



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**



**KARBON FİBER TAKVİYELİ ABS KOMPOZİTLERİN
FDM 3B YAZICI İLE ÜRETİMİ VE ANSYS
İLE MODELLENMESİ**

Zeki Yahya PATAN

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği

Anabilim Dalı

ÇANAKKALE

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON FİBER TAKVİYELİ ABS KOMPOZİTLERİN
FDM 3B YAZICI İLE ÜRETİMİ VE ANSYS
İLE MODELLENMESİ
Zeki Yahya PATAN

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliğı
Anabilim Dalı

Tezin Sunulduğı Tarih: 29/01/2019

Tez Danışmanı:
Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK

ÇANAKKALE

Zeki Yahya PATAN tarafından Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK yönetiminde hazırlanan ve **29/01/2019** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Karbon Fiber Takviyeli ABS Kompozitlerin FDM 3B Yazıcı ile Üretimi ve ANSYS ile Modellenmesi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR

Üye

Prof. Dr. Levent GENÇ

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:.....

İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Zeki Yahya PATAN

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışma süresince bilgi paylaşımını esirgemeyen, çalışmanın her aşamasında fikirlerini paylaşarak tecrübelerini aktaran saygı değer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK'e teşekkür ederim.

ANSYS Workbench programında yapılan analizlerde paylaştığı bilgilerden dolayı Makine Mühendisi Berk Buğra GÜRBÜZ ve Deniz AKTÜRK'e teşekkür ederim.

Gösterdiği anlayış ve desteklerden dolayı Selin SİLCAN'a, maddi manevi olarak desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Sevgi PATAN, babam Mehmet PATAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Zeki Yahya PATAN
Çanakkale, Ocak 2019

SİMGELER VE KISALTMALAR

3B	3 Boyut
CM	Basınç kalıplama
SLA	Tarayarak ışıkla kürleme
SLS	Seçici lazer sinterleme
STL	Stereolitografi
FDM	Eriyik biriktirme yöntemi
LOM	Tabaka yapıştırırmalı imalat
ASTM	Amerikan test ve malzeme kurumu
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
PLA	Polilaktik asit
std	Standart sapma
ort.	Ortalama
yşd	Yüzde şekil değişikliği
σ	Gerilme
$\sigma_{\max}$	Maksimum gerilme
P	Numuneye uygulanan yük
$P_{\max}$	Numunenin taşıyabildiği en büyük yük
A	Kesit alanı
N	Nevton
ε_i	Yer değiştirme noktasında oluşan şekil değiştirme miktarı
δ_i	Yer değişimi
E	Elastisite modülü
$\Delta\sigma$	Gerilme farkı
$\Delta\varepsilon$	Şekil değiştirme farkı
l	Numune boyu
L_g	Ekstansometre temas uzunluğu
ν	Poisson oranı

ÖZET

KARBON FİBER TAKVİYELİ ABS KOMPOZİTLERİN FDM 3B YAZICI İLE ÜRETİMİ VE ANSYS İLE MODELLENMESİ

Zeki Yahya PATAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK

29/01/2019, 77

Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin 3 boyutlu (3B) yazıcılar kullanılarak üretime yönelik çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Dünyada en çok tercih edilen baskı teknolojisi olan eriyik biriktirme yönteminde (Fused Deposition Modeling-FDM) kullanılan filamentler süreksiz karbon fiber takviyesi ile mekanik performansları iyileştirilmektedir. Bu çalışmanın amacı, FDM 3B yazıcı kullanılarak, bilgisayar destekli, kolay, hızlı ve ekonomik olarak kompozit parçaların üretimi, mekanik özelliklerinin incelenmesi ve analitik olarak modellenmesidir. Bu amaca ulaşmak için, Akrilonitril bütadien strien (ABS) ve kırpılmış karbon elyaf takviyeli ABS filamentler kullanılarak, sabit baskı parametrelerinde ASTM standartlarına uygun numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar numerik olarak doğrulanmıştır. Deney sonuçları kullanılarak, numunelerin ANSYS programında von Mises kriterine göre maksimum gerilmeleri ve şekil değiştirme enerjisi numerik olarak analiz edilmiştir. Mekanik deneyler sonucunda, karbon elyaf takviyeli ABS numunelerin basma ve eğilme dayanımı takviyesi ABS numunelere göre sırasıyla %23,9 ve %14,75 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Deneysel mekanik sonuçların girdi olarak kullanılmasıyla gerçekleştirilen analitik gerilme analizlerinde her iki numune türü için de çekme, basma ve eğilme davranışları minimum sapmalar ile modellenmiş ve analiz edilmiştir.

Anahtar sözcükler: 3B Yazıcı, ANSYS Mekanik Analiz, FDM Teknolojisi, CFR ABS, Mekanik Testler.

ABSTRACT

PRODUCTION OF CARBON FIBER REINFORCED ABS COMPOSITES WITH FDM 3D PRINTER AND MODELING WITH ANSYS

Zeki Yahya PATAN

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master of Science Thesis in Bioengineering and Materials Engineering

Advisor: Asst. Prof. Volkan ESKİZEYBEK

29/01/2019, 77

The production of fiber-reinforced polymer composite materials using 3D printers has accelerated in recent years. Fused Deposition Modeling (FDM) which is the most preferred printing technology is used to improve the mechanical performance of filaments with discontinuous carbon fiber reinforcement. The aim of this study is to produce composite parts using computerized, easy, fast and economical FDM, to determine the mechanical properties of the final parts, and model the parts using ANSYS. To achieve this goal, acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and discontinuous carbon fiber reinforced ABS filaments were used to produce samples in accordance with ASTM standards in constant pressure parameters. The mechanical behaviors of the produced samples were examined experimentally and the results obtained were verified numerically. Using the test results, the maximum stresses and deformation energy of the samples according to von Mises criterion were analyzed using ANSYS program. As a result of mechanical experiments, the compression and flexural strengths of the carbon fiber reinforced ABS samples were determined to be 23.9% and 14.75% higher than those of ABS samples, respectively. In both analytical stress analyzes performed by using experimental mechanical results as inputs, tensile, compression and bending behaviors for both sample types were modeled and analyzed with minimum deviations.

Keywords: 3D Printing, ANSYS Mechanical Analysis, FDM Technology, CFR ABS, Mechanical Tests.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ SINAVI SONUÇ FORMU.....	i
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Eriyik Biriktirme Yöntemi	3
2.2. Karbon Fiberin Mekanik Özelliklere Etkisi	5
2.3. Baskı Parametrelerinin Mekanik Özelliklere etkisi	6
2.4. ANSYS Workbench Numerik Analiz	9
BÖLÜM 3	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. Filamentler	11
3.2. ANET A8 3B Yazıcı ve Uygulanan İyileştirmeler	12
3.3. Numunelerin Üretim Prosesi.....	15
3.4. Numunelerin Modellenmesi ve Üretimi.....	18
3.4.1. Çekme Numunelerinin Modellenmesi ve Üretimi.....	20
3.4.2. Basma Numunelerinin Modellenmesi ve Üretimi	22
3.4.3. Eğilme Numunelerinin Modellenmesi ve Üretimi	24
3.5.Mekanik Karakterizasyon	27
3.5.1. Çekme Testleri.....	27
3.5.2. Basma Testleri	29
3.5.3. Eğilme Testleri	31
3.6. Numerik Analiz	33
BÖLÜM 4	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	39
4.1. DeneySEL Sonuçların Değerlendirilmesi	39

4.1.1. Çekme Testi Sonuçları	39
4.1.2. Basma Testi Sonuçları	45
4.1.3. Eğilme Testi Sonuçları	50
4.2 Numerik Sonuçların Değerlendirilmesi	55
4.2.1 Çekme Testi Numunelerinin Mekanik Analiz Sonuçları	55
4.2.2. Basma Testi Numunelerinin Mekanik Analiz Sonuçları	58
4.2.3. Eğilme Testi Numunelerinin Mekanik Analiz Sonuçları	62
4.3. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi	67
BÖLÜM 5	
SONUÇ VE ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	74
EKLERİ	I
EK 1. Performance ABS Filament Teknik Veri Formu	II
EK 2. CF0 ABS Filament Teknik Veri Formu	III
ÖZGEÇMİŞ	IV

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. FDM teknolojisi üretim süreci.....	4
Şekil 2.2. FDM teknolojisi çalışma prensibi.....	5
Şekil 2.3. Kompozit filament üretiminde kullanılan metot	6
Şekil 2.4. Çekme testi numunesinin önizlemesi, a) Doğrusal $[0,90]$ b) çapraz $[-45,45]$	7
Şekil 2.5. Numunelerin farklı yönelimleri	8
Şekil 2.6. Filament oryantasyonu: a) Boylamasına (0°), b) Enine (90°), c) Çapraz (45°), d) Çapraz çizgili ($+45/-45^\circ$)	8
Şekil 2.7. Çekme testi numunesi ve yakın mesh görünümü	10
Şekil 3.1. Numunelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için u akışşeması	11
Şekil 3.2. ANET A8 3B yazıcı mekanik ve elektronik parçaları.....	13
Şekil 3.3. Uzun süreli baskılarda meydana gelen hatalar	13
Şekil 3.4. Numune baskısında kullanılan ANET A8 3B yazıcı.....	14
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan FDM teknolojisi üretim süreci	17
Şekil 3.6. Performance ABS filament ile üretilen numunelerin baskı parametreleri.....	18
Şekil 3.7. CF0 ABS filament ile üretilen numunelerin baskı parametreleri	19
Şekil 3.8. Kullanılan dolgu şekli a) Tek sayılı katmanlar b) Çift sayılı katmanlar şekli	20
Şekil 3.9. ASTM D638 Tip-I çekme testi numune ölçüleri ve 3B modeli	20
Şekil 3.10. Performance ABS çekme testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler	21
Şekil 3.11. ASTM D3039 çekme testi numune ölçüleri ve 3B modeli	21
Şekil 3.12. CF0 ABS çekme testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler	22
Şekil 3.13. ASTM D695 basma testi numune ölçüleri ve 3B modeli.....	22
Şekil 3.14. Performance ABS basma testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler	23
Şekil 3.15. ASTM D6641 basma testi numune ölçüleri ve 3B modeli	23
Şekil 3.16. ASTM D6641 basma testi numunesi a) Dilimlenmiş görüntüsü, b) CF0 ABS ile üretilen basma testi numuneleri, c) alüminyum tab ve yapıştırıcı, d) Numune son hali	24
Şekil 3.17. ASTM D790 eğilme testi numune ölçüleri ve 3B modeli	25
Şekil 3.18. Performance ABS eğilme testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler	25
Şekil 3.19. ASTM D7264 eğilme testi numune ölçüleri ve 3B modeli	26
Şekil 3.20. CF0 ABS eğilme testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler	26
Şekil 3.21. ANSYS Workbench statik analiz sistemi	36
Şekil 3.22. 3B numune modellerinin statik analiz modülüne tanımlanması.....	37
Şekil 3.23. ANSYS Workbench model bölümünün sekmeleri.....	37
Şekil 4.1. Performance ABS çekme numunelerine ait deformasyonlar	40
Şekil 4.2. Performance ABS çekme gerilmesi - şekil değiştirme grafiği	40
Şekil 4.3. CF0 ABS çekme numunelerine ait deformasyonlar	42
Şekil 4.4. CF0 ABS çekme gerilmesi - şekil değiştirme grafiği.....	42
Şekil 4.5. Çekme gerilmeleri a) Performance ABS, b) CF0 ABS, c) Ortalama çekme gerilmeleri.....	44
Şekil 4.6. Performance ABS basma numuneleri ait deformasyonlar	45
Şekil 4.7. Performance ABS basma gerilmesi - şekil değiştirme grafiği.....	45
Şekil 4.8. CF0 ABS basma numunelerine ait deformasyonlar	47

Şekil 4.9. CF0 ABS basma gerilmesi- şekil değiştirme grafiği	47
Şekil 4.10. Basma gerilmeleri a) Performance ABS, b) CF0 ABS, c) Ortalama basma gerilmeleri	49
Şekil 4.11. Performance ABS eğilme numunelerine ait deformasyonlar	50
Şekil 4.12. Performance ABS eğilme gerilmesi – şekil değiştirme grafiği	50
Şekil 4.13. CF0 ABS eğilme numunelerine ait deformasyonlar	52
Şekil 4.14. CF0 ABS eğilme gerilmesi - şekil değiştirme grafiği	52
Şekil 4.15. Eğilme gerilmeleri a) Performance ABS, b) CF0 ABS, c) Ortalama eğilme gerilmeleri	54
Şekil 4.16. Performance ABS çekme numunesine uygulanan mesh işlemi	56
Şekil 4.17. ASTM D638 çekme testinin ANSYS ile modellenmesi	56
Şekil 4.18. ASTM D638 çekme testi numunesinin a) Çekme gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı	56
Şekil 4.19. CF0 ABS çekme testi numunesine uygulanan mesh işlemi	57
Şekil 4.20. ASTM D3039 çekme testinin ANSYS ile modellenmesi	57
Şekil 4.21. ASTM D3039 çekme testinin a) Çekme gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı	58
Şekil 4.22. Çekme testi numunelerinin mekanik analiz sonucu	58
Şekil 4.23. Performance ABS basma testi numunesine uygulanan mesh işlemi	59
Şekil 4.24. ASTM D695 basma testinin ANSYS ile modellenmesi	59
Şekil 4.25. ASTM D695 basma testinin a) Basma gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı	60
Şekil 4.26. Performance ABS basma testi numunesine uygulanan mesh işlemi	60
Şekil 4.27. ASTM D6641 basma testinin ANSYS ile modellenmesi	61
Şekil 4.28. ASTM D6641 basma testinin; a) Basma gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı	61
Şekil 4.29. Basma testi numunelerinin mekanik analiz sonucu	62
Şekil 4.30. Performance ABS eğilme testi numunesine uygulanan mesh işlemi	63
Şekil 4.31. ASTM D790 eğilme testinin ANSYS ile modellenmesi	63
Şekil 4.32. ASTM D790 eğilme testinin; a-b) Eğilme gerilmesi dağılımı, c-d) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı	64
Şekil 4.33. CF0 ABS eğilme testi numunesine uygulanan mesh işlemi	65
Şekil 4.34. ASTM D7264 eğilme testinin ANSYS ile modellenmesi	65
Şekil 4.35. ASTM D7264 eğilme testinin; a) Eğilme gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı	66
Şekil 4.36. Eğilme numunelerinin mekanik analiz sonucu	67
Şekil 4.37. Çekme gerilmelerinin karşılaştırılması	68
Şekil 4.38. Basma gerilmelerinin karşılaştırılması	68
Şekil 4.39. Eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Numune üretiminde kullanılan ABS filamentlerin teknik verileri ve önerilen üretim parametreleri.....	12
Çizelge 3.2. Numune üretimde kullanılan baskı parametreleri.....	15
Çizelge 3.3. Numunelere uygulanan ASTM test standartları	18
Çizelge 3.4. Performance ABS filament ile üretilen çekme testi numune ölçüleri	27
Çizelge 3.5. CF0 ABS filament ile üretilen çekme testi numune ölçüleri.....	28
Çizelge 3.6. Performance ABS filament ile üretilen basma testi numune ölçüleri	30
Çizelge 3.7. CF0 ABS filament ile üretilen basma testi numune ölçüleri	30
Çizelge 3.8. Performance ABS filament ile üretilen eğilme testi numune ölçüleri.....	32
Çizelge 3.9. CF0 ABS filament ile üretilen eğilme testi numune ölçüleri	32
Çizelge 3.10. Mekanik analizde kullanılacak diğer malzeme özellikleri	36
Çizelge 4.1. Performance ABS ile üretilen numunelerin çekme testi sonuçları.....	41
Çizelge 4.2. CF0 ABS ile üretilen numunelerin çekme testi sonuçları	43
Çizelge 4.3. Performance ABS ile üretilen numunelerin basma testi sonuçları	46
Çizelge 4.4. CF0 ABS ile üretilen numunelerin basma testi sonuçları.....	47
Çizelge 4.5. Performance ABS ile üretilen numunelerin eğilme testi sonuçları	51
Çizelge 4.6. CF0 ile üretilen numunelerin eğilme testi sonuçları.....	52
Çizelge 4.7. Performance ABS çekme testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri	55
Çizelge 4.8. Performance ABS çekme testi numunelerinin mekanik analiz sonuçları.....	56
Çizelge 4.9. CF0 ABS çekme testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri	57
Çizelge 4.10. CF0 ABS çekme testi numunesinin mekanik analiz sonucu	58
Çizelge 4.11. Performance ABS basma testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri.....	59
Çizelge 4.12. Performance ABS basma testi numunesinin mekanik analiz sonucu	59
Çizelge 4.13. CF0 ABS basma testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri	60
Çizelge 4.14. CF0 ABS basma testi numunesinin mekanik analiz sonucu	61
Çizelge 4.15. Performance ABS eğilme testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri.....	62
Çizelge 4.16. Performance ABS eğilme testi numunesinin mekanik analiz sonucu	63
Çizelge 4.17. CF0 ABS eğilme testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri	65
Çizelge 4.18. CF0 ABS eğilme testi numunesinin mekanik analiz sonucu.....	66

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Geleceğin teknolojisi olarak görülen 3 boyutlu (3B) yazıcılar, hayal edilen bir parçayı bilgisayar ortamında modellenmesiyle somut nesnelere dönüştüren makinelerdir. 3B baskı teknolojisi ilk olarak 1984 yılında Charless Hull tarafından geliştirilmiştir. 5-10 yıl içerisinde 3B baskı teknolojisi üzerine yatırımlar yapılarak farklı baskı teknolojileri geliştirilmiştir. 1988 yılında seçici lazer sinterleme (SLS) ve eriyik yığma yöntemi (FDM) teknolojileri bulunmuş. 2007 yılına gelindiğinde Reprap ismi ile açık kaynak kodlu yazıcıların teknoloji dünyasına girmesiyle 3B baskı teknolojisi günlük hayatımıza kullanılmaya başlanmıştır (Kruth ve ark., 1998).

Geleneksel üretim yöntemleri dışında, eklemeli imalat yöntemlerinden olan 3B yazıcılar kullanılarak üretilen termoplastik polimerler son yıllarda önem kazanmıştır. Üretimde 3B yazıcıların tercih edilmesinin başlıca sebepleri; bilgisayar destekli olarak, kolay, hızlı ve ekonomik üretim yapılabilmesidir (Kruth ve ark., 1998). Dünya da en çok tercih edilen baskı teknolojilerinden birisi olan eriyik biriktirme yöntemi (Fused Deposition Modeling-FDM) termoplastik filamentlerin, uygun viskozite sıcaklığına ısıtılıp, nozuldan geçirilmesiyle üst üste katmanların oluşarak, son kullanıma hazır nesnelerin üretilmesi prensibine dayanmaktadır. FDM teknolojisinde Akrlonitril bütadien stiren (ABS) ve polilaktik asit (PLA) yaygın kullanılan termoplastik polimer filamentlerdir. . Bununla birlikte günümüzde, termoplastik filamentler içerisine farklı türlerde ve oranlarda takviyeler ilave edilerek kompozit filamentler üretilmekte ve piyasada satılmaktadır. FDM teknolojiyle üretimde, geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan kalıp malzemelerinin bulunmaması, doğrudan son kullanıma hazır parçaların üretilmesi, 3B yazıcıyla üretimin popülerliğini artıran en önemli nedenlerdendir.

FDM teknolojisinde kullanılan termoplastik polimer filamentlerin düşük mekanik özelliklere sahip olması 3B baskı teknolojisinde elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin önemini artırmıştır. Şahin (2000)'e göre kompozit malzemeler, aynı ya da farklı gruptaki iki veya daha fazla malzemenin en iyi özelliklerini, makro düzeyde birleştirerek yeni ve tek bir malzemede toplanması ile oluşturulan malzemelerdir. Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler pek çok mühendislik uygulamasında yapı elemanı olarak tercih edilmektedir. Bunun sebebi kompozit malzemeler kendilerini oluşturan malzemelerin özelliklerini taşımaları yanı sıra; hafiflik, yüksek mukavemet, korozyon dayanımı, yüksek ısıl dayanım, yüksek kimyasal direnç, kalıplama kolaylığı, titreşim

sönümlenme, tasarım esnekliği, akustik iletkenlik gibi avantajları sağlar (Demirel, 2007). Takviye elemanı olarak kullanılan karbon fiberler hafif, yüksek dayanım ağırlık oranına sahip olması, ince, uygulaması hızlı, korozyona dayanıklı ve uzun ömürlü malzeme olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. ABS ve PLA termoplastik malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için karbon elyaf, cam elyaf, kevlar gibi takviye elemanları ile takviye edildiği önceki çalışmalarda anlaşılmaktadır. Buna rağmen, FDM teknolojisiyle üretilen takviyeli polimer kompozitlerin, geleneksel yöntemler ile üretilen takviyeli polimer kompozitlere göre daha düşük mukavemet sergilemeleri 3B baskı teknolojisinin yaygınlaşmasını engelleyen etkenlerden birisidir. Bu engel aşıldığında düşük maliyetli, kolay, dayanıklı, takviyeli polimer kompozit yapıların üretilmesi mümkün olacaktır.

Bu çalışmada; FDM teknolojisiyle çalışan 3B yazıcıyla; 1,75 mm çapında, takviyesiz ve ağırlıkça %12 karbon fiber takviyeli ABS filament kullanılarak, %100 doluluk oranında, 0,1 mm katman yüksekliğinde numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. FDM teknolojisiyle üretilen numunelerin mekanik performansları çekme, basma ve eğilme deneyleri ile belirlenmiştir. Deney sonuçları kullanılarak ANSYS Workbench programında von Mises'a göre maksimum gerilmeleri ve şekil değiştirme enerjisi numerik olarak analiz edilmiştir. Numunelerin mekanik davranışları incelenmiş ve sonuçlar numerik olarak doğrulanmıştır. DeneySEL ve numerik sonuçlar arasındaki sapmalar, en aza indirmek üzere tasarım ve modelleme de uygun parametreler seçilmiştir.

BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Üç boyutlu yazdırma, dijital ortamda hazırlanan 3B tasarımları, 3B katı nesneler üretme sürecidir. Bu işlemleri gerçekleştiren makineler üç boyutlu yazıcı olarak adlandırılır. 3B yazıcı teknolojileri katmanları üst üste yığma tekniği ile çalışmaktadır. Fakat bu katmanları oluşturma yöntemleri farklılık gösterebilir. Bu yöntemlerden en yaygın olarak bilineni termoplastik malzemelerin eritilerek katı nesneler oluşturan eriyik biriktirme yöntemidir (Kruth ve ark., 1998). Eriyik biriktirme yönteminde, petrolden elde edilen, ağırlıkça hafif ve sert bir malzeme olan ABS ile nişasta esaslı, nispeten daha düşük dayanımlı, sağlıklı ve medikal uygulamalarda tercih edilen PLA yaygın kullanılan malzemelerdir. Günümüzde Eriyik biriktirme yöntemi başta uzay (Williams ve ark., 2010), otomotiv (Vilaro ve ark., 2008), mimari (Kolarevic, 2001) ve eğitim (Flowers, 2000) gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Eren, 2017).

3B yazıcı teknolojileri, tasarımda aşamasındaki yeni bir ürünün geliştirme sürecinde meydana gelebilecek problemlerin önceden görülmesi ve problemlerin çözüm sürecini hızlandırmak için önem taşımaktadır. Tasarım aşamasında olan ürünün seri üretime geçmeden önce prototiplerinin hazırlanması ve gerekli testlerden geçmesi gerekmektedir. Geleneksel yöntemlerle prototip hazırlama süreci maliyet ve zaman alıcı faaliyetleri kapsamaktadır. Oysa üç boyutlu yazıcılar sayesinde istenilen prototipler saat içerisinde üretilmektedir (Çelik ve Çetinkaya, 2016).

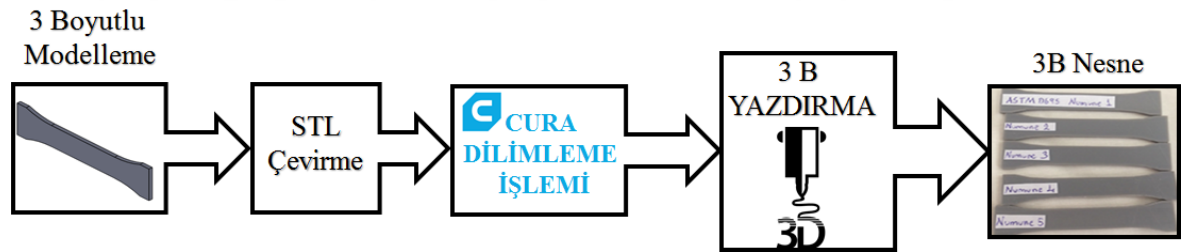
Bu çalışmada; Performance ABS ve CF0 ABS filamentler kullanılarak FDM teknolojiyle çalışan 3B yazıcıyla uygun mekanik test numuneleri üretilmiştir. Üretim sürecinde numuneler, SolidWorks programında 3B modellenmiş ve Cura yazılım dilimleme programıyla baskıya hazır hale getirilmiştir. Üretim sürecinde meydana gelecek olumsuz etkilerin önüne geçmek için 3B yazıcıda iyileştirmeler yapılmıştır. Numunelere ASTM standartlarına uygun çekme, basma, eğilme deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları ANSYS Workbench programına tanımlanmış ve numerik analizler uygulanmıştır. Deneysel ve numerik sonuçlar karşılaştırılarak, karbon fiberin ABS filamentin mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

2.1. Eriyik Biriktirme Yöntemi

Birçok farklı eklemeli imalat yöntemleri arasında; polimer filamentin yarı eriyik halde biriktirildiği FDM (Dudek, 2013), foto-polimer reçinenin katılaştırıldığı tarayarak ışıkla

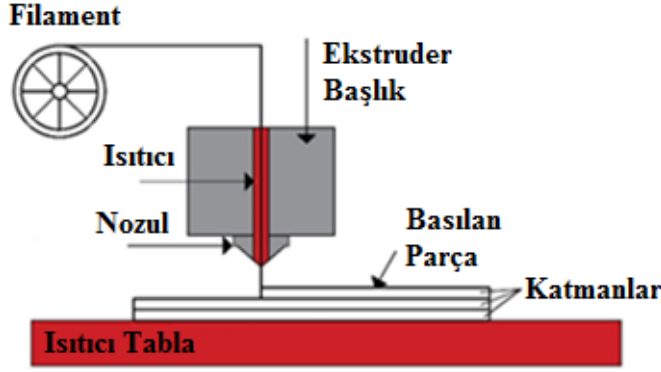
kürleme (SLA) (Cooke ve ark., 2002), metal tozlarının sinterlendiği seçici lazer sinterleme (SLS) (Kruth ve ark., 2003), ve kağıt/plastik/metal tabakaların bağlandığı tabaka yapıştırırmalı imalat (LOM) (Park ve ark.,2000) bulunmaktadır. Bunlardan mühendislik plastik malzemeleri kullanan en düşük maliyetli, minimum atık ve çok malzeme çeşidi içeren FDM'dir (Kai ve ark., 2000). Bu teknolojinin bilimsel temeli yüksek viskoziteli termoplastik malzemelerin bir nozuldan ekstrüzyonuna dayanır. Geleneksel polimer ekstrüzyonuna benzer şekilde polimer filament ısıtılmış ekstrüzyon nozulundan kontrollü olarak geçirilip yarı katı hale getirilir ve ekstrüzyon kafasının sabit hızda hareketiyle üniform çizgisel yollar halinde aynı formunu koruyarak katılaşır. Bu çizgisel yollarının yüzeyleri arasında ekstrüzyon kafasında yüklenen artık ısı enerjisinin aktivasyonu ile yan yana ve üst üste yapışma gerçekleşir ve katmanlar halinde sürekli biriktirilerek 3B geometri elde edilir. Katman kalınlıkları, arzu edilen geometrik hassasiyet ve ekstruder nozul çapına göre belirlenir (Sezer ve ark.,2017).

Genellikle, FDM'nin ilk adımı CAD yazılımı kullanarak bir model oluşturmaktır. Daha sonra bu model sık kullanılan Stereolitografi (STL) formatına aktarılır. Daha sonra, model 2B çizgi oluşturmak için dilimlere bölünür. Son adım olarak, biriktirme yolu oluşturulur ve bu veriler FDM 3B yazıcısına gönderilir (Başara, 2017).



Şekil 2.1. FDM teknolojisi üretim süreci

Dört aşamalı hazırlıktan sonra baskı işlemi başlar. Bu süreçte, FDM 3B yazıcı parça yörüngesini oluşturur. Bu yörüngeler dayanarak, kafa XY düzleminde hareket eder ve eriyen malzemeyi istenen geometriye göre akıtır. Filament başlangıçta katıdır. Yuvarlanarak ekstrüzyon kafasına taşınır, yarı sıvı haldeki duruma ulaşana kadar ısıtılır. Nozul boyunca, istenen nesnenin birinci tabakasını oluşturmak için platform üzerine akıtılır. Bu tabaka hemen hemen katılaşır. İkinci katmanı oluşturmak için ekstrüzyon Z ekseninde yukarı doğru hareket ettirilir. Daha sonra katman üzerine katman eklenerek istenen nesne elde edilir. FDM teknolojisi çalışma prensibi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



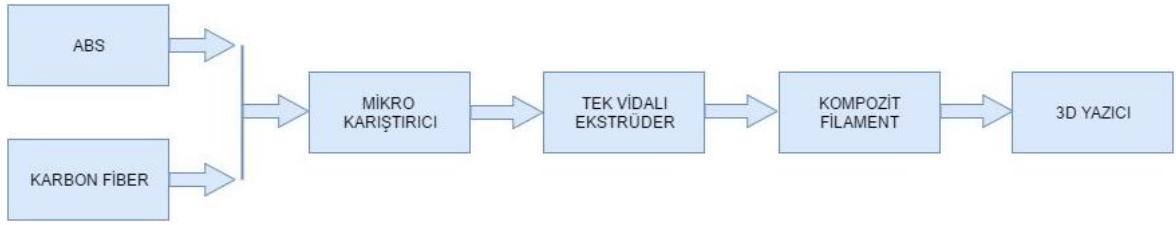
Şekil 2.2. FDM teknolojisi çalışma prensibi

Termoplastik filamentler, imalat sektöründe kullanılan malzemelere göre düşük mekanik özelliklerine sahiptir. 3B yazıcılarda kullanılan filamentlerin fiberler ile takviye edilerek mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Fiberlerin hafif, yüksek dayanım ağırlık oranına sahip olması, ince, uygulaması hızlı, korozyona dayanıklı ve uzun ömürlü malzeme olmasından dolayı takviye elemanı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2. Karbon Fiberin Mekanik Özelliklere Etkisi

FDM teknolojisiyle son kullanıma hazır parçaların doğrudan imalatına ilgi giderek artmaktadır. Üretilen nesnelerin düşük mekanik özelliklere sahip olması yaygın kullanımını önleyen temel bir problemdir. Dolayısıyla bu teknoloji için, mevcut malzemelerde yük taşıyan bileşenlere ait mekanik gereksinimleri karşılayacak düzeyde bir iyileştirilme yapılması gerekmektedir. FDM teknolojisinde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri elyaf fiberler takviye edilerek iyileştirilmektedir.

