



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>

EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİYLE ÜRETİLMİŞ DÜZ VE KAVISLI KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN KISA-KİRİŞ

SHORT-BEAM STRENGTH COMPARISON OF
ADDITIVELY MANUFACTURED FLAT AND CURVED
CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER MATRIX
COMPOSITE MATERIALS

Yazarlar (Authors): Sedat Süsler 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Süsler S.,
“Eklemeli İmalat Teknolojisiyle Üretilmiş Düz ve Kavisli Karbon Fiber Takviyeli Polimer
Matrisli Kompozitlerin Kısa-Kiriş Mukavemetlerinin Karşılaştırılması” *Int. J. of 3D Printing
Tech. Dig. Ind.*, 8(3): 352-360, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1534538

Araştırma Makale/ Research Article

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

EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİYLE ÜRETİLMİŞ DÜZ VE KAVISLİ KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN KISA-KIRIŞ MUKAVEMETLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Sedat Süsler^a 

^aKocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: sedat.susler@kocaeli.edu.tr

(Geliş/Received: 16.08.24; Düzeltme/Revised: 26.09.24; Kabul/Accepted: 01.10.24)

ÖZ

Bu çalışmada, eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilmiş düz ve kavisli polimer matrisli kompozitlerin kısa-kiriş mukavemetleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sürekli filaman imalatı yöntemiyle üretilen tek yönlü sürekli karbon fiber takviyeli kompozit kısa-kirişler, geometrik olarak birbirinden farklı üç numune grubu olarak sınıflandırılmış ve üretimlerinin ardından üç-nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Kuvvet ve deplasman verileri test sırasında elde edilip, grafiksel olarak kuvvet-deplasman ve gerilme-deplasman eğrileriyle test gidişatı gözlemlenmiştir. Özgül mukavemet kavramı da çalışmaya dahil edilerek, kısa-kiriş mukavemeti karşılaştırmasına nesnellik kazandırılmıştır. Kavisli kompozit kısa-kiriş, eşdeğer özelliklere sahip düz bir kirişe göre az bir miktar daha düşük mukavemete sahipken, enerji depolama kapasitesinde artış meydana gelmiştir. Kavisli kirişin kalınlığı %50 oranında ve içerdiği karbon fiber oranı 2 katı artırıldığındaysa, mukavemet değerini %19 arttırmış gözükse de özgül mukavemet değerinde %23 düşüş meydana getirmiştir. Çalışma, eriyik biriktirmeli modelleme temelli yeni bir teknik olan sürekli filaman imalatı teknolojisiyle üretilen kompozitlerin, henüz yeterli seviyede araştırılmamış mekanik performanslarını anlamaya yönelik katkı sunma, farkındalık yaratma ve gelecekteki mühendislik uygulamaları için yol gösterici nitelikte olma gayreti içindedir.

Anahtar Kelimeler: Eriyik Biriktirmeli Modelleme, Sürekli Filaman İmalatı, Kısa-Kiriş Mukavemeti, Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti, Kavisli Yapılar, Sürekli Fiber Takviyeli Kompozit.

SHORT-BEAM STRENGTH COMPARISON OF ADDITIVELY MANUFACTURED FLAT AND CURVED CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of the short-beam strength of flat and curved polymer matrix composites which were manufactured by using additive manufacturing technology. Unidirectional continuous carbon fiber-reinforced composite short beams which were manufactured through the continuous filament fabrication method, had been classified into three geometrically distinct sample groups and then subjected to three-point bending tests. Force and displacement data were obtained during the test, and the test progression was observed graphically along the force-displacement and stress-displacement curves. The concept of specific strength was also included into the study to provide an objective basis for comparing short-beam strength. Although the curved composite short-beam exhibited slightly lower strength than a flat beam with equivalent properties, its energy storage capacity increased. However, when the thickness of the curved beam was increased by 50% and the carbon fiber content was doubled, its strength increased by 19%, although a 23% decrease in specific strength was observed. This study aims to contribute to the understanding of the adequately unstudied mechanical

performance of 3D-printed composites with continuous filament fabrication, which is a new technique based on fused deposition modeling, to raise awareness, and to provide guidance for future engineering applications.

Keywords: Fused Deposition Modelling, Continuous Filament Fabrication, Short-Beam Strength, Interlaminar Shear Strength, Curved Structures, Continuous Fiber Reinforced Composite.

1. GİRİŞ

Ekleme imalat (Eİ), yaygın olarak bilinen adıyla 3 boyutlu (3B) baskı, malzeme bilimi ve mühendisliği alanında devrim yaratmıştır. Yapıların katman katman imalatına dayanan bu teknik, geleneksel üretim yöntemleriyle üretimi zor veya imkânsız olan hem karmaşık ve özelleştirilmiş hem de optimize edilmiş yüksek performanslı yapıları düşük maliyetle üretmeyi mümkün kılmıştır [1]. Partikül veya kısa fiber formunda fiberlerle takviye edilmiş polimer kompozit 3B baskı filamentleri geliştirme ve 3B yazıcılara entegre etme ulusal literatürde de kendine yer bulmaktadır [2]. Uzun ve sürekli fiberlerin termoplastikler içine entegrasyonu ile birlikte daha yüksek performanslı polimer kompozit parçaların üretilebilirliği için, filament malzeme geliştirme yanında 3D baskı cihazları ve tekniklerinin de geliştirilmesini gerektirir. Çeşitli Eİ teknikleri arasında daha yeni ve geliştirmeye açık bir teknoloji olan sürekli filament imalatı (SFİ) tekniği, eriyik biriktirmeli modelleme (EBM) tekniğiyle üretilen polimer yapıların sürekli fiberlerle takviye edilerek polimer matrisli kompozit formunda basılabilmesinin önünü açan çok yönlü ve erişilebilir bir yöntem olarak öne çıkmıştır. İkili nozul içeren bir ekstrüdere sahip baskı cihazları kullanan bu teknik, tasarım esnekliğiyle birlikte malzeme verimliliği ve fiber yönelimi ile dağılımının hassas kontrolü yoluyla mekanik özellikleri özelleştirme ve iyileştirme imkânı gibi önemli avantajlar sunar. Bir nozul, eriyik termoplastik veya kısa/partikül takviyeli termoplastik malzeme birikimi için kullanılırken, diğer nozul; sürekli karbon, cam veya aramid fiber demeti içeren polimer kompozit filament tarafından beslenir [3]. Sürekli fiberlerin entegrasyonu, 3B baskı yapıların mekanik özelliklerini artırarak, üstün özgül mukavemet, sertlik ve dayanıklılık sağlar ve bu yapıları havacılık ve otomotiv endüstrisi uygulamaları için oldukça arzu edilir hale getirebilir [4].

