



Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties

Hüseyin Kürşad Sezer^{*ID}, Oğulcan Eren^{ID}, Hüseyin Rıza Börklü^{ID}, Veysel Özdemir^{ID}

Department of Industrial Design Engineering, Gazi University, Technology Faculty, Ankara, 06500, Turkey

Highlights:

- Composite filament manufacturing for use in FDM 3D printer
- Effect of short carbon fiber ratio on mechanical properties
- Effect of short carbon fiber ratio on porosity and melt flow index

Keywords:

- Rapid prototyping
- 3D Printing
- Composite filament
- Carbon fibre reinforced polymer

Article Info:

Research Article
Received: 24.08.2017
Accepted: 18.02.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416523

Acknowledgement:

This work was supported under the TÜBİTAK BİDEB 2232 Research Scholarship Program No: 115C096

Correspondence:

Author:
Hüseyin Kürşad Sezer
e-mail:
kursadsezermail@gmail.com
phone: +90 312 202 8735

Graphical/Tabular Abstract

The paper investigates feasibility of FDM 3D printing of 6 mm long carbon fibre reinforced acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) composite filaments. The 3D printed part strength has been significantly improved with 6 mm long carbon fibre reinforcement with the flexibility and processability of the fibres is diminishing with increasing reinforcement content. It has also been determined that the print pattern significantly affects the mechanical properties.

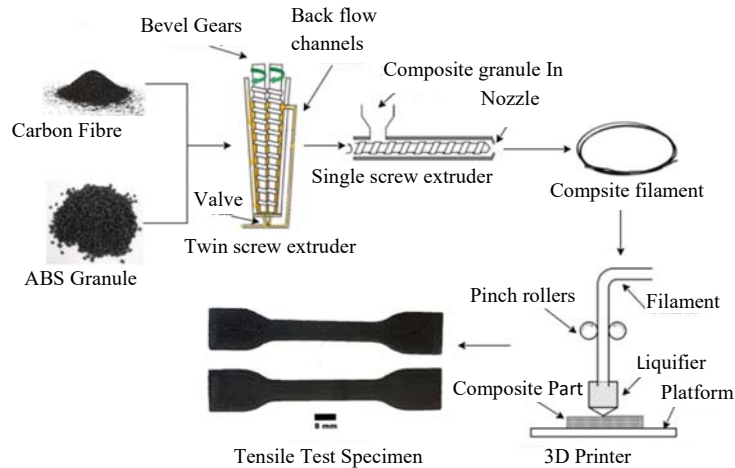


Figure A. Composite filament preparation and 3D printing

Purpose: Filaments produced with the addition of 6 mm long fibres in ABS matrix in this work aims to improve mechanical properties of the FDM printed parts to enable widespread application of this most popular and inexpensive 3D printing method in direct manufacturing of final, ready for use parts.

Theory and Methods: The 6 mm long carbon fibers has been dispersed in ABS granules using a double-screw extruder with a backflow facility. The mixture has been further processed in a single-screw extruder to produce standard filaments suitable for commercial 3D printers. The carbon fibre re-inforced filament with various wt% CF-ABS has been used in a commercial 3D printer to produce ASTM D412 A standard tensile test models.

Results: Tensile test results clearly suggested that specimens with higher wt% carbon fibre ratio are stronger than specimens with lower and that raster orientation has a significant effect on the mechanical properties of material. On the other hand toughness and ductility decreases with increasing carbon fibre content.

Conclusion: Extrusion temperature and speed play an important role in filament quality which subsequently affects 3D printed part quality. Physical fracture of the fibers in high wt% carbon fibre loading gives rise to porosity in the parts and hence reduces tensile strength. Fiber length, porosity and matrix-fiber interface has also been shown to significantly affect the fluidity behavior of the composite material.



Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin ergiyik biriktirme yöntemi ile eklemeli imalatı: fiber oranı ve yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi

Hüseyin Kürşad Sezer*^{ID}, Oğulcan Eren^{ID}, Hüseyin Rıza Börklü^{ID}, Veysel Özdemir^{ID}

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- EBY 3B yazıcıda kullanılmak üzere kompozit filament üretimi
- Karbon fiber oranının mekanik özelliklere etkisi
- Karbon fiber oranının poroziteye ve eriyik akış indeksine etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 24.08.2017
Kabul: 18.02.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416523

Anahtar Kelimeler:

Hızlı prototipleme,
3B baskı,
kompozit filament,
karbon fiber takviyeli
polimer

ÖZET

Son yıllarda bir çok farklı alanda kullanılan Eklemeli İmalat (Eİ) teknolojisi ile geleneksel yöntemlere kıyasla kompleks formdaki 3B parçaların daha kolay, düşük maliyetli ve hızlı üretimi mümkündür. Eİ teknolojileri arasında en popüler ve ucuz yöntem Ergiyik Biriktirme Yöntemidir (EBY). Son yıllarda, bu teknoloji ile son kullanıma hazır parçaların doğrudan imalatına ilgi artmıştır. Ancak EBY baskılı parçaların düşük mekanik özellikleri, bu kapsamda yaygın biçimde uygulanmasını önleyen temel bir problemdir. Eklemeli imalatın; nihai parça imalatında yaygın olarak uygulanması için, mevcut tekniklerde ve malzemelerde, yük taşıyan bileşenlere ait mekanik gereksinimleri karşılayacak düzeyde bir iyileştirilme yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyeli akrilonitril-butadien-stiren (ABS) kompozit filamentlerin üretimi ve EBY 3B baskısının fizibilitesi ilk kez yayınlanmaktadır. Bu çalışma ile 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyesi ile parça mukavemetinin önemli ölçüde iyileştirilebileceğine karşın; esneklik ve işlenebilirliğin artan takviye içeriği ile azaldığı bulguları not edilmiştir. Ayrıca yazdırma deseninin mekanik özellikleri önemli derecede etkilendiği saptanmıştır.

Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition modelling: effect of fiber content and process parameters on mechanical properties

H I G H L I G H T S

- Composite filament manufacturing for use in FDM 3D printer
- Effect of short carbon fiber ratio on mechanical properties
- Effect of short carbon fiber ratio on porosity and melt flow index

Article Info

Research Article
Received: 24.08.2017
Accepted: 18.02.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416523

Keywords:

Rapid prototyping,
3D printing,
composite filament,
carbon fiber reinforced
polymer (CFRP)

ABSTRACT

In recent years, with Additive Manufacturing (AM) technology, which is used in many different areas, it is possible to manufacture 3D parts in complex form more easily, inexpensively and quickly than conventional methods. Among the AM technologies, the most popular and inexpensive method is Fused Deposition Modelling (FDM). Recently there is growing interest in direct manufacturing of final ready for use parts using this technology. However mechanical properties of the FDM printed parts are the main constraint preventing the widespread application of FDM printed parts. In order to apply AM extensively in the manufacture of finished parts, there is a need for improvements in existing techniques and materials to meet the mechanical requirements of the load-bearing components. This paper, for the first time, investigates feasibility of manufacturing and FDM 3D printing of 6 mm long carbon fibre reinforced acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) composite filaments. The part strength is shown to be significantly improved with 6 mm long carbon fibre reinforcement with the flexibility and processability of the fibres is diminishing with increasing reinforcement content. It has also been determined that the print pattern significantly affects the mechanical properties.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: kursadsezer@gazi.edu.tr, ogulcaneren@gazi.edu.tr, rborklu@gazi.edu.tr, vozdemir@gazi.edu.tr
/ Tel: +90 312 202 8735

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat “3B model verilerinden geleneksel imalat metodolojisinin aksine genellikle malzemeleri katman katman birleştirilerek parça yapma işlemi” olarak tanımlanır [1]. Eklemeli imalat (Eİ) geleneksel imalat yöntemlerine göre daha kolay, hızlı ve ucuz bir şekilde gerçek parça ve/veya bunlara ait modelleri oluşturabilmektedir [2, 3]. Eklemeli imalat ile basit bir küp ya da aynı hacimdeki karmaşık yapıların üretimi aynı zaman ve zahmetle yapılabilmektedir. Başlangıçta basit model yapma olarak başlayan bu teknoloji, malzeme, hassasiyet ve parça kalitesinde iyileştirmeler ile modellerin 3F (Form, Fit, Function) özellikleri bilgisini verebilir hale gelmiştir. Bu teknolojinin ürün geliştirme ve imalatta devrim niteliğinde olduğu ve hatta son kapasitesine ulaştığında bildiğimiz şekliyle imalatın artık ortadan kalkacağı öngörülmektedir. Eklemeli imalata son yıllarda verilen bu denli önemle birlikte başta uzay [4], otomotiv [5], medikal [6, 7] olmak üzere mimari [8], eğitim [9] ve tekstil [10] vb. gibi birçok alanda kullanımı hızla artmaktadır.