Sezer ve Ark. (2017) kompozit filament elde etmek için ABS granül (Performance ABS, Oo-Kuma) matris malzeme, kısa karbon fiber (6 mm epoksi bazlı 1101, DowAksa) takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Bir çift vidalı mikro karıştırıcı (DSM Xplore) malzemeleri homojen olarak karıştırmak için kullanmıştır. Çift vidalı karıştırıcı, ABS matris malzemesini yarı eriyik hale getirip, karbon fiber takviye malzemesini matris içinde homojen karıştırarak ekstrüzyon sağlamıştır. Ayrıca elde edilen homojen karışımı FDM 3B yazıcıda kullanılmak üzere uygun boyuttaki filament haline getirmek için tek vidalı masaüstü filament ekstrüder (Wellzoom C) kullanılmıştır. Kompozit filament, birçok farklı malzemeyi kullanarak üretim yapabilen bir FDM 3B yazıcıda (3Dison Pro) kullanarak kompozit ASTM 412 A standartlarına sahip çekme testi numuneleri üretilmiştir. Kompozit filament üretiminde kullanılan metot Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Kompozit filament üretiminde kullanılan metot (Sezer ve ark., 2017)

Sezer ve Ark. (2017) FDM teknolojisinde yaygın olarak kullanılan ABS filamentin matris içerisine farklı boyutlarda kısa karbon fiber takviye ederek mekanik özelliklerini iyileştirmiş, FDM 3B baskı makinesinde parça üretiminde kullanmışlardır. Bir başka çalışmada ise Ning ve ark. (2015) %10-40 fiber içeren ve 0.2-0.4 mm uzunluğunda kısa fiberler ile takviye edilmiş ABS matrisi işlenebilirlik, mikroyapı ve mekanik performans açısından araştırmış ve geleneksel basınç kalıplama (CM) ile üretilmiş bir kompozit ile karşılaştırmışlardır. 3B yazıcı ile üretilen numunelerin çekme dayanımı %115 ve modülü ise %700 dolayında artışı gözlemlenmiştir. 3B yazıcı, baskı doğrultusunda yüksek fiber yönelimine (%91.5 civarı) sahip numune üretmiştir. Buna karşın basınç kalıplama ile üretilen numune çok düşük fiber yönelimine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Mikroyapısal mekanik özellikler ilişkilendirildiğinde ise 3B yazıcı ile üretilen numune basınç kalıplama ile üretilene göre büyük gözenekli yapıya sahiptir. Her ikisi de benzer çekme mukavemeti ve modülü göstermiştir (Tekinalp ve ark.,2015).

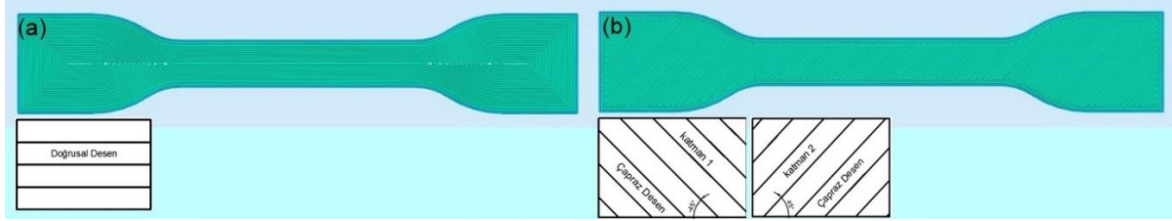
Golub ve ark., (2016) Üç adet 3B baskıda kullanılan ABS, ABS plus ve karbon fiber takviyeli polimer (ağırlıkça %20), plastik malzemeler mühendislik eğitimindeki gerilim uygulamaları için incelemiştir. Çekme testi kullanılarak, malzemelerin gerilme gerinim eğrileri ölçülmüş. Young modülü, mukavemeti ve malzemelerin kırılma dayanıklılığı, gerilim gerinim eğrisinden hesaplanmıştır. Sonuç olarak, karbon fiber takviyeli polimerin en yüksek sertliğe ve Young modülüne ve ABS plus polimerin en yüksek mukavemet ve kırılma dayanıklılığı ile en güçlü mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

2.3. Baskı Parametrelerinin Mekanik Özelliklere etkisi

FDM teknolojisinde; kullanılan termoplastik malzemelerin dışında, baskı parametreleri mekanik davranışlarını doğrudan etkileyen en önemli faktördür. Eklemeli sistemlerin modellenmesi, baskı süreci boyunca malzemenin sürekli gelişen geometrisi ve karmaşık viskoelastik yapısı nedeniyle karmaşıktır (Rao ve Rai, 2016). Birçok çalışma, termoplastik parçalarda mekanik özellikleri geliştirmek için baskı parametrelerini (ör. baskı

hızı, yapı sıcaklığı, vb.) değiştirmeye odaklanmıştır (Nidagundi, 2015).

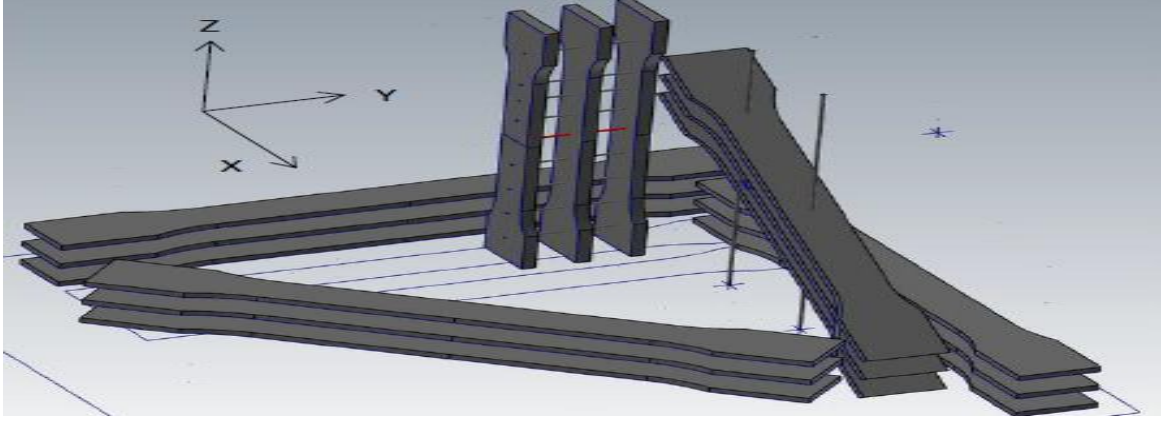
Sezer ve Ark. (2017) kısa karbon fiber takviyesinin ABS'nin mekanik özelliklerini, elastisite modülü, süneklik, tokluk gibi önemli ölçüde etkilediğini deneysel olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca kompozit numune anizotropik özellik gösterdiğinden yazdırma deseninin (Şekil 2.4) kompozit malzemenin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilediği görülmüştür.



Şekil 2.4. Çekme testi numunesinin önizlemesi, a) Doğrusal [0,90] b) çapraz [-45,45] (Sezer ve ark., 2017)

Sonuç olarak; ticari ABS ile kıyaslandığında karbon fiber etkisi doğrusal yazdırmada [0, 90] çekme dayanımını ve elastisite modülünü önemli derecede artırdığını tokluk ve sünekliğin azaldığını, çapraz yazdırmada [-45, 45] ise ticari ABS ile kıyaslandığında karbon fiber etkisi elastisite modülünü artırırken, çekme dayanımı tokluk ve sünekliği azalmaktadır. Ticari ABS için yazdırma deseni mekanik özellikleri kayda değer bir biçimde etkilememesine rağmen karbon fiber katkılı kompozit numunelerde mekanik özellikler yazdırma deseni ile önemli derecede değişmektedir. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler anizotropik özellik göstermektedirler. Gözlemlenen diğer sonuçlar ise; karbon fiber takviye oranı arttıkça kompozit malzemelerin kırılma, gevrek davranışları artmaktadır. Karbon miktarı arttıkça homojen karıştırma işleminde fiberlerin fiziksel kırılması artmış ve kompozit filament içerisindeki ortalama fiber uzunluğu azalmıştır (Sezer ve ark., 2017).

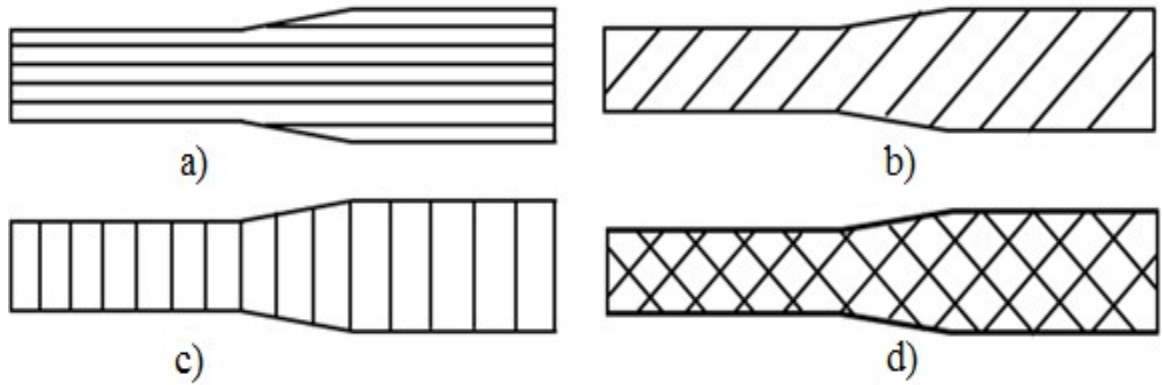
Hernandez ve ark. (2016) Stratasys tarafından üretilen ABS P430 kullanılarak, X, Y ve Z eksenine göre 5 farklı yönde yazdırılmak üzere (Şekil 2.5) CAD yazılımında ASTM standart mekanik testlerine (gerilme, basma ve eğilme) uygun olarak numune üretmiştir.



Şekil 2.5. Numunelerin farklı yönelimleri (Hernandez ve ark., 2016)

Çekme test sonuçlarına göre; Şekil 2.5’de gösterilen ABS P430 kullanılarak yazdırılan numuneler, XY düzleminde 90 derecelik yönelimle, % 6.92 oranında en yüksek uzamaya ve en düşük gerilmeye sahip olduğu, Z düzleminde 90 derece açıyla, 737 MPa ile en yüksek gerilmeye ve düşük uzamaya sahiptir. Yazdırma deseninin malzemenin basma ve eğilme özelliklerini daha çok etkilediği gözlemlenmiştir. XY düzleminde 0 derecelik yönelimle, en yüksek eğilme mukavemeti 59.3 MPa ve 122 MPa olarak ölçülmüştür. XY düzleminde 0 derece yönelime, en yüksek basma modülü 854 MPa iken, en yüksek eğilme mukavemeti XY düzleminde 45 derecelik yönelimde olduğu sonucuna varılmıştır (Hernandez ve ark., 2016).

FDM baskı teknolojisinde, dolgu yoğunluğu ve filament oryantasyonu malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerdendir. FDM baskı teknolojisinde yaygın olarak kullanılan dört adet filament oryantasyonu (Şekil 2.6) bulunmaktadır (Başara, 2016).



Şekil 2.6. Filament oryantasyonu: a) Boylamasına (0°), b) Enine (90°), c) Çapraz (45°), d) Çapraz çizgili ($+45^\circ/-45^\circ$) (Başara, 2016)

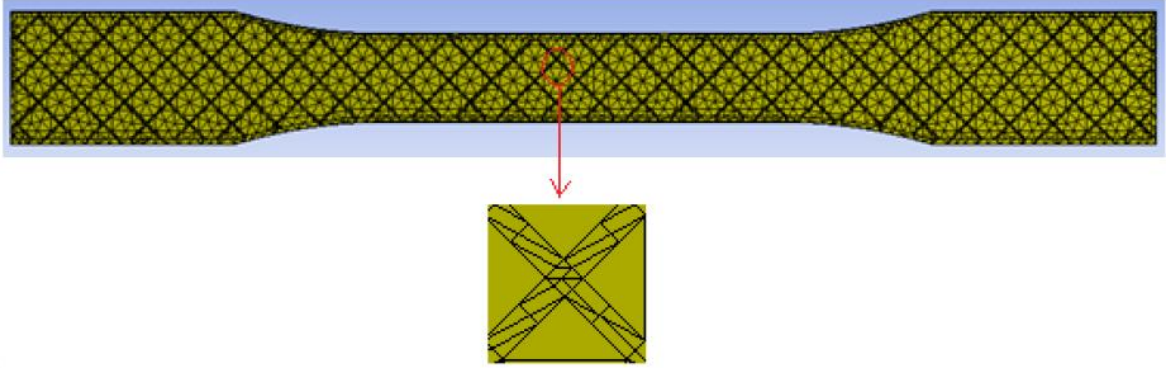
Son kullanıma hazır malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen diğer önemli parametre ise dolgu yoğunluğudur. PLA filament kullanılarak % 20 -% 100 dolgu yoğunluğu aralığında basılan numunelerin mekanik sonuçları karşılaştırıldığında, % 100 dolgu yoğunluğuna sahip numunelerin % 20 dolgu yoğunluğundaki numunelere göre yaklaşık 4 kat daha yüksek dayanıma sahip olduğunu gözlemlenmiştir (Başara,2017). Baskı parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini inceleyen bir diğer çalışma ise; FDM teknolojiyle çalışan 3B yazıcıyla, PLA filament kullanılarak üretilen numunelerinin kafes yapısı, tabaka kalınlığı ve yazdırma hızının mekanik performansına etkisini incelemiştir (Chacon ve ark., 2016).

2.4. ANSYS Workbench Numerik Analiz

Malzeme özelliklerini belirlemek için her zaman laboratuvarlarda deneyler yapmak mümkün değildir. Malzemenin ANSYS gibi sık kullanılan bir sonlu eleman analizi yazılımında uygun modellenmesi yapılarak, mekanik özelliklerinin belirlenebileceğini göstermek önemlidir. Deneysel sonuçları sayısal modelleme ile doğrulamak önemlidir. Her iki yöntem birbirini tamamlayıcıdır (Başara, 2017).

ANSYS'te akma dayanımının noktasındaki davranışı modellemek için iki yöntem bulunmaktadır. Bunlardan biri, akma dayanımı ve plastik bölgedeki gerilmesinin eğimini temsil eden bir teğet modülün tanımlandığı ikili doğrusal izotropik sertleştirmedir. Diğer yöntem ise, malzeme özelliği, plastik bölgede doğrusal olmayan davranış gösteren malzemeler için kullanılan çoklu doğrusal izotropik sertleştirmedir.

Başara (2017) PLA filament kullanarak 3B yazıcı ile toplamda 10 adet basma testi için numune üretmiştir. Ürettiği %20 dolguya sahip yedi adet numune için ikili doğrusal izotropik sertleştirme yöntemi kullanmış. % 20'lik dolguya sahip numunelerin üçü için, plastik bölgedeki davranışın doğrusal olmadığı gözlemlenmiş ve çoklu doğrusal izotropik sertleşme yöntemini kullanmıştır. Sayısal analiz için ANSYS Workbench 17 statik yapısal modül kullanmıştır. Çizimler ANSYS Dizayn kullanılarak hazırlanmıştır. ANSYS programına PLA'nın malzeme özellikleri tanımlanarak, mekanik test sonuçları sayısal olarak analiz edilmiştir. Poisson oranı (ν) mekanik özelliklere önemli bir etkisi bulunmadığını (Liu ve ark., 2014) vurgulamıştır. Uygun malzeme özellikleri ANSYS programına tanımlandıktan sonra mesh uygulanmıştır. Sayısal hesaplamaların doğruluğu mesh kalitesine (Şekil 2.7) bağlıdır; Bu nedenle, mesh, sayısal analizin önemli kısımlarından birisidir. Mekanik testler sayısal olarak modellenmiştir.



Şekil 2.7. Çekme testi numunesi ve yakın mesh görünümü (Başara, 2017)

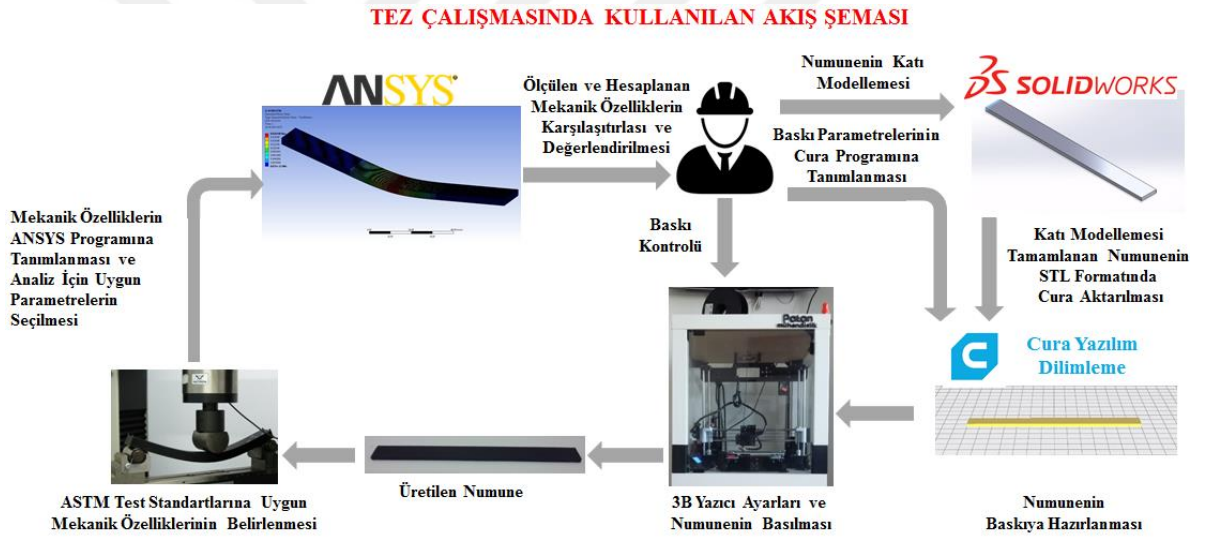
Sayısal analiz sonuçları %10'luk farkla deney sonuçları ile benzerlik göstermiştir. Çekme testleri, testlerdeki kopma noktası referans alınarak modellenmiş ve sayısal analiz uygulanmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar benzerlik göstermiştir. Bununla birlikte, numunelerin gerçek şekil değiştirme değerinden yaklaşık %20 daha büyük şekil değiştirme gözlemlenmiştir. Bu sonuç, sayısal analizlerde kullanılan modelin gerçek numunelerden daha güçlü olduğunu göstermiştir. Numunenin dolgu yoğunluğundaki küçük bir değişiklik bile farklı mekanik özelliklere neden olabilmektedir. Çekme testi sonuçlarında yapılan gözlemler bu iddiayı desteklemiştir.

3B yazıcılarda, karbon fiber takviyeli ABS'lerin sağlamış olduğu mekanik özelliklerden faydalanarak geleneksel imalat yöntemlerine göre nispeten daha kolay ve ucuz olarak son kullanıma hazır parçaların üretilmesi önemli bir süreçtir. Karbon fiberin takviye malzemeleri olarak kullanılması ve üretilen son kullanıma hazır nesnenin mekanik özelliklerinin geliştirilebilir olması araştırmacı ve bilim adamlarının çalışmalarına yön vermektedir.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında; ANET A8 3B yazıcıyla, ABS filament ve ağırlıkça %12 karbon fiber takviyeli ABS filament kullanılarak ASTM standartlarına uygun mekanik test numuneleri üretilmiştir. Numunelerin çekme, basma, eğilme kuvvetleri etkisinde meydana gelen mekanik davranışları ölçülmüştür. Mekanik özellikler ANSYS Workbench malzeme kütüphanesine tanımlanmıştır. Numunelere uygulanan mekanik testler, ANSYS Workbench programında uygun parametreler seçilerek modellenmiştir. Numunelerin mekanik özellikleri Von Mises'a göre maksimum gerilme ve şekil değiştirme enerjisi yöntemlerine göre hesaplamalı olarak belirlenmiştir. Hesaplanan ve ölçülen mekanik özellikler mukayese edilerek değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Numunelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için uygulanan akış şeması

Bu bölümde, FDM 3B yazıcı ile üretilen numunelerinin üretim sürecinden, mekanik testlerden ve ANSYS Workbench ile yapılan mekanik analizlerden bahsedilmiştir. Ek olarak üretimde kullanılan ANET A8 3B yazıcıya uygulanan iyileştirmelere değinilmiştir.

3.1. Filamentler

Geleneksel bir termoplastik malzeme olan ABS'nin, kolay bir şekilde elyaf takviye edilerek, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesiyle, takviyeli kompozit filamentlerin 3B yazıcıda kullanımı artırmıştır. Ayrıca malzeme özellikleri iyileştirilen elyaf takviyeli polimer ABS'lerin FDM teknolojisiyle çalışan yazıcılarda üretime uygun olması, bilgisayar

destekli olarak, son kullanıma hazır nesnelerin kolay ve düşük maliyetle üretimi, FDM teknolojisinin hızla yayılmasını başlıca sebepleri arasında sayabiliriz.

Bu çalışmada kullanılan ABS ve kırılmış karbon fiber takviyeli filamentler, OOKUMA firması tarafından üretilen ve satışı gerçekleştirilen, 1,75 mm çapında takviyesiz Performance ABS filament ile ağırlıkça %12 oranında karbon fiber takviyeli CF0 ABS filament kullanılmıştır. OO-KUMA firmasından temin edilen filamentlerin teknik verileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

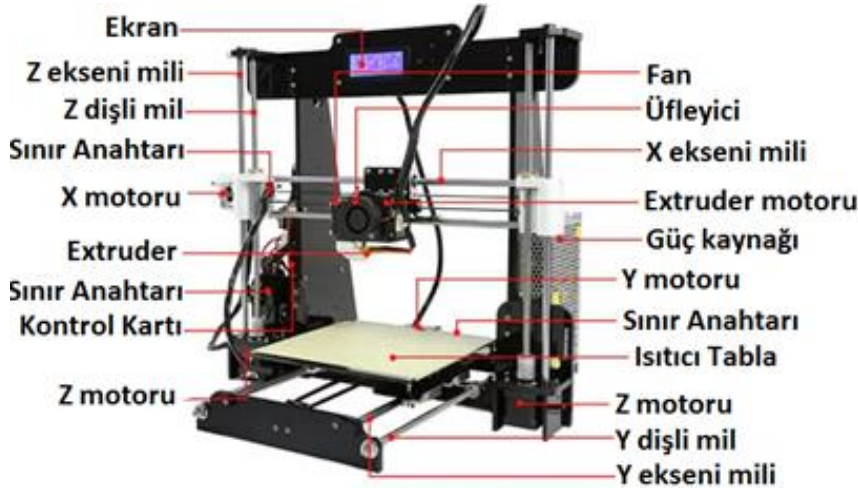
Çizelge 3.1. Numune üretiminde kullanılan ABS filamentlerin teknik verileri ve önerilen üretim parametreleri

Malzeme	Performance ABS	Karbon fiber takviyeli CF0 ABS
Renk	Gri	Siyah
Karbon Fiber Oranı (%)	0	12
Filament çapı (mm)	1.75	1.75
Nozul sıcaklığı (°C)	240-265	230-245
Tabla sıcaklığı (°C)	105-115	85-105
Yoğunluk (g/cm ³)	1,05	1,08
Çekme dayanımı(MPa)	43	52
Kopma uzaması (%)	40	2-3
Eğilme dayanımı (MPa)	70	66
Eğilme modülü (MPa)	2,100	7,100

Tez çalışmasında, OOKUMA firmasının ürettiği filamentlerin malzeme teknik veri formları bulunduğu için tercih edilmiştir. Malzemelerin teknik veri formları EK 1. ve EK 2.’de bulunmaktadır.

3.2. ANET A8 3B Yazıcı ve Uygulanan İyileştirmeler

Bu çalışmada, kurulumunun ve kullanımının kolay olmasından dolayı FDM teknolojiyle çalışan ANET A8 3B (Şekil 3.2) yazıcı kullanılmıştır. ANET A8 3B yazıcının mekanik ve elektronik parçalarının iyileştirilmesiyle daha kaliteli baskıların elde edilebilmesi de diğer tercih sebebi olmuştur.



Şekil 3.2. ANET A8 3B yazıcı mekanik ve elektronik parçaları (Koslow T, 2010)

ABS filamentlerin takviye oranına göre 200-265 °C sıcaklığında uygun viskoziteyi yakalaması ve 65-115 °C sıcaklığında ısıtıcı tablaya yapışmasına bağlı olarak baskısı alınan malzeme içerisinde sıcaklık farkları oluşmakta ve artık gerilmeler meydana gelmektedir. Bu artık gerilmelere bağlı olarak malzemede kalıcı deformasyonlar görülmektedir. Baskı sürecinde 3B yazıcının zemine sabitlenmemesinden dolayı uzun süreli baskılarda eksen kaymaları (Şekil 3.3) meydana gelmiştir. 3B yazıcının iyileştirilmesinde kullanılacak, sehpa ayağında meydana gelen eksen kayması ve ekran panelinde meydana gelen plastik çekmeler gözlemlenmiştir.



Şekil 3.3. Uzun süreli baskılarda meydana gelen hatalar

Eksen kaymaları ve plastik çekmelerin önüne geçmek için aşağıda belirtilen iyileştirmeler yapılmıştır.

- 3B yazıcı 4 mm cam kullanılarak yapılan kabin ile muhafaza altına alınmıştır.
- Kullanım kolaylığı açısından ekran ve kontrol paneli kabin içerisine yerleştirilmiştir.
- Filamentin, ekstruder tarafından rahat çekilebilmesi için kabin üstüne yerleştirilmiştir.
- Kullanım kolaylığı açısından SD kart girişi kabin dışına montaj edilmiştir.
- 3B yazıcının şasesi üzerinde bulunan güç kaynağı kabin dışına taşınmıştır.
- Alt katman ve üst katman arasında meydana gelen sıcaklık farkından dolayı temroplastik malzemelerde ısıl çarpılmalar meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak malzeme ısıtıcı tablaya yapışmadığı gözlemlenmiş, 2.5 mm kalınlığında 22x22 ebatlarında cam ısıtıcı tabla üzerine yerleştirilmiş ısıl çarpılmaların önüne geçilmiştir.
- Baskı alınan ortamın sıcaklığını dengede tutmak için 12V - 12.5x12.5 cm ebatlarında fan kabine yerleştirilmiş, elektronik termostat ile kontrolü sağlanmıştır.
- 3B yazıcının şasesini sabitlemek gerekli destek parçaları, 3B yazıcı ile basılmış, baskı sırasında meydana gelen titreşimler minimuma indirilmiştir.
- Baskı sırasında nozuldan daha düzgün akış sağlanabilmesi için; 0.4 mm pirinç nozul yerine 0.4 mm çelik nozul kullanılarak baskı alınmıştır.
- Kabin görselini düzenlemek için, extruder butonu, kablo gizleyici, kamera tutucu, alet tutucu gibi parçalar basılarak kabin görseli düzenlenmiştir.

Yukarıda bahsi geçen, mekanik ve elektronik iyileştirmeler sonucunda, numune baskısında kullanılan 3B yazıcının son hali Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Numune baskısında kullanılan ANET A8 3B yazıcı

3.3. Numunelerin Üretim Prosesi

FDM teknolojisiyle üretilen son kullanıma hazır parçaların mekanik özelliklerini üretimde kullanılan filamentler belirlemektedir. Üretilecek parçaya uygun olarak doğru filamentin seçimi, parçanın kullanım yerine göre daha uzun ömürlü ve daha düşük maliyetle üretilmesini sağlayacaktır. Örnek olarak herhangi bir statik veya dinamik yük etkisinde olmayan parçaların %0-20 dolgu yoğunluğunda baskısının tamamlanması, daha az maliyetli ve düşük mekanik özelliklere sahip son kullanıma malzemelerin elde edilmesine sebep olacaktır.

Bu çalışmada, ilk olarak üretimde kullanılan karbon fiber takviyeli ve takviyesiz ABS filamentler OOKUMA firmasından temin edilmiştir. Filament seçiminde sonra mekanik testlere tabi tutulacak numunelerin SolidWorks programıyla standartlarA uygun olarak katı modellemesi tamamlanmıştır. Solidworks programında STL formatında kaydedilen numune tasarımları, 3B yazıcının üretim ara yüzü olan ve üretim parametrelerinin kontrolüne izin veren Ultimaker Cura 3.6 yazılım dilimleme programına aktarılmıştır. Karbon fiber takviyeli ve takviyesiz ABS filamentlerin için yazdırma ve baskı tablası sıcaklıkları farklılık göstermektedir. Numunelerin üretiminde her iki filament için 0.4 mm çelik nozul kullanılmıştır.