Eİ yöntemiyle üretilmiş sürekli ve uzun fiberlerle güçlendirilmiş kompozitlerin çeşitli

yüklemeye koşulları altındaki mekanik performanslarının değerlendirilmesi, hem gerçek sanayi uygulamalarındaki potansiyel ve sınırlamalarını anlamak, hem de 3D baskı cihazları ve malzemelerinin güncellenmesi için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda; kilit bir parametre, kompozit malzemenin katmanlar arası kayma mukavemetinin (KAKM) bir ölçütü olan kısa-kiriş mukavemetidir (KKM). ASTM D2344/2344M-22 standardı [5], düz ve kavisli polimer matrisli kompozitlerin üç-nokta eğilme testi yoluyla kısa kiriş mukavemetini belirlemek için standartlaştırılmış bir yöntem sağlar. Gerçek sanayi uygulamalarında, düz veya kavisli kısa-kiriş formuna uyan yapıların tasarımı ve üretimi için dayanımı ölçülebilmek adına basitleştirilmiş bir model yaratır. Hasar moduna bağlı olarak, malzemenin kayma kuvvetlerine ve kayma kaynaklı delaminasyonlara karşı direncinin güvenilir bir ölçüsünü sunar.

Literatür incelendiğinde, ticarileşmiş durumdaki Markforged® endüstriyel ve masaüstü baskı cihazları ile SFİ metodu özelinde yoğunlaşmış bir araştırma birikimi gözükmektedir. Daha önce yayınlanan derleme makalelerde, SFİ temelli 3B baskı teknolojiyle üretilmiş sürekli fiberli kompozit malzemelerin çeşitli yüklemeler altındaki mekanik özellikleri ve etki eden baskı parametreleri üzerine yapılmış çalışmalar kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve sınıflandırılmıştır [6-8]. SFİ yöntemiyle üretilen 3B baskılı sürekli fiber destekli kompozit malzemelerin KKM ve/veya KAKM değerlerinin analiz edildiği çalışmalar [9-13] incelendiğinde, üretilen kısa kirişlerin hem düz formda olduğu hem de düz bir numune üretiminde optimum baskı yatağı yerleşimi olan, numune yüzeyi üzerinde (flat) basıldığı belirlenmiştir. Yazarların bilgisi dahilinde, 3B yazıcıyla üretilmiş sürekli fiber destekli kavisli polimer kompozit malzemelerin KKM değerlerinin analiz edildiği ve düz form ile karşılaştırılmalı olarak sunulduğu bir çalışma literatürde mevcut değildir.

DeneySEL sonuçların karşılaştırmalı olarak sunulduğu bu çalışmada, sürekli ve tek yönlü karbon fiberlerle takviye edilerek EBM'ye dayalı SFİ tekniğiyle üretilmiş düz ve kavisli kısa-kiriş formundaki polimer kompozitlerin maksimum kuvvetleri, KKM değerleri ve hasar modları incelenmiştir. Karbon fiber demetlerini kavisli yapıdaki kirişe gömebilecek şekilde, baskı yatağında kenar üzerinde yerleşim (on-edge) yöntemi uygulanmıştır. Devamında, kavisli kısa-kiriş modelin kalınlığı ve içine gömülen sürekli karbon fiber miktarı artırılarak üçüncü bir kiriş konfigürasyonu daha karşılaştırmalı çalışmaya dahil edilerek, bu parametrelerin test çıktılarına olan etkisi gösterilmiştir. Testleri yapılan tüm kısa-kiriş numunelerinin kuvvet-deplasman ve kısa-kiriş gerilmesi-deplasman grafikleri de gösterilip yorumlanmış; devamında da maksimum kuvvet ve KKM değerleri ve bunların ortalamaları tablolarla karşılaştırılmıştır. Yapılan üç-nokta eğilme testleri sonucu meydana gelen hasarlara ait resimler de incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

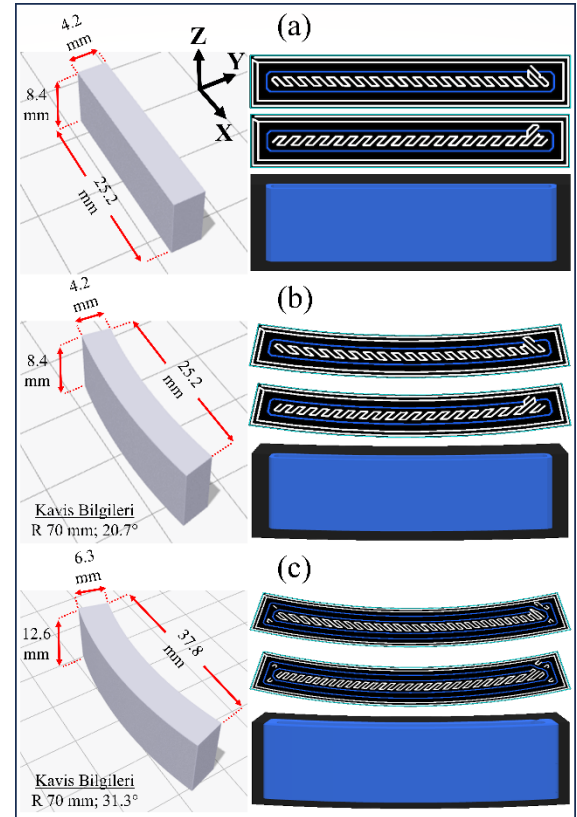
Üç-nokta eğilme testleri ve bu testlerde kullanılmış numunelerin üretimleri sırasıyla, Queen's University Belfast Makina ve Havacılık ve Uzay Mühendisliği Fakültesi'nde yer alan Malzeme Test ve Öğrenci Tasarım Laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirildi.

