (Şekil 4.3.b) çizilebilir. Kuvvet-uzama yerine gerilim-gerinim eğrisi kullanılmasının avantajı, gerilim-gerinim eğrisinin numune boyutlarından hemen hemen bağımsız olmasıdır. Farklı bir şekilde ifade ile Şekil 4.4.a’da bulunan B noktasından asılı L uzunluğuna sahip uniform kesit alanına sahip BC çubuğu incelenirse; C ucuna P yükü uygulandığında çubuk bir miktar uzamaktadır (Şekil 4.4.a). Deformasyona (δ) karşılık gelen yükün şiddeti P çizilerek belirli bir yük (kuvvet) – deformasyon diyagramı elde edilir (Şekil 4.3.a) [55].



Şekil 4.4. Farklı kesit alanlarına sahip ve farklı yüklere maruz bırakılan çubuklarda meydana gelen deformasyon [55]

Eğer BC çubuğuna P kuvveti δ deformasyonu oluşturuyorsa aynı deformasyonu aynı uzunlukta fakat 2A kesitindeki bir B'C' çubuğuna oluşturmak için 2P kuvvet gerektiği gözlemlenir (Şekil 4.4.b) . Diğer yandan P yükü A kesitinde fakat 2L uzunluğundaki B''C'' çubuğuna uygulandığında 2δ deformasyon ortaya çıkar (Şekil 4.4.c). Fakat iki halde de deformasyonun çubuğun boyuna oranı sabit olup δ/L 'ye eşittir. Bu gözlem ile şekil değiştirme kavramını tanımlanırsa; eksenel yük altındaki bir çubukta normal şekil

değiştirme, çubuğun birim uzunluğundaki deformasyondur [55]. Normal şekil değiştirme ε ile gösterilirse,

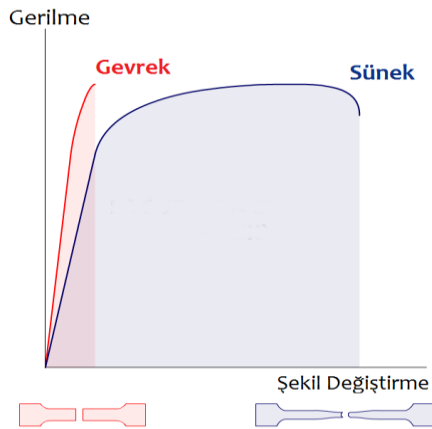
$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (4.3)$$

Deformasyon $\delta=L-L_0$ ile ifade edilebileceği için Eş. 4.3, Eş. 4.2'ye denktir.

Böylece gerilme $\sigma = P/A$ – şekil değiştirme $\varepsilon = \delta/L$ diyagramı çizilirken kullanılan numunenin boyutlarına bağlı olmayan, karakteristik malzeme özelliklerini veren bir eğri elde edilir.

4.2. Malzemelerin Sünek - Gevrek Davranışı

Malzeme grupları gerilme-şekil değiştirme diyagramlarının bazı ortak özellikler ile sünek ve gevrek olmak üzere iki büyük gruba ayırmak mümkündür. Süneklik; malzemenin kopmadan önce ne kadar deforme olabileceğinin bir ölçüsüdür. Numune artan yüke maruz bırakıldığında boyu önce yük ile lineer ve düşük hızda uzar. Böylece gerilme-şekil değiştirme diyagramlarının ilk kısmı büyük eğimli bir doğru parçasıdır (Şekil 4.5).

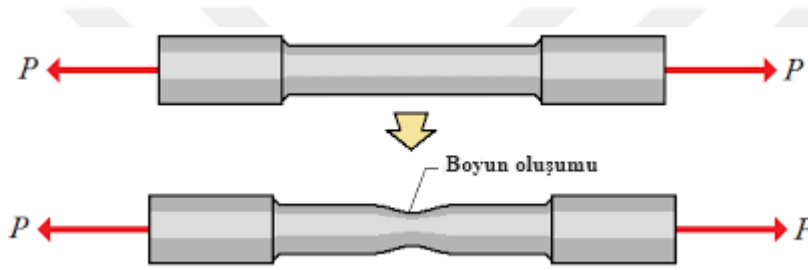


Şekil 4.5. Sünek ve gevrek malzemelere ait gerilme – yer değiştirme diyagramı ve numune deformasyonları [52]

Bununla birlikte kritik bir gerilme değerinden (σ_a) (akma dayanımı) sonra, uygulanan yükteki izafi olarak küçük bir artış, numunede büyük deformasyona neden olur. Bu deformasyon malzemenin eğik yüzeyler boyunca kaymasına sebep olur ve buna birinci derecede kayma gerilmeleri denir.

Gevrek malzemeler uzama oranında kayda değer bir belirti olmaksızın kırılmaları ile karakterize edilirler (Şekil 4.5). Bu yüzden gevrek malzemelerin kopma mukavemetleri ile akma mukavemetleri arasındaki fark oldukça küçüktür. Aynı zamanda kopma anındaki şekil değiştirmeleri de sünek malzemelere göre oldukça düşüktür. Bununla birlikte sünek bir malzeme düşük sıcaklıklarda gevrek, gevrek bir malzeme ise yüksek sıcaklıklarda sünek özellik gösterebilir.

Yük belirli bir azami değere ulaştıktan sonra numunenin bir kısmının çapı bölgesel karasızlık sebebi ile azalmaya başlar (Şekil 4.6). Bu olaya boyun verme denir. Boyun oluştuktan sonra daha küçük yükleme ile kırılma oluncaya denk uzama devam eder.



Şekil 4.6. Sünek malzemede boyun oluşumu [55]

Bir malzemenin sünekliğinin standart bir ölçüsü yüzde uzamadır ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\text{Yüzde uzama} = 100 \frac{L - L_0}{L_0} \quad (4.4)$$

Burada, L_0 'ın numunenin ilk boyu, L 'nin ise kopma sırasındaki boy olduğu unutulmamalıdır. Bu değer A36 adıyla bilenen genel bir inşaat çeliğinde %20 civarındadır.

Başka bir süneklik ölçüsü ise nadir kullanılan büzülme alanıdır ve Eş. 4.5'deki gibi tanımlanır.

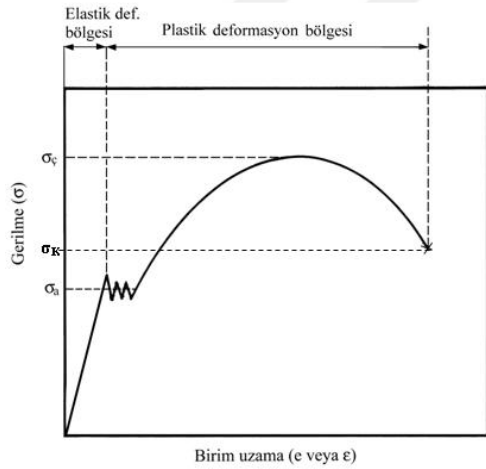
$$\text{Yüzde büzülme alanı} = 100 \frac{A_0 - A}{A_0} \quad (4.5)$$

Burada A_0 numunenin ilk kesit alanı iken A kopmada oluşan minimum kesit alanıdır. İnşaat çeliğinde alan genellikle %60 ila 70 arasında büzülür.

4.3. Malzemelerin Elastik – Plastik Davranışı

Uygulanan yük ile deney numunesinde oluşan şekil değiştirmeler, yük uzaklaştırılınca ortadan kalkıyorsa malzemenin elastik özellikte olduğu anlaşılır. Elastik şekil değiştirmede uygulanan küçük gerilimde atomlar arasındaki bağlar sıklaşır ve gerilim ortadan kaldırıldığında atomlar arasındaki bağ mesafeleri ilk haline döner. Malzemenin elastik davrandığı gerilmenin en büyük değerine bu malzemenin elastik sınırı denir [55].

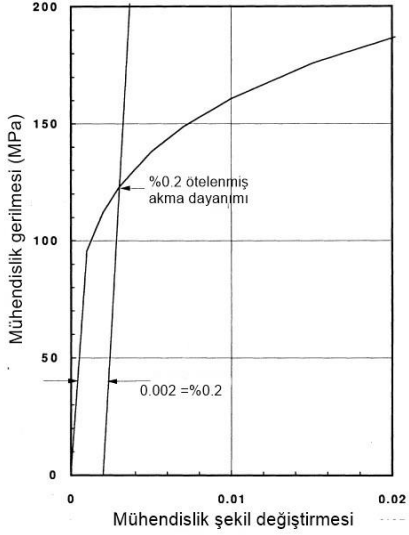
Eğer malzeme Şekil 4.7’de ki gibi iyi tanımlanmış bir akma noktasına sahipse elastik sınır ve akma noktası eşittir. Diğer bir ifade ile gerilme akma noktasının altında tutuldukça malzeme elastik ve lineer davranır. Malzeme akma dayanımının üstündeki yani plastik bölgelerdeki gerilimlere maruz kalırsa kalıcı veya plastik şekil değişme olur. Plastik şekil değiştirme çoğu malzemede sadece gerilmenin ulaşılan azami değerine değil aynı zamanda yük uzaklaştırılincaya kadar geçen süreye de bağlıdır. Plastik şekil değiştirmenin gerilmeye bağlı kısmı kayma ve zamana bağlı kısmı sıcaklığında etkili olduğu sürünme olarak bilinir.



Şekil 4.7. Gerilme – şekil değiştirme diyagramı (σ_a akma dayanımı, $\sigma_{\text{ç}}$ maksimum çekme dayanımı, σ_k kopma dayanımı) [56]

Malzeme iyi tanımlanmamış akma noktasına sahip değilse elastik sınır hassas olarak belirlenemez. Plastik deformasyonun oluşmaya başladığı gerilmeyi, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusallıktan saptığı ilk nokta olarak belirlemek her zaman doğru sonuçlar vermez. Özellikle plastik malzemelerde plastik (kalıcı) şekil değiştirmenin olduğu kısımlarda elastik şekil değişimde meydana gelebilir. Plastik şekil değiştirmeler ne kadar küçükse doğrusallıktan sapmalarda o kadar az olacaktır. Bu durumun önüne geçmek için plastik şekil değişiminin başladığı akma dayanımı, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin

başlangıçta ki doğrusal kısma paralel olan %0.2 ötelenmiş düz çizgi çizilerek bulunabilir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Gerilim-Şekil değiştirme grafiğinde akma noktasının öteleme yöntemi ile bulunması [57]

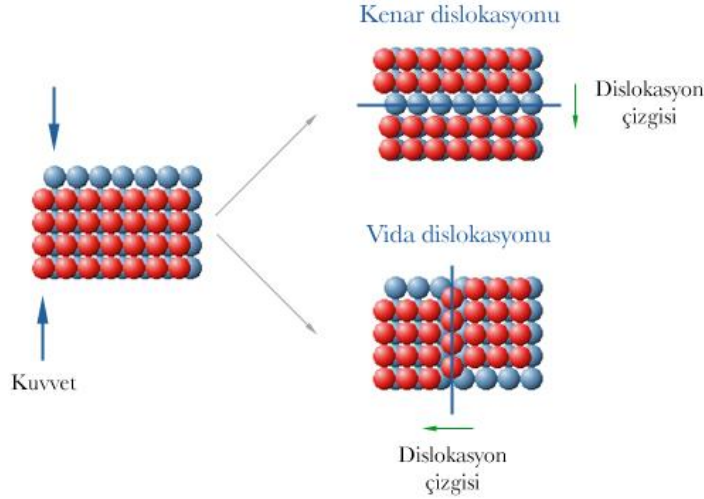
4.4. Malzemelerin Dayanımını Etkileyen Faktörler

Malzemelerin mekanik özellikleri büyük ölçüde metalurjik yapılarına bağlıdır. Metalurjik yapı ise kimyasal bileşim ile malzemeye uygulanan mekanik ve ısı işlemleriyle değiştiğinden dolayı malzemenin mekanik özelliklerinin bu faktörlere de bağlı olduğu söylenebilir. Mukavemet en önemli malzeme özelliklerinden biridir ve diğer özellikler de buna bağlı olarak değişir. Malzeme biliminde dayanım, malzemenin plastik şekil değiştirmeye olan direnci şeklinde tanımlanır. Malzemelerin plastik şekil değişimi, dislokasyon adı verilen çizgisel kusurların kristal yapı içerisinde ilerlemesiyle meydana gelmektedir. Dolayısıyla dayanım, süneklik, sertlik gibi mekanik özellikler, malzemenin içyapılarındaki dislokasyonların yoğunluğu ve diğer kusurlarla olan etkileşimleri ile açıklanabilir.

Dislokasyonların hareketini zorlaştıracak veya engelleyecek her türlü etken, malzemenin dayanımını arttıracaktır. Tersini durum olarak, dislokasyon hareketlerini kolaylaştıracak her türlü etken ise plastik şekil değişiminin daha kolay gerçekleşmesini sağlayacaktır [58].

4.4.1. Dislokasyon

Malzeme biliminde, dislokasyon, diğ er bir tabirle çizgisel kusur; kristal yapıların atomsal dizilişlerinde bir çizgi boyunca ortaya çıkan kusurlardır. Atomların denge konumlarından ayrılmasıyla oluşan çizgi çevresinde artık gerilimler meydana gelir ve şekil değıştirme enerjisi depo edilir. Dislokasyonlar özellikle malzemelerin katılaşma aşamalarında oluşmaktadır ve plastik şekil değıştirme esnasında sayıları artarmaktadır. Dislokasyonlar plastik deformasyona sebep olan en önemli faktörlerden birisidir. Çizgisel karakterde bulunan bu yapı kusurları gerilmeye maruz kaldığında kristal içerisinde hareket etmeye zorlanmaktadır ve bunun sonucunda plastik deformasyon meydana gelmektedir. Dislokasyon yoğunluğunun artması plastik deformasyonda çok önemlidir. Dislokasyonların mevcudiyeti plastik deformasyonu kolaylaştırırken, yoğunluğunun artması dislokasyon hareketini sınırlar ve malzemenin plastik deformasyonunu güçleştirir. Deformasyon sertleşmesinin esası dislokasyon yoğunluğunun artmasıdır. Dislokasyonlar kristal içerisinde sadece paralel düzlemler üzerinde hareket etmezler. Diğ er bir değışle, birbirini kesen kayma düzlemlerinde de hareket etmeye çalışırlar. Bu durumda farklı sitemlerde kayan dislokasyonlar birbirleriyle keşişirler ve geometrik bazı değışiklikler yaratarak yollarına devam etmeye çalışırlar. Genellikle iki dislokasyonun keşişmesiyle bir basamak (jog) meydana gelir. Bu durumda dislokasyonun boyu uzar, enerjisi artar ve keşişme öncesi kolay ilerleme özelliğinin yitirir. Bu sayede pekleşme olayına katkıda bulunurlar. şekil 4.9’da kenar ve vida dislokasyonlarının oluşumu gösterilmiştir. Kenar dislokasyonlarında, dislokasyon çizgisi uygulanan kuvvete paralel olarak hareket etmektedir. Bunun sebebi, kenar dislokasyonu oluşumunda dislokasyon çizgisine dik uygulanan kuvvetlerin atomların konumunu sırayla, uygulanan kuvvete paralel doğrultuda değıştirmesidir. Vida dislokasyonu oluşumunda ise, kayan düzlemler bir kenardan diğ er kenara uzanan bir dalga gibi ilerlemektedir. Bu nedenle, kırmızı ile gösterilen atom düzlemi yukarıya doğru hareket ederken, dislokasyon çizgisi ise sağdan sola doğru hareket etmektedir [58, 59].



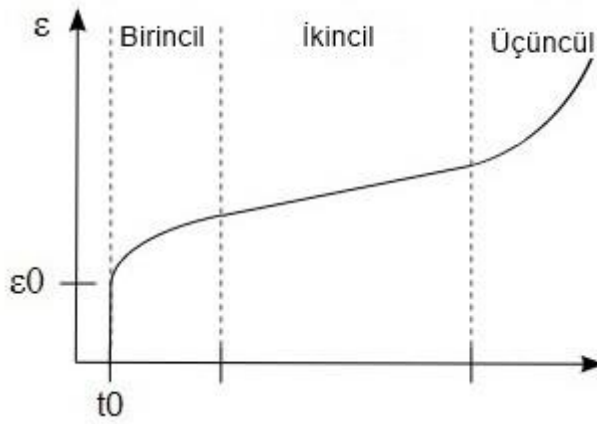
Şekil 4.9. İki kenar dislokasyonunun birbirini kesmesi [59]

Deformasyon sertleşmesi (pekleşme) sadece dislokasyonların parçacıklara takılmasıyla gerçekleşmez. Kayma düzlemine dik olarak uzanan dislokasyonlar da düzlem üzerinde kaymaya çalışan dislokasyonları yukarıda anlatıldığı gibi engellemeye veya basmak oluşturarak hareketlerini kolay gerçekleştirmemelerine neden olurlar. Bu şekilde “dislokasyon ormanı” oluşur. Deformasyon sırasında dislokasyonların bu şekilde birbirlerini kesmesi malzemenin mukavemetinin artmasına neden olur. Aslında deformasyon sertleşmesi diye bilinen olayı meydana getiren temel mekanizma da budur [59].

4.4.2. Sürünme

Malzemelerde sabit gerilme ve sabit sıcaklık altında malzemede meydana gelen kalıcı deformasyon sürünme (creep) olarak ifade edilmektedir. Malzeme içinde sürünmenin ortaya çıkması uzun zaman almaktadır. Sürünme deneyi yüksek sıcaklıkta çalışacak malzemeler için çok önemlidir. Yüksek sıcaklıklarda çalışmakta olan malzemelerin özellikleri oda sıcaklığındaki özelliklerinden farklıdır [60]. Sürünme deneyi yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Sürünme deneyi genellikle malzemenin erime sıcaklığının 0,3-0,4 katı arasında ki sıcaklıklarda yapılır.

Malzemelerin sürünme davranışları, plastik deformasyona/zaman grafiği ile incelenmektedir. Şekil 4.10’da bir malzemenin sürünmesi esnasındaki plastik şekil değiştirme hızını gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Sürünme için şekil değiştirme/zaman grafiği [60]

I. bölgenin ilk kısmında yükleme ile malzeme kendi mukavemeti ile bu yükü karışılır. Fakat ilk bölgenin sonlarına doğru malzeme bir miktar plastik deformasyona uğrar ve pekleşir.

II. bölge ise kararlı bölge olarak tanımlanır. Bu bölgede toplam plastik deformasyonun az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni I. bölgede pekleşen malzemenin II. bölgede sürünmeye karşı maksimum direnç göstermesidir. İlgili malzemenin sürünmesi bu bölgenin eğimiyle doğrudan ilişkilidir. Bu bölgede sürünme mekanizmasının genel formülü tanımlanabilir.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{C\sigma^m}{d^b} e^{\frac{-Q}{kt}} \quad (4.6)$$

Burada, ε sürünme şekil değiştirmesi, C malzemeye bağlı sürünme sabiti, m ve b sürünme mekanizmasına bağlı üstler, Q sürünme mekanizması için aktivasyon enerjisi, σ uygulanan gerilim, d malzemenin tanecik boyutu, k Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır.

III. bölgede “Hızlı Sürünme” bölgesi olarak bilinir. Bu bölgede sürünme hızı tekrar artar. Hızdaki bu değişim ile malzemenin içyapısının değişmesinden, boşlukların oluşmasından, ve tane sınırlarının kaymasından dolayı hızlı bir plastik deformasyon oluşur. Numunede boyun oluşumu başlar ve sonunda kopma meydana gelir [60].

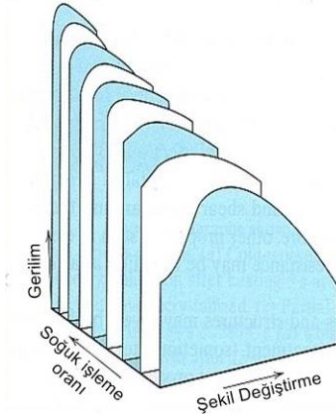
4.4.3. Pekleşme

Deformasyon sertleşmesi diğer bir tabirle pekleşme, soğuk deformasyon bölgesinde malzemelere uygulanan plastik deformasyonla sağlanmaktadır. Soğuk deformasyon ya da soğuk şekil değiştirme, malzemenin ergime sıcaklığının yarısı veya daha azı sıcaklıklarda, veya genel olarak oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Bu sıcaklık aralığında yapılan deformasyon işlemi malzeme yapısında pekleşmeye neden olur. Pekleşme, dislokasyonların birbirleriyle veya dislokasyon hareketini zorlaştıran çeşitli engellerle etkileşimi sonucunda oluşurlar. Ayrıca, soğuk deformasyon sırasında yeni dislokasyonların doğması da buna katkıda bulunur. Pekleşme ile mukavemet artarken genellikle süneklik azalır. Dövme, soğuk işlem, haddeleme gibi işlemlerle malzemenin pekleşmesi sağlanır. Soğuk işleme esnasında, azalan süneklik gibi istenmeyen etkileri gidermek için yapılan ters işleme ise tavlama denir. Plastik deformasyon sonucunda malzeme yapısında meydana gelen dislokasyon yoğunluğunun malzemenin mukavemetine etkisini aşağıdaki bağlantı vermektedir [53].

$$\sigma_a = \sigma_i + \alpha G b \rho^{1/2} \quad (4.7)$$

Burada σ_a akma gerilmesi, σ_i sürtünme gerilmesi, G kayma elastisite modülü, b Burgers vektörü, ρ dislokasyon yoğunluğu, α sabit (genellikle 0,3-0,6 arasında).

Soğuk deformasyon sırasında sarf edilen enerjinin bir kısmı ısı halinde kaybolurken bir kısmı dislokasyon enerjisine çevrilir. Böylece enerjinin önemli bir kısmı dislokasyon enerjisi olarak içyapıda depo edilir. Soğuk şekil değiştirme ile metalin dayanımında elde edilen artış, artan deformasyon miktarı ile sürekli artmaktadır. Şekil 4.11’de, soğuk şekil değiştirme ile birlikte gerilme birim şekil değiştirme diyagramında oluşan değiştirme verilmiştir. Görüldüğü gibi, uygulanan deformasyon oranı arttıkça malzemenin akma ve çekme dayanımları da artmaktadır. Bu artış malzemenin akma dayanımında daha fazla oranda meydana gelmekte ve akma ve çekme dayanımları arasındaki fark gittikçe azalmaktadır [61].



