
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

3B YAZICI İLE ÜRETİLEN KARBON FİBER TAKVİYELİ PLA PARÇALARINDA KARBON FİBER ORANININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Meltem Beste AKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Meltem Beste AKIN

26/07/2023

3B YAZICI İLE ÜRETİLEN KARBON FİBER TAKVİYELİ PLA PARÇALARINDA KARBON FİBER ORANININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Meltem Beste AKIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

Eklemeli imalat (Eİ), bir diğer adıyla üç boyutlu (3B) üretim teknolojisi, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak üretilecek parçanın katmanlar halinde birbiri üzerine eklenerek üretildiği bir metottur. Bu yöntemlerden Ergiyik Biriktirme Modelleme (Fused Deposition Modeling-FDM), eklemeli imalatın en yaygın kullanılan yöntemlerinden biridir. FDM yöntemi ile çoğunlukla Polilaktik Asit (PLA) ve Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) gibi malzemeler tercih edilmektedir. Bu çalışmada, malzeme olarak farklı katkı oranlarında (% 10-15-20) karbon fiber ve etilen vinil asetat (Eva) bağlayıcı takviyeli PLA ve saf PLA filament kullanılmıştır. Bu filamentlerden farklı üretim parametreleri kullanılarak parçalar üretilmiştir. Üretilen bu parçaların mekanik karakterizasyonu araştırılmıştır. Bu parçalar üretilirken dört faktör ve dört seviyeden oluşan Taguchi L_{16} deney tasarımı kullanılmıştır. 16 adet parça üç tekrarlı olarak üretilmiştir. Test parçalarının üretimi; farklı nozul sıcaklıkları (205, 215, 225, 235 °C), farklı dolgu desenleri (D1:Lines, D2:Tri-Hexagon, D3:Gyroid, D4:Concentric) ve farklı baskı hızları (40, 50, 60, 70 mm/s) ve farklı malzemeler ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen test parçalarına ASTM D638 ve ASTM D790 standartlarına uygun olarak çekme ve eğme testleri uygulanmıştır. Mekanik değişimler ve test sonuçları Varyans Analizi (ANOVA) uygulanarak değerlendirilmiştir. Çekme ve eğme test sonuçlarında, CF+Eva takviye oranı arttıkça akma dayanımında ve eğilme yükü dayanımında düşüş gözlenmiştir. Takviyelerin gözenekli yapı oluşturması sebebi ile matris sürekliliğini zayıflattığı ve ara yüz yapışmasını negatif yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. 225-235 °C nozul sıcaklıklarının, concentric dolgu deseninin ve 50 mm/s baskı hızının ise ideal sonuçlara ulaştırdığı görülmüştür.

Bilim Kodu	:	91418
Anahtar Kelimeler	:	Eklemeli İmalat, 3B Yazıcı, Ergiyik Yığma Modellemesi (EYM), Karbon fiber takviyeli PLA
Sayfa Adedi	:	73
Danışman	:	Doç. Dr. Yakup TURGUT

THE EFFECTS OF CARBON FIBER RATIO ON MECHANICAL PROPERTIES IN CARBON FIBER REINFORCED PLA PARTS PRODUCED BY 3D PRINTER

(M. Sc. Thesis)

Meltem Beste AKIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

Additive manufacturing (AD), also known as three-dimensional (3D) production technology, is a method in which the part to be produced is produced by adding layers to each other, unlike traditional production methods. Among these methods, Fused Deposition Modeling (FDM) is one of the most widely used methods of additive manufacturing. Materials such as Polylactic Acid (PLA) and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) are mostly preferred with the FDM method. In this study, carbon fiber and ethylene vinyl acetate (Eva) binder reinforced PLA and pure PLA filament with different additive ratios (10-15-20%) were used as materials. Parts were produced from these filaments using different production parameters. The mechanical characterization of these manufactured parts was investigated. While producing these parts, Taguchi L16 experimental design consisting of four factors and four levels was used. 16 pieces were produced in triplicate. Production of test pieces; different nozzle temperatures (205, 215, 225, 235 °C), different infill patterns (D1:Lines, D2:Tri-Hexagon, D3:Gyroid, D4:Concentric) and different printing speeds (40, 50, 60, 70 mm) /s) and different materials. Tensile and bending tests were applied to the produced test pieces in accordance with ASTM D638 and ASTM D790 standards. Mechanical changes and test results were evaluated by applying Analysis of Variance (ANOVA). In the tensile and bending test results, a decrease was observed in yield strength and bending load strength as the CF+Eva reinforcement ratio increased. It was concluded that the reinforcements weaken the matrix continuity and negatively affect the interface adhesion due to the porous structure. It has been observed that nozzle temperatures of 225-235 °C, concentric fill pattern and 50 mm/s printing speed provide ideal results.

Science Code	:	91418
Key Words	:	Additive manufacturing, 3D printer, Fused Deposition Modeling (FDM), Carbon fiber reinforced PLA
Page Number	:	73
Supervisor	:	Assoc.Prof.Dr. Yakup TURGUT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Sayın Doç. Dr. Yakup TURGUT'a çok teşekkür ederim. Yine değerli bilgilerinden faydalandığım Sayın Doç. Dr. Ramazan ÇAKIROĞLU, Doç. Dr. Gültekin UZUN'a, Arş. Gör. Dr. Bahattin YILMAZ'a, Arş. Gör. Saltuk Alper YAŞAR'a, Arş. Gör. Muhammed Furkan ERHAN'a, Arş. Gör. Duygu GÜRKAN'a, Arş. Gör. Gözdenur KOŞ'a, ve bu süreçte bana çokça destek olan değerli arkadaşım Merve KARASAKAL'a teşekkür ederim. Son olarak maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3

2.1. Karbon Fiber Takviyeli Filamentler ile İlgili Yapılan Çalışmalar 3

2.2. 3B Yazıcıda Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri ile İlgili Yapılan Çalışmalar 8

2.3. Literatür Değerlendirmesi 10

3. EKLEMELİ İMALAT (Eİ) 13

3.1. Eİ Teknolojilerinin Sınıflandırılması 14

3.2. Ergiyik Biriktirme Modelleme (Fused Deposition Modelling-FDM) 15

3.3. FDM Yönteminde Kullanılan Parametreler ve Bu Parametrelerin Ürün Mekaniği Üzerine Etkisi 17

3.3.1. Katman yüksekliği (layer height) 17

3.3.2. Dolgu oranı (fill density) 18

3.3.3. 3B yazdırma hızı 18

3.3.4. Dış duvar sayısı (perimeter) 18

3.3.5. Nozul sıcaklığı 18

3.3.6. Dolgu yönü 18

Sayfa

3.3.7.Dolgu deseni..... 19

3.4 FDM Yöntemlerinde Kullanılan Filamentler..... 19

3.4.1. Poli laktik asit (PLA) 19

3.4.2. Kompozit PLA (CF-PLA)..... 20

3.4.3. Kompozit malzemelerde bağlayıcı ajanlar 21

3.5. Mekanik Testler 21

3.5.1. Çekme testi..... 22

3.5.2. Eğme (üç nokta basma) testi 22

4. MATERYAL METOD..... 25

4.1. Test Malzemesi 26

4.2. Test Parçalarının Tasarımı 27

4.3. Kullanılan 3B Yazıcı..... 29

4.4. Çekme Test Parçalarının Boyutsal Kontrolü..... 30

4.5. Yapılan Testler ve Kullanılan Cihazlar..... 31

4.5.1. Çekme testi..... 31

4.5.2. Eğme testi..... 34

4.6. Kullanılan Analiz Yöntemleri 35

4.6.1. Varyans analizi (ANOVA)..... 36

4.6.2. Gri ilişkisel analiz 36

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 37

5.1. Boyutsal Kontrol Sonuçları..... 37

5.1.1. ANOVA ile boyutsal kararlılığın değerlendirilmesi..... 40

5.2. Çekme Test Sonuçları 41

5.2.1 ANOVA ile akma dayanımının değerlendirilmesi 44

Sayfa

5.2.2. ANOVA ile maksimum yük değerlendirilmesi..... 47

5.2.3. ANOVA ile deformasyon değerlendirilmesi 50

5.3. Eğme Test Sonuçları 51

5.3.1. ANOVA ile eğilme kuvveti değerlendirilmesi 54

5.3.2. ANOVA ile eğilme gerilmesi değerlendirilmesi..... 57

5.3.3. ANOVA ile eğilme uzaması değerlendirilmesi 60

6. SONUÇ VE ÖNERİLER..... 61

KAYNAKLAR 65

ÖZGEÇMİŞ..... 72

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Literatür değerlendirmesi 10

Çizelge 3.1. Eklemeli imalat sınıflandırılması..... 14

Çizelge 3.2. Dayanım ihtiyaçlarına göre dolgu desenler 19

Çizelge 4.1. Kontrol faktörleri ve seviyeler..... 25

Çizelge 4.2. Taguchi L_{16} deney tasarımı..... 25

Çizelge 4.3. Saf PLA'nın fiziksel özellikleri 26

Çizelge 4.4. Saf PLA'nın mekanik özellikleri 26

Çizelge 4.5. Bağlayıcı malzeme Eva'nın teknik özellikleri..... 27

Çizelge 4.6. Creality Sermoon D1 3B yazıcının teknik özellikleri 29

Çizelge 5.1. Boyutsal kontrol sonuçları 38

Çizelge 5.2. Ölçüm sonuçları ve grilik derecesi hesaplanması..... 38

Çizelge 5.3. Ortalama GRG ile optimum parametreler 40

Çizelge 5.4. Boyutsal doğruluk için elde edilen ANOVA sonuçları 40

Çizelge 5.5. Elde edilen akma dayanımı değerleri..... 42

Çizelge 5.6. Taguchi analiz optimum parametreler 43

Çizelge 5.7. Akma dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları 44

Çizelge 5.8. Elde edilen maksimum yük değerleri 45

Çizelge 5.9. Taguchi analiz optimum parametreler 46

Çizelge 5.10. Test parçasının kopmadan dayanabileceği maksimum yük için elde edilen ANOVA sonuçları..... 47

Çizelge 5.11. Elde edilen deformasyon değerleri 48

Çizelge 5.12. Taguchi analiz optimum parametreler 49

Çizelge 5.13. Deformasyon değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları 50

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.14. Elde edilen eğilme kuvveti değerleri 51

Çizelge 5.15. Taguchi analiz optimum parametreler 53

Çizelge 5.16. Eğilme kuvveti değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları 54

Çizelge 5.17. Elde edilen eğilme gerilmesi değerleri 55

Çizelge 5.18. Taguchi analiz optimum parametreler 56

Çizelge 5.19. Eğilme gerilmesi değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları 57

Çizelge 5.20. Elde edilen eğme uzaması değerleri 58

Çizelge 5.21. Taguchi analiz optimum parametreler 59

Çizelge 5.22. Eğme uzaması değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları 60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Eklemeli imalat işleyiş sıralaması 13

Şekil 3.2. FDM üretim yöntemi şematik gösterimi..... 16

Şekil 3.3. FDM yöntemi kullanılarak üretilen parça örnekleri 16

Şekil 3.4. Farklı renklerde PLA filament..... 20

Şekil 3.5. Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı 22

Şekil 3.6. Eğme test düzeneği..... 23

Şekil 4.1. Kullanılan filamentlerin mikroskop görüntüleri 27

Şekil 4.2. Çekme test parçasının teknik resmi 28

Şekil 4.3. Eğme test parçasının teknik resmi 28

Şekil 4.4. Dolgu desenleri..... 29

Şekil 4.5. Test parçaları üretimi..... 30

Şekil 4.6. Ölçülen test parçaları 31

Şekil 4.7. Çekme testinin gerçekleştirildiği cihaz, UTES UTM-100 33

Şekil 4.8. Çekme işlemi esnasında ve sonrasında test parçası görünümleri 33

Şekil 4.9. Eğme testinin şematik gösterimi..... 34

Şekil 4.10. Eğme testinin gerçekleştirildiği cihaz, INSTRON 3369 35

Şekil 5.1. Boyutsal kontrol sonuçları için türetilen ana etki grafiği 39

Şekil 5.2. Boyutsal kontrol sonuçları için türetilen S/N grafiği..... 40

Şekil 5.3. Akma değerleri için türetilen ana etki grafiği..... 42

Şekil 5.4. Akma değerleri için türetilen S/N grafiği 43

Şekil 5.5. Maksimum yük değerleri için türetilen ana etki grafiği 45

Şekil 5.6. Maksimum yük değerleri için türetilen S/N grafiği..... 46

Şekil 5.7. Deformasyon için türetilen ana etki grafiği 48

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.8. Deformasyon için türetilen S/N grafiği 49

Şekil 5.9. Çekme test parçalarının koptuktan sonraki kopma yüzeyi mikroskop görüntüleri 51

Şakil 5.10. Eğilme kuvveti için türetilen ana etki grafiği 52

Şekil 5.11. Eğilme kuvveti için türetilen S/N grafiği..... 53

Şekil 5.12. Eğilme gerilimi için türetilen ana etki grafiği..... 55

Şekil 5.13. Eğilme gerilimi için türetilen S/N grafiği 56

Şekil 5.14. Eğme uzaması için türetilen ana etki grafiği 58

Şekil 5.15. Eğme uzaması için türetilen S/N grafiği..... 59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
$\sigma_{ç}$	Çekme gerilmesi/ dayanımı, MPa
σ_{e}	Eğme gerilmesi/dayanımı, MPa
M_e	Eğme momenti, N.m
E_e	Elastikiyet modülü, N/m²
σ	Gerilme, MPa
Fc	Kesme kuvveti, N
δ	Sehim (uzama) miktarı, mm

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AM	Eklemeli imalat - Additive manufacturing
ANOVA	Varyans Analizi
ASTM	Amerikan test ve malzeme derneği
CF	Karbon fiber
Eİ	Eklemeli imalat
FDM	Ergiyik Biriktirme Modelleme – Fused Deposition Modeling
GRG	Gri derece
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
PLA	Polilaktik Asit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
3B	Üç boyutlu

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, bir diğer adıyla üç boyutlu (3B) üretim teknolojisi, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak üretilecek parçanın katmanlar halinde birbiri üzerine eklenerek üretildiği bir metottur. Tek uygulamada geleneksel yöntemler ile üretilemeyecek olan ürünler bu teknoloji sayesinde üretilebilir hale gelmiştir. Yetkinliği yalnızca bununla sınırlı kalmamış; yüksek tasarım serbestliği sağlaması, daha az ham madde kullanılması ve daha hızlı üretim gerçekleştirilebilmesi; dolayısıyla maliyet açısından kar sağlaması vb. avantajları ile kısa zamanda tercih edilen ve kullanımı yaygınlaşan bir üretim yöntemi olmuştur [1]. Günümüzde eklemeli imalat; otomotiv, uzay, havacılık, savunma sanayi, inşaat, tıp, kimya endüstrisi gibi daha birçok alanda kullanılmaktadır [2]. Bu teknoloji katmanların oluşturulma şekline göre farklı yedi yönteme ayrılmaktadır. Ergiyik Biriktirme Modelleme (Fused Deposition Modeling-FDM) eklemeli imalatın en yaygın kullanılan yöntemlerindendir. FDM yöntemi; yöntemin kullanım kolaylığı, üretimde kullanılan malzeme ve üretim cihazlarının daha kolay erişilebilir olması sebebi ile diğer eklemeli imalat yöntemlerinden öne çıkmaktadır. Ergiyik Biriktirme Modelleme (FDM), filament halinde termoplastik malzemenin ergime sıcaklığında bir nozuldan geçirilerek eriyik hale getirilmesi ve bilgisayar ortamında belirlenen 3B tasarım şekli doğrultusunda hareket ettirilerek kat ve kat imal edilmesi şeklinde gerçekleşir. Üretilecek ürünün mekanik dayanımı, yüzey kalitesi, ölçü doğruluğu bir takım baskı parametrelerine bağlı olarak değişmektedir [3-4].

FDM üretim yönteminde PLA (Polylactic Acid) ve ABS (Acrylonitrile Butadien Styrene) yaygın tercih olmak üzere PEK (Polyetherketoneketone), PA (Polyamid) gibi malzemeler tercih edilmektedir [5]. Bu malzemelerden PLA; %100 yenilenebilir kaynaklardan elde edilen çok yönlü, biyolojik olarak parçalanabilen, alifatik bir polyesterdir [6]. Çevre dostu bu polimer çekme mukavemetinin ve Young modülünün yüksek olması sayesinde 3 boyutlu yazıcılarda filament, ambalaj, diş telleri, dikişler, otomotiv, havacılık, endüstri ve tıp alanları gibi birçok alanda öncelikli tercih edilen bir alternatif olmaktadır. Bununla birlikte, yüksek performanslı mühendislik uygulamaları için 3B baskı ile üretilen bu saf polimer, birçok ürün için metallere oranla düşük mekanik dayanım göstermektedir. Bu sebeple kullanım alanı sınırlıdır [7]. 3B baskı ile tamamen işlevsel ve yük taşıyan

bileşenlerin üretimini sağlayabilmek amacıyla kompozit malzeme üretim çalışmaları günümüzde ilgi odağı olmaktadır [8].

Literatürde PLA'ya farklı malzemelerin (karbon fiber CF, bakır vb.) farklı oranlarda takviye edildiği çalışmalar mevcuttur. Bununla birlikte üç boyutlu yazdırma parametrelerinin bu kompozit malzemeler üzerindeki etkisinin araştırıldığı da görülmektedir [9-12].

Sistematik olmayan deneme yanılma yöntemleri ve hata metodu gibi tekniklerin kullanılması en uygun kombinasyonlu üretim parametrelerini bulmayı oldukça zorlaştırmaktadır [13]. Seri üretim için çok önemli olan ve ürün kalitesini etkileyen parametrelerin deneysel çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak tahmin edilmesi de oldukça önemlidir [14]. Literatür araştırması göstermektedir ki bu karbon-fiber takviyeli malzemenin ideal karbon fiber takviye oranı ve ideal yazdırma parametreleri üzerinde çalışılmaya ve güncel veriler eklemeye açık bir konudur. Bu çalışmada, PLA malzemeye farklı yüzdelik takviye oranlarında karbon fiber ve etilen vinil asetat (Eva) takviyeli kompozit filament ticari bir firmadan özel üretim talebi ile temin edilmiştir. Farklı yüzdelik oranlarda karbon fiber takviyeli farklı malzemeler, farklı nozul sıcaklığı, farklı baskı hızı ve farklı baskı deseni olmak üzere 4 faktör 4 seviye Taguchi L16 uygulanmıştır. Taguchi tasarımına göre belirlenen sayıda ASTM D638 çekme testi ve ASTM D790 eğme testi parçaları üretilmiştir. Test parçaları öncelikle boyutsal kontrolden geçirilmiş ardından çekme ve eğme testleri uygulanarak belirlenen parametrelerin mekanik sonuçları değerlendirilmiştir. Değerlendirme sırasında Taguchi-Gri İlişkisel Analiz Yöntemi ve ANOVA ile en etkili parametreler test sonuçları doğrultusunda elde edilmiş, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Her geçen gün sektörde daha çok yer edinen üç boyutlu üretim teknolojisi, hızlı ve uygun maliyetli üretim, birden çok süreci tek hamlede sonuçlandırabilme kolaylığı, karmaşık geometrili parçaların üretilebilirliği ve gelişen kompozit malzemeler ile son kullanıma uygun parça üretimi gibi avantajları sayesinde geleneksel imalat yöntemlerine karşı ciddi bir rekabet oluşturmaktadır. Bu sebeple de pek çok çalışmaya konu olmaktadır. Bu çalışmalar başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

2.1. Karbon Fiber Takviyeli Filamentler ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Yıldız, çalışmasında %0, %15 ve %20 CF takviyeli PLA filament farklı doluluk oranlarında (%70, %80, %90 ve %100) olmak üzere ergiyik biriktirme modelleme (FDM) kullanarak test parçaları üretmiştir. Üretilen parçalara çekme ve sürünme testleri uygulanmıştır. Sürünme hızının incelenmesinin ardından %0 ve %15 CF takviyeli PLA test parçalarının yüke bağımlılık sergileme durumunun %20 CF takviyeli PLA parçalara göre daha düşük olduğu ifade edilmiştir [12].

Uzun ve Erdoğdu, yaptıkları çalışmada, hammadde olarak PLA, %20 bakır-PLA ve %20 CF-PLA filament üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, 45° doldurma açısı, 220 °C nozul sıcaklığı, 60 °C tabla sıcaklığı, %100 doluluk yüzdesi, düz çizgili dolgu deseni ve 55 s baskı hızında numuneler üretilmiştir. Numunelere çekme testi ve eğme testi uygulanmıştır. PLA malzemeye bakır ve CF takviye eklenmesi sonucu malzemenin çekme ve eğilme dayanımının düştüğü tespit edilmiştir. Yapılan takviyelerin süreklilik konusunda matrisi ve ara yüz yapışmasını negatif etkilediği için genel olarak düşük mekanik performanslara neden olduğu belirtilmiştir. PLA malzemelere bakır takviye yapılmasının CF eklenmesine göre daha pozitif çekme ve eğilme dayanımı sağladığı fakat bakır takviyesi yapılması durumunda da malzemenin elastikliğinin azaldığı sonucu ifade edilmiştir [16].

Sezer ve arkadaşları, kompozit filament elde etmek için ABS granül (performance ABS, Oo-Kuma) matris malzeme ve kısa CF (6 mm epoksi bazlı 1101, DowAksa) takviye malzeme kullanmışlardır. Kompozit filamentler, Ergiyik Biriktirme Yöntemi (EBY) 3B yazıcı (3Dison Pro) kullanılarak üretilmiştir. ASTM 412 A standartlarındaki çekme test

parçaları farklı iki yazdırma açısı kullanılarak üretilmiştir. 6 mm uzunluğunda CF eklenmesi ile iyileşen mukavemet performansına karşın negatif etkilenen esneklik ve işlenebilirlik sonuçları paylaşılmıştır. Bunların yanı sıra dolgu deseni değişimlerinin de mekanik özellikler üzerinde ciddi bir etkisi olduğu söylenmiştir. Ekstrüzyon sıcaklık ve hızının filament kalitesinde ciddi etkisi olduğu vurgulanmıştır. Katkısız ABS ile karşılaştırıldığında doğrusal yazdırmada [0°, 90°] CF katkı varlığı elastikiyet modülü ve çekme dayanımı açısından pozitif etki sağlamakta denilmiştir. Buna karşın tokluk ve sünekliğin ise azaldığı ifade edilmiştir. Çapraz yazdırmada [-45°, 45°] ise katkısız ABS ile karşılaştırıldığında, CF varlığı çekme dayanımı, tokluk ve sünekliği negatif etkilerken elastikiyet modülüne pozitif katkı sağladığı belirtilmiştir. Katkısız ABS için mekanik özellikler açısından dolgu deseni etkisiz bir faktörken CF takviyeli kompozit numunelerde önemli bir etken olduğu ifade edilmiştir. Karbon fiber oranı arttıkça gözenek oluşumunun arttığı fakat oluşan gözenek çaplarının daha küçük olduğu söylenmiştir. Takviye CF oranı arttıkça homojen karıştırma prosesinde fiberlerde kırılma gözlendiği ve filament karışımdaki, fiber uzunluğunun azaldığı bilgisi paylaşılmıştır. Ayrıca fiber boyunun, çekme dayanımını ve poroziteyi etkilediği ifade edilmiştir. Eriyik Akış İndeksi (EAİ) %10 CF takviye oranına kadar azalan, bu değerden sonra ise ABS'nin elde ettiği değerlere ulaşamamakla birlikte arttığı belirtilmiştir. Fiber boyutu, gözenek ve matris-fiber ara yüzeyinin filament akış özelliklerini ciddi miktarda etkilediği ifade edilmiştir [17].

