



Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing

Muhammed Enes Gebel¹, Mehmet Ermurat*²

Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Engineering and Architecture Faculty, Mechanical Engineering, 46050, Kahramanmaraş Turkey

Highlights:

- Polymer matrix continuous fiber reinforced composite additive manufacturing
- Nozzle design for photocurable material based composite additive manufacturing
- Carbon and glass fiber reinforced composite 3 dimensional printer

Keywords:

- Additive Manufacturing
- Composite additive manufacturing
- Carbon fiber
- Glass Fiber
- Continuous fiber reinforcement

Graphical/Tabular Abstract

SEM images show cross sections of photocurable polymer matrix composite fibers fabricated with carbon fiber (Figure (i)) and glass fiber (Figure (ii)) as reinforcing material.

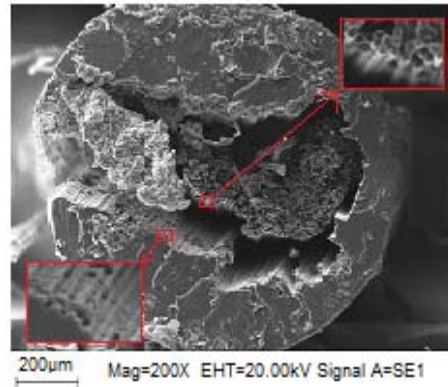


Figure (i) SEM image of Carbon Fiber Composite

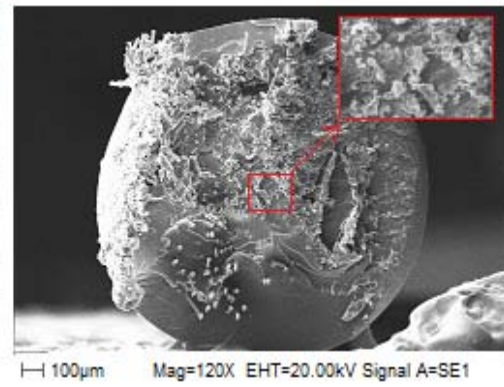


Figure (ii) SEM image of Glass Fiber Composite

Article Info:

Research Article
Received: 19.08.2019
Accepted: 19.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.606618

Acknowledgement:

This work was supported by grants from Kahramanmaraş Sütçü Imam University Scientific Research Projects, Project No: 2017/2-25 YLS

Correspondence:

Author: Mehmet Ermurat
e-mail:ermurat@ksu.edu.tr
phone: +90 344 300 1698

Purpose: It is aimed to develop a 3D printer that can produce composite parts using continuous fiber as reinforcing. Aimed reinforcing materials are glass fiber and carbon fiber in a continuous form and matrix material is photocurable epoxy resin in liquid form.

Theory and Methods:

First step of this study is to design and manufacture a composite fiber printing nozzle. Designed nozzle has the ability to perform some tasks that can feed the continuous fiber by wetting with liquid photocurable epoxy resin and then can cure epoxy resin by UV light. Second step of the study, is to do some experiments to form successful composite fibers building on a platform using 3D printer coupled with composite fiber printing nozzle. In the last stage of the study, the curing ability of the produced samples was examined. Variable parameters were reinforcing material type, nozzle tip diameter and UV light power. Examination methods were curing ability by observing with SEM microscopy and curing ratio calculation by measuring the weight of the samples.

Results:

For the carbon fiber experiments; liquid photopolymer surrounding the fibers on the outer fiber bundle was cured successfully, but the liquid photopolymer surrounding inside fibers of the fiber bundle could not be cured due to the UV light shading by the outer fibers due to opacity as in shown in Figure A. For the glass fiber experiments; any shadowing effect was not happened due to transparency of the glass fibers. Whole liquid photopolymer material surrounding fibers was cured successfully as shown in Figure B.

Conclusion:

It was found that carbon fiber has limitations about curing of inner part of resin due to its opacity. In contrast, glass fiber was found to be suitable for the process. Because of its transparency glass fiber allow resin curing throughout the fiber even inner part of fiber bundle. The designed nozzle was confirmed by examining the resin and fiber behavior. As the nozzle diameter decreases, the amount of resin decreases, which increases the proportion of fiber in the total mass. However, resin flow is getting increase as the nozzle diameter increases, that adversely affects the process. Because of this situation, the proportion of fiber in the total mass decreases.



Kompozit eklemeli imalat için polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parça üretilebilirliğinin araştırılması

Muhammed Enes Gebel^{ID}, Mehmet Ermurat*^{ID}

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Avşar Yerleşkesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 46040, Onikişubat, Kahramanmaraş, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit eklemeli imalat
- Işıklı kürlenmiş malzeme bazlı kompozit eklemeli imalat için nozul tasarımı
- Karbon ve cam fiber takviyeli kompozit 3 boyutlu yazıcı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 19.08.2019
Kabul: 19.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.606618

Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat,
kompozit eklemeli imalat,
karbon fiber,
cam fiber,
sürekli fiber takviye

ÖZET

Polimer esash eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için, polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit eklemeli imalat üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda önemli bir artış göstermektedir. Bu çalışmada, kompozit eklemeli imalat yöntemi için polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parçaların üretilebilirliği araştırılmıştır. Bu maksatla matris malzemesi olarak UV ışıkla kürlenebilen epoksi reçine, takviye malzemesi olarak da sürekli cam/karbon fiber demetleri kullanılarak kompozit fiber üretilebilen bir sistem geliştirilmiştir. Fiber demeti ve sıvı formda olan ve ışıkla kürlenebilen epoksi reçine bir nozul içerisinden beslenmekte, nozul üzerine monte edilen eş eksensli bir UV ışık kaynağı ile nozuldan çıkan fotopolimerin kürlenmesi sağlanmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda genel olarak matris malzemesinin takviye malzeme demetini tamamıyla kuşattığı, matris malzemesinin UV ışık kaynağı ile kürlenme işleminin sağlandığı ve böylece nozul ekseni doğrultusunda kompozit fiber üretiminin gerçekleştirilebildiği görülmüştür. Opaklığından dolayı karbon fiber takviyeli numunelerde demetin dış kısımdaki fiberlerin demetin iç kısmında bulunan sıvı fotopolimerin kürlenmesi için gerekli UV ışığını gölgelemiş ve kürlenme işlemi başarısız sonuçlanmıştır. Ancak, bu gölgeleme problemi, cam fiber takviyeli numunelerde gözlenmemiştir. Böylece, polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parçaların eklemeli imalat yöntemi ile üretilmesi bakımından cam fiber takviye malzemesinin karbon fiber malzemesine nazaran daha uygun olduğu ortaya konmuştur.

Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing

H I G H L I G H T S

- Polymer matrix continuous fiber reinforced composite additive manufacturing
- Nozzle design for photocurable material based composite additive manufacturing
- Carbon and glass fiber reinforced composite 3 dimensional printer

Article Info

Research Article
Received: 19.08.2019
Accepted: 19.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.606618

Keywords:

Additive manufacturing,
composite additive
manufacturing,
carbon fiber, glass fiber,
continuous fiber
reinforcement

ABSTRACT

Studies on polymer matrix continuous fiber reinforced composite additive manufacturing have shown a significant increase in recent years to improve the mechanical properties of parts produced by polymer-based additive manufacturing methods. In this study, producibility of polymer matrix continuous fiber reinforced composite parts was investigated for the composite additive manufacturing method. For this purpose, a system that can produce composite fiber using UV light curing epoxy resin as matrix material and continuous glass/carbon fiber bundles as reinforcement material has been developed. Photocurable epoxy resin in liquid form and fiber bundle are fed through a nozzle, the photopolymer is cured in the exit of nozzle with a coaxial UV light source that mounted on the head. As a result of the experiments, it has been observed that the matrix material completely encompasses the reinforcement material bundle, the curing process of the matrix material with the UV light source is provided and thus, composite fiber production can be carried out in the direction of the nozzle axis. Because of the opacity, carbon fibers block UV light, so the photopolymer resin at the inner section of the fiber bundle cannot be cured, so carbon fiber reinforced composite fiber production has failed. However, this shading problem was not observed with glass fiber reinforced samples. Thus, it has been demonstrated that glass fiber reinforcement material is more suitable than carbon fiber material in terms of producing polymer matrix continuous fiber reinforced composite parts by additive manufacturing method.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ermurat@ksu.edu.tr / Tel: +90 344 300 1698

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat prosesi fiziksel parçaların geleneksel imalat yöntemleri kullanılmadan 3 boyutlu CAD model verisi kullanılarak malzemelerin birbiri üzerine eklenmesiyle üretilmesi işlemidir.

Fiziksel parçaların hızlı ve otomatik bir şekilde üretilmesine olanak tanıyan eklemeli imalat, günümüzde daha çok kavramsal ürün tasarım denemeleri, hızlı prototipleme sistemleri, fonksiyon ve uyum uygulamaları, master modeller ve son olarak hızlı imalat olanaklarıyla kullanılmaktadır [1]. Bu nedenle günümüzde eklemeli imalat teknolojileri birçok farklı mühendislik alanında (mekanik, biyomedikal, havacılık, elektronik ve daha fazlası) yaygın olarak kullanılmaktadır.

Uzun zamandır yapılan çalışmalarda eklemeli imalat teknolojisi tek tür malzemenin kullanımına dayanmaktaydı. Fakat günümüzde eklemeli imalat teknolojisinin avantajları sebebiyle kompozit malzemelerin eklemeli imalatı üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu nedenle polimer, toz, fiber ve seramik gibi farklı malzemelerin kombinasyonlarının diğer imalat yöntemlerinde kompozit malzemelere yönelimlerin olduğu gibi bu teknikte kullanımı da hızla artmaktadır [2-5]. Eklemeli imalat yönteminde polimerler, özellikle üretim ve elde edilebilirlik kolaylığı açısından çalışmaların odağı haline gelmiştir. Eklemeli imalat endüstrisinde termoplastik polimerler eğitilip katılaştırılmasıyla, termoset malzemeler ise katalizör veya ışıkla kürlenmesiyle kullanılmaktadır [6, 7]. Plastik bazlı malzemelerin kullanıldığı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçaların sahip olduğu zayıf mekanik özellikleri iyileştirmek için fiber veya parçacıkla güçlendirme çalışmaları gerçekleştirilmektedir [8]. Ayrıca karbon, kompozit malzemelerde elektrik iletkenliğini sağlamak için de kullanılmaktadır [9]. Polimerlerin fiber takviyeler ile kombinasyonu eklemeli imalat teknolojisinde farklı mekanik özelliklere sahip parça imalatı açısından büyük imkânlar sunmaktadır.

Eriyik yığıma modellemesi (Fused Deposition Modeling) (FDM) prosesi termoplastik bir malzemenin eğitilerek yığılmasıyla katman oluşturulması ve katmanların üst üste dizilmesiyle istenilen fiziksel parçanın oluşturulması prensibine dayanır. FDM prosesinde bir filament malzeme eğitilerek beslenmektedir. Bu filament malzemesi türüne göre tek tip polimer olarak (ABS, PLA vb.) veya karbon parçacık katkılı filamentler olabilmektedir. FDM prosesinde ABS polimeri içerisine cam fiber parçacıkların [10] ve karbon fiber parçacıkların [11] eklenmesi ile çekme gerilmesini iyileştirme üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Sürekli fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerle eklemeli imalat ile kompozit parça üretimi üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır [3, 12, 13]. Takviye malzemesinin sürekli formda olması kesintili parçacıklı ve karışık yönlü olmasına karşı mekanik özellik bakımından avantajlar getirirken [14], eklemeli imalat yöntemi ile üretilmesi bakımından çeşitli zorluklar barındırmaktadır [15]. Daha önce yapılan çalışmalarda termoplastik polimer

olan (PLA, ABS vb.) sürekli karbon fiber ile güçlendirilmiş kompozit eklemeli imalat işlemi başarılı şekilde uygulanmıştır. Sürekli karbon fiber kullanılarak UV ışıkla kürlenme yönteminde de bazı çalışmalar yapılmaktadır [16]. Ancak bu yöntemde takviye elemanı olan karbon fiberin UV ışığını gölgelemesi sorun teşkil etmektedir. Bundan dolayı karbon fiber tarafından bloke edilen UV ışığı karbon fiber demetinin iç kısmına nüfuz eden reçine bölgelerini sertleştirememektedir. Bu nedenle de heterojen bir yapı oluşmaktadır. Lü vd. [17] bu durumu engellemek için karbon fiber yerine cam fiber kullanmanın sürekli fiber demetinin iç kısmına nüfuz eden reçine bölgelerini kürlenmek için yararlı olabileceğini önermişlerdir.

Gupta vd. [18] ise sürekli karbon fiberlerin takviye, ışıkla kürlenilen reçinenin matris olduğu eklemeli imalat uygulamalarında yaşanan blokenin engellenmesi için UV ışığın yanı sıra sıcaklığın da kullanılmasını önermişlerdir. Çift polimerizasyonun kullanıldığı bir başka çalışmayı da Invernizzi vd. [19] gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada da hem cam ve hem de karbon fiber takviyeli kompozit eklemeli imalatı için matris vazifesi görececek olan reçinenin hem UV ışık hem de sıcaklık etkisi ile kürlenebilen özel bir formülasyonunu kullanmışlardır.

Alpöz vd. yaptıkları çalışmada ışıkla kürlenme metodunun ve ışığın nüfuziyet süresinin reçine tabanlı dışçılık 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. tip Tetric Ceram, 2. tip Compoglass, 3. tip Fuji II LC) üzerinde LED ve halojen ışık kaynağı ile farklı nüfuziyet zamanları (20s ve 40s) kullanılarak reçinelerin küreledikten sonra Vickers sertlik değeri ve basma dayanımı ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda 1. tip reçine 40s LED ile 40s halojen ışık kaynağı ile küreyip önemli bir basma dayanımı gözlemlenmemiştir. Ancak LED ışık kaynağı ile 20s küreldiğinde 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 [20].

Chantarapanich vd. [21] 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, ortam ışığının kürlenme etkisini gidermek amacıyla karanlık ortamda yapılmıştır. Deneyde kullanılan sabit değerler olarak katman kalınlığı 0,175 mm, lazer tarama hızı 3200 mm/sa, lazer spot genişliği 0,08 mm, lazer tarama metodu olarak çapraz tarama 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 son kütleme işlemi 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. Son kütleme 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 son kütleme uygulanmış numunede çıkmıştır. Son kütleme uygulanmayan numunede ise en düşük çekme dayanımı değeri tespit edilmiştir.