Şekil 4.11. Soğuk şekil değiştirme oranının metallerin gerilme-birim şekil değiştirme diyagramına etkisi [62]

Deneysel olarak edinilen gerçek gerilme-gerçek uzama eğrileri ile örtüşen bazı ampirik formüller geliştirilmiştir. Hollomon denklemi (Eş. 4.8) plastik bölgedeki şekil değiştirmeler için kullanılabilir.

$$\sigma_g = K \epsilon^n \quad (4.8)$$

Burada K mukavemet katsayısı ve n pekleşme katsayısıdır.

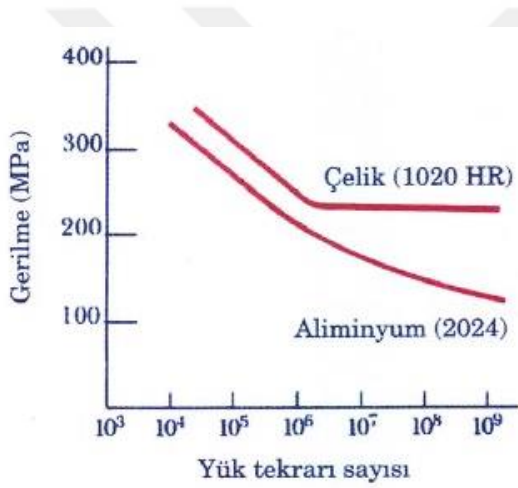
n değeri, malzemenin pekleşmeye uğrama ve deformasyon dayanımını artırma yeteneğini belirlemektedir. Pekleşememe durumunda n değeri sıfıra yaklaşmaktadır. Birçok mühendislik malzemesi için pekleşme katsayısı 0,15 ile 0,25 arasındadır. Deformasyon sertleşme üssünün artması üniform birim şekil değiştirme miktarını da arttırmaktadır. Dayanım sabiti K ise malzemenin dayanımı hakkında doğrudan fikir vermektedir. Diğer bir ifadeyle yüksek K değeri, malzemenin dayanımında yüksek olduğunu ifade etmektedir.

4.4.4. Yorulma

Değişken dinamik yüklere maruz kalan malzemenin belirli bir süre sonra aniden kırılmasına yorulma hasarı denir. Yorulma, malzemenin sürekli olarak yüklenme ve boşalma durumuna maruz kalmasıyla gerçekleşir. Eğer yüklemeler belirli bir seviyenin üzerindeyse, malzeme yüzeyinde mikroskobik çatlaklar oluşmaya başlar. Zaman içerisinde bu mikro çatlaklar kritik bir büyüklüğe ulaşarak yapıda çatlamları meydana getirir. Yapının şekli yorulma süresini büyük ölçüde etkiler. Kare delikli profiller yada keskin köşeler daha yüksek

yorulmaya sebep olurlar. Bu nedenle yorulma karşı önlem olarak yuvarlak delikli profiller veya yumuşak geçişler tercih edilmelidir.

Yüksek çevrimli yorulma durumlarda, malzeme performansı genel olarak Wöhler diyagramı olarak da bilinen bir S-N eğrisi ile karakterize edilir (Şekil 4.12). Bu diyagram ile farklı sabit gerilmelere maruz kalan malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını ya da kırılacağını tespit edilebilir. S-N eğrilerini elde etmek için genellikle 8 ila 12 benzer numune kullanılır. Ortalama gerilmenin tüm deneylerde sabit kalması şartı ile numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanır ve numunenin çatlamasına veya kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N) belirlenir.



Şekil 4.12. Malzeme yorulmasının tespiti için kullanılan Wöhler diyagramı [56]

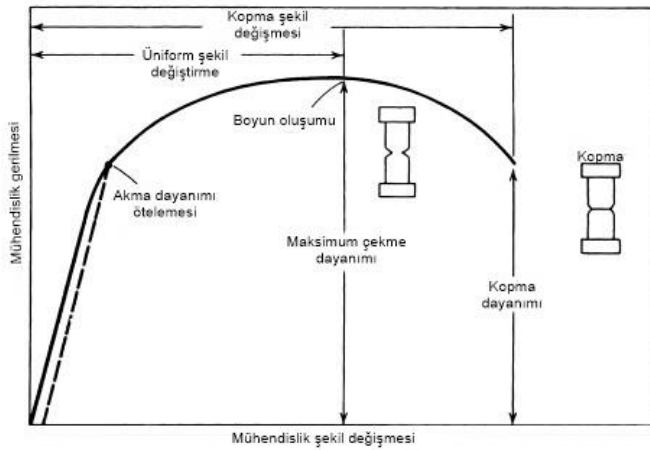
Şekil 4.12’de görüldüğü üzere çelik malzemesinin yorulmasının bir alt sınırı vardır. Yani 200 Mpa gerilim ve altında etki eden kuvvetler çelik malzemede yorulmanın oluşmasına sebebiyet vermez. Alüminyumda ise bu sınır görülmemektedir. Bu durumda alüminyumun uzun süreli kullanıma uygun olmayan yorulma açısından güvensiz malzeme olduğu sonucu çıkarılabilir [56].

4.4.5. Boyun verme

Boyun verme malzemenin küçük bir alanında orantısız şekilde oluşan şekil değişikliğidir. Çekme testinde malzeme plastik şekil değişime başladıktan sonra bir müddet düşen kesit alanı değişikliğini pekleşme telafi eder. Böylece şekil değiştirme arttıkça gerilim artmaya devam eder. Sonunda, numunenin kesit alanındaki azalmanın, pekleşmeden kaynaklanan deformasyon yükündeki artıştan daha büyük olduğu bir noktaya ulaşılır. Bu durum ilk önce

numunenin zayıf olan kısmında meydana gelir. Daha ileri plastik deformasyonlar bu bölgede yoğunlaşır ardından numunede boyun oluşur ve bölgesel olarak inceler. Numune kesit alanının hızlı bir biçimde azalmasından dolayı malzemeyi deformasyona uğratabilecek yük azalır ve sonunda numune kırılır (Şekil 4.13.) [53].

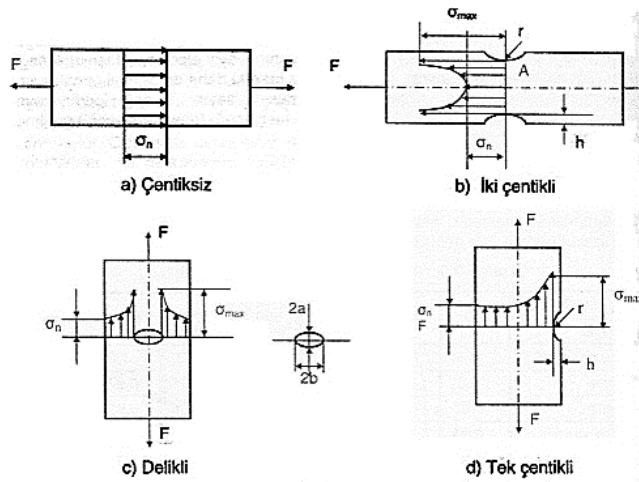
Gevrek malzemelerde genellikle belirgin boyun verme meydana gelmez iken sünek malzemelerde belirgin boyun verme gözlenir.



Şekil 4.13. Mühendislik gerilim şekil değiştirme eğrisi ve boyun oluşumu [63]

4.4.6. Çentik etkisi

Çentik bir parçada bulunan ani kesit değişikliğidir. Şekil 4.14’de görüldüğü gibi, çentikten dolayı çentik dibinde gerilme yığılması oluşmakta ve hesaplanandan daha büyük gerilmelere ulaşmaktadır [53].



Şekil 4.14. Farklı numuneler için çentik etkisi ve oluşan gerilmeler [53]

Çentik nedeniyle oluşan maksimum gerilme Eş. 4.9'de ki gibi ifade edilir.

$$\sigma_{max} = K_t \sigma_n \quad (4.9)$$

Burada K_t teorik yığılma faktörü, σ_n nominal (ortalama) gerilmedir. Teorik gerilme yığılma faktörü, belirli zorlanma şekline göre çentik geometrisi ile ilişkilidir ve tablodan belirlenir.

Çentik faktörü ise hem çentik geometrisinin etkisini (K_t) hem de malzemenin çentik hassasiyetini içeren bir faktördür (Eş. 4.10).

$$K_\zeta = 1 + q(K_t - 1) \quad (4.10)$$

Burada q çentik hassasiyet katsayısıdır. Malzeme için tablo değerlerinden okunur.

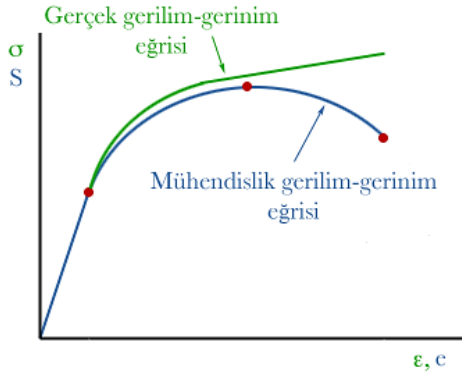
Genel olarak sünek malzemelerde çentik hassasiyeti az iken gevrek malzemelerde çentik hassasiyeti fazladır.

4.5. Gerçek Gerilme ve Şekil Değiştirme

Mühendislik gerilmesi (s olarak da gösterilebilir) ve mühendislik şekil değiştirmesini (e olarak da gösterilebilir) hesaplarken (Eş. 4.1 ve Eş. 4.2) numunenin sırasıyla ilk kesit alanını ve ilk boyunu kullanmıştık. Fakat çekme testi yapılırken malzemenin boyunda ve kesit alanında anlık değişimler meydana gelir. Bu durum mühendislik değerlerinde hatalara yol açar (Şekil 4.15). Boyutsal değişiklikler hassas bir şekilde belirlenerek elde edilen değerlere gerçek gerilme (Eş. 4.11) ve gerçek şekil değiştirme (Eş. 4.12) olarak ifade edilir [55].

$$\sigma_g = \frac{F}{A_i} \quad (4.11)$$

Burada σ_g gerçek gerilmeyi, A_i ise kesit alanının anlık değişimini ifade eder.



Şekil 4.15. Gerçek ve mühendislik gerilim-şekil değiştirme eğrileri arasında oluşan fark [56]

Gerçek gerinimde ise L_0 ilk boyu yerine kaydedilen ardışık L değerleri kullanılır. Böylece ölçüm bölgesindeki her ΔL artışına karşılık gelen L değerine bölünür ve $\Delta\varepsilon = \Delta L/L$ elemanter birim şekil değiştirmesi elde edilir. Ardışık $\Delta\varepsilon$ değerleri toplanarak ε_t gerçek şekil değiştirmesi tanımlanır (Eş. 4.12).

$$\varepsilon_t = \sum \Delta\varepsilon = \sum \Delta L/L \quad (4.12)$$

Toplama işareti integralle değiştirilip gerçek şekil değiştirme aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Eş. 4.13).

$$\varepsilon_t = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (4.13)$$

Gerçek gerilim/gerinim değerlerini belirlemek için ihtiyaç duyulan anlık değerleri çekme testi sırasında takip etmek kolay değildir. Anlık değerleri belirlemek için çekme testi cihazı ek ekipmanlara ihtiyaç duymaktadır. Fakat bu anlık değişim değerlerini elde etmek için her zaman pahalı ekipmanlara gerek yoktur. Bir çekme ya da basma testiyle mühendislik değerlerini ölçülebiliyorsa, aşağıdaki denklemler (Eş. 4.14 ve Eş. 4.15) vasıtasıyla bu mühendislik değerlerini gerçek değerlere çevrilebilir [55].

$$\sigma_g = \sigma_m(\varepsilon_m + 1) \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon_m) \quad (4.15)$$

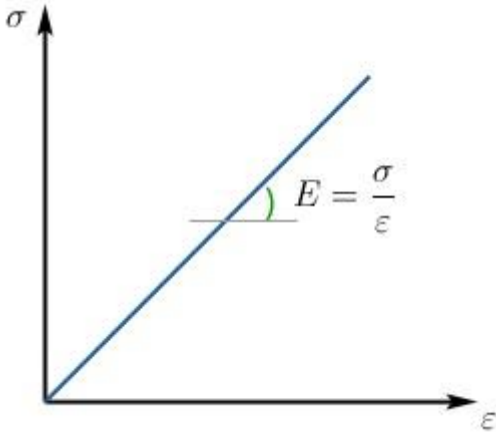
4.6. Malzemelerin Karakteristik Özellikleri

4.6.1. Hooke kanunu; elastisite modülü

Gerilme ve Şekil değiştirme bileşenlerinin lineer ilişkileri Hooke Yasası olarak bilinir. Elastisite modülü, malzemenin yükler altında elastik şekil değiştirmesinin bir ölçüsüdür. Tanımı gereği birim kesit alanına sahip malzemede (genellikle 1 mm²) birim boyu iki katına çıkarmak için uygulanması gereken kuvveti gösterir. Bazı kaynaklarda Young modülü olarak da anılır ve Eş 4.16'da ki gibi formülize edilir.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.16)$$

Burada σ elastik bölgede uygulanan kuvvet, E elastisite (Young) modülü ve ε birim şekil değiştirmedir. Elastisite modülü elastik bölgedeki gerilim-şekil değiştirme doğrusunun eğimidir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Gerilme-şekil değiştirme diyagramında elastisite modülünün tespiti [52]

Young modülü, malzemeye üzerinde bir miktar elastik gerinim oluşturabilmek için uygulanması gereken gerilim miktarını ifade etmektedir. Dolayısıyla malzemeye ait bu sabit, malzemenin elastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olarak da değerlendirilebilir. Bir malzemenin Young modülünün yüksek olması, elastik olarak zor esnediğini, düşük olması ise nispeten daha kolay, elastik bir biçimde esneyebileceğini göstermektedir. Yani Young modülü malzemeye katılığının (stiffness) bir ölçüsüdür. Malzeme katılığı malzemenin uygulanan kuvvet karşısında deformasyona gösterdiği

dirençtir. Bu kavram sertlik (hardness) ile karıştırılmamalıdır. Malzeme sertliği, malzemenin yüzeyine etki eden daha sert malzemeye karşı gösterdiği dirençtir [53].

Elastisite modülü malzemeye özgüdür. Örnek vermek gerekirse Şekil 4.17'deki saf demir ve üç farklı haldeki çeliğin gerilme-şekil değiştirme diyagramlarına bakıldığında, akma mukavemeti, kopma mukavemeti ve nihai şekil değiştirmeleri (süneklik) gibi özelliklerinin farklı olmasına rağmen elastisite modülünün hepsinde aynı olduğu görülür. Yani katılıkları (lineer bölgede deformasyona direnç yetenekleri) aynıdır [53-56].



Şekil 4.17. Demir ve farklı üç çelik için gerilim-şekil değiştirme grafiği [55]

Daha önce Eş. 4.1'de gerilmenin kuvvete ve numunenin kesit alanına bağlı eşitliği verilmişti. Hooke kanununda ise elastik bölgedeki gerilme elastisite modülü ve şekil değiştirmeye bağlı olarak (Eş. 4.16) tanımlanmıştır. Bu iki eşitlik birlikte çözülürse:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (4.1)$$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.16)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{AE} \quad (4.17)$$

Birim şekil değiştirme ise Eş. 4.3'de $\varepsilon = \frac{\delta}{L}$ olarak tanımlamıştık. Bu denklemden deformasyonu çekilirse Eş. 4.18 elde edilir.

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (4.18)$$

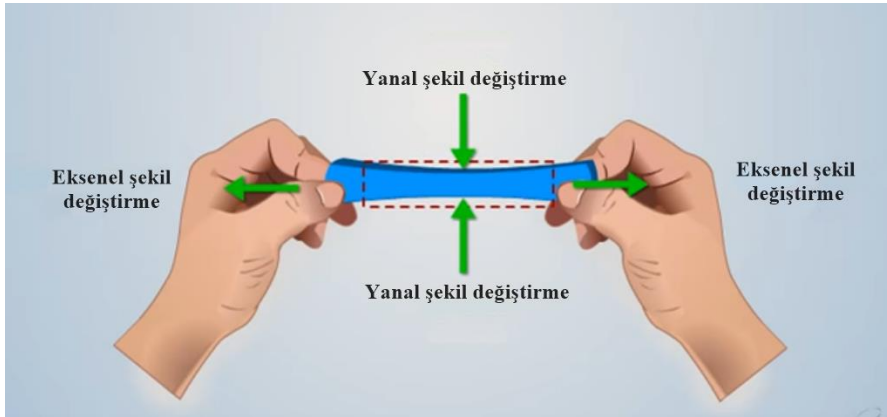
4.6.2. Possion Oranı

Malzemenin elastik sınırı aşılmadıkça homojen ince bir çubuk aksel olarak yüklendiğinde gerilme ve şekil değiştirmenin Hooke kanununa uyduğu belirtilmişti. P kuvveti x eksen yönünde uygulandığında A kesit alanı olmak üzere;

$$\varepsilon_x = \sigma_x / E \quad (4.19)$$

olarak belirlenmişti ve burada E elastisite modülüdür [13].

y ve z eksenlerine dik yüzeylerdeki normal gerilmelerin sıfır olduğunu belirtirsek $\sigma_y = \sigma_z = 0$. Bunlara karşılık gelen ε_y ve ε_z şekil değiştirmelerinin de sıfır olduğu düşünülebilir. Fakat bu durum doğru değildir. Bütün mühendislik malzemelerinde aksel çekme kuvveti ile oluşan uzama ile birlikte herhangi bir enine yönde daralma ortaya çıkar (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Aksel kuvvetin etkisi ile oluşan kesit daralması [64]

Malzemelerin izotropik olduğunu yani mekanik özelliklerinin incelenen yönden bağımsız olduğunu kabul edersek enine şekil değiştirmenin her yönde aynı yani $\varepsilon_y = \varepsilon_z$ olduğu sonucuna varırız. Enine şekil değiştirmenin boyuna şekil değiştirmeye oranının mutlak değerine Poisson oranı denir (Eş. 4.20) ve ν (nu) harfi ile gösterilir [53, 55].

$$\nu = \left(\frac{\text{enine şekil değiştirme}}{\text{boyuna şekil değiştirme}} \right) = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (4.20)$$

Elastik şekil değiştirme genellikle çok küçük olduğundan, çekme testinde Young modülünün ve Poisson oranının makul derecede doğru ölçülmesi, gerilmenin çok hassas bir

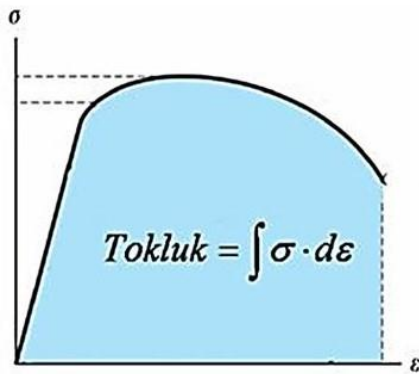
ekstensometre ile ölçülmesini gerektirir. Poisson oranı 0 ile 0,5 değeri arasındadır. Çelik için bu oran 0,3 civarındadır [53].

4.6.3. Tokluk

Tokluk, bir malzemenin enerjiyi emme kabiliyeti ve kırılma olmaksızın plastik olarak deforme olabilme kabiliyetidir. Bir tokluğunun bir diğer tanımı ise malzemenin kopmadan önce emebileceği birim hacim başına enerji miktarıdır. Aynı zamanda malzemeye gerilim uygulandığında kırılmaya karşı gösterdiği dayanım olarak ta tanımlanabilir [59]. Tokluk σ - ϵ eğrisinin altında kalan alandır ve σ - ϵ eğrisinin integrali alınarak bulunur (Eş. 4.21) (Şekil 4.19).

$$Tokluk = \int_0^{\epsilon_k} \sigma \cdot d\epsilon \quad (4.21)$$

Burada ϵ_k kopma anındaki uzamayı göstertmektedir.



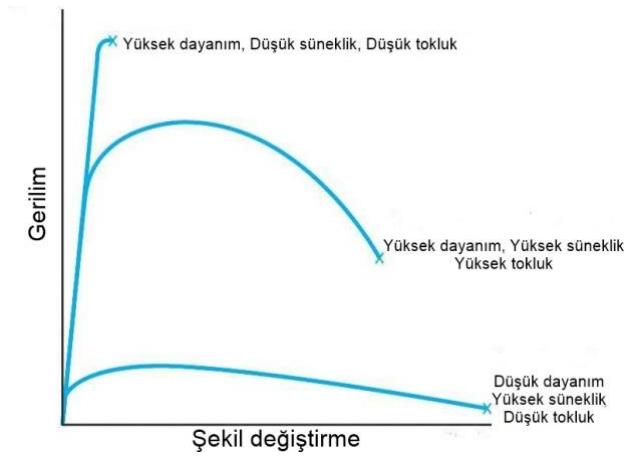
Şekil 4.19. Malzeme tokluğunun belirlenmesi [59]

Tokluk (veya deformasyon enerjisi, UT), SI sisteminde metreküp başına joule ($J \cdot m^{-3}$) ve kübik inç başına inç pound kuvveti ($in \cdot lbf \cdot in^{-3}$) olarak ölçülür.

Malzemenin tok (tough) olması için hem güçlü (strong) hem sünek olması gerekir. Örneğin, güçlü ancak sınırlı süneklığe sahip gevrek malzemeler (seramik gibi) tok değildir; Bunun tersine, düşük mukavemetli çok sünek malzemeler de tok değildir. Tok olmak için, malzemenin hem yüksek gerilimlere hem de yüksek şekil değişimlerine dayanmalıdır (Şekil 4.20). Genel olarak, mukavemet, maddenin ne kadar kuvvetle destekleyebileceğini

gösterirken, tokluk, bir maddenin kopmadan önce ne kadar enerji emebileceğini gösterir [53, 55].

İmalat, kötü işçilik ve tasarım gibi etkenlerin neden olduğu çentikler, gerilimlerin belli bölgelerde yoğunlaşmasına neden olur ve malzemenin tokluğunu azaltır. Malzemelerde çentik hassasiyeti, çentikli ve çentiksiz numunelerin absorbe ettiği enerji miktarları karşılaştırılarak açıklanabilir [59].



