



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

3B YAZICILAR İÇİN CAM FİBER KATKILI KOMPOZİT FİLAMENT ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

MANUFACTURING AND MECHANICAL PROPERTIES OF A GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITE FILAMENT FOR 3D PRINTERS

Yazarlar (Authors): Suat Altun^{ID*}, Buğra Sekban^{ID}



Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Altun S., Sekban B., "3B Yazıcılar İçin Cam Fiber Katkılı Kompozit Filament Üretimi ve Mekanik Özellikleri" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(1): 64-77, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1262980

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

3B YAZICILAR İÇİN CAM FİBER KATKILI KOMPOZİT FİLAMENT ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Suat Altun^a , Buğra Sekban^b 

^aKarabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE
^bErzurum Şehir Hastanesi, Üniversite Mahallesi, Çat Yolu Caddesi, Erzurum, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: saltun@karabuk.edu.tr

(Received: 10.03.2023; Revised: 28.03.2023; Accepted: 25.04.2023)

ÖZ

3B yazıcıların hızlı prototipleme ve özel üretim alanlarında kullanımı hızla artmaktadır. En yaygın kullanılan 3B yazıcı teknolojisi olan eriyik biriktirme yönteminde (FDM), polilaktik asit (PLA) malzeme yaygın olarak tercih edilmektedir. 3D yazıcı baskılarının prototip veya model üretiminin ötesinde kullanılabilir parça üretiminde kullanılabilmesi için kullanılan filamentlerin mekanik özelliklerinin de geliştirilmesi gerekli olmuştur. Bu amaçla takviyeli kompozit filamentlerin geliştirilmesi önemlidir. Bu çalışmada ana amaç cam lifi takviyeli kompozit PLA filament üreterek, özellikle eğilme ve darbe direnci daha yüksek, kullanılabilir parçaların 3B yazıcı ile üretilmesine olanak sağlamaktır. Bu amaçla PLA termoplastik malzemeye %5, %10 ve %15 oranlarında cam lifi (CL) katkısı yapılarak çift vidalı ekstrüderde kompozit granül elde edilmiş ve bu granüllerden de 1,75 mm çapında 3B yazıcı filamenti üretilmiştir. Elde edilen kompozit filament kullanılarak 3B yazıcıda yazdırılan parçaların çekme dayanımı (ASTM D638), eğilme dayanımı (ASTM D790) ve darbe direnci (ASTM D6110) değerleri belirlenerek saf PLA'dan üretilen örneklerin değerleriyle karşılaştırılmıştır. 3B yazıcıda parça üretim sürecinde yazdırma parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi amacıyla da, %10, %50 ve %90 olmak üzere üç farklı doluluk oranı; rectilinear, grid ve honeycomb yazdırma geometrileri ile 190°C ve 210°C yazdırma esnasında ekstrüder sıcaklığı parametreleri kullanılarak deney örnekleri hazırlanmıştır. PLA malzemeye CL katkısı mekanik özellikleri etkilemiş, %5 CLT katkısı ile çekme dayanımında %28, eğilme dayanımında %24 artış; %10 CL katkısı ile de darbe direncinde %8,6 artış elde edilmiştir. CL katkı oranının %15 olması durumunda ise mekanik dirençlerde azalma meydana gelmiştir. Yazdırma parametrelerinden doluluk oranı ile mekanik özellikler arasında doğrusal bir ilişki olduğu ancak yazdırma geometrisi ve sıcaklığının önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3B Yazıcı, PLA, Cam Lifi, Kompozit Filament.

MANUFACTURING AND MECHANICAL PROPERTIES OF A GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITE FILAMENT FOR 3D PRINTERS

ABSTRACT

The use of 3D printers in rapid prototyping and specialty manufacturing areas is increasing rapidly. In the melt deposition method (FDM), which is the most widely used 3D printer technology, polylactic acid (PLA) material is widely preferred. In order for 3D printing to be used in the production of usable parts beyond prototype or model production, it was necessary to improve the mechanical properties of the filaments used. For this purpose, it is important to develop reinforced composite filaments. In this study, the main purpose was to produce glass fiber reinforced PLA composite filament, which has particularly higher bending and impact resistance and to allow producing parts which can be used as a functional part by using a 3D printer. In the study, to produce composite granule, glass fiber powder (GF) were added by 5%, 10% and 15% to a thermoplastic PLA by using a twin-screw extruder. With

these granules, 1,75 mm filament was extruded by using single screw extruder. In order to determine the mechanical properties of the 3D printed specimens, tensile test (ASTM D638), flexural test (ASTMD790) and impact strength (ASTM D6110) test performed. To determine the effect of the printing parameters on the mechanical properties of the printed specimens, three infill geometries (Grid, Rectilinear, Full honeycomb), three infill rate (10%, 50%, 90%) and two nozzle temperatures (190°C and 210°C) were used. Addition of GF to the PLA affected the mechanical properties of the printed parts. Adding 5% GF resulted in a 28% increase in tensile strength and a 24% increase in flexural strength. Adding 10% GF led an 8,6 % increase in Charpy impact strength. It was determined that mechanical properties decrease when the addition ratio of GFP increases to 15%. It was also determined that there was a direct proportion between infill rate and mechanical properties, but neither infill geometry nor nozzle temperature affected the mechanical properties, significantly.

Keywords: 3D Printer, PLA, Glass Fiber, Composite Filament.

1. GİRİŞ

Son yıllarda 3B baskı teknolojisine olan ilgi hızla artmaktadır. 3B baskıda, seçici lazer sinterleme (SLS), eriyik biriktirme yöntemi (FDM) ve benzer çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanı, hem basit çalışma mantığı hem de yatırım maliyeti açısından daha ekonomik olması sebebiyle FDM teknolojisidir [1]. Bu yüzden FDM baskı teknolojisi sürekli olarak gelişmektedir ve sürdürülebilir gelişimi için baskı malzemeleri de son derece önemlidir [2-3].

FDM teknolojisinde genellikle polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polikarbonat (PC) gibi termoplastik materyaller kullanılmaktadır. 3B üretimde elde edilen ürünün kalitesine etki eden faktörler arasında filament kalitesi ve dayanımı da bulunmaktadır. PLA malzemenin dayanımının nispeten düşük olması, yazdırılan parçaların dayanım gerektiren fonksiyonel son ürün olarak kullanım alanlarının sınırlı olmasına neden olmaktadır. Mekanik özellikleri daha iyi olan petrol türevi plastik malzemelerin çevre kirliliğine neden olmasından dolayı, doğal olarak bozunabilen (biobozunur) bir polimer olan PLA'nın sanayide kullanımı çevresel etki açısından da olumlu olacaktır. Bu durum 3B baskı teknolojisinde mekanik özellikleri iyileştirilmiş takviyeli PLA kompozit filamentlerin geliştirilmesine ihtiyaç doğurmaktadır.

Takviyeli kompozit imalatında plastik matrise doğal veya sentetik liflerin veya çeşitli inorganik takviye malzemelerinin katılması yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Çeşitli boyut ve formlardaki cam lifi (CL) de, bu amaçla yaygın olarak kullanılan bir takviye

malzemesidir. Birçok farklı termoplastik, termoset plastik veya reçineler CL ile güçlendirilerek kompozit malzemeler elde edilmektedir. Bu bağlamda, 3D baskı teknolojisinde kullanılan PLA filamentlerin de CL ile güçlendirilerek PLA filamentin endüstriyel ürünlerde kullanım imkanlarını arttırabilmek mümkün olabilir. Lifli yapısı nedeni ile malzemenin darbe dayanımında çentik etkisini azaltıcı yönde etkileyeceği öngörülmektedir. Ancak lif uzunluklarının fazla olması yazdırma sırasında nozul tıkanması gibi zorluklara neden olabilmektedir. Bu nedenle kısa hatta toz formunda cam lifi kullanılması faydalı olabilir. CL takviyesi ile mekanik özellikleri iyileştirilecek PLA filamentin 3B yazıcılarda kullanımı ile, daha az malzeme ile üretim yapılabilmesi olanağı, daha hafif ürün ve ekonomik üretim yapma imkanı sağlayacaktır.

