



Araştırma Makalesi/Research Article

3 boyutlu yazıcıda karbon fiber filamentten üretilen farklı dolgu deseni ve dolgu yoğunluğuna sahip numunelerin mekanik davranışlarının incelenmesi

Burçin Cengiz ¹, Fatih Taylan ²

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Karbon fiber
Mekanik deneyler
Eklemeli imalat
Çekme deneyi
Basma deneyi

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 24.10.2024

Kabul Tarihi: 27.11.2025

Öz: Bu çalışmada üç boyutlu (3B) yazıcı kullanılarak karbon fiber takviyeli naylon filamentten üretilen numunelerin mekanik özelliklerini araştırmak amacıyla çekme ve basma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde 5 farklı dolgu oranı (%20, %40, %60, %80 ve %100) ve 4 farklı desen çeşidi (gyroid, üçgen, zik zak ve ızgara) kullanılmıştır. Bu desenler, karbon fiber malzeme dışında diğer malzemelerle yapılmış çalışmalarla kıyaslanması için, standart desen tipleri içerisinde seçilmiştir. Numune boyutları; çekme deneyi için ASTM D638, basma deneyi için ASTM D695 standardına göre belirlenmiştir. Deney numune malzemesi olarak ESUN marka EPA-CF 1.75 mm doğal karbon elyaf filament kullanılmıştır. Numunelerin 3 boyutlu yazıcı ile imalinde, yazdırma parametreleri olarak, yazdırma sıcaklığı 265 °C, imalat tablası sıcaklığı 85 °C ve katman yüksekliği 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, 5 farklı dolgu oranında ve 4 farklı desen tipinde yapılan çalışmalarda çekme deneyi sonuçlarında dolgu oranı arttıkça; çekme gerilmesi, elastisite modülü, akma gerilmesi, rezilyans modülü ve kopma gerilmesi değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Dolgu oranı azaldıkça kopmadaki uzama ve çekmedeki uzama değerlerinde artış görülmüştür. Basma deneyi sonuçlarına göre %100 ve %80 dolgu oranlı numunelerin elastisite modülü, rezilyans modülü ve akma dayanımı değerlerinde %60, %40 ve %20 dolgu oranlı numunelere göre daha yüksek değerler ölçülmüştür. Çekme ve basma deneyleri karşılaştırıldığında basma akma gerilmelerinin çekme akma gerilmelerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. %80, %60 ve %20 dolgu oranlı numuneler arasında basma akma gerilmesi değeri en yüksek numune gyroid desenli numune olup sırasıyla 38.82 MPa, 18.11 MPa ve 6.97 MPa olarak ölçülmüştür.

Atıf için/To Cite:

Cengiz, B. Taylan, F. 3 boyutlu yazıcıda karbon fiber filamentten üretilen farklı dolgu deseni ve dolgu yoğunluğuna sahip numunelerin mekanik davranışlarının incelenmesi. Ulusallararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 17(1), 10-19, 2025.

Investigation of mechanical behavior of samples with different infill patterns and infill densities produced from carbon fiber filament in a 3D printer

Keywords

Carbon fiber
Mechanical experiments
Additive manufacturing
Tensile test
Compression test

Article history:

Received: 24.10.2024

Accepted: 27.11.2025

Abstract: In this study, tensile and compression tests were carried out to investigate the mechanical properties of samples produced from carbon fiber reinforced nylon filament using a three-dimensional (3D) printer. In the experiments, 5 different filler ratios (20%, 40%, 60%, 80% and 100%) and 4 different pattern types (gyroid, triangle, zig-zag and grid) were used. These patterns were selected from the standard pattern types in order to compare with the studies conducted with materials other than carbon fiber. Specimen dimensions were determined according to ASTM D638 for tensile test and ASTM D695 for compression test. ESUN brand EPA-CF 1.75 mm natural carbon fiber filament was used as the test specimen material. In the fabrication of the samples with a 3D printer, the printing parameters were set as printing temperature 265 °C, manufacturing table temperature 85 °C and layer height 0.2 mm. As a result, in the tensile test results of the studies performed with 5 different filler ratios and 4 different pattern types, an increase in tensile stress, modulus of elasticity, yield stress,

modulus of resilience and tensile stress at break values were observed as the filler ratio increased. As the filler ratio decreased, elongation at break and elongation in tension values increased. According to the compression test results, the modulus of elasticity, modulus of elasticity, modulus of resistance and yield strength values of the specimens with 100% and 80% filler ratio were higher than the specimens with 60%, 40% and 20% filler ratio. When the tensile and compression tests were compared, it was observed that the compression yield stresses were higher than the tensile yield stresses. Among the specimens with 80%, 60% and 20% filler ratios, the specimen with gyroid pattern had the highest compression yield stress value and was measured as 38.82 MPa, 18.11 MPa and 6.97 MPa, respectively.

1. Giriş

Eklemeli imalat “3B model datalarından alışımlı imalat yöntemlerinin aksine genel olarak malzemeleri katman katman birleştirilerek parça üretme işlemi” olarak ifade edilir [1]. Eklemeli imalat (Eİ) klasik imalat yöntemlerine göre daha kolay, hızlı ve ucuz bir şekilde parça oluşturulmasına olanak sağlar [2],[3]. Başlangıçta basit bir model meydana getirme amacıyla ortaya çıkan bu teknoloji, zamanla malzeme kalitesi, hassasiyet ve parça özellikleri açısından büyük gelişmeler kaydetmiştir. Bu teknolojinin daha da gelişmesi ile birlikte geleneksel imalatın yavaş yavaş kaybolması beklenmektedir. Eklemeli imalatın, uzay [4], otomotiv [5], medikal [6],[7], mimari [8], eğitim [9] ve tekstil [10] gibi birçok sektörde hızla yaygınlaştığı gözlemlenmektedir.

