FARKLI TİPTE ELYAFLAR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ TERMOPLASTİK TABANLI KOMPOZİT MALZEMELERİN LİNEER OLMAYAN VE ANİZOTROPİK MALZEME MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE SİMÜLASYONLARDA KULLANILMASI

Ayşe POLAT

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TİPTE ELYAFLAR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ TERMOPLASTİK TABANLI KOMPOZİT MALZEMELERİN LİNEER OLMAYAN VE ANİZOTROPİK MALZEME MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE SİMÜLASYONLARDA KULLANILMASI

Ayşe POLAT
0000-0003-2168-431X

Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

FARKLI TİPTE ELYAFLAR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ TERMOPLASTİK TABANLI KOMPOZİT MALZEMELERİN LİNEER OLMAYAN VE ANİZOTROPİK MALZEME MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE SİMÜLASYONLARDA KULLANILMASI

Ayşe POLAT

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Babür Deliktaş

Bu tez çalışmasında, kısa ve sürekli elyaflarla güçlendirilmiş termoplastik kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının modellenmesi ve bu modellerin sonlu elemanlar analizine entegrasyonu ele alınmıştır. Plastik enjeksiyon sürecinin, malzemelerin anizotropik ve doğrusal olmayan özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Malzeme davranışını modellemek için homogenizasyon yöntemleri (Mori-Tanaka, Ortalama Alan Homojenizasyonu) ve J2 plastiklik teorisi gibi yaklaşımlar kullanılmıştır. Sürekli ve kısa elyaflar için elastik, kısa elyaflar için ayrıca elastoplastik (J2 plastikliği) özellikler göz önünde bulundurulmuştur. Çalışma, elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini tahmin etmek ve bu sonuçları sonlu elemanlar analizlerinde kullanmak için bir yöntem önermektedir.

Tezde ayrıca, plastik enjeksiyon süreçleri, süreç parametrelerinin etkileri ve üretim sırasında karşılaşılan hata türleri detaylı şekilde incelenmiştir. Malzemenin anizotropik davranışını etkileyen fiber yönelimi ve kaynak izleri gibi parametreler değerlendirerek doğruluk oranı yüksek simülasyon sonuçlarına ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, geliştirilen modelin termoplastik kompozit malzemelerin davranışını etkili bir şekilde temsil ettiği ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilir olduğu gösterilmiştir. Bu sayede, malzeme tasarım süreçlerinin optimize edilmesi ve üretim hatalarının önlenmesine yönelik önemli bir katkı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elyaf takviyeli kompozitler, sonlu elemanlar analizi, kalıp akış analizi, plastik enjeksiyon, homojenizasyon
2025, xviii + 141 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DEVELOPMENT OF NONLINEAR AND ANISOTROPIC MATERIAL MODELS FOR THERMOPLASTIC-BASED COMPOSITE MATERIALS REINFORCED WITH DIFFERENT TYPES OF FIBERS AND THEIR USE IN SIMULATIONS

Ayşe POLAT

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Babür Deliktaş

This thesis focuses on the modeling of the mechanical behavior of thermoplastic composite materials reinforced with short and continuous fibers, and the integration of these models into finite element analysis. The effects of the plastic injection molding process on the anisotropic and nonlinear properties of the materials are investigated.

Approaches such as homogenization methods (Mori-Tanaka, Mean-Field Homogenization) and J2 plasticity theory are used to model the material behavior. Elastic properties for continuous and short fibers, and additionally elastoplastic (J2 plasticity) properties for short fibers are considered. This study proposes a method for predicting the mechanical properties of fiber-reinforced composites and using these results in finite element analyses.

The thesis also examines plastic injection molding processes, the effects of process parameters, and the types of defects encountered during production in detail. High-accuracy simulation results are achieved by evaluating parameters such as fiber orientation and weld lines, which affect the anisotropic behavior of the material.

In conclusion, it is shown that the developed model effectively represents the behavior of thermoplastic composite materials and can be used in engineering applications. Thus, a significant contribution is made to optimizing material design processes and preventing production defects.

Key words: Fiber-reinforced plastics, finite element analysis, mold flow analysis plastic injection, homogenization
2025, xviii + 141 pages.

ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR

Öncelikle, tezimin her aşamasında engin bilgi birikimi, sabrı ve yol göstericiliği ile beni yönlendiren, değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Babür Deliktaş'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin akademik bakış açısı ve teşvikleri, bu çalışmanın şekillenmesinde büyük rol oynamıştır.

Tez izleme komitemde yer alarak değerli katkıları ve yapıcı eleştirileriyle tezime yön veren Sayın Prof. Dr. Murat Yazıcı ve Sayın Prof. Dr. Mustafa Özgür Yaylı hocalarıma teşekkür ederim.

Bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Adem Doğangün'e ve bölümümüzün değerli öğretim üyelerine, doktora eğitimim boyunca verdikleri destek, bilgi birikimi ve sundukları verimli çalışma ortamı için teşekkürlerimi sunarım.

Mekanik Grubu'ndaki, Dr. Aiman Tariq ve Gökçen Kurt'a tez kapsamında yapılan çalışmalara katkılarından dolayı minnettarım. Ayrıca Dr. Ögr. Üyesi Büşra Uzun ve Cem İbrahim Kapcı da dahil olmak üzere tüm ekip arkadaşlarıma bu süreçte gösterdikleri dayanışma ve yardımlaşma için teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimde edindiğim bilgi birikimine önemli katkıları olan Sayın Doç. Dr. Fuad Okay'a akademik ilerlemem konusundaki teşviki için teşekkür ederim.

TÜBİTAK 119C089 numaralı proje kapsamında, tez çalışmamı desteklediği ve bursiyer olarak fon sağladığı için Proje Yürütücüsü Prof. Dr. Murat Yazıcı'ya, Tübitak'a ve Vimansys firmasına ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu zorlu süreçte bana her zaman sonsuz destek veren, sabırla yanımda olan ve beni motive eden sevgili aileme ve biricik kızım Nil'e en derin sevgilerimle teşekkür ederim. Onların varlığı ve inançları, bu çalışmanın tamamlanmasında en büyük motivasyon kaynağım olmuştur.

Ayşe POLAT
20/02/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ xv
ÇİZELGELER DİZİNİ xviii
1. GİRİŞ…….. 1
1.1. Genel Arka Plan ve Motivasyon 1
1.2. Problem Tanımı 2
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı 4
1.4. Tez Düzeni ve Yapısı 5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 6
2.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler 6
2.2. Homojenizasyon Yöntemleri 8
2.3. Plastik Enjeksiyon Üretim Yöntemi 13
2.4. Kalıp Akış Analizi 16
2.5. Digimat……. 19
3. MATERYAL ve YÖNTEM 22
3.1. Plastik Enjeksiyon Makinesi 22
3.1.1. Plastik enjeksiyon süreci adımları 23
3.1.2. Plastik enjeksiyon sürecini etkileyen parametreler 25
3.1.3. Enjeksiyon sonucu oluşabilecek muhtemel hatalar 26
3.2. Kalıp Akış Analizi, Fiber Oryantasyon ve Birleşme İzi Etkisi 28
3.2.1. Kalıp akış analizi önemi ve etkileri 28
3.2.2. Fiber oryantasyonunun önemi ve etkileyen faktörler 31
3.2.3. Birleşme izi oluşumu ve etkisi 34
3.3. Ortalama Alan Homojenizasyon Yaklaşımı 37
3.4. Farklı Tipte Elyafla Güçlendirilmiş Kompozitlerin Makine Öğrenimi Algoritmaları Kullanılarak Makroskobik Davranışın Tahmin Edilmesi 38
3.4.1. Elastik matrisli sürekli elyaf takviyeli kompozit için Mori-Tanaka yöntemi 38
3.4.2. Elastoplastik matrisli kısa elyaf takviyeli kompozit için Mori-Tanaka yöntemi 45
3.5. Anizotropik Kompozit Malzemeler için Sistematik Hesaplamalı Modelleme Yöntemi……. 52
3.6. Fiber Oryantasyon Etkisinin Entegre Edildiği Model ile Geleneksel Model Analizleri……. 55
3.6.1. Açık delikli numunenin çekme testi analizi 56
3.6.2. Braket dayanım testi analizleri 59
3.7. Fiber Oryantasyon, Birleşme İzi, Enjeksiyon Dolum Yeri ve Sayısının Mekanik Dayanım Üzerine Etkisi 64
3.7.1. Açık delikli numunenin doğrusal olmayan çekme testi analizi 65
3.7.2. Kapak parçasının mekanik dayanım testi analizi 68
3.8. İnce Duvarlı ve Değişken Kesitli Kolonlarda Dolum Yeri ve Sayısının Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi 73
3.8.1. İnce duvarlı ve değişken kesitli kolonlarda geleneksel model kullanarak sonlu elemanlar burkulma analizi 73