Literatürde doğal veya sentetik çeşitli lif veya takviye malzemeleri ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerin özelliklerine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Cam lifi (CL) katkısının PLA malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisine yönelik de çalışmalar yapılmıştır. Bu kompozitlerin üretiminde çoğunlukla sıcak presleme veya enjeksiyon kalıplama yöntemleri kullanılmıştır. Huda vd. [4] %30 CL katkılı PLA kompozitlerin çekme dayanımında %28, eğme dayanımında %10, darbe dayanımında ise %53 artış tespit etmişlerdir. Lin vd. [5] %30 CL katkısının saf PLA ya oranla çekme dayanımında %84, eğme dayanımında %73 ve darbe dayanımında %200 artış sağlayabildiğini belirtmiştir. Lu vd. [6] de yine %30 CL katkısı ile PLA/HDPE harmanı kompozitinin çekme dayanımında %75 artış, darbe dayanımı ve sünekliğinde ise sırasıyla %57 ve %83 azalış tespit etmişlerdir.

Jaszkiwicz vd. [7] ise %30 CL takviyeli PLA matrisli kompozitlerin çentikli darbe dayanımında %531 gibi oldukça yüksek bir artış elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Termoplastik matrisli, takviyeli kompozit termoplastiklerin 3B yazıcı filamentleri olarak kullanımı ve yazdırılan parçaların özelliklerine yönelik akademik çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmalar daha çok ABS matrisli kompozitler üzerine yoğunlaşmıştır. Zhong vd. [8] 3B yazıcılarda kullanılmak üzere ABS matris malzemesine kısa cam fiber takviye elemanlarını ekleyerek ürettikleri filamentin kırılma dayanımının arttığını, bu nedenle 3B yazıcılarda kullanımının sınırlı olduğunu belirtmişlerdir. Ancak kompozite plastikleştirici olarak LLDPE ve uyumlaştırıcı ajan (Hydrogenated Buna-N) katılması ile elde edilen kompozit filamentin çekme dayanımının ABS'ye oranla oldukça yüksek olduğunu ve 3B yazıcılarda kullanılabilirliğini bildirmişlerdir. Shofner vd. [9] ABS matrise %10 karbon nanofiber katarak çekme dayanımında %39, çekme modülünde ise %60 artış sağlamışlardır. Perez vd. [10], ise ağırlıkça %5 oranında hint kenevirli elyafı ekleyerek ürettikleri ABS filament ile yazdırdıkları numunelerin çekme dayanımının saf ABS filamentle yazdırılanlara kıyasla %9 oranında düşük olduğunu belirtmişlerdir. Namıkı vd. [11] PLA ve sürekli karbon fiber kullanarak yazdırdıkları kompozit örneklerin çekme dayanımı ve elastisite değerlerinin, saf PLA ile yazdırılan örneklerle göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Weng vd. [12] %1-5 montmorillonit takviyeli ABS kompozitinin 3B yazıcı ile yazdırılan örneklerinin çekme dayanımı ve modülü değerlerinin enjeksiyon kalıplama yöntemleriyle üretilenlerinkinden %40-45 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Literatürde CL takviyeli PLA kompozitinin 3B yazıcıda

kullanımına yönelik yalnızca bir çalışmaya ulaşılabilmektedir. Çalışmada %5, 10, 15 ve 20 CL ile takviye edilen PLA kompoziti ile 3B yazıcıda yazdırılan örneklerin ve enjeksiyon kalıplama yöntemi ile elde edilen örneklerin mekanik özellikleri incelenmiştir [13]. Ayrıca PLA ile %10 termoplastik üreten (TPU) harmanlanarak kompozitin tokluğunun artırılması hedeflenmiştir. Enjeksiyon kalıplama ile elde edilen numunelerde %15 CL takviyesi ile PLA'nın çekme dayanımında %32, eğilme dayanımında %21 artış belirlenmiştir. Ancak 3B yazdırılmış örneklerin çekme dayanımında %30 ve eğilme dayanımında %32 azalış olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada ana amaç, PLA termoplastik malzemeye cam lifleri katılarak mekanik özellikleri daha iyi bir kompozit filament üretmek ve bu filament ile prototip veya modellerden çok, kullanılabilir son ürünlerin 3B yazıcılar ile üretilmesine imkân tanımaktır. Bu amaçla PLA malzemeye %5, %10 ve %15 oranlarında CL katılarak granül halinde kompozit malzeme elde edilmiş ve bu kompozit granüllerden de 3B yazıcı için filament üretilmiştir. Üretilen filament kullanılarak yazdırılan parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ise, doluluk oranı, yazdırma geometrisi ve nozul sıcaklığı gibi yazdırma parametrelerinin farklı seviyeleri kullanılarak parçalar üretilmiş ve optimum yazdırma parametreleri belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan ana matris malzemesi PLA granül halde Kumru Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti. (Türkiye) temin edilmiştir. Tedarikçi firma tarafından sağlanan bilgilere göre kullanılan PLA'nın teknik özellikleri Çizelge 1.'de verilmiştir.

Çizelge1. PLA granül teknik özellikleri.

Fiziksel Özellik	Miktar (birim)
Yoğunluk	1.24 g/cm ³
Erime akış indeksi (ISO 1133-A at 210°C/2.16kg)	8 g/10 min
Erime akış indeksi (ISO 1133-A at 190°C/2.16kg)	3 g/10 min
Görünüm	Kristalin beyaz granül
Erime sıcaklığı T _m (DSC)	155 °C
Camsı geçiş sıcaklığı T _g (DSC)	55-60 °C

Takviye elemanı olarak öğütülmüş cam lifi (CL) kullanılmıştır. Fiber Elyaf Kompozit San Tic Ltd Şti firmasından temin edilen cam lifi,

tedarikçi tarafından verilen bilgilere göre, E-camı yapısında, 13 mikron çapında ve 7-300 mikron lif uzunluğuna sahip toz yapısındadır.

2.2. Yöntem

2.2.1. Kompozit malzeme üretimi

3B yazıcıda kullanılacak CL ile güçlendirilmiş filament elde edilmesi için öncelikle kompozit granül elde edilmiş ve bu granüller kullanılarak filament üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme ve filament üretimi Anatolia Arge Makine Elektronik Kimya Otomotiv Ltd. Şti. firmasından hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir.

Kompozit malzeme bileşiminde ana matris olarak PLA kullanılmıştır. Takviyeli kompozit üretiminde yüksek oranda takviye kullanımında ana matris oranı da düşmekte ve takviye elemanından beklenen katkı sağlanamamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada %5, %10 ve %15 olmak üzere üç farklı oranda CL karışımı ile toplam 4 farklı malzeme elde edilmiştir. Kompozit granül üretiminde termoplastik malzeme PLA çift vidalı ekstrüderin ana besleme haznesinden, katkı olan CL ise belirlenen oranda yan besleme ünitesinden beslenerek istenen homojen karışım elde edilmiştir. Anı zamanda karışımlarda katkı oranını belirtmek için çok düşük oranda (% 0,05) renk pigmenti kullanılmıştır. Hizmet sağlayıcının teknik altyapısına bağlı olarak üretim şartlarına ait bilgiler firma tarafından belirtilmiştir.

