



T.C.

KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMER MATRİSLİ SÜREKLİ FİBER TAKVİYELİ
KOMPOZİT PARÇA ÜRETİMİ İÇİN
BİR EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

MUHAMMED ENES GEBEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

KAHRAMANMARAŞ 2018

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**POLİMER MATRİSLİ SÜREKLİ FİBER TAKVİYELİ
KOMPOZİT PARÇA ÜRETİMİ İÇİN BİR EKLEMELİ
İMALAT YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

MUHAMMED ENES GEBEL

Bu tez,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2018

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi Muhammed Enes GEBEL tarafından hazırlanan “Polimer Matrisli Sürekli Fiber Takviyeli Kompozit Parça Üretimi İçin Bir Eklemeli İmalat Yönteminin Geliştirilmesi” adlı bu tez, jürimiz tarafından 05 / 07/ 2018 tarihinde oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ERMURAT

.....

(DANIŞMAN)

Makine Mühendisliği ABD, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Prof. Dr. Metin KÖK (ÜYE)

.....

Makine Mühendisliği ABD, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr Bülent KAYA (ÜYE)

.....

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği , Erciyes Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa ŞEKKEİ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Muhammed Enes GEBEL

Bu çalışma Kahramanmaraş Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından “3D Yazıcı ile Kompozit Parça Üretimi Yönteminin Geliştirilmesi” İsimli projeyle desteklenmiştir.

Proje No: 2017/2-25 YLS

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

ÖZET

Teknolojinin her geçen gün ilerlemesi insan hayatında gereksinimleri çeşitlendirmiş; bu gereksinimler imalat yöntemlerinde her geçen gün yeni bir metoda ihtiyaç oluşturmıştır. Son yıllarda isminden sıkça bahsettiren bir imalat yöntemi de eklemeli imalattır. Eklemeli imalat yöntemi ilk olarak 1986 da Charles Hull tarafından tanımlanmıştır. Eklemeli imalat 3 boyutlu katı model verisi kullanılarak fiziksel parçaların bilgisayar kontrollü olarak otomatik bir şekilde geleneksel imalat yöntemleri kullanılmadan üretildiği modern bir imalat metodudur. Bu yöntemde CAD verisi STL formatına çevrilerek katmanlarına ayrılır. Her katmanın kesit alan verisi kullanılarak en alt katmandan en üst katmana kadar ekleme devam ettirilir. Böylelikle karmaşık geometrilere sahip ürünler kolaylıkla imal edilebilir.

Son yıllarda eğilim gösterilen bir malzeme türü de kompozit malzemelerdir. Kompozit; iki veya daha fazla malzemenin, her bir malzemenin üstün özelliklerini kullanmak amacıyla, bir araya gelerek oluşturduğu yeni bir malzemedir. Kompozitler hafiflikleriyle ve mukavemet değerleriyle birçok sektörde yerini almıştır.

Bu çalışmada; karbon ve cam fiber takviyeli ultraviyole ışınla kürlenebilen polimer matrisli kompozit ürünlerin, üretilebileceği bir eklemeli imalat yöntemi geliştirilmiş ve çeşitli parametreler irdelenmiştir. Yapılan çalışmalarda cam fiberin karbon fibere kıyasla daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Cam fiber takviyeli kompozit parça üretimi optimize edilmiştir. Deneyler için özgün bir nozul tasarlanmıştır. Nozul çıkışında tablaya yığılan kompozit lifler ultraviyole ışınla kürlenerek üretim gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, 3 Boyutlu Yazıcı, Sürekli Fiber Takviyeli Epoksi Reçine Matrisli Kompozit, Ultraviyole ile Kürlenebilen Reçine

SUMMARY

The progress of technology every day has diversified requirements in human life; These requirements, has created a need for a new method of manufacturing methods each day. In recent years, A manufacturing method that has frequently mentioned is Additive Manufacturing. Additive Manufacturing was first described in 1986 by Charles Hull. This technology creates objects by adding materials to reduce waste while reaching satisfactory geometric accuracy, without traditional manufacturing methods. It begins with a meshed 3D computer model that can be created by acquired image data or structures built in computer-aided design (CAD) software. A STL (Surface Tessellation Language) file is commonly created. The mesh data will be further sliced into a build file of 2D layers and sent to the 3D printing machine. Thus, products with complex geometries can be manufactured easily.

In recent years, composites are also a type of material that has shown a tendency. Composite is a new material that two or more materials come together to use the superior properties of each material. Composites have taken place in many sectors with their lightness and strength values

In this study; an additive manufacturing method was developed and some parameters were investigated in order to create carbon and glass fiber reinforced photocurable polymer matrix composites. In the studies, it has been understood that the glass fiber is more suitable than the carbon fiber. Glass fiber reinforced composite part production is optimized. A unique nozzle is designed for experiments. At the exit of the nozzle, the composite fibers stacked on the table were cured by ultraviolet ray.

Key words: Additive Manufacturing, 3 Dimensional Printer, Continuous Fiber reinforced Epoxy Resin Matrix Composite, Ultraviolet Curable Resin,

TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecim boyunca bilimsel olarak beni her zaman sabır ve özveri ile bir adım öne taşımaya çalışan, gerektiğinde çalışmalarımın hızlı bir şekilde devam etmesi için maddi desteklerini esirgemeyen, her şeyden önce bir akademisyen ve bir birey olarak etik titizliği ile bir örnek olarak hatırlayacağım, danışmanım, Sayın Dr.Öğr.Üyesi Mehmet ERMURAT hocama, çalışmalarım sırasında desteklerinden dolayı mesai arkadaşım Arş. Gör. Semih KORKMAZ beye, süreç içerisinde beni anlayışla karşılayarak her daim cesaretlendiren değerli aile üyelerimin tek tek ve şahsen her birine ve KSÜ ailesine teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ	3
3. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ VE KOMPOZİT PARÇA ÜRETİM UYGULAMALARI	7
3.1. Eriyik Yığma Prosesi (FDM)	8
3.2. Katmanlı Nesne İmalatı (LOM)	16
3.3. Stereolitografi (Stereolithography Apparatus-SLA)	20
3.4. Ekstruzyon	23
3.5. Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS)	24
4. MATERYAL METOD	26
4.1. Kompozit Lif Üretimi	28
4.1.1. Nozul ekseninde (z eksen) yapılan deneyler	28
4.1.2. Tabla düzleminde (X-Y düzlemi) kompozit lif üretimi	30
4.2. Kompozit Liflerin İstiflenmesi	33
5. SONUÇLAR	34
5.1. Kompozit Lif Üretiminin İrdelenmesi	34
5.1.1. Z ekseninde üretilen karbon fiber takviyeli kompozit lifler	34
5.1.2. Z ekseninde yazılan cam fiber-epoksi kompozit lifler	37
5.1.3. Tabla düzleminde kompozit lif üretimi	39

5.1.4. Liflerin yan yana istiflenmesinin irdelenmesi	50
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	57
7. GELECEK ÇALIŞMALAR.....	59
8. KAYNAKÇA	60
ÖZGEÇMİŞ.....	67



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan bazı malzemelerin çekme testi değerlerinin karşılaştırılması	5
Şekil 2. (a) Bağ yapma formasyonu (b) Eriyik yığma ile üretilen bir parçanın kesit görüntüsü (Sun , ve diğerleri 2008)	9
Şekil 3. a) tek yönlü $[0^\circ]$, b) çift yönlü $[45^\circ/-45^\circ]$ olarak üretilen numunelerin çekme testi sonucu kırılan yüzeylerinin SEM görüntüleri (Ahn, ve diğerleri 2002).....	10
Şekil 4. Hizalanmış VGCF ile FDM tarafından hazırlanan VGCF / ABS kompozit malzemenin SEM görüntüsü (Shofner ML 2003)	11
Şekil 5. Eriyik yığma modellemesi ile elde edilen parçalarda fiberle güçlendirilmiş kompozitlerin şematik gösterimi (Tekinalp, ve diğerleri 2014)	12
Şekil 6. (a,b) FDM ile üretilmiş saf ABS'nin, (c) ağırlıkça %10 karbon fiber eklenmiş parçanın ve (d) basınçlı kalıplama ile üretilmiş ağırlıkça %10 karbon fiber katkılı kompozitin, SEM görüntüleri (Tekinalp, ve diğerleri 2014).....	13
Şekil 7. Eriyik yığma modellemesi yönteminde nozulda emdirilerek sürekli karbon fiberlerin üretimi (a) sistem şeması; (b) kullanılan fiber demeti; (c) üretim esnasından bir görüntü. (Matsuzaki , ve diğerleri 2016)	14
Şekil 8 a) PLA'nın, tek yönlü karbon fiber ile güçlendirilmiş termoplastiğin (CFRTP) ve tek yönlü jüt fiber ile güçlendirilmiş termoplastiğin (JFRTP) Gerilim-Birim Uzama eğrileri; (b) bazı metodlara göre young modülü ve mukavemet kıyaslaması (Matsuzaki , ve diğerleri 2016).....	14
Şekil 9. Methylene Dichloride ile modifiye edilmiş CF-PLA, CF-PLA ve saf PLA'nın mekanik özellikleri (a) çekme mukavemeti, (b) eğilme mukavemeti (Li, Li ve Liu 2016) .	15
Şekil 10. (a,b) sürekli karbon ile güçlendirilmiş bir PLA tabanlı bir parçanın Sem görüntüsü ve (c) kesit görüntüsü. (Tian , ve diğerleri 2016)	15
Şekil 11. Karbon fiberle güçlendirilmiş PLA malzeme ,sürekli karbon fiber kullanarak yüksek eğrilikler inşa edilebilmiştir. (Tian , ve diğerleri 2016)	16
Şekil 12. Katmanlı nesne İmalatının Şematik Gösterimi (Ahn, Kweon ve Choi, ve diğerleri 2012).....	17
Şekil 13. (a) Eğimli LOM'un çalışma şeması, (b)Lom ile üretilmiş kürlenmiş cam fiber/epoksi kompozit parça, ve(c) LOM ile prepreg kumaştan üretilmiş ve CO ₂ ile kesilmiş cam fiber/epoksi kompozit parça (Klosterman , ve diğerleri 1999).....	18
Şekil 14. (a) tek yönlü kumaş ile LOM'da üretilmiş cam fiber/epoksi kompozit parça, sağdaki parça kürlenmiştir, ve (b) $[0/90]$ dizilim ile kesit görünümü (Klosterman D 1998)	19
Şekil 15. (a) Lazer yardımcı AM prosesinin şematik gösterimi ve üretilmiş örnek parça . (b) tek yönlü ve çift yönlü kumaşların çekme gerilmeleri. (c) Mukavemet açısından diğer metodlarla karşılaştırılması (Parandoush P 2017).....	20
Şekil 16. SLA ile üretilmiş hacimce %20 fiber içeren polimer kompozitin SEM görüntüsü, (a) Kalıplanmış örnek; (b) Lazer tarama ile örnek (Cheah C 1999).....	21

Şekil 17. (a) üçgensel bal peteği şeklindeki parçanın 3 boyutlu yazımından bir görüntü. (b) kompozit mürekkep yığılması sırasında oluşan sürecin şematik görünümü (Compton ve Lewis 2014).....	24
Şekil 18. Seçmeli lazer sinterleme yönteminin şematik gösterimi (Shahzad , ve diğerleri 2014).....	25
Şekil 19. Nozul ve Led lamba montajı	27
Şekil 20. Tasarlanan nozul ve üretim şeması	28
Şekil 21. Karbon (solda) ve cam (sağda) fiber ile yapılan deneyler.....	29
Şekil 22. Tabla düzleminde üretilen bir kompozit lif.....	31
Şekil 23. Üretim esnasında dönüş kabiliyetin incelenmesi	32
Şekil 24. Karbon fiberle elde edilen kompozit lifler	34
Şekil 25. 1, 1.4 , 1.8 mm nozul çapında ışık güç yoğunluğuna göre kürlenme oranı.....	36
Şekil 26. Cam fiberle kompozit numuneler.....	37
Şekil 27. Farklı nozul çaplarında, cam fiber deneylerinde elde edilen Kütle Oranları	38
Şekil 28. 300mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen numuneler	40
Şekil 29. 375mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen numuneler	41
Şekil 30. 450 mm/dak ilerleme hızıyla yığılmış kompozit lif numuneleri.....	41
Şekil 31. 525 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri.....	42
Şekil 32. 600 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri.....	42
Şekil 33. 675 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri.....	43
Şekil 34. 750mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri.....	43
Şekil 35. 825 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri.....	44
Şekil 36. En üstten, alta 0.5, 0.75, 1, 1.25 mm nozul yükseklikleriyle üretilen kompozit lif numuneleri.....	45
Şekil 37. Kare şeklinde kapalı kompozit lif üretimi (üstte 525 mm/dak, altta 675 mm/dak)	47
Şekil 38. 825mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kare şekilli numuneler.....	48
Şekil 39. 675 ve 525mm/dak ilerleme hızıyla yığılan altıgen şekilli numuneler	49
Şekil 40. 2 ve 3 mm çaplarında U dönüş numuneleri.....	50
Şekil 41 . 0.5 mm yanal istif mesafesiyle, 525 mm/dak üretim hızıyla yığılan numuneler	51
Şekil 42. 0.75 mm yanal istif mesafesiyle, 525 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler	52
Şekil 43. 1 mm yanal istif mesafesiyle, 525 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler..	52
Şekil 44. 1.25 mm yanal istif mesafesiyle, 525 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler	53
Şekil 45. 0.75 mm yanal istif mesafesiyle, 675 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler	54
Şekil 46. 1 mm yanal istif mesafesiyle, 675 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler.	54

Şekil 47. 1.25 mm yanal istif mesafesiyle, 675 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler	55
Şekil 48. 7 sıra 2 kat olarak üretilen numune	56



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Değişken Parametreler	29
Tablo 2. Karbon fiberle yapılan deneylerden elde edilen veriler	35
Tablo 3. Cam fiber ile yapılan deneylerde ağırlık ve kütle oranı değerleri	38



1. GİRİŞ

Teknolojinin her geçen gün ilerlemesi insan hayatında gereksinimleri çeşitlendirmiş; bu gereksinimler imalat yöntemlerinde her geçen gün yeni bir metoda ihtiyaç oluşturmıştır. Son yıllarda isminden sıkça bahsettiren bir imalat yöntemi de eklemeli imalattır. 3 boyutlu yazım olarak da isimlendirilen Eklemeli İmalat yöntemi ilk olarak 1986 da Charles Hull tarafından tanımlanmıştır (Hull 1986) . Eklemeli imalat 3 boyutlu katı model verisi kullanılarak fiziksel parçaların bilgisayar kontrollü olarak otomatik bir şekilde geleneksel imalat yöntemleri kullanılmadan üretildiği modern bir imalat metodudur. Bu yöntemde, 3 boyutlu katı modelleme yazılımları ile tasarlanan parçanın CAD verisi *STL (stereolithography)* veri formatına çevrilerek dilimleme programları yardımıyla katmanlarına ayrılır. Her katmanın kesit alan verisi kullanılarak üretim metoduna uygun hareket vektörleri elde edilir. Elde edilen bu hareket verisi ile bir katman kalınlığındaki parçanın ilgili katmanının üretimi malzeme ekleme suretiyle gerçekleştirilir. En alt katmandan en üst katmana kadar bütün katmanların birbiri üzerine eklenerek üretilmesiyle parça üretimi gerçekleştirilir. Böylelikle karmaşık geometrilere sahip ürünler kolaylıkla imal edilebilir.

Yıllardır süregelen çalışmalar neticesinde eklemeli imalat teknolojilerinin örnekleri havacılık, otomotiv, biomedikal, mimari gibi pek çok alanda görülmektedir (Guo ve Leu 2013). Eklemeli imalat, hızlı prototipleme ve hızlı üretimde kullanım kolaylığı ve düşük maliyetleri sebebiyle eksponansiyel bir büyümeyle çok hızlı bir şekilde gelişmeye devam etmektedir. Hassas toleranslarla karmaşık geometrilerin kolayca üretilmesi eklemeli imalat sektörünü kısa sürede milyar dolarlık bir endüstri haline getirmiştir (Horn ve Harrysson 2012) (Wong ve Hernandez 2012).

Bir modelin hızlı bir şekilde fiziksel nesneye dönüştürme olanağı ile eklemeli imalatla elde edilen ürünler fonksiyonel olarak kullanılmak istense de mukavemet sorunlarından dolayı ilk yıllarda fonksiyonel olarak kullanılamamakta, daha çok prototipleme amacıyla kullanılmaktaydı (Wang, ve diğerleri 2017). Günümüzde eklemeli imalat üzerine yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmı parçaların direkt bir şekilde kullanılabileceği özellikle, boyutsal toleranslar dâhilinde, hassas yüzey kalitesinde ve mukavemet bakımından kabul edilebilir değerlerin yakalanması üzerine yoğunlaşmıştır (Ermurat 2009). Bu durum, kavramsal ürün tasarım denemeleri, hızlı prototipleme sistemleri dışında bu teknolojinin

fonksiyonel ve adaptasyon uygulamaları, master modeller ve son olarak hızlı imalat olanaklarıyla kullanılmasının önünü açmıştır (Kara 2013).

İhtiyaç duyulan ürünlerin fonksiyonel özellikte ve direkt olarak kullanılma isteği eklemeli İmalatın özellikle mühendislik uygulamalarındaki önemini giderek artırmış, çok çeşitli malzemelerin bu üretim yöntemlerinde hammadde olarak kullanılabilmesi için çeşitli Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Polimerlerin 3D baskısının, havacılık endüstrisinde karmaşık hafif yapılar (Kroll ve Artzi 2011), yapısal modeller için mimari endüstriler (Wong ve Hernandez 2012), eser çoğaltma veya eğitim için sanat alanları (Short 2015) ve dokuların ve organlar için tıbbi alanlar (Murphy ve Atala 2014) kapsamında uygulamalarını görmek mümkündür.

Günümüze kadar eklemeli imalat endüstrisindeki çalışmaların büyük bir kısmı tek bir malzemeden ürün üretimi üzerine yoğunlaşmıştır. Malzemelerin tek tip ve sınırlı olması ürünlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından da sınırlamaları beraberinde getirmiştir. Bu sınırlamaları aşma isteği eklemeli imalat teknolojilerinde tek proseste birden fazla malzeme türünün kullanımının optimize edildiği çalışmaların önünü açmıştır.

Bu tez kapsamında bazı polimer matrisli kompozit malzeme üretim yöntemlerinden kısaca bahsedilerek eklemeli imalat yöntemi ile polimer matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi üzerine yapılan çalışmalar özetle verilecek. Daha sonra proje kapsamında geliştirilen ve polimer matrisli fiber takviyeli parçaların eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesine temel teşkil edecek deney seti tanıtılarak, yapılan deneysel çalışma sonuçları irdelenecektir.

2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Bir veya daha fazla sayıdaki aynı veya birbirinden farklı gruptaki malzemelerin birbirlerinin zayıf yönünü tamamlayarak veya üstün özelliklerini pekiştirerek elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş malzeme sistemine, kompozit malzeme denir. Kompozit malzemelerin eklemeli imalat yöntemleri ile üretilebilir olması eklemeli imalat yöntemleri ile elde edilen standart (tek bileşenli) parçaların sahip olduğu sınırlamaların ortadan kaldırılması açısından önem arz etmektedir. Kompozit malzemelerin bu teknolojiye kazandırılması ile birlikte üretilen ürünlerin fonksiyonel olarak kullanılması hedeflenmektedir. Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde elle yatırma, vakum infüzyon, püskürtme, sıcak presleme, pultrüzyon, prepreg gibi yöntemler kullanılır. Bu yöntemler kısaca özetlenmek gerekirse;

Elle yatırma genellikle kumaş şeklinde örülmüş takviye malzemesinin kalıba serilmesi ve açık kalıp üzerine sıvı reçine uygulanması temel prensibine dayanır. Kalıp yapımında da, tıpkı üründe olduğu gibi kompozit malzemeler kullanılabilir. Proses isimlerinden de anlaşıldığı gibi, elle yatırmada reçine ve takviye malzemeleri ilavesi elle gerçekleştirilir. Kürleme işleminin gerçekleştirilebilmesi için reçine içerisine belirli oranlarda katalizör karıştırılmalıdır. Kürlemenin hızlandırılması için oda sıcaklığından yüksek farklı sıcaklık seviyelerinde belirli sürelerde kürleme gerçekleştirilebilir (Arkaz 2016).

Vakum infüzyon yönteminde de elle yatırmada olduğu gibi kumaş şeklinde örülmüş takviye malzemesi kalıba serilir. Reçinenin takviye malzemenin bütün kısımlarına ulaşabilmesi için kalıp üzerine akış yolları oluşturacak kanallar konularak hava almayan bir poşet içerisine konulur. Kalıbın merkezi bir yerinden reçine girişine imkan verecek şekilde reçine haznesi yerleştirilir ve kalıbın diğer kısımlarından bir vakum pompası vasıtası ile vakum uygulanır. Vakum etkisi ile kalıbın üzerindeki takviye kumaş üzerine dışarıdan reçine çekilerek takviye malzemesinin üzeri belirli bir miktar reçine ile ıslatılması ve emdirilmesi sağlanır. Reçine bütün takviye elemanlarını ıslatıp vakum hortumuna gelinceye kadar işlem sürdürülür ve yine uygun bir zaman diliminde kürlenmesi için beklemeye alınır (Resin Infusion 2017). Reçinenin kürlenmesi için elle yatırmada olduğu gibi reçinenin içerisine katalizör katılması gereklidir ve istenildiğinde farklı sıcaklık seviyelerinde tutularak erken kürlenmesi sağlanabilir.

Düz şekle sahip kompozit malzemeler elde edilmek istendiği durumlarda iki kalıp arasında presleme işlemi de uygulanabilir. Bunun için kompozit malzeme öncelikle elle serilir ve üzerine katalizör karıştırılmış reçine sürülür. İstenilen özelliklerde kumaş serme işlemi gerçekleştirildikten sonra presleme yapılarak kürlenme sonuna kadar beklenir. Kürlenmenin kısa sürede gerçekleşmesi için presleme işlemi esnasında sıcaklığını artırmak için pres kalıplarına ısı da uygulanabilir. Sıcak presleme ile kompozit üretiminde matris malzemesi olarak termoplastik özelliklerde malzemeler de kullanılabilir. Bunun için takviye malzeme katları arasına termoplastik film bir malzeme serilir. İstenilen kalınlık elde edilinceye kadar kat kat serme işlemi gerçekleştirilir. Elde edilen deste düz iki kalıp arasında belli bir sıcaklık altında sıkıştırılarak termoplastik film tabakasının eriyerek takviye elemanına yapışması sağlanır (Nas, Gökkaya ve Sur 2013).

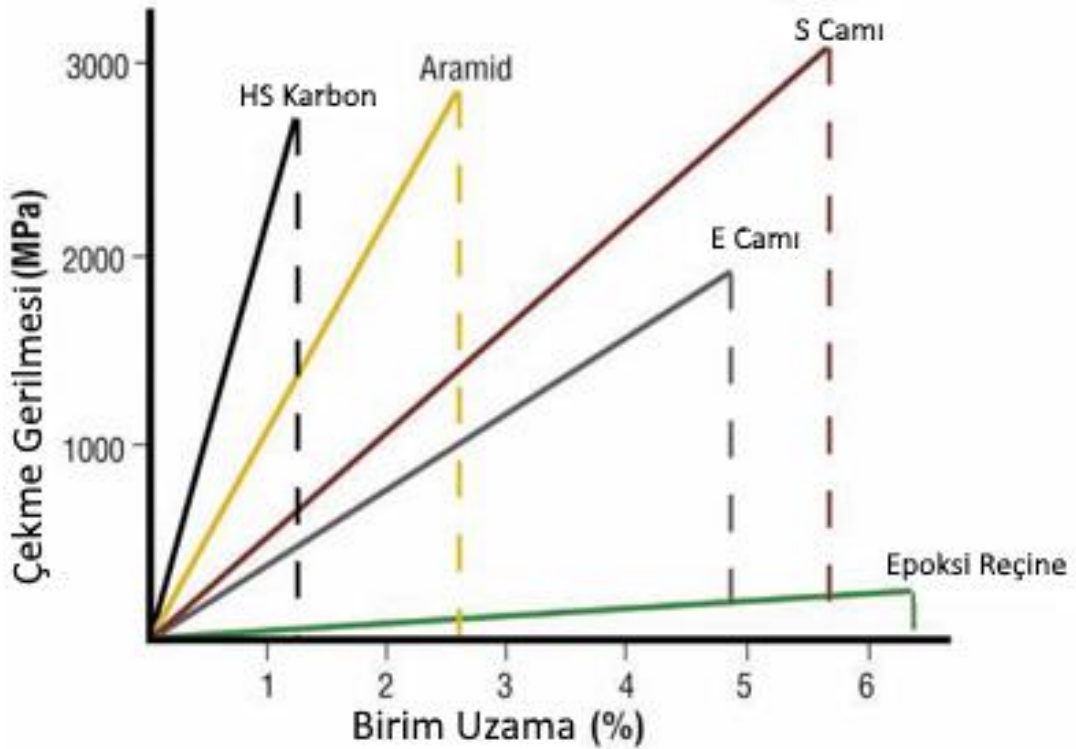
Püskürtmede ise reçine ve takviye malzemesi ilavesi işlemi, kalıba bir püskürtme cihazı ile yapılmaktadır. Lif şeklindeki malzemeler küçük küçük kesilerek ilave edilen reçine ile birlikte kalıp yüzeyine püskürtülür (Pur Csm Spray Technology 2017). Bu şekilde elde edilen takviye malzemeleri süresiz yapıdaki parçacıklardan oluşmaktadır.

Pultrüzyon metodunda lifler ekstrüzyon prosesinde olduğu gibi sürekli olarak uzunlamasına bir kalıp içerisinden geçirilirken polimer malzemenin takviye liflerinin arasına nüfuziyeti sağlanmakta, sıcaklık etkisi ile kalıbın çıkışında katılaşmış bir şekilde kompozit profiller imal edilebilmektedir (Frp Composites Pultrusion 2017).

Özellikle elle yatırma ve vakum infüzyonda takviye malzemesine katılan polimerin miktarının iyi ayarlanamaması, kalıplama prosedürünün sıkıntılı olmasından yola çıkılarak prepreg olarak adlandırılan kompozit türü geliştirilmiştir. Bu kompozit türünde takviye malzemesine termoset polimer önceden emdirilmekte, daha sonra sıcaklık ve basınç altında kürlenmesi sağlanmaktadır. Bu şekilde polimer katkısının oranı istenildiği gibi ayarlanabilmektedir (Fibre Glast Development Corporation 2017).