Üretimler için kullanılan Markforged Mark Two masaüstü 3B yazıcı [14], termoplastik ve fiber filament makaraları tarafından ayrı ayrı beslenen iki ısıtılmış nozul kullanarak, sürekli ve uzun fiber takviyeli termoplastik üretme kabiliyetine sahiptir. Termoplastik ve SFİ fiber nozullar için çalışma sıcaklıkları sırasıyla, yaklaşık 275 °C ve 250 °C'dir. Termoplastik malzeme olarak, bir poliamid türü olan, geleneksel naylon malzemesinden daha güçlü ve sert yapıdaki Nylon White kullanılmıştır. Karbon fiber takviyesi için kullanılan 3B yazıcının diğer filamentiyse aslında bir çeşit önceden geleneksel naylon emprenye edilmiş karbon fiber demetidir ve katı halde 0.3 mm çapında filament formda bulunur. Filament bütünlüğünü oluşturan içindeki naylon, fiber nozulundan geçerken sıcaklık etkisiyle erir ve içindeki sürekli karbon fiber demeti, istenen baskı alanına dağılık bir şekilde gömülür. Karbon filament, alüminyum 6061-T6 kadar sert ve ondan daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilir. 1.4 g/cm³ yoğunluğa, 60

GPa çekme elastisite modülüne ve 800 MPa çekme mukavemetine sahiptir [15].

Düz ve kavisli numunelerin boyutlandırılmasında kullanılan temel parametre numunelerin kalınlık (h) değeridir. L , numune uzunluğu ve b , numune genişliği olmak üzere, ASTM D2344/2344M-22 standardına [5] göre, $L=6.0 \times h$ ve $b=2.0 \times h$ olarak atanmıştır. Kavisli numunelerde L uzunluğu, minimum veter uzunluğu olarak tanımlanır. Kavisin eğrilik yarıçapı 70 mm olmalıdır.

'D', düz kısa-kiriş ve 'K', kavisli kısa-kiriş bir numuneyi simgeleyen harf kodlarıdır. 'T1', 4.2 mm h değerini simgelerken, 'T2' ise %50 daha kalın ve iki katı miktarda karbon fiber takviyeli bir numune yaratacak şekilde, 6.3 mm kalınlığındaki h değerine ait kodlardır. Bu tanımlamalar ışığında, 'D-T1', 'K-T1' ve 'K-T2' kod gruplarıyla simgelenmiş üç farklı numune grubu bu çalışmada üretilmiştir. Boyutlandırma bilgilerine dayanarak üç farklı numune grubuna ait boyut değerleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Numune boyutlandırması ile üstten ve yandan numunenin iç yapısı: (a) D-T1, (b) K-T1 ve (c) K-T2.

Eiger yazılımına [16] gönderilen STL formatındaki çizimler kullanılarak, aşağıdaki Çizelge 1’de yer alan baskı girdileriyle Şekil 1’de yer alan her numune grubu için üstten ve yandan numune içi baskı oryantasyonları elde edilmiştir. STL dosyası elde edilirken, kavisli numunelerin 3D baskıyla üretiminde kritik olan açıl tolerans değeri 1° seçilerek yüksek çözünürlükte baskı tercih edildi. Baskı yatağında on-edge inşa şekli kullanılarak, kavisli numunelerin hem destek kullanımı olmadan üretilmesi hem de numuneler içinde tek yönlü sürekli karbon fiber yönelimi sağlandı. Düz numuneler, h boyunca 0.125 mm baskı katman kalınlığıyla üretime izin veren flat konumlu inşa edilmeye uygun olmakla birlikte, kavisli numunelerle sağlıklı bir karşılaştırma için on-edge olarak üretildi. Sonuç olarak, tüm numune grupları, Şekil 1’de yer alan yandan oryantasyon görüntülerinde gösterildiği gibi, b boyunca 0.125 mm baskı katman kalınlığı değeriyle üretilerek yoğun karbon fiber gömülümü b boyunca sağlandı. Bununla birlikte, Çizelge 1’de belirtilen çatı/tabak katman sayısı değeri, baskı cihazı için minimum 5 olması gerektiğinden, b boyunca numunenin üst ve alt kısmında 0.625 mm kalınlığında Nylon White malzemesinden hem iyi bir yüzey pürüzlülüğü hem de içerideki karbon/naylon katmanları için su sızdırmazlık sağlayan, bölgeler oluşturuldu. On-edge inşa metoduyla, sırasıyla ‘T1’ ve ‘T2’ h değerleri için toplamda 2 ve 4 tek yönlü karbon fiber takviyeli katman elde edilebildi. Baskı cihazına ait minimum takviye edilen genişlik kriteri, en küçük takviye edilen alan ve minimum fiber uzunluğu gibi sınırlamalar ile tek yönlü fiber oluşturma açısından önemli eş merkezli fiber seçimi bu değerlerin elde edilmesinde etkili olmuştur [17]. Numune orta kısmı ile iyi bir yüzey pürüzlülüğü ve su sızdırmazlık için önemli ve 2 olarak atanan duvar katmanları Nylon White ile %100 katı dolgu ile doldurulmuştur. Şekil 1’de yer alan bitişik iki baskı katmanına ait üst oryantasyon görüntülerinde (numune kesiti), mavi çizgiler karbon/naylon nozul bölgelerini ve beyaz çizgiler de Nylon White bölgelerini göstermektedir.