Kompozit malzeme, vida boy/çap oranı (L/D) 30, vida dönüş hızı 5 dev/dak, besleme bölgesi

sıcaklığı 20-25 °C, eritme/karıştırma bölgesi sıcaklığı 190-200 °C ve çıkış kalıp sıcaklığı 200 °C işlem parametreleri kullanılarak çift vidalı ekstrüderde üretilmiştir. Elde edilen kompozit kırıcıda kırılarak granül hale getirilmiştir. Granül halde elde edilen kompozit malzeme filament üretimi öncesi 12 saat 80 °C sıcaklıkta vakumlu fırında kurutulmuştur. Rutubetinden arındırılan granüller tek vidalı ekstrüder kullanılarak 1,75 mm çapında filament haline getirilmiştir. Filament üretimi parametreleri ise, L/D=24, besleme bölgesi sıcaklığı 20-25 °C, eritme bölgesi sıcaklığı 200 °C ve çıkış kalıp sıcaklığı 210 °C olarak uygulanmıştır. Elde edilen filamentler makaralara sarılarak 3B yazıcılarda kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.

2.2.2. Deney Örneklerinin Hazırlanması

Mekanik özelliklerin belirlenmesi için kullanılacak deney örnekleri farklı yazdırma parametreleri kullanılarak Makerbot marka FDM yazıcı ile elde edilmiştir. Çekme testi, eğilme testi ve darbe testi örnekleri ilgili standarda uygun olarak SolidWorks programında modellenmiş ve STL dosya formatında kaydedildikten sonra 3B yazıcının yazılımı ile dilimlenmiş ve yazdırılmıştır. Deney örneklerinin elde edilmesinde kullanılan yazdırma parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. 3B yazıcıda üretilen deney örneklerinin yazdırma parametreleri.

Parametre	Parametre alt seviye
Doluluk oranı	%10
	%50
	%90
Yazdırma geometrisi	Rectilineer
	Grid
	Full Honeycomb
Yazdırma ekstrüder sıcaklığı	190 °C
	210 °C
Yazdırma hızı	45 mm/sn
Katman kalınlığı	0,2 mm

Çalışmanın hedeflerinden birisi malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirerek daha az malzeme ile daha hafif parçalar üretilebilmesini sağlamak olduğundan, doldurma oranı olarak %10, %50 ve %90 oranları seçilmiştir. Örneklerin yazdırılmasında kullanılan parametrelerden birisi olan yazdırma geometrisi

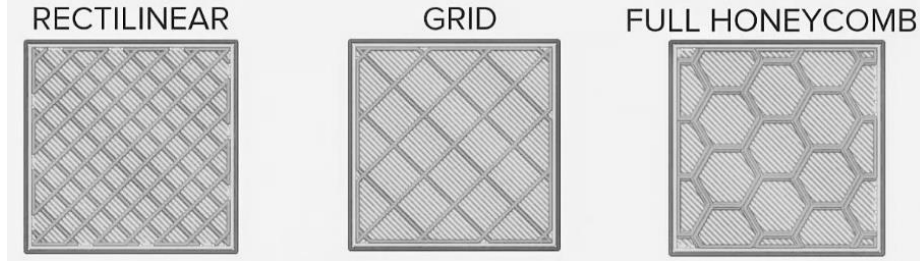
(infill pattern) olarak seçilen 3 farklı geometri şematik olarak Şekil 1'de verilmiştir.

2.2.3. Mekanik testler

CL katkısının ve yazdırma parametrelerinin 3B yazıcılarda üretilecek parçaların mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile ilgili standarda göre yazdırılan örneklerin, çekme

dayanımı ASTM D638 (Tip 1) [14], eğilme dayanımı ASTM D790 [15] ve darbe direnci değerleri ASTM D6110 [16] standardına uygun olarak tespit edilmiştir. Çekme ve eğilme testlerinde Zwick/Roel Z50 universal test

makinesi, darbe direnci testlerinde Devotrans DVT CD C model çentik darbe test cihazı kullanılmıştır. Her deney grubu için 5 adet numune kullanılmıştır.



Şekil 1. Yazdırma geometrisi (infill pattern).

2.2.4. Malzeme Karakterizasyonu

CL katkısı ile PLA malzemeden üretilen kompozit malzemede, cam liflerinin matris içerisindeki dağılımı ve arayüz etkileşimine ait değerlendirme taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem) görüntüleri ile değerlendirilmiştir.

2.2.5. Verilerin Değerlendirilmesi

Cam lifi tozu katkılı PLA filament ile, farklı yazdırma parametreleri kullanılarak 3D yazıcıda yazdırılan numunelerin mekanik testlerinden elde edilen veriler, çoklu regresyon analizi ile istatistiksel değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Faktör seviyeleri arasındaki farklılıkların tespiti için ise Duncan's çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Çekme Dayanımı

CL katkılı PLA filament kullanılarak farklı yazdırma parametrelerine göre yazdırılan örneklerin çekme dayanımı değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Elde edilen verilere göre CL katkı oranı ve yazdırma parametreleri örneklerin çekme dayanımı üzerinde etkili olmuştur. En düşük çekme dayanımı değeri 11,07 N/mm² ile saf PLA filamentle, honeycomb yazdırma geometrisi, %10 doluluk oranı ve 190 °C yazdırma sıcaklığında yazdırılmış kontrol örneklerinde tespit edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı değeri ise 25,69 N/mm² ile rectilinear geometride, %90 doluluk oranı ve 210 °C yazdırma sıcaklığında saf PLA ile yazdırılan örneklerde ölçülmüştür.

Hem kontrol grubu hem de CL tozu katkılı örneklerin çekme dayanımı arasında doğrusal bir ilişki ve istatistiksel olarak da önemli

($p=0,000$) bir fark bulunmaktadır. Çoğunlukla %5 CL katkılı grupların çekme dayanımının diğerlerine göre daha yüksek olduğu ancak %90 doluluk oranında saf PLA ile yazdırılan örneklerin çekme dayanımı ile aradaki farkın çok az olduğu tespit edilmiştir. Yazdırma geometrisinin çekme dayanımı üzerinde istatistiksel olarak önemli bir etkisi yoktur ($p=0,215>0,05$). Yazdırma sıcaklığının etkisi ise nispeten daha az olmaktadır.

CL katkı oranının çekme dayanımı değerleri üzerindeki etkisini daha anlaşılır şekilde ortaya koyabilmek için doluluk oranından bağımsız olarak değerlendirmek daha uygundur. Doluluk oranı % 10 iken CL katkı oranı % 5 olduğunda en yüksek çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Yazdırma geometrisinin belirgin bir etkisi görülmezken, yazdırma sıcaklığının artışı ile çekme dayanımının da arttığı belirlenmiştir. Katkı oranı %10'a çıktığında ise sıcaklığın artışı ile çekme dayanımının kontrol grubuna göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Katkı oranı %15 iken çekme dayanımı kontrol grubu ile hemen hemen aynı iken, %5 katkı oranının değerlerine göre daha düşüktür. Yazdırılan örneklerin doluluk oranı %50 iken yine % 5 CL katkılı örneklerin çekme dayanımı diğerlerinden yüksektir. Katkı oranının artışı ile birlikte çekme dayanımı değerleri de azalmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıkta yazdırılan örneklerde bu değer kontrol grubunun da altına düşmektedir. Yazdırma sıcaklıkları arasında ise yüksek sıcaklığın çok az da olsa çekme dayanımını artırdığı söylenebilir. Örneklerin doluluk oranı %90 iken, CL katkı oranının etkisi daha da belirgin olmakta ve çekme dayanımını azaltmaktadır.

Katkı oranı arttıkça genellikle çekme dayanımındaki azalış da artmaktadır.

Yazdırma sıcaklığının ve geometrisinin ise çok belirgin bir etkisi tespit edilememiştir.