Kompozit malzemelerde çeşitli elyaflar kullanılmaktadır. Cam elyaf; silis-kum esaslı bir malzeme olup içinde belli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerde bulunur. Polimerlerle kullanılarak kompozitler malzeme üretiminde sıklıkla takviye elemanı olarak kullanılırlar. Cam elyaf, maliyet açısından tercih sebebi bir elyaftır ve oldukça fazla ve kolay bulunabilmektedir. E, S ve C gibi çeşitleri mevcuttur. Karbon lifleri atomlar arası var olan güçlü kovalent bağlar sebebiyle yüksek dayanım özelliklerine sahiplerdir ve bu sebeple kompozit malzemelerde kullanılmaktadırlar. Karbon lifleri ilk

olarak Edison tarafından akkor lamba tellerinde pamuk ve bambu gibi selüloz yapılı malzemelerin karbonizasyonu ile elde edilerek kullanılmıştır. Karbon lif üretiminde temel üretim tekniği çeşitli organik öncü malzemelerin ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Karbon lif üretiminde birçok malzemenin kullanılabilmesine karşın en uygun hammaddeler poliakrilonitril (PAN), zift ve rayondur. Karbon lifleri genel olarak düşük yoğunluklu, düşük termal iletkenliği olan, yapısal olarak etkili ve yüksek yorulma direnci gösteren malzemelerdir. Boron elyaf hafif elementlerdendir ve oda sıcaklığında katı halde bulunur. Üretimi zor olan bir elyaftır. İçerisindeki tungsten tel nedeniyle yoğunluğu yüksektir. Yüksek dayanımlı metallerle kolay birleşebilmektedir. Pahalı olmasına rağmen daha çok uzay sanayiinde kullanılmaktadır. Alümina elyaflar; metal matrisli kompozitlerde kullanılırlar. Yoğunluğu 3300 kg/m^3 elastik modülleri 380 GPa'a kadar çıkabilmektedir. Organik takviye elemanlarının arasında en önemlilerinden biri Para-aramid (Kevlar)'dır. Elastik modülleri 130 GPa a kadar çıkabilmektedir. Kurşun geçirmez yeleklerde, araç lastiklerinde ve halat ve kablolarda sıkça kullanılmaktadır. Kimyasal etkilere karşı dirençli bir elyaftır. Bazı elyafların çekme deneyi altında davranışları Şekil 1'de gösterilmiştir



Şekil 1. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan bazı malzemelerin çekme testi değerlerinin karşılaştırılması

Matris malzemesi olarak genellikle termosetler kullanılır. Bu malzemelerden bazıları sertleştirici/katalizörlerle belli oranlarda karıştırılması ile bazıları ise ısı ve/veya UV ışıyla katılaştırılırlar. Kürlenme olarak adlandırılan bu durum esnasında geri d n    olmayan kimyasal reaksiyonlar ve ba lar meydana gelir. Farklı termoset reçineler mevcuttur. Bunlardan bazıları; Epoksi, Fenolik, Polyester, Silikons, Amino reçineler olarak sıralanabilirler ( ahin 2015).



3. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ VE KOMPOZİT PARÇA ÜRETİM UYGULAMALARI

Kompozit malzemeler düşük hacimli parçaların üretiminde de rahatlıkla kullanılabilirler. Eklemeli imalat teknolojisinin mukavemet ve dayanım sorunu, kompozit ürünlerin dayanım/kg oranları yüksek olmasından dolayı kompozitlere bu alanda yer açmıştır. Kompozit malzemelerin bu teknolojiye kazandırılması bu sınırlamaların kırılması açısından önem arz etmektedir. Kompozit malzemelerin bu teknolojiye kazandırılması ile birlikte üretilen ürünlerin fonksiyonel olarak kullanılması hedeflenmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda takviye elemanları ile güçlendirilmiş polimer matrisli kompozit malzemelerin eklemeli imalat yöntemleriyle üretilmesinde öne çıkan yöntemler; Stereolitografi (Stereolithography Apparatus-SLA), Katmanlı Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturin-LOM), Eriyik Yığılma Prosesi (Fused Deposition Modeling-FDM), Seçmeli Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS) ve Ekstruzyondur. Kompozit malzemelerin eklemeli imalat teknolojilerinde üretilmesi, çok karmaşık sistemlerin gereksinimine rağmen yoğun ilgi görmektedir. Eklemeli imalat teknolojilerinin en yeni konularından biridir. Aynı zamanda mekanik özellikler bakımından birçok farklı kombinasyonla elde edilebilecek muhtemel gelişmeleri bizlere sunmaktadır.

Parça üretimi esnasında nano-partikül, karbon nanotüp, grafen, fiber, toz gibi katkıların katılmasıyla kompozit parça üretebilecek 3 boyutlu yazıcı geliştirme çalışmaları son yıllarda artarak devam etmiştir (Kalsoom , Nesteranko ve Paull 2016). Üretilen parçalar katkıya bağlı olmak üzere farklı gelişmiş özellikler sergilemektedirler. İstenilen elektriksel, termal ve mekanik özellikler bu katkılarla elde edilebilir (Parandoush ve Lin 2017). Kompozit ürünlerin eklemeli imalat metodlarıyla üretilibilmeleri için yeni yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir (Kumar ve Kruth 2010).

Polimerlerin güçlendirilmesinde takviye malzemesi olarak fiber kullanımı araştırmacılar açısından cazip olduğu görülmektedir. Katkı maddesi olarak parçacık (kısa fiber) kullanan önceden karıştırılmış malzemeler, karmaşık ve maliyetli tasarımlara sahip çok kafalı yazıcılara uygun bir alternatif olarak yoğun araştırmaların yürütüldüğü bir alandır.

Polimer matrisli kompozitler, eklemeli imalat metotları ile üretilmesinde özellikle üretim kolaylığı ve kullanılabilirlik nedeniyle dikkat odağı olmuştur.

Eklemeli imalat alanında matris malzemesi olarak çeşitli formlarda termoset ve termoplastik polimerler kullanılmaktadır. Fiber takviyeleriyle elde edilen bu geliştirmeler eklemeli imalat teknolojisinin gelecekteki gelişimi için olumlu kombinasyonlar sunmaktadır (Gu , ve diğerleri 2012) (Hofmann 2014). Ek olarak mevcut eklemeli imalat yöntemlerinin çoğunda fiber takviyesi uygulamalarından yararlanılabilir.

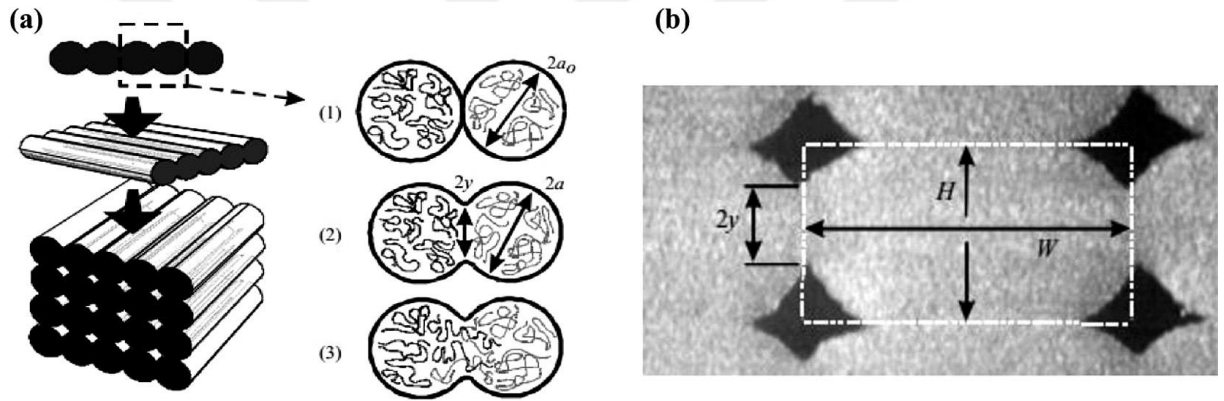
Fiber takviyeli 3 boyutlu yazıcılar umut verici olmakla beraber (Ivanova, Williams ve Campbell 2013) kullanım şekillerine göre çözülmesi gereken birçok problem bulunmaktadır. Bunlardan bazıları fiberlerin çözünürlük üzerindeki olumsuz etkisi, yığılma problemi, heterojen lif dağılımı, gölge etkisi, boşluklu yapı, fiber demetleri arasında tutunmama, kirlenme zamanı olarak sayılabilir (Kalsoom , Nesteranko ve Paull 2016).

Eklemeli imalat yöntemleri ile polimer matrisli kompozit malzeme üretiminde kullanılan yöntem matris malzemesinin kimyasal özelliği ile ve takviye malzemesinin şekli ile ilişkilidir. Matris olarak termoset ver termoplastikler kullanılabilir. Termoplastiklerde matrisin ergitilip katılaştırılması gerekiyorken termosetlerde katalizör, sıcaklık veya UV ışık veya bunların kombinasyonları gerekmektedir. Takviye malzemeleri ise nanotüp, toz, parçacık (kısa fiber), fiber veya kumaş olabilir. Literatürdeki çalışmalar üretim yöntemine göre başlıklar halinde özetle şu şekilde ele alınabilir.

3.1. Eriyik Yığma Prosesi (FDM)

Eriyik yığma prosesi son zamanlarda popülerliği son derece artmış şekilde hem kullanılmakta hem de üzerinde AR-GE çalışmaları gerçekleştirilen eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Bu proseste termoplastik malzemeler kullanılır. Dilimleme programlarıyla elde edilen yollar boyunca nozuldan eriyik halindeki termoplastik malzeme katmana serilir. İlgili katmanda soğuyarak katılan termoplastik malzemeler yanyana kesit boyunca dizilerek katmanlar oluşturulur. Tabla z ekseninde katman kalınlığı kadar aşağı indirilerek sıradaki katman yazılır. Birbiri ardına yazılan katmanlar sonunda parça elde edilir. Eriyik yığma prosesi uygulamada en çok kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Bunun en önemli nedeni olarak kullanılan malzemenin şekli bakımından ucuz bir şekilde temin edilebilmesi ve prosesin çok basit olmasından dolayı çok sayıda üreticisinin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bir eriyik yığma ile eklemeli imalat cihazı temel olarak X, Y ve Z yönlerinde hareket kabiliyetine sahip CNC, besleme mekanizması, eritici, nozul, tabla ve elektronik kontrol kartından oluşmaktadır (Turner , Strong ve Gold 2014). Bu yöntemde nozulun katman içerisinde ki tarama yolu, doluluk oranı, tarama hızı, tabla

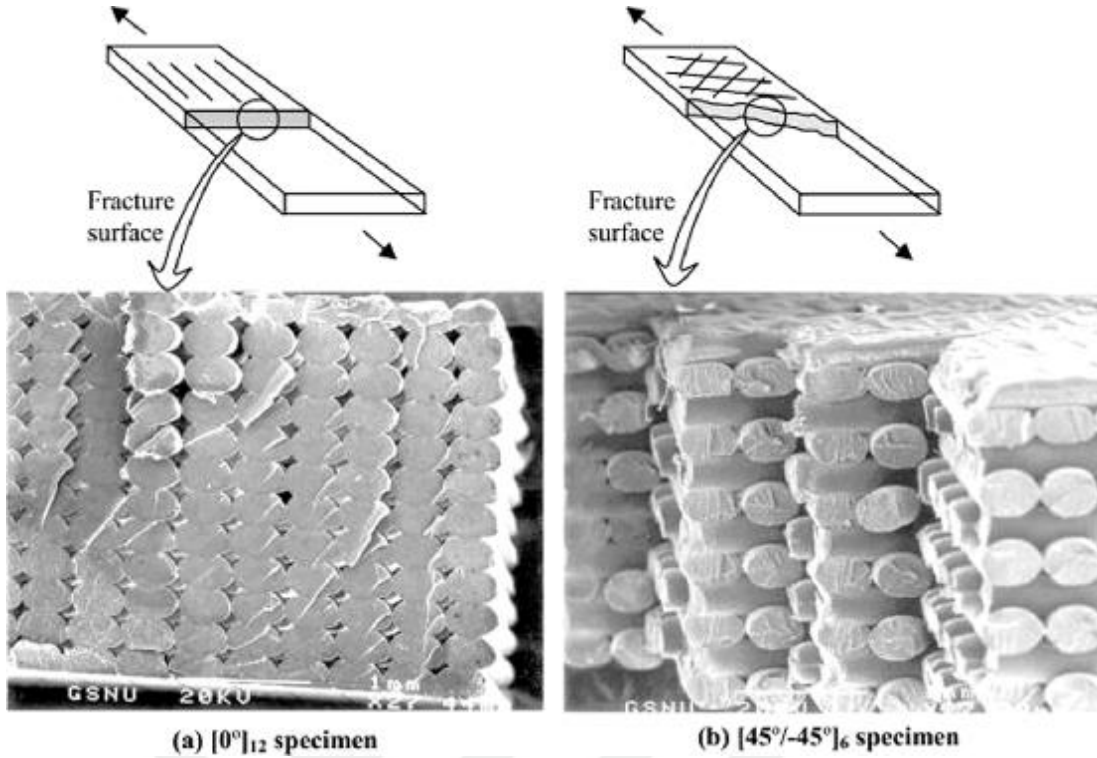
sıcaklığı, nozul sıcaklığı gibi önemli parametreler vardır. Nozulun katman üzerine eriyiği yığma yolları üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmış, basma ve çekme gerilmelerine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir (Ahn, ve diğerleri 2002). Bir başka çalışmada parça üretimi boyunca parça üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı termal kamerayla incelenerek sıcaklık farklarının parça geometrisi üzerine etkisi incelenmiştir (Dinwiddie , ve diğerleri 2014). Bu proseslerle üretilen parçaların yüzey sertliği ve kesit alan şekilleri hala yoğun olarak araştırılmaktadır. Eriyik yığma ile oluşturulmuş parçalarda katmanların ve yığınların birbirlerine bağ oluşturma şekilleri Şekil 2’de gösterilmiştir (Sun , ve diğerleri 2008) (Ahn, Kweon ve Kwon , ve diğerleri 2009). Şekil 2-a’da iki yığının birbirleri ile bağ yapma formasyonu gösterilmiştir (1-yüzeylerin teması, 2- boyun gelişimi, 3- ara kesitteki moleküler difüzyon ve bağ oluşumu). Şekil 2-b’de ise eriyik yığma prosesi ile üretilen bir parçanın kesit alanının mikroskop görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2. (a) Bağ yapma formasyonu (b) Eriyik yığma ile üretilen bir parçanın kesit görüntüsü (Sun , ve diğerleri 2008)

Ürünlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için birçok yazım kuralları öne sürülmüştür. Örneğin bunlar, çekme gerilmelerinin yönüne göre yazım yolları belirlemek, köşelerde ki gerilme dağılımları, sertlik ve mukavemetin artımında doluluk oranının yükseltilmesi, yüzey kalitesinin artırılması için daha küçük nozul kullanılması, basma ve çekme gerilmelerinin olduğu alanlarda farklı oryantasyonlar olarak sayılabilirler (Ahn, ve diğerleri 2002).

Şekil 3’de tek yönlü ve birbirlerine göre dik açıyla (iki yönlü) oluşturulmuş bir parçanın çekme testinde çekilerek kırılması sonucunda kırılmış kesit alanın SEM görüntüleri gösterilmiştir.

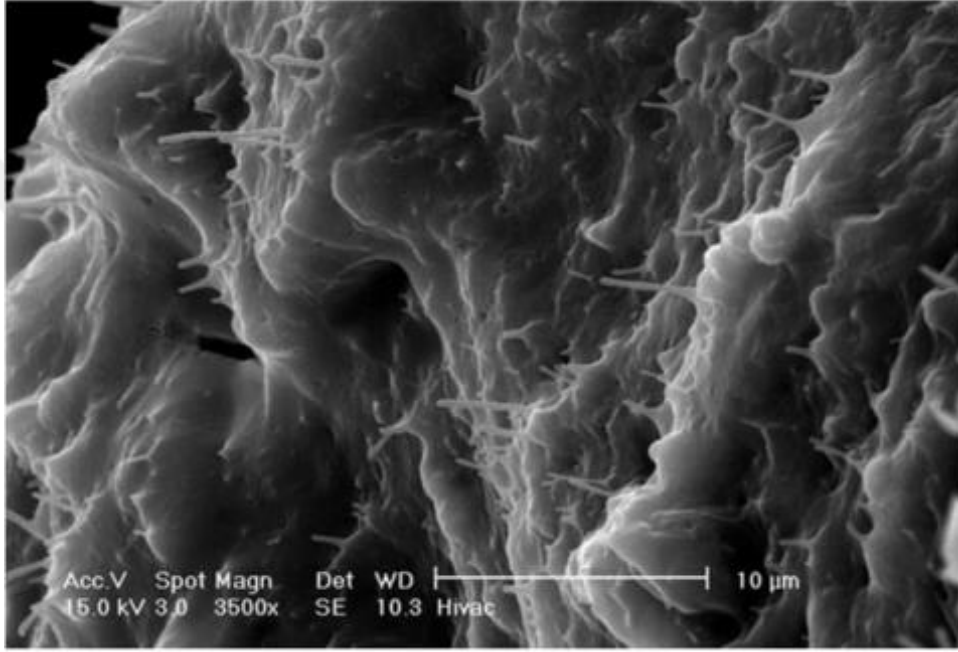


Şekil 3. a) tek yönlü $[0^\circ]_{12}$, b) çift yönlü $[45^\circ/-45^\circ]_6$ olarak üretilen numunelerin çekme testi sonucu kırılan yüzeylerinin SEM görüntüleri (Ahn, ve diğerleri 2002)

Eriyik yığma prosesi (Fused Deposition Modeling-FDM) İngilizce terminolojisinin kısaltması olarak ülkemizde de çok yaygın bir şekilde FDM olarak isimlendirilmektedir. Takviye elemanı olarak sürekli fiber kullanılan çalışmalarda parça oluşturma işlemi fiziksel olarak bu yönteme benzediği için kompozit çalışmalarında da genelde FDM prosesine benzer olarak isimlendirilir. Ancak sürekli fiber kullanılan sistemlerde matris malzemesi olarak ergitilen termoplastik malzemeler kullanıldığı gibi farklı yöntemlerle kürlenmiş termoset malzemeler de kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanıldığı uygulamalar için ‘eriyik’ ifadesi doğru olmamaktadır. Bu yüzden bundan sonra bu çalışmada sürekli fiber kullanılan ve FDM yöntemine benzer şekilde gerçekleştirilen çalışmalar (çalışma sahibi FDM olarak kullansa bile) daha kapsayıcı olması nedeniyle fiber yığma olarak adlandırılacaktır. Matris malzemesinin termoset veya termoplastik olması fiber yığma terminolojisi ile çelişmemektedir.

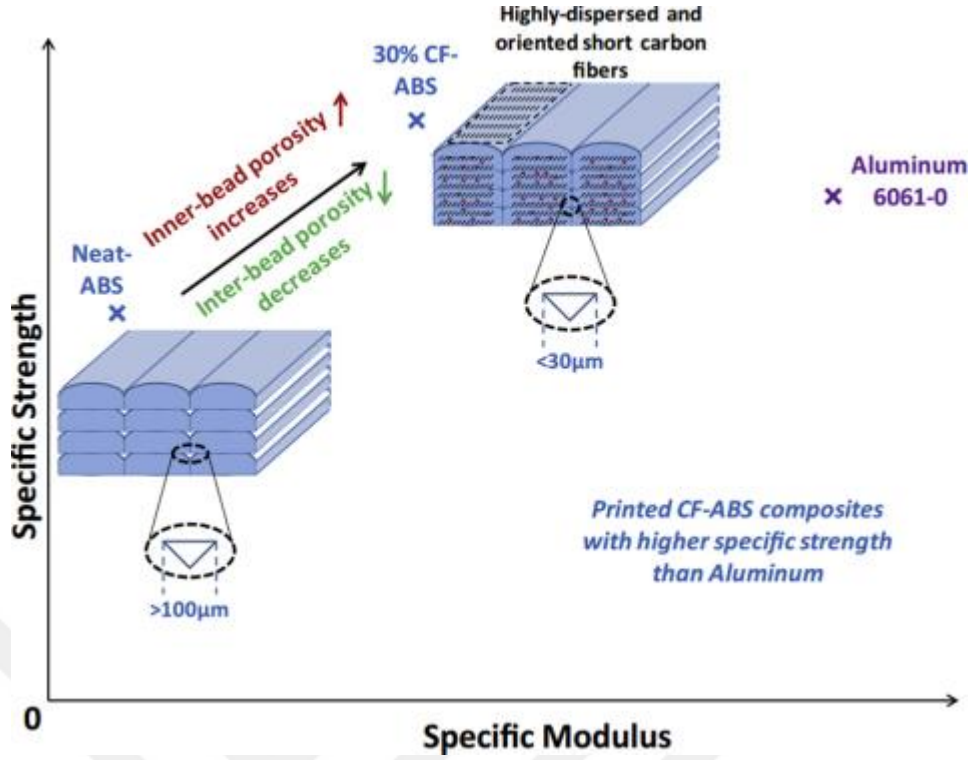
Son zamanlarda araştırmacılar arasında FDM prosesinde fiber katkıları kullanmak popüler durumdadır. Çalışmaların çoğu filamentlerde kısa fiber kullanılmasıyla yeni filament üretilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Fiberlerin filamente eklenmesiyle nozul ucunda baskı kalitesi artırılmış, ürün mukavemeti de iyileştirilmiştir (Zhong , ve diğerleri 2001). Carneiro ve Silva yaptıkları çalışmada polipropilen içerisine cam fiber katarak incelemeler yapmışlardır (Carneiro, Silva ve Gomes 2015) . Yaptıkları incelemede saf propilene göre %

30-40 mertebelerinde mekanik özelliklerde gelişme elde etmişlerdir. Buhar ile Üretilen Karbon Fiber(VGCF) ve Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (SWNT) ABS ile karıştırılıp FDM yönteminde kullanılmıştır. Ağırlıkça %5 VGCF ve SWNT eklenmiş numunelerin çekme mukavemetlerinde sırasıyla 18% ve 31% artış gözlenirken sünekliğinde ciddi bir düşüş gözlenmiştir (Shofner ML 2003). Yönlendirilmiş VGCF ve SWNT içeren ABS mukavemet özelliklerinde %93'e kadar gelişme göstermiştir (Shofner , Rodriguez Macias ve Vaidyanathan 2003). Fiber yönlendirilmesi yapılarak üretilmiş kompozit malzemenin SEM görüntüsü Şekil 4'de görülmektedir.



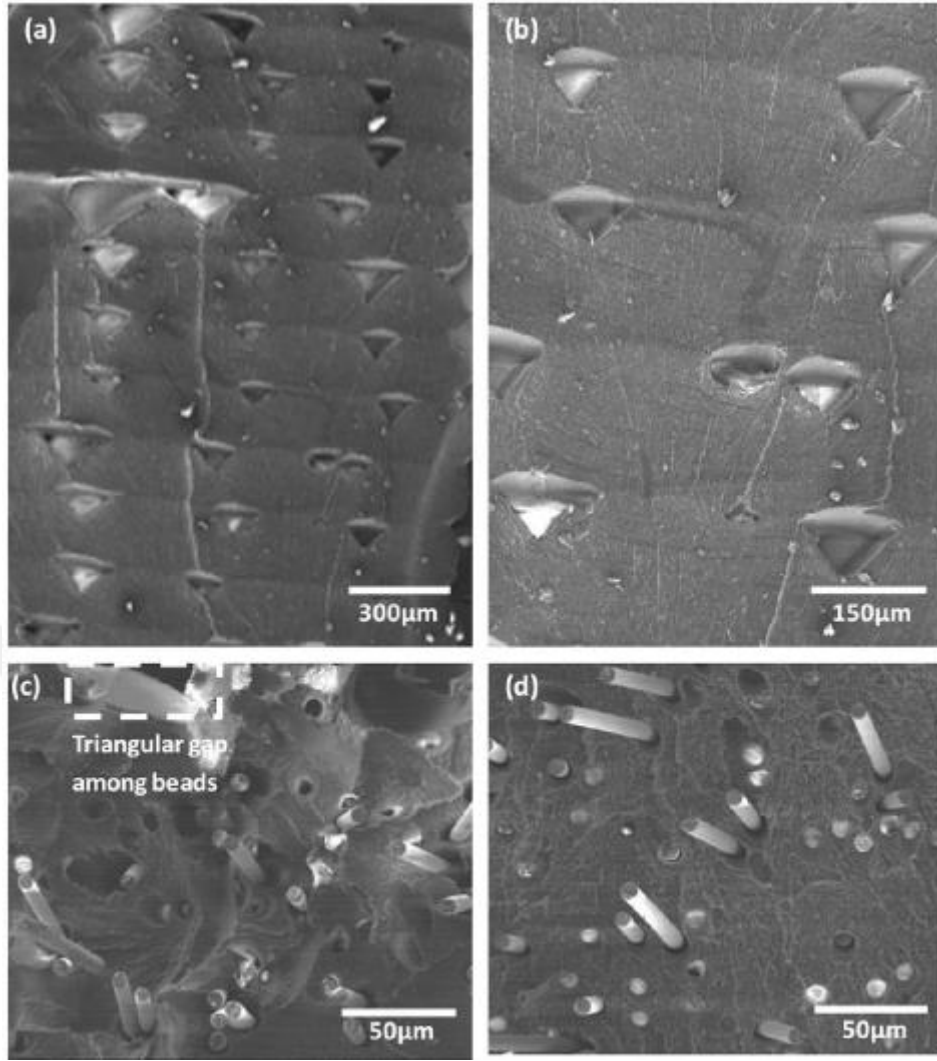
Şekil 4. Hizalanmış VGCF ile FDM tarafından hazırlanan VGCF / ABS kompozit malzemenin SEM görüntüsü (Shofner ML 2003)

Ning ve Cong (Ning , ve diğerleri 2015) ABS malzemesine karbon fiber katkısında lif uzunluğunun ve ağırlıkça oranının mukavemete etkisini FDM prosesinde incelemiştir. Ağırlıkça %5 ve %7,5 karbon fiber oranı çekme mukavemetinde ve young modülünde en iyi sonucu vermiştir. Bu araştırmacılar uzun fiber kullanımının çekme dayanımı ve young modülü açısından daha olumlu sonuçlar verdiğini sonucuna varmışlardır. Şekil 5'de eriyik yığılma prosesi ile üretilen parçalarda fiber kullanımının mukavemete etkisi şematize edilmiştir. Söz konusu çalışmada eriyik yığılma yönteminde %30 ağırlıkta yönlendirilmiş CF-ABS kompozit malzeme kullanımı mukavemette yaklaşık %115, young modülünde ise %700 artış göstermiştir.