Çizelge 1. Baskı girdileri.

Parametre	Girdi
Dolgu Tipi	Katı Dolgu
Dolgu Yoğunluğu	%100
Duvar Katmanı Sayısı	2
Çatı/Taban Katman Sayısı	5
Fiber Örüntü Alanı	Tüm Grup
Fiber Dolgu Tipi	Eş Merkezli Fiber
Eş Merkezli Fiber Sayısı	1 (T1 için) 2 (T2 için)
Destek Kullanımı	Hayır
Brim Kullanımı	Evet

Eiger yazılımıyla öngörülen, Çizelge 2’de yer alan baskı çıktıları kontrol edildikten sonra, her bir numune grubu için 5 adet üretim gerçekleştirilmiştir. Çizelge 2’de, v_m her bir numune içeriğindeki Nylon White hacmini verirken, v_f karbon/naylon hacmini vermektedir. Sürekli fiber destekli bölgenin hacim oranı olarak tanımlanabilecek V_r ; v_f ’nin (v_m+v_f) ’ye oranı olarak bulunur. V_r ifadesinin, literatürde geleneksel metotlarla üretilen kompozit malzemeler için kullanılan fiber hacim oranı (V_f) ifadesiyle karıştırılmaması gerekir. Çünkü, V_r ifadesine karbon filamentinde bulunan naylon hacmi de dahil edilmektedir. Her bir numune grubunun bir numunesine ait, brim için kullanılan Nylon White miktarı hariç, kütle (m) değerleri de çizelgede ayrıca belirtilmiştir.

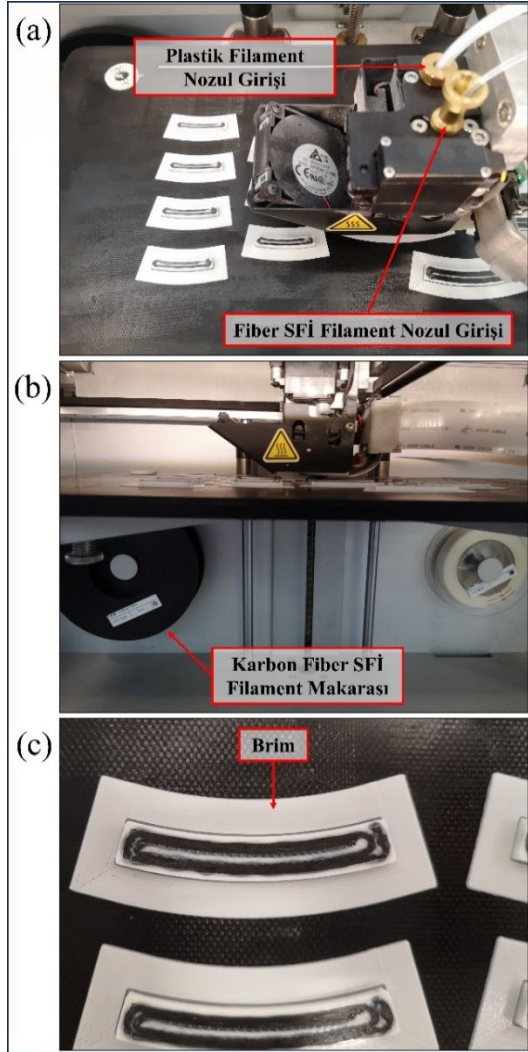
Çizelge 2. Numune gruplarına ait baskı çıktıları.

Numune Grubu	v_m [cm ³]	v_f [cm ³]	V_r [%]	m [g]
D-T1	1.89	0.32	14.5	1.07
K-T1	1.90	0.33	14.8	1.10
K-T2	3.53	1.59	31.1	3.89

‘K-T1’ numune grubu, düz numune grubuyla aynı h ve b değerlerine sahip olmakla birlikte, L değeri, kavisli numune için minimum veter uzunluğu olmasından dolayı V_r ve m değerleri az bir miktar daha büyüktür. ‘K-T2’ numune grubunun, ‘T1’ kalınlığındaki kavisli numune grubuna göre, h yanında b ve L değerleri de %50 oranında artmıştır. Bu artışlar, V_r ve m değerinde, sırasıyla 2.1 ve 3.5 kata varan belirgin artışları da beraberinde getirdi.

Şekil 2’de, yapılan 3B baskı üretimleri farklı açıdan çekilen fotoğraflarla belgelenmiştir. Şekil 2(a)’da kavisli numunelerin imalatlarına dair genel görünümle birlikte, plastik filament ve fiber SFİ filament nozul girişleri

gösterilmiştir. Şekil 2(b)'de imalat anına ait yandan görünümle birlikte, karbon fiber SFİ filament makarası görülmektedir. Şekil 2(c)'de, 'T2' h değerine sahip bir kavisli numunenin karbon fiber demetlerinin numune içine gömülümü ve yayılımı gösterilmiştir. 3B yazıcı, baskı sırasında herhangi bir baskı katmanını oluştururken her iki nozul eş zamanlı olarak çalışmaz. Öncelikle fiber SFİ filament nozulu aktive olur ve sürekli fiber takviyeli bölgeler oluşturulur. Devamında da plastik filament nozulu aktive olur ve o baskı katmanına polimer kısımları ekler ve son şeklini verir. Şekil 2(c), karbon fiberlerin yerleştirilmesinden sonrasında ve fiberler etrafına ve ortasına Nylon White eklenmesinden öncesini gösterir ki, plastik ilavesinin daha sonra eklenmesiyle, Şekil 3'te gösterildiği gibi, karbon fiber demetlerinin dağılımını daha düzgün bir forma dönüştürür.