Yazdırma doluluk oranına ve CL katkı oranına göre çekme dayanımı değişimi Şekil 2 de verilmiştir. En yüksek çekme dayanımı değerleri %5 CL katkılı filamentle yazdırılan örneklerde tespit edilmiştir.

Çizelge 3. Cam lifi katkılı PLA filamentle yazdırılmış örneklerin çekme dayanımı.

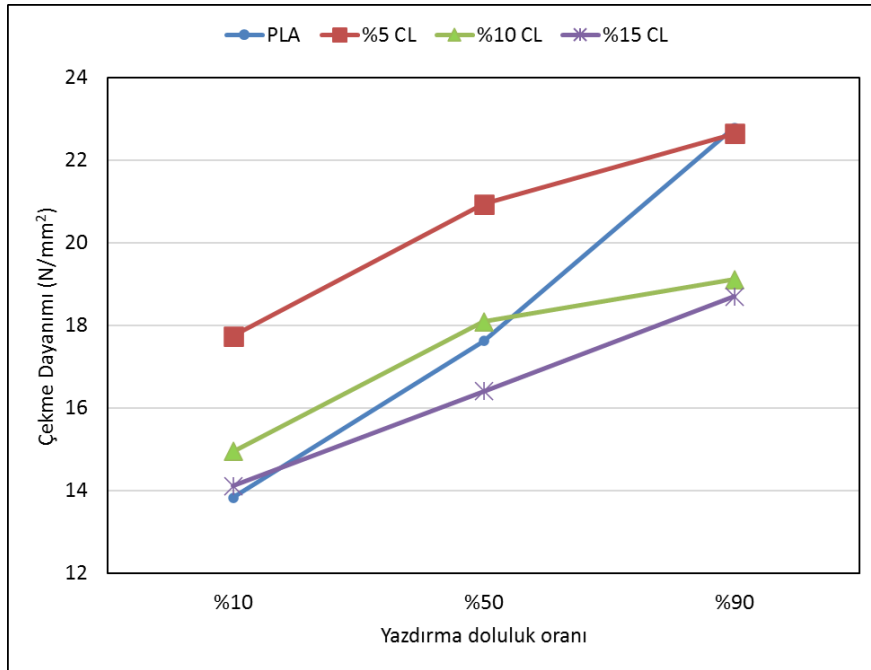
Yazdırma Geometrisi	Yazdırma Sıcaklığı (°C)	Doluluk Oranı (%)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)				
			PLA	%5CL	%10CL	%15CL	
Grid	190	10	13,02 (0,42)	17,95 (0,35)	15,45 (0,50)	12,56 (0,46)	
		50	15,12 (1,48)	20,64 (1,06)	18,45 (0,66)	15,28 (0,74)	
		90	22,76 (0,69)	20,38 (0,29)	19,14 (0,64)	20,54 (0,63)	
	210	10	15,72 (0,66)	18,08 (0,22)	14,33 (0,79)	15,50 (0,46)	
		50	18,51 (0,63)	21,07 (0,92)	17,20 (0,65)	17,32 (0,66)	
		90	23,57 (0,29)	23,58 (0,31)	19,99 (0,36)	18,34 (0,77)	
	Honeycomb	190	10	11,07 (0,97)	17,65 (0,59)	15,80 (0,44)	12,98 (0,60)
			50	15,87 (0,66)	21,78 (0,70)	19,11 (0,84)	15,12 (1,18)
			90	19,62 (0,72)	22,47 (0,14)	17,73 (0,15)	19,35 (0,44)
210		10	15,76 (0,54)	17,69 (0,28)	14,59 (0,53)	16,15 (0,45)	
		50	20,56 (0,32)	20,94 (0,72)	17,65 (0,69)	18,36 (0,36)	
		90	23,27 (0,64)	23,55 (0,56)	19,80 (0,36)	18,56 (0,43)	
Rectilinear		190	10	12,33 (0,38)	17,90 (0,98)	15,34 (0,52)	12,50 (0,77)
			50	17,26 (0,33)	20,32 (1,16)	18,30 (1,07)	17,78 (0,61)
			90	21,78 (0,66)	22,69 (0,68)	18,63 (0,76)	18,67 (1,01)
	210	10	15,08 (0,54)	17,20 (0,54)	14,21 (0,70)	15,00 (0,63)	
		50	18,43 (0,50)	20,87 (0,98)	17,86 (0,68)	14,58 (1,90)	
		90	25,69 (1,02)	23,19 (0,72)	19,37 (0,43)	16,75 (0,47)	

PLA:Saf PLA kontrol, %5CL:%5 Cam lifi+%95 PLA, %10CL:%5 Cam lifi+%90 PLA, %15CL:%15 Cam lifi+%85 PLA. Parantez içerisindeki değerler standart sapmayı ifade etmektedir.

Doluluk oranı artıkça kontrol numunesi ile %5 CL katkıli numunelerin değerleri arasındaki fark azalmakta, %90 doluluk oranında ise neredeyse eşitlenmektedir. %10 ve %15 CL katkıli örneklerin çekme dayanımı sadece %10 doluluk oranında saf PLA'ninkinden yüksek iken, doluluk oranı artıkça saf PLA dan daha düşük değerler tespit edilmiştir.

Kontrol numunesinin %10, %50 ve %90 doluluk oranlarındaki çekme dayanımına göre değişim %5 CL katkıli grupta sırasıyla %28, %8 ve %2 artış; %10 CL katkıli grupta %18,78, %2,66 artış, %6,93 azalış ve %15 CL katkıli grupta % 0,61, %16,11 ve %17,92 azalış olarak gerçekleşmiştir. Artan katkı oranının boşluk oranını arttırdığı ve bu nedenle çekme ve eğilme dayanımlarında düşüşe neden olduğu literatürde

de belirtilmiştir [17,18]. Artan katkı oranı ile matrise tutunamayan ve yerinden çıkan fiberlerin oluşturduğu boşlukların gerilme yığılma bölgeleri oluşturabileceği ve dayanımda düşüşe neden olabileceği belirtilmiştir [19]. %10 kısa cam lifi katkıli PLA kompozit ile %100 doluluk oranı ile 3B yazıcıda yazdırılmış örneklerin çekme dayanımında %10,8 azalış tespit edilen çalışmada [13] hem daha uzun hem de lif ile matris arasındaki ara yüzey bağlanmasının daha iyi olduğu silanlanmış cam lifleri kullanıldığından, bu çalışmada elde edilenden daha az düşüş elde edilmiş olabilir. Carneiro vd. [20] ise %30 cam lifi katkıli polipropilenden ürettikleri filamentle % 100 doluluk oranında yazdırdıkları örneklerde %40'a varan bir artış elde etmişlerdir.



Şekil 2. Doluluk oranına göre CL katkı oranının çekme dayanımına etkisi.