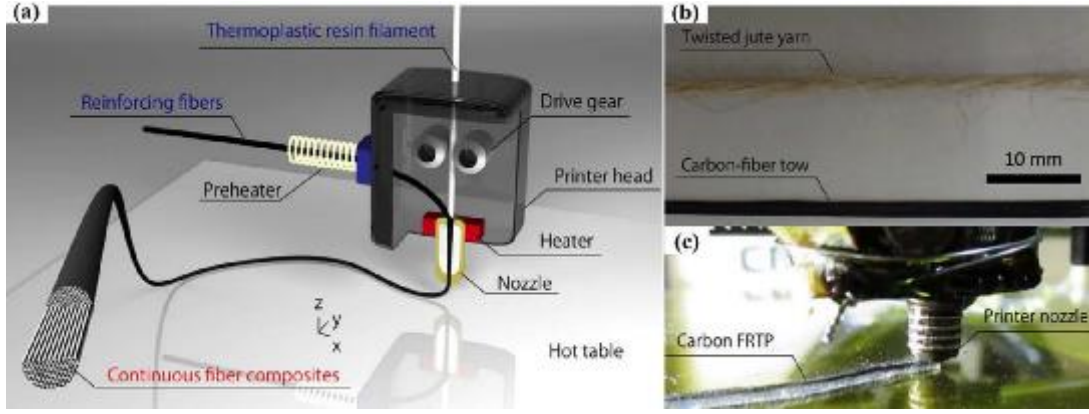
Şekil 5. Eriyik yığma modellemesi ile elde edilen parçalarda fiberle güçlendirilmiş kompozitlerin şematik gösterimi (Tekinalp, ve diğerleri 2014)

Kullanılan CF-ABS numuneleri mukavemet açısından alüminyumdan daha yüksek mukavemet göstermişlerdir. Adımlar arasındaki üçgensel kanallar karbon fiberlerinin dizilime katılmasıyla azaltılmıştır. Kalıp şişmesindeki azalma ve ısı geçirgenliğinin artması bu kanalların azalmasında etkilidir. Bununla birlikte karbon fiberlerin besleme stoğuna katılması gerilme yığılmasına sebebiyet vermesiyle düşük gerilmelerde hasarlar görülebilmektedir. FDM ile üretilmiş numunede üretim boyunca adımlar arasında oluşan gözenekler Şekil 6'da görülmektedir (Tekinalp, ve diğerleri 2014). Şekil 6-a,b' de saf ABS'nin eriyik yığma modellemesi yöntemiyle üretilmesi sonucunda kesit görünüşünün SEM görüntüsü verilmektedir. Şekil 6-c,d' de ise ağırlıkça %10 karbon fiber katkılı kompozit numunenin SEM görüntüsü verilmektedir.



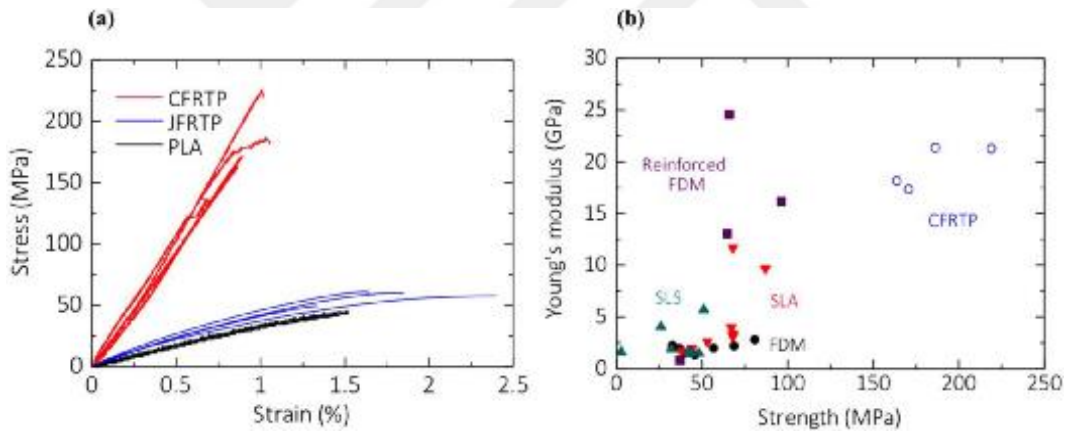
Şekil 6. (a,b) FDM ile üretilmiş saf ABS'nin, (c) ağırlıkça %10 karbon fiber eklenmiş parçanın ve (d) basınçlı kalıplama ile üretilmiş ağırlıkça %10 karbon fiber katkıli kompozitin, SEM görüntüleri (Tekinalp, ve diğerleri 2014)

3 boyutlu yazıcılarda polimer kompozit üretiminde araştırmacıların karşılaştığı en büyük zorluk şu anda sürekli fiber ile güçlendirme çalışmalarıdır. Mukavemet açısından süreksiz fiber kullanımına kıyasla çok önemli gelişmeleri bize sunmasına rağmen sürekli fiber kullanımında hala güçlü ve kabul görmüş bir metod hala ortaya konamamıştır. Matsuzaki ve Ueda (Matsuzaki , ve diğerleri 2016) termoplastik matris ve sürekli fiber kullanımında nozul içerisinde emdirme için yeni bir teknik geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, termoplastik filament ve fiber nozulda ısıtılmadan ve karıştırılmadan önce ayrı ayrı beslenmektedir. Karışım daha sonra tablaya serilmektedir. Şekil 7-a'da nozulda fibere termoplastik matrisin emdirilmesi şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 7-b'de ise proseste kullanılan fiber demetleri görülmektedir. Şekil 7-c'de ise üretim esnasında kayda alınmış bir görüntü görülmektedir.



Şekil 7. Eriyik yığma modellemesi yönteminde nozulda emdirilerek sürekli karbon fiberlerin üretimi (a) sistem şeması; (b) kullanılan fiber demeti; (c) üretim esnasından bir görüntü. (Matsuzaki , ve diğerleri 2016)

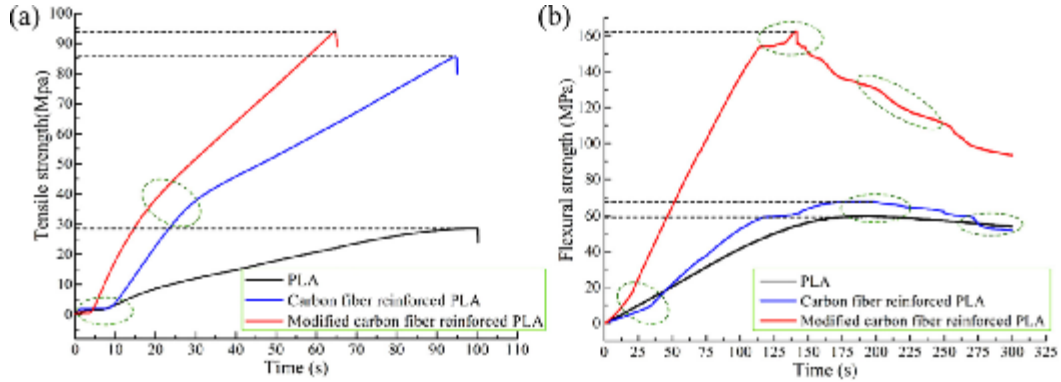
Karbon fiber ve bükümlü jüt fiber, güçlendirmede kullanılmıştır. Şekil 8’de sürekli fiber kullanımının kısa fibere ve diğer takviye malzemelerine ve yöntemlere kıyasla üstünlüğü görülmektedir. Karbon fiber ve jüt (Hintkeneviri) fiber ile güçlendirilmiş numunelerin çekmedeki etkisi gözlemlenmektedir.



Şekil 8 a) PLA’nın, tek yönlü karbon fiber ile güçlendirilmiş termoplastiğin (CFRTTP) ve tek yönlü jüt fiber ile güçlendirilmiş termoplastiğin (JFRTTP) Gerilim-Birim Uzama eğrileri; (b) bazı metodlara göre young modülü ve mukavemet kıyaslaması (Matsuzaki , ve diğerleri 2016)

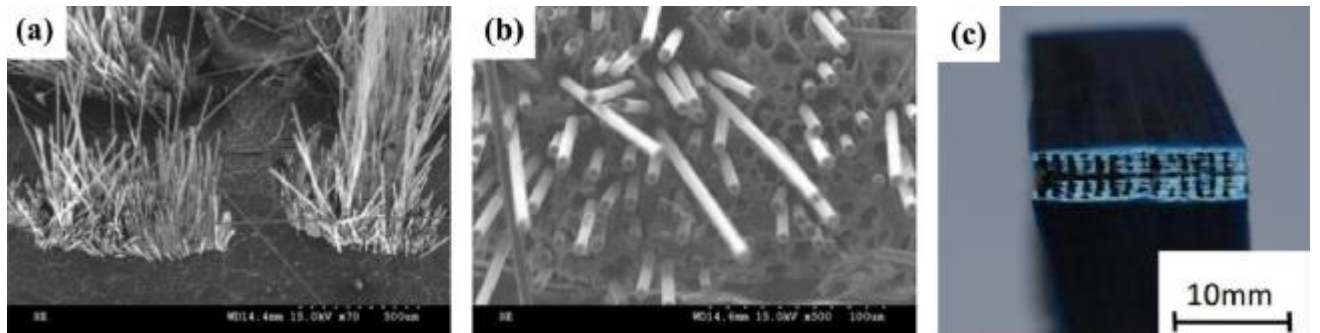
Namiki ve Ueda (Namiki, ve diğerleri 2014) PLA için aynı tekniği uygulamışlardır. Çözünürlüğün artırılmasıyla azaltılabilecek boşlukların oluştuğu belirtilmiştir. Li ve Li (Li, Li ve Liu 2016) kısa fiber ile güçlendirilmiş PLA parçaların çekme dayanımı 68 MPa a kadar çıkarken, uzun fiber kullanımında 91 MPa a kadar çekme mukavemeti elde edildiğini gözlemlenmiştir. PLA ve fiber arasındaki zayıf bağ, mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir (Yu, ve diğerleri 2010). Bununla birlikte karbon fiber demetlerinde methylene dichloride ile yüzey modifikasyonu yapılan CF-PLA (karbon fiber ile güçlendirilmiş PLA)

numunelerinde çekme ve eğilme mukavemetlerinde artış gözlenmiştir (Li, Li ve Liu 2016) Şekil 9'da saf PLA'nın, CF-PLA'nın ve düzenlenmiş CF-PLA'nın çekme ve eğilme dayanımları gösterilmektedir.

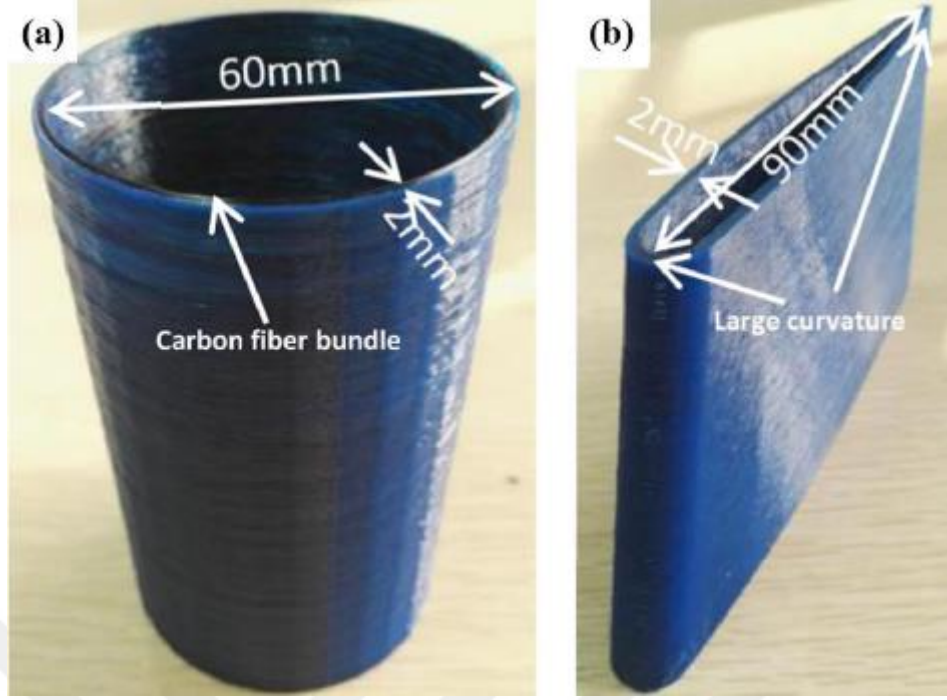


Şekil 9. Methylene Dichloride ile modifiye edilmiş CF-PLA, CF-PLA ve saf PLA'nın mekanik özellikleri (a) çekme mukavemeti, (b) eğilme mukavemeti (Li, Li ve Liu 2016)

Şekil 9 (a) 'daki yeşil daireler, gerilme işleminin farklı fazlarını, yani, testin başlangıcında PLA malzemesinin, fişör ve test numunesi arasında yüklenmesini ve fiber-matris ara yüzüne bağlanma nedeniyle eğri eğiminin hafif bir düşüşünü göstermektedir. Şekil 9(b) de ki daireler ise testin başında ki reçineden elyafa yük değişimini göstermektedir. Şekil 9(b) de görüldüğü gibi karbon liflerinin kopmasının ardından PLA polimer zincirlerinin plastik uzaması bir süre devam etmiştir.. Tian ve Liu (Tian , ve diğerleri 2016) karbon fiberle güçlendirilmiş PLA'nın performansı ve sıcaklık ve basıncın prosese etkisini sistematik bir analiz ile sergilemişlerdir. Şekil 10'da çekme çubuğu kesit yapısının normal ve SEM görüntüleri ve kırılmış yüzeydeki fiberler gösterilmekte, Şekil 11'de ise 3 boyutlu yazıcılarda sürekli fiberlerle sürekliliği kaybetmeden eğrisel yüzeylere sahip geometriler inşa edilebileceği uygulamayla gösterilmektedir.



Şekil 10. (a,b) sürekli karbon ile güçlendirilmiş bir PLA tabanlı bir parçanın Sem görüntüsü ve (c) kesit görüntüsü. (Tian , ve diğerleri 2016)



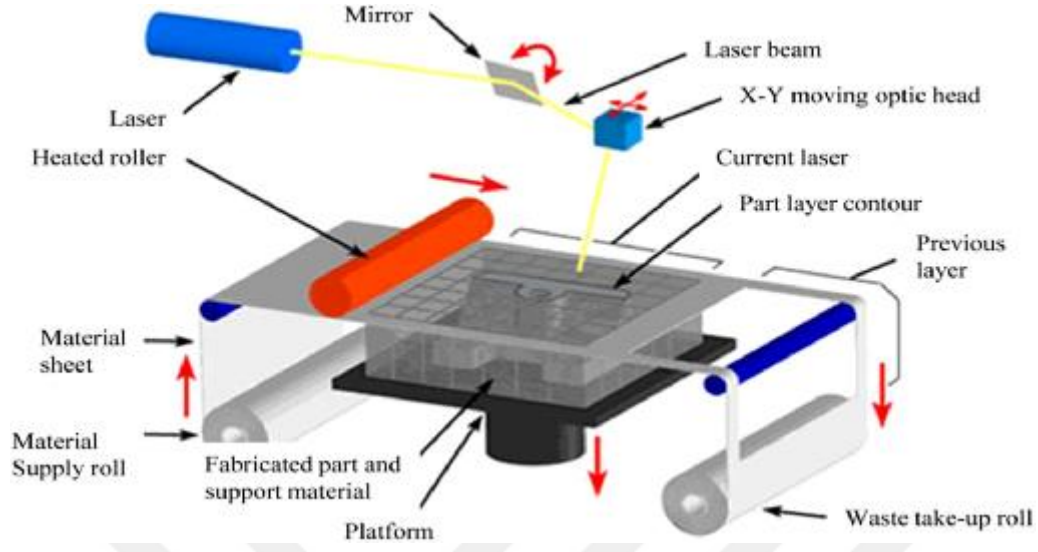
Şekil 11. Karbon fiberle güçlendirilmiş PLA malzeme ,sürekli karbon fiber kullanarak yüksek eğrilikler inşa edilebilmiştir. (Tian , ve diğerleri 2016)

Melenka, Cheung (Melenka, ve diğerleri 2016) gerilme özelliklerini belirlemek için ticari masaüstü yazıcıları kullanarak sürekli Kevlar elyaf takviyeli 3 boyutlu yazıcılarda basılmış naylon yapılarını değerlendirmiştir. Yapılan çalışmada sertlik ve mukavemette lif takviyesiyle önemli bir artış elde edilmiştir. Mukavemet ve yorulma ömrünü iyileştirmek için 3 boyutlu yazıcılarda polimer katmanları arasına karbon fiberler yerleştirilirken, mekanik özellikler daha da arttırmak için ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir (Mori, Maeno ve Nakagawa 2014). Bunlarla birlikte Van Der Klift ve Koga (Van Der Klift, ve diğerleri 2015) karbon fiber katmanlarının artmasıyla parça içi boşluklarında arttığını, bu durumun çekme dayanımında olumsuz etkisinin olduğunu öne sürmüşlerdir. Plastiklerin lif demeti içerisine emdirilmesi için prosesin 200-230°C arasında olması gerekmektedir. Katman kalınlığı 0.4-0.6 mm ve katman içindeki çizgi genişliği 0.6 mm olması gerektiği belirtilmiştir. Bu şartlarda 335 MPa eğilme dayanımı ve 30 GPa eğilme modülü elde etmişlerdir.

3.2. Katmanlı Nesne İmalatı (LOM)

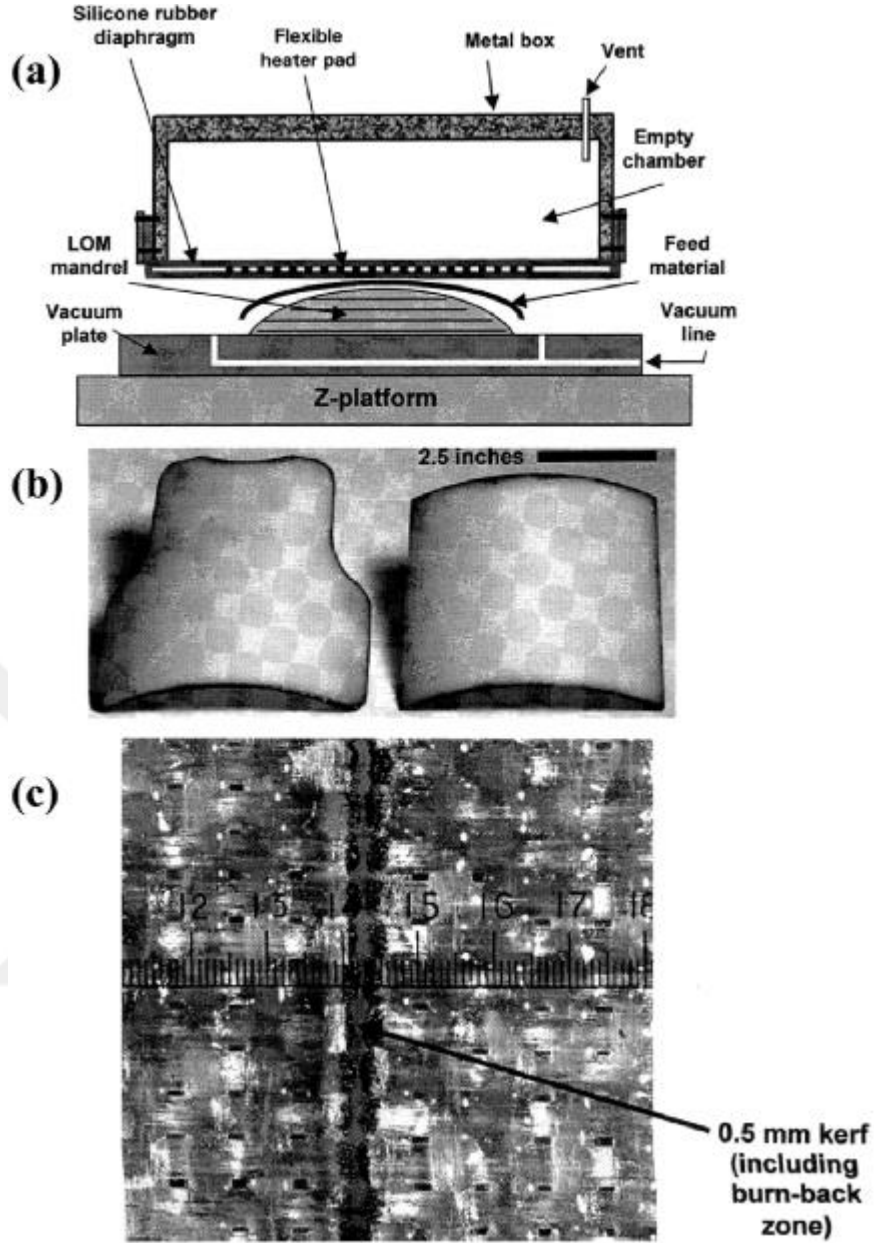
İlk olarak Helisys şirketi tarafından geliştirilen bu sistemde katman 2 boyutlu kesit alan şeklinde bir laser veya kesici tarafından kesilerek her bir katman bir sonrakine ilişkilendirilir. Katmanlı nesne imalatının temel işlemleri şematik olarak Şekil 12’de gösterilmektedir. Bu yöntemde kağıt, metal, plastik, kumaş, sentetik malzemeler ve

kompozitler kullanılmaktadır (Huang , ve diğerleri 2013) (Mahindru , Priyanka Mahendru ve Ganj 2013).



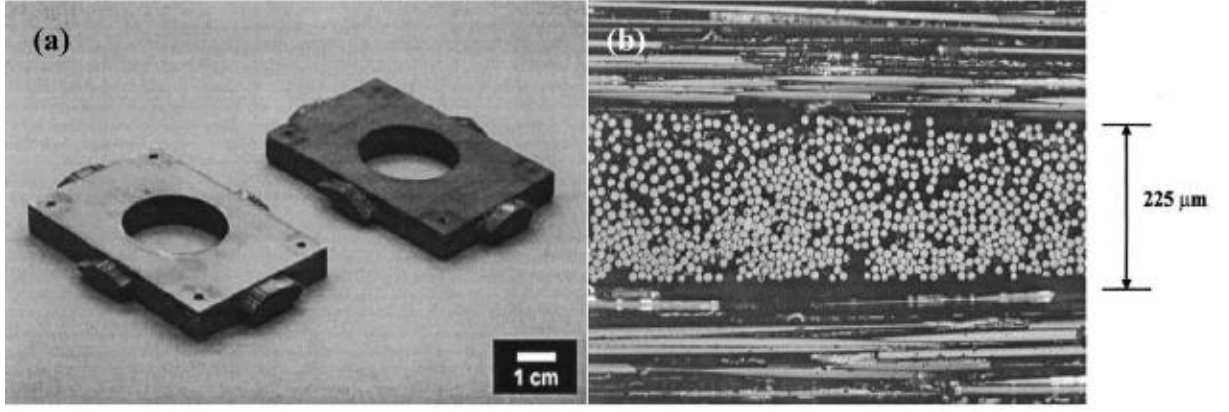
Şekil 12. Katmanlı nesne İmalatının Şematik Gösterimi (Ahn, Kweon ve Choi, ve diğerleri 2012)

C-şekilli polimer matriks kompozitler eğimli LOM ile direkt olarak üretilebilmektedir. Eğimli LOM'un çalışma prensibi ve örnek ürün Şekil 13'de gösterilmektedir (Klosterman , ve diğerleri 1999)



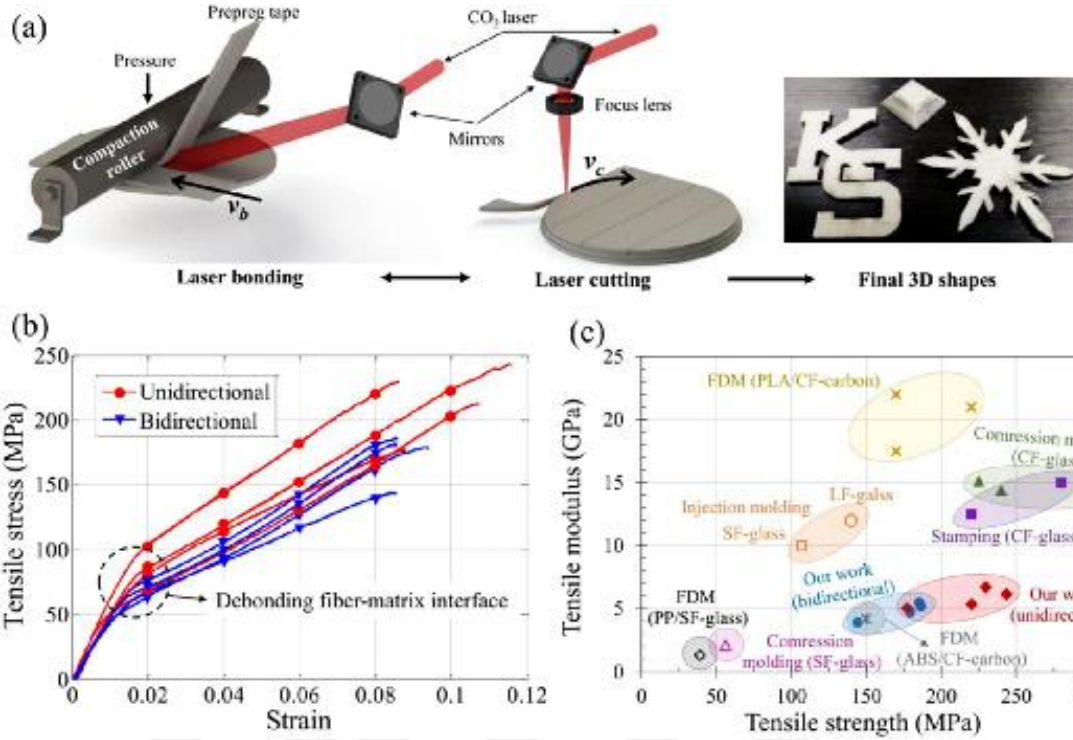
Şekil 13. (a) Eğimli LOM'un çalışma şeması, (b) Lom ile üretilmiş kûrlenmiş cam fiber/epoksi kompozit parça, ve (c) LOM ile prepreg kumaştan üretilmiş ve CO₂ ile kesilmiş cam fiber/epoksi kompozit parça (Klosterman , ve diğerleri 1999)

Prepreg kumaşa termoform bir aparat ile vakum uygulanır. Yükseklikteki sapma %7.9 a kadar çıkarken diğer yönlerde %1'in altında doğruluk elde edilir. Üretilen bir kompozitin kayma mukavemeti yaklaşık 24.8 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer yazar tarafından standart bir proseste elde edilebilecek normal bir değer olarak kabul edilmiştir. Şekil 14'de LOM prosesi ile tek yönlü sürekli cam fiberle üretilmiş kompozit parça ve iç yapısı gösterilmektedir (Klosterman D 1998). LOM ile üretilmiş polimer kompozitin mikro yapısını incelediğimizde katmanlar arası bağların düzgün olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 14. (a) tek yönlü kumaş ile LOM'da üretilmiş cam fiber/epoksi kompozit parça, sağdaki parça kurlenmiştir, ve (b) [0/90] dizilim ile kesit görünümü (Klosterman D 1998)

LOM proseslerinde karşılaşılan en büyük problem ısıtılmış silindirin katmanları tam olarak kurlayememesidir. Bu durum katmanlar arası bağın güçlenmesine ve iç boşlukların azalmasına yardımcı olmaktadır. Sonmez ve Hahn [32R Sonmez FO 1998] LOM prosesi süresince gerçekleşen ısı transferini sıcaklık ve gerilim dağılımının etkisini anlamak için incelemişlerdir. Sürekli fiber termoplastik kompozit malzemenin kullanıldığı Lazer yardımlı eklemeli imalat olarak adlandırılan yeni bir metot geliştirilmiştir (Parandoush P 2017). Çalışmada yazar önceden kesilmiş kısa fiber kullanılan prepreg levha yerine sürekli liflerin kullanıldığı prepreg bantlar kullanmayı önermiştir. Bantlar katman katman bir silindir yardımıyla sıralanırken CO₂ lazer ışınıyla kesilmektedir. Üretim şeması ve örnek ürün, mukavemet açısından diğer metotlarla karşılaştırılması Şekil 15'te gösterilmektedir.