3.8.2. İnce duvarlı ve değişken kesitli kolonlarda gerçek malzeme verisinin entegre edildiği modelde sonlu elemanlar burkulma analizi 75
3.8.3. İnce duvarlı ve değişken kesitli kolonlarda yük taşıma kapasitesi analizi 79
3.9. Çarpışma Kutusu (Crash-Box) Analizinde Fiber Oryantasyon ve Birleşme izi Etkilerinin İncelenmesi 80
3.9.1. Çarpışma kutularının geleneksel model kullanarak sonlu elemanlar analizi 82
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 84
4.1. Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitin Makroskopik Davranışını Tahmin Etmek için Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Performans Değerlendirmesi 84
4.1.1 Bayes optimizasyonu ile parametre ayarlama sonuçları 84
4.1.2 Boosting modellerinin performans değerlendirmesi 85
4.2. Kısa Elyaf Takviyeli Polimerlerin Elastoplastik Davranışını Tahmin Etmek için Eğitilmiş Makine Öğrenimi Modellerinin Performans Değerlendirmesi 89
4.3. Fiber Oryantasyon Etkisinin Entegre Edildiği Model ile Geleneksel Model Analiz Sonuçları…….. 95
4.3.1. Açık delikli numune çekme testinin analiz sonuçları 95
4.3.2. Braket dayanım testinin analiz sonuçları 100
4.4. Fiber Oryantasyon ve Birleşme İzinin Entegre Edildiği Farklı Enjeksiyon Dolum Yeri ve Sayısına Sahip Modellerin Mekanik Dayanım Analiz Sonuçları 102
4.4.1. Açık delikli numune doğrusal olmayan çekme testinin analiz sonuçları 102
4.4.2. Kapak parçasının mekanik dayanım testi analiz sonuçları 106
4.5. İnce Duvarlı ve Değişken Kesitli Kolonlarda Farklı Dolum Yeri ve Sayısına Sahip Modellerin Burkulma ve Yük Taşıma Kapasitesi Analiz Sonuçları 110
4.5.1. Geleneksel model burkulma analiz sonucu 110
4.5.2. Gerçek malzeme verilerinin entegre edilidği model burkulma analiz sonuçları. 110
4.5.3. İnce duvarlı ve değişken kesitli kolonlarda yük taşıma kapasitesi analizi sonuçları……. 113
4.6. Farklı Dolum Yeri ve Sayısına Sahip Modellerin Çarpışma Kutusu (Crash-Box) Analiz Sonuçları 118
4.6.1. Geleneksel model çarpışma kutusu analiz sonucu 118
5. SONUÇ……. 125
KAYNAKLAR 131
ÖZGEÇMİŞ 141

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
P	Birim vektör
$\psi(P)$	Oryantasyon dağılım fonksiyonu
Aij	Oryantasyon tensörü
v_m	Matrisin hacmi
v_f	Fiberin hacmi
v_c	Kompozitin hacmi
B^f	Yoğunlaşma tensörü
Cm	Matrisin uniform sertliği
Cf	Fiberin uniform sertliği
I	Tek fiberin elipsoidal hacmi
H	Tek fiber gerilme konsantrasyon tensörü
S	Eshelby tensörü
ε_{ijk}	Permütasyon tensörü
M	Toplam sayısı
N	Toplam sayısı
ϑ_M	Matrisin Poisson oranı
ϑ_F	Fiberin Poisson oranı
E_M	Matrisin elastisite modülü
E_F	Fiberin elastisite modülü
C_{eff}	Etkin rijitlik tensörü
$\dot{\sigma}$	Makroskopik gerilme hız tensörü
$\dot{\varepsilon}$	Makroskopik şekil değiştirme hız tensörün
Θ	Yönelim dağılım tensörü
n	Elyaf oryantasyonu
σ_{yp}	Malzemenin akma dayanımı
k	Doğrusal pekleşme modülü
R_∞	Pekleşme modülü
m	Pekleşme katsayısı
λ	En-boy oranı
t	Zaman aralığı
V	Çarpışma hızı
L	Kolon boyu

Kısaltmalar	**Açıklama**
FEA	Sonlu elemanlar analizi
PA	Poliamid
GF	Cam fiber
RVE	Temsili birim hacim eleman
UMAT	Kullanıcı tanımlı malzeme
3D	Üç boyutlu
2D	İki boyutlu
RP	Güçlendirilmiş plastik

PP	Polipropilen
SFRP	Kısa elyaf takviyeli kompozitler
UEL	Kullanıcı tanımlı eleman
MFH	Ortalama alan homojenizasyonu
YSA	Yapay sinir ağı
MÖ	Makine öğrenimi
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
RMSE	Kök ortalama kare hatası
PCA	Temel bileşen analizi
R^2	Belirleme katsayısı
MT	Mori-Tanaka
ODF	Oryantasyon dağılım fonksiyonu
mm	Milimetre
s	Saniye
N	Newton
kN	Kilonewton
DOF	Serbestik derecesi
°C	Santigrat derece
C3D10	10 düğümlü ikinci dereceden tetrahedron elemanlar
C3D8R	8 düğümlü üç boyutlu hegzagonal tuğla elemanlar
.inp	Abaqus girdi dosyası
LPF	Yük orantı faktörü
U	Yer değiştirme

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 3.1.	Plastik enjeksiyon makinesi.....	23
Şekil 3.2.	Plastik enjeksiyon makinesi kalıbın kapanması (Radzi vd. 2021'den değiştirilerek alınmıştır…….....	23
Şekil 3.3.	Plastiğin kalıba enjekte edilmesi (Radzi vd. 20212021'den değiştirilerek alınmıştır)……	24
Şekil 3.4.	Parçanın kalıptan çıkarılması (Radzi vd. 20212021'den değiştirilerek alınmıştır).....	24
Şekil 3.5.	Basınç parametresinin parça kalitesine etkisi….....	25
Şekil 3.6.	Plastik enjeksiyon hataları (Brightworks Engineering, 2025; Fluent Co., 2025; Teknikde, 2025)…….....	26
Şekil 3.7.	Oryantasyon vektörünün tanımı…….	32
Şekil 3.8.	Eriyik akışının birleştiği bölgedeki birleşme izi……	35
Şekil 3.9.	Kompozit malzemelerde matris ve fiber katkısının mekanik etkisi……	37
Şekil 3.10.	Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin homojenizasyonu……	38
Şekil 3.11.	PCA ile 2 boyuta indirgeme sonrası dağılım grafiği (Tariq vd., 2024)……	43
Şekil 3.12.	Kompozit RVE'nin makine öğrenimi ile homojenleştirilmesi için genel çerçeve (Tariq vd., 2024)……	45
Şekil 3.13.	Kısa elyaf takviyeli kompozitlerin homojenizasyonu…….	46
Şekil 3.14.	Örnek verilerin t-SNE dağılımı (Tariq vd., 2024)……...	51
Şekil 3.15.	Geleneksel model ve gerçek malzeme verilerinin sonlu elemanlar programına doğrudan aktarımı olan model……	52
Şekil 3.16.	Digimat RP çalışma prensibi……...	53
Şekil 3.17.	Numune geometrisi…….	56
Şekil 3.18.	Kalıp akış simülasyonu için hazırlanan model……	57
Şekil 3.19.	(a) Y yönündeki cam elyaf yönelimi, (b) X yönündeki cam elyaf yönelimi, (c) Dolum sürecinde Y yönündeki elyaf yönelimi istatistikleri, (d) Dolum sürecinde X yönündeki elyaf yönelimi istatistikleri, (e) Cam elyaf yönelimi, (f) Deliğin çevresindeki cam elyaf yönelimi…….	58
Şekil 3.20.	Gerçek malzeme verilerinin (fiber oryantasyonu) Digimat RP ile sonlu elemanlar programına aktarılmasının işlem adımları...	59
Şekil 3.21.	(a) Prototip üretimi için braket numunesi, (b) Braket dayanım test aparatı……	60
Şekil 3.22.	Braket sınır ve yükleme koşulları……	62
Şekil 3.23.	Fiber dağılım tensörleri……...	63
Şekil 3.24.	Fiber dağılımı ve yöneliminin aktarılmasıyla elde edilen anizotropik model……	64
Şekil 3.25.	Gerilim yükü altında delikli sonsuz ince eleman……	66
Şekil 3.26.	Kalıp akış simülasyonu için yapılmış modeller…….	68
Şekil 3.27.	Kapak parçasının yük ve sınır koşulları…….	69
Şekil 3.28.	Birleşme izi oluşmuş alanlar a) bir giriş, b) iki giriş, c) dört giriş, d) sekiz giriş…….....	72
Şekil 3.29.	İnce duvarlı değişken kesitli kolon geometrisi……	73
Şekil 3.30.	Kalıp akış analizi için yapılan modeller (A) üstte iki köşe, (B)	

	üstte iki kenar, (C) üstte dört köşe, (D) üstte dört kenar, (E) altta iki köşe, (F) altta iki kenar, (G) altta dört köşe, (H) altta dört kenar…….	76
Şekil 3.31.	Dolum tipine göre fiber yönelimi bilgisi (A) üstte iki köşe, (B) üstte iki kenar, (C) üstte dört köşe, (D) üstte dört kenar, (E) altta iki köşe, (F) altta iki kenar, (G) altta dört köşe, (H) altta dört kenar…….	77
Şekil 3.32.	Doldurma tipine göre kaynak hattı bilgisi (A) üstte iki köşe, (B) üstte iki kenar, (C) üstte dört köşe, (D) üstte dört kenar, (E) altta iki köşe, (F) altta iki kenar, (G) altta dört köşe, (H) altta dört kenar…….	78
Şekil 3.33.	Gerçek malzeme verilerinin (fiber oryantasyonu ve kaynak hattı) Digimat RP ile sonlu elemanlar programına aktarılmasının işlem adımları……..	79
Şekil 3.34.	Çarpışma kutusu (crash-box) yapısı ve araçtaki konumu……...	80
Şekil 3.35.	İnce duvarlı değişken kare kesitli kolon geometrisi……	82
Şekil 3.36.	İnce duvarlı değişken daire kesitli kolon geometrisi……...	82
Şekil 3.37.	İnce duvarlı değişken ondüle kesitli kolon geometrisi……	83
Şekil 4.1.	Hiperparametre optimizasyonu sırasında boosting modellerinin RMSE değerleri……...	85
Şekil 4.2.	R2, MAE, MAPE ve RMSE değerlerini karşılaştıran tüm boosting modellerinin radar grafikleri…….	87
Şekil 4.3.	Tüm boosting modelleri için gerçek ve tahmin t-SNE değerlerinin karşılaştırılması……...	89
Şekil 4.4.	MÖ modellerin a) R2, b) MAE, c) MAPE ve d) RMSE değerlerini karşılaştıran radar grafikleri……..	91
Şekil 4.5.	Polinom denkleminin altı katsayısı için XGB (üst sıra) ve YSA (alt sıra) modellerinin dağılım grafikleri…….	92
Şekil 4.6.	a) Eğitim ve b) test veri kümesi için XGB ve YSA modellerin Taylor diyagramları…….	92
Şekil 4.7.	Digimat ve YSA'dan elde edilen gerilme-gerinim eğrisinin karşılaştırılması…….....	93
Şekil 4.8.	Farklı hacim oranları için YSA tarafından tahmin edilen gerilme-gerinim eğrileri……..	94
Şekil 4.9.	Farklı en-boy oranları için YSA tarafından tahmin edilen gerilme-gerinim eğrileri……..	95
Şekil 4.10.	Geleneksel çekme deneyi numunesindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımının kontur grafikleri…….	96
Şekil 4.11.	Gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği çekme testi modelinin, numune üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımını gösteren kontur grafikleri……...	97
Şekil 4.12.	Çekme analiz sonuçlarının karşılaştırılması, maksimum gerilme bölgesi……	98
Şekil 4.13.	Eleman bazında çekme analizi sonuçlarının karşılaştırılması….	99
Şekil 4.14.	Geleneksel model braket testinin parça üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımına ait kontur grafikleri……	100
Şekil 4.15.	Gerçek malzeme verisi entegre edildiği modelde braket testinin parça üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımına ait	