Birçok farklı eklemeli imalat yöntemleri arasında; polimer filamentin yarı eriyik halde biriktirildiği FDM (Fused deposition modelling) [11], foto-polimer reçinenin UV veya lazer ile kürlenerek katılaştırıldığı SLA (Stereolithography Apparatus) [12], metal tozlarının sinterlendiği SLS (Selective Laser Sintering) [13] ve kağıt/plastik/metal tabakaların bağlandığı LOM (Laminated Object Manufacturing) [14] bulunmaktadır. Bu eklemeli imalat teknolojileri arasında polimer mühendislik malzemelerini kullanabilen, en düşük maliyetli, minimum atık ve en çok malzeme çeşidi içeren teknoloji EBY'dir [15, 16]. Bu teknolojinin bilimsel temeli yüksek viskoziteli malzemelerin bir nozuldan ekstrüzyonuna dayanmaktadır. Geleneksel polimer ekstrüzyonuna benzer şekilde (farklı ekstrüzyon kafası dikey ve hareketlidir) polimer filament ısıtılmış ekstrüzyon nozulundan kontrollü bir şekilde geçirilip yarı ergiyik hale getirilir ve ekstrüzyon kafasının sabit hızda hareketiyle üniform çizgisel yollar halinde aynı formunu koruyarak katlaşır. Bu çizgisel yollarının yüzeyleri arasında ekstrüzyon kafasında yüklenen atık ısı enerjisinin aktivasyonu ile yan yana ve üst üste yapışmalar gerçekleşir. Böylece istenilen desene sahip katmanlar üretilerek 3B parça geometrisi elde edilir. Katman kalınlıkları, arzu edilen geometrik hassasiyet ve ekstrüzyon nozul çapına (genelde nozul çapının %60-70'i kadar) göre belirlenir. EBY teknolojisinde en iyi netice veren polimer, viskoz macun formunda ekstrüde edilen polimerlerdir. Bu yüzden EBY teknolojisi ile çalışan 3B baskı makinelerinin kullandığı malzemeler genel olarak; amorf yapıdaki polimerlerdir. Amorf polimerlerin belirgin bir erime sıcaklığı yoktur, artan sıcaklıkla giderek yumuşaklık gösterir ve viskoziteleri düşer. Basınçla ekstrüde edilebildikleri sıcaklıkta viskoziteleri yüksektir ve ekstrüzyon sonrasında formlarını koruyarak hızlıca katlaşırlar. Ayrıca yollar yan yana eklendiğinde ya da yeni bir katman olarak eklendiğinde birbirine kolayca yapışır. Plastik enjeksiyon sektöründe en çok kullanılan

malzemelerden biri; yüksek dayanımlı, ağırlıkça hafif ve rijit bir malzeme olan ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren)'dir. Bunun yanında nispeten daha düşük dayanımlı ancak nişasta esaslı olduğundan sağlık, güvenlik açısından daha uygun ve medikal uygulamalarda tercih edilebilecek PLA (Polilaktik asit)'de yaygın EBY malzemeleri arasındadır. Mekanik dayanımı oldukça iyi olan ve termo-mekanik özellikler iyileştirilmiş PC (Polikarbonat)'ın mukavemeti ile ABS'nin esnekliğini içeren karışımlarda EBY teknolojisinde kullanılabilir [17-19]. Ayrıca yüksek mukavemeti ve hafifliği nedeniyle havacılık ve otomotiv sektörlerinde tercih edilen ULTEM 9085 ve ısı eğilmeye dayanıklı (189 °C kadar) PPSF (polifenilsülfon) özel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Standart ABS kullanılarak üretilen EBY baskılı parçaların düşük mekanik özellikleri [20-23], bu teknolojinin diğer avantajlarına rağmen son kullanıma hazır parçaların doğrudan imalatına yönelik yaygın biçimde uygulanmasını önleyen temel bir problemdir [24-27]. EBY ile oluşturulan parçaların dayanımını arttırmak için polimer matris malzeme içine karbon fiber vb. gibi takviye edici malzemeler eklenerek polimer kompozitler oluşturulabilir [28-30]. Zhong vd. EBY malzemesi olarak kullanılmak üzere kısa fiber-glass takviyeli ABS (GFABS) polimer kullanmıştır [31]. Bu birleşim, kırılma nedeniyle filament haline getirilememiştir. Doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) katkısının daha iyi esneklik ve süneklik sağladığı görülmüştür. LLDPE ve ABS matris arasındaki faz ayrımından dolayı ABS ve LLDPE molekül zincirleri arasındaki bağlantıyı güçlendirecek dengeleyici madde eklenmiştir. Böylece ağırlık oranı %18 fiber-glass olan mekanik dayanımı ~48% güçlendirilmiş filament elde edilmiştir. Daha fazla fiber-glass eklenmesi ile doğrusal yüklemeye açısından yüksek gerilme direnci sağlanmıştır. Buna karşın fiber-glass eklemek, saf ABS ile karşılaştırıldığında, katmanlar arasındaki yapışma kuvvetini zayıflatmıştır. Bazı araştırmalar ise bitişik katmanlar arasındaki bağ düzenine fiber etkisini ele almıştır [31]. Tekinalp vd. kısa fiber (0,2-0,4 mm) ile takviye edilmiş ABS matrisi işlenebilirlik, mikroyapı ve mekanik performans açısından araştırmış ve geleneksel basınç kalıplama (CM) ile üretilmiş bir kompozit ile karşılaştırmışlardır. 3B yazıcı ile üretilen numunelerin çekme dayanımı %115 ve modülü ise %700 dolayında artmıştır. 3B yazıcı, baskı doğrultusunda yüksek fiber yönelimine (%91,5 civarı) sahip numune üretmiştir. Buna karşın basınç kalıplama ile üretilen numune çok düşük fiber yönelimine sahiptir. Mikroyapısal mekanik özellikler ilişkilendirildiğinde ise 3B yazıcı ile üretilen numune basınç kalıplama ile üretilene göre büyük gözenekli yapıya sahiptir. Her ikisi de benzer çekme mukavemeti ve modülü göstermektedir. Bu olgu fiber yönlendirilmesi, dağılımı ve gözenek biçimine göre açıklanabilir [20]. Ning vd. ABS matris içerisine farklı boyutlarda (100 µm ve 150 µm) karbon fiber tozu takviye edilerek elde ettikleri filamentleri EBY 3B baskı makinesinde kullanmışlardır. Saf ABS ile kıyaslandığında, karbon fiber eklentisi çekme dayanımını ve Young's modülünü arttırırken tokluk, akma