Eİ teknolojileri; toz yataklı ergitme, yapıştırıcı ile imalat, direkt enerji depolama, malzeme ekstrüzyon, malzeme püskürtme, sac laminasyon ve fotopolimerizasyon olarak sınıflandırılmıştır. Malzeme ekstrüzyon yöntemi olarak bilinen eriyik yağma modelleme (EYM)’de düşük maliyeti ve malzeme çeşitliliği nedeniyle sadece prototipleme değil, aynı zamanda hücresel yapıların üretimi açısından da tercih edilen bir yöntemdir. Özellikle EYM yöntemiyle otomotivden biyomedikale, denizcilikten gıda endüstrisine kadar pek çok alanda kullanılan polimer esaslı ürünler üretilebilmektedir [11]. Yaygın olarak kullanılanlar; PLA (Polilaktik Asit), ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), PETG (Polietilen Tereftalat Glikol), TPU (Termoplastik Poliüretan), PC (Polikarbonat) ve CF (Karbon Fiber) dir.

3B yazıcı teknolojisi için en uygun filamentlerden olan PLA ve ABS 3B baskı dünyasında oldukça yaygın kullanılmaktadır. 3B yazıcılarda yazdırılan parçaların mukavemeti, malzeme ve yazdırma aşamasında kullanılan değişkenlere göre artmakta ya da azalmaktadır. Literatürde, standart filament kullanılan çalışmalarda uygun parametreler kullanılarak üretilen parçaların mukavemetlerinde artış olduğu görülmüştür [12],[13].

CF yüksek sertlik, kimyasal direnç ve çekme mukavemetine sahiptir. Aşırı ısıya dirençlidir. Ağırlığı

düşüktür. Hafif olduğu için pek çok parçanın üretimi için idealdir. Bununla beraber uzun ömürlü olmasından dolayı da tercih sebebidir. CF malzemenin yoğunluğu çeliğe oranla düşüktür. Buna bağlı olarak CF malzeme yüksek ağırlık oranı gerektiren uygulamalar için eşsiz bir malzeme gibi görülmektedir. Otomotiv, rüzgâr türbinleri, havacılık, denizcilik, inşaat, elektrik elektronik, özel tasarım parça imalatı, sportif ekipmanlar gibi geniş kullanım alanı bulunmaktadır [14].

Polat (2022) yaptığı çalışmada, sürekli karbon fiber kullanarak yapının güçlenmesini amaçlamıştır. Yazdırılan numunelere çekme testleri uygulamış ve sayısal olarak elde edilen sonuçları değerlendirmiştir. Polimer malzeme olarak Onyx ve sürekli fiber malzemesi olarak karbon fiber kullanmıştır. Fiberli numunelerin fiber katılmadan basılan Onyx numunesi ile karşılaştırmasını yapmıştır. Onyx (kıyılmış karbon fiber dolgu naylon) ile basılan numune 16 MPa çekme dayanımına ulaşırken, yapıya sürekli karbon fiber takviyesi eklenerek basılan numune 58 MPa çekme dayanımı değerine ulaşmıştır. Bu sonuçlarla birlikte yapıya karbon fiber katılmasının çekme dayanımını olumlu yönde etkilediğini, gözlemlemiş ve karbon fiber yoğunluğunun da çekme dayanımını etkilediğine dikkat çekmiştir [15].

Bu çalışmada karbon fiber malzeme kullanarak farklı dolgu deseni ve dolgu yoğunluğu ile yazdırılan numunelerin mekanik deneyleri yapılarak sonuçları sayısal verilerle desteklenerek açıklanmıştır. Literatürde diğer malzemelere kıyasla CF ile ilgili çalışmaların fazla olamaması sebebiyle bu malzeme tercih edilmiştir. Tasarım programlarıyla latis yapıları oluşturma zor olmasından dolayı, kullanıcıya tasarım konusunda kolaylık sağlaması açısından cihaz kütüphanesinde bulunan desen tipleri kullanılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada karbon fiber malzemelerin kuvvet-uzama performanslarını araştırmak amacıyla dört farklı desen tipi (zik zak, üçgen, grid ve gyroid) ve beş farklı doluluk oranı (%20, %40, %60, %80, %100) kullanılarak toplamda 34 adet numune imal edilmiştir. (Çekme ve

basma olmak üzere; her bir desende ve dolgu oranında ikişer adet numune üretilmiştir. %100 dolgu oranı için de yine aynı şekilde iki adet numune üretimi yapılmıştır. Grafiklerde işlenen veriler, deney sonuçlarının aritmetik ortalamasından elde edilmiştir.

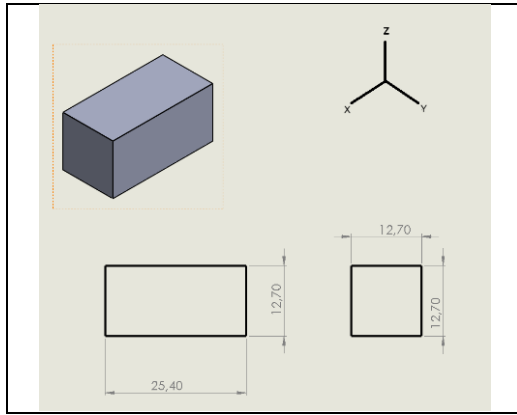
2.1. Deney numunesi

Bu çalışmada Esun Epa CF filament 1.75 mm Natural Karbon Elyaf kullanılmıştır. Nylon 6/66 kopolimer tabanlı ve buna ek olarak %20 oranında karbon fiber içeren bir filamenttir. Filament ile ilgili firma tarafından verilen değerler tablo 1'de paylaşılmıştır [16].

Tablo 1. Esun Epa CF filament için firma verileri

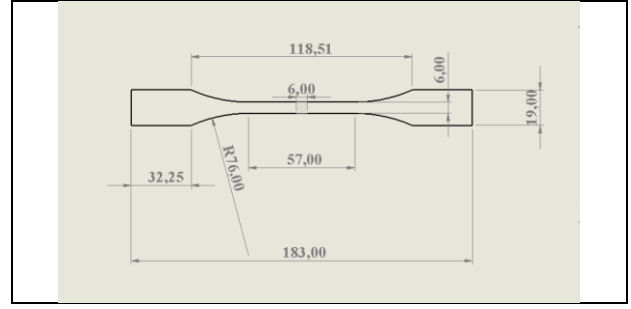
Baskı Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Bozulma Sıcaklığı (°C, 0.45 MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
260-290	1.24	155	140
Kopma Uzaması (%)	Eğme Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (kJ/m ²)	
10.61	140	18.67	

Basma deneyi numuneleri ASTM D695 standardına göre şekil 1'de verildiği üzere 12.7x12.7x25.4 mm ölçülerinde imal edilmiştir. Numune tasarımı SolidWorks çizim programında oluşturulmuştur. Katmanlar 25,40x12,70 kesit alanına paralel olacak şekilde oluşturularak imal edilmiştir.