Şekil 2. 3D baskıyla üretim anına ait (a) genel görünüm, (b) yandan görünüm ve karbon fiber SFİ filament makarası ve (c) karbon fiber demetlerinin eklenmesi ve yayılımı.



Şekil 3. T1 kalınlık değerine sahip bir numunenin karbon fiber takviyeli nylon ve Nylon White malzemelerinin nihai yerleşiminin görünümü.

On-edge imalata dayalı olarak, baskı yatağıyla geniş bir temas yüzeyi olmadığından, baskı sırasında oluşabilecek eğilme sorununu çözen bir çeşit kenarlık kullanılır. Baskı yatağındaki numunelerin tabanlarını çevreleyen brim adı verilen bu yapılar Şekil 2(a) ve Şekil 2(c)'de belirgin şekilde gözükmemektedir. İlk dört baskı katmanında numuneyle birlikte basılan brim yapılar, üretimin ardından herhangi bir alet kullanmadan el yordamıyla kolaylıkla numuneden ayrılabilir yapıdadır.

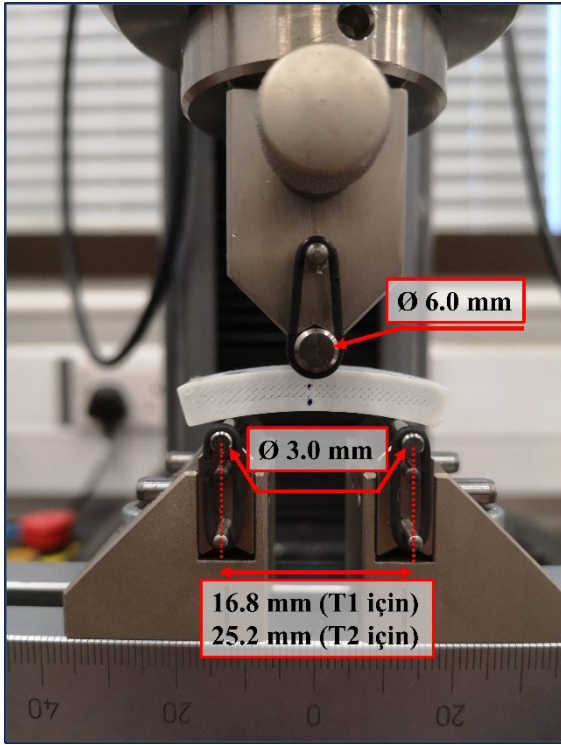
Üretimleri tamamlanan her bir numune grubuna ait kısa-kiriş numunelerinin genişlik ve kalınlık değerleri kumpas kullanılarak ölçüldü. Çizelge 3'te bu değerler listelenmiştir.

Çizelge 3. Kısa kiriş numunelerine ait ölçülen genişlik ve kalınlık değerleri.

Numune Kodu	b [mm]	h [mm]
D-T1-1	8.35	4.35
D-T1-2	8.35	4.26
D-T1-3	8.35	4.32
D-T1-4	8.30	4.32
D-T1-5	8.34	4.27
K-T1-1	8.26	4.31
K-T1-2	8.26	4.31
K-T1-3	8.35	4.31
K-T1-4	8.29	4.25
K-T1-5	8.32	4.31
K-T2-1	12.54	6.45
K-T2-2	12.63	6.42
K-T2-3	12.50	6.47
K-T2-4	12.57	6.40
K-T2-5	12.62	6.42

Ölçümlerin tamamlanmasının ardından, ASTM D2344/2344M-22 standardı [5] rehberliğinde, Şekil 4'te gösterildiği gibi üç-nokta eğilme testi yapıldı. Lloyd LS5 test cihazı [18] ve alt ve üst şeklinde iki parçalı üç-nokta eğilme aparatı kullanıldı. Test için 62 HRC sertlikte çelikten imal edilen, sırasıyla 6.0 mm çapında ve 3.0 mm çapında, yükleme ve destek silindirleri kullanıldı. İki destek silindiri arasındaki açıklık değeri, numunenin kalınlığına bağlıdır ve $4.0 \times h$ değerine sahip olmalıdır. Testler, yükleme silindiri 1.0 mm/dakika hızla kirişlerin tam

ortasından basma kuvveti uygulayacak şekilde yapıldı.



Şekil 4. Test düzeneği ve kavisli bir numunenin düzenek üzerinde yerleşimi.

Her bir test boyunca 10 Hz örnekleme hızıyla kuvvet (P) ve deplasman verileri toplandı. Testin herhangi bir anındaki kısa-kiriş gerilmesi (F):

$$F = 0.75 P/bh \quad (1)$$

formülüyle elde edilir. Test sırasında, hasardan önce elde edilen maksimum kuvvet, P_m ile simgelenirse, KKM (F^{sbs}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

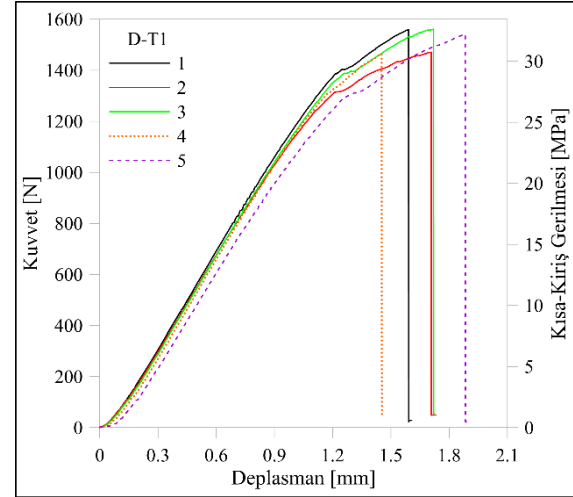
$$F^{sbs} = 0.75 P_m/bh \quad (2)$$

Test sonucunda elde edilen F^{sbs} , katmanlar arası kayma, çekme ve basma etkisinde eğilme hasarı ve elastik olmayan deformasyon hasarları için geçerlidir. Bununla birlikte, elde edilen F^{sbs} , ancak katmanlar arası bir kayma hasarı mevcutsa KAKM olarak da tanımlanır.