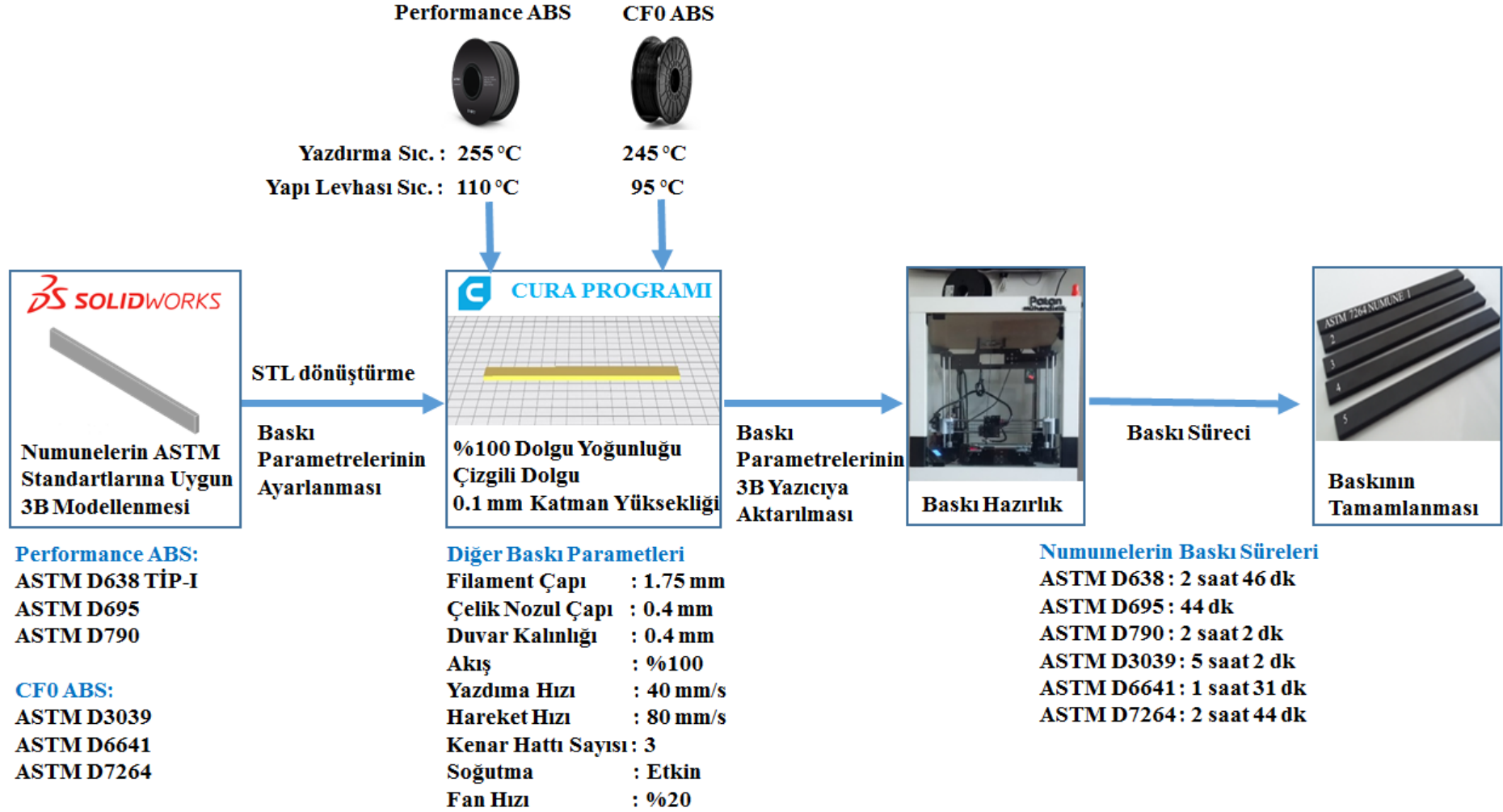
Çizelge 3.2. Numune üretimde kullanılan baskı parametreleri

Parametreler	CF0 ABS	Performance ABS
Yazdırma sıcaklığı (°C)	245	255
Tabla sıcaklığı (°C)	95	110
Katman kalınlığı (mm)	0,1	0,1
Dolgu yoğunluğu (%)	100	100
Duvar kalınlığı (mm)	0,4	0,4
Nozul akışı (%)	100	100
Hareket hızı (m/s)	40	40
Yazdırma hızı (m/s)	80	80

Çizelge 3.2 de gösterilen baskı parametreleri kullanılmış ve üretime hazır hale getirilen numuneler 3B yazıcıya aktarılmıştır. Üretim süresinin tamamlanmasında sonra numuneler mekanik testlere tabi tutulmuştur. Statik kuvvet etkisinde meydana gelen çekme, basma ve eğilme dayanımları, şekil değiştirmeleri ve elastisite modülleri ölçülmüştür. Mekanik testler ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiş ve ANSYS Workbench malzeme

kütüphanesine tanımlanmıştır. Numunelere uygulanan mekanik testlerin parametreleri ANSYS programında modellenmiş Von Mises ve şekilde değiştirme enerjisi analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Elde edilen mekanik test sonuçları ve analiz sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Yukarıda bahsi geçen FDM teknolojisi üretim sürecinin (Şekil 3.5) her adımı ilgili başlıklar altında açıklanmıştır.





Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan FDM teknolojisi üretim süreci

3.4. Numunelerin Modellenmesi ve Üretimi

Numuneler ASTM mekanik test standartlarına uygun olarak SolidWorks programı çevrimiçi modelleme programıyla modellenmiştir. Numunelere uygulanacak ASTM test standartları Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Numunelere uygulanan ASTM test standartları

Mekanik test	Performance ABS	CF0 ABS
Çekme testi	ASTM D638-I	ASTM D3039
Basma testi	ASTM D695	ASTM D6641
Eğilme testi	ASTM D790	ASTM D7264

Çizelge 3.3’de verilen standartlar; Performance ABS filament kullanılarak üretilen numuneler için ASTM D638, ASTM D695, ASTM D790, CF0 karbon fiber takviyeli ABS filament kullanılarak üretilen numuneler için ASTM D3039, ASTM D6641, ASTM D7264 standartları kullanılarak numuneler modellenmiştir. Baskı parametreleri, malzeme teknik veri formunda belirtilen üretim sıcaklıklarına uygun olarak, Cura dilimleme yazılımı programıyla dilimlenmiş ve üretime hazır hale getirilmiştir. Performance ABS filament ile üretilen numunelerin Cura programı baskı parametreleri Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

Kalite

Katman Yüksekliği: 0.1 mm

Kovan

Duvar Kalınlığı: 0.4 mm

Üst/Alt Kalınlık: 0.8 mm

Dolgu

Dolgu Yoğunluğu: 100 %

Dolgu Şekli: Çizgiler

Malzeme

Yazdırma Sıcaklığı: 255 °C

Yapı Levhası Sıcaklığı: 110 °C

Çap: 1.75 mm

Akış: 100 %

Geri Çekmeyi Etkinleştir: ☒

Geri Çekme Mesafesi: 6.5 mm

Geri Çekme Hızı: 25 mm/s

Geri Çekme Sırasındaki Çekim Hızı: 25 mm/s

Geri Çekme Sırasındaki Astar Hızı: 25 mm/s

Minimum Geri Çekme Hareketi: 0.8 mm

Hız

Yazdırma Hızı: 40 mm/s

Hareket Hızı: 80 mm/s

İlk Katman Hızı: 20.0 mm/s

Hareket

Soğuma

Yazdırma Soğutmayı Etkinleştir: ☒

Fan Hızı: 20 %

Olağan Fan Hızı: 20 %

Maksimum Fan Hızı: 20 %

Destek

Oluşturma Desteği: ☐

Yapı Levhası Yapıştırması

Yapı Levhası Türü: Kenar

Kenar Hatlı Sayısı: 3

Şekil 3.6. Performance ABS filament ile üretilen numunelerin baskı parametreleri

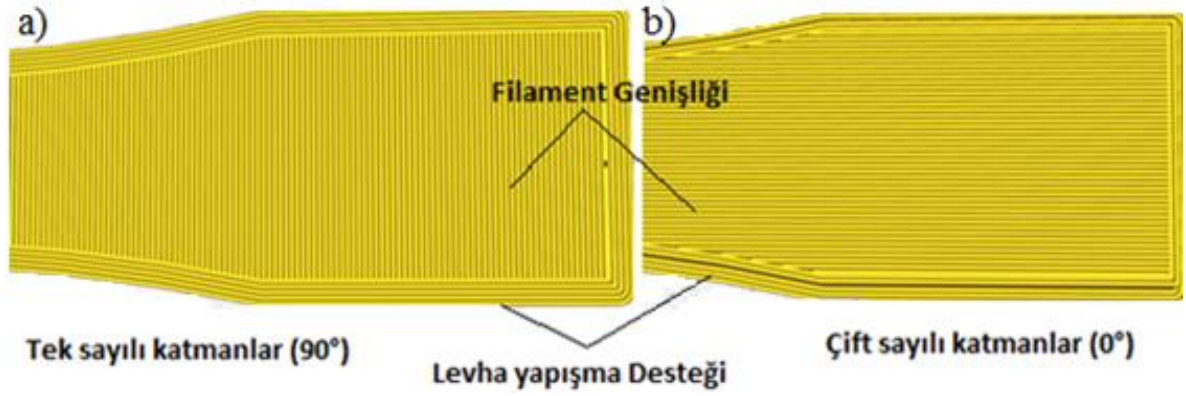
CF0 Karbon fiber takviyeli ABS filament kullanılarak üretilen numunelerin Cura baskı parametreleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Section	Parameter	Value	Unit
Kalite	Katman Yüksekliği	0.1	mm
	Duvar Kalınlığı	0.4	mm
	Üst/Alt Kalınlık	0.8	mm
Kovan	Dolgu Yoğunluğu	100	%
	Dolgu Şekli	Çizgiler	
Malzeme	Yazdırma Sıcaklığı	245	°C
	Yapı Levhası Sıcaklığı	95	°C
	Çap	1.75	mm
	Akış	100	%
	Geri Çekmeyi Etkinleştir	☒	
	Geri Çekme Mesafesi	6.5	mm
	Geri Çekme Hızı	25	mm/s
	Geri Çekme Sırasındaki Çekim Hızı	25	mm/s
	Geri Çekme Sırasındaki Astar Hızı	25	mm/s
	Minimum Geri Çekme Hareketi	0.8	mm
Hız	Yazdırma Hızı	40	mm/s
	Hareket Hızı	80	mm/s
	İlk Katman Hızı	20.0	mm/s
Soğuma	Yazdırma Soğutmayı Etkinleştir	☒	
	Fan Hızı	20	%
	Olağan Fan Hızı	20	%
Destek	Maksimum Fan Hızı	20	%
	Oluşturma Desteği	☐	
Yapı Levhası Yapıştırması	Yapı Levhası Türü	Kenar	
	Kenar Hatlı Sayısı	3	

Şekil 3.7. CF0 ABS filament ile üretilen numunelerin baskı parametreleri

Performance ve CF0 ABS filamentlerin baskı parametreleri karşılaştırıldığında yazdırma ve yapı levhası sıcaklığı farklılık göstermektedir. Bu sıcaklık farkı, ağırlıkça farklı oranlarda takviye edilmiş ABS'nin malzeme özelliklerinden meydana gelmektedir. Bu çalışmada, Cura dilimleme programına tanımlanan baskı sıcaklıkları nozuldan uygun akış elde edilene kadar deneme yanılma yöntemiyle elde edilmiştir.

Numunelerin; tek sayılı katmanları (birinci, üçüncü, beşinci, yedinci, ...) 90° oryantasyon açısıyla (Şekil 3.8a), çift sayılı katmanları (ikinci, dördüncü, altıncı,...) 0° oryantasyon açısıyla (Şekil 3.8b) boylamasına baskısı tamamlanmıştır. Basılan numunelerin katman sayısı, standartlarda istenilen numune kalınlıklarına göre farklılık göstermiştir.

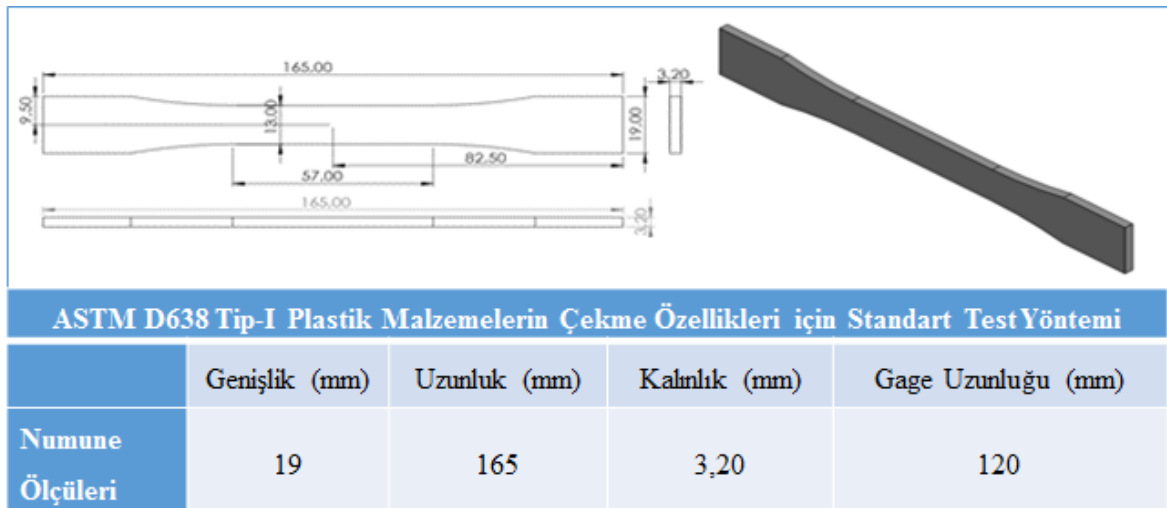


Şekil 3.8. Kullanılan dolgu şekli a) Tek sayılı katmanlar b) Çift sayılı katmanlar şekli

Numunelerin ölçüleri ASTM standartlarında belirtilen ölçüler referans alınmıştır. Numunelerin kalınlıkları, referans değerleri %10 geçmesi durumunda baskılar hatalı kabul edilmiş ve değerlendirilmemiştir.

3.4.1. Çekme Numunelerinin Modellenmesi ve Üretimi

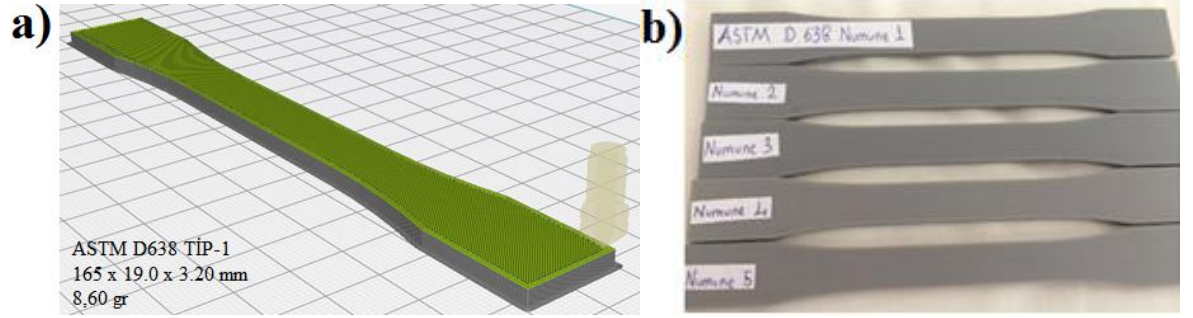
Performance ABS filament ile üretilen çekme numuneleri için ASTM D638 Tip-I plastik malzemeler için çekme testi numune ölçüleri kullanılmıştır. Baskısı alınacak numunelerin ölçüleri ve 3B modeli (Şekil 3.9) verilmiştir.



Şekil 3.9. ASTM D638 Tip-I çekme testi numune ölçüleri ve 3B modeli (ASTM D638, 2014)

SolidWorks çevrimiçi yazılımında modellenen çekme testi numunesi, STL formatında Cura dilimleme programına aktarılmıştır. Şekil 3.6'da belirtilen parametreler kullanılarak, 0,1 mm katman yüksekliğinde, %100 dolgu yoğunluğunda, 255 °C yazdırma ve 110 °C tabla

sıcaklığında 5 adet çekme testi numunelerinin baskısı tamamlanmıştır. Çekme testi numunesinin dilimlenmiş haldeki görüntüsü (Şekil 3.10a) ve baskı sonrasında üretilen numuneler (Şekil 3.10b) Şekil 3.10 'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Performance ABS çekme testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler

Baskısı tamamlanan Performance ABS çekme testi numuneleri (Şekil 3.10b) 8,60 gr/adet ağırlığındadır. Baskı süresi 2 saat 46 dakika olarak hesaplanmıştır.

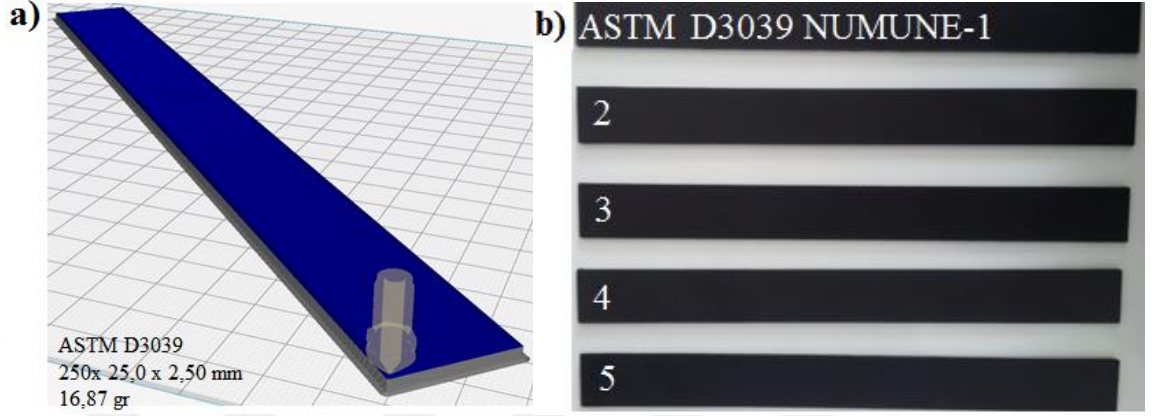
CF0 karbon fiber takviyeli ABS filament kullanılarak Şekil 3.11’de gösterilen ASTM D3039 standardına uygun numune ölçüleri ve 3B modeli verilmiştir.



Şekil 3.11. ASTM D3039 çekme testi numune ölçüleri ve 3B modeli (ASTM D3039/D3039M, 2017)

SolidWorks çevrimiçi yazılımında, Şekil 3.11’e uygun olarak modellenen çekme numunesi, STL formatında Cura yazılım dilimleme programına aktarılmıştır. Şekil 3.7’de belirtilen parametreler kullanılarak, 0,1 mm katman yüksekliğinde, %100 dolgu

yoğunluğunda, 245 °C yazdırma ve 95 °C tabla sıcaklığında 5 adet çekme testi numunelerinin baskısı tamamlanmıştır. Çekme testi numunelerinin dilimlenmiş haldeki görüntüsü (Şekil 3.12a) ve baskı sonrasında üretilen numuneler (Şekil 3.12b) Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



Şekil 3.12. CF0 ABS çekme testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler

3B yazıcı maksimum 220x220 mm yazdırma alanına sahip olduğundan. Numune, baskı tablasında 45° döndürülerek yerleştirilmiştir. Şekil 3.16b’de gösterilen numunelerin baskısında 16,87 gr/adet CF0 karbon fiber takviyeli ABS filament kullanılarak 5 saat 2 dakikada baskısı tamamlanmıştır.

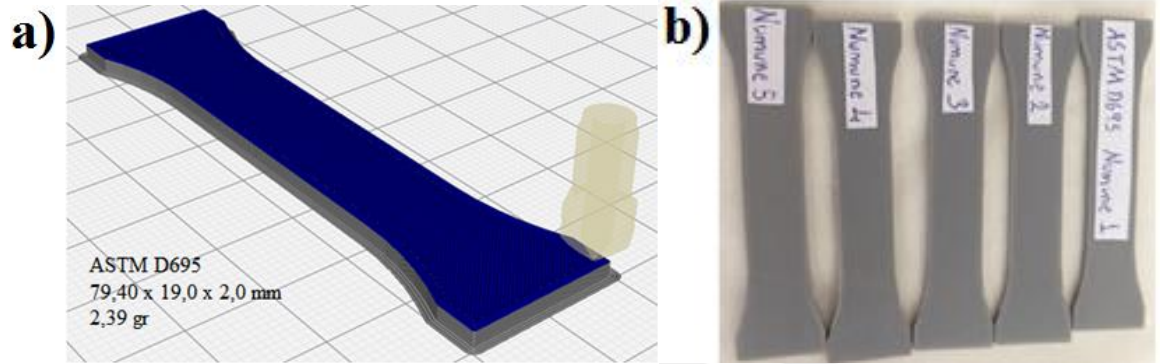
3.4.2. Basma Numunelerinin Modellenmesi ve Üretimi

Şekil 3.13’de Performance ABS filament kullanılarak üretilen ASTM D695 plastik malzemeler için basma testi standardına uygun numune ölçüleri ve 3B modeli verilmiştir.



Şekil 3.13. ASTM D695 basma testi numune ölçüleri ve 3B modeli (ASTM D695, 2015)

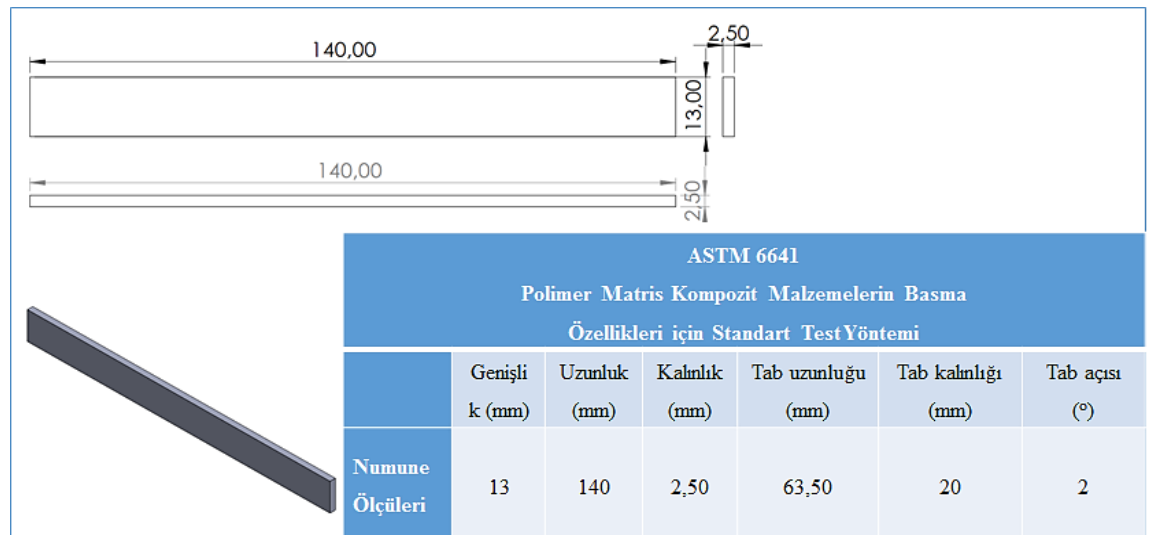
Şekil 3.13'e uygun olarak modellenen basma numunesi; Şekil 3.6'da belirtilen parametreler kullanılarak, 0,1 mm katman yüksekliğinde, %100 dolgu yoğunluğunda, 255 °C yazdırma ve 110 °C tabla sıcaklığında 5 adet basma testi numunelerinin baskısı tamamlanmıştır. Basma testi numunesinin dilimlenmiş haldeki görüntüsü (Şekil 3.14a) ve üretilen numuneler (Şekil 3.14b) Şekil 3.14'de gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Performance ABS basma testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler

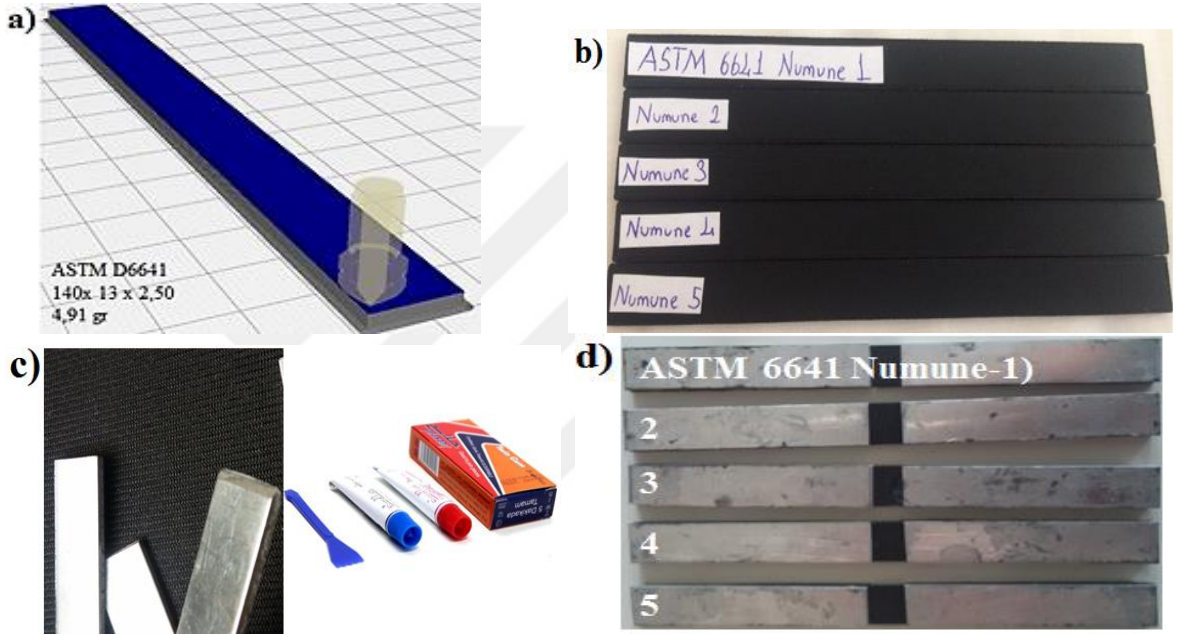
Baskısı tamamlanan Performance ABS basma testi numuneleri (Şekil 3.12b) 2,39 gr/adet ağırlığındadır. Baskı süresi 44 dakika olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.15'de CF0 ABS filament kullanılarak üretilen ASTM D6641 Polimer matris kompozit malzemeler için basma test standardına uygun numune ölçüleri ve 3B modeli verilmiştir.



Şekil 3.15. ASTM D6641 basma testi numune ölçüleri ve 3B modeli (ASTM D6641/D6641M, 2016)

Şekil 3.15'e uygun olarak modellenen basma numunesi, Şekil 3.7'de belirtilen parametreler kullanılarak, 0,1 mm katman yüksekliğinde, %100 dolgu yoğunluğunda, 245 °C yazdırma ve 95 °C tabla sıcaklığında 5 adet basma testi numunelerinin baskısı tamamlanmıştır. Basma testi numunesinin dilimlenmiş haldeki Şekil 3.16a'da gösterilmektedir. Üretilen basma testi numunelerine (Şekil 3.16b), Baytaş epoxy twin plastik ve çelik yapıştırıcı kullanılarak, 63,50 mm uzunluğunda, 2 mm kalınlığında ve 2° tab açısına sahip alüminyum tablalar (Şekil 3.16c) yapıştırılmıştır. Şekil 3.16d'de basma testi numunesinin son hali gösterilmiştir.

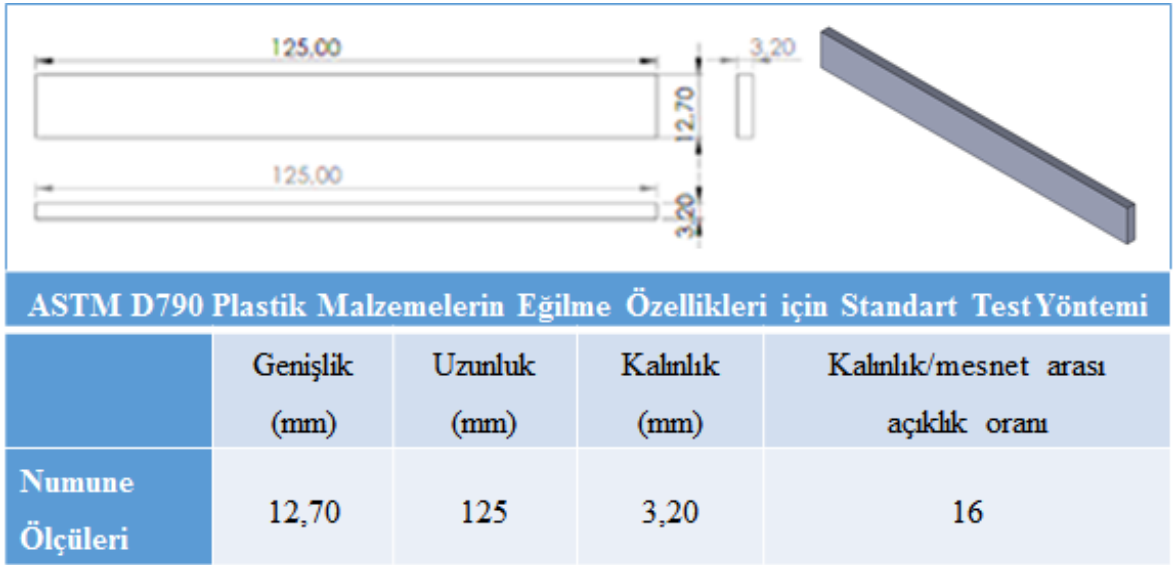


Şekil 3.16. ASTM D6641 basma testi numunesi a) Dilimlenmiş görüntüsü, b) CF0 ABS ile üretilen basma testi numuneleri, c) alüminyum tab ve yapıştırıcı, d) Numune son hali

Baskısı tamamlanan CF0 ABS basma testi numuneleri (Şekil 3.16b) 4,91 gr/adet ağırlığındadır. Baskı süresi 1 saat 31 dakika olarak hesaplanmıştır.

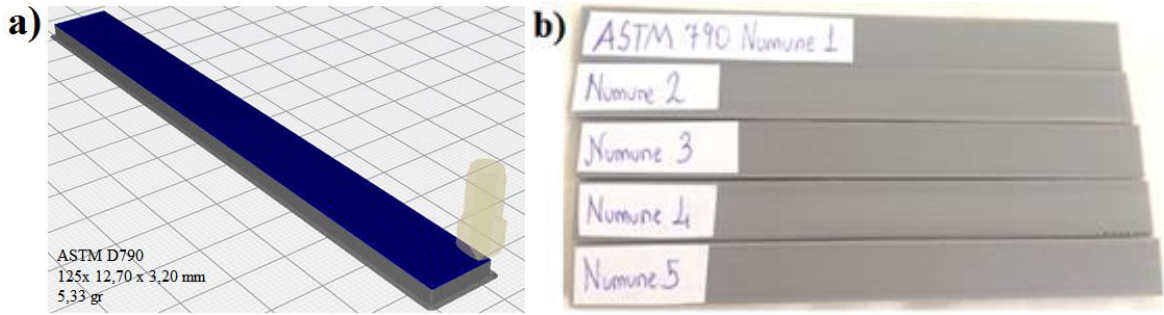
3.4.3. Eğilme Numunelerinin Modellenmesi ve Üretimi

Şekil 3.17'de Performance ABS filament kullanılarak üretilen ASTM D790 plastik malzemeler için eğilme testi standardına uygun numune ölçüleri ve 3B modeli verilmiştir.