3.2. Eğilme Dayanımı

CL katkıli PLA filament ile yazdırılan örneklerin eğilme dayanımları tespit edilmiş ve ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Eğilme dayanımı sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde en düşük değer 22,62 N/mm² ile % 15 CL katkıli grupta, grid yazdırma geometrisi, %10 doluluk oranı ve 190 °C yazdırma sıcaklığı kullanılan örneklerde; en yüksek ise 50,87 N/mm² ile kontrol grubu, grid yazdırma geometrisinde %90 doluluk ve 210 °C yazdırma sıcaklığı kullanılan örneklerde tespit

edilmiştir. Genel olarak doluluk oranı ve yazdırma sıcaklığı artışı ile eğilme dayanımının da arttığı görülmektedir. CL katkı oranının artışı ile birçok grupta eğilme dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Yapılan varyans analizi sonucuna göre CL katkı oranı, doluluk oranı ve yazdırma sıcaklığı eğilme dayanımı üzerinde etkili iken, yazdırma geometrisinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı (p=0,064>0,05) tespit edilmiştir. %10 doluluk oranı ile yazdırılan örneklerde % 5 CL katkısı kontrol grubuna göre eğilme dayanımını arttırmış ancak katkı maddesi oranı artıkça eğilme dayanımı düşmüştür. Yazdırma

sıcaklığının belirgin bir etkisi görülmez iken honeycomb yazdırma geometrisinin daha yüksek eğilme dayanımı sağladığı söylenebilir. %50 doluluk oranı ile yazdırılan parçalarda yazdırma parametrelerinin çok belirgin etkisi görülmemekle beraber, %5 cam lifi tozu katkısının az da olsa eğilme dayanımını olumlu

etkilediği söylenebilir. %90 doluluk oranında yazdırılmış örneklerde yalnızca Grid yazdırma geometrisi, 190 °C yazdırma sıcaklığında üretilen grup hariç tüm diğer gruplarda CL katkısı eğilme dayanımı değerini düşürmüştür. Yazdırma geometrisinin ve sıcaklığının ise belirgin bir etkisi görülmemektedir.

Çizelge 4. Cam lifi katkılı PLA filamentle yazdırılmış örneklerin eğilme dayanımı.

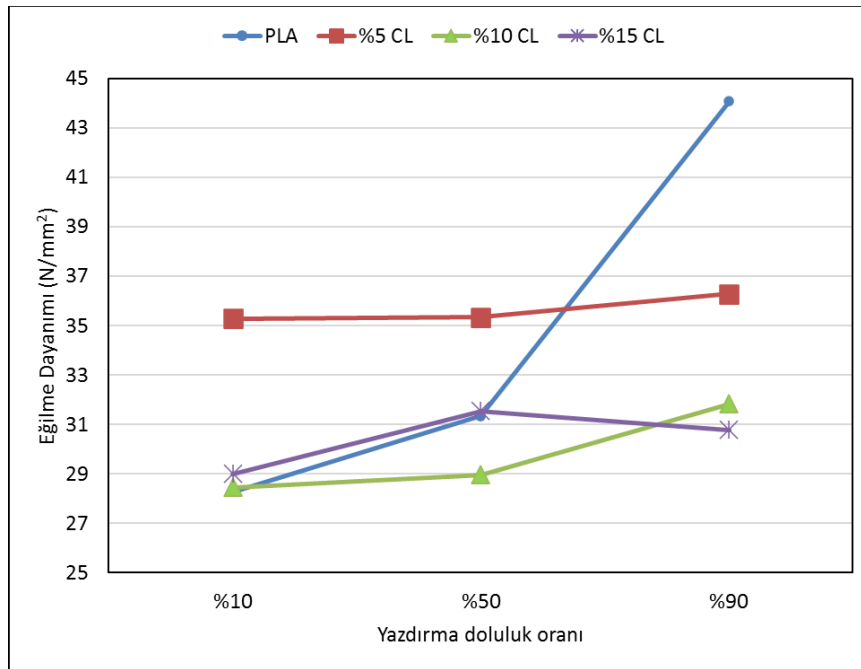
Yazdırma Geometrisi	Yazdırma Sıcaklığı (°C)	Doluluk Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (N/mm ²)			
			PLA	%5CL	%10CL	%15CL
Grid	190	10	31,55 (2,20)	34,74 (2,45)	29,45 (0,59)	22,62 (6,17)
		50	32,34 (1,03)	48,38 (3,41)	30,36 (0,14)	34,52 (1,83)
		90	31,37 (2,84)	43,86 (3,38)	34,62 (0,89)	30,62 (1,67)
		10	30,42 (0,21)	29,76 (2,33)	26,54 (0,76)	28,29 (1,13)
		50	27,38 (2,51)	30,39 (0,17)	29,13 (0,50)	30,80 (1,46)
		90	50,87 (2,35)	33,18 (1,90)	30,19 (0,70)	32,16 (1,20)
	190	10	24,29 (1,34)	42,00 (1,37)	34,37 (0,94)	32,42 (2,10)
		50	30,90 (0,31)	31,68 (2,52)	29,04 (1,88)	31,60 (6,00)
		90	47,99 (1,37)	34,50 (0,87)	30,51 (0,14)	30,53 (0,37)
		10	29,08 (1,17)	37,22 (7,73)	27,80 (2,11)	27,39 (2,45)
		50	30,71 (0,14)	34,75 (5,06)	30,26 (0,19)	30,80 (0,44)
		90	41,82 (2,51)	38,57 (5,33)	30,41 (0,07)	32,37 (0,46)
Honeycomb	190	10	25,72 (1,17)	38,95 (3,98)	27,58 (0,82)	33,04 (1,28)
		50	29,79 (0,49)	36,87 (2,46)	30,72 (0,34)	30,77 (0,52)
		90	46,06 (2,39)	37,77 (5,92)	34,72 (0,39)	27,16 (1,74)
	210	10	28,61 (1,70)	29,00 (1,84)	24,99 (0,91)	30,23 (0,22)
		50	36,93 (8,75)	29,96 (0,44)	24,29 (0,51)	30,74 (0,13)
		90	46,36 (1,27)	29,86 (0,46)	30,54 (0,09)	31,89 (0,95)

PLA:Saf PLA kontrol, %5CL:%5 Cam lifi+%95 PLA, %10CL:%5 Cam lifi+%90 PLA, %15CL:%15 Cam lifi+%85 PLA. Parantez içerisindeki değerler standart sapmayı ifade etmektedir.

CL katkı oranının etkisini ortaya koymak için yapılan Duncan testi sonucu % 5 oranında katkı yapılmasının eğilme dayanımını istatistiksel olarak anlamlı derecede arttırdığı, ancak %10 ve %15 oranında katkı yapıldığında düşürdüğü belirlenmiştir. %10 ve %15 katkılı grupların eğilme dayanımı arasında istatistiksel olarak önemli bir fark bulunmamaktadır. Literatürde de Nişasta/PLA kompozitinin özelliklerini geliştirmek için CL kullanıldığında %4 oranının en olumlu etkiyi yaptığı, bu oranın üzerine çıkıldığında ise beklenen etkinin sağlanmadığı ve kırılma yüzeylerindeki prüzlülüğün azaldığı belirtilmiştir [21]. Yazdırma doluluk oranı ve CL katkı oranına göre eğilme dayanımındaki değişim Şekil 3'te verilmiştir.

%5 CL katkısı ile %10 ve %50 doluluk oranında yazdırılmış örneklerin eğilme dayanımında sırasıyla %24,75 ve %12,76 artış elde edilirken, %90 doluluk oranında %17,67 azalış meydana gelmiştir. %90 doluluk oranında bu azalış %10 CL katkısında %27,78, %15 CL katkısında ise %30,8'e ulaşmaktadır. Varsavaş [13] %10 kısa cam lifi katkılı PLA kompozit ile %100 doluluk oranı ile 3B yazıcıda yazdırdıkları örneklerin eğilme dayanımında %17,5 azalış tespit etmişlerdir. Kullanılan cam lifinin daha uzun ve silanlanmış oluşu elde edilen sonuçların

farklılığına neden olmuş olabilir. Yazdırma doluluk oranının artışı ile saf PLA polimer katmanları arasında daha iyi bir kaynaşma olduğu ve neredeyse enjeksiyon kalıplama ile elde edilen yapıya yakın bir sonuç elde edildiği, ancak CL katkısının polimer ile yeterince iyi arayüz bağlanması olmamasının mekanik dayanımları azalttığı söylenebilir. Bu açıklamayla uyumlu olarak Varsavaş [13] %100 doluluk oranı ile yazdırılan PLA ile enjeksiyonla üretilen PLA örneklerin hem çekme hem de eğilme dayanımlarının aynı olduğunu belirtmiştir. Chen vd [22] sürekli cam fiber takviyeli PLA ile yaptıkları çalışmada saf PLA ile cam lifleri arasındaki arayüzey bağlanmasının zayıf olduğunu ve bu nedenle de takviyeden beklenen katkının sağlanmadığını ancak % 3 oranında özel bir uyumlaştırıcı olan PLA-g-MAH kullanımında ise eğilme dayanımında %10,4 artış elde edilebildiğini belirtmişlerdir. Yu vd. [23] de, sürekli cam fiber takviyeli PLA kompoziti ile yazdırılan örneklerde, CL katkı oranının artması ile yazdırma katmanları arasındaki asıl bağlanmanın sağlandığı PLA oranının azaldığını ve bu nedenle de parçanın mekanik dayanımında azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir.