	kontur grafikleri……...	101
Şekil 4.16.	Braket Dayanım Testi ve analiz sonuçları……...	102
Şekil 4.17.	Doğrusal olmayan çekme analizi sonuçlarının karşılaştırılması: maksimum gerilme bölgesi…….	104
Şekil 4.18.	Eleman bazında doğrusal olmayan çekme analiz sonuçlarının karşılaştırılması……...	105
Şekil 4.19.	Geleneksel model kapak parçası üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımının kontur grafikleri…….	106
Şekil 4.20.	Gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği kapak parçası modeli üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımına ait kontur grafikleri……...	107
Şekil 4.21.	Kaynak hattı birleşme açıları; a) 1 giriş, b) 2 giriş, c) 4 giriş, d) 8 giriş……	109
Şekil 4.22.	Kapak parçası geleneksel model ve gerçek malzeme verisinin aktarıldığ modeller analiz sonuçları……	109
Şekil 4.23.	Geleneksel model kolon burkulma analiz modları	110
Şekil 4.24.	Gerçek malzeme veri modelinin entegre edildiği kolonun dolgu tipine göre burkulma modları……	112
Şekil 4.25.	Geleneksel model ve kalıp akış verilerinin entegre edildiği modellerde plastik deformasyon bölgeleri……..	115
Şekil 4.26.	Geleneksel ve gerçek malzeme verilerine sahip modellerin (A, B, C, D, E, F, G, H) yük orantı faktörü (LPF) ve yer değiştirme (U) grafikleri……	116
Şekil 4.27.	Eriyik enjeksiyon girişinin temsili gösterimi…….	117
Şekil 4.28.	Alttan dolum tipinde eriyik giriş çapının bölgesel parametre analizi ile maksimum yük taşıma kapasitesinin değişimi……...	118
Şekil 4.29.	Geleneksel modelde çapışma kutuları analizlerinde gerilme ve yer değiştirme dağılımına ait kontur grafikleri……	119
Şekil 4.30.	5, 25, 50, 100 mm yer değiştirme ve nihai konum için gerilme-gerinim evrimi…….	120
Şekil 4.31	Kare, dairesel ve ondüle kesitler için kuvvet – yer değiştirme grafiği……..	121
Şekil 4.31.	Kare, dairesel ve ondüle kesitler için kinetik enerji zaman grafiği……..	122
Şekil 4.32.	Kare, dairesel ve ondüle kesitler için ivme zaman grafiği……..	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 3.1.	İzotropik bir malzemede eliptik kesitli silindirik fiberler için *S*'nin belirlenmesindeki doğruluk……	42
Çizelge 3.2.	Parametrelerin alt ve üst sınırları…….	43
Çizelge 3.3.	Son veri tabanının genel görünümü…….	44
Çizelge 3.4.	Digimat'ta Kullanılan Malzeme Parametreleri: İsimler, Semboller, Boyutlar ve Birimler……..	49
Çizelge 3.5.	Cam elyaf takviyeli polipropilen malzeme parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri……...	50
Çizelge 3.6.	Ağ boyutuna bağlı değişim oranları……	67
Çizelge 3.7.	Ağ boyutuna bağlı değişim oranları……	70
Çizelge 3.8.	Ağ boyutuna bağlı değişim oranları……	75
Çizelge 3.9.	Dolum ve çevrim süreleri……	76
Çizelge 4.1.	Parametre arama uzayı ve optimum değerler…….	84
Çizelge 4.2.	Tüm boosting modellerinin performans değerleri……...	86
Çizelge 4.3.	Digimat ve XGB tahmininden elde edilen rijitlik matrisinin elemanları……	88
Çizelge 4.4	Farklı istatistiksel metriklere göre modellerin performansı…….	90
Çizelge 4.5.	Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin malzeme parametreleri……	93
Çizelge 4.6.	Çekme analizi sonuçlarının özeti……	97
Çizelge 4.7.	Doğrusal olmayan çekme analizi sonuçlarının özeti……...	102
Çizelge 4.8.	Kalıp akış verilerinin entegre edildiği modellerin birinci, ikinci ve üçüncü modlarındaki kritik burkulma yükleri……	112

1. GİRİŞ

1.1. Genel Arka Plan ve Motivasyon

Mühendislikte malzeme davranışlarının doğru bir şekilde anlaşılması ve modellenmesi, tasarım ve üretim süreçlerinin başarısında kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel malzemeler için geliştirilen analiz ve simülasyon yöntemleri genellikle izotropik ve lineer davranış varsayımlarına dayanırken, kompozit malzemelerin karmaşık yapısı bu varsayımları yetersiz kılmaktadır. Örneğin, çelik gibi homojen malzemelerde elastisite modülü her yönde aynı kalırken, cam elyafla güçlendirilmiş epoksi gibi kompozitlerde mekanik özellikler liflerin yönüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu durum, kompozit malzemelerin anizotropik özelliklerini dikkate alan daha hassas modellerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Lineer davranış varsayımı da genellikle malzemenin elastik sınırları içinde geçerlidir. Ancak, plastik deformasyon gibi non-lineer davranışlar, elastisite sonrası malzeme tepkilerini içerir ve bu süreçlerin modellenmesi, gerçekçi bir analiz elde etmek için hayati öneme sahiptir. Özellikle akma bölgesini geçen yüklerde, malzemenin lineer olmayan davranışlarının doğru bir şekilde tanımlanamaması, simülasyon sonuçlarında önemli sapmalara yol açmaktadır. Bununla birlikte, mevcut yöntemler genellikle deneysel verilere dayalı bünye denklemleri kullanmakta ve bu denklemler, karmaşık malzeme davranışlarında hata ve belirsizliklerin kaynağı olabilmektedir.

Son yıllarda, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda hafif, dayanıklı ve yüksek performanslı malzemelere olan ihtiyaç hızla artmıştır. Otomotiv, havacılık, beyaz eşya ve savunma sanayi gibi sektörlerde, ürünlerin ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmak, çevresel etkileri en aza indirmek ve mekanik dayanımı artırmak, öncelikli hedefler haline gelmiştir. Bu doğrultuda, geleneksel metal malzemelerin yerini hafiflik ve mekanik performansı bir arada sunan plastik tabanlı kompozit malzemeler almaya başlamıştır.

Elyaf takviyeli plastik kompozitler, entegre edilen elyaf türü, yoğunluğu ve boyutuna bağlı olarak geniş bir performans yelpazesi sunmaktadır. Bu malzemeler, hafiflikleri sayesinde enerji tüketimini azaltırken, yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç gibi mühendislik gereksinimlerini de karşılamaktadır. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde, bu tür malzemeler tasarım esnekliği sağlamaları nedeniyle geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.

Plastik enjeksiyon kalıplama, elyaf takviyeli kompozitlerin düşük maliyetli, yüksek verimli ve tekrarlanabilir bir şekilde üretilmesini mümkün kılan temel bir üretim yöntemidir. Farklı şekillerde ve karmaşıklıkta parçaların seri üretimine olanak sağlayan bu teknoloji, birçok sektörde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, enjeksiyon kalıplama süreci, hem malzeme davranışlarının detaylı bir şekilde anlaşılmasını hem de proses parametrelerinin dikkatle kontrol edilmesini gerektiren oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir.

Araştırmalar, enjeksiyon kalıplama sürecinin son ürün üzerinde doğrudan veya dolaylı etkisi olan 200'den fazla parametre içerdiğini göstermektedir. Bu kadar çok parametreye bağlı bir süreci yönetmek, genellikle birden fazla nedenin bir araya geldiği problemlere ve birden fazla çözümün gerektiği durumlara yol açmaktadır. Süreçteki her bir parametredeki değişiklik, ürün kalitesini doğrudan etkilemekte ve bu da enjeksiyon kalıplamanın hem hassas hem de titiz bir şekilde kontrol edilmesini zorunlu kılmaktadır.

1.2. Problem Tanımı

Günümüzde kullanılan simülasyon yöntemleri, genellikle izotropik ve lineer malzeme davranış varsayımlarına dayanmaktadır. Ancak, bu yaklaşımlar, kompozit malzemelerin anizotropik ve lineer olmayan özelliklerini yetersiz bir şekilde temsil etmektedir. Örneğin, cam elyafla güçlendirilmiş plastik malzemelerde, liflerin yönlenmesine bağlı olarak mekanik özellikler önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Bu durum, malzemenin anizotropik davranışını dikkate alan daha hassas modellerin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilen parçaların simülasyonlarında, üretim kaynaklı kusurlar (hava boşlukları, elyaf yönlenmesi vb.) genellikle önceden tahmin edilememektedir. Bu da imal edilen parçaların mekanik özellikleri ile simülasyon sonuçları arasında uyumsuzluklara yol açmaktadır. Bu sorunlar nedeniyle, üretim süreçlerinde deneme yanılma yöntemleri sıkça kullanılmakta ve bu durum, süreci zaman alıcı, maliyetli ve deneyime bağımlı hale getirmektedir.