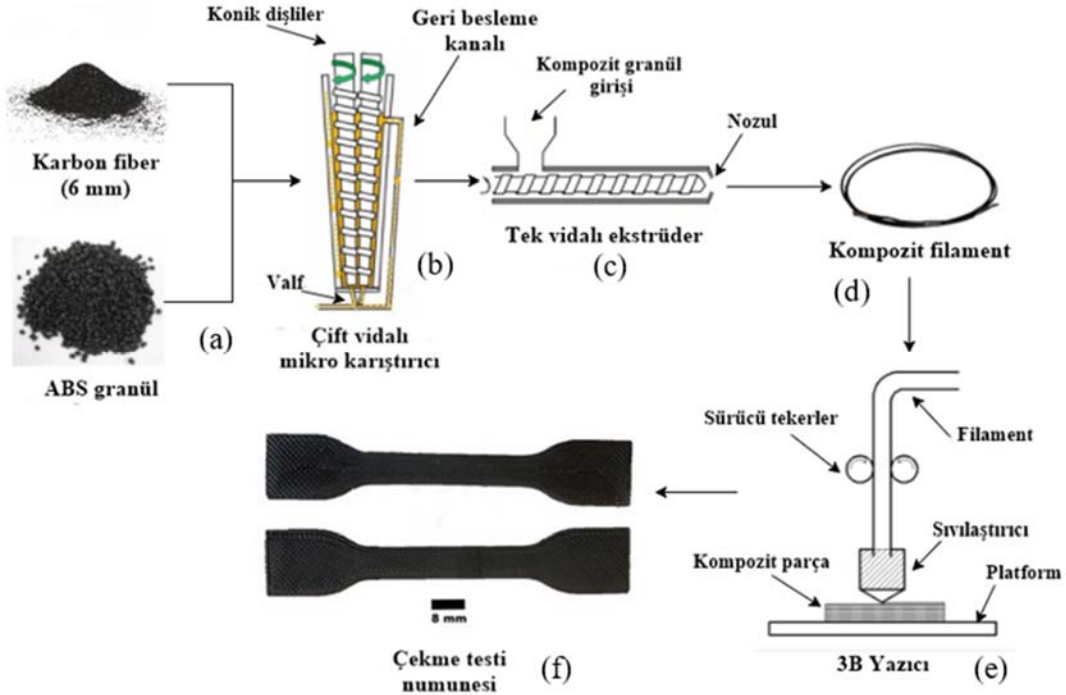
dayanımı ve sünekliliği azaltmıştır. En yüksek çekme ve eğme dayanımı %5 kısa karbon fiber içeren numunede görülmüştür. En yoğun porozite ise %10 karbon fiber içeren numunede görülmüştür. En düşük çekme dayanımınının %10 karbon fiber içeren numunede görülmesi bu durum ile açıklanmıştır [32]. Ning vd. bir diğer çalışmalarında karbon fiber takviyeli ABS filamentleri EB3 yazıcı kullanarak farklı işlem parametrelerine sahip parçalar üretmiş ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Çalışmada yazdırma deseni, yazdırma hızını, katman kalınlığı ve ekstrüzyon sıcaklığının parçanın mekanik özelliklerini etkilediği saptanmıştır [33].

Literatürdeki çalışmalarda katkı malzemesi olarak ya toz ya da kısa (> 3 mm) fiber formundaki güçlendirme malzemelerinin kullanılmış ve sınırlı derecede mekanik dayanım artışı sağlandığı görülmüştür. Bu çalışmada ilk kez 6 mm uzunluğunda karbon fiber takviyeli akrilonitril-butadien-stiren (ABS) kompozit filamentlerin üretimi ve EB3 yazıcısının uygulanabilirliği araştırılmıştır. Artan karbon fiber boyu ile mekanik dayanımda ve diğer çekme özelliklerinde daha fazla iyileştirme sağlanabileceği beklenmektedir. Farklı karbon fiber takviye oranlarında (%5, %10, %15, %20, %30) kompozit filament üretilerek EB3 yazıcı ile kompozit numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan çekme testi numunelerinin mekanik özellikleri

belirlenmiştir. Ayrıca yazdırma açısının (tablanın x eksenine göre yazdırma deseninin yönü) mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

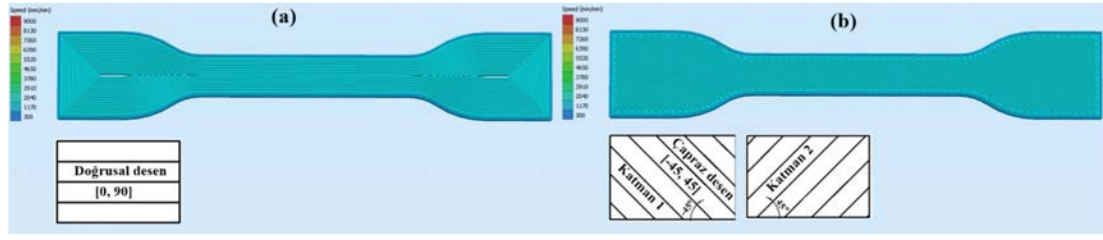
2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METOD)

Çalışmada kompozit filament elde etmek için ABS granül (performance ABS, Oo-Kuma) matris malzeme, kısa karbon fiber (6 mm epoksi bazlı 1101, DowAksa) takviye malzeme olarak kullanılmıştır. Farklı oranlarda ki homojen kompozit karışımını elde etmek için laboratuvar tipi eş zamanlı dönen çift vidalı mikro karıştırıcı (DSM Xplore) kullanılmıştır. Çift vidalı karıştırıcı, ABS matris malzemesini yarı eriyik hale getirip, karbon fiber takviye malzemesini matris içinde homojen karıştırarak ekstrüzyon sağlar. Ayrıca elde edilen homojen kompozit karışımı EB3 yazıcıda kullanılmak üzere uygun boyuttaki filament (1,75) haline getirmek için tek vidalı masaüstü filament ekstrüder (Wellzoom C) kullanılmıştır. Kompozit filament üretiminde kullanılan metot Şekil 1'de gösterilmiştir. Üretilen kompozit filamentler, polimer esaslı birçok farklı malzeme ile üretim yapabilen bir EB3 yazıcıda (3Dison Pro) kullanılarak ASTM 412 A standartlarında ki çekme testi numuneleri [0, 90] ve [-45, 45] olmak üzere iki farklı yazdırma açısı ile üretilmiştir, Şekil 2. Üretilen kompozit filament ve çekme testi numuneleri bakalit içerisine alınıp yüzeyleri parlatılarak



Şekil 1. Kompozit filament hazırlanması ve 3D baskı a) Kısa karbon fiber ve ABS ganülleri resmi b) Karbon fiber ve ABS'nin çift vidalı ekstrüder ile dispersiyonları c) Karbon fiber / ABS kompozit yapının tek vidalı ekstrüder ile ticari 3D baskı makinasında kullanılabilen standart filament haline getirilmesi d) Rulo halinde karbon fibere takviyeli filament sargısı e) EB3 yazıcı sürecinin şematik gösterimi f) Kompozit filament kullanarak EB3 yazıcı ile üretilen ASTM D412 A standartlarında ki çekme testi numunesi ölçek çubuğu: 8 mm.

(Composite filament preparation and 3D printing (a) Picture of short carbon fiber and ABS granules (b) Dispersion of carbon fibers into ABS with double-screw extruder (c) Standard filament production with single-screw extruder suitable for a commercial 3D printer (d) Carbon fiber reinforced filament spool (e) Schematic illustration of fused deposition modelling 3D printing process (f) A typical 3D printed ASTM D412 A standard tensile test model with 5 wt% CF-ABS composite filament, scale bar 8 mm.



Şekil 2. Çekme testi numunesinin yazdırma ön izlemesi a) doğrusal [0, 90] b) çapraz [-45, 45] (Printing preview of tensile test specimen, a) linear raster [0, 90] b) transverse raster [-45, 45])

mikro yapıları Optik mikroskop (Leica DMI5000M) ile incelenmiştir. Fiber miktarının poroziteye, karbon fiber uzunluğuna ve karbon fiber yönlendirilmesine etkisi saptanmıştır. Ayrıca çekme numunesinin kopma yüzeyleri de yine aynı metot ile incelenmiştir. Numunelerin eriyik akış indeksleri (EAİ) ise eriyik akış test cihazı Coesfield Material Test Meltfluxer LT kullanılarak analiz edilmiş ve numune karakterizasyonları belirlenmiştir.

2.1. Proses Parametreleri (Process Parameters)

Granül halinde bulunan ABS, karbon fiber ile 220 °C sıcaklıkta 100 rpm'de 5 dakika boyunca mikro karıştırıcı kullanılarak Tablo 1'de gösterilen miktarlarda karıştırılmıştır. Mikro karıştırıcı küçük karıştırma haznesine (15 cc) sahip olduğundan tabloda verilen oranlara sahip karışımlar birkaç defa üretilmiştir. Homojen karışım çift vidalı mikro karıştırıcı ile sağlandıktan sonra granül halden filament haline gelen filamentler istenilen çapa (3B yazıcıya uygun genellikle 1,75 mm) sahip olmadıkları için masaüstü tek vidalı ekstrüder kullanılarak tekrar işlem den geçirilmiş ve 1,75 mm çaplı filamanet haline getirilmiştir. Filament ekstrüzyon işlemi sırasında; ekstrüderin ön ısıtıcı ve çıkış nozulu sıcaklıkları ile birlikte ekstrüzyon hızı, filament kalitesi ve çapını önemli oranda etkilemektedir. Özellikle sıcaklık filamentin yüzey kalitesini ve gözenek oranını ve yapısını etkilemektedir. Bu çalışmada masaüstü ekstrüderin ön ısıtıcı ve çıkış sıcaklıkları sırasıyla 225 °C ve 235 °C olarak, ekstrüzyon hızı ise 2000-2200 mm/dk olarak optimize edilmiştir.