Sang ve arkadaşları, potansiyel bir 3D baskılı hammadde olarak KH550 ile işlenmiş bazalt elyaf (KBF) ile güçlendirilmiş Polilaktik Asit (PLA) kompozit geliştirmişlerdir. Çalışmada, PLA/KBF'nin fiziksel (termal, mekanik ve reolojik) özellikleri ve 3D baskı için uygulanabilirliği araştırılmıştır. KBF'nin, döküm muadillerinde rastgele dağılmış KBF'nin aksine, basılı numunede baskı yönü boyunca yönlendirilmiş-dağılmış olduğu ifade edilmiştir. PLA/KBF filamentlerinin mekanik testleri, yoğunlaşmış maddenin akış davranışları ve mikro yapı gözlemleri, aynı fiber ağırlık oranına sahip karbon fiber (CF) takviyeli emsalleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, PLA/KBF'nin, PLA/CF kontroldekilerle karşılaştırılabilir gerilme özellikleri ve üstün eğilme özellikleri sergilediğini göstermiştir. Çalışma, PLA/KBF'nin karmaşık geometrili ve değişken boyutlara sahip 3D baskı uygulamaları için mekanik olarak geliştirilmiş ve düşük maliyetli bir hammadde olduğunu ifade edilmiştir [18].

Ercan, sandviç yapıya sahip basma ve eğme test parçalarının merkez bölümünde; (yatay bal peteği, dikey bal peteği, yatay truss, dikey truss, kübik, gyroid ve iskelet) farklı birim hücre geometrileri üzerinde çalışılmıştır. Bu farklı hücre geometrileri 5×5×5 mm boyutlarında sabit tutulmuştur. Tüm hücresel yapılar, belirlenen yoğunluk değerinde hücre kalınlıkları değiştirilerek deney tasarımı kurgulanmıştır. Sandviç yapıdaki basma ve eğme test parçalarının mekanik özellikleri karşılaştırmalı değerlendirilmiştir. Basma test parçaları, (PLA) ve (CFR-PLA) filamentten 3B yazıcı ile üretilmiştir. Eğme numuneleri ise yalnızca PLA filamentten üretilmiştir. Ayrıca eklemeli olarak üretilmiş periyodik hücresel çekirdeğe sahip eğme numunelerinin alt ve üst yüzeylerine, vakum infüzyon yöntemiyle üretilen karbon fiber kompozit plakaların yapıştırılmasıyla sandviç kompozit eğme numuneleri üretilmiştir. Basma ve üç nokta eğme testleri uygulanmıştır. En yüksek basma dayanımı ve elastisite modülünün çekme baskın deformasyon davranışı gösteren dikey truss, dikey bal peteği ve kübik birim hücrelerine sahip numunelerde ortaya çıktığı belirtilmiştir. Ayrıca izafi yoğunluğu arttırmanın mekanik özellikleri belirli ölçüde arttırdığı, alt ve üst yüzeylere takviye edilen karbon fiber kompozit plakaların eğme dayanımı, elastisite modülü, tokluk ve enerji emme kabiliyetini önemli ölçüde arttırdığı soncu paylaşılmıştır [19].

Karaman ve Çolak, üretim açısı (30/-60°, 45/-45°, 90/0°) ve doluluk oranı (%20, %60, %100) olmak üzere iki farklı üretim değişkeni kullanarak, ABS Plus ve 0,6mm uzunluğa sahip CF-ABS malzemeden test parçaları üretmiş ve bu parçalara çekme testi yapmışlardır. Test parçaları 15 katmandan oluşmak üzere 3mm yüksekliğindedir. Artan doluluk oranı ile tüm test parçalarında mekanik özelliklerin de artış gösterdiği ve üretim açılarının mekanik özelliklere ciddi oranda tesir ettiği sonuçları paylaşılmıştır [20].

Eren, karbon elyaf takviyesiyle 3B baskılı Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) polimer kompozit parça üretimi ve bu parçaların mekanik özelliklerindeki iyileşme üzerine çalışmıştır. Çalışmada, 6 mm uzunluğunda poliüretan bazlı karbon elyafları, ticari ABS içerisine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında takviye edilmiştir. Kompozit filamentler ile ASTM D412 A standartlarında çekme testi numuneleri, 3B yazıcıda, doğrusal yazdırma (0°, 90°), çapraz yazdırma (-45°, 45°) deseninde üretilmiştir. Kompozit filamentlerin ticari ABS ile karşılaştırıldığında; karbon elyaf eklentisi doğrusal yazdırmada (0°, 90°) çekme dayanımını ve elastisite modülünü önemli derecede arttırdığı, tokluk ve sünekliği ise azalttığı ifade edilmiştir. Çapraz yazdırmada (-45°, 45°) ise ticari ABS ile

karşılaştırıldığında karbon elyaf varlığı elastikiyet modülünü arttırırken, çekme dayanımı tokluk ve sünekliği azalttığı belirtilmiştir. Ticari ABS ve karbon elyaf katkılı kompozit numunelerde yazdırma deseninin mekanik özellikleri kayda değer bir biçimde etkilediği ifade edilmiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin anizotropik özellik gösterdiği söylenmiştir. Karbon elyaf takviye oranı arttıkça kompozit malzemelerin kırılgan, gevrek davranışlar gösterdiği ve gözenek oluşumu çapının küçülerek, oluşan gözenek sayısının çoğaldığı ifade edilmiştir. Porozite miktarı ve çapın mekanik özellikleri etkilediği vurgulanmıştır. Bunların yanı sıra karbon miktarı arttıkça homojen karıştırma işleminde elyafların fiziksel kırılmasının arttığı ve kompozit filament içerisindeki ortalama elyaf uzunluğunun azaldığı belirtilmiştir. Elyaf boyunun çekme dayanımını ve poroziteyi etkilediği sonucu paylaşılmıştır [21].

Ferreira ve arkadaşları, PLA ve ağırlıkça %15'lik bir oranda kısa karbon fiberlerle güçlendirilmiş PLA malzemelerin mekanik karakterizasyonu üzerine çalışmışlardır. Numunelerin tümü, sabit mikro yapı ve aynı yapı parametreleri ile özel olarak yönlendirilmiş (0°+, 90°+ veya ±45° 0°+ 'da) malzeme biriktirme ile üretilmiştir. Sertlik için sunulan sonuçlardan, kısa karbon fiberlerin takviyeli PLA+CF'nin çekme dayanımının (baskı yönüne göre) PLA'ya kıyasla çok (yaklaşık 2,2 kat) arttığı sonucu verilmiştir. Çekme dayanımının, baskı yönüne çapraz ve baskı düzlemine göre de kısa lifler tarafından sırasıyla 1,25 ve 1,16 kat artırıldığı ifade edilmiştir. PLA+CF'deki değerlendirmeler, PLA'dakinden daha düşük gerinimlerde meydana gelmesinden kaynaklı takviyeli malzemenin kısa karbon liflerinin eklenmesiyle daha kırılgan hale geldiği vurgulanmıştır. PLA+CF'nin SEM değerlendirmeleri kısa karbon fiberlerin çoğunlukla 3B yazıcının nozul ucu uzunluğu ile hizalandığını belirtmektedir. PLA+CF için sertlikteki en büyük artışın baskı yönünde olduğu bilgisi paylaşılmıştır. PLA ve PLA+CF için rijitlik ve güçlerdeki farklılıkları açıklanmıştır [9].

Sezer ve arkadaşları, FDM 3B yazıcılarda kullanılacak karbon fiber takviyeli ABS filament üretimi elde etme yöntemleri ve elde edilen filamentlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, %10 %15 ve %20 oranlarında karbon fiber takviyeli filamentler üretilmiştir. Sünekliği artırmak için karışıma LDPE ve yağlayıcı olarak polietilen eklenmiştir. Karbon fiber özelliklerinin çeşitliliğine göre belirli miktarın üzerindeki karışımlarda çekme dayanımının düştüğü ifade edilmiştir. Bunun sebebi olarak artan fiber oranıyla fiber-ABS arasındaki katmanların tam birleşmediği, daha sık boşluk

oluştuğu böylece gözenekli yapı sebebiyle dayanımın da azaldığı yorumunu yapmışlardır. Homojenliği sağlamak için yoğun karıştırma işlemi yapıldığında ise fiberlerin kırıldığı ifade edilmiştir. Karbon fiber oranının artmasının çekme dayanımına ek olarak kırılganlığı da arttırdığı bilinmektedir. Bu durum sebebi ile filamentin FDM yazıcılarda kullanılmasının zorlaştığı ayrıca ağırlık olarak %20 üzerindeki karbon fiber miktarının FDM makinasında nozul tıkanmalarına sebebiyet verdiği belirtilmiştir. Kısa karbon fiber uzunluğunun dayanımı arttırdığı fakat nozul tıkanmaları gibi negatif özelliklere de da yol açabildiği sonucu paylaşılmıştır [10].

Hu ve arkadaşları, sürekli-fiber takviyeli kompozitlerin eklemeli imalattaki son patentleri incelemişlerdir. Bu incelemeyi yeni teknik yöntemlerle ilgili çalışma ve yeni yapılarla ilgili patentler olmak üzere iki açıdan sınıflandırmışlardır. Eklemeli imalat tabanlı kompozitlerin mevcut sorunları ve gelecekteki gelişimi ele alınmıştır**.** Elyaf ile matris arasında zayıf ara yüzey bağı sebebi ile boşluk oluşumunun nasıl azaltılacağı ve lifler üzerindeki yapışma mukavemetinin nasıl artırılacağının araştırılması gerektiği önerilmiştir. Ek olarak, 3 boyutlu baskının tekrarlanabilirliğini garanti etmek genellikle zor olduğundan, basılı parçaların tutarlılığının nasıl sağlanacağı daha fazla araştırılmalıdır önerisinde bulunulmuştur. Mevcut ticari yazıcıların çoğu saf polimerler için tasarlandığından, sürekli liflerin eklenmesi de nozulun tıkanmasına, aşınmasına, bükülmesine ve zayıf yapışmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Ek olarak, fiberlerin uygun değer oryantasyonu ile kompozit yapının nasıl tasarlanacağının, genel mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde çok önemli bir rol oynadığı söylenmiştir [22].

Khan ve arkadaşları, FDM tarafından üretilen tek yönlü bir hibrit kompozitin ara yüzey kırılma tokluğunu mekanik testler uygulanması sureti ile incelemişlerdir. Bileşik yapı olarak nitelendirilen malzeme, ABS ve karbon fiberle güçlendirilmiş PLA'dan oluşmaktadır. İlk alternatif için çift konsol kiriş numune testi, uç çentikli eğilme kullanılarak karakterize edilmiştir. İkinci değerlendirme koşulu için ise çift konsol kiriş numune testi ve karışık mod iki alternatif için karışık mod eğme numune testi uygulanmıştır. Nozul ucu sıcaklığının ve baskı hızının arttırılmasının hem ilk alternatif değerlendirmede hem de ikinci alternatif değerlendirmede kırılma tokluğunu artırdığı, ayrıca ikinci alternatif test koşulunda kırılma tokluğu üzerindeki nozul sıcaklığının artmasının etkisinin oldukça yüksek olduğu ifade edilmiştir [23].

2.2. 3B Yazıcıda Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Kamer ve Temiz, ABS ve PLA malzeme kullanarak farklı tabla ve nozul sıcaklıkları ile çekme test parçalarını 3B olarak üretmişlerdir. Çalışmada, ABS malzemede 5 farklı nozul sıcaklığı (80°C sabit tabla sıcaklığında; 260, 250, 240, 230, 220 °C) ve 6 farklı tabla sıcaklığı (260 °C sabit nozul sıcaklığında; 80, 70, 60, 50, 40, 30 °C) kullanılmıştır. PLA malzemede ise 6 farklı nozul sıcaklığı (60 °C sabit tabla sıcaklığında; 240 °C, 230 °C, 220 °C, 210 °C, 200 °C, 190 °C) ve 4 farklı tabla sıcaklığı (240 °C sabit nozul sıcaklığında; 60, 50, 40, 30 °C) kullanmışlardır. Test parçalarının kütle, sertlik, yüzey pürüzlülükleri gibi özellikleri değerlendirilerek parçalara çekme testi uygulamışlardır. Çekme test parçalarını ASTM D638-14 standardı doğrultusunda üretmişlerdir. Her iki malzeme için de kullandıkları farklı tabla sıcaklıklarının sonuçlar üzerinde etkili olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca ABS ve PLA malzemelerle üretilen çekme test parçalarında nozul sıcaklığının azalması ile kütle, üst yüzey sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin doğru orantılı azaldığı, pürüzlülük değerlerinin yükseldiği, alt yüzey sertlik ve uzama değerlerinin ise değişmediği ifade edilmiştir. Gerilme şekil değiştirme eğrileri hazırlanılıp malzemenin sünek mi gevrek mi özellik gösterdiği ABS ve PLA malzemeler için değerlendirilmiştir [24].

Özdoğan, eklemeli imalatta doluluk oranı, katman kalınlığı, nozul sıcaklığı ve tarama açısı değişkenlerinin PLA malzeme üzerindeki akma mukavemeti, maksimum eğilme gerilmesi, rezilyans, tokluk, elastikiyet modülü gibi değerleri üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Çalışmada, bu değişkenlerin malzemenin mekanik özelliklerine ve baskı süresine etkisi üzerine araştırma yapılmıştır. Doluluk oranı olarak % 20, 40, 60, 80, katman kalınlığı olarak 0,15, 0,2 0,25 ve 0,3 mm, nozul sıcaklığı 210, 220, 230 °C ve tarama açısı ±45° ve 0/90° parametreleriyle çalışılmıştır. ASTM D790 standartlarına uygun eğme testleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ile akma gerilmesi, maksimum eğilme gerilmesi, elastisite modülü, rezilyans, tokluk ve birim uzama değerleri paylaşılmıştır. En üst ve en düşük değerler arasındaki fark %126 olarak verilmiştir. Baskı süreleri kıyaslamasında ise katman kalınlığı ve sıcaklık artışı ile doğru orantılı olarak artış, tarama açısı ve doluluk oranı ile ters orantılı azalış elde edildiği paylaşılmıştır [25].

Bıyıklıoğlu, katman kalınlığı, doluluk oranı, dolgu tipi gibi üretim parametrelerinin ve çarpma hızının kırılma mekaniği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada Charpy

darbe testi uygulanmıştır. Test parçaları üretimi ABS ve PLA malzemeden FDM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katman kalınlığı olarak 0,2, 0,15, 0,1 mm tercih edilirken dolgu deseni olarak lineer, kübik, üçgen, eş merkezli, kübik alt bölümlü ve dörtyüzlü dolgu desenleri kullanılmıştır. Katman kalınlığı değişikliğinin kırılma mekaniği üzerinde etkili olmadığı fakat belirli koşullarda darbe dayanımını pozitif yönde etkilediği sonuçları paylaşılmıştır. Artan doluluk oranı doğrusal olarak malzemenin tokluğu ve enerji sönümleme kabiliyetini de arttırmaktadır sonucu verilmiştir. Bu çalışmanın ardından vakum infüzyon yöntemi ile EYY birleştirilerek sürekli fiber takviyeli 3B numuneler üretilmiştir. Kompozit takviye malzemesi olarak cam fiber ve karbon fiber, matris malzemesi olarak ABS ve bileşimi kolaylaştırıcı bağlayıcı olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Bu üretim yöntemiyle çekme ve darbe numuneleri üretilmiş ve sonuçlar takviyesiz ABS numune ile karşılaştırılmıştır. Cam fiberin darbe dayanımını artırdığı fakat çekme dayanımını düşürdüğü sonucu paylaşılmıştır. CF takviyesinin ise darbe dayanımını herhangi bir şekilde pozitif ya da negatif etkilemediği fakat çekme dayanımını düşürdüğü ifade edilmiştir. Her iki takviye malzemesinin de test parçasının kırılma mekaniğini etkilediği ve daha az hasara uğramasını sağladığı ifade edilmiştir [26].

Günay ve diğerleri, PLA+ filament kullanarak üç boyutlu üretimi gerçekleştirilen çekme test numunelerinde baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısının mekanik özelliklere etkisini değerlendirmişlerdir. ANOVA sonuçlarına göre mekanik özelliklere en etkili parametre olarak doluluk oranı olarak belirtilmiştir. Taguchi optimizasyonu sonucunda da çekme dayanımının 30 mm/s baskı hızı, %100 doluluk oranı ve 0/90° tarama açısının en uygun değer işlem parametreleri olduğu sonucu paylaşılmıştır [27].

Apak, eklemeli imalat yöntemi ile PLA filament malzemesi kullanılarak üretim yapılmıştır. %20, %60, %100 olmak üzere üç farklı doluluk oranı kullanılmıştır. Çizgi, Kafes ve Orta merkezli olmak üzere üç farklı dolgu deseni ve 20 mm/s, 40 mm/s ve 60 mm/s olmak üzere üç farklı üretim hızı kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Üretilen test parçalarına sertlik ölçüm testleri ve çekme testleri uygulanarak test parçalarının mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Test sonuçlarına göre; doluluk oranındaki artış ile numunelerin çekme mukavemetinin de arttığı ifade edilmiştir. Dolgu deseni ve üretim hızının değişiminin, çekme mukavemeti açısından kayda değer bir değişikliğe neden olmadığı söylenmiştir. Doluluk oranının artışı ve üretim hızının azalışı ise birlikte değerlendirildiğinde uzama değerlerinde azalmaya sebep olduğu bilgisi verilmiştir. Dolgu

oranındaki artış ve üretim hızındaki azalmanın birlikte değerlendirildiğinde, sertlik değerlerinde genel olarak bir artışa neden olduğu belirtilmektedir. Uzama ve sertlik değerlerindeki değişimin, PLA malzemesinin ürün elde edilmesi sürecinde, daha fazla ısıya maruz kalmasına bağlı olarak gevrekleşmesinden kaynaklandığı sonucu vurgulanmıştır. Dolgu deseni parametrelerinin ise, tüm testlerde anlamlı bir değişme neden olmadığı söylenmiştir [28].

Jerez-Mesa R. ve arkadaşları, PLA malzemeden üretilen numunelerin yorulma ömrüne etki eden faktörleri analiz etmiştir. Analiz sonucunda katman yüksekliğinin yorulma ömrü üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu bilgisi paylaşılmıştır. Nozul çapının büyüklüğü arttıkça yorulma ömründe daha iyi sonuçlar elde edildiği ve dolgu yoğunluğu arttıkça da parça direncinin arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca baskı hızının yorulma ömrü üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonucu paylaşılmıştır. Bu sebeple çalışmada benzer 3B üretilen ve bu malzeme kullanılan çalışmalarda en yüksek üretim hızının seçilmesinin faydalı olacağı önerisine yer verilmiştir [29].

2.3. Literatür Değerlendirmesi

Literatürde yapılan çalışmaların kullanılan malzeme, üretim parametreleri ve tarihe göre sınıflandırılması tablo halinde Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Literatür değerlendirmesi

Yazar	Malzeme	Karbon Oranı	Nozul Sıcaklığı	Dolgu Deseni	Doluluk Oranı	Katman Kalınlığı	Nozul Çapı	Baskı Hızı	Tarih
Yıldız	CF-PLA	✓	-	-	✓	-	-	-	2022
Nergün ve arkadaşları	CFRPLA	✓	-	-	-	-	-	✓	2022
Marsayine ve arkadaşları	PLA-DB-SENB	-	-	-	-	✓	-	-	2022
Kaveloğlu ve arkadaşları	ABS ve PLA	-	-	-	-	✓	-	-	2022
Kamer ve arkadaşları	ABS ve PLA	-	-	-	-	-	-	✓	2022
Khan ve arkadaşları	ABS ve CFPLA	-	✓	-	-	-	-	✓	2021

Çizelge 2.1. (devam) Literatür değerlendirmesi

Yazar	Malzeme	Karbon Oranı	Nozul Sıcaklığı	Dolgu Deseni	Doluluk Oranı	Katman Kalınlığı	Nozul Çapı	Baskı Hızı	Tarih
Karabıyık ve Apak	PLA	-	-	✓	✓	-	-	✓	2021
Özdoğan	PLA	-	✓	-	✓	✓	-	-	2021
Gebel ve Ermurat	Epoksi reçine-CF/Cam Fiber	-	-	-	-	-	✓	-	2021
Kamer ve Temiz	ABS ve PLA	-	✓	-	-	-	-	-	2021
Kamer ve arkadaşları	ABS ve PLA	-	✓	✓	-	-	-	-	2021
Günay ve diğerleri	PLA+	-	-	-	✓	-	-	✓	2020
Uzun ve Erdoğdu	PLA-%20 Bakır PLA-%20CF-PLA	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	2020
Sezer ve arkadaşları	CF-ABS	-	-	✓	-	-	-	-	2019
Ercan	PLA-CFRPLA	-	-	✓	✓	-	-	-	2019
Öztürk ve arkadaşları	CF-PLA	-	-	-	-	-	-	-	2019
Sang ve arkadaşları	KFB-PLA / CF-PLA	-	-	-	-	-	-	-	2019
Karaman ve Çolak	ABS Plus / CF-ABS	-	-	-	✓	-	-	-	2019
Bıyıklıoğlu	ABS ve PLA	✓	-	✓	✓	✓	-	-	2019
Güleç	PLA-PEO-KET	✓	-	-	-	-	-	-	2019
Apak	PLA	-	-	✓	✓	-	-	✓	2019
Gebel	Epoksi reçine-CF /Cam Fiber	-	-	-	-	-	✓	-	2018
Ferreira ve arkadaşları	PLA - CFPLA%15	✓	-	-	-	-	-	-	2017
Eren	CF-ABS / ABS	✓	-	✓	-	-	-	-	2017
Chacon ve arkadaşları	PLA	-	-	-	-	✓	-	✓	2017
Jerez-Mesa ve arkadaşları	PLA	-	-	-	✓	✓	✓	✓	2017
Sezer ve arkadaşları	CF-ABS	✓	-	-	-	-	-	-	2016

Literatürde yapılan bu çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Saf termoplastiklere göre daha iyi mekanik özellikler için kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla FDM yönteminde en çok

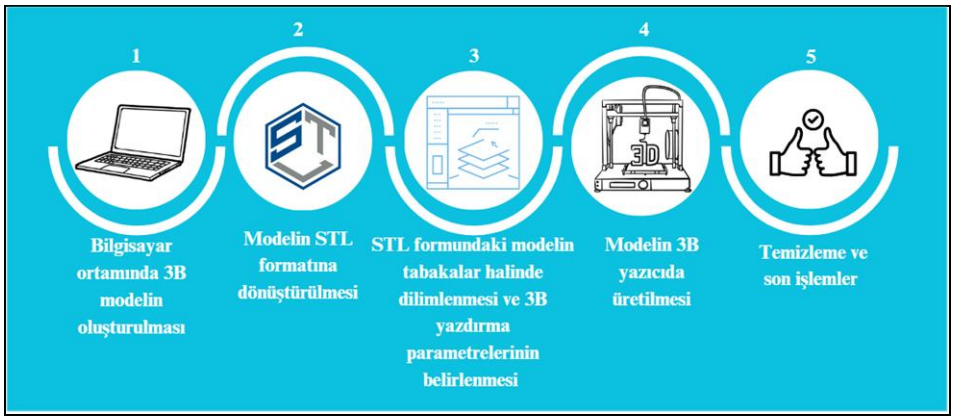
kullanılan ABS ve PLA malzemelere karbon fiber, cam fiber, bakır gibi birçok farklı takviye malzemesi farklı yüzdelik oran ve formlarda eklenmiştir.

