

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ERİYİK YIĞMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
SÜREKLİ FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
DARBE DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mümin BIYIKLIOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2019

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ERİYİK YIĞMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN
SÜREKLİ FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN
DARBE DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mümin BIYIKLIOĞLU
(172080102)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bahattin KANBER

HAZİRAN 2019

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Mümin BIYIKLIOĞLU

İmzası :

X X X X



Beni bugünlere getiren Anneme ve Babama,

ÖNSÖZ

Günümüzde birçok mühendislik malzemesi bulunmaktadır. Temel olarak polimer, metal, seramik ve kompozit malzemeler olmak üzere dörde ayrılırlar. Bütün mühendislik malzemelerinin üretiminde ve geliştirilmesinde insanların ihtiyaçları itici kuvveti oluşturmaktadır. Özellikle aynı anda hem daha dayanıklı hem de hafif veya sadece termal, elektriksel gibi özelliklerin belirli değerlerde olması gibi ihtiyaçların bir veya birkaçının sağlanmasında zorluklar yaşanabilmektedir. Kompozit malzemelerde bu tarz gereksinimlere cevap vermek için son yüzyılda keşfedilmiş ve geliştirilmektedir.

Kompozitlerin genel dezavantajları ise üretim yöntemlerinin sınırlı oluşu istenilen özelliklerin izotropik olmayışı ve takviye-matris ara yüzey etkileşimlerinin zayıflığından doğan problemlerdir. Ancak unutulmamalıdır ki kompozit malzemeler diğer malzeme türlerine görece yenidir ve günümüzde kompozit malzemeler için yapılan çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir.

Son yarım yüzyılda yaşanan önemli bir gelişme de mühendislik malzemelerinin üretiminde yöntemlerinde yaşanmıştır. Günümüzde talaşlı imalat, döküm, haddelem, ekstrüzyon gibi birçok konvansiyonel yöntemle seramik, metal ve polimer malzemeler seri olarak üretilebilmektedir. Kompozit malzemeler için daha farklı ve yavaş üretim yöntemleri mevcuttur.

Ancak özellikle karmaşık şekilli parçaların üretiminde karşılaşılan zorluklar nedeniyle yeni arayışlar sonucu eklemeli üretim metodları geliştirilmiştir. Konvansiyonel yöntemler farklı yollarla malzemeye şekil verme ya da parça kopararak şekillendirmeyi esas alırken eklemeli üretim yöntemleri parçaya parça ekleyerek şekillendirmeyi esas almıştır.

Özellikle kompozitlerin üretim zorluklarına çözüm oluşturabileceği düşünüldüğü için bu çalışmada eklemeli üretim yöntemlerinden biriyle kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiş ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Böylece kompozit malzemeler için önemli bir sorunun çözümüne katkıda bulunulmuştur.

Tez çalışmamda planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Bahattin KANBER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2019

Mümin BIYIKLIOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. KOMPOZİT MALZEMELER	14
1.1 Kompozitlerin Tarihçesi.....	17
1.2 Takviye Malzemeleri.....	18
1.2.1 Cam fiberler	18
1.2.2 Karbon fiberler	19
1.3 Matris Malzemeleri	21
1.3.1 Epoksi reçineler.....	22
2. EKLEMELİ İMALAT	25
2.1 Giriş.....	25
2.1.1 Ürünün tasarımı ve 3B modellenmesi.....	27
2.1.2 Katı modelin .stl formatına dönüştürülmesi.....	27
2.1.3 Katı modelin .stl dosyasının 3B yazıcıya aktarılması ve düzenlenmesi ...	27
2.1.4 3B yazıcının hazırlanması	28
2.1.5 Üretim	28
2.1.6 Modelin 3B yazıcıdan çıkarılması ve temizlenmesi	28
2.1.7 Son işlemler.....	28
2.1.8 Kullanım.....	28
2.2 Eklemeli Üretimin Tarihçesi	29
2.3 Tank Fotopolimerizasyon (Vat Photopolymerization).....	29
2.4 Toz Yatak Birleştirme Prosesi (Powder Bed Fusion Process)	30
2.5 Malzeme Püskürtme Teknolojisi (Material Jetting).....	33
2.6 Bağlayıcı Püskürtme Teknolojisi (Binder Jetting)	34
2.7 Sac Tabakalama Yöntemi (Sheet Lamination Yöntemi).....	34
2.8 Direkt Enerji Depolama Prosesi (Directed Energy Deposition Process)	35
2.9 Ekstrüzyon Bazlı Sistemler (Extrusion – Based Systems).....	36
2.9.1 Malzeme beslenmesi	37
2.9.2 Sıvılaştırma	38
2.9.3 Ekstrüzyon	38
2.9.4 Katılaşma	38
2.9.5 Konumsal hareket	38
2.9.6 Yüzeylerarası birleşme.....	39
2.9.7 Destek oluşturma.....	39

2.9.8 EYY yönteminde kullanılan malzemeler	39
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	41
4. MATERYAL ve METHOD	49
4.1 FDM Yöntemiyle Darbe ve Çekme Numunesi Üretimi.....	49
4.2 Sürekli Fiber Takviyeli 3B numunelerin Üretimi	53
4.3 Düşen Ağırlık Darbe Testi	55
4.4 Çekme Testi.....	57
5. VERİLERİN İNCELENMESİ.....	58
6. SONUÇLAR	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ.....	75



KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BBKF	: Buharla Büyütmeli Karbon Fiber
BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CF	: Carbon Fiber
CNT	: Carbon Nanotubes
CPE	: Chlorinated polyethylene
DED	: Direkt Enerji Depolama
DLF	: Direct Laser Forming
DMD	: Direct Metal Deposition
EYY	: Eriyik Yığıma Yöntemi
FDM	: Fused Deposition Modelling
ISO	: International Organization for Standardization
LENS	: Laser Engineered Net Shaping
LOM	: Laminate Object Manufacturing
MMK	: Metal Matrisli Kompozitler
PC	: Polikarbonat
PCL	: Polikaprolakton
PEEK	: Polieter eter keton
PHA	: Polihidroksialkonat
PLA	: Polilaktikasit
PMK	: Plastik Matrisli Kompozitler
PVA	: Polivinil alkol
PVC	: Polivinil klorür
SGC	: Solid Ground Curing
SLS	: Selective Laser Sintering
SMK	: Seramik Matrisli Kompozitler
TPU	: Termoplastik Poliüretan
TYB	: Toz Yatak Birleştirme
UV	: Ultraviyole

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Cam fiberler için belirlenen simgeler ve anlamları.	19
Çizelge 3.1 : ABS ve paslanmaz çelik katkılı ABS için farklı üretim parametrelerine göre çekme dayanımı değerleri [51].	46
Çizelge 3.2 : Farklı çalışmalara göre katkılı ve katkısız ABS malzemenin farklı üretim parametrelerine göre çekme dayanımları.....	47
Çizelge 4.1 : Bu çalışmada kullanılan test parametreleri ve değişkenleri	50
Çizelge 4.2 : Farklı katman kalınlıklarına göre numunelerin üretim süreleri.....	50
Çizelge 4.3 : Çarpma hızına göre oluşan çarpma enerjisi miktarı.....	57

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kompozit malzeme çeşitleri: a)Sürekli fiber takviyeli, b) Örgü takviyeli, c)Kısa fiber takviyeli, d)Partikül takviyeli.....	15
Şekil 2.1 : a) Serbest radikalın oluşması, b)Serbest radikalın akrilik monomerle tepkimeye girmesi, c) akrilik monomerin büyümesi, d) farklı bir serbest radikalın epoksi monomerle tepkimeye girmesi, e) epoksi monomerin büyümesi.	31
Şekil 2.2 : EYY cihazının şematik gösterimi.	37
Şekil 4.1 : Düşen ağırlık darbe testi numunesi.	49
Şekil 4.2 : Kübik altbölümlü dolgu tipinde farklı doluluk oranlarına göre numune içyapısı; a) %20 doluluk oranı, b) %40 doluluk oranı, c) %60 doluluk oranı, d) %80 doluluk oranı.	51
Şekil 4.3 : Lineer dolgu tipinde farklı doluluk oranlarına göre numune içyapısı; a) %20 doluluk oranı, b) %40 doluluk oranı, c) %60 doluluk oranı, d) %80 doluluk oranı, e) %100 doluluk oranı.....	51
Şekil 4.4 : %80 doluluk oranında dolgu tiplerine göre numuneler; a)lineer dolgu tipi, b)kübik altbölümlü dolgu tipi, c) üçgen dolgu tipi, d) kübik dolgu tipi, e) tetrahedral dolgu tipi, f) eşmerkezli dolgu tipi.....	52
Şekil 4.5 : Numunelerin üretim sırasında termal kamera ile alınmış görüntüsü.	53
Şekil 4.6 : Sürekli fiber takviyeli 3B çekme numunesi için boyut ölçüleri (mm).	54
Şekil 4.7 : a) sürekli fiber takviyeli 3B çekme numune modeli, b) sürekli fiber takviyeli 3B darbe numune modeli.	54
Şekil 4.8 : a) reçine transfer borularının yerleştirilmesi ve sızdırmazlık macunu ile çevresinin kaplanması, b) numunelerin yerleştirilmesi, c)soyma kumaşının örtülmesi, d) infüzyon filesinin yerleştirilmesi, e) vakum naylonunun kaplanması, f) vakumlama ve infüzyon.	55
Şekil 4.9 : Düşen ağırlık darbe testi cihazı.	56
Şekil 4.10 : Çekme testi cihazı.	57
Şekil 5.1 : Saf ABS numune için a) kuvvet-yerdeğiştirme ve b) enerji-zaman grafikleri.....	58
Şekil 5.2 : Farklı çarpma hızlarında test edilmiş numuneler; a) 1,1 m/s b) 2,1 m/s c) 3,1 m/s d) 4,1 m/s e) 5,1 m/s f) 6,1 m/s.	59
Şekil 5.3 : Farklı çarpma hızlarında numunelerin sönmülediği enerji değerleri.	60
Şekil 5.4 : Lineer dolgu tipinde farklı doluluk oranlarına sahip numunelerin test sonrası görünümüleri; a) %20, b)%40, c)%60, d) %80, e)%100.....	60
Şekil 5.5 : Lineer dolgu tipinde farklı doluluk oranlarında numunelerin sönmülediği enerji miktarları.	61
Şekil 5.6 : Kübik alt bölümlü dolgu tipinde farklı doluluk oranına sahip numunelerin test sonrası görünümü; a) %20, b) %40, c) %60, d) %80.	62
Şekil 5.7 : Kübik alt bölümlü dolgu tipinde farklı katman kalınlığına sahip numunelerin test sonrası görünümü; a) 0,10 mm, b) 0,15 mm, c) 0,20 mm.....	62

Şekil 5.8 : Farklı katman kalınlıklarında numunelerin 6,1 m/s çarpma hızında sönümlendiği enerji miktarları.	62
Şekil 5.9 : Farklı katman kalınlıklarının mikroskopik görüntüsü; a) 0,10 mm, b) 0,15 mm, c) 0,20 mm.	63
Şekil 5.10 : Farklı katman kalınlıklarında numunelerin 4,1 m/s çarpma hızında sönümlendiği enerji miktarları.	64
Şekil 5.11 : Farklı dolgu tiplerine sahip numunelerin test sonrası görünümü; a) eşmerkezli, b) kübik, c) kübik alt bölümlü, d) lineer, e) tetrahedral f) üçgen. ..	64
Şekil 5.12 : Dolgu tiplerinin sönümlenen darbe enerjisine etkisi.	65
Şekil 5.13 : Sürekli fiber takviyeli 3B numunelerin çekme dayanımları.	65
Şekil 5.14 : Sürekli fiber takviyeli 3B numunelerin sönümledikleri darbe enerjisi miktarları.	66
Şekil 5.15 : Sürekli karbon fiber takviyeli numunenin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği.	67
Şekil 5.16 : Sürekli cam fiber takviyeli numunenin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği. ..	67
Şekil 5.17 : Test numunelerinin çarpma anındaki sönümledikleri enerji.	68
Şekil 5.18 : Sürekli fiber takviyeli 3B numunelerin test sonrası görünümü; a) saf ABS, b) karbon fiber takviyeli ABS, c) cam fiber takviyeli ABS.	68
Şekil 5.19 : Test sonrası oluşan hasarların makro görünümü a) çekme testi sonrası sürekli cam fiber takviyeli 3B numune, b) çekme testi sonrası sürekli karbon fiber takviyeli 3B numune, c) darbe testi sonrası sürekli cam fiber takviyeli 3B numune.	68

ERİYİK YIĞMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN SÜREKLİ FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Eklemeli üretim son yarım yüzyılda gelişen ve gelecek vaat eden bir üretim teknolojisidir. Nihai ürünü elde edebilmek için katman temelli üretim metodunu benimsemiştir. Son yıllarda bu konu üzerine binlerce çalışma yapılmakla birlikte halen mekanik özelliklerle özellikle de darbe dayanımı ile ilgili boşluklar bulunmaktadır. Bu çalışma da önce katman kalınlığı, doluluk oranı, dolgu tipi ve çarpma hızının kırılma mekaniği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu işlem için düşen ağırlık darbe testi uygulanmıştır. Üretim parametrelerinin araştırılması için ABS ve PLA malzemeden üretilen numuneler kullanılmıştır. Bütün numuneler Eriyik Yığıma Yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Katman kalınlığı için 0,2, 0,15, 0,1 mm katman kalınlıkları, dolgu tipleri için lineer, kübik, üçgen, eş merkezli, kübik alt bölümlü ve tetrahedral dolgu tipleri incelenmiştir. Ayrıca kübik alt bölümlü dolgusunda %20, %40, %60 ve %80 doluluk oranı, lineer dolgusunda %20, %40, %60, %80 ve %100 doluluk oranı incelenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde katman kalınlığının kırılma mekaniğine herhangi bir etkisi olmadığı görülmekle beraber darbe dayanımını arttırdığı görülmüştür. Farklı dolgu tiplerinin farklı kırılma mekaniklerine sahip olduğu ve farklı miktarlarda enerjiyi sönmülediği incelenmiştir. Son olarak doluluk oranı arttıkça malzemenin tokluğunun arttığı ve daha fazla enerji sönmülediği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın ardından vakum infüzyon yöntemi ile EYY birleştirilerek sürekli fiber takviyeli 3B numuneler üretilmiştir. Takviye malzemesi olarak cam fiber ve karbon fiber, matris malzemesi olarak ABS ve bağlayıcı olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Yeni geliştirilen üretim yöntemiyle çekme ve darbe numuneleri üretilmiş ve test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar saf ABS numune ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular cam fiberin darbe dayanımı artırdığı ancak çekme dayanımını düşürdüğü yönündedir. Karbon fiber takviyesinin ise darbe dayanımını değiştirmedeği ve çekme dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bunun sebebi katmanlar arası ve katman-fiber yapışmasının yeterli derecede sağlanamamış olmasıdır. Bu sebeple yük dengeli bir şekilde malzemeye dağılamamıştır. Ancak her iki takviye malzemesi de numunenin kırılma mekaniğini etkilemiş ve daha az hasara uğramasına sebep olmuştur.

Anahtar kelimeler: Eklemeli Üretim, Darbe Dayanımı, Eriyik Yığıma Yöntemi, Kompozit Malzemeler, Vakum İnfüzyon Yöntemi

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF IMPACT BEHAVIOUR OF CONTINUOUS FIBER REINFORCED COMPOSITES PRODUCED BY FUSED DEPOSITION MODELLING(FDM) METHOD

SUMMARY

Additive manufacturing which has been developed in the recent half century is promising manufacturing technology. It uses layer-wise manufacturing method to obtaining end product. In last years, thousand researches have been made but there are still vacancies about mechanical properties, especially impact studies. In this study, first, the effect of layer thicknesses, infill rate, infill pattern and impact speed were investigated on the fracture mechanics of 3D printed samples via drop weight impact test. The specimens were produced using Fused Deposition Modeling (FDM) Method with various infill patterns, infill rates and different layer thicknesses. PLA and ABS materials were used for the samples which investigation of production parameters. 0.2, 0.15, 0.1 mm layer thickness were examined. Linear, Cubic, Triangle, Concentric, Cubic Subdivision and Tetrahedral infill types are used. For Cubic Subdivision infill type, 20%, 40%, 60% and 80% infill rates and for linear infill type, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% infill rates were chosen for examining the effect of infill rate. As a result of the tests, it is observed that the layer thickness doesn't not affect the fracture behavior. It has been observed that different infill types affect the amount of energy absorbed and the fracture behavior in different ways. As the infill rate increases, it is found to give toughness to the part.

After this study, continuous fiber reinforced 3D samples were produced by combining FDM with vacuum infusion method. Glass fiber and carbon fiber were used as reinforcement material, ABS was used as matrix material and epoxy resin was used as binder. Tensile and impact test specimens were produced with the novel production method and tested. The results obtained were compared with the pure ABS sample. The findings show that glass fiber increases impact strength but decreases tensile strength. It has been observed that carbon fiber reinforcement does not change the impact strength and decrease the tensile strength. This is because inter-layer and layer-to-fiber adhesion is not sufficiently achieved. For this reason, the load is not distributed in a balanced form. However, both reinforcing materials affected the fracture mechanics of the sample and caused less fracture.

Keywords: Additive Manufacturing, Impact Resistance, Fused Deposition Modeling, Composite Materials, Vacuum Infusion Method

1. KOMPOZİT MALZEMELER

Birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin belirli bir arayüzey oluşturarak birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelere kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler genelde mekanik, yapısal, elektriksel ve termal özellikleri nedeniyle tercih edilir. Günümüzde kompozit malzemeler bir çok özelliği optimum şekilde bulunduracak şekilde tasarlanır. Çok geniş bir kullanım alanına sahip kompozit malzemelerin üretiminde de çok geniş bir malzeme yelpazesinden yararlanılmaktadır. Bu sebepten dolayı kompozit malzemelerin sade, tek ve kullanışlı bir açılımı yapılamamaktadır. Ancak genel olarak kompozit malzeme bütün yapıyı birbirine bağlayan sürekli bir faz halinde bulunan matris malzemesi ile genellikle belli bir yönelime sahip, matris malzemesinden daha iyi mekanik özelliklere veya istenilen diğer özelliklere sahip takviye malzemesinden oluşur.

Sonuç olarak elde edilmiş kompozit malzeme, mekanik özellikleri açısından hem matris hem de takviye malzemesinden daha dengelenmiş bir yapıya ve her iki yapı elemanından da birçok alanda daha iyi dayanım değerlerine sahiptir. Aynı zamanda kompozitlerin bu yapısı çalışma esnasında oluşan bütün yüklerin matris ve takviye elemanı arasında dağılmasını sağlayan bir yük-paylaşım mekanizması içerir.

Kompozitler genel olarak fiber ya da partikül halinde bulunan sürekli matris fazından daha rijit ve dayanıklı bir takviye malzemesi içerir. Takviye elemanlarının birçoğu iyi bir termal ve elektriksel iletkenliğe, matris malzemesinden daha düşük bir termal genişleme katsayısına sahiptir. Aynı zamanda aşınma dayanımları genel olarak yüksektir.

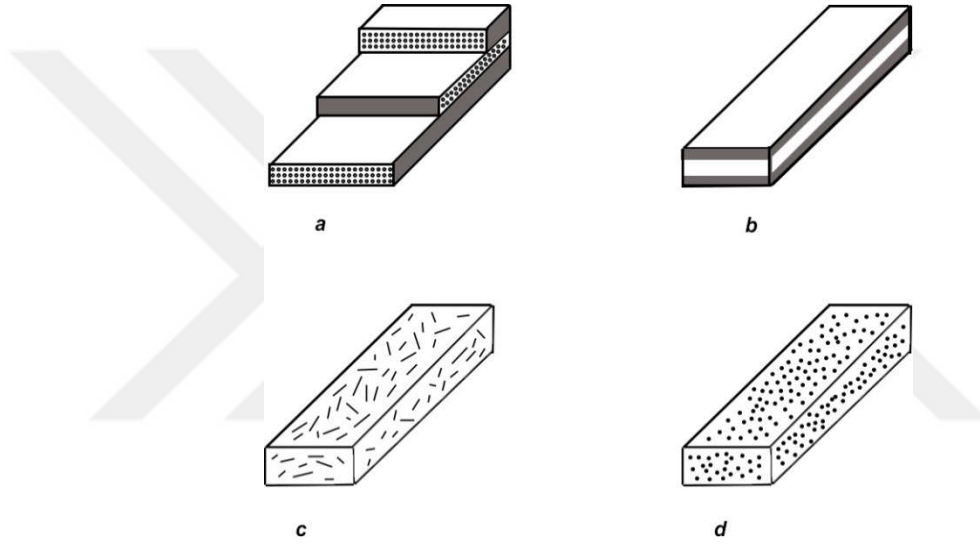
Kompozit malzemelerin türlerine göre ayırım yapılırken kompozit malzemelerin 2 temel ögesi baz alınarak yapılır. Bunlardan birincisi matris malzemesidir ve kompozit malzemeler matris malzemesine göre 3'e ayrılır. Bunlar;

- Plastik Matrisli Kompozitler(PMK)
- Metal Matrisli Kompozitler(MMK)

- Seramik Matrisli Kompozitler(SMK)

Diğer gruplandırma yönteminde ise takviye malzemesinin şekline göre ayırım yapılır. Ve bu şekilde kompozit malzemeler takviye malzemesi tipine göre şekil 1.1’de de gösterildiği üzere 4 gruba ayrılır [1]. Bunlar;

- Partikül Takviyeli Kompozit
- Kısa Fiber Takviyeli Kompozit
- Sürekli Fiber Takviyeli Kompozit
- Örgü Takviyeli Kompozit



Şekil 1.1 : Kompozit malzeme çeşitleri: a)Sürekli fiber takviyeli, b) Örgü takviyeli, c)Kısa fiber takviyeli, d)Partikül takviyeli.

Malzeme özelliklerinde farkedilebilir bir iyileşme görmek için genellikle hacimce veya ağırlıkça belli bir oranda takviye malzemesi katılır. Eğer takviye malzemesinin bütün boyutları (yükseklik, genişlik, uzunluk) birbirine kabaca eş değerlerde ise partikül olarak adlandırılır. Partikül yapısı küresel olabileceği gibi çubuk, pul, küp gibi tiplerde de olabilir. Partikül ve kısa fiberler süreksiz takviye elemanları olarak bilinirler. Çünkü bu yapıların görece düşük hacim oranlarından dolayı matris malzemesi içerisinde sürekli bir faz sağlayamazlar. Aynı zamanda bu takviye malzemeleri dolgu amaçlı da kullanılır. Her zaman mekanik özelliklerde iyileşme beklenmeyen bu kompozit çeşidinde ateşe dayanıklılık, maliyet düşürme, termal ve/veya elektriksel iletkenliğin artırılması, büzüşmenin kontrol edilmesi gibi farklı özellikler sağlanması için de takviye malzemesi eklenmektedir.

Eğer ki fiber takviyesi kompozit malzeme içerisinde boydan boya olacak şekilde veya daha kısa fiberler yapı içerisinde yoğun bir şekilde bulunarak süreklilik sağlıyorsa bu kompozit malzemelere sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme denir. Genellikle fiberler her katmanda belli bir yönelim içerisinde dizilirler. Böylece bu katmanlar istenilen yönde daha iyi mekanik özellikler sergileyecek şekilde yerleştirilebilirler. Bu açıdan bakıldığında genel olarak kompozit malzemeler hem sürekli hem de süreksiz fazlarıyla ele alındığında hiçbir zaman 3 boyutta da gerçek anlamda sürekli değildir. Ancak birçok uygulama da belirli bir düzlemde özelliklerin izotropik olması istenmektedir. Tabakalı kompozitlerde bu özellik fiber yönlenmesi ile sağlanmaktadır.

Aynı zamanda birden fazla takviye elemanı tipi bir kompozit malzemede kullanılabilir. Örneğin partikül takviyesi ile sürekli fiber takviye malzemesi aynı kompozit malzemede kullanılabilir.