Tablo 1. Üretilen filament numunelerinin malzeme içerikleri (The material contents of the sample filament)

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

Elde edilen kompozit filament ticari bir EBY 3B yazıcıda (3Dison Pro) kullanılarak ASTM D412 A standartlarına ki (%70 ölçeklendirilmiş) çekme testi numunelerden her bir oran için 4 adet yazdırılmıştır. Yazdırma işleminde 0,60 mm çapa sahip nozul ile 0,30 mm kalınlığında %100 doluluk oranına sahip katmanlar oluşturulmuştur. Daha küçük nozul çapları, artan karbon fiber takviye oranı ile nozul

tıkanmalarına sebep olmaktadır. Yazdırma işlemi sırasında nozul sıcaklığı 245 °C ve platform sıcaklığı 110 °C olarak ayarlanmıştır. Nozul sıcaklığı parçanın mekanik özelliklerini etkilemektedir [33]. Düşük nozul sıcaklıklarında desenler arasında zayıf bağlar oluşurken iken yüksek nozul sıcaklıklarında daha gözenekli yapılar gözlenmektedir. Yazdırma yönü, çekme kuvvetinin uygulanacağı yöne paralel [0, 90] veya 45° açılı [-45, 45] olarak belirlenmiştir. Şekil 2'de ASTM D412 A standartlarında ki farklı yazdırma desenine sahip çekme testi numunesinin .stl dosya formatındaki yazdırma ön izlemesi görülmektedir.

Elde edilen çekme testi numuneleri çekme testi cihazı (Instron 5965) ile 2 mm/dk hızında çekilerek mekanik özellikleri saptanmıştır. Bakalit içerisine alınıp parlatılan filament ve numune kesitleri optik mikroskop yardımıyla incelenerek kompozit karışımda ki fiber yönlendirmesi, fiber boyutu ve porozite oluşumu incelenmiştir.

Eriyik akış indeksi (EAİ), belirli bir sıcaklık ve kütle altında belirli çap değerine sahip kalıptan 10 dakika içinde geçen polimer kütesidir. Eriyik akış hızı düşük moleküler ağırlığa karşılık gelen yüksek erime hızı ile moleküler ağırlığın dolaylı bir ölçüsüdür. Aynı zamanda eriyik akış hızı malzemenin basınç altında akma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Numunelere ait EAİ değerleri belirlenirken Tablo 2'de bahsedilen işlem parametreleri kullanılmıştır. Farklı takviye oranlarının her biri için 12 farklı numune alınmıştır.

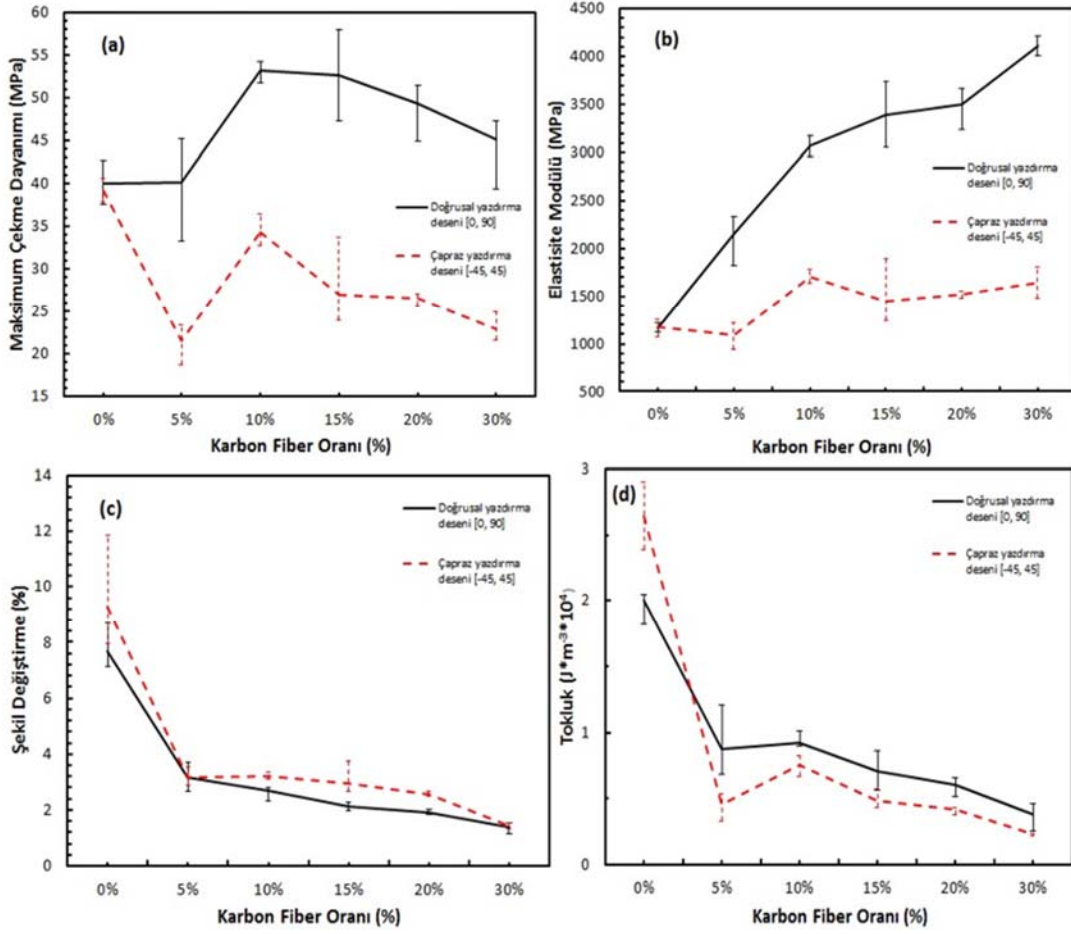
Tablo 2. EAİ test cihazı işlem parametreleri (Process parameters for Melt Flow Index measurements)

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

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Çekme Dayanımına Etkisi (Effects on Tensile Strength)

Şekil 3'de de farklı oranlarda fiber takviyesi içeren kompozit numunelerin mekanik özelliklerine ait grafikler verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, farklı karbon oranları ve yazdırma deseni kompozit malzemenin mekanik özelliklerini (çekme dayanımı, elastisite modülü, tokluk ve süneklik) önemli ölçüde etkilemektedir. Maksimum çekme dayanımı; malzemenin kopmadan önce dayanabildiği maksimum



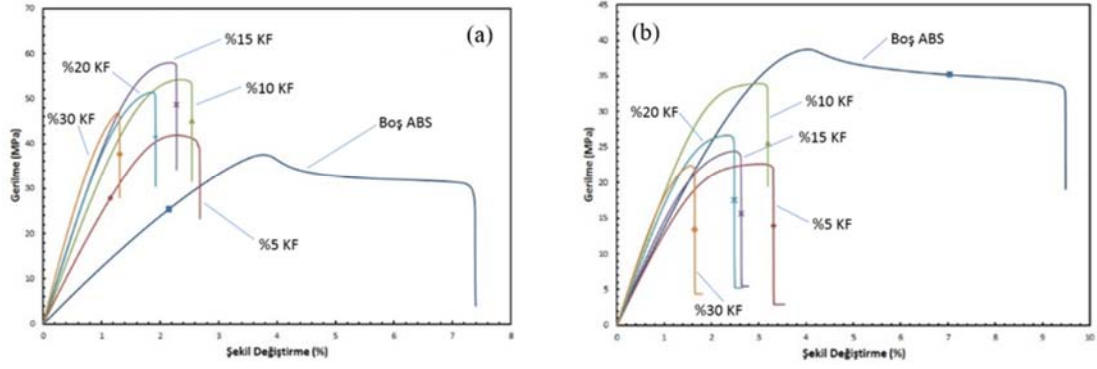
Şekil 3. Farklı karbon fiber oranına ve farklı yazdırma desenine sahip filamentlerin mekanik özellikleri a) maksimum çekme dayanımı b) elastisite modülü c) şekil değiştirme d) tokluk