Şekil 1. Basma deneyi numunesi

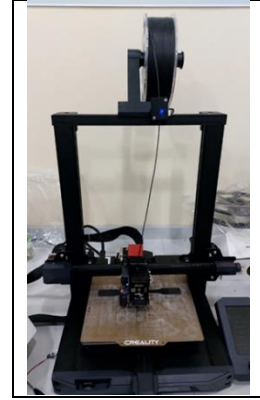
Çekme deney numunelerinin boyutları ASTM D638 standardına göre belirlenmiştir ve şekil 2'deki ölçülere göre çizilmiştir.



Şekil 2. Çekme deneyi numunesi

2.2. 3B Yazıcı

Numunelerin imalatında 3B yazıcı olarak CREALITY marka cihaz kullanılmıştır (Şekil 3.) Yazdırma sıcaklığı 265 °C, yapı levhası sıcaklığı 85 °C ve katman yüksekliği 0.2 mm'dir Numunelerin tamamında duvar kalınlığı her biri 0,2 mm olacak şekilde üç katmandan oluşmaktadır. Bu değerlerin seçiminde esun firmasının verdiği aralıklar kullanılarak seçim yapılmıştır.



Şekil 3. 3B yazıcı

2.3. Çekme ve basma deneyi cihazı

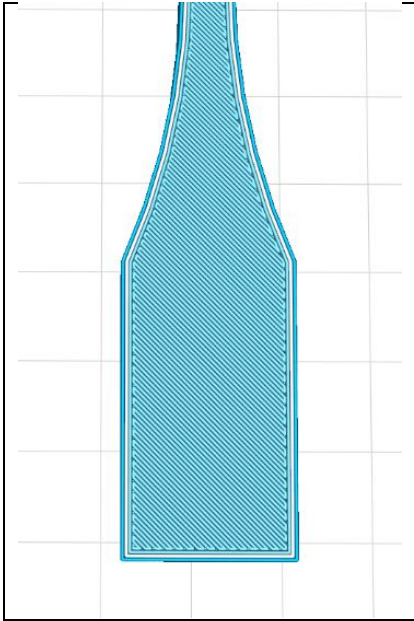
Çekme ve Basma deneyinde cihaz olarak SDÜ Yetem bünyesinde bulunan, Shimadzu AGS-X (10kN) (Şekil 4.) kullanılmıştır. Yassı numuneler için ölçü aralığı: 0-7mm kalınlığında ve 30 mm genişliğinde, silindirik numuneler için ölçü aralığı: Ø 4 - 9 mm olarak ayarlanan numuneler cihaza bağlanabilir. Güç kapasitesi 10 kN dur. Çekme deneyi 1mm/dk çekme hızıyla numunelerde kopma gerçekleşene kadar yük uygulanarak yapılmıştır. Basma hızı 1mm/dk'dır. Basma deneyleri basma yükü tüm numunelerde 10 kN'ye ulaşıncaya kadar yapılmıştır.



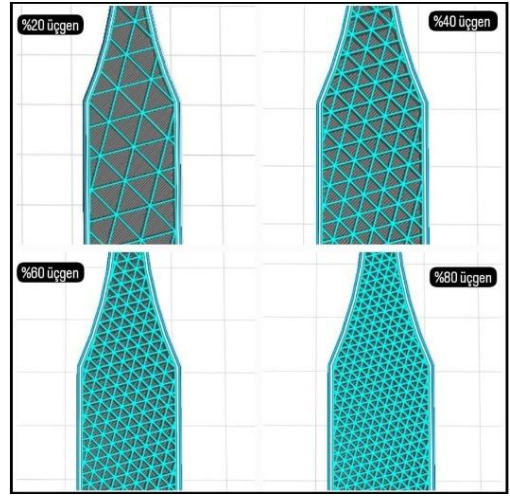
Şekil 4. Çekme ve basma deneyi cihazı

2.4. Desen tipi ve dolgu oranı

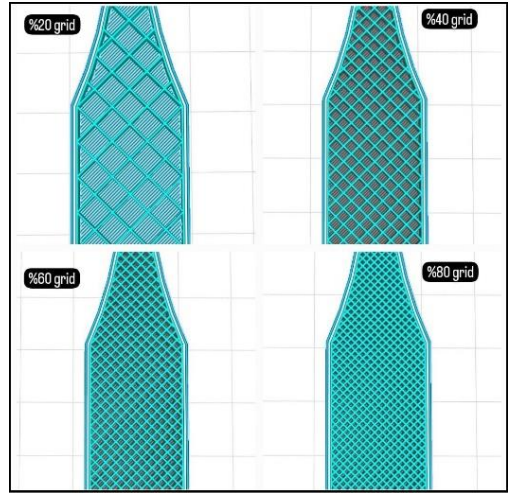
Bu çalışmada desen tipi olarak Ultimaker cura programı kütüphanesinde mevcut olan desen tipleri kullanılmıştır. Çalışmada 4 farklı desen tipi ve 5 farklı dolgu oranı ile çalışılmıştır. Desen tipleri olarak üçgen, grid, zikzak, gyroid ve %20, %40, %60 ve %80 dolgu oranları seçilerek çalışmalar yapılmıştır. Desen tipleri ve dolgu oranlarına göre görünümleri Şekil 5-9'da paylaşılmıştır.