Plastik enjeksiyon süreçlerinin bir diğer zorluğu, kontrol edilmesi gereken çok sayıda parametrenin bulunmasıdır. Araştırmalar, enjeksiyon sürecinin son ürünün kalitesini doğrudan etkileyen 200'den fazla farklı parametre içerdiğini göstermektedir. Basınç, hız, viskozite, reçine sıcaklığı ve tutma süresi gibi parametreler, üretim sırasında değişen sınır koşullarına bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik gösterebilmektedir. Bu parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanamaması, üretim sırasında çatlak, deformasyon gibi hataların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Ayrıca, parametreler arasında denge sağlamak mevcut yöntemlerle oldukça zordur ve bu da kalite sorunlarının önüne geçmeyi güçleştirmektedir.

Mevcut simülasyon yöntemleri, genellikle deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle sınırlı doğruluk seviyelerine sahiptir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin anizotropik ve lineer olmayan mekanik davranışları tam olarak modellenemediğinden, endüstriyel uygulamalarda süreç optimizasyonu ve simülasyon doğruluğu istenilen düzeye ulaşamamaktadır. Bu eksiklikler nedeniyle, plastik enjeksiyonla üretilen parçaların test aşamasında çatlak ve diğer kusurların tespit edilmesi, tasarım ve üretim süreçlerinde ciddi zaman ve kaynak kayıplarına yol açmaktadır.

Endüstrinin, bu sorunların üstesinden gelebilecek yeni yöntem ve teknolojilere olan ihtiyacı giderek artmaktadır. Plastik enjeksiyon süreçlerinin daha doğru bir şekilde modellenmesi ve simülasyon doğruluğunun artırılması, hem üretim kalitesini iyileştirmek hem de zaman ve maliyet kayıplarını minimize etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde, kısa elyaf takviyeli kompozit malzemelerin karmaşık mekanik davranışlarını dikkate alan çeşitli simülasyon yöntemleri geliştirilmiş olsa da, bu alanda hâlâ önemli bilgi ve teknoloji boşlukları bulunmaktadır.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışması, kısa elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin anizotropik ve lineer olmayan mekanik davranışlarının detaylı bir şekilde modellenmesini ve bu modelin sonlu elemanlar analizi (FEA) süreçlerine entegrasyonunu amaçlamaktadır. Çalışmanın temel hedefi, plastik enjeksiyon süreçlerinde malzeme özelliklerini daha doğru bir şekilde modelleyerek simülasyonların doğruluğunu artırmak ve üretim süreçlerinde karşılaşılan belirsizlikleri en aza indiren bir metodoloji geliştirmektir.

Bu doğrultuda, Moldex3D, Digimat RP ve Abaqus gibi ileri düzey simülasyon yazılımları entegre bir şekilde kullanılmıştır. Elyaf yönlenmesi, mekanik özellikler ve üretim sırasında oluşabilecek kusurların (hava boşlukları, deformasyonlar vb.) simülasyon süreçlerine doğrudan aktarılmasını sağlamak için deneysel verilerle doğrulanmış bir malzeme modeli geliştirilmiştir. Bu model, geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı alanlarda daha hassas ve güvenilir analizler gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

Çalışmanın odak noktalarından biri, plastik enjeksiyonla üretilen parçaların mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde öngörülmesi ve üretim süreçlerinde kullanılan parametrelerin optimize edilmesidir. Basınç, hız, viskozite ve tutma süresi gibi üretim parametrelerinin etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu parametrelerin simülasyon doğruluğuna olan etkileri ortaya konulmuştur. Ayrıca, süreçte meydana gelebilecek değişikliklerin tahmin edilmesi ve bu değişikliklerin ürün kalitesi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasının sonuçları, plastik enjeksiyonla üretilen parçaların daha iyi anlaşılmasına, tasarım ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesine, kalite sorunlarının önlenmesine ve üretim sürecindeki maliyet ve zaman kayıplarının azaltılmasına katkı sağlayacaktır. Bunun yanı sıra, endüstriyel uygulamalar için daha verimli simülasyon yöntemleri sunarak, sektördeki süreç optimizasyonu çalışmalarına rehberlik edecek bir kaynak oluşturacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma, plastik enjeksiyon süreçlerinde kullanılan mevcut yöntemlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmayı; anizotropik ve lineer olmayan malzeme davranışlarının doğru bir şekilde modellenmesini sağlayarak akademik literatüre ve endüstriyel uygulamalara önemli bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

1.4. Tez Düzeni ve Yapısı

Tez beş bölümden oluşmakta olup, her bölüm detaylı şekilde açıklanmıştır. Bölümlerin içeriklerine dair özet bilgiler aşağıda sunulmuştur:

- Birinci Bölüm: Bu bölümde, problem tanımı, söz konusu probleme yönelik çalışmanın motivasyonu, tezin amacı ve kapsamı ile tezin düzeni ve yapısı açıklanmaktadır.
- İkinci Bölüm: Elyaf takviyeli kompozitler, homojenizasyon yöntemleri, plastik enjeksiyon üretim yöntemi, kalıp akış analizi ve Digimat programı ile ilgili literatür araştırması bu bölümde ele alınmıştır.
- Üçüncü Bölüm: Plastik enjeksiyon süreci, bu süreci etkileyen parametreler ve olası üretim hataları incelenmiştir. Ayrıca kalıp akış analizi, fiber oryantasyonu, birleşme izleri ve bu faktörleri etkileyen parametreler detaylandırılmıştır. Ortalama alan homojenizasyonu ve Mori-Tanaka yöntemi açıklanmış, sistematik bir hesaplama modeli geliştirilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen dört uygulama çalışmasının geleneksel model ve gerçek verilerin entegre edildiği model kurulumları ile seçilen malzemeler ve hesaplamalı modelleme yaklaşımının uygulama süreci bu bölümde detaylandırılmıştır.
- Dördüncü Bölüm: Üçüncü bölümde geliştirilen modellerin analiz sonuçları sunulmuş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Geleneksel model ile gerçek malzeme verilerinin entegrasyonu karşılaştırılmış; aynı zamanda deney sonuçları ile kıyaslanarak model doğrulaması gerçekleştirilmiştir.
- Beşinci Bölüm: Tezde elde edilen sonuçlar bu bölümde özetlenmiştir. Ayrıca, tez sonrası süreçte yapılabilecek çalışmalara ilişkin öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Elyaf Takviyeli Kompozitler

Polimer kompozitlerin kullanımı 20. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitler, elyaflarla güçlendirilmiş bir polimer matrisinden oluşan malzemelerdir ve elyaf takviyeli polimerler olarak da adlandırılmaktadır. Bu malzemelerde, matris ve takviye elyafları, elyafların matrise gömülü olduğu bir yapı oluşturarak farklı mekanik özellikler sergiler. Karbon veya cam elyafların polimer matrise entegrasyonu, kompozit malzemenin genel performansını ve özelliklerini önemli ölçüede iyileştirir (Gandhi vd., 2020).

Lif takviyeli termoplastik kompozitler, otomotiv, inşaat mühendisliği, havacılık, denizcilik, ev eşyaları ve elektronik gibi çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Fu vd., 2009). Bu kompozitlerin mekanik davranışı, matris ve liflerin fiziksel özellikleri ile ara yüzey yapısına bağlıdır. Liflerin dağılımı ve matris içerisindeki oranı gibi faktörler, kompozitin genel performansını belirler (Klusemann vd., 2009).

Kısa elyaf takviyeli termoplastik (SFRTP) kompozitler, kıyılmış çelik liflerle güçlendirilmiş betona benzerlik gösterir (Eik, 2014). Fiber takviyesi, termoplastiklerin sertlik ve mukavemet özelliklerini geliştirirken, bu malzemelerin gerilme kabiliyetini azaltabilir. Güçlendirilmemiş termoplastikler genelde süyek davranış gösterirken, yüksek lif fraksiyonlarına sahip kompozitler genellikle kırılgan bir davranış sergiler. Bu nedenle, kompozit malzemelerin potansiyelinden tam anlamıyla faydalanmak için, kritik deformasyon limitlerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi gerekir. Malzeme kırılmasının öngörülmesi, elastik ve plastik deformasyonun detaylı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir.

Karmaşık yükleme durumlarında, mekanik davranışın analitik yöntemlerle çözülmesi zordur. Bu tür durumlar genellikle sonlu elemanlar analizi (FEA) ile simüle edilir (Stommel vd., 2018). Kısa fiber ile güçlendirilmiş malzemeler, anizotropik yapıları ve

karmaşık mekanik özellikleri nedeniyle ileri düzey malzeme modelleri gerektirir. Termoplastiklerin mekanik davranışı, metallerin performansından belirgin şekilde farklıdır (Rösler vd., 2008).

Ferrano vd. (2016), cam elyaf takviyeli poliamid 66 (PA66 GF30) kullanarak, kısa elyaf takviyeli plastiklerin elastoplastik ve anizotropik davranışını hesaba katan bir yöntemle, malzeme kırılma tahminlerini sonlu elemanlar analiziyle incelemiştir. Bu çalışma, malzeme ömrünü gerinim tabanlı bir yaklaşımla hesaplamış ve yük çevrim testleri ile doğrulamıştır. Kanters vd. (2019), Digimat yazılımını kullanarak kısa elyaf takviyeli termoplastiklerin yorulma ömrünü tahmin etmiştir.

Rad vd. (2019), kısa elyaf takviyeli termoplastiklerin mekanik anizotropisini ve zamana bağlı davranışlarını modellemek için viskoelastik-viskoplastik bir model geliştirmiştir. Bu model, yükleme hızı ve lif yöneliminin akma davranışı üzerindeki etkilerini dikkate alarak deneysel verilerle uyum sağlamıştır. Zhu vd. (2022), fiber takviyeli kompozit malzemelerle katı roket motoru gövdesi (SRMC) bağlantı elemanları için optimize edilmiş tasarımlar gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, %31 oranında ağırlık azaltımı sağlandığını göstermiştir.