- Tarama açısı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, dolgu deseni, katman kalınlığı, nozul çapı ve yazdırma hızı gibi parametrelerin de eklemeli imalat sürecini büyük ölçüde etkilediği görülmüştür.
- Çalışmaların çoğunlukla doluluk oranı, baskı hızı ve tarama açısı üzerine yoğunlaştığı görülmüştür.

Bu çalışmada, literatürde üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde en etkili parametrelerden olan; nozul sıcaklığı, dolgu deseni yazdırma hızı parametrelerinin ideal parametreleri kullanılmıştır. Değişken karbon fiber takviye oranlarında Eva bağlayıcılı malzeme ile özel olarak üretilmiş filamentler bu parametrelerde üretilmiştir. Nozul sıcaklıkları (205, 215, 225, 235 °C), dolgu desenleri (D1:Lines, D2:Tri-Hexagon, D3:Gyroid, D4:Concentric) ve farklı baskı hızları (40, 50, 60, 70 mm/s) ile kompozit filamentin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Bu doğrultuda üretilen test parçalarına çekme ve eğme testleri uygulanmıştır. İhtiyaç duyulan farklı mekanik özellikler doğrultusunda ideal karbon fiber takviye oranı, ideal yazdırma parametreleri ve malzemenin mekanik karakterizasyonu değerlendirilmiştir.

3. EKLEMELİ İMALAT (Eİ)

Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerinde kullanılan malzemenin azaltılarak ürün oluşturulması prensibinin aksine; katman katman biriktirilen malzeme ile ürünün 3 boyutlu geometriye dönüştürülmesine dayalı bir üretim yöntemidir [30]. İlk olarak 1980'li yıllarda keşfedilen ve o dönemde hızlı prototipleme adı ile anılan bu üretim yöntemi 1986 tarihinde Charles Hull (3D Systems şirketinin kurucusu) tarafından patent alınmıştır [31]. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesinin birçok farklı işlem gerektireceği ve çok zaman alacağı karmaşık geometrili parçaları kolaylıkla üretebilme imkânı sunması, üretilecek parçanın içyapısının katmanlar arası boşaltma yapılarak hafifletilebilmesi, montaj gereksinimini bazı koşullarda kısmen bazı koşullarda tamamen ortadan kaldırması vb. avantajları ile eklemeli imalat hızlı bir gelişim göstermiştir [32]. Eklemeli imalat katmanların birleştirilmesi ve kullanılan malzeme açısından birçok farklı yönteme ayrılsa da temelde, tüm yöntemler için işleyiş Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Eklemeli imalat işleyiş sıralaması

Üretilmesi planlanan parçanın, herhangi bir CAD yazılımı ile veya tersine mühendislik uygulaması gerçekleştirilerek 3B tasarım modeli bilgisayar ortamında oluşturulmaktadır. Bilgisayar destekli tasarım, Solidworks, Catia vb. yazılımlar aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. İkinci aşama olarak tasarlanan üç boyutlu model, verilerin düzenini açıklayan ve tasarımın yüzey geometrisini minimum boyutlarda üçgen parçalara bölerek yeniden var eden STL (STereoLithography) dosya şekline dönüştürülür ve kaydedilir. Ardından, kaydedilen bu tasarım "Dilimleyici (Slicer)" olarak isimlendirilen 3 boyutlu yazıcı ara yüz programlarından birine (Simplfy 3D, Cura vb.) aktarılmaktadır. Bu ara yüz programları, modelin dilenen ölçülerde katmanlara ayrılmasına ve 3 boyutlu yazdırma

parametrelerinin (nozul sıcaklığı, katman kalınlığı, 3B yazdırma hızı, tabla sıcaklığı vb.) belirlenmesine imkân sağlamaktadır. Böylece tasarım katmanlar halinde bir katı modele dönüştürülür. Bu dönüşüm 3 boyutlu yazıcının tasarımı katı modele dönüştürmek için kullandığı bir yazılım dili olan G kod formatında gerçekleşmektedir. Bu veri 3B yazıcıya aktarılarak tasarlanan ürünü oluşturmaktadır. Son olarak da tercihen, yüzey kalitesini arttırmak ya da parçayı renklendirmek için üretim sonrası temizleme ve son işlemler uygulanabilmektedir [33].

3.1. Eİ Teknolojilerinin Sınıflandırılması

Literatürde Eİ teknolojileri ile ilgili pek çok farklı sınıflandırma karşımıza çıkmaktır [34]. Kullanılan malzeme ve cihaza bağlı olarak süreç farklılıkları gözlenmektedir. Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM), farklılıkları derleyerek, yedi temel kategoriden oluşan bir sınıflandırma yapmıştır. Bunlar; 1-Fotopolimerizasyon, 2-Malzeme ekstrüzyonu, 3-Malzeme püskürtme, 4- Yapıştırıcılarla katmanlı imalat, 5- Toz yataklı eritme, 6-Yönlendirilmiş enerji biriktirme ve 7- Levha/Sac laminasyonudur [35]. Çizelge 3.1.'de bu sınıflandırma verilmiştir.

Çizelge 3.1. Eklemeli imalat sınıflandırması [36-38].

Üretim Tipi	Yöntem	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Malzeme
Fotopolimerizasyon	Lazerle sertleştirme	Stereolitografi (SLA)	UV ile sertleşen reçineler Vakslar Seramikler
	Projektörle sertleştirme	Dijital ışık işleme (DLP)	
	LED ve oksijenle Sertleştirme	Aralıksız dijital ışık işleme (CDLP)	
Malzeme ekstrüzyonu	3B Yazıcı	Ergiyik yığma modelleme (FDM)	Termoplastikler Vakslar
Malzeme ekstrüzyonu	UV ışıkla ile Sertleştirme	Malzeme püskürtme (MJ)	UV ile sertleşen reçineler
	Isı ile sertleştirme	Nanopartikül püskürtme (MPJ)	Metaller
	Kesici ile şekillendirme	DOD (İstek üzerine bırakma)	Vakslar
Yapıştırıcılarla katmanlı imalat	Bağlayıcı madde ile Birleştirerek	Yapıştırıcı ile katmanlı imalat (BJ)	Alçı Kum Metaller
Üretim Tipi	Yöntem	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Malzeme
Toz yataklı eritme	Madde ve enerji ile eritme	Multijet eritme (MJF)	Metaller
	Lazer ile sertleştirme	Seçici lazer sinterleme (SLS)	

Çizelge 3.1. (devam) Eklemeli imalat sınıflandırması [36-38]

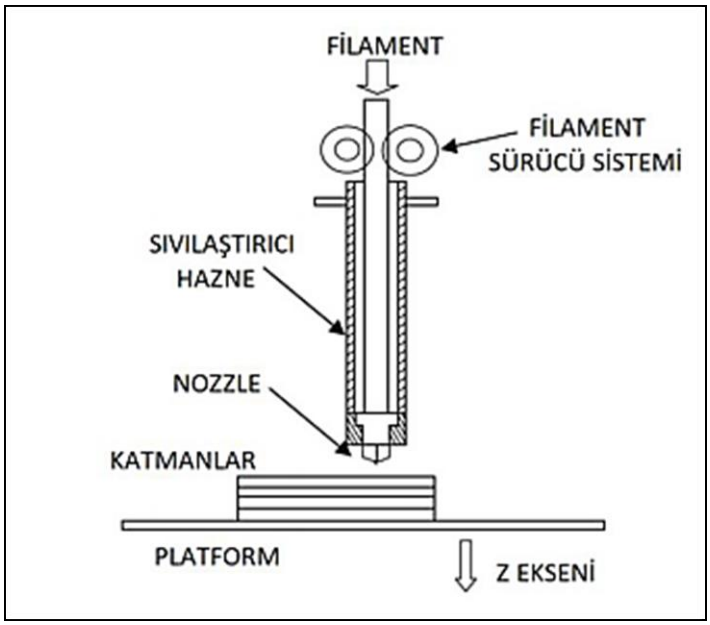
Üretim Tipi	Yöntem	Kullanılan Teknoloji	Kullanılan Malzeme
Toz yataklı eritme	Elektron ışınıyla eritme	Direkt metal lazer sinterleme (DMLS) Seçici lazer sinterleme (SLM)	Metaller
Yönlendirilmiş enerji biriktirme	Lazer ile eritme	Lazer toz şekillendirme (LENS)	Metaller
	Elektron ışınıyla eritme	Elektron ışın eklemeli imalat (EBAM)	
Levha/Sac laminasyonu		Tabakalı obje üretimi (LOM)	Termoplastikler Kompozitler Kâğıt

Çalışmada Ergiyik Biriktirme Modelleme metodu kullanılmaktadır. Bu sebeple diğer üretim yöntemlerinin detaylarına yer verilmemiş, yalnızca Ergiyik Biriktirme Modelleme detaylandırılmıştır.

3.2. Ergiyik Biriktirme Modelleme (Fused Deposition Modelling-FDM)

FDM yöntemi günümüzün gelecek vaat eden teknolojilerinden biridir. 3B yazıcılar tarafından yaygın olarak kullanılan bu yöntemde, üretilecek parçanın kat kat oluşturulabilmesi için genelde tel şeklinde hammaddeler, eriyebilen termoplastik malzemeler başta olmak üzere gelişen teknoloji ile kompozit malzemeler de kullanılabilmektedir. Bu malzemelerin genel adına filament denmektedir. FDM yönteminde, üretilmesi planlan model ilk olarak bir CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) programında oluşturulur veya bir tarayıcı yardımı ile var olan herhangi bir parça taranıp bilgisayar ortamına aktarılır. Ardından bu model, herhangi bir dilimleme yazılımı aracılığı ile küçük boyutlarda dilimlere ayrılır. Dilimleyici yazılım yardımı ile oluşturulan her bir dilim 3B yazıcıya gönderilebilecek bir G-kod formatında kaydedilir. Kullanılacak filament 3B yazıcıda var olan ektrüzyon başlığında eritilerek sıvı ya da katı-sıvı arası bir forma getirilir. Yazıcı motoru tarafından yönlendirilen bu ekstruder eritilmiş ham maddeyi nozul adı verilen bir başlıktan yazdırılma düzlemi üzerine akıtmaya başlar. Eritilen malzeme bu katlar üzerine yapışarak işlem tekrar tekrar uygulanır ve istenen geometride parça oluşumu gerçekleştirilir. Bu yöntem üretim esnasında, nozul sıcaklığı, üretim yüzeyi sıcaklığı (tabla sıcaklığı), üretim hızı (mm/s), eritilen ham madde katman yüksekliği, üretim tarama açısı, malzeme doluluk oranı ve malzemenin akıtılacağı dolgu deseni gibi birçok parametreyi

yönetme olanağı sunmaktadır [39-41]. Şekil 3.2'de FDM üretim yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.2. FDM üretim yöntemi şematik gösterimi [41]

Güncel olarak sıkça AR-GE çalışmalarına konu olan FDM üretim yöntemi fayda ve kısıtlayıcı faktörleri ile ele alınabilmektedir. Bu avantaj ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir [43].

Avantajları:

- Karmaşık geometrili parçaların üretim kolaylığı
- Düşük maliyet
- Çoklu öncül ya da ardıl işlem gereksinimi olmayışı
- Ek aparatlara ihtiyaç duyulmaksızın üretim
- Hızlı üretim olanağı

Dezavantajları:

- Düşük yüzey kalitesi
- Değişken parça yoğunluğu
- Z yönünde zayıf parça oluşumu

- Keskin yüzey üretimi zorluğu
- Malzemeler sebebiyle mekanik dayanımı düşük ürün oluşumu

Şekil 3.3'te FDM yöntemi kullanılarak üretilen parça örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.3. FDM yöntemi kullanılarak üretilen parça örnekleri [42]

3.3. FDM Yönteminde Kullanılan Parametreler ve Bu Parametrelerin Ürün Mekaniği Üzerine Etkisi

3B yazıcı kullanılarak üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde kullanılan değişken parametrelerin ciddi ölçüde etkili olduğu bilinmektedir. Bu değişken parametreler, koşullar değiştirilerek arttırılabilir sayıda olmakla birlikte 7 adet temel değişken parametre literatürde en etkili parametreler olarak kabul görmektedir. FDM yöntemi ile eklemeli imalatta en etkili 7 eğişken parametre ve bu parametrelerin özellikleri aşağıda verilmiştir [44].

3.3.1. Katman yüksekliği (layer haight)

Ürün oluşturulurken akıtılan her bir filament katmanı yüksekliğini milimetre cinsinden ifade etmektedir. Daha ince katman yüksekliği kullanılarak oluşturulan ürünler daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olurken üretim süresini arttırmaktadır. Karmaşık geometrili ve görünümün önemli olduğu parça üretimlerinde ince katman yüksekliği tercih edilmelidir.

Çözünürlüğün önemli olmadığı daha kaba ürün üretimleri için ise kalın-yüksek katman kullanımı üretim hızını arttırabilmektedir.

3.3.2. Dolgu oranı (fill density)

Üretilmesi hedeflenen parçanın dış kabuk içinde kalan malzeme yoğunluğunu ifade etmektedir. Yüzdelik cinsinden ifade edilmektedir. Örneğin %100 doluluk oranında üretilen bir ürün tamamen katı ve boşluksuz kabul edilmektedir. Doluluk oranının artışı mukavemet özellikleri yönünden pozitif etmekle birlikte zaman ve malzeme açısından artışa sebep olmaktadır.

3.3.3. 3B yazdırma hızı

Filament akıtıcı başlığın hızını ifade etmektedir. Kullanılan malzemeye, parça geometrisine ve 3B yazıcının sınırlarına bağlı olarak değişebilmektedir. Literatürde kullanılan filamentin yapışma kabiliyetini negatif yönde etkilemeyecek şekilde muhtemel en yüksek hızın kullanılmasının üretim süresi açısından faydalı olacağı ifade edilmektedir.

3.3.4. Dış duvar sayısı (perimeter)

Eklemeli imalatta üretim öncelikle dış çerçeve oluşturulması ve ardından bu çerçevenin içinin dolgu deseni şeklinde doldurulması ile gerçekleşmektedir. Dış duvar sayısı doğrultusunda desen ve içyapıdaki malzeme yoğunluğu değişebilmektedir.

3.3.5. Nozul sıcaklığı

Kullanılan filamentin akışkan-yarı akışkan hale getirilme sıcaklığıdır. Malzemenin kimyasal özellikleri ve yapışma kabiliyetini etkilediği için önemli bir değişken parametredir.

3.3.6. Dolgu yönü

Parça üretilirken kullanılan 3B yazdırma açısını temsil etmektedir. 0° ile 90° arasında olabilmektedir.

3.3.7. Dolgu deseni

Üretilen parçanın dış duvarları içerisinde kalan kısma iç dolgu denilmektedir. Bu iç dolgu farklı desenlerde işlenebilmektedir. Dolgu desenleri ürünün dayanım ve esnekliğini büyük oranda etkilemektedir. İhtiyaç duyulan dayanımlara göre Cura 5.2.2 paket programında var olan dolgu desenleri Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Dayanım ihtiyaçlarına göre dolgu desenleri

Düşük Dayanım Gereken Durumlar	Orta Dayanım Gereken Durumlar	Yüksek Dayanım Gereken Durumlar	Esnek 3B Üretimler
Çizgiler	Izgara	Kübik	Eş Merkezli
	Üçgenler	Kübik Alt Bölüm	Çapraz
	Üçlü Altıgenler	Sekizlik	Çapraz 3B
		Çeyrek Kübik	
		Gyroid	

3.4. FDM Yönteminde Kullanılan Filamentler

FDM yöntemi ile gerçekleştirilen üretimlerde çoğunlukla Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Polilaktik Asit (PLA) başta olmak üzere Paliamid (PA), Polikarbonat (PK) ve Polietilen Tereftalat (PETG) gibi termoplastik esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Son yıllarda bu saf polimerlere ek olarak farklı katkı elemanları ile desteklenen, mekanik özellikleri geliştirilmiş, iyileştirilmiş kompozit malzemeler de geliştirilmekte ve kullanılmaktadır [45-48].

3.4.1. Polilaktik asit (PLA)

PLA; tamamen yenilenebilir kaynaklardan elde edilen çok yönlü, biyolojik olarak parçalanabilen bir polimerdir [49]. Çevre dostu bu polimer çekme mukavemetinin ve Young modülünün yüksek olması sayesinde 3 boyutlu yazıcılarda filament olarak kullanılabilmektedir. Bunun yanı sıra ambalaj, diş telleri, medikal dikişler, otomotiv ve havacılık sektörü gibi birçok alanda kullanılan bir ham madde olmaktadır. 3B yazdırma esnasında genellikle kokusuz, nadir durumlarda da toksik olmayan şeker benzeri koku oluşturduğu bilinmektedir. Bu özelliği, ev ve ofis ortamlarında sağlıklı kullanım imkânı ile diğer filamentlere göre PLA'yı öne çıkarmaktadır [50]. Bununla birlikte, yüksek

performanslı mühendislik uygulamaları için 3B baskı ile üretilen bu saf polimer birçok ürün için düşük mekanik dayanımlı olması nedeniyle kullanımda sınırlı kalmaktadır [51-53]. Maruz kaldığı ısı altındaki dayanımı düşük, darbe dayanımı ise ABS malzemeye kıyasla daha kötüdür. Bu olumsuzluklar, PLA ile 3B baskıda istenilen düzeyde işlevsel ve yük taşıyan bileşenlerin üretimini engellemektedir [54]. Şekil 3.4'te farklı renklerde PLA filamente örnek verilmiştir.



Şekil 3.4. Farklı renklerde PLA filament [55]

3.4.2. Kompozit PLA (CF-PLA)

Birden fazla malzemenin biri ana matris malzemesi diğeri takviye malzemesi olacak şekilde bir araya getirilmesi ile üretilen yeni malzemelere kompozit malzeme denilmektedir. Kompozitler genel olarak mukavemeti yükseltmek, ağırlığı düşürmek veya ısıya dayanımı arttırmak gibi tekil ya da çoğul faydaları bir arada elde etmek amacıyla üretilirler [56]. Farklı endüstriler için kompozit halleri ile değiştirilebilir mekanik özelliklere sahip olan PLA; çevre ve insan sağlığını koruyan, kaliteli ürünler sunmak isteyen birçok plastik sanayi firması için günümüzde ilgi odağı olmuştur. 3B üretim teknolojisi için biyo malzemelerde gelecek gelişmelerde kullanılabilir, geliştirilmiş özellikler ve daha geniş bir uygulama yelpazesi ile ticari ve akademik araştırmalarda birçok yeni uygulama ve ürün sunabileceği düşünülmektedir [57].

Büyük bir çoğunlukla takviye elemanları elyaf (fiber) şeklinde imal edilmektedir. Bu durum katı hallerindeki rijitlik ve dayanımlarına göre daha iyi bir performans göstermelerini sağlamaktadır. Ana matris ile takviye malzemesi arasındaki ara yüzey

bağları arttıkça kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin arttığı görülmektedir. Karbon fiber günümüzde sıkça kullanılan bir takviye maddesidir. Elastikiyet modülü ve dayanımı yüksektir [58]. Karbon fiberler bilinen en sert takviye elemanlarından olmakla birlikte yapısal özellikleri bakımından bazı dış etkenlere göre değişiklik gösterebilmektedir. Yönlendirilişe bağlı olarak; boyuna çekme dayanımı, elastikiyet modülü, ısıl ve elektrik iletkenliği ve ısıl genleşme katsayısını arttıracak yönde tesir etmekte fakat enine çekme dayanımını azaltabileceği de görülmektedir [59].

3.4.3. Kompozit malzemelerde bağlayıcı ajanlar

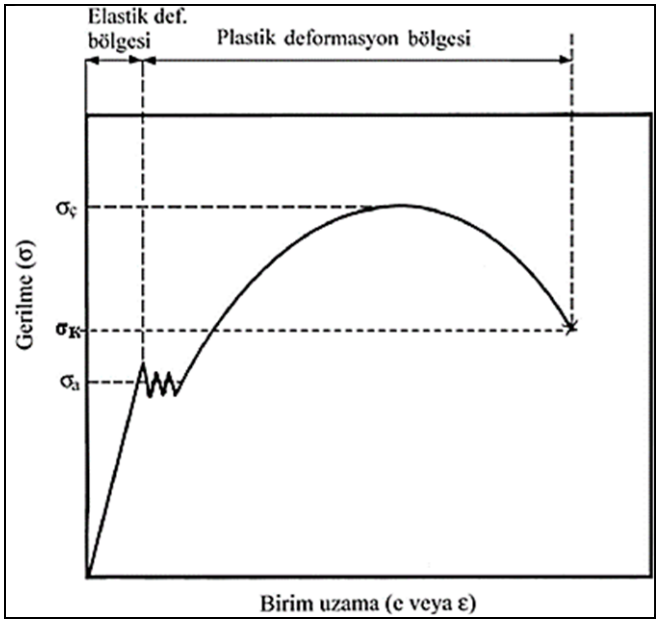
Termoplastik malzemeler ve takviye elemanlarının çoğu uyumsuzdur. Fazlar arasındaki zayıf bağlanma sebebi ile termoplastikler zayıf gerilme özelliği gösterebilmektedir. Bağlayıcı ajan ya da bağdaştırıcı olarak adlandırılan malzemeler, iki fazın eşleşmesini iyileştirmek için polimer karışımına eklenen malzemelerdir [60-62]. Kompozitlerde, başta Etilen Vinil Asetat (EVA) ve Silan (Si-69) bağlayıcı ajan olmak üzere pek çok bağlayıcı kullanılabilmektedir. Bu bağlayıcı ajanlar takviye ve matris arasındaki arayüzde kimyasal köprü oluşturarak arayüz yapışmasını iyileştiren kimyasallardır. Takviye yüzeyine tutunan molekül ve polimer faz ile reaksiyona girerler. Böylelikle arayüz gerilimini düşürüp mikro yapıyı stabilize ederler ve dağılmış faz alanı boyutunu azaltırlar. Günümüzde ahşap ve PLA kompozit malzemelerde kullanılan bu bağlayıcı ajanlar üzerine çalışmalar devam etmektedir [63-65].

3.5. Mekanik Testler

Ürünlerin mekanik yüklere maruz kaldığında gösterdiği davranışlara mekanik özellikler denilmektedir. Bu özellikleri belirlemek amacı ile malzemeye göre farklı kriterlerde testler uygulanmaktadır. Örneğin statik yüklere dayanımını belirlemek istediğimiz bir ürün/malzeme için basma ve çekme testleri kullanılırken enine yük taşıyan kiriş gibi elemanların mukavemetini öğrenebilmek için eğme (üç nokta basma) testi uygulanır [66, 67]. Bu testler koşulları ve uygulanabilirliği ASTM ya da TSE'ye uygun olarak belirlenmektedir.

3.5.1. Çekme testi

Kompozitler, metaller, plastikler vb. olmak üzere çeşitli malzemelere çekme testi uygulanmaktadır [68]. Bu test ile yapı malzemelerinin tasarımında ne kadar yüke dayanabildikleri ve ne kadar şekil değiştirebilme yeteneğine sahip oldukları elde edilmektedir. Bu verileri elde etmek için kullanılan temel test çekme testidir. Malzemeye bir kuvvet uygulandığında bu genel olarak şekil değişikliğine sebep olmaktadır. Uygulanan kuvvet kaldırıldığı zaman malzeme ilk şekline dönebiliyorsa buna, elastik şekil değiştirme; dönemiyorsa plastik şekil değiştirme denir. Malzemenin elastik ve plastik şekil değiştirebilme kabiliyeti çekme testi ile öğrenilmektedir [69]. Şekil 3.5'te çekme testi sonucunda elde edilecek çekme diyagramına örnek olarak, düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı verilmiştir [70].