Şekil 4.20. Gerilim-şekil değiştirme eğrilerinin dayanım süneklik ve tokluk ifadeleri [59]

4.6.4. Rezilyans

Malzemenin elastik deforme edildiğinde enerjiyi emme ve yüklemenin kaldırıldığında enerjiyi geri verme kabiliyetine rezilyans denir. Bu özellik genellikle rezilyans modülü ile ölçülür. Rezilyans modülü malzemenin sıfır gerilimden akma gerilmesine (σ_0) kadar ki her birim hacimde ki şekil değiştirme enerjisidir. Tek eksenli gerilim için birim hacim başına (U_0) şekil değiştirme enerjisi Eş 4.22’de ki gibidir.

$$U_0 = \frac{1}{2} \sigma_x \varepsilon_x \quad (4.22)$$

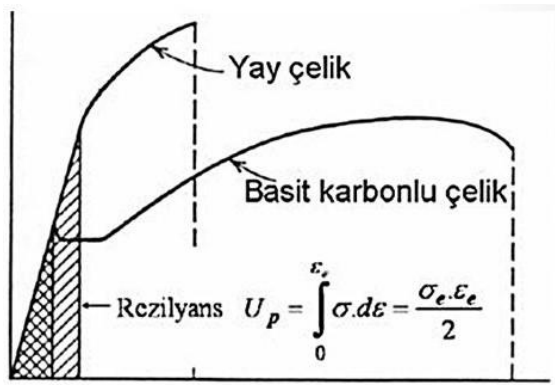
Yukarıda ki eşitlik (Eş 4.23) tanımından rezilyans modülü (U_r):

$$U_r = \frac{\sigma_a^2}{2E} = \frac{\sigma_a \cdot \varepsilon_a}{2} \quad (4.23)$$

olarak tanımlanır. Burada U_r rezilyans modülü, σ_a akma dayanımı, ε_a akma şekil değiştirmesi, E young modülüdür [65].

Bu denklem, malzemenin kalıcı deformasyona uğramaması gereken uygulamalarda enerji yüklerine direnen uygun malzeme (yüksek akma dayanımına ve düşük elastisite modülüne sahip mekanik yaylar gibi) seçiminde kullanılır [55].

Diğer bir ifadeyle rezilyans, σ - ε eğrisinin elastik bölgesi altında kalan alandır (Şekil 4.21).



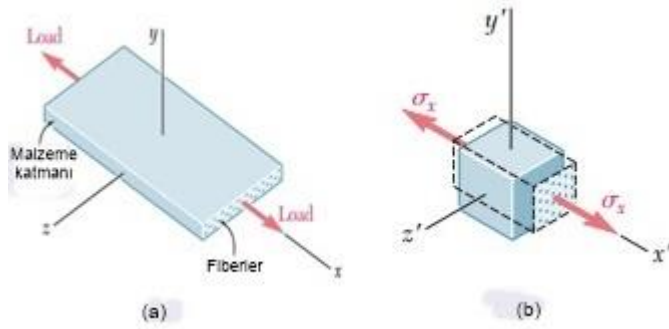
Şekil 4.21. Yay çeliği ve basit karbonlu çelik için rezilyansın belirlenmesi [52]

4.7. Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Çekme Testi

Daha önce Hooke kanunu $\sigma = E\varepsilon$ (Eş. 4.16) olarak açıklamıştık. Bu eşitlik yüklemenin yapıldığı yönden bağımsızdır. Çünkü elastisite modülü E gibi malzemenin mekanik özellikleri yönden bağımsızdır. Bu tip malzemelere izotropik denmektedir. Yöne bağlı olarak farklı özellik gösteren malzemelere ise anizotropik olarak adlandırılır. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler anizotropik özellik göstermektedirler. Şekil 4.22’de gösterilen elyaf takviyeli kompozit malzemeye x eksen boyunda gerilim uygulandığında (elyaflara paralel) σ_x gerilimi ε_y şekil değiştirmesi oluşacaktır. Bu durum diğer eksenler içinde geçerli olup elastisite modülü E_x , E_y , E_z farklı değerlere sahip olacaktır. Örneğin elyafların x eksenine paralel olmasından dolayı E_x diğer elastisite modüllerine göre daha büyük olacaktır ve x yönündeki maksimum gerilme kuvveti daha büyük olacaktır [55].

Kompozit malzemeler katmanlar halinde üretildiğinde tek bir yönde en büyük dayanımı elde etmek için elyaf yönelimlerinin aynı olması gerekmektedir. Fakat bu durumda matris malzeme elyafları kıvrılmaya ve yığılmaya karşı korumak için güçlü olmalıdır. Elyafların

gerilim uygulanan eksene paralel olması o eksendeki dayanımı oldukça arttırmasına rağmen diğer eksenlerdeki dayanım önemli miktarda düşecektir. Bu durumun önüne geçerek kompozit parçanın yanal (lateral) dengesini sağlamak için elyaflar 30° , 45° veya 60° gibi açılarda yerleştirilerek düzlem içi kaymaya karşı direnç arttırılabilir [55].



Şekil 4.22. Tek eksenli gerilme yükü altında elyaf takviyeli kompozit malzeme [55]

Elyafları paralel, yani x yönünde tek eksenli bir gerilme yüküne tabi tutalım (Şekil 4.20.a). Analizi basitleştirmek için elyafların ve matrisin özelliklerini homojen bir biçimde taşıyan hayali eşdeğer bir parça ele alalım (Şekil 4.22.b). σ_x 'i normal gerilim olarak ele alırsak $\sigma_x = \sigma_x = 0$ olur. X ekseninde oluşan şekil değiştirmeyi tespit etmek için Hooke kanununu ($\epsilon_x = \sigma_x / E_x$) kullanırız. Burada E_x kompozit malzemenin x yönündeki elastisite modülüdür. İzotropik malzemelerde olduğu gibi malzemenin x yönünde uzaması y ve z yönlerinde daralmalara eşlik eder. Bu daralmalar, elyafların matristeki yerleşimine bağlıdır ve genellikle farklıdır. Bu durum yanal şekil değiştirmeleri ϵ_y ve ϵ_z 'nin de farklı olacağı anlamına gelir ve Poisson oranına göre (Eş. 4.20);

$$\nu_{xy} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad \nu_{xz} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \quad (4.20)$$

olarak ifade edilir. Burada Poisson oranlarındaki ilk indis yükün doğrultusunu ifade ederken ikinci indis daralma yönünü ifade eder [55].

5. KOMPOZİT MALZEMELERİN FDM 3B BASKISI

FDM ile üretilen parçanın mekanik özelliklerini geliştirmek ve performansı yüksek termoplastik parça üretmek için bazı araştırmacılar mevcut FDM ekipmanı ile birlikte kullanılabilen termoplastik kompozit malzemeler geliştirmiştir. Burada belirli termo-fiziksel, mekanik ve katman oluşturma özellikleri gösteren takviyeli termoplastik filament üretilmesi gereklidir. Termo-fiziksel özellikleri şu şartları sağlamalıdır;

- Uygun erime ve katılaşma sıcaklığı
- Düşük termal genleşme katsayısı
- Minimal büzülme
- Yüksek ısı direnci olması ve
- Katı halde faz değişimi olmaması [66].

Zhong ve diğerleri, FDM malzemesi olarak kullanılmak üzere kısa cam elyaf takviyeli ABS (GFABS) polimer kullanmıştır [66]. Bu birleşim, kırılma nedeniyle filament haline getirilememiştir. Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) katkısının daha iyi esneklik ve süneklik sağladığı görülmüştür. LLDPE ve ABS matris arasındaki faz ayrımından dolayı ABS ve LLDPE molekül zincirleri arasındaki bağlantıyı güçlendirecek dengeleyici madde eklenmiştir. Böylece ağırlık oranı %18 cam elyaf olan güçlendirilmiş filament elde edilmiştir. Daha fazla cam elyaf eklenmesi ile doğrusal yükleme açısından yüksek gerilme direnci sağlanmıştır. Buna karşın cam elyaf eklemek, saf ABS ile karşılaştırılırsa, katmanlar arasındaki yapışma kuvvetini zayıflatmıştır. Bazı araştırmalar ise bitişik katmanlar arasındaki bağ düzenine elyaf etkisini ele almıştır [66].

Shofner ve diğerleri, FDM takviye malzemesi olarak karbon nanotüp ve karbon nanoelyaf içeren termoplastik kullanımını incelemiştir [24, 67]. Mekanik özellikleri arttırmak için polimer matris içinde nanoelyafları düzenleme amaçlı yürütülen araştırmalar da vardır [67 - 68]. Polimer içindeki nano-partiküller polimerin makro moleküllerin hareketini önlediği ve darbe dayanımını azaltmadan gerilme modül ve dayanımı arttırdığı görülmüştür [68]. Kompozit malzeme özellikleri içlerindeki elyaf şerit uyumuna bağlı olarak geliştirilebilir. Nanoelyaf dağılımı ve uyumu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenebilir. Elyafların uyumlu bir şekilde düzenlemesi ile mukavemet artmaktadır. Ayrıca kompozit örneklerde elastik uzama miktarının oldukça azaldığı ve süneklikten kırılma

özelliğe de geçildiği görülmüştür. Bu etki katman içindeki dayanımı artırmış ama bunlar arası bağlantıyı azaltmıştır [67].

Gray ve diğerleri, termotropik sıvı kristal polimerlerin (TLCPs) ticari FDM 1600 (Stratasys) makinasında kullanımını araştırmıştır [69]. Sıvı kristal polimer, uygun sıcaklık, basınç ve yoğunlukta sıvı kristal mezofaz olarak bulunabilen (çözelti içinde kristal halde) veya ergimiş halde kristal düzende sıralanabilen makromoleküllerdir. Bu tür sıvılar anizotropik davranış gösterir ve bunlara ait düzenli bölgelere ‘mezofazlar’ denir. Termotropik sıvı kristal polimerler, çeşitli sıvı kristal fazların bazı sıcaklık aralıklarında oluştuğu polimerlerdir. Üretilen basit parçaların mekanik özellikleri saf ABS ile üretilen parçalar ile karşılaştırılmış ve %40 TLCP takviyesi içeren kompozit gerilme modülü saf ABS ile üretilen parçadan %100, polipropilen ile üretilenden %150 daha fazladır. Katmanlar içi dayanım artmakla birlikte bitişik katman ve yollar arası dayanım (yapışma zayıf olduğu için) değişmemiştir [69].

Li ve diğerleri, kısmi kontrol edilebilen özelliklere sahip prototip imalatı için FDM prototip model mekanik özellikleri konusunda çalışmışlardır. Teorik ve deneysel analizlere dayalı elastikiyet sabitlerini hesaplayacak denklem kümesi önerilmiştir. Bu sabitler FDM parça yapısal modellerini belirlemede kullanılmıştır. Elyafların farklı yığılma yoğunlukları, yönleri ve kombinasyonları; imal edilecek parça sertlik özelliklerini sağlamada kullanılabilir. Ardışık katmanlardaki desenin farklı açılı kombinasyonları, üretilen katman küme çeşitliliğini arttıracaktır [70].

Masood ve diğerleri, yeni metal/polimer kompozit filament kullanarak FDM tekniği ile parça üretmiş ve test etmişlerdir. Bu yeni malzeme FDM sistemi ile doğrudan fonksiyonel parça ve kalıp üretmede gerekli mekanik özellikleri sağlamıştır. Bu özellikler, kompozit filament kullanmada partikül boyutu ve dolgu malzemesinin hacim oranı gibi hususları belirlemeyi sağlar. Kompozite ait büyük dolgu parçaları ve yüksek hacim oranı, düzenli kompozit malzeme partikül büyüklüğü durumunda, düşük çekme modülü, çekme dayanımı ve deformasyonu gösterir. Aynı hacme sahip büyük dolgu partikülleri (50-80 μm) ve küçük dolgu partiküllerinden (< 30 μm) oluşan kompozitler karşılaştırılırsa; büyük boyuta sahip kompozitin çekme modülü ve dayanımının daha iyi olduğu görülür (Çizelge 5.1). Küçük dolgu partiküllerine sahip kompozit ise çok daha iyi çekme deformasyonuna sahip olduğu görülmüştür [71].

Çizelge 5.1. Demir/naylon kompozit filament çekme özellikleri [71]

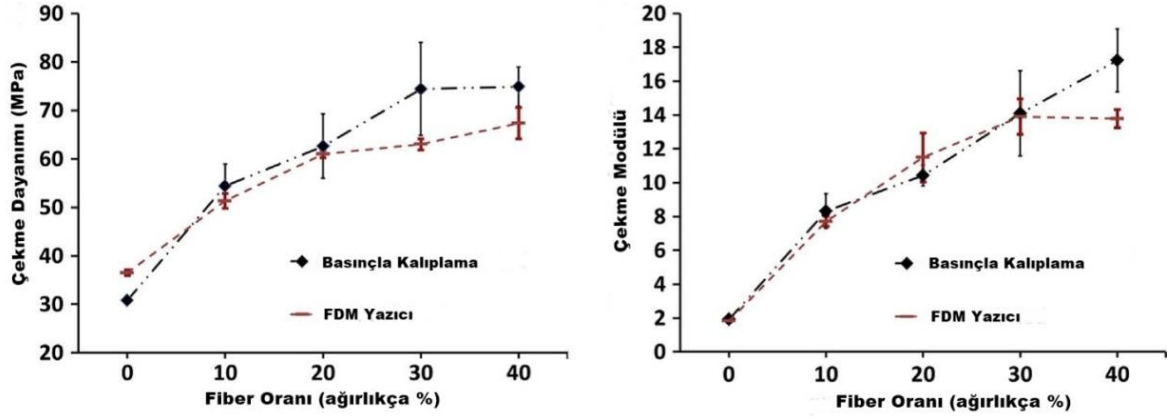
Numune no	İçeriği (hacimsel)	Çekme modülü E (MPa)	Çekme dayanımı σ (MPa)	Çekme deformasyonu ϵ (%)
1	%30 Fe (büyük partikül) %70 naylon	54,52	3,87	16,82
2	%40 Fe (büyük partikül) %60 naylon	42,23	2,76	12,94
3	%40 Fe (küçük partikül) %60 naylon	37,18	2,44	74,61

Sa'ude vd., FDM filamentleri olarak bakır-ABS kompozit kullanmak için bunun dinamik mekanik özelliklerini araştırmışlardır. ABS matris malzeme içine farklı oranlarda toz bakır karıştırılarak elde edilen polimer matris kompoziti (PMC) deneysel olarak incelemişlerdir. Temel olarak bakır takviye oranının depolama modülü (E') ve $\tan \delta$ 'ya etkileri incelenmiştir. Depolama modülü (E') ve $\tan \delta$, bakır miktarı ile orantılı olarak artmaktadır. Yani, bu tür ABS matrisin dinamik mekanik özelliklerinin bakır miktarından oldukça etkilendiği gözlenmiştir [72].

Onagoruwa vd., polipropilen (PP) bağlayıcı ile seramik tozun karışımından üretilen filamentleri FDM sisteminde kullanmışlardır. Mullit, eriyik silis ve titanya tozu içeren filamentler, FDM 1650 makinesinde kullanılarak gözenekli seramik parçalar üretilmiştir. Daha sonra ise bağlayıcı madde parçadan çıkartılmış ve sinterleme işlemi uygulanmıştır. Bazı gözenekli parçalar Al ile infiltrasyon işlemine tabi tutulup metal seramik kompozitler üretilmiştir [73].

Tekinalp vd., kısa elyaf (0.2-0.4 mm) ile takviye edilmiş ABS matrisi işlenebilirlik, mikroyapı ve mekanik performans açısından araştırmış ve geleneksel basınç kalıplama (CM) ile üretilmiş bir kompozit ile karşılaştırmışlardır. 3B yazıcı ile üretilen numunelerin çekme dayanımı %115 ve modülü ise %700 dolayında artmıştır. 3B yazıcı, baskı doğrultusunda yüksek elyaf yönelimine (%91.5 civarı) sahip numune üretmiştir. Buna karşın basınç kalıplama ile üretilen numune çok düşük elyaf yönelimine sahiptir. Mikroyapısal mekanik

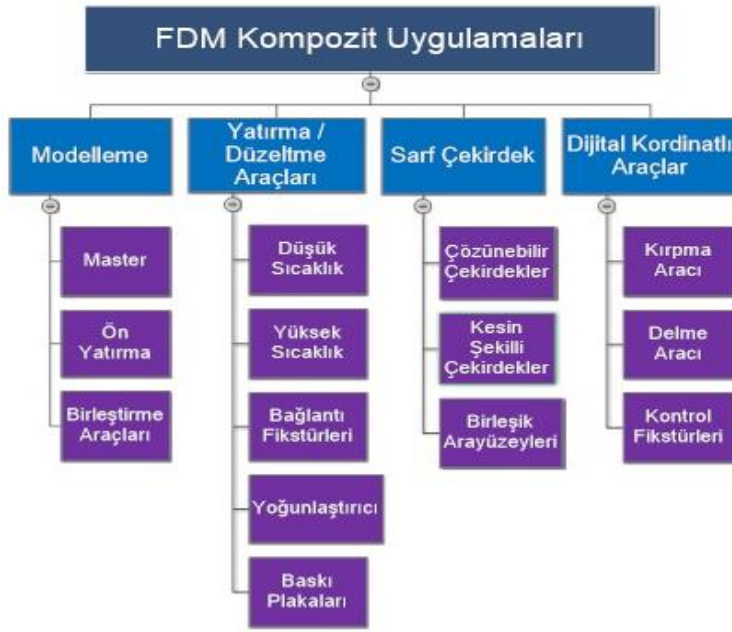
özellikler ilişkilendirildiğinde ise 3B yazıcı ile üretilen numune basınç kalıplama ile üretilene göre büyük gözenekli yapıya sahiptir. Her ikisi de benzer çekme mukavemeti (Şekil 5.1) ve modülü göstermektedir. Bu olgu elyaf yönlendirilmesi, dağılımı ve gözenek biçimine göre açıklanabilir [23].



Şekil 5.1. Basınç kalıplama ve FDM yöntemleri ile üretilen kompozit parçanın çekme özellikleri [23]

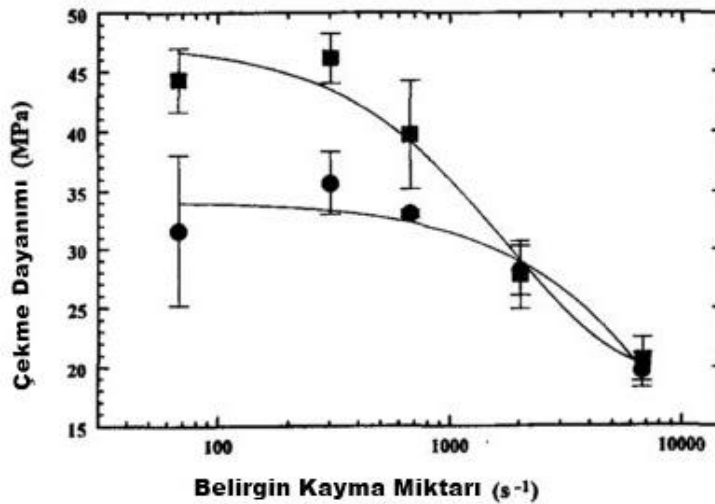
Su'ade vd., enjeksiyon kalıbı veya FDM için filament üretmede kullanılan ekstrüzyon makinesine ait yeni polimer matris kompozit geliştirmişlerdir. Burada ABS matrisine farklı oranlarda demir tozu ve bağlayıcı eklenerek mekanik özellikleri test edilmiştir. Temel olarak demir tozu oranındaki artış; sertlik, çekme ve eğilme mukavemetini arttırmaktadır. Hızlı polimer kompozit yığma işlemi ile ürün geliştirme zamanı, kalıp ve araç masrafı ile atık malzeme miktarı azaltılmaktadır [74].

Stratasys'den Bill Macy dolaylı üretimle kompozit parça üretimi konusunda FDM'in sağladığı kolaylık ve avantajlar konusunda çalışmıştır [75]. Şekil 5.2'de de görüldüğü gibi FDM, farklı tip kompozit uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılabilir. FDM kalıplama, işlevsel olmamakla birlikte ergonomik açıdan birçok avantajlara sahiptir. FDM kalıplama, geleneksel yöntemlerden daha hafif olduğu için, yük kaldırma ve destek performansı düşüktür. Buna karşın geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor, karmaşık ve pahalı parçaların hızlı ve ucuz bir şekilde yapılması mümkündür [75].



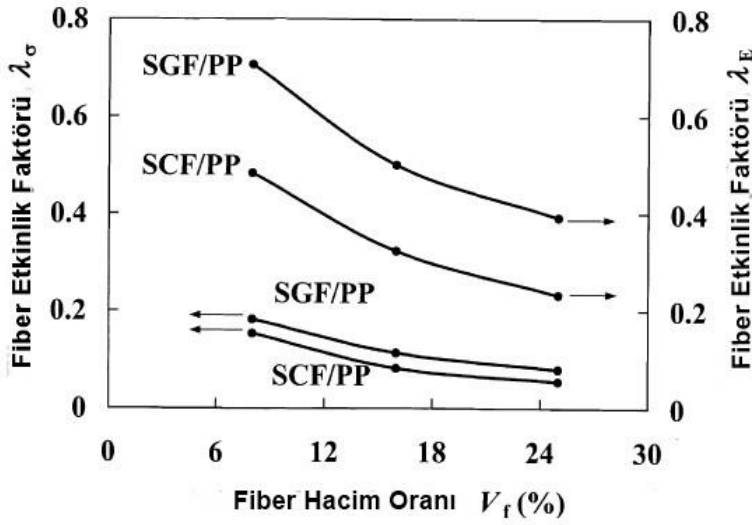
Şekil 5.2. FDM Kompozit uygulamaları [75]

Gray vd., FDM’de kullanılacak termotropik sıvı kristal polimer (TLCP) lifleri ile takviye edilmiş polipropilen (PP) demetleri üretmek için yeni çift ekstrüder işlemi üzerine çalışmışlardır. İşlem PP’nin erime sıcaklığı olan 165 °C’de yüksek erime sıcaklığına sahip (283 °C) TLCP liflerini karıştırmaya dayanmaktadır. Demetler sonra FDM işlemi ile tekrar ekstrüde edilir. Şekil 5.3’de takviye edici TLCP liflerinin yönelimi ve L/D oranının (ekstrüder vida uzunluğu/vida çapı) mekanik özelliklere etkisi görülebilir [75].