Kompozitlerin ilk ve en önemli özelliği standart malzemelerden çok daha yüksek özgül dayanım ve özgül rijitliğe sahip mühendislik malzemesi olmalarıdır [2]. Kompozit malzemeler bu yüksek özgül dayanımı ve özgül rijitliği, yüksek dayanım ve modüle sahip takviye malzemelerinden sağlar. Kompozit malzemelerin özgül dayanım ve özgül rijitlik değerleri kompozit malzeme içerisindeki takviye malzemesinin hacimce oranı değiştirilerek veya farklı takviye malzemeleri kullanılarak istenildiği gibi ayarlanabilir. Ayrıca fiber takviyeli kompozitlerde fiber yönelimi kontrol edilerek dayanım belli bir yönde artırılabilir. İstenilen özelliklerdeki en yüksek değerler fiberlerin tamamının birincil yüklenme doğrultusunda dizilmesiyle elde edilir. Ancak fiber dizilim doğrultusuna dikdoğrultularda en düşük dayanım değerlerinin elde edilmesine sebep olur. Kompozit malzemenin gösterdiği bu anizotropik davranışa kullanım esnasında dikkat edilmelidir. Elbette farklı katmanlı yapılarla kompozit malzemede izotropik özelliklerin sağlanması mümkündür. Ayrıca kompozit malzemede fiber doğrultusu dışındaki doğrultulardan gelen yüklemelerle genelde iki şekilde başa çıkılır. İlk yöntemde fiberler birincil yükün yüklenildiği doğrultuda dizilirler böylece asıl yük doğrudan fiberlere yüklenir ve diğer doğrultularda kompozit malzemeye aşırı yük binmeyeceği için diğer doğrultularda önemli bir dayanıma ihtiyaç duyulmaz. Böylece hem fiber takviye elemanından hem de kompozit malzemedan tam verim alınmış olur. Diğer yöntem ise fiber takviye elemanlarının çapraz şekilde dizilmesiyle elde edilir. Böylece diğer yüklenme doğrultularındaki yüklemelerin bir

kısmı fiber takviye elemanları tarafından taşınmış olur. Her iki yöntemle de istenilen dayanım elde edilebilir ve her iki yöntem de günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır.

1.1 Kompozitlerin Tarihçesi

Plastik matrisli kompozitler ilk defa 2. Dünya Savaşı sırasında geliştirilmeye başlandı. Özellikle var olan yapı malzemelerinden özgül dayanımı ve özgül rijitliği daha yüksek malzeme elde edilmesi için yapılan çalışmalar sırasında gerçekleştirildi. Bunun yanı sıra o dönem kullanılan yapı malzemeleri olan alüminyum alaşımlarının temel sorunları olan düşük yorulma dayanımı ve korozyon direncinde de iyileştirme sağlamıştır [3]. 2. Dünya Savaşı'nın sonlarına doğru cam fiber takviyeli plastikler havacılık alanında kendine yer edinmeye başlamıştır. İlerleyen yıllarda kompozit malzemelerin yapısal dayanımında ve korozyon direncinde iyileştirmelerle 1960'lı yıllarda ticari uygulamalarda yer edinmeye başlamıştır.

Kompozit malzemelerin özellikle askeri hava araçlarında başarılı bir şekilde kullanımı ticari olarak kullanımın da güvenilirliğinin garantisini oluşturmuştur. Böylece tasarım ve üretimdeki iyileştirmelerle birlikte daha düşük maliyetli ürünler ile piyasada kendine yer edinmiştir. Öncelik le var olan parçaların 2. Derecede önemli olan kısımlarında kullanılan kompozit malzemeler güvenilirliklerinin artmasıyla daha yüksek oranda ve daha fazla alanda kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin F-15 savaş uçağının sadece %2'si plastik matrisli kompozit malzemeden oluşurken F-22 savaş uçağında bu oran %24'ün üzerindedir. Bir başka askeri hava taşıtı olan V-22 Osprey tiltrotorda kullanılan plastik matrisli kompozit miktarı kullanılan toplam malzemenin %41'inden fazladır.

Ayrıca plastik matrisli kompozitlerin en temel sorunlarından biri olan yüksek sıcaklıklarda kullanım alanında iyileştirmeler yapılmıştır. İlk kullanılan epoksi reçineler ile çalışma sıcaklığı maksimum 120°C iken ilerleyen yıllarda kullanılan bizmalemid reçinelerle 200°C'ye günümüzde ise poliimid reçinelerle 300°C'ye yakın sıcaklıklarda kullanılabilmektedir.

Seçkin malzemeler ancak gösterdiği performans yüksek maliyetini dengeler veya geçerse kullanılabilir ve yeni uygulama alanlarında kendine yer edinebilir. Karmaşık şekilli parçaların daha kolay üretimi, seri üretimin sağlanması ve malzeme fiyatlarında

düşüş ile seçkin bir malzeme çeşidi olan kompozit malzemelerin hem kullanım alanları hem de kullanım miktarı yüksek bir artış göstermiştir.

1.2 Takviye Malzemeleri

Takviye malzemelerinin temel amacı kompozit malzemeye daha yüksek seviyede dayanım ve rijitlik sağlamaktır. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde dayanım ve rijitliğin tamamı fiberler tarafından sağlanır [4]. Partikül takviyeli kompozitlerde ise partikül takviye malzemesi dayanımı ve rijitliği belli oranda artırır. Aynı zamanda grafit, cam, alümina gibi partikül takviyeleri termal ve elektriksel iletkenlik, aşınma dayanımı gibi diğer malzeme özelliklerine de katkıda bulunur.

En çok tercih edilen takviye malzeme tipi fiber ipliklerdir. Bunlarca yüzlerce ince filamentin tek bir demet olarak sarılmasıyla elde edilir. Bu fiber iplikler tek bir iplikten oluşmuşçasına kullanılabilir. Böylece bu fiber eğilip bükülebilir ve örgü amaçlı kullanılabilir. Bunun haricinde çapı 100 μ 'dan büyük fiber teller, kırılmış fiberler ve partiküller de kompozit malzemelerde sıklıkla tercih edilen takviye malzemeleridir [5]. Fiberlerin en çok kullanılan türleri; cam fiber, karbon fiber ve aramid fiberdir. Bu çalışmada cam fiber ve karbon fiber kullanıldığı için bu takviye elemanları ayrıntılı biçimde anlatılacaktır.

1.2.1 Cam fiberler

Cam fiberler günümüzde birçok amaç için kullanılabilen mühendislik malzemelerinden biridir. Bütün cam fiber çeşitlerinin temel bileşeni silikadır. Cam fiberlerin kendi temel yapılarından dolayı sertlik, opaklık, kimyasal aşınmaya karşı direnç gibi özelliklere sahiptir [6]. Ayrıca fiber yapısından dolayı esneklik, rijitlik ve dayanıma sahiptir. Bu durumda cam fiberi önemli bir mühendislik malzemesi yapmaktadır. Genel olarak cam fiberler kompozit yapımında, basılı elektrik kartlarında ve fiber kablolar gibi uzun mesafeli iletişim araçlarında kullanılmaktadır [7].

Cam fiberler üretimi için önce silika diğer mineraller katılarak istenilen bileşenlere sahip kompozisyon elde edilerek ergitilir. Ardından eriyik haldeki kompozisyon hızlı bir şekilde soğutulmuş olarak kristalleşmesi engellenerek cam fiber elde edilir. Neredeyse cam fiberlerin tamamı direkt çekme prosesi ile üretilir. Bu üretim prosesinde ekstrüde edilmiş cam fiber platinyum alaşımından bir kılavuz tarafından çekilir. Bu kılavuzda delik çapları 0,79 ile 3,17 mm arasında değişen bir kaç bin delik bulunur [8]. Halen

yüksek akışkanlığa sahip cam fiberler hızlı bir şekilde çekilerek düzgün bir çapa sahip olarak katılır.

Cam fiberler düşük maliyetli genel kullanım için ve özel amaçlı kullanım için üretilmiş olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kullanılan fiberlerin büyük bir çoğunluğu düşük maliyetli genel kullanım için olanlardır. Ayrıca cam fiberin karakteristiğini belirtmek için ASTM tarafından bir notasyon da belirlenmiştir [9]. Buna göre fiberin adının önüne koyulan harfin belirttiği özellikleri Çizelge 1.1’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 1.1 : Cam fiberler için belirlenen simgeler ve anlamları.

Sembol	Anlamı
E	Düşük elektriksel iletkenlik
S	Yüksek dayanım
C	Kimyasal dayanıklılık
M	Yüksek rijitlik
A	Yüksek alkali bileşen içeren
D	Düşük dielektrik sabiti

Bu cam fiber çeşitlerinden E tipi cam fiberler genel kullanım amaçlı olanlardır. Diğer fiber tipleri ise genel olarak özel amaçlı fiberlerde birden fazla çeşidi bulunarak kullanılmaktadır.

1.2.2 Karbon fiberler

Teknik olarak karbon fiberlerin ticari olarak kullanımın ilk örneği olarak Thomas Edison’un pamuk ve bambu liflerini karbonizasyonlu lamba filamentine hale getirmesi kabul edilse de gerçek anlamda 1950’li roketlerdeki aşınan parçaların iyileştirilmesinde kullanılmasıyla başlamıştır [10,11]. 1960 ve 1970’li yıllarda fiyat/performans oranının artmasıyla karbon fiberin kullanımında artış görülmüştür. Bu sırada birçok araştırmacı poliakrilonitril, zift, suni ipek, fenol, imidler, amidler, vinil polimerler gibi farklı malzemelerden karbon fiber üretmeye çalışmıştır. Bu malzemelerden poliakrilonitril ile en iyi karbon fiber üretilirken, zift 2. ve suni ipek 3. sırada yer almıştır. 1980’lere gelindiğinde ABD’ nin karbon fiber ihtiyacı yıllık 1000 tonu aşmıştır. 1997’e geldiğimizde ise bu miktar 16000 tona ulaşmış ve bu karbon fiber ihtiyacının %30’u uzay ve havacılık sanayii, %30’u spor malzemeleri, %30’u ticari/endüstriyel uygulamalar ve kalan %10’luk kısmı diğer uygulamaların ihtiyacı oluşturmaktadır [12].

Karbon fiberin kompozitlere sağladığı özellikleri daha iyi anlamak açısından bir kaç karşılaştırma yapmak gerekirse, karbon fiber takviyeli kompozitler 1020 çeliğinden 5

kata kadar daha dayanıklı olup aynı zamanda 5 kat daha hafiftir. Bir başka örnek olarak 6061 Al alaşımından 7 kat daha dayanıklı, 2 kat daha rijit ve 1,5 kat daha hafiftir. Karbon fiber kompozitlerin yorulma dayanımı bilinen metal ve alaşımlarından daha iyidir. Ayrıca uygun bir reçine ile kullanıldığında korozyon dirençleri yeterince iyi olabilmektedir. Bazı ortaevre-zift bazlı karbon fiberlerin termal iletkenliği bakımından 3 kat daha fazladır. Ayrıca ısıyla yumuşama veya kısmi ergime göstermediklerinden yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler. Bütün bu özellikler fiber mikroyapı tarafından sağlanır. Karbon atomları arasındaki güçlü kovalent bağ yüksek dayanım ve rijitliği sağlarken zayıf olan Van Der Waals bağları ile zayıf kayma direncinin oluşmasını sağlar ayrıca termal ve elektriksel iletkenlik verir. Karbon fiber içerisinde bulunan grafen düzlemler ne kadar büyük ve yönelimi düzgün ise termal ve elektriksel iletkenlik o kadar artar. Ayrıca mikroyapının yönelimi arttıkça fiber çekme modülü de artar. Bu yönelim plastik deformasyon veya ısıl işlem ile sağlanabilir. Bu bağlamda genelde istenilen yönelim fiberin boy eksenine paralel yani 0° olmalıdır.

Eksenel yönelim fiberin çekme modülünü belirlerken, fiber dayanımını eksenel ve enine kusurlar belirlemektedir. Kusurların boyutu ve yoğunluğu karbon fiberin dayanımını düşürmekle beraber, fiber diğer yüzlerce fiber ile kompozit için demet şeklinde kullanıldığından ortalama dayanımı çok etkilememektedir.

Karbon fiberlerin diğer fiberlerden üstün kılan en önemli özelliklerden biri yorulma dirençlerinin yüksek olmasıdır. Cam ve aramid fiberlere nazaran karbon fiberler gerilim yırtıklarından-fiber demetine uygulanan yük etkisiyle demetteki fiberlerin bir kısmının kopması- etkilenmez ve yüklemeye kaldırıldığında tamamen elastik davranırlar. 2200 °C altındaki sıcaklıklarda karbon fiberlerde sürünme gözlenmez [13]. Karbon fiberler ne kadar saf ve kristal yapıları düzgünse termal ve elektriksel iletkenlikleri o kadar yüksektir [14].

Buna karşın karbon fiberler matrisle, cam fiber kadar iyi arayüzey bağı kuramazlar. Reçineler ve eriyik metallerle yüzeyler arası iyi ıslanma gerçekleşmemesinin temel sebebi görece olarak inert fiber yüzeyidir. Bu yüzden karbon fiber üreticileri fiber yüzeyini hidroksil, karboksil ve karbonil gibi aktif kimyasallar ile işleme tabi tutar [15]. Karbon fiberler inorganik olduğu için nemden, atmosferden ve zayıf asitlerden etkilenmezken yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça oksidasyon önemli bir problem olmaya başlar.

Günümüzde karbon fiberlerle ilgili yapılan çalışmaların çoğunluğu maliyet azaltmaya yöneliktir. Maliyet azaldıkça yeni uygulamalarda ve var olan uygulamalarda kullanımı artacaktır. Kompozitler malzemeler hakkında çalışmalar ve eğitimler çok daha artmış olsa da halen metaller kadar tanınmamıştır. Diğer bir önemli konuda ilgili standartların oluşturulmasıdır. Cam fiberler için standartlaşma ile ilgili E-Cam fiber ve S-Cam fiber gibi belli türleri için bu çalışmalar yapılmışken karbon fiber için böyle bir standartlaşmaya daha gidilmemiştir. Karbon fiberlerin daha geniş çaplı uygulamalarda yer almasıyla müşteriler bu konuda standartlaşma

Isteklerinde bulunacaktır.

1.3 Matris Malzemeleri

Mühendisler kompozit yapının bileşen malzemelerinin özelliklerini iyi bilmeli ve anlamalıdır ki kullandığı uygulamada belirli şartlar altında kalışının etkisini, uygulanan yükün ve oluşturduğu etkinin kompozit yapının üzerinde nasıl bir etki bırakacağını bilsin.

Genellikle çekme dayanımı, rijitlik gibi değerler kompozit yapıda fiberler tarafından sağlanırken kullanılabilir en üst sıcaklık, tabaka içi kayma özellikleri gibi değerler matris malzemesi tarafından belirlenir.

Matris malzemesi olarak epoksi, polyester, bizmalemid, poliimid, fenolik ve termoplastik reçineler kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra metaller ve seramikler de matris malzemesi olarak kullanılabilmektedir. Bu çalışmada plastik matrisli kompozitler araştırıldığı için sadece polimer reçine ve termoplastiklerden bahsedilecektir. Çalışma içerisinde epoksi reçine kullanıldığından dolayı epoksi reçine ayrı bir başlıkta ele alınacaktır. Ayrıca çalışmada kullanılan diğer termoplastik matris malzemelerin ikinci kez anlatılmaması açısından bu kısımda değil 3B üretimde kullanılan malzemeler başlığı altında her bir termoplastik ayrı ayrı incelenecektir.

Polyester reçineler kendilerine geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Hem takviyeli hem de takviyesiz olarak kullanılmaktadır [16]. Takviyeli polyesterler genelde teknelerde, otomobillerde, yapı levhalarında ve korozyon dirençli tank ve borularda kullanılırken takviyesiz polyester bowling toplarında, kaplamalarda ve lavabolarda kullanılmaktadır. Hem fiyat uygunluğu hem de parçanın fiziksel özelliklerini etkilemeksizin farklı yöntemlerle küreleşebildiği için markette kendine yer edinmiştir.

Kürleşmiş polyester için çekme dayanımı 59 Mpa, basma dayanımı 156 Mpa iken yoğunluğu 1,22 gr/cm³'tür. %70 oranında yönlendirilmiş şekilde cam fiber eklendiğinde yoğunluk 1,96 gr/cm³'e çıkarken çekme dayanımı 10 kat artarak 611 Mpa'a ulaşmaktadır [12]. Ancak 60°C'nin üzerinde dayanım değerlerinde dramatik düşüşler yaşanmaktadır.

Bizmalemid reçineler görece endüstride daha yeni kabul görmüş bir sınıftır. Endüstride kabul görmesinin başlıca sebepleri nemli ortamlarda, yüksek sıcaklıklarda fiziksel özelliklerini koruyabilmeleri, geniş sıcaklık aralıklarında elektriksel özelliklerinin değişmemesi ve alevlenmemeleridir. Bu sebeplerden dolayı bizmalemid reçineler ileri teknoloji kompozitler ve elektronikte tercih edilir. En önemli kullanım alanlarına F-22 savaş uçağı ve Formula-1 yarış aracı örnek gösterilebilir [17]. Bazı bizmalemid reçine matrisli kompozitler 180°C'lerde yüksek mekanik özelliklerini koruyabilir. Ayrıca bazı bizmalemid reçineler 230 ile 290°C arası sıcaklıklara kadar kullanılabilir. Bizmalemidin de içinde bulunduğu poliimid reçineler genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilir. Poliimidlerin yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmesinin başlıca sebepleri yüksek sıcaklıklarda(400°C'ye kadar) termal ve termo-oksidatif kararlılıklarını korumaları, aynı şekilde mekanik özelliklerini ve yapışkanlıklarını yüksek sıcaklıklarda kaybetmemeleri ve film veya fiber şeklini alabilmeleridir. Ayrıca termoset ve termoplastik çeşitleri bulunmaktadır.

Fenolik reçineler plastik matrisli kompozit malzemelerde kullanılan başka bir termoset reçine türüdür. Genellikle ateşe karşı dirençleri, uzun süre dayanıklılıklarını korumaları ve hidrokarbon ile klorlu çözeltilere karşı dirençli oldukları için tercih edilirler [18,19].

Son olarak polisiyanüratlar epoksi reçineler ile yüksek sıcaklıkta kullanılan poliimit reçinelerinin arasındaki boşluğu dolduran reçine tipidir. Görece maliyeti yüksek olmasıyla birlikte elektronik sektöründe kendine yer edinmiştir. Bunun temel sebebi düşük dielektrik sabiti ve dielektrik kaybıdır. Ayrıca düşük termal genişleme katsayısı, kürleşirken büzülmenin az olması ve düşük nem emme kabiliyetine sahiptirler. Ancak üretim maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle kullanım alanları sınırlıdır [20].

1.3.1 Epoksi reçineler

1940'lı yılların başında eş zamanlı olarak Avrupa ev Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilmeye başlanmıştır. İlk epoksi reçineler genellikle kaplama ve kalıp parçalarında

kullanılmıştır. Birçok çeşidi bulunması nedeniyle düşük viskoziteli sıvı halden görece yüksek ergime sıcaklığına sahip katı hale kadar birçok fiziksel formda bulunabilirler. Bu durumda onları hem kompozitler için kullanılan diğer termosetlerden farklı kılar hem de çok geniş bir üretim çeşitliliği ve uygulama alanı sağlar. Epoksi reçineler genelde polimerlere göre yüksek dayanıma, düşük çekilmeye, kimyasal dirence ve düşük maliyete sahiptir. Birçok kimyasal ile kürleşebilen epoksiler aynı zamanda birçok malzemeyle iyi bir şekilde bağ kurarak yapışabilir. Bu özellikleri nedeniyle epoksiler, kompozit malzemeler için iyi birer matris malzemesidir.

Günümüzde epoksi reçineler yapıştırıcılar, kaplamalar ve kalıp malzemesi olarak yer edinmiş durumdadır. Epoksi reçineler uzay-havacılık endüstrisinde kullanılan plastik bazlı kompozitlerde istenilen özellikleri sağlanmıştır. Şimdi bu epoksi reçineler otomobilden müzik enstrümanına kadar birçok alanda kullanılmaktadır.

Termoset reçine seçilirken genellikle çekme dayanımı modülü, basma dayanımı ve modülü, çentik hassasiyeti, darbe direnci, camsı-geçiş sıcaklığı, alevlenebilirliği ve malzemeulaşılabilirliği dikkate alınır [21]. Bu bağlamda epoksi reçineler kimyasal ve mekanik özellikleri bakımından dengeli bir bileşime sahiptir.

Epoksi reçineler temel yapıtaşı çapraz bağlı bir oksijen ve 2 karbonlu bileşiğin çapraz bağlanmasından oluşan çok geniş bir termoset polimer ailesidir. Bu temel moleküldeki duyurulmamış karbonlar, diğer moleküller ile bağ yaparak epoksi reçineler üretilir. Epoksi reçinenin üretiminde en çok kullanılan madde epoklorohidrindir. Üretilen epoksi reçinelerin kullanımında dikkat edilen ilk şey camsı geçiş sıcaklığıdır. Bu sıcaklığın altında kırılğan yapı gösterirken, üstünde daha kauçuk tipi bir davranış sergiler [22]. Camsı geçiş sıcaklığının üzerinde epoksi reçinenin dayanım modülleri camsı geçiş sıcaklığının altındaki değerlerden bir kaç kat daha düşüktür. Bu bağlamda camsı geçiş sıcaklığı epoksi reçine tercihinde önemli bir etkidir. Camsı geçiş sıcaklığı genel olarak kürleşmiş epoksi reçinenin kürleşme sırasında oluşan moleküler yapısına ve çapraz bağların yoğunluğuna bağlıdır. Genellikle kürleşme sıcaklığı artırıldıkça camsı geçiş sıcaklığı yükselir ancak bu yükseliş belli bir noktaya kadar olur. Ayrıca saf reçinenin, kürleşme ajanının ve modifiyecilerin önemli etkenler olduğu unutulmamalıdır.

Kullanım sıcaklığı haricinde üretim çeşidi ve kullanılacağı yere göre farklı kimyasal ve mekanik özelliklere sahip birçok epoksi reçine vardır. Epoksi reçinelerde

kürleştirici olarak genellikle amin, amin türevleri ve anhidridler kullanılır. Kürleşme sıcaklığı 5 ile 260°C arasında değişirken, kürleşme dakikalar kadar kısa sürebileceği gibi günlerce de sürebilir.

Kürleştiriciler haricinde epoksi reçineye etki eden diğer önemli katkı malzemesi modifiyecilerdir. Bunlar reçineye özel fiziksel ve mekaniksel özellikler sağlar.

Kauçuk katkı malzemesi olarak yorulma dayanımı, esneklik ve tokluk sağlar. Ancak buna karşı dayanım ve modüllerde değerleri düşürmekte ve camsı geçiş sıcaklığını aşağı çekmektedir. Termoplastik katkı malzemeleri ise genelde kırılma tokluğunu artırmak için katılır. Termoplastikler kauçuklar gibi camsı geçiş sıcaklığına etki etmez.

Ayrıca bazı reçineler sulandırıcı olarak da kullanılır. Genellikle çok düşük viskoziteye sahip epoksiler diğer epoksi reçinelere sulandırıcı olarak katılır. Ancak bunların kullanımını termal ve mekanik özelliklerde düşüşe neden olur.

Alev geciktiriciler epoksi reçinelerde dolgu veya matris malzemesi olarak kullanılarak alevlenebilirliği azaltır. Genel olarak polimer yapıda ne kadar çok C ve O varsa o kadar yanıcı özellik gösterir. Yapıda halojenlerin veya kömürleştirici aromatiklerin bulunması alevlenebilirliği azaltır.

Epoksi reçinelere katılan bir diğer katkı malzemesi ise reaktif olmayan dolgu malzemeleridir. Özellikle takviye malzemesi olarak düşük yoğunluk, termal ve elektriksel iletkenlik, büzölmeyi azaltıcı etkiye sahip gibi belli başlı fiziksel özellikleri değiştirmek için kullanılırlar. Bu dolgu malzemeleri toz, kürecik, kısa fiber, pul, kristal filamen gibi şekillerde olabilirler. Bunlar epoksi reçineye katılırken tane karakteristiği, mekanik dayanımları, hacimce oran, epoksi ile bağ kurarak yapışılabilirliğine dikkat edilir.

Son olarak epoksilere renk vermesi amacıyla pigment veya boyalar katılabilir. Pigmentler epoksi reçine içinde çözünmezken boyalar epoksi reçine içinde çözülebilir. Ancak boyalar yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı değildir. Bunların haricinde esnekleştiriciler, plastikleştiriciler, antioksidanlar ve köpük engelleyicilerde katkı malzemesi olarak kullanılır.

2. EKLEMELİ İMALAT

2.1 Giriş

Son 50 yıla dek imalat yöntemleri iki temel başlık altında inceleniyordu. Bu iki kategori talaşlı imalat yöntemleri ve talaşsız imalat yöntemleridir. Adından da anlaşılacağı üzere talaşlı imalat yöntemlerinde nihai parçanın üretilmesi için kaba parçadan talaş kaldıran yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerin başında tornalama, frezeleme, cnc işleme ve tel erozyon gelmektedir. Bu üretim yöntemleri genel olarak seri üretime uygundur. Bu yöntemlerin diğer bir avantajı ise yüksek hassasiyetleridir. Ancak üretim sırasında oluşan talaş nedeniyle verimlilik görece düşüktür. Ve kesme takımlarının boyut ve şekillerinden dolayı karmaşık şekilli parçaların üretimi zordur.