(Tensile stress strain curves for specimens with different carbon fiber contents (a) maximum tensile stress (b) Young's modulus (c) strain (d) toughness)

gerilme değeridir. Bu değer doğrusal yazdırma [0, 90] deseninde %5 karbon takviyesi ile ciddi miktarda değişim göstermemiştir, bkz. Şekil 3a. Burada çekme dayanımını arttıracak kritik fiber takviye değerine ulaşamamıştır. Bunun sebebinin karbon fiber takviyesi ile matris içerisinde oluşan gözenekli yapının (Şekil 7-Şekil 8) parçanın dayanımını azalması olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla %5 fiber katkısı çekme dayanımı artışı için gerekli kritik takviye oranının altında kalmıştır. %10 karbon fiber takviye oranında ise çekme dayanımında yaklaşık %33'lük bir artış meydana gelirken bu takviye oranının üzerindeki değerlerde dayanım yavaşça azalmaya başlamıştır. Bu azalma, artan fiber oranı ile fiber-fiber etkileşimi neticesinde meydana gelen fiber kırılmalarından dolayı olmuş olabilir [34-36]. Fiber boyu malzeme mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biridir [37-39]. Ayrıca artan fiber oranı matris-takviye malzeme fazı arasında oluşan gözenekleri artırarak çekme dayanımının bir miktar daha azalmasına neden olmaktadır. Buna rağmen tüm takviye oranlarında elde edilen çekme dayanımı boş ABS'den yüksek olmuştur. Dolayısıyla en yüksek dayanım ortalama 53,20 MPa ile %10

kısa karbon fiber içeren numunede gözlemlenirken; en düşük dayanım 40,02 MPa ile boş ABS'de gözlemlenmiştir.

Diğer taraftan çapraz yazdırmada [-45, 45] çekme dayanımı, boş ABS için neredeyse doğrusal yazdırma [0, 90] değeri ile aynıyken artan karbon fiber eklentisi ile azalmaya başlamıştır, Şekil 4a. Yani boş ABS katmanlar arası ve katmanlar içinde birbirlerine daha sıkı tutunurken artan karbon fiber takviyesi ile bu bağlar zayıflamaktadır. Bu durum matris içerisinde karbon fiberlerin yönlendirilmesi ile mekanik özelliklerin önemli derecede etkilendiğini göstermektedir. Karbon fiberlerin çekme yönüne paralel (doğrusal [0, 90]) yönlendirilmesi ile 45° açı ile (çapraz [-45, 45]) yönlendirilmesi kıyaslandığında; doğrusal yönlendirilmiş numunelerin çekme dayanımlarının ortalama %81,75 daha fazla olduğu görülmektedir. Çapraz yazdırmada en yüksek dayanım ortalama 39,16 MPa ile boş ABS'de görülürken en düşük dayanım 21,57 MPa ile %5 karbon fiber içeren numunede görülmüştür, Şekil 4a. Zhong vd. karışıma bir miktar yapısal (bütadien ve akrilonitril içeren) olarak ABS'ye ana zincir yapısı ((CH₂)_n) olarak



Şekil 4. Farklı karbon fiber takviye oranlarına sahip numunelerin gerilme/şekil değiştirme eğrileri a) doğrusal desen [0, 90] b) çapraz desen [-45, 45]

(The stress/strain curves of the samples with different carbon fiber contents (a) the linear raster [0, 90] (b) the transverse raster [-45, 45])

LLDPE benzeyen HNBR (Hidrojene nitril kauçuk) ekleyerek faz ayrımlarının önlemeye çalışmışlardır [31].

3.2. Elastisite modülüne etkisi (Effects on Young's modulus)

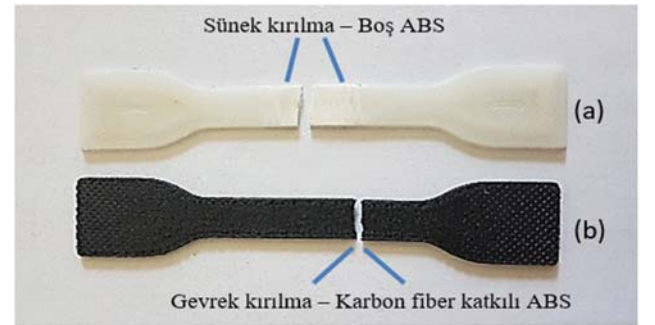
Elastisite (Young) modülü, malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür. Yani bu sabit, malzemenin rijitliğini gösterir ve elastik esnemeye karşı gösterdiği direnç olarak da ifade edilebilir. Malzemenin, yüksek elastisite modülüne sahip olması elastik sınırlar içerisinde esnemesinin zor olduğunu gösterirken, düşük elastisite modülüne sahip olması ise nispeten daha kolay esneyebileceğini göstermektedir. Yapılan çekme testinde, her iki farklı yazdırma deseninde de karbon fiber miktarı arttıkça elastisite modülü önemli derecede artmaktadır, Şekil 3b. Doğrusal yazdırma deseninde [0, 90] elastisite modülü boş ABS için ortalama 1,16 GPa iken, %5 karbon fiber takviyesinde %85 oranında artarak 2,15 GPa olmuştur. %30 karbon fiber takviye oranında ise elastisite modülü boş ABS'ye göre %254 artarak 4,11 GPa olmuştur. Elastisite modülündeki bu büyük artış karbon fiber takviyesi ile malzemenin rijitliğinde önemli derecede artışı göstermektedir. Benzer şekilde çapraz yazdırma deseninde de [-45, 45] fiber eklentisi ile elastisite modülü kayda değer bir biçimde artmıştır, Şekil 3b. Fakat bu artış doğrusal yazdırma deseninde meydana gelen artışa nazaran oldukça düşüktür. Boş ABS için elastisite modülü ortalama 1,18 GPa iken %30 karbon fiber içeren numunede elastisite modülü %35,5 artışla ortalama 1,64 GPa olarak belirlenmiştir.

3.3. Elastisite Sünekliğe Etkisi (Effects on Ductility)

Süneklik malzemenin kopmadan önce ne kadar deforme olabileceğinin bir ölçüsüdür. Düşük süneklik kırılmaya karşı düşük direncin göstergesidir. Sünekliği düşük, yani gevrek malzemeler uzama oranında kayda değer bir değişim olmaksızın kırılmanın ortaya çıkması ile karakterize edilirler. Bu yüzden gevrek malzemelerin kopma mukavemetleri ile akma mukavemetleri arasında ki fark oldukça küçüktür. Aynı zamanda kopma anında ki şekil değiştirmeleri de sünek malzemelere göre oldukça düşüktür. Şekil 4 de gerilme şekil değiştirme eğrileri görülmektedir.

Bu şekilden anlaşılacağı üzere, boş ABS sünek özellik gösterirken (% şekil değiştirme oranı yüksek), karbon fiber takviyesi ile numuneler belirli bir akma dayanımı göstermeksizin koparak gevrek özellik göstermişlerdir. Şekil 4'de görüldüğü üzere, doğrusal desene sahip numuneler ise çapraz desene sahip numunelere göre daha gevreklerdir.

Doğrusal yazdırma deseninde [0, 90] en fazla yüzde uzama ortalama %7,66 ile boş ABS'de görülmektedir Şekil 4c. %30 karbon fiber katkılı numune için ise yüzde uzama, boş ABS'ye göre %460 oranında düşerek ortalama %1,37 seviyelerine gerilemiştir. Yani sünek ABS matris içerisine karbon fiber takviyesi ile elde edilen kompozit malzeme gevrek özellik göstermektedir. Ayrıca karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerde genel olarak boyun verme görülmemektedir, Şekil 5.



Şekil 5. ABS a) ve %20 karbon fiber takviyeli b) numunelere ait kopma yüzeyleri ve boyun oluşumu

(Fracture surfaces of (a) ABS, (b) 20% carbon fiber reinforced specimens and necking)

Diğer taraftan, çapraz yazdırma deseninde [-45, 45] ise en fazla yüzde uzama ortalama %7,66 ile boş ABS'de görülürken en düşük yüzde uzama ortalama %1,44 ile %30 karbon fiber katkılı numunede görülmektedir, Şekil 3c. Çapraz yazdırma deseni ile doğrusal yazdırma deseni kıyaslandığında, birim şekil değiştirmenin çapraz yazdırma deseninde ortalama %20 daha fazla olduğu görülmektedir. Böylece doğrusal yazdırma deseninde çekme dayanımı daha yüksek olan kompozit malzemeler elde edilirken çapraz

yazdırma deseninde ise daha sünek kompozit malzemeler elde edilmiştir, Şekil 3a, c.