Lee vd. [22] yaptıkları çalışmada fotopolimerin kürlenme derinliğini deneysel ve teorik olarak belirlemeye çalışmışlardır. Stereolitografi yönteminde fotopolimer reçinenin kürlenme derinliğinin katman kalınlığını belirlediğini, aynı zamanda kürlenme derinliği ve ışık şiddeti arasında ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Deneylerinde fotopolimer reçine ve 325nm dalga boyunda, spot genişliği olarak 250 μ m 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 dozajı arttıkça kürlenme derinliğinin katlanarak arttığını belirtmişlerdir.

Matris malzemesi olarak ışıkla kürlenmiş polimerlerin kullanıldığı ve kürlenme davranışının hem geometrik hem de mekanik olarak değerlendirildiği çalışmalarda [20-22], kullanılan ışığın şiddetinin, ışığın dalga boyunun, ışığın maruziyet süresinin ve enerji seviyesinin matris mukavemetine önemli oranda etkisinin olduğu ortaya konulmuştur. Diğer yandan, sürekli fiber ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için kullanılan genel denklem, Eş. 1'de gösterilmektedir [23].

$$\sigma_c(u) = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (1)$$

Bu denklemde $\sigma_c(u)$ kompozit malzemenin gerilme dayanımını, σ_m ve σ_f sırasıyla matris ve takviye malzemesinin çekme dayanımını, V_m ve V_f ise sırasıyla matris ve takviye malzemesinin hacim oranını temsil

etmektedir. Buna göre kompozit bir malzemenin mukavemetinde takviye malzemesinin kullanım oranının yani fiber kütle oranının yüksek olmasının önemli karakteristik bir özellik olduğu anlaşılmaktadır.

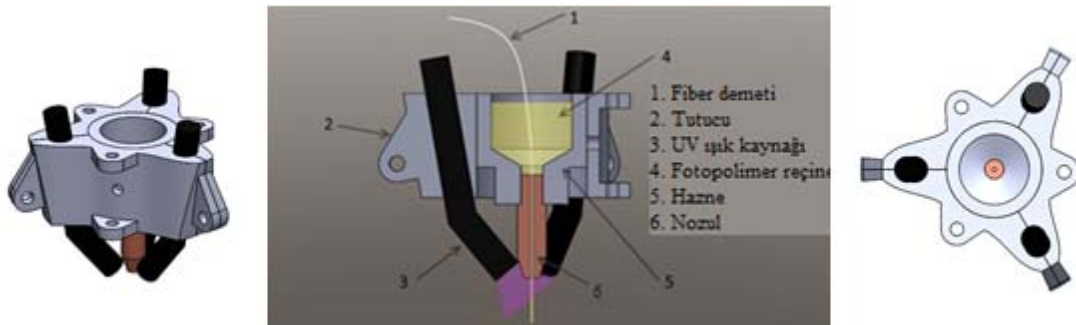
Kompozit malzemelerde takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki yapışmama sorunu zayıf ara yüz bağı oluşmasına neden olmaktadır. Bu zayıf ara yüz bağı takviye malzemesinde daha düşük kuvvetlerde bile kırılmalara neden olmakta ve bu da elde edilen kompozit malzemenin mukavemetini olumsuz etkilemektedir [24]. Diğer kompozit üretim yöntemlerinde olduğu gibi eklemeli imalat yöntemi ile kompozit parça üretim tekniklerinde de yapışma kabiliyeti önemli yer tutmaktadır.

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak UV ışıkla kürlenebilen epoksi reçine, takviye malzemesi olarak da sürekli cam/karbon fiber demetleri kullanılarak kompozit fiber üretilen bir sistem geliştirilmiştir. Fiber demeti ve sıvı formda olan epoksi reçine bir nozul içerisinden beslenmekte, nozul üzerine monte edilen eş eksenli bir UV ışık kaynağı ile nozuldan çıkan fotopolimerin kürlenmesi sağlanmaktadır. Geliştirilen deney seti ile bu çalışmada, kompozit eklemeli imalat yöntemi için polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit fiber parçaların üretilirliği araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Sistemin Genel Tanıtımı (General Information About Test System)

Deney seti olarak kullanılan sistem 3 eksen hareket kabiliyetine sahip bir CNC üzerine kompozit fiber üretim modülünün geliştirilip üretilerek monte edilmesi ile elde edilmiştir. Özgün olarak tasarlanan ve Şekil 1'de gösterilen, kafa olarak da adlandırılan kompozit fiber üretim modülü çeşitli kısımlardan oluşmaktadır. Sürekli forma sahip takviye fiber demeti nozul içerisinden sabit bir hızda beslenebilmekte, bu işlem esnasında nozul üzerinde konumlandırılmış sıvı fotopolimer ile dolu bir hazne içerisinden geçirilmektedir. Takviye fiber demetinin nozul içerisinden beslenmesi, fiber demetinin kafanın alt bölgesinde bulunan platform üzerine önceden tutturulması ve platformun nozul eksenli boyunca (Z eksenli boyunca nozuldan uzaklaştırılması ile) hareket ettirilmesiyle



Şekil 1. Kafa tasarımı (Head Design)

gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde nozuldan çıkan fiber demeti üzerinde belirli miktarda sıvı polimer tutundurulmaktadır. Kafa üzerine konumlandırılan ve nozuldan çıkan fiber demeti üzerine çepeçevre odaklanan UV ışık kaynakları yardımıyla fiber demeti üzerine tutunan fotopolimer malzemenin kürlenmesi gerçekleştirilmektedir.

Numune üretimi fiber demetinin sadece nozul ekseninde boyunca beslenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni nozul çevresinde sadece 3 adet UV ışık kaynağı kullanılmasıdır. Işık kaynakları arasında 120°'lik açı olduğundan dolayı yatay yönlerdeki farklı doğrultularda numuneler UV ışık kaynaklarının farklı tesir bölgelerine maruz kalmaktadır. Bu durumda yönden bağımsız bir kürlenme davranışı elde edilemediğinden dolayı numune üretimi için yatay yönler tercih edilmemiştir.

2.2. Deneysel Parametreleri (Experiment Parameters)

Çalışmalarda kullanılan fotopolimer reçinenin yoğunluğu 1,1g/cm³, reaksiyon enerjisi 423 mJ/cm², çekme dayanımı 62,7MPa'dır. Kullanılan UV led ışık kaynakları 420-480nm dalga boyuna sahiptir ve voltaj ayarlaması yapılarak ışık şiddeti farklılaştırılmıştır. Fiber üretim hızı (Z eksen hızı) 5 mm/sn olarak sabit tutulmuştur. Karbon fiber demeti 1K, cam fiber demeti 300 tex özelliklerinde seçilmiştir. Şekil 2'de karbon fiber ve cam fiber demetlerinin SEM görüntüleri verilmektedir.

