





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Eriyik Biriktirme Yönteminde Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Ve Parçaların İç Yapısına Etkisinin İncelenmesi

 Efecan KARAMAN ^{a,*},  Oğuz ÇOLAK ^b

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Alanya, TÜRKİYE

^b Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: efecan.karaman@alanya.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.592468

ÖZET

Eriyik biriktirme yöntemi termoplastik esaslı malzemelerin yarı eriyik hale getirilerek birbiri üstüne katman katman yığılması ile üretim gerçekleştiren bir eklemeli imalat teknolojisidir. Eklemeli imalatta plastik esaslı parçaların üretimi için kullanılacak birçok teknoloji bulunmasına karşın, düşük maliyet, düşük artık malzeme oranları ve kullanım kolaylığı gibi nedenlerle en çok tercih edilen yöntem eriyik biriktirme yöntemidir. Yöntem sunduğu avantajların yanı sıra birçok üretim parametresine sahiptir. Bu parametreler üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Bu çalışmada üretim açısı ve doluluk oranı olmak üzere iki farklı üretim parametresi kullanılarak, ABS Plus ve karbon elyaf takviyeli ABS kompozit malzemelerinden test numuneleri üretilmiş ve üretilen numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri sonucu üretim parametrelerinin parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kırık yüzeylerden Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri alınarak, üretim parametrelerinin parça içyapısında meydana getirdiği değişimler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, doluluk oranının artması tüm numunelerde iyi mekanik özellikler gösterirken, farklı üretim açılarının mekanik özellikler üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eriyik biriktirme yöntemi, Üretim açısı, Doluluk oranı, Polimer matrisli kompozitler

The Effects of Process Parameters on Mechanical Properties and Microstructures of Parts in Fused Deposition Modeling

ABSTRACT

Fused deposition modeling is an additive manufacturing technology that produces parts layer by layer deposition of semi molten thermoplastic materials. Although there are many technologies that can be used for the production of plastic based parts in additive manufacturing, the most preferred method is Fused deposition modeling due to low costs, minimal wastage and the ease of use. In addition to the advantages of the method, it has many process parameters. These parameters have an effect on the mechanical properties of the manufactured parts. In this study, test samples were produced from ABS Plus and carbon fiber reinforced ABS composite materials by using two different process parameters as build angle and infill density then tensile tests were performed on the produced samples. As a result of tensile tests, the effects of the process parameters on the mechanical properties of the parts were investigated. Scanning electron microscopy images were taken from the fracture surfaces and the changes caused by the process parameters were evaluated. The results show that the increase in the infill density exhibited an increase in the mechanical properties in all parts and the different build angles have significant effect on determination of mechanical properties.

Keywords: Fused deposition modeling, Build angle, Infill density, Polymer matrix composites

I. GİRİŞ

Eklenebilir imalat, malzemelerin katman katman birbiri üstüne eklenmesi suretiyle üretim yapan ve günümüzde fonksiyonel ürünlerin üretilebildiği yenilikçi bir teknolojidir. Doğduğu ilk yıllarda prototip üretimi amacıyla kullanılan bu teknoloji yıllar içinde artan malzeme çeşitliliği, üretimde kullanılan cihazların iyileştirilmesi ile sektörde bulunan imalat yöntemi kısıtlarını ortadan kaldırarak ilgi odağı olmuş ve önemli sektörlerin makine parkurlarında yerini almıştır. Günümüzde eklenebilir imalat teknolojilerinin kişisel ürünlerin üretiminden havacılık sektöründe kullanılan parçaların üretimine kadar geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır [1]. Üretimde kullanılan malzeme ve katman oluşturma teknikleri esas alındığında birçok eklenebilir imalat teknolojisi olmasına karşın kuşkusuz en yaygın olanı eriyik biriktirme yöntemidir [2]. Yöntemde kullanılan cihazlara nispeten kolay erişim, üretimde kullanılan malzeme çeşidi ve yöntemin kullanım kolaylığı eriyik biriktirme yöntemine olan ilgiyi arttırmaktadır. Eriyik biriktirme yönteminde üretim, filament formundaki termoplastik esaslı malzemenin bir ısıtıcı eleman yardımıyla yarı eriyik hale getirilmesi ve nozul uç vasıtasıyla üretim tablası üzerine katman katman yığılarak katılaşması esasına dayanmaktadır. Katman oluşumu belirlenen parametrelere göre parça oluşana kadar tekrarlı olarak devam etmektedir.

Yöntemde üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde üretimde kullanılan malzemeler ve üretim parametreleri etkili olmaktadır. Üretimde sıklıkla kullanılan malzemeler Akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve Polilaktik asit (PLA) olmakla birlikte son yıllarda saf polimerlerin özelliklerinin iyileştirilmesiyle optimize edilmiş termoplastik malzemeler veya çeşitli katkı elemanları ile desteklenmiş polimer matrisli kompozit malzemeler de kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemde üretilen parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla ideal üretim parametrelerinin belirlenmesi ya da üretimde kullanılan malzemelerin iyileştirilmesi amacıyla çok sayıda çalışma yapılmaktadır [3-6]. Literatürde bu iki amaç doğrultusunda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Tmyrak vd. ABS ve PLA malzemeler kullanarak ürettikleri numunelerde farklı üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Üç farklı katman kalınlığı (0.4, 0.3, 0.2 mm) ve iki farklı üretim açısı (0/90°, 45/-45°) kullanılarak üretilen deney numunelerinde 0.2 mm katman kalınlığı ve 45/-45° üretim açısında en yüksek çekme mukavemeti değeri elde edilirken 0.4 mm ve 0/90° üretim açısında en yüksek elastisite modülü değerleri elde edilmiştir [7]. Nunez vd. ABS-Plus malzeme kullanarak iki farklı katman kalınlığı (0.178 mm, 0.254 mm) ve iki farklı doluluk oranında (%10, %100) ürettikleri numunelerin boyutsal davranışlarını incelemiş, doluluk oranının artması ve katman kalınlığının azalması ile boyutsal doğruluğun arttığını tespit etmiştir [8]. Vicente vd. yaptıkları çalışmada farklı doluluk oranları (%20, %50, %100) ve farklı dolgu desenlerinin (doğrusal, düz çizgi, bal peteği) mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Doluluk oranının artması ile özelliklerin iyileştiği, aynı doluluk oranında üretilen numunelerde bal peteği dolgu deseninin en yüksek mukavemet değerlerini verdiğini belirtmişlerdir [9]. Zekavat vd. nozul sıcaklığının parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. 180-260°C aralığında değişen nozul sıcaklıklarında üretilen numunelerden elde edilen bulgularda düşük üretim sıcaklıklarında tutarsız malzeme yığılması gerçekleştiği ve porozite miktarında artış meydana geldiği, parça kütlelerinde ve kalitesinde önemli oranda düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Üretim sıcaklığının artmasıyla parça kalitesinde iyileşme görüldüğü belirtilmiştir [10]. Kam vd. çalışmalarında eriyik biriktirme yönteminde farklı dolgu desenlerinin PET-G (Polyethylene Terephthalate Glycol) malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve doğrusal düzende oluşturulan numunelerde diğer dolgu desenlerine göre %15 oranında daha yüksek mukavemet değerleri elde etmişlerdir [11]. Üretim parametrelerinin incelendiği çalışmaların yanı sıra bazı çalışmalarda yeni malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmalarda polimer malzemeler, cam elyaf [12], jüt elyaf [13], nano partikül katkıları [14] ve karbon elyaf katkıları [15-17] ile takviye edilmiş ve eriyik biriktirme yönteminde kullanılabilirlikleri incelenmiştir. Elyaf katkıları polimer matris içerisine genellikle toz halde, süreksiz veya sürekli olarak üzere üç farklı formda takviye edilmektedir [18]. Toz halde ve süreksiz formdaki elyaf katkıları polimer matris malzemesi ile homojen karışımı sağlandıktan sonra ekstrüzyon yöntemiyle filament haline getirilmekte ve üretimde kullanılmakta iken sürekli elyaflar farklı nozul uçlarından polimer esaslı filamentler ile eş zamanlı beslenerek üretime dahil edilmektedir [19]. Üretimde kullanılan elyaf çeşitleri, katkı oranları ve üretim