Şekil 3.17. ASTM D790 eğilme testi numune ölçüleri ve 3B modeli (ASTM D790, 2010)

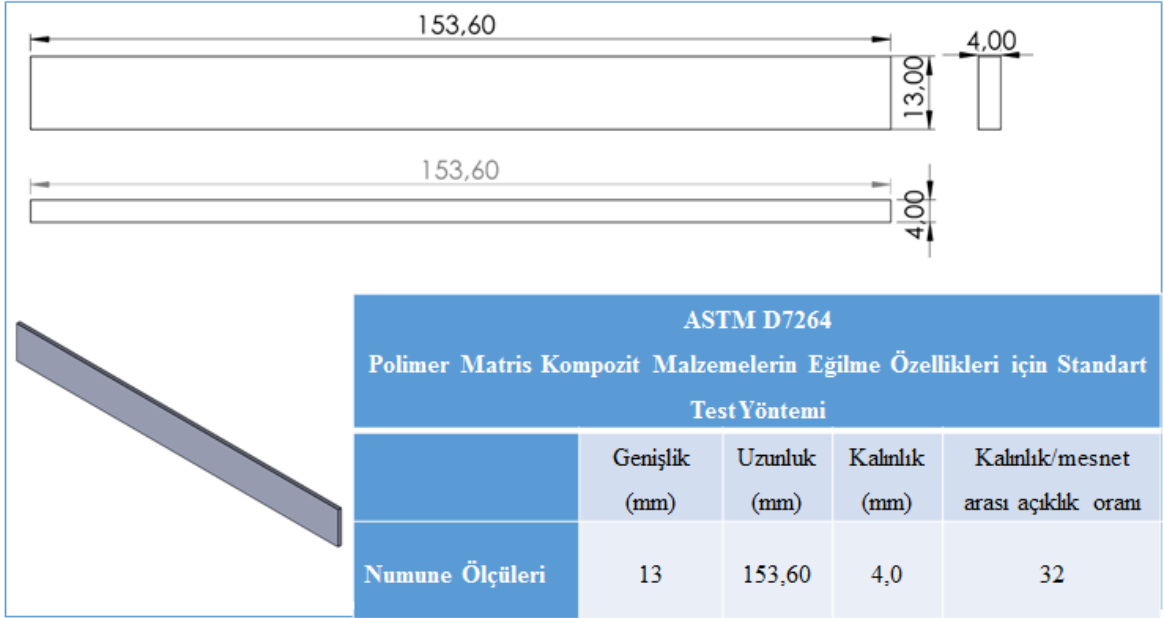
Şekil 3.17'e uygun olarak modellenen eğilme numunesi; Şekil 3.6'da belirtilen parametreler kullanılarak, 0,1 mm katman yüksekliğinde, %100 dolgu yoğunluğunda, 255 °C yazdırma ve 110 °C tabla sıcaklığında 5 adet eğilme testi numunelerinin baskısı tamamlanmıştır. Eğilme testi numunelerinin dilimlenmiş haldeki görüntüsü (Şekil 3.18a) ve üretilen numuneler (Şekil 3.18b) Şekil 3.18'de gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Performance ABS eğilme testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler

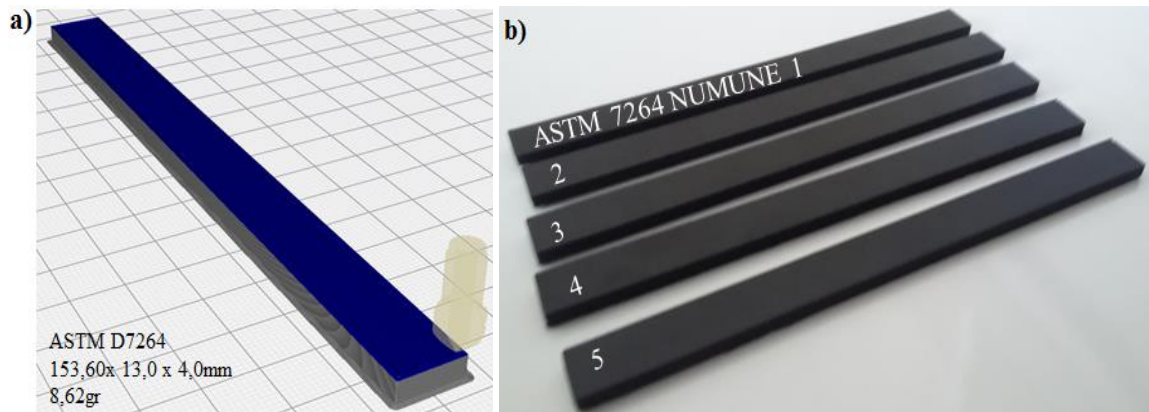
Baskısı tamamlanan Performance ABS eğilme testi numuneleri (Şekil 3.18b) 5,33 gr/adet ağırlığındadır. Baskı süresi 2 saat 2 dakika olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.19'da CF0 ABS filament kullanılarak üretilen ASTM D7264 Polimer matris kompozit malzemeler için eğilme test standardına uygun numune ölçüleri ve 3B modeli verilmiştir.



Şekil 3.19. ASTM D7264 eğilme testi numune ölçüleri ve 3B modeli (ASTM D7264/D7264M, 2007)

Şekil 3.19'a uygun olarak modellenen eğilme numunesi; Şekil 3.7'de belirtilen parametreler kullanılarak, 0,1 mm katman yüksekliğinde, %100 dolgu yoğunluğunda, 245 °C yazdırma ve 95 °C tabla sıcaklığında 5 adet eğilme testi numunelerinin baskısı tamamlanmıştır. Eğilme testi numunesinin dilimlenmiş haldeki görüntüsü (Şekil 3.20a) ve üretilen numuneler (Şekil 3.20b) Şekil 3.20'de gösterilmektedir



Şekil 3.20. CF0 ABS eğilme testi numunelerinin a) Dilimlenmiş görüntüsü b) Baskısı tamamlanan numuneler

Baskısı tamamlanan CF0 ABS eğilme testi numuneleri (Şekil 3.20b) 8,62 gr/adet ağırlığındadır. Baskı süresi 2 saat 44 dakika olarak hesaplanmıştır.

3.5.Mekanik Karakterizasyon

FDM ANET A8 3B yazıcıyla, takviyesiz Performance ABS ve karbon fiber takviyeli CF0 ABS filamentlerin kullanılmasıyla üretilen numunelerin Çizelge 3.3’de belirtilen ASTM standartlarına uygun olarak çekme, basma, eğilme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan karakterizasyon tekniği anlatılmıştır.

3.5.1. Çekme Testleri

Basılan çekme numunelerine, ASTM D638 Tip I / ASTM D3039 standartına uygun çekme deneyleri uygulanmıştır. Üretilen numunelerin; çekme dayanımı ($\sigma_{\text{çmax}}$), elastisite modülü ($E_{\text{ç}}$), yüzde şekil değişimleri ($\epsilon_{\text{ç}}$) ve uygulanan maksimum yük ($F_{\text{çmax}}$) belirlenmiştir. Performance ABS ve Karbon fiber takviyeli CF0 ABS filamentler kullanılarak üretilen beşer adet numunelerin çekme dayanımlarının, yüzde şekil değişimlerinin ve çekme elastisite modülünün hesaplanmasında kullanılmak üzere numune uzunluklarının ve kesit alanı büyüklüklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kesit alanının belirlenmesi için ise numunenin genişlik ve kalınlıklarının ölçülmesi gerekmektedir. Şekil 3.10b ve 3.12b’de gösterilen çekme testi numunelerinin genişlik, kalınlık, kesit alanı ve boyu Çizelge 3.4 ve 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Performance ABS filament ile üretilen çekme testi numune ölçüleri

Numune No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kesit alanı(mm ²)	Boy (mm)
1	3,11	19	41	165,15
2	3,17	19	42	165,00
3	3,15	19	41	165,20
4	3,28	19	42	165,17
5	3,29	19	42	165,12

Performance ABS filament kullanılarak üretilen ASTM D638 Tip-I plastik malzemeler için çekme testi standardına uygun 5.00 mm/dk yükleme hızıyla çekme testi uygulanmıştır.

Çizelge 3.5. CF0 ABS filament ile üretilen çekme testi numune ölçüleri

Numune No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Boy (mm)
1	2,60	25	64,9	250,10
2	2,58	25	64,5	250,05
3	2,53	25	63,2	250,10
4	2,58	25	64,4	250,10
5	2,60	25	65,0	250,20

CF0 ABS filament kullanılarak üretilen ASTM3039 polimer matrisli kompozit malzemeler için çekme testi standartına uygun numunelere 5.00 mm/dk yükleme hızıyla çekme testi uygulanmıştır. Uygulanan kuvvetin %15-20 arasında düşmeye başladığı anda çekme testleri sonlandırılmıştır. Yükleme hızlarına bağlı olarak meydana gelen kuvvet-uzama grafikleri kayıt altına alınmaktadır. Her bir numuneye uygulanan maksimum yük $F_{çmax}$ ve yer değiştirme δ değerleri anlık olarak kayıt edilmiş ve numunelerin çekme dayanımları σ_{max} Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\sigma_{çmax} = \frac{F_{çmax}}{A_{ç}} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de $F_{çmax}$ numunenin taşıyabildiği maksimum yükü (N), $A_{ç}$ ortalama kesit alanını (mm²), ve $\sigma_{çmax}$ ise numunede oluşan maksimum gerilmeyi (MPa) göstermektedir. Numunelerin çekme dayanımları; boyca uzamanın numunelerin ilk boyuna bölünmesiyle yüzde şekil değişikliği ve Hooke Kanunu formülünden birim uzama başına gerilme değerinin ölçülmesiyle de çekme elastisite modülü hesaplanmıştır. Şekil 4.2 ve 4.4’de Ağırlıkça % 0-12 oranlarında karbon fiber takviyeli ABS filament kullanılarak üretilen numunelere uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen dayanım- şekil değiştirme grafiği, ölçülen çekme elastisite modülü (MPa), yüzde şekil değiştirme (mm/mm), akma dayanımı (MPa) ve maksimum yükleme (N) gösterilmiştir. Üretilen numunelerin çekme testleri yapılırken eş zamanlı olarak bilgisayar yardımıyla oluşturulan kuvvet – yüzde şekil değiştirme grafiklerinde y eksenindeki maksimum kuvvet kullanılarak hesaplanan çekme dayanımının yanında x eksenindeki uzama değerleri kullanılarak numunelerin yüzde şekil değişiklikleri hesaplanmaktadır. Buna göre kopma anındaki son boydan standart olan ilk boy çıkartılıp ilk boya oranlandığında elde edilen sonuç numunenin yüzde şekil değişikliğini vermektedir. Farklı baskı parametrelerinde, takviyeli ve takviyesiz ABS filamentler

kullanılarak üretilen beş adet çekme numuneleri için YŞD'leri hesaplanmıştır. Numuneye uygulanan yük nedeniyle yer değiştirmeye bağlı olarak numunenin şekil değişimi Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır

$$\epsilon_{\zeta max} = \delta_{\zeta max} / L_{\zeta g} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2'te $\epsilon_{\zeta max}$ en büyük yer değiştirme noktasında oluşan şekil değiştirme miktarını (mm/mm), $\delta_{\zeta max}$ en büyük yer değişimini (mm), $L_{\zeta g}$ ekstansometre gage uzunluğu (mm) göstermektedir.

Çekme elastisite modülü ise Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{\zeta} = \Delta\sigma / \Delta\epsilon \quad (3.3)$$

Çekme elastisite modülünün hesaplanmasında kullanılan Denklem 3.3'de E_{ζ} çekme elastisite modülünü (MPa), $\Delta\sigma$ iki gerilme noktası arasındaki farkı (MPa), $\Delta\epsilon$ ise seçilen gerilme değerlerine bağlı olarak şekil değiştirme miktarları arasındaki farkı göstermektedir.

3.5.2. Basma Testleri

Bu çalışmada üretilen basma numunelerine, ASTM D695 / ASTM D6641 standartına uygun basma deneyleri uygulanmıştır. Üretilen numunelerin; basma dayanımı (σ_{bmax}), basma elastisite modülü (E_b), yüzde şekil değiştirme (ϵ_b) ve uygulanan maksimum yük (F_{bmax}) belirlenmiştir. Performance ABS ve Karbon fiber takviyeli CF0 ABS filamentler kullanılarak Şekil 3.14b ve 3.16d'de gösterilen üretimi tamamlanan beşer adet basma testi numunelerinin genişlik, kalınlık, kesit alanı ve boyu Çizelge 3.6 ve 3.7'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Performance ABS filament ile üretilen basma testi numune ölçüleri

Numune No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Boy (mm)
1	1,98	12,80	25,34	79,56
2	1,98	12,90	25,54	79,58
3	1,98	12,83	25,40	79,45
4	2,13	12,43	26,47	79,42
5	1,95	12,81	24,97	79,48

Performance ABS filament kullanılarak üretilen ASTM D695 plastik malzemeler için basma testi standartına uygun 5.00 mm/dk yükleme hızıyla basma testi uygulanmıştır.

Çizelge 3.7. CF0 ABS filament ile üretilen basma testi numune ölçüleri

Numune No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kesit alanı (mm ²)	Boy (mm)
1	2,49	12,840	31,972	124,90
2	2,50	12,850	32,125	125,00
3	2,40	12,930	31,032	125,10
4	2,40	12,900	30,960	125,20
5	2,43	12,900	31,347	125,00

CF0 ABS filament kullanılarak üretilen ASTM6641 polimer matrisli kompozit malzemeler için basma testi standartına uygun numunelere 1.30 mm/dk yükleme hızıyla basma testi uygulanmıştır. Uygulanan kuvvetin %15-20 arasında düşmeye başladığı anda basma testleri sonlandırılmıştır. Şekil 4.7 ve 4.9’de takviyeli ve takviyesiz ABS filamentler kullanılarak üretilen numunelere uygulanan basma testleri sonucunda elde edilen gerilme – yüzde şekil değiştirme grafiği, basma dayanımı (MPa), basma elastisite modülü (MPa) yüzde şekil değiştirme (mm/mm) (MPa), ve maksimum yükleme (N) gösterilmiştir.

Her bir numuneye uygulanan maksimum yük F_{bmax} ve yer değiştirme δ değerleri kayıt edilmiş ve numunelerin basma dayanımları σ_{bmax} Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{bmax} = F_{bmax} / A_b \quad (3.4)$$

Denklem 3.4’de F_{bmax} numunenin taşıyabildiği maksimum yükü (N), A_b ortalama kesit alanını (mm²), ve σ_{bmax} ise numunede oluşan maksimum gerilmeyi (MPa) göstermektedir.

Numuneye uygulanan yük nedeniyle yer değiştirmeye bağlı olarak numunenin şekil değişimi Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\epsilon_{bmax} = \delta_{bmax} / L_{bg} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'te ϵ_{bmax} en büyük yer değiştirme noktasında oluşan şekil değiştirme miktarını (mm/mm), δ_{bmax} en büyük yer değişimini (mm), L_{bg} ekstansometre gage uzunluğu (mm) göstermektedir.

Basma elastisite modülü Denklem 3.6 kullanılarak hesaplanmıştır

$$E_b = \Delta\sigma / \Delta\epsilon \quad (3.6)$$

Basma elastisite modülünün hesaplanmasında kullanılan Denklem 3.6'de E_b basma elastisite modülünü (MPa), $\Delta\sigma$ iki gerilme noktası arasındaki farkı (MPa), $\Delta\epsilon$ ise seçilen gerilme değerlerine bağlı olarak şekil değiştirme miktarları arasındaki göstermektedir.

3.5.3. Eğilme Testleri

Bu çalışmada üretilen eğilme numunelerine, ASTM D790 / ASTM D7264 standardına uygun eğilme deneyleri uygulanmıştır. Üretilen numunelerin; eğilme dayanımı (σ_{emax}), eğilme elastisite modülü (E_e), yüzde şekil değişimi ($\epsilon_{e\epsilon}$) ve uygulanan maksimum yük (F_{emax}) belirlenmiştir. Performance ABS ve Karbon fiber takviyeli CF0 ABS filamentler kullanılarak Şekil 3.18b ve 3.20b'de gösterilen üretimi tamamlanan beşer adet numunelerin genişlik, kalınlık, kesit alanı ve boyu Çizelge 3.8 ve 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.8. Performance ABS filament ile üretilen eğilme testi numune ölçüleri

Numune No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Mesnet/Kalınlık Oranı	Boy (mm)
1	3,40	12,69	1/16	125,00
2	3,30	12,65	1/16	125,00
3	3,40	12,61	1/16	125,10
4	3,18	12,85	1/16	125,20
5	3,36	12,65	1/16	125,00

ASTM D790 plastik malzemeler için eğilme testi standartına uygun numunelere, üç nokta eğilme deneyi uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin kalınlık/mesnetler arası açıklık oranı 1/16 olarak alınmıştır. Eğilme deneyinde, 5 mm çapa sahip destek ve yüklememe uçları kullanılmıştır. Numunelere 1.00 mm/dk yükleme hızıyla eğilme testi uygulanmıştır.

Çizelge 3.9. CF0 ABS filament ile üretilen eğilme testi numune ölçüleri

Numune No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Mesnet/Kalınlık Oranı	Boy (mm)
1	4,10	13,00	1/32	153,60
2	4,14	12,92	1/32	153,80
3	4,00	12,98	1/32	152,82
4	4,05	12,92	1/32	153,80
5	4,09	12,93	1/32	153,60

ASTM D7264 polimer matrisli kompozit malzemeler için eğilme testi standartına uygun numunelere, dört nokta eğilme deneyi uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerin kalınlık/mesnetler arası açıklık oranı 1/32 olarak alınmıştır. Ayrıca numunelerin boyu mesnetler arası açıklığın %20 kadar daha uzundur. Eğilme deneyinde, 10 mm çapa sahip destek ve yüklememe uçları kullanılmıştır. Numunelere 1.00 mm/dk yükleme hızıyla eğilme testi uygulanmıştır. Şekil 4.12 ve 4.14’de takviyeli ve takviyesiz ABS filamentler kullanılarak üretilen numunelere uygulanan eğilme testleri sonucunda elde edilen gerilme – yüzde şekil değiştirme grafiği, basma dayanımı (MPa), basma elastisite modülü (MPa) yüzde şekil değiştirme (mm/mm) (MPa), gösterilmiştir.

Her bir numuneye uygulanan yük P ve sehim δ değerleri kayıt edilmiş ve numunelerin eğilme dayanımları σ_{emax} Denklem 3.7 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{emax} = 3P_{emax} \cdot L / 2bh^2 \quad (3.7)$$

Denklem 3.7.'te σ numunenin orta noktasında dış yüzeyde oluşan gerilmeyi (MPa), P uygulanan yükü (N), L mesnetler arası açıklığı (mm), b numunenin genişliğini (mm) ve h ise numune kalınlığını (mm) göstermektedir. Numunenin orta noktasında dış yüzeyinin şekil değişimi ise Denklem 3.8 kullanılarak hesaplanmıştır;

$$\epsilon_{emax} = 6\delta_e h / L^2 \quad (3.8)$$

Denklem 3.8.'de dış yüzeyde oluşan en büyük şekil değiştirme miktarını (mm/mm), δ orta noktadaki sehimini (mm), L mesnetler arası açıklığı (mm) ve h ise numune kalınlığını (mm) temsil etmektedir.

Eğilme elastisite modülü ise denklem 3.9 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_e = \Delta\sigma / \Delta\epsilon \quad (3.9)$$

Eğilme elastisite modülünün hesaplanmasında kullanılan denklem 3.9.'da E_e eğilme elastisite modülünü (MPa), $\Delta\sigma$ iki gerilme noktası arasındaki fark (MPa), $\Delta\epsilon$ seçilmiş iki şekil değiştirme miktarı arasındaki farktır. Deneysel sonuçlar ile elde edilen sayısal değerler grafiklere dönüştürülerek birbirleri ile kıyaslanmıştır.

3.6. Numerik Analiz

ANSYS programı bilgisayar destekli olarak analiz ve simülasyonların yapılabilirdiği bilgisayar destekli sonlu elemanlar analiz programıdır. Program mekanik analiz, yapısal analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve ısı transferi gibi farklı türde çalışmalarda kullanılmaktadır. Parça üzerine statik kuvvetlerin uygulanmasıyla meydana gelen şekil değişiklikler ve gerilme dağılımları anlık olarak görüntülenebilmektedir.

Bu çalışmada, mekanik analizler ANSYS Workbench Release 19.2 Öğrenci programında gerçekleştirilmiştir. ASTM test standartlarıyla elde edilen mekanik özellikler malzeme kütüphanesine tanımlanmıştır. Tanımlanan malzeme özelliklerine bağlı olarak mekanik test ve numunelerinin modellenmesiyle malzemeye statik analizler uygulanmıştır. Numunelerde meydana gelen gerilmelerin analizinde von Mises ve şekil değiştirme enerjisi

analiz yöntemleri kullanılarak mekanik davranışları incelenmiştir.

Von Mises gerilme hesaplama fikri ilk olarak 1904 yılında Huber Hencky tarafından önerilmiştir ancak Richard von Mises 1913 yılında bu fikri tekrar önerdiğinde daha fazla ilgi görmüştür. Her iki bilim adamı da sadece bir matematik denklemi önerirken, Hencky von Mises gerilmesi fikrini fiziksel olarak daha mantıklı bir şekilde yorumlamıştır. Maksimum von Mises gerilimi aynı zamanda maksimum bozulma enerjisi teorisi olarak da adlandırılan von Mises-Hencky teorisine dayalıdır (Korkut, 2017). Üç eksenli gerilme durumunda von Mises gerilimi asal gerilimler kullanılarak Denklem 3.10 ile ifade edilir:

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.10)$$

Malzemede iki eksenli gerilme durumunda $\sigma_3=0$ olacağından Denklem 3.10 çözümlendiğinde Denklem 3.11 elde edilir.

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (3.11)$$

Malzemelerin mekanik davranışlarının da termodinamiğin iki kanununa uygun gerçekleştiğini unutmamak gerekir. Termodinamiğin birinci kanununa göre enerji ne yoktan var edilebilir ne de yok edilebilir. Ancak; yalnızca bir formdan diğerine dönüştürülebilir. Dolayısıyla, bir parçaya bir mekanik kuvvet uygulandığında, parça üzerinde bir miktar iş yapılır. Bu enerji parça üzerinde şekil değiştirme enerjisi olarak depolanır. Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu Denklem 3.12 ile tanımlanır.

$$W = \frac{1}{2} \sigma \epsilon \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'deki bu enerji başka bir deyişle, parçanın her bir diferansiyel hacminde depolanan şekil değiştirme enerjisidir. Bu şekil değiştirme enerjisi tüm diferansiyel hacimler üzerinden toplanırsa parça üzerinde depolanan toplam şekil değiştirme enerjisini elde edebiliriz. Toplam enerjinin bir kısmı, maddenin hacmini değiştirir ve volümetrik enerji olarak bilinir. Enerjinin geri kalan kısmı malzemenin şeklini bozmak için kullanılır ve deviatorik enerji olarak bilinir.

Von Mises gerilmesi, deviatorik enerji olan bu gerilme bileşeniyle ilgilidir. Denklem 3.13 matematik ifadeyle aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon} \\
 W &= \frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma}_v + \boldsymbol{\sigma}_d) : (\boldsymbol{\varepsilon}_v + \boldsymbol{\varepsilon}_d) \\
 W &= \frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma}_v : \boldsymbol{\varepsilon}_v + \boldsymbol{\sigma}_v : \boldsymbol{\varepsilon}_d + \boldsymbol{\sigma}_d : \boldsymbol{\varepsilon}_v + \boldsymbol{\sigma}_d : \boldsymbol{\varepsilon}_d)
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Denklem 3.13 'deki matematiksel yaklaşımdaki v ve d sırasıyla volümetrik ve deviatorik bileşenleri temsil eder. Bununla birlikte, herhangi bir volumetrik ve deviatorik tensörün çarpımı her zaman sıfırdır. Böylece, şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu Denklem 3.14 ile ifade edilir:

$$W = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_v : \boldsymbol{\varepsilon}_d + \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}_d : \boldsymbol{\varepsilon}_d \tag{3.14}$$

Denklem 3.14'deki toplam enerji volümetrik ve deviatorik kısımlar olarak ayrılabilir. Temsili skaler von Mises gerilmesi vasıtasıyla deviatorik şekil değiştirme enerjisini yeniden yazdığımızda Denklem 3.15 elde edilir.

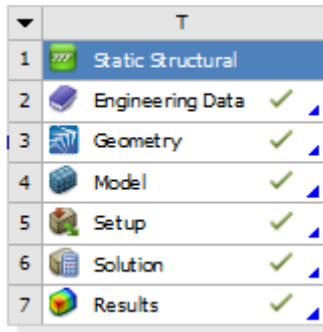
$$\boldsymbol{\varepsilon}_d = \frac{1}{2G} \boldsymbol{\sigma}_d \Rightarrow W_{dev} = \frac{1}{4G} \boldsymbol{\sigma}_d : \boldsymbol{\sigma}_d = \frac{1}{4G} \sigma_{rep}^2 \Rightarrow \sigma_{rep} = \sqrt{\boldsymbol{\sigma}_d : \boldsymbol{\sigma}_d} \tag{3.15}$$

Teorik hesaplamaların yanı sıra kompozitler için geliştirilmiş yaklaşık gerilme hesaplama yöntemleri söz konusudur. Bunlardan en çok bilineni ve en yaygın olarak kullanılanı ise sonlu elemanlar yöntemidir. Özellikle teorik hesaplamaların yapılmasının zor olduğu karmaşık parçalarda sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Bu gün için sonlu elemanlar yöntemi esas alınarak geliştirilmiş ANSYS Workbench programı ile kompozit malzemelere özel analizler de yapabilmektedir (Zor, 2019).

İzotropik malzemelerde birleşik gerilim hesaplaması için von-Mises gerilimi kullanılmaktadır. Von Mises gerilimi izotropik malzemelerin kullanımına uygun olmasına rağmen izotropik olmayan kompozit malzemeler için uygun olmamaktadır (Mallick, 2017).

Kompozitlerin mekanik davranışlarının izotropik malzemelerden daha farklı olması, yöne göre değişebilmesi, mekanik açıdan farklı yaklaşım ve kriterlerle incelenmelerini gerektirir (Zor, 2019). Üretilen deney numuneleri (çekme, basma, eğilme) tek eksenli kuvvete maruz bırakılacağından dolayı sonlu elemanlar analizinde von Mises gerilmesi ve şekil değiştirme enerjisi numerik olarak hesaplanmıştır.

Numunelerin mekanik analizinde, ANSYS Workbench programında bulunan statik analiz (Şekil 3.21) modülü kullanılmıştır. Statik analiz sonucunda elde edilen Von Mises gerilmesi ve şekilde değiştirme enerjisi analiz edilmiştir. Buna bağlı olarak ANSYS programında mekanik analiz yapılması için gerekli parametreler tanımlanmıştır.



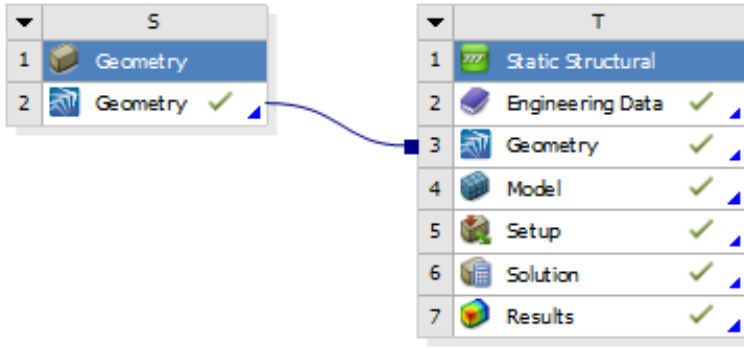
Şekil 3.21. ANSYS Workbench statik analiz sistemi

İlk olarak statik analiz uygulanacak numunelerin, çekme, basma ve eğilme testleri sonucunda elde edilen ortalama gerilme değerleri elastisite modülleri malzeme kütüphanesine tanımlanmıştır. Programa tanımlanması gereken diğer malzeme özelliklerinden; Poisson oranı literatürden alıntı yapılmış, malzeme yoğunluğu ise teknik veri formundan alınarak Çizelge 3.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Mekanik analizde kullanılacak diğer malzeme özellikleri

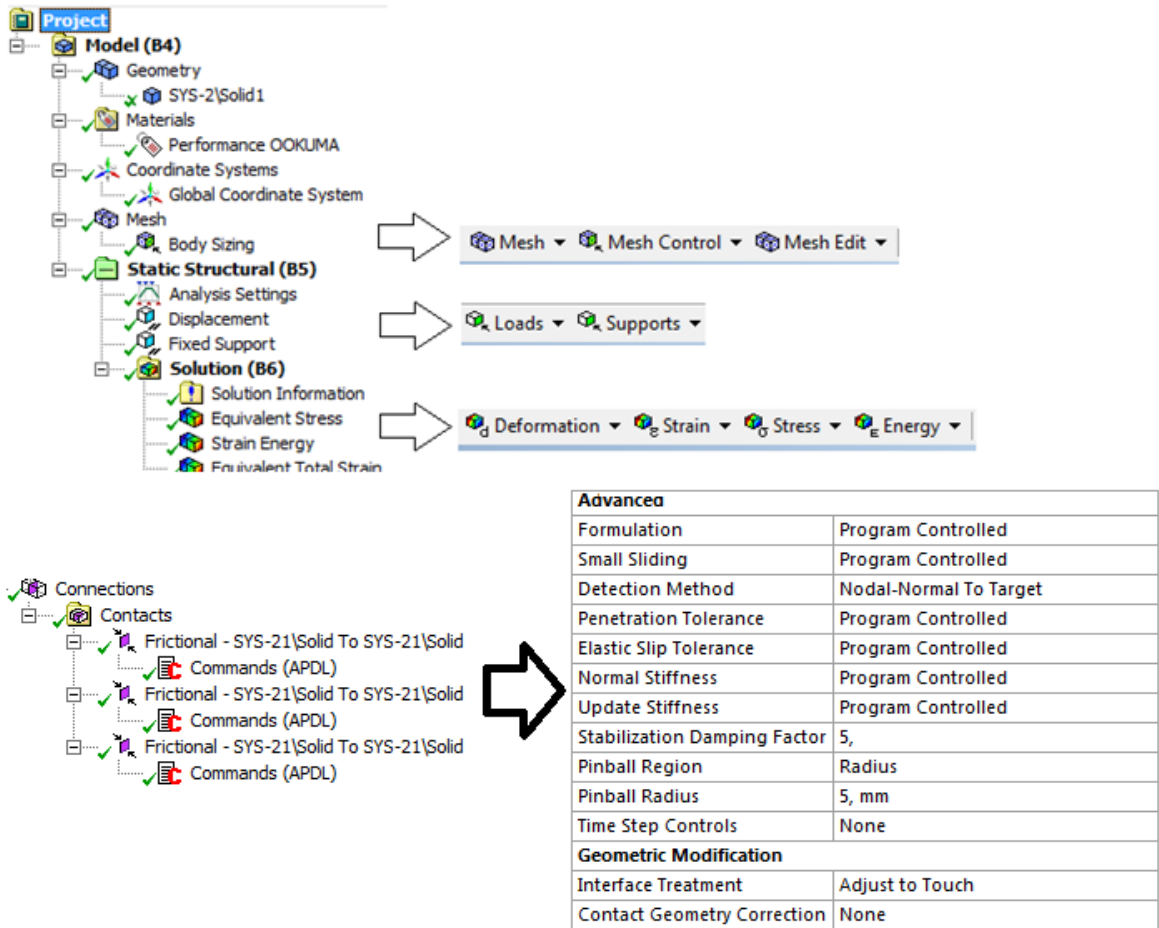
Malzeme	Poisson Oran	Yoğunluk (gr/cm ³)
Performance ABS	0,35	1,05
CF0 ABS	0,30	1,08

Numunelerin SolidWorks programıyla oluşturulan 3B modelleri, statik analiz modülüne (Şekil 3.22) bağlanmıştır. Bu aşamaya kadar numunelerin malzeme özellikleri ve 3B modelleri programa tanımlanmıştır.