Takviye malzemesi olarak opak olan karbon ve şeffaf olan cam fiber demetlerinin kullanılması ile bu malzemelerin ışığı absorbe etmesi/geçirmesi neticesindeki kürlenme davranışı incelenmiştir. Farklı delik çaplarına sahip nozulların kullanılması ile oluşan fiber kütle oranı ve ışık kaynaklarının güç yoğunluklarının farklı şiddette uygulanmasıyla ise ışık

etkisi ile kürlenme kabiliyeti incelenmiştir. Hedeflenen bu inceleme konularına göre, karbon ve cam fiber takviye malzemeleri için ayrı ayrı yapılan deneylerin değişken parametreleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

2.3. Numunelerin Üretimi ve İncelenmesi (Producing and Investigating of Samples)

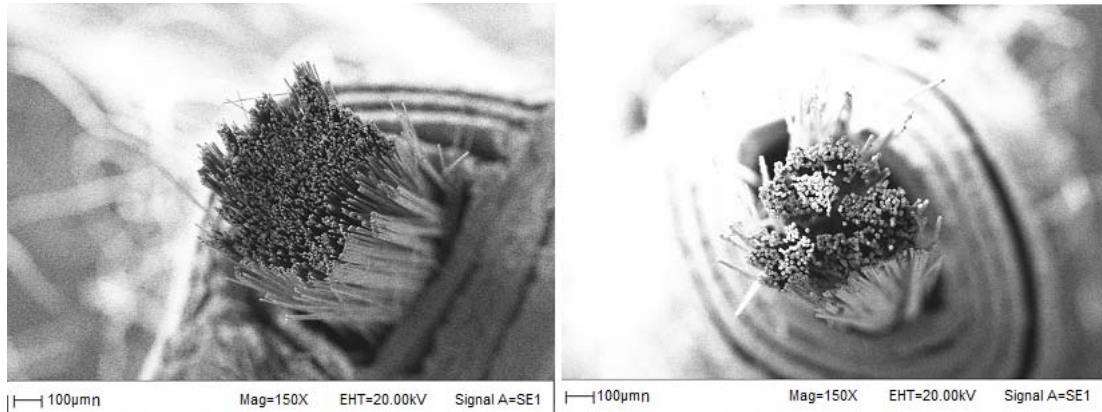
Numuneler her iki takviye malzemesi için ayrı ayrı olmak üzere tam faktöriyel tasarıma göre 9'ar adet deney yapılarak üretilmiştir. Karbon fiberle yapılan deneyler 3'er kez, cam fiber ile yapılan deneyler 2'ser kez gerçekleştirilmiş, sonuçlar ortalama olarak verilmiştir. Deney esnasında alınan görüntüler Şekil 3'de görülmektedir.

Her biri 15cm boyunda üretilen numuneler uç kısımlarından kesilerek her biri 14cm uzunluğuna getirilmiş ve hassas terazide tartılarak toplam kütle değerleri bulunmuştur. Aynı şekilde her iki fiber demeti de hassas terazi ile tartılarak takviye malzemesi kütle değerleri bulunmuştur. Bu veriler kullanılarak fiber kütle oranı değerleri hesaplanmıştır. Cam veya karbon fiber demeti kütlelerinin kürlenme neticesinde elde edilen kompozit fiberin toplam kütlelerine oranı 'fiber kütle oranı' olarak adlandırılmıştır. Fiber kütle oranı Eş. 2 ile elde edilmiştir.

$$R_m = \frac{M_f}{M_t} \quad (2)$$

Burada R_m fiber kütle oranını, M_f takviye fiber kütlelerini, M_t toplam kütleli ifade etmektedir.

Nozuldan çıkarak karbon fiberler etrafında tutunan reçinenin ışıkla kür edilmesi esnasında, karbon fiberin opak olmasından dolayı özellikle iç bölgelerde olmak üzere ışığın



Şekil 2. Fiber demetlerinin SEM görüntüleri. Karbon fiber (solda) Cam fiber (sağda)
(SEM images of fiber bundles. Carbon fiber (left), Glass fiber (right))

Tablo 1. Karbon fiber ve Cam fiber takviyeli kompozit numuneler için Değişken Parametreler
(Variable Parameters for carbon fiber or fiber glass reinforcement composite samples)

Parametre	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Nozul çapı	1 mm	1,4 mm	1,8 mm
Işık Güç Yoğunluğu	1565 mW/cm ²	1050 mW/cm ²	465 mW/cm ²

ulaşmadığı kısımlardaki reçine kürlenmemektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi karbon fiberin kesit alanı cam fiberden fazladır. Bu durum sebebiyle karbon fiber demeti cidarına tutunan reçine miktarı cam fiber demetine nazaran daha az olmuş ve gölgelemenin de etkisiyle numune cidarlarında süreksiz kürlenmelere sebebiyet vermiştir. Bu durum Şekil 6a'da açıkça görülmektedir. Cidarda oluşan bu kısımlardaki sıvı olarak kalan süreksiz bölgelerden reçine emdirilerek uzaklaştırılmıştır.

Bu durumdan dolayı karbon fiber kompozit numuneleri, üretimden hemen sonra hassas terazi ile tartılarak ham ağırlık değerleri elde edilmiştir. Daha sonra aynı numuneler, üzerindeki kürlenmeyen epoksi reçinenin uzaklaştırılmasından sonra tekrar tartılmış ve böylece ikincil ağırlık değerleri elde edilmiştir. Eş. 3 kullanılarak kürlenme oranı değerleri hesaplanmıştır. Sadece karbon fiber numuneleri için hesaplanan kürlenme oranı, kürlenmiş reçine miktarının, toplam kullanılan reçine miktarına oranı ile elde edilmiştir.

$$R_c = \frac{R_t - R_u}{R_t} \times 100 \quad (3)$$

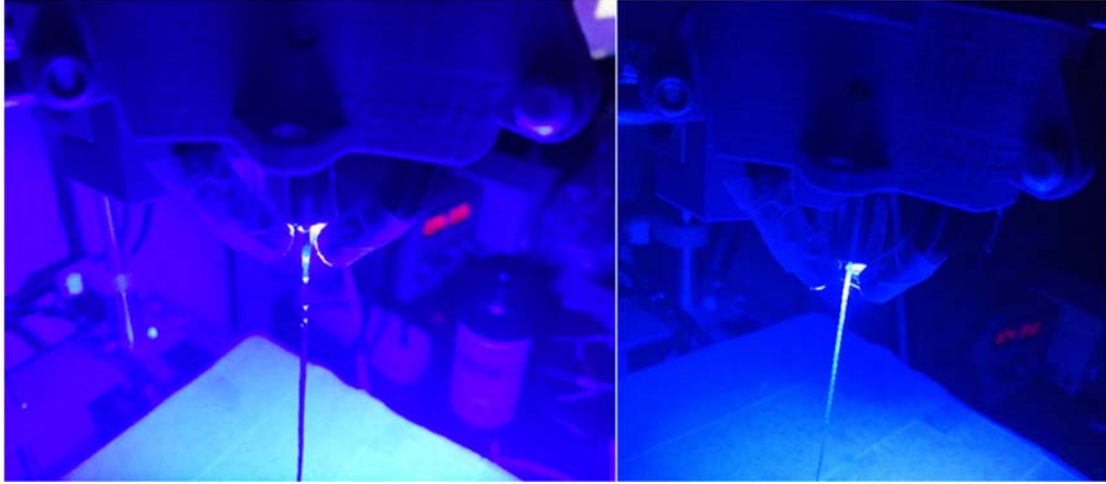
Burada R_c kürlenme oranını, R_u uzaklaştırılan reçine miktarını, R_t Toplam reçine miktarını belirtmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