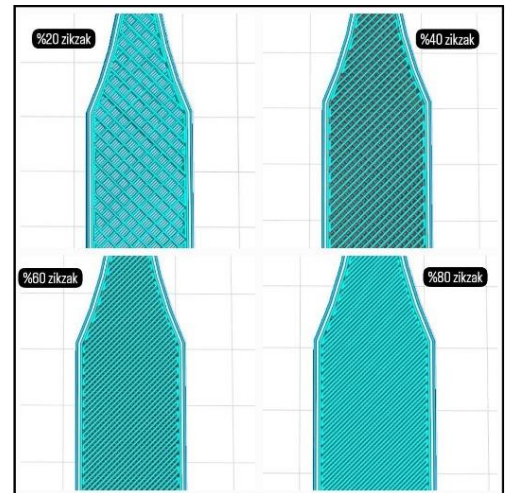
Şekil 5. Tam dolu numunenin iç yapı görünümü



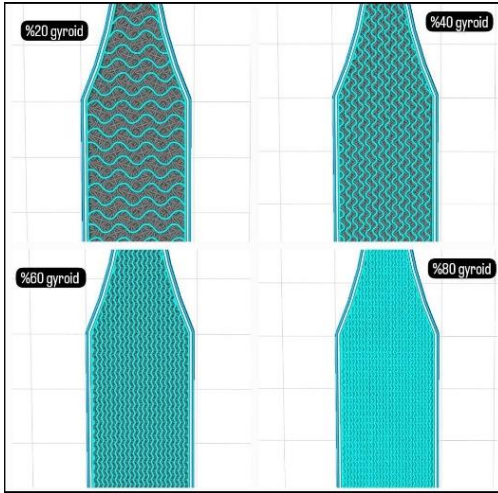
Şekil 6. Üçgen desenli numunenin dolgu oranlarına göre iç yapı görünümü



Şekil 7. Grid desenli numunenin dolgu oranlarına göre iç yapı görünümü



Şekil 8. Zikzak desenli numunenin dolgu oranlarına göre iç yapı görünümü

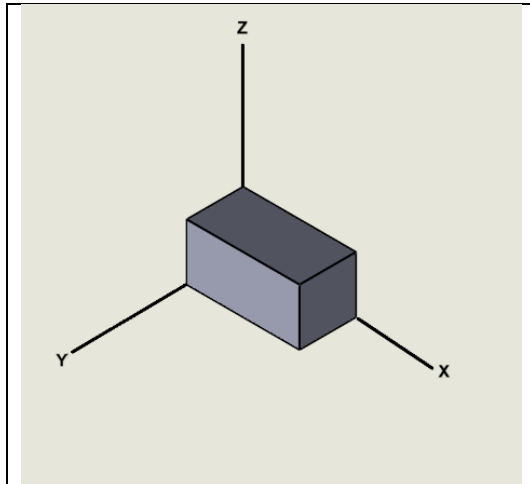


Şekil 9. Gyroid desenli numunenin dolgu oranlarına göre iç yapı görünümü



Şekil 10. Üretilen numunelere ait görsel

Deney numunelerine uygulanan kuvvet, imal edilen numunenin katman yönlerine dik olarak seçilmiştir. İmalat Z yönünde yapılmış ve kuvvet X yönünde uygulanmıştır.



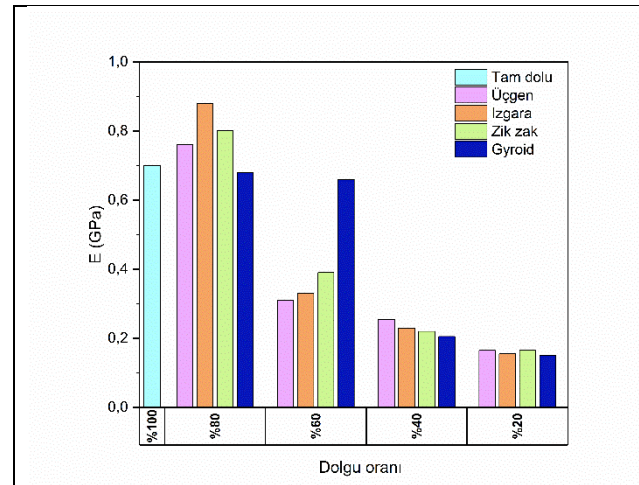
Şekil 11. Basma kuvveti ve yazdırma yönü gösterimi

Tablo 2. İmalat parametreleri

DENEY NUMUNE NO	DOLGU ORANI	DESEN	NUMUNE ADEDİ	İLERLEME HIZI (mm)	NOZÜ L SICAK LIĞI
1	%100	YOK	2	0.2	265 °C
2	%80	ÜÇGEN	2	0.2	265 °C
3	%80	GRİD	2	0.2	265 °C
4	%80	ZİK ZAK	2	0.2	265 °C
5	%80	GYROID	2	0.2	265 °C
6	%60	ÜÇGEN	2	0.2	265 °C
7	%60	GRİD	2	0.2	265 °C
8	%60	ZİK ZAK	2	0.2	265 °C
9	%60	GYROID	2	0.2	265 °C
10	%40	ÜÇGEN	2	0.2	265 °C
11	%40	GRİD	2	0.2	265 °C
12	%40	ZİK ZAK	2	0.2	265 °C
13	%40	GYROID	2	0.2	265 °C
14	%20	ÜÇGEN	2	0.2	265 °C
15	%20	GRİD	2	0.2	265 °C
16	%20	ZİK ZAK	2	0.2	265 °C
17	%20	GYROID	2	0.2	265 °C

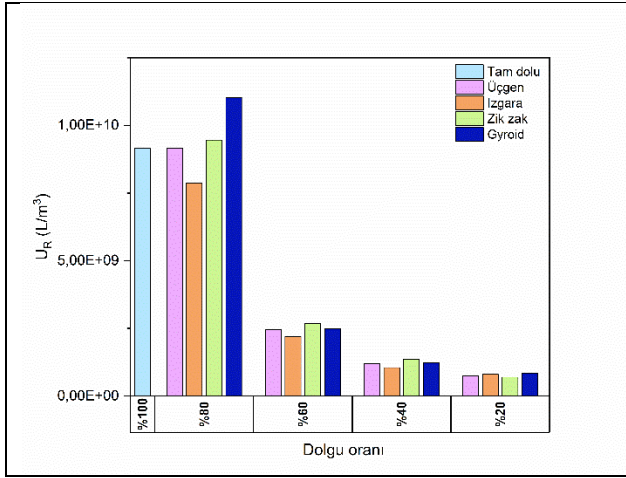
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Basma deneyi bulguları