Frącz ve Janowski (2016), ahşap-polimer kompozitlerin çekme testlerini simüle etmiş ve Moldflow Insight yazılımından elde edilen lif yönelim verileriyle Digimat yazılımını kullanarak kompozit özelliklerini tanımlamıştır. Çalışma, deneysel veriler ve simülasyonlar arasında yüksek bir uyum ortaya koymuştur.

Melchior ve Alsteens (2021), kısa elyaf takviyeli termoplastiklerin uzun süreli yük altında viskoelastik-viskoplastik davranışlarını modellemeyi amaçlamış ve bu modellerin sanal testlerle kalibrasyonunu gerçekleştirmiştir. Bu yöntemle, termo-mekanik tepkiler doğru bir şekilde öngörülmüştür. Kurkin vd. (2021), havacılık endüstrisinde kısa elyaf takviyeli kompozitlerin, laminatlar yerine kullanılarak delaminasyon problemlerini azalttığını ve böylece ağırlık ile maliyet avantajı sağladığını göstermiştir.

Kufel vd. (2021), bazalt/cam elyaf ve polipropilen hibrit kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemiş, bu malzemelerde %20 elyaf içeriğinin çekme mukavemetinde %306, çekme modülünün ise %333 artış sağladığını rapor etmiştir. Simülasyon ve deneysel veriler arasındaki hata oranı %2 seviyesinde bulunmuştur. Sim vd. (2021), geri dönüştürülmüş polyester (rPET) ile takviye edilmiş cam elyafın termal ve mekanik özelliklerini inceleyerek, cam elyafın kristalleşme sıcaklığını ve mekanik özellikleri nasıl iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Sonuçlar, Digimat ve Abaqus yazılımları kullanılarak doğrulanmıştır.

Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin plastik enjeksiyon kalıplama işleminin tamamı için sistematik bir hesaplamalı modelleme yaklaşımının oluşturulmasında hala bir boşluk vardır. Bu yaklaşım, elyaf yönelimleri tarafından tetiklenen anizotropik elastoplastik davranışı yeterince hesaba katmalıdır. Böyle bir modelleme çerçevesi, üretim sürecini tam olarak anlamak ve optimize etmek, istenen mekanik özelliklere ve yapısal bütünlüğe sahip bileşenlerin üretimini sağlamak için gereklidir.

2.2. Homojenizasyon Yöntemleri

Son yıllarda, mikro ölçeklerden elde edilen bilgilerin kullanılmasıyla makro düzeyde malzeme davranışlarını tahmin etmeyi amaçlayan hesaplamalı çok ölçekli modelleme yöntemlerinde önemli bir artış olmuştur. Bu tür çok ölçekli yaklaşımlar, genellikle yapının tümü üzerinde doğrudan sayısal simülasyonlar yapmaktan kaçınır. Bunun yerine, her bir Temsilci Hücre Hacmi (RVE) modelini çözerek, bu RVE'nin makroskobik ölçekte bir malzeme noktasına karşılık geldiği kabul edilir. RVE, mikro yapısal heterojenliği istatistiksel olarak temsil etmek için yeterince büyük olmasına rağmen, genel katı gövdeye göre oldukça daha küçüktür (Elmoghazy vd., 2023; Higuchi vd., 2024; Guan vd., 2024).

Hesaplamalı homojenleştirme, RVE kullanılarak heterojen malzemelerin tepkisinin hesaplanmasında güçlü bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşım, her bir fazın yapısal davranışı ve mikro yapının morfolojisine dayalı olarak eşdeğer bir homojen malzemenin etkili davranışını sayısal olarak türetir. Elde edilen homojenleştirilmiş

özellikler, gerinim-gerilim ilişkisini kurmak ve mekanik davranışı makroskobik ölçekte incelemek için kullanılabilir.

RVE analizi için kullanılan hesaplamalı homojenleşme yöntemlerinden bazıları, tam alan yöntemi, ortalama alan yöntemi ve Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yöntemleridir. Renard ve Marmonier (1987) tarafından geliştirilen tam alan yöntemi, RVE analizlerinde sonlu elemanlar ayrıştırması kullanırken, Guedes ve Kikuchi (1990) ve Feyel (2003) gibi araştırmacılar bu yöntemi çok ölçekli modelleme bağlamında daha da geliştirmiştir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)-tabanlı RVE analizi yüksek doğruluk sağlasa da, karmaşık mikro yapılar için ağ yapısının oluşturulması ve hesaplamaların pahalı olması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu yüzden, hesaplama verimliliğini artırmak amacıyla ortalama alan (MF) modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller, her mikro yapı fazındaki ortalama gerilme ve gerilme durumlarını dikkate alarak hızlı ve doğru tahminler yapar (Selmi et al., 2011; Heidari-Rarani et al., 2018). FFT yöntemi ise, girdileri birim ağ (2D için pikseller, 3D için voksel) olarak alarak RVE analizini hızlandırır ve hesaplama verimliliğine katkı sağlar.

RVE analizini daha da hızlandırmak amacıyla çeşitli azaltılmış model (ROM) yöntemleri de geliştirilmiştir. Bu yöntemler, prediktif doğruluk ve hesaplama verimliliği arasında bir denge kurmayı amaçlar (Michel ve Suquet, 2003; Yvonnet ve He, 2007; Liu et al., 2016). Örneğin, Islam vd. (2016) yüksek hacim oranı ve geniş en-boy oranına sahip fiberler için rastgele kompozit mikro yapı modelleri geliştirmiştir. Bu model, rastgele ardışık adsorpsiyon algoritması ve dinamik sonlu eleman simülasyonlarını birleştirerek, %50'ye kadar hacim oranına sahip kompozitleri başarıyla modellemektedir.

Mentges vd. (2023), kısa elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik tepkisini, üretim sırasındaki akış koşullarına göre yerel elyaf hacmi, oryantasyonu ve uzunluk dağılımına göre değişkenlik gösterecek şekilde incelemiştir. Bu çalışmada, elyaf uzunluğu dağılımını da dikkate alan homojenleştirilmiş malzeme tepkisini tahmin eden modeller geliştirilmiş ve hesaplama açısından daha verimli olan temsilci elyaf uzunluğu yaklaşımı öne çıkmıştır.

Das Lala vd. (2020), biyobozunur lastik tohum kabuğu, kaju fıstığı kabuğu ve ceviz kabuğu tozu ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin elastik modülünü, Mori-Tanaka homojenizasyon yöntemi kullanarak incelemiş ve yapılan hesaplamaların deneysel sonuçlarla %7'lik bir hata payıyla uyumlu olduğunu bulmuştur. Ayrıca, dolgu oranı arttıkça elastik modülüsün arttığı ancak %15'in üzerindeki dolgu oranlarında belirgin bir artış gözlemlenmediği saptanmıştır.

Wang vd. (2011) uzun elyaf takviyeli kompozitlerin temsili hacim elemanını (RVE) oluşturmak için bir algoritma geliştirmiş ve rastgele elyaf dağılımının, kompozitlerin elastik modülü ve hasar davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu algoritma, ABAQUS yazılımı kullanılarak hasar oluşumunu ve ilerlemesini doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir.

Navratil vd. (2020) ise %30 kısa karbon fiber takviyeli PEEK termoplastiklerinin karmaşık elyaf yönelim dağılımı ve buna bağlı anizotropik mekanik davranışını incelemiş ve geliştirilen üç boyutlu modelin elastik, viskoelastik ve plastik fenomenleri içeren mekanik tepkilerini başarılı bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir.

Tikarrouchine vd. (2021) poliamid termoplastik matrisle güçlendirilmiş cam kumaşla takviyelenmiş kompozit malzemenin iki ölçekli (FE2) doğrusal olmayan sonlu elemanlar simülasyonunu incelemiş ve mikroskobik ve makroskobik ölçekte çok seviyeli hesaplamalar yapılmıştır. Bu çalışmada, geliştirilen UMAT alt programı ve paralel hesaplama tekniği kullanılarak mikroskobik ve makroskobik düzeyde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Furuya vd. (2017) cam elyaf takviyeli termoplastiklerin (GFRTP) makroskopik statik ve dinamik mekanik özelliklerini, Eshelby-Mori-Tanaka yaklaşımı ve elyaf yönelimi tensörü kullanarak tahmin etmiştir.

Peng vd. (2009) partiküllü kompozitlerin elastik özelliklerini tahmin etmek için birleşik bir öz-konsistan ve Mori-Tanaka yaklaşımı geliştirmiştir. Bu yaklaşım, partikül dolgularının boyutunun makroskopik özelliklere etkisini modellemektedir.

Son olarak, Gommers vd. (1998) Mori-Tanaka yönteminin tekstil kompozit materyallerinin elastik özelliklerini hesaplamak için nasıl uygulanabileceğini incelemiş ve bu yöntemin, özellikle örgü kumaş kompozitlerinde daha doğru sonuçlar verdiğini bulmuştur.

Belhouideg (2018), heterojen materyallerin etkili mekanik özelliklerini tahmin etmek için kullanılan homojenleştirme yaklaşımını sunmuştur. Bu yaklaşım, Eshelby'nin dahil etme probleminin çözümüne dayanan çeşitli şemalarla uygulanarak, tungsten fiber güçlendirilmiş metalik cam kompozitinin mekanik özelliklerini tahmin etmiştir. Tahmin edilen değerler, literatürden alınan deneysel verilerle karşılaştırıldığında iyi bir uyum göstermektedir.

Ogierman ve Kokot (2013), kompozit malzemelerin sayısal analizinde kullanılan ortalama alan homojenleştirme şemasının yeteneklerini test etmiştir. DIGIMAT yazılımı ile uygulanan bu yöntem, kompozitlerin etkili mekanik özelliklerini hızlı bir şekilde elde etmeyi sağlamış ve sonlu elemanlar analizine entegre edilerek çok ölçekli analiz yapılmasına imkan tanımıştır.