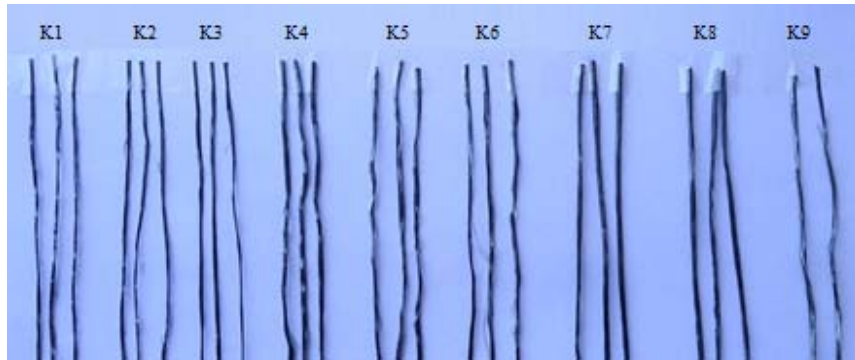
Karbon fiber ve cam fiberden elde edilen numuneler ayrı ayrı değerlendirmeye tabi tutulmuş, sonuçlar ayrı ayrı başlıklar altında verilerek irdelenmiştir. Sonuçlar ve tartışma kısmında numuneler fiber kütle oranları bakımından tartışılmıştır. Karbon fiber takviyeli numunelerde denenmiş tüm parametrelere rağmen tam kürlenme sağlanamadığı için kürlenme oranı ayrıca incelenmiş ve opaklığı sebebiyle metoda ait dezavantajı ortaya konmuştur. Cam fiber takviyeli numunelerde ışığın liflerin hem kesiti boyunca geçebilmesi ve hem de eksenini doğrultusunda yayılabilmesi sebebiyle karbon fiber takviyeli numunelere nazaran çok farklı davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Cam fiber numunelerinin hiç birinde kürlenme sorunuyla karşılaşılması sebebiyle cam fiber takviyeli numunelerde kürlenme oranı %100 olarak kabul edilmiş, sonuçlar kısmında tekrardan belirtilmemiştir.

3.1. Karbon Fiber Takviyeli Numuneler (Carbon Fiber Reinforced Samples)

Karbon fiber takviyeli kompozit numunelere ait bir fotoğraf Şekil 4'te gösterilmiştir. Karbon fiber takviyeli deneylerde fiber demetinin dış kısmında bulunan reçinenin ışıkla



Şekil 3. Karbon (solda) ve cam (sağda) fiber ile yapılan deneyler (Experiments with carbon(left) and glass (right) fiber)



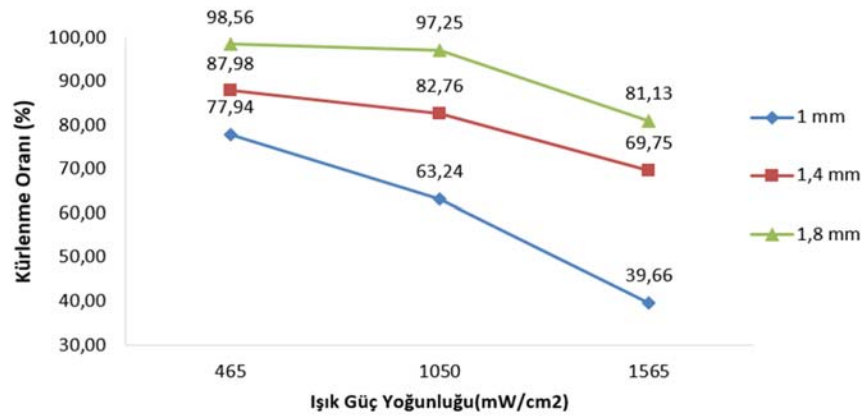
Şekil 4. Karbon fiber takviyeli kompozit fiber numuneleri (Carbon fiber reinforced composite fiber samples)

kürlenmesine karşın karbon fiberin opak oluşundan dolayı ışığı absorbe edip geçişine müsaade etmeyişi, prosesin tam anlamıyla tamamlanmasına engel olmaktadır. Karbon fiberle yapılan deney sonuçları Tablo 2’de gösterilmiştir. Numuneler öncelikle ham olarak, daha sonra da kürlenmeyen sıvı reçinenin uzaklaştırılması ile elde edilen ikincil hali ile tartılmış, ham ve ikincil durumu için fiber kütle oranı değerleri ayrı ayrı hesaplanarak tabloda gösterilmiştir. Karbon fiberle yapılan deneyler sonucunda nozul çapı arttıkça reçinenin takviyeye oranı artmış, bu durum gölgelenmeyen kısımlarda kürlenmiş reçine miktarının artmasından dolayı daha rijit numuneler elde edilmesine sebep olmuştur. 465mW/cm² ışık gücü yoğunluğu ile elde edilen numunelerde ışık gücü reçineyi kürlemekte yetersiz kalmış, cidarda oluşan ince bir katman dışında iç kısım kürlenmemiştir. 1 mm, 1,4 mm, 1,8 mm nozul çapına ait kürlenme oranları Şekil 5’te gösterilmiştir. Şekil 5’te ışık gücü yoğunluğunun artmasıyla UV ışığının daha iç kısımlara

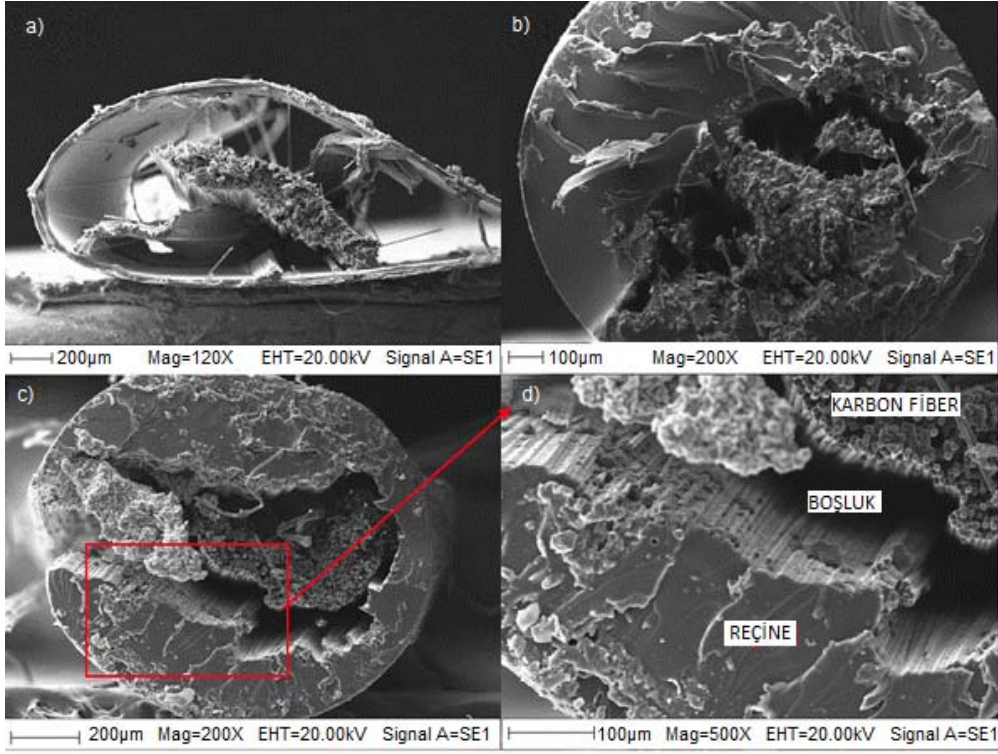
nüfuz ederek kürlenme oranının arttığı görülmektedir. Nozul çapının artmasının da kürlenme oranına pozitif katkı yaptığı görülmektedir. Bunun nedeni SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Şekil 6’de büyük nozul çapına sahip numunelerde fiber demetinin matrisin iç kısmında sınırlı bir alana toplanmış olduğu, bundan dolayı da fiber demetinin dış kısmında kalan ve gölgelemeye maruz kalmayan matris malzemesi miktarının fazla olduğu görülmektedir. Bu da büyük nozul çapına sahip numunelerdeki kürlenme oranının yüksek çıkmasını açıklamaktadır. Bundan dolayı 1,8 mm nozul çapıyla ve 1565mW/cm² ışık gücü yoğunluğu ile elde edilen numuneler, rijitliği en fazla olan numunelerdir. Fakat numuneler kesildiğinde fiberin içerisinde halen kürlenmeyen sıvı halde kalan reçinenin olduğu gözlemlenmiştir. Fiber etrafındaki reçine miktarının artması ve bu reçinenin kürlenerek duvar etkisi oluşturmasından dolayı kürlenmemiş olan reçine numuneden uzaklaştırılamamıştır. Bu sebeple Şekil 5’de 1,8 mm için gözlemlenen yüksek değerler