Şekil 3. Doluluk oranına göre CL katkı oranının eğilme dayanımına etkisi.

3.3. Darbe Direnci

CL katkılı PLA filamentle 3B yazıcıda yazdırılan örneklerin yazdırma parametrelerine

göre darbe direnci değerleri Çizelge 5'te verilmiştir. Darbe direnci testi sonuçlarına göre en yüksek değer 89,47 J/m ile %10 CL katkılı

filamentle, 210 °C yazdırma sıcaklığı, grid yazdırma geometrisinde %50 doluluk oranında yazdırılan parçalarda elde edilmiştir. En düşük darbe direnci ise 77,02 J/m ile kontrol grubu

210 °C yazdırma sıcaklığı, rectilinear yazdırma geometrisinde %10 doluluk oranında yazdırılan parçalarda elde edilmiştir.

Çizelge 5. Cam lifli katkıli PLA filamentle yazdırılmış örneklerin darbe direnci

Yazdırma Geometrisi	Yazdırma Sıcaklığı (°C)	Doluluk Oranı (%)	Darbe Direnci (J/m)				
			PLA	%5CL	%10CL	%15CL	
Grid	190	10	79,76 (5,04)	80,15 (3,06)	87,57 (4,95)	81,07 (5,74)	
		50	77,97 (1,5)	85,04 (1,97)	80,14 (3,04)	82,47 (1,01)	
		90	77,87 (2,75)	84,77 (1,61)	81,37 (2,32)	79,52 (1,27)	
		10	77,56 (5,92)	81,81 (4,86)	87,29 (2,99)	84,95 (0,77)	
		50	78,86 (2,18)	79,56 (2,6)	89,47 (2,44)	83,89 (2,1)	
		90	77,87 (2,58)	81,87 (3,4)	87,34 (1,81)	84,86 (1,97)	
	Honeycomb	190	10	85,85 (3,79)	83,09 (3,97)	89,08 (3,71)	79,66 (1,51)
			50	81,9 (2,95)	82,94 (2,53)	84,59 (2,11)	77,32 (2,73)
			90	77,86 (2,69)	84,55 (1,75)	80,33 (3,63)	77,58 (2,17)
		210	10	78,88 (3,03)	83,18 (2,73)	87,79 (4,32)	80,66 (3,06)
			50	81,35 (3,22)	83,46 (4,2)	86,57 (3)	81,57 (3,3)
			90	82,26 (3,08)	80,81 (5,3)	82,57 (4,71)	79,11 (2,43)
Rectilinear	190	10	80,56 (3,98)	77,75 (3,07)	83,7 (3,85)	77,24 (1,46)	
		50	77,97 (2,23)	80,61 (3,28)	79,63 (1,9)	82,85 (3,33)	
		90	77,34 (3,07)	83,72 (3,5)	82,19 (4,31)	79,31 (0,94)	
	210	10	77,02 (4,72)	81,35 (2,92)	85,34 (1,28)	79,96 (1,82)	
		50	79,23 (4,56)	84,36 (3,6)	87,24 (3,82)	85,3 (3,29)	
		90	79,16 (5,13)	82,62 (3,06)	83,11 (7,02)	81,58 (2,36)	

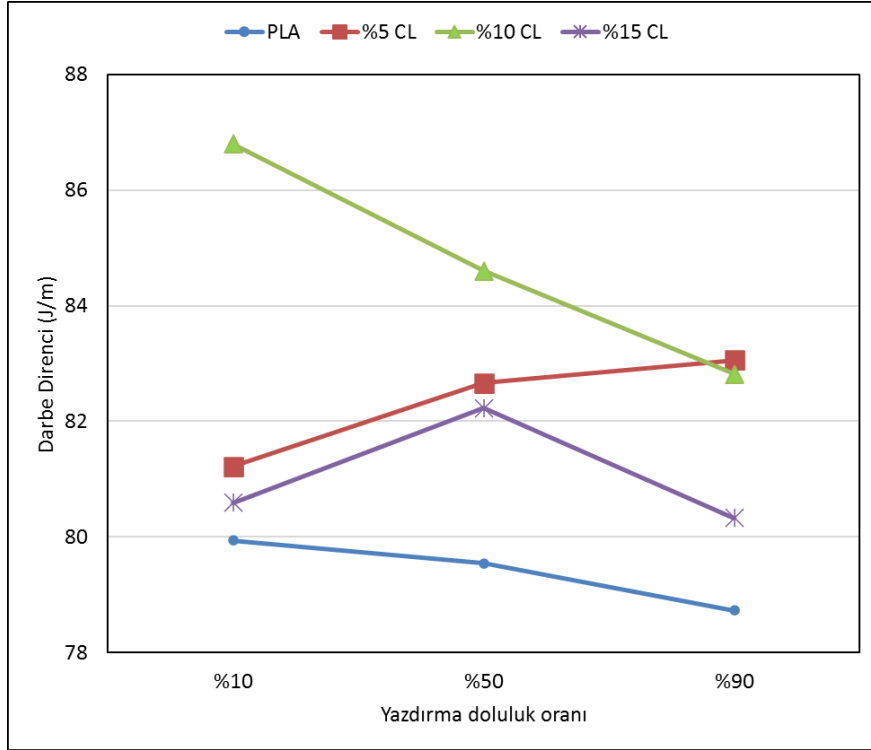
PLA:Saf PLA kontrol, %5CL:%5 Cam lifli+%95 PLA, %10CL:%5 Cam lifli+%90 PLA, %15CL:%15 Cam lifli+%85 PLA. Parantez içerisindeki değerler standart sapmayı ifade etmektedir.

Varyans analizi sonucuna göre CL katkısı PLA örneklerin darbe direncini önemli derecede etkilemekte ve tüm gruplar arasında istatistiksel

olarak anlamlı fark bulunmaktadır. En yüksek darbe direnci değerleri % 10 katkıli örneklerde ölçülmüştür. Daha sonra sırası ile %5 CL

katkılı, %15 CL katkı ve en düşük de kontrol grubunda darbe direnci belirlenmiştir. Yazdırma geometrisi ($p=0,058>0,05$) ve yazdırma sıcaklığı ($p=0,072>0,05$) parçaların darbe direnci üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark meydana getirmemiştir. Şekil 4'de yazdırma doluluk oranı ile CL katkısı oranına göre darbe direncinin değişimi görülmektedir. %10 doluluk oranında %10 CL katkı filamenlerle yazdırılan parçalarda darbe direnci artışı % 8,6 iken, %90 doluluk oranında

bu artış %5 ve %10 CL katkı gruplarında %5 seviyesinde olmuştur. Kullanılan katkı malzemesinin toz formunda olması, lif uzunluklarının çok kısa olması nedeni ile darbe direncinde beklenen artış gerçekleşmemiştir. Li vd.[24] %5 uyumlaştırıcı ile %4 CL katkı PLA filamenle yazdırdıkları parçaların darbe dayanımlarlarında %13 artış elde etmişlerdir. Takviyeli kompozitlerde uyumlaştırıcı kullanımının önemi bu sonuçlarla da ortaya konmaktadır.