parametrelerine bağı olarak kompozit parçaların mekanik özellikleri çeşitlilik göstermektedir. Ning vd. yaptıkları çalışmada ABS matrisine farklı ağırlık oranlarında 0.1-0.15 mm uzunluğa sahip süreksiz karbon elyaf katkısı ekleyerek mekanik özelliklerde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Ağırlıkça %5 oranına kadar karbon elyaf katkısının mekanik özellikleri iyileştirdiği tespit edilmiştir. Farklı uzunluklardaki elyaf katkıları karşılaştırıldığında elyaf uzunluğunun 0.15 mm olduğu numunelerde daha iyi sonuç elde edildiğini belirtmişlerdir [15]. Ning vd. yaptıkları bir başka çalışmada farklı üretim parametrelerinin kompozit parçaların mekanik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Katman kalınlığının azalması ve üretim hızının düşmesiyle katmanlar arasındaki etkileşimin artarak parça mukavemetini artırdığı bunun yanı sıra üretimde kullanılan nozul sıcaklığı ve üretim açısının mekanik özellikler üzerine ve ürün kalitesi üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada kullanılan iki farklı üretim açısı (0/90°, 45/-45°) karşılaştırıldığında 0/90° üretim açısının en iyi mekanik özellikleri verdiği tespit edilmiştir [20]. Ferreira vd. çalışmalarında ağırlıkça %15 oranında karbon elyaf katkısına sahip PLA kompozit filamentlerini kullanarak ürettikleri numunelerde üretim açısının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. 0°, 90° ve 45/-45° üretim açıları arasında 0° üretim açısı en iyi mekanik özellikleri göstermiştir. 0° üretim açısında karbon elyaf takviyesi ile elastisite modülünü yaklaşık iki kat oranda artarken çekme dayanımında düşüş meydana geldiği vurgulanmıştır [21].

Literatür kapsamında yapılan çalışmalar incelendiğinde bazı sonuçlarda parçaların çekme dayanımı üzerinde etki elde edilememesine rağmen genel olarak takviye elemanlarının eriyik biriktirme yönteminde üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için potansiyel oluşturdukları belirtilmiştir. Bu çalışmada 0.6 mm uzunluğa sahip karbon elyaf takviyesi ile üretilen ABS kompozit filamentleri ve optimize edilmiş yeni ABS Plus filamentleri kullanılarak günümüzde eklemeli imalat teknolojileri için geliştirilmekte olan yeni nesil malzemelerin üretimde kullanılabilirliği ve bu malzemelerin farklı üretim şartlarındaki mekanik özellikleri incelenmiştir. Farklı üretim açıları ve doluluk oranları kullanılarak üretimi gerçekleştirilen numunelere çekme testleri uygulanmış ve üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Ayrıca kırık yüzeylerden alınan görüntüler ile üretim parametrelerinin malzemelerin içyapısına etkileri araştırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Esun™ firmasından temin edilen 1.75 mm çapa sahip ABS Plus filamentleri ve OO-Kuma™ firmasından temin edilen kısa karbon elyaf destekli (ağırlıkça %10, 0.6 mm uzunluk ve 7µm çaplı) ABS kompozit malzeme filamentleri kullanılarak test numuneleri üretilmiştir. Test numunelerinin üretiminde 1000x1000x1000 mm baskı boyutlarına sahip proje kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen deneysel amaçlı üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır. Üretimde kullanılan üç boyutlu yazıcıya ait teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca numunelerin üretiminde 0.4 mm çapa sahip paslanmaz çelik malzemeden yapılmış nozul uçlar kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde kullanılan termoplastik filamentlerde bulunan karbon katkısının aşındırıcı özelliği nedeniyle nozul uçlarında meydana getireceği çapta aşınma ve bozulma sonucu katman kalınlığı ve yığılan malzeme miktarının değişmemesi amacıyla her üretim sonrası nozul uçları değiştirilmiştir.

Tablo 1. Üretimde kullanılan üç boyutlu yazıcı teknik özellikleri

Teknik Özellikler	Değer
Baskı Alanı (mm)	1000x1000x1000
Yazılım	Marlin
Hareket Sistemi	Kartezyen koordinat
Baskı Hassasiyeti (mm)	0.1
Maks. Baskı Hızı (mm/s)	200
Maks. Nozul Sıcaklığı (°C)	280
Maks. Tabla Sıcaklığı (°C)	140

Katman kalınlıkları 0.2 mm olarak belirlenmiş, her numunede kullanılan katman sayısı, ilk katman ve diğer katman kalınlıkları sabit tutulmuştur. Parçaların katman genişliği her test numunesi için 3 adet döngü olacak şekilde ve her döngüde katman genişliği nozul çapına bağlı olarak 1.2 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Üretimlerde kullanılan dolgu deseni, üretim açılarının değiştirilebilmesine imkân tanınması amacıyla doğrusal desen olarak belirlenmiştir. Üretimde kullanılan sabit parametreler sırasıyla Tablo 2’de verilmiştir. İki farklı üretim parametresi ve her parametreden üç farklı seviye belirlenerek test numuneleri üretilmiştir. Üretim için belirlenen parametreler ve bu parametrelerin seviyeleri Tablo 3’te verilmiştir.