Diğer kategori ise talaşsız imalat yöntemleridir. Bu başlık altındaki yöntemler proses içerikleri birbirlerinden çok farklı olsalarda temel ortak özellikleri nihai parça üretimi sırasında kaba parçaya şekil verirken herhangi bir talaş kaldırma işlemi yapılmamasıdır. Bu kategori altında başlıca kullanılan üretim yöntemleri döküm, haddeleme, ekstrüzyon ve preslemedir. Bu yöntemlerde genel olarak ilk maliyet yüksektir ancak seri üretime uygundur. Ayrıca döküm yöntemlerinden bir kaç hariç karmaşık şekilli parçaların üretimine uygun değildirler. Ancak talaşsız imalat yöntemlerinde metaller, plastikler ve seramikler işlenebilir ki bu da günümüzde kullanılan mühendislik malzemelerinin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Talaşlı imalat yöntemleri bu anlamda dezavantajlı olup çoğunlukla metallerle üretimi gerçekleştirir.

Genel olarak parça imalatı sırasında birden fazla üretim yöntemi birarada kullanılır. Örneklendirmek gerekirse basit bir şekle sahip metal parayı elde edebilmek için önce belirlenmiş alaşım ergitilerek hazırlanır ve döküm yöntemiyle slab olarak dökülür. Ardından bu slab haddelemede inceltilerek istenilen kalınlıkta sac elde edilir. Elde edilen sacın yüzeyi kir ve pürüzlülüğün giderilmesi için frezelenir. Ardından sac preslere gönderilerek istenilen ebatta yuvarlak pullar kesilir. Yıkamaya gönderilen pullar burada parlatıldıktan sonra bir sonraki preste istenilen şekiller pul yüzeyine

preslenerek istenilen para elde edilir. Sadece bu örnek bile üretimin genel olarak birbiri içine geçmiş karmaşık prosesler bütün olduğunu göstermektedir.

Yaklaşık yarım asır önce başlayan çalışmalarla bu üretim anlayışına yeni bir bakış açısı, yöntem getirilmiştir. Eklemeli imalat adı verilen bu yöntem günümüze kadar hız kesmeden gelişerek gelmiş ve kendisine imalat yöntemleri arasında önemli bir yedinmiştir. Öyle ki artık imalat yöntemlerinde 3. kategori oluşturmuştur.

Eklemeli imalat yöntemlerinin temelini oluşturan ve diğer üretim yöntemlerinden ayıran özellik üretilecek parçanın malzemeye malzeme eklenerek üretilmesidir. Böylece üretim sırasında hurda miktarı sifıra yakın olurken, karmaşık şekilli parçalar rahatlıkla üretilebilir. Bütün üretim tek bir proseste toplanmaktadır. Böylece önceden 3B Bilgisayar Destekli Tasarım(BDT) yazılımı yardımıyla tasarlanmış bir katı modelin üretimi herhangi bir üretim planlamasına ihtiyaç duymadan sağlanabilmektedir. Her ne kadar eklemeli üretim yöntemleri özellikle karmaşık parçaların üretimini kolaylaştırmış olsa dahi yinede eklemeli üretim yöntemlerinde üretim sürecine hâkim olmak gerekmektedir. Eklemeli üretimin çalışma prensibi BDT modelinden elde edilen verinin kullanılarak katı modelin katmanlara ayrıştırılması ve katmanın bir önceki katmanın üzerine gelecek şekilde malzeme eklenerek oluşturulmasıdır. Elbette katmanların belirli bir kalınlığı vardır ve bu yüzden üretilen parçaların boyutları gerçekte tasarlanan modelle bir değildir. Katman kalınlığı azaldıkça boyutsal hassasiyet artar ve 3B katı modele boyutsal olarak daha yakın bir ürün elde edilir. Ayrıca ilk maliyet görece olarak diğer üretim yöntemlerine göre oldukça düşüktür. Bu durum son kullanıcının bu üretim teknolojisine ulaşmasını kolaylaştırarak üretimin evlere kadar girerek kişiye özel hale gelmesini sağlamıştır. Buna rağmen kullanılan malzeme çeşitliliğinin nispeten az olması, elde edilen parçaların dayanımlarının görece düşük olması ve nihai ürünün yüzey kalitesi talaşlı imalata göre düşük olması başlıca dezavantajlarıdır. Ancak eklemeli imalat teknolojilerinin daha emekleme döneminde olduğu düşünülürse bu sorunlar zamanla çözülecektir [23].

Eklemeli üretim teknolojilerini birbirlerinden ayıran özellikler temel olarak kullanılan malzeme, katmanların nasıl üretildiği ve katmanların birbirine nasıl birleştirildiğidir. Bu özelliklerin hepsi direkt olarak üretilen nihai ürünün mekanik özelliklerini, boyutsal hassasiyetini, üretim hızını ve maliyetini etkileyen faktörlerdir.

Bu çalışmada da eklemeli üretim yöntemlerinden ekstrüzyon bazlı bir proses olan FDM(Fused Deposition Modelling-Eriyik Yığıma Yöntemi) kullanılarak üretilen numuneler inceleme konusu olarak seçilmiş veya bu yöntemin yardımıyla üretilen sürekli fiber takviyeli 3B numuneler test edilmiştir. Bu bağlamda önce eklemeli üretim yöntemlerinin gelişim ortak bileşenleri ele alınacak ve gelişim sürecinden bahsedilecek ardından üretim yöntemleri sınıflandırılarak temel yöntemler kısaca anlatılacak ve bu çalışmanın konusu olan FDM yöntemi ayrıntılarıyla ele alınacaktır. Bu bağlamda eklemeli üretim prosesleri genel olarak 8 ana adımdan oluşur.

2.1.1 Ürünün tasarımı ve 3B modellenmesi

Bütün ürün geliştirme prosesleri, ürünün ne işe yarayacağı ve nasıl görüneceği fikri ile başlar. Ürünün ihtiyaca göre tasarlanması gerekmektedir ve bu tasarım yazı, 2B çizim gibi farklı şekillerde sunulabilir. Eklemeli üretim ile üretilecek parçanın ise 3B BDT yazılımı ile katı model olarak tasarlanması gerekmektedir.

Diğer üretim yöntemlerinde genel olarak üretim yönteminden kaynaklı olarak 3B katı model tasarımını sınırlayan etmenler vardır. Ancak eklemeli üretimde bu sınırlamalar yok denecek kadar azdır. Bu durumda tasarımcıya büyük bir kolaylık ve imkan sağlamaktadır.

2.1.2 Katı modelin .stl formatına dönüştürülmesi

Günümüzde bütün eklemeli üretim teknolojileri .stl formatına sahip dosyaları işlemektedir. .stl formatı haricinde .amf, .obj, .x3d, .3mf ve .vrmf formatları da kullanılmaktadır [24]. Ancak .stl en eski ve yaygın formatlardan biri olduğu için ve ayrıca bu çalışmada da .stl formatı kullanıldığı için bütün tanım ve süreçler .stl dosya tipi temel alınarak anlatılacaktır. Oluşturulan katı model direkt olarak 3B yazıcıya aktarılamaz. Bunun yerine önce .stl dosya tipinde kaydedilir. .stl dosya tipi katı modelin yüzeylerinin geometrik olarak üçgenlere ayrılması ve bu üçgenlerin, yüzey normalleri ile birlikte kaydedilmesinden oluşur.

2.1.3 Katı modelin .stl dosyasının 3B yazıcıya aktarılması ve düzenlenmesi

Teknik olarak .stl tipi katı model dosyası direkt olarak 3B yazıcıya aktarılarak üretimi yapılabilir. Ancak genelde 3B yazıcı üzerinde, .stl dosyasında kısmi değişiklikler

yapılarak yazdırılır. Bu değişiklikler arasında modelin boyutunu, basım yönünü, basım konumunu değiştirme gibi parametreler vardır [25].

2.1.4 3B yazıcının hazırlanması

.stl dosyası 3B yazıcıya aktarıldıktan sonra yazıcının üretim için hazırlanması gerekir. Genel olarak 3B yazıcılar mekanik olarak hazır olmakla beraber üretilecek parçanın katman kalınlığı, malzemesi, malzeme parametreleri gibi veriler bir yazılım aracılığıyla 3B yazıcıya aktarılır [26]. Bu işlem günümüzde kullanılan bir çok yazılımda 3B modelin düzenlenmesi ile birlikte yapılmaktadır. Ayrıca 3B yazıcıda modelin üretimi için yeterli malzeme bulunup bulunmadığı ve diğer mekanik kontroller bu aşamada yapılır.

2.1.5 Üretim

3B yazıcı çalıştırılarak üretime başlanır. Günümüzde 3B yazıcıların hepsi otomatik üretim yapmaktadır. Üretim sürecinde herhangi bir hataya rastlanılmadığı sürece üretime devam edilir. 3B model katman katman bütün parça tamamlana kadar üretilir.

2.1.6 Modelin 3B yazıcıdan çıkarılması ve temizlenmesi

Teknik olarak 3B yazıcıdan çıkarılan parça nihai üründür ve kullanıma hazırdır. Ancak bazı üretimlerde destek ve/veya radye kullanılarak üretim yapılır. Bu tarz durumlarda destek ve/veya radyenin modelden ayrılması gerekir. Ayrıca bazı üretim yöntemleri üretim malzemesi olarak toz malzeme kullanır. Bu durumda üretilen parçanın üzerindeki toz temizlenir.

2.1.7 Son işlemler

3B yazıcılarda üretilen parçalar gerekli görüldüğü takdirde yüzey parlatma veya yüzey kaplama işlemine tabi tutulabilir. Ayrıca bazı 3B üretim yöntemlerinde parçanın istenilen özelliklere sahip olabilmesi için termal veya kimyasal bir son işleme tabi tutulur.

2.1.8 Kullanım

Üretilen, temizlenen ve son işlem uygulanan parça artık kullanıma hazırdır. Ancak kullanım sırasında dikkat edilmesi gereken bir husus mekanik özelliklerin konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçalara göre farklı olacağıdır [27].

2.2 Eklemeli Üretimin Tarihçesi

Eklemeli üretim üzerine çalışmalar 1950'lerin ortalarında başlamış olmakla birlikte gerçek anlamda geliştirilmesi bilgisayar, lazer ve kontrol sistemleri gibi teknolojilerin desteğiyle 1980'lerde olmuştur. Bu teknoloji ile ilgili ilk patentler 1984'te Japonya, Fransa ve ABD'de alınmıştır. Ancak sadece ABD'de alınan patentle Charles Hull tarafından ilk eklemeli üretim firması olan 3D Systems kurulmuştur. Bu firmanın ticarileştirdiği yöntem stereolitografi(stereolithography) yöntemidir. 1986 yılında ise 3 firma daha kurulmuştur. Bunlar LOM(Laminate Object Manufacturing) teknolojisini kullanan Helisys, SGC(Solid Ground Curing) teknolojisini kullanan Cubital ve SLS(Selective Laser Sintering) teknolojisini kullanan DTM'dir. Bu teknolojilerden sadece SLS günümüzde kullanılmaktadır. 1989 ise Scott Crump FDM'in patentini alarak Stratasys firmasını kurdu.

Günümüze kadar birçok eklemeli üretim yöntemi geliştirilmiştir. Bunların bir kısmı başarılı olup ticarileştirilebilmiştir. Eklemeli üretim teknolojilerinde alınan ilk patentlerin lisans sürelerinin dolmasıyla beraber 2010 yılından beri eklemeli üretim konusundaki çalışmalar hız kazanmıştır. Bununla beraber 2009 yılında ASTM altında kurulan F42 komitesi ve ISO tarafından standartlaşma çalışmaları başlamıştır [28].

2.3 Tank Fotopolimerizasyon (Vat Photopolymerization)

Işınım ile kürleşebilen sıvı reçine veya fotopolimerleri kullanarak üretim yapan eklemeli üretim prosesidir. Genellikle UV ışınları kürleşme için kullanılır. 1960'ların sonuna doğru geliştirilmiş fotopolimerler günümüzde özellikle kaplama ve matbaa başta olmak üzere birçok alanda kendine yer edinmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi fotopolimerleri kullanacak Hull tarafından geliştirilen ilk eklemeli üretim yöntemi stereolitografidir.

Işın, malzeme üzerine lazer tarayıcı ile aynı anda sadece bir noktadan geçerek tarayabileceği gibi maskeleme yöntemi ile aynı anda bütün yüzeye uygulanabilen çeşitleri de bulunur. Ayrıca bir başka yöntemde ise daha hassas üretim için iki ışın kaynağının odak noktası birleştirilerek noktasal kürleşme yapacak şekilde kullanılır [29].

Fotopolimerler 1960'da geliştirilmeye başlanmış ve özellikle elektronik endüstrisinde kullanımının yaygınlaşmasıyla ar-ge çalışmaları hız kazanmıştır. Fotopolimerlerin uy,

x-ışınları, gama ışınları, görünür ışık veya elektron ışınları ile kürleşebilen türleri mevcuttur. Fotopolimerler çapraz bağlı bir yapıya sahiptir. Yani polimer molekülleri lineer ya da dallı bir yapıda değil, birbiriyle bağlı şekildedir. Bu yüzden fotopolimerler termoset malzemelerdir. Diğer bir deyişle sıcaklıkla eritilip tekrar kullanılamazlar. Eklemeli üretimde ilk polimerler akrilik bazlı idi. Ancak akrilik bazlı fotopolimerlerin %5-20 arası büzüşme göstermesi ve üretim sırasında bu büzüşmeden dolayı parçanın deforme olması nedeniyle sebebiyle dayanım değerleri düşük çıkmıştır [30]. Bu sorunların giderilmesi için epoksi bazlı fotopolimerlere yönelme olmuştur. Ancak epoksi reçinelerin kürleşme hızının düşük olması, kürleşen parçanın kırılabilirliği ve neme karşı hassas oluşu epoksi reçinelerin dezavantajlarıdır. Bu sebeple günümüzde kullanılan eklemeli üretim fotopolimerleri içerisinde bir miktar akrilik reçine bulduran epoksi reçinelerdir. Böylece parça için gerekli dayanım sağlanırken kürleşme için yeterli hız ve hassasiyet sağlanmış olur.

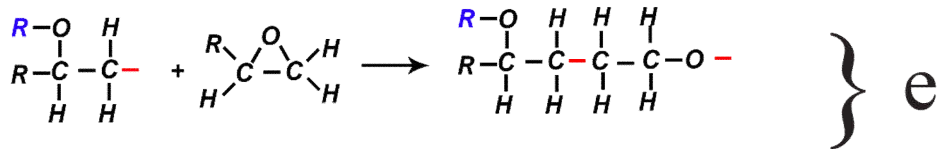
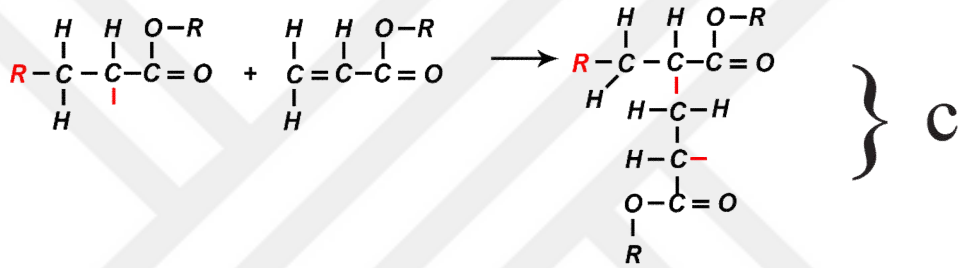
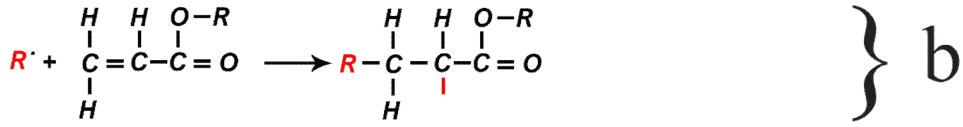
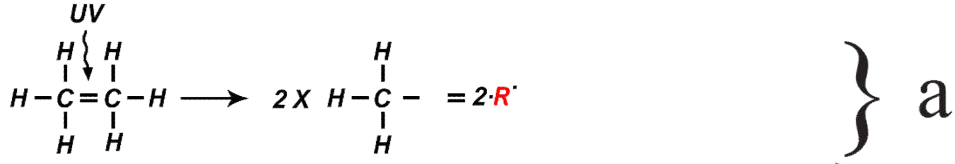
Şunu belirtmek gerekir ki; fotopolimerler sadece sıvı monomerlerden oluşmaz. İçlerinde fotobaşlatıcılar, dengeleştiriciler, reaktif seyrelticiler, yumuşatıcılar da bulunur. Kürleşme, uv ve ya başka bir ışınla sağlanan enerjiyle aktifleşen fotobaşlatıcıların monomerler ile tepkimeye girerek uzun, çapraz bağlarla bağlı büyük polimerler oluşturmasıyla gerçekleşir. Günümüzde en sık rastlanan fotopolimerizasyon teknikleri iki tanedir. Akriliklerde kullanılan serbest radikal fotopolimerizasyonu ile epoksilerde kullanılan katyonik fotopolimerizasyondur. Bu yöntemleri birbirinden ayıran polimerizasyon sürecini başlatan elemanlardır. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere akrilik monomerde karbonların çift bağı açılarak epoksilerde ise C-O-C halkası açılarak polimerizasyon gerçekleşir.

Tank içerisinde bulunan sıvı fotopolimer ışınla kürleştirilir. Ardından ışının odak noktası bir katman kalınlığı yukarı kaydırılarak veya üretim tablası bir katman kalınlığı aşağı hareket ettirilerek ikinci katmana geçilir. Tekrar ışınla katman kürleştirilir. Parça tamamlanana kadar işlem devam eder.

2.4 Toz Yatak Birleştirme Prosesi (Powder Bed Fusion Process)

TYB ilk ticarileşen eklemeli üretim yöntemidir. Bu yöntem toz halindeki malzemenin sinterlenmesi, üzerine yeni bir toz katmanı eklenmesi ardından bu katmanın alt katmanla sinterlenerek birleşmesi şeklinde ilerleyen bir prosesdir. Bu yöntemde partiküllerin ve katmanların birbiriyle birleşmesi için bir ısı kaynağına ihtiyaç duyar.

Bu birleşme tozların kısmı ergiyip birleşmesi şeklinde olur ve bu ergime için gerekli ısı genellikle lazer ile sağlanır. Birçok malzemenin toz halinde hammadde olarak kullanılabilmesinden dolayı polimer, metal ve seramik türünde birçok malzeme bu şekilde işlenebilir.



Şekil 2.1 : a) Serbest radikalın oluşması, b) Serbest radikalın akrilik monomerle tepkimeye girmesi, c) akrilik monomerin büyümesi, d) farklı bir serbest radikalın epoksi monomerle tepkimeye girmesi, e) epoksi monomerin büyümesi.

Üretim için malzeme tozu üretim tablasına ~0.1 mm kalınlıkta serilir. Oksidasyonun engellenmesi için kapalı ortamda ve/veya inert gazlar eşliğinde toz belli bir sıcaklığa ısıtılır. Böylece hem lazerle ergitme için daha az enerji harcanmış olur hem de katmanın soğuması sırasında termal sebeplerden dolayı çarpılmayı engeller.

Toz serilip ön ısıtıldıktan sonra lazer, ilgili modelin istenilen katman dilimini tozu ergitip birleştirerek oluşturur. Katmanın etrafındaki toz haznede durarak destek yapısı

görevi görür. Katman tamamlandıktan sonra yapı tablası bir katman kalınlığı aşığı iner ve hazne tekrar toz doldurulur. Lazer yeni katmanı toz üzerine işler. İşlem parça bitene dek tekrar eder. Parça tamamlandıktan sonra kontrollü soğutularak hazır hale getirilir.

TYB yönteminde başta polyamide 11 ve polyamide 12 olmak üzere PEEK, PLA ve PCL polimerleri üretim malzemesi olarak kullanılmaktadır. Metaller olarak ise Al Alaşımları, Ti Alaşımları, paslanmaz ve takım çeliklerinin bir kısmı üretim malzemesi olarak kullanılabilir. Bunun haricinde karbür, nitrür ve metal oksitlerin bir kısmı PBF için uygundur.

PBF prosesinde tozların birleşme mekaniğı 4 farklı şekilde gerçekleşebilir [31]. Bunlardan ilki katı faz sinterlemedir. Katı faz sinterlemenin itici kuvveti toplam serbest enerjinin minimuma düşürülmesidir.

Bu proseste, süreç ilerledikçe sinterleme hızı düşer. Partikül boyutu küçüldükçe boyun oluşturma ve birleşme daha hızlı olur. Kimyasal sinterleme ise birbiriyle ve/veya atmosferik gazlarla bağ yapabilen tozlarda görülür. Seramik malzemelerin sinterlenmesinde başlıca rol oynar. Örneğın SiC atmosferik ortamda sinterlendiğinde SiO₂ de oluşarak SiC ve SiO₂ birbirine bağlanarak kompozit malzeme oluşturur.

3. mekanizma ise sıvı faz sinterlemesi ve kısmi ergimedir. Bu işlem için malzemeye ergiyip katılarak bağlayıcı görevini üstlenecek bir malzeme katılabilir. Düşük ergime sıcaklığına sahip metaller, ötektik olmayan alaşımlar ve plastiklerde ise bağlayıcıya ihtiyaç duyulmaz. Bağlayıcılar ayrı bir toz olarak, kompozit (asıl malzeme ile bileşik halinde) veya partikül kaplaması olarak katılabilir. Bu yöntemlerde genel olarak porozite önemli bir sorundur. Ayrıca parça bu porozitenin azaltılması için ısı işleme tabi tutulduğunda parçanın alt kısımlarının üst kısımlara göre daha yoğun olduğu görülür. Bunun sebebi kısmi ergime sırasında yerçekiminin etkisiyle önce alt kısımlardaki porozitenin dolmasıdır.

Son olarak yüksek yoğunluklu ve katmanlar arası bağın kuvvetli olması için tam ergitme yöntemi kullanılabilir. Genellikle mühendislik alaşımları ve yarı-kristal polimerlerde tercih edilir.

Kullanılan birleştirme mekaniğı hangisi olursa olsun sinterleme üretim içerisinde önemli yan etkilere sahiptir. Bunlardan ilki yüksek sıcaklık nedeniyle kullanılmayan tozun sinterleşmesi ve topaklanmasıdır. Bu durum tozun tekrar kullanımında boyut hassasiyeti gibi sıkıntılara yol açmaktadır. Ayrıca bu sinterleme durumu parçanın

etrafında da gerçekleşerek parçanın dışında çeper oluşturur. Böylece parça büyür ve istenilen boyut hassasiyetinin dışına çıkılabilir.

TYB yönteminde üretimle ilgili temel parametreler lazer gücü, odak boyutu, lazer atım frekansı ve süresi, toz boyutu, katman kalınlığı, tarama hızı ve deseni ile üretim haznesinin sıcaklığıdır.

2.5 Malzeme Püskürtme Teknolojisi (Material Jetting)

1980'lerde geliştirilmeye başlanan bu teknoloji ile polimer, seramik ve metal parçaların üretimi gerçekleştirilmektedir. İlk verimli çalışmalar farklı balmumu çeşitleri (mikrokristalli petrol balmumu, kandelilla balmumu) ile yapılmıştır. Son dönemlerde ise metakrilat reçineler ve üretan akrilatlarla üretim yapılabilmektedir.

Seramiklerde ise alümina ve zirkonya ile çalışılmış ancak gözenekliliği ve birleşmeyi sağlamak için bağlayıcıların giderilip sinterleme yapıldığında yüksek miktarda hacimce küçülme yaşanmıştır. Alüminyum, bakır ve kalayda malzeme püskürtme yöntemiyle parça üretimi için geliştirilen metallerdir [32].

Bu yöntem sıvı haldeki malzemenin sürekli veya kesikli halde yüzeye püskürtülerek katmanın oluşturulması ve bu katmanın katılarak bir sonraki katmana altlık oluşturması şeklinde çalışır. Bu yöntemin temel sorunlarından ilki kullanılacak malzemenin sıvı hale getirilmesidir. Metal veya polimerse ergitilerek, seramik ise bir çözücü hazırlanarak bu işlem yapılır. İkinci temel sorun püskürtülen damlacıkların istenilen boyut ve şekilde olmasıdır. Malzemede yapılacak küçük değişiklikler (katkı maddesi ekleme, viskozitesini değiştirme vs.) damla yapısını direkt etkileyerek prosesin tekrar düzenlenmesine yol açacaktır. Üçüncü temel sorun ise bu damlacıkların yüzeyde birikmesinin kontrol edilmesidir. Örneğin damlacıklar yüzeye çarptığında küçük parçalar asıl damlacıktan ayrılıp etrafa saçılıyorsa istenilen üretilen hassasiyeti sağlanamayabilir. Püskürtme işlemi sürekli (continuous stream) veya kesikli (drop-on-demand) şeklinde olabilir. Sürekli püskürtmede nozula düzenli bir şekilde sıvı beslemesi yapılır. Kesikli püskürtmede ise istek üzerine anlık olarak damlalar oluşturulur. Bunun için ısıtıcı veya piezoseramik malzeme kullanılabilir [23].