Şekil 15. (a) Lazer yardımlı AM prosesinin şematik gösterimi ve üretilmiş örnek parça . (b) tek yönlü ve çift yönlü kumaşların çekme gerilmeleri. (c) Mukavemet açısından diğer metotlarla karşılaştırılması (Parandoush P 2017)

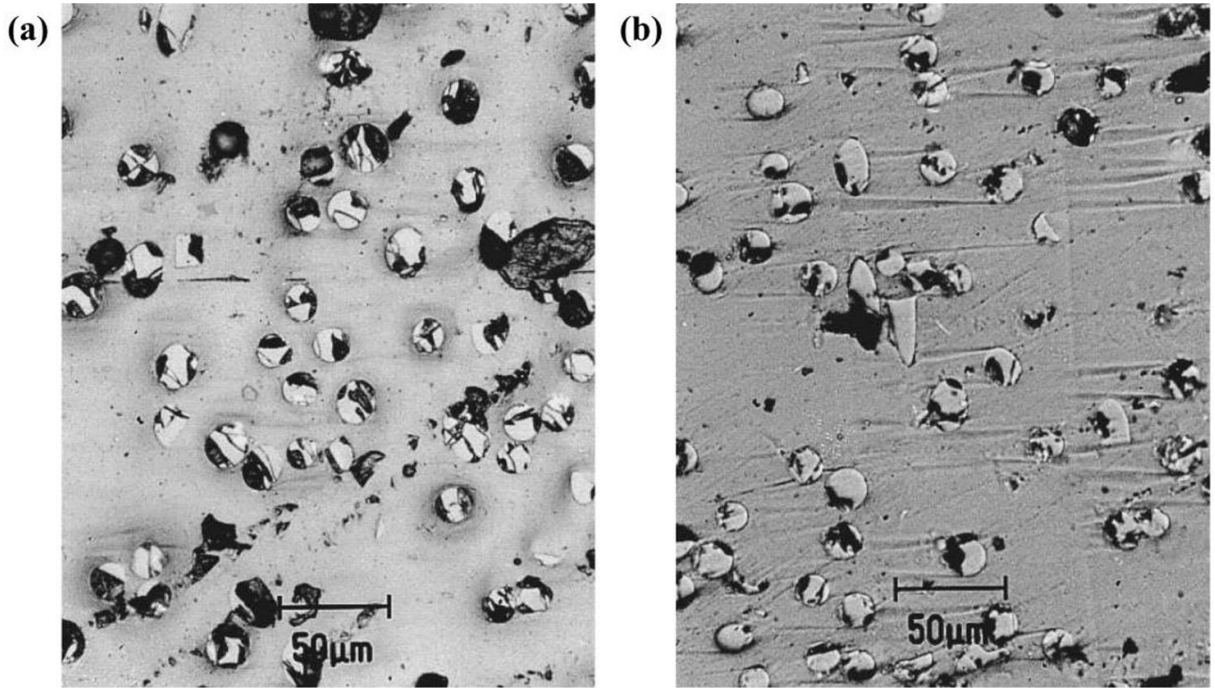
Bu metod mekanik özellikler açısından sürekli fiber kullanımıyla, yüksek fiber kütle oranıyla, iç boşlukların azaltılmasıyla önemli sonuçlar sergilemektedir.

3.3. Stereolitografi (Stereolithography Apparatus-SLA)

SLA ile üretilen parçalar fonksiyonel olarak kullanılmasını engelleyen zayıf mekanik özellikler sergilemektedir (Karalekas D 2004). Fakat fiber ile güçlendirerek fonksiyonel kullanılmalarının önü açılabilir. Sürekli fiber kullanımı güçlendirme için ideal olarak gözüksede, kısa fiber kullanımındaki fiber kütle oranının yüksek olması kısa fiber kullanımını kıyaslanabilir hale getirmekte fakat kısa fiber kullanımında reçine ile karıştırmada fiberlerin kırılması, malzeme içindeki rastgele dağılım ve farklı uzunluklarda fiber parçaları kısa fiber kullanımını verimsizleştirmektedir.

Çok duvarlı karbon nonatüp (MWNT) SLA sistemlerinde kullanılmak üzere mekanik ve ultrasonik olarak karıştırılarak kullanılmıştır (Sandoval JH 2006). Ağırlıkça %0.025 MWNT ekleyerek çekme ve eğme dayanımlarında sırasıyla %5.7 ve %26 lık artışlar gözlenmiştir. Karbon fiber, polimerleri güçlendirmek için başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Fakat karbon fiberi kullanmada en büyük problem karbon fiberin opak oluşudur. Karbon fiberin engellediği bölgelerde reçine kürlenememektedir. Bu sorunu aşmak için bazı metotlar

geliştirilmiştir. Bunlardan biride cam fiber kullanımıdır. Cam fiber UV ışığını geçirmekte kürlenmeye problemini azaltmaktadır (Lü L 2001). Mekanik özellikleri artırmak için vakumlu kalıplama prosesi uygulanmıştır (Karalekas D 2004) (Karalekas 2003). Vakum kalıplama prosesiyle elde edilen polimer cam ve nonwoven-polimer sandviç yapılarda çekme dayanımında %36 ve sertlikte %11 artış gözlemlenmiştir. Reçine vizkozitesi önemli derecede artmıştır (Zak G 1996). Bu durum yüksek fiber oranı elde etmek için önemlidir. Lazer taramalı SLA, hacimce %20 kısa cam fiber (uzunluk:1.6, çap:15.8um)içeren akrilik temelli fotopolimer reçine malzemelerini işlemede kullanılmıştır. Şekil 16'da deneyde elde edilen hacimce %20 fiber içeren numunelerin mikro yapısı gösterilmektedir (Cheah C 1999).



Şekil 16. SLA ile üretilmiş hacimce %20 fiber içeren polimer kompozitin SEM görüntüsü, (a) Kalıplanmış örnek; (b) Lazer tarama ile örnek (Cheah C 1999)

Fiberlerle güçlendirilmiş polimerler yüksek elastik modül ve üst çekme dayanımı sunmaktadırlar. Ayrıca fiberle güçlendirilmiş parçalarda üretim aşamasındaki büzüşme/çekme'nin daha az olduğu gözlemlenmiştir. UV ışın ve sıcaklıkla birlikte çift etki ile kürlenmiş polimerlerde kullanılmıştır. Bu çözüm karbon fiberin reçineyi gölgelemesinden dolayı düşünülmüştür (Gupta A 2002). Özellikle karbon liflerinin arasında kalan reçinenin toplamın çeyreği olduğu tahmin edilmiştir. Bir saatlik ısıtma işleminden sonra çekme mukavemetinin %95 arttığı gözlemlenmiştir.

Mekanik özellikler bakımından reçinenin kürlenme metodu da önemlidir. Alpöz R. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ışıkla kürlenme metodunun ve ışığın nüfuziyet süresinin reçine tabanlı dişçilik malzemelerinin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Işık kaynağı olarak 2 farklı ışık kaynağı kullanmışlardır. Birincisi 400-515nm dalga boyunda 700mW/cm² yoğunlukta olan Optilux501 halojen ışık kaynağı, ikincisi 430-490nm dalga boyuna sahip 500mW/cm² yoğunlukta olan LED bluephase C5 marka LED ışık kaynağıdır. Çalışmada dental uygulamalarda kullanılan 3 farklı reçine tipi(1.tipTetric Ceram, 2.tip Compoglass, 3.tip Fuji II LC) üzerinde LED ve halojen ışık kaynağı ile farklı nüfuziyet zamanları(20s ve 40s) kullanılarak reçinelerin kürlendikten sonra Vickers sertlik değeri ve basma dayanımı ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda 1.tip reçine 40s LED ile 40s halojen ışık kaynağı ile kürleştirilip önemli bir basma dayanımı gözlemlenmemiştir. Ancak LED ışık kaynağı ile 20s kürleştirildiğinde basma dayanımında önemli bir düşüş meydana gelmiştir.2.tip reçine ise en yüksek basma dayanımını sırasıyla LED ışık kaynağı ile 40s ve 20s daha sonra halojen ışık kaynağı ile 40s değerlerinde vermiştir (Alpöz R 2008).

N. Chantarapanich ve ark. Stereolitografi yöntemini kullanarak foto kürlenmiş epoksiden kenar ve yüzeyden katmanlandırarak elde ettikleri çekme numunelerini farklı dizilim açıları ile üretilen fotopolimer reçinenin mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Deneyler bulunan ortam ışığının kürlenme etkisini gidermek amacıyla karanlık ortamda yapılmıştır. Deneyde kullanılan sabit değerler olarak katman kalınlığı 0,175mm, lazer tarama hızı 3200 mm/sa, lazer spot genişliği 0,08mm, lazer tarama metodu olarak cross hatching ve lazer gücü 2,5W seçilmiştir. Fotopolimer reçine olarak WatershedXC 11122(DSM Samos, Inc, USA) kullanılmıştır. Çekme numuneleri farklı yüzey ve kenar olmak üzere 0°, 45°, 90° olarak üretilmiştir. Ayrıca üretilen numunelere 0, 2, 4, 6, 8 saat olmak üzere post-curing uygulanmıştır. Deney sonuçlarında maksimum çekme dayanımı kenardan üretilen ve 0° açığa sahip numunede en yüksek çıkmıştır. En düşük çekme dayanımı değeri yüzeyden 0° ile üretilen numunede ortaya çıkmıştır. Post-curing sonuçlarında aynı metotla ve aynı açıda 5 numune üretilip farklı sürelerde tutulup daha sonra çekme testi uygulanmıştır. Bunun sonucunda en yüksek çekme dayanımı 8 saat post-curing uygulanmış numunede çıkmıştır. Hiç post curing uygulanmayan numunede ise en düşük çekme dayanımı değeri tespit edilmiştir (Nattapon Chantarapanich 2013).

Jim H. Lee ve ark. yaptıkları çalışmada fotopolimerin kürleşme derinliğini deneysel ve teorik olarak belirlemeye çalışmışlardır. Stereolithography yönteminde fotopolimer reçinenin kürleşme derinliğinin katman kalınlığını belirlediğini, aynı zamanda kürleşme derinliği ve

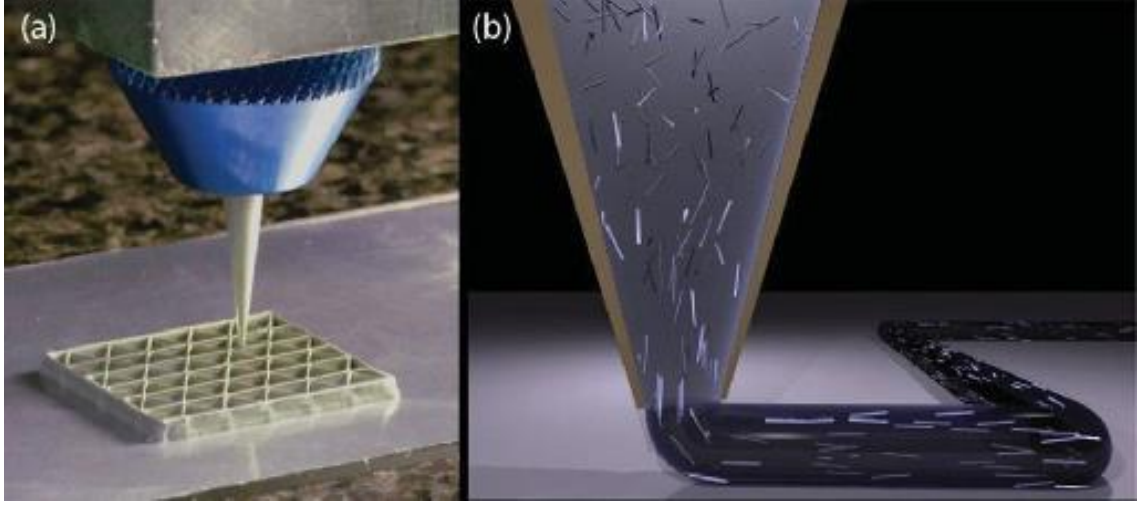
ışık şiddeti arasında ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Deneylerinde fotopolimer reçine ve 325nm dalga boyunda, spot genişliği olarak 250um ve lazer gücü 40mW olan (He-Cd) lazer kullanmışlardır. Katman kalınlığını belirlemek için 3 farklı enerji yoğunluğunda (0.931 j/cm², 1.732 j/cm², 22.255 j/cm²) deneyler yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda enerji yoğunluğu arttıkça kürleşme derinliğinin katlanarak arttığını belirtmişlerdir (Jim H. Lee 2001).

Marta Invernizzi ve ark. cam ve karbon fiber takviyeli çift kürleme ile elde edilmiş polimer kompozitlerin UV destekli 3D baskısı üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları yeni bir çift kürlenebilir reçine formülasyonu ile karbon fiber ve cam fiber ile birlikte UV ışın ve sıcaklık ile kürleştirmişlerdir (Invernizzi, ve diğerleri 2016).

Llewellyn ve Drinkwater (Llewellyn Jones , Drinkwater ve Trask 2016) mikro cam fiberleri dağıtmak için ultrasonik sistem kullanmışlardır. Bu şekilde reçine içerisindeki fiberleri farklı açılarda yerleştirebilmişlerdir. Bu metod akıllı malzeme üretiminin önünü açmıştır (Kim K 2014).

3.4. Ekstruzyon

Ekstruzyon, 3 boyutlu yazıcılarda en son gelişmelerden biri olarak, çok yönlülüğü ve düşük maliyeti ile FDM metodunun sınırlarını genişletmiş bir metot olarak ortaya çıkmıştır. Bu eklemeli imalat teknolojisinde katmandan bağımsız serbest şekilli üretim yapılmaktadır (Guo , ve diğerleri 2013). Hafif gözenekli karbon fiber(10um çap ve 220um uzunluk) ve SiC karıştırılmış kompozit Şekil 17 de gösterildiği gibi tablaya yığılmıştır (Compton ve Lewis 2014).

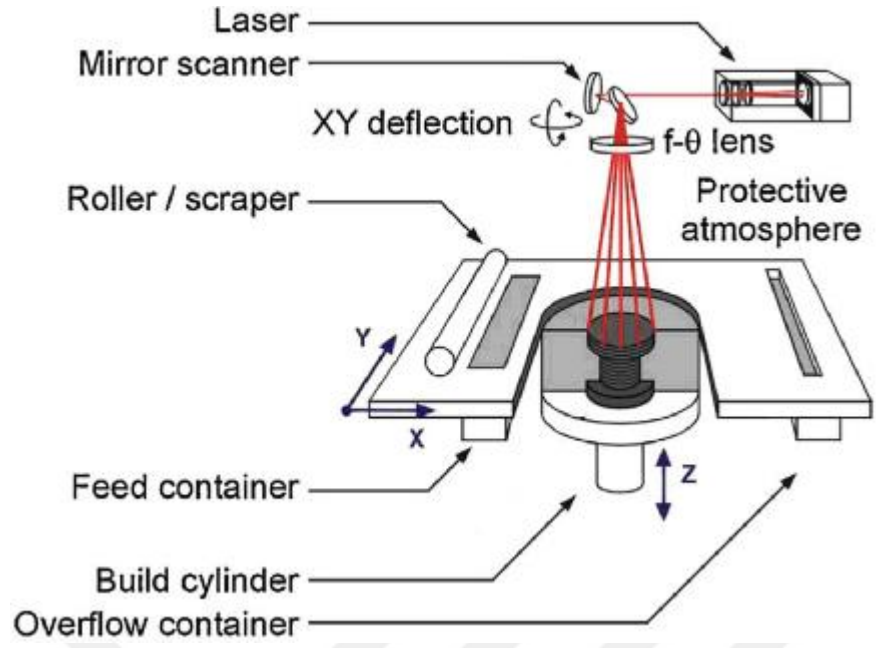


Şekil 17. (a) üçgensel bal peteği şeklindeki parçanın 3 boyutlu yazımından bir görüntü. (b) kompozit mürekkep yığılması sırasında oluşan sürecin şematik görünümü (Compton ve Lewis 2014)

Viskoelastisite ve raf ömrü açısından istenen özelliklerde olan epoksi esaslı mürekkep kullanım için hazırlanmıştır. Yazar fiber yönlerinin üretim yönüyle aynı olduğunu öne sürmüştür. Deneyler sonucunda young modülünde önemli derece artış gözlenmiştir. Young modülü yaklaşık 3-10 GPa dan 16-25 GPa civarlarına çıkmıştır. PLA/MWNT kompozit sıvı yığma modellemesi olarak adlandırılan bir yöntemle iletken 3D parça üretilmek için kullanılmıştır (Postiglione, ve diğerleri 2015)

3.5. Seçmeli Lazer Sinterleme (SLS)

SLS toz tabanlı bir eklemeli imalat metodudur. Lazer tozların serili olduğu tablayı tarar bu tarama esnasında lazerin geçtiği yerlerde katman katman 3 boyutlu yapı meydana getirilir. Yöntemin şematiği Şekil 18 de gösterilmektedir. Bu yöntemde ağırlıklı olarak mum, seramik, metal ve polimerler kullanılmaktadır. SLS yönteminde sıklıkla kullanılan polimerler naylon, polyamide (PA), polyethylene (PE), PEEK ve PCL olarak sıralanabilir. SLS yönteminde kompozit üretimi ağırlıklı olarak karbon nanotüp ilavesiyle çalışılmıştır (Bai J 2013) (Salmoria GV 2011) (Yan C 2011) (Yuan S 2016)



Şekil 18. Seçmeli lazer sinterleme yönteminin şematik gösterimi (Shahzad , ve diğerleri 2014)

4. MATERYAL METOD

Bu çalışmada; kompozit parça üretimi için bir eklemeli imalat yöntemi geliştirilmeye çalışılmış ve bu çerçevede UV ışıkla kürlenene epoksi reçinesi (fotopolimer) ile cam veya karbon fiber kullanılarak sürekli fiber takviyeli kompozit bir malzemenin üretimi hedeflenmiştir. Bunun için takviye fiber (cam veya karbon) nozul içerisinde belirli hızlarda beslenmiş, bu işlem esnasında da nozul üzerinde konumlandırılmış sıvı fotopolimer ile dolu bir hazne içerisinde geçirilmiştir. Bu şekilde nozuldan çıkan takviye fiber üzerinde sıvı fotopolimer tutunmuştur. Nozuldan çıkan fiber üzerine odaklanan UV ışıklar yardımıyla fiber üzerine tutunan fotopolimer malzemenin kürlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu yığıma işlemi yapılırken nozul X,Y ve Z eksenlerinde hareket ettirilerek katman ve parça üretimi hedeflenmektedir.

Bu çalışma iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, fiber ve fiberi saran fotopolimer üzerine eşit bir şekilde sağlanabilmesi için nozulu çepeçevre saran UV ledlerinin ışık etkisi ile nozuldan çıktıktan sonra kompozit lifler üretilerek metod içerisindeki fiber-reçine davranışlarının irdelenmesini ve üretilen numunelerin özellikleri açısından incelenmesini kapsamaktadır. Birinci aşamada elde edilecek kompozit lifin üretiminde etkili parametrelerin belirlenmesi için nozuldan çıkan fiber nozul eksen (Z eksen) doğrultusunda ve tabla düzleminde (XY düzlemi) üretim gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise katmanlı imalat felsefesi çerçevesinde fiberlerin yan yana istiflenmesindeki etkili olan parametrenin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Deney çalışmalarına öncelikle 50mW gücüne sahip UV lazer kullanılarak başlansa da fiber ve üzerine tutunan fotopolimer malzemenin bütün kesitine tesir edememiş, bundan dolayı daha yüksek güce ve etki alanına sahip UV led kullanımı yoluna gidilmiştir. Kullanılan UV led 420-480 nm dalga boyuna sahiptir.

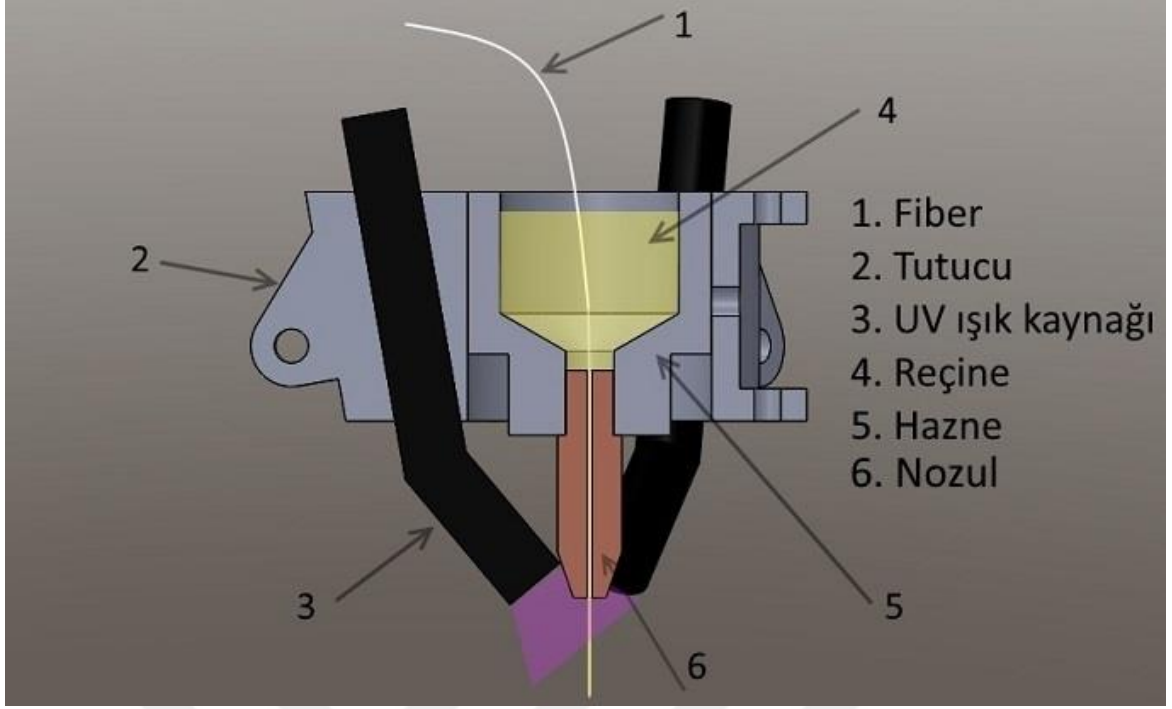
Deneylerde öncelikle UV ile kürlenene polyester reçine üzerinde çalışılmış fakat yeterli mukavemetin elde edilememesinden dolayı epoksi reçine kullanımına karar verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan fotopolimer reçinenin yoğunluğu 1.1 g/cm³, reaksiyon enerjisi 423mJ/cm², çekme dayanımı 62.7 MPa'dır.

Kompozit liflerin imalatı için nozul tasarım ve imalatı özgün olarak tasarlanarak üretilmiştir. UV ledlerinin reçine ile doğru açıda konumlandırılması için nozul etrafına bir tutucu tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilerek komple nozul montajı Şekil 19'da gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 19. Nozul ve Led lamba montajı

Nozul etrafındaki 3 adet UV led lambanın üzerinde konumlandırıldığı tutucu tasarlanırken ışığın 120° açılarla nozul ucuna eşit şekilde odaklanmasına ve deneyler arasında lamba konumlarının Z yönünde değiştirilebilir olmasına dikkat edilmiştir. Bu şekilde yatay yönde 3 adet lamba ile mümkün olan en iyi ışık optimizasyonu sağlanmaya çalışılmış, düşey yönde ise farklı ışık şiddeti gereksinimine göre ayarlanabilir bir tutucu elde edilmiştir. Tasarlanan nozul ve üretim şeması Şekil 20’de gösterilmektedir.



Şekil 20. Tasarlanan nozul ve üretim şeması

Fiber bir hazne içerisinden geçirilerek hazne içerisinde ki reçine fibere emdirilmektedir. Daha sonra bir nozuldaki çıkmaktadır. Nozul çıkışında kompozit fiber ultraviyole ışık ile kürlenmektedir. Nozul hareketi üretilecek geometriyi belirlemektedir.

4.1. Kompozit Lif Üretimi

Eklemeli imalat uygulaması için kullanılan deney seti ile kompozit parça üretiminde ilk adım olarak tek bir lif üzerine yoğunlaştırılmıştır. Bu kısımda incelenecek numuneler X ve Z eksenlerinde ve X-Y düzleminde üretilmiştir. Tek bir kompozit lifin üretilmesinde etkili olan parametreler üzerinde durulmuş ve bir sonraki adım için kabul edilebilir özelliklerde kompozit lif üretimi için optimum değerlerin elde edilmesi hedeflenmiştir.

4.1.1. Nozul ekseninde (z ekseni) yapılan deneyler

Nozul ekseninde yapılan deneyler geliştirilen nozul sistemi ile yapılan ilk deneyleri kapsamaktadır. Bu deneylerde karbon fiber ile cam fiber takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Z ekseninde hareketli tablaya kompozit lif tutundurulduktan sonra tabla hareket ettirilerek cam fiber ve karbon fiber takviyeli kompozit liflerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada sadece tek bir kompozit lif üretilmeye çalışılmış, üretim esnasındaki etkili olan parametrelerin irdelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneylerde değişken olarak belirlenen parametreler takviye fiber çeşidi, nozul delik çapı ve UV ışığın güç yoğunluğudur. Takviye malzemesi olarak cam fiber ve karbon fiber kullanılmıştır. Fiberler reçine havuzundan geçirildikten sonra farklı çaplara sahip nozullardan geçirilerek kompozit lifler üretilmişlerdir. Son olarak bu deneyler farklı ışık şiddetlerinde tekrar edilmiştir. Bu işlemler esnasında kullanılan değişken parametreler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Değişken Parametreler

Parametre / Seviye	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Fiber tipi	Cam fiber (300tex)	Karbon fiber (1K)	
Nozul çapı	1mm	1,4mm	1,8mm
Işık Güç Yoğunluğu	1565mW/cm ²	1050mW/cm ²	465mW/cm ²

Hem karbon fiber hem de cam fiber ayrı ayrı farklı çaplara (1mm, 1,4mm ve 1,8mm) sahip nozullardan geçirilerek 15 cm boyunca kürlenmiştir.