Şekil 3.22. 3B numune modellerinin statik analiz modülüne tanımlanması

Numunelere uygulanacak mekanik testlerin simülasyon edildiği, model bölümünün en önemli sekmesi mesh sekmesidir. Mesh sekmesi, malzemeye uygulanacak analizlerin etki edeceği birim karelerin oluşturulduğu sekmedir. Özellikle şekil yönünden kompleks malzemelerde gerçeğe yakın sonuç elde etmek için çok önemlidir. Çalışmada, ANSYS Workbench 19.2 öğrenci lisansında uygulanabilen mesh değerleri numunenin hacmine göre farklılık göstermektedir.



Şekil 3.23. ANSYS Workbench model bölümünün sekmeleri

Şekil 3.23’de gösterilen connections bölümü eğilme numunelerinin analizinde yükleme ve destek uçlarının numuneye bağlantısında kullanılmıştır. Her bir test için ayrı ayrı statik analiz modülleri (Şekil 3.22) oluşturulmuştur. Deneysel testlerin tamamı ASTM standartlarına uygun olarak modellenmiştir. Mekanik analiz sonucunda elde edilen sayısal değerler, deneysel testler ile elde edilen sonuçlar mukayese edilerek değerlendirilmiştir.



BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölüm üç ana başlıkta incelenmiştir. İlk başlıkta numunelere uygulanan mekanik testler sonuçları ile elde edilen çekme, basma ve eğilme özellikleriyle alakalı detaylar açıklanmış ve sonuçlar vurgulanmıştır. İkinci başlıkta ise mekanik test sonuçları ile elde edilen malzeme özellikleri ile ANSYS Workbench programında sayısal modellenmiş ve sonuçlar vurgulanmıştır. Son kısımda ise deneysel ve sayısal mekanik özellikler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada uygulanan deneysel ve sayısal sonuçlar ve tüm bulgular aşağıda geniş bir şekilde açıklanmıştır.

4.1. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Çekme, basma ve eğilmeleri numuneleri üretiminde ANET A8 3B (Şekil 3.4) yazıcı kullanılmıştır. Üçüncü Bölümde anlatılan baskı malzemeleri ve parametrelerine uygun olarak numuneler üretilmiştir. Ayrıca numunelere 3.4. başlıkta belirtilen ASTM standartlarına uygun mekanik testler uygulanmıştır. Mekanik test sonuçlarının değerlendirilme sürecinde; çekme, basma, eğilme kuvvetleri etkisinde elde edilen mekanik özelliklerinin ortalama değerleri referans alınmıştır. Her bir numunenin ortalama ölçüleri %10 geçmesi durumunda üretim sürecinde baskı hataları olduğu kabul edilmiştir. Hatalı numunelerin mekanik özellikleri değerlendirmeye katılmamıştır.

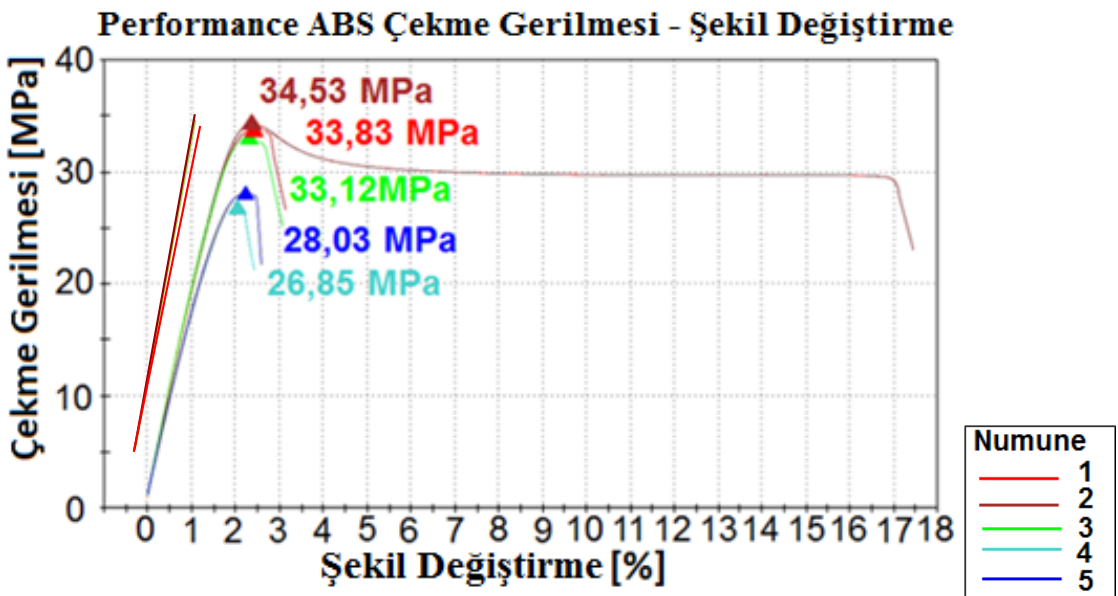
4.1.1. Çekme Testi Sonuçları

Eriyik biriktirme teknolojisiyle çalışan 3B yazıcılarla üretilen numunelerin çekme özellikleri tek eksenli çekme testiyle belirlenmiştir. Performance ABS ile üretilen çekme testi için beş adet numunenin baskısı tamamlanmış ve 5 mm/dk çene hızıyla kopma meydana gelene kadar çekme yükü uygulanmıştır. Çekme testi sonucunda elde edilen sonuçlar çekme dayanımı, elastisite modülü ve yüzde şekil değiştirme miktarının değişimlerini göz önüne almak üzere detaylı incelenmiştir. Numunelerin baskısı aynı koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Baskı sonrasında ölçülen numunelerin boyutlarında (Çizelge 3.4) farklılıklar gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. Performance ABS çekme numunelerine ait deformasyonlar

Yükün maksimum olduğu noktada numunenin herhangi bir bölgesinde meydana gelen daralmalara boyun verme denir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi numunelerin tamamında sünek kopma ve boyun verme meydana gelmiştir. Boyun bölgesindeki kesitin sürekli azalması uygulanan yükte düşmeye neden olduğundan dolayı boyun vermenin limitli olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin homojen olması ve test cihazına doğru bağlanmasından dolayı boyun verme orta noktada gözükmiştir. Performance ABS kullanılarak üretilen, çekme numunelerinin, gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Performance ABS çekme gerilmesi - şekil değiştirme grafiği

Numunelere uygulanan çekme testi parametreleri ve elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 4.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Performance ABS ile üretilen numunelerin çekme testi sonuçları

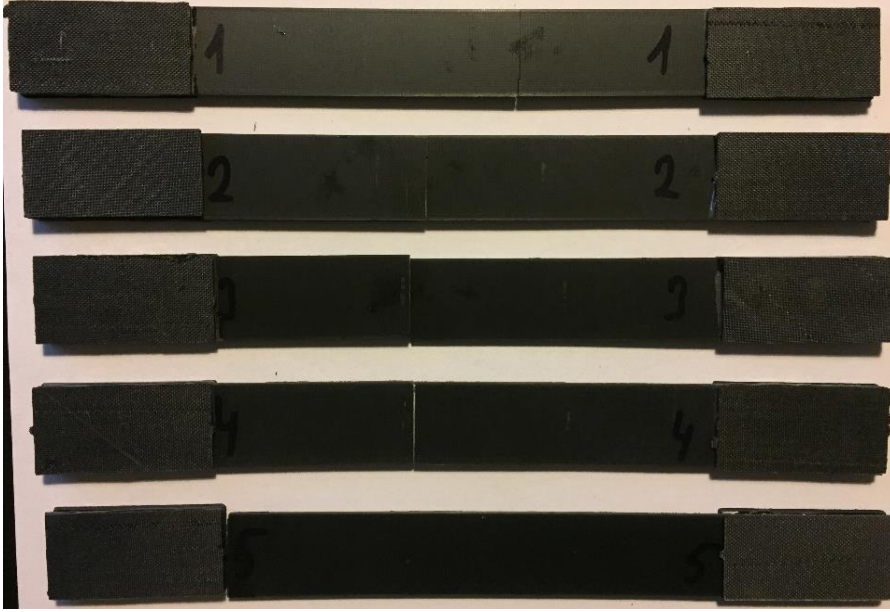
Numune No	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Gösterge Uzunluğu (mm)	Alan (mm ²)	$\sigma_{\text{çmax}}$ (MPa)	Kopma Sınırında Çekme Dayanımı (MPa)	$\epsilon_{\text{ç}}$ (%)	$E_{\text{ç}}$ (MPa)	$F_{\text{çmax}}$ (N)
1	13	3,11	120	41	33,813	33,33	2.78	1678,11	1391,23
2	13	3,17	120	42	34,253	28,86	17.0	1668,26	1430,04
3	13	3,15	120	41	33,122	32,33	2.65	1669,58	1374,08
4	13	3,28	120	42	26,853	26,56	2.19	1459,95	1137,96
5	13	3,29	120	42	28,035	27,75	2.47	1468,67	1182,45
Ort.	13	3,20	120	41,5	30,455	29,99	2,52	1569,07	1271,43
Std.	0	0,09	0	0,57	3,52	3,33	0,25	121,07	129,89

Çizelgede en dikkat çekici noktalardan birisi diğer numunelere göre daha sünek davranış gösteren 2 numaralı numunenin en büyük çekme dayanımına sahip olmasıdır. 2 numaralı numunenin yüzde şekil değiştirmesi diğer numunelere göre aşırı fazla olması baskı hatasından meydana geldiği varsayılarak değerlendirilmemiştir. Çizelge 4.1’de verilen mekanik özelliklere göre en büyük çekme dayanımına sahip numune 33,813 MPa ile 1 numaralı numune, en düşük çekme dayanımına sahip numune ise 26,853 MPa ile 4 numaralı numunedir. Numunelerin ortalama çekme dayanımı 30,455 MPa, standart sapma değeri 3,52 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri (STD) %11,55 olarak hesaplanmıştır.

Üretilen Performance ABS çekme numunelerinin kopma sınırında, en büyük yüzde şekil değişikliğine (YŞD) sahip numune %2.78 ile 1 numaralı numune, en düşük yüzde şekil değişikliğine sahip numune %2,19 ile 4 numaralı numunedir. Ortalama YŞD. %2,52, standart sapma değeri 0,25 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %9,92 olarak hesaplanmıştır.

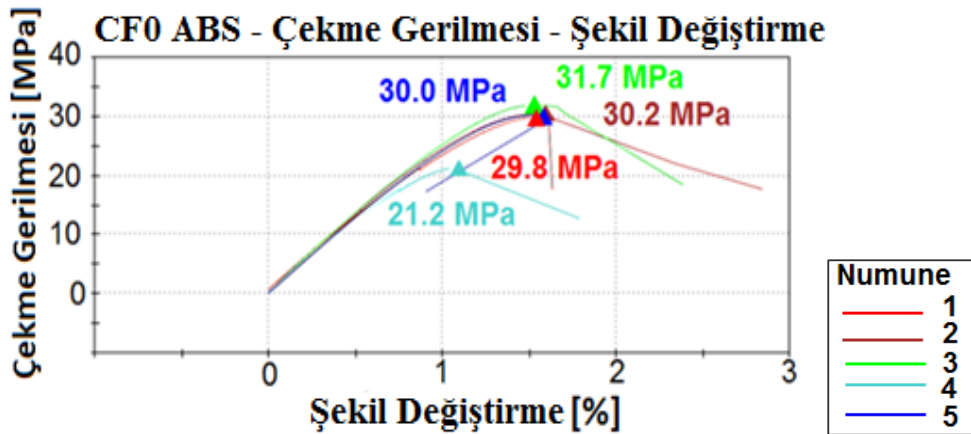
Üretilen numunelerin çekme dayanımı ve yüzde şekil değişikliklerinin yanında ayrıca birim uzama başına düşen çekme gerilmesi olarak adlandırılan elastisite modülleri (Young modülü) Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Elastisite modüllerinin belirlenmesinde Şekil 4.2’deki gerilme – şekil değiştirme grafiğindeki eğimlerden faydalanarak en büyük elastite modülüne sahip numune 1678,11 MPa ile 1 numaralı numune, en düşük elastite modülüne sahip numune 1459,95 MPa ile 4 numaralı numunedir. Ort. elastisite modülü 1569,07 MPa, standart sapma değeri 121,07 ve yüzdelik STD %7,71 olarak hesaplanmıştır.

Çekme testi için CF0 ABS ile üretilen beş adet numunenin baskısı tamamlanmış ve 5 mm/dk çene hızıyla kopma meydana gelene kadar çekme yükü uygulanmıştır. Çekme testi sonucunda elde edilen grafikler çekme dayanımı, elastisite modülü ve yüzde şekil değiştirme miktarının değişimlerini göz önüne almak üzere detaylı incelenmiştir. Numunelerin baskısı aynı koşullar altında gerçekleşmiştir. Numunelere uygulanan çekme testi sonucunda farklı noktalarda kopma (Şekil 4.3) meydana gelmiştir.



Şekil 4.3. CF0 ABS çekme numunelerine ait deformasyonlar

Şekil 4.3'de görüldüğü numunelerde farklı noktalarda kopma meydana gelmiş fakat numunelerin tamamında gevrek kopma gözlemlenmiştir. CF0 ABS kullanılarak üretilen, çekme numunelerinin, gerilme - şekil değiştirme grafiği Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. CF0 ABS çekme gerilmesi - şekil değiştirme grafiği

Numunelere uygulanan çekme testi parametreleri ve elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 4.2 de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. CF0 ABS ile üretilen numunelerin çekme testi sonuçları

Numune No	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Gösterge Uzunluğu (mm)	Alan (mm ²)	$\sigma_{\text{çmax}}$ (MPa)	Kopma Anında Çekme Dayanımı (MPa)	$\epsilon_{\text{çmax}}$ (%)	E _ç (MPa)	F _{çmax} (N)
1	25	2,60	150	64,9	29,80	29,81	1,603	2511,2	1937,40
2	25	2,58	150	64,5	30,20	30,09	1,604	2686,7	1947,32
3	25	2,53	150	63,2	31,70	31,47	1,647	2725,4	2005,85
4	25	2,58	150	64,4	21,20	21,22	1,110	2487,2	1367,12
5	25	2,60	150	65,0	30,00	29,85	1,623	2615,0	1952,07
Ort.	25	2,58	150	64,4	30,40	30,30	1,619	2634,6	1960,66
Std.	0,1	0,03	0	0,81	0,86	0,03	0,02	90,0	0,03

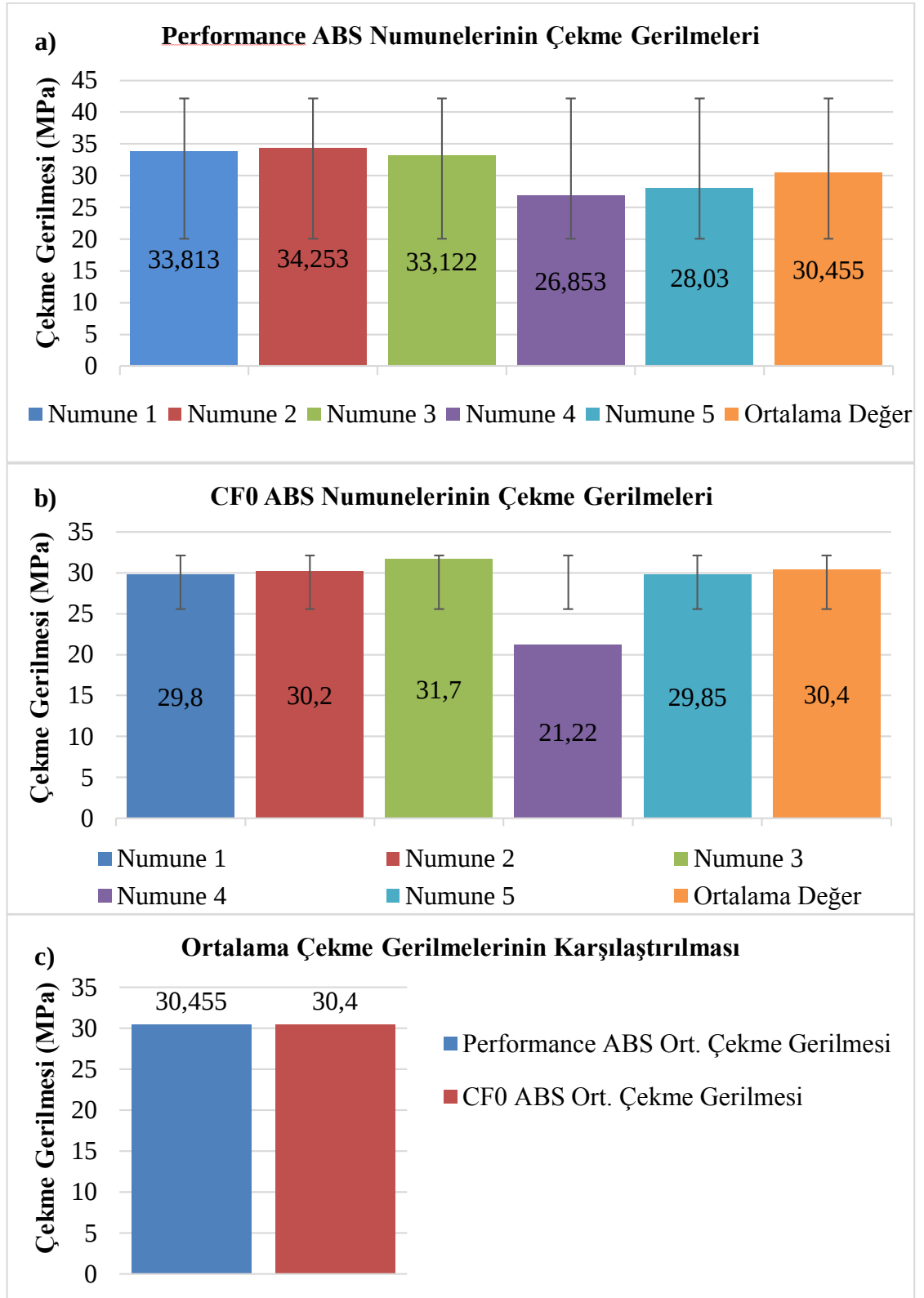
Çizelge 4.2’de verilen mekanik özelliklere göre en büyük çekme dayanımına sahip numune 31,70 MPa ile 3 numaralı numune, en düşük çekme dayanımına sahip numune ise 30,00 MPa ile 5 numaralı numune gelmektedir. 4 numaralı numune standart sapmasının büyük olmasından dolayı değerlendirilmemiştir. CF0 ABS ile üretilen numunelerin ortalama çekme dayanımı 30,40 MPa, standart sapma değeri 0,86 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %2,82 olarak hesaplanmıştır.

Üretilen CF0 ABS çekme numunelerinin kopma sınırında, en büyük YŞD sahip numune % 1,647 ile 3 numaralı numune ve en küçük YŞD sahip numune % 1,603 ile 1 numaralı numunedir. Ortalama YŞD %1,611, standart sapma değeri 0,02 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %1,24 olarak hesaplanmıştır.

Çekme kuvveti etkisinde elastisite modüllerinin belirlenmesinde Şekil 4.4’deki gerilme – şekil değiştirme grafiğindeki eğimlerden faydalanarak en büyük elastite modülüne sahip numune 2725,4 MPa ile 3 numaralı numune, en düşük elastite modülüne sahip numune 2511,2 MPa ile 1 numaralı numunedir. Ort. elastisite modülü 2634,6 MPa, standart sapma değeri 90,0 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %3,41 olarak hesaplanmıştır.

Performance ABS numunelerinin [90,0] yazdırma deseninde çekme kuvveti etkisinde meydana gelen çekme gerilmelerinin (Şekil 4.5a), Süreksiz karbon fiber içeren CF0 ABS numunelerinin çekme gerilmelerine (Şekil 4.5b) göre daha iyi sonuç elde edilmiştir. CF0 ABS numunelerin çekme gerilmelerinin düşük olması, filament içerisinde bulunan karbon fiberlerin süreksiz fiber olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

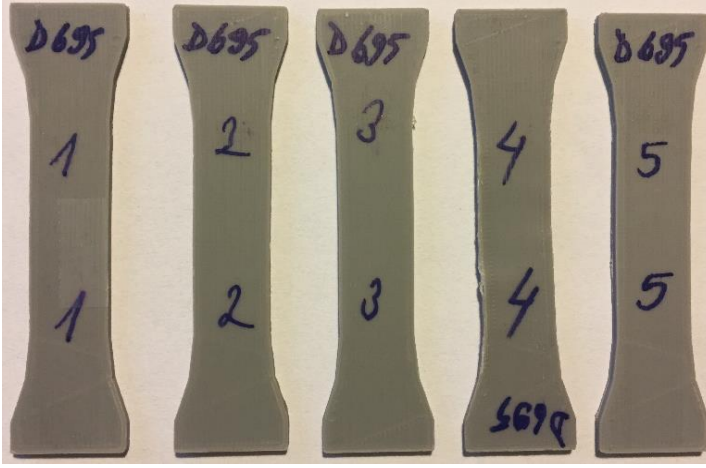
CF0 ABS numunelerinin STD, Performance ABS numunelere göre çok daha küçük olması üretimin daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.5. Çekme gerilmeleri a) Performance ABS, b) CF0 ABS, c) Ortalama çekme gerilmeleri

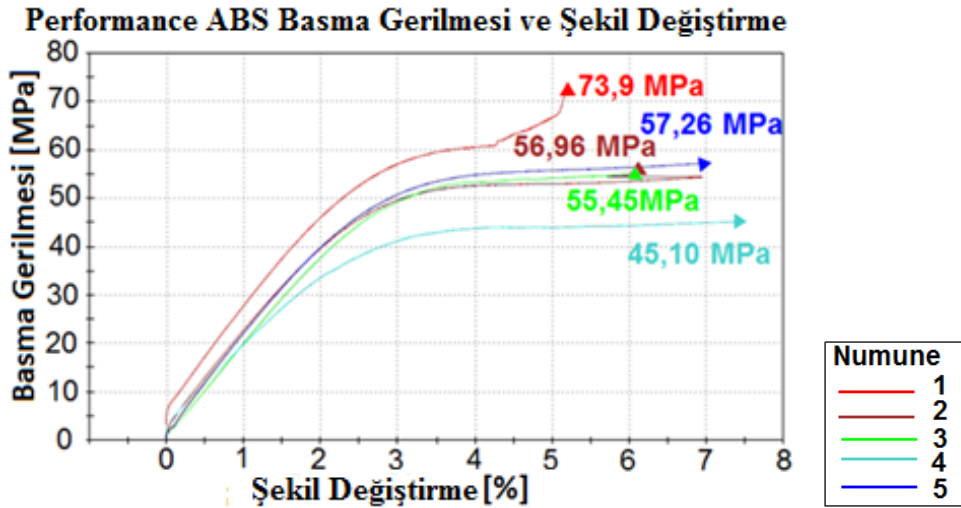
4.1.2. Basma Testi Sonuçları

Üretilen numunelere basma kuvveti etkisinde basma özellikleri belirlemek için tek eksenli basma testi uygulanmıştır. Performance ABS ile üretilen basma testi için beş adet numunenin baskısı tamamlanmış ve tamamı uygulanan maksimum kuvvetin %20 azaldığı noktaya kadar basma yüküne maruz bırakılmıştır. Basma testi sonucunda elde edilen grafikler basma dayanımı, elastisite modülü ve yüzde şekil değiştirme miktarının değişimlerini göz önüne almak üzere detaylı incelenmiştir. Baskı sonrasında ölçülen numunelerin boyutlarında (Çizelge 3.6) farklılıklar gözlemlenmiştir. Numunelerde gözle görülür deformasyonlar (Şekil 4.6) meydana gelmemiştir.



Şekil 4.6. Performance ABS basma numuneleri ait deformasyonlar

Performance ABS ile basma testine maruz bırakılan numunelerinin (Şekil 4.6) gerilme - şekil değiştirme grafiği Şekil 47.'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Performance ABS basma gerilmesi - şekil değiştirme grafiği

Numunelere uygulanan basma testi parametreleri ve elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Performance ABS ile üretilen numunelerin basma testi sonuçları

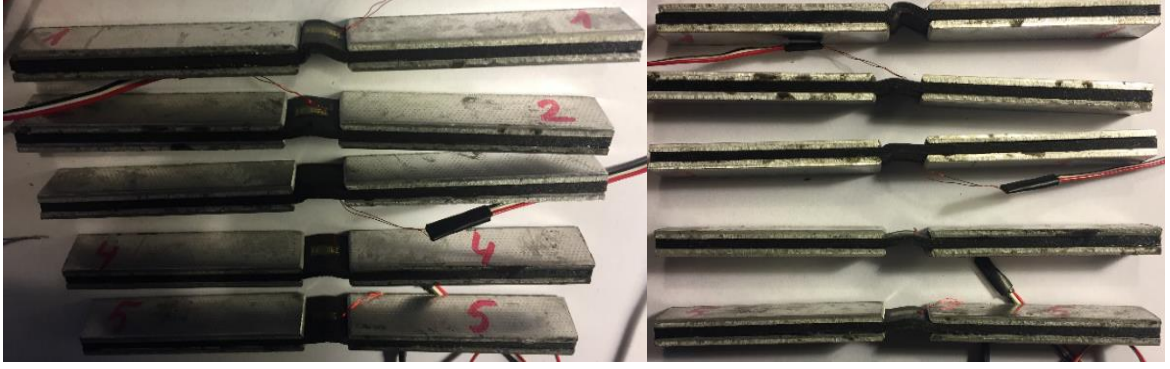
Numune No	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Deney Parçası Boyu (mm)	σ_{bmax} (MPa)	Kopma Sınırında Basma Dayanımı (MPa)	ϵ_{bmax} (%)	E_b (MPa)
1	12,80	1,98	38,10	73,90	73,90	5,21	2766,52
2	12,90	1,98	38,10	56,96	56,96	6,09	2393,07
3	12,83	1,97	38,10	55,45	55,45	6,15	1946,30
4	12,43	2,13	38,10	45,10	45,06	7,52	2271,71
5	12,81	2,00	38,10	57,26	57,16	7,01	2233,09
Ort.	12,84	1,983	38,10	56,55	56,52	6,416	2190,82
Std.	0,047	0,015	0	0,97	0,934	0,514	226,36

1 ve 4 numaralı numunelerin standart sapma değeri büyük olduğu için değerlendirilmemiştir. Çizelge 4.3’de verilen mekanik özelliklere göre en büyük basma dayanımına sahip numune 57,16 MPa ile 5 numaralı numune, en küçük basma dayanımına sahip numune ise 55,45 MPa ile 3 numaralı numunedir. Performance ABS ile üretilen numunelerin ortalama basma dayanımı 56,55 MPa, standart sapma değeri 0,97 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %1.71 olarak hesaplanmıştır.

Üretilen Performance ABS basma numunelerinin kopma sınırında, en büyük YŞD sahip numune %7,01 ile 5 numaralı numune, en küçük YŞD sahip numune %6,15 ile 3 numaralı numune, % 6,19 ile 2 numaralı numunedir. Ortalama YŞD. %6,416, standart sapma değeri 0,514 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %8,01 olarak hesaplanmıştır.

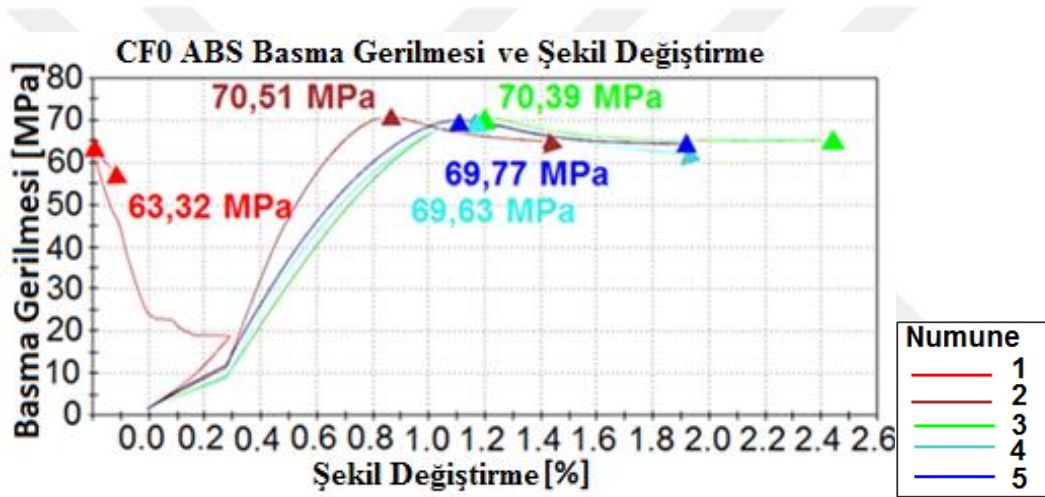
Basma kuvveti etkisinde elastisite modüllerinin belirlenmesinde Şekil 4.6’deki gerilme – şekil değiştirme grafiğindeki eğimlerden faydalanarak, en büyük elastite modülüne sahip numune 2393,07 MPa ile 2 numaralı numune, en küçük elastite modülüne sahip 1946,30 MPa ile 3 numaralı numunedir. Ort. elastisite modülü 2190,82 MPa, standart sapma değeri 226,36 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %10,33 olarak hesaplanmıştır.

Basma testi için CF0 ABS filament ile üretilen beş adet numunenin baskısı tamamlanmış ve 1.3 mm/ dk yükleme hızıyla basma yüküne maruz bırakılmıştır. Basma testi sonucunda elde edilen grafikler basma dayanımı, elastisite modülü ve yüzde şekil değiştirme miktarının değişimlerini göz önüne almak üzere detaylı incelenmiştir. Numunelerin baskısı aynı koşullar altında gerçekleşmiştir. Numunelere uygulanan basma testi sonucunda farklı noktalarda yıgılmalar (Şekil 4.8) meydana gelmiştir.



Şekil 4.8. CF0 ABS basma numunelerine ait deformasyonlar

CF0 ABS ile kullanılarak üretilen, basma testine maruz bırakılan numunelerinin (Şekil 4.8) gerilme - şekil değiştirme grafiği Şekil 4.9’de verilmiştir.