Tablo 2. Karbon fiberle yapılan deneylerden elde edilen veriler (Data obtained by experiments with carbon fiber composite)

Numune Nr.	Nozul Çapı (mm)	Işık Güç Yoğunluğu (mW/cm ²)	Ham/İkincil	Toplam (gr)	Fiber kütle oranı	Kürlenme Oranı (%)	Standart Sapma
K1	1	1565	Ham	0,073	0,382	77,94	0,02
			İkincil	0,063	0,442		0,027
K2	1	1050	Ham	0,073	0,382	63,24	0,02
			İkincil	0,057	0,494		0,038
K3		465	Ham	0,067	0,420	39,66	0,027
			İkincil	0,043	0,646		0,057
K4		1565	Ham	0,167	0,168	87,98	0,004
			İkincil	0,150	0,187		0,008
K5	1,4	1050	Ham	0,163	0,171	82,76	0,004
			İkincil	0,140	0,200		0,015
K6		465	Ham	0,150	0,187	69,95	0,008
			İkincil	0,113	0,247		0,008
K7		1565	Ham	0,260	0,108	98,56	0,007
			İkincil	0,257	0,109		0,001
K8	1,8	1050	Ham	0,270	0,104	97,25	0,002
			İkincil	0,263	0,106		0,006
K9		465	Ham	0,240	0,117	81,13	0,005
			İkincil	0,200	0,140		0,006



Şekil 5. Karbon Fiber numunelerinin kürlenme oranları (Curing rates graphics of Carbon Fiber samples)



Şekil 6. Karbon kompozit fiber numunelerine ait SEM görüntüleri (1565 mW/cm²) a)1 mm nozul, b)1,8 mm nozul c,d)1,4 mm nozul

(SEM images of carbon composite fiber samples a) 1 mm nozzle b) 1.8 mm nozzle c,d) 1.4 mm nozzle)

(özellikle 1565mW/cm² ve 1050mW/cm² ışık güç yoğunluğunda) kürlenme oranını tam olarak yansıtmamaktadır.

Şekil 6'da karbon fiber numunelerinden elde edilen SEM görüntüleri verilmektedir. Karbon fiber numunelerinde fiber-reçine arasında boşluklar olduğu gözlenmektedir. Bu boşluğun bir nedeni karbon fiberlerinin UV ışınlarını absorbe ederek iç kısımda ve arka kısımda kalan reçinenin kürlenmesini engellemesidir. Şekil 6a'dan anlaşıldığına göre, nozul çapının düşük olması fiber etrafındaki reçine miktarının az oluşmasına, dolayısıyla reçinenin ince bir cidar şeklinde oluşmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı 1 mm'lik nozul karbon kompozit fiber üretimi için çok yetersiz kalmaktadır. Büyük çapa sahip nozullarla elde edilen kompozit fiberlerde ise reçine miktarının fazla olmasından dolayı kürlenmiş reçine cidar kalınlığı fazla olmuştur. Dolayısıyla küçük çaplı nozul numunelerine göre daha rijit numuneler elde edilmiştir (Şekil 6). Numune üretimi sonucunda kürlenmeyip sıvı durumda kalan reçinenin uzaklaştırılması neticesinde boş olarak kalan hacimler SEM görüntülerinde gösterilmiştir. Şekil 6d'de reçinenin kürlenmesi sırasında reçine cidarına tutunan ve ışığın iç kısma geçişini engelleyen fiber taneleri reçine ile boşluk bölge arasında gözlenmektedir. SEM görüntüleri verilen numuneler, 1565mW/cm² ışık güç yoğunluğunda yapılan deneylerden elde edilen numunelerdir. Grafikselsel olarak Şekil 5'te ve SEM görüntüleri olarak da Şekil 6'da görüldüğü gibi

karbon fiber kompozit deneylerinde üretilen hiçbir numunede kürlenme tam olarak gerçekleşmemiştir. Bu durum literatürde yapılan diğer çalışmalarda da görülmüş ve aynı şekilde karbon fiberlerin opak olmasından dolayı ışık kaynağının iç kısımlarda gölgelenmesi nedenine dayandırılmıştır [18, 20]. Bu nedenle, kürlenme işleminin ışık kaynağı ile yapıldığı sistemlerde ışığın geçişine izin vermeyecek şekildeki şeffaf olmayan takviye malzemelerinin uygun malzemeler olmadığı söylenebilir.

3.2. Cam Fiber Takviyeli Numuneler (Glass Fiber Reinforced Samples)

Karbon fiber numuneleri ile yapılan çalışmaların ardından Cam fiber ile denemeler yapılmıştır. Cam fiber numuneleri hazırlanırken tüm deneyler birer kez tekrarlanarak ikişer numune üretilmiştir. Sonuçlar ortalama olarak verilmiştir. Cam fiber ile yapılan kompozit numunelerin görüntüleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

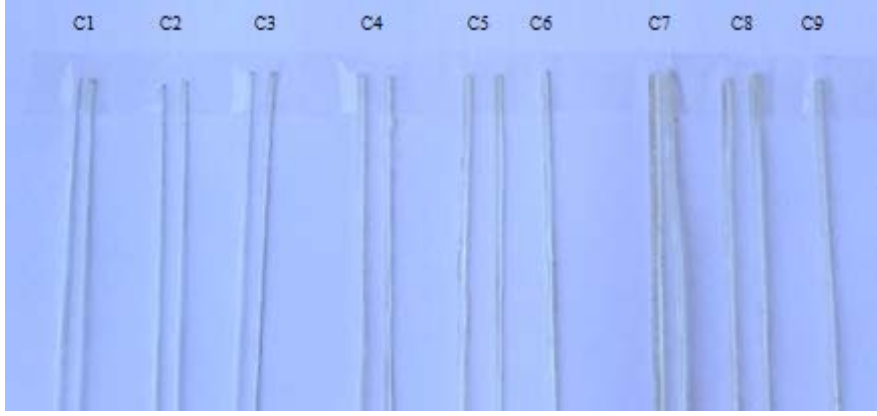
Cam fiber numunelerinde, karbon fiber numunelerindeki gibi gölgeleme etkisinin olmaması ve fiber demeti içerisine giren ışık hüzmesinin Z eksenini boyunca uzanan fiberlerin içinde yansıma yoluyla ilerleyerek kürlenmeye yardımcı olması sebebiyle (Şekil 3) cam fiber numunelerinde kürlenme problemi yaşanmamıştır. Cam fiber numunelerinin incelenmesinde reçinenin tamamen kürlendiği gözlemlendiğinden dolayı deney verilerinde kürlenme oranı