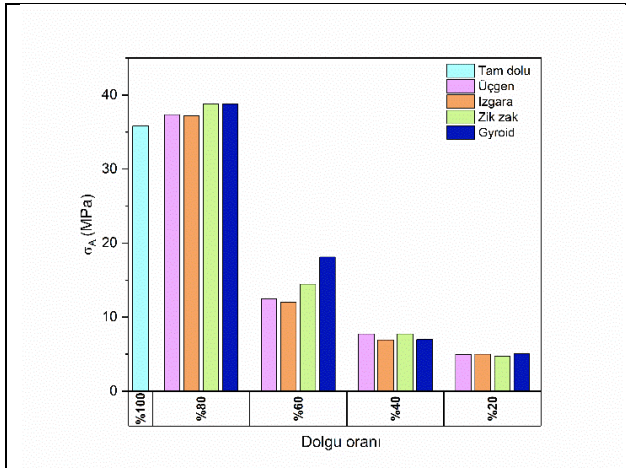
Şekil 12. Numunelerin basma deneyi elastisite modülü grafiği

Basma deneyi sonucunda elde edilen % dolgu oranı ve desen tipine göre Elastisite modülü (E) değerleri şekil 9'da verilmiştir. %80 dolgu oranlı izgara desenli numunenin maksimum değere sahip olduğu (0.88 GPa) ve en dayanıksız grubun %20 dolgu oranlı numuneler (üçgen 0.165 GPa, izgara 0.155 GPa, zik zak 0.165 GPa, gyroid 0.15 GPa) olduğu görülmektedir. Dolayısıyla daha az malzeme kullanımı için %100 ve %80 dolgu oranı yerine %60 dolgu oranı ve gyroid deseni kullanılabilir.



Şekil 13. Numunelerin basma deneyi rezilyans modülü grafiği

Rezilyans modülü (U_R) grafiğinde (şekil 10) %80 dolgulu gyroid desenli numunenin maksimum değerinde ($1.10E+10 \text{ J/m}^3$) olduğu görülmektedir. %80 dolgulu numunelerin ve tam dolu numunenin diğer numunelere göre daha dayanıklı olduğu, %20 dolgu oranlı numunelerin ise daha çabuk deforme olduğu gözlemlenmiştir (üçgen $7.46E+08 \text{ J/m}^3$, ızgara $8.00E+08 \text{ J/m}^3$, zik zak $6.95E+08 \text{ J/m}^3$, gyroid $8.36E+08 \text{ J/m}^3$). Grafiğe bakıldığında rezilyans modülünün bir göstergesi olarak elastikiyet özelliği bakımından %100 ve %80 dolgu oranlı numuneler avantajlı olarak görülmektedir. Elastiklik istenen bir çalışmada %80 dolgu oranlı gyroid desen kullanılması uygun olacaktır.



Şekil 14. Numunelerin basma deneyi akma gerilmesi grafiği

Basma deneyi sonucuna göre numunelerin akma dayanımı (σ_A) grafiği şekil 4.14'te verilmiştir. Dolgu oranı arttıkça akma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. %80 dolgu oranlı numunelerin diğer numunelere göre akmaya karşı daha dirençli olduğu görülmektedir (%80 dolgu oranlı zik zak desenli 38.79 MPa, gyroid desenli 38.82 MPa). En dayanıksız

grup %20 dolgu oranlı numunelerdir ve değerler sırasıyla şu şekildedir: 4.98 MPa, 5.005 MPa, 4.72 MPa ve 5.05 MPa).

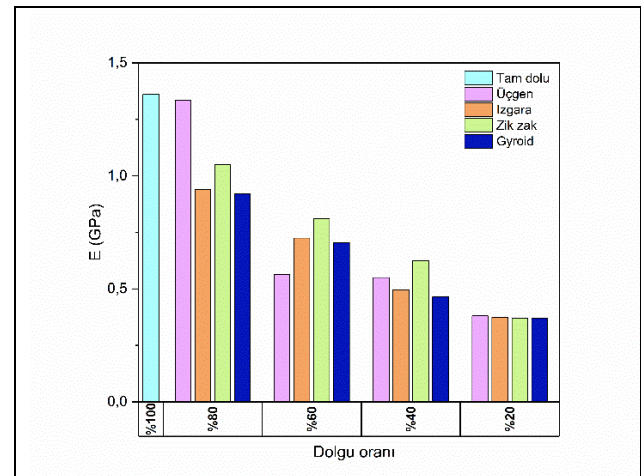
Kaya vd. (2024), PLA ile yaptıkları çalışmada %25, %50, %75 ve %100 dolgu oranlarında, üçgen malzeme ile çekme ve basma deneyleri yapmışlardır. Dolgu oranı arttıkça mekanik özelliklerin de arttığını gözlemlemişlerdir. %25 dolgu oranlı numunede basma dayanımı 19.52 MPa, uzama %9.181, %50 dolgu oranlı numunede basma dayanımı 27.51 MPa, uzama %8.126, %75 dolgu oranlı numunede basma dayanımı 53.56 MPa ve uzama %14.953 sonuçlarına ulaşmışlardır [17].

Dakhil vd. (2023), PLA filament ile üç boyutlu yazıcıda üçgen, üç altıgen ve çizgi desenli numuneler üretmek yapıldığı çalışmada, numunelere basma testi uygulanmıştır. Üç farklı dolgu oranı ile (%30, %50, %70) üretilen numunelerde dolgu oranının artmasıyla basma dayanımının arttığını ve çizgi desenli numunenin en yüksek basma dayanımına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [18].

Oudah vd. (2022), ABS filament ile yaptıkları çalışmada, üç altıgen, zik zak ve gyroid desenlerini kullanarak numuneler üretmişlerdir (dolgu oranları %25, %50 ve %75). Dolgu oranı arttıkça basma dayanımının arttığını ve %75 dolgu oranlı gyroid desenli numunenin en yüksek değere sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [19].