Şekil 4.9. CF0 ABS basma gerilmesi- şekil değiştirme grafiği

Numunelere uygulanan basma testi parametreleri ve elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 4.4’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. CF0 ABS ile üretilen numunelerin basma testi sonuçları

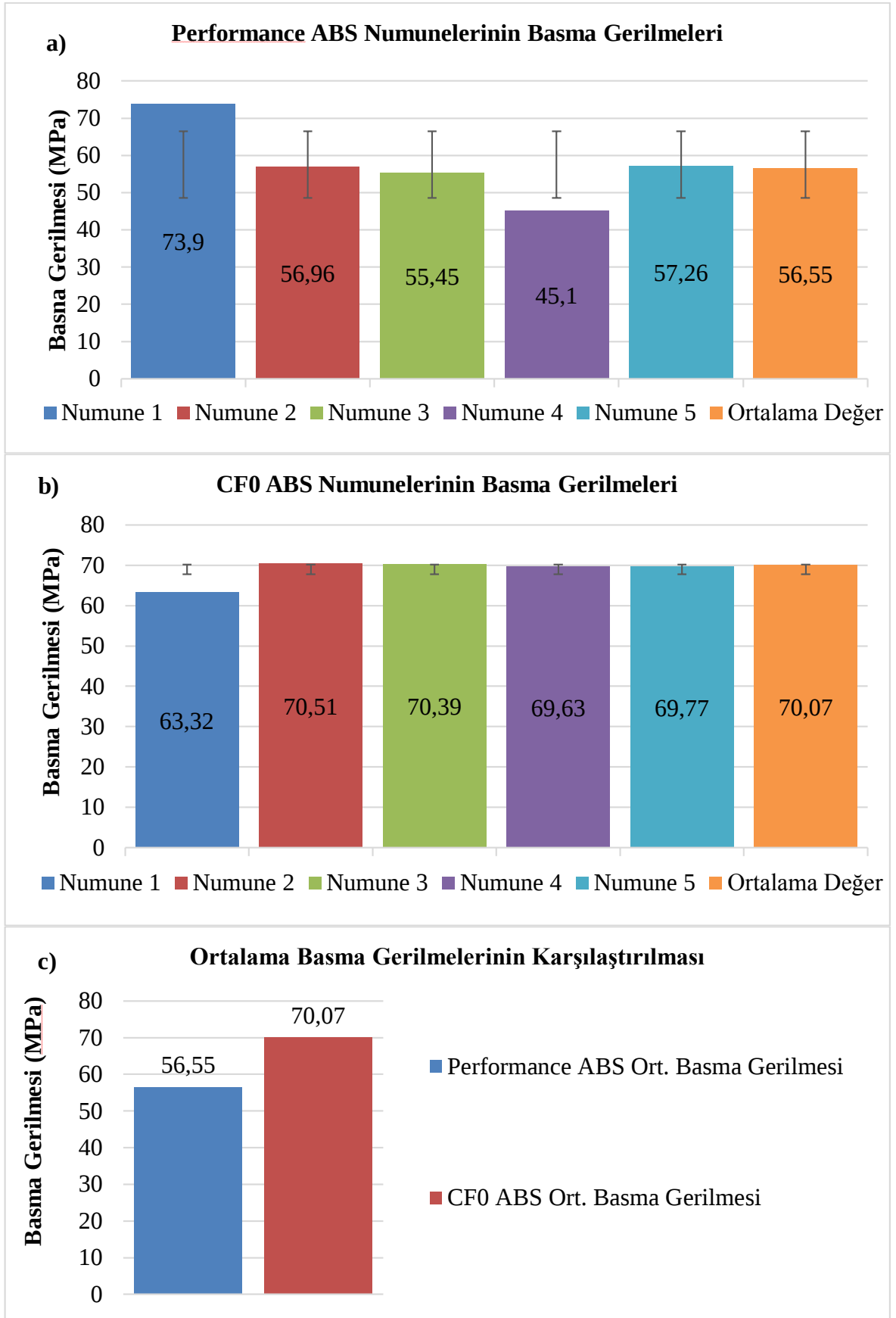
Numune No	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Deney Parçası Boyu (mm)	σ_{bmax} (MPa)	Kopma Sınırında Basma Dayanımı (MPa)	ϵ_{bmax} (%)	E_b (MPa)
1	12,840	2,49	124,90	63,32	57,31	-0,195	6395,3
2	12,850	2,50	125,00	70,51	64,67	0,859	3403,6
3	12,930	2,40	125,10	70,39	64,96	1,194	2614,3
4	12,900	2,40	125,20	69,63	61,68	1,164	2712,8
5	12,900	2,43	125,00	69,77	64,17	1,110	3493,7
Ort.	12,895	2,432	125,07	70,07	63,87	1,082	3056,1
Std.	0,033	0,047	0,095	0,439	1,49	0,152	456,542

1 numaralı numunenin beklenmedik şekilde yığılmaların meydana gelmesinden dolayı değerlendirilmesi yapılmamıştır. Çizelge 4.4’de verilen mekanik özelliklere göre en büyük basma dayanımına sahip olan numune 70,51 MPa ile 2 numaralı numune, en küçük basma dayanımına sahip numune ise 69,63 MPa ile 4 numaralı numunedir. CF0 ABS ile üretilen numunelerin ortalama basma dayanımı 70,07 MPa, standart sapma değeri 0,436 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %0,622 olarak hesaplanmıştır.

Üretilen CF0 ABS basma numunelerinin kopma sınırında, en büyük YŞD sahip numune % 1,194 ile 3 numaralı numune, en küçük YŞD sahip numune % 0,859 ile 2 numaralı numunedir. Ortalama YŞD. %1,082, standart sapma değeri 0,152 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %14,04 olarak hesaplanmıştır.

Basma kuvveti etkisinde elastisite modüllerinin belirlenmesinde Şekil 4.8’deki gerilme – şekil değiştirme grafiğindeki eğimlerden faydalanarak, en büyük elastite modülüne sahip 3493,7 MPa ile 5 numaralı numune, en küçük elastite modülüne sahip 2614,3 MPa ile 3 numaralı numunedir. Ortalama young modülü 3053,1 MPa, standart sapma değeri 456,542 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %14,95 olarak hesaplanmıştır.

Süreksiz karbon fiber içeren CF0 ABS numunelerinin [90,0] yazdırma deseninde basma kuvveti etkisinde meydana gelen basma gerilmelerinin (Şekil 4.10b), Performance ABS numunelerinin basma gerilmelerine (Şekil 4.10a) göre daha iyi sonuç elde edilmiştir. CF0 ABS numunelerinin standart sapma değerlerinin, Performance ABS numunelere göre çok daha küçük olması CF0 ABS ile üretilen numunelerinin üretiminin daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Basma numuneleri Basma testlerinden elde edilen gerilme değerleri Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Basma gerilmeleri a) Performance ABS, b) CF0 ABS, c) Ortalama basma gerilmeleri

4.1.3. Eğilme Testi Sonuçları

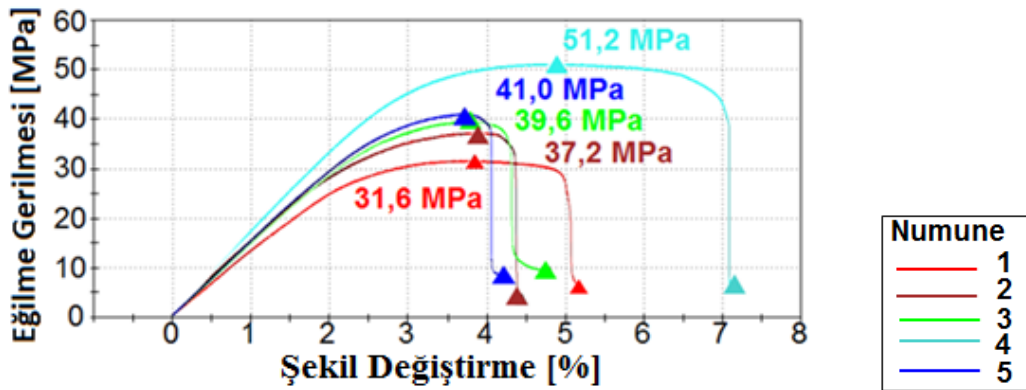
Performance ABS ile üretilen numunelerin eğilme özellikleri üç nokta eğme testiyle belirlenmiştir. Eğilme testi için beş adet numunenin baskısı tamamlanmıştır. Numuneler, 5 mm çapında uç ve desteklerle, 54 mm mesnet açıklığında kuvvet etkisini kaybedene kadar eğilme yüküne maruz bırakılmıştır. Eğilme testi sonucunda elde edilen grafikler çekme dayanımı, elastisite modülü ve yüzde şekil değiştirme miktarının değişimlerini göz önüne almak üzere detaylı incelenmiştir. Numunelere uygulanan eğilme testi sonucunda farklı noktalarda bükülmeler (Şekil 4.11) meydana gelmiştir.



Şekil 4.11. Performance ABS eğilme numunelerine ait deformasyonlar

Performance ABS kullanılarak üretilen, eğilme testine maruz bırakılan numunelerinin (Şekil 4.11) gerilme - yüzde uzama grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir.

Performance ABS Eğilme Gerilmesi ve Şekil Değiştirme



Şekil 4.12. Performance ABS eğilme gerilmesi – şekil değiştirme grafiği

Numunelere uygulanan eğilme testi parametreleri ve elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Performance ABS ile üretilen numunelerin eğilme testi sonuçları

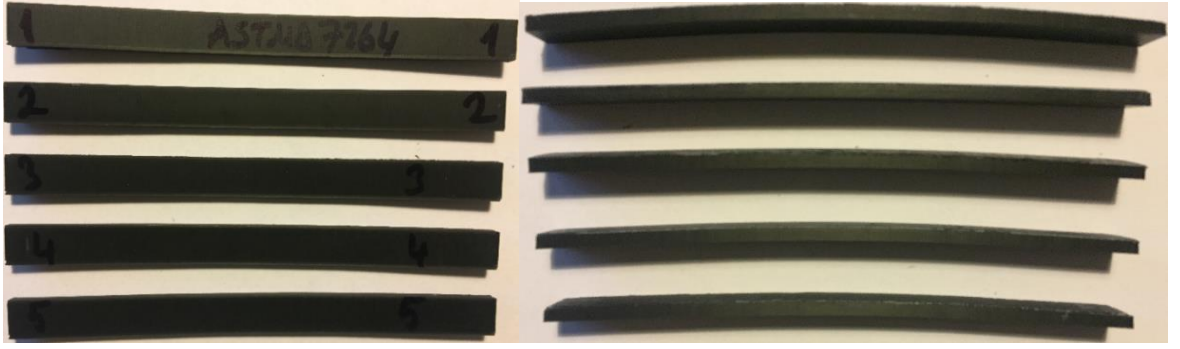
Numune No	Genişlik (mm)	Derinlik (mm)	Mesnet açıklık (mm)	σ_{emax} (MPa)	ϵ_{emax} (%)	Maksimum yüklemde şekil değiştirme (mm)	F_{emax} (N)
1	12,69	3,40	54,00	31,60	3,837	6,182	57,251
2	12,65	3,30	54,00	37,20	3,889	6,632	63,291
3	12,61	3,40	54,00	39,60	3,782	5,540	71,228
4	12,85	3,18	54,00	51,20	4,887	7,764	82,065
5	12,65	3,36	54,00	41,10	3,705	5,483	72,363
Ort.	12,65	3,365	54,00	37,37	3,803	5,959	66,03
Std.	0,032	0,047	0	4,17	0,078	0,549	7,11

4 numaralı numune standart sapma değeri büyük olduğu için değerlendirilmemiştir. Çizelge 4.5’de verilen mekanik özelliklere göre en büyük eğilme dayanımına sahip numune 41,10 MPa ile 5 numaralı numune, en küçük eğilme dayanımına sahip numune ise 31,60 MPa ile 1 numaralı numunedir. Performance ABS ile üretilen numunelerin ortalama eğilme dayanımı 37,37 MPa, standart sapma değeri 4,17 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %11,15 olarak hesaplanmıştır.

Üretilen Performance ABS eğilme numunelerinin en büyük şekil değiştirmesine (mm) sahip numune 6,632 mm ile 2 numaralı numune, en küçük şekil değiştirmeye sahip numune ise 5,483 mm ile 5 numaralı numunedir. Ortalama şekil değiştirme 5,959 mm, standart sapma değeri 0,549 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %9,21 olarak hesaplanmıştır.

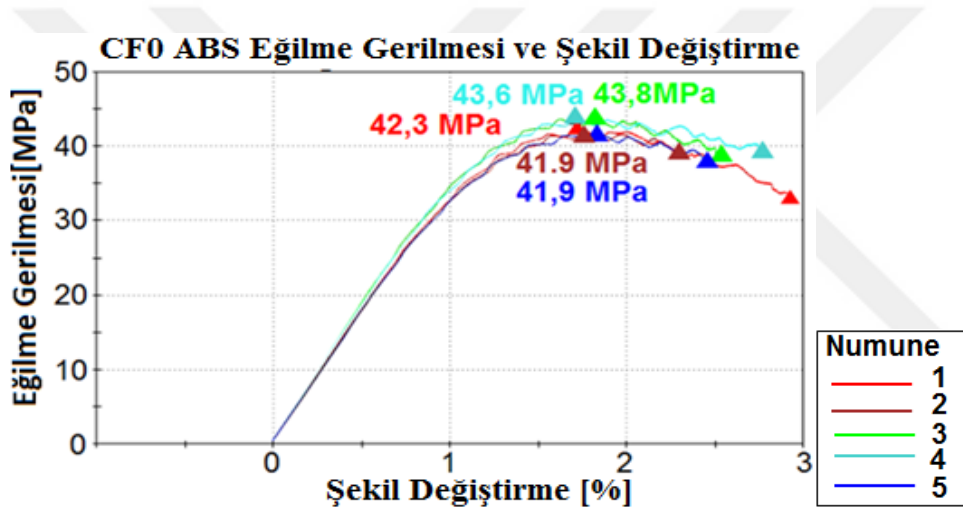
Eğilme kuvveti etkisinde Elastisite modüllerinin belirlenmesinde Şekil 4.10’daki gerilme – şekil değiştirme grafiğindeki eğimlerden faydalanarak, en büyük elastite modülüne sahip numune 1517 MPa ile 5 numaralı numune, en küçük elastite modülüne 1328 MPa ile 1 numaralı numunedir. Ort. elastite modülü 1431,25 MPa, standart sapma değeri 81,83 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %5,71 olarak hesaplanmıştır.

CF0 ABS ile üretilen numunelerin eğilme özellikleri üç nokta eğme testiyle belirlenmiştir. Eğilme testi için beş adet numunenin baskısı tamamlanmıştır. Numuneler, 10 mm çapında uç ve desteklerle, 130 mm mesnet açıklığında, 1 mm/dk ilerleme hızında kuvvet etkisini kaybedene kadar eğilme yüküne maruz bırakılmıştır. Eğilme testi sonucunda elde edilen grafikler çekme dayanımı, elastisite modülü ve yüzde şekil değiştirme miktarının değişimlerini göz önüne almak üzere detaylı incelenmiştir. Numunelerin baskısı aynı koşullar altında gerçekleşmiştir. Numunelere uygulanan eğilme testi sonucunda farklı noktalarda bükülmeler (Şekil 4.13) meydana gelmiştir.



Şekil 4.13. CF0 ABS eğilme numunelerine ait deformasyonlar

CF0 ABS ile eğilme testine maruz bırakılan numunelerinin (Şekil 4.13) gerilme - yüzde uzama grafiği Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14. CF0 ABS eğilme gerilmesi - şekil değiştirme grafiği

Numunelere uygulanan eğilme testi parametreleri ve elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. CF0 ile üretilen numunelerin eğilme testi sonuçları

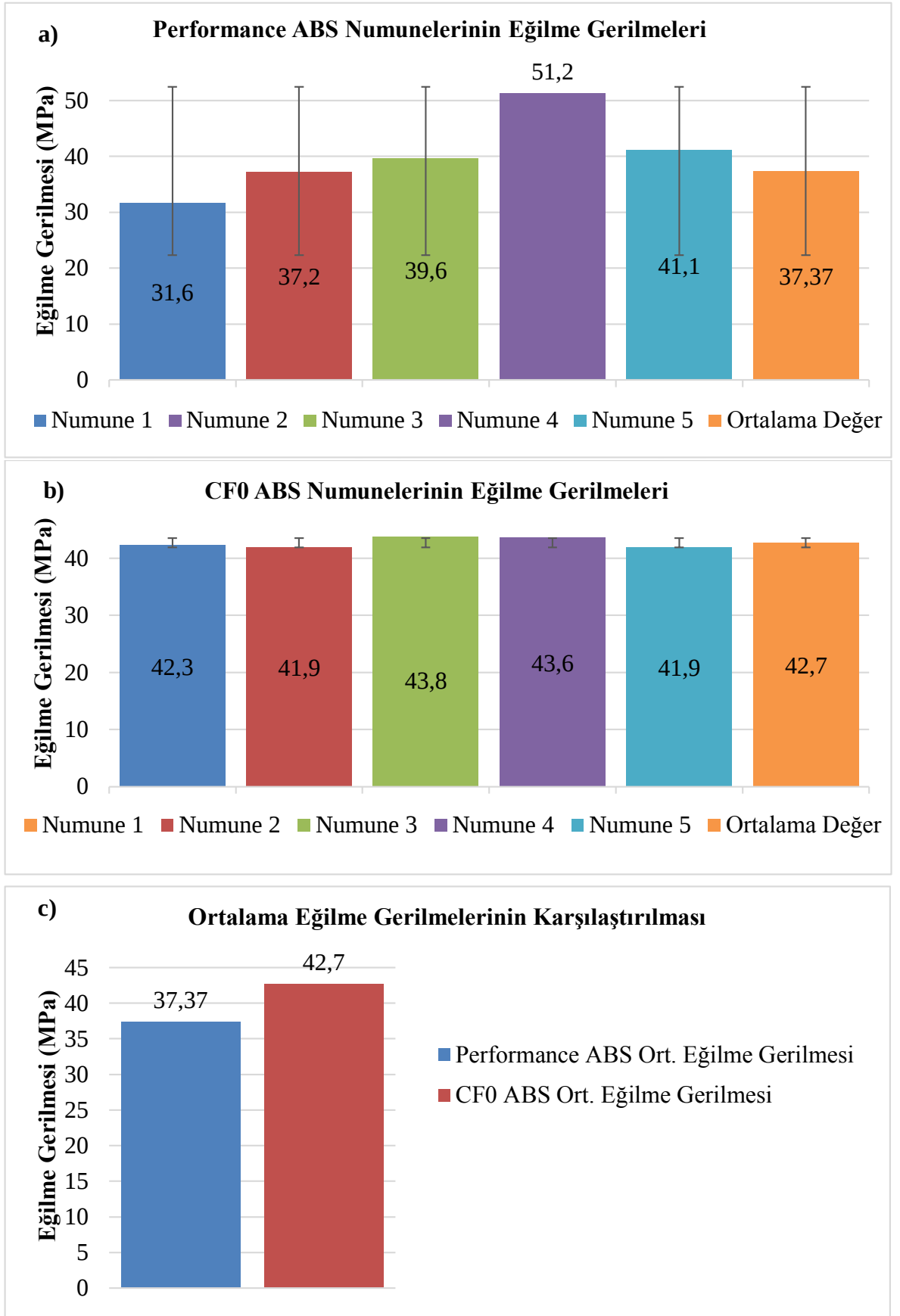
Numune No	Genişlik (mm)	Derinlik (mm)	Mesnet açıklık (mm)	σ_{emax} (MPa)	ϵ_{emax} (%)	Kopma sınırında eğilme dayanımı, (MPa)	F_{emax} (N)
1	13,00	4,10	130	42,30	1,722	33,3	94,803
2	12,92	4,14	130	41,90	1,756	39,4	95,103
3	12,98	4,00	130	43,80	1,805	38,8	93,354
4	12,92	4,05	130	43,60	1,706	39,3	94,798
5	12,93	4,09	130	41,90	1,831	38,2	92,851
Ort.	12,95	4,08	130	42,70	1,764	37,8	94,182
Std.	0,04	0,05	0	0,96	0,05	2,55	1,01

Çizelge 4.6’da verilen mekanik özelliklere göre en büyük eğilme dayanımına sahip numune 43,8 MPa ile 3 numaralı numune, en küçük eğilme dayanımına sahip numune ise 41,90 MPa ile 2 ve 5 numaralı numunelerdir. Performance ABS ile üretilen numunelerin ortalama eğilme dayanımı 42,70 MPa, standart sapma değeri 0,96 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %2,24 olarak hesaplanmıştır.

Üretilen Performance ABS eğilme numunelerinin en büyük YŞD sahip numune %1,831 ile 5 numaralı numune, en düşük YŞD sahip numune ise %1,706 mm ile 4 numaralı numunedir. Ortalama YŞD %1,764, standart sapma değeri 0,05 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %2,83 olarak hesaplanmıştır.

Eğilme kuvveti etkisinde Elastisite modüllerinin belirlenmesinde Şekil 4.10’daki gerilme – şekil değiştirme grafiğindeki eğimlerden faydalanarak, en büyük elastite modülüne sahip numune 3717,85 MPa ile 4 numaralı numune, en düşük elastisite modülüne sahip numune ise 3445,73 MPa ile 5 numaralı numunedir. Ort. elastite modülü 3586,73 MPa, standart sapma değeri 116,31 ve yüzdelik cinsinden standart sapma değeri %3,242 olarak hesaplanmıştır.

Süreksiz karbon fiber içeren CF0 ABS numunelerinin [90,0] yazdırma deseninde eğilme kuvveti etkisinde meydana gelen eğilme gerilmelerinin (Şekil 4.15b), Performance ABS numunelerinin eğilme gerilmelerine (Şekil 4.15a) göre daha iyi sonuç elde edilmiştir. CF0 ABS numunelerinin standart sapma değerlerinin, Performance ABS numunelere göre çok daha küçük olması CF0 ABS ile üretilen numunelerinin üretiminin daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Basma numuneleri Basma testlerinden elde edilen gerilme değerleri Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Eğilme gerilmeleri a) Performance ABS, b) CF0 ABS, c) Ortalama eğilme gerilmeleri

4.2 Numerik Sonuçların Değerlendirilmesi

Numerik analiz için ANSYS Workbench Student Release 19.2 kullanılmıştır. numerik analizde numunelerin SolidWorks programında çizilen 3B modelleri kullanılmıştır. ANSYS programına tanımlanan malzeme özellikleri; deneysel yollarla elde edilen ortalama değerler referans alınarak kullanılmış, malzemelerin çekme, basma, eğilme kuvvetleri etkisinde dayanımları, elastite modülleri, kopma anında dayanımları tanımlanmıştır. Mekanik testler sırasında yanal ve eksenel gerilmeler hesaplanmadığından dolayı poisson oranı literatürden alıntı yapılarak kullanılmıştır. Numunelere uygulanan mekanik testler; ANSYS programında modellenmiş ve Von Mises'a göre maksimum gerilme ve şekil değiştirme enerjisi mekanik analizler sonucunda elde edilmiştir. Üretilen beşer adet numunenin çekme, basma, eğilme kuvvetleri etkisinde elde edilen mekanik özelliklerinin ortalama değerleri referans alınarak mekanik analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

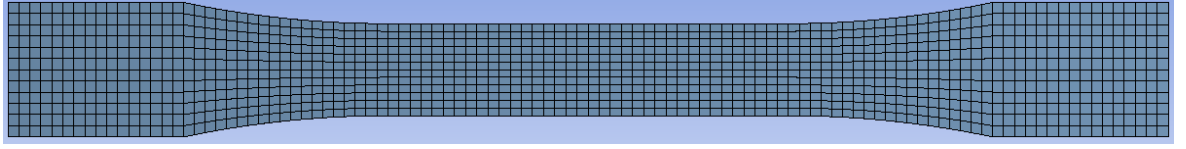
4.2.1 Çekme Testi Numunelerinin Mekanik Analiz Sonuçları

Performance ABS filament kullanılarak üretilen numunelere, uygulanan ASTM D638 plastik malzemelerin çekme testiyle elde edilen mekanik özellikleri ve Ek 1.'de teknik veri formundan elde edilen malzeme özellikleri referans alınarak ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Performance ABS çekme testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri

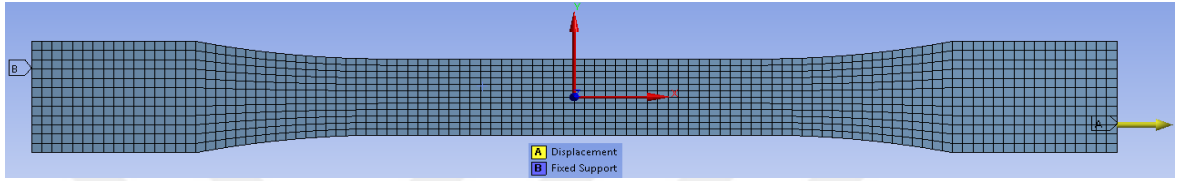
Numune no	Çekme dayanımı (MPa)	Elastite modülü (MPa)	Poisson oranı (mm/mm)	Yoğunluk (kg/m ³)
Ort. Değer	30,455	1569,07	0,35	1,05

Elastite modülü (Young modulus) ve poisson oranının tanımlanması ile program malzemelerin hacim modülü (Bulk modulus) ile kayma modülünü (Shear modulus) otomatik olarak hesaplanmaktadır. Mekanik analizi yapılacak, 3B modele tanımlanan malzeme özelliklerinden (Çizelge 4.7) sonra analiz sonucunun gerçeğe yakın çıkması için meshleme işlemi uygulanması gerekmektedir. Performance ABS çekme numunesi için ANSYS öğrenci lisansının müsaade ettiği en küçük mesh değeri 1,6 mm olduğu belirlenmiş ve mesh işlemi (Şekil 4.16) uygulanmıştır.



Şekil 4.16. Performance ABS çekme numunesine uygulanan mesh işlemi

Mekanik analize başlamadan önce, ASTM D638 çekme testi (Şekil 4.17) ANSYS programında modellenmiştir. İlk olarak numunenin bir ucu sabitlenmiş, diğer ucu 5 mm/dk çene hızı ile çekme yüküne maruz bırakılmıştır.



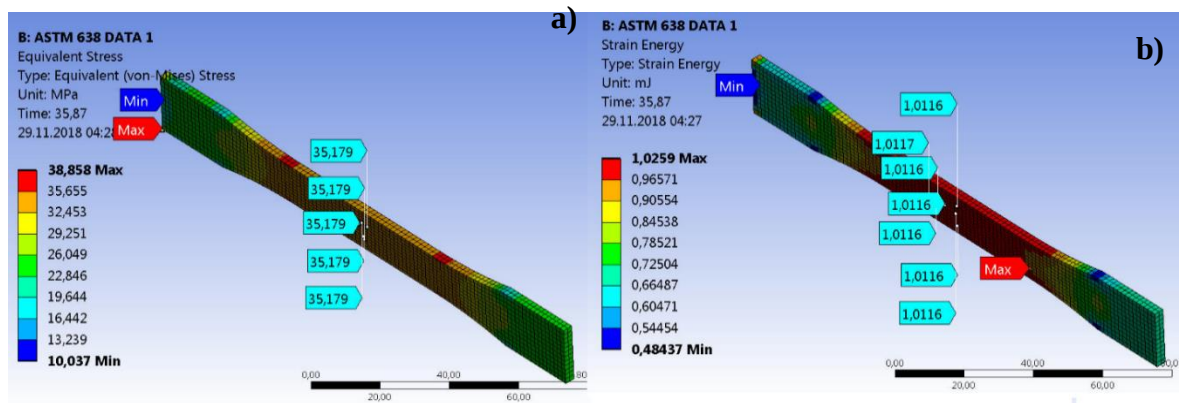
Şekil 4.17. ASTM D638 çekme testinin ANSYS ile modellenmesi

Uygulanan çekme etkisinde her bir numunede meydana gelen Von Mises'e göre maksimum çekme dayanımı ve şekil değiştirme enerjileri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Performance ABS çekme testi numunelerinin mekanik analiz sonuçları

Numune no	Çekme gerilmesi (MPa)	Şekil değiştirme enerjisi (mJ)	Şekil no
Ort. Değer	30,563	0,50794	4.18

Çekme kuvveti etkisinde numunelerde meydana gelen çekme dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi dağılımı Şekil 4.18' de verilmiştir.



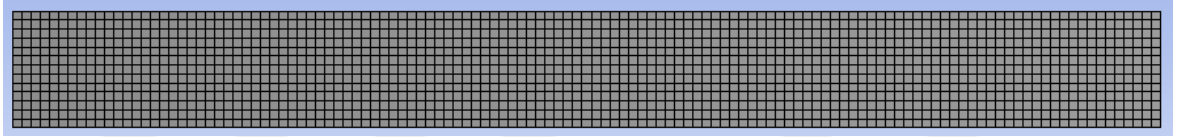
Şekil 4.18. ASTM D638 çekme testi numunesinin a) Çekme gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı

CF0 ABS filament kullanılarak üretilen numunelere, uygulanan ASTM D3039 polimer matris kompozit malzemelerin çekme testiyle elde edilen mekanik özellikler ve Ek 2.'de bulunan teknik veri formundan elde edilen malzeme özellikleri referans alınarak ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. CF0 ABS çekme testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri

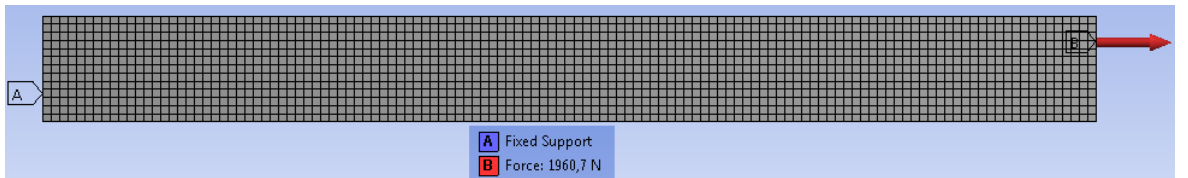
Numune No	Çekme dayanımı (MPa)	Elastite modülü (MPa)	Uygulanan çekme kuvveti (N)	Poisson oranı (mm/mm)	Yoğunluk (kg/m ³)
Ort.	30,40	2634,6	1960,66	0,30	1,08

CF0 ABS çekme numunesi için ANSYS öğrenci lisansının müsaade ettiği en küçük mesh değeri 2,0 mm olduğu belirlenmiş ve mesh işlemi (Şekil 4.19) uygulanmıştır.



Şekil 4.19. CF0 ABS çekme testi numunesine uygulanan mesh işlemi

Mekanik analize başlamadan önce, ASTM D3039 çekme testi (Şekil 4.20) ANSYS programında modellenmiştir. İlk olarak numunenin bir ucu sabitlenmiş, diğer ucu 5 mm/dk çene hızı ile çekme yüküne maruz bırakılmıştır.