2.6 Bağlayıcı Püskürtme Teknolojisi (Binder Jetting)

Bu yöntemde üretim tablasında bulunan tozun üzerine bağlayıcı püskürtülerek modelin ilk katmanı basılır. Ardından besleyici bir hazne ve merdane yardımıyla ilk katmanın üzerine istenilen katman kalınlığında toz doldurulur. Bağlayıcı püskürtülerek sıradaki katman yazdırılır. Bu işlem parça tamamlanana dek tekrar eder. Genellikle parça tamamlandıktan sonra bir süre daha üretim tablasında bekletilerek bağlayıcının etkisini sağlamlaştırması ve modele dayanım vermesi sağlanır. Ayrıca parça çıkarılıp temizlendikten sonra da ikinci bir bağlayıcı emdirilerek mukavemeti daha fazla artırabilir.

Genellikle alçı bazlı geliştirilen malzemeler kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak kullanılan malzemeler ise su bazlıdır. Üretilen parçalar genel termoplastiklere göre daha rijit olmakla beraber dayanımları düşüktür. Ayrıca polimer bağlayıcı kullanılarak bronz ve 420 paslanmaz çeliği ile de üretim yapılabilmektedir [33]. Üretim yapıldıktan sonra parçaya 3 kademeli ısıtım işlemi uygulanır. Önce düşük sıcaklıkta polimer bağlayıcı giderilir ardından sinterleme yapılır. Böylece parça yaklaşık %60 yoğunluğa sahip olur. Son olarak bronz infiltrasyon gerçekleştirilerek parça %90-95 yoğunluğa ulaştırılır. Inconel 625 (%20 Cr, %5 Fe, %10 Mo, % 4 Nb+Ta içeren Ni alaşımı) ile üretilen parçalar sinterlemeyle %99 yoğunluğa ulaşabilir [34]. Ayrıca seramik malzemeler üzerinde de çalışmalar yapılmaktadır.

Bu yöntemin temel avantajları renkli üretim sağlanması ve yazıcı başlıktaki nozul sayısı artırılarak üretim hızının yükseltilebilmesidir. Ancak bağlayıcı-malzeme uyumu nedeniyle kullanılabilen malzeme sınırlıdır. Ve günümüzde kullanılan malzemelerin dayanım değerleri oldukça düşüktür.

2.7 Sac Tabakalama Yöntemi (Sheet Lamination Yöntemi)

Bu yöntemin temelinde 3B modelin dilimlenerek oluşturulan katmanlarının ayrı ayrı oluşturulup birbirlerine yapışkanla, termal veya farklı yollarla birleştirilmesi bulunur. Bu yöntem birçok eklemeli üretim yöntemine göre daha erken bir tarih olan 1991 yılında ticarileşmiştir. Yöntem malzeme olarak plastik, metal, seramik ve kâğıtları kullanabilir. Yöntem ilk geliştirildiğinde kasap kâğıdı kullanılmıştır. İlk geliştirilen yöntemde katman malzemesi bir alt katmana yapıştırılıp ardından lazer veya mekanik bıçak ile katmanın çizgilerinden kesiliyordu. Arda kalan kısım ise destek malzemesi

olarak üretim tablasında bırakılıyordu. İlerleyen yıllarda PVC saclar ile malzeme çeşitliliği artırıldı ve günümüzde metal ve seramiklerin de bulunduğu çok daha geniş bir malzeme yelpazesine sahiptir [35]. Genel olarak bu yöntemin avantajları düşük kalıntı gerilmesi, nihai üründe az miktarda çarpılma ve büzüşme olması kullanılan malzeme çeşidinin çok olmasıyla görece ilk yatırım maliyetinin az olmasıdır. Ancak katman kalınlığının her katmanda eşit olmayışı, boyut hassasiyetinin düşüklüğü, mekanik ve termal özelliklerin yapıştırıcı nedeniyle homojen olmayışı dezavantajlarıdır [36].

Özellikle iç ayrıntısı veya boşlukları olan parçaların üretiminde yaşanan zorluklar nedeniyle önce katman kesilip ardından yapıştırılması yöntemiyle üretim çalışmaları yapılmıştır. Bu yöntem ayrıca bir alt katmanın kesilmesi riskini de ortadan kaldırır.

Özellikle katmanların birbiriyle yapışması için birden fazla yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan başlıcaları termal bağlanma, vida ile sıkıştırma, ultrasonik dikme yöntemleridir. Ayrıca seramik ve/veya metal partiküllerin bulunduğu bantlarla üretim yapıp ardından sinterlenerek nihai parça elde edilmektedir.

2.8 Direkt Enerji Depolama Prosesi (Directed Energy Deposition Process)

Bu yöntemi diğer eklemeli üretim yöntemlerinden ayıran noktası malzemenin üretim tablasında hazır bulunmayıp, tablaya bir besleyici ile üretim anında aktarılmasıdır. Yöntem gerekli enerjiyi sağlayarak kullanılacak malzemenin eritilerek biriktirilmesi esasına dayanır. Plastik, seramik ve metal malzemeler kullanılabilirle beraber en çok metaller tercih edilir. Genellikle malzemeyi eritmek için ısı kaynağı olarak lazer veya elektron ışınları kullanılır. Malzeme ise ortama toz veya tel şeklinde eklenir. Yöntem teknik olarak lazer kaplama ve plazma kaynak ile aynıdır. Ancak bu yöntemde tamamıyla yeni bir parça üretilir.

Günümüzde eklemeli üretim sektöründe birçok firma bu teknolojiyi kullanarak LENS, DLF, DMD gibi kendi yöntemlerini geliştirmiştir [37-39]. Hepsi aynı temel yapıyı kullanmakla beraber lazer özellikleri, nozul hareket sistemleri, toz ve inert gaz besleme sistemlerinde farklılıklar vardır. Bu teknoloji ile üretilen parçaların mikroyapısı toz yatağı teknolojisinde lazer kullanılan proseslerle üretilen parçaların mikroyapısına benzerdir. İşlem sırasında tam eritme yapıldığından parçanın yoğunluğu yüksektir. Ayrıca lazer özellikleri (yoğunluğu, derinliği, odak çapı vs.) değiştirilerek mikroyapı

değiştirilebilir. Yine tarama açısı değiştirilerek malzemenin özelliklerinin mümkün olduğunca izotropik olması sağlanabilir. Tarama açısının değiştirilmesi aynı zamanda kalıntı gerilmelerinin oluşmasını da azaltır.

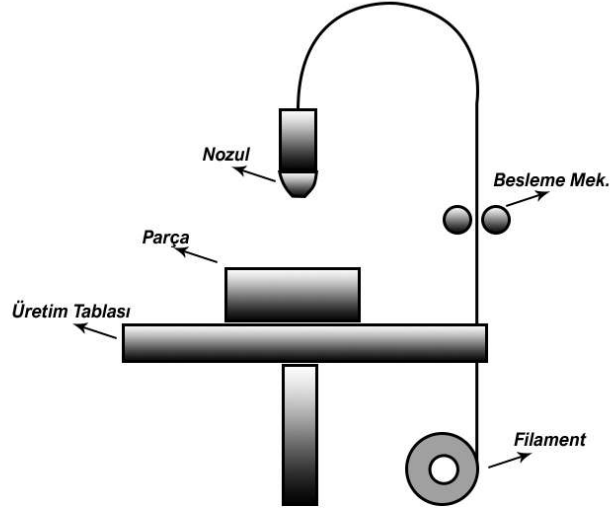
Kullanılan malzemenin termal iletkenliğinin yüksek ve ışını yansıtma kabiliyetinin düşük olması üretimi kolaylaştırır. Bu yüzden altın ile bazı Cu ve Al alaşımları üretim için kullanılamaz. Seramikler ise hem ergitme sıcaklıklarının çok yüksek olması hem de ani soğuma sırasında çatlama nedeniyle pek tercih edilmez. Bunun yerine Ti/TiC gibi kompozit şeklinde üretim tercih edilir. Aynı zamanda üretim sırasında farklı malzemelerden gönderilen toz oranları değiştirilerek parça içinde malzeme değişikliklerine gidilebilir.

2.9 Ekstrüzyon Bazlı Sistemler (Extrusion – Based Systems)

Eklemeli üretim yöntemleri arasında en çok tercih edilen ve bu çalışmada da kullanılan EYY yöntemini de barındıran, DED yöntemlerine benzer üretim yöntemleridir. DED yöntemleri ile ortak noktası üretilecek parçanın hammaddesi üretim tablasında bulunmaz, nozul aracılığıyla üretim tablasına parça üretilirken aktarılır. Buradaki önemli ayrıntılardan biri DED yöntemlerinde nozuldan çıkan malzeme katı iken ekstrüzyon bazlı sistemlerde yarı katı haldedir. Malzeme nozuldan çıktıktan sonra üretim tablasına yazdırılır ve o şekilde tamamen katılaşır. Ayrıca bir alt katmanla soğuma sırasında bağ kurarak birleşir. İlgili katman tamamlandıktan sonra ya üretim tablası bir katman aşağı iner ya da nozul bir katman kalınlığı yukarı çıkar.

Ekstrüzyon işlemi genellikle malzemeyi ısıtarak gerçekleşir. Böylece malzeme istenilen faz halinde tutulabilir. Yöntem klasik polimer ekstrüzyon yöntemine benzer olmakla beraber temel farkı Şekil 2.2’de gösterildiği üzere ekstrüderin(nozul) hareketli ve dikey konumda olmasıdır.

Bir başka faz değişimi (yarı-katı halden katılaşma) için uygulanan yöntem ise kimyasal değişimdir. Bunun için kuruyan veya havayla tepkimeye giren malzemeler kullanılır. Özellikle biyomalzemelerde bu yol tercih edilir. Günümüzde daha çok ekstrüzyon bazlı EYY yöntemi tercih edilmektedir.



Şekil 2.2 : EYY cihazının şematik gösterimi.

Yöntemin temel bileşenleri sırasıyla ele alınacak olursa, süreç şu şekilde işler;

1. Malzemenin nozula beslenmesi
2. Malzemenin sıvılaştırılması
3. Ekstrüzyon
4. Katılaşma
5. Önceden tanımlanmış yollara göre katmanın yazdırılması (Konumsal ve Yol Kontrolü)
6. Katmanların Birleşmesi
7. Destek Kısımlarının Oluşturulması

Bu çalışmada da EYY yöntemi kullanıldığı için bu başlıkların her biri ayrıntılı şekilde incelenecektir.

2.9.1 Malzeme beslenmesi

Ekstrüzyon bazlı sistemlerde kullanılacak malzeme genellikle üretim sırasında sürekli bir şekilde nozula beslenir. Malzeme toz veya pelet şeklinde olabilmekle beraber bir çok ticari makinede filament tercih edilir. Filamentin nozula beslenmesi genellikle mekanik baskı ile sağlanır. Bu baskı aynı zamanda malzemenin nozula girişi ve yarıkatı halde ekstrüde edilerek tablaya yazdırılması içinde yeterli olmaktadır.

2.9.2 Sıvılaştırma

Ekstrüzyon işlemi için malzemenin katı halden viskozitesi düşük yarı katı-sıvı hale geçmesi gerekmektedir. Bu işlem için genellikle nozul başlığı içinde bulunan ısıtıcı bobinler kullanılır. Isıtılarak ergiyen malzeme ekstrüzyon için nozul ucuna aktarılır. Bu işlem sırasında sıcaklık sürekli kontrol altında tutulması için başlığa ısı sensörleri yerleştirilir.

2.9.3 Ekstrüzyon

Nozulun ekstrüde olan filamentin şeklini ve boyutunu belirler. Bu yüzden nozul ucu açıklığı aynı zamanda ayrıntı hassasiyetini de belirler. Daha geniş nozul ucu açıklığı arttıkça çizgi kalınlığı artarak üretim hızını artırır ancak boyutsal hassasiyet azalır. Aynı zamanda nozul çapından daha düşük kalınlıkta ekstrüzyon olamayacağından nozul çapı x-y doğrultusundaki hassasiyeti de belirler. Ekstrüzyon sırasında malzeme akışı; nozul geometrisi, malzemenin viskozitesi ve uygulanan basınca bağlıdır.

2.9.4 Katılaşma

Malzeme üretim tablasına ekstrüde olduktan sonra şeklini ve boyutunu mümkün olduğunca korur. Ancak unutulmamalıdır ki yer çekimi, yüzey gerilmesi ve soğumanın etkisiyle değişiklikler meydana gelebilir. Ayrıca eğer malzeme jel şeklinde ise kuruma sırasında küçülebilir ve gözenekli yapı oluşmasına yol açabilir. Diğer bir sorunda, soğuma eğer düzenli değilse malzeme soğurken oluşan küçülmelerin bölgelerde farklılık göstermesi nedeniyle çarpılabilir. Bu durumun önlenmesi için katılaşma süresince ortam sıcaklığının kontrol edilmesi gerekmektedir.

2.9.5 Konumsal hareket

Bir çok eklemeli üretim teknolojisinde olduğu gibi ekstrüzyon bazlı sistemlerde de her bir katman bilgisi ayrı ayrı saklanır. Bu katman bilgisine göre başlık hareket ederek ilgili katmanı ekstrüde ederek yazar. Ancak üretim sırasında başlık hareket halinde olduğu için ekstrüzyon hızının hareket hızıyla bağlantılı şekilde artması veya azalması gerekmektedir.

Nozul başlığını hareket ettirmek için genellikle standart düzlemsel hareket sistemi kullanılır. Sistemin hareketi kayışla tahrikle veya aktarma vidası ile sağlanır. Sistemi

hareket ettirmek için kullanılan motorlar hem gerekli hareketi sağlayacak hem de ani yön ve hız değişikliklerine geri tepme yapmaksızın cevap verebilecek güçte olmalıdır.

Hızdaki ani değişiklikler malzeme akışını etkileyeceği için genel olarak önce katmanın dış hattı yavaşça yazdırılır. Ardından katman iç kısmı istenilen desen tipinde daha yüksek bir hızda yazdırılır. Böylece önce dış hattı yapıldığı için boyut hassasiyeti ve çizgi taşması sorunu giderilmiş olur. Desen tipleri kullanılarak üretilen parçanın belli doğrultularda daha dayanıklı olması sağlanabilir. Ayrıca basım sırasında çizgiler kısmen birbiri üzerine binerek boşluklu yapının azaltılması sağlanır.

2.9.6 Yüzeylerarası birleşme

Ekstrüzyon sonucu malzemenin üretim tablasının yüzeyine (veya bir önceki katmanın yüzeyine) ve diğer ekstrüzyon çizgileri ile birleşmesi için yeterli miktarda ısı sağlanmalıdır. Bu birleşme her ne kadar sağlansa dahi birleşme bölgesi iki farklı kısmın birleşmesinden oluştuğu için daha zayıftır. Ayrıca yeterli miktarda ısı verilmediği takdirde bu birleşme çok daha zayıf olacağından malzeme birleşme noktalarından çok daha kolay hasara uğrayacaktır.

2.9.7 Destek oluşturma

Bütün eklemeli üretim yöntemleri ihtiyaç halinde kullanılmak için destek yapıları oluşturabilir. Bu destek yapılar genellikle üretim tablasında kalan, kullanılmayan toz, jel veya sac tabakalardır. Ekstrüzyon bazlı sistemlerde ise destek yapı aynı parça üretimindeki gibi oluşturulur. Burada malzeme olarak ana üretim malzemesi kullanılabilmesi gibi ikincil bir malzemede kullanılabilir. Özellikle ikinci bir nozuldaki farklı malzemede destek parçaları basımı tercih edilir. Bunun temel sebebi farklı malzemelerin genellikle birbiriyle kuvvetli bir birleşme gerçekleştirememesidir. Ayrıca PVA gibi suda çözünen malzemeler tercih edilerek destek parçası suda çözülerek de uzaklaştırılabilir.

2.9.8 EYY yönteminde kullanılan malzemeler

Ekstrüzyon bazlı sistemlerde en çok tercih edilen yöntem olan FDM yönteminde polimer malzemeler kullanılır. PLA ve ABS başta olmak üzere TPU, PC, CPE, Nylon en çok tercih edilen malzemelerdir. Ayrıca kırpık karbon fiber veya başka katkı maddeleri eklenerek daha dayanıklı malzemeler üretilebilmektedir. Genellikle

kullanılan iki farklı polimer birbiriyle iyi birleşme göstermemekle beraber, eğer iyi birleşme varsa parçanın farklı kısımları aynı anda üretilebilir.



3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasının konusu bilindiği üzere 3 boyutlu yazıcı kullanılarak yeni yaklaşımlarla kompozit malzeme üretimidir. Literatürde hali hazırda bu konuda birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmaların hepsine burada yer vermemiz mümkün olmadığından sadece belirli bir kısmına, özellikle yenilikçi ve özgün olanlara yer vermeye çalıştık. Bu bağlamda burada örnek gösterilen çalışmalar literatürün kısa bir özeti maiyetindedir.

Sugiyama ve arkadaşları özellikle modern uçak parçası yapımında kullanılan dış tarafında yüksek çekme ve basma dayanımına sahip içinde ise kayma rijitliği yüksek hafif malzemeden oluşan karbon fiber takviyeli kompozit yapıları incelemiştir. Bu parçaların konvansiyonel yöntemlerle üretimi sırasında karmaşık ve pahalı birleştirme prosesleri kullanılmaktadır. Bu sürecin basitleştirilmesi ve maliyetin düşürülmesi adına yapılan bu çalışmada sürekli karbon fiber kullanan 3 boyutlu yazıcı kullanılarak balpeteği, eşkenar dörtgen, dikdörtgen ve daire içyapıları kullanılarak üretim sağlanmıştır. Çalışmanın devamında ise üretilen kompozit yapıların fonksiyonel özellikleri, şekil değerlendirmeleri ve 3 nokta-eğme testine göre özellikleri belirlenmiştir. Yapılan 3 nokta-eğme testi sonucunda bütün içyapı desen tiplerinde içyapı yoğunluğu arttıkça maksimum yükleme ve eğme modülünün arttığı gözlemlenmiştir. Mekanik özellikler içyapı şekliyle değişiklik gösterdiği için sürekli karbon fiber kullanan 3 boyutlu yazıcı ile istenilen içyapı tasarımı kullanılarak istenilen dayanım ve tokluğun sağlanabileceği düşüncesine varılmıştır.

Ayrıca bu prototiplerin üretimi sırasında içyapı alt ve üst taraftaki plakalar tarafından tamamen kapatılacağından herhangi bir destek malzemesi kullanılmamış ve üst plaka basılırken sadece fiber ipliklerin kendi iç gerilmesinden yararlanılmıştır. Ve elde edilen prototip yüzey pürüzlülüğüne bakıldığında karbon fiber takviyeli termoplastiklerin, PLA sandviç yapılardan daha düşük bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu gözlemlenmiştir [40].

Lebedev ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise elektriksel ve termal iletken polimer kompozitler esasına dayalı biyoçözünür PLA'nın geliştirilip kullanıldığını görürüz. Pristine marka tek cidarlı karbon nanotüplerin (CNT) ve doğal grafit tozunun (G) takviye elemanları olarak seçildiği bu çalışmada PLA matris malzemeli kompozitler ergitme-birleştirme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. PLA/CNT kompozitlerin saf PLA'ya göre öz direnç hacimlerinin 10 kat artırılabilirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca PLA/G kompozitlerle saf PLA'nın $0,193 \text{ W} \times \text{m}^{-1} \times \text{K}^{-1}$ olan termal iletkenliği $2,73 \text{ W} \times \text{m}^{-1} \times \text{K}^{-1}$ değerine artırılmıştır. PLA/G kompozit malzemesine düşük miktarlar CNT eklenerek termal iletkenliği minimum %40 civarında artırılmıştır [41]. Kompozit malzeme denemelerinde PLA/CNT kompozit malzemelerinde CNT miktarı %0 ile %3 arası değiştirilmiştir. Termal iletken olarak seçilen kompozit malzeme PLA/G' de ise doğal grafit miktarı %0 ile %30 arasında değiştirilmiştir. PLA/G kompozite ağırlıkça %1 oranında CNT eklenerek elde edilen üçlü PLA/G/CNT kompozitin termal iletkenliği PLA/G kompozit malzemeye göre %40 ve daha üstü oranlarda artış sağlamıştır. Hem ikili PLA/G ve PLA/CNT hem de üçlü PLA/G/CNT kompozit malzemesi ergitme-birleştirme yöntemiyle üretilmiştir ve üretilen bütün kompozit malzemeler enjeksiyon, ekstrüzyon ve eklemeli üretime uygun olduğu görülmüştür [41].

Tekinalp ve arkadaşları ise yaptığı çalışmada kısa fiber takviyeli ABS kompozit malzeme kullanarak işlenebilirliği, mikroyapısı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Kullanılan kısa fiberin uzunluğu 0,2 – 0,4 mm'dir. 3B yazıcıda üretilen parçalar geleneksel sıkıştırma yöntemiyle üretilen parçalarla karşılaştırılmıştır. Buna göre 3B yazıcıda üretilen parçalar, saf ABS'den üretilen parçalardan çekme dayanımında %115 ve çekme modülünde %700 artış sağlamıştır [42].

3B yazıcıda basılan numunelerde basım yönünde %91,5 gibi bir oranda fiber yönelimi görülürken geleneksel sıkıştırma yöntemiyle üretilen numunelerde bu oran çok daha düşüktür. Mikroyapı-mekanik özellik ilişkisi incelendiğinde 3B basılan numunelerde geleneksel sıkıştırmaya göre daha yüksek oranda porozite gözlemlenmiştir. Ayrıca karbon fiber içeren ABS ile FDM cihazında üretilen numunelerde gözle görülür porozite bulunurken geleneksel sıkıştırma yöntemiyle üretilen numunelerde bu durum gözlemlenmemiştir. Fiber miktarı arttıkça FDM dikişi (nozulun tabla üzerinde eriyik malzemeyle bıraktığı çizgi) içerisindeki porozite artmış ancak dikişler arası boşluk

azalmıştır. Her iki yöntemlede üretilen numuneler incelendiğinde saf ABS'den oluşan numunelerde daha yüksek dayanıma sahiptir. Geleneksel sıkıştırma yöntemiyle üretilen parçaların dayanım değerlerinin FDM ile üretilen parçalardan daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçtan porozitenin etkisinin fiber yöneliminin etkisinden daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca tarayıcı elektron mikroskopunda görüntüler incelendiğinde fiberlerin matris yüzeyinden çıktığı farkedilmiş ve bu durumda fiber-matris yüzeyler arası yapışmanın yeterince iyi olmadığı sonucuna ulaştırmıştır.

Yapılan çalışma sonucu gözenekliliğin azaltılması, yüzeyler arası yapışmanın artırılması ve fiber kırılmasının engellenmesi sağlanarak FDM yönteminin tam potansiyelinin ortaya çıkarılabileceği kanısına varılmıştır [42].

Hou ve arkadaşları ise sürekli fiber takviyeli termoplastik malzeme kullanarak 3B yazıcıda sürekli fiber takviyeli kompozit hafif yapılar üretmeyi denemiştir. Bu çalışmada çapraz-sargı ve panel-iç kısım sargı tasarımı için yeni stratejiler denenmiştir. Baskı yüklemeleri sırasında kırılma türleri incelenmiştir. Proses parametleri, yapı parametreleri, yoğunluk, fiber içeriğinin birbiriyle etkileşimi incelenmiştir. 3B yazıcıda basılan sürekli fiber takviyeli kompozit hafif yapılar için en uygun fiber miktarı belirlenmiştir. Buna göre hacimce %11,5 fiber miktarı için 17,17 Mpa baskı dayanımı bulunmuştur [43].

Bollig ve arkadaşları yaptıkları çalışmada transformatör çekirdeğinin 3B yazıcıda basılmasını incelemiştir. Eklemeli üretim ile ideal transformatör çekirdeği basılarak daha verimli transformatörler üretilebileceği düşünülmüştür. Bu çalışmada farklı 3B basım ayarları kullanılarak torodial geometriler üretilip test edilmiş ve transformatörün manyetik kapasitesi ölçülmüştür. Ardından bu farklı özellikler karakterize edilerek en verimli transformatörün yüksek doluluk oranıyla birlikte yüksek yoğunlukta manyetik partikül barındırması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca doluluk deseninin önemli bir etkisi görülmezken doluluk yüzdesi arttıkça transformatörün tepkisi artmıştır. Standart ferrit transformatör çekirdeğine göre daha düşük oranda transformatör tepkisi gözlemlenmiş ve bu etkinin de PLA içerisinde bulunan FE partiküllerinden geldiği sonucuna varılmıştır [44].