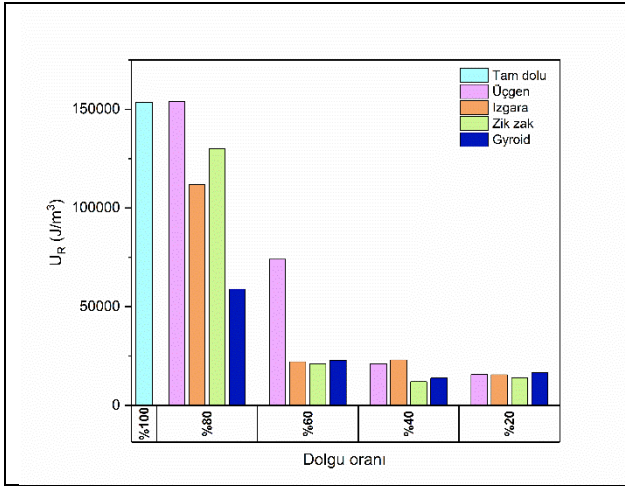
Literatüre bakıldığında dolgu oranları arttıkça basma akma dayanımında da artış gözlemlenmiştir. Bu çalışmada da elde edilen sonuç literatürle paraleldir. Grafikten görüldüğü üzere dolgu oranındaki artışla beraber akma dayanımında da artış meydana gelmiştir.

3.2. Çekme deneyi bulguları



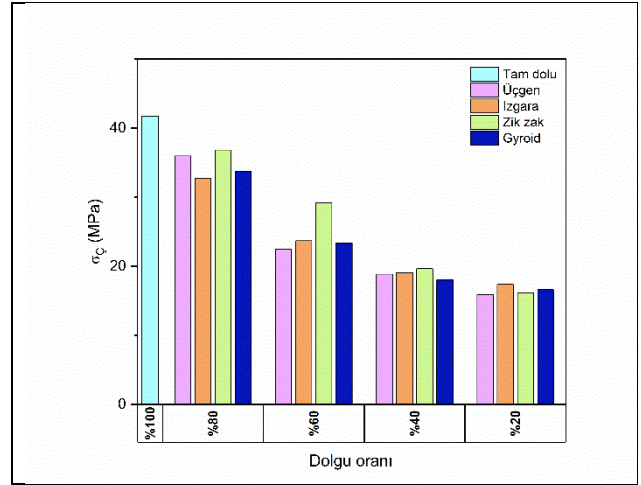
Şekil 15. Numunelerin çekme deneyi elastisite modülü grafiği

Şekil 15'te elde edilen verilere göre en yüksek elastisite modülü (E) değeri %100 dolgu oranlı numunede görülmektedir (1.36 GPa). Dayanıklılık bakımından %100 dolgu oranlı numune ile %80 dolgu oranlı üçgen desenli numune yakın değerlerde ölçülmüştür (%80, 1.33 GPa). Buna göre tam dolu baskı yerine %80 dolgulu üçgen desenli baskı alınarak daha az malzeme kullanımı sağlanabilir. En düşük elastisite modülüne sahip grup ise %20 dolgu oranlı numunelerdir. %20 dolgu oranlı numunelerde elastisite modülü dört desen tipinde de birbirlerine yakın değerlerde elde edilmiştir (sırasıyla 0.38 GPa, 0.38 GPa, 0.37 GPa, 0.37 GPa).



Şekil 16. Numunelerin çekme deneyi rezilyans modülü grafiği

Şekil 16'daki grafikte verilen rezilyans modülü (U_R) değerlerine göre en yüksek değere sahip numuneler tam dolu ($1.54E+05$ J/m³) ve %80 dolgu oranlı üçgen desenli ($1.54E+05$ J/m³) numuneler olup, rezilyans modülü en düşük numune %40 dolgu oranlı zik zak desenli ($1.20E+04$ J/m³) numunedir. Daha esnek yapıda olan numuneler %100 dolgu oranlı ve %80 dolgu oranlı üçgen desenli numuneler olarak görülmektedir. %40 ve %20 dolgu oranlı numuneler esneklik bakımından düşük değerlere sahiptirler (%40 üçgen $2.12E+04$ J/m³, %40 ızgara $2.30E+04$ J/m³, %40 zik zak $1.20E+04$ J/m³, gyroid $1.66E+04$ J/m³).



Şekil 17. Numunelerin çekme deneyi çekme gerilmesi grafiği

Şekil 17'deki grafikte görüldüğü üzere maksimum çekme gerilmesi (σ_c) %100 dolgu oranlı numunede görülmektedir. %80, %60 ve %40 dolgu oranlı numunelerdeki en yüksek çekme gerilmesi değeri zik zak desenli numunede elde edilmiştir (Sırasıyla, 36.8 MPa, 29.2 MPa, 19.6 MPa). %20 dolgu oranlı numunede ise en yüksek çekme gerilmesi ızgara desenli numunede elde edilmiştir (17.3 MPa). Desen grupları arasında en düşük çekme gerilmesi değeri üçgen desenli numunede elde edilmiştir. En düşük çekme gerilmeleri ise %80 dolgu oranlı numunede ızgara deseninde (32.7 MPa), %60 dolgu oranlı numunede üçgen deseninde (22.4 MPa), %40 dolgu oranlı numunede gyroid deseninde (18 MPa), %20 dolgu oranlı numunede ise üçgen deseninde (15.9 MPa) görülmüştür. Genel olarak % doluluk oranları azaldıkça çekme gerilmesi değerlerinde de azalmalar meydana gelmiştir. Kullanım yerinde maruz kalacağı çekme gerilmesine göre %80, %60 ve %40 dolgu oranlı numuneler için zik zak desen seçimi uygun olacaktır.

PLA iki farklı dolgu oranı ile (%20 ve %100) yapılan çalışmada grid, gyroid ve cross 3D desenleri kullanılmıştır. %100 dolgu oranında en yüksek çekme gerilmesi değeri yakalanırken, %20 dolgu oranlı numuneler arasında en yüksek çekme gerilmesi değerine grid desenli numune (38.76 MPa) sahip olmuştur [20].