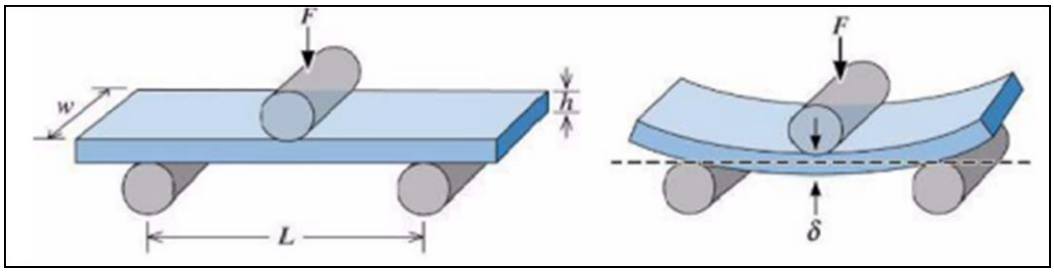


Şekil 3.5. Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı [70]

3.5.2. Eğme testi (üç nokta basma testi)

Eğme testi tasarım aşamasında malzemenin eğilmeye karşı mekanik dayanımını tespit etmek amacıyla yapılır. Enine yük taşıyan elemanlarda eğilme sıkça görülmektedir. Örneğin kiriş bu kuvvete maruz kalan elemanlardan biridir. Bu testin uygulanması sonucunda eğme momenti (M_e), eğilme gerilmesi (σ_e), elastikiyet modülü (E_e) ve sehim

miktarı (δ) gibi değerler hesaplanır [71]. Şekil 3.6'da eğme test düzeneği gösterilmiştir [72].



Şekil 3.6. Eğme test düzeneği [73]

4. MATERYAL METOD

Bu çalışma kapsamında, FDM yönteminde filament olarak sıkça kullanılan PLA kullanılmıştır. Saf ve kompozit (%10CF+%10Eva PLA, %15CF+%15Eva PLA, %20CF+%20Eva PLA) filamentlerden çekme ve eğme test parçası, farklı 3B yazdırma parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Kullanılan PLA filamentin içeriğinde, karbon fiber ile aynı oranda bağlayıcı malzeme (Eva) kullanılmıştır. Değişken yazdırma parametreleri olarak, nozul sıcaklığı, baskı deseni ve baskı hızı kullanılmıştır. Deney tasarımı olarak, Taguchi L_{16} kullanılarak belirlenen sayıda üretilen parçaların boyutsal doğrulukları değerlendirilmiş, çekme ve eğme testleri uygulanarak mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çizelge 4.1'de Taguchi kontrol faktörleri ve seviyeleri ile Çizelge 4.2'de Taguchi L_{16} deney tasarımı verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kontrol faktörleri ve seviyeler

Sembol	Kontrol Faktörleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
M	Malzeme	Saf PLA – 1(A)	%10CF+%10 Eva PLA – 2(B)	%15CF+%15 Eva PLA – 3(C)	%20CF+%20 Eva PLA – 4(D)
T	Nozul Sıcaklığı (°C)	205	215	225	235
D	Dolgu Deseni	Lines - 1	Tri-hexagon - 2	Gyroid - 3	Concentric - 4
H	3B Yazdırma Hızı (mm/s)	40	50	60	70

Çizelge 4.2. Taguchi L_{16} deney tasarımı

Deney No	Faktör M	Faktör T	Faktör D	Faktör H
1	1	205	1	40
2	1	215	2	50
3	1	225	3	60
4	1	235	4	70
5	2	205	2	60
6	2	215	1	70
7	2	225	4	40
8	2	235	3	50
9	3	205	3	70
10	3	215	4	60
11	3	225	1	50
12	3	235	2	40
13	4	205	4	50
14	4	215	3	40
15	4	225	2	70
16	4	235	1	60

4.1. Test Malzemesi

Bu çalışmada, filament malzemesi olarak Filameon marka saf PLA kullanılmıştır. Kullanılan PLA, reçine biçimli olup 1,75 mm çapında, film ekstrüzyonu, termoform veya fiber eğirme için uygun, yüksek viskoziteli, düşük akışlı, amorf yapıda ve şeffaftır. Ayrıca Filameon şirketi bünyesinde %10CF+Eva PLA, %15CF+Eva PLA, %20CF+Eva PLA olmak üzere üç farklı kompozit filament özel olarak üretilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan kompozit filamentler, 80 mikron (µm) boyunda, 3 mikron (µm) çapında (M80-3) öğütülmüş karbon elyaf kullanılarak üretilmiştir. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de saf PLA'nın fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Saf PLA'nın fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Yöntem	Standart Değer
Yoğunluk	Literatür değeri	1,24 g/cm³
Eriyik akış indeksi	ISO 1133-A (210°C/2,16kg)	6 g/10 dk.
Eriyik akış indeksi	ISO 1133-A (190°C/2,16kg)	3 g/10 dk.
Stereo kimyasal saflık	Toplam enerjiler corbion yöntemi	96% L-izomer
Dış görünüş	Görüş	Kristal beyaz peletler
Kalıntı monomer	Toplam enerjiler corbion yöntemi	≤ 0,3%
Su / nem	Kulometrik Karl-Fischer	≤ 400 ppm
Erime sıcaklığı	DSC	155°C
Camsı değişim ısısı	DSC	60°C

Çizelge 4.4. Saf PLA'nın mekanik özellikleri

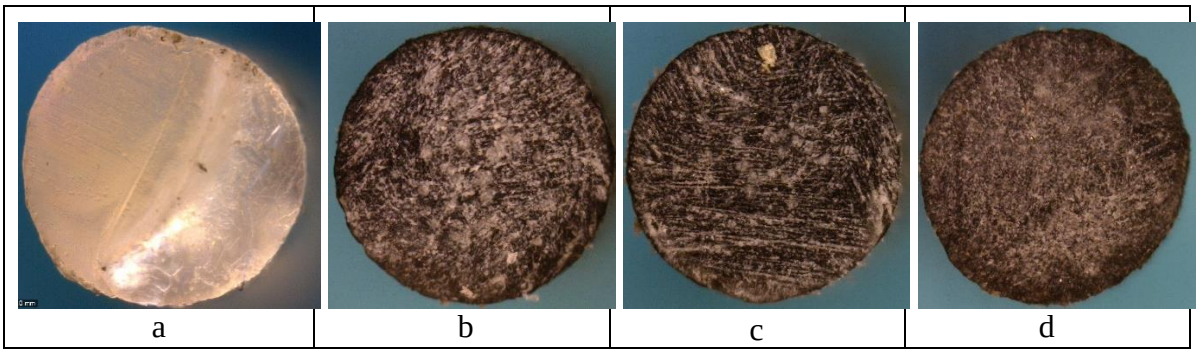
Mekanik Özellikler	Yöntem	Standart Değer
Gerilim modülleri	ISO 527-1	3500 MPa
Gerilme direnci	ISO 527-1	45 MPa
Kopma uzaması	ISO 527-1	≤ 5%
Çentikli darbe 23°C	ISO 179-1eA	≤ 5 kJ/m²
Isı sapma sıcaklığı	ISO 75-1	60°C

Bağlayıcı malzeme olarak Sipchem EVA 2518 CO malzemesi kullanılmıştır. Sipchem EVA 2518 CO, çeşitli köpük kalıplama uygulamaları için tasarlanmış %18 etilen vinil asetat kopolimer reçinesidir. Bağlayıcı maddenin üretimi yüksek basınçlı boru prosesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan Eva bağlayıcısının teknik özellikleri Çizelge 4.5'te verilmiştir

Çizelge 4.5. Bağlayıcı malzeme Eva'nın teknik özellikleri

Özellikler	Standart Değer	Test Metodu
Erime indeksi (190°C / 2,16 kg için) (g/10 dk.)	2,5	ASTM D1238
Vinil asetat içeriği (wt%)	18	ASTM D5594
Yoğunluk (g/cm³)	0,935	ASTM D1505
Vicat yumuşama noktası (°C)	64	ASTM D1525
Erime noktası (°C)	87	ASTM D3418
Akma anındaki çekme dayanımı (MPa)	5,2	ASTM D638
Kopmada çekme mukavemeti (MPa)	11	
Verim noktasında uzama (%)	260	
Kopmada uzama (%)	>800	
Eğilme modülü (MPa)	60	ASTM D790
Shore A sertlik değeri	76	ASTM D2240
Shore D sertlik değeri	36	

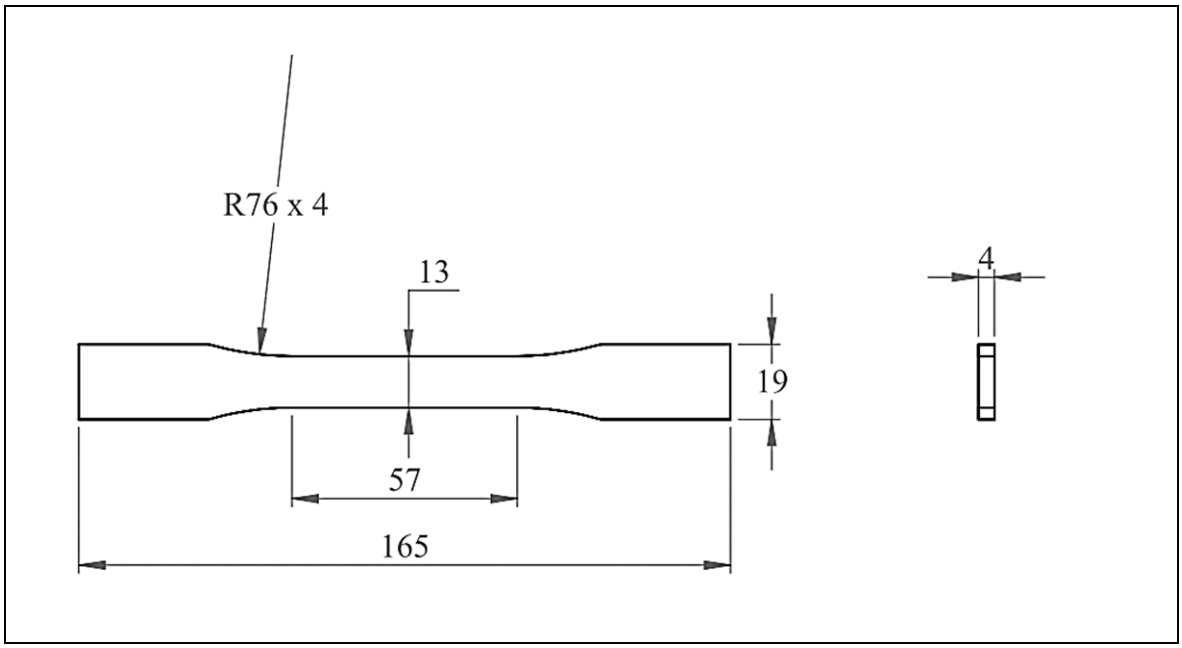
Şekil 4.1'de kullanılan filamentlerin mikroskop görüntüleri verilmiştir.



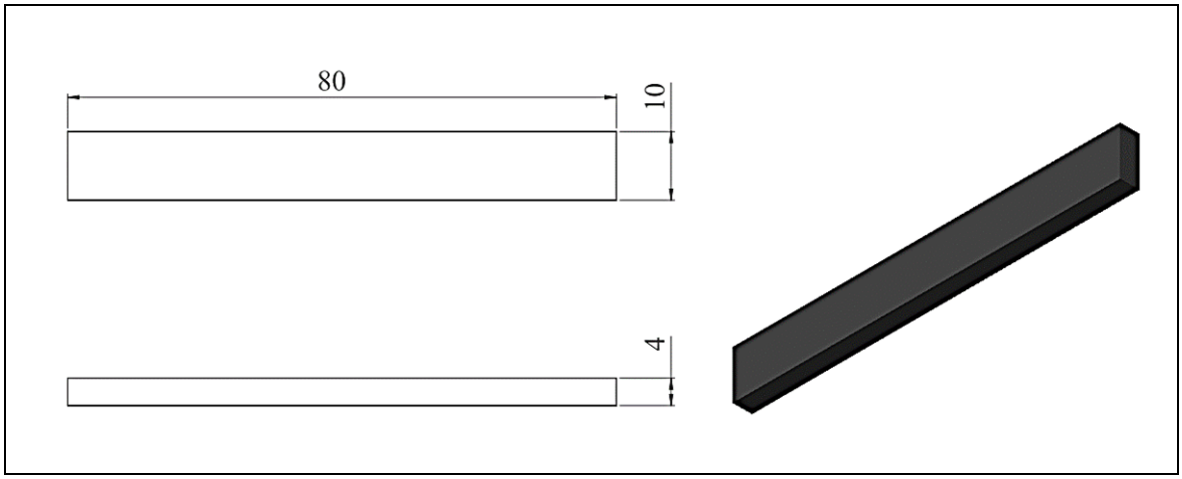
Şekil 4.1. Kullanılan filamentlerin mikroskop görüntüleri a) Saf PLA, b) %10CF+Eva PLA, c) %15 CF+Eva PLA, d) %20 CF+Eva PLA

4.2. Test Parçalarının Tasarımı

Testlerde kullanılan parçaların tasarımı, bilgisayar destekli tasarım programı (SolidWorks) ile 3B olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme test parçalarının ölçüleri, ASTM D638-22 standardına göre 60x19x4 mm ölçülerinde 16 adet 3 tekrarlı olarak toplamda 48 adet (Şekil 4.2) üretilmiştir. Eğme test parçalarının ölçüleri ise ASTM D790 standardına göre 80x10x4 mm ölçülerinde 16 adet 3 tekrarlı olarak toplamda 48 adet üretilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.2. Çekme test parçasının teknik resmi

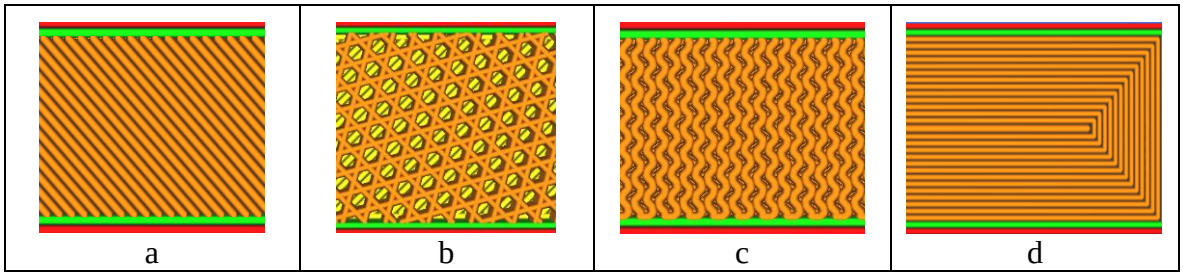


Şekil 4.3. Eğme test parçasının teknik resmi

Test parçaları için 3B yazıcıda üretim parametreleri Ultimaker Cura 5.2.2 yazılımı ile belirlenmiştir ve üretime hazır hale getirilmiştir. Taguchi deney tasarımı, istenilen veya araştırılması yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçları ve bunlar sebepli oluşan etkileri doğru ve kabul görebilir şekilde analiz etmek amacıyla kullanılmaktadır. Çeşitli deneyler için etkili parametreleri kategorize edip deney sayılarını azaltan tasarım matrisleri yapılmıştır. Bu çalışmada zaman ve maliyet açısından avantaj sağlayabilmek amacıyla Taguchi L16 deney tasarımı kullanılmış ve 16 adet test parçası üç tekrarlı olarak üretilmiştir. Uygulanan Taguchi metodunun doğruluğu için elde edilmiş veri sayısını

arttırmak sonuçların doğruluğunu pozitif yönde etkilemektedir. Bu sebeple her bir test 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada toplam 96 adet test parçası üretilmiştir.

Tüm test parçaları %100 doluluk oranıyla üretilmiştir. Çalışmada dört farklı malzeme (Saf PLA, %10CF+Eva PLA, %15CF+Eva PLA, %20CF+Eva PLA), dört farklı baskı hızı (40, 50, 60, 70 mm/sn), dört farklı nozul sıcaklığı (205, 215, 225, 235 °C), dört farklı dolgu deseni (lines, tri-hexagon, gyroid, concentric (Şekil 4.4)) kullanılmıştır.

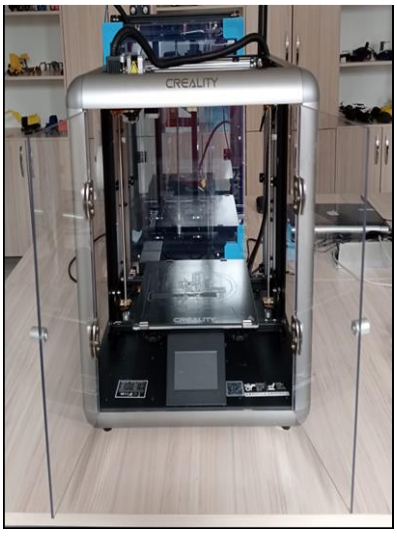


Şekil 4.4. Dolgu desenleri a) Lines, b) Tri-hexagon, c) Gyroid, d) Concentric desen

4.3. Kullanılan 3B Yazıcı

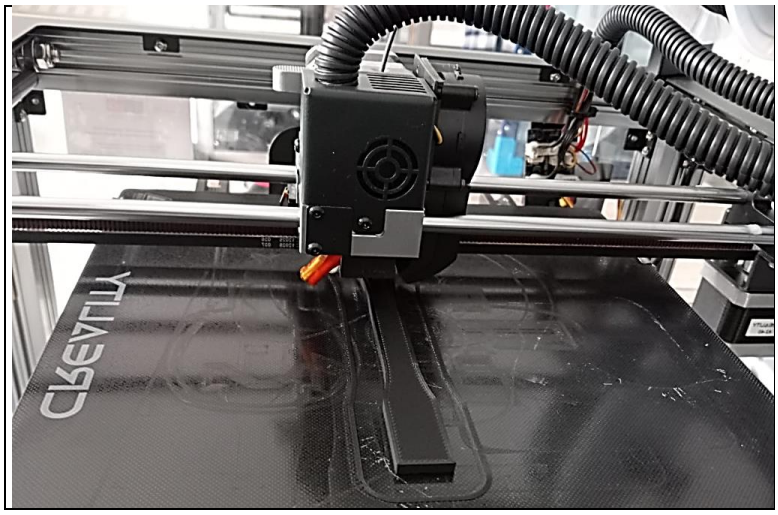
Test parçalarının üretimi için FDM baskı teknolojisini kullanan Creality marka Sermoon D1 model 3B yazıcı kullanılmıştır. Yazıcıya ait teknik özellikler Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6.Creality Sermoon D1 3B yazıcının teknik özellikleri



3B Baskı Teknolojisi	FDM (Fused Deposition Molding)
Baskı Haznesi	Kapalı (Üstü açık)
Baskı Alanı (mm)	280 x 260 x 310
Baskı Hassasiyeti (mm)	0,1
Katman Kalınlığı (mm)	0,1- 0,4
Baskı Hızı (mm/s)	30-60 (önerilen), ≤ 100
Nozul Sayısı	1
Nozul Çapı (mm)	0,4 (Genel kullanım) – 0,2 – 0,6 – 0,8 – 1,2 (Opsiyonel)
Filament Çapı (mm)	1,75
Tabla Sıcaklığı (°C)	100 (Maks.)
Nozul Sıcaklığı (°C)	250 (Maks.)
3B Yazdırma Yazılımı	Creality Slicer, Cura, Repetier-Host, Simplify3D
Kullanılabilir Filamentler	PLA, ABS, Wood, TPU, PLA kompozitler, Copper, Carbon Fiber
Cihaz Ağırlığı (Kg)	20,5
Cihaz Boyutu (mm)	500 x 500 x 531

FDM 3B yazıcılarda genel olarak 0,4 mm çelik nozul kullanıldığı bilinmektedir. Fakat bu nozul çapı ve malzemesi, çalışmada takviye olarak kullanılan karbon fiber tarafından kolaylıkla aşındırdığı için tercih edilmemiştir. Kompozit malzemelerin akışını kolaylaştırmak ve nozulda oluşabilecek tıkanmaları önlemek amacıyla genel olarak kullanılan nozul tipinden (0,4 mm çelik) farklı olarak 0,6 mm çapında pirinç nozul kullanılmıştır. Test parçaları yazdırılmadan önce örnek kontrol baskıları alınmış ve boyutsal kontrolleri ile yüzey kontrolleri yapılmıştır. Her yazdırma öncesi tabla kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Tüm test parçalarının üretimlerinde fan özelliği aktif çalışırken tabla sıcaklığı sabit 60 °C kullanılmıştır. Şekil 4.5'de 3B yazıcıda CF+Eva takviyeli parçaların üretimi gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Test parçaları üretimi

4.4. Çekme Test Parçalarının Boyutsal Kontrolü

Ölçüm değerleri, yazdırma işlemi yapılırken malzemenin tablaya yapışma yüzeyinden değil, bunun tersi yüzeyden dijital kumpas ile ölçülerek elde edilmiştir. Ölçümler orta nokta, bu noktanın 20 mm sağı ve 20 mm solundan olmak üzere üç noktadan gerçekleştirilmiş ve bunların ortalamaları alınmıştır (Şekil 4.6.). Ölçüm alınan yerlerdeki genişilik ölçüsü 13 mm kalınlık ise 4 mm'dir.



Şekil 4.6. Ölçülen test parçaları

4.5. Yapılan Testler ve Kullanılan Cihazlar

Malzemelerin mekanik davranışlarını karakterize etmek için üretilen 48 adet çekme test parçasına çekme testi uygulanmıştır. Malzemelerin çekme dayanımı, sünekliği ve akma dayanımı araştırılmıştır. Ayrıca 48 adet eğme test parçası üretilmiş ve eğme testi uygulanmıştır. Bu sayede malzemelerin eğilme-gerinim davranışları ve eğilme limitleri elde edilmiştir.

4.5.1. Çekme testi

Parçalara çekme testi yapmaktaki amaç, statik yükleme koşulunda malzemede oluşan elastik ve plastik davranışı karakterize etmektir [73]. Çekme testi ile elde edilen gerilme-birim deformasyon grafiği, parçaya dair birçok mekanik özelliğin elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Eşitlik 4.1'de gerilme (σ) cinsinden birim alana etkileyen yük miktarı verilmiştir.

$$\sigma = F / A_0 \tag{4.1}$$

Eşitlik 4.2'de parçanın yüklenmesi durumunda oluşan ilk ve son uzunluk arasındaki farkın, yüklenmeden önceki uzunluğuna oranını ifade eden mühendislik birim şekil değişimi (e) hesabı verilmektedir.

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{4.2}$$

Eşitlik 4.3'de gerçek şekil değişimi (ε) gösterilmektedir.