3.4. Tokluğa Etkisi (Effects on Toughness)

Tokluk, bir malzemenin kırılma olmaksızın plastik deforme olabilme kabiliyetidir. Diğer bir ifade ile tokluk, malzemenin kopmadan önce birim hacim başına absorbe edebileceği enerji miktarıdır. Ancak, malzemede tamamen kırılma olmaksızın malzeme bütünlüğü ve işlevi yitirilmediği halde üzerinde çatlakların olabileceği dikkate alınmalıdır. Tokluk her iki farklı yazdırma deseni için de karbon fiber takviye oranı arttıkça azalmaktadır Şekil 3d. %5 karbon fiber takviyesinde dahi tokluk ortalama 3 kat azalmıştır. Doğrusal yazdırma deseninde [0, 90] tokluk boş ABS için ortalama $2,00 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ iken, %30 karbon fiber içeren numunede 6 kat azalarak $0,38 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ olmuştur. Çapraz yazdırma deseninde [-45, 45] ise boş ABS için $2,65 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ değerinde olan tokluk %30 karbon fiber içeren kompozit numune için 10 kat azalarak $0,23 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 10^4$ seviyelerine düşmüştür. Çapraz yazdırma deseni ile üretilen kompozit numunelerin tokluk değerleri, doğrusal yazdırma deseni ile üretilen numunelere nazaran ortalama %9 daha düşüktür. Bunun sebebi tokluğun malzemenin çekme dayanımı ve sünekliliğine bağlı bir fonksiyon olmasıdır, Şekil 4a, b. Yani bir malzemenin tok olabilmesi için hem yüksek dayanımlı hem de sünek olması gerekmektedir. Çapraz yazılmış kompozit numunelerin genel olarak daha sünek olmalarına rağmen dayanımları doğrusal yazdırmaya kıyasla oldukça düşüktür.

3.5. Karbon Fiber Takviyesinin Poroziteye Etkisi (Effects Of Carbon Fiber Content On Porosity)

Şekil 7 ve 8 çekme testi numunelerinden elde edilen optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere karbon fiber katkılı ABS filamentlerde gözenekli yapılar mevcuttur. Bu gözenekli yapılar genel olarak filament üretimi ve yazdırma işleminde ki ekstrüzyon sırasında iç bölgelerde gaz sıkışması, katmanlar arasında ki fiziksel boşluklar ya da matris ile takviye edici yüzeyleri arasında ki faz ayrımından oluşan boşluklar nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Numunelerdeki gözenek miktarını tespit etmek için aşağıda ki formül kullanılmıştır [32].

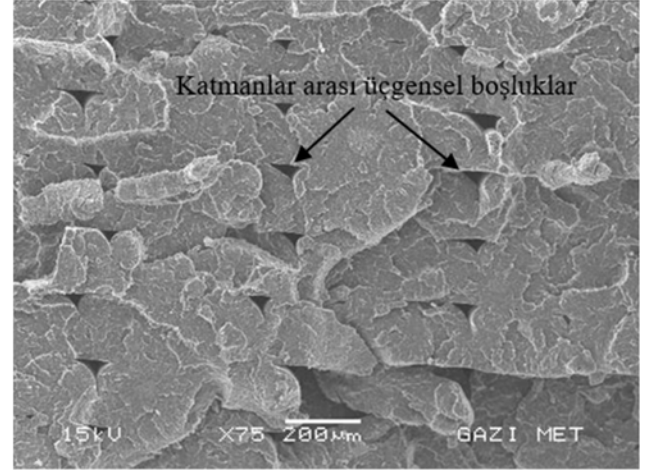
$$P = \frac{V_t - V_a}{V_t} \quad (1)$$

Burada; P toplam gözenek oranı, V_t numunenin teorik hacmi ve V_a numunenin gerçek hacimidir. CAD ortamında tasarlanan numunenin hacmi $2,55 \text{ cm}^3$ 'dür. Numunenin gerçek hacmi Eş. 2 ile belirlenmiştir [32].

$$V_a = \frac{M \times \%ABS}{\rho_{ABS}} + \frac{M \times \%CF}{\rho_{CF}} \quad (2)$$

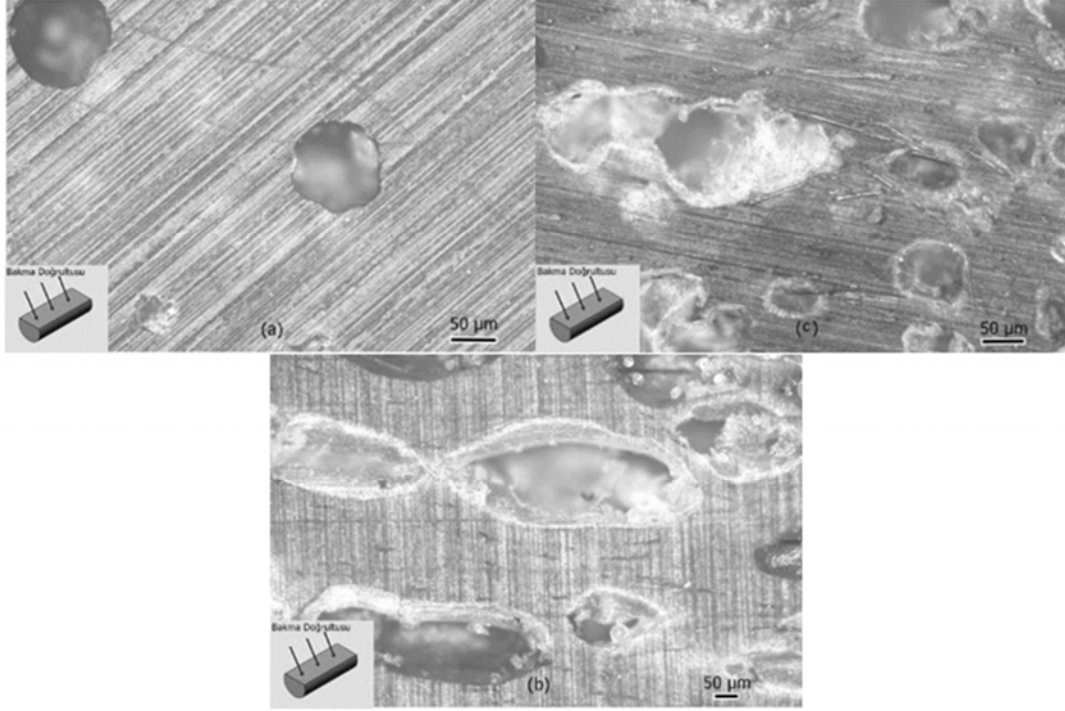
Burada; M numunenin gerçek ağırlığı, ρ_{ABS} ABS'nin öz kütlesi ($1,05 \text{ g/cm}^3$), ρ_{CF} ise karbon fiberin öz kütlesi ($1,76 \text{ g/cm}^3$)'dir. %20 karbon fiber içeren numune için teorik

olarak %30 hesaplanan porozite oranı, yazdırma işlemi sırasında katman arasında oluşan üçgensel bölgeleride içermektedir. Şekil 6. Üçgensel bölgeler, dairesel kesite sahip olan filamentin yarı eriyik halde yığılması sırasında nozul tarafından uygulanan basınçla eliptik hale gelmesi sonucu filament alt bölgesinin düzgün şekilde katılaşmasına rağmen üst bölgenin eliptik durumunu koruyarak katılaşmasından kaynaklanır. Böylece yazdırma işlemi sırasında aşağı yönlü üçgenler oluşmaktadır, Şekil 6.