Şekil 5.3. %28 TLCP ve %72 PP karışımı çekme dayanımı, L/D = 12.5 (◻) ve L/D = 18 (●) [76]

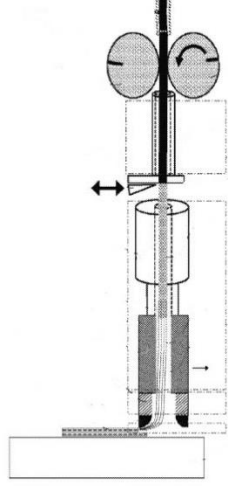
Fu vd., kısa cam elyaf (SGF) ve kısa karbon elyaf (SCF) takviyeli polipropilen (PP) kompozitin ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmesini ele almışlardır. Sonra bu malzemelerin çekme özellikleri incelenmiştir. Sonuçta Şekil 5.4’de de görüldüğü gibi bu iki kompozitin de elyaf etkinlik faktörü, elyaf hacim oranı artışına ters orantılı olarak azalmış ve daha kırılğan olan karbon elyaf, cam elyafa göre daha düşük elyaf etkinliği göstermiştir [77].



Şekil 5.4. SGF/PP ve SCF/PP Dayanımı ve modülü için elyaf etkinlik faktörü [77] (λ_E kompozit modülü için elyaf etkinlik faktörü, λ_σ kompozit dayanımı için elyaf etkinlik faktörü)

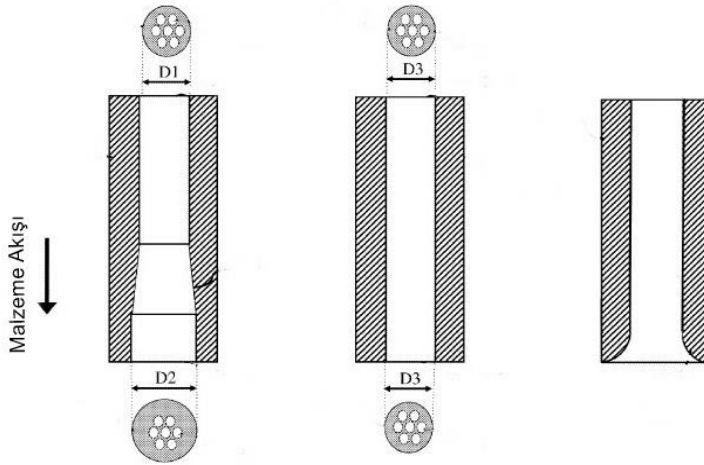
Karslı vd., karbon elyaf (CF) takviyeli poliamid 6 (PA6) ile kompozit malzemelerde elyaf miktar ve uzunluğunun; mekanik, termal, morfolojik özellikler üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Mekanik sonuçlar, artan CF oranının çekme dayanımı, çekme modülü ve sertliği arttırırken; kompozitin kırılma dayanımını azalttığı görülmüştür. Diferansiyel taramalı kalorimetre analiz (DSC) sonuçları, cam geçiş sıcaklığı (T_g) ve ergime sıcaklığının (T_m) karbon elyaf içeriği ve uzunluğuna bağlı önemli bir değişiklik göstermediği belirlenmiştir. Dinamik mekanik analiz (DMA) sonuçları ise depolama ve kayıp modülünün karbon elyaf oranına bağlı olarak arttığını göstermiştir [78].

Mark ise sürekli karbon elyaf takviyeli filament geliştirerek, yine kendi geliştirdiği MarkForced adlı FDM yöntemine dayanan Şekil 5.5’de görünen 3B yazıcıda kullanmıştır.



Şekil 5.5. Sürekli çekirdek güçlendirmeli filament kullanan 3B yazıcının şematik gösterimi [79]

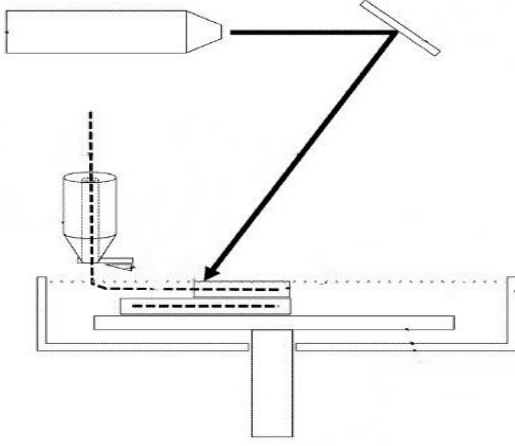
Mark, patentinde sürekli karbon elyaf takviye yığılmasında tıkanma veya elyaf kırılmalarına sebebiyet vermeyen yeni nozul çeşitleri geliştirmiştir (Şekil 5.6). Bu yeni nozulda ki ek düzeltici kısım yüzey düzgünlüğünü (kalitesini) artırırken gözenek oluşumunu bir miktar azaltmaktadır.



Şekil 5.6. Çeşitli nozul başlıkları [79]

Bu çalışmada çift nozullu bir sistem, önce seçili alan desenlerine eriyik dolgu malzemesi (dayanımı az kompozit, saf reçine naylon gibi) serer. Arkasından sürekli karbon elyaf takviyeli kompozit ile kabuk oluşturularak dayanımı yüksek kompozit parça üretebilir. Ayrıca patent çalışmasında stereolitografi ve/veya seçici lazer sinterleme teknikleriyle birlikte kullanılan karma bir sistemde de tanıtılmaktadır (Şekil 5.7). Burada sürekli akışkan

reçine veya toz şeklindeki malzemeler tabakalar şeklinde serilip gerekli katman özellikleri için radyasyon ışını ile katılaştırma yapılır [79].



Şekil 5.7. Takviyeli elyaf biriktirebilen karma stereolitografi 3B yazıcı [79]

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında farklı karbon elyaf takviye oranlarına sahip kompozit filamentler üretilerek FDM 3B baskı makinesinde kullanılmış ve kompozit numuneler oluşturulmuştur. Elde edilen çekme testi numunelerinin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca yazdırma açısının mekanik özelliklere etkisi incelenmiş ve yazdırma deseninin mekanik özellikleri önemli derecede etkilediği saptanmıştır. Yazdırma açısı, tablanın x eksenine göre yazdırma deseninin yönünü belirtir. Bu çalışmada [0, 90] ve [-45, 45] olmak üzere iki yazdırma açısı kullanılmıştır. Örneğin [-45, 45] açısı, Şekil 6.14.b'de gösterildiği gibi, farklı katmanlar için yazdırma yönlerinin sırayla -45° ve 45° olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca karbon elyaf takviyeli filamentin mikro yapısı incelenerek elyaf miktarının poroziteye, karbon elyaf uzunluğuna ve karbon elyaf yönlendirilmesine etkisi incelenmiştir.

6.1. Kompozit Filament İçin Optimum Oranının Belirlenmesi

FDM prensibi plastik tel malzemenin (filament) erime noktasının hemen üstünde bir sıcaklıkta, XY düzleminde hareketli ve çıkış çapı 150 – 400 µm arasında olan ısıtılmış bir nozuldan geçirilerek bir platform üzerine ekstrüzyonu ile parçanın katmanlar halinde üretilmesi prensibine dayanır. Bu yöntem diğer hızlı prototipleme yöntemlerine göre oldukça ucuzdur. Fakat kullanılan malzemelerin (ABS, PLA) mukavemetinin oldukça düşük olması ekonomik ve basit olan bu yöntemin fonksiyonel parça üretmesinin önündeki engeldir. ABS, PLA'ya göre daha yüksek mukavemet göstermektedir. Tez kapsamında kompozit filament üretimi için ABS matris içine karbon elyaf takviye malzemesi farklı oranlarda eklenerek homojen karışım oluşturulmuştur. Bu homojen karışım masaüstü filament ekstrüder ile 3D yazıcıda kullanılmak üzere filament haline getirilmiştir. Burada ki önemli husus kompozit içerisindeki karışım oranının optimizasyonudur. Kompozit karışım oranı belirlenirken aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

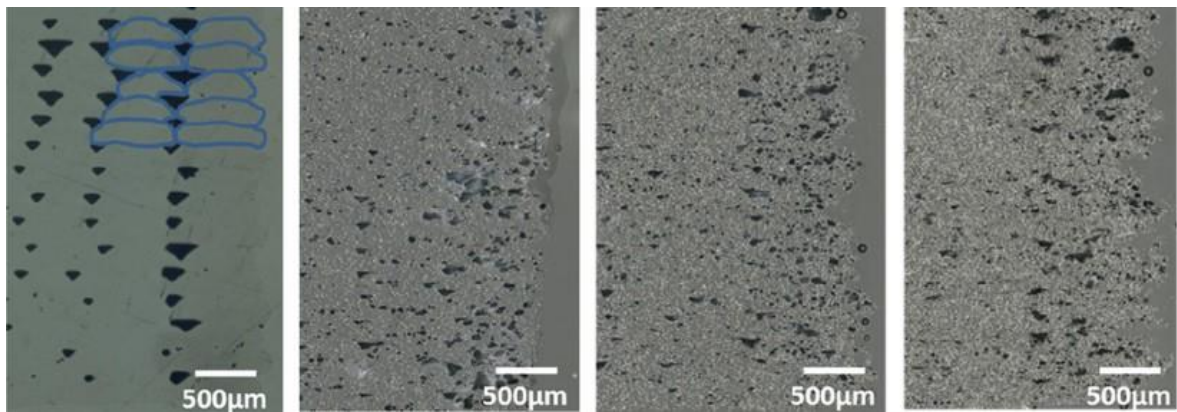
$$W_c = \frac{W_{cop} + W_{ABS}}{(1 - \%Ws)} \quad (6.1)$$

Burada;

W_c ; Kompozit malzemenin ağırlığı (g), W_{cop} ; Takviye eden malzemenin ağırlığı (g)

W_{ABS} ; ABS (matris) malzemenin ağırlığı (g), $\%Ws$; Bağlayıcı malzeme yüzdesi

Kompozit filament yapmada kullanılan kısa karbon elyaflar, 6 mm uzunluklarında 550-600 g/l hacimsel yoğunluğa sahip poliüretan bazlı olarak DowAksa'dan ücretsiz olarak temin edilmiştir. Birçok kompozit parça imalatında düşük maliyetli kısa elyaf takviyeli polimer (SFRPs) kullanılarak mekanik özellikleri geliştirilmiştir [80-82]. Kısa elyaf takviyeli polimerler genellikle ekstrüzyon birleştirme ve enjeksiyon kalıplama işlemleri ile üretilirler [83]. Kısa elyaf takviyeli polimerler mekanik özellikleri genellikle elyaf uzunluğu dağılımı ve elyaf yönlerine bağlıdır [77]. İşlem sırasında nihai kompozit parçanın mekanik özellikleri etkileyen kopmalar meydana gelebilir. Elyaf miktarı arttıkça elyaf-elyaf etkileşimi artacağından dolayı kırılmalar oluşur. İşlem sırasında elyaf kırılmaları elyafın polimer ve işleme ekipman yüzeyleri etkileşimi ile de artabilir [77]. Bu nedenle matris malzemesi, işlem koşulları ve elyaf miktarı kompozitin nihai elyaf uzunluğu dağılımını belirler. Benzer şekilde kısa elyaf takviyeli polimerin yönlendirilmiş elyaf dağılımı ve boşluk oranında yukarıda belirtilen faktörlerden etkilenir. Mevcut çalışmalar %30 kısa karbon elyaf takviyesi üzerindeki karbon elyaflar takviyesinin 1,75 mm filament çapı için kullanılan nozulların tıkanmasına sebebiyet verdiğini göstermektedir. Bu aşamada Tekinalp ve arkadaşları %30 kısa karbon elyaf içeren numunelerinin çekme dayanımı ve modülünün büyük derecede artarak (52,9 kN m/kg) özgül mukavemeti 45,9 kN m/kg olan alüminyum 6061-0'ı geçmiştir. Çalışmada ayrıca karbon elyafın çekme dayanımına katkısı yanı sıra saf ABS kullanımında yığılma sırasında meydana gelen boşlukları azaltarak ekstra katkı sağladığını göstermektedir (Şekil 6.1.) [23].



Şekil 6.1. Çekme testi numunelerinin kesit görüntüleri a) Saf ABS, b) %10 karbon elyaf, c) %20 karbon elyaf, d) %30 karbon elyaf [23]

Kompozit karışım içeriğine hacimce %10-%15 oranında bağlayıcı malzeme (LLDPE vb.) eklenmesi ile kompozit karışımın akışkanlığı, sünekliği ve tokluğu arttırılabilir. Fakat bağlayıcı eklentisi, ABS ve bağlayıcı arasında geniş faz ayrımı oluşması sebebi ile filamentin dayanımını olumsuz etkilediği için kullanılmamıştır.

6.2. Malzeme ve Ekipmanlar

Deneylerde kullanılmak üzere temin edilen ekipman, malzemeler ve bunlara ait özellikler aşağıda belirtilmiştir.

Kompozit malzemelerde elyaf; rijitlik, dayanım gibi yapısal özellikleri sağlarken matris malzeme ise elyaflar ile yapısal bütünlük oluşturarak uygulanan yükün elyaflara dağılmasını ve elyafın atmosfer şartları ve kimyasal etkilerden korunmasını sağlar. Matris malzemesi olarak özellikleri Çizelge 6.1’de verilen ticari ABS kullanılmıştır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Granül haldeki ABS matris polimeri

ABS, FDM 3B yazıcılarda kullanılmakta olan başlıca mühendislik plastiklerinden biridir. ABS genel olarak diğer termoplastiklere (PLA, PET vb.) nazaran daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir.

Çizelge 6.1. ABS matris özellikleri

Özgül ağırlık – g/cm ³	1,05
Kalıp büzülmesi - %	0.4 ~ 0.7
Çekme Dayanımı (akmada) - Mpa	43

Çizelge 6.1. (devam) ABS matris özellikleri

Uzama - %	6 ~ 9
Eğilme Dayanımı - Mpa	70
Rockwell sertlik (R ölçeği)	109

Takviye malzemesi olarak ise özellikleri Çizelge 6.2’de özellikleri verilen 6 mm uzunluğundaki poliüretan bazlı kısa karbon elyaf kullanılmıştır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. 6 mm uzunluğundaki poliüretan bazlı karbon elyaf

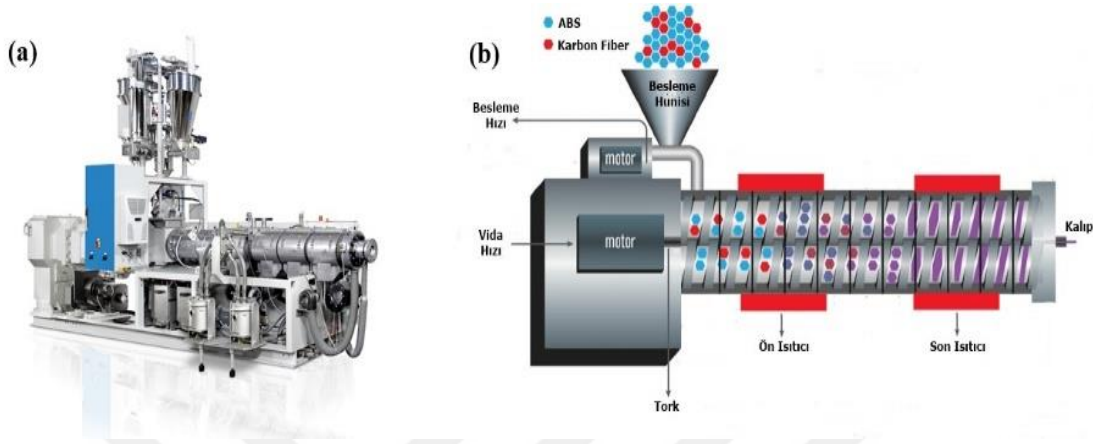
Karbon elyaflar oldukça dayanıklı olmalarına rağmen sert yapıdadırlar ve çok küçük uzama değerlerine sahiptirler.

Çizelge 6.2. Karbon elyaf takviye edici malzeme özellikleri

Çekme dayanımı – GPa	4,2
Young Modülü - GPa	240
Uzama - %	1,8
Yoğunluk – Kj/m ²	1,76
Bulk modülü – g/l	600

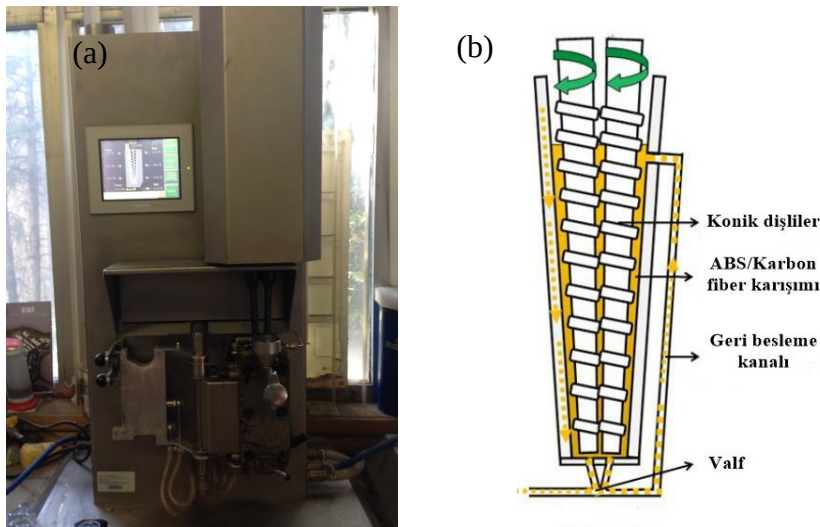
Çalışmada kompozit filament üretiminin ilk adımı olarak ABS granüller takviye edici malzeme ile ABS’nin yarı eriyik hale geçtiği sıcaklığa (200 °C - 230 °C) ısıtılarak

karıştırılmıştır. Homojen karışımı sağlamak için ilk olarak sanayi boyutlarındaki çift vidalı ekstrüder (Krauss Maffei) kullanılmıştır (Şekil 6.4). Çift vidalı ekstrüderin ön ısıtma sıcaklığı 180 °C ve çıkış sıcaklığı 215 °C olarak ayarlanmıştır.



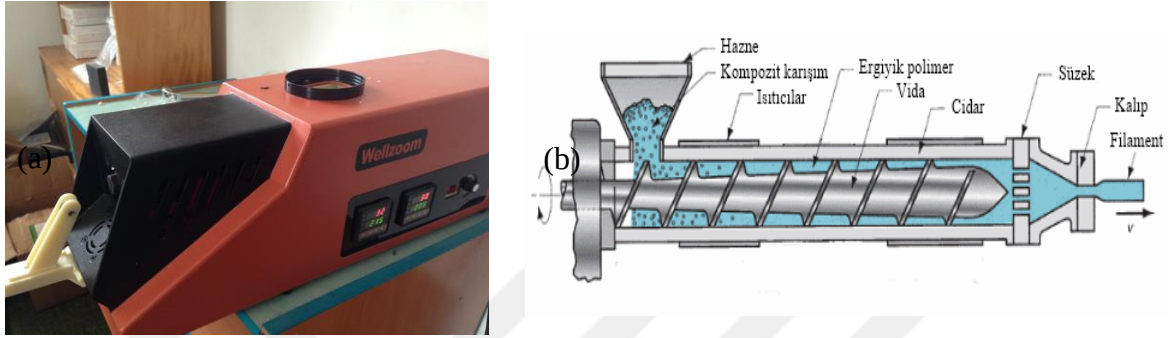
Şekil 6.4. Çift vidalı ekstrüdere ait a) görsel ve b) şematik gösterim [84]

Kullanılan bu sanayi tipi çift vidalı ekstrüderin büyük hacmi ve karıştırma süresinin kontrol edilememesinden dolayı istenilen homojen karışımı elde edilememiştir. Bu durumda homojen karışımı elde etmek için çift vidalı mikro ekstrüderin (DSM Xplore 15 ml micro compounder) kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 6.5). Çift vidalı karıştırıcı, ABS matris malzemesini yarı eriyik hale getirip, karbon fiber takviye malzemesinin içerisine homojen karıştırarak ekstrüzyonunu sağlamaktadır.



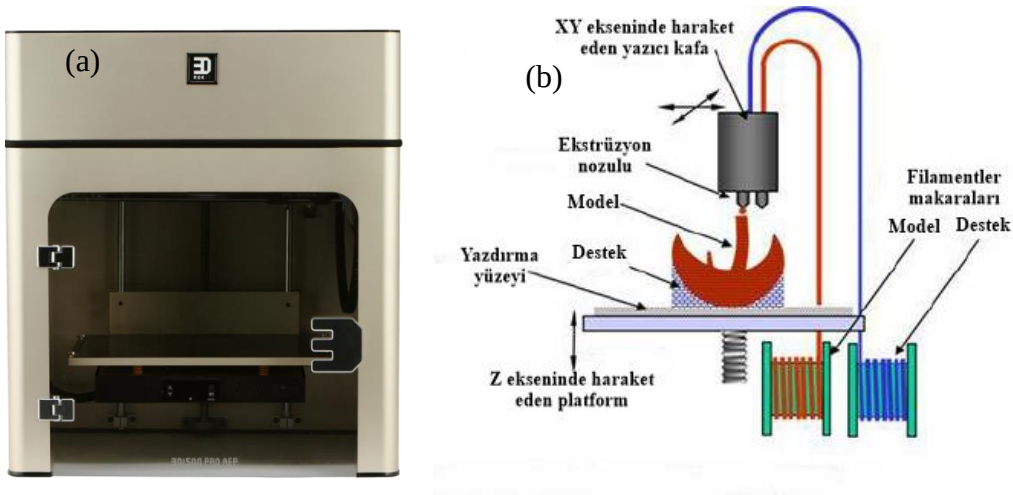
Şekil 6.5. Çift vidalı mikro karıştırıcıya ait a) görsel ve b) şematik gösterim [85]

Elde edilen homojen karışımın filament haline getirilmesi için Şekil 6.6’da gösterilen Wellzoom C tipi masaüstü ekstrüder yurtdışından temin edilmiştir. Wellzoom C tipi tek vidalı ekstrüder 1800 mm/dk – 2500 mm/dk arasında ayarlanabilen ekstürüzyon hızıyla naylon, ABS, PLA gibi malzemeleri 1.75 mm ve 3 mm filament çapları için ekstrüde edebilir. Wellzoom C modeli sıcaklığı ayarlanabilir ön ısıtmaya sahiptir. Ön ısıtmada malzeme nozul uçuna gelmeden önceki bir bölümde ısıtılarak yarı eriyik haline gelir. Bu durum kompozit malzemeler için homojen karışımı kolaylaştırır.