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \tag{4.3}$$

Elastik bölge incelendiğinde, birim uzama miktarı ve elastisite modülünün gerilme ile doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir. Eşitlik 4.4'de Hooke Kanunu olarak adlandırılan bu ilişki verilmiştir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{4.4}$$

Eşitlik 4.5'de malzemenin kırılma yaşayıncaya veya kopma gerçekleşene kadar kaldırabileceği en fazla gerilme değeri olan, çekme dayanımı ($\sigma_ç$) verilmiştir.

$$\sigma_ç = \frac{P_{max}}{A_0} \tag{4.5}$$

Bunların yanı sıra, gerilme- birim şekil değiştirme eğrisi yardımı ile malzemenin, poisson oranı (ν), elastiklik sınırı (ε_e), akma dayanımı (σ_a), kalıcı şekil değişimi ve pekleşme, kopma uzaması (δ), kesit büzülmesi (φ), rezilyansı ve tokluk değeri gibi mekanik özellikleri hesaplanabilmektedir.

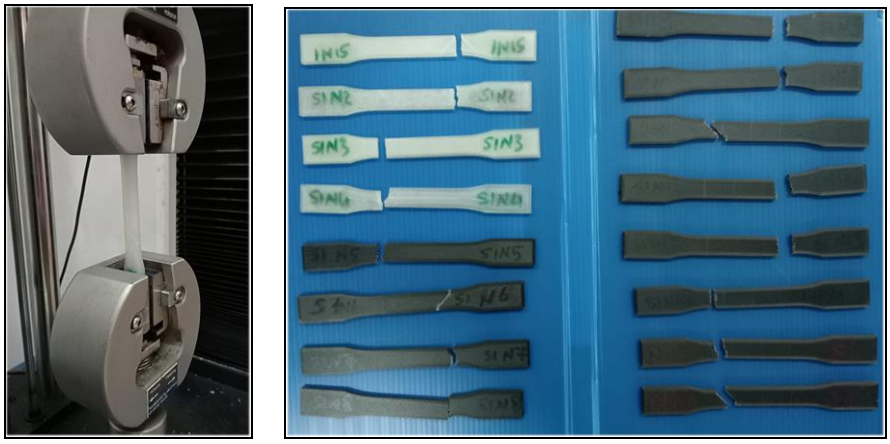
Bu çalışmada test parçalarının geometrik tasarımı ve çekme testi uygulaması ASTM D638-22 standardına ve literatürde kompozit malzemeler için önerilen deformasyon hızına göre gerçekleştirilmiştir [74]. Yapılan çekme testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında yer alan 10 kN kapasiteli UTEST UTM-100 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7'de kullanılan cihaz verilmiştir.



Şekil 4.7. Çekme testinin gerçekleştirildiği cihaz, UTEST UTM-100

Gövde, güç ünitesi ve veri toplama-kontrol sistemi olmak üzere 3 ana bölümden oluşan bu cihazda; yük ölçümleri için basınç sensörü, gerinim ölçümleri için ise boy değişimi ölçüm sensörü bulunmaktadır. Öncelikle cihaza test parçalarının mekanik ve boyutsal değerleri girilmiştir. Ardından test parçaları, 5 mm/dk deformasyon hızında ve dikey doğrultuda bir çene sabit bir çene hareketli olacak şekilde çekme kuvveti uygulanmıştır.

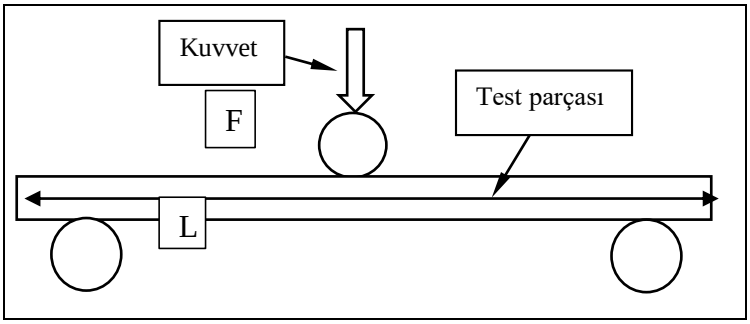
Ölçüm işlemi esnasında ve sonrasında test parçalarının görünümleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu test ile akma dayanımı (N/mm²) ve deformasyon (mm) değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Çekme işlemi esnasında ve sonrasında test parçası görünümleri

4.5.2. Eğme testi

Bir parçaya eğme testi yapmaktaki amaç, malzemede eğilme durumunda oluşan eğme dayanımı (σ_e), elastisite modülü (E), eğilme rijitliği, eğilme miktarı (δ) gibi değerleri hesaplayarak, tasarımda gerekli olabilecek verileri belirlemektir. Eğilmeye maruz kalan elamanlara enine yük taşıyan kirişler, ankastre ürünler vb. örnek verilmektedir. Eğilmeye maruz kalan elamanın her bölgesinde eğilme momentleri oluşmaktadır. Bu durumda, elemanın eğilme gerilmelerine maruz kaldığı bilinmektedir [75]. Eğme (üç nokta basma) testinin şematik görüntüsü Şekil 4.9'da verilmiştir. Eğme testinde en yüksek eğilme momenti kirişin orta noktasında uzamanın olduğu yüzeyde oluşmaktadır. Bu noktada en yüksek eğilme momenti oluştuğu için en yüksek eğme gerilmesi de burada meydana gelmektedir. Bu sebeple eğme testinde kuvvet, test parçasının orta noktasından uygulanmaktadır.



Şekil 4.9. Eğme testinin şematik gösterimi

Eğme testinde, kademeli artışlı F kuvvetine karşılık test parçasının merkezinde oluşan yer değiştirme miktarı ölçülür. Ölçülen değerler ışığında maruz bırakılan kuvvete karşılık kuvvet- yer değiştirme grafiği elde edilmektedir. Eğilme gerçekleşen test parçalarının, iç yüzey ve çevresinde basma gerilmeleri, dış yüzey ve çevresinde ise çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Eşitlik 4.6'da merkezde meydana gelen eğme momentinin en yüksek değeri ve eşitlik 4.7'de eğme gerilmesi verilmektedir.

$$M_e = F.L/4 \tag{4.6}$$

$$\sigma_e = M.y/I \tag{4.7}$$

Eğme test parçasının geometrik tasarımı ve eğme testi ASTM D790-17 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen eğme testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında yer alan 100 kN kapasiteli INSTRON 3369 cihazı ile yapılmıştır (Şekil 4.10). Destekler arası mesafe 50 mm olarak belirlenmiştir. Bu test ile eğilme uzaması (mm) ve eğilme yükü (N) elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Eğme testinin gerçekleştirildiği cihaz (INSTRON 3369)

4.6. Kullanılan Analiz Yöntemleri

Saf ve kompozit PLA'dan üretilen çekme test parçalarının akma dayanımı, maksimum yük ve deformasyon sonuçları ile eğme test parçalarının eğilme yükü, kopma uzaması ve eğilme gerinimi sonuçları Minitab16 paket programı yardımıyla Taguchi deney tasarımı üzerinden varyans analizi (ANOVA) yapılarak çözümlenmiştir. Ortalama etki grafikleri elde edilmiştir. Boyutsal kontrol için ise çoklu karar verme yöntemlerinden biri olan Taguchi-Gri ilişkisel Analiz yöntemi Excell yardımı ile değerlendirilmiş ve etki grafiği oluşturulmuştur.

4.6.1 Varyans analizi (ANOVA)

Herhangi bir testi gerçekleştirmekteki amaç, test değişkenleri ya da test parçası ile elde edilen ve sonucu etkileyen durumları gözlemlemektir. Aynı zamanda test esnasında karşılaşılan problemleri belirleyip bu problemleri çözüm yollarına ulaştırmaktır. Test edilen parçalar ile ilgili performans değerlendirmesi ve ideal değerleri grafik yardımı ile elde etmemizi sağlayan analiz yöntemlerinden biri de Varyans Analizidir (Analysis of Variance: ANOVA). "F testi" ismi ile de anılan bu yöntem, Varyans analiz çizelgesi hazırlanmasının ardından test esnasında nihai sonuca en etkili faktörlerin elde edilmesini ve ortalama etki grafiklerinin oluşturulmasını sağlamaktadır [76-82].

4.6.2 Gri ilişkisel analiz (Grey relational analysis, GRG)

Çoklu analiz yöntemlerinden biri olan GRG'yi ilk defa Profesör Deng Ju-long geliştirmiştir [77]. Gri ilişkisel analiz, öncelikle, tüm farklı birimlerden oluşan ya da sayısal değer içermeyen alternatiflerin performansını karşılıklı değerlendirilebilir bir seriye çevirmektedir. Bu adım "gri ilişkisel oluşum" olarak adlandırılmaktadır. Oluşturulan bu adıma uygun olacak şekilde referans seri belirlenir, ardından karşılaştırılabilir nitelikteki tüm seriler ve referans seri arasındaki fark kaydedilerek "gri ilişkisel katsayı" isimli katsayı hesaplanır. Son olarak, referans seri ve karşılaştırılabilir seriler arasındaki gri ilişkisel derece farkı GRG katsayıları temel alınarak hesaplanır [78]. En yüksek GRG dereceye sahip olan değer en iyi sonuca ulaştıracaktır [79]. Bu çalışmada da boyutsal kontrol değerlendirmesinde elde edilen en boy oranları ve diğer değişken parametreler arasındaki ideal performans için bu analiz yöntemi kullanılmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, PLA filamentlere CF takviye yapılarak üretilen test parçalarının mekanik karakterizasyon değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda farklı oranlarda karbon fiber ve Eva bağlayıcı takviyeli filamentler bir firmada özel olarak üretilmiştir. Bu filamentler ile değişken parametrelerde üretilen test parçalarına boyutsal kontrol, çekme ve eğme testleri uygulanmıştır. Uygulanan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.1. Boyutsal Kontrol Sonuçları

Analiz ve çoklu yanıt optimizasyonu, ihtiyaç doğrultusunda üç farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Kullanılan formüller Eşitlik 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6'da verilmiştir [83].

- En büyük en iyi, (Eq.X): $x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_{ij})}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})}$ (5.1)

GRC, (Eq.X): $\gamma(x_{0j}, x_{ij}) = \frac{\Delta_{min} + \zeta\Delta_{max}}{\Delta_{ij} + \zeta\Delta_{max}}$ (5.2)

- En küçük en iyi, (Eq.X): $x_{ij} = \frac{\text{maks}(y_{ij}) - y_{ij}}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})}$ (5.3)

GRG, (Eq.X): $\Gamma(X_0, X_i) = \sum_{j=1}^{n} w_j \gamma(x_{0j}, x_{ij})$ (5.4)

- Nominal en iyi, (Eq.X): $x_{ij} = 1 - \frac{y_{ij} - y_j^*}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})}$ (5.5)

S/N oranı, (Eq.X): $S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right)$ (5.6.)

Taguchi L_{16} uygulanarak elde edilen test parçalarının boyutsal kontrol sonuçları, genişlik ve kalınlık olmak üzere iki farklı değerden oluşmaktadır. Sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Boyutsal kontrol sonuçları

Nozul Sıc. (°C)	Parça No.	SERİ 1						SERİ 2						SERİ 3						Malzeme	Genişlik Ort.	Kalınlık Ort.
		G 1	K 1	G 2	K 2	G 3	K 3	G 1	K 1	G 2	K 2	G 3	K 3	G 1	K 1	G 2	K 2	G 3	K 3			
205	1	13,04	3,99	13,00	3,98	12,99	4,01	13,00	3,91	13,00	3,90	12,97	3,94	12,97	3,89	12,90	3,89	12,96	3,88	A	12,98	3,93
215	2	13,27	4,16	13,23	4,26	13,24	4,30	13,28	4,12	13,29	4,18	13,23	4,19	13,16	3,99	13,18	4,00	13,17	4,00		13,23	4,13
225	3	13,00	4,01	13,03	4,03	12,98	4,00	13,03	3,89	13,02	3,87	13,02	3,92	13,01	3,91	13,04	3,91	13,03	3,91		13,02	3,94
235	4	12,99	4,01	13,01	4,00	12,93	4,03	12,97	4,05	12,98	4,13	13,00	4,01	12,98	4,01	12,90	4,02	13,01	4,00		12,97	4,03
205	5	13,10	4,01	13,11	4,04	13,11	4,01	13,09	3,96	13,13	3,94	13,06	4,01	13,08	4,01	13,01	4,02	13,08	4,03	B	13,09	4,00
215	6	12,92	3,99	12,93	4,00	12,93	3,99	12,93	3,94	12,93	3,97	12,93	3,92	12,90	4,00	12,92	3,99	12,90	4,01		12,92	3,98
225	7	12,94	3,98	12,94	3,96	12,94	4,00	12,94	3,93	12,96	3,97	12,94	3,92	12,98	3,99	12,93	3,99	12,93	4,00		12,94	3,97
235	8	12,95	4,01	12,97	3,99	12,97	4,02	13,02	3,93	12,97	3,97	13,00	3,91	13,00	3,97	12,99	3,97	12,98	3,99		12,98	3,97
205	9	12,95	4,01	12,98	4,01	12,94	4,03	12,98	3,93	12,99	3,96	12,92	3,90	12,95	3,99	12,95	4,00	12,94	3,97	C	12,96	3,98
215	10	12,94	3,97	12,94	3,97	12,93	4,00	12,95	3,93	12,90	3,91	12,92	3,97	12,90	3,98	12,88	3,99	12,91	3,98		12,92	3,97
225	11	12,94	3,98	12,93	3,97	12,91	4,01	12,99	3,92	12,97	3,95	12,97	3,90	12,93	3,96	12,93	3,97	12,94	3,95		12,95	3,96
235	12	13,17	3,86	13,19	3,87	13,19	3,91	13,16	3,94	13,18	3,92	13,16	4,01	13,12	3,95	13,07	3,95	13,16	3,98		13,16	3,93
205	13	12,95	3,88	12,95	3,86	12,95	3,84	12,94	3,96	12,91	3,94	12,94	4,00	12,90	3,95	12,89	3,94	12,90	3,96	D	12,93	3,93
215	14	12,91	3,92	12,95	3,91	12,94	3,95	12,96	3,96	12,99	3,99	12,98	3,94	12,92	3,93	12,93	3,91	12,91	3,93		12,94	3,94
225	15	13,08	3,95	13,08	3,96	13,10	3,97	13,15	3,97	13,15	3,98	13,19	3,96	13,14	3,95	13,12	3,96	13,13	3,94		13,13	3,96
235	16	12,98	3,98	12,99	3,97	12,90	3,99	13,00	3,95	13,00	3,95	12,96	3,96	12,99	3,96	12,98	3,97	13,01	3,95		12,98	3,96

Bu durumda sonuçları tek bir değere dönüştürebilmek için, çalışmanın analizinin çoklu karar verme yöntemlerinden biri olan Taguchi-gri ilişkisel analiz ile değerlendirilmesi gerekmektedir. Ölçülen genişlik ve kalınlık değeri sapmalarını minimize etmek için Eşitlik 5.3'te verilen "En küçük en iyi" yöntemi kullanılmıştır. Normalize edilmiş sonuçlardan Eşitlik 5.4 kullanılarak gri ilişkisel katsayılar türetilmiş ve böylelikle gri ilişkisel derece bulunmuştur. Deneysel çalışmada her ölçüm sonucunun öneminin eşit olduğu varsayıldığında $w_j = {}^1/_2$ olarak belirlenir. Çizelge 5.2'de ölçüm sonuçları ve grilik derecesi hesaplaması gösterilmiştir. Çizelgede GRG değerinin yüksekliği sonucun uygun ve ideal olduğunu göstermektedir. GRG değeri ile en uygun sonuç için her değişkenin etkisi belirlenebilmektedir.

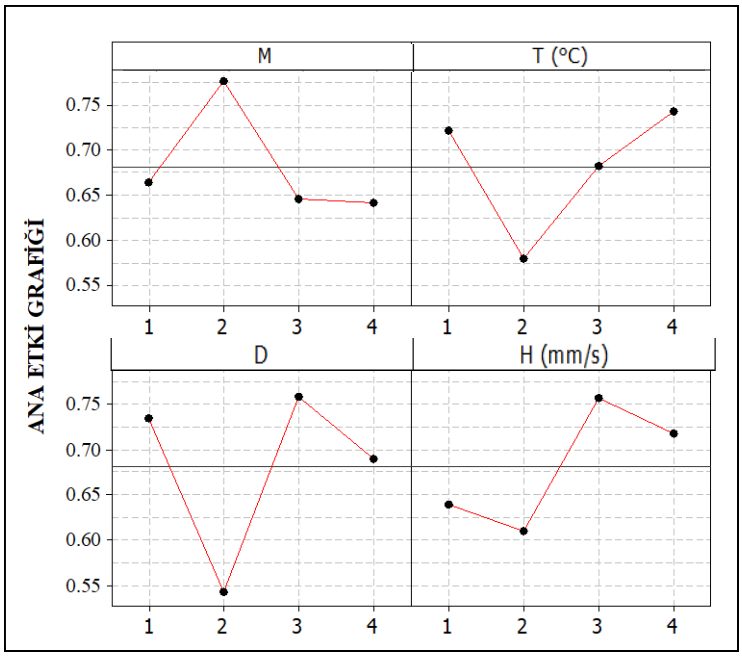
Çizelge 5.2. Ölçüm sonuçları ve grilik derecesi hesaplanması

M	T (°C)	D	H (mm/s)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Normalizeler		Mutlaklar		Katsayı Matrisi		Gri derecesi GRG
						G(mm)	K(mm)	G(mm)	K(mm)	G(mm)	K(mm)	
A	205	1	40	0,019	0,068	0,989	0,504	0,011	0,496	0,979	0,502	0,741

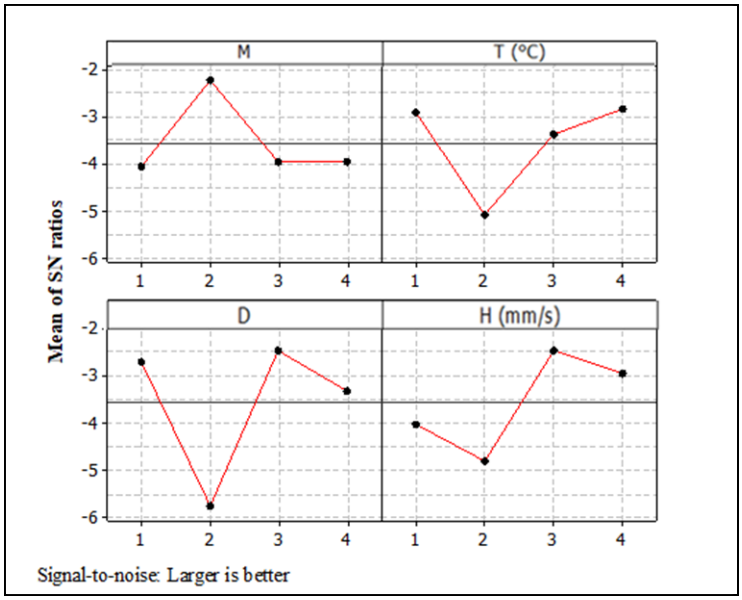
Çizelge 5.2. (devam) Ölçüm sonuçları ve grilik derecesi hesaplanması

M	T (°C)	D	H (mm/s)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Normalizeler		Mutlaklar		Katsayı Matrisi		Gri derecesi GRG
						G(mm)	K(mm)	G(mm)	K(mm)	G(mm)	K(mm)	
A	215	2	50	0,228	0,133	0,000	0,000	1,000	1,000	0,333	0,333	0,333
A	225	3	60	0,018	0,061	0,995	0,556	0,005	0,444	0,990	0,529	0,759
A	235	4	70	0,026	0,029	0,958	0,803	0,042	0,197	0,922	0,718	0,820
B	205	2	60	0,086	0,003	0,674	1,000	0,326	0,000	0,605	1,000	0,803
B	215	1	70	0,079	0,021	0,705	0,863	0,295	0,137	0,629	0,785	0,707
B	225	4	40	0,056	0,029	0,816	0,803	0,184	0,197	0,731	0,718	0,724
B	235	3	50	0,017	0,027	1,000	0,821	0,000	0,179	1,000	0,736	0,868
C	205	3	70	0,044	0,022	0,868	0,855	0,132	0,145	0,792	0,775	0,783
C	215	4	60	0,081	0,033	0,695	0,769	0,305	0,231	0,621	0,684	0,653
C	225	1	50	0,054	0,043	0,821	0,692	0,179	0,308	0,736	0,619	0,678
C	235	2	40	0,156	0,068	0,342	0,504	0,658	0,496	0,432	0,502	0,467
D	205	4	50	0,074	0,074	0,726	0,453	0,274	0,547	0,646	0,478	0,562
D	215	3	40	0,057	0,062	0,811	0,547	0,189	0,453	0,725	0,525	0,625
D	225	2	70	0,127	0,040	0,479	0,718	0,521	0,282	0,490	0,639	0,565
D	235	1	60	0,021	0,036	0,979	0,752	0,021	0,248	0,960	0,669	0,814

Hesaplanan gri ilişkisel analiz derecelerine göre veriler Minitab16 paket programına aktarılmıştır. Taguchi en büyük en iyi yaklaşımı tercih edilerek Şekil 5.1'de boyutsal kontrol sonuçları için türetilen ana etki grafiği ve Şekil 5.2'de türetilen S/N grafiği verilmiştir.



Şekil 5.1. Boyutsal kontrol sonuçları için türetilen ana etki grafiği



Şekil 5.2 Boyutsal kontrol sonuçları için türetilen S/N grafiği

Şekil 5.2'de %10 CF+Eva takviyesinin saf PLA'ya göre boyutsal doğrulukta daha iyi bir performans sağladığı, CF+Eva takviye oranı arttıkça bunun boyutsal kararlılığı olumsuz etkilediği görülmüştür. Ayrıca literatüre paralel olarak 215 °C ve artan nozul sıcaklığının boyutsal doğruluğu pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir [80].

Çizelge 5.3 ise ortalama gri ilişkisel derece (GRG) sonuçlarının deney parametrelerinin dört farklı seviyedeki sonuçları ve etki sıralamasını göstermektedir.

Çizelge 5.3. Ortalama GRG ile optimum parametreler

Seviye	Faktör seviyelerine göre GRG ortalaması					
	M	T (C°)	D	H (mm/s)	Delta	Etki Sırası
1	0,6634	0,7221	0,7349	0,6392	0,1341	4
2	0,7755	0,5795	0,5418	0,6102	0,1628	2
3	0,6451	0,6815	0,7589	0,7572	0,2171	1
4	0,6414	0,7423	0,6897	0,7188	0,1469	3

Etki sıralamasının gösterildiği Çizelge 5.3 ANOVA sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.

5.1.1. ANOVA ile boyutsal kontrolün değerlendirilmesi

Çalışmada üretilen test parçalarının her birinde farklı sapma değerleri gözlenmiştir. Bu farklılıkların hangi faktörlerinden hangi yüzdelik oranlarda etkilendiğini belirlemek amacıyla Varyans analizi kullanılmıştır. Çizelge 5.4'te boyutsal değerlerin Varyans analiz (ANOVA) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.4. Boyutsal doğruluk için elde edilen ANOVA sonuçları

Source	DoF	SS	MS	F-test	P-coefficient	PCR (%)
Malzeme	3	3,28	3,093	1,51	0,327	4,492
Nozul Sıcaklığı T (°C)	3	13,199	4,4	2,14	0,274	10,14
Dolgu Deseni	3	27,445	9,148	4,45	0,126	30,66
Baskı Hızı	3	13,321	4,44	2,16	0,271	10,31
Residual Error	3	6,163	2,054			55,61
Total	15	69,408				100

Yapılan testlerde malzeme, nozul sıcaklığı, dolgu deseni, 3B baskı hızı parametrelerinin boyutsal doğruluğa etkisi incelendiğinde; boyutsal doğruluk üzerinde en etkili parametrenin %30,66 oranı ile dolgu deseni parametresi olarak belirlenmiştir. Bunu takip eden parametreler ise %10,31 ile baskı hızı ve %10,14 ile nozul sıcaklığıdır. Malzemenin ise boyutsal kararlılık değerlendirilmesine %4,492 oranı ile en az etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre; 3B yazıcı ile değişken parametrelerde üretilen karbon fiber takviyeli PLA parçalarında %10 CF+Eva takviyeli PLA malzemenin 235 °C nozul sıcaklığında, gyroid dolgu deseni ve 60 mm/s hız ile üretilmesinin en iyi boyutsal

doğruluğu sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. %20CF+Eva takviyeli malzemeden 215 °C nozul sıcaklığında 50 mm/s hız ile tri-hexagon dolgu deseni ile üretildiği koşulda ise en kötü boyutsal kararlılığı gösterdiği gözlenmiştir.