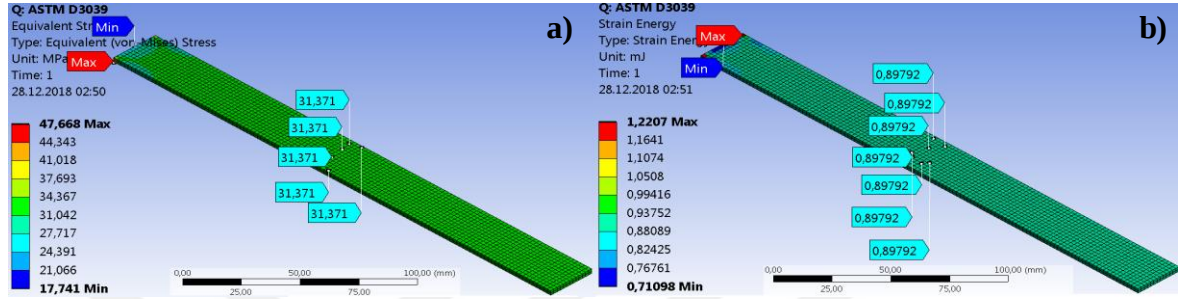
Şekil 4.20. ASTM D3039 çekme testinin ANSYS ile modellenmesi

Uygulanan çekme etkisinde her bir numunede meydana gelen Von Mises'e göre maksimum çekme dayanımı ve şekil değiştirme enerjileri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.10. CF0 ABS çekme testi numunesinin mekanik analiz sonucu

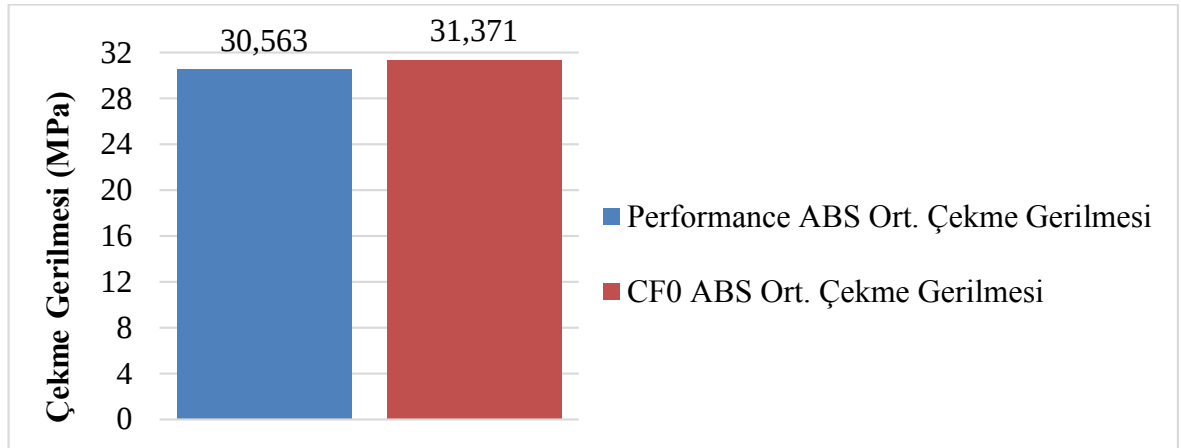
Numune no	Çekme gerilmesi (MPa)	Şekil değiştirme enerjisi (mJ)	Şekil no
Ort. Değer	31,371	0,89792	4.21

Çekme kuvveti etkisinde numunelerde meydana gelen çekme dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi dağılımı Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. ASTM D3039 çekme testinin a) Çekme gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı

Çekme testi numunelerine uygulanan numerik analiz sonucunda elde edilen çekme gerilmeleri Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Çekme testi numunelerinin mekanik analiz sonucu

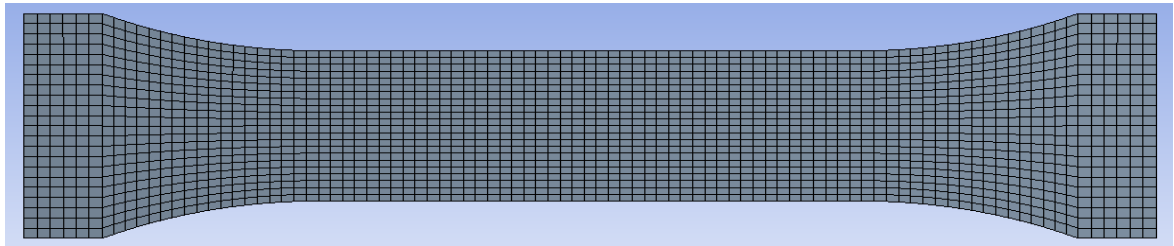
4.2.2. Basma Testi Numunelerinin Mekanik Analiz Sonuçları

Performance ABS filament kullanılarak üretilen numunelere, uygulanan ASTM D695 plastik malzemelerin basma testiyle elde edilen mekanik özellikler ve Ek 1.’de bulunan teknik veri formundan elde edilen malzeme özellikleri referans alınarak ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 4.11’da verilmiştir.

Çizelge 4.11. Performance ABS basma testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri

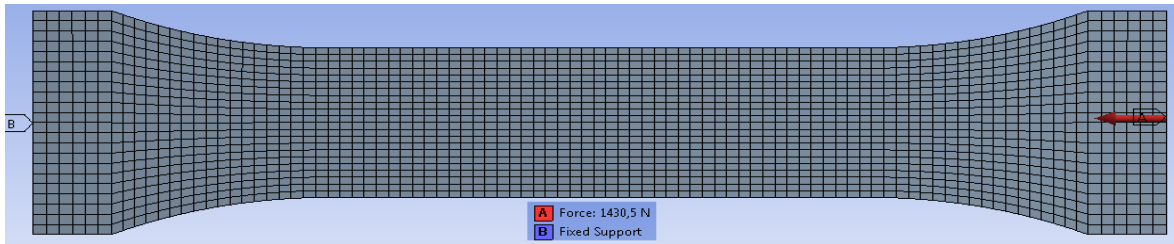
Numune no	Basma dayanımı (MPa)	Elastite modülü (MPa)	Uygulanan ort. basma kuvveti (N)	Poisson oranı (mm/mm)	Yoğunluk (kg/m ³)
Ort.	56,55	2190,82	1443,15	0,35	1,05

Performance ABS basma numunesi için ANSYS öğrenci lisansının müsaade ettiği en küçük mesh değeri 0,85 mm olduğu belirlenmiş ve mesh işlemi (Şekil 4.23) uygulanmıştır.



Şekil 4.23. Performance ABS basma testi numunesine uygulanan mesh işlemi

Mekanik analize başlamadan önce, ASTM D695 basma testi (Şekil 4.24) ANSYS programında modellenmiştir. İlk olarak numunenin bir ucu sabitlenmiş, diğer ucu 1,3 mm/dk çene hızı ile basma yüküne maruz bırakılmıştır.



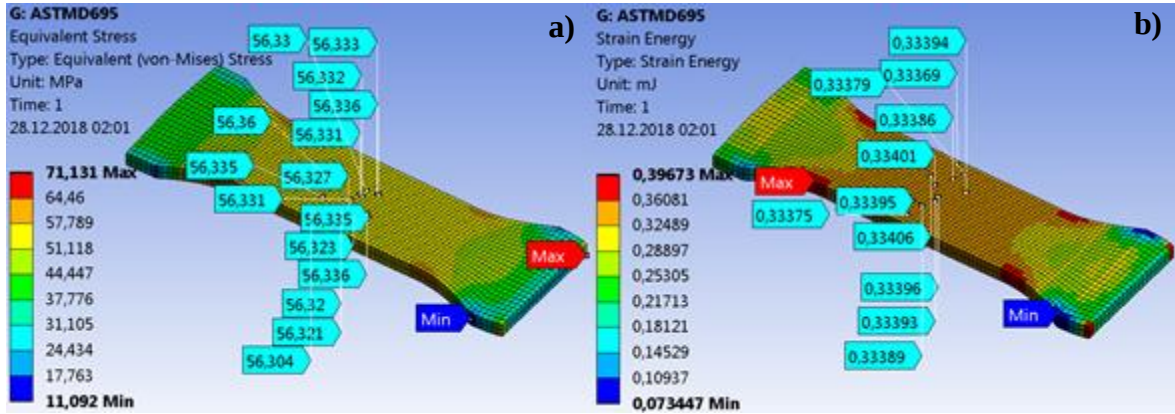
Şekil 4.24. ASTM D695 basma testinin ANSYS ile modellenmesi

Uygulanan basma kuvveti etkisinde numunede meydana gelen Von Mises'e göre maksimum basma dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Performance ABS basma testi numunesinin mekanik analiz sonucu

Numune No	Basma gerilmesi (MPa)	Şekil değiştirme enerjisi (mJ)	Şekil no
Ort. Değer	56,82	0,33375	4.25

Ortalama basma kuvveti etkisinde numunede meydana gelen basma dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi dağılımı Şekil 4.25’de verilmiştir.



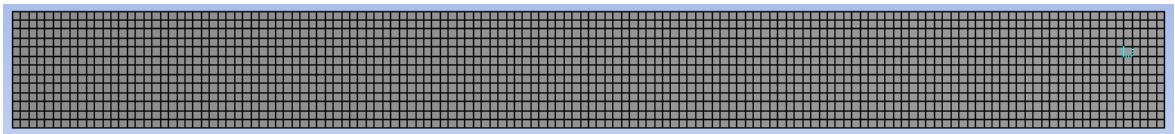
Şekil 4.25. ASTM D695 basma testinin a) Basma gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı

CF0 ABS filament kullanılarak üretilen numunelere; uygulanan ASTM D6641 basma testiyle elde edilen mekanik özellikler ve Ek 2.’de bulunan teknik veri formundan elde edilen malzeme özellikleri referans alınarak ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13. CF0 ABS basma testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri

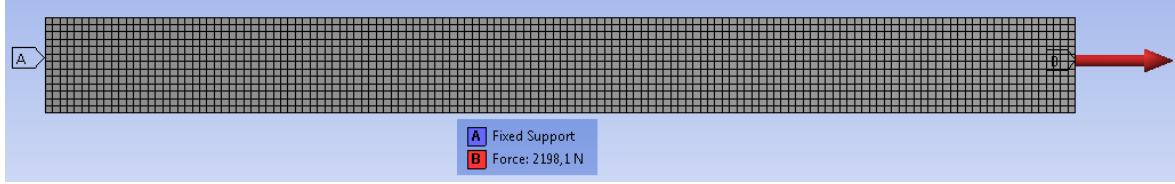
Numune no	Basma dayanımı (MPa)	Elastite modülü (MPa)	Uygulanan ort. basma kuvveti (N)	Poisson oranı (mm/mm)	Yoğunluk (kg/m ³)
Ort.	70,07	3056,10	2198,10	0,30	1,08

CF0 ABS basma numunesi için ANSYS öğrenci lisansının müsaade ettiği en küçük mesh değeri 1,00 mm olduğu belirlenmiş ve mesh işlemi (Şekil 4.26) uygulanmıştır.



Şekil 4.26. Performance ABS basma testi numunesine uygulanan mesh işlemi

Mekanik analize başlamadan önce, ASTM D6641 basma testi (Şekil 4.27) ANSYS programında modellenmiştir. İlk olarak numunenin bir ucu sabitlenmiş, diğer ucu 1,3 mm/dk çene hızı ile basma yüküne maruz bırakılmıştır.



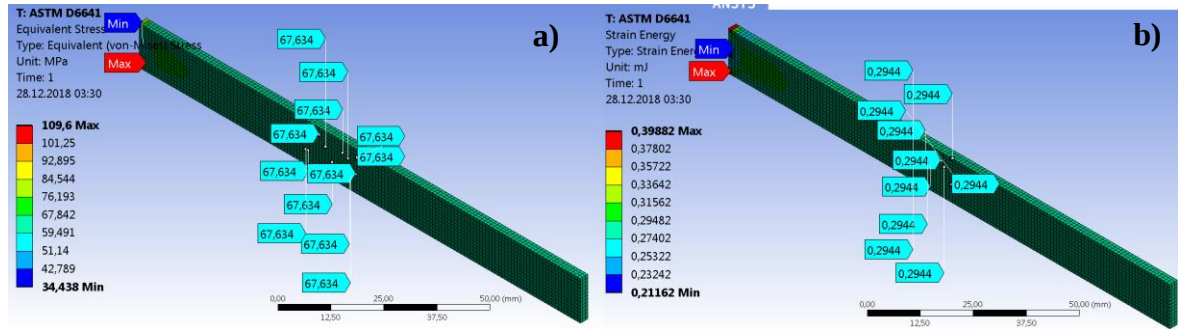
Şekil 4.27. ASTM D6641 basma testinin ANSYS ile modellenmesi

Uygulanan basma kuvveti etkisinde numunede meydana gelen Von Mises'e göre maksimum basma dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi Çizelge 4.14'de verilmiştir.

Çizelge 4.14 CF0 ABS basma testi numunesinin mekanik analiz sonucu

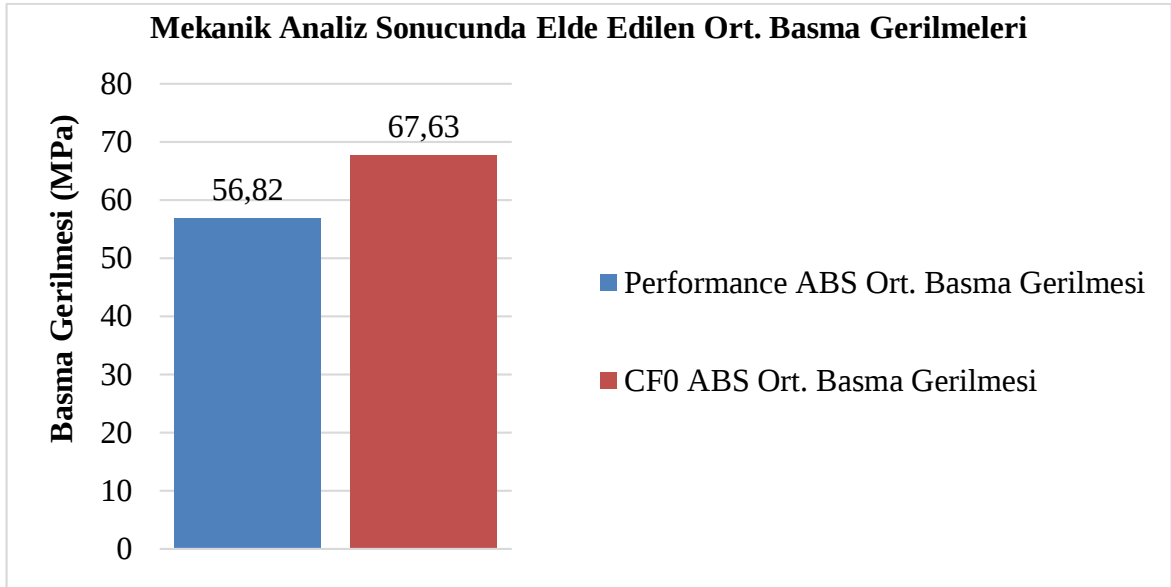
Numune no	Basma gerilmesi (MPa)	Şekil değiştirme enerjisi (mJ)	Şekil no
Ort. Değer	67,634	0,2944	4.28

Ortalama basma kuvveti etkisinde numunede meydana gelen basma dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi dağılımı Şekil 4.28'de verilmiştir.



Şekil 4.28. ASTM D6641 basma testinin; a) Basma gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı

Basma testi numunelerine uygulanan numerik analiz sonucunda elde edilen basma gerilmeleri Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Basma testi numunelerinin mekanik analiz sonucu

ASTM basma testlerinin modellenmesiyle uygulanan mekanik testler sonucunda, CF0 ABS numunesinin basma gerilmeleri, Performance ABS numunelerine göre daha büyüktür. Buna bağlı olarak CF0 ABS numunesinin şekil değiştirme enerjileri daha küçüktür

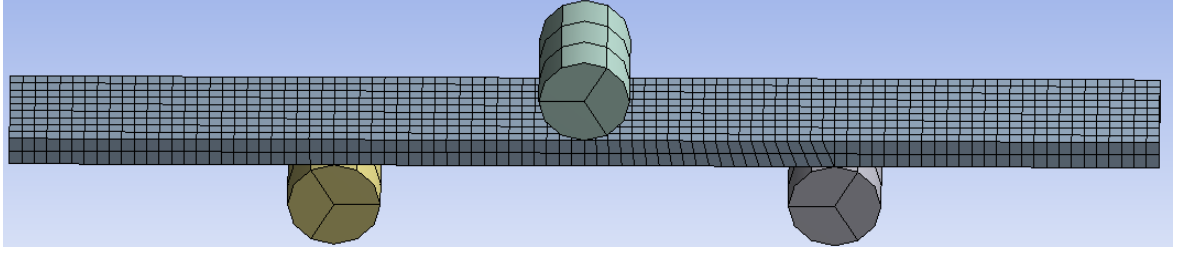
4.2.3. Eğilme Testi Numunelerinin Mekanik Analiz Sonuçları

Performance ABS filament kullanılarak üretilen numunelere, uygulanan ASTM D790 plastik malzemelerin üç nokta eğilme testiyle elde edilen mekanik özellikler ve Ek 1.'de bulunan teknik veri formundan elde edilen malzeme özellikleri referans alınarak ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 4.15'de verilmiştir.

Çizelge 4.15 Performance ABS eğilme testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri

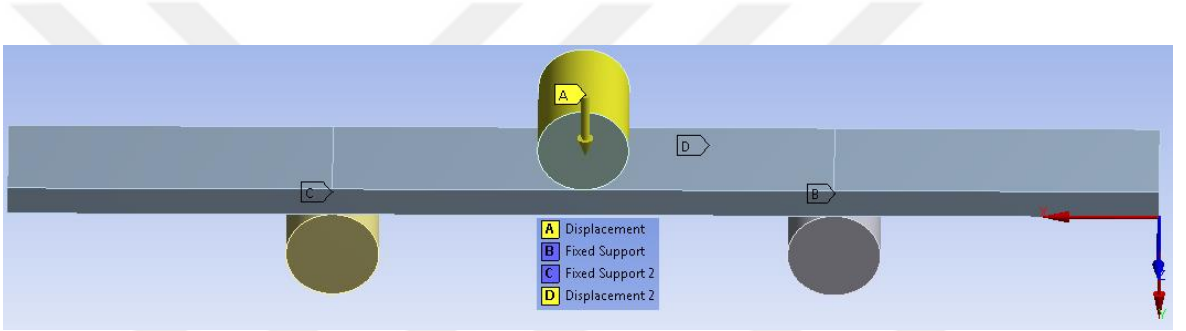
Numune no	Eğilme dayanımı (MPa)	Elastite modülü (MPa)	Maksimum yükleme (mm)	Poisson oranı (mm/mm)	Yoğunluk (kg/m ³)
Ort.	37,37	1431,25	5,95 mm	0,35	1,05

Performance ABS eğilme numunesi için ANSYS öğrenci lisansının müsaade ettiği en küçük mesh değeri 1,3 mm olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.26'de uygulanmıştır.



Şekil 4.30. Performance ABS eğilme testi numunesine uygulanan mesh işlemi

Mekanik analize başlamadan önce, ASTM D790 basma testi (Şekil 4.31) ANSYS programında modellenmiştir. İlk olarak C ve B de noktaları sabitlenmiş, D noktası X yönünde hareket etmemesi için 0 değeri girilmiş, Y yönünde ise serbest bırakılmıştır. A noktasından ise 1,3 mm/dk çene hızı ile eğilme yüküne maruz bırakılmıştır.



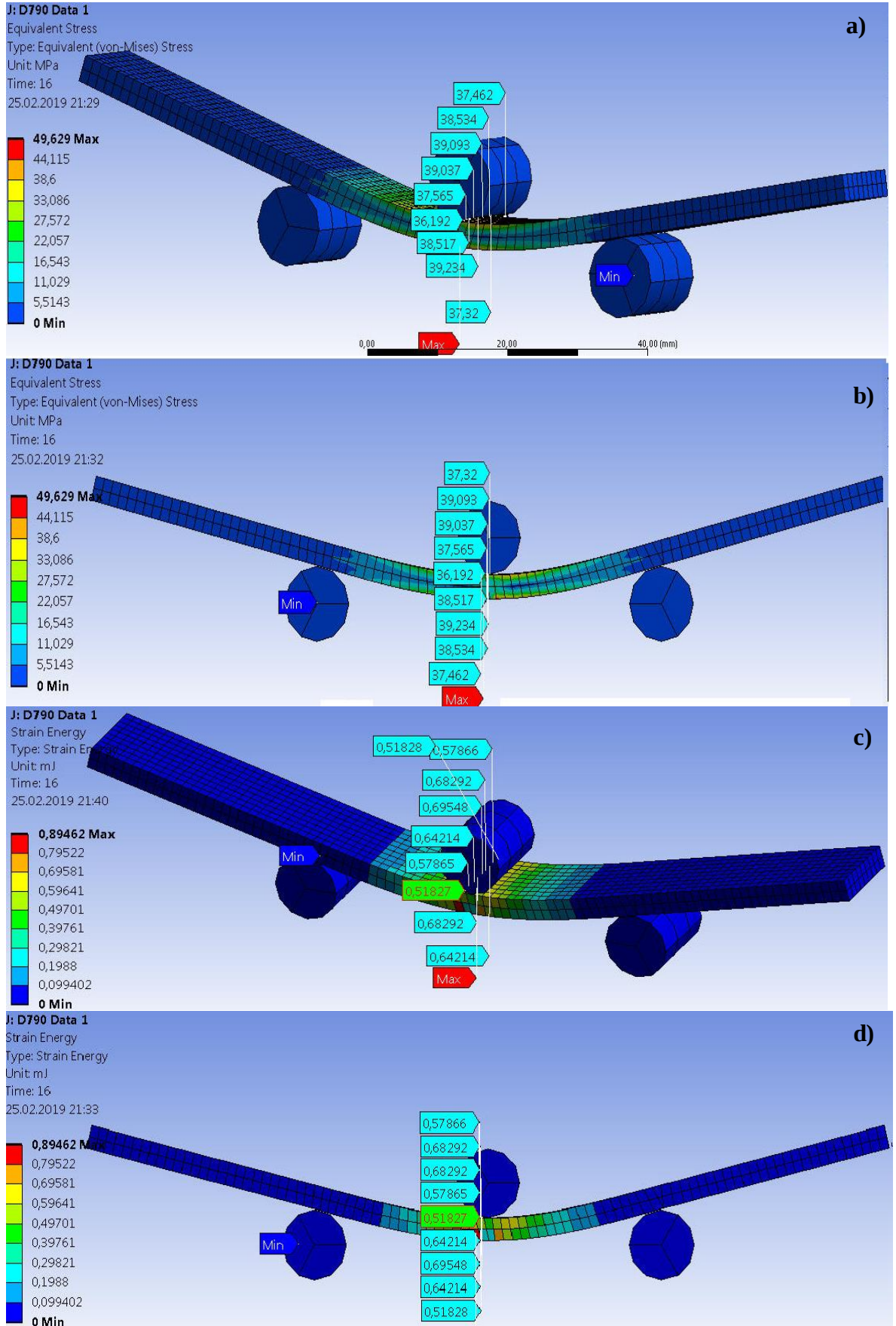
Şekil 4.31. ASTM D790 eğilme testinin ANSYS ile modellenmesi

Uygulanan eğilme kuvveti etkisinde numunede meydana gelen Von Mises'e göre maksimum eğilme dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi Çizelge 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.16. Performance ABS eğilme testi numunesinin mekanik analiz sonucu

Numune no	Eğilme gerilmesi (MPa)	Şekil değiştirme enerjisi (mJ)	Şekil no
Ort. Değer	38,10	0,6154	4.32

Ortalama eğilme kuvveti etkisinde numunede meydana gelen eğilme dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi dağılımı Şekil 4.32'de verilmiştir.



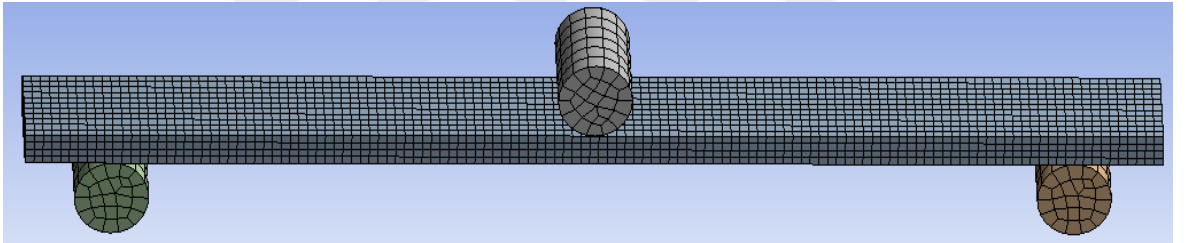
Şekil 4.32. ASTM D790 eğilme testinin; a-b) Eğilme gerilmesi dağılımı, c-d) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı

CF0 ABS filament kullanılarak üretilen numunelere uygulanan ASTM D7264 polimer matris kompozit malzemelerin üç nokta eğilme testiyle elde edilen mekanik özellikler ve Ek 2.'de bulunan teknik veri formundan elde edilen malzeme özellikleri referans alınarak ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri Çizelge 4.17'de verilmiştir.

Çizelge 4.17. CF0 ABS eğilme testi için ANSYS kütüphanesine tanımlanan malzeme özellikleri

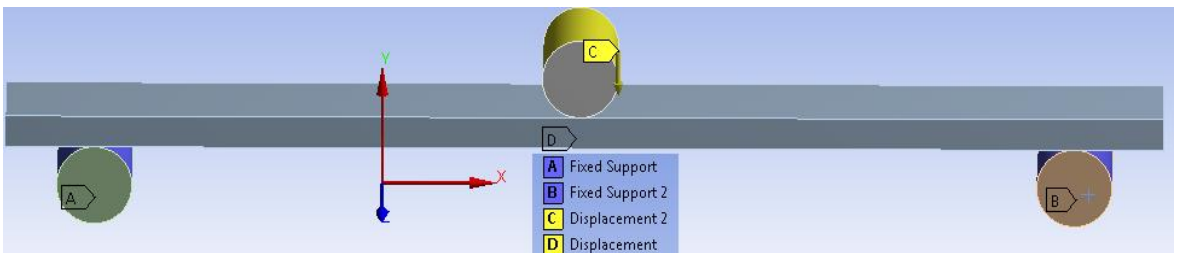
Numune no	Eğilme dayanımı (MPa)	Elastite modülü (MPa)	Uygulanan ort. eğilme kuvveti (N)	Poisson oranı (mm/mm)	Yoğunluk (kg/m ³)
Ort.	42,7	3586,7	94,18 N	0,30	1,08

CF0 ABS eğilme numunesi için ANSYS öğrenci lisansının müsaade ettiği en küçük mesh değeri 1,2 mm olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.33'de uygulanmıştır.



Şekil 4.33. CF0 ABS eğilme testi numunesine uygulanan mesh işlemi

Mekanik analize başlamadan önce, ASTM D7264 basma testi (Şekil 4.34) ANSYS programında modellenmiştir. İlk olarak C ve B de noktaları sabitlenmiş, D noktası X ve Z yönünde hareket etmemesi için 0 değeri girilmiş, Y yönünde ise serbest bırakılmıştır. A noktasından ise 1,3 mm/dk çene hızı ile eğilme yüküne maruz bırakılmıştır.



Şekil 4.34. ASTM D7264 eğilme testinin ANSYS ile modellenmesi

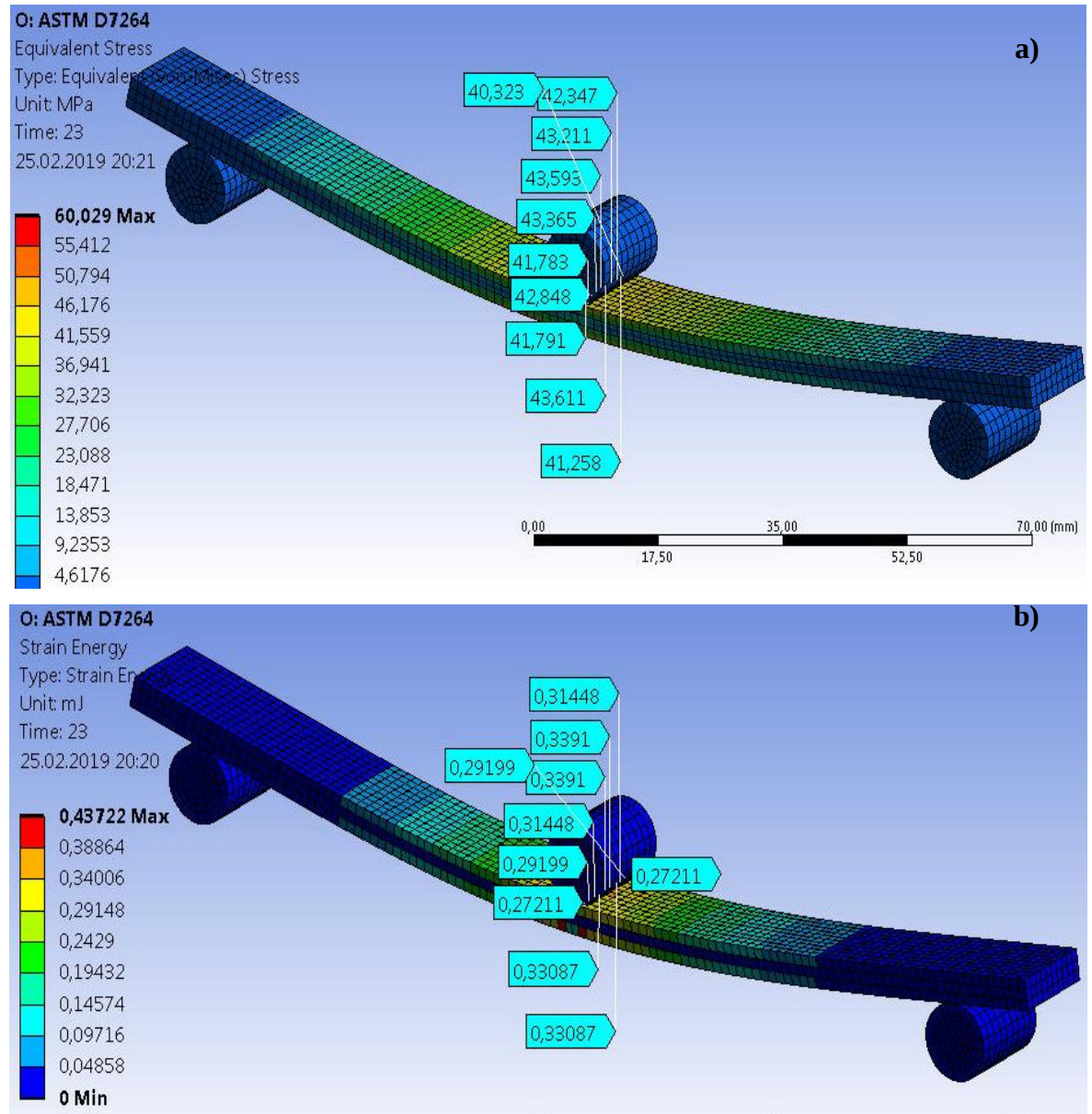
Uygulanan eğilme kuvveti etkisinde numunede meydana gelen Von Mises'e göre

maksimum eğilme dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18. CF0 ABS eğilme testi numunesinin mekanik analiz sonucu

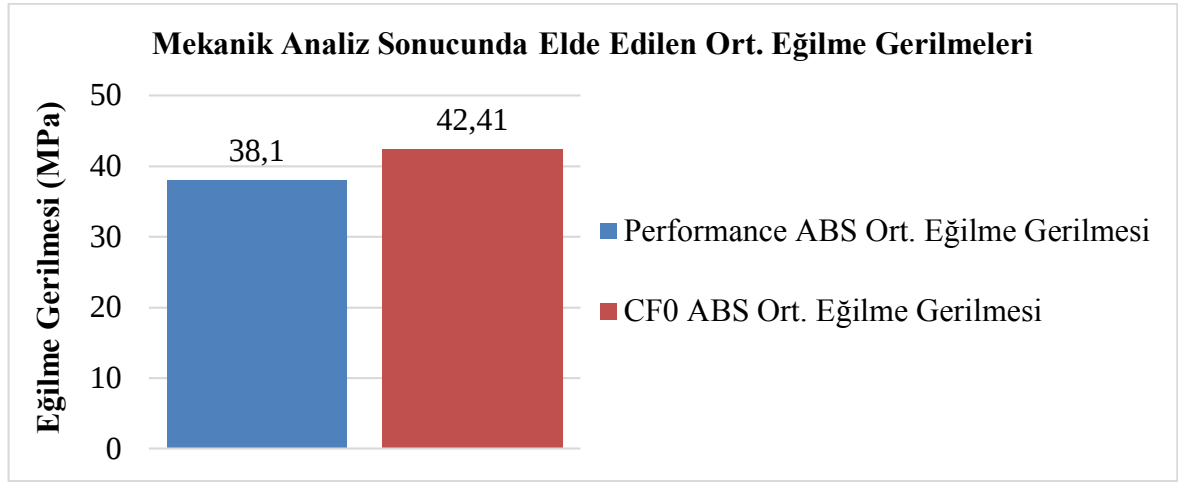
Numune no	Eğilme gerilmesi (MPa)	Şekil değiştirme enerjisi (mJ)	Şekil no
Ort. Değer	42,41	0,3166	4.35

Ortalama eğilme kuvveti etkisinde numunede meydana gelen eğilme dayanımı ve şekil değiştirme enerjisi dağılımı Şekil 4.35’de verilmiştir.