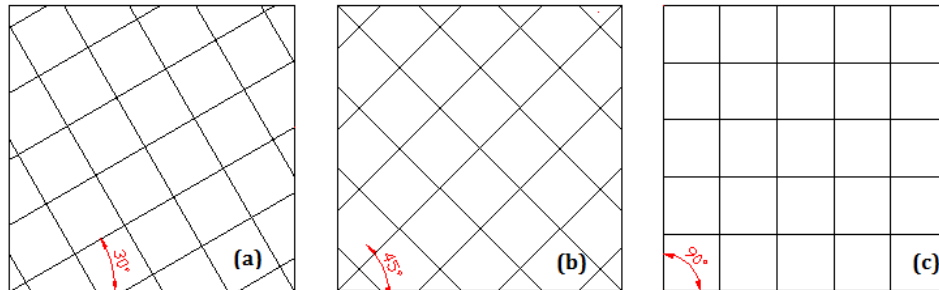
Tablo 2. Üretimde kullanılan sabit parametreler

Parametre	Değer
Nozul Çapı (mm)	0.4
Katman Kalınlığı (mm)	0.2
İlk Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Katman Genişliği (mm)	1.2
Dolgu Deseni	Doğrusal
Nozul Sıcaklığı (°C)	235
Tabla Sıcaklığı (°C)	70
Üretim Hızı (mm/s)	40

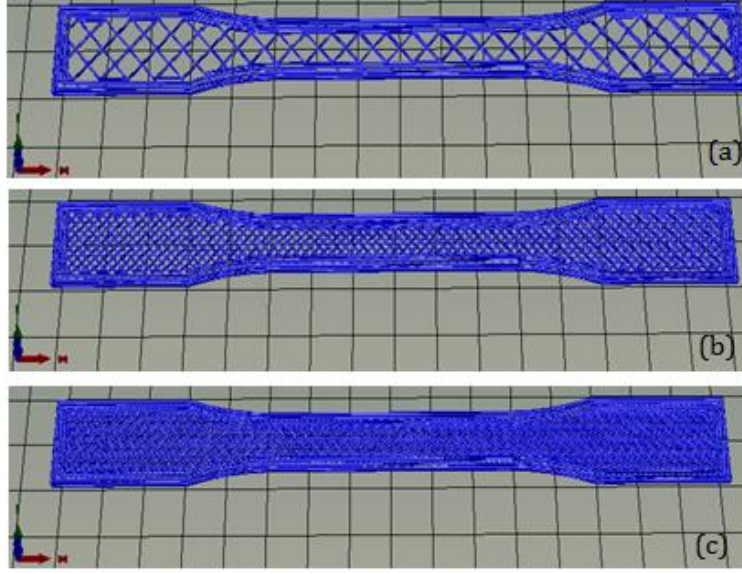
Tablo 3. Üretim parametreleri

Parametre	Değer		
Doluluk Oranı (%)	20	60	100
Üretim açısı (°)	30/-60	45/-45	90/0

Test numuneleri, ASTM D638 standardı Tip-1 numune ölçülerine uygun olarak Solidworks katı modelleme programında çizilmiş ve stl formatına dönüştürülerek Slic3r dilimleme programına aktarılmıştır. Test numuneleri 3 mm kalınlıklarda üretilmiş ve her test numunesi 15 adet katmandan oluşmuştur. Her doluluk oranı ve üretim açısı için 5’er adet test numunesi üretilmiştir. Test numunelerinin üretiminde kullanılan açılarda elyaf lar birbirine göre dik açılı bir nozul hareketiyle yığılmaktadır. Örneğin 90°/0° üretim açısı baz alındığında ilk katman x eksenine 90°’lik açı yaparak üretim tablası üzerine malzeme yığarken ikinci katmanda x eksenine göre 0°’lik açıda malzeme yığılmaktadır. Üretim her katmanda belirlenen açılarda ardışık olarak malzeme yığılması ile parça tamamlanana kadar devam etmektedir. Test numunelerinin üretiminde kullanılan üç farklı üretim açısı ve doluluk oranları Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir.

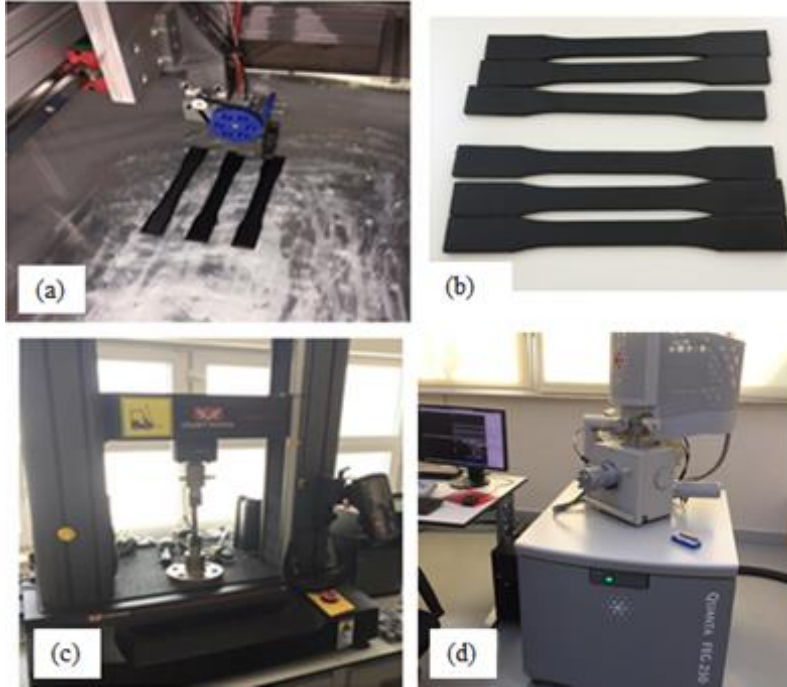


Şekil 1. (a) 30°/-60° üretim açısı, (b) 45°/-45° üretim açısı ve (c) 90°/0° üretim açısı



Şekil 2. Farklı doluluk oranlarında test numuneleri (a) %20 doluluk oranı (b) %60 doluluk oranı ve (c) %100 doluluk oranı

Çekme deneyleri 30 kN yük kapasitesine sahip Instron 5967 üniversal test cihazı kullanılarak ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri ASTM D638 standardına uygun olarak 5 mm/min çekme hızında gerçekleştirilmiş ve veriler 0.1 s aralıklarla Bluehill yazılımında toplanmıştır. Çekme deneyleri sonrası parçaların kırık yüzeyleri Quanta FEG-250 SEM kullanılarak alınan görüntüler ile değerlendirilmiştir. Deney numunelerinin üretimi, çekme testleri ve kırık yüzey incelemeleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Deney numunelerinin üretimi (a), deney numuneleri (b), çekme testleri (c), kırık yüzey incelemeleri (d)

III. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

A. ÇEKME DENEY SONUÇLARI

Deney grubunda ele alınan üç farklı doluluk oranı ve üç farklı üretim açısına göre üretilen deney numunelerinin çekme testleri sonucu elde edilen gerilme şekil değiştirme diyagramları Şekil 4'te, mekanik değerler Tablo 4'te verilmiştir. Deneylerde, doluluk oranlarının artması tüm üretim açılarında mekanik özellikleri iyileştirdiği tespit edilirken üretim açılarının numunelerin karakteristik özelliklerinde farklılıklar gösterdiği görülmüştür. %20 doluluk oranında ve farklı üretim açılarında üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde üretim açılarının tümünde ABS Plus malzemelerden elde edilen çekme mukavemeti değerleri karbon katkılı numunelere göre yüksek ölçülmüştür. Katman içinde boşluk oluşumuna bağlı olarak oluşturulan elyaf sıklığının düşük olması elyaflar arasındaki yük transferini azaltmıştır. Bu nedenle karbon katkısı numunelerde önemli bir mukavemet değişimi göstermemiştir.