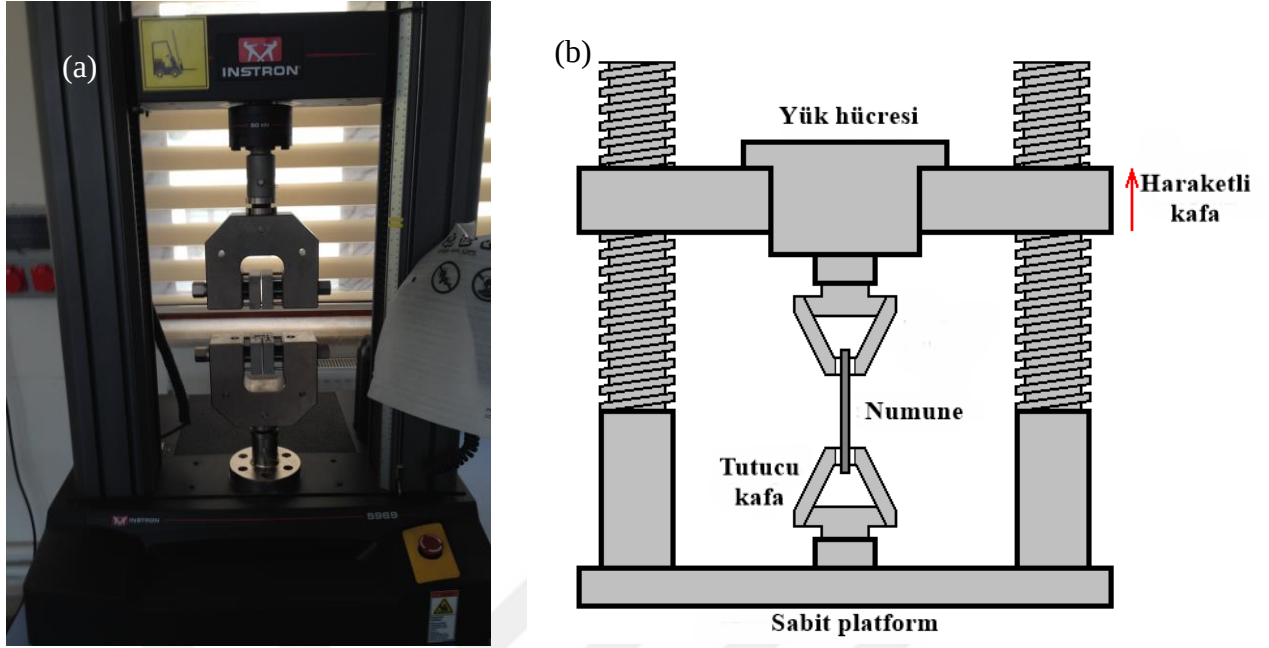
Şekil 6.6. Tek vidalı filament ekstrüdere ait a) görsel ve b) şematik gösterim [86]

3D yazıcı olarak FDM teknolojisi ile çalışan Kore menşeli Rookit firmasına ait 3Dison Pro modeli (Şekil 6.7) kullanılmıştır. 270mm x 200mm x 245mm inşa alanına sahip olan yazıcı 25µm’ye kadar (tavsiye edilen 100 µm -300 µm) katman kalınlığında 50’ye varan farklı malzemeyi yazabilmektedir.



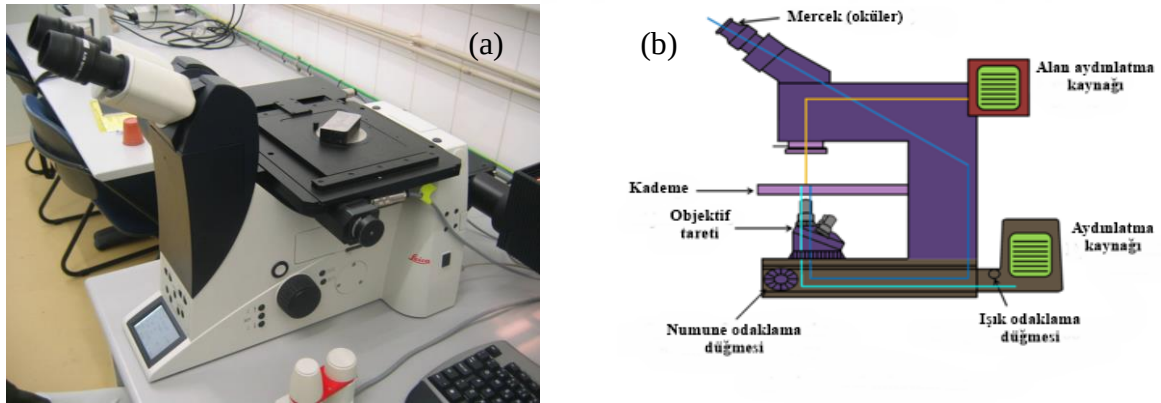
Şekil 6.7. FDM 3B yazıcı ait a) görsel ve b) şematik gösterim [87, 88]

Kompozit filamentlerin 3D yazıcıda yazdırılmasıyla elde edilen çekme testi numuneleri çekme testi cihazı (Instron 5969) ile 2 mm/dk hızında çekilerek mekanik özellikleri saptanmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Çekme test cihazına ait a) görsel ve b) şematik gösterim [89]

Bakalit içerisine alınarak yüzey parlatma işleminden sonra üretilen kompozit numuneler ters optik mikroskop (Leica DMI5000M) yardımıyla incelenmiştir (Şekil 6.9).



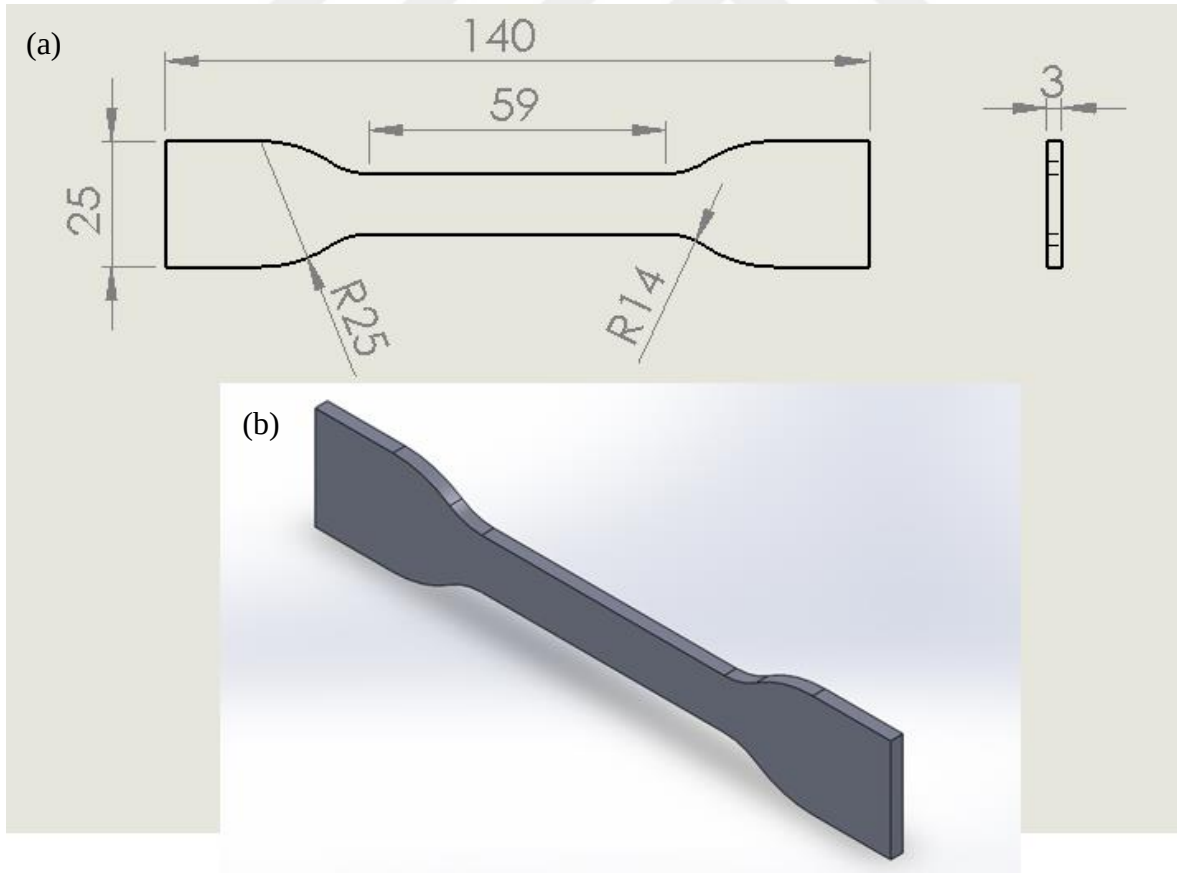
Şekil 6.9. Ters optik mikroskoba ait a) görsel ve b) şematik gösterim [90]

Numunelerin eriyik akış indeksleri (MFI) ise eriyik akış test cihazı (Coesfield Material Test Meltfliker LT) (Şekil 6.10) kullanılarak analiz edilmiş ve numune karakterizasyonları belirlenmiştir.



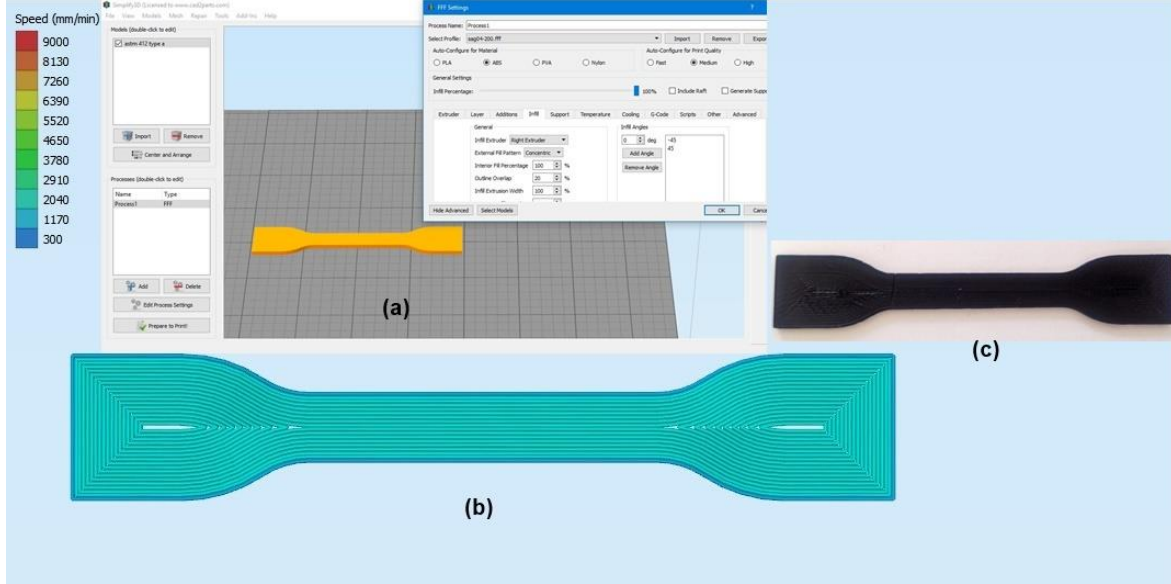
Şekil 6.10. MFI test cihazına ait a) görsel ve b) şematik gösterim [91]

Üretilen kompozit filamentler 3B yazıcıda sarf malzemesi olarak kullanılarak ASTM 412 A standartlarındaki çekme testi numuneleri üretilmiştir. Bu standart modeller SolidWorks programı aracılığı ile modellenmiştir (Şekil 6.11). Katı model CAD ortamında oluşturulduktan sonra .stl dosya formatında kaydedilmiştir.



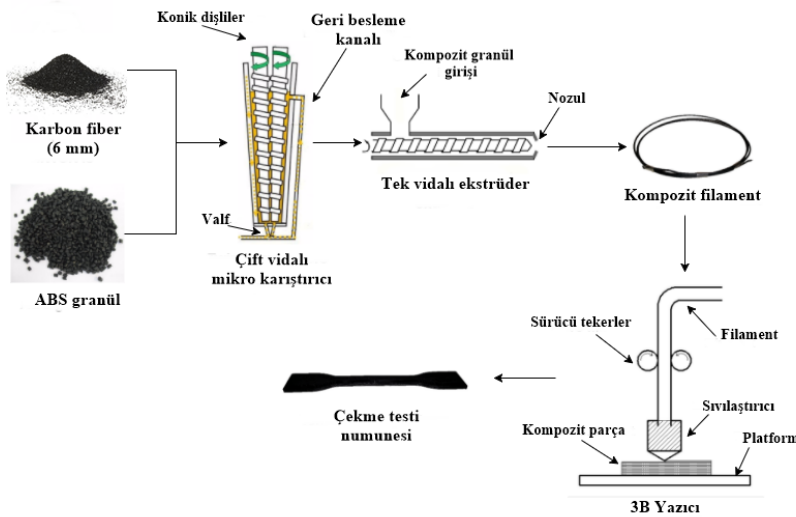
Şekil 6.11. ASTM 412 A standartlarında bulunan numuneye ait teknik resim ve CAD görseli

Stl dosya formatında kaydedilen modeller Simplify3D dilimleme programı kullanılarak dilimlenmiştir (Şekil 6.12). Dilimleme işlemi parçanın katmanlarına ayrılmasıdır. Program her bir katman için yazdırma koordinatlarını belirler. Ayrıca program ile parçanın yazdırma oryantasyonu, dolgu deseni vb. gibi 3B yazıcı işlem parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 6.12. Çekme testi numunesinin a) .stl dosya formatındaki katı modeli, b) program arayüzünde ki yazdırma ön izlemesi, c) 3B yazıcıda basılmış hali

Özet olarak; ABS granül (performance ABS, Oo-Kuma) matris malzeme, kısa karbon elyaf (6 mm epoksi bazlı 1101, DowAksa) takviye malzeme olarak kullanılmıştır. Farklı oranlarda ki homojen kompozit karışımını elde etmek için, laboratuvar tipi eş zamanlı dönen çift vidalı mikro karıştırıcı (DSM Xplore) kullanılmıştır. Çift vidalı karıştırıcı, ABS matris malzemesini yarı eriyik hale getirip, karbon elyaf takviye malzemesini matris içinde homojen karıştırarak ekstrüzyon sağlar. Ayrıca elde edilen homojen kompozit karışımı FDM 3B yazıcıda kullanılmak üzere uygun boyuttaki filament (1.75 mm çap) haline getirmek için tek vidalı masaüstü filament ekstrüder (Wellzoom C) kullanılmıştır. Üretilen kompozit filamentler, polimer esaslı birçok farklı malzeme ile üretim yapabilen bir FDM 3B yazıcıda (3Dison Pro) kullanılarak ASTM 412 A standartlarındaki çekme testi numuneleri üretilmiştir. Üretilen kompozit filamentler bakalit içerisine alınmış ve yüzeyleri parlatılmıştır. Optik mikroskop (Leica DMI5000M) ile filament ve kopma yüzeyleri incelenmiştir. Numunelerin eriyik akış indeksleri (MFI) ise eriyik akış test cihazı (Coesfield Material Test Meltflixer LT) kullanılarak analiz edilmiş ve numune karakterizasyonları belirlenmiştir. Kompozit filament üretiminde kullanılan metot Şekil 6.13’de gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Kompozit filament üretiminde kullanılan metot

6.3. Kompozit Filamentin Hazırlanışı

Granül halinde bulunan ABS, ile kısa karbon elyaf Çizelge 6.3’de gösterilen oranlarda Çizelge 6.4’deki işlem parametrelerine optimize edilen çift vidalı mikro karıştırıcıda karıştırılmıştır. Malzemeler mikro karıştırıcı ile homojen karıştırılarak, granül halden filament haline geldiğinde (istenilen filament çapına sahip olmadıkları için) masaüstü tek vidalı ekstrüder kullanılarak tekrar işleminden geçirilmiş ve 1.75 mm çaplı filamanet haline getirilmiştir (Resim 6.1). Filament ekstrüzyonunda ekstrüderin ön ısıtıcı ve çıkış sıcaklıkları ile ekstrüzyon hızı, filament kalitesi ve çapını önemli oranda etkilemektedir. Özellikle sıcaklık filamentin yüzey kalitesini ve filament içerisindeki gözenek oranını etkilemektedir.

Çizelge 6.3. Üretilen filament numunelerinin malzeme içerikleri

Numune no	Karbon elyaf (g)	ABS (g)	Karbon elyaf oranı
1	0,75	14,25	%5
2	1,5	13,5	%10
3	2,25	12,75	%15
4	3	12	%20
5	4,5	10,5	%30

Mikro karıştırıcı ile çift vidalı ekstrüdere göre daha homojen karışımı sağlanmıştır. Ancak mikro karıştırıcı küçük karıştırma haznesine (15 cc) sahip olduğundan daha homojen karışmasına rağmen daha küçük miktarlardaki malzemeyi karıştırabilir.

Çizelge 6.4. Çift vidalı mikro karıştırıcı işlem parametreleri

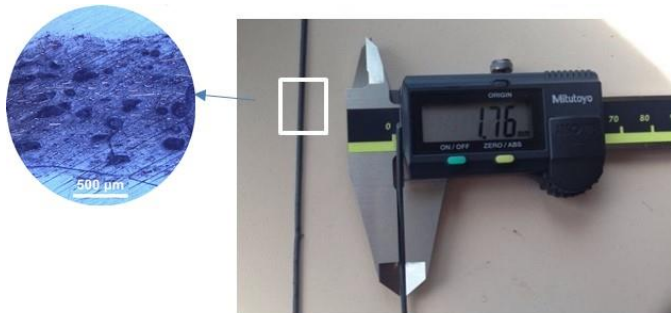
Ekstrüzyon çapı – mm	0,25
Karıştırma haznesi hacmi - cc	15
İşlem sıcaklığı - °C	220
Karıştırma hızı - rpm	100
Karıştırma süresi - dk	5

İstenilen çap değerinin (1,75 mm) elde etmesi için masaüstü ekstrüder Çizelge 6.5’deki işlem parametrelerine optimize edilmiştir.

Çizelge 6.5. Tek vidalı mikro karıştırıcı işlem parametreleri

Ön ısıtıcı – °C	215
Ekstrüzyon sıcaklığı – °C	235
Ekstrüzyon hızı – mm/dk	2000 - 2200

Resim 6.1’de 3B yazıcı filament standartlarında üretilen kısa karbon elyaf takviyeli kompozit filament ve filamente ait mikroyapı görülmektedir.



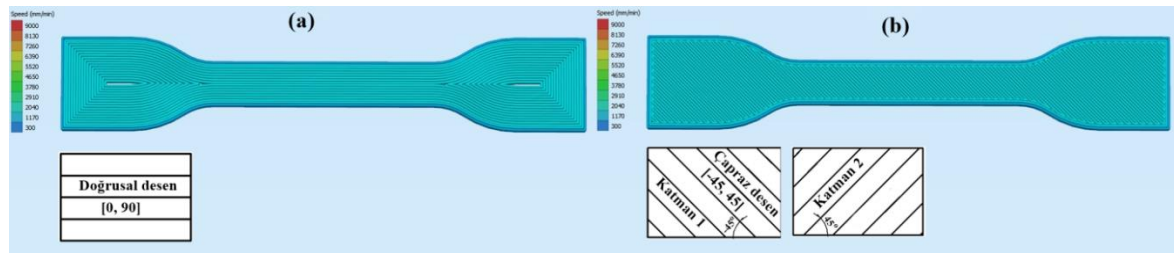
Resim 6.1. Üretilen kompozit filament ve optik mikroskop görüntüsü

Elde edilen kompozit filament FDM 3B yazıcıda (3Dison Pro) kullanılarak ASTM D412 A standartlarına ki (%70 ölçeklendirilmiş) çekme testi numunelerden her bir oran için 4 adet yazdırılmıştır. Yazdırma parametreleri Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. FDM 3B yazıcı işlem parametreleri

Nozul çapı – mm	0,60
Katman kalınlığı - mm	0,30
Nozul sıcaklığı - °C	245
Platform sıcaklığı - °C	245

Daha küçük nozul çapları, artan karbon elyaf takviye oranı ile nozul tıkanmalarına sebep olmaktadır. Nozul sıcaklığı parçanın mekanik özelliklerini etkilemektedir. Düşük nozul sıcaklıklarında desenler arasında zayıf bağlar oluşurken iken yüksek nozul sıcaklıklarında daha gözenekli yapılar gözlenmektedir. Yazdırma yönü, çekme kuvvetinin uygulanacağı yöne paralel $[0, 90]$ veya 45° açılı $[-45, 45]$ olarak belirlenmiştir. Şekil 6.14'de ASTM D412 A standartlarında ki çekme testi numunesinin .stl dosya formatındaki modeli görülmektedir.



Şekil 6.14. Çekme testi numunesinin yazdırma önizlemesi a) doğrusal $[0, 90]$, b) çapraz $[-45, 45]$

Kompozit filamentlerin 3B yazıcıda yazdırılmasıyla elde edilen çekme testi numuneleri çekme testi cihazı (Instron 3363) ile 2 mm/dk hızında çekilerek mekanik özellikleri saptanmıştır. Bakalit içerisine alınıp parlatılan filament ve numune kesitleri optik mikroskop yardımıyla incelenerek kompozit karışımdaki elyaf yönlendirmesi, elyaf boyutu ve porozite oluşumu incelenmiştir.

Eriyik akış indeksi (MFI), belirli bir sıcaklık ve kütle altında belirli çap değerine sahip kalıptan 10 dk içinde geçen polimer kütlesidir. Eriyik akış hızı düşük moleküler ağırlığa karşılık gelen yüksek erime hızı ile moleküler ağırlığın dolaylı bir ölçüsüdür. Aynı zamanda eriyik akış hızı malzemenin basınç altında akma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Numunelere ait MFI değerleri belirlenirken Çizelge 6.7’de bahsedilen işlem parametreleri kullanılmıştır. Farklı takviye oranlarının her biri için 12 farklı numune alınmıştır.