Şekil 4.35 ASTM D7264 eğilme testinin; a) Eğilme gerilmesi dağılımı, b) Şekil değiştirme enerjisi dağılımı

ASTM D790 ve ASTM D7264 eğilme testlerinin modellenmesiyle elde edilen eğilme gerilmeleri Şekil 4.36’da gösterilmiştir.



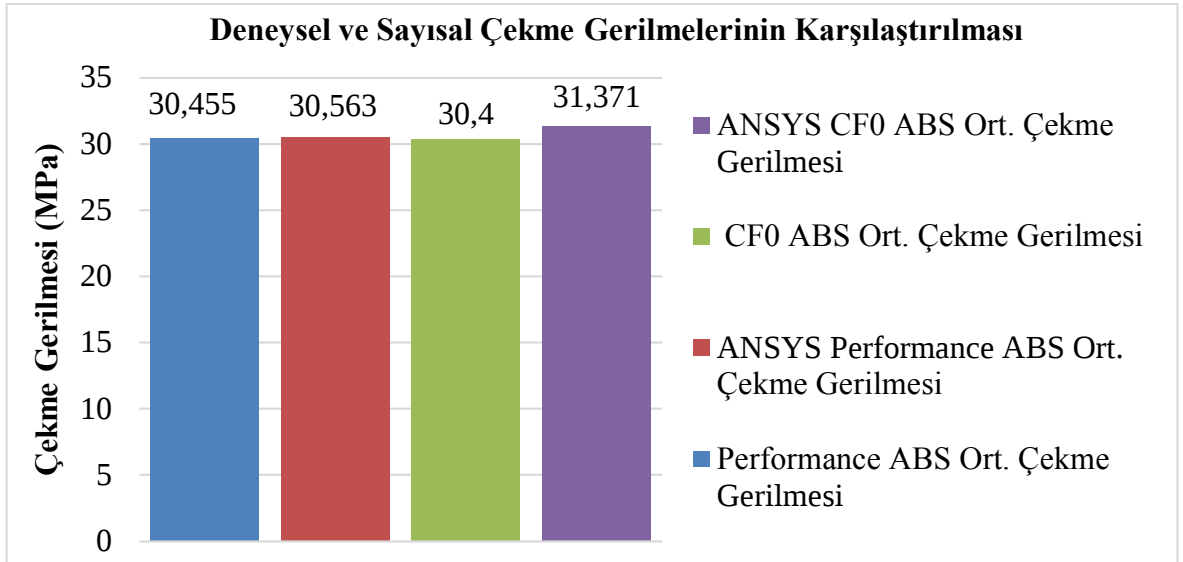
Şekil 4.36. Eğilme numunelerinin mekanik analiz sonucu

ASTM eğilme testlerinin modellenmesiyle uygulanan mekanik testler sonucunda, CF0 ABS numunesinin eğilme gerilmeleri, Performance ABS numunelerine göre daha büyüktür.

4.3. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi

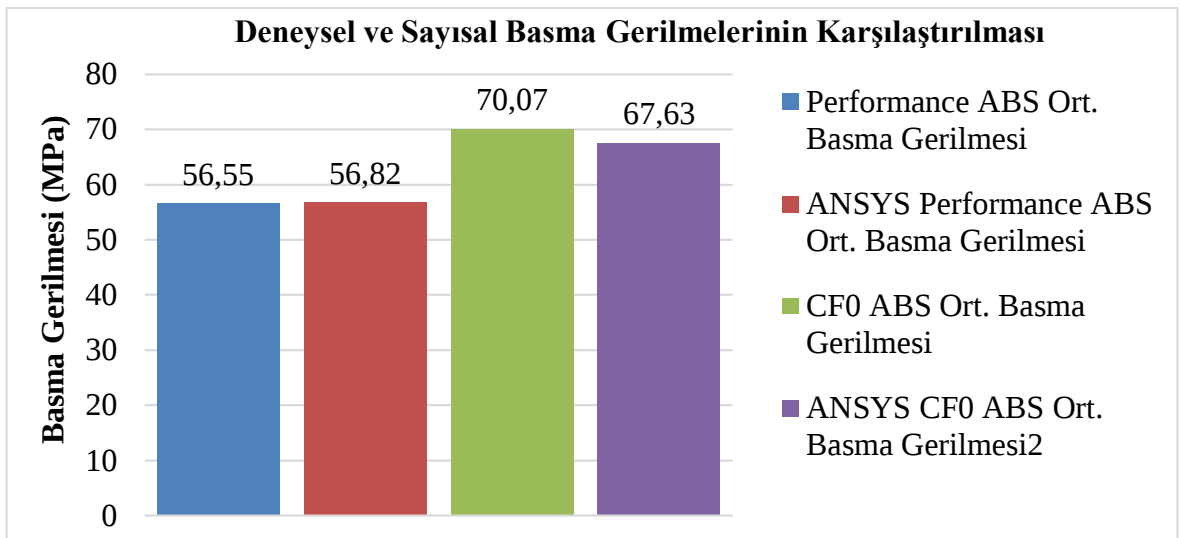
Mekanik test sonuçlarıyla deneysel olarak elde edilen çekme, basma, eğilme gerilmeleri ile ANSYS Workbench programı statik analiz modülünde gerçekleştirilen numerik analiz sonucunda elde edilen Von Mises’a göre maksimum gerilmeler mukayese edilmiştir.

Deneysel ve sayısal olarak elde edilen ortalama çekme gerilmeleri (Şekil 4.37) karşılaştırıldığında, En büyük çekme gerilmesi CF0 ABS numunelerine uygulanan mekanik analiz sonucunda 31,371 MPa olarak hesaplanmıştır. En küçük çekme gerilmesi ise Performance ABS numunelerine uygulanan mekanik test sonucunda 30,455 MPa olarak ölçülmüştür. Deneysel ve sayısal yöntemler ile elde edilen çekme gerilmelerinin birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.



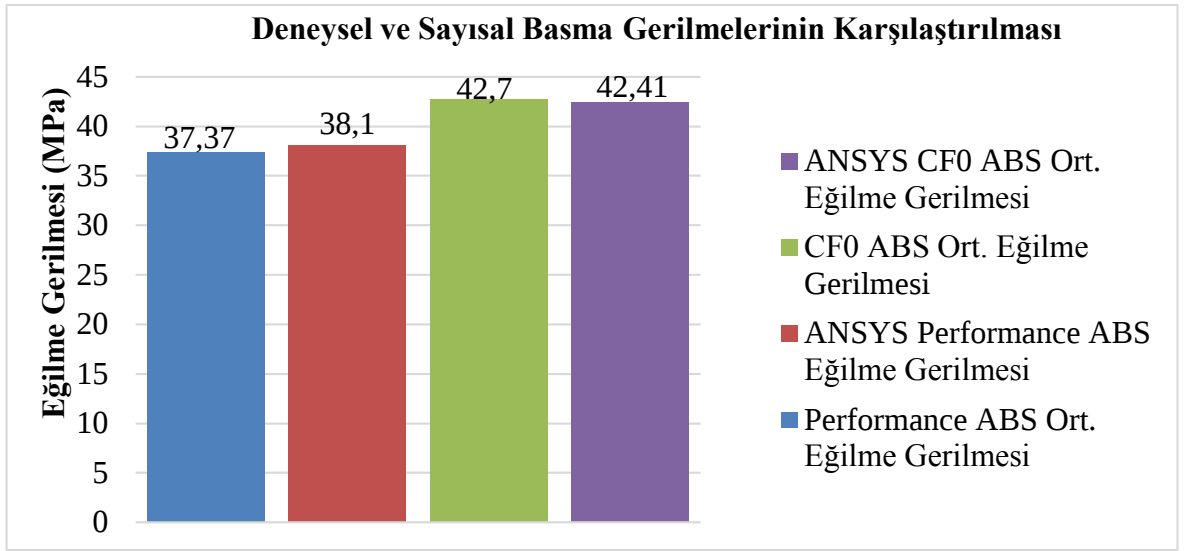
Şekil 4.37. Çekme gerilmelerinin karşılaştırılması

Deneysel ve sayısal olarak elde edilen ortalama Basma gerilmeleri (Şekil 4.38) karşılaştırıldığında, En büyük basma gerilmesi CF0 ABS numunelerine uygulanan mekanik test sonucunda 70,07 MPa olarak hesaplanmıştır. En küçük basma gerilmesi ise Performance ABS numunelerine uygulanan mekanik test sonucunda 56,55 MPa olarak ölçülmüştür. CF0 ABS numunelerinde mekanik analiz sonucunda elde edilen basma gerilmesinin, basma testi sonucunda elde edilen gerilmeden küçük olmasının sebebi, süreksiz karbon fiberlerin ANSYS Workbench programında fiber yöneliminin tanımlanamamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.38. Basma gerilmelerinin karşılaştırılması

Deneyssel ve sayısal olarak elde edilen ortalama eğilme gerilmeleri (Şekil 4.39) karşılaştırıldığında, En büyük eğilme gerilmesi CF0 ABS numunelerine uygulanan mekanik analiz sonucunda 42,41 MPa olarak hesaplanmıştır. En küçük eğilme gerilmesi ise Performance ABS numunelerine uygulanan mekanik analiz sonucunda 37,03 MPa olarak ölçülmüştür. Performance ABS numunelerinin mekanik analiz sonucunda elde edilen eğilme gerilmesinin, mekanik test sonucunda elde edilen eğilme gerilmesinden küçük olmasının sebebi ANSYS Workbench öğrenci versiyonunun müsaade ettiği mesh değerinin büyük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.39. Eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ağırlıkça %12 karbon fiber takviyeli CF0 ABS ve takviyesiz Performance ABS filamentler kullanılarak mekanik test numuneleri üretilmiştir. Numunelerin, FDM ANET A8 3B yazıcıyla üretimi ve işlem parametreleri incelenmiştir. Karbon fiberin, ABS filamentin mekanik özellikleri (basma dayanımı, eğilme dayanımı) etkilediği görülmüştür. Deneysel yöntemler ile elde edilen mekanik özellikler referans alınarak ANSYS Workbench programında gerçekleştirilen numerik analizlerde karbon fiberin mekanik özelliklere etkisini ortaya koymuştur.

CF0 ABS filamentin mekanik özelliklerinin Performance ABS filamente göre daha iyi olması, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin 3B baskı teknolojilerinde kullanımı açısından umut vericidir. Fakat termoplastik filamentlerin, geleneksel yöntemler ile üretilen takviyeli polimer kompozitlere göre daha düşük mekanik özellik sergilemeleri 3B baskı teknolojisinin yaygınlaşmasını da engelleyen en büyük etkenlerden birisidir. Termoplastik filamentlerin karbon fiber, cam elyaf, kevlar gibi takviye elemanlarıyla takviye edildiğinde mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi farklı mühendislik uygulamalarında kullanılabilir olması açısından önem kazanmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen ana sonuçlar şu şekildedir:

- FDM ANET A8 3B yazıcı kullanılarak, karbon fiber takviyeli/takviyesiz termoplastik numunelerin üretimi tamamlanmıştır.
- CF0 ABS ve Performance ABS ile üretilen numunelere ASTM standartlarına uygun olarak çekme, basma, eğilme testleri uygulanmıştır. Her test grubu için beşer adet numune üretilmiştir. Standart sapma değerini yükselten numuneler değerlendirilmemiştir.
- Üretilen numunelerin tamamı ASTM test standartlarına uygun olarak üretilmiştir.
- Deneysel yöntemlerle elde edilen mekanik özellikler referans alınarak ANSYS Workbench programında mekanik testler (çekme, eğilme, basma) modellenmiş ve analiz uygulanmıştır. Literatürden alıntı yapılarak kullanılan Poisson oranı değiştirildiğinde, malzemede meydana gelen gerilmelerin kayda değer şekilde değişmediği gözlemlenmiştir. Farklı kuvvetlerin etkisinde (çekme, basma, eğilme) Von Mises'a göre maksimum gerilmesi ve şekil değiştirme enerjisi analiz edilmiştir.
- Üretimde meydana gelecek hataların (eksen kayması, plastik çekme, ısı transferleri gibi) önüne geçmek için ANET A8 3B yazıcıya iyileştirmeler yapılmıştır.

- 3B yazıcı ile son kullanıma hazır parçaların üretiminin bilgisayar destekli olarak kolay bir üretim yöntemi olduğu gösterilmiştir.
- Üretilen çekme testi numuneleri çekme yüküne tabi tutulmuş ve yük etkisi altında mekanik olarak karakterize edilmiştir. Performance ABS numunelerin ortalama çekme dayanımının 30,455 MPa, CF0 ABS numunelerinin ise 30,40 MPa olarak hesaplanmıştır. Çekme yükü etkisinde meydana gelen gerilmelerin birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Fakat numunelerin tamamı değerlendirilmeye tabii tutulduğunda CF0 ABS numunelerinin standart sapma değerlerinin düşük olması daha başarılı üretimin gerçekleştirildiğini göstermektedir.
- ANSYS Workbench programında çekme testlerinin modellenmesiyle uygulanan mekanik analizler sonucunda, Performance ABS ve CF0 ABS numunelerinde meydana gelen Von Mises'a göre maksimum çekme gerilmesi sırasıyla 30,563 MPa ve 31,371 MPa elde edilmiştir. Deneysel ve sayısal yöntemler ile elde edilen çekme gerilmelerinin birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.
- Performance ABS ve CF0 ABS filamentlerine ait malzeme teknik veri formunda verilen çekme dayanımı sırasıyla 43 MPa ve 52 MPa değerleri referans alındığında Performance ABS numunesinin çekme dayanımının %29,17 azaldığı, CF0 ABS numunesinin %41,53 azaldığı tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak yüksek sıcaklıklara ısıtılarak uygun viskozite elde edilen termoplastik filamentlerin ısıtıldığında mekanik özellikleri olumsuz etkilendiği sonucuna varılmaktadır. Ayrıca mekanik özellikleri etkileyen diğer bir faktör olarak baskı sırasında katmanların yeteri kadar birbirine yapışmaması mekanik özellikleri olumsuz etkilediği düşünülmüştür.
- Performance ABS numunelerin çekme yükü etkisinde ortalama yüzde şekil değişikliğinin %2,52, CF0 ABS numunelerin ortalama yüzde şekil değişikliği %1,619 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre Performance ABS numuneleri, CF0 ABS numunelerine göre daha sünek bir davranış göstermektedir.
- Performance ABS numunelerin çekme yükü etkisinde ortalama Elastisite modülü 1569,17 MPa, CF0 ABS numunelerin ise 2634,60 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre CF0 ABS numunelerinin çekme yükü etkisinde, Performance ABS numunelerine göre %67,9 daha iyi elastisite modülüne sahip olduğunu göstermektedir.
- Üretilen basma testi numuneleri basma yüküne tabi tutulmuş ve yük etkisi altında mekanik olarak karakterize edilmiştir. Performance ABS numunelerin ortalama basma dayanımının 56,55 MPa, CF0 ABS numunelerinin ise 70,07 MPa olarak hesaplanmıştır.

Bu gerilme değerlerine göre CF0 ABS numunelerinin basma kuvveti etkisinde, Performance ABS numunelerine göre %23,9 daha iyi basma dayanıma sahip olduğunu göstermektedir.

- ANSYS Workbench programında basma testlerinin modellenmesiyle uygulanan mekanik analizler sonucunda, basma kuvveti etkisinde Performance ABS ve CF0 ABS numunelerinde meydana gelen Von Mises'a göre maksimum basma gerilmesi sırasıyla 56,82 MPa ve 67,384 MPa elde edilmiştir. CF0 ABS numunelerinde mekanik analiz sonucunda elde edilen Von Mises gerilmesinin, basma testi sonucunda elde edilen gerilmeden %3,83 oranında düşük olduğu belirlenmiştir.
- Performance ABS numunelerin basma yükü etkisinde; ortalama yüzde şekil değişikliğinin %6,416, CF0 ABS numunelerin ortalama yüzde şekil değişikliği %1,082 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre Performance ABS numuneleri basma yükü etkisinde, CF0 ABS numunelerine göre daha sünek bir davranış göstermektedir.
- Performance ABS numunelerin basma yükü etkisinde ortalama Elastisite modülü 2190,82 MPa, CF0 ABS numunelerin ise 3056,10 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre CF0 ABS numunelerinin basma kuvveti etkisinde, Performance ABS numunelerine göre %39,495 daha iyi elastisite modülüne sahip olduğunu göstermektedir.
- Üretilen eğilme testi numuneleri üç nokta eğilme testine tabi tutulmuş ve yük etkisi altında mekanik olarak karakterize edilmiştir. Performance ABS numunelerin ortalama eğilme dayanımının 37,37 MPa, CF0 ABS numunelerinin ise 42,88 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu gerilme değerlerine göre CF0 ABS numunelerinin eğilme kuvveti etkisinde, Performance ABS numunelerine göre %14,75 daha iyi eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir.
- ANSYS Workbench programında eğilme testlerinin modellenmesiyle uygulanan mekanik analizler sonucunda, eğilme kuvveti etkisinde Performance ABS ve CF0 ABS numunelerinde meydana gelen Von Mises'a göre maksimum eğilme gerilmesi 38,10 MPa ve 42,41 MPa elde edilmiştir. Deneysel ve sayısal yöntemler ile elde edilen eğilme gerilmelerinin birbirine yakın olduğu sonucuna varılmıştır.
- Performance ABS ve CF0 ABS filamentlerine ait malzeme teknik veri formunda verilen eğilme dayanımı sırasıyla 70 MPa ve 66 MPa değerleri referans alındığında Performance ABS numunesinin eğilme dayanımının %46,614 azaldığı, CF0 ABS numunesinin %35,03 azaldığı tespit edilmiştir.

- Performance ABS numunelerin eğilme yükü etkisinde ortalama yüzde şekil değişikliğinin %3,803, CF0 ABS numunelerin ortalama yüzde şekil değişikliği %1,764 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre Performance ABS numuneleri eğilme yükü etkisinde, CF0 ABS numunelerine göre daha sünek bir davranış göstermektedir.
- Performance ABS numunelerin eğilme yükü etkisinde ortalama Elastisite modülü 1431,25 MPa, CF0 ABS numunelerin ise 3586,70 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre CF0 ABS numunelerinin eğilme kuvveti etkisinde elastisite modülünün, Performance ABS numunelerine göre 2,506 kat daha iyi elastisite modülüne sahip olduğunu göstermektedir.
- Deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Sonuçlardan yola çıkarak, CF0 ABS numunelerinin mekanik özelliklerinin nispeten Performance ABS numunelerine göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlara göre karbon fiber ile takviye edilen ABS filamentin mekanik özelliklerinin iyileştirildiği ortaya koyulmuştur. Literatür araştırmasında 3B yazıcı teknolojilerinde kullanılan kompozit termoplastik filamentler ile ilgili yapılan çalışmaların az olmasından dolayı tercih edilmiştir.

Termoplastik filamentlerin mekanik özelliklerinin baskı sonrasında azalmasına istinaden, 3B yazıcı teknolojisinde kullanılacak takviyeli/takviyesiz termoplastik filamentler için daha detaylı araştırmalar ve çalışmalar yapılması gerekmektedir. Çalışmada üretilen numuneler farklı baskı parametrelerinde üretilerek aynı testlere tabii tutulup mekanik özelliklerinin araştırılması literatür açısından yararlı olacağı düşünülmektedir.

Öngörü olarak, 3B yazıcı ile üretilen takviyeli polimer kompozit parçaların mekanik performanslarının iyi olması durumunda kullanımı yaygınlaşacaktır. Buna bağlı olarak geleneksel üretim yöntemlerinde bulunan kalıp maliyetleri ortadan kalkacak, bilgisayar destekli hatasız ve kolay son kullanıma hazır parçalara üretilecektir.

KAYNAKLAR

- ASTM D638-14., 2014. Standart Test Method for Tensile Properties of Plastics, West Conshohocken, PA, United States: ASTM International.
- ASTM D3039/D3039M-17., 2017. Standart Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken, PA, United States: ASTM International.
- ASTM D695-15., 2015. Standart Test Method for Compressive Properties of Plastics, West Conshohocken, PA, United States: ASTM International.
- ASTM D6641/D6641M-16., 2016. Standart Test Method for Compressive Properties Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken, PA, United States: ASTM International.
- ASTM D790-10., 2010. Standart Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, West Conshohocken, PA, United States: ASTM International.
- ASTM D7264/D7264M-07., 2007. Standart Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, West Conshohocken, PA, United States: ASTM International.
- Başara G., 2017. Mechanical strength of 3D printed objects: experimental and numerical investigation, Master of Science in Mechanical Engineering Department (Master of Science Thesis), Middle East Technical University, Türkiye.
- Chacón J.M., Caminero M.A., García-Plaza E., Núñez P.J., Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection, Mater. Des. 124 (2017) 143–157. doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065.
- Comb, J. W. and Priedeman W. R., 1993. Control Parameters and Material Selection Criteria for Rapid Prototyping Systems, Solid Freeform Fabrication Symposium.
- Comb, J.W., Priedeman W.R., Leavit P.J., Skubic R.L., Batchelder J.S., 2005. High-Precision Modeling Filament, Patent.

- Cooke M.N., Fisher J.P., Dean D., Rimnac C., Mikos A.G., 2002. Use of Stereolithography to Manufacture Critical Sized 3D Niodegradable Scaffolds for Bone in Growth, Journal of Biomedical Materials Research Part, 64 (B), 65-69.
- Çelik D., Çetinkaya K., 2016. Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımları, Protipleri ve Ürün Yazdırma Karşılaştırmaları, İleri Teknolojileri Bilimleri Dergisi, 5:2
- Demirel A., 2007. Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye.
- Dudek P., 2013. FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements, Archives of Metallurgy and Materials (Arch. Metall. Mater.), 58 (4), 1415-1418
- Eren O., 2017. FDM 3B Yazıcı ile Kompozit Parça Tasarımı ve Mekanik Özelliklerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye.
- Flowers J., 2000. 3D laser scanning in technology education, Technology Teaching, 60 (3), 27-30.
- Kai C.C., Fai L.K., Chu-Sing L., 2003. Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing, 2nd ed. Singapore: World Scientific Publishing.
- Kolarevic B., 2001. Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age, Proceedings of Association for Computer Aided Design in Architecture, 268-277.
- Koslow T. (10 Eylül 2018). Anet A8 Review. 30 Eylül 2018, <https://all3dp.com/1/anet-a8-3d-printer-review-diy-kit/>
- Kruth J.-P., Leu M.C., Nakagawa T., 1998. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, Keynote Papers, 47(2), 525-540.
- Kruth J.P., Wang X., Laoui T., Froyen L., 2003. Lasers and Materials in Selective Laser Sintering, Assembly Automation, 23 (4), 357-371.
- Mallick P.K., 2007. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, CRC Press Taylor & Francis Group., ISBN-13: 978-0-8493-4205-9, AB.
- Marcincinova L.N., Marcincin J.N., Barna J., Torok J., 2012. Special Materials Used in FDM Rapid Prototyping Technology Application, Proceedings of IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES), Lisbon, 73-76.

- Mehmet Z., (21 Şubat Eylül 2019). Kompozit Malzeme Mekanığı. 22 Şubat 2019, <http://mehmetzor.com/dersler/kompozit-malzeme-mekanigi/ders-notlari/>
- Nidagundi V.B., 2015. Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modelling Process, *Materials Today: Proceedings*, 1691-1699.
- Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S., 2015. Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling, *Composites Part B* 80, 369-378.
- Park J., Tari M.J., Hahn H.T., 2000. Characterization of The Laminated Object Manufacturing (LOM) Process, *Rapid Prototyping Journal*, 6 (1), 36-50.
- Rao, R. V. ve Rai D. P., 2016. Optimization of Fused Deposition Modeling Process Using Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19, 587-603.
- Sezer K. H., Eren O., Börklü R. H., 2017. Ergiyik Biriktirme Yöntemi İle Karbon Fiber Takviyeli Plastik Kompozitlerin Eklemeli İmalatı: İşlem Parametrelerinin Çekme Özelliklerine Etkisi, 2nd International Symposium On 3D Printing Technologies, 3-4 Nisan 2017, Türkiye.
- Şahin Y., 2000. Kompozit Malzemelere Giriş. Ankara: Gazi Kitabevi, 73-74.
- Tekinalp H.L., Kunc V., Velez-Garcia G.M., Duty C.E., Love L.J., Naskar A.K., 2014. Highly Oriented Carbon Fiber-Polymer Composites Via Additive Manufacturing. *Composite Science Technology*, 105 (10), 144-150.
- Vilaro T., Abed S., Knapp W., 2008. Direct manufacturing of technical parts using selective laser melting: example of automotive application, *Proceedings of 12th European Forum on Rapid Prototyping*.
- Williams J.V., Revington R.J., 2010. Novel use of an aerospace selective laser sintering machine for rapid prototyping of an orbital blowout fracture, *International Journal of Oral Maxillofacial Surgery* 39, 182–184.
- Zein, I. et al., 2002. Fused Deposition Modeling of Novel Scaffold Architectures for Tissue Engineering Applications, *Biomaterials* 23:1169-1185.

Zhang L., Zhou H., 2014. Quasi-static Mechanical Response and Corresponding Analytical Model of Laminates Incorporating with Nanoweb Interlayers, Composite Structures, 111, 436-445.



EKLERİ

EK 1. Performance ABS Filament Teknik Veri Formu



OO-KUMA 3D PRINTING FILAMENTS
WWW.OO-KUMA.COM

Technical Data Sheet (ISO)

ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) PerformanceABS

Features Low warping, Easy flow, Medium-High impact strength, Dimensional stability
Characteristics High heat resistance, Extreme ease of support removability

Physical	Test Method	Value
Specific gravity	ISO 1183	1.05 g/cm ³
Water absorption	ISO 62	0.2 - 0.5 %
Mold Shrinkage	ISO 294-4	0.4 ~ 0.7 %

Mechanical	Test Method	Value
Tensile Strength(at yield)	ISO 527	43 Mpa
Elongation(at break)	ISO 527	40 %
Flexural Strength	ISO 178	70 MPa
Flexural Modulus	ISO 178	2,100 Mpa
Izod Impact Strength(23°C)	ISO 180/1A	19 KJ/m ²
Charpy Impact Strength(23°C)	ISO 179/1eA	no break
Rockwell Hardness(R scale)	ISO 2039-2	109

Thermal	Test Method	Value
Heat Deflection Temperature(1.8Mpa, Annealed)	ISO 75-2	100°C
Heat Deflection Temperature(0.45Mpa, Under Load)	ISO 75-2	104°C
Vicat Softening Temperature(B50)	ISO 306	102°C

Flammability	Test Method	Value
Flame Rating - UL (1.6mm)	ISO 1210	HB

EK 2. CF0 ABS Filament Teknik Veri Formu



OO-KUMA 3D PRINTING FILAMENTS
WWW.OO-KUMA.COM

Technical Data Sheet (ISO)

Carbon-Fiber Reinforced ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) CF0

Features Low warping, Extreme strength, High dimensional stability
Characteristics Surface Conductivity, Enhanced mechanical properties

Physical	Test Method	Value
Specific gravity	ISO 1183	1.08 g/cm ³
Water absorption	ISO 62	0.23 %
Mechanical	Test Method	Value
Tensile Strength(at yield)	ISO 527	52 Mpa
Elongation(at break)	ISO 527	2-3%
Flexural Strength	ISO 178	66 MPa
Flexural Modulus	ISO 178	7,100 Mpa
Izod Impact, unnotched (23°C)	ISO 180/1U	15 KJ/m ²
Izod Impact, notched (23°C)	ISO 180/1A	7 KJ/m ²
Thermal	Test Method	Value
Heat Deflection Temperature(1.8Mpa, Annealed)	ISO 75/Af	99°C
Heat Deflection Temperature(0.45Mpa, Under Load)	ISO 75/Bf	104°C

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Zeki Yahya PATAN

Doğum Yeri : Giresun

Doğum Tarihi : 12.08.1993

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Selçuk Üniversitesi, Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

Bildiriler -Uluslararası –Ulusal

Patan, Y. Z., Eskizeybek V., “Production of Carbon Fiber Reinforced ABS Composites with FDM 3D Printer and Modelling with ANSYS”, “II. INTERNATIONAL JOINT SCIENCE CONGRESS OF MATERIALS AND POLYMERS (ISCMP ALBANIA 2018)”, Durres, Arnavutluk, 9-12 Kasım 2018, pp.79-133

İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl :

Kalesemt Asansör San. Tic. Ltd. Şti., Bakım Mühendisi, (2018 – Devam Ediyor.)

Patan Mühendislik, Firma Sahibi, (2017 – Devam Ediyor.)

İLETİŞİM

E-posta Adresi : yahyapatan@gmail.com

İnternet Sitesi : www.patanmühendislik.com