Tan ve vd. (2005), Mori-Tanaka yöntemiyle, yüksek parçacık hacmine sahip kompozitlerde, ara yüzeydeki kopmanın malzeme davranışı üzerindeki etkisini incelemiş ve parçacık boyutunun sertleşme veya yumuşama üzerinde önemli bir etkisi olduğunu bulmuştur.

Barral vd. (2020), uzun elyafla güçlendirilmiş elastoplastik ve viskoelastik-viskoplastik kompozitlerin genel davranışını tahmin etmek için modifiye edilmiş çok ölçekli bir ortalama alan yaklaşımına dayalı bir mikromekanik model önermiştir. Bu model, Mori-Tanaka şemasını Dönüşüm Alanı Analizi (TFA) ile birleştirir ve klasik Mori-Tanaka yönteminin aşırı tahminlerini ele almak için elyaflar ile matris arasına özel bir kaplama

ekler. Çalışma, çeşitli yükleme koşulları ve gerilme hızlarında yapılan sayısal doğrulama testleriyle modelin etkinliğini göstermektedir.

Liu ve arkadaşları (2023), NP-C/C kompozitlerinin modülüsünü tahmin etmek için çok ölçekli bir sonlu elemanlar modeli kurmuş ve analitik homogenizasyon yöntemiyle modülüsün etki ağırlığını analiz etmiştir. Sonuçlar, analitik homogenizasyon yöntemiyle elde edilen sertlik katsayısı tahminlerinin deneysel verilere %6,0 hata ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu yöntem, karmaşık mikromekanik modeller kurmaya gerek duymadan, bilgisayar scriptleriyle doğrudan uygulanabilir ve basit bir çözüm sunar.

Liu ve Huang (2014), transversely izotropik lif takviyeli UD kompozitlerinin Mori-Tanaka tensörünün açık formüllerini sunmuş ve kompozitin etkin elastik özellikleri için kapalı formüller elde etmiştir. 3D ve 2D uyum tensörlerinin farklı özelliklerini incelemiş ve bu yaklaşımların deneysel verilerle karşılaştırmasını yapmıştır.

Mishra ve Das (2022), unidirectional piezoelectric polymer kompozitlerinin etkin elektroelastik özelliklerini tahmin etmek için iki mikromekanik modelin (artımlı özkonsantrasyon (ISC) ve modifiye Eshelby-Mori-Tanaka (EMT)) verimliliğini değerlendirmiştir. Sonuçlar, modifiye EMT modelinin daha iyi tahminler sağladığını göstermektedir.

Lee ve Ryu (2018), bu çalışmada, dolguların kısmi hizalanması ve arayüzdeki bozulmaların etkisiyle takviye edilmiş kompozitlerin etkin modüllerini tahmin etmek için geliştirilmiş bir teori sunmuştur. Önceki teorilerin bazı sınırlamalarını aşarak, doğru hasar tensörü kullanımıyla sınırsız veya negatif etkin modül tahminlerinin önüne geçilmiş ve genel eksensel hizalanma dağılımında, transversely izotropik 4. dereceden tensörlerin yön ortalamasına dair analitik ifadeler türetilmiştir.

Literatürde, homojenleştirme ve çok ölçekli modelleme yöntemlerinin kullanımında bazı önemli boşluklar bulunmaktadır. Özellikle, mikro yapısal özelliklerin homojenleştirilmiş malzeme davranışlarına etkisi yeterince derinlemesine incelenmemiştir. Anizotropik davranışların daha etkili bir şekilde modellenmesi, elyaf

ve matris fazlarının karşılıklı etkileşimlerinin göz önünde bulundurulması ve dinamik yükleme koşullarının dikkate alınması gereken eksik alanlar arasında yer almaktadır. Ayrıca, yüksek doğrulukla çalışan verimli hesaplama yöntemlerinin eksikliği ve RVE modellemesindeki hesaplama zorlukları, homojenleştirme süreçlerinde önemli kısıtlamalar yaratmaktadır. Bu boşluklar, Digimat RP ve Moldex3D gibi yazılımların entegrasyonu ile daha etkin bir şekilde dldurulacak, özellikle kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin daha doğru ve verimli bir şekilde tahmin edilmesini sağlayacaktır.

2.3. Plastik Enjeksiyon Üretim Yöntemi

Polimer malzemelerin mekanik davranışı, genellikle elyaf ile matris arasındaki ilişkiye dayanır. Elyafı güçlendirmek için kullanılan matris türü, aynı zamanda işleme prosedürünü de etkiler. Polimer matrisi, genellikle iki ana kategoriye ayrılır: termosetler ve termoplastikler. Termoset matrisler, işleme sırasında reaksiyona girip kürleşerek inatçı bir katı oluşturan, düşük viskoziteli reçinelerdir. Öte yandan, termoplastikler, erime sıcaklıklarına ulaştığında işlenebilen, yüksek viskoziteli reçinelerdir (Campbell, 2010).

Enjeksiyon kalıplama, polimer endüstrisinde yaygın olarak tercih edilen bir işleme tekniğidir ve son yıllarda çeşitli üretim süreçleri de geliştirilmiştir. Uygulanan işleme teknikleri, kullanılan polimer matris türüne bağlı olarak değişir. Elyaf takviyeli termoplastikler, enjeksiyon veya sıkıştırma kalıplama yöntemleriyle işlenirken, Khosravani, Nasiri ve Reinicke (2021) tarafından yapılan araştırmaya göre, tüm termoplastik malzemelerin yaklaşık üçte biri enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmektedir. Enjeksiyon kalıplama, karmaşık şekillerdeki parçaların seri üretimini yüksek hassasiyetle gerçekleştirmek için ideal bir yöntemdir.

Rijitlik ve maksimum dayanım açısından nispeten daha az istere sahip olan mekanik yapılarda süreksiz fiber takviyeli termoplastik matris malzemeler teknolojik önem kazanmıştır. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin aksine bu malzemelerin avantajı, enjeksiyon kalıplama gibi polimer işleme tekniklerinin uygulanabilirliğidir, bu da

yüksek verimde düşük maliyetler ile gelişmiş yüzey kalitesi ve karmaşık şekilli parçalar elde edilmesi anlamına gelmektedir. Bu işleme tekniklerini kullanarak, çok çeşitli ve karmaşık şekillerde üretim mümkün olduğundan, parçalar esnek bir şekilde tasarlanabilir (Schürmann, 2007). Enjeksiyonlu kalıplama işlemine bağlı mikroyapısal özellik dağılımları yerel olarak değişebilir ve genellikle, örneğin yerel sertlik, mukavemet ve kırılma özellikleri ile ilgili olarak karmaşık bir anizotropik malzeme davranışına sebep olur (Stommel vd., 2018).

Haramburu vd. (2002), yüksek basınç enjeksiyonu ile kısa fiber takviyeli yarı yapısal polimer parçalarının üretim ve yapısal analiz süreçlerini ele almış ve lif yönelimi ile mekanik yapısal tepkilerin sanayiye yönelik hesaplama araçlarıyla entegre edilmesini amaçlamıştır. Çalışma, üç endüstriyel parça için (uçak basınç valfi gövdesi, birinci kademe stator ve fan çarkı) lif yönelimi verilerinden homojen elastik özelliklerin dağılımlarını hesaplamıştır. Hirsch ve arkadaşları (2021), hibrit enjeksiyon kalıplama yöntemiyle kısa ve sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin mekanik davranışını incelemiş ve bu davranışın sayısal simülasyonunu yapmışlardır. PP/GF30 kısa elyaf takviyeli malzemede enjeksiyon hacim akış hızının (25-100 cm^3/s) fiber yönelimine güçlü bir etkisi olduğu, ancak fiber uzunluğunu etkilemediği bulunmuştur. Sayısal simülasyonlarda, PP/GF60 ve PP/GF30 hibrit yapıdaki test numunesinin eğilme yükleri altındaki mekanik davranışı öngörülmüş, enjeksiyon kalıplama verilerinin entegrasyonu ile tahmin doğruluğu artırılmış ve deneysel sonuçlarla simülasyon arasındaki sapma %21'den %9'a düşürülmüştür.

Dean vd. (2016), kısa elyaf takviyeli kompozitler (SFRP) için termo-mekanik elastoplastik bir model geliştirmiş ve bu modeli enjeksiyon kalıplama ile üretilen malzemelerin anizotropik ve sıcaklık bağımlı davranışını, kullanıcı tanımlı bir eleman (UEL) aracılığıyla sonlu eleman analizi yazılımına entegre etmiştir. Postawa ve Gnatowski (2007), enjeksiyon kalıplama işlemlerinde fiziksel özelliklerin anizotropik davranışını incelemiş ve bunun malzemenin dayanıklılığı üzerindeki etkilerini tartışmıştır. Dinamik Mekanik Termal Analiz (DMTA) yöntemi kullanılarak, enjeksiyon kalıplama parçasından alınan örnekler arasındaki fiziksel farklılıklar çok hassas bir şekilde belirlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, akış yolunun başından

alınan örnekler daha iyi mekanik özelliklere sahipken, akış yönüne paralel alınan örnekler yüksek sıcaklıklarda daha iyi sönümleme özellikleri sergilemiştir.

Pedro (2017), çalışmasında enjeksiyon kalıplama süreçlerinden kaynaklanan parça gerilmeleri, lif yönelimleri ve mekanik özellikler gibi parametrelerin yapısal analiz yazılımlarına aktarılmasının önemini vurgulamaktadır. Bu sayede, özellikle kısa elyaf takviyeli plastikler gibi kompozit malzemelerin doğruluğu artırılarak, malzeme davranışını daha güvenilir bir şekilde öngörmek mümkün olmaktadır. Çalışma, deneysel verilerle desteklenen tersine mühendislik süreçleri kullanarak malzeme modelleme ve veri transferini ele almaktadır. Schulenberg vd. (2017), enjeksiyonla kalıplanmış uzun elyaf takviyeli termoplastikler için anizotropik elastoplastik bir malzeme modeli sunmuş ve bu modelin fiber oryantasyon dağılımları ile fiber hacmi oranlarındaki işlem kaynaklı değişikliklerden dolayı oluşan yerel heterojenlikleri dikkate almıştır. İki aşamalı bir homojenleştirme prosedürü ile malzeme modelinde, ilk olarak anizotropik bir rijitlik tensörü tahmin edilmiş ve ardından plastik davranış Hill'in transversely izotropik akma kriteri ile açıklanmıştır. Bu iki yaklaşımın birleşimi, kompozit malzemenin davranışını mikro-mekanik bir şekilde, ancak hızlı bir sayısal hesaplama ile modellemeye olanak tanımaktadır. Modelin doğruluğu, farklı yönlerden alınan örneklerle yapılan çekme testleri ile doğrulanmıştır.