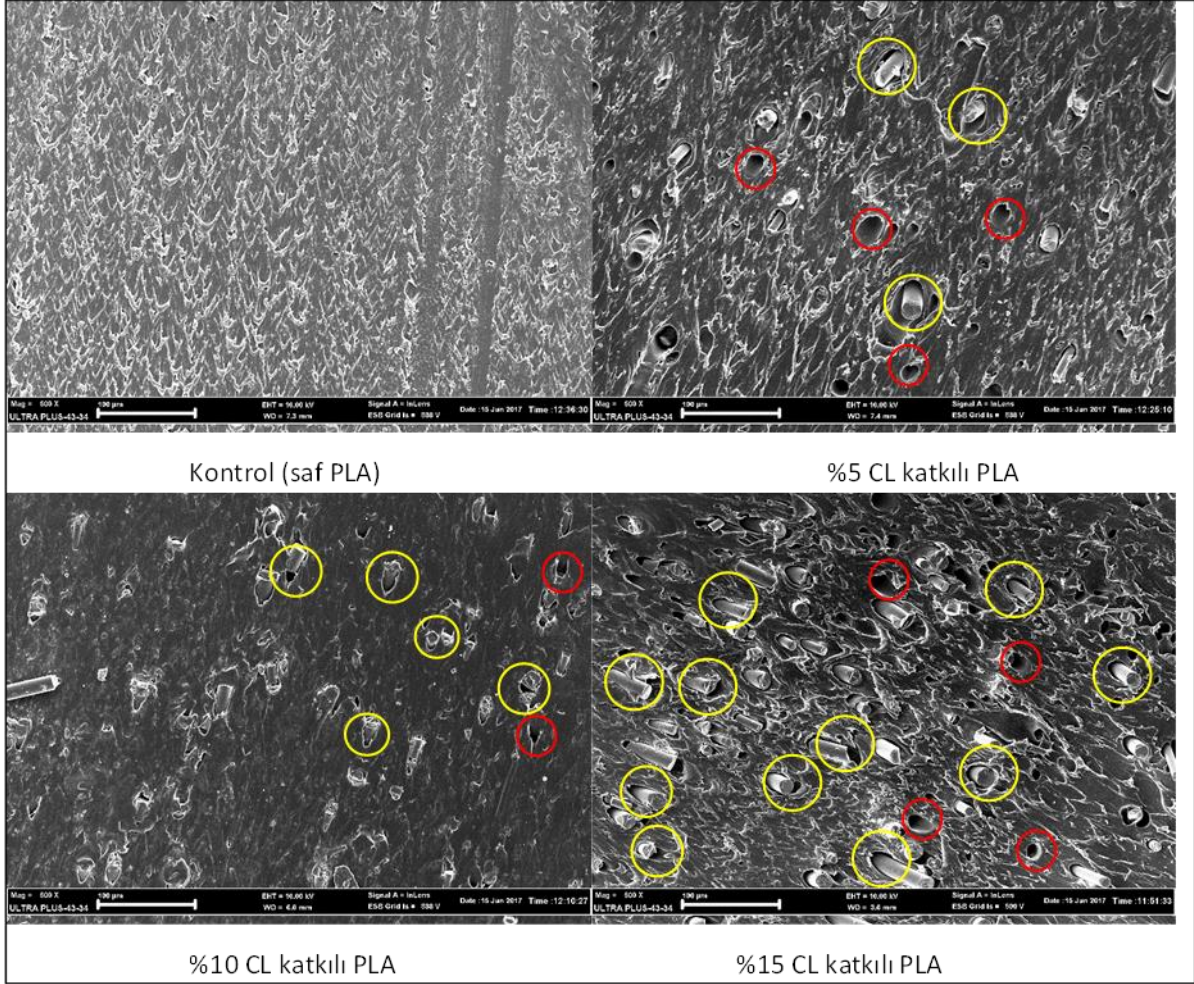
Şekil 4. Doluluk oranına göre CL katkı oranının darbe direncine etkisi.

3.4. Malzeme Karakterizasyonu

CL katkı PLA filament üretimi sürecinde, elde edilen kompozit malzeme içerisinde katkı maddelerinin dağılımı ve bu parçacıklar ile ana matris malzemesi arayüz ilişkisi kırılmış yüzeylerden elde edilen SEM görüntüleri ile incelenmiştir. Şekil 5'te SEM görüntüleri verilmiştir.

SEM görüntülerinde saf PLA kırılma yüzeyinin daha pürüzsüz ve boşluksuz yapıda olduğu görülmektedir. Takviyeli örneklerde CL parçacıklarının her üç örnekte de homojen bir şekilde dağıldığı ve ekstruzyon yönünde yönlendiği görülmektedir. Lifler ile PLA matris arasındaki arayüz etkileşimi incelendiğinde, aralarında tam bir kaynaşmanın sağlanmadığı

ve yer yer boşluklar oluştuğu görülmektedir. Kırmızı renk ile işaretli yerinden çıkan liflerin oluşturduğu boşluklar ile sarı ile işaretli (tüm boşluklar işaretlenmemiştir) lif ile matris arasındaki boşluklar dikkat çekmektedir. Katkı oranının artışı ile bu oluşan boşlukların da birim alandaki miktarı artmaktadır. Bu nedenle katkı miktarının artışı ile elde edilen mekanik özelliklerdeki değişim paralel olmamaktadır. Katkı oranı % 15'e çıktığında genellikle ölçülen mekanik özelliklerde düşüş meydana gelmiştir. Aynı tespit Rahimizadeh vd. [19] tarafından da yapılmış, yerinden çekilip çıkan fiberlerin oluşturduğu boşlukların matris içerisinde porozite artışına neden olduğu ve artan katkı oranı ile porozitenin de arttığı belirtilmiştir.



Şekil 5. CL katkıli PLA kompozit filamentlerin kırılmış yüzeylerine ait SEM görüntüleri (Büyütme 500X).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 3B yazıcılarda kullanılmak amacı ile cam lifi katkısı ile güçlendirilmiş kompozit PLA filament üretimi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- SEM görüntüleri incelendiğinde cam lifi parçacıklarının PLA matris içinde homojen şekilde dağıldığı ve kompozit hazırlanması ve filament üretim aşamasında başarılı sonuçlar alındığı görülmektedir. Ancak CL ile PLA molekülleri arasında yeteri kadar iyi bir arayüz bağlanmasının olmadığı da belirlenmiştir.
- CL katkısının PLA malzemenin çekme ve eğilme dayanımını istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkilediği, %5 oranında CL katkısının çekme ve eğilme dayanımını arttırdığı ancak bu katkı oranı arttıkça, her iki dayanımın da düştüğü tespit edilmiştir.
- CL parçacıkları ile PLA arasında tam bir arayüz bağlanmasının oluşmaması ve katkı oranının artışı ile malzemede boşluklu bir yapının oluştuğu, bu nedenle de çekme dayanımının düştüğü belirlenmiştir. Doluluk oranı arttıkça, yüksek katkı oranının düşürücü etkisi daha da belirginleşmektedir. %5 CL katkısı ile çekme dayanımında elde edilen artış %13 olarak hesaplanmıştır.
- Yazdırma parametrelerinin çekme ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, en etkili parametrenin doluluk oranı olduğu belirlenmiştir. Doluluk oranı ile dayanım arasında paralel bir ilişki bulunmaktadır. % 10 doluluk oranı ile %90 doluluk oranı arasında çekme dayanımı %30 luk bir artış göstermiştir. Yazdırma geometrisinin ise dayanım üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Yazdırma sıcaklığının ise çok az da olsa etkili olduğu ve genellikle 210 °C de daha yüksek çekme dayanımı ancak daha düşük

eğilme dayanımı değerleri elde edildiği belirlenmiştir.