Her biri 15cm boyunda üretilen fiber takviyeli kompozit parçalardan 14cm uzunluğunda (uç kısımları kesilerek başlangıç ve bitiş kısımlarındaki birikmiş reçinelerin etkisi bertaraf edilmiş) numuneler elde edilmiş ve hassas terazide tartılmıştır. Farklı nozul çaplarında ve farklı ışık güç yoğunluğunda fibere tutunan ve k rleşen fotopolimer malzeme miktarları tespit edilmiştir. Deney esnasında alınan görüntüler şekil 21’de görülmektedir.



şekil 21. Karbon (solda) ve cam (sağda) fiber ile yapılan deneyler

Karbon fiberle yapılan deneyler 3'er kez, cam fiber ile yapılan deneyler 2'ser kez gerçekleştirilmiş, sonuçlar ortalama olarak verilmiştir.

Deneylerde farklı nozul çapları kullanıldığı için nozul çapına bağlı olmak üzere farklı fiber-reçine ağırlık oranları elde edilmiştir.

$$R_m = \frac{M_f}{M_t} \quad (1)$$

Burada R_m kütle oranını, M_f fiber kütlelerini, M_t toplam kütleleri ifade etmektedir. Kütle oranı, cam ve karbon fiber kütlelerinin, toplam kütleyle oranını belirtmektedir.

Nozuldan çıkarak karbon fiber etrafında tutunan reçinenin ışıkla kür edilmesi esnasında, karbon fiberin opak olmasından dolayı özellikle iç bölgelerde olmak üzere ışığın ulaşmadığı kısımlardaki reçine kürlenmemektedir. Yapılan deneylerden elde edilen numuneler hassas bir terazi ile tartılmış daha sonra kürlenmeyen reçine fiber üzerinden uzaklaştırılarak tekrar tartılmıştır. Karbon fiber takviyeli kompozit fiberler üretildikten hemen sonra tartılmıştır. Kürlenmeyen reçinenin de içinde bulunduğu numunenin bu ilk hali "ıslak numune" olarak, kürlenmeyen reçine numuneden uzaklaştırıldıktan sonra "Kuru numune" olarak isimlendirilmiştir.

UV ışıkla kürleşen reçine miktarının, toplam reçine miktarına oranı 'kürlenme oranı' olarak adlandırılmış ve sonuç kısmında belirtilmiştir.

$$R_c = \frac{M_t - M_c}{M_t} \times 100 \quad (2)$$

Burada R_c Kürlenme oranını, M_c uzaklaştırılan reçine miktarını, M_t Toplam reçine miktarını belirtmektedir.

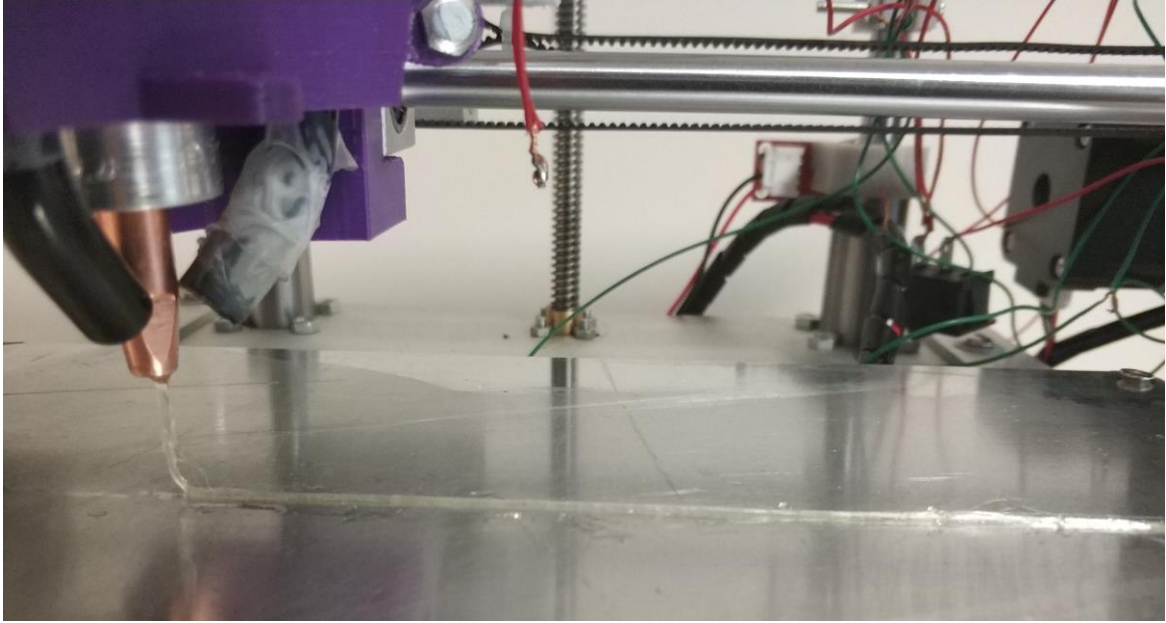
Nozul ekseninde yapılan deneyler reçine-fiber kompozitinin eklemeli imalatındaki davranışı hakkında fikir vermiş, tabla düzleminde üretilen liflerde dikkat edilecek noktalara ışık tutmuştur. Detaylı olarak 5.1.1 başlığında verilen sonuçlara göre nozul çapı 1.2mm, ışık güç yoğunluğu 1565 mW/cm² ve elyaf olarak 300 tex cam elyaf kullanımına karar verilmiştir. Bundan sonra yapılan çalışmalarda bu değerler sabit kabul edilecektir.

4.1.2. Tabla düzleminde (X-Y düzlemi) kompozit lif üretimi

Nozul ekseninde tabla hareket ettirilerek yapılan deneylerde üretilen lifleri üretim sırasında sınırlayan sadece nozul olurken, tabla düzleminde nozulun yanısıra tabla da üretim esnasında bir sınırlama getirmiştir. Z ekseninde yapılan çalışmalarda reçine nozul içerisinde cam fibere emdirilmekte, nozuldan çıktıktan sonra yine fiber üzerinde kürlenmekte idi. Tabla ekseninde

yapılan çalışmalarda ise reçine nozul içerisinde fibere emdirilmekte nozul çıkışında ise tablaya serilerek fibere tutunduğu gibi tablaya da tutunmaktadır. Burada reçinenin 3 işlevinden söz edilebilir. Öncelikle cam fibere mukavemet kazandırması, cam fiber ile tabla (altlık) arasında parça üretimini gerçekleştirebilecek şekilde bir tutunma gerçekleştirmesi ve bir sonraki aşamada kompozit liflerin istiflenerek katman katman yığılması sırasında lifler arası (yan life ve alt life) tutunma sağlayarak kompozit liflerden kompozit parça üretilmesinin sağlanmasıdır.

Şekil 22’ de tabla düzleminde tek eksen boyunca yığılarak kürleştirilmiş bir kompozit lif görülmektedir. Burada kullanılan parametreler ilerleme hızı, nozul yüksekliği, düz ve açılı ilerleme ile kompozit lif üretimi olarak sıralanabilir. Tabla alüminyum sacdan imal edilmiştir.



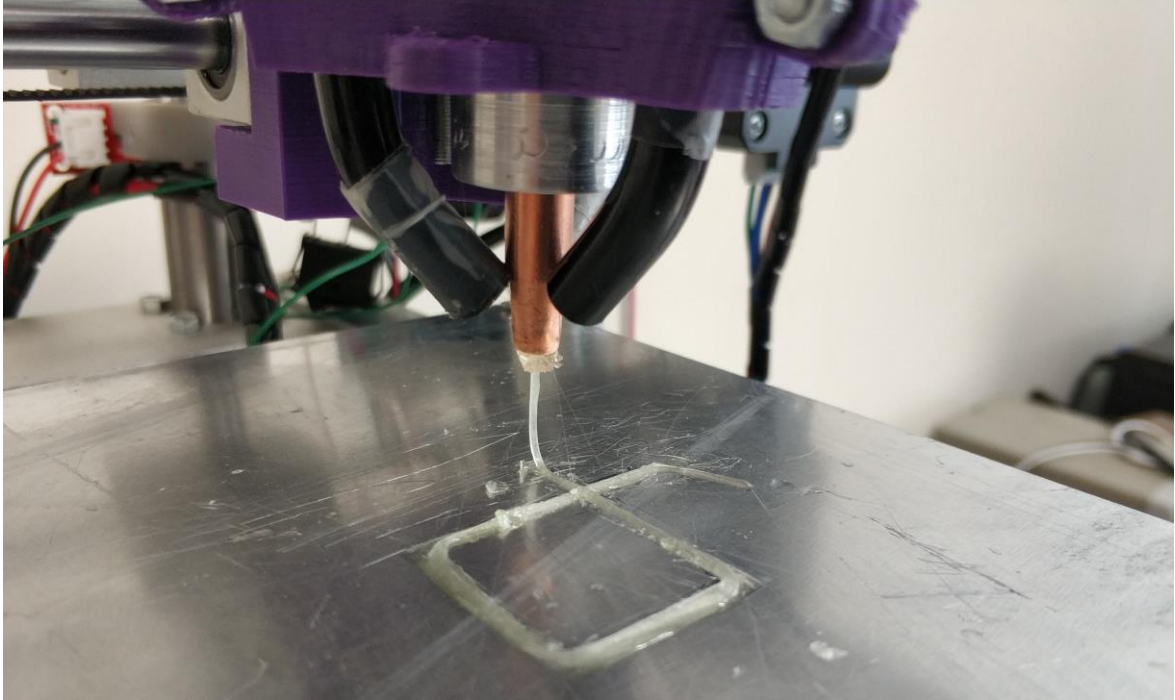
Şekil 22. Tabla düzleminde üretilen bir kompozit lif

Deneylerde öncelikle İlerleme hızı parametresi irdelenmiştir. İlerleme hızı reçinenin kürlenme zamanı açısından önemlidir. Üretim esnasında reçinenin nozuldan ayrıldıktan sonra çok geçmeden tablaya tutunacak kadar kürlenmesi istenmektedir. İlerleme hızının yavaş olması reçinenin henüz nozuldan tam olarak ayrılmadan kürlenmesine sebep olabilirken, çok hızlı olması kompozit lifin tablaya tutunmamasına dolayısı ile sağlıklı bir yığma gerçekleşmemesine sebebiyet vermektedir. Yapılan deneylerde kullanılan İlerleme hızları sırasıyla 300, 375, 450, 525, 600, 675, 750 ve 825 mm/dak’ dır. Deneyler yapılırken Üretim esnasında, nozulun iç çapı 1.2mm olmasından dolayı nozul yüksekliği 1 mm olarak seçilmiştir. Üretim +X doğrultusunda 120mm boyunca devam ettirilmiş, üretim sonunda Z

ekseninde 15 mm nozul hareket ettirilerek nozulun tabladan uzaklaşması sağlanmış ve numuneler tabladan alınmıştır. Numunelerin son kısmında ki +Z yönünde görülen yapısı bu sebeple oluşmaktadır.

Üretim boyunca nozul ve tabla arasındaki mesafe sadece katman kalınlığını belirlemekle kalmamakta aynı zamanda üretim esnasında tek lifin kapladığı genişliği de etkilemektedir. Bu yönüyle nozul ile tabla arasındaki mesafe çok önemli bir parametredir. Deneylerde 0.5, 0.75, 1 ve 1.25 mm mesafelerde üretim yapılmış ve elde edilen kompozit lifler sonuçlar bölümünde verilmiştir. Nozulun 1.2 mm çapta olması sebebiyle 1.25 mm'nin üzerindeki yüksekliği mesafeleri denenmemiştir.

Tabla düzleminde yapılan deneylerin ikinci aşamasında ise parça üretimi yapılabilmesi için ilk ekseninde yapılan üretim neticesinde fiberin belli bir açı yaparak yan tarafa kaydırılması (paso verilmesi) üzerine gerçekleştirilmiştir. Bunun için üretim esnasında 90°, 120° açılarla dönüşler yapılmıştır. UV ışık kaynaklarının reçineyi her yönde kürleştirebilme kabiliyetinin dönüşlerde oluşacak yapıya etkisinin incelenmesi bakımından X-Y düzleminde bütün yönlerde dönüşler tekrarlanacak şekilde kare (Şekil 23) ve altıgen (Şekil 39) şeklinde bir üretim gerçekleştirilmiştir.



Şekil 23. Üretim esnasında dönüş kabiliyetin incelenmesi

4.2. Kompozit Liflerin İstiflenmesi

Eklemeli imalatta yığılan materyal üst üste ve yan yana istiflenerek parça imalatı gerçekleştirilir. Bu kısımda lifler yanyana dizilerek bir katman elde edilmeye çalışılmıştır. Böylelikle Eklemeli İmalat ile üretilen parçaların en büyük problemlerinden biri olan farklı katman ve sıraların oluşturulması esnasında yaşanması muhtemel süreksizlik problemini irdelemeye altyapı oluşturmak için bu aşamada liflerin yanyana istiflenmesi deneyleri yapılmıştır. Burada kullanılan parametreler; Yanal İstif Mesafesi ve ilerleme hızıdır. Yanal istif mesafesi yanyana yığılmış iki lifin merkezleri arasındaki uzaklıktır.

Yanal istif mesafesi değişken değerleri 0.5, 0.75, 1 ve 1.25 mm ve İlerleme Hızı değerleri ise 675mm/dak ve 525mm/dak'dır



5. SONUÇLAR

5.1. Kompozit Lif Üretiminin İrdelenmesi

Bu deneylerde karbon fiber ve cam fiber takviyeli kompozit lifler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler ve buna bağlı sonuçlar ayrı başlıklarda verilmiştir.

5.1.1. Z ekseninde üretilen karbon fiber takviyeli kompozit lifler

Karbon fiberle elde edilen kompozit liflere ait bir görüntü Şekil 24’de gösterilmiştir. Karbon fiber deneylerinde reçinenin kısmen kürleştiği gözlenmiştir. Bunun nedeni karbon fiberin siyah oluşu ve ışığı absorbe etmesidir.



Şekil 24. Karbon fiberle elde edilen kompozit lifler

Kürlenmemiş reçineler henüz üzerindeyken numune “ıslak” olarak, kürleşmeyen reçine numuneden uzaklaştırıldığında ise numuneler “kuru” olarak isimlendirilmiştir. Kürlenme oranını elde etmek için; üretim sonunda numuneler öncelikle ıslak olarak tartılmış, kürlenmeyen numuneden uzaklaştırıldıktan sonra kuru olarak tekrar tartılmıştır. Her iki değer için de Fiber Kütle Oranı değerleri ayrı ayrı hesaplanarak Tablo 2’de gösterilmiştir. Fiber ağırlıkları bilindiğinden, kürlenmeyen reçine ağırlıkları saptanmış ve numunelerde elde edilen kürlenme oranı elde edilip tabloda verilmiştir.

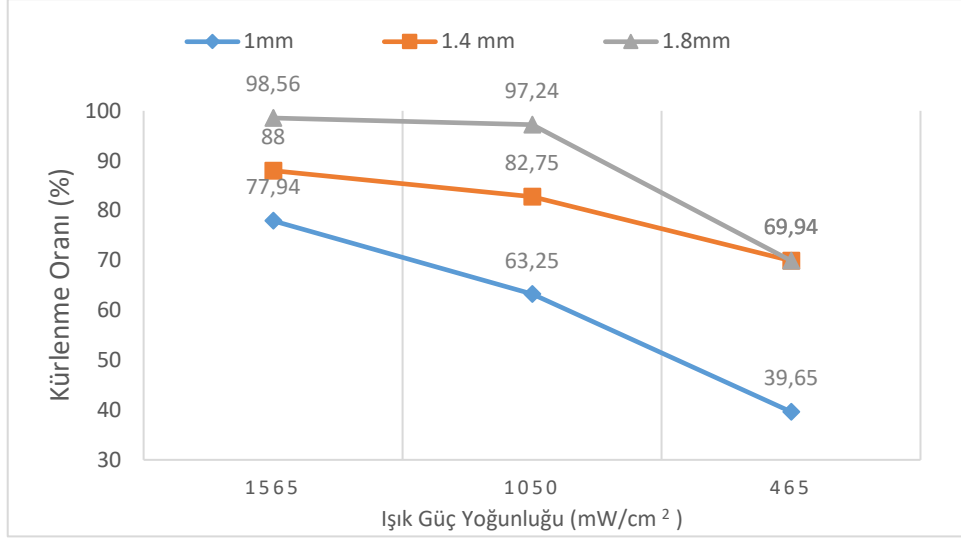
Karbon fiberle yapılan deney sonuçları Tablo 2. Karbon fiberle yapılan deneylerden elde edilen veriler Tablo 2’de gösterilmiştir. Tabloda bulunan Fiber kütle oranı Denklem 1, Kürleşme oranı ise Denklem 2 kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 2. Karbon fiberle yapılan deneylerden elde edilen veriler

Nozul Çapı	Işık Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)	Islaklık/ Kuruluk	Kompozit lif ağırlığı (gr)	Fiber Kütle Oranı	Kürleşme Oranı (%)
1 mm	1565	Islak	0,073	0,382	77,94
		Kuru	0,063	0,442	
	1050	Islak	0,073	0,382	63,24
		Kuru	0,057	0,494	
	465	Islak	0,067	0,420	39,66
		Kuru	0,043	0,646	
1,4 mm	1565	Islak	0,167	0,168	87,98
		Kuru	0,150	0,187	
	1050	Islak	0,163	0,171	82,76
		Kuru	0,140	0,200	
	465	Islak	0,150	0,187	69,95
		Kuru	0,113	0,247	
1,8 mm	1565	Islak	0,260	0,108	98,56
		Kuru	0,257	0,109	
	1050	Islak	0,270	0,104	97,25
		Kuru	0,263	0,106	
	465	Islak	0,240	0,117	81,13
		Kuru	0,200	0,140	

Numuneler 1565, 1050 ve 465 mW/cm² ışık güç yoğunluklarında ayrı ayrı üretilmiştir. Işık güç yoğunluğu parametresi ışık kaynaklarının çıkındaki güç yoğunluğunu ifade etmektedir. Işık kaynakları çalıştırıldığında 3 ayrı dairenin ortak kümesi olacak şekilde nozul ucunda yoğunlaşarak şekil almaktadır. Mesela, 3 ışık kaynağı da 1565 mW/cm² güç yoğunluğunda çalıştırıldığında nozul ucunda 600 mW/cm² ışık güç yoğunluğuna ulaşmaktadır.

Karbon fiberle yapılan deneyler sonucunda nozul çapı arttıkça reçinenin fibere oranı artmış, bu durum gölgelenmeyen kısımlarda kürlenmiş reçine miktarının artmasından dolayı daha rijit numuneler elde edilmesine sebebiyet vermiştir. 465 mW/cm² ışık güç yoğunluğu ile elde edilen numunelerde ışık gücü reçineyi kürelemekte yetersiz kalmış, cidarda oluşan ince bir katman dışında iç kısım kürlenmemiştir. 1mm, 1.4mm ve 1.8 mm nozul çaplarına ait kürleşme oranları Şekil 25’de gösterilmiştir.



Şekil 25. 1, 1.4 , 1.8 mm nozul çapında ışık güç yoğunluğuna göre kürlenme oranı

Şekil 25’de ışık güç yoğunluğunun artmasıyla UV ışığının iç kısımlara nüfuz etme kabiliyetinin arttığı, bundan dolayı kürlenme oranının arttığı görülmektedir.

1mm ve 1.4 mm nozul çaplarında kürlenme oranları incelendiğinde çap arttıkça kürlenme oranının daha yüksek oranlardan başladığı gözlenmektedir. Bu durumun sebebi ise nozul çapının artması ile fiber cidarına tutunan reçine kalınlığını artmakta, gölgeleme etkisinde kalan reçine oranını azalmaktadır.

1,8 mm nozul çapında reçine nozuldan akmaya başlamış, kontrolü zorlaşmıştır. Nozul çıkışında kürleşme olduğundan çapta fazla değişim olmamış olsa da bu istenmeyen bir durumdur. 1,8 mm 1565 mW/cm² nozul çapında yapılan deney sonucu karbon fiberle elde edilen numuneler arasında rijitliği en fazla olan numunelerdir. Fakat numuneler kesildiğinde fiberin içerisinde halen kürlenmemiş sıvı halde bulunan reçinenin olduğu gözlemlenmiştir. Fiber etrafındaki reçine kalınlığının artması ve bu duvarın kürlenmesinden dolayı içeride kalan ve gölge etkisinden dolayı kürlenmemiş olan reçine numuneden uzaklaştırılamamıştır. Bu sebeple 1.8 mm nozul için gözlemlenen yüksek değerler kürleşme oranını tam olarak yansıtmamaktadır.

5.1.2. Z ekseninde yazılan cam fiber-epoksi kompozit lifler

Cam fiber ile yapılan kompozit numunelerin görüntüleri Şekil 26’de gösterilmiştir.



Şekil 26. Cam fiberle kompozit numuneler

Şekil 26’de en solda 1mm’den en sağda 1.8mm’ye kadar olan cam fiber takviyeli epoksi reçine kompozit liflerine ait görüntülerdir.

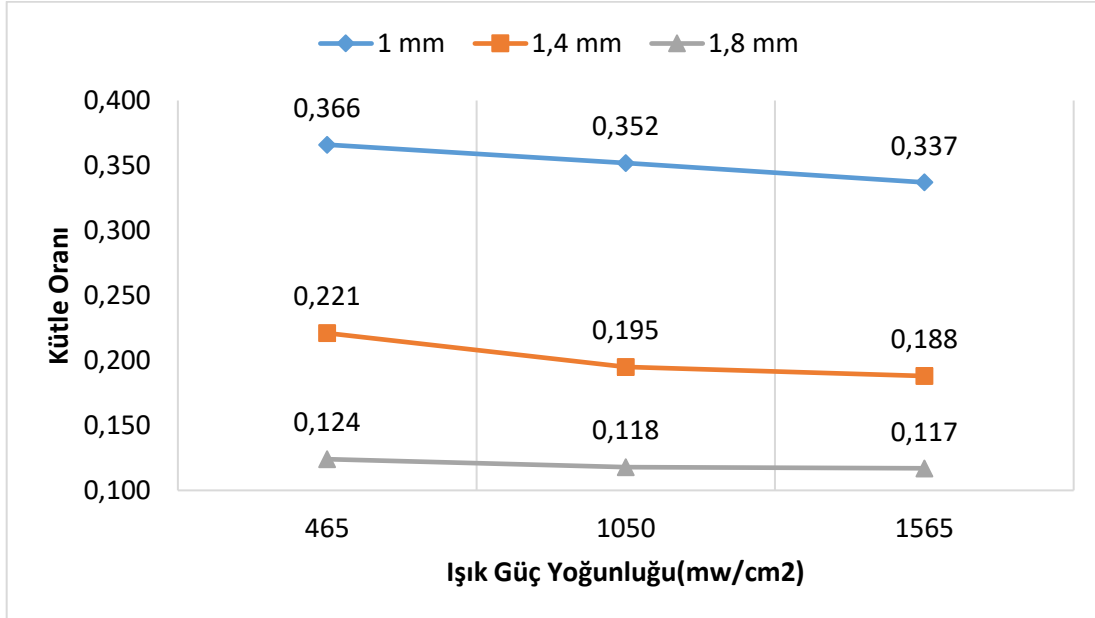
Cam fiber numunelerinin incelenmesinde reçinenin tamamen kürleştiği gözlemlendiğinden dolayı deney verilerinde ıslaklık/kuruluştan bahsedilmemiştir. Cam fiberin şeffaf ve ışığı geçirgen özellikte olmasından, karbon fiber gibi gölgeleme etkisinin olmayışından dolayı UV ışığın reçineyi kürlemesinde sorunlarla karşılaşılmamıştır. Kürleşme problemi olmayan cam fiberlerin rijitlik davranışı bakımından karbon fiberlerden çok daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Elle yapılan kontrollerde karbon fiberle elde edilen numunelerden en rijit olan numunenin dahi, cam fiberle elde edilen numunelerden daha az mukavim olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen numunelerin çaplarının, nozul çaplarından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Cam fiberlerle yapılan deney sonuçları Tablo 3’te gösterilmiştir. Tabloda bulunan fiber kütle oranı Denklem 1 kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 3. Cam fiber ile yapılan deneylerde ağırlık ve kütle oranı değerleri

Nozul Çapı	Işık Güç yoğunluğu (mW/cm ²)	Kompozit lif ağırlığı (gr)	Fiber Kütle Oranı
1 mm	1565	0,125	0,337
	1050	0,120	0,352
	465	0,115	0,366
1,4 mm	1565	0,225	0,188
	1050	0,217	0,195
	465	0,190	0,221
1,8 mm	1565	0,360	0,117
	1050	0,355	0,118
	465	0,340	0,124

Farklı ışık güç yoğunluğuna göre farklı nozul çapları kullanılarak oluşan kütle oranı değerleri grafiksel olarak Şekil 27’de gösterilmektedir. Grafiğe göre, nozul çapı azaldıkça reçine miktarı azalmakta bu da fiberin toplam kütle içerisindeki payını (kütle oranı) artırmaktadır. Ayrıca ışık güç yoğunluğu etkisinin nozul çapına kıyasla oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 27. Farklı nozul çaplarında, cam fiber deneylerinde elde edilen Kütle Oranları

Yapılan deneylerde cam fiberin UV ışıqla karbon fiberden çok daha uyumlu çalıştığı gözlemlenmiştir. Karbon fiberin opak olmasından dolayı UV ışığı hapsederek fiberin iç ve arka kısımlarındaki reçinenin kürlenmesine engel olması problemi cam fiber deneylerinde yaşanmamıştır. Cam fiberin şeffaf olması ışığın lif demetlerinin arasına ve arkasına ulaşmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra ışığın lif üzerine açılı bir şekilde nüfuz etmesi nedeniyle lif demetinin içine giren ışık lif içerisinde yansıma yaparak sadece nozul ucunda değil, nozuldan uzaklaşan yerlerde de etkisini devam ettirmektedir. Bu nedenle bundan sonra yapılan çalışmalarda karbon fiber kullanılamaması bunun yerine cam fiber kullanılması kararlaştırılmıştır.