Enjeksiyon kalıplama süreci, mikro yapısal özelliklerin dağılımında yerel değişikliklere neden olduğundan, malzemelerde genellikle karmaşık anizotropik davranışlar gözlemlenir. Anizotropi, farklı koşullarda malzeme davranışını anlamak için kritik öneme sahiptir. Patlayıcı yükleme, darbe problemleri ya da elastik ve plastik deformasyonlar gibi durumlarda anizotropik özelliklerin dikkate alınması, doğru modelleme, tahmin ve mühendislik tasarımı için esastır. Çeşitli çalışmalar, anizotropinin malzeme davranışları üzerindeki önemini vurgulamış ve dinamik tepkiler, hasar mekanizmaları ve genel mekanik performans üzerindeki etkisini göstermiştir (Stommel vd., 2018; Sielicki vd., 2019; Voyiadjis vd., 2003; Lu ve Papadopoulos, 2000; Sumelka vd., 2021; Manzari ve Yonten, 2014; Safaei vd., 2014).

Ancak, üretim süreçlerinde malzeme anizotropisinin doğru bir şekilde aktarılması hala önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Bu konu, özellikle hasar bölgelerinin sanal ortamda yüksek doğrulukla tahmin edilmesinde ciddi bir boşluk yaratmaktadır. Gerçek zamanlı süreç parametrelerini izlemek, büzülme, eğilme, çökme, hava boşluğu ve elyaf yönelimi gibi önemli değişkenlerin neden olduğu hasarları en aza indirmeye yönelik birçok çalışma yapılmasına rağmen, bu parametrelerin etkilerinin sanal ortamda tam anlamıyla doğru bir şekilde modellenmesi hala geliştirilmeyi bekleyen bir alan olarak kalmaktadır. Bu eksiklik, üretim süreçlerinin ve nihai ürünlerin kalitesini doğrudan etkileyebileceği için, daha doğru ve güvenilir sanal simülasyonların geliştirilmesi gereklidir.

2.4. Kalıp Akış Analizi

Kalıp akış simülasyonu, enjeksiyon kalıplama sürecinde malzemenin kalıp içerisindeki akış davranışını sayısal olarak modelleyen ve analiz eden bir tekniktir. Bu simülasyon, enjeksiyon kalıplama sürecinde eriyik plastiklerin kalıp boşluğuna nasıl yerleşeceğini, dolum hızını, basıncını ve sıcaklık dağılımlarını tahmin eder. Kalıp akış simülasyonları, malzeme davranışlarının, kalıp tasarımının ve üretim koşullarının parçanın son özellikleri üzerindeki etkilerini anlamada kritik bir rol oynar. Bu süreç, özellikle elyaf takviyeli kompozit malzemeler gibi karmaşık malzemelerin üretiminde, elyaf yönelimleri, yerel gerilmeler ve sıcaklık profillerinin doğru bir şekilde öngörülmesine olanak tanır. Simülasyonlar, mühendislerin üretim sürecinde olası hataları, kaynak hatlarını, gerilme birikimlerini ve diğer potansiyel hataları önceden tespit etmelerini sağlar. Böylece, üretim sırasında karşılaşılabilecek sorunlar en aza indirgenir ve malzeme özellikleri daha tutarlı hale gelir.

Modhaffar vd. (2017), polipropilen polimerinin eğri elyaflarla karıştırılarak enjeksiyonla şekillendirildiği çalışmada, elyaf yönlenmesinin etkilerini incelemişlerdir. Bu etkiyi belirlemek için, elyafların boyutları ve elips şeklindeki yönelimleri, bir görüntü işleme yöntemiyle analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar, ImageJ yazılımı ile doğrulanmıştır. Chai vd. (2019) ise, uzun cam elyaf takviyeli termoplastik kompozitten (LGFT) üretilmiş enjeksiyon kalıplı bir tekerlekte, artık gerilme dağılımını tahmin etmek için sonlu eleman analizi (FEA) yöntemi geliştirmiştir. Çalışmalarında, kalıplama

simülasyonuyla hesaplanan artık gerilmenin, tekerlek bükme yorulma testi simülasyonlarına etkisi incelenmiş ve sonuçlar, artık gerilmenin dikkate alındığı simülasyonların deneysel test sonuçlarıyla daha uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, LGFT tekerlek simülasyonlarında artık gerilmenin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Tseng ve arkadaşları (2017), enjeksiyonla şekillendirilmiş uzun cam elyaf takviyeli kompozit parçalarda doğru elyaf yönelim tahmini yapmak için Moldex3D simülasyonunu kullanmışlardır. Bu simülasyon, elyaf yönelimini belirleyerek üretim sırasında oluşabilecek anizotropik özellikleri öngörmeye imkan tanımaktadır. Moldex3D ile yapılan kalıp akış simülasyonu, elyafların yerel dağılımı ve yönelimini belirleyerek, parça üretimindeki mekanik özelliklerin daha doğru tahmin edilmesini sağlamaktadır. Jansson ve arkadaşları (2018) ise, cam elyaf takviyeli plastiklerin anizotropik ve doğrusal olmayan davranışını tahmin etmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada, enjeksiyon kalıplama simülasyonlarından elde edilen elyaf yönelimi bilgisiyle yerel malzeme özelliklerinin daha doğru hesaplanabilmesi için dördüncü dereceden tensörler kullanılmış ve malzeme modeli deneysel test verileriyle uyumlu hale getirilmiştir.

Dzulkipli ve Azuddin (2017), polipropilen ve polipropilen-cam elyaf takviyeli kompozitlerde kaynak hatlarını incelemiş, farklı parametrelerin (eriyik sıcaklığı, malzeme türü ve kalıp tasarımı) kaynak hattı oluşumunu nasıl etkilediğini belirlemişlerdir. Autodesk Simulation Moldflow Adviser yazılımı kullanılarak yapılan deneysel karşılaştırmalar, bu parametrelerin kaynak hatlarının oluşumunu önemli derecede etkilediğini ortaya koymuştur. Dogossy vd. (2022), enjeksiyonla kalıplanmış cam elyaf ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerin yapı ve mekanik özelliklerini simülasyon yöntemleriyle analiz etmişlerdir. Elyaf yönelimi enjeksiyon simülasyonuyla belirlenmiş, ardından elde edilen malzeme modeli ile finite element yazılımı kullanılarak mekanik davranış analiz edilmiştir. Sonuçlar, optik mikroskop görüntüleri ve eğilme testleriyle doğrulanmış ve kalın duvarlı GF takviyeli ürünler için kullanılan yazılım entegrasyonunun güvenilir olduğunu göstermiştir.

Kurkin vd. (2020), kısa elyaf takviyeli PA6 Aramid SV 30-1ETM kompozit malzemeden üretilmiş bir bağlantı elemanında kaynak hattının mekanik özelliklere etkisini değerlendirmiştir. Moldex3D yazılımı kullanılarak bağlantı elemanının kalıplama süreci, kaynak hattı pozisyonu ve lif yönlenmesi tahmin edilmiştir. Statik yapısal analiz, Digimat MX ile oluşturulan doğrusal olmayan anizotropik malzeme modeli kullanılarak ANSYS Workbench'te yapılmış ve Tsai-Hill 3D transversely isotropic modeliyle başarısızlık tahmini gerçekleştirilmiştir.

Elyaf yönelimi ve kaynak hattının mekanik özellikler üzerindeki etkisi, özellikle bileşenler yük altında iken çatlak ilerlemesinin zayıf kaynak hattı bölgelerinde başlaması nedeniyle önem taşımaktadır (Jadhav vd., 2023). Kaynak hattı dayanıklılığı faktörleri ile yönelme faktörü arasında net bir ilişki bulunmaktadır; kaynak hattı bölgesindeki kırılma performansı, bu bölgedeki yerel elyaf yönelimi tarafından kontrol edilmektedir (Quintana ve Frontini, 2020). Geleneksel enjeksiyon kalıplama ürünlerinde, kaynak hattı mekanik dayanıklılığını kaybetmektedir. Deneysel bulgular, eriyik ve kalıp sıcaklıklarının artırılması ve enjeksiyon hızlarının yükseltilmesinin kaynak hattı dayanıklılığını artırırken, sıkıştırma basıncının artırılmasının bu dayanıklılığı azalttığını göstermektedir (Der Chien vd., 2004).

Malzeme deformasyonunu öngörebilmek için, süreç öncesindeki tüm aşamaların doğru şekilde anlaşılması gerekmektedir. Bu, elastik özelliklerin yanı sıra plastik deformasyonun başlangıç ve ilerleyişinin bilinmesini de kapsar. Karmaşık yükleme senaryolarında mekanik parçaların davranışını tahmin etmek için sonlu elemanlar analizi (FEA) gibi sayısal simülasyonlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Kısa elyaf takviyeli enjeksiyon kalıplama kompozitleri, hafif ve yüksek hacimli uygulamalar için uygun malzemeler olmalarına rağmen, bu malzemelerle yapılan bileşenlerin tasarımında kullanılan simülasyon teknikleri şu an için sürekli olarak arızayı tahmin edememektedir (Fujita ve arkadaşları, 2024). Bu sebeple, malzemelerin anizotropik ve elastoplastik özelliklerinin sayısal simülasyon tekniklerinde dikkate alınması kritik önem taşımaktadır (Adam ve Assaker, 2014; Lindhult ve Ljungberg, 2015; Chai vd., 2019; Das Lala vd., 2020). Elyaflarla güçlendirilmiş termoplastik kompozitlerin enjeksiyon kalıplama sürecini doğru bir şekilde modellemek için bu faktörlerin dikkate alınması

gerekmektedir. Bu sayede, plastik enjeksiyon kalıplama yoluyla üretilen parçaların yapısal bütünlüğü ve kalitesi iyileştirilebilmektedir (Tseng ve arkadaşları, 2017). Bu malzemelerle yapılan bileşenlerin tasarımında, hasar başlangıç kriterlerinin entegre edilmesi, üretim sürecini daha güvenilir ve doğru hale getirmektedir. Elyaf yönelimleri ve kaynak hattı nedeniyle oluşan anizotropik elastoplastik davranışın yeterince dikkate alınması için plastik enjeksiyon kalıplama sürecinin kapsamlı bir hesaplamalı modelleme yöntemi halen eksiktir.