5. CL katkısının örneklerin darbe direnci üzerinde arttırıcı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Ancak bu arttırıcı etki, katkı oranı ile doğru orantılı değildir. En yüksek darbe direnci değerleri kontrol grubuna göre %8,6 artış ile %10 CL katkılı grupta elde edilmiştir.
6. Yazdırma parametreleri açısından, yazdırma geometrisi ile sıcaklığının darbe direnci üzerinde önemli bir etkisi bulunmazken, doluluk oranı etkili olmuştur. %10 ile %50 doluluk oranına sahip örneklerin darbe direnci arasında fark bulunmamaktadır. Doluluk oranı artışı ile darbe direnci değerleri düşmektedir.
7. CL katkısı ile PLA filamentin mekanik özelliklerini iyileştirmek üzere yapılan çalışmaların sonucuna göre, %5 CLT katkısı ve 210 °C yazdırma sıcaklığı önerilir. Yazdırma geometrisi ise mekanik özelliklerde etkili değildir. Mekanik özellikler, doldurma oranı ile doğru orantılı olarak arttığından, mukavemet gerektiren parçaların üretiminde %90 doluluk oranının kullanılması uygun olacaktır. Darbe dayanımının önemli olduğu parçaların üretilmesinde %10 CL katkısının ve %90 doluluk oranının tercih edilmesi önerilir.
8. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre CL katkı oranının artışı ile mekanik özelliklerde elde edilen artış paralel olmamaktadır. Bu konuda en önemli faktör katkı elemanı ile polimer arasındaki arayüz etkileşiminin yeterli olup olmamasıdır. Katkı elemanı ile polimerin yalnızca karıştırılması yeterli olmayabilmektedir. Bu nedenle iki farklı karakterdeki malzemenin arakesit kaynaşmasını sağlamak üzere farklı uyumlaştırıcı işlem ya da malzemelerin kullanılması önerilir. Eğer arayüz kaynaşması sağlanabilirse, katkı oranının artışı işe mekanik özelliklerde elde edilecek artış da artacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından

KBU-BAP-17/YL-166 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Credi, C., Fiorese, A., Tironi, M., Bernasconi, R., Magagnin, L., Levi, M., and Turri, S., "3D Printing of Cantilever-Type Microstructures by Stereolithography of Ferromagnetic Photopolymers", ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 8, Issue 39, Pages 26332-26342, 2016.
2. Lee, J. S., Hong, J. M., Jung, J. W., Shim, J. H., Oh, J. H., and Cho, D. W., "3D printing of composite tissue with complex shape applied to ear regeneration", Biofabrication, Vol. 6, Issue 2, 024103, Pages 1-12, 2014.
3. Liu, L., Lin, M., Xu, Z., and Lin, M., "Polylactic acid-based wood-plastic 3D printing composite and its properties," BioResources, Vol. 14, Issue 4, 8484–8498, 2019.
4. Huda, M. S., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., & Misra, M., "Chopped glass and recycled newspaper as reinforcement fibers in injection molded poly(lactic acid) (PLA) composites:A comparative study. Composites Science and Technology, Vol. 66, Issue 11–12, Pages 1813–1824, 2006.
5. Lin, L., Deng, C., Lin, G., & Wang, Y., "Mechanical Properties, Heat Resistance and Flame Retardancy of Glass Fiber-Reinforced PLA-PC Alloys Based on Aluminum Hypophosphite", Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 53, Issue, 6, Pages 613–625, 2014.
6. Lu, X., Tang, L., Wang, L. L., Zhao, J. Q., Li, D. D., Wu, Z. M., & Xiao, P., "Morphology and properties of bio-based poly (lactic acid)/high-density polyethylene blends and their glass fiber reinforced composites", Polymer Testing, Vol. 54, Pages 90–97, 2016.
7. Jazskiewicz, A., Bledzki, A. K., & Franciszcak, P., "Improving the mechanical performance of PLA composites with natural, man-made cellulose and glass fibers--a comparison to PP counterparts", Polimery, Vol 58, Issue 6, Pages 435-442, 2013.
8. Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L. and Li, Z., "Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling", Materials Science and Engineering A, Vol. 301, Pages 125–130, 2001.
9. Shofner ML, Lozano K, Rodríguez-Macías FJ, Barrera EV., "Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 89, Issue 11, Pages 3081-3090, 2003.

10. Perez, A.R.T., Roberson D.A. and Wicker, R.B., "Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 14, Issue 3, Pages 343–353, 2014.
11. Namiki, M., Ueda, M., Todoroki, A., Hirano, Y. ve Matsuzaki, R. "3D Printing of Continuous Fibre Reinforced Plastic", *Proceedings of the Society of the Advancement of Material and Process Engineering*, Seattle, 2-5 June 2014.
12. Weng, Z., Wang, J., Senthil, T., & Wu, L. "Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing", *Materials & Design*, Vol. 102, Pages 276–283, 2016.
13. Varsavaş, S. D. (2017). "Effects of glass fiber content, 3D-printing and weathering on the performance of polylactide", Yüksek Lisans Tezi, [Cam elyaf miktarının, 3D-yazıcı ile şekillendirmenin ve atmosferik yaşlandırmanın polilaktitin performansına etkileri] [Thesis in English], Middle East Technical University, Ankara, 2017.
14. ASTM Standart D638, "Standart test methods for tensile properties of plastics", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
15. ASTM Standard D790, "Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
16. ASTM Standart D6110, "Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics", ASTM international, West Conshohocken, PA, 2004.
17. Khan, B.A., Na, H., Chevali, V., Warner, P., Zhu, J., Wang, H., "Glycidyl methacrylate-compatible poly(lactic acid)/hemp hurd biocomposites: Processing, crystallization, and thermo-mechanical response", *J. Mater. Sci. Technology*, Vol. 34, Pages 387–397, 2018.
18. Turner Brian, N., "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness", *Rapid Prototyp. J.*, Vol. 21, Pages 250–261, 2015.
19. Rahimizadeh, A., Kalman, J., Henri, R., Fayazbakhsh, K., Lessard, L., "Recycled Glass Fiber Composites from Wind Turbine Waste for 3D Printing Feedstock: Effects of Fiber Content and Interface on Mechanical Performance", *Materials*, Vol.12, Issue 23, Number 3929, Pages 1-12, 2019.
20. Carneiro, O., Silva, A., & Gomes, R., "Fused deposition modeling with polypropylene", *Materials & Design*, Vol.83, Pages 768-776, 2015.
21. Zuo, Y., Wu, Y., Gu, J., Zhang, Y., "Effect of fiber dosage on properties of glass fiber reinforced starch / polylactic acid composites", *Journal of Functional Materials*, Vol. 46, Issue 21, Pages 21148-21152, 2015.
22. Chen, K., Yu, L., Cui, Y., Jia, M., & Pan, K., "Optimization of printing parameters of 3D-printed continuous glass fiber reinforced polylactic acid composites", *Thin-Walled Structures*, Vol. 164, No:107717, Pages 1-9, 2021.
23. Yu, L., Chen, K., Xue, P., Cui, Y., & Jia, M., "Impregnation modeling and preparation optimization of continuous glass fiber reinforced polylactic acid filament for 3D printing", *Polymer Composites*, Vol. 42, Issue 11, Pages 5731-5742, 2021.
24. Li, X., Ni, Z., Bai, S., Lou, B., "Preparation and Mechanical Properties of Fiber Reinforced PLA for 3D Printing Materials", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 322, Issue 2, No:022012, Pages 1-12, 2018.