1.8mm iç çapa sahip nozulda reçinenin cam fiber üzerinden kontrolsüz bir şekilde aktığı saptanmıştır. 1.4mm çaptaki nozulda bu etki kısmen görülmüştür. 1 mm nozulda ise fiber akışı zorlanmaya başlamıştır. Bundan dolayı ideal nozul çapı olarak 1.2 mm seçilmiştir. Bundan sonra yapılan deneylerde 1.2 mm çapa sahip nozul kullanılmıştır.

5.1.3. Tabla düzleminde kompozit lif üretimi

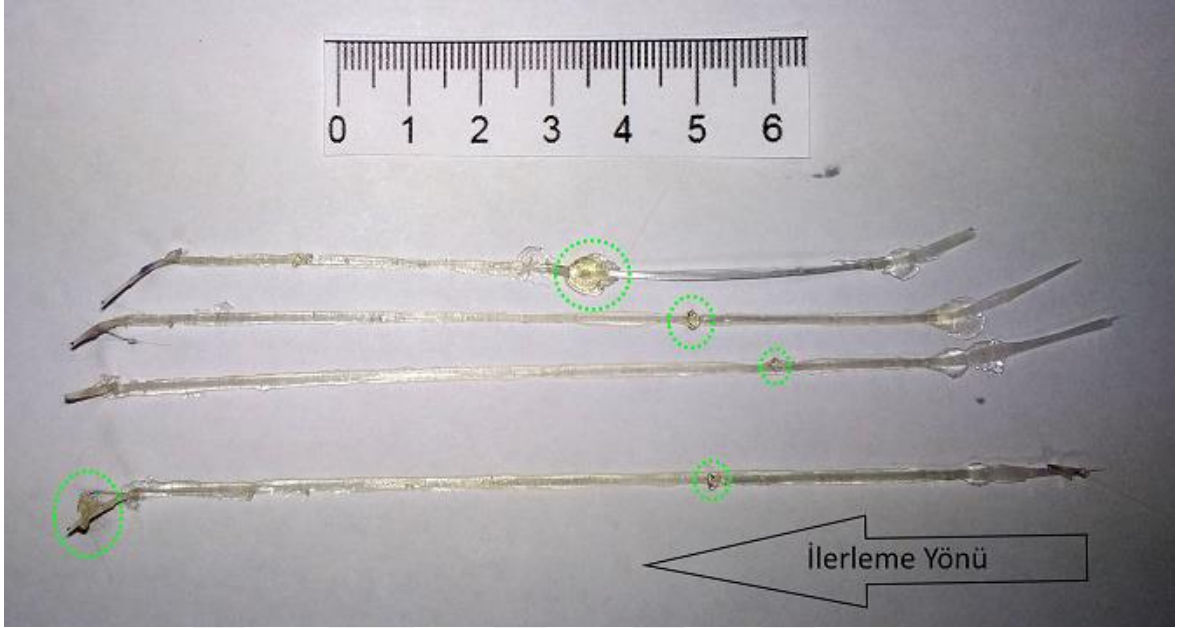
Çalışmaların bu aşamasında kompozit lif X-Y düzleminde yığılarak üretilmesi optimize edilmiştir.

Nozul ekseninde reçine sadece nozul tarafından kısıtlanırken, tablaya yatırılması sırasında kısıtlamalar arasına tabla da girmektedir. Bu durumdan dolayı tabla ile nozul arasındaki mesafenin de optimize edilmesi gerekmektedir. Reçinenin akışkan ve ışık şiddetine göre kısa sürede kürleniyor olması ilerleme hızını önemli bir parametre haline getirmektedir. Önceki çalışmalarda kompozit lif, nozul eksenı boyunca üretilmişken tablada (X-Y düzlemi) ise iki eksen de üretim gerçekleştirilmiştir. Cam liflerin kırılğan ve doğrusal olması sebebiyle üretim esnasında ki dönme kabiliyeti de bu kısımda incelenmiştir. Bu kısımda, tabla düzleminde kompozit lif üretimi için İlerleme Hızı, Nozul Yüksekliği ve Açılı İlerleme olarak 3 ana parametrenin sonuçları verilmiştir.

5.1.3.1. İlerleme hızı

Reçinenin tablaya yığılmasında iki etken vardır. Birincisi; Cam fibere tutunan reçine, fiberin nozuldan çıkmasıyla birlikte cam fiberle birlikte tablaya yığılır. Cam fiberin ilerleyişi reçinenin akmasını sağlar. İkincisi ise reçinenin kendi akışkanlığından ve nozulun yerçekimi doğrultusunda olmasından dolayı oluşan akıştır. İlerleme hızı, ikinci sebepten dolayı oluşan akışa süre tanıyacağından dolayı reçine miktarında küçükte olsa değişikliğe neden olmaktadır.

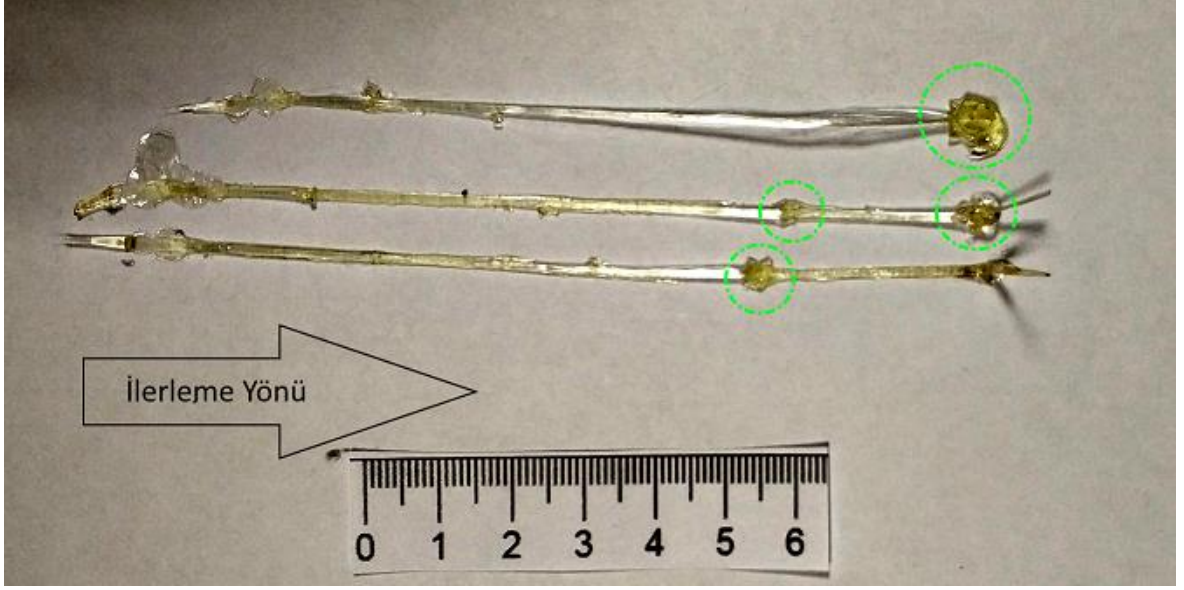
Yapılan deneylerde elde edilen numuneler aşağıda verilmiştir. Bu deneylerde 300, 375, 450, 525, 600, 675, 750, 825 mm/dak hızlarında deneyler yapılmıştır.



Şekil 28. 300mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen numuneler

Şekil 28’da görülen numuneler 300 mm/dak ilerleme hızıyla yığma yapılarak üretilen numunelerdir. İlerleme hızının yavaş olması sebebiyle UV ışık etkisinde kalan reçine nozuldan ayrılmadan nozulun çıkışında cidarlara tutunarak kurlaşmaktadır. Böylece nozul ucunda ve lif boyunca topaklanmalar oluşmaktadır. Şekil 28’de en üstte görülen numunenin boyunun kısa olduğu, üretim esnasında nozulun tıkanarak tablaya tutunması sonucunda bir müddet ilerleyememesinin sonucu olarak gözlenmektedir. Kurlenme etkisi ile bazen nozul tamamen tıkanmakta ve yığma işlemi durmakta, bazen kurlenen kısım tablada topak olarak bırakılarak üretim devam etmektedir. Oluşan topaklanmalar yeşil renkli daireler içerisinde alınarak gösterilmektedir.

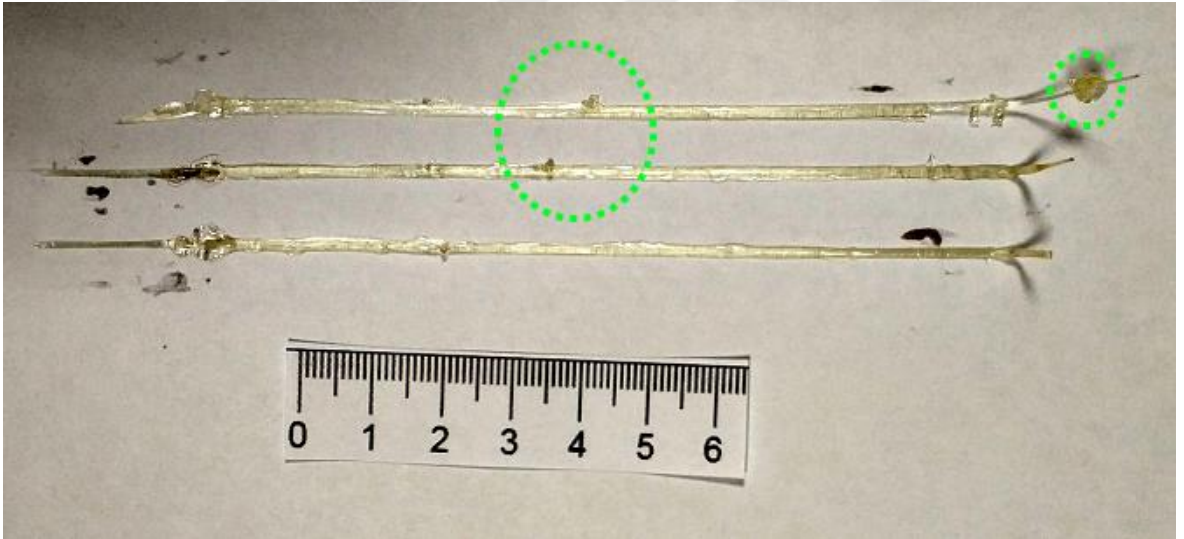
Şekil 29’da 375mm/dak ilerleme hızıyla tablaya yığılan numuneler gösterilmektedir



Şekil 29. 375mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen numuneler

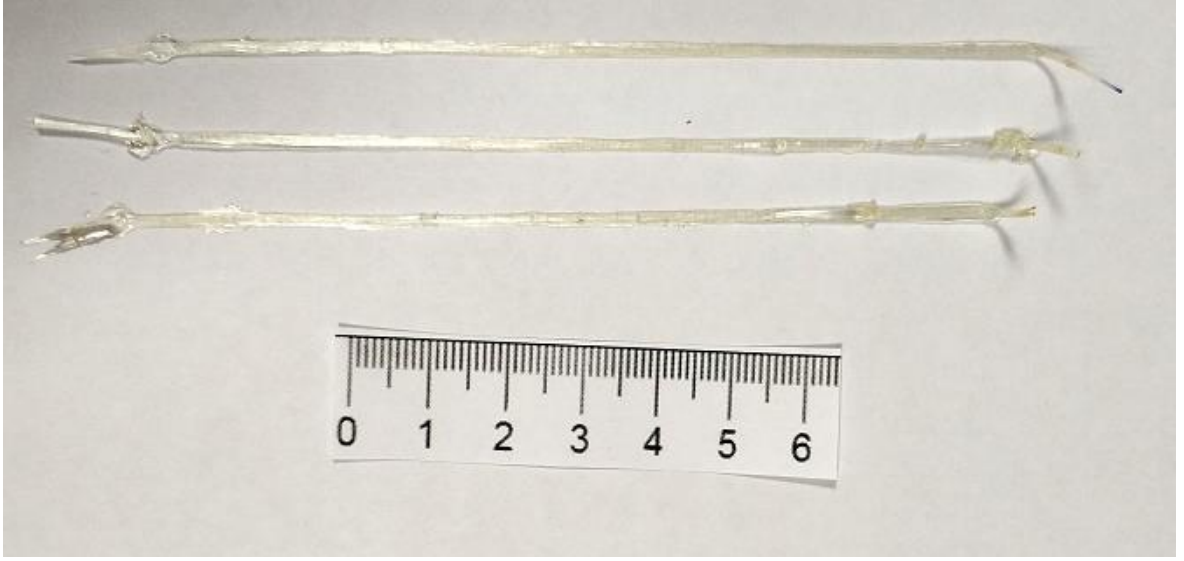
İlerleme hızının düşük olması 300mm/dk lık numune üretiminde oluşan benzer sorunların yaşanmasına neden olmuştur. Şekil 29 da bu topaklar bariz bir şekilde görülmektedir.

Şekil 30'de 450 mm/dak ilerleme hızıyla tablaya yığılan numuneler gösterilmektedir.



Şekil 30. 450 mm/dak ilerleme hızıyla yığılmış kompozit lif numuneleri

450mm/dak ilerleme hızı ile üretilen numunelerde topaklanmaların kısmen azaldığı numuneler üzerinde gözlenmektedir. Şekil 31'de 525 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lifler görülmektedir.



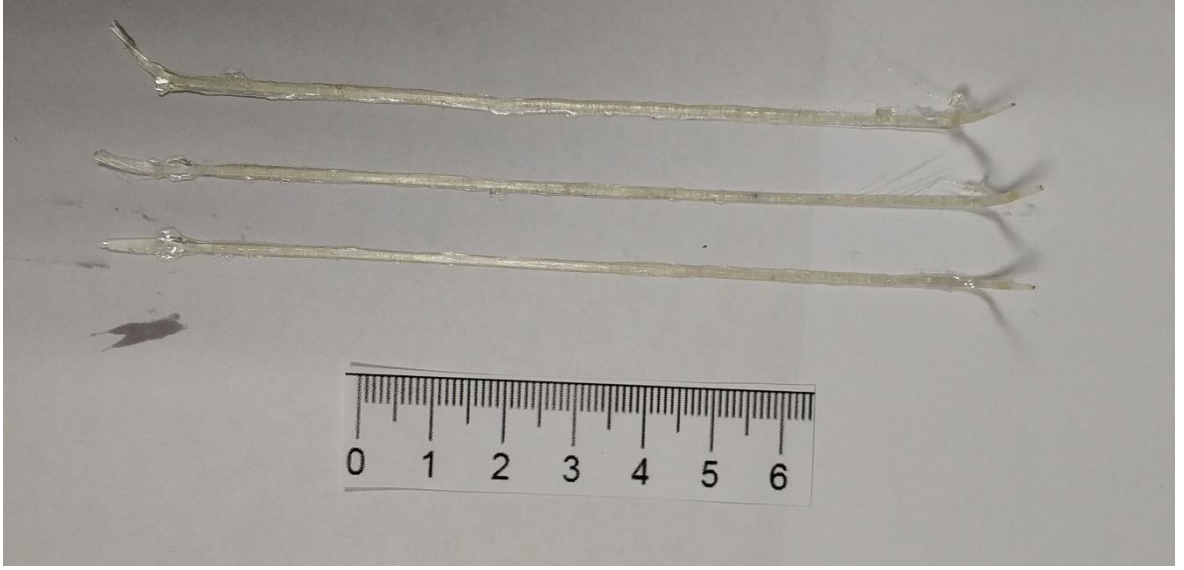
Şekil 31. 525 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri

525 mm/dak ilerleme hızında elde edilen numunelerde topaklanmalar iyice azalmıştır. Şekil 32’de görülen 600 mm/dak ile üretilen numunelerde nozul ağzında kürlenme sorunu kalmamıştır. Hızlı ilerleme sayesinde, reçine nozul ağzında kürlenmeye fırsat bulamadan nozuldan uzaklaşarak tablaya yığılmaktadır. 525mm/dak ilerleme hızından sonra üretim kararlı hale gelmiştir.



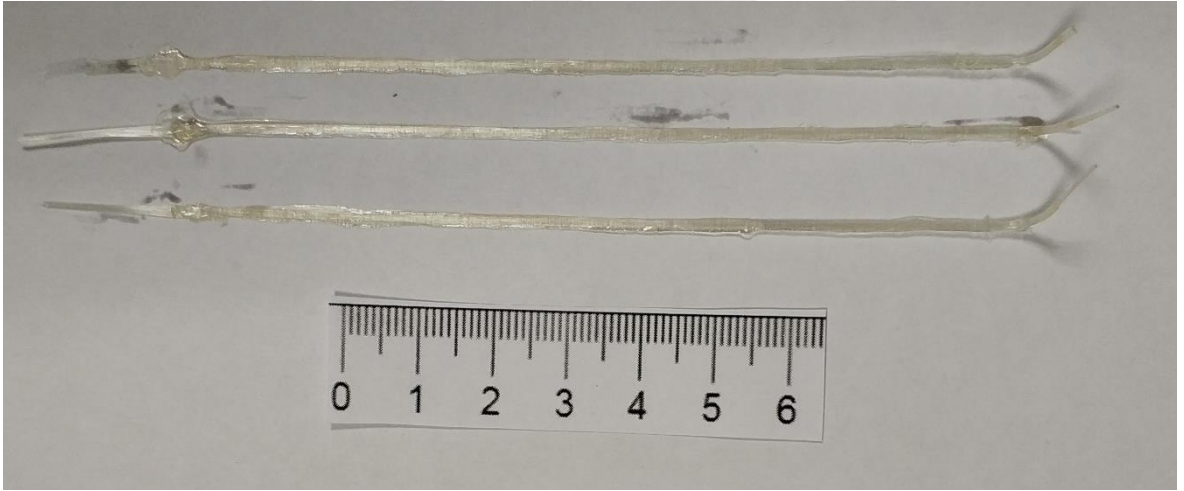
Şekil 32. 600 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri

600 mm/dak ilerleme hızıyla yazılan numunelerde topaklanma sorunu çözülmekle birlikte bu hızdan sonra kürlenmenin yetersiz olmasından kaynaklı mukavemet kayıplarının başladığı gözlemlenmektedir.

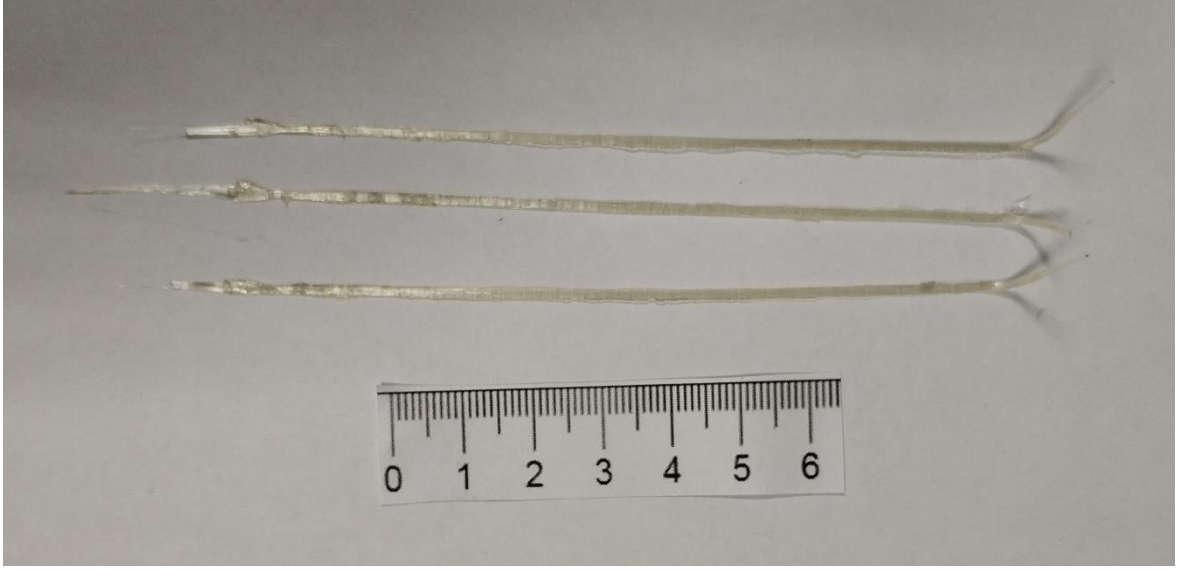


Şekil 33. 675 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri

600 mm/dak ilerleme hızının üzerindeki hızlarda herhangi bir topaklanma etkisi görülmemektedir. Şekil 33-34-35-36'de sırasıyla 675, 750 ve 825 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 34. 750mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri



Şekil 35. 825 mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kompozit lif numuneleri

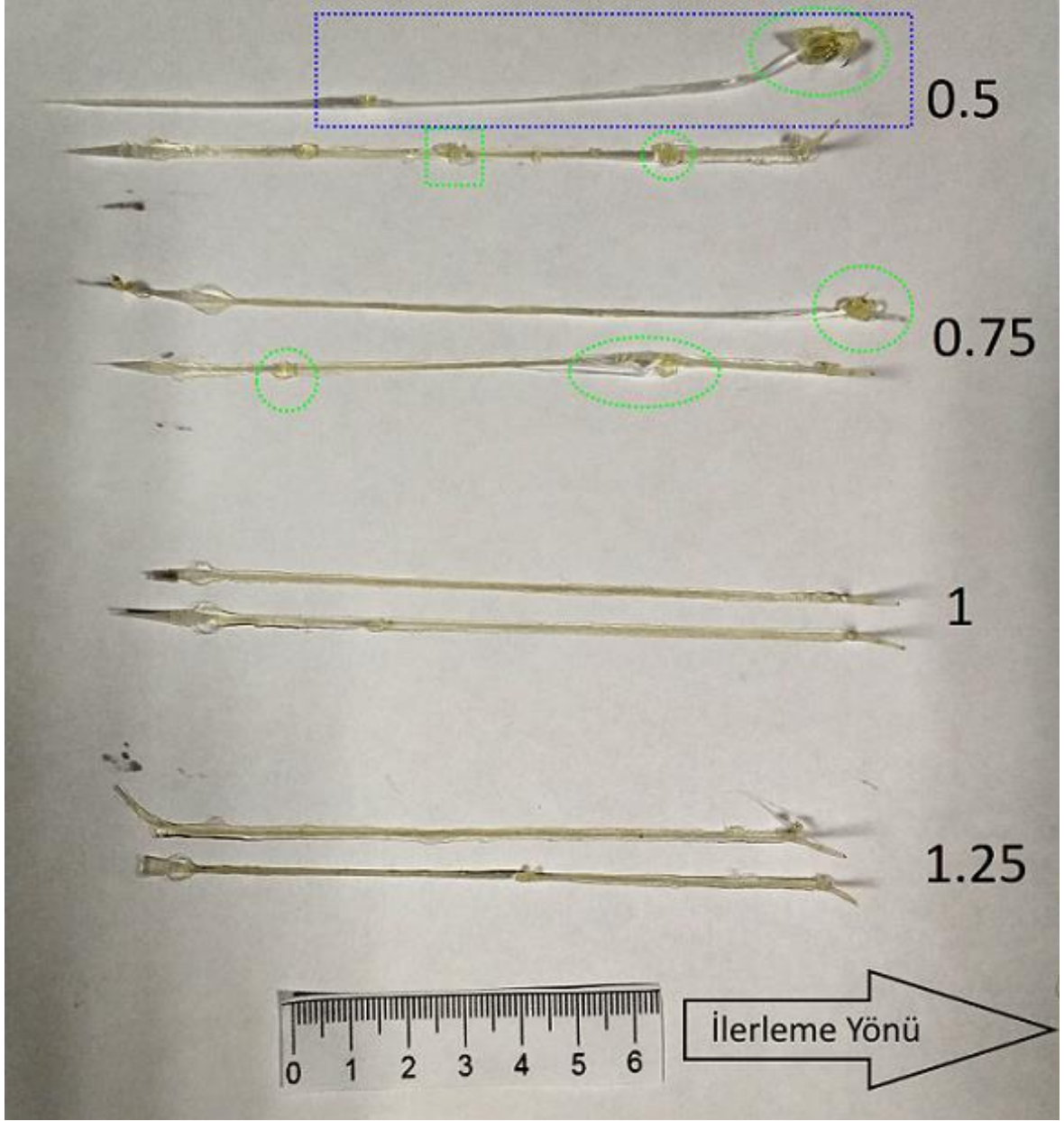
Bu kısımda yapılan deneylerde nozul ile tabla arasındaki mesafe 1mm olarak sabit tutulmuştur. Tabla (X-Y) düzleminde ilerleme hızı değiştirilerek yapılan deneylerde düşük hızlarda reçinenin nozula tutunarak nozulun uç kısmında kürleşmesinden kaynaklanan topaklanma sorunu ile karşılaşmıştır. Hız arttıkça sıvı haldeki reçine nozula tutunamadan nozuldan ayrılmış, bu durum üretim esnasında oluşan topakları ortadan kaldırmıştır. Hızın artması üretim kalitesini artırmıştır.

600 mm/dak ilerleme hızından sonra topak oluşunun azalmasıyla birlikte numunelerde rijitlik azalmıştır. Bunun sebebi olarak reçinenin tam olarak kürleşebilecek kadar UV ışık enerjisini almamış olmasıdır. Bu durum ilerleyen aşamalarda yanına serilecek lifle bağ oluşturmaya açısından istenen bir etkidir.

5.1.3.2. Nozul yüksekliği

Nozul yüksekliği, üretim esnasında nozul ile tabla arasındaki mesafedir. Bu mesafe ilk katman kalınlığında belirleyici bir parametredir. 1.2 mm olarak nozuldan çıkan fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme, nozuldan çıktıktan hemen sonra, kürlenmeden önce, reçinenin tablaya akmasıyla bir miktar daha katman yüksekliği azalmasına sebep olduğu deneyler sırasında gözlenmiştir.

Nozul yüksekliği parametresi incelenirken 675mm/dak ilerleme hızında 0.5, 0.75, 1 ve 1.25mm nozul yüksekliği ile deneyler yapılmıştır. Numuneler Şekil 36'da gösterilmektedir.



Şekil 36. En üstten, alta 0.5, 0.75, 1, 1.25 mm nozul yükseklikleriyle üretilen kompozit lif numuneleri

Yapılan deneylerde 0.5mm nozul yüksekliğinde, nozul tablada ilerlerken reçineyi sıyırmıştır. Artık reçineler nozul etrafında toplanarak kürlenmiş, ve zaman içinde reçine akışı durmuştur. Nozulun tıkanarak reçine akışının durduğu durumlarda fiber akışı bir müddet devam etmekte, bir süreden sonra fiber ya kopmakta yada nozulda biriken kürlenmiş reçineyle birlikte topaklanarak tablada kalmaktadır. Bu etki Şekil 36'da mavi kare içine alınarak gösterilmektedir.

Üretim kalitesi açısından 0.75mm nozul yüksekliği, 0.5mm'den bariz şekilde çok daha iyidir. Fakat hala topaklanmalar gözlenmektedir. Oluşan topaklanmalar daire içerisine alınarak gösterilmiştir.