%100 olarak belirlenmiştir. Kırılma problemi olmayan cam fiber deneylerinde elde edilen numuneler karbon fiber deneylerinde elde edilen numunelere nazaran daha rijit olduğu gözlemlenmiştir.

Cam fiberlerin karşılaştırılmasında fiber miktarının toplam ağırlığa oranı fiber kütle oranı olarak adlandırılmıştır. Nozul çapına bağlı olarak fiber kütle oranı değeri elde edilmiştir. Cam fiberlerle yapılan deney sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir. Farklı ışık güç yoğunluğuna göre farklı nozul çapları nezdinde oluşan fiber kütle oranı değerlerinin

grafiksel gösterimi Şekil 8'de gösterilmektedir. Işık güç yoğunluğu etkisinin nozul çapına kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buna göre, nozul çapı azaldıkça reçine miktarı azalmakta bu da fiberin toplam kütle içerisindeki payını artırmaktadır. Eş. 1'e bakıldığında kompozit malzemelerde takviye oranının artması kompozit parçanın mukavemet özelliklerini doğrudan artırıcı nitelikte etki eden bir parametre olduğu görülmektedir.

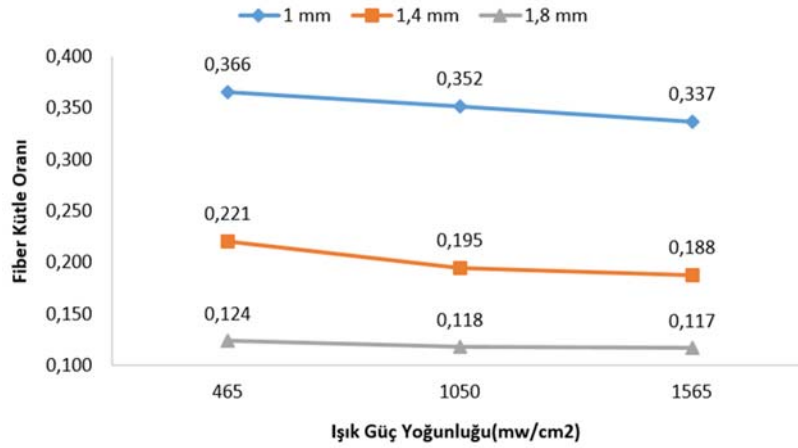
Şekil 9'da cam fiber kullanılarak elde edilen numunelerin SEM görüntüleri verilmektedir. Cam fiber kompozit fiber



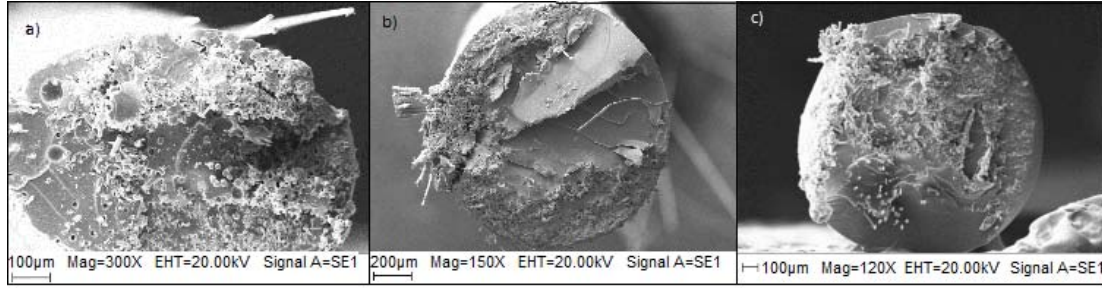
Şekil 7. Cam fiber takviyeli kompozit fiber numuneleri (Glass fiber reinforced composite fiber samples)

Tablo 3. Cam fiberle yapılan deneylerden elde edilen veriler (Data obtained by experiments with glass fiber composite)

Numune Nr.	Nozul Çapı (mm)	Işık Gücü (mW/cm ²)	Toplam (gr)	Fiber Kütle Oranı	Standart Sapma
C1	1	1565	0,125	0,337	0,019
C2		1050	0,120	0,352	0,041
C3		465	0,115	0,366	0,022
C4	1,4	1565	0,225	0,188	0,017
C5		1050	0,217	0,195	0,005
C6		465	0,190	0,221	0,01
C7	1,8	1565	0,360	0,117	0,041
C8		1050	0,355	0,118	0,002
C9		465	0,340	0,124	0,005



Şekil 8. Cam fiber numunelerinin fiber kütle oranları grafiği (Fiber volume ratios graphics of glass fiber samples)



Şekil 9. Cam Kompozit fiber numunelerine ait SEM görüntüleri a) 1 mm nozul b) 1,4 mm nozul c) 1,8 mm nozul
(SEM images of Glass composite fiber samples a) 1 mm nozzle b) 1.4 mm nozzle c) 1.8 mm nozzle)

numunelerine bakıldığında fiberin ıslanmasına rağmen cam fiberlerin kesit alanda homojen bir dağılım göstermediği görülmektedir. Fiber demetinin reçine tarafından tam olarak ıslatılması için yardımcı bir düzenek nozul içerisinde yoktur. Şekil 9b'deki numuneye bakıldığında cam fiber demetinin nozula girmeden önceki kesit şeklini nozul çıkışında da büyük oranda korumaya çalıştığı gözlemlenmiştir. Cam fiber demeti nozula girmeden önce yüksekliği enine göre çok az olan dikdörtgen bir kesit alana sahiptir. Fakat 1 mm nozulda kesitin dar oluşu fiber demetinin nozul öncesi kesit şeklinin değişmesinde etkilidir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Polimer matrisli ve sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerin eklemeli imalat üretim mantığı ile üretilebilirliğinin incelendiği bu çalışmada kısaca şu sonuçlar elde edilmiştir. Cam fiber numunelerinin üretiminde cam fiberin geçirgen (şeffaf) olması nedeniyle gölgelemeye neden olmadığı ve hatta her bir UV Led ışık kaynağından yansıyan ışığın bütün bölgelerde etkili olduğu gözlenmiştir. Bundan dolayı cam fiber takviyesi ile üretilen numunelerde sıvı fotopolimer tamamen kürlenmiştir.