3. DENEYSEL BULGULAR

Kavisli kısa-kiriş performansından önce, karşılaştırma yapmak açısından düz kısa-kiriş performansını referans değer olarak elde etmek önemlidir. 'D-T1' numune grubuna ait kuvvet-deplasman ve gerilme-deplasman grafikleri

Şekil 5'te gösterilmiştir. Tüm numuneler, P_m değerlerine ulaştıktan sonra keskin bir şekilde kuvvette sıfıra doğru kayıp yaşayarak katastrofik hasara uğradı. Ortalama 1.2 mm deplasman değerine kadar lineere yakın bir yönelim izleyen eğriler, devamında hasara kadar lineer olmayan bir ilerleme gösterip hasara uğramıştır. Hasar anına kadar ulaştığı maksimum deplasman değerleri, F^{sbs} değerlerine göre daha geniş bir saçılım göstermiştir.



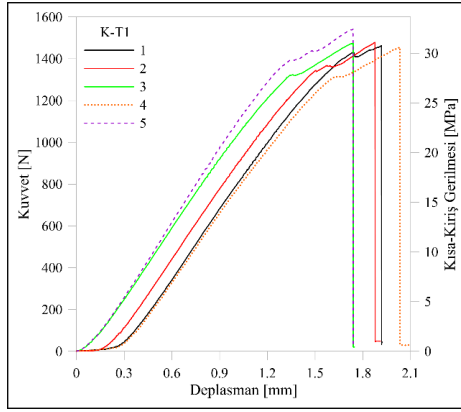
Şekil 5. Düz ve T1 kalınlığına sahip numunelerin Kuvvet-Deplasman ve Kısa-Kiriş Gerilmesi-Deplasman eğrileri.

Çizelge 4'te 'D-T1' numune grubunun her bir numunesine ait P_m ve F^{sbs} değerleri gösterilmiş ve numune grubuna ait elde edilen ortalama değerlerle standart sapmaları vurgulanmıştır. Numune grupları arasında daha efektif bir karşılaştırma için, özgül mukavemet (F^{sbs}/ρ) de her bir numune için hesaplanarak ortalama değeriyle birlikte çizelgeye dahil edilmiştir. ρ , yoğunluk değeridir ve Çizelge 2'de yer alan m ve baskı için toplam harcanan malzeme hacmi (v_m+v_f) kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4. Düz ve T1 kalınlığına sahip numunelerin P_m , F^{sbs} ve F^{sbs}/ρ değerleriyle birlikte ortalama sonuçları ve standart sapmaları.

Numune Kodu	P_m [N]	F^{sbs} [MPa]	F^{sbs}/ρ [kN.m/kg]
D-T1-1	1559	32.2	66.5
D-T1-2	1472	31.0	64.1
D-T1-3	1562	32.5	67.1
D-T1-4	1463	30.6	63.2
D-T1-5	1541	32.5	67.0
Ortalama	1519	31.8	65.6
Standart Sapma	43	0.8	1.6

'K-T1' numune grubuna ait kuvvet-deplasman ve gerilme-deplasman grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Genel eğilim olarak, ulaşılan F^{sbs} az bir miktar daha düşük gözükürken, aynı zamanda hasardan önceki maksimum deplasman değerleri, düz kısa-kiriş numunelerine göre belirgin şekilde daha yüksektir. Bu durum, kavisli numunelerin aynı kalınlıktaki düz numunelere göre daha fazla enerji depolayabildiğinin bir ölçütü sayılabilir. Şekil 5 ve Şekil 6'daki her numune eğrisinin altındaki alan hesaplanarak, 'D-T1' ve 'K-T1' için elde edilen enerji değerlerinin ortalamaları sırasıyla 1.47 mJ ve 1.52 mJ elde edilmiştir. Kavisli kırıta yaklaşık %3 enerji depolama artışı olmuştur. Hasardan hemen önceki bölümdeki eğrilerin eğilimi, düz numunelerle benzerlik göstermektedir.



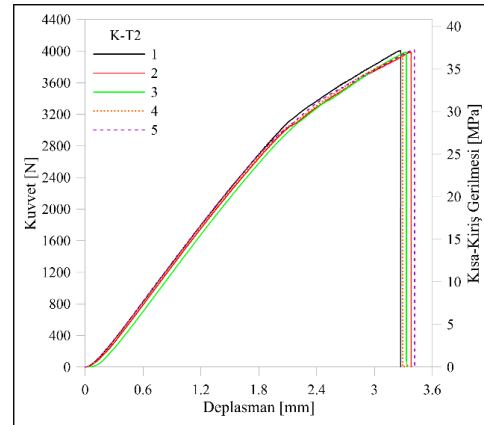
Şekil 6. Kavisli ve T1 kalınlığına sahip numunelerin Kuvvet-Deplasman ve Kısa-Kiriş Gerilmesi-Deplasman eğrileri.

Maksimum değerler ve bu değerlerin ortalamaları açısından daha belirgin karşılaştırmak yapmak için, 'K-T1' numune grubu için de Çizelge 5 hazırlanmıştır. Kavisli numunelerde, düz numunelere göre, F^{sbs} ve özgül F^{sbs} değerlerinde, sırasıyla %2 ve %4 düşüş gerçekleşmiştir. 'K-T1' grubu standart sapması, düz numunelerinkine göre daha iyi bir değerdir.