Nozul yüksekliği artırılarak 1 mm nozul yüksekliğinde yapılan deneylerde üretim kalitesinin bariz şekilde arttığı gözlenmiştir. Yükseklik kaynaklı topaklanmalar gözlenmemiştir.

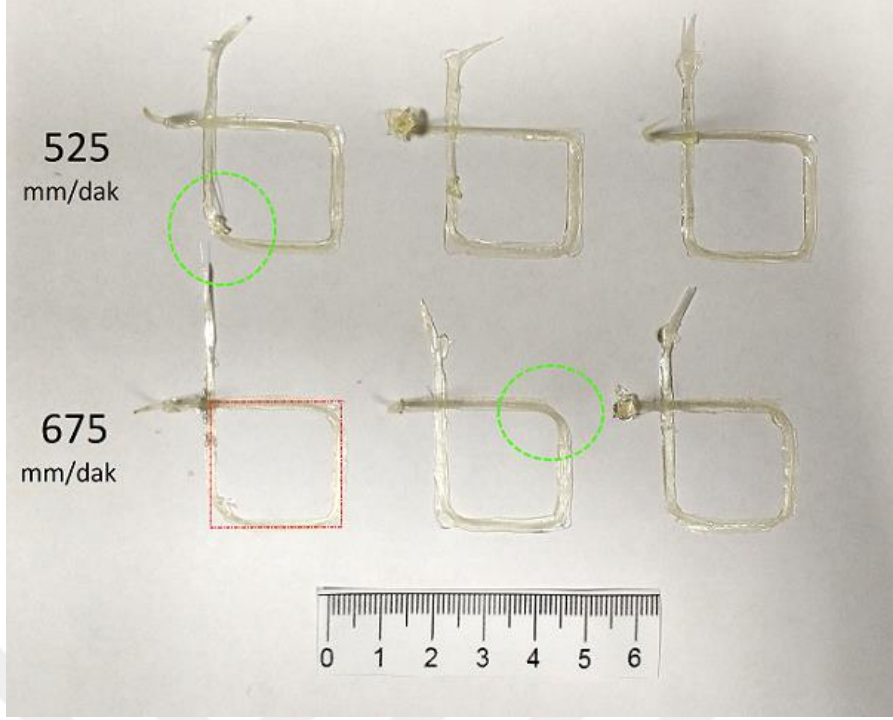
1.25mm nozul yüksekliğinde topak oluşumu söz konusu değildir. Bu yükseklikte yapılan üretimlerde kompozit lif nozul çıkışında tablaya değmemekte, süreç içinde tablaya akmaktadır. Bu yükseklikle beraber nozul kompozit lifi tablaya değil ilk anda yığmaya başlamıştır. Yapılan deneyler neticesinde 1.2 mm nozul çapı ile üretilen numunelerden, 1 mm nozul yüksekliğinin daha güzel sonuç verdiği saptanmıştır.

5.1.3.3. Açılı ilerleme

Önceki çalışmalarda yapılan deneylerde doğrusal olarak tek bir kompozit lifin yatay düzlemde üretimine etki eden parametreler irdelenmiştir. Eklemeli imalat sistemlerinde katmanlı olarak parça üretimi gerçekleştirebilmek için bir katmanın başarılı bir şekilde üretilmesi gerekmektedir. Bir katmanın üretilmesi için ise fiberler yanyana istiflenmek durumundadır. Fiberlerin yanyana istiflenebilmesi için üretim esnasında yığın yapılan fiberlerin yanal mesafe verilerek ikinci ve üçüncü yığını istifleyebilmesi için nozul hareketinin zig-zag veya spiral şekillerde ötelenmesi gerekmektedir. Bu öteleme işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için nozul çeşitli açılarda dönüşler yapmak zorundadır. Bu kısımda 90^0 , 120^0 açılarında dönüşler ve 2 ve 3 mm çapta kavis hareketi (U Dönüşü) yapılarak 180^0 davranışlar incelenmiştir.

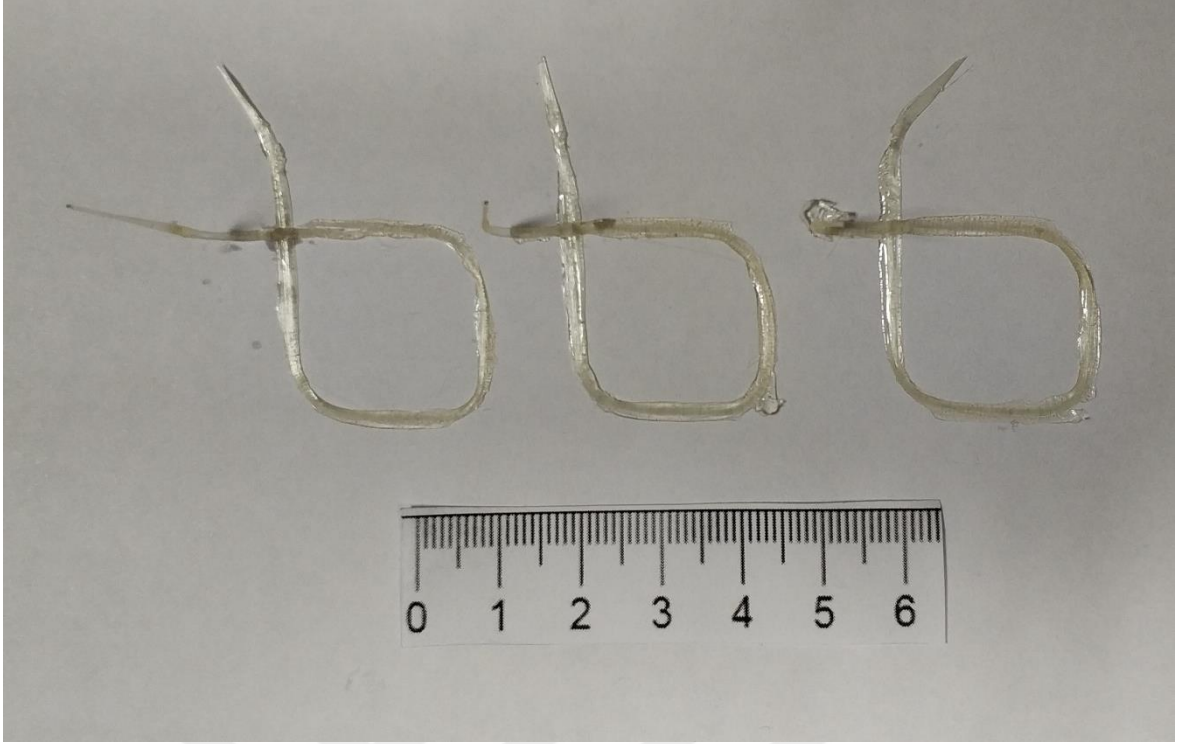
90^0 dönüşlerde tablaya kare şeklinde kompozit lifler serilmiştir. Kapalı bir şekil yığılması ortaya koyulan metotta önemli bir adımdır. 25mm kenar uzunluğuna sahip kare şekil 525, 675 ve 825 mm/dak ilerleme hızlarıyla tablaya serilmiştir. Oluşturulan nozul yolunda dönüşler keskin olarak yapılmıştır.

525mm/dak ve 675 mm/dak ilerleme hızlarıyla kapalı kare şeklinde yazılan numuneler Şekil 37'de görülmektedir.



Şekil 37. Kare şeklinde kapalı kompozit lif üretimi (üstte 525 mm/dak, altta 675 mm/dak)

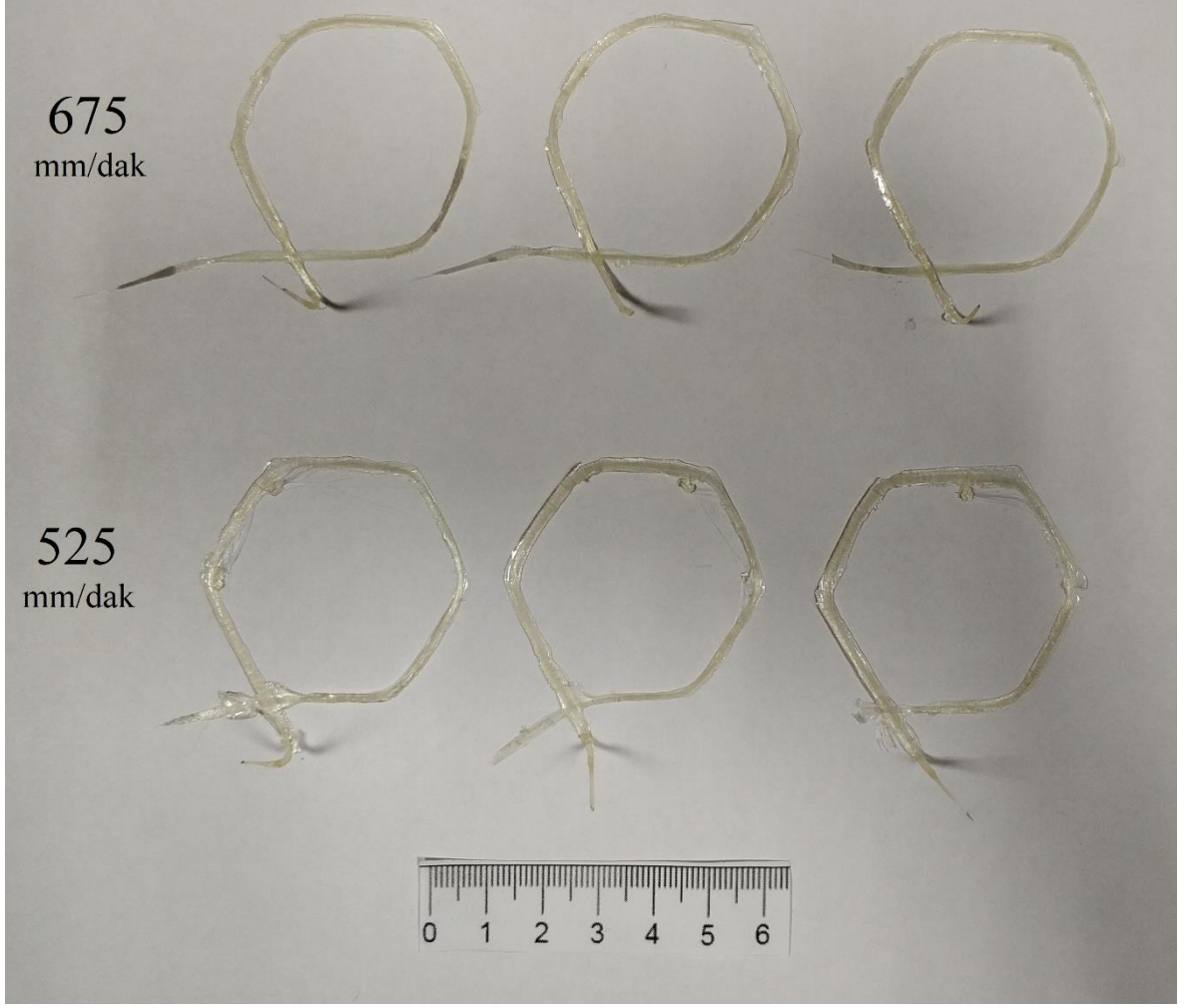
Numunelerde reçinenin keskin dönüş sırasında yığılmaya devam etmesine rağmen fiberlerde sorun olduğu gözlemlenmektedir. Metotta fiber bir itki ile beslenmemektedir. Tablaya tutunan reçine fibere de tutunmasıyla nozulun gerisinde serbest olan fiberi çekmekte bu şekilde üretim sağlanmaktadır. Dönme anında henüz fiber-reçine-tabla tutunması gerçekleşmemiştir. Bu sebeple nozul dönerken fiberin tablaya tutunmaması nozulla birlikte fiberinde tablada çekilmesine ve köşede kavis oluşumuna sebebiyet vermektedir. Nozulun izlediği yol kırmızı çizgili kare şekliyle gösterilmiştir. Oluşan kavisler daire içine alınarak öne çıkarılmıştır.



Şekil 38. 825mm/dak ilerleme hızıyla elde edilen kare şekilli numuneler

Şekil 37 ve Şekil 38 da görüleceği gibi ilerleme hızı arttıkça kavis büyüklükleri artmıştır. Bunun sebebi olarak ilerleme hızı arttıkça fiberin tablaya tutunamadan nozul tarafından çekilmesi gösterilebilir.

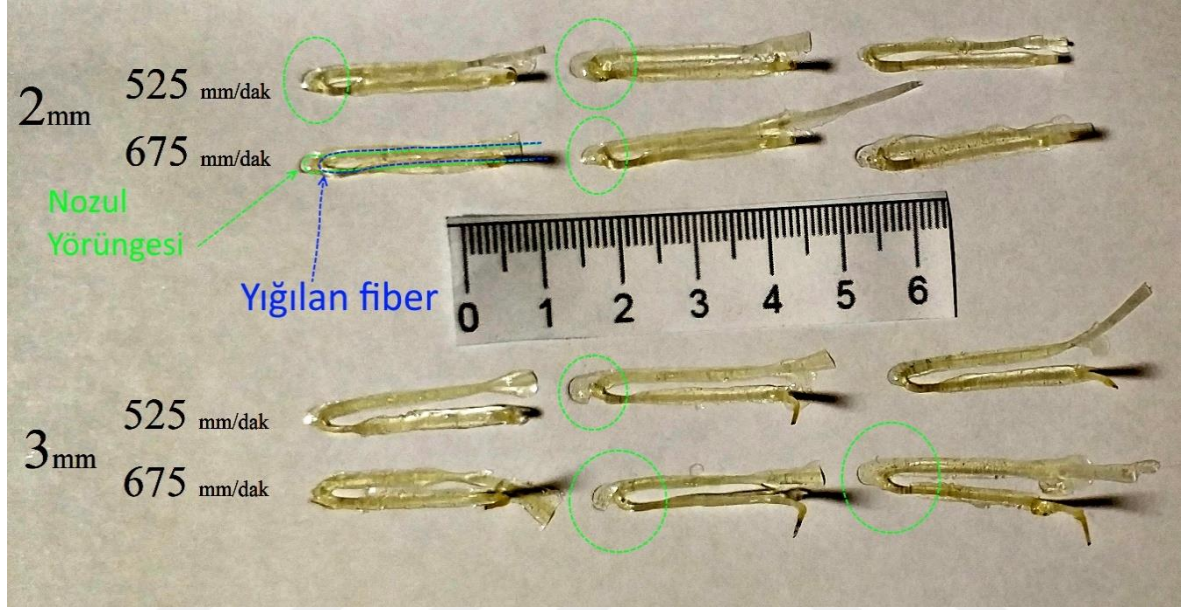
Şekil 39’da 120 derece açıyla dönüş davranışı kapalı altıgen şekil üretimi ile incelenmiştir. Her bir altıgenin bir kenar uzunluğu 25mm’dir. 90 derecede görülen sonuç burada da görülmektedir. Dönüş esnasında tam kürlenmeme sebebiyle kavis oluşmuş aynı zamanda hız arttıkça kavis büyüklüğü artmıştır.



Şekil 39. 675 ve 525mm/dak ilerleme hızıyla yığılan altıgen şekilli numuneler

Açılı ilerleme deneylerinden bir sonuç daha çıkmaktadır. Deneylerde kapalı geometriler yazılmaya çalışılmış bu sayede nozul hareketinde çeşitli vektörlerde üretimler yapılmıştır. Örneğin 90^0 lik kare üretiminde nozul orjine göre öncelikle 0^0 doğrultusunda daha sonra 90^0 doğrultusunda daha sonra 180^0 ve 270^0 doğrultularında üretim yapmıştır. Altıgende ise 0^0 , 60^0 , 120^0 , 180^0 , 240^0 ve 300^0 doğrultularında üretim yapılmıştır. UV ışık kaynaklarının 3 noktada olması üretim sırasında farklı doğrultularda farklı davranışlar gözlenmesine sebebiyet vermektedir. Bunun önüne geçmek için ışık kaynağı sayısının artırılması gerekmektedir.

Doğrusal hareketlerde açılı ilerlemenin yanı sıra dairesel hareketler de incelenmiştir. Nozulun 2mm ve 3mm çapta dairesel hareketlerinde kompozit lifin nasıl serildiği gözlemlenmiştir. Bu deneyde nozul öncelikle +X yönünde 30 mm ilerlemiş daha sonra ilgili çapta yarım daire çizerek U dönüşüyle -X yönünde 30 mm geri gelerek üretimini tamamlamış son olarak her üretimin sonunda olduğu gibi +Z yönünde numunenin alımının kolaylaşması için 15 mm hareket etmiştir. Elde edilen numuneler Şekil 40’de görülmektedir.



Şekil 40. 2 ve 3 mm çaplarında U dönüş numuneleri

Açılı dönüşlerde görülen etki burada da görülmektedir. Reçinenin kürlenerek tablaya tutunması gerekirken, dönüş esnasında çoğunlukla nozulun gölgesinde kalan kompozit katılaşmadığından nozul ile birlikte bir müddet geri dönmüştür. Numunelerin ucunda görünen ve sadece reçine olan kısım (şekil üzerinde daire içine alınarak belirtilmiştir) nozulun U dönüşü yaptığı yörünge olup reçinenin vaktinde kürlenememesi sebebiyle fiber tabla üzerine tutunamamıştır. Şekil 40’da nozulun yörüngesi ve yığılan fiberin arasındaki fark belirtilerek gösterilmiştir. Numunelerden görüleceği gibi U dönüşlerde düşük hızlarda alınan numunelerde nispeten daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

5.1.4. Liflerin yan yana istiflenmesinin irdelenmesi

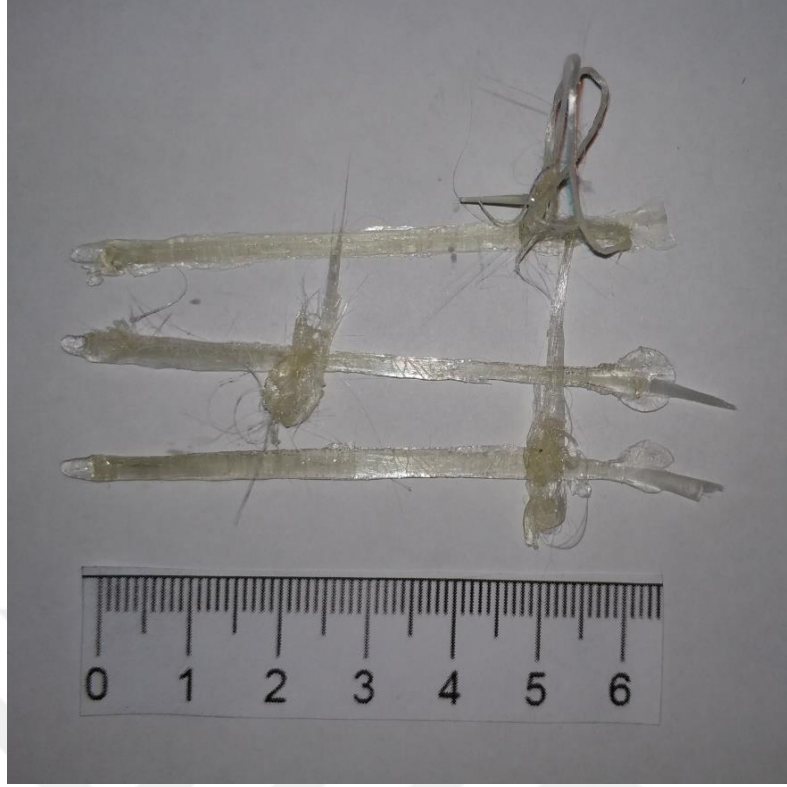
Kompozit lif üretiminde çeşitli parametreler irdelenerek tek bir lifin üretimi optimize edilmiştir. Bu bölümde lifler yanyana istiflenmiştir. Yanyana üretimde lifler arası mesafe ve ilerleme hızı parametre olarak incelenmiştir. G kodlar, lifler 70 mm boyunca 4 sıra olarak yan yana yazılacak şekilde yazılmış, lifler arası mesafe ve ilerleme hızı parametre olarak değiştirilmiştir.

Yanal istif mesafesi 0.5, 0.75, 1, 1.25 mm olarak 4 farklı aralıkta denenmiştir. Şekil 41’de 0.5mm mesafeyle istiflenmeye çalışılan numuneler Şekil 41’de görülmektedir.



Şekil 41 . 0.5 mm yanal istif mesafesiyle, 525 mm/dak üretim hızıyla yığılan numuneler 0.5 mm yanal istif mesafesiyle yazılmaya çalışılan deneylerde mesafe çok dar gelmiş, nozulun uç kısmında reçine topaklanması olmuştur. Nozul etrafına yığılan reçine kürleşerek nozulu tıkanmıştır. Tıkanan nozulda cam fiberler kopmuştur. Bu numunelerde üretim 4 sıra olarak tamamlanamamış 3. Sırada kopma göstermiştir. Numunelerde sıralar arası geçiş U dönüşü şeklinde yapılmıştır. Numunelerin ucunda biriken reçine kürleşmiş fiber akışı bir müddet devam ederken nozul ucunda kürlenmiş reçine nozuldan çıkan fibere tutunmuş olan reçineyi sıyırmıştır. Reçinesiz tablaya bir müddet akan fiber sade haliyle bir önceki sırayla birleşmeden kalmıştır. Bu durum Şekil 42 de en alttaki numunede açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 42’de 0.75 mm mesafe kullanılarak yığılan numuneler gösterilmektedir.

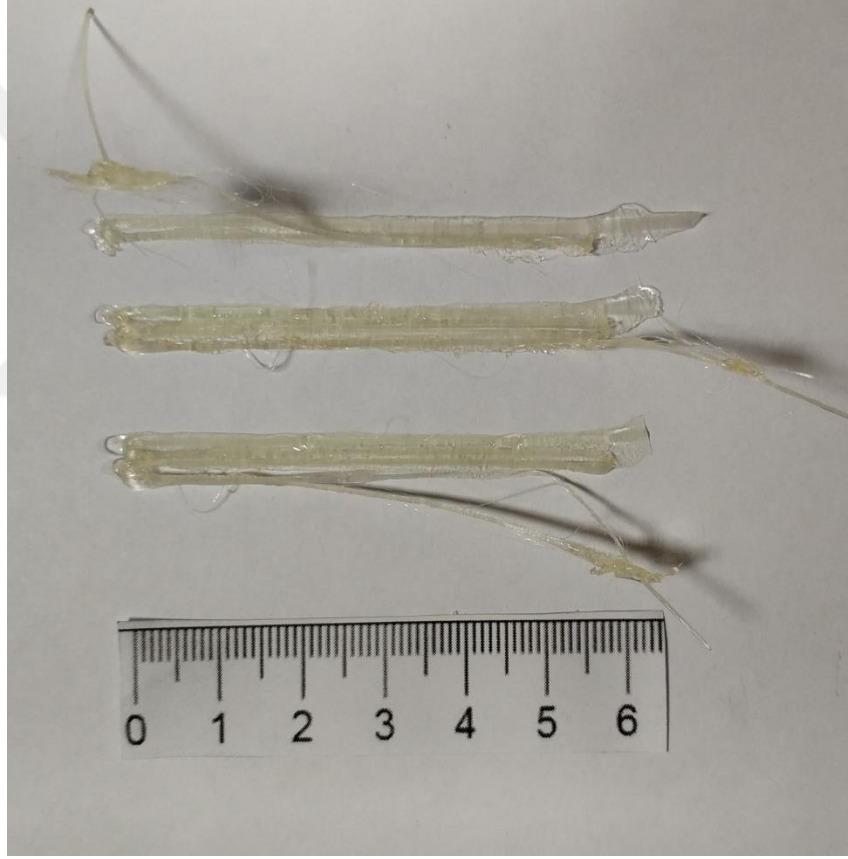


Şekil 42. 0.75 mm yanal istif mesafesiyle, 525 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler
Şekil 42 ve Şekil 43’de daha başarılı bir üretim elde edilmesine rağmen reçine topaklanması devam etmiş buda nozul tıkanmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 43. 1 mm yanal istif mesafesiyle, 525 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler

Nozul U dönüşü yaptığında fiberin doğrusal olarak durmak istemesi dönüş esnasında fiberleri dönüş merkezinden dışarı doğru hareket ettirmektedir. Bu durum belli bir uzunlukta liflerin bir önceki sıraya tutunmasına engel olmaktadır. 1 mm aralıkta üretim daha rahatlamıştır. Son sırada oluşan 3 ve 4. sıranın birbirlerine tutunmamasının sebebi olarak; 3. Sıranın sonunda nozul u dönüşü yaparken nozulun hem +X hemde -X doğrultusunda reçine birikmektedir. Biriken reçine kısa sürede nozuldan uzaklaşamamakta ve kürlenmeye başlamaktadır. Nozul ağzında oluşan bu topak, fiberle birlikte gelen reçineyi sıyrarak sadece fiber geçişine müsaade etmekte tablaya reçinesiz olarak bırakılan fiber matris malzemesi olmadığından bir önceki katmanla bütünleşememektedir. Bu durum Şekil 43’de daha bariz gözükmemektedir.



Şekil 44. 1.25 mm yanal istif mesafesiyle, 525 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler 1.25mm yanal istif mesafesiyle elde edilen numunelerde reçine yığılmasının olmadığı, üretimin başarılı bir şekilde tamamlandığı gözlemlenmiştir. 525 mm/dak hızla yapılan deneylerin ardından 675 mm/dak hızla deneyler tekrar edilmiştir. 675 mm/dak hızla yapılan deneylerde 0.5 mm aralığı denenmemiş, 0.75, 1 ve 1.25mm aralıklarıyla deneyler yapılmıştır.

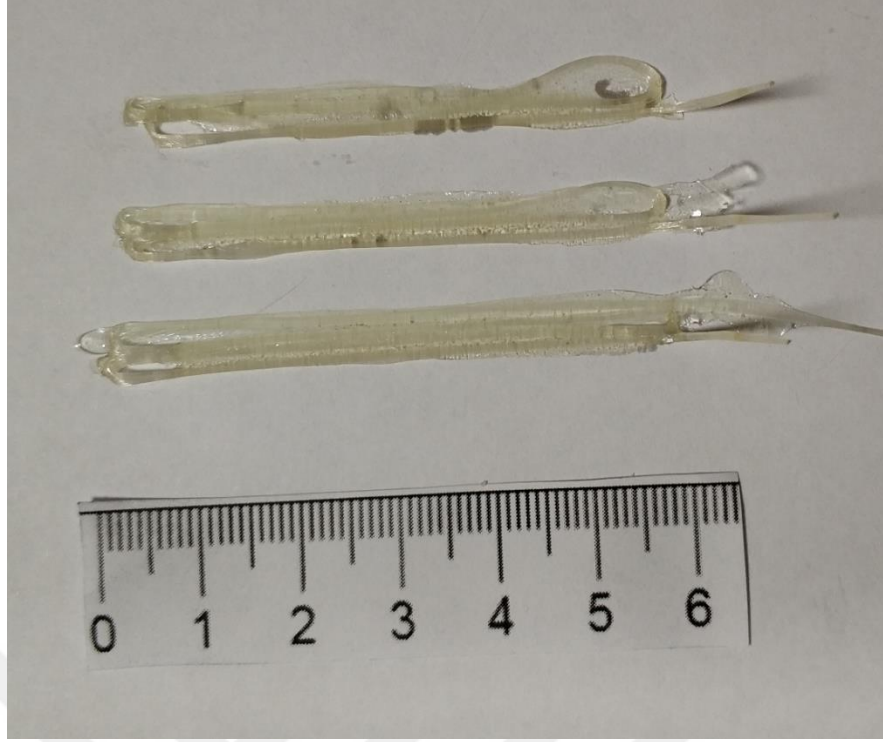
Şekil 45, Şekil 46 ve Şekil 47’de sırasıyla 0.75, 1 ve 1.25mm, 675mm/dak ilerleme hızı ile yığılan numuneler gösterilmektedir.