Karbon fiber numunelerinin üretiminde ise nispeten dış kısımda bulunan sıvı fotopolimerin külendiği, ancak fiber demetinin iç kısımlarında bulunan sıvı fotopolimerin gölgeleme problemi nedeniyle kürlenmediği gözlenmiştir. SEM görüntülerinden de anlaşıldığı gibi iç kısımlardaki matris malzemesinin kürlenmesi gerçekleşmediği için fiber demetlerinin matris malzemesi tarafından tutunması tam olarak gerçekleşmemiştir. Bu çalışmada elde edilen numuneler üzerinde mukavemet incelemesi yapılmamış olmasına rağmen karbon fiberlerin matris malzemesine tam olarak tutunamamasından dolayı bu numunelerde mukavemet problemleri yaşanacağı sonucuna ulaşılmıştır. Hem karbon fiberde hem de cam fiberde 1,8 mm nozul çapıyla yapılan deneylerde reçinenin fiber kalınlığının değişmemesi ve fiber ile nozul deliği arasındaki boşluğun artması sebebiyle fiberden daha hızlı akmaya eğilim gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak artan nozul çapının fiber kütle oranını düşürdüğünden dolayı tercih edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada kompozit eklemeli imalat için numune üretme kabiliyetinin araştırılması çalışılmış numuneler üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmemiştir. Ancak Eş. 1'den de anlaşılacağı gibi takviye elemanının hacimce yüksek olması yani fiber kütle

oranının yüksek olması mukavemeti artıran bir genel karakteristik özelliktir. Bu yüzden düşük nozul çapı ile üretilen numunelerde takviyenin malzemesinin hacimce oranının artması daha yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlayacaktır.

5. ÖNERİLER (FUTURE WORKS)

- Üretimin bilgisayar kontrollü olarak gerçekleşmesi için yazılıma ihtiyaç duyulmaktadır.
- İlerleyen süreçte fiber üzerinde oluşan ışık şiddeti karakteristiği irdelenerek sistemin daha verimli hale getirilebileceği düşünülmektedir.
- Eklemeli imalatın yapılabilmesi için tabla yüzeyinde farklı geometrilerde ve ilerleme hızları uygulanarak her birim hacme uygulanan ışık şiddetinin besleme ve ilerleme hızına bağlı değişken hale getirilmesi sağlanması düşünülmektedir.
- Farklı besleme yönü ve açıları da üretimler gerçekleştirilmesi için nozul tasarımı iyileştirilmelidir. Farklı açılarda kompozit fiber üretimi gerçekleştirilebilirse bu yöntemle latis yapılaraya sahip parçalar üretilebilir.
- Yatay yönlerde fiber üretiminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için nozul etrafında her yönde homojen bir ışık tesiri oluşturması bakımından ışık sayısı artırılabilir.
- Geleneksel katmanlı imalat mantığında 3 boyutlu yapılarda geometriler üretilebilmesi için yatay eksenlerde de üretim yapılacak şekilde nozul tasarımının iyileştirilmesi ve bu nozula uygun algoritmalara sahip yazılımlar geliştirilmesi gerekmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

2017/2-25 YLS "3D Yazıcı ile Kompozit Parça Üretimi Yönteminin Geliştirilmesi" projesi Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi BAP tarafından desteklenmiş, Proje kapsamında 2019/10399 ve 2019/10402 numaraları ile iki patent için Türk Patent ve Marka Kurumu'na başvuruda bulunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Necmi Kara, Havacılıkta Katmanlı İmalat Teknolojisinin Kullanımı, Mühendis ve Makina, 54 (636), 70-75, 2013.

2. Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Composites Part B: Engineering* 80, 369–378, 2015.
3. Matsuzaki R., Ueda M., Namiki M., Jeong T.-K., Asahara H., Horiguchi K., Nakamura T., Todoroki A., Hirano Y., Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation, *Scientific Reports*, 6, 23058, 2016.
4. Sezer H.K., Eren O., Börklü H.R., Özdemir V., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 663-674, 2019.
5. Topçu İ., Güllüoğlu A.N., Bilici M.K., Gülsoy H.Ö., Investigation of wear behavior of Ti-6Al-4V/CNT composites reinforced with carbon nanotubes, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1441-1449, 2019.
6. Gu DD, Meiners W, Wissenbach K, Poprawe R., Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, *Int Mater Rev*, 57 (3), 133–164. 2012.
7. Hofmann M., 3D printing gets a boost and opportunities with polymer materials, *ACS Macro Letters*, 3 (4), 382–386, 2014.
8. Ivanova, C. Williams, T. Campbell, Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges, *Rapid Prototyp. J.*, 19 (4), 353–364, 2013.
9. Uysal A, Altan E, Karbon Siyahı Takviyeli Elektriği İleten Polipropilen Kompozite Delik Delinmesinde İşlem Parametrelerinin İncelenmesi, *Journal of Polytechnic*, 18 (4), 241-249, 2015.
10. W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song, Z. Li, Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling, *Mater. Sci. Eng:A*, 301 (2), 125–130, 2001.
11. F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, S. Wang, Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Compos. Part B Eng.*, 80, 369–378, 2015.
12. Tekinalp HL, Kunc V, Velez-Garcia GM, Duty CE, Love LJ, Naskar AK, Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing, *Compos Sci Technol*, 105, 144–150, 2014.
13. Van Der Klift F, Koga Y, Todoroki A, Ueda M, Hirano Y, Matsuzaki R., 3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic (CFRTP) tensile test specimens, *Open J Compos Mater*, 6, 18-27, 2015.
14. Parandoush p, Lin D, A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 182, 36-53, 2017.
15. Andrew N. Dickson, James N. Barry, Kevin A. McDonnell, Denis P. Dowling, Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing *Additive Manufacturing*, 16, 146-152, 2017.
16. Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D, 3D printing of polymer matrix composites: A Review and prospective, *Composites Part B*, 110, 442-458, 2017.
17. Lü L, Fuh JYH, Wong YS., Improvements of Mechanical Properties by Reinforcements. *Laser-Induced Materials and Processes for Rapid Prototyping*, 67–88, 2001.
18. Gupta A, Ogale AA, Dual curing of carbon fiber reinforced photoresins for rapid prototyping, *Polym Compos*, 23, 1162–1170, 2002.
19. Invernizzi M, Natale G, Levi M, Turri S, Griffini G, UV-Assisted 3D Printing of Glass and Carbon Fiber-Reinforced Dual-Cure Polymer Composites , *Materials*, 9 (7), 583, 2016.
20. Alpöz R, Ertuğrul F, Cogulu D, Topaloğlu Ak A, Tanoğlu M, Kaya E, Effects of Light Curing Method an Exposure Time on Mechanical Properties of Resin Based Dental Materials, *European Journal of Dentistry*, 2, 37-42, 2008.
21. Chantarapanich N , Puttawibul P, Sittthiseripratip K , Sucharitpatskul S, Chantaweroad S, Study of the mechanical properties of photo-cured epoxy resin fabricated by stereolithography process, *Songklanakarin J. Sci. Technol*, 35 (1), 91-98, 2013.
22. Jim H. Lee, Robert K. Prud'homme, and Ilhan A. Aksay, Cure depth in photopolymerization: Experiments and theory, *Journal of Materials Research*, 16 (12), 3536-3544, 2001.
23. Callister W.D., *Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 2007.
24. Goh G.D., Dikshit V, Nagalingam A.P, Goh G.L, Agarwala S, Sing S.L, Wei J, Yeong W.Y, Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics, *Materials and Design* 137, 79-89, 2018.