Elde edilen mekanik değerler incelendiğinde %20 doluluk oranında her iki malzeme için de en yüksek çekme mukavemeti 30°/-60° üretim açısında elde edilmiştir. Bu değerler, ABS Plus malzemede ortalama 22.19 MPa civarında iken karbon katkılı kompozit malzemelerde 21.08 MPa olarak elde edilmiştir. Yüzde uzama değerleri incelendiğinde, en yüksek yüzde uzama, her iki malzeme için de 45°/-45° üretim açısında elde edilirken ABS Plus malzemede %6.42, karbon takviyeli numunelerde %58 oranında düşüş ile %2.65 olarak bulunmuştur. Gerilme şekil değiştirme diyagramlarında, ABS Plus malzemeden üretilmiş numuneler karbon elyaf katkılı numunelere kıyasla nispeten sünek davranış gösterirken, karbon elyaf takviyeli numunelerde takviye etkisiyle gevrek davranış elde edilmiştir. Karbon katkısı ile malzemelerde oluşan rijit yapıdan dolayı esneme kabiliyeti azalmış ve şekil değiştirme oranları yarı yarıya düşmüştür. %20 doluluk oranına sahip tüm üretim açılarında karbon takviyesi ile elastisite modüllerinde artış görülmüştür. En yüksek elastisite modülü ABS Plus malzemede 90°/0° üretim açısında 0.64 GPa iken karbon elyaf takviyeli numunelerde %89 artarak 1.21 GPa olarak bulunmuştur. %60 doluluk oranında üretilen numunelerde doluluk oranının artması ile parça iç bölgesindeki boşluk oranı azalmakta bu nedenle dolgu deseni daha fazla miktarda malzeme yığılarak oluşturulmaktadır. Tmyrak vd. ile Vicente vd. yaptıkları çalışmalara benzer şekilde doluluk oranının artması sonucu hacimce daha az boşluk meydana geldiğinden bağlar arasında tutunma artmış ve tüm numunelerde mukavemet artışı görülmüştür [7, 9]. Qattawi yaptığı çalışmada doluluk oranını arttırmanın mekanik özellikleri artırdığı ancak parçalarda boyutsal hataları minimize etmek için doluluk oranının düşürülmesi gerektiğini belirtmiştir [24].

Tablo 4. Deneyler sonucu elde edilen ortalama mekanik değerler

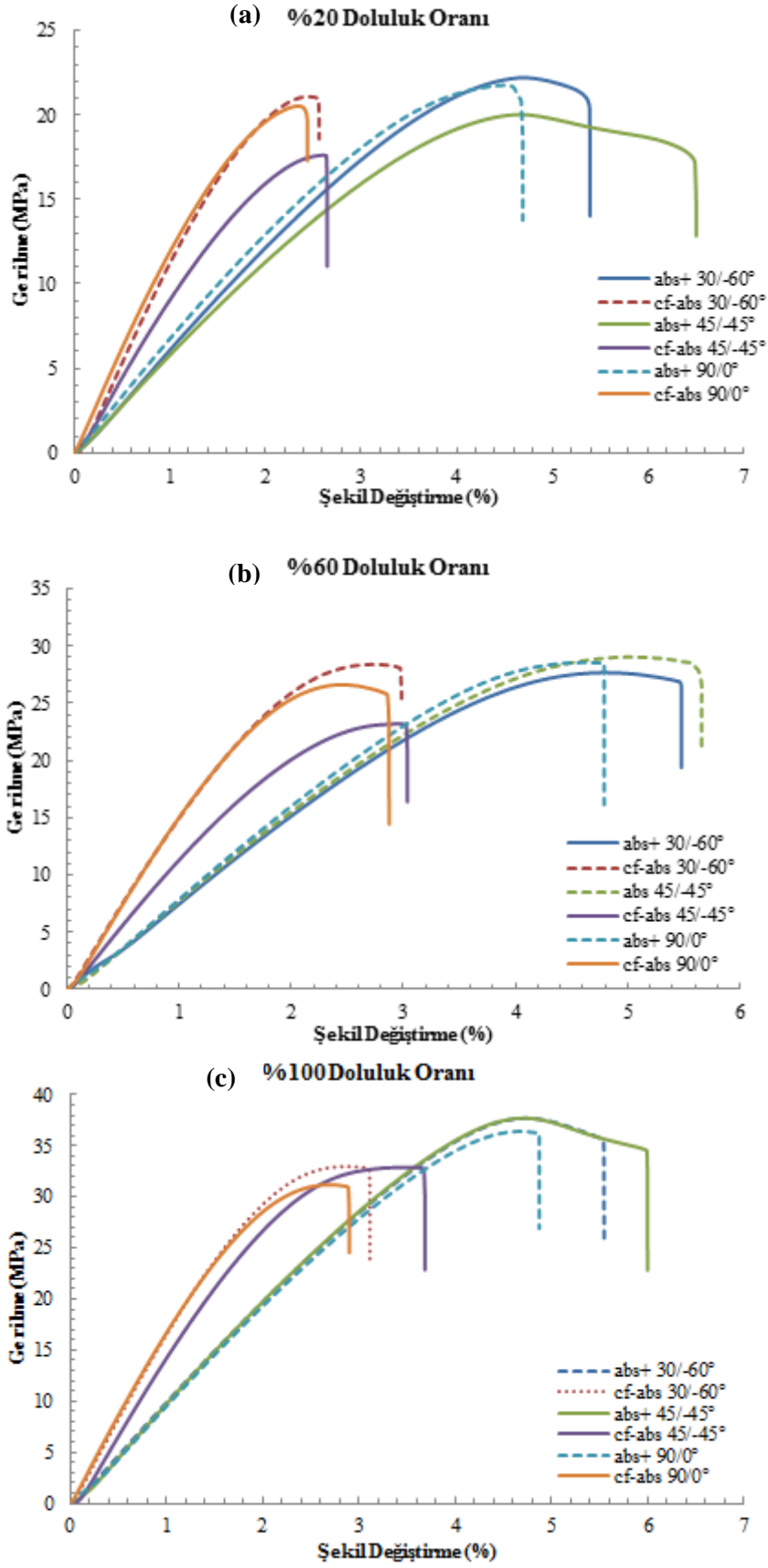
Malzeme	Doluluk Oranı (%)	Üretim Açısı (°)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Şekil Değiştirme (mm)
ABS+	%20	30°/-60°	22.19±0.13	0.60±0.01	0.0545
CF-ABS	%20	30°/-60°	21.08±0.12	1.10±0.09	0.0257
ABS+	%20	45°/-45°	19.90±0.17	0.55±0.01	0.0642
CF-ABS	%20	45°/-45°	17.62±1.53	0.89±0.08	0.0265
ABS+	%20	90°/0°	21.76±0.14	0.64±0.02	0.0481
CF-ABS	%20	90°/0°	20.76±0.27	1.21±0.008	0.0245
ABS+	%60	30°/-60°	27.93±0.31	0.77±0.01	0.0547
CF-ABS	%60	30°/-60°	28.44±0.19	1.54±0.03	0.0291
ABS+	%60	45°/-45°	29.03±0.04	0.84±0.13	0.0566