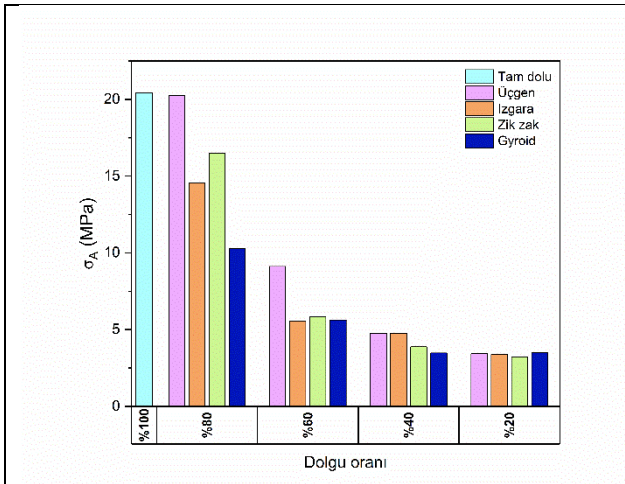
PLA, ABS ve PLA+CF malzemelerden ve %20, %50, %80 dolgu oranlı üçgen desenli üretilen çekme deney numunelerine yapılan testler sonucunda dolgu miktarındaki artışa bağlı olarak çekme dayanımı ve süneklik yüzdesi açısından en iyi sonuçlar PLA+CF kompozitlerde, ardından PLA ve ABS numunelerinde bulunmuştur [21].

PLA ile yapılan bir çalışmada ızgara desenli ve dolgu oranları %25, %50 ve %75 olan numunelere uygulanan

çekme deneyi sonuçlarına göre dolgu oranı arttıkça çekme özelliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. %25, %50 ve %75 dolgu oranlı numunelerden elde edilen çekme dayanımları sırasıyla; 29.7 MPa, 31.5 MPa, 35.4 MPa'dır [22].

PLA ile yapılan bir çekme deneyi testinde %70, %80 ve %90 dolgu yoğunluklu gyroid desenli çekme deneyi numuneleri hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilen baskıda (195-205-215 °C) %90 dolgu yoğunluklu ve 195 °C baskı sıcaklığına sahip numunenin maksimum çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir [23].

Literatürdeki bu çalışmada zik zak deseni hariç diğer desenler kullanılmıştır. Zik zak deseni ile yapılan çalışmalar gözardı edildiğinde benzer sonuçlar karbon fiber malzeme kullanılarak yapılan bu çalışmada da görülmektedir. %60 ve %40 dolgu oranlı numunelerde en yüksek çekme dayanımı zik zak deseninden sonra ızgara deseninde elde edilmiştir. %80 dolgu oranı ile yapılan çalışmalarda ise en yüksek çekme gerilmesi zik zak desenden sonra üçgen desende görülmüştür. %20 dolgu oranı ile yapılmış çalışmalarda ise en yüksek çekme gerilmesi yukarıda da belirtildiği üzere ızgara deseninde elde edilmiştir. Sonuç olarak %80, %60 ve %40 dolgu oranlı numunelerde en yüksek çekme gerilme değeri zik zak desenli numunde mevcuttur. Numunenin çekme yüklerine karşı direncini artıran desen, deseninin doğrusal yapısından dolayı zik zak desen olarak bulunmuştur.



Şekil 18. Numunelerin çekme deneyi akma gerilmesi grafiği

Şekil 18'de verilen akma gerilmesi (σ_A) grafiğinde %100 dolgu oranlı numune ile %80 dolgu oranlı üçgen desenli numunelerin en yüksek akma gerilmesi değerine sahip oldukları görülmüştür (20.43 MPa, 20.245 MPa). %100 ve %80 dolgu oranlı üçgen desenli bu numunelerin birbirlerine çok yakın

değerlerde olmaları sebebiyle daha az malzeme kullanımı açısından üretim aşamasında %80 dolgu oranı ve üçgen deseni tercih edilebilir. %20 dolgu oranlı numunelerde ise en düşük akma gerilmesi değerleri elde edilmiş ve bu değerlerin farklı desen tiplerinde bile birbirlerine yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir (üçgen 3.43 MPa, ızgara 3.385 MPa, zik zak 3.205 MPa, gyroid 3.49 MPa).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı dolgu oranları ve desen tipleri kullanılarak karbon fiber malzemeden üretilen numunelerin mekanik testler sonucu bazı özellikleri sayısal veriler ve grafiklerle desteklenerek sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar da bu bölümde paylaşılmıştır.

%80 dolgu oranı için,

Üçgen deseninde çekmedeki akma gerilmesi 20.245 MPa iken basmadaki akma gerilmesi 37.35 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %80 dolgu oranı ve üçgen desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Izgara desenli numunede çekme akma gerilmesi 14.53 MPa iken basma akma gerilmesi 37.18 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %80 dolgu oranı ve ızgara desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Zik zak desenli numunede çekme akma gerilmesi 16.49 MPa iken basma akma gerilmesi 38.79 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %80 dolgu oranı ve zik zak desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Gyroid desenli numunede çekme akma gerilmesi 10.295 MPa iken basma akma gerilmesi 38.82 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %80 dolgu oranı ve gyroid desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre %80 dolgu oranında basmaya en dayanıklı desen tipi gyroid olarak bulunmuştur.

%60 dolgu oranı için,

En yüksek çekme akma gerilmesi değeri üçgen deseninde 9.115 MPa iken basmadaki akma gerilmesi 12.51 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %60 dolgu oranı ve üçgen desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Izgara desenli numunede çekme akma gerilmesi 5.57 MPa iken basma akma gerilmesi 12 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %60 dolgu oranı ve ızgara desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Zik zak desenli numunede çekme akma gerilmesi 5.845 MPa iken basma akma gerilmesi 14.455 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %60 dolgu oranı ve zik zak desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Gyroid desenli numunede çekme akma gerilmesi 5.63 MPa iken basma akma gerilmesi 18.11 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %60 dolgu oranı ve gyroid desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre %60 dolgu oranında basmaya en dayanıklı desen tipi gyroid olarak bulunmuştur. %40 dolgu oranı için,

Üçgen deseninde çekmedeki akma gerilmesi 4.745 MPa iken basmadaki akma gerilmesi 7.735 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %40 dolgu oranı ve üçgen desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Izgara desenli numunede çekme akma gerilmesi 4.765 MPa iken basma akma gerilmesi 6.935 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %40 dolgu oranı ve ızgara desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Zik zak desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.875 MPa iken basma akma gerilmesi 7.74 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %40 dolgu oranı ve zik zak desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Gyroid desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.475 MPa iken basma akma gerilmesi 6.97 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %40 dolgu oranı ve gyroid desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre %40 dolgu oranında basmaya en dayanıklı desen tipi zik zak olarak bulunmuştur.