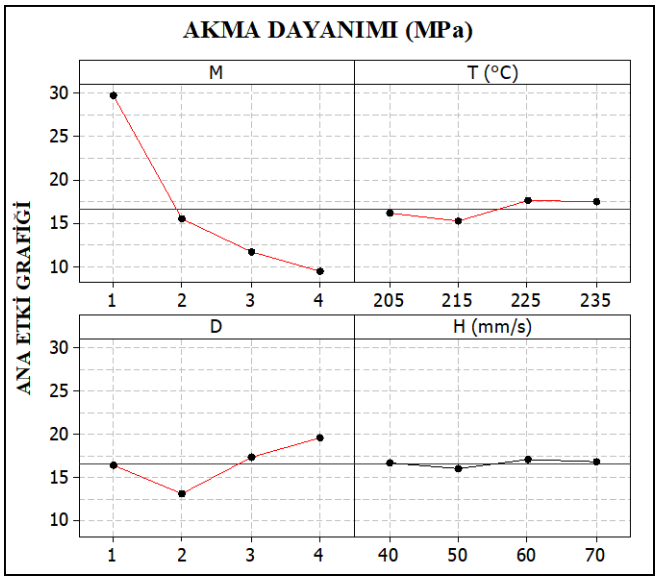
Taguchi Analiz ile elde edilen ideal parametreler ile doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. En iyi şartlar tespit edilerek yapılan deneylere doğrulama deneyleri denilmektedir. Bu deneyler sonucunda elde edilen faktör-seviye kombinasyonu en iyi sonuç değerlerine ulaşırsa durum istenildiği şekilde gerçekleşmiş ve deney amacına ulaşmış kabul edilir [82]. Yapılan doğrulama deneyleri ile boyutsal doğrulukta %11,6 oranında iyileşme sağlanmıştır.

5.2. Çekme Test Sonuçları

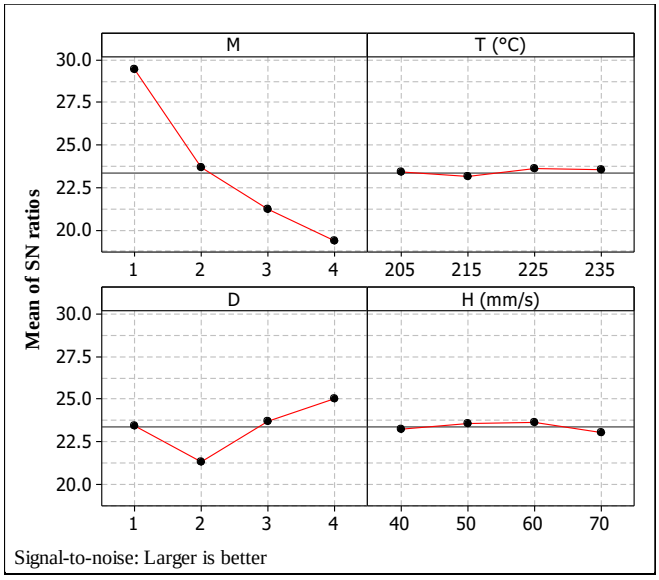
Bu bölümde çekme testleri ile elde edilen sonuçlar, deformasyon miktarı, maksimum yük ve akma dayanımı sonuçları ele alınarak değerlendirilmiştir. Akma dayanımı için elde edilen ortalama değerler Çizelge 5.5'te verilmiştir. Ulaşılan sonuçlar Minitab16 paket programına aktarılmıştır. Taguchi en büyük en iyi yaklaşımı tercih edilerek, verilen akma dayanımı için türetilen ana etki grafiği Şekil 5.3'te ve S/N grafiği Şekil 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Elde edilen akma dayanımı değerleri

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)
PLA(A)	29,449
PLA(A)	24,039
PLA(A)	31,962
PLA(A)	33,795
%10CF+Eva PLA (B)	11,795
%10CF+Eva PLA (B)	14,109
%10CF+Eva PLA (B)	19,202
%10CF+Eva PLA (B)	16,699
%15CF+Eva PLA (C)	11,878
%15CF+Eva PLA (C)	13,968
%15CF+Eva PLA (C)	11,615
%15CF+Eva PLA (C)	8,904
%20CF+Eva PLA (D)	11,327
%20CF+Eva PLA (D)	8,776
%20CF+Eva PLA (D)	7,263
%20CF+Eva PLA (D)	10,134



Şekil 5.3. Akma dayanımı için türetilen ana etki grafiği



Şekil 5.4. Akma değerleri için türetilen S/N grafiği

Şekil 5.4 değerlendirildiğinde, filamente eklenen CF+Eva takviye oranı arttıkça akma dayanımında doğru orantılı olarak düşüş gözlenmiştir. Bunun temel sebebi, CF ve Eva takviye eklenmesi sonucu süreklilik konusunda matris ve ara yüz yapışmasını negatif etkilemesidir [16-21]. Dolgu deseni açısından akma dayanımı sonuçları karşılaştırıldığında, concentric desenin en iyi performansı verdiği, line ve gyroid desenin herhangi bir etkisinin bulunmadığı fakat tri-hexagon desenin akma dayanımını negatif yönde etkilediği görülmüştür. Kompozit malzemelerin anizotropik özellik göstermesi sebebi ile dolgu deseninde bu yönde bir sonucun çıkması literatürle paralellik göstermiştir

[17- 21]. Akma dayanımında en ideal performansı saf PLA'nın 225 °C nozul sıcaklığında, concentric desende ve 60 mm/s baskı hızında sağladığı gözlenmiştir.

Çizelge 5.6'da akma dayanımı sonuçlarının deney parametrelerinin dört farklı seviyedeki sonuçları ve etki sıralamasını göstermektedir.

Çizelge 5.6. Taguchi analiz optimum parametreler

Seviye	Taguchi analiz etki sıralaması					
	M	T (C°)	D	H (mm/s)	Delta	Etki Sırası
1	29,42	23,35	23,45	23,23	10,10	4
2	23,64	23,09	21,32	23,61	0,48	2
3	21,17	23,57	23,73	23,64	3,74	1
4	19,32	23,53	25,06	23,07	0,57	3

Etki sıralamasının gösterildiği Çizelge 5.6 ANOVA sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.

5.2.1. ANOVA ile akma dayanımının değerlendirilmesi

Çalışmada, test parçalarının her birinde akma dayanımının hangi faktörlerden hangi yüzdelik oranlarda etkilendiğini belirlemek amacıyla Varyans analizi kullanılmıştır. Çizelge 5.7'de akma dayanımının Varyans analiz (ANOVA) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.7. Akma dayanımı için elde edilen ANOVA sonuçları

Source	DoF	SS	MS	F-test	P-coefficient	PCR (%)
Malzeme	3	231,439	77,1463	230,39	0	87,7003
Nozul Sıcaklığı T (°C)	3	0,571	0,1903	0,57	0,673	0
Dolgu Deseni	3	28,782	9,5939	28,65	0,01	10,5717
Baskı Hızı	3	0,956	0,3188	0,95	0,516	0
Residual Error	3	1,005	0,3349			98,272
Total	15	262,752				100

Yapılan testlerde malzeme, nozul sıcaklığı, dolgu deseni, 3B baskı hızı parametrelerinin akma dayanımına etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin %87,7003 oranı ile malzeme parametresi olduğu belirlenmiştir. Malzemenin ardından dolgu deseninin %10,5717 oranı ile akma dayanımına etkili olduğu görülmüştür. Analiz sonucunda, üretim

esnasındaki nozul sıcaklığı ve baskı hızının akma dayanımı üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı görülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre; 3B yazıcı ile değişken parametrelerde üretilen karbon fiber takviyeli PLA parçalarında saf PLA malzemenin 225 °C nozul sıcaklığında, concentric dolgu deseni ve 60 mm/s hız ile üretilmesinin en iyi akma dayanımını sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. %20 CF+Eva takviyeli malzemeden, 215 °C nozul sıcaklığında, 40 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretildiği koşulda ise en düşük akma dayanımı gösterdiği gözlenmiştir.

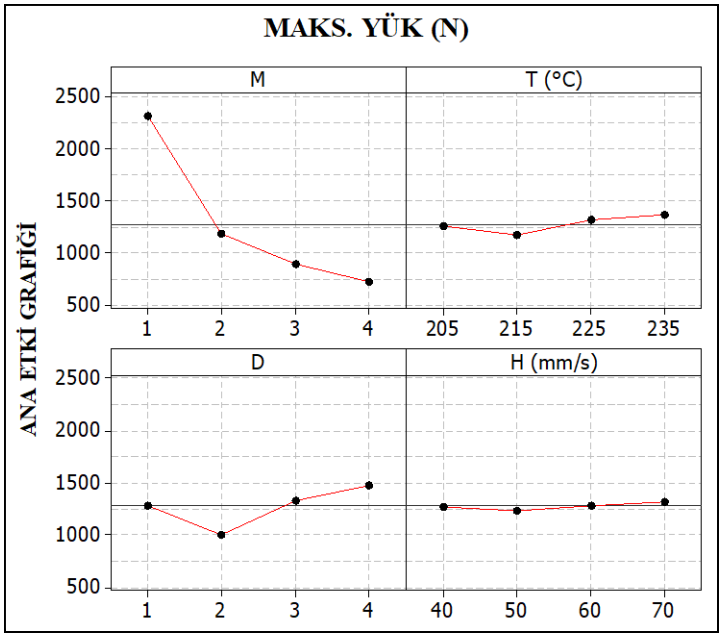
Elde edilen sonuçlar ışığında yapılan doğrulama deneyleri ile akma dayanımında %81 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür.

Çekme testi ile elde edilen maksimum yük değerleri için ortalama değerler Çizelge 5.8'de verilmiştir.

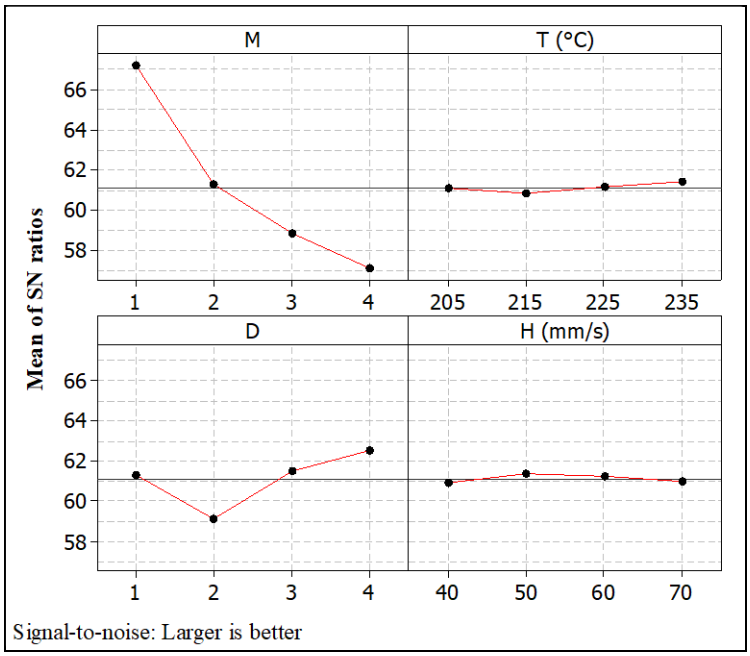
Çizelge 5.8. Elde edilen maksimum yük değerleri

Malzeme	Maksimum Yük (N)
PLA(A)	2326,333
PLA(A)	1871
PLA(A)	2399,333
PLA(A)	2657,333
%10CF+Eva PLA (B)	908
%10CF+Eva PLA (B)	1105,333
%10CF+Eva PLA (B)	1401,667
%10CF+Eva PLA (B)	1303
%15CF+Eva PLA (C)	930,667
%15CF+Eva PLA (C)	1029
%15CF+Eva PLA (C)	900
%15CF+Eva PLA (C)	688,667
%20CF+Eva PLA (D)	853,667
%20CF+Eva PLA (D)	685,333
%20CF+Eva PLA (D)	573
%20CF+Eva PLA (D)	801

Çekme testinde elde edilen değerler, Minitab16 paket programına aktarılmıştır. Taguchi en büyük en iyi yaklaşımı tercih edilerek, verilen maksimum yük değeri için türetilen ana etki grafiği Şekil 5.5'te ve S/N grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.5. Maksimum yük değerleri için türetilen ana etki grafiği



Şekil 5.6. Maksimum yük değerleri için türetilen S/N grafiği

Şekil 5.6 değerlendirildiğinde, malzemeye CF+Eva takviye oranı arttıkça dayanabileceği maksimum yük değerinde orantılı olarak düşüş gözlenmiştir. Dolgu deseni açısından sonuçlar değerlendirildiğinde akma dayanımı ile benzer bir şekilde concentric desenin en iyi performansı verdiği, line ve gyroid desenin negatif bir etkisinin bulunmadığı fakat tri-hexagon desenin test parçasının dayanabileceği maksimum yükü negatif yönde etkilediği

görülmüştür. Maksimum yük değeri ele alındığında en ideal performansı saf PLA'nın 235 °C nozul sıcaklığında, concentric desende ve 50 mm/s baskı hızında sağladığı gözlenmiştir.

Çizelge 5.9'da maksimum yük sonuçlarının deney parametrelerinin dört farklı seviyedeki sonuçları ve etki sıralamasını göstermektedir.

Çizelge 5.9. Taguchi analiz optimum parametreler

Seviye	Taguchi analiz etki sıralaması					
	M	T (C°)	D	H (mm/s)	Delta	Etki Sırası
1	67,22	61,12	61,34	60,94	10,10	1
2	61,32	60,82	59,13	61,36	0,48	3
3	58,87	61,20	61,50	61,27	3,74	2
4	57,14	61,41	62,57	60,97	0,57	4

Etki sıralamasının gösterildiği Çizelge 5.9 ANOVA sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.

5.2.2. ANOVA ile maksimum yük değerlendirilmesi

Çalışmada test parçalarının her birinde kopmadan önce dayanabileceği maksimum yük açısından farklı değerler ölçülmüştür. Bu farklılıkların hangi faktörlerinden hangi yüzdelik oranlarda etkilendiğini belirlemek amacıyla Varyans analizi kullanılmaktadır. Çizelge 5.10'da maksimum yük sonuçlarının Varyans analiz (ANOVA) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.10. Test parçasının kopmadan dayanabileceği maksimum yük için elde edilen ANOVA sonuçları

Source	DoF	SS	MS	F-test	P-coefficient	PCR (%)
Malzeme	3	232,319	77,4396	262,09	0	89,188
Nozul Sıcaklığı T (°C)	3	0,705	0,2352	0,8	0,572	0
Dolgu Deseni	3	25,034	8,3447	28,24	0,011	9,3058
Baskı Hızı	3	0,543	0,181	0,61	0,652	0
Residual Error	3	0,886	0,2955			98,4938
Total	15	259,488				100

Yapılan testlerde, malzeme, nozul sıcaklığı, dolgu deseni, 3B baskı hızı parametrelerinin test parçasının dayanabileceği maksimum yüke etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin %89,188 oranı ile malzeme parametresi olduğu belirlenmiştir. Malzemenin

ardından dolgu deseninin %9,3058 oranı ile maksimum yüke etkili olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonucunda, üretim esnasındaki nozul sıcaklığı ve baskı hızının maksimum yük dayanımı üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre; 3B yazıcı ile değişken parametrelerde üretilen karbon fiber takviyeli PLA parçalarında saf PLA malzemenin 235 °C nozul sıcaklığında, concentric dolgu deseni ve 50 mm/s hız ile üretilmesinin en iyi maksimum yük dayanımını sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. %20 CF+Eva takviyeli malzemeden, 215 °C nozul sıcaklığında, 40 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretildiği koşulda ise en düşük dayanımı gösterdiği gözlenmiştir.

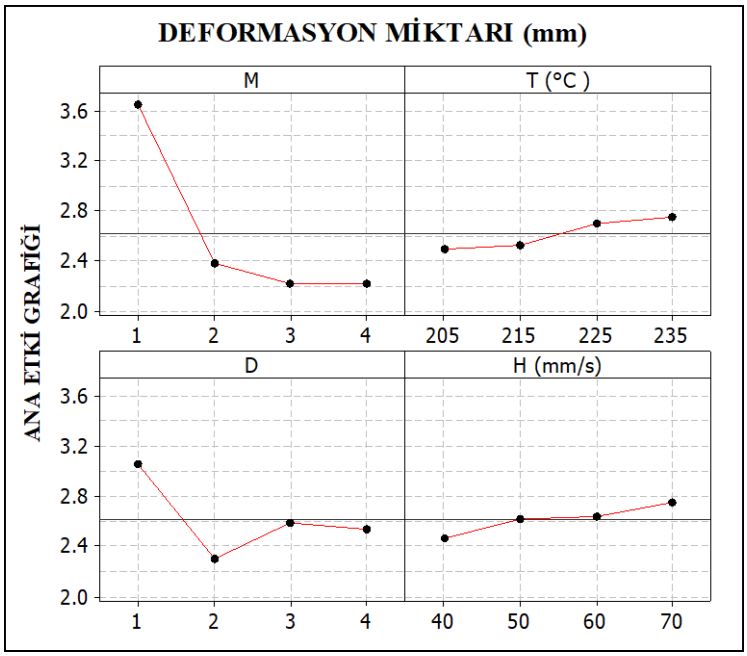
Elde edilen sonuçlar ışığında yapılan doğrulama deneyleri ile maksimum yük dayanımında %81 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür.

Çekme testi ile elde edilen deformasyon için ortalama değerler Çizelge 5.11'de verilmiştir.

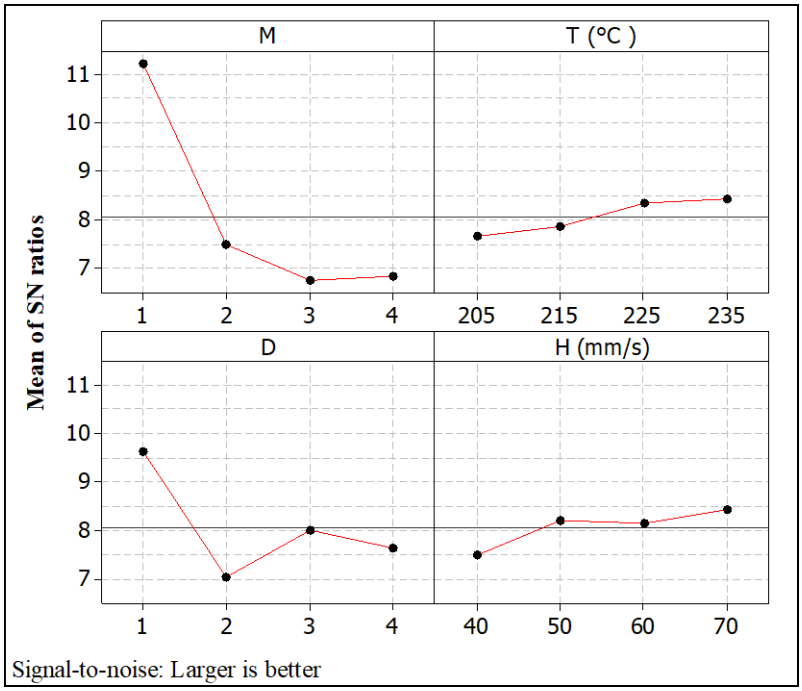
Çizelge 5.11. Elde edilen deformasyon değerleri

Malzeme	Deformasyon değerleri (mm)
PLA(A)	3,684
PLA(A)	3,181
PLA(A)	3,732
PLA(A)	4,014
%10CF+Eva PLA (B)	2,151
%10CF+Eva PLA (B)	2,865
%10CF+Eva PLA (B)	2,160
%10CF+Eva PLA (B)	2,356
%15CF+Eva PLA (C)	2,137
%15CF+Eva PLA (C)	1,929
%15CF+Eva PLA (C)	2,911
%15CF+Eva PLA (C)	1,874
%20CF+Eva PLA (D)	2,018
%20CF+Eva PLA (D)	2,115
%20CF+Eva PLA (D)	1,983
%20CF+Eva PLA (D)	2,747

Ulaşılan sonuçlar Minitab16 paket programına aktarılmıştır. Taguchi en küçük en iyi yaklaşımı tercih edilerek, verilen deformasyon değerleri için türetilen ana etki grafiği Şekil 5.7'de ve S/N grafiği Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Deformasyon için türetilen ana etki grafiği



Şekil 5.8. Deformasyon için türetilen S/N grafiği

Şekil 5.8 değerlendirildiğinde, malzemeye CF+Eva takviye oranı arttıkça deformasyon miktarında düşüş gözlenmiştir. Dolgu deseni açısından sonuçlar değerlendirildiğinde line desenin en iyi performansı ve tri-hexagon desenin en kötü performansı verdiği görülmüştür. Deformasyon açısından en ideal performansı saf PLA'nın 235 °C nozul sıcaklığında, line desende ve 70 mm/s baskı hızında sağladığı gözlenmiştir.

Çizelge 5.12'de deformasyon sonuçlarının deney parametrelerinin dört farklı seviyedeki sonuçları ve etki sıralamasını göstermektedir.

Çizelge 5.12. Taguchi analiz optimum parametreler

Seviye	Taguchi analiz etki sıralaması					
	M	T (C°)	D	H (mm/s)	Delta	Etki Sırası
1	11,222	7,668	61,34	9,632	4,462	1
2	7,482	7,852	59,13	7,026	0,768	4
3	6,760	8,339	61,50	7,641	2,605	2
4	6,832	8,437	62,57	2,605	0,945	3

Etki sıralamasının gösterildiği Çizelge 5.12 Anova sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.