Tablo 4. (devam) Deneyler sonucu elde edilen ortalama mekanik değerler

CF-ABS	%60	45/-45°	23.19±0.48	1.12±0.09	0.0304
ABS+	%60	90°/0°	28.17±3.3	0.78±0.04	0.0479
CF-ABS	%60	90°/0°	26.22±0.52	1.50±0.002	0.0287
ABS+	%100	30°/-60°	37.67±0.10	0.99±0.02	0.0578
CF-ABS	%100	30°/-60°	32.82±0.14	1.67±0.02	0.0308
ABS+	%100	45/-45°	37.57±0.57	0.98±0.06	0.0602
CF-ABS	%100	45/-45°	32.78±0.84	1.41±0.04	0.0363
ABS+	%100	90°/0°	36.28±0.32	0.95±0.05	0.0487
CF-ABS	%100	90°/0°	31.76±1.26	1.66±0.11	0.0294

%60 doluluk oranında ABS Plus malzeme için en yüksek çekme mukavemeti, 45/-45° üretim açısında 29 MPa iken karbon takviyeli numunelerde 30/-60° üretim açısında 28.44 MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen mekanik değerler incelendiğinde, ABS Plus numunelerden farklı üretim açılarında elde edilen mekanik değerler ortalama %4 değişim gösterirken, karbon elyaf takviyeli numunelerde elde edilen mekanik değerlerde farklı üretim açılarında göre ortalama %20 oranında değişim gözlenmiştir. Karbon elyaf takviyesiyle matris malzemesi anizotropik özellik göstermekte ve karbon elyaf yönelimine göre farklı üretim açılarında mekanik özelliklerde değişim meydana gelmektedir.

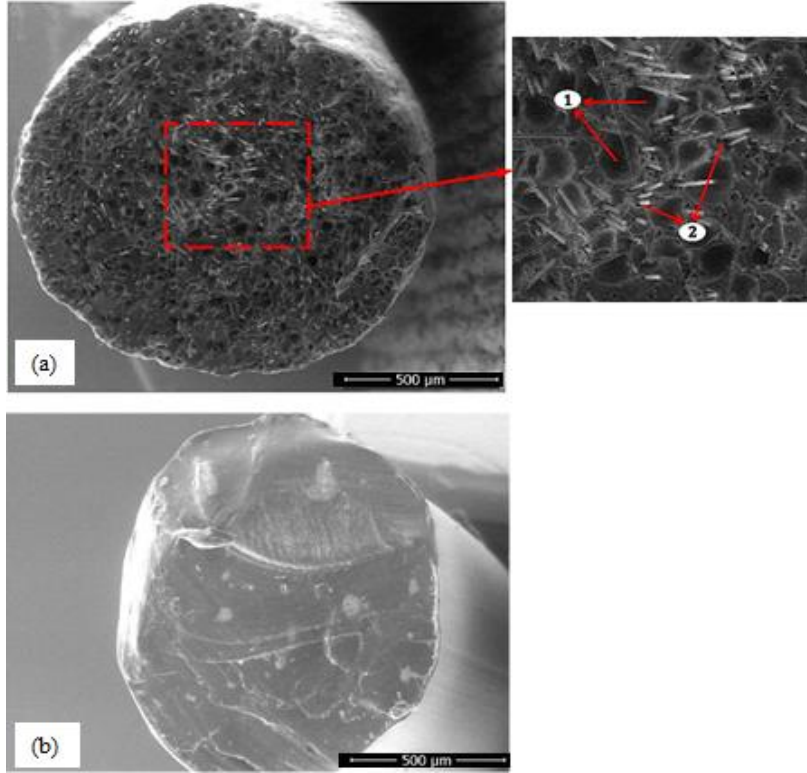
%100 doluluk oranında üretilen numunelerin gerilme şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde, tüm üretim açılarında mekanik özelliklerde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. %100 doluluk oranında yani tam dolu numunelerde yığılan malzeme miktarı arttıkça katmanlar arası yapışma ve bağlanmanın arttığı, gelen yükleri taşıma kabiliyetinin iyileştiği görülmektedir. %20 doluluk oranından %100 doluluk oranına geçildiğinde tüm numunelerdeki çekme mukavemeti değerleri, ortalama %70 oranında artış göstermiştir. %100 doluluk oranında en iyi dayanım değerleri her iki malzeme içinde 30/-60° üretim açısında elde edilmiştir. ABS Plus malzeme için en yüksek çekme dayanımı 37.67 MPa iken karbon takviyeli kompozit malzemede bu değer %12 oranında düşüş ile 32.82 MPa olarak bulunmuştur. Tüm üretim açılarında ABS Plus malzemede elde edilen çekme dayanımları, karbon katkılı numunelere kıyasla daha yüksek olmuştur. Karbon katkısının, termoplastik malzemenin çekme mukavemetinde belirgin bir artış meydana getirmemesinin nedeni kırık yüzey incelemelerinde araştırılmıştır. %100 doluluk oranında elde edilen elastisite modülü değerleri incelendiğinde karbon elyaf takviyeli kompozitlerin farklı üretim açılarında, ABS Plus malzemeye kıyasla elastisite modüllerinde yaklaşık %70 oranda artış görülmüştür. %100 doluluk oranında en yüksek elastisite modülü 30/-60° üretim açısında ABS Plus malzemede 0.99 GPa iken karbon takviyeli kompozit malzemede 1.67 GPa olarak bulunmuştur. Dolayısıyla karbon elyaf takviyesinin malzeme rijitliğini önemli oranda etkilediği görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Ning vd. %10 karbon elyaf içeriğine sahip kompozit numunelerde 45/-45° üretim açısında 34 MPa'lık çekme dayanımı elde ederken Jiang vd. 0° üretim açısında 50 MPa değerinde çekme mukavemeti ve 7.1 GPa değerinde elastisite modülü elde etmişlerdir [15,25]. Çalışmalardan elde edilen sonuçlarda meydana gelen farklılıklar üretimde kullanılan malzemelerin farklı firmalardan temini ve kompozit hazırlama esnasında meydana gelen takviye eleman boyutlarındaki değişim, üç boyutlu yazıcıların farklı markalara ait olması ve teknik özelliklerinin değişkenlik göstermesi, ortam koşulları, test koşulları ve üretim parametrelerinin farklılaşması gibi nedenlerle ortaya çıkmaktadır [26].



Şekil 4. Farklı üretim açıları ve doluluk oranlarında üretilen numunelerden elde edilen gerilme şekil değişirme diyagramları %20 doluluk oranı (a), %60 doluluk oranı (b), %100 doluluk oranı (c)

B. KIRIK YÜZEY ANALİZLERİ

Çekme testleri gerçekleştirilen numunelerde karbon takviyesinin çekme mukavemetinde bir artış meydana getirmekten elastisite modülü değerleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Çekme dayanımında meydana gelen düşüş nedenleri farklı üretim parametrelerine göre üretilen numunelerin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri ile incelenmiştir. ABS Plus malzemeye ait filament kesiti incelendiğinde içyapıda boşluk oluşumu gözlenmezken, karbon elyaf takviyeli kompozit filament içyapısında önemli oranda gözenek oluşumu tespit edilmiştir. Şekil 5’de her iki malzemeye ait SEM görüntüleri verilmiştir.