Çizelge 6.7. MFI test cihazı işlem parametreleri

Ön ısıtıcı sıcaklığı - °C	235
Nozul Sıcaklığı - °C	235
Yük - kg	5
Süre - sn	12

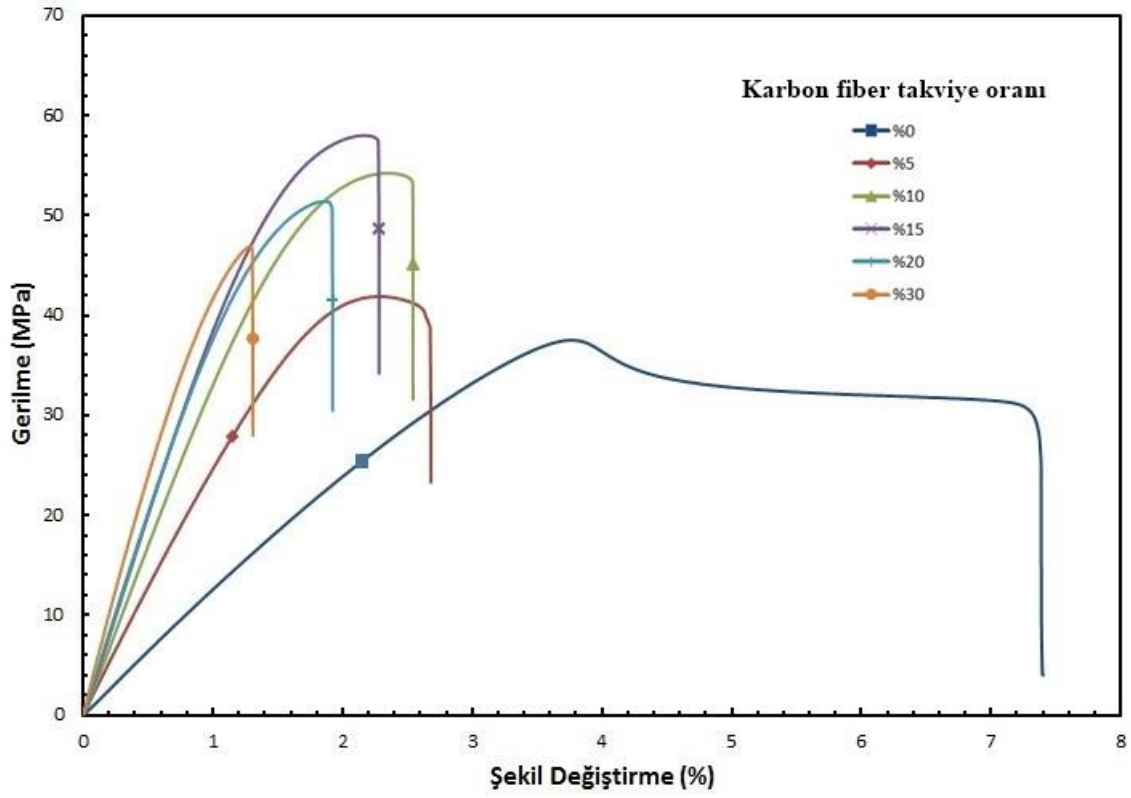


7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

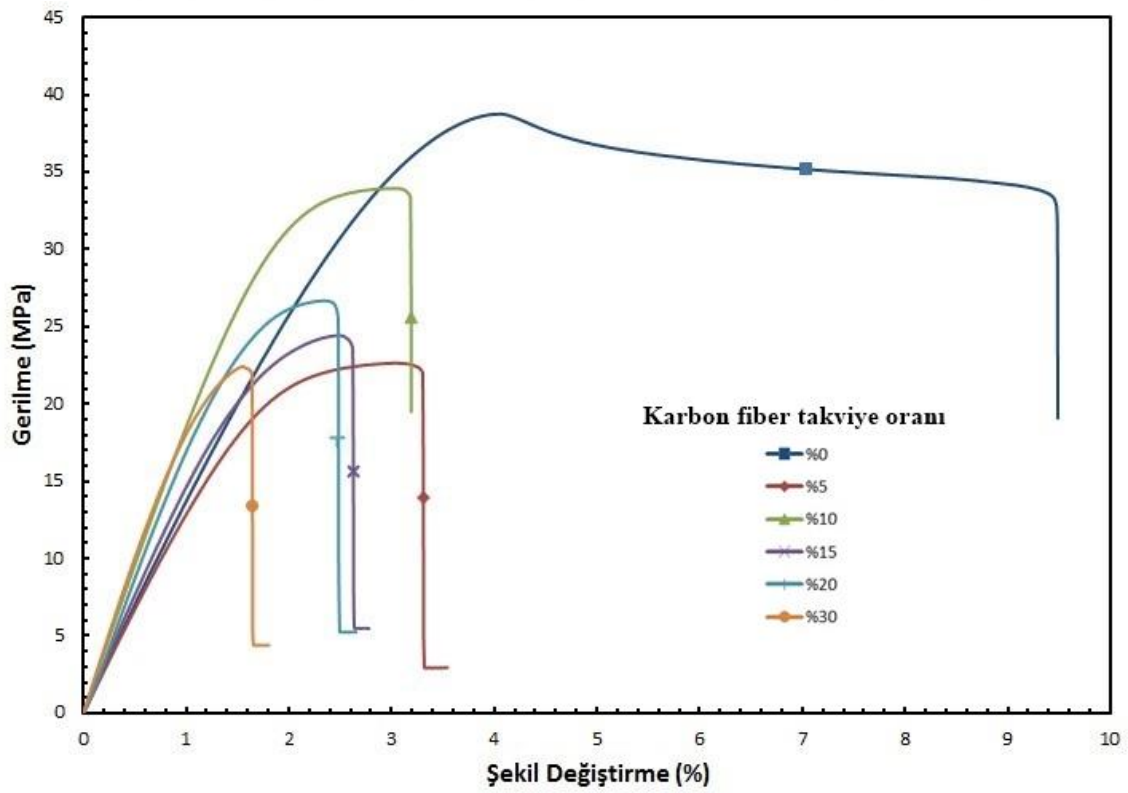
Kompozit filament üretiminde ekstrüzyon sıcaklığı ve hızının filament kalitesinde önemli rol oynadığını görülmüştür. ABS, 250 °C’de bozulmaya başlamaktadır. 200 °C altı sıcaklıklarda ise yarı eriyik özellikte olmadığı için ekstrüzyon zorlaşmaktadır. Bu durum pürüzlü yüzey oluşmasına yol açmaktadır. Ayrıca ekstrüder ön ısıtıcısı nozul çıkış sıcaklığından 5-10 °C daha düşük olmalıdır. Diğer taraftan ekstrüzyon ve filament çekme hızları, filament çaplarını etkilediği ve bu hızların eşit değerde olmaları gerektiği gözlemlenmiştir. Aksi takdirde filament çapında dalgalanmalar görülmektedir. Filament çekme hızı, ekstrüzyon hızına göre ayarlanabilen bir sarıcı makara yardımıyla belirlenmelidir. Karbon elyaf katkısı, malzemenin çekme dayanımı, elastikiyet modülü, tokluk ve süneklik gibi mekanik özelliklerini etkilemektedir. Karbon elyaf miktarının artması çekme dayanımını genel olarak arttırmaktadır [23, 66, 77-83, 92-94]. Fakat daha çok karbon elyaf eklenmesi her zaman daha iyi sonuçlar verecek anlamına gelmemektedir. Farklı karbon elyaf özelliklerine göre belirli miktarın üzerindeki karışımlarda çekme dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. Çünkü artan elyaf oranıyla elyaf-ABS arası katmanlar tam birleşmediği için daha sık boşluk oluşmaktadır. Gözenekli yapı dayanımı da azaltmaktadır.

7.1. Karbon Elyaf Takviyesinin Mekanik Özelliklere Etkisi

6 mm uzunluğunda poliüretan bazlı karbon elyaflar, ticari ABS içerisine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında takviye edilmiştir. Kompozit filamentler ile ASTM D412 A standartlarında çekme testi numuneleri 3B yazıcıda üretilmiştir. Deneylerde her numuneden 4 adet üretilip çekme testleri yapılarak mekanik özellikleri saptanmıştır. Farklı karbon oranları malzeme mekanik özelliklerini (çekme dayanımı, elastisite modülü, tokluk, akma dayanımı ve süneklik) önemli ölçüde etkilemektedir. Kısa karbon elyaf katkılı kompozit numune üzerinde yapılmış olan deney sonuçlarının gerilim gerinim diyagramı Şekil 7.1’de ve Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Mekanik özelliklere ilişkin ayrıntılı grafiklerde ise her bir oran için üretilen 4 ayrı numunenin maksimum, minimum ve ortalama değerleri gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Doğrusal desende [0, 90] yazdırılmış farklı karbon elyaf takviye oranlarına sahip numunelerin gerilme/şekil değiştirme eğrileri

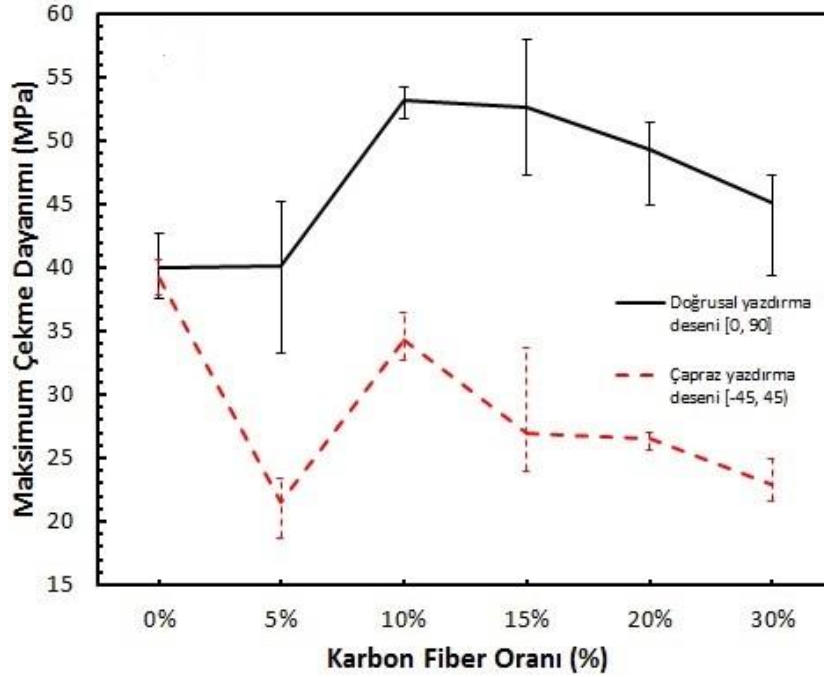


Şekil 7.2. Çapraz desende [-45, 45] yazdırılmış farklı karbon elyaf takviye oranlarına sahip numunelerin gerilme/şekil değiştirme eğrileri

7.2.1. Çekme dayanımına etkisi

Maksimum çekme dayanımı; malzemenin kopmadan önce dayanabildiği maksimum gerilme değeridir. Şekil 7.3’de görüldüğü üzere, doğrusal yazdırma [0, 90] deseninde %5 karbon takviyesine sahip numunede çekme dayanımını arttıracak kritik takviye değerine ulaşamamıştır. Bu duruma karbon elyaf takviyesi ile matris içerisinde oluşan gözenekli yapının (Resim 7.3.) parçanın dayanımını düşürmesi ve karbon elyaf miktarının bu düşen dayanımı arttıracak kritik takviye değerinin altında olması neden olmuştur. %10 karbon elyaf takviye oranında çekme dayanımında yaklaşık %33’lük bir artış meydana gelirken bu takviye oranının üzerindeki değerlerde dayanım yavaşça azalmaya başlamıştır. Bu duruma artan elyaf oranının elyaf - elyaf etkileşimini yani elyaf kırılmasını arttırması gösterilebilir. Elyaf boyu malzeme mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biridir [81]. Ayrıca artan elyaf oranı matris-takviye malzeme fazı arasında oluşan gözenekleri arttırarak çekme dayanımının bir miktar daha azalmasına neden olmaktadır. En yüksek dayanım ortalama 53,20 MPa ile %10 kısa karbon elyaf içeren numunede gözlemlenirken; en düşük dayanım 40,02 MPa ile ticari ABS’de gözlemlenmiştir.

Çapraz yazdırmada [-45, 45] çekme dayanımı, ticari ABS için neredeyse doğrusal yazdırma [0, 90] değeri ile aynıyken artan karbon elyaf eklentisi ile azalmaya başlamıştır (Şekil 7.3). Ticari ABS katmanlar arası ve katmanlar içinde birbirlerine daha sıkı tutunurken artan karbon elyaf takviyesi ile bu bağlar zayıflamaktadır. Bununla beraber matris içerisinde karbon elyafların yönlendirilmesi ise mekanik özellikleri önemli derecede etkilemektedir. Karbon elyafların çekme yönüne paralel (doğrusal [0, 90]) yönlendirilmesi ile 45° açı ile (çapraz [-45, 45]) yönlendirilmesi kıyaslandığında; doğrusal yönlendirilmiş numunelerin çekme dayanımlarının ortalama %81.75 daha fazla olduğu görülmektedir. Çapraz yazdırmada en yüksek dayanım ortalama 39,16 MPa ile ticari ABS’de görülürken en düşük dayanım 21,57 MPa ile %5 karbon elyaf içeren numunede görülmüştür.



Şekil 7.3. Farklı karbon elyaf oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin çekme dayanımları

7.2.2. Sünekliğe etkisi

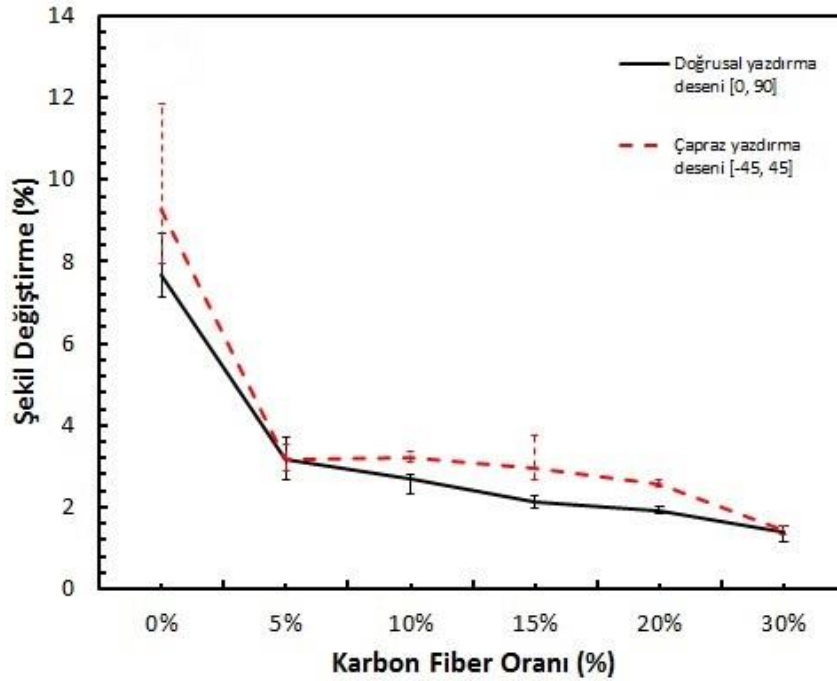
Süneklik; malzemenin kopmadan önce ne kadar deforme olabileceğinin bir ölçüsüdür. Çekme testindeki düşük süneklik kırılmaya karşı düşük direncin göstergesidir. Gevrek malzemeler uzama oranında kayda değer bir belirti olmaksızın kırılmanın ortaya çıkması ile karakterize edilirler. Bu yüzden gevrek malzemelerin kopma mukavemetleri ile akma mukavemetleri arasındaki fark oldukça küçüktür. Aynı zamanda kopma anındaki şekil değiştirme sünek malzemelere göre oldukça düşüktür. Şekil 7.1 ve 7.2’de görüldüğü gibi, ticari ABS sünek özellik gösterirken, karbon elyaf takviyesi ile numuneler belirli bir akma dayanımı göstermeden koparak gevrek özellik göstermişlerdir. Doğrusal desene sahip numuneler ise çapraz desene sahip numunelere göre daha gevrek özellik göstermişlerdir.

Numunelerin şekil değiştirme grafiği (Şekil 7.5.) incelendiğinde doğrusal yazdırmada [0, 90] en fazla yüzde uzama ortalama %7,66 ile ticari ABS’de görülmektedir. Karbon elyaf takviye oranı arttıkça malzemenin birim şekil değiştirmesi önemli derecede azalmaktadır. %30 karbon elyaf katkılı numune için yüzde uzama ortalama %1,37 (ticari ABS’ye göre %460 oranında bir düşüş) olarak ölçülmüştür. Sünek ABS matris içerisine karbon elyaf takviyesi kompozit malzemenin gevrek özellik göstermesine neden olmuştur. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerde genel olarak boyun verme görülmemektedir (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. ABS a) ve %20 karbon elyaf takviyeli, b) numunelere ait kopma yüzeyleri ve boyun oluşumu

Diğer taraftan, çapraz yazdırma deseninde $[-45, 45]$ ise en fazla yüzde uzama ortalama %7,66 ile boş ABS’de görülürken en düşük yüzde uzama ortalama %1,44 ile %30 karbon elyaf katkılı numunede görülmektedir (Şekil 7.5). Çapraz yazdırma deseni ile doğrusal yazdırma deseni kıyaslandığında, birim şekil değiştirmenin çapraz yazdırma deseninde ortalama %20 daha fazla olduğu görülmektedir. Böylece doğrusal yazdırma deseninde çekme dayanımı daha yüksek olan kompozit malzemeler elde edilirken çapraz yazdırma deseninde ise daha sünek kompozit malzemeler elde edilmiştir (Şekil 7.3, Şekil 7.5)

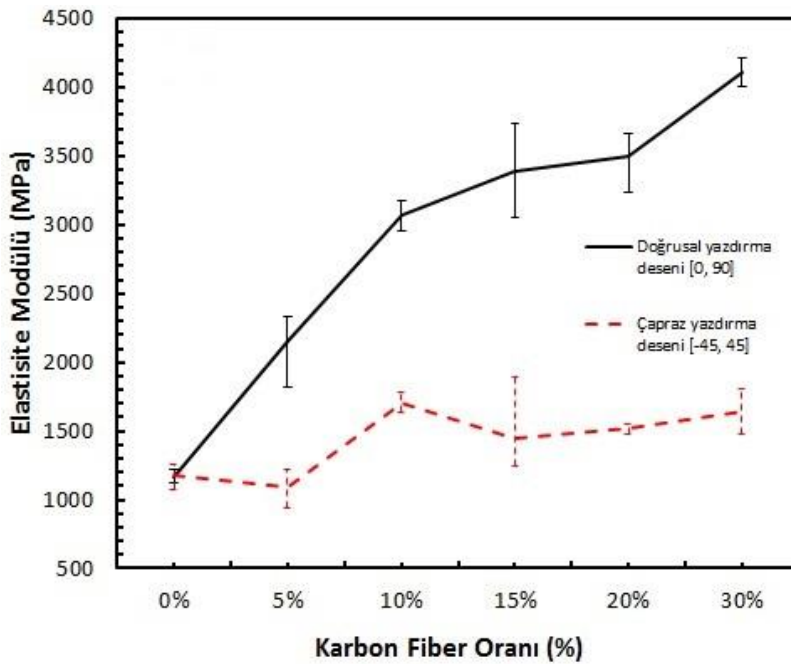


Şekil 7.5. Farklı karbon elyaf oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin şekil değiştirme grafiği

7.2.3. Elastisite modülüne etkisi

Elastisite (Young) modülü, kuvvet altındaki malzemenin elastik şekil değiştirmesinin bir ölçüsüdür. Yani bu sabit, malzemenin rijitliğini gösterir ve elastik esnemeye karşı gösterdiği direnç olarak da ifade edilebilir. Malzemenin, yüksek elastisite modülüne sahip olması elastik sınırlar içerisinde esnemesinin zor olduğunu gösterirken, düşük elastisite modülüne sahip olması ise nispeten daha kolay esneyebileceğini göstermektedir (Şekil 7.1 ve Şekil 7.2).

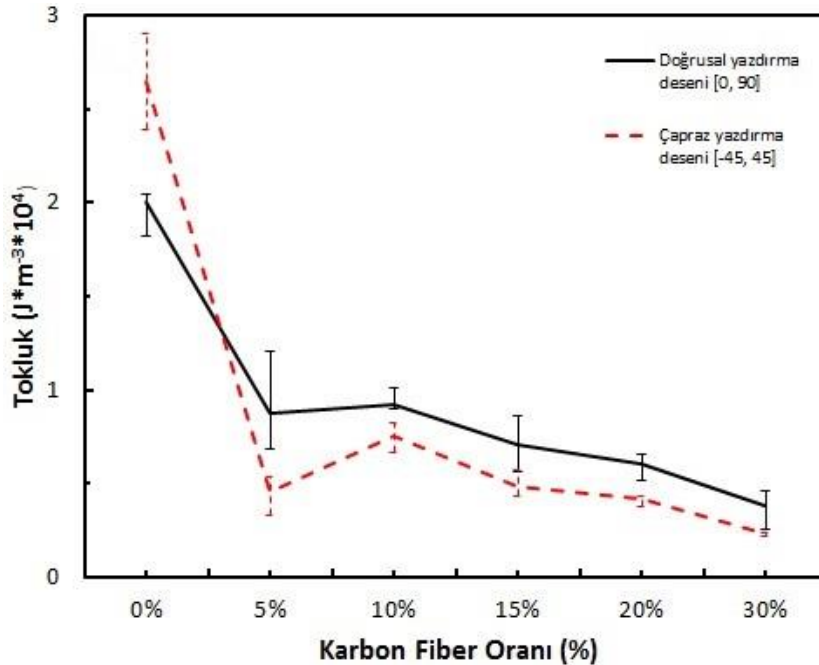
Şekil 7.6’de görüldüğü üzere, her iki yazdırma deseni için elastisite modülü karbon elyaf miktarı arttıkça önemli derecede artmaktadır. Doğrusal yazdırmada $[0, 90]$ elastisite modülü ticari ABS için ortalama 1161,98 MPa iken, %5 karbon elyaf takviyesinde %85 oranında artarak 2149,98 MPa olarak görülmektedir. %30 karbon elyaf takviye oranında ise elastisite modülü ticari ABS’ye göre %254 artarak 4113,22 MPa olmuştur. Elastisite modülündeki bu büyük artış karbon elyaf takviyesi ile malzemenin katılığının önemli derecede arttığını göstermektedir. Çapraz yazdırmada $[-45, 45]$ ise elastisite modülü ticari ABS’ye göre kayda değer bir artış göstermemiştir. Ticari ABS için elastisite modülü ortalama 1183,92 MPa iken %30 karbon elyaf içeren numunede elastisite modülü %35,5 artışla ortalama 1640,47 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.6. Farklı karbon elyaf oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin elastisite modülleri

7.2.4. Tokluğa etkisi

Tokluk, bir malzemenin enerjiyi emme kabiliyeti ve kırılma olmaksızın plastik deforme olabilme kabiliyetidir. Tokluğun bir diğer tanımı ise malzemenin kopmadan önce emebileceği birim hacim başına enerji miktarıdır. Aynı zamanda gerilim uygulanan malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği dayanım olarak da tanımlanabilir. Şekil 7.7’de görüldüğü üzere, tokluk her iki yazdırma deseni için karbon elyaf takviye oranı arttıkça azalmaktadır. %5 karbon elyaf takviyesinde dahi tokluk ortalama 3 kat azalmıştır. Doğrusal yazdırmada $[0, 90]$ tokluk ABS için ortalama $2,00 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ iken %30 karbon elyaf içeren numunede 6 kat azalarak $0,38 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ olmuştur. Çapraz yazdırmada $[-45, 45]$ ise ticari ABS için $2,65 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ değerinde olan tokluk %30 karbon elyaf içeren kompozit numune için 10 kat azalarak $0,23 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ ‘dir. Çapraz yazdırmadaki kompozit numunelerin tokluk değerleri doğrusal yazdırmadakine nazaran ortalama %9 daha düşüktür. Bunun sebebi tokluğun malzemenin çekme dayanımı ve sünekliğine bağlı bir fonksiyon olmasıdır (Şekil 7.1 ve Şekil 7.2). Yani malzemenin tok olabilmesi için hem yüksek dayanımlı hem de sünek olması gerekmektedir. Çapraz yazdırmadaki kompozit numuneleri genel olarak daha sünek olmasına karşın dayanımları doğrusal yazdırmaya kıyasla oldukça düşüktür.