Li ve arkadaşları ise sürekli karbon fiber takviyeli PLA malzeme kullanarak 3B yazıcıda sürekli karbon fiber takviyeli kompozit malzeme üretmiştir. Öncelikle fiber takviyesiz ve fiber takviyeli numuneler 3B yazıcı kullanılarak üretilmiş ardından dinamik mekanik analiz cihazı kullanılarak mekanik dayanım ve termodinamik özellikleri test etmiştir. Yeni nozul ve yol(3B yazıcının her bir katmanı basmak için izlediği patika) kontrol metodu tasarlanarak sürekli karbon fiber baskısında iyileşme sağlamışlardır. Deney ve analiz boyunca önışleme tabi tutulmuş karbon fiber kullanılarak fiber ve reçine arasındaki arayüzey yapışması artırmışlardır.

Deney sonuçlarına göre çekme dayanımı %13,8 ve eğme modülü %164 oranında daha yüksek çıkmıştır. Tarayıcı elektron mikroskobundan elde edilen görüntülere bakıldığında istenilen fiber-matris arayüzey yapışması sağlanmıştır [45].

Zhong ve arkadaşları kısa fiber takviyeli ABS kullanarak 3B yazıcıda üretim yapmıştır. ABS polimer filamentler FDM yazıcılarda sıkça kullanılan bir malzemedir. Ancak düşük dayanım ve sertlik değerlerine sahiptir. Bu eksikliklerin üzerinden gelmek için ABS malzemeye kısa cam fiber, akışkanlaştırıcı ve uyumlaştırıcı katarak modifiye etmişlerdir. Cam fiberin işlenebilirliği ve esnekliği düşürmesine karşın dayanımı ciddi oranda arttırdığı gözlemlenmiştir. Zayıflamış değerler akışkanlaştırıcı ev uyumlaştırıcının düşük miktarlarda katılmasıyla iyileştirilmiştir. Sonuç olarak elde edilen filamentin FDM cihazında kullanım için uygun olduğu görülmüştür [46].

Kang ve arkadaşları FDM cihazında şekil hafızalı alaşım ve şekil hafızalı polimer kullanarak şekil hafızalı kompozit malzeme üretmişlerdir. Şekil hafızalı alaşım sıcaklığın etkisiyle martenzitik fazdan östenitik faza dönüştüğü için şekil hafızası etkisine sahiptir. Ayrıca şekil hafızalı polimer de cam geçiş sıcaklığında sert ve yumuşak bölümlerinin oransal değişiminden dolayı şekil hafızası etkisine sahiptir. Genellikle kullanılan şekil hafızalı alaşımlar ve şekil hafızalı polimerler tersinebilir değildir. Bu yüzden bu malzemeler bir kez deforme olduklarında tekrar eski hallerine dönemezler. Kang ve arkadaşları bu çalışmada 4B yazıcı teknolojisini(3B yazıcıda basılan şekil hafızalı malzemelerin üretimine verilen ad) kullanarak aktüatör üretmişlerdir. Çalışmada Nylon 12 filament tercih edilmiştir. Şekil hafızalı alaşımın şekil hafızalı polimere oranı 1:5 olduğunda 8 mm ile en uzun boy değişimi sağlanmıştır.

Ayrıca şekil hafızalı alaşım filament yazdırılırken şekil hafızası etkisi sebebiyle tersinebilir eğme kuvveti oluşarak ısınmaya yol açmıştır. Bu miktar 2 sn'de 1,5 A akış için 7 mm ilerlemede 10 °C ısı farkının olmasına sebep olmuştur. Ayrıca soğutma süresince şekil hafızalı kompozitin hacimsel oranları uzamanın toparlanmasına etki eden önemli faktörlerdir. Diferansiyel kalorimetre tarayıcı ve dinamik mekanik analiz cihazı ile şekil hafızası etkisinin 45-60°C aralığında kendisini gösterdiği gözlemlenmiştir. Tersinebilirlik etkisi akma testleri sonucunda görülmüştür.

Düşük sıcaklıklarda şekil hafızalı alaşım ve şekil hafızalı polimer fiber formunda birlikte ve bu durumda şekil hafızalı kompozitin dayanımı artar. Ancak yüksek sıcaklıklarda şekil hafızalı polimeri matris formuna dönüşür. Şekil hafızalı alaşım ve şekil hafızalı polimer arasındaki bu ilişki gösterir ki şekil hafızalı kompozit sürekli terinebilir eğme kuvveti altındadır ve bunun sebebi sıcaklık ve faz dönüşümlerindeki farklılıklardır.

Bu çalışmada şekil hafızalı kompozitlerin 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak stent veya vana kontrolü gibi uygulamalar için gelecek vaad ettiği görülmüştür [47].

Tian ve arkadaşları daha farklı bir çalışmada bulunarak karbon fiber takviyeli termoplastikleri geri dönüşümle kazanarak yeniden 3B yazıcı kullanarak parçalar üretmiş bu parçaların mekanik özelliklerini incelemiştir.

Çalışmada sürekli karbon fiber ve PLA, PLA emdirilmiş karbon fiberden geri dönüştürülmüş ve tekrar 3B yazıcıda basım için hammadde olarak kullanılmıştır. Herhangi bir mekanik özellikte kayıp yaşanmadan %100 oranında geri dönüşüm sağlanmıştır. İlk basımda üretilen numunelerden daha yüksek çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca tekrar imal edilen numunelerde eğme dayanımı %25 daha yüksek çıkmıştır. İlk kez bir karbon fiber takviyeli termoplastikte dayanım değerleri daha düşük kalitede değildir. Sürekli karbon fiberde %100 ve PLA'da %73 oranında geridönüşüm sağlanmıştır. Karbon fiber için 67,7 ve PLA için 66 MJ/kg oranında geridönüşümü için enerji harcanmıştır. Tekrar üretilen çekme numunelerinin dayanımı 142 N iken orijinal numunelerde çekme dayanımının 118 N olmasının sebebi iyileşen arayüzey özellikleridir. PLA malzemedeki yıpranma görülmesine rağmen saf PLA eklenerek dayanım değerlerindeki düşüş engellenmiştir [48].

Zhang ve arkadaşları ise ABS, CNT-ABS ve CF-ABS kullanarak FDM cihazında üretilmiş numunelerin yüzeyler arası bağlanma dayanımını incelemiştir. $\pm 45^\circ$ tarama açısı kullanılarak üretilen numunelere düzlemiçi kayma testi ve çift çentik kayma testi uygulamıştır. CF-ABS ve CNT-ABS numunelerin düzlem içi kayma testi değerleri birbirine yakın ve ABS malzemeden üretilmiş numunelere göre daha yüksektir. Üretim hızı ve katman kalınlığı arttıkça CF-ABS numunelerin kayma dayanımı düşmektedir. X-ışını mikroişlemcili tomografi ile numunelerin içyapısı incelendiğinde CF-ABS numunelerin en fazla poroziteye sahip olduğu görülmüştür. Matris kırılması, fiber kopması ve matris-fiber arayüzey sıyrılması CF-ABS numunenin başlıca hasar mekanizmaları olduğu gözlemlenmiştir [49].

Stephshkin ve arkadaşları ise FDM yazıcıda karbon fiber takviyeli PEEK ile üretim yapmış ve elde edilen numuneleri döküm yöntemiyle üretilen numunelerle karşılaştırmıştır. Elde ettikleri verilere göre termal iletkenlik %25-30 arasında dökümle üretilen numunelere göre daha düşük bulunmuştur. Kısa karbon fiber takviyesi her iki yöntemle de üretilen numunelerde termal özelliklerin anizotropik olmasına sebep olmuştur [50].

Ryder ve arkadaşları ise takviye malzemesi olarak 420 paslanmaz çelik tozu kullanmış ve ABS matris malzemesine ağırlıkça %10 ve %15 oranında katarak FDM yöntemiyle ürettikleri numunelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlar Çizelge 3.1’de gösterilmiştir [51].

Çizelge 3.1 : ABS ve paslanmaz çelik katkılı ABS için farklı üretim parametrelerine göre çekme dayanımı değerleri [51].

Mekanik Özellikler	0/90° Dikey Üretim			0/90° Yatay Üretim		
	ABS	%10 PÇ	%15 PÇ	ABS	%10 PÇ	%15 PÇ
Maks. Çekme Dayanımı(Mpa)	30,4	29,1	29,1	40,5	36,8	32,9
Uzama(%)	8,2	9,1	6,8	30,8	32,4	30,2

Literatürde bu konuda birçok araştırma yapılmıştır ve hepsine burada yer vermek ne yazık ki mümkün değildir. Ancak Çizelge 3.2’de literatürde yapılmış diğer çalışmalardan örnekler derlenmiştir.

Çizelge 3.2 : Farklı çalışmalara göre katkılı ve katkısız ABS malzemenin farklı üretim parametrelerine göre çekme dayanımları.

Malzeme	Yazar	Üretim Yönü	Katkı Maddesi	Maks. Çekme Day.
Saf ABS	[52]	0/90° Dikey	-	24,4 Mpa
Saf ABS	[50]	0/90° Dikey	-	13,61 Mpa
Saf ABS	[53]	0/90° Dikey	-	14,1 Mpa
Saf ABS	[51]	0/90° Dikey	-	17,73 Mpa
Saf ABS	[52]	0/90° Yatay	-	29,1 Mpa
Saf ABS	[54]	0/90° Yatay	-	25,69 Mpa
Saf ABS	[58]	0/90° Yatay	-	28,5 Mpa
Saf ABS	[59]	0/90° Yatay	-	33,96 Mpa
Saf ABS	[55]	0/0° Yatay	-	33,94 Mpa
Saf ABS	[56]	0/0° Yatay	-	16,9 Mpa
Saf ABS	[57]	0/0° Yatay	-	26,9 Mpa
Saf ABS	[58]	0/0° Yatay	-	45,7 Mpa
Katkı Malz. ABS	[59]	0/90° Dikey	%5 Jüt Fiber	12,9 Mpa
Katkı Malz. ABS	[59]	0/90° Dikey	%5 TiO ₂	18,4 Mpa
Katkı Malz. ABS	[59]	0/90° Dikey	%5 TP Elastomer	9,1 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Dikey	%5 Jüt Fiber	8,63 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Dikey	%2 Mayacrom Blue	7,79 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Dikey	%5 TiO ₂	16,67 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Dikey	%5 ZnO	7,41 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Dikey	%5 SrTiO ₃	5,95 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Dikey	%5 Al ₂ O ₃	12,14 Mpa
Katkı Malz. ABS	[59]	0/90° Yatay	%5 Jüt Fiber	25,9 Mpa
Katkı Malz. ABS	[59]	0/90° Yatay	%5 TiO ₃	32,2 Mpa
Katkı Malz. ABS	[59]	0/90° Yatay	%5 TP Elastomer	24 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Yatay	%5 Jüt Fiber	24,25 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Yatay	%2 Mayacrom Blue	17,31 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Yatay	%5 TiO ₃	32,9 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Yatay	%5 ZnO	20,7 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Yatay	%5 SrTiO ₄	21,6 Mpa
Katkı Malz. ABS	[60]	0/90° Yatay	%5 Al ₂ O ₄	28,8 Mpa
Katkı Malz. ABS	[57]	0/0° Yatay	%10 BBKF	37,4 Mpa
Katkı Malz. ABS	[58]	-	%10 Cu	42 Mpa
Katkı Malz. ABS	[58]	-	%30 Cu	26,5 Mpa
Katkı Malz. ABS	[58]	-	%10 Fe	43,4 Mpa
Katkı Malz. ABS	[58]	-	%30 Fe	40,6 Mpa
Katkı Malz. ABS	[58]	-	%40 Fe	36,2 Mpa

Ning ve arkadaşları ise ekstrüzyon yöntemiyle karbon fiber ve ABS malzeme kullanarak karbon fiber takviyeli kompozit filament elde etmişler ve bu kompozit filamentin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Saf ABS malzemedan üretilen numuneye göre karbon fiber takviye edilmesi çekme dayanımı ve young's modülünü artırırken tokluk, akam dayanımı ve sünekliliği düşürmektedir. Ağrlıkça %5 karbon fiber içeren numune en büyük çekme dayanımına sahipken %7,5 karbon fiber içeren en büyük young's modülüne sahiptir. Sırasıyla bu değerleri %22,5 ve %30,5 artırmışlardır [53].

Camirero ve arkadaşları ise katman kalınlığının, basım doğrultusunun ve fiber oranının karbon, cam ve kevlar sürekli fiber takviyeli naylon kompozitlerde etkisini incelemiştir. Cam fiber takviyeli numunelerin en yüksek darbe dayanımına sahip olduğu gözlemlenirken karbon fiber takviyeli numunelerin ise en düşük darbe dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir [61].

Song ve arkadaşları ise daha farklı bir sorunu ele alarak üzerine çalışmışlardır. Makro/mikro poroziteli yapıları PVA takviyeli PLA malzeme kullanarak FDM yöntemi ve gaz köpürtme tekniğini kullanarak üretmişlerdir. Bu yapılar özellikle doku yenilenmesinde kilit rol oynamaktadır. Çalışma elde edilen özgün doku yapıları kemik dokusunun yenilenmesi için kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır [62].

Gorsky ve arkadaşları charpy testini kullanarak FDM yöntemiyle üretilmiş ABS parçaların darbe dirençlerine bakmıştır. Buldukları değerler arasında en iyi sonucu yatay olarak üretilen parça vermesine rağmen enjeksiyon yöntemiyle üretilen parçadan %47 daha düşük çıkmıştır [63].

Alvarez ve arkadaşları ise doluluk oranının darbe direncine etkisini incelemek için charpy testini kullanmıştır. Elde ettikleri bulgulara göre %100 doluluk oranında parça en yüksek darbe direncini göstermiştir [64].

Beretta ve arkadaşları ise PEEK malzemeye %1 ve %5 oranında CNT ekleyerek numuneler üretmişlerdir. Ancak FDM yöntemiyle üretilen bu numunelerde CNT katkı malzemesinin mekanik özelliklere olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmemiştir [65].

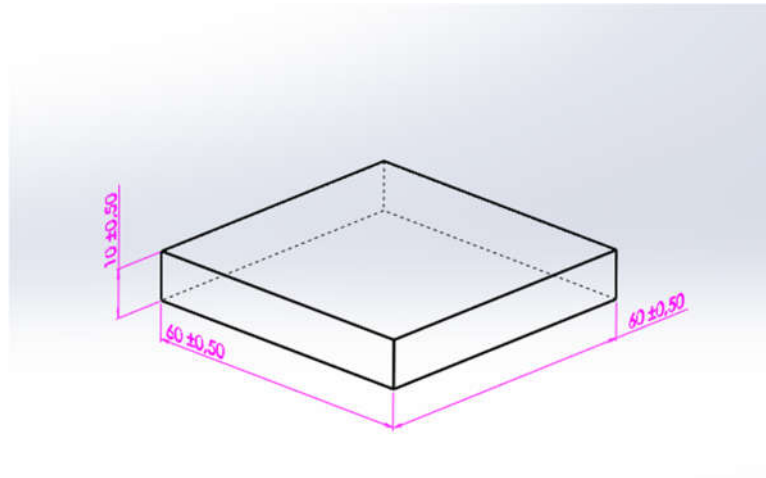
4. MATERYAL ve METHOD

Bu çalışmada FDM yöntemiyle ve bu yöntemin yardımıyla üretilen numunelere darbe ve çekme testleri uygulanarak elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Bu bağlamda öncelikle FDM yöntemi kullanılarak saf polimer malzemelerden darbe test numuneleri üretilmiştir. Bu çalışma sırasında farklı malzeme, dolgu tipi, katman kalınlığı, doluluk oranı gibi değerler değiştirilerek üretim yapılmıştır. Ardından iki farklı teknikle kompozit darbe numunesi üretilmiştir. Üretilen tüm numuneler darbe testine tabi tutulmuştur. Ayrıca yine eklemeli üretim yöntemi yardımıyla kompozit çekme numuneleri üretilmiş ve test edilmiştir. Yapılan bütün bu çalışmalar ayrı ayrı başlıklar altında ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

4.1 FDM Yöntemiyle Darbe ve Çekme Numunesi Üretimi

Sürekli fiber takviyeli 3B numuneler üretiminden önce saf polimer malzemedeki darbe numuneleri üretilmiştir. Bu işlem için ISO 6603-1 standardı temel alınmıştır [66]. Bu standarda göre 60*60*2 mm ölçülere sahip kare plakalar kullanılır. Ancak bu çalışmada dolgu tipi, doluluk oranı gibi değerlerin incelenmesi için yükseklik 2 mm yerine şekil 4.1’de görüldüğü gibi 10 mm seçilmiştir.



Şekil 4.1 : Düşen ağırlık darbe testi numunesi.

Bilgisayar destekli tasarım programında tasarlanan numune FDM yöntemini kullanan Ultimaker 3 Extended 3B yazıcısında üretilmesi için Cura yazılımına aktarılmıştır.

Cura yazılımı 3B Modeli eklemeli üretim için katmanlara ayıran bir yazılımdır [67]. Katmanlara ayırma işlemi yanı sıra modeli büyütme-küçültme, döndürme ve çoğaltma gibi temel işlemleri de yapmaktadır. Cura yazılımının asıl avantajı Ultimaker 3 Extended ile tam uyumlu olması ve üretim ile ilgili katman kalınlığı, doluluk oranı, dolgu tipi bileşenleri ayarlayıp Ultimaker 3 Extended yazıcıya aktarmasıdır. Bu çalışmada Çizelge 4.1’de gösterilen ve değiştirilebilen bu parametrelerin bir kaçı kullanılarak farklı numuneler üretilmiştir.

Çizelge 4.1 : Bu çalışmada kullanılan test parametreleri ve değişkenleri

Doluluk Oranı	Dolgu Tipi	Katman Kalınlığı	Çarpma Hızı
%20	Kübik	0,20 mm	1,1 m/s
%40	Kübik Altbölümlü	0,15 mm	2,1 m/s
%60	Üçgen	0,10 mm	3,1 m/s
%80	Tetrahedral		4,1 m/s
%100	Lineer		5,1 m/s
	Eşmerkezli		6,1 m/s

Bu çalışmada ilk numune 0,2 mm katman kalınlığına sahip, %80 doluluk oranında, kübik altbölümlü dolgu tipi ile üretildiği için bu numune standart olarak kabul edilmiştir. Aksi belirtilmedikçe numunenin üretim parametreleri bunlardır.

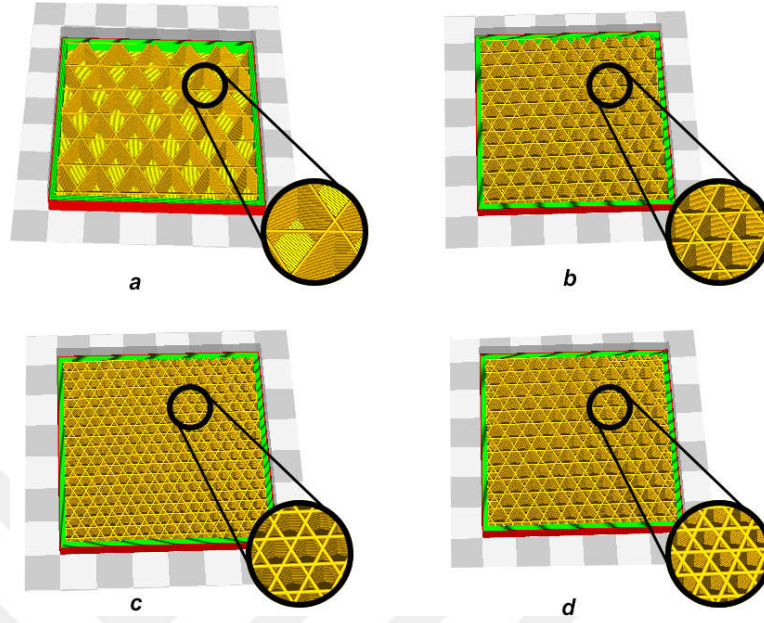
Katman kalınlığının darbe dayanımına etkisini incelemek için katman kalınlığı olarak 0,20 mm, 0,15 mm, 0,10 mm tercih edilmiştir. Katman kalınlığı arttıkça numunenin oluştuğu katman sayısı azalmış ve üretim süresi kısalmıştır. Çizelge 4.2’de %80 dolulukta kübik altbölümlü dolgu tipine sahip bir darbe testi numunesinin katman kalınlığına göre değişen üretim süreleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Farklı katman kalınlıklarına göre numunelerin üretim süreleri.

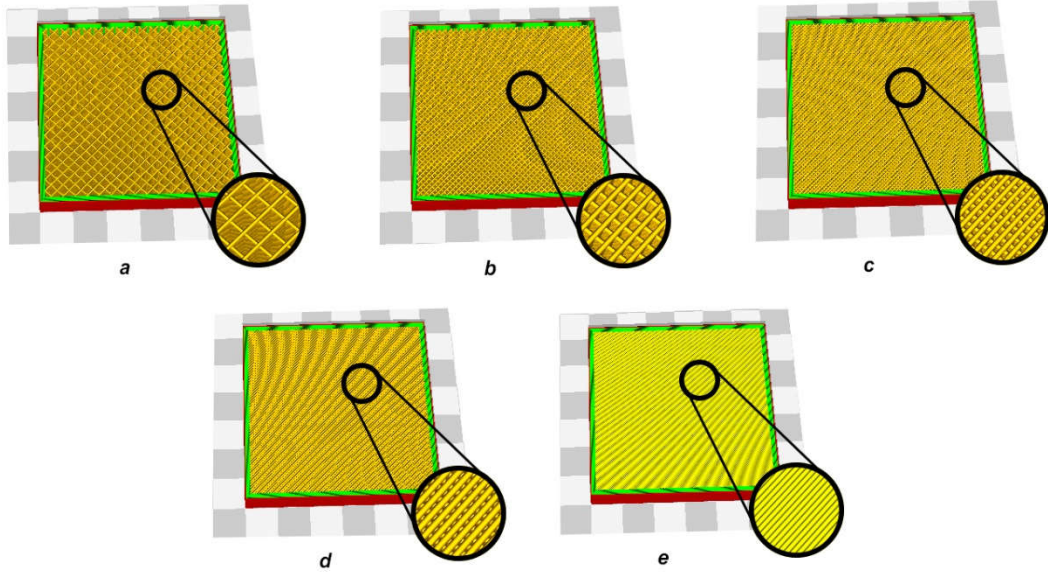
Katman Kalınlığı (mm)	Katman Sayısı	Üretim Süresi
0,10	100	5 sa 9 dk
0,15	66	3 sa 12 dk
0,20	50	2 sa 16 dk

Katman kalınlığı haricinde numunenin doluluk oranının darbe dayanımını incelemek adına kübik altbölümlü dolgu tipinde %20, %40, %60, %80 doluluk oranlarında numuneler üretilmiştir. Kübik altbölümlü dolgu tipinden dolayı %100 doluluk oranında numune üretilmemiştir. %100 doluluk oranının etkisini de görmek adına lineer dolgu tipinde %20, %40, %60, %80, %100 doluluk oranında numuneler

üretimiştir. Şekil 4.2 ve 4.3’de sırasıyla kübik altbölümlü ve lineer dolgu tipinde belirlenen doluluk oranlarına göre oluşan içyapının görüntüleri verilmiştir.