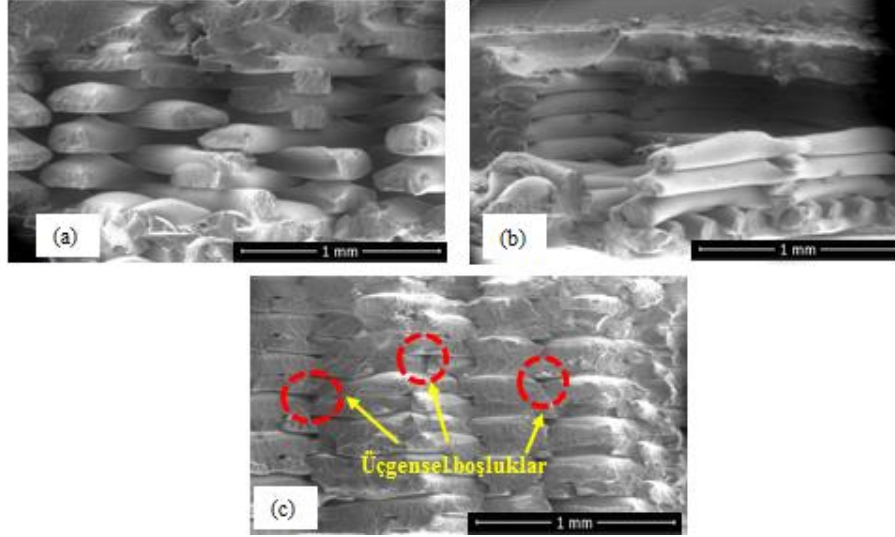


Şekil 5. Karbon elyaf takviyeli kompozit filament ve iç yapısında gözeneklilik oluşumu (a), ABS Plus filament iç yapısı (b)

Karbon elyaf takviyeli filament içyapısı incelendiğinde iki farklı tipte boşluk oluşumu görülmektedir. Şekil 5a’da verilen karbon elyaf katkılu filament içyapısında oluşan (1) numaralı boşluk tipi, filament üretimi esnasında gaz sıkışması kaynaklı oluşmakta, (2) numaralı boşluk tipi ise karbon elyaf ile matris malzemesi arasında düşük yapışma nedeniyle meydana geldiği görülmektedir. Bu boşluk tipi, çekme işlemi sonucu oluşan kopma yüzeyinde bulunan karbon elyaf takviyesinin matris malzemesinden ayrılması ile daha belirgin olmaktadır. Ning vd. ile Lopes vd. yaptıkları çalışmalarda, karbon takviyeli filament içyapılarında aynı tipte boşluk oluşumları gözlemlendiği ve bu tip gözenek yapısının mukavemet düşüşü ile sonuçlandığını belirtmiştir [15,22].

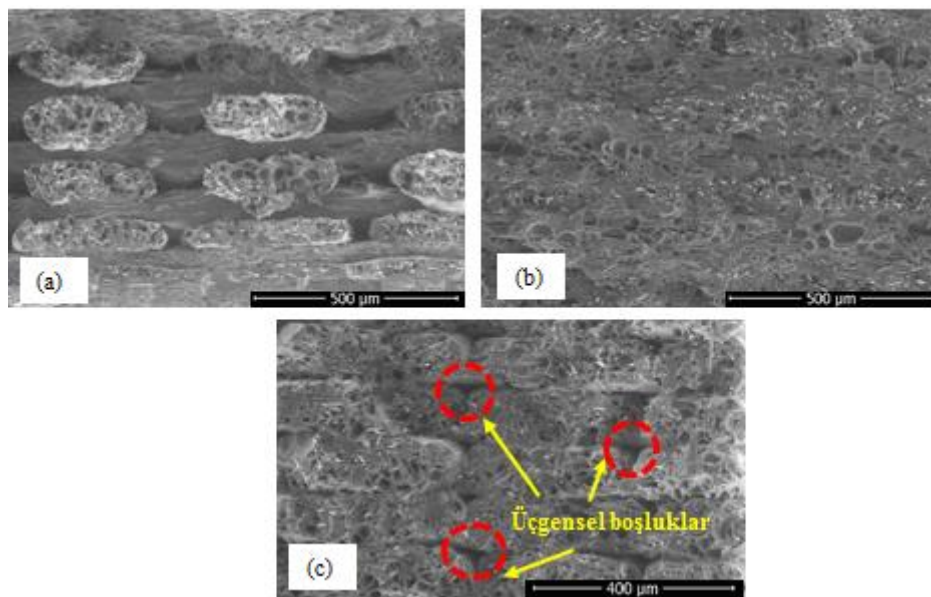
Farklı doluluk oranlarında (%20, %60, %100) üretilen test numunelerinin kırık yüzeyleri ABS Plus malzeme için Şekil 6’da karbon elyaf takviyeli ABS kompozit malzeme için Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 6a’da gösterildiği gibi %20 doluluk oranında üretilen numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde, doluluk oranına bağlı parça iç bölgesindeki boşluk oranının fazla olduğu görülmekte iken doluluk oranı arttıkça boşluk oluşumu azalmıştır. Boşluk oluşumunun azalması ile katmanlar arası tutunmanın iyileştiği görülmüştür. Dolayısıyla katman yapışmasındaki artış ile tüm numunelerde çekme dayanımı artmıştır. Şekil 6c’de gösterildiği gibi %100 doluluk oranında üretilen numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde elyaf lar da boyun vermenin olduğu ve bir sonraki elyaf ile etkileşiminin arttığı tespit edilmiştir. Ancak %100 doluluk oranlarında belirgin olarak katmanlar arasında üçgensel boşlukların

meydana geldiği görülmüştür. Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan nozul uçların dairesel kesite sahip olması yığılan malzemenin de dairesel kesitli olarak nozul uçtan çıkmasına sebep olmaktadır. Katman oluşumu esnasında yarı eriyik haldeki filament, nozul ucun uyguladığı basınç ile eliptik form almakta ve yığılırken önceki katman ile birleşen alt bölgelerde yassılaşıma olmaktadır. Malzeme alt bölgesi bir önceki katmana doğrusal şekilde yığılıp katılırken, üst bölgedeki katılma eliptik şekilde olmaktadır [23]. Eriyik biriktirme yönteminde üretim süreci periyodik olarak katmanların birbiri üzerine yığılması esasına dayandığı için her katman birleşiminde, malzeme alt bölgesinin düzgün şekilli olması ve üst bölgenin eliptik şekilli olmasından kaynaklı aşağı yönlü üçgensel boşluklar oluşmaktadır.