%20 dolgu oranı için,

Üçgen deseninde çekmedeki akma gerilmesi 3.43 MPa iken basmadaki akma gerilmesi 4.98 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %20 dolgu oranı ve üçgen desene sahip

numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Izgara desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.385 MPa iken basma akma gerilmesi 5.005 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %20 dolgu oranı ve ızgara desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Zik zak desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.205 MPa iken basma akma gerilmesi 4.72 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %20 dolgu oranı ve zik zak desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Gyroid desenli numunede çekme akma gerilmesi 3.49 MPa iken basma akma gerilmesi 5.05 MPa bulunmuştur. Bu sonuca göre %20 dolgu oranı ve gyroid desene sahip numunenin basma kuvvetine çekme kuvvetinden daha dayanıklı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre %20 dolgu oranında basmaya en dayanıklı desen tipi gyroid olarak bulunmuştur.

Çekme ve basma gerilmeleri sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde ve dolgu desenleri de dikkate alındığında, %80 dolgu oranında basma için optimum desen tipi gyroid, %60 dolgu oranında çekme için optimum desen tipi üçgen, %40 dolgu oranında çekme ve basma için optimum desen tipi sırasıyla, ızgara ve zik zak, %20 dolgu oranında çekme ve basma için optimum desen tipi gyroid olarak belirlenmiştir.

5. Tartışma ve Öneriler

Genel olarak bakıldığında,

Tüm dolgu oranı ve desenindeki numunelerin basma kuvvetine daha dayanıklı oldukları görülmektedir. Çekme kuvvetinden ziyade basma kuvvetine maruz kalacakları yerlerde kullanılmaları daha uygun görülmüştür.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen % doluluk oranları ve desen tiplerine göre elde edilen optimum sonuçlar, kullanım yerleri göz önünde bulundurularak seçilebilir ve seçilen şartlarda makine elemanları üretilerek dinamik ve tribolojik deneyler yapılabilir.

Kaynaklar

- [1] ASTM. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies ASTM F2792-12a F27 (2015). <https://www.astm.org/f2792-12a.html> (Erişim Tarihi: 15.05.2024).

- [2] Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*. 31, 287- 295, 2010.
- [3] Yakovlev A, Trunova E, Grevey D, Pilloz M. Smurov. Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects. *Surf Coatings Technol*. 190(1), 15-24, 2005.
- [4] Williams JV, Revington RJ. *International Journal of Oral Maxillofacial*. Novel use of an aerospace selective laser sintering machine for rapid prototyping of an orbital blowout fracture, *Surgery*. 39, 182-184, 2010.
- [5] Vilaro T, Abed S, & Knapp W. Direct manufacturing of technical parts using selective laser melting: example of automotive application, *Proceedings of 12th European Forum on Rapid Prototyping*, Paris, France, March 5-6, 2008.
- [6] Webb PA. A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector, *Journal of Medical Engineering & Technology*, 24 (4), 149-153, 2000.
- [7] Rengier F, Mehndiratta A, Tengg-Kobligk H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R & Kauczor HU. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 5(4), 335-41, 2010.
- [8] Kolarevic, Branko. Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age. *Proceedings of the Twenty First Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*, Buffalo New York, 11-14 October 2001.
- [9] Flowers, J. 3D laser scanning in technology education, *Technology Teaching*, 60 (3), 27-30, 2000.
- [10] Brandt J, Drechsler K, Arendts FJ. Mechanical performance of composite based on various three dimensional woven-fibre preforms. *Composites Science and Technology*, 56, 381-386, 1996.
- [11] Ergene, B., & Yalçın, B. (2023). Investigation on mechanical performances of various cellular structures produced with fused deposition modeling (FDM). *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*.
- [12] Ang KC, Leong KF, Chua CK. (2006) Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling fabricated porous structures. *Rapid Prototyping Journal*. 12(2),100-105, 2006.
- [13] Spoerk M, Arbeiter F, Cajner H, Sapkota J, Holzer C. Parametric optimization of intra- and inter-layer strengths in parts produced by extrusion-based additive manufacturing of poly(lactic acid) *Journal of Applied Polymer Science*. 134(41):1-15, 2017.
- [14] Park, S. J. & Seo, M. K. (2011). *Element and Processing*. Interface Science and Technology. (pp. 431-499).
- [15] Polat, Y. F. (2022). Eriyik Biriktirme Yöntemi ile Üretilen Karbon Fiber Katkılı Malzemelerde Fiber Katman Konumlarının Mekanik Özelliklere Etkisi. (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [16] Esun. ePA-CF filament bilgi sayfası. <https://www.esun3d.com/tr/epa-cf-product/>. (Erişim Tarihi: 20.04.2024)
- [17] Kaya, E., Bayar, İ. & Akpınar, A. F. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13, 3, 792-798, 2024.
- [18] Dakhil, G. Y., Salih, R. M. & Hameed, A. M. *Journal of Applied Sciences and Nanotechnology*, 3(1), 2023.
- [19] Oudah, S. A, Al-Attraqchi, H. B. & Nassir, N. A. (2022). The effect of process parameters on the compression property of acrylonitrile butadiene styrene produced by 3D printer. *Engineering and Technology Journal*, 40(01), 189-194.
- [20] Bacak S. FDM üç boyutlu yazıcı teknolojisinde farklı içyapı geometrileri ile üretilmiş numunelerin çekme dayanımlarının karşılaştırılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 1444-1454, (2020).
- [21] Tandon, S, Kacker, R., Sudhakar, K. G. Experimental investigation on tensile properties of the polymer and composite specimens printed in a Triangular pattern. *Kapoor S. SME*, Southfield, 2021.
- [22] Rismalia, R., Hidajat, S. C., Permana, G. R., Hadisujoto, B., Muslimin, M, Triawan F., & Rismalia, M. Infill pattern and density effects on the tensile properties of 3D printed PLA material. *Department of Mechanical Engineering*, 1402, 4, 044049, 2019.
- [23] Ahmed, B. A., Nadeem, U., Hakeem, A. S., Ul-Hamid, A., Khan, M. Y., Younas, M., & Saeed, H. A. Printing Parameter Optimization of Additive Manufactured PLA Using Taguchi Design of Experiment. *Polymers*, 15(22), 4370, 2023.