Çizelge 5. Kavisli ve T1 kalınlığına sahip numunelerin P_m , F^{sbs} ve F^{sbs}/ρ değerleriyle birlikte ortalama sonuçları ve standart sapmaları.

Numune Kodu	P_m [N]	F^{sbs} [MPa]	F^{sbs}/ρ [kN.m/kg]
K-T1-1	1463	30.8	62.5
K-T1-2	1478	31.1	63.1
K-T1-3	1475	30.7	62.3
K-T1-4	1456	31.0	62.8
K-T1-5	1541	32.2	65.4
Ortalama	1483	31.2	63.2
Standart Sapma	30	0.5	1.1

'K-T2' numune grubuna ait kuvvet-deplasman ve kısa-kiriş gerilmesi-deplasman grafikleri Şekil 7'de gösterilmiştir. P_m , F^{sbs} ve deplasman verilerinde belirgin artış gözlemlenmiş ve malzemenin enerji depolama kapasitesi artmıştır. Hasar anına kadar ulaşılan maksimum deplasman değerleri ve F^{sbs} değerleri, diğer iki numune grubuna göre dar bir saçılım göstermiştir. Bu durum, Eİ ile üretilmiş polimer kompozit malzemeler için kalınlık ve V_r artışıyla birlikte daha tahmin edilebilir bir kısa-kiriş performansı sunmuştur. Hasardan hemen önceki bölümdeki eğrilerin eğilimi de daha düzgün ve bu performans analizini destekler durumdadır. Diğer numune gruplarında olduğu gibi, 'K-T2' için de hasarın keskin bir kuvvet düşüşüyle gerçekleştiği görülmüştür.



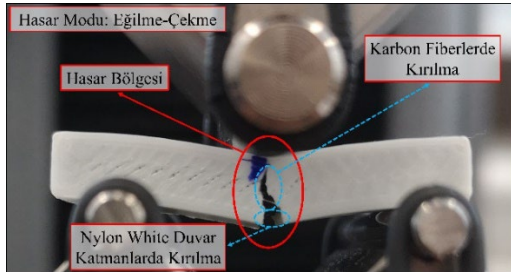
Şekil 7. Kavisli ve T2 kalınlığına sahip numunelerin Kuvvet-Deplasman ve Kısa-Kiriş Gerilmesi-Deplasman eğrileri.

Çizelge 6'da 'K-T2' numune grubuna ait limit değerler incelendiğinde, V_r miktarındaki artış, 'K-T1' numune grubuna göre mukavemet değerini %19 arttırmış gözükse de özgül mukavemet değerinde %23 düşüş meydana getirmiştir. Standart sapma değerleri de Şekil 7'deki eğrilerin eğilimini destekler şekilde, tüm gruplar içinde en düşük değerlere sahiptir.

Çizelge 6. Kavisli ve T2 kalınlığına sahip numunelerin P_m , F^{bs} ve F^{bs}/ρ değerleriyle birlikte ortalama sonuçları ve standart sapmaları.

Numune Kodu	P_m [N]	F^{bs} [MPa]	F^{bs}/ρ [kN.m/kg]
K-T2-1	4008	37.2	48.9
K-T2-2	3989	36.9	48.6
K-T2-3	3990	37.0	48.7
K-T2-4	3931	36.7	48.2
K-T2-5	4016	37.2	48.9
Ortalama	3987	37.0	48.7
Standart Sapma	30	0.2	0.3

Şekil 8’de testler sırasında karşılaşılan tek hasar modu, ‘K-T1-1’ numunesi özelinde gösterilmiştir. Düz ve ‘T2’ kalınlıklı kavisli numunelerde de şekildeki gibi çekme gerilmesinin baskın olduğu eğilme hasarı gözlemlenmiştir. Öncelikle, Nylon White duvar (h boyunca) ve çatı/tabana katmanları (b boyunca) tarafından çevrilen ve gerilmeyi domine eden numune iç kısmındaki karbon fiber demetleriyle takviyeli naylon katmanların çekme mukavemetinin aşılmasından kaynaklı fiber kırılmaları meydana gelmiştir. Bu durumun devamında, zaten gerilme yüklü durumdaki ve yeterince plastik uzama gerçekleştirilmiş esnek fakat zayıf mukavemete sahip alt Nylon White duvar ve çatı/tabana bölgelerinde de kırılmalar meydana gelerek şekildeki hasar görüntüsü oluşmuştur. Numunelerin kesmeye uygun olmayacak şekilde çok küçük olması yanında, Nylon White çatı/tabana katmanların daha kritik numune iç kesit yüzeyini örtmesi nedeniyle ileri seviye görüntüleme teknikleri kullanılarak olası bir katmanlar arası kayma delaminasyon hasarı gözlemi yapılmamıştır ve bu hasar olasılığı ihmal edilmiştir.



Şekil 8. Hasar modu.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, EBM tekniğinin ileri bir süreci olarak tanımlanabilecek SFİ kullanılarak üretilen düz ve kavisli tek yönlü karbon fiber takviyeli kompozit kısa kirişlerin dayanım performansı deneysel olarak incelendi. 70 mm

eğrilik yarıçapına sahip kavisli kompozit kısa-kiriş, eşdeğer özelliklere sahip düz bir kirişe çok yakın KKM değerine ulaşabilmiştir. Az bir miktar düşüşle mukavemetini koruyarak, hasardan önce bir miktar daha fazla enerji depolayabilecek şekilde deplasmana sahip olmuştur. Kavisli numunenin kalınlığı %50 oranında ve içerdiği karbon fiber miktarı iki katına çıkarılırken eğrilik yarıçapı sabit tutulduğunda, boyutsal değerlerindeki artışa bağlı olarak mukavemet değerinde belirgin artışa ulaşılmıştır. Bununla birlikte, daha sağlıklı bir karşılaştırma amacıyla elde edilen özgül mukavemet değerleri incelendiğinde, karbon fiber oranının iki katına çıkarılması ancak ve ancak kalınlık değerinde artışla gerçekleştirilebildiği için, özgül mukavemet değerinde belirgin düşüş gözlemlenmiştir. Kavisli tek yönlü numunelerin flat olarak baskı yatağı üzerinde üretilebilme imkanı, bu ters orantılı durumu aksi yöne değiştirebilir.