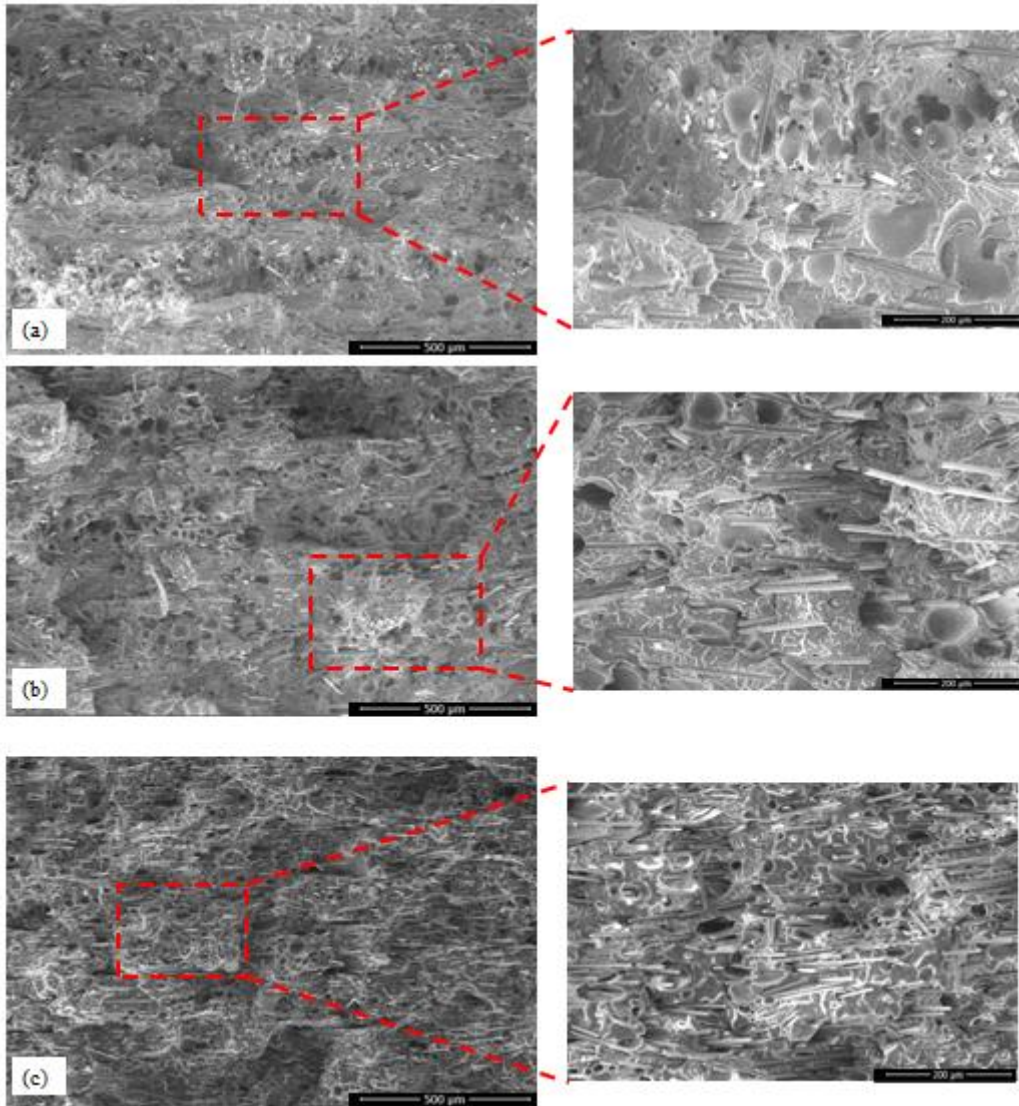
Şekil 6. Farklı doluluk oranlarında ABS Plus numunelerin kırık yüzeyleri, (a) %20, (b) %60 ve (c) %100 doluluk oranları

Şekil 7a ve Şekil 7b'de gösterildiği gibi karbon elyaf takviyeli malzemelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde doluluk oranı arttıkça katman içindeki elyaf sıklığı ve elyaflar arasındaki etkileşim artarken tüm doluluk oranlarında boşluk oluşumunun oldukça yoğun olduğu görülmüştür. Ning vd. çalışmalarında bu tür boşluk oluşumlarının ekstrüzyon aşamasında gaz sıkışması kaynaklı oluştuğunu belirtmiştir [15]. Eriyik biriktirme yönteminde sıkça görülen üçgensel boşluk oluşumunun karbon elyaf takviyeli numunelerde de mevcut olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7c).



Şekil 7. Farklı doluluk oranlarına karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerin kırık yüzeyleri, (a) %60, (b) %100 ve (c) üçgensel boşluk oluşumu

Farklı üretim açılarında ($30/-60^\circ$, $45/-45^\circ$, $90/0^\circ$) üretilen numunelerin kırık yüzeyleri Şekil 8'de incelenmiştir. Tüm üretim açılarında karbon elyaf takviyeli numunelerde filament üretimi esnasında gaz sıkışması kaynaklı boşlukların önemli oranda olduğu görülürken ABS numunelerde bu tür boşluklara rastlanmamıştır. Karbon elyaf takviyeli numunelerde oluşan bu boşlukların katman içindeki malzeme yoğunluğunu azalttığı dolayısıyla mukavemeti olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Karbon katkılı numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde, elyafların çoğunlukla üretim açlarına göre yönlendiği tespit edilmiştir. Ancak tüm üretim açılarında matris ile elyaf yüzeyleri arasında boşluk oluşumunun meydana geldiği ve fiber ayrılmalarının olduğu görülmektedir. Bu durum matris elyaf yapışma kabiliyetinin düşük olduğunu göstermektedir. Zayıf yapışma sonucu matris ile elyaf arasında yük iletimi sağlanamamış dolayısıyla oluşan porozite yoğunluğunun da etkisiyle katkısız termoplastik malzemeye kıyasla çekme dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Ferreira vd. PLA matrisine karbon elyaf takviyesi ile ürettikleri kompozit numunelere, uyguladıkları çekme testleri sonrası iç yapı incelemeleri yapmışlar ve PLA matris malzemesi ile karbon elyaf takviyesi arasındaki düşük yapışma kabiliyetleri dolayısıyla çekme dayanımlarında düşüş meydana geldiğini belirtmişlerdir [21].



Şekil 8. %100 doluluk oranında $90/0^\circ$ (a), $45/-45^\circ$ (b) ve $30/-60^\circ$ (c) üretilen karbon elyaf takviyeli numunelerde elyaf yönlenmesi

Kırık yüzeyi incelenen bazı numunelerde, belirli bölgelerde dairesel şekilli ve elyaf çapına benzer boşluklar görülmektedir. Bu boşluklar numunenin yüke maruz kalması esnasında elyafların matris ara yüzeyi içinde koptuğunu göstermektedir. Bu durum, o bölgelerde matris elyaf bağlanmasının iyi olduğu

ve elyafların yük taşınmasında matris malzemesine katkıda bulunduğunu belirtmektedir. Elyaf kopmasıyla oluşan boşluk türü en sık 30/-60° üretim açısında üretilen numunelerde görülürken en az 90/0° üretim açısında üretilen numunelerde görülmüştür. Ancak genel yapıya bakıldığında elyaf ayrılması kaynaklı oluşan boşluk türünün, elyaf kopması sonucu oluşan boşluk türünden daha sık olduğu görülmüştür.