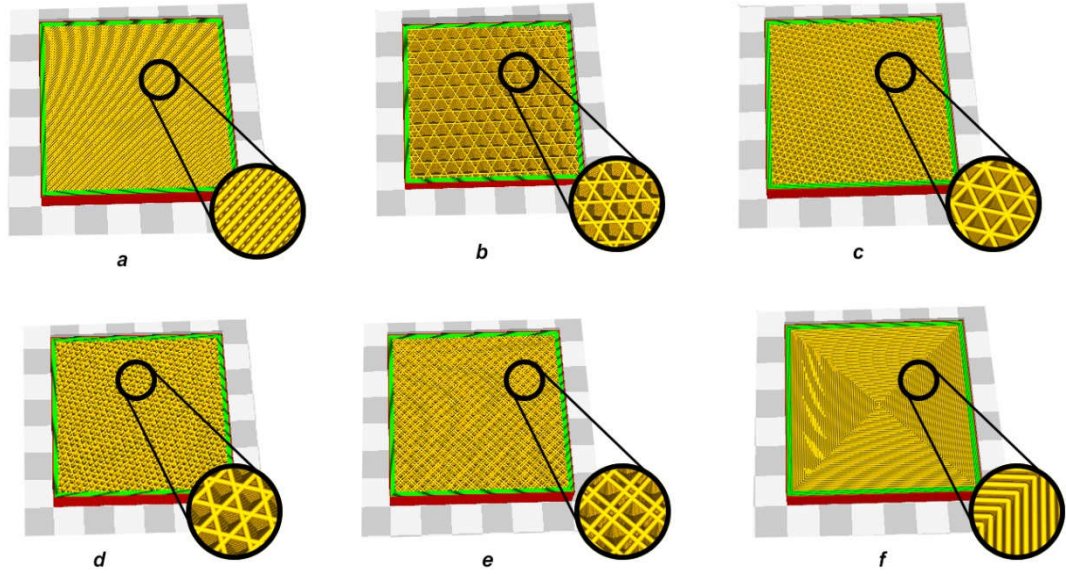
Şekil 4.2 : Kübik altbölümlü dolgu tipinde farklı doluluk oranlarına göre numune içyapısı; a) %20 doluluk oranı, b) %40 doluluk oranı, c) %60 doluluk oranı, d) %80 doluluk oranı.



Şekil 4.3 : Lineer dolgu tipinde farklı doluluk oranlarına göre numune içyapısı; a) %20 doluluk oranı, b) %40 doluluk oranı, c) %60 doluluk oranı, d) %80 doluluk oranı, e) %100 doluluk oranı.

Son olarak dolgu tipinin etkisini incelemek için farklı dolgu tipleri kullanılarak numuneler üretilmiştir. Kullanılan dolgu tipleri şekil 4.4’de gösterilmiştir. Şunu

hatırlatmak gerekir ki eğer aksi belirtilmemişse dolgu tipi olarak kübik altbölümlü kullanılmıştır.



Şekil 4.4 : %80 doluluk oranında dolgu tiplerine göre numuneler; a)lineer dolgu tipi, b)kübik altbölümlü dolgu tipi, c) üçgen dolgu tipi, d) kübik dolgu tipi, e) tetrahedral dolgu tipi, f) eşmerkezli dolgu tipi.

Darbe testi için üretilen numunelerde kullanılan malzeme PLA/PHA ve ABS'dir. Görsellerde ayırt edilmesi kolay olması amacıyla PLA/PHA malzemenin rengi siyah, ABS malzemenin rengi gri olarak seçilmiştir. PLA/PHA malzeme ile sadece katman kalınlığı ve doluluk oranları hakkında inceleme yapılmıştır.

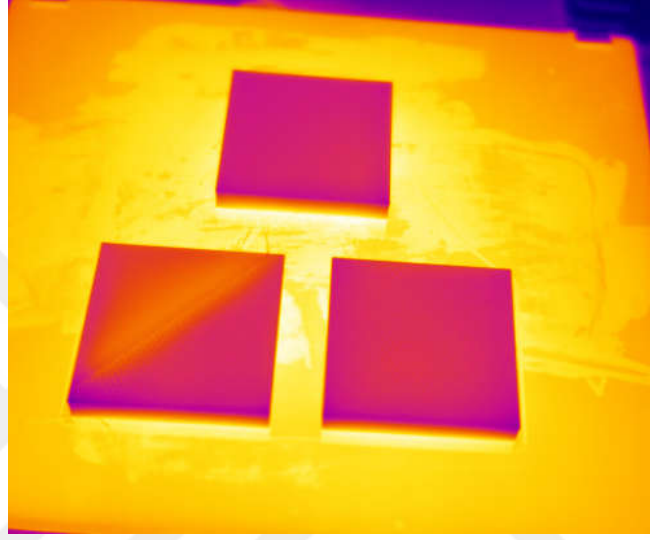
Aksi belirtilmedikçe numunenin üretim parametreleri aşağıdaki gibidir;

- Katman kalınlığı: 0,2 mm
- Doluluk oranı: %80
- Dolgu deseni: Kübik altbölümlü

Her tip numunedan 3'er adet üretilmiştir. Üretim parametrelerini incelemek üzere 51, malzeme etkisini incelemek için 9 ve darbe hızının etkisini gözlemlemek için 15 numune olmak üzere toplam 75 numune basılmıştır. Bu numunelerin hepsi saf malzemenin üretilmiştir. Sürekli fiber takviyeli 3B numunelerin üretimi ayrıca ele alınacaktır.

Üretim sırasında karşılaştığımız temel problem numunenin hızlı soğumadan dolayı çarpılmasıdır. Ortam sıcaklığını incelemek için öncelikle termal kamera ile çekim

yapılmıştır. Şekil 4.5’de görüldüğü üzere üretim tablası daha sıcakken ekstrüde olmuş malzeme hızla soğumaktadır. Üretim tablası ile katman arasındaki uzaklık arttıkça yani üst katmanlara geçildikçe üretim tablasının sıcaklığı numuneye yeterince nüfuz edemeyerek numune içerisinde yüksek sıcaklık farklılıklarına yol açmaktadır. Bu durumda numunede çarpılmaya neden olmaktadır. Bu durumu önlemek için tabla sıcaklığı 20°C artırılarak 100°C’ye çıkartılmış ve ortam sıcaklığı klima vasıtasıyla 25°C’ye sabitlenmiştir.

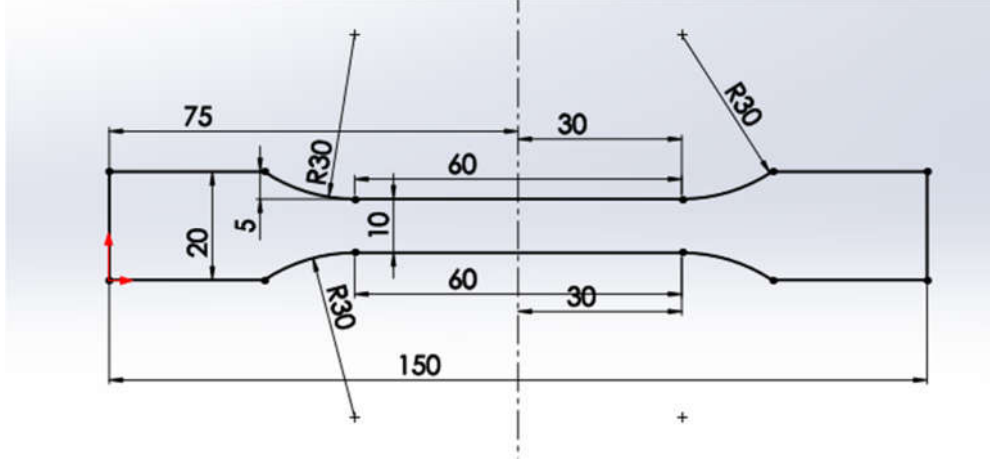


Şekil 4.5 : Numunelerin üretim sırasında termal kamera ile alınmış görüntüsü.

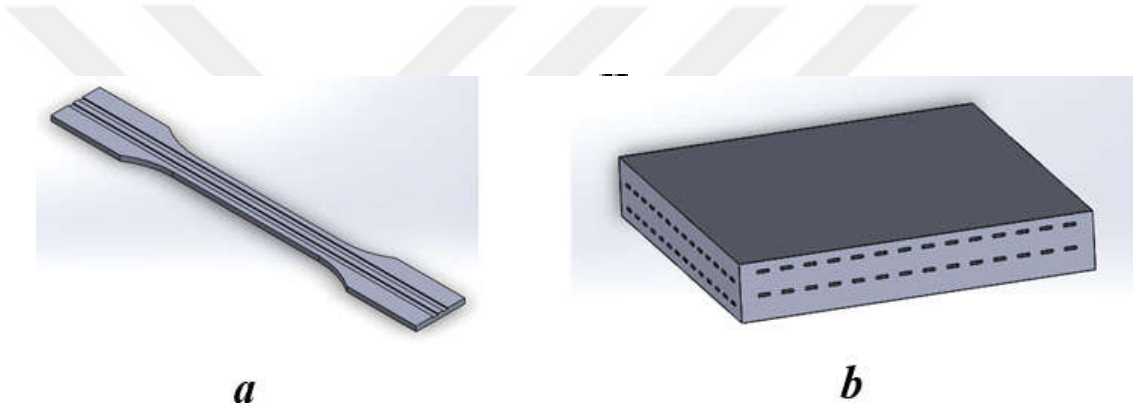
4.2 Sürekli Fiber Takviyeli 3B numunelerin Üretimi

Sürekli fiber takviyeli 3B numuneler için öncelikle bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak darbe ve çekme numuneleri tasarlanmıştır. Çekme numunesi tasarımı için ISO 527-1, ISO 527-4, darbe numunesi tasarımı için ISO 6603-1 standartlarından yararlanılarak Şekil 4.6 ve 4.7’deki tasarımlar elde edilmiştir [68]. Numuneler karbon fiber ve cam fiberlerin yerleştirilmesi için boşluklu şekilde tasarlanmıştır. Her iki numune tasarımında kalınlık 10 mm seçilmiştir. Numuneler her biri 2 mm kalınlığında 5 plakanın birleşiminden oluşacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu plakaların üst kısmında –en üst plaka hariç- fiberler için yolluklar bulunmaktadır.

Plakalar Cura programı yardımıyla Ultimaker 3 Extended cihazında %100 dolulukta, lineer dolgu tipinde ve 0,2 mm katman kalınlığına sahip şekilde üretilmiştir. Plakaların üretimi için ABS malzeme kullanılmıştır. Ardından üretilen plakalarda yolluklara karbon fiber veya cam fiber dizilmiştir.



Şekil 4.6 : Sürekli fiber takviyeli 3B çekme numunesi için boyut ölçüleri (mm).



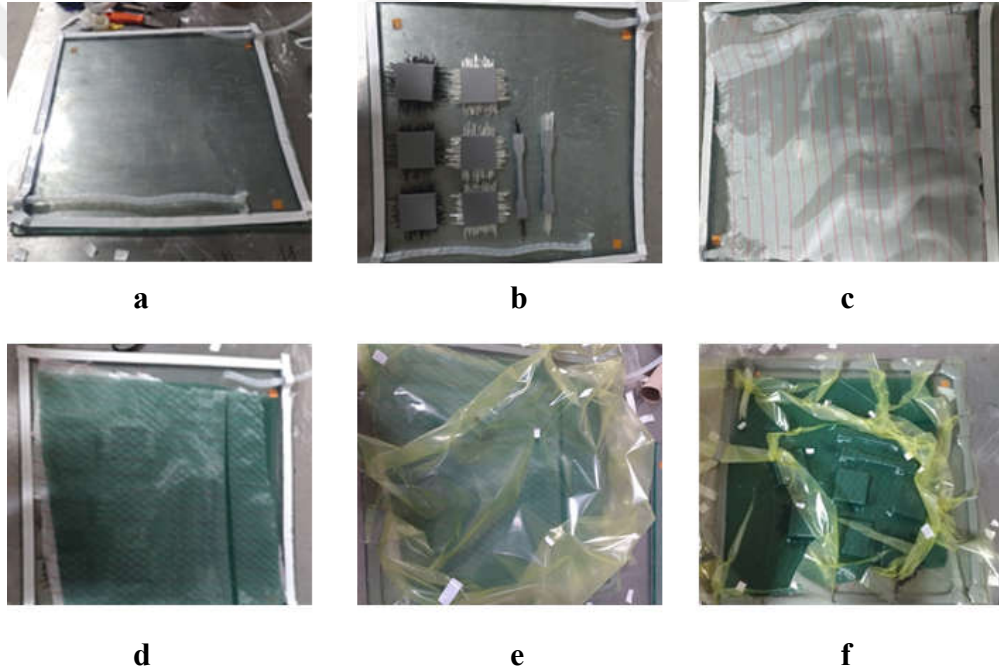
Şekil 4.7 : a) sürekli fiber takviyeli 3B çekme numune modeli, b) sürekli fiber takviyeli 3B darbe numune modeli.

Plakalar üst üste konarak vakum infüzyon yöntemiyle fiber-matris yüzey bağlanması sağlamak için epoksi reçine doldurulmasına hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.8’de gösterildiği üzere vakum difüzyon uygulanması için önce cam yüzey temizlenmiş, reçine transfer boruları yerleştirilmiş ve vakum yapılacak alan sızdırmazlık macunu ile çevrilmiştir. Ardından numuneler alana yerleştirilmiş ve üzerleri soyma kumaşı (peel ply) ile örtülmüştür. Soyma kumaşınının üzeri önce infüzyon filesi ardından vakum naylonu ile kapatılmıştır. Vakum uygulanarak alandaki hava uzaklaştırılmış ve infüzyon borusu önceden hazırlanmış %75 reçine - % 25 sertleştirici karışımına daldırılarak infüzyon işlemi başlatılmıştır. ~110 Saat vakumlu ortamda bekletilerek reçinenin sertleşmesi sağlanmıştır.

Sürekli fiber takviyeli numunelerin üretimi sırasında kullanılan darbe testi numunesinin, ABS malzemeden üretilen modelinin ağırlığı ~23,90 gr iken takviye malzemesi olan sürekli karbon fiberlerin toplam ağırlığı ~1,21 gr, cam fiberlerin ağırlığı ise ~3,98 gramdır. Sürekli fiber takviyeli kompozit yapıyı bağlayıcı olarak

epoksi reçine kullanılarak vakum infüzyon uygulanmıştır. Vakum infüzyon sonrası sürekli cam fiber takviyeli darbe numunelerinin ortalama ağırlığı 42,40 gr, sürekli karbon fiber takviyeli darbe testi numunelerinin ortalama ağırlığı ise 40,35 gramdır. Buna göre cam fiber takviyeli numunelerde ortalama 14,52 gr, karbon fiber takviyeli numunelerde ise 15,24 gr epoksi reçine kullanılmıştır. Bu bağlamda karbon fiber takviyeli numunelerde ağırlıkça takviye malzemesi % 2,9 iken cam fiber takviyeli numunelerde ise bu oran % 9,38 civarındadır.

Bu çalışmada kullanılan epoksi reçine Fibermak F-1564 marka olup sertleştirici de yine aynı markanın amin bazlı F-3487 adlı ürünüdür.



Şekil 4.8 : a) reçine transfer borularının yerleştirilmesi ve sızdırmazlık macunu ile çevresinin kaplanması, b) numunelerin yerleştirilmesi, c)soyma kumaşının örtülmesi, d) infüzyon filesinin yerleştirilmesi, e) vakum naylonunun kaplanması, f) vakumlama ve infüzyon.

4.3 Düşen Ağırlık Darbe Testi

Bu çalışmada daha önce bahsedildiği gibi ve yapılan birkaç çalışmanın aksine test mekanizması olarak düşen ağırlık darbe testi tercih edilmiştir. Bunun sebebi düşen ağırlık darbe testinde gerçek hayatta karşılaşılabilecek koşulların oluşturulabilmesi, test edilecek parçaya Charpy veya Izod testindeki çentik açılmadan test yapılması ve böylece parçanın kırılma davranışına müdahale edilmeyişi gibi başlıca avantajlarıdır.

Önceden hazırlanmış numuneler CEAST 9350 marka düşen ağırlık darbe cihazı kullanılarak test edildi. Test cihazı şekil 4.9’de gösterilmektedir.

Test için 6,1 m/s çarpma hızı ile 8,79 kg yükün düşmesi standart olarak belirlendi. Bu ağırlığın 1 kilogramı çarpma ucunu tutan aparata, 2,79 kilogramı çarpma ucuna aittir. 5 kg ilave yük eklenerek ağırlık 8,79 kg olarak belirlenmiştir. İlgili standartta çarpma hızı ve uygulanacak yük için özel bir değer bulunmayıp bu değerler testi yapan uzmanların tercihine bırakılmıştır. Ayrıca 1,1 m/s, 2,1 m/s, 3,1 m/s, 4,1 m/s, 5,1 m/s çarpma hızlarında da testler yapılarak çarpma hızının etkisi incelendi. Çarpma hızı değiştikçe uygulanan çarpma enerjisi de değişmektedir. İlgili çarpma hızına ait oluşan çarpma enerjisi Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.9 : Düşen ağırlık darbe testi cihazı.

Ceast 9350 düşen ağırlık darbe testi cihazında öncelikle yazılım ile test koşulları cihaza aktarılır. Ardından cihaz çarpma başlığını gerekli yüksekliğe çıkartır, eğer çarpma hızına ulaşması için yükseklik cihazın kendi yüksekliğinden fazla ise üst kısmında bulunan pnömomatik yaylar ile başlangıç hızı sağlanarak istenilen çarpma hızına ulaşılır.

Çizelge 4.3 : Çarpma hızına göre oluşan çarpma enerjisi miktarı.

Çarpma Hızı (m/s)	Çarpma Enerjisi(J)
1,1	5,318
2,1	19,382
3,1	42,236
4,1	73,880
5,1	114,314
6,1	163,538

Çarpmanın etkisi ile vurucu uçtaki gerinim ölçer üzerinden veri DAS64K veri toplama sistemi aracılığıyla yazılıma aktarılır. Yeterli veri alınabilmesi açısından veri toplama süresi 5 ms olarak belirlenmiştir.

4.4 Çekme Testi

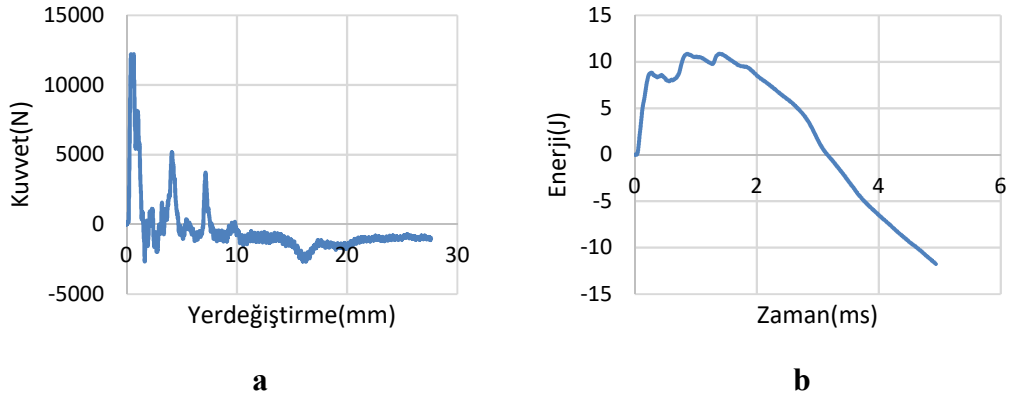
Üretilen kompozit çekme numuneleri, şekil 4.10’da gösterilen Shimadzu marka çekme deney cihazında teste tabi tutulmuştur. Numuneler mengene aracılığıyla cihazın çenelerine sıkıştırılmış ve lazer extansometre için işaretleyiciler takılmıştır. Ardından ISO 527 standardına göre 2mm/dk hızla çekme kuvvetine tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler Shimadzu TRViewX marka veri toplama cihazı ile bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 4.10 : Çekme testi cihazı.

5. VERİLERİN İNCELENMESİ

Literatür çalışmalarına bakıldığında araştırmacıların özellikle çekme mukavemeti üzerinde durduğu görülmüştür. Bu bağlamda bu çalışmanın diğer çalışmaların tekrarı olmasını engellemek amacıyla darbe sönümlenme kabiliyeti ve kırılma mekaniği üzerinde durulmuştur. Şekil 5.1’de standart numunenin (abs malzeme, 02 mm katman kalınlığı, %80 doluluk oranı, kübik albtömlü dolgu tipi) kuvvet-yerdeğiştirme ve enerji-zaman grafiklerine yer verilmiştir. Kuvvet-yerdeğiştirme grafiği, kırılmanın kararsız olduğu ve kırılmanın ardından vurucu ucun doğal titreşimini bize göstermektedir. Çarpma ve enerjinin sönümlenmesi ilk 1 ms içinde gerçekleşmektedir. Doğal titreşim enerji-zaman grafiğinde aşağı yönlü harekete yol açmaktadır. Bu sebeple doğal titreşimin olduğu kısım ISO 6603 standardına göre sönümlenen enerji miktarının hesaplamasına katılmamakla birlikte, test düzeneği için veri alma süresi 5 ms olarak belirlendiği için grafiklerde bu süre korunmuştur

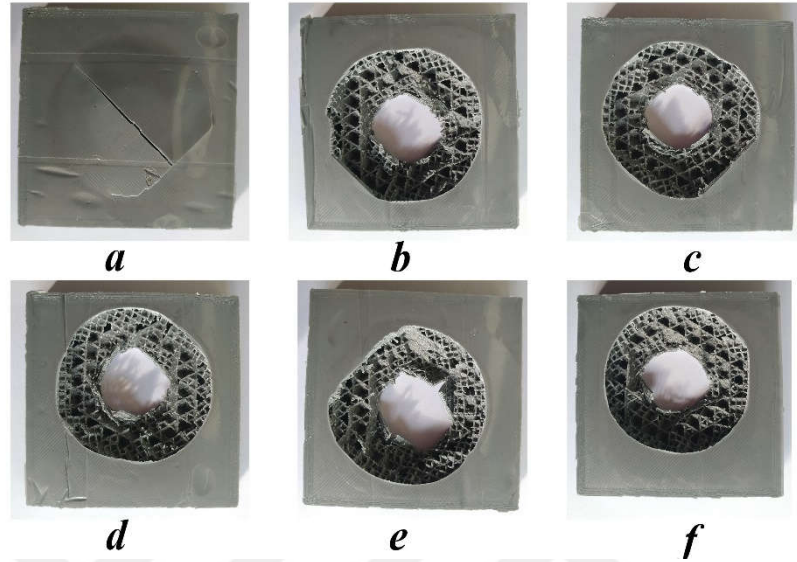


Şekil 5.1 : Saf ABS numune için a) kuvvet-yerdeğiştirme ve b) enerji-zaman grafikleri.

Çarpma hızının kırılma mekaniği üzerindeki etkisi incelendiğinde, çarpma hızının belli bir eşik değerine kadar etki ettiği görülmüştür. Şekil 5.2’de görüldüğü üzere 1,1 m/s çarpma hızında darbe ucu numuneye yeterinsce nüfuz edip delememişken, 2,1 m/s çarpma hızında gerekli enerji sağlandığı için numuneyi delip geçmiştir.

Düşen ağırlık darbe testini farklı hızlarda test ettiğimizde, belli bir hıza kadar, şekilde görüldüğü gibi absorbe edilen enerji miktarının hız artışıyla beraber arttığı

farkedilmiştir. Çarpma hızını artırmak uygulanan maksimum kuvveti ve dolayısıyla maksimum enerjiyi artırmaktadır. Ancak hız artırımıyla artan maksimum enerji ile absorbe edilen maksimum enerji arasında orantılı bir bağlantı bulunamamıştır.



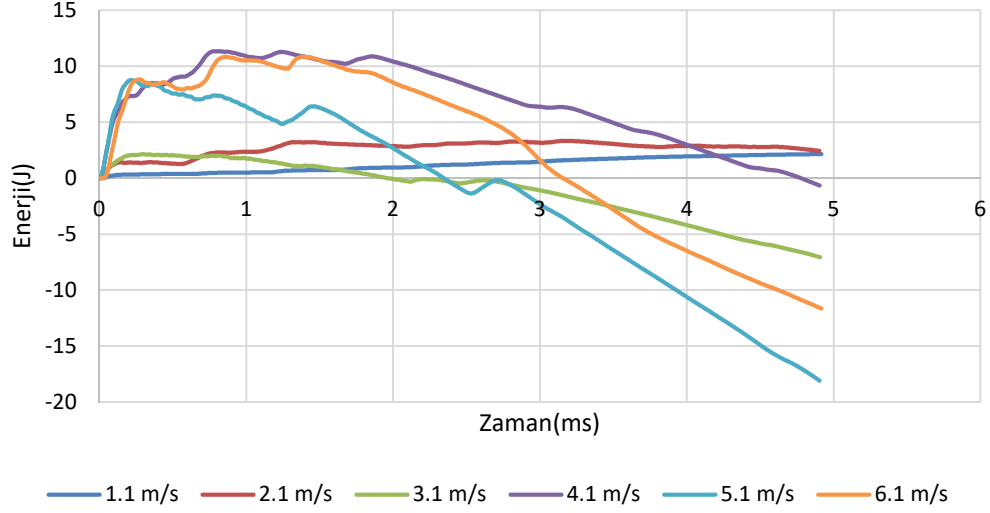
Şekil 5.2 : Farklı çarpma hızlarında test edilmiş numuneler; a) 1,1 m/s b) 2,1 m/s c) 3,1 m/s d) 4,1 m/s e) 5,1 m/s f) 6,1 m/s.