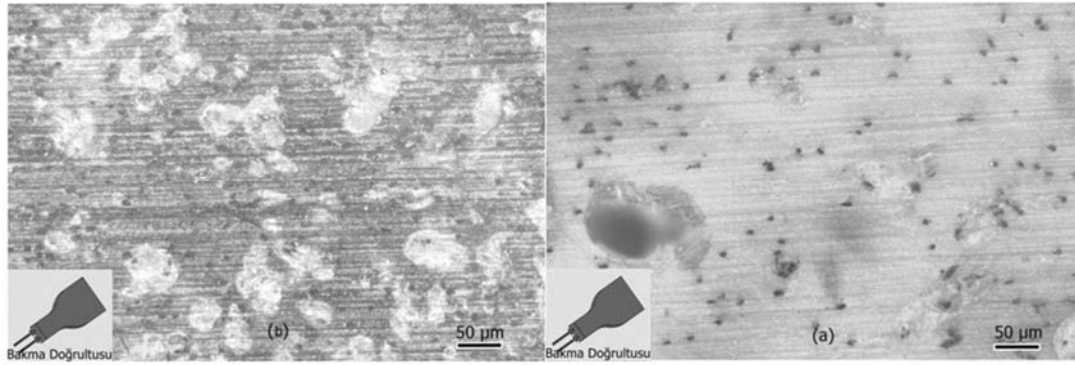


Şekil 6. Yazdırma işlemi sırasında katmanlar arasında oluşan üçgensel bölgeler (Interlayer triangular features after printing process)

Şekil 7 ve şekil 8'de görüldüğü üzere, karbon lifleri ABS matris içerisine homojen olarak dağılmış ve ekstrüzyon yönüne paralel biçimde konumlanmıştır. Bu durum ekstrüzyon yönündeki dayanımı önemli ölçüde arttırmaktadır. Şekil 7b ve c'de fiber boyları ölçüldüğünde fiber katkılı numunelerde homojenliği sağlamak için yapılan karıştırma işlemi sırasında fiber kırılmalarının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu kırılmaların fiber oranının artması ile çoğaldığı görülmüştür. Şöyle ki, artan karbon fiber miktarı daha çok fiber-fiber mekanik kırılmalarına sebebiyet vererek fiber boylarının kısalmasına neden olmuştur. Başlangıçta 6 mm uzunluğunda olan kısa karbon fiberler kırılarak %5 takviye oranı için 200-400 μm , %15 takviye oranı için 25-150 μm uzunluğuna düşmüştür, Şekil 7b-c. Fiber boyu ile mekanik özellikleri doğru orantılıdır. Fiber boyunun küçük ve oranının yüksek olması, küçük çaplı ve yoğun porozite oluşumuna neden olmaktadır. Buna karşın ABS ile üretilen çekme testi numunesi ve filament kesitine bakıldığında porozitenin büyük çapta ve az sayıda olduğu görülmektedir, Şekil 7a. Boş ABS'de ortaya çıkan gözenekli yapıya yazdırma işlemi sırasında gazların oluşturduğu boşlukların sebep olduğu düşünülmektedir. Kısa karbon fiber eklentisi ile genel olarak porozite çapını azaltmakla birlikte porozite miktarı artmaktadır, Şekil 7b-c. Boş ABS'de ki porozite çapı ortalama 100 μm iken ağırlıkça %15 kısa karbon fiber içeren filamentte porozite çapı küçülerek 50 μm seviyelerine inmiştir. Porozite özellikle fiber sınırlarında oluşmaktadır. Bu durum fiber takviyesi ile matris yüzeyleri arasındaki faz ayrımından kaynaklanmıştır. Kompozit



Şekil 7. Farklı oranlarda kısa karbon fiber içeren kompozit filamentlerin mikro yapıları. a) Boş ABS b) %5 KF c) %15 KF
(The microstructure of the composite filament containing short carbon fibers (a) Blank ABS (b) 5% CF (c) 15% CF)



Şekil 8. Farklı oranlarda kısa karbon fiber içeren çekme testi numunelerinin mikro yapıları a) %5 KF b) %15 KF
(The microstructure of the tensile test specimen containing short carbon fibers (a) 5% CF (b) 15% CF)

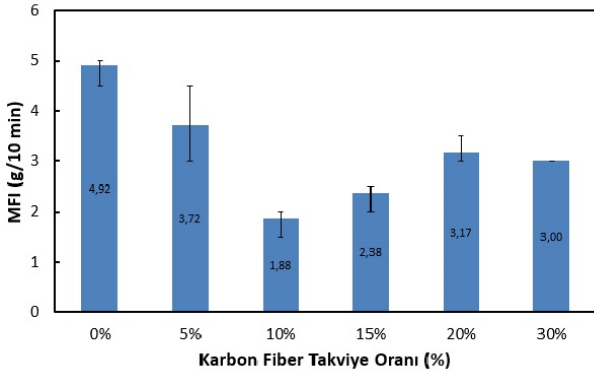
numunelerin mekanik özelliklerinin boş ABS'ye göre önemli derecede artmasına rağmen belirli karbon fiber takviye oranından sonra daha fazla artış göstermemesi durumu, porozite oluşumu ve fiber boyları ile açıklanabilir. Çekme testine tabi tutulan numunelerin kesitleri incelendiğinde ise yine kompozit filament kesitlerinde söz edilen porozite özelliklerine benzer durumlar görülmektedir. Şekil 8. Ağırlıkça %5 kısa karbon fiber içeren numunenin kopma kesitine, Şekil 8'de şematik olarak gösterilen doğrultuda bakıldığında, porozitenin daha az ve dağınık olduğu ayrıca karbon fiberlerin bakma yüzeyine dik olarak konumlandığı görülmektedir. Karbon fiber miktarı arttıkça porozite miktarı artmaktadır. %15 kısa karbon fiber içeren numunede gözenekler küçük çapta (25-

40 µm) ve daha sık olarak görülmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'de görüldüğü üzere porozite sıklıkla fiber çevresinde görülmektedir. Fiber çevresindeki bu poroziteler düşük fiber-matris yüzey tutunmasına sebebiyet vererek üretilen kompozit parçanın mekanik özelliklerinin azalmasına neden olur. İki farklı fazın (polimer ve fiber) yazdırma işlemi sırasında birbirlerine göre farklı akması bu iç porozitelerin oluşmasının en önemli nedenlerinden biridir [20]. Bu durumun önüne geçmek için fiberlerin yüzey işlemine tabi tutulması ve ya haşıl maddesi kullanılarak matrise daha iyi tutunmaları sağlanabilir [36]. Li ve Zhang ise çalışmalarında HNO₃ ile işlenmiş kısa karbon fiberi ABS matris içerisine takviye ederek tutunma yüzeylerini ve boşluk oluşumlarını incelemiştir [36].

3.6. Karbon Fiber Takviyesinin Eriyik Akış İndeksine (EAİ) Etkisi (Effects of Carbon Fiber Content on Melt Flow Index (MFI))

Malzeme ekstrüzyonunun tercih edildiği endüstriyel uygulamalarda, malzemenin EAİ değerleri işlem parametrelerinin belirlenmesi için önemlidir. EAİ değeri, plastik malzemelerin akış kolaylığının bir ölçüsüdür ve malzemelerin molekül ağırlığına, katkı maddelerine ve diğer bileşenlere bağlıdır. Üretilen karbon fiber takviyeli polimer kompozite ait EAİ değeri Şekil 9'da gösterilmiştir.

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



Şekil 9. Farklı oranlarında karbon fiber takviyesi içeren ABS polimer kompozitlere ait eriyik akış hızı (The melt flow rate of ABS polymer composites containing different amounts of carbon fiber reinforcement)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 6mm uzunluğa sahip karbon fiberlerin ABS matris içerisine takviyesi ile üretilen kompozit filamentin üretim aşamaları ve işlem parametreleri incelenmiştir. Kısa karbon fiber takviyesinin ABS'nin mekanik özelliklerini (çekme dayanımı, elastisite modülü, süneklik, tokluk vb) önemli ölçüde etkilediği deneysel olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca kompozit numune anizotropik özellik gösterdiğinden yazdırma deseninin kompozit malzemenin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Mekanik testlerden sonra kısa karbon fiber takviyeli filament ve çekme testinde kullanılan numunenin kesitlerine optik mikroskop yardımıyla bakılarak farklı oranda ki katkılar için porozite oluşumu, kısa karbon fiber yönlendirilmesi ve katmanlar incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıda ki gibi özetlenebilir;

Ticari Ekstrüzyon sıcaklığının ve hızının filament kalitesinde önemli rol oynadığı gözlemlenmiştir. Boş ABS ile kıyaslandığında karbon fiber etkisi doğrusal yazdırmada [0,

90] çekme dayanımını ve elastisite modülünü önemli derecede arttırmıştır. Tokluk ve süneklik ise azalmıştır. Çapraz yazdırmada [-45, 45] ise boş ABS ile kıyaslandığında karbon fiber etkisi elastisite modülünü arttırırken, çekme dayanımı tokluk ve sünekliği azaltmıştır.