IV. SONUC

Eriyik biriktirme yönteminde üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde üretim parametreleri etkili olmaktadır. Bu çalışmada iki farklı üretim parametresinin ABS Plus ve karbon elyaf katkılı ABS kompozit filamentleri kullanılarak üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneylemlerden elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir;

- Doluluk oranının artması, malzemelerden elde edilen mekanik özelliklerin artmasını sağlamıştır. Tüm doluluk oranları ve üretim açılarında karbon elyaf takviyesinin malzemenin rijitliğini önemli oranda arttırdığı görülürken malzemeye gevrek özellik kazandırmış ve yüzde uzama değerlerini yarı oranda düşürmüştür. Karbon elyaf katkısının elastisite modülüne önemli katkı sağladığı görülürken, çekme dayanımını iyileştirmeye etki etmemiştir.
- En yüksek çekme dayanımı her iki malzeme içinde %100 doluluk oranı ve 30/-60° üretim açısında ABS Plus malzeme ve karbon elyaf destekli ABS kompozit malzeme için sırasıyla 37.67 MPa ve 32.82 MPa olarak bulunmuştur. Karbon elyaf katkısı ABS Plus malzemeye kıyasla çekme mukavemetinde %14 oranında bir düşüş meydana getirirken elastisite modülü %68 oranında arttırmıştır. Karbon elyaf takviyeli ABS ve ABS Plus malzemelerinin her ikisinde de en yüksek elastisite modülü değerleri 30/-60 üretim açısı ve %100 doluluk oranında sırasıyla 1.67 GPa ve 0.99 GPa olarak hesaplanmıştır.
- Kırık yüzey incelemelerinde karbon elyaf katkılı numunelerin içyapısında önemli oranda boşluk oluşumu tespit edilmiş ve matris elyaf ara yüzünde düşük yapışma kaynaklı elyaf ayrılmaları görülmüştür. Çekme dayanımındaki düşüşe, içyapıda bulunan boşluk oluşumunun ve matris elyaf arasında düşük yapışmadan kaynaklı matris malzemesi ile karbon elyaflar arasında yük transferinin yeterli oranda sağlanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 1605F440).

V. KAYNAKLAR

- [1] A. L. Verhoef, B. W. Budde, C. Chockalingam, B. G. Nodar ve A. J. van Wijk, "The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach," *Energy Policy*, c. 112, ss. 349-360, 2018.
- [2] I. Gibson, W. D. Rosen ve B. Stucker, *Additive manufacturing technologies*, 2. Baskı, New York, USA: Springer, 2010, ss. 147-173.
- [3] B. Sağbaş, "Surface texture characterization and parameter optimization of fused deposition modelling process," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, s. 4, ss. 1028-1037, 2018.
- [4] K. J. Christiyan, U. Chandrasekhar, K. Venkateswarlu, "A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, c. 114, s. 1, 2016.

- [5] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, P. J. Núñez, “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,” *Materials & Design*, c. 124, ss. 143-157, 2017.
- [6] T. J. Coogan, D. O. Kazmer, “Bond and part strength in fused deposition modeling,” *Rapid Prototyping Journal*, c. 23, s. 2, ss. 414-422, 2017.
- [7] B. M. Tymrak, M. Kreiger and J. M. Pearce, “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions,” *Materials and Design*, c. 58, ss. 242-246, 2014.
- [8] P. J. Nuñez, A. Rivas, E. García-Plaza, E. Beamud and A. Sanz-Lobera, “Dimensional and surface texture characterization in fused deposition modelling (FDM) with ABS Plus,” *Procedia Engineering*, c. 132, ss. 856-863, 2015.
- [9] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz, A. Conejero, “Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing,” *3D printing and additive manufacturing*, c. 3, s. 3, ss. 183-192, 2016.
- [10] M. Vishwas, C. K. Basavaraj, M. Vinyas, “Experimental investigation using taguchi method to optimize process parameters of fused deposition Modeling for ABS and nylon materials,” *Materials Today: Proceedings*, c. 5 s. 2, ss. 7106-7114, 2018.
- [11] M. Kam, H. Saruhan, A. İpekçi, “Farklı doldurma şekillerinin üç boyutlu yazıcılarda üretilen ürünlerin mukavemetine etkisi,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, s. 3, ss. 951-960, 2019.
- [12] W. Zhong, F. Li, Z. Zhang, L. Song ve Z. Li, “Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling,” *Materials Science and Engineering: A*, c. 301, s. 2, ss.125-130, 2001.
- [13] R. Matsuzaki, M. Ueda, M. Namiki, T. K. Jeong, H. Asahara, K. Horiguchi ve Y. Hirano, “Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation,” *Scientific reports*, c. 6, ss.1-7, 2016.
- [14] S. Dul, L. Fambri ve A. Pegoretti, “Fused deposition modelling with ABS–graphene nanocomposites,” *Composites Part A*, c. 85, ss.181-191, 2016.
- [15] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei ve S. Wang, “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling,” *Composites Part B*, c. 80, ss.369-378, 2015.
- [16] L. J. Love, V. Kunc, O. Rios, C. E. Duty, A. M. Elliott, B. K. Post, C. A. Blue, “The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing,” *Journal of Materials Research*, c. 29, s. 17, ss. 1893-1898, 2014.
- [17] L. G. Blok, M. L. Longana, H. Yu, B. K. Woods, “An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites,” *Additive Manufacturing*, c. 22, ss. 176-186, 2018.
- [18] I. Fidan, A. Imeri, A. Gupta, S. Hasanov, A. Nasirov, A. Elliott, N. Nanami, “The trends and challenges of fiber reinforced additive manufacturing,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 102 s.5-8, ss. 1801-1818, 2019.

- [19] T. N. A. T. Rahim, A. M. Abdullah, H. Md Akil, "Recent Developments in Fused Deposition Modeling-Based 3D Printing of Polymers and Their Composites," *Polymer Reviews*, c. 59, s. 4, ss. 589-624, 2019.
- [20] F. Ning, W. Cong, Y. Hu, H. Wang, "Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties," *Journal of Composite Materials*, c. 51, s. 4, ss. 451-462, 2017.
- [21] R. T. L. Ferreira, I. C. Amatte, T. A. Dutra, D. Bürger, "Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers," *Composites Part B: Engineering*, c. 124, ss. 88-100, 2017.
- [22] B. J. Lopes, J. R. M. d'Almeida, "Development And Characterization Of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics–Part B: Mechanical Properties And Microstructural Analysis," 4th Brazilian Conference on Composite Materials, Rio de Janeiro, Brazil, 2018.
- [23] H. L. Tekinalp, V. Kunc, G. M. Velez-Garcia, C. E. Duty, L. J. Love, A. K. Naskar and S. Ozcan, "Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing," *Composites Science and Technology*, c. 105, ss. 144-150, 2014.
- [24] A. Qattawi, "Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method," *Journal of Manufacturing Processes*, c. 36, ss. 164-174, 2018.
- [25] D. Jiang, D. E. Smith, "Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication," *Additive Manufacturing*, c. 18, ss. 84-94, 2017.
- [26] N. G. Tanikella, B. Wittbrodt, J. M. Pearce, "Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing," *Additive Manufacturing*, c. 15, ss. 40-47, 2017.