Yine de belirtmek gerekirken hız arttıkça absorbe edilen maksimum enerjinin çarpma enerjisine oranı azalmaktadır. Bunun sebebi özellikle yüksek hızlarda delme etkisinin artarak çarpma etkisini baskılamasıdır. Böylece darbe ucu numuneyi hızlı bir şekilde delip geçerken çarpma etkisinin yayılmasını engellemektedir. Diğer yandan numunenin iç yapısından kaynaklı olarak darbe ucu numuneyi, numunenin üst yüzeyinden altına doğru genişleyen bir kırılma yüzeyiyle parçalayarak deler.

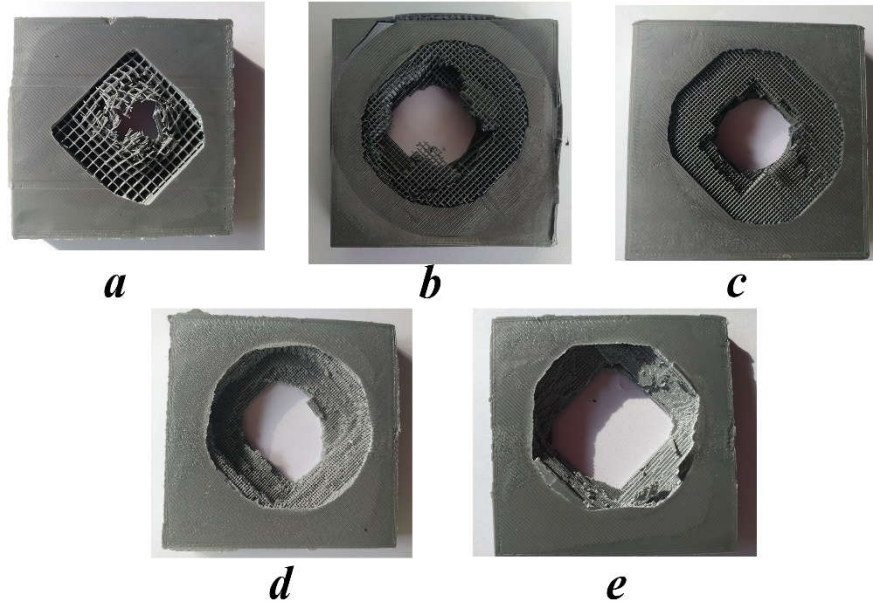
Hız değişikliğine bağlı test sonuçlarına şekil 5.3'de bakıldığında 4,1 m/s üzerinde malzemenin enerji absorblama kabiliyeti değişmektedir. Bu sebepten dolayı herhangi bir hataya sebebiyet vermemek için bu eşik hız değerinin (4,1 m/s) biraz üzerindeki bir hız değeri (6,1 m/s) tercih edilmiştir.

Kırılma yüzeylerini incelediğimizde, darbe numuneleri şekil 5.4'de görüldüğü üzere lineer dolgu tipinde farklı doluluk oranlarında farklı kırılma davranışları sergilemektedir. %20 doluluk oranında darbe ucu numuneye nüfuz etmiş ancak çarpma sırasındaki gerilme numuneye yayılmamıştır. Ayrıca numune sünek davranışta bulunmuş ve numunenin iç kısmından parçalar kopmamıştır. %40 ve %60 doluluk oranlarında benzer kırılma yapıları gözlemlenmiş ve sadece darbe ucunun çarptığı nokta hasara uğramıştır. Ancak %20 doluluk oranından farklı olarak numuneler gevrek

davranış sergileyerek numunenin iç kısmından kopmalar meydana gelmiştir. %80 ve %100 doluluk numune kırılğan bir iç yapıya sahip olmakla beraber yine iç yapının sayesinde çarpma etkisi yayılarak numuneyi hasara uğratmıştır.



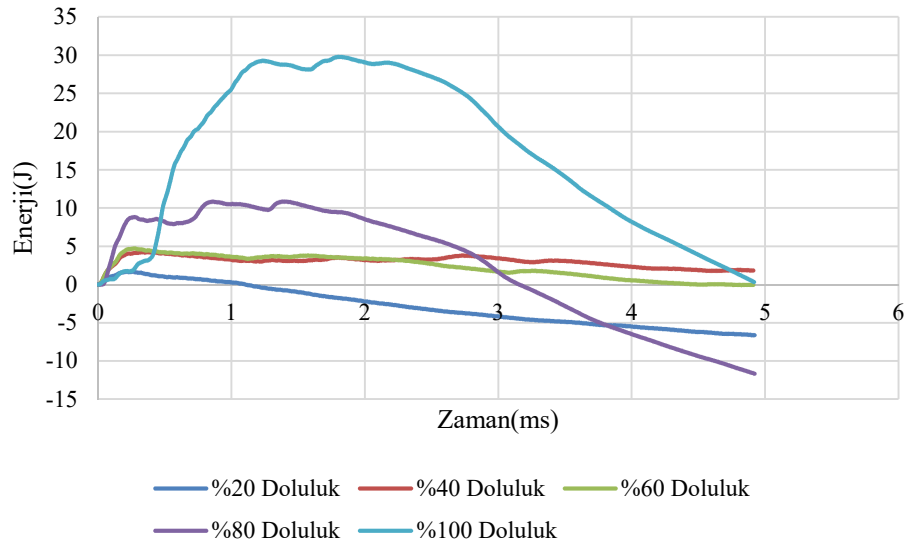
Şekil 5.3 : Farklı çarpma hızlarında numunelerin sönmülediği enerji değerleri.



Şekil 5.4 : Lineer dolgu tipinde farklı doluluk oranlarına sahip numunelerin test sonrası görünüşleri; a) %20, b)%40, c)%60, d) %80, e)%100.

Şekil 5.5’de belirtildiği gibi absorbe edilen enerji miktarları, doluluk oranlarına göre incelendiğinde %20 doluluk oranına sahip numune en düşük, %40 ve %60 doluluk oranına sahip numuneler birbirine yakın değerlerde olmakla beraber daha fazla enerji absorbe etmişlerdir. Beklenildiği üzere %80 ve %100 doluluk oranına sahip numunelerde absorbe edilen enerji kademeli olarak artmıştır. Bunun sebebi doluluk

oranı arttıkça parçanın rijitleşmesi ve çarpma enerjisinin daha geniş bir alana yayılarak absorbe edilmesidir.



Şekil 5.5 : Linear dolgu tipinde farklı doluluk oranlarında numunelerin sönümlendiği enerji miktarları.

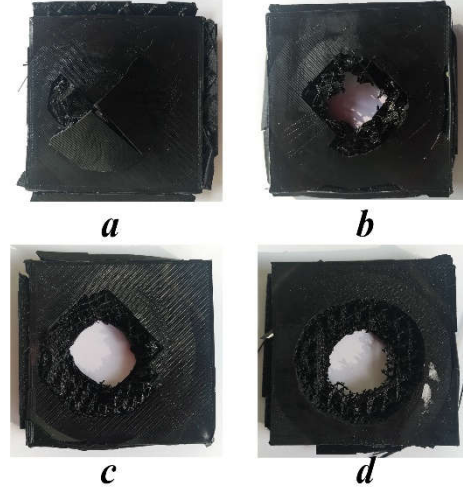
Ayrıca kübik alt bölümlü dolgu tipinde de doluluk oranları, linear dolgu tipindeki benzer davranış göstermiştir. %20 doluluk oranına sahip numunede çökme gerçekleşmiş ancak alt katmanlar parçadan kopmamıştır. %40 doluluk oranında kısmi çökme gerçekleşmiş ve kopmalar meydana gelmiştir.

%60 ve %80 doluluk oranlarında parça kopması içerden başlayarak alt katmanlara doğru genişlemiştir. Darbenin etkisinin yayılması %20 ve %40 doluluk oranlarında görece az iken, %60 ve %80 doluluk oranlarında darbe etkisinin yayılması Şekil 5.6'da açıkça görülebilmektedir.

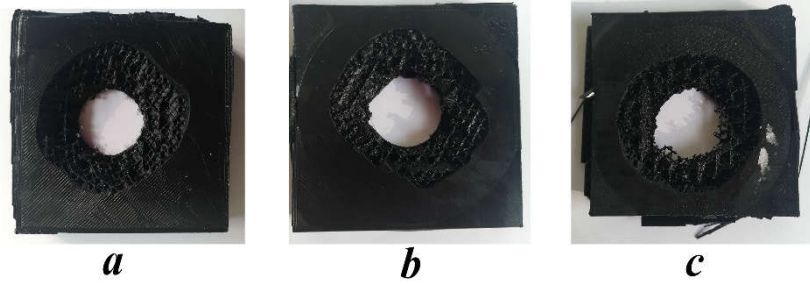
Katman kalınlığının kırılma mekaniğine önemli bir etkisi yoktur. 0,10 mm, 0,15 mm ve 0,20 mm katman kalınlığına sahip numuneler darbe testinden sonra incelendiğinde hasar mekanizmasının aynı şekilde etki ettiği ve Şekil 5.7'de görüldüğü üzere büyük farklılıklar olmadığı tespit edilmiştir.

Şekil 5.8'de katman kalınlığının artmasının enerji absorblama kabiliyetini arttırdığı göstermektedir. Yine aynı şekilde gösterildiği üzere numuneler ilk 1 milisaniye içinde maksimum miktarda enerjiyi absorbe etmişlerdir. Ardından lineer bir şekilde absorbe edilen enerji miktarı düşmüştür. Bu durum kalın katmanların fiberlerinin ince katmanlara göre 1 milisaniye daha zor elastik deforme olması ve deforme olmasının ardından kırılmasıdır.

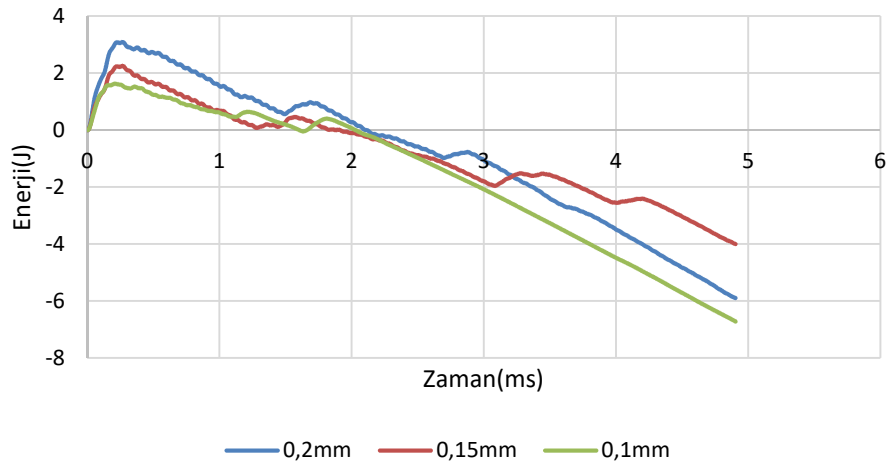
Katman sayısı arttıkça toplam katman sayısı azalmaktadır. 3B yazıcıda üretilen, 0,10 mm katman kalınlığına sahip numune 100 katmandan oluşmakta iken 0,20 mm katman kalınlığına sahip numune 50 katmandan oluşmaktadır.



Şekil 5.6 : Kübik alt bölümlü dolgu tipinde farklı doluluk oranına sahip numunelerin test sonrası görünümü; a) %20, b) %40, c) %60, d) %80.

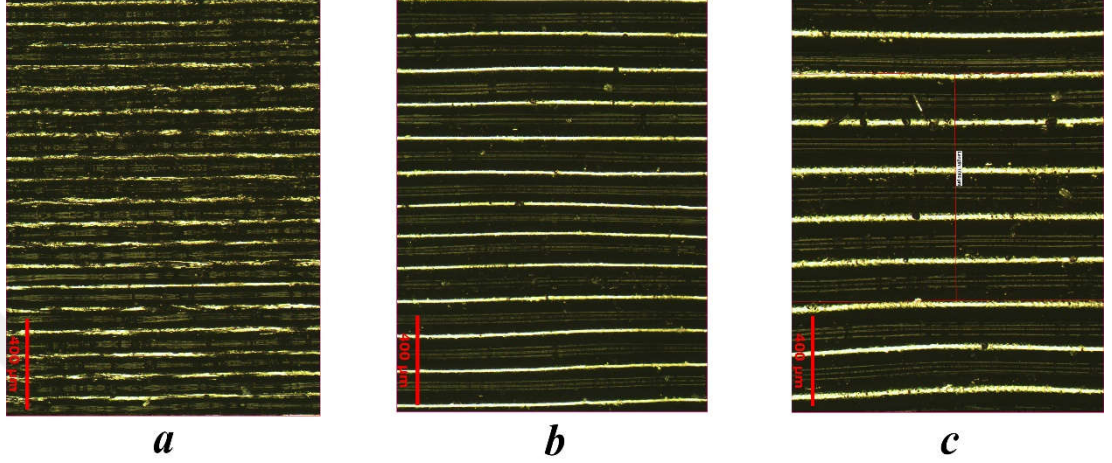


Şekil 5.7 : Kübik alt bölümlü dolgu tipinde farklı katman kalınlığına sahip numunelerin test sonrası görünümü; a) 0,10 mm, b) 0,15 mm, c) 0,20 mm.



Şekil 5.8 : Farklı katman kalınlıklarında numunelerin 6,1 m/s çarpma hızında sönümlendiği enerji miktarları.

Bundan dolayı katmanlar arası boşlukların sayısı yarıya düşmüştür. Şekil 5.9’da görüldüğü üzere katmanlar arası boşluklar 0,2 mm katman kalınlığında 0,15 ve 0,1 mm katman kalınlığına göre daha geniştir. Ancak fiberler yazdırılırken nozuldan kaynaklı oluşan baskı bu boşluğu azaltmaktadır. Ayrıca katmanlar arası boşlukların sayısı arttıkça darbe dayanımı düşmektedir.



Şekil 5.9 : Farklı katman kalınlıklarının mikroskopik görüntüsü; a) 0,10 mm, b) 0,15 mm, c) 0,20 mm.

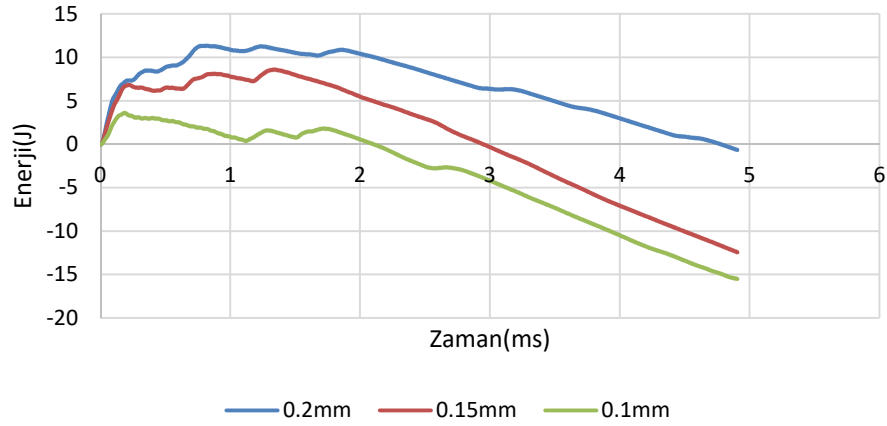
Şekil 5.8 ve 5.10’deki verilere göre çarpma hızının enerji absorblama kabiliyetine önemli oranda etkilediği gözükmemektedir. 0,2 mm katman kalınlığına sahip ABS numunelere 4,1 m/s hızla düşen ağırlık darbe testi uygulandığında ~11 J enerji absorblarken 6,1 m/s hızla uygulandığında ise ~3 J enerji absorbe edebilmiştir. Ayrıca 6,1 m/s hızla yapılan testte enerji absorblanması ilk 0,4 milisaniyede gerçekleşirken 4,1 m/s hızla yapılan testte ilk 1 milisaniyede gerçekleşmiştir. Çarpma anında oluşan etkinin düşük hızlarda daha yavaş yayıldığı sonucuna varılmaktadır.

Dolgu tiplerinin kırılma mekaniği üzerindeki etkisi incelendiğinde, şekil 5.11’de anlaşılacağı üzere üçgen, tetrahedral ve eşmerkezli desen tiplerinde çarpma etkisi genişçe yayılmamışken kübik, kübik altbölümlü ve lineer dolgu tiplerinde çarpma etkisi bütün malzemeye yayılarak hasar vermiştir.

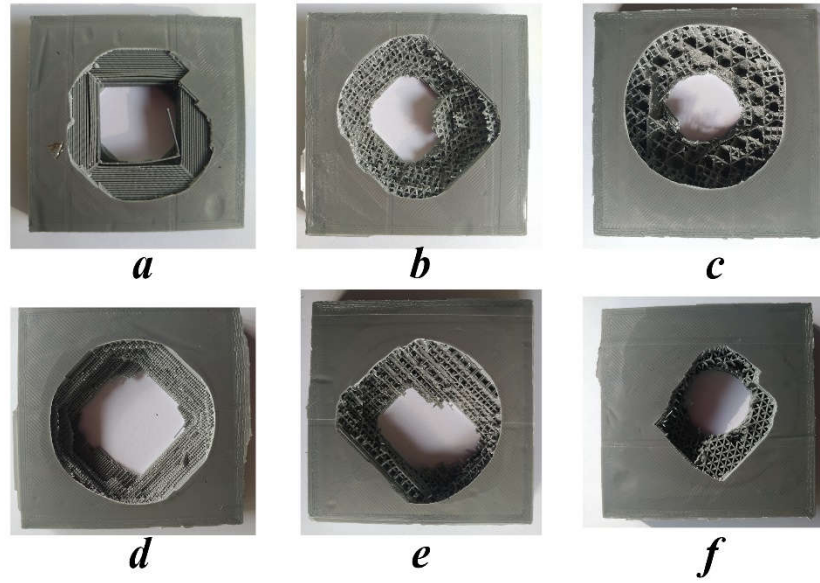
Bunun sebebi kübik, kübik altbölüm ve lineer dolgu tipinde iç yapının tasarımında iç yapının tasarımındaki kolonların birbiriyle bağlantılı olarak darbe etkisini yayarak iletirken diğer dolgu tiplerinde kolonların direk üst yüzeyden alt yüzeye bağlanması ve böylece üst yüzeye uygulanan kuvveti direkt alt yüzeye iletmesidir.

Şekil 5.12 bize farklı dolgu tiplerinin darbe enerjisi absorblama kabiliyetini göstermektedir. Tetrahedral ve kübik dolgu tipi ~2 J kadar enerji absorbe etmiştir.

Eşmerkezli, lineer ve üçgen dolgu ~4 J civarı enerji absorbe ederken kübik altbölümlü dolgu tipi 10,8 J ile en yüksek miktarda enerji absorbe etmiştir.



Şekil 5.10 : Farklı katman kalınlıklarında numunelerin 4,1 m/s çarpma hızında sönümlediği enerji miktarları.

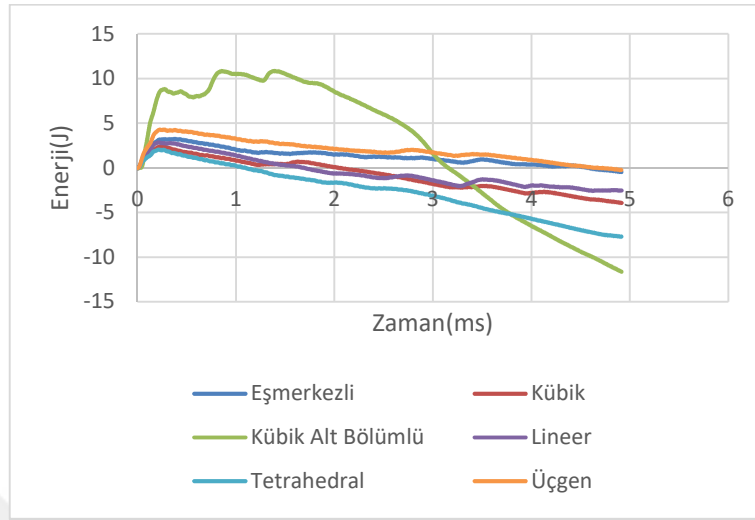


Şekil 5.11 : Farklı dolgu tiplerine sahip numunelerin test sonrası görünümü; a) eşmerkezli, b) kübik, c) kübik alt bölümlü, d) lineer, e) tetrahedral f) üçgen.

Şekil 5.12'den de anlaşılacağı üzere farklı dolgu tipleri farklı miktarlarda enerji absorbe etmekle beraber hepsi aynı şekilde enerjiyi absorblama desenine sahiptir. Bütün numuneler ilk darbe sonrasında çökmüştür. Hiçbirinde tekrar sekme gerçekleşmemiştir. Bu yüzden numune tek seferde enerjiyi absorblamış ve dışarı salıvermiştir.

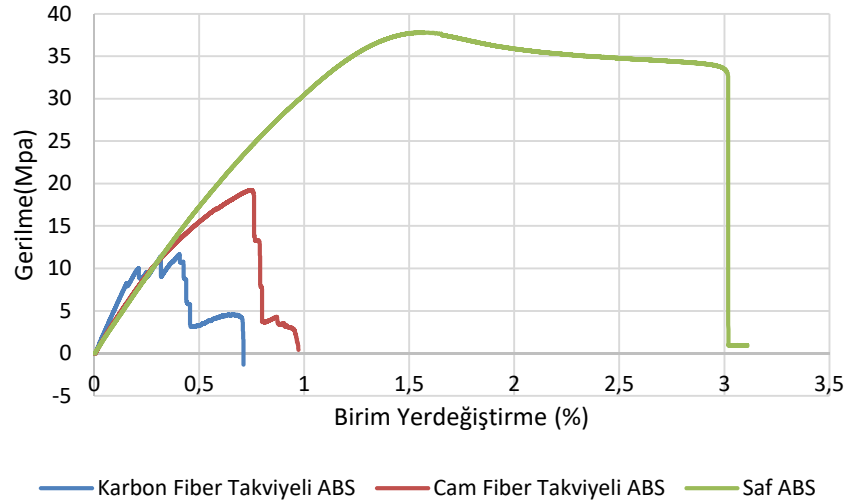
Şekil 5.13'de çekme testi sonuçları gösterilmiştir. Bu sonuçlar baktığımızda sırasıyla karbon fiber ve cam fiber takviyeli numunelerin çekme dayanımları 11,16 ve 19,01

Mpa, % uzama değerleri ise 0,7 ve 0,9 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar saf ABS malzemenin dayanım değerleri ile karşılaştırıldığında düşük çıkmaktadır.



Şekil 5.12 : Dolgu tiplerinin sönmülenen darbe enerjisine etkisi.

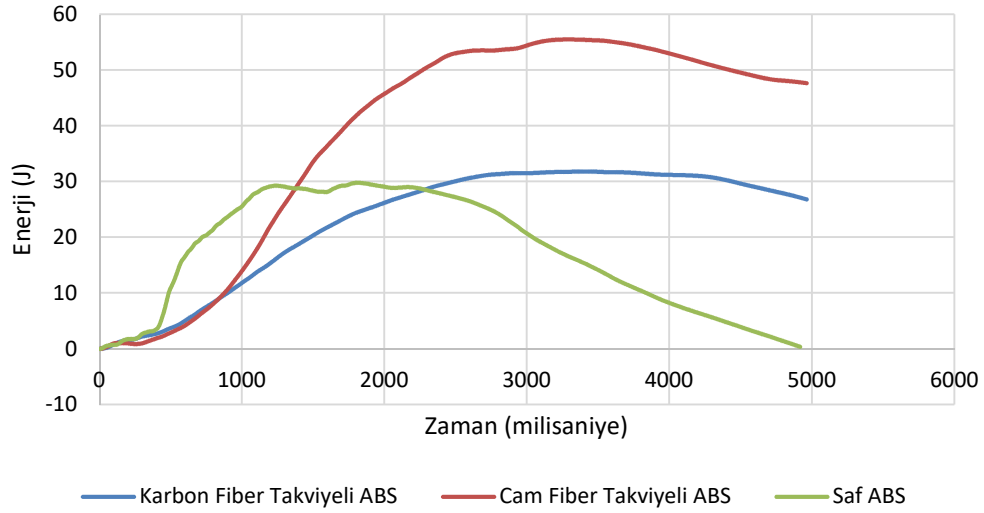
Bunun temel sebebi şekil ve şekil deki görsel verilerin de desteğiyle reçine içerisindeki boşluklar ile katman-fiber ve katman-katman arayüzey yapışmasının iyi olmayışıdır. Bu sebeple yük öncelikle katmanlara ve dolayısıyla sürekli fiberlere dengeli şekilde dağılamamıştır. Böylece kompozit yapı bir bütün olarak davranamamıştır.



Şekil 5.13 : Sürekli fiber takviyeli 3B numunelerin çekme dayanımları.