5.2.3. ANOVA ile deformasyon değerlendirilmesi

Çalışmada, üretilen test parçalarının her birinde farklı deformasyon uzaması görülmüştür. Bu farklılıkların hangi faktörlerden hangi yüzdelik oranlarda etkilendiğini belirlemek amacıyla Varyans analizi kullanılmaktadır. Çizelge 5.13'te deformasyon sonuçlarının Varyans analiz (ANOVA) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.13. Deformasyon değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları

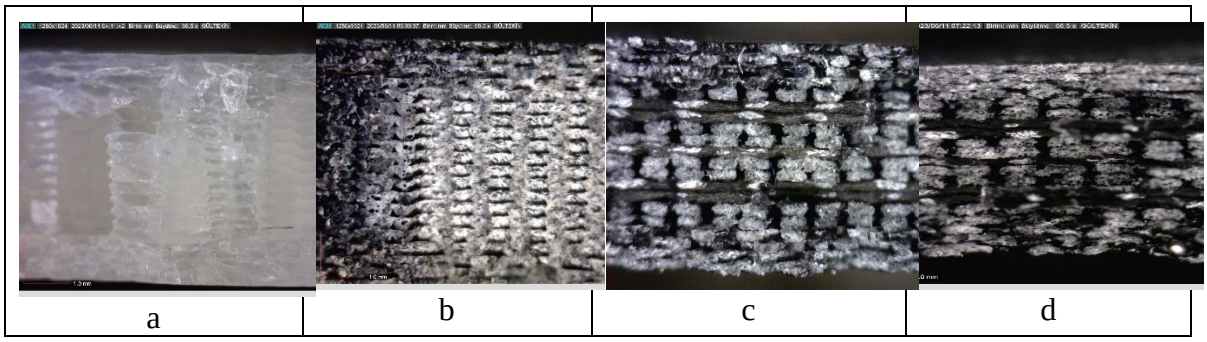
Source	DoF	SS	MS	F-test	P-coefficient	PCR (%)
Malzeme	3	54,121	54,121	25,54	0,012	63,897
Nozul Sıcaklığı T (°C)	3	1,663	1,663	0,78	0,577	0
Dolgu Deseni	3	14,868	14,686	7,02	0,072	11,359
Baskı Hızı	3	1,981	1,981	0,93	0,521	0
Residual Error	3	2,119	2,119			75,256
Total	15	74,751				100

Yapılan testlerde malzeme, nozul sıcaklığı, dolgu deseni, 3B baskı hızı parametrelerinin test parçasının deformasyon miktarına etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin %63,897 oranı ile malzeme parametresi olduğu belirlenmiştir. Malzemenin ardından dolgu deseninin %11,359 oranı ile deformasyona etkili olduğu görülmüştür. Analiz sonucunda, üretim esnasındaki nozul sıcaklığı ve baskı hızının deformasyon üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı görülmektedir.

Sonuçlara göre; 3B yazıcı ile değişken parametrelerde üretilen karbon fiber takviyeli PLA parçalarında saf PLA malzemenin 235 °C nozul sıcaklığında, line dolgu deseni ve 70 mm/s hız ile üretilmesinin en yüksek deformasyonu sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. %15 CF+Eva takviyeli malzemeden, 205 °C nozul sıcaklığında, 40 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretildiği koşulda ise en düşük deformasyon gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ışığında yapılan doğrulama deneyleri ile deformasyon değerlerinde %3,48 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür. CF takviyelerin malzeme yapışmasına negatif yönde etki ettiği ve bu sebeple deformasyonda diğer parametrelerin etki oranını ve iyileşme miktarının az oluşu açıklanmaktadır [17].

Şekil 5.9'da çekme test parçalarının koptuktan sonraki kopma yüzeyi mikroskop görüntüleri verilmektedir. Görüldüğü üzere CF+Eva takviye miktarı arttıkça boşluk miktarı da artmaktadır. Akma ve diğer değerlerde saf PLA'nın takviyelilere oranla daha iyi performans göstermesinin sebebi takviyeli filamentlerin boşluklu bir yapıya sahip olması ve kullanılan bağlayıcı reçinenin de CF miktarı ile aynı şekilde arttırılarak kullanılmasının mekanik dayanımı etkilemiş olmasından kaynaklıdır.



Şekil 5.9. Çekme test parçalarının koptuktan sonraki kopma yüzeyi miroskop görüntüleri a) saf PLA, b) %10 CF+Eva PLA, c) %15 CF+Eva PLA, d) %20 CF+Eva PLA

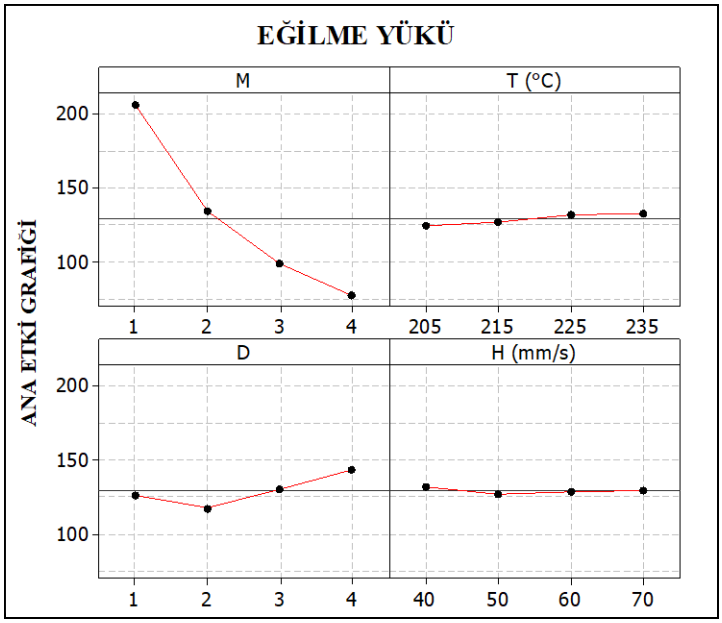
5.3. Eğme Test Sonuçları

Bu bölümde eğme testleri ile elde edilen sonuçlar eğilme kuvveti, eğilme gerilmesi ve kopma uzaması yönünden değerlendirilmiştir. Eğme testi ile elde edilen ortalama eğilme kuvveti değerleri Çizelge 5.14'te verilmektedir.

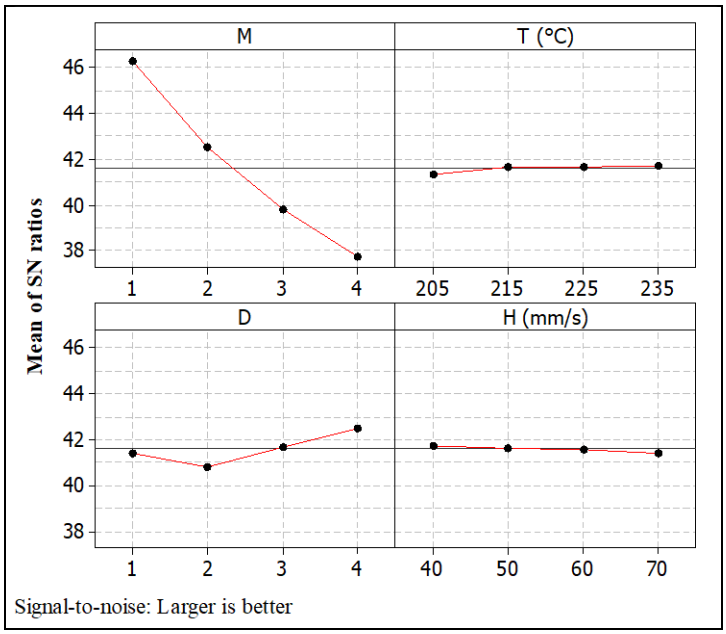
Çizelge 5.14. Elde edilen eğilme kuvveti değerleri

Malzeme	Eğilme Kuvveti (N)
PLA(A)	202,900
PLA(A)	190,732
PLA(A)	209,139
PLA(A)	223,343
%10CF+Eva PLA (B)	115,598
%10CF+Eva PLA (B)	127,734
%10CF+Eva PLA (B)	153,766
%10CF+Eva PLA (B)	139,382
%15CF+Eva PLA (C)	94,968
%15CF+Eva PLA (C)	111,757
%15CF+Eva PLA (C)	94,706
%15CF+Eva PLA (C)	91,747
%20CF+Eva PLA (D)	83,376
%20CF+Eva PLA (D)	78,413
%20CF+Eva PLA (D)	70,958
%20CF+Eva PLA (D)	76,949

Elde edilen sonuçlar Minitab16 paket programına aktarılmıştır. Taguchi en büyük en iyi yaklaşımı tercih edilerek, eğilme yükü için türetilen ana etki grafiği Şekil 5.10'da ve türetilen S/N grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.10. Eğilme kuvveti için türetilen ana etki grafiği



Şekil 5.11. Eğilme kuvveti için türetilen S/N grafiği

Şekil 5.11 grafiklerinin tamamı değerlendirildiğinde malzemeye CF+Eva takviye oranı arttıkça eğilme kuvvetinde de düşüş gözlenmiştir. Takviyelerin matrisin sürekliliğini negatif yönde etkilemesi ve gözenekli yapı oluşturması sebebi ile ara yüz yapışmasını zayıflattığı bilinmektedir [10]. Dolgu deseni açısından sonuçlar değerlendirildiğinde concentric desenin en iyi performansı ve tri-hexagon desenin en kötü performansı verdiği görülmüştür. Şekil 5.11 genel olarak ele alındığında en ideal performansı saf PLA'nın 225 °C nozul sıcaklığında, concentric desende ve 40 mm/s baskı hızında sağladığı gözlenmiştir

Çizelge 5.15 eğilme kuvveti sonuçlarının deney parametrelerinin dört farklı seviyedeki sonuçları ve etki sıralamasını göstermektedir.

Çizelge 5.15. Taguchi analiz optimum parametreler

Seviye	Taguchi analiz etki sıralaması					
	M	T (C°)	D	H (mm/s)	Delta	Etki Sırası
1	46,29	41,34	41,38	41,76	8,52	1
2	42,50	41,65	40,78	41,61	0,37	3
3	39,82	41,67	41,68	41,59	1,74	2
4	37,76	41,71	42,53	41,42	0,34	4

Etki sıralamasının gösterildiği Çizelge 5.15 ANOVA sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.

5.3.1. ANOVA ile eğilme kuvveti değerlendirilmesi

Çalışmada, test parçalarının her birinde deformasyon miktarı açısından farklı değerler ölçülmüştür. Bu farklılıkların hangi faktörlerinden hangi yüzdelik oranlarda etkilendiğini belirlemek amacıyla Varyans analizi kullanılmaktadır. Çizelge 5.16'da eğilme kuvveti sonuçlarının Varyans analiz (ANOVA) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.16. Eğilme kuvveti değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları

Source	DoF	SS	MS	F-test	P-coefficient	PCR (%)
Malzeme	3	162,569	54,1895	638,23	0	95,650
Nozul Sıcaklığı T (°C)	3	0,34	0,1132	1,33	0,409	0,050
Dolgu Deseni	3	6,305	2,1017	24,75	0,013	3,565
Baskı Hızı	3	0,228	0,0759	0,89	0,536	0
Residual Error	3	0,255	0,0849			99,265
Total	15	169,696				100

Yapılan testlerde malzeme, nozul sıcaklığı, dolgu deseni, 3B baskı hızı parametrelerinin test parçasının dayanabileceği eğilme kuvvetine etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin %95,650 oranı ile malzeme parametresi olduğu belirlenmiştir. Malzemenin ardından dolgu deseninin %3,565 oranı ile çok düşük bir miktarda eğilme kuvvetine etkili olduğu görülmüştür. Analiz sonucunda, üretim esnasındaki nozul sıcaklığı ve baskı hızının eğilme kuvveti üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı görülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre; 3B yazıcı ile değişken parametrelerde üretilen karbon fiber takviyeli PLA parçalarında saf PLA malzemenin 225 °C nozul sıcaklığında, concentric dolgu deseni ve 40 mm/s hız ile üretilmesinin en yüksek eğilme kuvveti sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. %20 CF+Eva takviyeli malzemeden, 205 °C nozul sıcaklığında, 70 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretildiği koşulda ise en kötü eğilme kuvveti gözlenmiştir.

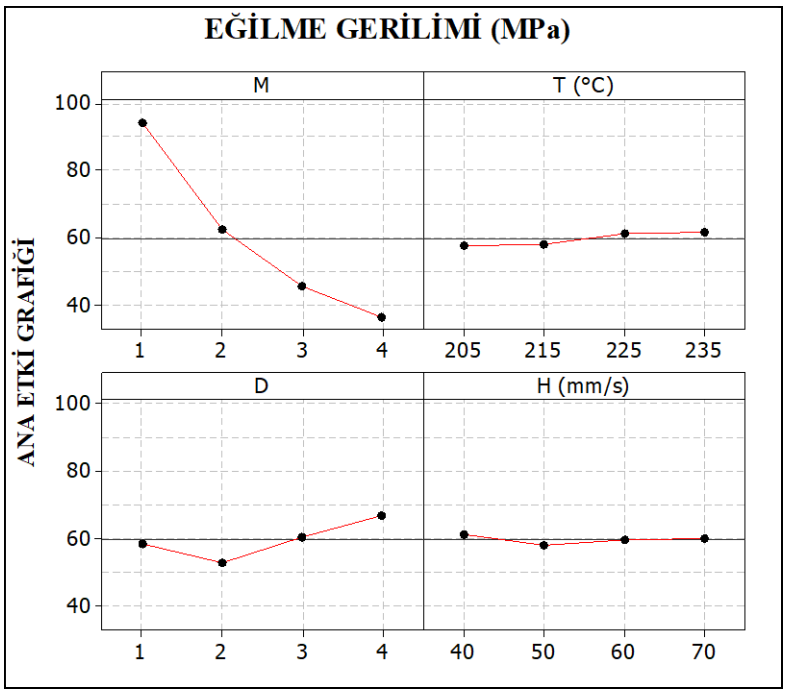
Elde edilen sonuçlar ışığında yapılan doğrulama deneyleri ile eğilme kuvvetinde %49,8 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür.

Eğme testi ile elde edilen ortalama eğilme gerilmesi değerleri Çizelge 5.17'de verilmektedir.

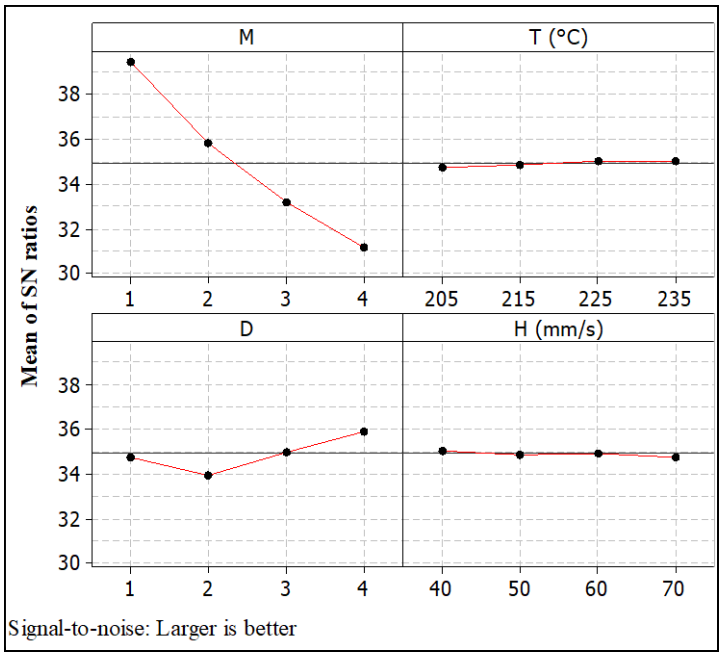
Çizelge 5.17. Elde edilen eğilme gerilmesi değerleri

Malzeme	Eğilme Gerilmesi
PLA(A)	94,066
PLA(A)	83,188
PLA(A)	96,272
PLA(A)	103,326
%10CF+Eva PLA (B)	53,395
%10CF+Eva PLA (B)	59,648
%10CF+Eva PLA (B)	71,940
%10CF+Eva PLA (B)	64,797
%15CF+Eva PLA (C)	44,192
%15CF+Eva PLA (C)	52,182
%15CF+Eva PLA (C)	44,389
%15CF+Eva PLA (C)	41,981
%20CF+Eva PLA (D)	39,443
%20CF+Eva PLA (D)	36,274
%20CF+Eva PLA (D)	32,673
%20CF+Eva PLA (D)	36,027

Elde edilen sonuçlar Minitab16 paket programına aktarılmıştır. Taguchi en büyük en iyi yaklaşımı tercih edilerek, eğilme gerilimi için türetilen ana etki grafiği Şekil 5.12'de ve türetilen S/N grafiği Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.12. Eğilme gerilimi için türetilen ana etki grafiği



Şekil 5.13. Eğilme gerilimi için türetilen S/N grafiği

Şekil 5.13 değerlendirildiğinde malzemeye CF+Eva takviye oranı arttıkça eğilme gerilmesinde de düşüş gözlenmiştir. Dolgu deseni açısından sonuçlar değerlendirildiğinde concentric desenin en iyi performansı ve tri-hexagon desenin en kötü performansı verdiği görülmüştür. Şekil 5.13 genel olarak ele alındığında en ideal performansı saf PLA'nın 235 °C nozul sıcaklığında, concentric desende ve 40 mm/s baskı hızında sağladığı gözlenmiştir. Çizelge 5.18'de eğilme gerilmesi sonuçlarının deney parametrelerinin dört farklı seviyedeki sonuçları ve etki sıralamasını göstermektedir.

Çizelge 5.18. Taguchi analiz optimum parametreler

Seviye	Taguchi analiz etki sıralaması					
	M	T (C°)	D	H (mm/s)	Delta	Etki Sırası
1	94,21	57,77	58,53	61,07	58,11	1
2	62,44	57,82	52,81	57,95	3,76	3
3	45,69	61,32	60,38	59,47	13,91	2
4	36,10	61,53	66,72	59,91	3,11	4

Etki sıralamasının gösterildiği Çizelge 5.12 ANOVA sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.

5.3.2. ANOVA ile eğilme gerilmesi değerlendirilmesi

Çalışmada test parçalarının her birinde eğilme gerilmesi açısından farklı değerler ölçülmüştür. Bu farklılıkların hangi faktörlerinden hangi yüzdelik oranlarda etkilendiğini belirlemek amacıyla Varyans analizi kullanılmaktadır. Çizelge 5.19'da eğilme gerilmesi sonuçlarının Varyans analiz (ANOVA) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.19. Eğilme gerilmesi değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları

Source	DoF	SS	MS	F-test	P-coefficient	PCR (%)
Malzeme	3	155,523	51,8409	665,45	0	94,493
Nozul Sıcaklığı T (°C)	3	0,261	0,0868	1,11	0,465	0,0166
Dolgu Deseni	3	8,112	2,7041	34,71	0,008	4,794
Baskı Hızı	3	0,208	0,0695	0,89	0,536	0
Residual Error	3	0,234	0,0779			99,304
Total	15	164,338				100

Yapılan testlerde, malzeme, nozul sıcaklığı, dolgu deseni, 3B baskı hızı parametrelerinin test parçasının dayanabileceği eğilme gerilmesine etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin %94,493 oranı ile malzeme parametresi olduğu belirlenmiştir. Malzemenin ardından dolgu deseninin %4,794 oranı ve nozul sıcaklığının %0,0166 gibi düşük bir etkisinin eğilme gerilmesine etkili olduğu görülmüştür. Analiz sonucunda, üretim esnasındaki baskı hızının eğilme yükü üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre; 3B yazıcı ile değişken parametrelerde üretilen karbon fiber takviyeli PLA parçalarında saf PLA malzemenin 225 °C nozul sıcaklığında, concentric dolgu deseni ve 40 mm/s hız ile üretilmesinin en yüksek eğilme gerilmesi dayanımı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. %20 CF+Eva takviyeli malzemeden, 205 °C nozul sıcaklığında, 70 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretildiği koşulda ise en kötü eğilme gerilmesi değeri gözlenmiştir.

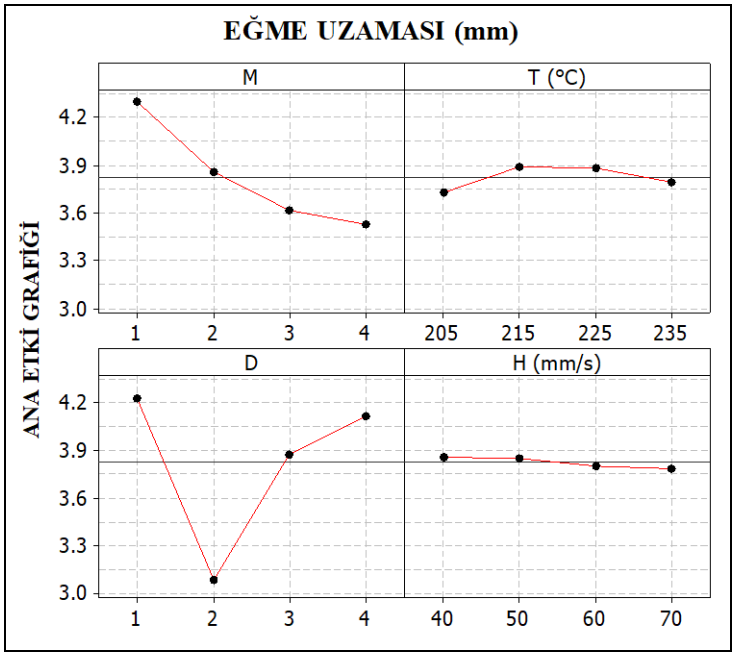
Ulaşılan sonuçlar ışığında yapılan doğrulama deneyleri ile eğilme gerilmesi dayanımında %49,8 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür.

Eğme testi ile elde edilen ortalama eğme uzaması değerleri Çizelge 5.20'de verilmektedir.

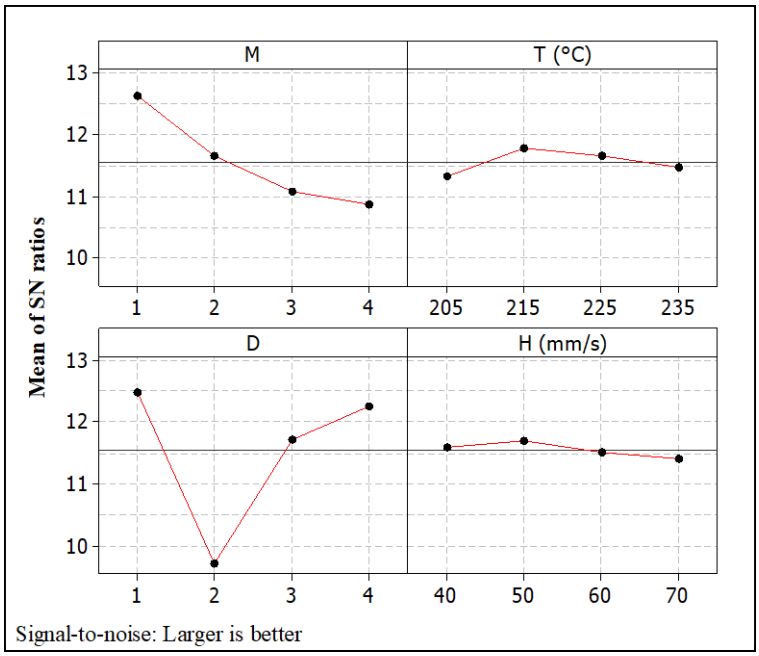
Çizelge 5.20. Elde edilen eğme uzaması değerleri

Malzeme	Eğme Uzaması (mm)
PLA(A)	4,647
PLA(A)	3,560
PLA(A)	4,434
PLA(A)	4,550
%10CF+Eva PLA (B)	3,018
%10CF+Eva PLA (B)	4,345
%10CF+Eva PLA (B)	4,147
%10CF+Eva PLA (B)	3,916
%15CF+Eva PLA (C)	3,433
%15CF+Eva PLA (C)	3,965
%15CF+Eva PLA (C)	4,131
%15CF+Eva PLA (C)	2,918
%20CF+Eva PLA (D)	3,802
%20CF+Eva PLA (D)	3,698
%20CF+Eva PLA (D)	2,812
%20CF+Eva PLA (D)	3,787

Elde edilen sonuçlar Minitab16 paket programına aktarılmıştır. Taguchi en büyük en iyi yaklaşımı tercih edilerek, eğme uzaması için türetilen ana etki grafiği Şekil 5.14'te ve türetilen S/N grafiği Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.14. Eğme uzaması için türetilen ana etki grafiği



Şekil 5.15. Eğme uzaması için türetilen S/N grafiği

Şekil 5.15 değerlendirildiğinde malzemeye CF+Eva takviye oranı arttıkça eğilme uzamasında da düşüş gözlenmiştir. Dolgu deseni açısından sonuçlar değerlendirildiğinde line desenin en iyi performansı ve tri-hexagon desenin en kötü performansı verdiği görülmüştür. Şekil 5.15 genel olarak ele alındığında en ideal performansı saf PLA'nın 215 °C nozul sıcaklığında, line desende ve 40 mm/s baskı hızında sağladığı gözlenmiştir

Çizelge 5.21 eğme uzaması sonuçlarının deney parametrelerinin dört farklı seviyedeki sonuçları ve etki sıralamasını göstermektedir.