Bu çalışmada, farklı numune geometrileri arasında mekanik performansın sağlam bir karşılaştırması sunulacak çeşitli mühendislik alanlarında SFİ ile üretilmiş kompozitlerin tasarımı ve uygulanması için değerli bilgiler sağlanmıştır. El yöntemiyle üretilmiş sürekli fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler üzerine büyüyen bilgi birikimine katkıda bulunuldu. Özellikle, havacılık ve otomotiv alanındaki endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan yapısal sınırlamalar nedeniyle, yeterince uzun olmayan kavisli kompozit kiriş yapıların eklemeli imalat yöntemiyle de üretilebilirliği ve eksik olan yönler hakkında farkındalık yaratılmıştır.

Ultrason tekniğiyle görüntüleme yönteminin, 3B baskıyla üretilmiş ve özellikle delaminasyon hasarı gözlemi için yararlı olabilecek bir teknik olduğu önerilmektedir. Gelecek çalışmalarda, kısa-kiriş performansının farklı eğrilik yarıçaplarına sahip kavisli yapılar üzerinde de incelenebileceği ve ultrason tekniğiyle hasar analizinin çalışmalara dahil edilebileceği tavsiye edilmektedir. Ayrıca, tek yönlü kavisli yapıları flat olarak baskı yatağında da üretebilecek ve farklı malzemelerle aynı takviyeye izin verebilecek şekilde hibrit kompozit yapıların çeşitli yüklemeler altında davranışlarının incelenmesini sağlayacak 3D baskı ekstrüderleri ve cihazlarının tasarımı üzerine yoğunlaşılması da tasarımcılar için önerilerdir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesi sürecindeki katkılarından ötürü Queen's University Belfast öğretim üyelerinden Doç. Dr. Zafer Kazancı'ya teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

1. Karagöz, İ., Danış Bekdemir, A. ve Tuna, Ö., "3B yazıcı teknolojilerindeki kullanılan yöntemler ve gelişmeler üzerine bir derleme", Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt 9, Sayı 4, Sayfa 1186-1213, 2021.
2. Altun, S. ve Sekban, B., "3B yazıcılar için cam fiber katkılı kompozit filament üretimi ve mekanik özellikleri", Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., Cilt 7, Sayı 1, Sayfa 64-67, 2023.
3. Süsler, S. and Kazancı, Z., "Delamination strength comparison of additively manufactured composite curved beams using continuous fibers", Polymers, Vol. 15, Issue 19, Pages 3928, 2023.
4. Brunken, B., Barocio, E., Favaloro, A. and Kunc, V., "Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review.", Addit. Manuf., Vol. 21, Pages 1-16, 2018.
5. ASTM International, "ASTM D2344/D2344M-22 Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates", https://doi.org/10.1520/D2344_D2344M-22, April 2, 2024.
6. Fijul Kabir, S.M., Mathur, K. and Seyam, A.F.M., "A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties", Compos. Struct., Vol. 232, Pages 111476, 2020.
7. Handwerker, M., Wellnitz, J. and Marzbani, H., "Review of mechanical properties of and optimisation methods for continuous fibre-reinforced thermoplastic parts manufactured by fused deposition modelling", Prog. Addit. Manuf., Vol. 6, Pages 663-677, 2021.
8. Jamal, M.A., Shah, O.R., Ghafour, U., Qureshi, Y. and Bhutta, M.R., "Additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites via fused deposition modelling: A comprehensive review", Polymers, Vol. 16, Pages 1622, 2024.
9. Yang, C., Tian, X., Liu, T., Cao, Y. and Li, D., "3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: Mechanism and performance", Rapid Prototyp. J., Vol. 23, Pages 209-215, 2017.
10. Caminero, M.A., Chacón, J.M., García-Moreno, I. and Reverte, J.M., "Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling", Polym. Test., Vol. 68, Pages 415-423, 2018.
11. Iragi, M., Pascual-González, C., Esnaola, A., Lopes, C.S., and Aretxabaleta, L., "Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates; effects of processing conditions and microstructure", Addit. Manuf., Vol. 30, Pages 100884, 2019.
12. Yavas, D., Zhang, Z., Liu, Q. and Wu, D., "Interlaminar shear behavior of continuous and short carbon fiber reinforced polymer composites fabricated by additive manufacturing", Compos. Part B Eng., Vol. 204, Pages 108460, 2021.
13. Santos, J.D., Fernández, A., Ripoll, L. and Blanco, N., "Experimental characterization and analysis of the in-plane elastic properties and interlaminar fracture toughness of a 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced composite", Polymers, Vol. 14, Pages 506, 2022.
14. Markforged®, "Mark Two 3D Printer", <https://markforged.com/3d-printers/mark-two>, September 1, 2023.
15. Markforged®, Carbon Fiber, <https://markforged.com/materials/continuous-fibers/continuous-carbon-fiber>, September 25, 2024.
16. Markforged®, "Eiger Software", <https://www.eiger.io/>, September 1, 2023.
17. Markforged®, Design Guide for 3D Printing with Composites, <https://static.markforged.com/downloads/CompositesDesignGuide.pdf>, September 1, 2023.
18. Lloyd Instruments, Lloyd LS5 Testing Machine, <https://www.ametektest.com/products/material-testers/single-column-test-stands/l5-series>, September 15, 2023.