Şekil 7.7. Farklı karbon elyaf oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin toklukları

7.3. Karbon Elyaf Takviyesinin Poroziteye Etkisi

Kısa karbon elyaf katlı ABS filamentlerde gözenekli yapı görülmektedir. Bu gözenekler genel olarak şu sebeplerden kaynaklanır.

- Filament üretimi ve yazdırma işlemindeki ekstrüzyon sırasında iç bölgelerde gaz sıkışması;
- Katmanlar arasındaki fiziksel boşluklar;
- Matris ile takviye edici yüzeyleri arasındaki faz ayrımından oluşan boşluklar

Numunelerin gözenek miktarının tespit edilebilmesi için aşağıdaki formül kullanılabilir [81].

$$P = \frac{V_t - V_a}{V_t} \quad (6.1)$$

Eş. 6.1’de P toplam gözenek oranı, V_t numunenin teorik hacmi ve V_a numunenin gerçek hacmidir. CAD ortamında tasarlanan numunenin hacmi 2.55 cm^3 ’dür. Fakat FDM yazdırma işleminde parça bir miktar büzölmeye uğrayabilir.

Numunenin gerçek hacmi ise Eş. 6.2 ile belirlenebilir [81].

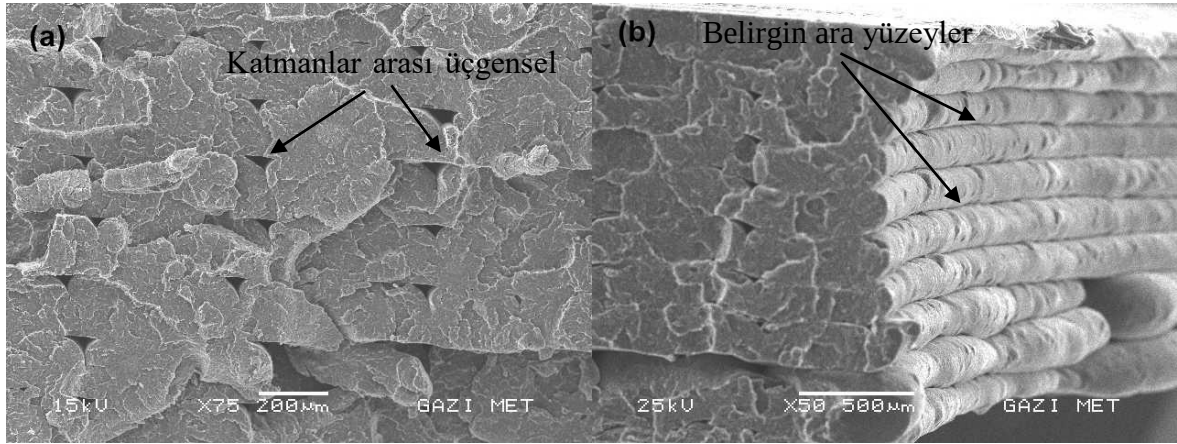
$$V_a = \frac{M \times \%ABS}{\rho_{ABS}} + \frac{M \times \%CF}{\rho_{CF}} \quad (6.2)$$

M: numunenin gerçek ağırlığı

ρ_{ABS} : ABS’nin öz kütlesi ($1,05 \text{ g/cm}^3$)

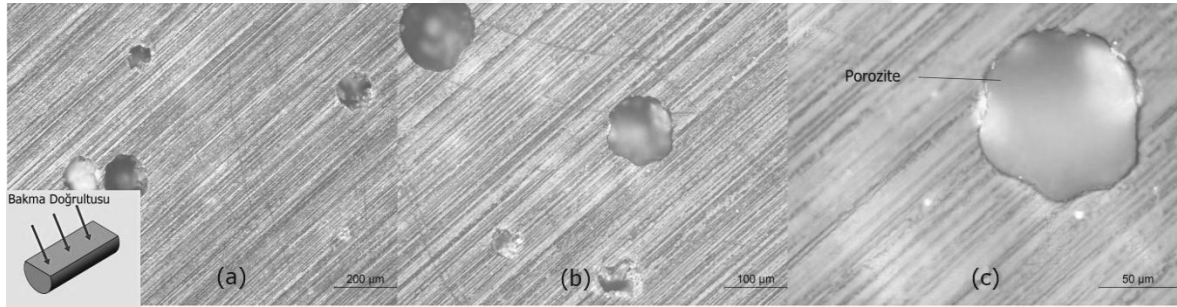
ρ_{CF} : Karbon elyafın öz kütlesi ($1,76 \text{ g/cm}^3$)

%20 karbon elyaf içeren numune için teorik olarak %30 hesaplanan porozite oranı yazdırma işlemi sırasında katman arasında oluşan üçgensel bölgeler nedeniyle güvenilir değildir. Üçgensel bölgeler, dairesel olan filamentin yarı eriyik halde yığılması sırasında nozulun uyguladığı basınçla eliptik hale gelmesi ve filament alt bölgesinin düzleşerek katılaşmasına rağmen üst bölgenin eliptik durumunu koruyarak katılaşmasından kaynaklanır. Böylece yazdırma işlemi sırasında aşağı yönlü üçgenler ve belirgin ara yüzeyler oluşmaktadır (Resim 7.1).



Resim 7.1. FDM 3B yazıcı ile üretilen elyaf-polimer numunenin SEM görüntüsü a) kırılma yüzeyi, b) katman yapısı

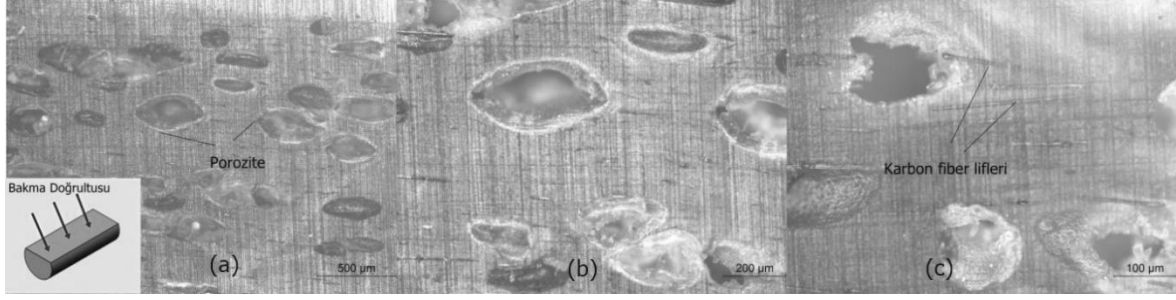
Resim 7.2’de görüldüğü üzere ticari ABS ile üretilen çekme testi numunesi ve filament kesitine bakıldığında porozitenin küçük çapta ve az sayıda olduğu görülür.



Resim 7.2. Ticari ABS filament kesiti ve gözenek oluşumu a) x5 büyütülmüş, b) x10 büyütülmüş, c) x20 büyütülmüş

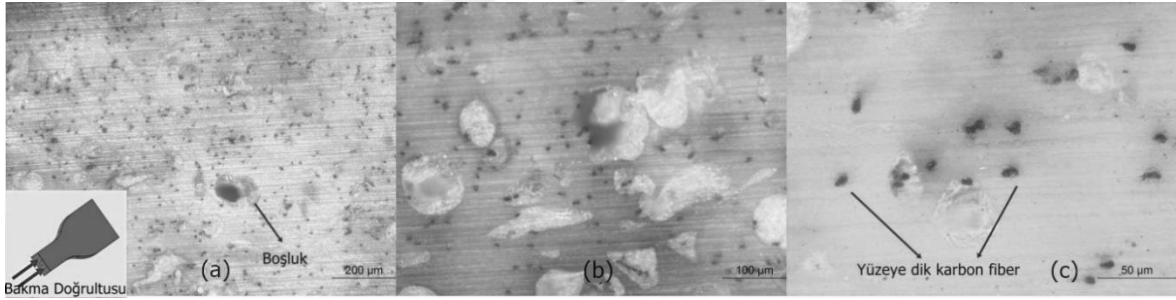
Ticari ABS’de ortaya çıkan gözenekli yapıya yazdırma işlemi sırasında gazların oluşturduğu boşluklar sebep olmaktadır. Katmanlar arasındaki boşluklar çok küçük seviyededir. Gözenekler ortalama 100 µm çapındadır.

Resim 7.3’de görüldüğü üzere %5 kısa karbon elyaf içeren kompozit filament kesitine bakıldığında gözeneklerin daha sık ve eliptik olduğu görülmektedir. Karbon liflerinin ise 200-400 µm uzunluğunda homojen olarak dağıldığı ve ekstrüzyon yönüne paralel biçimde konumlandığı görülmektedir. Gözenekler yaklaşık 400 µm uzunluğunda ve 200 µm yüksekliğinde ölçülmüştür.



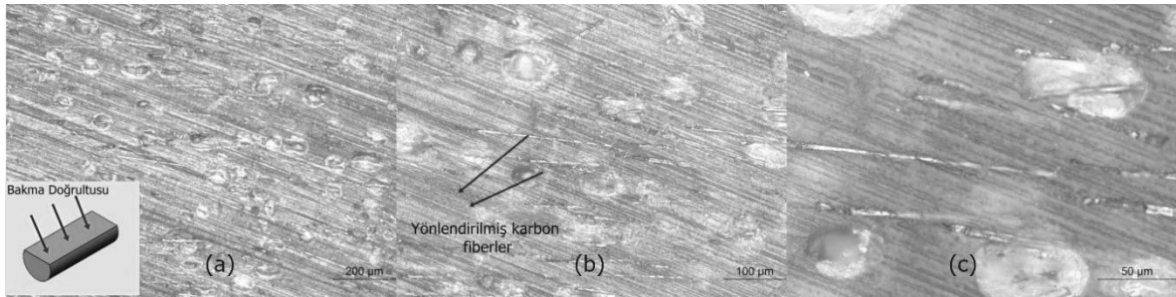
Resim 7.3. %5 Kısa karbon elyaf içeren filament kesiti ve gözenek oluşumu a) x2 büyütülmüş, b) x5 büyütülmüş, c) x10 büyütülmüş

Çekme deneyi yapılan numune kesitine dik bakıldığında (Resim 7.4.) ise porozitenin daha az ve dağınık olduğu ve kısa karbon elyafların bakma yüzeyine dik olarak konumlandığı görülmektedir.



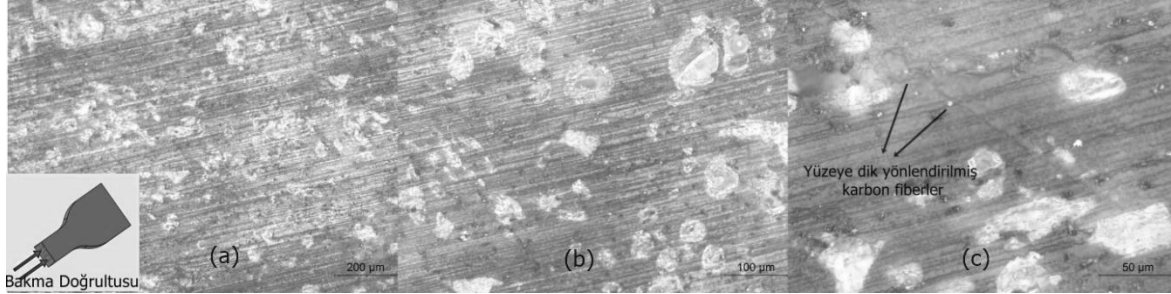
Resim 7.4. %5 Kısa karbon elyaf içeren numune dik kesiti a) x5 büyütülmüş, b) x10 büyütülmüş, c) x20 büyütülmüş

Resim 7.5’de gösterilen %10 kısa karbon elyaf içeren filament kesitine bakıldığında ise boşlukların dairesel, %5 kısa karbon elyaf içeren filamentte göre daha küçük çapta fakat daha sık olduğu görülmektedir. Yine karbon elyaf iplikleri homojen biçimde dağılmış ve ekstrüzyon doğrultusunda yönlendirilmişlerdir. Gözenekler ortalama 70 µm çapındadır.



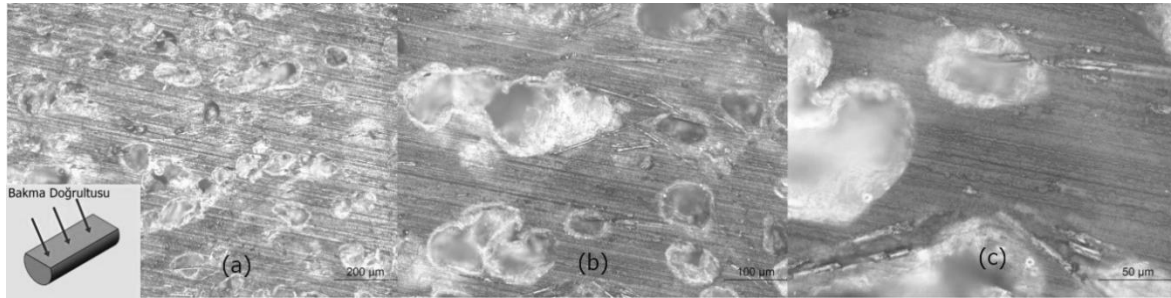
Resim 7.5. %10 Kısa karbon elyaf içeren filament kesiti ve gözenek oluşumu a) x5 büyütülmüş, b) x10 büyütülmüş, c) x20 büyütülmüş

%10 kısa karbon elyaf içeren filamentin çekme deneyi yapılan numune kesitine dik bakıldığında (Resim 7.6.) ise %5 kısa karbon elyaf içeren numuneye göre daha çok porozite görülmektedir. Gözenekler yine küçük çaptadır (30-50 μm) ve aşırı sık değildirler.



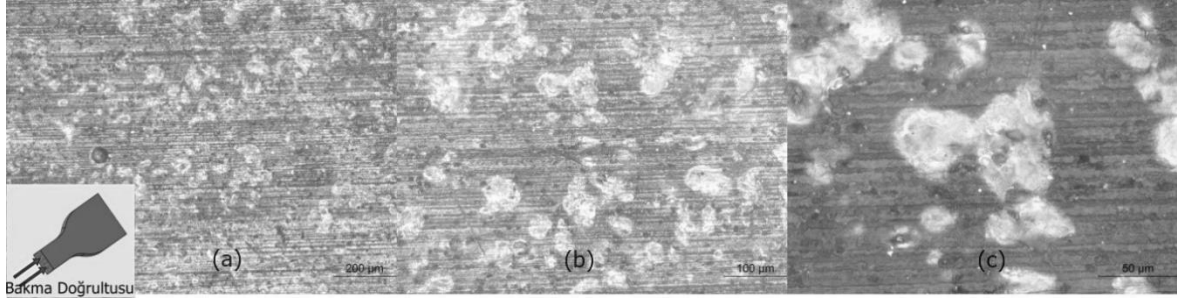
Resim 7.6. %10 Kısa karbon elyaf içeren numune dik kesiti a) x5 büyütülmüş, b) x10 büyütülmüş, c) x20 büyütülmüş

Resim 7.7’de görüldüğü üzere %15 kısa karbon elyaf içeren filamentin kesitinde yoğun filament lifleri arasına dağılmış çok sayıda küçük çaplarda poroziteler görülür. Porozite özellikle elyaf sınırlarında oluşmaktadır. Bu durum elyaf takviyesi ile matris yüzeyleri arasındaki faz ayrımından kaynaklanır. Elyaf oranının artmasından dolayı homojenliği sağlamak adına yapılan karıştırma işlemi sırasında elyaf kırılmaları meydana gelmektedir. Karbon liflerinin uzunluğu 25 ile 200 μm arasında ölçülmüştür. Gözenekler ise ortalama 50 μm çapındadır.



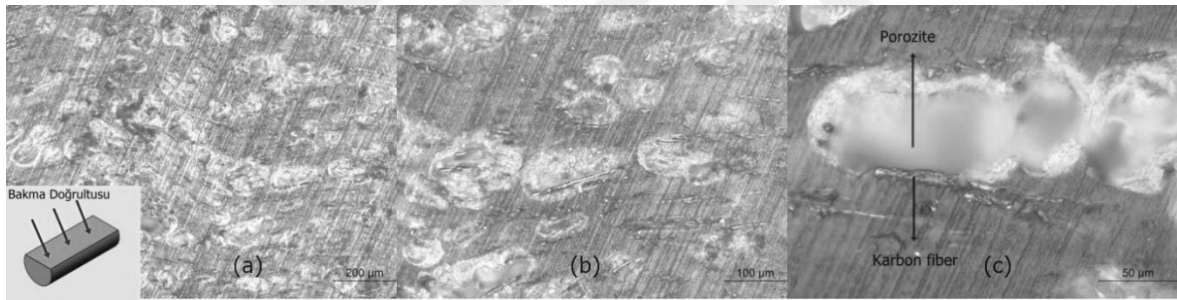
Resim 7.7. %15 Kısa karbon elyaf içeren filament kesiti ve gözenek oluşumu a) x5 büyütülmüş, b) x10 büyütülmüş, c) x20 büyütülmüş

Çekme deneyi yapılan numune kesitine dik bakıldığında (Resim 7.8.) ise aynı şekilde küçük çaplı ve yoğun gözenekler görülmektedir.



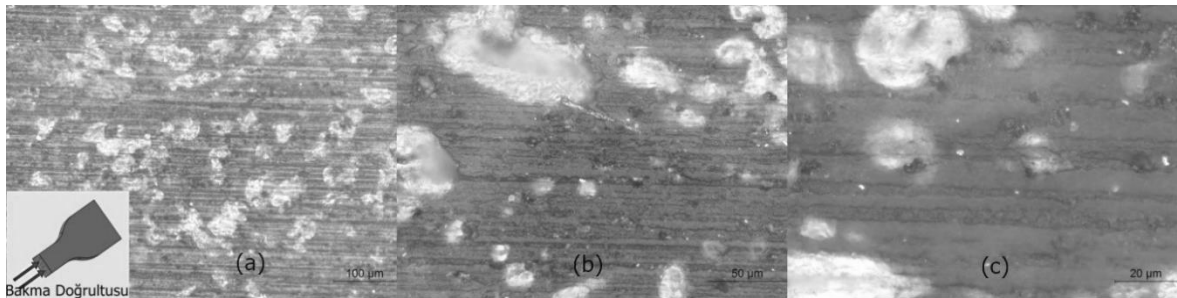
Resim 7.8. %15 Kısa karbon elyaf içeren numune dik kesiti a) x5 büyütülmüş, b) x10 büyütülmüş, c) x20 büyütülmüş

Resim 7.9’da ise %20 kısa karbon elyaf oranına sahip filament kesiti görülmektedir. %15 kısa karbon elyaf oranına sahip filament kesitine benzer şekilde küçük çaplı ve yoğun porozite görülmektedir. Kısa karbon elyaflar karıştırma esnasında fiziksel kırılmalara daha çok maruz kalarak değişik uzunluklara bölünmüşlerdir. Karbon liflerinin uzunluğu 25 ile 150 μm arasında değişmektedir. Gözeneklerin çapları ise ortalama 50 μm ’dir.



Resim 7.9. %20 Kısa karbon elyaf içeren filament kesiti ve gözenek oluşumu a) x5 büyütülmüş, b) x10 büyütülmüş, c) x20 büyütülmüş

%20 Kısa karbon elyaf içeren filament ile üretilerek çekme deneyi yapılan numune kesitine dik bakıldığında (Resim 7.10.) katman yapıları görülmektedir. Katmanlar arasında dağınık boşluklar bulunmaktadır.