Şekil 5.14'e göre fiber takviyesinin 2 önemli etkisi olmuştur. Bunlardan ilki hem cam fiber hem de karbon fiber takviyesinde gözlemlenen darbe enerjisinin absorbe edilmesinin saf ABS numuneye göre daha uzun sürdüğüdür. İkinci önemli bulgu ise cam fiber takviyesinin ABS malzemesinin darbe direncini önemli oranda arttırdığıdır.

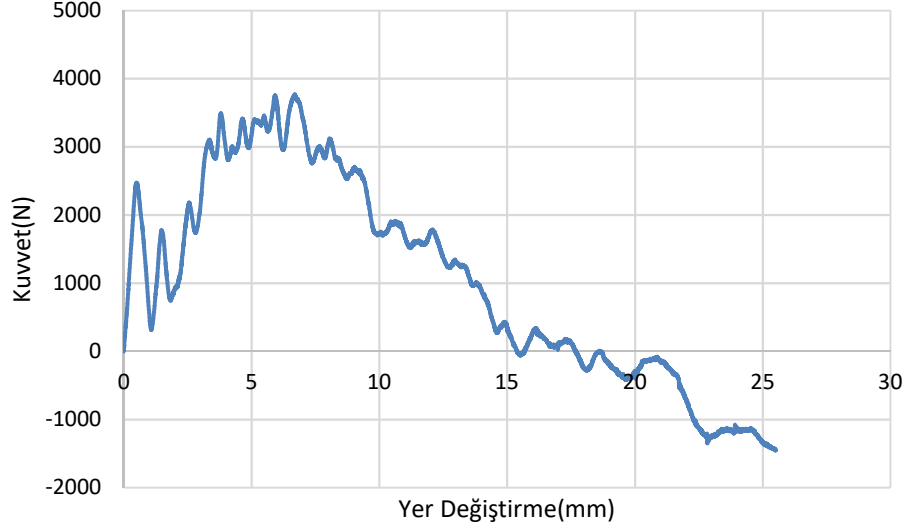
Şekil 5.14 dikkatle incelendiğinde karbon fiberin darbe direncinde önemli bir artış sağlamamakla birlikte numunenin hızlı bir şekilde hasara uğramasını geciktirir. Enerji eğrisinin tepe yaptığı nokta numunenin maksimum enerji sönümlendiği ve dolayısıyla en fazla deforme olduğu andır.



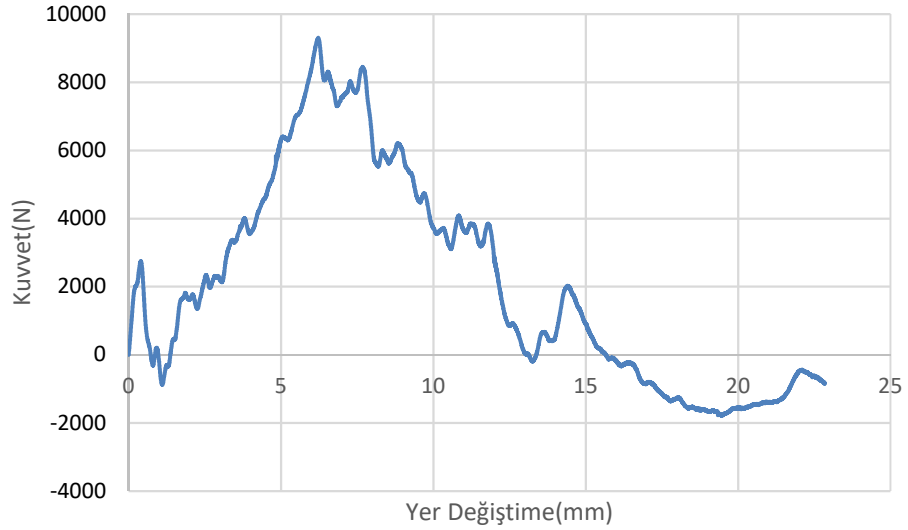
Şekil 5.14 : Sürekli fiber takviyeli 3B numunelerin sönümledikleri darbe enerjisi miktarları.

Saf malzemede bu tepe noktasına ~1200 milisaniyede ulaşırken karbon fiber takviyeli numune ~3000 milisaniyede tepe noktasına ulaşmaktadır. Saf numune 29,87 J enerji sönümlerken karbonfiber takviyeli numune 31,8 J enerji sönümlenmiştir. Cam fiber takviyeli numune ise yaklaşık %60 daha fazla sönümlenerek 55,4 J enerji absorbe etmiştir. Ayrıca malzemenin hasara uğrama hızını da yavaşlatmıştır.

Sürekli karbon fiber ve cam fiber takviyeli numunelerin kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri şekil 5.15 ve 5.16'da verilmiştir. Bu grafikler bize kırılmanın saf abs numunedeki gibi ani bir şekilde gerçekleşmediğini, bir sürece yayıldığını göstermektedir. Dolayısıyla kırılma anındaki yerdeğiştirme çok daha fazla olmuştur. Ayrıca şekil 5.15 ve 5.16'daki eğrilerin açık uçlu olması numunelerin delindiğini de göstermektedir. Ayrıca her iki grafikte de ilk pikin ardından bir düşüş ve tekrar yükselerek maksimum noktaya ulaşma gözlemlenmektedir. Bunun sebebinin en üst tabakanın geri kalan kısım ile iyi bir arayüzey bağlantısı kuramayarak tek başına davranış göstermiş olması olabilir. Şekil 5.17 çarpma anındaki sönümlenen enerji miktarlarını göstermektedir. Sürekli fiber takviyeli numunelerde kuvvetin maksimum noktaya ulaşması daha uzun sürmesinden dolayı saf ABS numuneye göre daha yüksek bir enerjiye ulaşmışlardır.



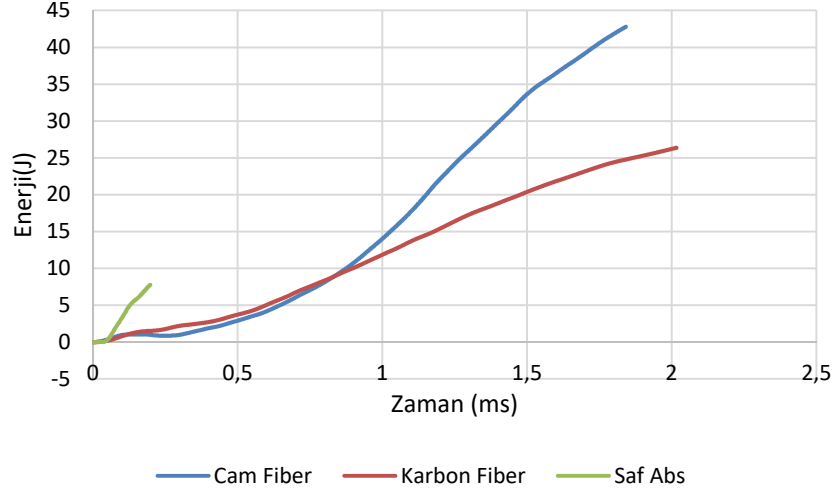
Şekil 5.15 : Sürekli karbon fiber takviyeli numunenin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 5.16 : Sürekli cam fiber takviyeli numunenin kuvvet-yerdeğiştirme grafiği.

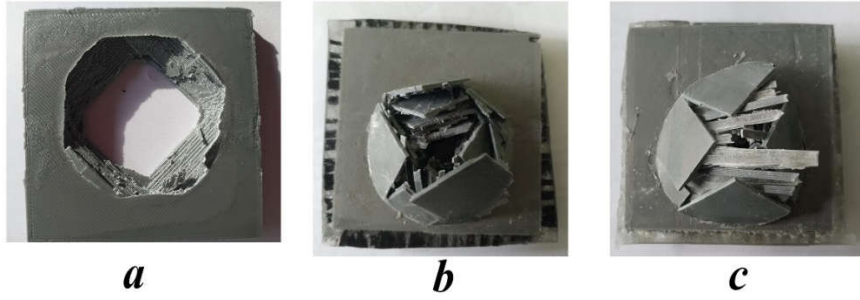
Sürekli karbon fiber ve cam fiber takviyeli numuneler saf ABS numuneye göre daha yavaş bir enerji sönümlemesi gerçekleştirerek saf ABS numunenin sönümlendiği enerjiyi 4 katı bir sürede sönümlenmişlerdir. Bu noktadan itibaren ise sönümlenen enerji miktarı, sürekli fiber takviyeli numuneler için hızlı bir şekilde artmış ve çarpma anının tepe noktasında sürekli cam fiber takviyeli numune ~ 42 J, sürekli karbon fiber takviyeli numune ise ~ 26 J çarpma enerjisi sönümlerken saf ABS numune ~ 7 J enerji sönümleyebilmiştir.

Cam fiber, karbon fiber ve saf ABS numuneler test sonrası karşılaştırıldığında, şekil 5.18'de göze çarpan ilk bulgu fiber takviyeli numunelerde hasara uğrama gerçekleşmiş ancak saf ABS numunedeki gibi parça kopması meydana gelmemiştir.

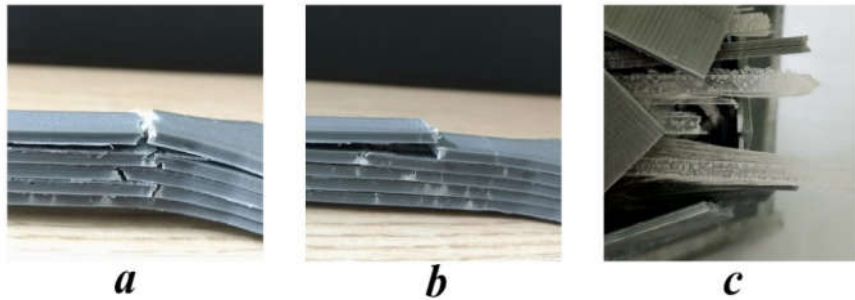


Şekil 5.17 : Test numunelerinin çarpma anındaki sönümledikleri enerji.

Bunda sürekli fiberlerin 0/90° yönelimle dizilerek yapıyı bir örgü şeklinde tutmasında etkisi vardır. Ayrıca numunelere dikkatli bakıldığında şekil 5.19-c’de olduğu gibi vakum infüzyon sırasında havanın içerde hapsoldüğü ve fiber-matris arayüzey bağlantısı için reçine infüzyon gerçekleştirildiği sırada içeride hava boşlukları oluşmasına sebep olduğu gözükmemektedir. Bu boşluklar dayanımı düşürücü etki yapmaktadır.



Şekil 5.18 : Sürekli fiber takviyeli 3B numunelerin test sonrası görünümü; a) saf ABS, b) karbon fiber takviyeli ABS, c) cam fiber takviyeli ABS.



Şekil 5.19 : Test sonrası oluşan hasarların makro görünümü a) çekme testi sonrası sürekli cam fiber takviyeli 3B numune, b) çekme testi sonrası sürekli karbon fiber takviyeli 3B numune, c) darbe testi sonrası sürekli cam fiber takviyeli 3B numune.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. Önce EYY yöntemi kullanılarak düşen ağırlık darbe testi için farklı üretim parametrelerine sahip saf ABS malzemedeki numuneler üretilmiştir. Böylece üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada test edilen üretim parametreleri katman kalınlığı, doluluk oranı, dolgu tipidir. Ayrıca çarpma hızında darbe sönümlenme kapasitesine ve kırılma mekaniğine etkisi incelenmiştir. Burada elde edilen verilerden yola çıkarak katman kalınlığı arttıkça darbe sönümlenme kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi katmanlar arası boşluk sayısının azalması ve böylece yapının rijitleşmesidir. Farklı dolgu tiplerinin hem kırılma mekaniği hem de darbe sönümlenme kapasitesini farklı şekillerde etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle eşmerkezli ve üçgen dolgu tiplerinde çarpma etkisi direkt alt tabakaya aktarılırken, kübik ve kübik altbölümlü dolgu tiplerinde çarpma etkisinin numuneye yayıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca doluluk oranının arttıkça malzemenin rijitliği arttığı için darbe sönümlenme kapasitesinin arttığı belirlenmiştir.

Çarpma hızının etkisi incelendiğinde belli bir eşik değere kadar darbe ucunun numuneyi tam olarak hasara uğratanmadığı gözlemlenmiştir. Bu eşik değerinin üzerinde kırılma mekaniğinin aynı kaldığı ancak hız arttıkça darbe ucunun delici etkisinin çarpma etkisini bastırarak enerji sönümlenme kabiliyetini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

İkinci kısımda ise cam fiber veya karbon fiber ile saf ABS malzeme kullanılarak EYY ve vakum infüzyonu birleştirilerek fiber takviyeli tabakalı kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen sürekli fiber takviyeli 3B numunelere çekme ve düşen ağırlık darbe testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar darbe testi için olumlu olmakla birlikte çekme testinde istenilen verim alınamamıştır. Darbe testinde her iki fiber tipinin kırılmayı azalttığı gözlemlenmiş ve cam fiberin enerji sönümlenme kapasitesini arttırdığı bulunmuştur. Çekme testinde ise elde edilen sonuçlar saf ABS malzemeye göre düşük çıkmıştır. Numuneler üzerinde inceleme yapıldığında vakum infüzyon sırasında boşlukların oluştuğu ve tabakalar arası ile katman-fiber arayüzey

bağlanmalarının yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple çekme yükü dengeli dağılmamış ve sonuçların beklenenden düşük olmasına sebep olmuştur.

Bütün bu bilgiler ışığında gelecek çalışmalarda kullanılan epoksi reçine değiştirilerek ve/veya ABS malzemeye yüzey işlemi uygulanarak arayüzey bağlanmaları iyileştirilebilir. Böylece dayanım değerlerinde istenilen artış sağlanabilir. Farklı matris ve fiber malzemeleri kullanılarak üretim gerçekleştirilebilir. Ayrıca şu anki verilerle bu yeni birleştirilmiş yöntemle karmaşık şekilli kompozit parçaların üretimi teorik olarak mümkün olmakla birlikte pratiğe dökülebilir. Ve özellikle iç boşluklu parçaların üretiminde oluşabilecek sorunlar (boşluğun reçine ile dolması gibi) irdelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Zweben, C.** (1998). Composite Materials and Mechanical Design, *Mechanical Engineer's Handbook*: Wiley
- [2] **Gupta, P. K.** (1988). Glass fibers for composite materials, *Elsevier Science Publishers B. V., Fiber Reinforcements for Composite Materials*, 2, 19-71.
- [3] **Lubin, G.** (2013). *Handbook of composites*: Springer Science & Business Media.
- [4] **Mallick, P. K.** (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. New York: CRC press.
- [5] **Peters, S. T.** (2013). *Handbook of composites* (2. Baskı): Springer Science & Business Media.
- [6] **Wallenberger, F.** (2000). Structural Silicate and Silica Glass Fibers, In *Advanced Inorganic Fibers* (ss.129-168): Springer.
- [7] **Wallenberger, F. T.** (1997). Melt viscosity and modulus of bulk glasses and fibers: Challenges for the next decade, *Glass Science And Technology-Frankfurt Am Main*-, 70(C), 63-78.
- [8] **Loewenstein, K. L.** (1975). The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers. Amsterdam: Elsevier
- [9] **ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.** (2015). ASTM International.
- [10] **Edison, T. A.** (1880). Electric lamp. In: Google Patents.
- [11] **Tang, M. M., & Bacon, R.** (1964). Carbonization of cellulose fibers—I. Low temperature pyrolysis. *Carbon*, 2(3), 211-220.
- [12] **Shariq, K., Anderson, E., & Yamaki, M.** (1999). Carbon Fibers. *Chemical Economics Handbook Market Research Report, SRI International, Menlo Park, CA*.
- [13] **Feldman, L.** (1986). High temperature creep effects in carbon yarns and composites. (Rapor No. TOR0086A(2728-02)-1). Arlington : Office of Naval Research.
- [14] **Bright, A., & Singer, L.** (1979). The electronic and structural characteristics of carbon fibers from mesophase pitch, *Carbon*, 17(1), 59-69.
- [15] **Jacobsen, G., & Schimpf, W. C.** (2009). Process Development and Characterization of Stretch Broken Carbon Fiber Material, *SAMPE'09 Spring Symposium Technical Conference*.
- [16] **Apicella, A., Migliaresi, C., Nicodemo, L., Nicolais, L., Iaccarino, L., & Roccotelli, S.** (1982). Water sorption and mechanical properties of a glass-reinforced polyester resin. *Composites*, 13(4), 406-410.
- [17] **Bisagni, C., Di Pietro, G., Frascini, L., & Terletti, D.** (2005). Progressive crushing of fiber-reinforced composite structural components of a Formula One racing car. *Composite Structures*, 68(4), 491-503.
- [18] **Seal, E. C., Bodepudi, V. P., Biggs Jr, R. W., & Cranston, J. A.** (1995). High-Temperature Graphite/Phenolic Composite. (Rapor No. 71) Wheeling, WV : NASA
- [19] **Trick, K. A., & Saliba, T. E.** (1995). Mechanisms of the pyrolysis of phenolic resin in a carbon/phenolic composite. *Carbon*, 33(11), 1509-1515.
- [20] **Pilato, L.** (2010). *Phenolic resins: a century of progress* (Vol. 11): Springer.

- [21] Song, W., Gu, A., Liang, G., & Yuan, L. (2011). Effect of the surface roughness on interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy resin composites. *Applied surface science*, 257(9), 4069-4074.
- [22] Montserrat, S., & Málek, J. (1993). A kinetic analysis of the curing reaction of an epoxy resin. *Thermochimica acta*, 228, 47-60.
- [23] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2014). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17): Springer.
- [24] Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012.
- [25] Gebhardt, A. (2011). Understanding additive manufacturing. Munich, GE : Hanser Publications
- [26] Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215-243.
- [27] Kruth, J.-P., Leu, M.-C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *Cirp Annals*, 47(2), 525-540.
- [28] Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. (2019). Retrieved from <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>
- [29] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Vat photopolymerization processes. In *Additive Manufacturing Technologies*, 63-106: Springer.
- [30] Crivello, J. (1998). Photoinitiators for free radical cationic and anionic photopolymerization. *Surface and coatings technology*, 168.
- [31] Kruth, J.-P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, 11(1), 26-36.
- [32] Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1-4), 389-405.
- [33] Bai, Y., & Williams, C. B. (2015). An exploration of binder jetting of copper. *Rapid prototyping journal*, 21(2), 177-185.
- [34] Shankar, V., Rao, K. B. S., & Mannan, S. (2001). Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. *Journal of nuclear materials*, 288(2-3), 222-232.
- [35] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). Sheet lamination processes. In *Additive Manufacturing Technologies*, 223-252: Springer.
- [36] Roys, J., Enlow, H., & Martus, P. (2003). Thick sheet lamination product and process. In: Google Patents.
- [37] Keicher, D. M., & Miller, W. D. (1998). LENSTM moves beyond RP to direct fabrication. *Metal powder report*, 12(53), 26-28.
- [38] Lewis, G., Nemec, R., Milewski, J., Thoma, D., Barbe, M., & Cremers, D. (1994). Directed light fabrication, *ICALEO '94*, Orlando.
- [39] House, M., Whitney, E., Krantz, D., & Arcella, F. (1996). Rapid laser forming of titanium near shape articles: LaserCast, *International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- [40] Sugiyama, K., Matsuzaki, R., Ueda, M., Todoroki, A., & Hirano, Y. (2018). 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, 114-121.
- [41] Lebedev, S., Gefle, O., Amitov, E., Berchuk, D. Y., & Zhuravlev, D. (2017). Poly (lactic acid)-based polymer composites with high electric and thermal conductivity and their characterization. *Polymer Testing*, 58, 241-248.

- [42] Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., . . . Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144-150.
- [43] Hou, Z., Tian, X., Zhang, J., & Li, D. (2018). 3D printed continuous fibre reinforced composite corrugated structure. *Composite Structures*, 184, 1005-1010.
- [44] Bollig, L. M., Hilpisch, P. J., Mowry, G. S., & Nelson-Cheeseman, B. B. (2017). 3D printed magnetic polymer composite transformers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 442, 97-101.
- [45] Li, N., Li, Y., & Liu, S. (2016). Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 218-225.
- [46] Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L., & Li, Z. (2001). Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. *Materials Science and Engineering: A*, 301(2), 125-130.
- [47] Kang, M., Pyo, Y., young Jang, J., Park, Y., Son, Y.-H., Choi, M., . . . Lee, C. S. (2018). Design of a shape memory composite (SMC) using 4D printing technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, 283, 187-195.
- [48] Tian, X., Liu, T., Wang, Q., Dilmurat, A., Li, D., & Ziegmann, G. (2017). Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Journal of cleaner production*, 142, 1609-1618.
- [49] Zhang, W., Cotton, C., Sun, J., Heider, D., Gu, B., Sun, B., & Chou, T.-W. (2018). Interfacial bonding strength of short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene composites fabricated by fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 137, 51-59.
- [50] Stepashkin, A., Chukov, D., Senatov, F., Salimon, A., Korsunsky, A., & Kaloshkin, S. (2018). 3D-printed PEEK-carbon fiber (CF) composites: Structure and thermal properties. *Composites Science and Technology*, 164, 319-326.
- [51] Ryder, M. A., Lados, D. A., Iannacchione, G. S., & Peterson, A. M. (2018). Fabrication and properties of novel polymer-metal composites using fused deposition modeling. *Composites Science and Technology*, 158, 43-50.
- [52] Cantrell, J. T., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton, J., . . . Kroese, C. (2017). Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts. *Rapid prototyping journal*, 23(4), 811-824.
- [53] 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: Engineering*, 80, 369-378.
- [54] Riddick, J. C., Haile, M. A., Von Wahlde, R., Cole, D. P., Bamiduro, O., & Johnson, T. E. (2016). Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modeling. *Additive Manufacturing*, 11, 49-59.
- [55] Chockalingam, K., Jawahar, N., & Praveen, J. (2016). Enhancement of anisotropic strength of fused deposited ABS parts by genetic algorithm. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(15), 2001-2010.
- [56] Ziemian, S., Okwara, M., & Ziemian, C. W. (2015). Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene. *Rapid prototyping journal*, 21(3), 270-278.
- [57] Shofner, M., Lozano, K., Rodríguez-Macías, F., & Barrera, E. (2003). Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling. *Journal of applied polymer science*, 89(11), 3081-3090.

- [58] Hwang, S., Reyes, E. I., Moon, K.-s., Rumpf, R. C., & Kim, N. S. (2015). Thermo-mechanical characterization of metal/polymer composite filaments and printing parameter study for fused deposition modeling in the 3D printing process. *Journal of Electronic Materials*, 44(3), 771-777.
- [59] Perez, A. R. T., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(3), 343-353.
- [60] Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B., & Roberson, D. A. (2015). Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. *Additive Manufacturing*, 6, 16-29.
- [61] Caminero, M., Chacón, J., Garcia-Moreno, I., & Rodriguez, G. (2018). Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148, 93-103.
- [62] Song, P., Zhou, C., Fan, H., Zhang, B., Pei, X., Fan, Y., . . . Dong, Z. (2018). Novel 3D porous biocomposite scaffolds fabricated by fused deposition modeling and gas foaming combined technology. *Composites Part B: Engineering*, 152, 151-159.
- [63] Górski, F., Kuczko, W., & Wichniarek, R. (2014). Impact strength of ABS parts manufactured using Fused Deposition Modeling technology. *Archives of Mechanical Technology and Automation*, 31(1), 3-12.
- [64] Alvarez, C., Kenny, L., Lagos, C., Rodrigo, F., & Aizpun, M. (2016). Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ingeniería e Investigación*, 36(3), 110-116.
- [65] Berretta, S., Davies, R., Shyng, Y., Wang, Y., & Ghita, O. (2017). Fused Deposition Modelling of high temperature polymers: Exploring CNT PEEK composites. *Polymer Testing*, 63, 251-262.
- [66] *ISO Standard 6603-1. Plastics -- Determination of puncture impact behaviour of rigid plastics -- Part 1: Non-instrumented impact testing.* (2000).
- [67] Cura(Software)(t.y.). *Wikipedia*. Erişim: 21 Mart, 2019, [https://en.wikipedia.org/wiki/Cura_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cura_(software)).
- [68] *ISO Standard 527. Plastics—Determination of Tensile Properties—Part 1: General Principles. Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fibre-Reinforced Plastic Composites.* (1997).

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Mümin BIYIKLIOĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri : 05.09.1992 -Trabzon
E-posta : muminbiyiklioglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2014,Yıldız Teknik Üniversitesi,Kimya-Metalurji
Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

- Kayalar Bakır A. Ş. – Üretim Mühendisi – Ağustos 2016 / Şubat 2017
- Bursa Teknik Üniversitesi – Araştırma Görevlisi - Mart 2017 / Günümüz

ESERLER:

- Bildiri - Biyıklıoğlu et al., Impact Energy Consumption Capabilities of 3D Printed Specimens, ISAS, Samsun, Turkey