Şekil 45. 0.75 mm yanıl istif mesafesiyle, 675 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler



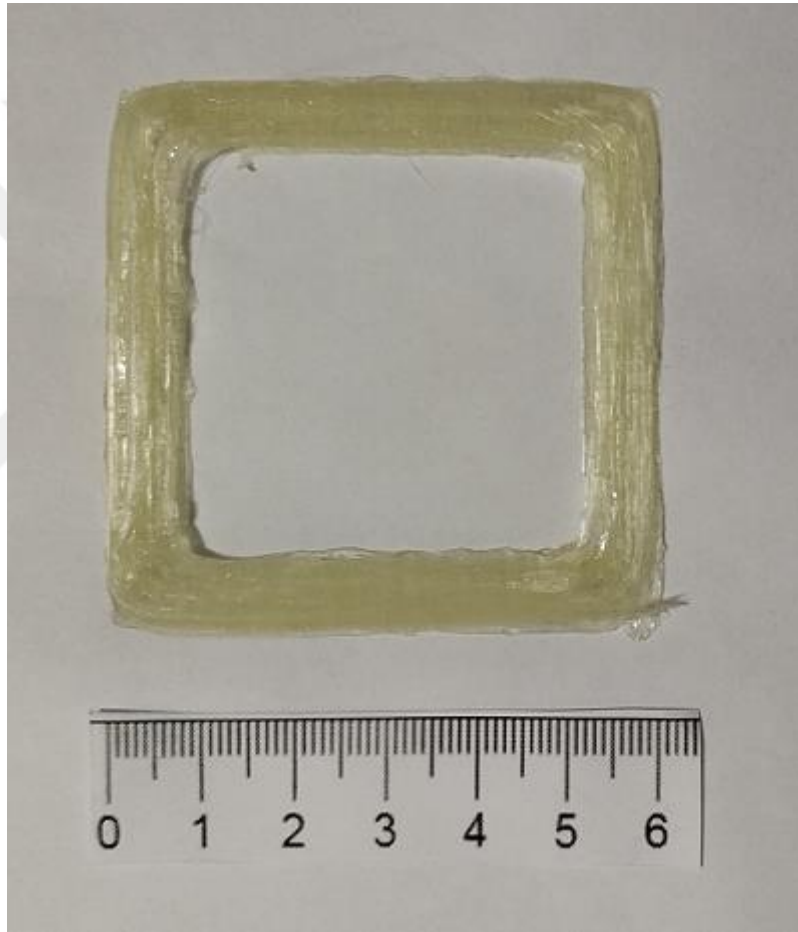
Şekil 46. 1 mm yanıl istif mesafesiyle, 675 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler



Şekil 47. 1.25 mm yanıl istif mesafesiyle, 675 mm/dak ilerleme hızıyla yığılan numuneler 675 mm/dakika ilerleme hızıyla yığılan numunelerde U dönüşlerinde ilerleme hızı fazla gelmiştir. Fiberin doğrusal ve kırılğan oluşu aynı zamanda reçinenin henüz kürlenmemiş oluşu, Şekil 47’de olduğu gibi fiberi nozul yörüngesinden bağımsız olarak dönüş kısımlarının bombeleşmesine sebep olmaktadır. Burada Şekil 47den farklı olarak yüksek ilerleme hızında dorusal olarak yığılan kısımdaki liflerinde kürlenmemiş olması şeklin daha çok bozulmasına sebep olmuştur. U dönüşlerde iç boşluklar oluşmuştur. İç boşluklarla beraber ilgili olmayan sıralarda fazla yığılma olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerde ki şekil kaybı çoğunlukla buna bağlıdır.

Yapılan deneylerin sonucunda bir katman üzerinde fiberlerin yanyana istiflenebilmesi için zig-zag şeklinin uygulanması zor görülmektedir. Özellikle istiflerin birbirine uzaklığının U dönüşü için yapılan deneylerden daha küçük kavise sahip olması gerektiği, büyük kavislerde bile fiziksel bazı problemlerin yaşandığı gözönüne alındığında istiflemenin spiral şekilde yapılmasının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bunu gerçekleştirmek için bir geometri tasarlanmıştır. Tasarlanan bu geometri cidarı kalın bir kare profil şeklindedir. Bu deneyde 7 sıra iki kat yığma yapılmıştır. Nozul üretime karenin dış kısmından başlamış öncelikle içeri doğru iç içe kare oluşturacak spiral bir şekilde yörünge takip ederek iç içe 7 sıra lif yığmıştır. İlk katmanın bitiminden sonra tabla Z ekseninde 1 mm hareket etmiş ve sistem ikinci katmanın üretilmesine hazır hale gelmiştir. Nozul hareketi ilk katmanda olduğu

gibi bu kez iten dışarı doğru yine spiral yörünge takip ederek ikinci katman da üretilmiştir. Üretim esnasında 7 sıra kompozit lif istiflenerek üretilmiş ve üretim sonunda Z ekseninde 15 mm yukarı çıkmıştır. Üretim dönüşlere yakın olunan yerlerde daha yavaş, kısa olmayan doğrusal hareketlerde daha hızlı olacak şekilde iki ayrı ilerleme hızı kullanılarak yapılmıştır. Dnşlerden 5mm önce ve sonra 525mm/dak ilerleme hızı kullanılmıştır. Diğer bölümlerde ise 825 mm/dak ilerleme hızı kullanılmıştır. Yatay istif mesafesi ve katman kalınlığı 1 mm olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak şekil 48'de gösterildiği gibi deney sonunda numune başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Elde edilen kare şekilli numunenin dış kenar uzunluğu 60mm'dir



şekil 48. 7 sıra 2 kat olarak üretilen numune

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada 3 boyutlu yazılarda UV ile kürlenebilen Epoksi Reçine-Cam/Karbon Fiber kompozit malzeme üretimi için bir nozul tasarlanmış, bir metot geliştirilmiş ve metot içerisinde önemli parametreler belirlenerek optimizasyonları üzerinde çalışılmıştır. Öncelikle nozul ekseninde reçine fiber davranışları gözlenmiş sonuçlar irdelenmiştir. Z ekseninde yapılan çalışmalarda nozul çapı, ışık güç yoğunluğu ve fiber çeşidi üzerinde durulmuş, metodun temelleri atılmıştır. Karbon fiberin opak olması sebebiyle UV ışıkla uyumlu çalışmadığı gözlenmiş, çalışmalara Cam fiber üzerinden devam edilmiştir. Tabla düzleminde katmanlı imalata yönelik deneyler yapılmış bu deneyler sonucunda nozul yüksekliği, ilerleme hızı, açılı ilerleme, yanyana üretim konularında materyal davranışları not edilmiştir.

Cam fiberle yapılan deneylerden şu sonuçlar çıkarılabilir;

- Cam fiber, UV ışık ile eklemeli imalat yönteminde kullanılabilir bir malzeme çeşididir.
- 300 tex Cam fiber için 1.2 mm ve civarlarında delik çapına sahip nozul kullanımı idealdir.
- Düşük ilerleme hızlarında reçine nozuldaki uzaklaşmadan kürlenmeye başladığı için nozul ağzında tıkanmalar olmakta bu durum sebebiyle parça üzerinde topaklanmalar oluşmakta ya da üretim tamamen durmaktadır.
- Yüksek ilerleme hızlarında reçine yeterli UV ışığı absorbe edemediğinden kürlenmeme kaynaklı mukavemet kayıpları yaşanmaktadır. Bu durum bir sonraki lifle birlikte kürlenmeye zemin oluşturması bakımından, katmanlı imalat için avantaj olarak kullanılıp üretim sonunda son kürlleme işlemi yapıp, üretim esnasında lifler arası tutunma, üretim sonunda yüksek parça mukavemeti sağlanabilir.
- Üretim esnasında doğrusal hareketlerde yüksek hız üretim kalitesini artırırken, dönüşlerde fiber tablaya tutunmadan nozul yön değiştirdiği için üretim kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple dönüşlerde ilerleme hızı düşürülmeli, doğrusal hareketlerde reçinenin tablaya tutunmasını engellemeyecek kadar yüksek tutulmalıdır.
- Işık kaynaklarının 3 adet, 120 derecelik açılarla yerleştirilmiş olması üretim esnasında farklı ilerleme vektörlerinde farklı davranışlar elde edilmesine sebep olmuştur.

- 1.2 mm nozul çapında yapılan deneylerde, nozul yüksekliğinin nozul çapına yakın olan 1 mm değerinde tutulmasının ideal olduğu kanaatine varılmıştır.
- 1.2mm nozul çapında yapılan deneylerde lif sıraları arasındaki genişliğin 1 ile 1.25 mm arasında tutulması gerektiği anlaşılmıştır.



7. GELECEK ÇALIŞMALAR

- UV ışık kaynaklarının nozulun çevresine çok adetli olarak konumlandırılıp her yönde homojen ışık güç yoğunluğu elde edilmelidir.
- Uygun şekil ve büyüklükte numuneler elde edilip, numuneler Çekme, Basma, Eğme gibi mekanik testlere tabi tutulmalıdır.
- Parçalarda boyutsal doğruluk irdelenip, fotopolimer reçinenin farklı ışık şiddetlerinde ve fiber kütle oranlarında yaşanan kürlenme esnasındaki çekme miktarı incelenmelidir.
- Katmanlı imalat ile birlikte latis yapılı geometrilerde oluşturacak şekilde katmanlı imalat mantığından farklı, şekle bağlı bir ekleme stratejisi geliştirilmelidir.
- Gerek yanyana, gerekse üst üste yapılan istifleme işlemlerinde fiber demetlerinin yığılma doğrultularına dik kesitlerinde incelenebilmesi için uygun numuneler üretilip mikroskop altında incelenmelidir. Bu şekilde daha gerçekçi istifleme stratejileri geliştirilebilir.

8. KAYNAKÇA

- Invernizzi, Marta, Gabriele Natale, Marinella Levi, Stefano Turri, ve Gianmarco Griffini. 2016. «UV-Assisted 3D Printing of Glass and Carbon Fiber-Reinforced Dual-Cure Polymer Composites.» *Materials* 583.
- Ahn, D, J-H Kweon , J Choi, ve S Lee. 2012. «Quantification of surface roughness of parts processed by laminated object manufacturing.» *Journal of Materials Processing Technology* 339-346.
- Ahn, D, J-H Kweon, S Kwon , J Song, ve S Lee. 2009. «Representation of surface roughness in fused deposition modeling.» *Journal of Material Process Technology* 593-600.
- Ahn, S-H, M Montero, D Odell, S Roundy, ve PK Wright. 2002. «Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS.» *Rapid Prototyping Journal* 248-257.
- Alpöz R, Ertuğrul F, Cogulu D, Topaloğlu Ak A, Tanoğlu M, Kaya E. 2008. «ects of Light Curing Method an Exposure Time on Mechanical Properties of Resin Based Dental Materials.» *europaen journal of dentistry* 37-42.
- Arkaz , H. 2016. «Elle Yatırma Yöntemi (Hand Lay up) ile Kompozit Malzeme Üretimi.» *Erciyes Üniversitesi*.
- Bai J, Goodridge RD, Hague RJM, Song M. 2013. «Improving the mechanical properties of laser-sintered polyamide 12 through incorporation of carbon.» *Polymer Engineering & Science* 1937-1946.
- Carneiro, O, A Silva, ve R Gomes. 2015. «Fused deposition modeling with polypropylene.» *Materials and Design* 768-776.
- Cheah C, Fuh J, Nee A, Lu L. 1999. «Mechanical characteristics of fiber-filled photopolymer used in stereolithography.» *Rapid Prototyping Journal* 112-119.
- Compton, BG, ve JA Lewis . 2014. «3D-printing of lightweight cellular composites.» *Advanced Materials*.
- Dinwiddie , RB, V Kunc, JM Lindal, B Post, RJ Smith, ve L Love. 2014. «Infrared imaging of the polymer 3D-printing process.» *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVI* 502-5012.

- Ermurat, Mehmet. 2009. «Lazerli Doğrudan Metal Parça İmalatı Sisteminin Geliştirilmesi.» *Lazerli Doğrudan Metal Parça İmalatı Sisteminin Geliştirilmesi*. Doktora Tezi.
- Fibre Glast Development Corporation. 2017. *Fibre Glast*. Mart. Erişildi: Mart 2017. http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center.
2017. *Frp Composites Pultrusion*. Erişildi: Mart 2017. <http://www.pultrusionindustry.org/pultrusion-101/>.
- Gu , DD, W Meiners , K Wissenbach, ve R Poprawe . 2012. «Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms.» *International Materials Reviews* 64.
- Guo , S-Z, F Gosselin , N Guerin , A-M Lanouette, M-C Heuzey, ve D Therriault . 2013. «Solvent-cast three-dimensional printing of multifunctional microsystems.» *Small* 4118-4122.
- Guo, N, ve MC Leu. 2013. «Additive manufacturing: technology, applications and.» *Front Mech Eng* 43.
- Gupta A, Ogale AA. 2002. «Dual curing of carbon fiber reinforced photoresins for rapid prototyping.» *Polymer Composites* 162-170.
- Hofmann , M. 2014. «3D printing gets a boost and opportunities with polymer materials.» *ACS Macro Letters* 382.
- Horn , T, ve OLA Harrysson . 2012. «Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications.» *Sci Progress* 255.
- Huang , SH, P Liu, A Mokasdar, ve L Hou. 2013. «Additive manufacturing and its societal impact: a literature review.» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 1191-1203.
- Hull. 1986. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.
- Ivanova, O, C Williams, ve T Campbell. 2013. «Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges.» *Rapid Prototyping Journal* 353-364.
- Jim H. Lee, Robert K. Prud'homme, İlhan A. Aksay. 2001. «e depth in photopolymerization: Experiments and theory.» *Journal of Materials Research* 3536-3544.
- Kalsoom , U, PN Nesteranko , ve B Paull . 2016. «Recent developments in 3D printable composite materials.» *RSC Advances* 71.

- Kara, Necmi. 2013. «HAVACILIKTA KATMANLI İMALAT TEKNOLOJİSİNİN KULLANIMI.» *Mühendis ve Makina* 70-75.
- Karalekas D, Antoniou K. 2004. «Composite rapid prototyping: overcoming the drawback of poor mechanical properties.» *Journal of Materials Processing Technology* 153-154.
- Karalekas, DE. 2003. «Study of the mechanical properties of nonwoven fibre mat reinforced photopolymers used in rapid prototyping.» *Material and Design* 665-670.
- Kim K, Zhu W, Qu X, Aaronson C, McCall WR, Chen S. 2014. «3D optical printing of piezoelectric nanoparticle-polymer composite materials.» *ACS Nano* 9799-9806.
- Klosterman , D, R Chartoff , M Agarwala, I Fiscus , J Murphy , ve S Cullen . 1999. «Direct Fabrication of Polymer Composite Structures with Cuwed LOM.» *Rapid Prototype Development Laboratory* 401-410.
- Klosterman D, Chartoff R, Graves G, Osborne N, Priore B. 1998. «Interfacial characteristics of composites fabricated by laminated object manufacturing.» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 65-74.
- Kroll, E, ve D Artzi . 2011. «Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models.» *Rapid Prototyping journal* 393-402.
- Kumar, S, ve J-P Kruth . 2010. «Composites by rapid prototyping technology.» *Materials and Design* 6.
- Li, N, Y Li, ve S Liu. 2016. «Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing.» *Journal of Materials Processing Technology* 218-225.
- Llewellyn Jones , TM, BW Drinkwater , ve RS Trask . 2016. «3D printed components with ultrasonically arranged microscale structure.» *Smart Materials and Structures*.
- Lü L, Fuh JYH, Wong YS. 2001. «Improvements of Mechanical Properties by Reinforcements.» *Laser-Induced Materials and Processes for Rapid Prototyping* 67-68.
- Mahindru , D, S Priyanka Mahendru, ve T Ganj. 2013. «Review of rapid prototyping technology for the future.» *Global Journal of Computer Science and Technology* 13.

- Matsuzaki , R, M Ueda, M Namiki, T-K Jeong, H Asahara, ve K Horiguchi . 2016. «Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation.» *Scientific Reports* 23058.
- Melenka, GW, BK Cheung, JS Schofield, MR Dawson , ve JP Carey. 2016. «Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures.» *Composite Structures* 866-875.
- Mori, K-I, T Maeno, ve Y Nakagawa. 2014. «Dieless forming of carbon fibre reinforced plastic parts using 3D printer.» *Procedia Engineering* 595-600.
- Murphy , SV, ve A Atala. 2014. «3D bioprinting of tissues and organs.» *Nature biotechnology* 773-785.
- Namiki, M, M Ueda, A Todoroki, Hirano Y, ve R Matsuzaki. 2014. «3D printing of continuous fiber reinforced plastic.» *Advancement of Material and Process Engineering*.
- Nas, E, H Gökkaya , ve G Sur . 2013. «çak Presleme Yöntemi Kullanılarak Kompozit Malzemelerin Üretilebilirliği Üzerine Bir Değerlendirme.» *Karaelmas Science and Engineering Journal*.
- Nattapon Chantarapanich, Puttisak Puttawibul, Kriskrai Sitthiseripratip ,Sedthawatt Sucharitpwatskul, Surapon Chantaweroad. 2013. «Study of the mechanical properties of photo-cured epoxy resin fabricated by stereolithography process.» *Songklanakarin J. Sci. Technol* 91-98.
- Ning , F, W Cong, J Qui , J Wei , ve S Wang . 2015. «Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling.» *Composites Part B: Engineering* 369-378.
- Parandoush P, Tucker L, Zhou C, Lin D. 2017. «Laser assisted additive manufacturing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites.» *Materials and Design* 186-195.
- Parandoush, Pedram , ve Dong Lin. 2017. «A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites.» *Composite Structures* 36-53.
- Postiglione, G, G Natale, G Griffini, M Levi , ve S Turri . 2015. «Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites

- via liquid deposition modeling.» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 110-114.
- Pur Csm Spray Technology. 2017. *Hennecke GmbH*. Mart. <http://www.hennecke.com>.
2017. *Resin Infusion*. Mart. http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/FibreGlast_Vacuum_infusion_process.pdf.
- Salmoria GV, Paggi RA, Lago A, Beal VE. 2011. «Microstructural and mechanical characterization of PA12/MWCNTs nanocomposite manufactured by selective laser sintering.» *Polymer Testing* 611-615.
- Sandoval JH, Wicker RB. 2006. «Functionalizing stereolithography resins: effects of dispersed multi-walled carbon nanotubes on physical properties.» *Rapid Prototyping Journal* 292-303.
- Shahzad , K, J Deckers, Z Zhang, J-P Kruth , ve J Vleugels. 2014. «Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering.» *Journal of the European Ceramic Society* 81-89.
- Shofner , ML, FJ Rodriguez Macías , ve R Vaidyanathan. 2003. «Single wall nanotube and vapor grown carbon fiber reinforced polymers processed by extrusion freeform fabrication.» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 1207-1217.
- Shofner ML, Lozano K, Rodríguez-Macías FJ, Barrera EV. 2003. «Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling.» *Journal of Applied Polymer Science* 3081-3090.
- Short, DB. 2015. «Use of 3D printing by museums: educational exhibits, artifact education, and artifact restoration.» *3D Printing and Additive Manufacturing* 209.
- Song , Y-A, ve W Koenig. 1997. «Experimental study of the basic process mechanism for direct selective laser sintering of low-melting metallic powder.» (CIRP Ann – Manuf Technol) 46.
- Sun , Q, G Rizvi , C Bellehumeur, ve P Gu. 2008. «Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments.» *Rapid Prototyping Journal* 72-80.
- Şahin, Yusuf. 2015. *Kompozit Malzemelere Giriş*. Seçkin Yayıncılık.

- Tekinalp, HL, V Kunc , GM Velez-Garcia , CE Duty, LJ Love, ve AK Naskar. 2014. «Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing.» *Composite Science Tecnology* 144-150.
- Tian , X, T Liu, C Yang, Wang Q, ve D Li. 2016. «Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites.» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 198-205.
- Turner , BN, R Strong , ve SA Gold. 2014. «A review of melt extrusion additive manufacturing processes I. Process design and modeling.» *Rapid Prototyping Journal* 192-204.
- Van Der Klift, F, Y Koga, A Todoroki , M Ueda , Y Hirano, ve R Matsuzaki. 2015. «3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic (CFRTP) tensile test specimens.» *Open Journal of Composite Materials* 18.
- Wang, Xin , Man Jiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou, ve David Hui. 2017. «3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective.» *Composite Part B* 442-458.
- Wong , KV, ve A Hernandez . 2012. «A review of additive manufacturing.» *ISRN Mech Eng* 10.
- Wong, K, ve A Hernandez. 2012. «A review of additive manufacturing.» *ISRN Mechanical Engineering* 10.
- Yan C, Hao L, Xu L, Shi Y. 2011. «Preparation, characterisation and processing of carbon fibre/polyamide-12 composites for selective laser sintering.» *Composites Science and Technology* 1834-1841.
- Yu, T, J Ren, S Li, H Yuan , ve Y Li. 2010. «Effect of fiber surface-treatments on the.» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 499-505.
- Yuan S, Bai J, Chua C, Wei J, Zhou K. 2016. «Material evaluation and process optimization of CNT-coated polymer powders for selective laser sintering.» *Polymers* 370.
- Zak G, Chan A, Park C, Benhabib B. 1996. «Viscosity analysis of photopolymer and glass-fibre composites for rapid layered manufacturing.» *Rapid Prototyping Journal* 16-23.
- Zhong , W, F Li, Z Zhang , Song L, ve Z Li. 2001. «Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling.» *Material Science and Engineering* 125-130.



ÖZGEÇMİŞ



Muhammed Enes GEBEL

Adres | Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Avşar Yerleşkesi, 46100 Onikişubat/Kahramanmaraş

E-posta | menesgebel@gmail.com

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Tarihi : 1992

Doğum Yeri : Merkez/ Kahramanmaraş

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans

2010 - 2015 Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği

2011 - 2015 Kocaeli Büyükşehir Belediyesi Konservatuvarı (Kanun)

Yüksek Lisans

2015 - 2016 Kocaeli Üniversitesi FBE Makine Mühendisliği (Yüksek Lisans)

2016 - 2018 Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği ABD (Yüksek Lisans)

BİLGİSAYAR BİLGİSİ

- SOLİDWORKS
- AUTOCAD
- ANSYS
- CURA
- David
- MATLAB
- GCODES (for 3d printing)

AKADEMİK ÇALIŞMALAR

Projeler

- 2017/2-25 YLS 3D Yazıcı ile Kompozit Parça Üretimi Yönteminin Geliştirilmesi, **Araştırmacı** (KSÜ Bap Projesi) (YL Tez Konusu)
- 2016/5-73 M Yeni Nesil Elektrikli Aracın Mekanik Tasarımı ve İmalatı, **Araştırmacı** (KSÜ Bap Projesi)
- 2017/7-195 A Kompozit Bileşenli Elektrikli Aracın Mekanik Tasarım ve İmalatı **Araştırmacı** (KSÜ Bap Projesi)

“TÜBİTAK Elektromobil yarışmalarına Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi bünyesinde Makine Mühendisliği ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği işbirliği ile tasarlanıp üretilen “Uğur Böceği” elektrikli aracın tasarım ve üretiminde aktif olarak görev almış ve 2017 de yapılan yarışlarda “Uğur Böceği” başvuran 70 takım arasından 15. Olmuştur.

YAYINLAR

Uluslararası Bildiriler

- **Gebel M.E.**, Ermurat M, Korkmaz S, “3 Boyutlu Yazıcılarda Kompozit Parça İmalatı İçin Fotopolimer Reçine İle Kompozit Lif Üretimi” 3rd International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies and Digital Industry 2018, 19-21 April 2018, ANTALYA
- Korkmaz S, **Gebel M.E.**, Ermurat M, “Bazı Otomotiv Ön Düzen Parçalarının Kompozit Malzemeden Üretilmesi için Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi”, 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC’18), March 22-24, 2018 Karabük, Turkey
- **Gebel M.E.**, Salih Önalı, Korkmaz S, Osmanoğlu S, Özçelik B, Ermurat M, İmal M, “Bir Elektrikli Aracın Aerodinamik Özelliklerinin Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi” 9th International Automotive Technologies Congress 7-8 May 2018 Bursa Turkey
- Özçelik B, Osmanoğlu S, Korkmaz S, **Gebel M.E.**, Büyükbesnili M, Fırtına B, Ermurat M, İmal M. “Design, Analysis And Manufacturing Of Space Frame Chassis For An Electrical Vehicle” 9th International Automotive Technologies Congress 7-8 May 2018 Bursa Turkey

KURS BİLGİLERİ ve SERTİFİKALAR

a. SOLIDWORKS 2012 (72 saat) Yıl:2013

Alınan Yer: Kocaeli Ahmet Elginkan Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi (MEB onaylı)

b. Hidrolik-Pnömatik (64 saat) Yıl:2013

Alınan Yer:Kocaeli Ahmet Elginkan Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi (MEB onaylı)

SEMİNERLER, FUARLAR VE TEKNİK GEZİLER

- 2013-Tüyap (PLASTEURASIA) Fuarı
- 3. Köprü
- Körfez Geçiş Köprüsü
- Marmaray - Avrasya Tüneli

İŞ DENEYİMİ

- TÜPRAŞ (İmalat stajı)
- İZAYDAŞ (Organizasyon stajı)
- ATIK ÇEVRE TEKNOLOJİLERİ A.Ş
- KSÜ Makine Mühendisliği- Araştırma Görevlisi

HOBİLERİ

- Klasik Türk Müziği (Kanun)
- Spor (Basketbol)
- Gezi

Yurtdışı Seyahatleri

- Mısır
- Arabistan
- İtalya
- Filistin
- Amerika