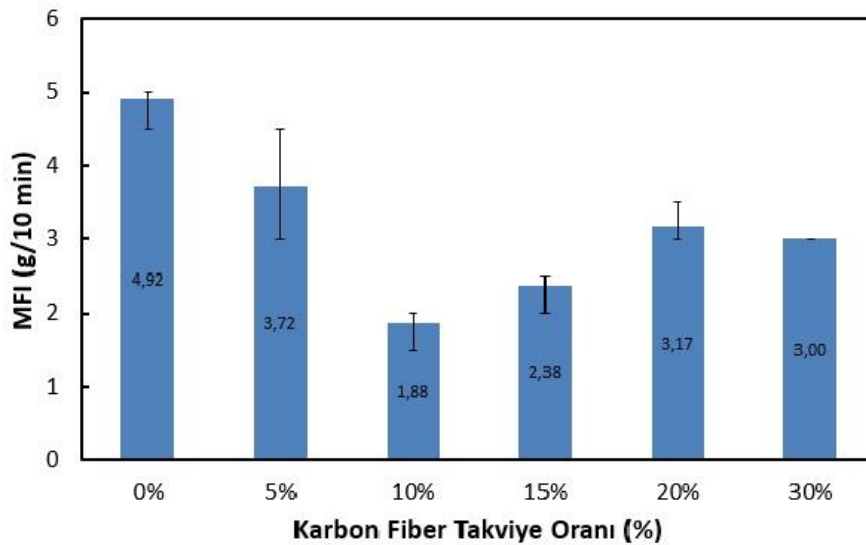


Resim 7.10. %20 Kısa karbon elyaf içeren numune dik kesiti a) x10 büyütülmüş, b) x20 büyütülmüş, c) x50 büyütülmüş

7.4. Karbon Elyaf Takviyesinin Eriyik Akış Hızına (MFI) Etkisi

Malzeme ekstrüzyonunun tercih edildiği endüstriyel uygulamalarda, malzemenin MFI değerleri işlem parametrelerinin belirlenmesi için önemlidir. MFI değeri, plastik malzemelerin akış kolaylığının bir ölçüsüdür ve malzemelerin molekül ağırlığına, katkı maddelerine ve diğer bileşenlere bağlıdır. Üretilen karbon elyaf takviyeli polimer kompozite ait MFI değeri Şekil 7.8’de gösterilmiştir.

Şekilde görüldüğü üzere %10 karbon elyaf takviye oranına kadar, artan elyaf oranı ile MFI değeri düşmektedir. %10 takviye oranının üstündeki değerlerde ise MFI değeri ABS’nin üstüne çıkmamak kaydıyla yükselmektedir. Bu duruma artan elyaf oranı ile elyaf - elyaf veya elyaf -karıştırma haznesi etkileşiminden kaynaklanan kırılmalar ile elyaf boyunun önemli derecede düşmesi neden olabilmektedir.



Şekil 7.8. Farklı oranlarında karbon elyaf takviyesi içeren ABS polimer kompozitlere ait eriyik akış hızı



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 6mm uzunluğundaki karbon elyaf takviyeli ABS kompozit filamentin üretim yöntemleri ve işlem parametreleri incelenmiştir. Kısa karbon elyaf takviyesinin ABS'nin mekanik özelliklerini (çekme dayanımı, elastisite modülü, süneklik, tokluk vb) önemli ölçüde etkilediği deneysel olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca kompozit numune anizotropik özellik gösterdiğinden yazdırma deseninin kompozit malzemenin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Mekanik testlerden sonra kısa karbon elyaf takviyeli filament ve çekme testinde kullanılan numunelerin kesitlerine optik mikroskop yardımıyla bakılarak farklı orandaki katkılar için porozite oluşumu, kısa karbon elyaf yönlendirilmesi ve katmanlar incelenmiştir.

Sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Karbon fiber takviyeli numuneler ticari ABS ile kıyaslandığında; karbon elyaf eklentisi doğrusal yazdırmada $[0, 90]$ çekme dayanımını ve elastisite modülünü önemli derecede arttırmıştır. Tokluk ve süneklik ise azalmıştır. Çapraz yazdırmada $[-45, 45]$ ise ticari ABS ile kıyaslandığında karbon elyaf etkisi elastisite modülünü arttırırken, çekme dayanımı tokluk ve sünekliği azaltmıştır.
- Ticari ABS için yazdırma deseni mekanik özellikleri kayda değer bir biçimde etkilememesine rağmen karbon elyaf katkılı kompozit numunelerde mekanik özellikler yazdırma deseni ile önemli derecede değişmektedir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler anizotropik özellik göstermektedirler.
- Karbon elyaf takviye oranı arttıkça kompozit malzemeler kırılgan, gevrek davranışlar göstermektedirler.
- Karbon elyaf oranı arttıkça gözenek oluşumu çapı küçülerek çoğalmaktadır. Porozite miktarı ve çapı mekanik özellikleri etkilemektedir.
- Karbon miktarı arttıkça homojen karıştırma işleminde elyafların fiziksel kırılması artmış ve kompozit filament içerisindeki ortalama elyaf uzunluğu azalmıştır. Elyaf boyu çekme dayanımını ve poroziteyi etkilemektedir.



KAYNAKLAR

1. Phillips, L. N. (1989). *Design with Advanced Composite Materials*. Springer-Verlag: The Design Council.
2. Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials* (Third edition). Science and Engineering: Springer.
3. Şahin, Y. (2000). *Kompozit Malzemelere Giriş*. Ankara: Gazi Kitabevi, 73-74.
4. Lubin, G. (1982). *Handbook of Composites*. Van Nostrand Reinhold Co., 196.
5. Demircioğlu, G. (2006). *Kısa Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyutunun Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-20.
6. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, C. M., Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 1302 – 1355.
7. Özuğur, B. (2006). *Hızlı Prototipleme Teknikleri ile Kompleks Yapıdaki Parçaların Üretilirliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-32.
8. Williams, J. V., Revington, R. J. (2010). Novel use of an aerospace selective laser sintering machine for rapid prototyping of an orbital blowout fracture. *International Journal of Oral Maxillofacial Surgery*, 39, 182–184.
9. Vilaro, T., Abed, S., Knapp, W. (2008). *Direct manufacturing of technical parts using selective laser melting: example of automotive application*. Proceedings of 12th European Forum on Rapid Prototyping.
10. Webb, P. A. (2000). A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 24 (4), 149-153.
11. Rengier, F., Mehndiratta, A., Tengg-Kobligh, H., Zechmann, C. M., Unterhinninghofen, R., Kauczor, U., Giesel, F. L. (2010). 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5, 335-341.
12. Kolarevic, B. (2001). Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age. *Proceedings of Association for Computer Aided Design in Architecture*, 268-277.
13. Flowers, J. (2000). 3D laser scanning in technology education. *Technology Teaching*, 60(3), 27-30.
14. Brandt, J., Drechsler, K., Arendts, F. J. (1996). Mechanical performance of composite based on various three dimensional woven-fibre preforms. *Composites Science and Technology*, 56, 381-386.

15. Dudek, P. (2013). FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements, *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(4), 1415-1418.
16. Cooke, M. N., Fisher, J. P., Dean, D., Rimnac, C., Mikos, A. G. (2002). Use of stereolithography to manufacture critical sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 64(B), 65-69.
17. Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., Froyen, L. (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), 357-371.
18. Park, J., Tari, M. J., Hahn, H. T. (2000). Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process. *Rapid Prototyping Journal*, 6(1), 36-50.
19. Kai, C. C., Fai, L. K., Chu-Sing, L. (2003). *Rapid prototyping: principles and applications in manufacturing*. Singapore: World Scientific Publishing.
20. Wong, K. V., Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International Scholarly Research Network*, Article ID: 208760.
21. Comb, J. W., Priedeman, W. R., Leavit, P. J., Skubic, R. L., Batchelder, J. S. (2005). *High-precision modeling filament*, patent.
22. Marcincinova, L. N., Marcincin, J. N., Barna, J., Torok, J. (2012). *Special materials used in FDM rapid prototyping technology application*. Proceedings of IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES), 73-76.
23. Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar A. K. (2014). Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composite Science Technology*, 105(10), 144-150.
24. Shofner, M. L., Lozano, K., Rodríguez-Macías, F. J., Barrera, E. V. (2003). Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. *Journal of Applied Polymer Science*, 89(11), 3081-3090.
25. Demirel, A. (2007). *Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-40.
26. Kaw, A. K. (2014) *Kompozit Malzeme Mekaniği* (çev. Buket Baba ve Ramazan Karakuzu). Efil Yayınevi. (Eserin orijinali 1997’ yayımlandı).
27. İnternet: Akrilonitril bütadien stiren. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fteknikbil.blogspot.com.tr%2F2013%2F11%2Fakrilonitril-butadien-stiren-abs.html&date=2016-09-09>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2016.
28. İnternet: NBC Plastik. PA 6 (Poliamid 6) URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ncbplastik.com%2Fsayfalar.asp%3FLanguageID%3D1%26cid%3D3%26id%3D8&date=2016-09-09>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2016.

29. İnternet: Vikipedi. Polyester. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Ftr.wikipedia.org%2Fwiki%2FPolyester&date=2016-09-09>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2016.
30. Ersoy, H. Y. (2001). *Kompozit Malzeme*. İstanbul: Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama, San. ve Tic. Ltd. Sti.
31. İnternet: Shah, N. Carbon fiber reinforced plastic composites. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fengineeringcorner.blogspot.com.tr%2F2011%2F09%2Fcarbon-fiber-reinforced-plastic.html&date=2016-09-09>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2016.
32. İnternet: Zor, M. Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fdocplayer.biz.tr%2F2254217-Kompozit-malzemelerle-ilgili-genel-bilgiler.html&date=2016-09-09>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2016.
33. Çağlar, E. (2012). *Karbon Elyaf Hasarlarının Elektriksel Yöntemlerle Tespiti*, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 25-27.
34. Apak, S., Korkut İ., Dünder, K. (2005). *Hızlı Prototipleme Tezgahlarında Üretilen Parçaların Maliyet Araştırması*. 4. Uluslar Arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 2, 581-590.
35. Özuğur, B., Korkut, İ., Şeker, U. (2005). *Kompleks Yapıdaki Parçaların Üretiminde Hızlı Prototipleme Teknikleri İle Geleneksel Ve Geleneksel Olmayan Yöntemlerin Karşılaştırılması*. 4. Uluslar Arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, (1), 581-590.
36. Özuğur, B. (2002). *İleri İmalat Teknolojileri*, Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Ana Bilim Dalı, Ankara, 32-144 (2002).
37. Öztürk, O. (2003). Hızlı Prototipleme ve Üretim. *DES&TECH Tasarım ve Teknoloji Dergisi*, 1, 32-45.
38. Raja, V., Fernands, K. J. (2008). *Reverse Engineering – An Industrial Perspective*. London: Springer, 123-198.
39. Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies – 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (second edition). London: Springer.
40. Börklü, H. R., Yıldırım, A. K., Sezer, H. K. (2016). *Hızlı Prototip Oluşturmada Karşılaşılan Problemler Ve Çözüm Önerileri*. 1. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu, İstanbul, 111-122.
41. Noorani, R. (2006). *Rapid Prototyping Principles and Applications*. JohnWiley & Sons, ISBN: 978-0-471-73001-9.
42. İnternet: Vikipedi. STL File Format. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FSTL>

- 2FSTL_%28file_format%29%23%2Fmedia%2FFile%3AThe_differences_between_CAD_and_STL_Models.svg&date=2016-09-09, Son Erişim Tarihi: 09.09.2016.
43. Ippolito, R., Luliano, L., Gatto, A. (1995). Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish. *Annals of the CIRP*, 44.
 44. Özüğür, B. (2002). *Hızlı Prototipleme Teknikleri ile Kompleks ve Mikro Yapıdaki Parçaların Üretilebilirliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi Ana Bilim Dalı, Ankara, 32-144.
 45. Dogan, G. (2007). *Mikro ve nano hızlı prototipleme*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 31-36.
 46. Apak, S. (2010). *Farklı Hızlı Prototipleme Cihazlarında Üretilen Parçaların Üretim Zamanı Ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
 47. Chua, C. K., Leong, K. F., Lim, C. S. (2010). *Rapid Prototyping: Principles and Applications* (Third edition). World Scientific.
 48. İnternet: Hueway. 3D printing filament parameter. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fsc01.alicdn.com%2Fkf%2FHTB1gvwcJVXXXXc4XpXX760XFXX Xu%2F54509%2FHTB1gvwcJVXXXXc4XpXX760XFXX Xu.png&date=2016-09-09>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2016.
 49. İnternet: Hızlı Prototipleme Teknolojileri. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fdabircan.blogspot.com%2F2014%2F06%2Fhizli-prototipleme-teknolojileri-1.html&date=2016-09-09>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2016.
 50. İnternet: Yavuz, M. Hızlı Prototip Üretim Teknolojisi. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.cadcamsektoru.com%2Fansiklopedi%2FHizli-Prototip-Uretim-Teknolojisi-9612.htm&date=2016-09-09>, Son Erişim Tarihi: 09.09.2016.
 51. Ermurat, M. (2002). *Hızlı Prototip Ve Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tasarım Ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze, 16-32.
 52. Celal Beyar Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümü Deney Föyü
 53. Davis, Joseph R. (2004), *Tensile testing* (2. ed.), ASTM International.
 54. Harran Üniversitesi Mekanik Deney Föyü
 55. Hibbeler, R. C. (2009). *Mechanics of Materials* (5th ed). Upper Saddle River, N.J: Pearson Education.
 56. İnternet: Metallerin mekanik özellikleri. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.bilgikumbarasi.com%2F>

- F2016%2F11%2Fmetallerin-mekanik-ozellikleri.html&date=2017-05-09, Son Erişim Tarihi: 09.05.2017
57. İnternet: Çekme dayanımı ve çekme deneyi. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.metalurjik.net%2F2013%2F12&date=2017-05-09>, Son Erişim Tarihi: 09.05.2017
 58. Metallerde Mukavemet Artırıcı Mekanizmalar (Ders Notları) Gençğa Pürçek Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliğı Bölümü
 59. İnternet: Malzemelerin mekanik davranışları. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fmuhendishane.org%2Fkutuphane%2Fmalzemelerin-mekanik-davranisi%2F&date=2017-05-09>, Son Erişim Tarihi: 09.05.2017
 60. İnternet: Sürünme. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.metalurjik.net%2Ftag%2Fsurunme-nedir&date=2017-05-09>, Son Erişim Tarihi: 09.05.2017
 61. İnternet: Pekleşme. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FWork_hardening&date=2017-05-09, Son Erişim Tarihi: 09.05.2017
 62. İnternet: Gerilim sertleşmesi görseli. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fimages.slideplayer.com%2F27%2F9027425%2Fslides%2Fslide_28.jpg&date=2017-05-09, Son Erişim Tarihi: 09.05.2017
 63. İnternet: Gerilim gerinim grafiğı. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.totalmateria.com%2Fimages%2FArticles%2Fktn%2FFig39-1.gif&date=2017-05-09>, Son Erişim Tarihi: 09.05.2017
 64. İnternet: Poisson oranı. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.mechanicalbooster.com%2F2016%2F10%2Fwhat-is-poissons-ratio.html&date=2017-05-09>, Son Erişim Tarihi: 09.05.2017
 65. İnternet: Rezilyans. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FResilience_%28materials_science%29&date=2017-05-09, Son Erişim Tarihi: 09.05.2017
 66. Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L., Li, Z. (2001). Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. *Materials Science and Engineering: A*, 2(301), 125–130.
 67. Shofner, M. L., Rodríguez-Macías, F. J., Vaidyanathan, R., Barrera, E. V. (2003). Single wall nanotube and vapor grown carbon fiber reinforced polymers processed by extrusion freeform fabrication. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34, 1207-1217.

68. Kim, J., Creasy, T. S. (2004). Selective laser sintering characteristics of nylon 6/clay reinforced nanocomposite. *Polymer Testing*, 23(6), 629-636.
69. Robert, W., Gray, I. V, Donald G. B., Bøhn, J. H. (1998). Effects of processing conditions on short TLCP fiber reinforced FDM parts. *Rapid Prototyping Journal*, 4(1), 14–25.
70. Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C. (2002). Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 4(2), 129-141.
71. Masood, S. H., Song, W. Q. (2004). Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. *Materials and Design*, 25, 587–594.
72. Sa'ude, N., Masood, S. H., Nikzad, M., Ibrahim, M., Ibrahim, M. H. (2013). Dynamic Mechanical Properties of Copper-ABS Composites for FDM Feedstock. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* ISSN: 2248-9622, 3(3), 1257-1263
73. Onagoruwa, S., Bose S., Bandyopadhyay, A. Fused Deposition of Ceramics (FDC) and Composites. *School of Mechanical and Materials Engineering*.
74. Sa'ude, N., Ibrahim, M., Ibrahim, M. H. (2014). Mechanical Properties of Highly Filled Iron-ABS Composites in Injection Molding for FDM wire Filament. *Materials Science Forum*, (201a), 456-461.
75. Macy, B. (2011). Rapid/Affordable Composite tooling strategies utilizing Fused Deposition Modeling. Society For The Advancement of Material and Process Engineering *Journal*, 47(4).
76. Gray, R. W., Baird, D. G., Bohn, J. H. (1998). Thermoplastic Composites Reinforced With Long Fiber Thermotropic Liquid Crystalline Polymers for Fused Deposition Modeling. *Polymer Composite*, 19(4).
77. Fu, S. Y., Lauke, B., Mader, E., Yue, C.Y., Hu, X. (2000). Tensile properties of short glass fiber and short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Composites Part A*, 31, 1117–1125.
78. Karsli, N. G., Aytac, A. (2013). Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. *Composites Part B* 61, 270–275.
79. Mark, G. T. (2014). *Methods for fiber reinforced additive manufacturing*, patent.
80. Gordeyev, S. A., Ferreira, J. A., Bernardo, C. A., Ward, I. M. (2001). A promising conductive material: highly oriented polypropylene filled with short vapour-grown carbon fibers. *Material Lett*, 51:32–6.
81. Kuriger, R. J., Khairul, M. A., Anderson, P. D., Jacobson, R. L. (2002) Processing and characterization of aligned vapor grown carbon fiber reinforced polypropylene. *Composites Part A*, 33:53–62.

82. Fu, S. Y., Lauke, B. (1996) Effect of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers. *Compos Sci Technol* 56:1179–90.
83. Hine P. J., Davidson, N., Duckett, R. A., Ward, I. M. (1995) Measuring the fibre orientation and modelling the elastic properties of injection-molded long-fibre-reinforced nylon. *Compos Sci Technol* 53:125.
84. İnternet: Çift vidalı ekstrüder. URL:
http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kraussmaffeigroup.com%2Fmedia%2Ffiles%2Fkmnews%2Fde%2FPM_EXT_2016_16.jpg&date=2017-11-28, Son Erişim Tarihi: 28.11.2017
85. İnternet: Çift vidalı mikro karıştırıcı. URL:
http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FJinkai_Yuan%2Fpublication%2F264730194%2Ffigure%2Ffig13%2FAS%3A295838220865552%401447544736866%2FFigure-14-TheMWNTPVDF-composites-are-prepared-by-melt-mixing-using-a-corotating.png&date=2017-11-28, Son Erişim Tarihi: 28.11.2017
86. İnternet: Tek vidalı ekstrüder. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fptfemachinery.com%2Fwpcontent%2Fuploads%2F2017%2F02%2FPolymer-Screw-Extrusion.gif&date=2017-11-28>, Son Erişim Tarihi: 28.11.2017
87. İnternet: FDM 3B yazıcı. URL:
http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2Fİsmail_Durgun%2Fpublication%2F280069434%2Ffigure%2Ffig1%2FAS%3A284585951809545%401444861986726%2FFigure-1-The-working-principle-of-the-FDM.png&date=2017-11-28, Son Erişim Tarihi: 28.11.2017
88. İnternet: FDM 3B yazıcı. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.3ders.org%2Fimages%2F2014%2F3DISON-PRO-AED-3D-printer-3.png+&date=2017-11-28>, Son Erişim Tarihi: 28.11.2017
89. İnternet: Çekme test cihazı. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.engineersgallery.com%2Fwpcontent%2Fuploads%2F2016%2F02%2F25.png&date=2017-11-28>, Son Erişim Tarihi: 28.11.2017
90. İnternet: Ters optik mikroskop. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fnptel.ac.in%2Fcourses%2F102103047%2Fmodule6%2Flec31%2Fimages%2F2.png&date=2017-11-28>, Son Erişim Tarihi: 28.11.2017
91. İnternet: MFI test cihazı. URL:
http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FBasel_Younes%2Fpublication%2F279785793%2Ffigure%2Ffig2%2FAS%3A324003743977474%401454259920219%2FThe-MFI-tester-with-schematic-

diagram-of-the-pressure-distribution-in-the-capillary.png&date=2017-11-28, Son
Erişim Tarihi: 28.11.2017

92. Botelho, E. C., Figiel, L., Rezende, M. C., Lauke, B. (2003). Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites. *Composites Science Technology*, 63, 1843–1855.
93. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B*, 80, 369-378.
94. Tezcan, J., Ozcan, S., Gurung, B., Filip, P. (2008). Measurement and analytical validation of interfacial bond strength of PAN fiber reinforced carbon matrix composites. *Journal of Material Science*, 43(5), 1612–1628.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EREN, Oğulcan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 18.06.1991 Ankara/Altındağ
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 05058475798
 e-mail : ogulcaneren@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi/ Endüstriyel Tasarım Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Ömer Halisdemir Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	2014
Lise	Ali Naili Erdem Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Gazi Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği	Araştırma Görevlisi
2015-2017	Gazi Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği	Proje Asistanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Sezer, H. K., Eren, O. Börklü HR. (2017). *Grafen Kompozitlerin 3B Baskısı*. ISIDE International Symposium on Industrial Design Engineering, 13-15 September, Kapadokya, 14-19.

2. Gürcüm, B., Börklü, H. R., Sezer, H. K., Eren O. (2017). *Implementing 3D Printed Structures As The Newest Textile Form*. International Conference on Intelligent Textiles and Mass Costomisation, Belgium.
3. Sezer, H. K., Eren, O., Börklü, H. R. (2017). *Ergiyik Biriktirme Yöntemi ile Karbon Fiber Takviyeli Plastik Kompozitlerin Eklemeli İmalatı: İşlem Parametrelerinin Çekme Özelliklerine etkisi*. The 2nd Int. Symposium On 3D Printing Technologies, İstanbul, 424-333.
4. Şahin, İ., Şahin, T., Gökçe, H., Eren, O. (2017). *Hasarlı Dişlilerin Tersine Mühendislik Yaklaşımıyla Yeniden Oluşturulması*. The 2nd International Symposium On 3D Printing Technologies, İstanbul, 126-134.
5. Sezer, H. K., Eren, O. (2017). *Enhanced Mechanical and Electrical Properties of 3D Printed MWCNT Re-inforced ABS Nano-Composite Parts*. 39th MATADOR Conference, Manchester.

Hobiler

Trekking, Kampçılık, Yüzme



GAZİ GELECEKTİR..