Çizelge 5.21. Taguchi analiz optimum parametreler

Seviye	Taguchi analiz etki sıralaması					
	M	T (C°)	D	H (mm/s)	Delta	Etki Sırası
1	12,617	11,313	12,498	11,590	1,741	2
2	11,641	11,778	9,726	11,702	0,465	3
3	11,075	11,648	11,716	11,515	2,771	1
4	10,876	11,471	12,270	11,403	0,298	4

Etki sıralamasının gösterildiği Çizelge 5.12 ANOVA sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir.

5.3.3. ANOVA ile eğilme uzaması değerlendirilmesi

Çalışmada, test parçalarının her birinde eğme uzaması açısından farklı değerler ölçülmüştür. Bu farklılıkların hangi faktörlerinden hangi yüzdelik oranlarda etkilendiğini belirlemek amacıyla Varyans analizi kullanılmaktadır. Çizelge 5.22'de eğme uzaması sonuçlarının Varyans analiz (ANOVA) sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.22. Eğme uzaması değerleri için elde edilen ANOVA sonuçları

Source	DoF	SS	MS	F-test	P-coefficient	PCR (%)
Malzeme	3	7,3047	2,43488	57,95	0,004	26,39701
Nozul Sıcaklığı T (°C)	3	0,4964	0,16548	3,94	0,145	1,361799
Dolgu Deseni	3	19,0786	6,35953	151,35	0,001	69,69152
Baskı Hızı	3	0,1891	0,06304	1,5	0,373	0,231808
Residual Error	3	0,1261	0,04202			97,68214
Total	15	27,1949				100

Yapılan testlerde malzeme, nozul sıcaklığı, dolgu deseni, 3B baskı hızı parametrelerinin eğme uzamasına etkisi incelendiğinde; en etkili parametrenin %69,69152 oranı ile dolgu deseni parametresi olduğu belirlenmiştir. Dolgu deseninin ardından malzeme parametresi %26,39701 oranı ile eğme uzamasına etkili olduğu görülmüştür. Analiz sonucunda, üretim esnasındaki baskı hızının ve nozul sıcaklığı parametrelerinin eğme uzaması değeri üzerinde çok düşük oranlarda etki etmesi sebebiyle anlamlı bir etkiye sahip olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Ulaşılan sonuçlara göre; 3B yazıcı ile değişken parametrelerde üretilen karbon fiber takviyeli PLA parçalarında saf PLA malzemenin 215 °C nozul sıcaklığında, line dolgu deseni ve 50 mm/s hız ile üretilmesinin en yüksek eğme uzaması sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. %20 CF+Eva takviyeli malzemeden, 205 °C nozul sıcaklığında, 70 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretildiği koşulda ise en düşük eğme uzaması değeri gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ışığında yapılan doğrulama deneyleri ile eğme uzaması %26 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, karbon fiber ve Eva takviyeli PLA filamentler üretilmiş ve bu PLA filamentler ile farklı yazdırma parametrelerinde test parçaları üretilmiştir. Bu test parçalarına çekme ve eğme testleri uygulanmıştır. Ayrıca üretilen parçaların boyutsal doğrulukları da kontrol edilmiştir. Çalışma ile elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- %10 CF+Eva takviyeli parçaların, diğer üretim yöntemlerinde üretilen parçalara göre boyutsal doğrulukta daha iyi bir performans sağladığı, CF+Eva takviye oranı arttıkça bunun boyutsal doğruluğu olumsuz etkilediği görülmüştür. Ayrıca literatüre paralel olarak 215 °C ve artan nozul sıcaklığının boyutsal doğruluğu pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir.
- Boyutsal doğruluk üzerinde en etkili parametrenin %33,66 oranı ile dolgu deseni parametresi olduğu, bunu takip eden parametrelerin ise %10,31 ile baskı hızı ve %10,14 ile nozul sıcaklı olduğu tespit edilmiştir.
- En iyi boyutsal doğruluk, %10CF+Eva takviyeli PLA malzemenin 235 °C nozul sıcaklığında, gyroid dolgu deseni ve 60 mm/s hız ile üretilen parçalarda elde edilmiştir. En kötü boyutsal doğruluk ise %20CF+Eva takviyeli malzemeden 215 °C nozul sıcaklığında 50 mm/s hız ile tri-hexagon dolgu deseninde elde edilmiştir.
- Çekme ve eğme test parçalarında filamente eklenen CF+Eva takviye oranı arttıkça akma dayanımında, çekme dayanımında, eğilme gerilmesi, eğilme dayanımı ve deformasyon değerlerinde doğru orantılı olarak düşüş gözlenmiştir.
- Dolgu deseni olarak concentric desenin akma ve çekme dayanımında en iyi performansı verdiği, line ve gyroid desenin herhangi bir etkisinin bulunmadığı ve tri-hexagon desenin akma ve çekme dayanımını negatif yönde etkilediği görülmüştür. Deformasyon için değerlendirildiğinde ise line desenin en iyi performansı verdiği, tri-hexagon desenin en kötü performansı verdiği ve diğer desenlerin herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Akma dayanımında en yüksek sonucu saf PLA'nın 225 °C nozul sıcaklığında, concentric desende ve 60 mm/s baskı hızında sağladığı gözlenmiştir. En kötü sonucu ise %20 CF+Eva takviyeli malzemeden, 215 °C nozul sıcaklığında, 40 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretilen test parçaları vermektedir.

- Akma dayanımında en etkili parametrenin %87,7 oranı ile malzeme, ardından %10,5717 oranı ile dolgu deseninin olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonucunda, nozul sıcaklığı ve baskı hızının akma dayanımı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Çekme testinde maksimum yük değeri için en yüksek dayanım saf PLA ile 235 °C nozul sıcaklığında, concentric desende ve 50 mm/s baskı hızında elde edilmiştir. En düşük dayanım ise %20 CF+Eva takviyeli malzeme ile 215 °C nozul sıcaklığında, 40 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretilen koşullarda görülmüştür.
- Çekme testinde, maksimum yük için en etkili parametrenin %89,188 oranı ile malzeme parametresi olduğu ardından %9,3058 oranı ile dolgu deseninin olduğu tespit edilmiştir. Nozul sıcaklığı ve baskı hızının maksimum yük dayanımı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Çekme testinde deformasyon değerleri için en yüksek sonuç, saf PLA ile 235 °C nozul sıcaklığında, line desende ve 70 mm/s baskı hızında elde edilmiştir. En düşük sonuç ise %15 CF+Eva takviyeli malzeme ile 205 °C nozul sıcaklığında, 40 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretilen koşullarda görülmüştür.
- Çekme testinde, deformasyon için en etkili parametrenin %63,897 oranı ile malzeme parametresi olduğu ardından %11,359 oranı ile dolgu deseninin olduğu tespit edilmiştir. Nozul sıcaklığı ve baskı hızının deformasyon üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Eğme testinde eğilme kuvveti ve eğme gerilmesi açısından en yüksek dayanımı saf PLA'nın 225 °C nozul sıcaklığında, concentric desende ve 40 mm/s baskı hızında sağladığı gözlenmiştir. En düşük eğilme dayanımı dayanımı ise %20 CF+Eva takviyeli malzemeden, 205 °C nozul sıcaklığında, 70 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretildiği koşulda gözlenmiştir.
- Eğme testinde, eğilme kuvveti için en etkili parametrenin %95,650 oranı ile malzeme parametresi olduğu ardından %3,565 oranı ile dolgu deseninin olduğu tespit edilmiştir. Nozul sıcaklığı ve baskı hızının eğilme kuvveti üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Eğme testinde, eğilme gerilmesi için en etkili parametrenin %94,493 oranı ile malzeme parametresi olduğu ardından %4,794 oranı ile dolgu deseninin olduğu tespit edilmiştir. Nozul sıcaklığı ve baskı hızının eğilme gerilmesi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

- Eğme testin en yüksek eğme uzaması saf PLA'nın 215 °C nozul sıcaklığında, line desende ve 50 mm/s baskı hızında sağlandığı gözlenmiştir. En düşük eğme uzaması ise %20 CF+Eva takviyeli malzemeden, 205 °C nozul sıcaklığında, 70 mm/s hız ve tri-hexagon dolgu deseni ile üretildiği koşulda gözlenmiştir.
- Eğme testinde, eğme uzaması için en etkili parametrenin %69,692 oranı ile dolgu deseni olduğu ardından %26,397 oranı ile malzeme olduğu tespit edilmiştir. Nozul sıcaklığı ve baskı hızının eğme uzaması üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Taguchi Analiz ile elde edilen ideal parametreler ile doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan doğrulama deneyleri ile boyutsal doğrulukta %11,6 oranında, akma ve çekme dayanımında %81 oranında, eğilme kuvveti ve gerilmesinde %49,8 oranında iyileşme sağlanmıştır.

Bundan sonra gerçekleştirilecek çalışmalar için elde edilen sonuçlar ışığında aşağıdaki önerilerin faydalı olacağı düşünülmektedir.

- CF takviyesinin vakum infüzyon yöntemi kullanılarak ve yönlendirme işlemi gerçekleştirilerek üretilmesi ve bunlarla üretilen parçaların mukavemet özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D. (2018). Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, *Methods, Applications and Challenges,* Composites Part B, 143, 172-196.

2. Yalçın, B. ve Ergene, B. (2017). Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B eklemeli imalat yöntemi ve metalürjisi, *SDÜ Uluslararası Teknoloji Bilimi Dergisi,* 9(3), 65-88.

3. Dizon J.R.C., Espera A.H., Chen Q. and Advincula R.C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing,* 20: 44–67.

4. Tofail, S.A., Koumulos E.P., Bandyopadhyay A., Bose S., O'Donoghue L. and Charitidis C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, *Materials Today,* 21(1), 22-37.

5. Das, A., Chatham C. A., Fallon J. J., Zawaski C. E., Gilmer E. L., Williaös C. B. and Bortner, M.J. (2020). Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers. *Additive Manufacturing,* 34, (101218), 1-21.

6. Lopes, M. S., Jardini, A. L., and Filho, R. M. (2012). Poly (Lactic Acid) Production for Tissue Engineering Applications. *Procedia Engineering,* 42, 1402-1413.

7. Caulfield, B., McHugh, P. and Lohfeld, S. (2007). Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process. *Journal of Material Processing Technology,* 182(1-3): 477-88.

8. Gu, H., Ma, C., Gu, J., Guo, J., Yan, X., Huang, J., et al. (2016). An overview of multifunctional epoxy nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry C,* 4(25): 5890-906.

9. Ferreira, R.T.L., Amatte, I.C., Duatra, T.A. and Burger, D. (2017). Experimental Characterization and Micrography of 3D Printed PLA and PLA Reinforced with Short Carbon Fibers, *Composites Part B* 124, 88-100.

10. Uzun, M. ve Erdoğdu, Y.E. (2020). Eriyik Yığma Modellemesi ile Üretimde Takviyesiz ve Takviyeli PLA Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 10(4): 2800-2808

11. Kadayıf., E.(2021). *Otomotiv İç Tasarım Malzemesi Olarak PLA'nın Kullanım İmkânlarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.

12. Yıldız, A. (2022). *3D Baskılı Karbon Fiber Takviyeli PLA Numunelerinin Sürünme Davranışının İncelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

13. Mehat, N.M., Kassim, S.M. and Kamaruddin, S. (2017). Investigation on the effects of processing parameters on shrinkage behaviour and tensile properties of injection moulded plastic gear via the taguchi method, *In Journal of Physics: Conference Series,* 908 (1), 12-49.

14. Aksoy, B. ve Koru, M. (2020). Estimation of casting mold ınterfacial heat transfer coefficient in pressure die casting process by artificial ıntelligence methods, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 8969-8980

15. Zhao, T. and Jiang, Y. (2008). Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*, 30(5), 834-849.

16. Uzun, M. ve Erdoğdu, Y.E. (2020). Eriyik Yığma Modellemesi ile Üretimde Takviyesiz ve Takviyeli PLA Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 10(4): 2800-2808.

17. Sezer, H.K., Eren, O., Börklü, H.R. ve Özdemir, V. (2019). Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Ergiyik Biriktirme Yöntemi ile Eklemeli İmalatı: Fiber Oranı ve Yazdırma Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 34:2, 663-674.

18. Sang, L., Han, S., Li, Z., Yang, X. and Hou, W.(2019). Development of short basalt fiber reinforced polylactide composites and their feasible evaluation for 3D printing applications, *Composites Part B* 164, 629-639.

19. Ercan, N. (2019). *3B Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Hücresel Kafes Yapılı Sandviç Panellerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

20. Karaman, E. ve Çolak, O. (2019). Eriyik Biriktirme Yönteminde Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere ve Parçaların İç Yapısına Etkisinin İncelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi,* 8, 617-630 Düzce.

21. Eren, O. (2017). *FDM 3B Yazıcı ile Kompozit Parça Tasarımı ve Mekanik Özelliklerinin* Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

22. Hu, C., Sun, Z. Xiao, Y. and Qin, Q. (2019). *Recent Patents in Additive Manufacturing of Continuous Fiber Reinforced Composites*, Research School of Engineering, College of Engineering and Computer Science, Australian National University, Canberra, ACT 2601, Australia.

23. Khan, A.S., Ali, A., Hussain, G. and Ilyas, M. (2021). *A*n Experimental Study on Interfacial Fracture Toughness of 3D Printed ABS/CF-PLA Composite Under Mode I, II, and Mixed-Mode Loading, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 34(12) 1599 –1622.

24. Kamer, M.S. ve Temiz, Ş. (2021). 3 Boyutlu Yazıcıda ABS ve PLA Filamentler ile Farklı Tabla ve Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Çekme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 24(4), 341-358.

25. Özdoğan, S. (2021). *Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilen Parçaların Baskı Parametrelerinin Üç Nokta Eğilme Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

26. Bıyıklıoğlu, M. (2019). *Eriyik Yığma Yöntemiyle Üretilen Sürekli Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

27. Günay, M., Gündüz, S., Yılmaz, H., Yaşar, N. ve Kaçar, R. (2020). PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı için 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu, *Politeknik dergisi*, 23(1): 73-79.

28. Apak, K. (2019). *PLA Malzemesinden Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ürünlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.

29. Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J.A., Lluma-Fuentes, J., Gomez-Gras, G., Puig, D. (2017). Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by additive manufacturing, *ScienceDirect, Procedia Manufacturing* 13 (2017) 872–879.

30. Hasipek, İ. (2019). *Otomotiv Endüstrisi için Çok Ölçütlü Karar Verme Teknikleri ile Katmanlı İmalat Teknolojisi Seçim Asistanı Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

31. Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2014). *Aditive manufacturing technologies.* (498), New York.

32. Poyraz, O., Yasa, E., Depboylu, F.N., Korkusuz, F. (2022). Design, analysis, and Production of lattice structures through powder bed fusion additive manufacturing. Materials, *Structures and Manufacturing for Aircraft*, 345-366.

33. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M.C. ve Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31, 53-70.

34. Williams C.B., Mistreee F. ve Rosen D.V., (2011). *A functional classification framework for the conceptual design of additive manufacturing Technologies,* J. Mec. (133), 12, 121002.

35. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM F42, 2012.

36. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K. , Chen, Y., Williams, C.B., Wang, C.C.L., Shin, Y.C., Zhang, S., and Zavattieri, P.D. (2015). *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,"* Computer-Aided Design, (69), 65-89, 2015.

37. Huang, Y. and Leu, M.C. (2013). *An NSF additive manufacturing workshop report 2013,* University of Florida Center for Manufacyuring Innovation, USA.

38. Karagöz, İ. , Danış Bekdemir, A. ve Tuna, Ö. (2021). 3B Yazıcı Teknolojilerindeki Kullanılan Yöntemler ve Gelişmeler Üzerine Bir Derleme . *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi,* 9 (4) , 1186-1213.

39. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, C. M., Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 31,1302 – 1355.

40. Raja, V. And Fernands, K.J. (2008). *Reverse Engineering – An Industrial Perspective.* London: Springer, 123-198.

41. Apak, S. (2010). *Farklı Hızlı Prototipleme Cihazlarında Üretilen Parçaların Üretim Zamanı Ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması,* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

42. İnternet: 3B parça görüntüleri, Web: https://acikatolye.com.tr/industrial/, Erişim Tarihi: 21.06.2023

43. İnternet: 3B yazıcı görüntüleri, Web: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fdabircan.blogspot.com%2F2014%2F06%2Fhzl-prototipleme-teknolojileri-1.html&date=2016-09-09, Erişim Tarihi: 21.06.2023.

44. O'Carroll, E. (2017). *Determine the mechanical properties of 3d printed polymer parts for computer modelling applications*. Web: https://www.researchgate.net/publication/326994864_Determine_the_Mechanical_Properties_of_3D_Printed_Polymer_Parts_for_Computer_Modelling_Applications, Erişim Tarihi: 19.05.2023.

45. Sağbaş B. (2018), Surface texture characterization and parameter optimization of fused deposition modelling process, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi,* (6), 4, 1028-1037.

46. Christiyan, K. J., Chandrasekhar, U., Venkateswarlu, K. (2016). A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114, 1.

47. Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., Núñez, P.J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, *Materials & Design*, 124, 143-157.

48. Coogan, T. J., Kazmer, D.O. (2017). Bond and part strength in fused deposition modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 23, 2, 414-422.

49. Lopes, M. S., Jardini, A. L., ve Filho, R. M. (2012). Poly (Lactic Acid) Production for Tissue Engineering Applications. *Procedia Engineering*, 42, 1402-1413.

50. İnternet: Filament görüntüleri, Web: https://fillamentum.com/collections/nonoilen-filament , Erişim Tarihi: 01.07.2023.

51. Caulfield, B., McHugh, P., Lohfeld, S. (2007). Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process. *Journal of Materials Processing Technology,* 182(1-3): 477-88.

52. Serra, T., Planell, J.A., Navarro, M. (2013). High-resolution PLA-based composite scaffolds via 3-D printing technology. *Acta Biomater,* 9(3): 5521-30.

53. Carneiro, O.S., Silva, A., Gomes, R. (2015). Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials Design* 83: 768-76.

54. Gu, H., Ma, C., Gu, J., Guo, J., Yan, X., Huang, J. (2016). An overview of multifunctional epoxy nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry C* 4(25): 5890-906

55. İnternet: Filament özellikleri, Web: https://www.porima3d.com/blog/icerik/pla-filament-nedir, Erişim Tarihi: 01.07.2023

56. İnançer, G., (2015). *Farklı Takviye Malzemeli Plastik Kompozitlerin Darbe Davranışına Çevrenin Etkisi,* Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

57. Gutierrez, C. R. R. (2016*). Improvıng the engineerıng properties of pla for 3D printing and beyond.* The University of Texas at El Paso Faculty of the Graduate School, ABD.

58. Şahin, Y. (2000), *"Kompozit Malzemelere Giriş",* Ankara: Gazi Kitapevi.

59. Kaw, A. K. (2014), *"Kompozit Malzeme Mekaniği"*, Efil Yayınevi Yayınları, 496.

60. Pechurai, W., Nakason, C., Sahakaro, K. (2008). Thermoplastic natural rubber based on oil extended NR and HDPE blends: Blend compatibilizer, phase inversion composition and mechanical properties, *Polymer Testing* 27, 621-631.

61. Chang, Y.W., Mishra, J.K., Kim, S.K., Kim, D.K. (2006). Effect of supramolecular hydrogen bonded network on the properties of maleated ethylene propylene diene rubber/maleated high density polyethylene blend based thermoplastic elastomer, *Materials Letters* 60 (25-26) 3118-3121.

62. Eisele, U. (1990). *Deformation Behavior of Thermoplastic Elastomers*, Springer Berlin Heidelberg: German, 147-155.

63. Boudenne, A., Ibos, L., Candau, Y., Thomas, S. (2011). *Handbook of Multiphase Polymer Systems, Wiley*, United Kingdom, 1-12.

64. Xie, Y., Hill, C.A.S., Xiao, Z., Militz, H., Mai, C., (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41, 806-819.

65. Cercle, C. and Favis, B.D. (2012). *Generalizing interfacial modification in polymer blends*, Polymer 53, 4338-4343.

66. Davis, J. R. (2004). *Tensile testing (48).* ASM international, 283.

67. Murugan, S. S. (2020). Mechanical properties of materials: definition, testing and application. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering (IJMSME)*, 6(2), 28-38.

68. İnternet: Malzeme bilgileri, Web: www.malzemebilimi.net, Erişim Tarihi: 02.07.2023.

69. İnternet: Test prosedürleri, Web: www.gozetim.com, Erişim Tarihi: 02.07.2023.

70. İnternet: Çekme testi cihazı verileri, Web: https://argevetasarim.com/cekme-deneyi/, Erişim Tarihi: 02.07.2023.

71. ASTM D790-17, (2017). *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*, ASTM International, West Conshohocken.

72. The Science and Engineering of Materials, 4 th ed Donald R. Askeland - Pradeep P. Phule Chapter 6 - Mechanical Properties and Behavior.

73. Taşdemir, M. (2018). *Plastik Malzemelerin Test Teknikleri*. Ankara, Seçkin.

74. ASTM D638-22, (2022). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee*. West Conshohocken.

75. Ercan, N. (2019). *3B Eklemli Üretim Yöntemiyle Üretilmiş Hücresel Kafes Yapılı Sandviç Panellerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi,* Yüksel Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 49-50.

76. Kuruoğlu, Y., Akgün, M., Demir, H. (2022). Fdm Yöntemiyle Üretilen Abs, Pla ve Petg Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğü ve Çekme Dayanımının Modellenmesi Ve Optimizasyonu, *International Journal of 3D Printing Technology Digital Industry,* 6(3): 358-369.

77. Özdemir, A.İ. ve Deste, M. (2009). Gri İlişkisel Analiz ile Çok Kriterli Tedarikçi Seçimi: Otomotiv Sektöründe Bir Uygulama, *9. Üretim Araştırmaları Sempozyumu Kitabı,* Eskişehir, 429-437.

78. Kuo, Y., Yang, T., Huang, G.W. (2008). The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems, *Computers & Industrial Engineering,* 55, 80- 93.

79. Lin, J.L. ve Lin, C.L. (2005). The use of grey-fuzzy logic for the optimization of the manufacturing process, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol.160, pp. 9-14.

80. Kaveh, M., Badrossamay, M., Foroozmehr, E., ve Etefagh, A. H. (2018). Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes, *Journal of Materials Processing Technology,* 226.

81. Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J. ve Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Composites Part B: Engineering,* 80, 369–378.

82. Çakıroğlu, R. (2011). *Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın modellenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

83. Yılmaz, B. (2016). *Pnömatik tahrikli dinamik talaş kırıcı tasarımı ve işleme parametrelerine etkilerinin araştırılması,* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.



Gazili olmak ayrıcalıktır