Boş ABS için yazdırma deseni mekanik özellikleri kayda değer bir biçimde etkilememesine rağmen karbon fiber katkılı kompozit numunelerde mekanik özellikler yazdırma deseni ile önemli derecede değişmektedir. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler anizotropik özellik göstermektedirler.

Karbon fiber takviyeli kompozitler boş ABS'ye oranla daha kırılğan, gevrek özellik göstermekte ve bufiber takviye oranı ile daha belirgin hale gelmektedir.

Karbon fiber oranı arttıkça gözenek oluşumu çapı küçülerek çoğalmaktadır. Porozite miktarı ve çapı mekanik özellikleri etkilemektedir. Karbon fiber miktarı arttıkça homojen karıştırma işleminde fiberlerin fiziksel kırılması artmış ve kompozit filament içerisindeki ortalama fiber uzunluğu azalmıştır. Fiber boyu çekme dayanımını ve poroziteyi etkilemektedir. EAİ değeri %10 karbon fiber içeren numuneye kadar azalmaktadır. Bu değerden sonra ise ABS'nin üstüne çıkmamak kaydıyla artmaktadır. Fiber boyu, gözenek ve matris-fiber ara yüzeyi kompozit malzemenin akışkanlığını önemli ölçüde etkilemektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, 115C096 numaralı TÜBİTAK BİDEB 2232 Araştırma Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. ASTM F2792e12a, Standard terminology for additive manufacturing technologies, West Conshohocken: ASTM International, 2012.
2. Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S., Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, Material Design 31, 287-295, 2010.
3. Yakovlev A., Trunova E., Grevey D., Pilloz M., Smurov I., Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects, Surface Coatings Technology 190 (1), 15-24, 2005.
4. Williams J.V., Revington R.J., Novel use of an aerospace selective laser sintering machine for rapid prototyping of an orbital blowout fracture, International Journal of Oral Maxillofacial Surgery 39, 182-184, 2010.
5. Vilaro T., Abed S., Knapp W., Direct manufacturing of technical parts using selective laser melting: example of automotive application, Proceedings of 12th European Forum on Rapid Prototyping; 2008.
6. Webb P.A., A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector, Journal

- of Medical Engineering & Technology (J. Med. Eng. Technol.) 24 (4), 149-153, 2000.
7. Rengier F., Mehndiratta A., Tengg-Kobligk H., Zechmann CM., Unterhinninghofen R., Kauczor U., Giesel F.L., 3D printing based on imaging data: review of medical applications, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5, 335-341, 2010.
 8. Kolarevic B., Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age, *Proceedings of Association for Computer Aided Design in Architecture*, 268-277, 2001.
 9. Flowers J. 3D laser scanning in technology education, *Technology Teaching*, 60 (3), 27-30, 2000.
 10. Brandt J., Drechsler K., Arendts F.J., Mechanical performance of composite based on various three dimensional woven-fibre preforms, *Composites Science and Technology (Compos. Sci. Technol.)*, 56, 381-386, 1996.
 11. Dudek P., FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements, *Archives of Metallurgy and Materials (Arch. Metall. Mater.)*, 58 (4), 1415-1418, 2013.
 12. Cooke M.N., Fisher J.P., Dean D., Rinnac C., Mikos A.G., Use of stereolithography to manufacture critical sized 3D biodegradable scaffolds for bone ingrowth, *Journal of Biomedical Materials Research Part A (J. Biomed. Mater. Res. Part B)*, 64 (B), 65-69, 2002.
 13. Kruth J.P., Wang X., Laoui T., Froyen L., Lasers and materials in selective laser sintering, *Assembly Automation*, 23 (4), 357-371, 2003.
 14. Park J, Tari MJ, Hahn HT. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process, *Rapid Prototyping Journal*, 6 (1), 36-50, 2000.
 15. Kai C.C., Fai L.K., Chu-Sing L., *Rapid prototyping: principles and applications in manufacturing*, 2nd ed. Singapore: World Scientific Publishing; 2003.
 16. Wong K.V., Hernandez A., A review of additive manufacturing. *International Scholarly Research Network*, Article ID: 208760, 2012.
 17. Chakraborty D., Reddy A.B., Choudhury, R.A., Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling, *Computer Aided Design*, 40, 235-243, 2008
 18. Comb, J.W., Priedeman W.R., Leavit P.J., Skubic R.L., Batchelder J.S., High-precision modeling filament, patent, 2005.
 19. Marcincinova L.N., Marcincin J.N., Barna J., Torok J., Special materials used in FDM rapid prototyping technology application, *Proceedings of IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, Lisbon, 73-76, 2012.
 20. Tekinalp H.L., Kunc V., Velez-Garcia G.M., Duty C.E., Love L.J., Naskar A.K., Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composite Science Technology*, 105 (10), 144-150, 2014.
 21. Shofner M.L., Lozano K., Rodríguez-Macías F.J., Barrera E.V., Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling, *Journal of Applied Polymer Science (J. Appl. Polym. Sci.)*, 89 (11), 3081-3090, 2003.
 22. Karsli N.G., Aytac A., Tensile and thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composite, *Composites Part B*, 61, 270-275, 2013.
 23. Bijsterbosch H., Gaymans R.J., Polyamide 6-long glass fiber injection moldings, *Polymer Composite*, 16, 363-369, 1995.
 24. Denault J., Vu-Khanh T., Foster B., Tensile properties of injection molded long fiber thermoplastic composites, *Polymer Composite*, 10, 313-321, 1989.
 25. Fu S.Y., Hu X., Yue C.Y., Effects of fiber length and orientation distributions on the mechanical properties of short fiber reinforced polymers- a review, *Materials Science Research International (Mater. Sci. Res. Int.)*, 5, 74-83, 1999.
 26. Ramsteiner F., Theysohn R., Tensile and impact strengths of unidirectional, short fiber-reinforced thermoplastics, *Composites*, 10, 111-119, 1979.
 27. Botelho E.C., Figiel L., Rezende M.C., Lauke B., Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites, *Composites Science Technology*, 63, 1843-1855, 2003.
 28. Li J., Zhang YF., The tensile properties of HNO₃-treated carbon fiber reinforced ABS/PA6 composites, *Surface and Interface Analysis (Surf. Interface Anal.)*, 41, 610-614, 2009.
 29. Li J., Cai CL., The carbon fiber surface treatment and addition of PA6 on tensile properties of ABS composites, *Current Applied Physics (Curr. Appl Phys.)*, 11, 50-54, 2011.
 30. Fu S.Y., Lauke B., Mader E., Yue C.Y., Hu X., Tensile properties of short glass fiber and short carbon fiber reinforced polypropylene composites, *Composites Part A*, 31, 1117-1125, 2000.
 31. Zhong W., Li F., Zhang Z., Song L., Li Z., Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling, *Materials Science Engineering*, 301, 25-30, 2001.
 32. 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* 80, 369-378, 2015.
 33. Ning F., Cong W., Hu Y., Wang H., Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties, *Journal of Composite Materials* 0(0), 1-12, 2016.
 34. Tezcan J., Ozcan S., Gurung B., Filip P., Measurement and analytical validation of interfacial bond strength of PAN fiber reinforced carbon matrix composites, *Journal of Material Science*, 43(5), 1612-1628, 2008.
 35. Tang L.G., Kardos J.L., A review of methods for improving the interfacial adhesion between carbon fiber and polymer matrix, *Polymer Composites*, 18(1), 100-113, 1997.
 36. Li J., Zhang Y.F., The tensile properties of short carbon fiber reinforced ABS and ABS/PA6 composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites (J. Reinf. Plast. Compos.)*, 29 (11), 1727-33, 2010.

37. Pekedis M., Yıldız H., Damage diagnosis of a laminated composite beam and plate via model based structural health monitoring techniques, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31(4), 813-831, 2016.
38. Kara Y., Akbulut H., Mechanical behavior of helical springs made of carbon nanotube additive epoxy composite reinforced with carbon fiber, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32:2, 417-427, 2017.
39. Dogru M.H., An improved algorithm for optimization of composite plates using tsai-wu criteria, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (3), 821-829, 2017.