2.5. Digimat

Digimat, yenilikçi ve maliyet etkin ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlayan çok ölçekli bir malzeme ve yapı modelleme platformudur. Bu platform, doğrusal olmayan analizler için geliştirilmiş olup, çeşitli modüller aracılığıyla malzeme davranışları ve yapısal performansı inceleme imkanı sunmaktadır. Aşağıda, Digimat yazılımının sunduğu modüller sıralanmıştır (Digimat User's Manual, 2017):

Digimat MF: Çok fazlı malzemelerin doğrusal olmayan davranışını tahmin etmek için kullanılan Ortalama Alan (Mean-Field) homogenizasyon modülü.
Digimat FE: Malzeme mikro yapılarının Temsili Hacim Elemanları (RVE) üzerinden doğrusal olmayan davranışını modelleyen Sonlu Eleman (Finite Element) tabanlı homogenizasyon modülü.
Digimat MX: Malzeme tedarikçileri ile son kullanıcılar arasında malzeme modellerinin hazırlanmasını, saklanmasını ve paylaşılmasını sağlayan Malzeme Değişim (Material Exchange) platformu.
Digimat CAE: Kompozit yapıların çok ölçekli analizlerini mümkün kılmak için büyük işleme ve yapısal sonlu eleman yazılımlarıyla entegrasyon sağlayan bir modül.
Digimat MAP: Lif yönelimi, artık gerilmeler ve sıcaklıkların farklı işlem ve yapısal ağlar arasında aktarılmasını sağlayan Kabuk ve 3D eşleme yazılımı.
Digimat RP: Elyaf takviyeli plastik parçaların tasarımı için kullanıcı dostu ve etkili bir çözüm aracıdır.
Digimat HC: Bal peteği sandviç panellerin tasarımı için optimize edilmiş bir çözüm modülüdür.

Digimat VA: Malzeme davranışlarının çok ölçekli analizini gerçekleştirmek için kullanılan ve veritabanı oluşturulmasına yardımcı olan bir modüldür. Bu modül, özellikle malzeme özelliklerinin tahmin edilmesinde ve simülasyon süreçlerinin optimize edilmesinde önemli bir araçtır.
Digimat AM**:** 3D yazıcıyla üretilen parçaların, özellikle metal ve polimer kompozitlerin, üretim sürecindeki deformasyonları, artık gerilmeleri ve mekanik özelliklerini simüle etmek için kullanılan bir modüldür. Bu modül, özellikle additif üretim süreçlerinde kullanılan malzemelerin davranışlarını tahmin etmek ve optimize etmek için oldukça etkilidir.

Digimat yazılımı, kompozitlerin simülasyonunda karşılaşılan anizotropik davranış, plastiklik, hasar, sıcaklık ve gerinim hızı bağımlılıkları gibi zorlukları ele alır (Adam ve Assaker, 2014). Bu yazılım, süreç ve yapısal modelleme arasındaki boşluğu kapatarak, yerel mikro yapıyı dikkate alan çok ölçekli doğrusal olmayan malzeme modelleri ile farklı performansları öngörmeyi amaçlar. Isaincu ve arkadaşları (2021), lif yönelimlerinin mekanik özelliklere etkisini incelemek için sonlu eleman yöntemiyle bir sayısal çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, ISO-527-2 standardına uygun olarak tasarlanan PA66 GF30 malzemesinden yapılmış numuneler, Moldflow yazılımı kullanılarak lif yönelim tensörleri belirlenmiş ve Digimat ile homojenleştirilmiştir. Sonrasında, anisotropik davranış dikkate alınarak Ansys yazılımında mekanik analizler yapılmıştır.

Al Rashid ve Koç (2022) ise, 3D yazıcıyla üretilen polimer kompozitlerin üretim sırasında oluşan deformasyon, artık gerilmeler ve eğilmeleri Digimat-AM® yazılımı kullanarak sayısal simülasyonla incelemişlerdir. Çalışmalarında, farklı dolgu desenleri ve yoğunluklarının mekanik özellikler üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve simülasyon sonuçları, fiziksel testlerle doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, üretim ve ürün sorunlarını önceden tahmin etme konusunda bu yöntemin etkinliğini ortaya koymuştur.

Isametova ve arkadaşları (2021), polikarbonat matrisli kısa cam elyaf dolgulu kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin bilgisayar modeli ile tahmin edilmesini sunmuştur. DIGIMAT programı kullanılarak, dolgu oranının malzemenin gerilme sınırı ve elastik

modülü üzerindeki etkisi incelenmiş ve elyafların iğne şekline sahip olduğu durumda malzemenin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu bulunmuştur. Ayrıca, fiber yönelimi tensörünün bileşenleri belirlenmiş ve bilgisayar modelleme sonuçları deneysel verilerle uyumlu olmuştur. Farklı elyaf içeriklerine sahip örnekler üzerinde yapılan deneylerle bilgisayar modeli sonuçları doğrulanmış, üretim teknolojisinin malzeme özelliklerine etkisi tartışılmıştır.

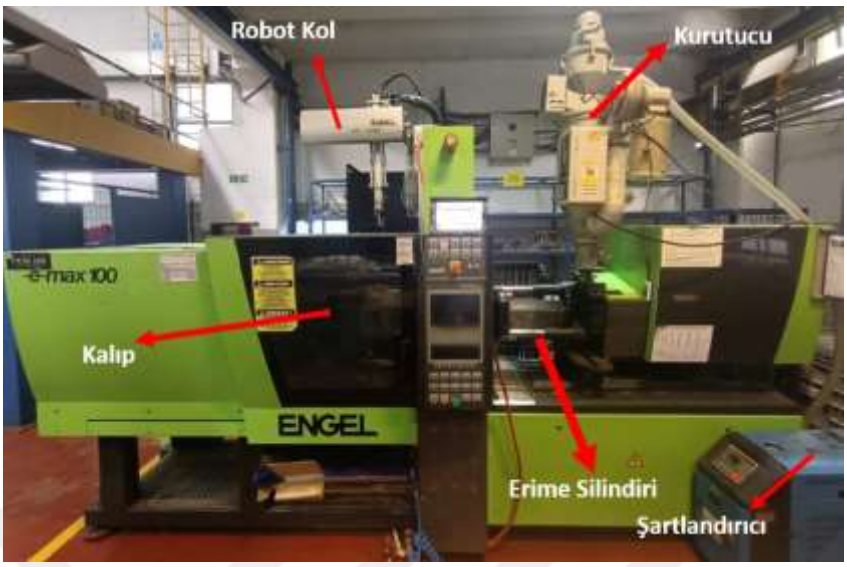
Bu çalışmalar, Digimat yazılımının, özellikle lif yönelimi, anisotropik davranış ve mekanik özellikler üzerine sağladığı faydalı analizler ile kompozit malzemelerin tasarımında ne kadar kritik bir rol oynadığını gözler önüne sermektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Plastik Enjeksiyon Makinesi

Plastik enjeksiyon yöntemi, plastik hammaddelerin eritilip bir kalıba enjekte edilerek istenilen şekle dönüştürülmesi işlemidir. Bu yöntem, seri üretimde oldukça yaygın bir şekilde kullanılır ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilir (Shahid ve Gukhool, 2020). Sistemin temel bileşenleri şunlardır (Şekil 3.1.):

- Kalıp (Mold): Kalıp, plastik malzemenin şekillendirilmesini sağlayan ana bileşendir. İki parçadan oluşur: sabit kalıp yarısı (fixed half) ve hareketli kalıp yarısı (moving half). Enjeksiyon sırasında erimiş plastik, kalıp boşluğuna doldurulur ve burada soğuyarak katılaşır. Kalıbın tasarımı, parçanın boyutlarına ve özelliklerine göre belirlenir.
- Erime Silindiri (Barrel): Plastik hammaddenin eritildiği ve karıştırıldığı kısımdır. Silindir içinde yer alan vida, plastik granülleri ileri doğru iterken aynı zamanda ısıtma elemanları tarafından malzemeyi eritir. Bu aşamada, plastik homojen bir şekilde eriyik hale gelir ve enjeksiyon için hazırlanır.
- Kurutucu (Dryer): Plastik hammaddelerin üretim öncesinde nemden arındırılması oldukça önemlidir, çünkü nem, malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Dryer, granülleri kurutarak nem oranını azaltır ve enjeksiyon için uygun hale getirir. Özellikle higroskopik malzemelerde (örneğin, PA, PET) bu adım kritik önemdedir.
- Robot Kol (Robot Arm): Üretilen parçaların kalıptan otomatik olarak çıkarılmasını sağlar. Bu otomasyon, üretim sürecini hızlandırır, iş güvenliğini artırır ve parçaların düzgün bir şekilde taşınmasını sağlar. Robot kol aynı zamanda ikinci işlem (örneğin, montaj) için parçaları taşımada da kullanılabilir.
- Şartlandırıcı (Conditioner): Kalıpta sıcaklık kontrolünü sağlamak için kullanılır. Kalıp sıcaklığının optimize edilmesi, hem parça kalitesini artırır hem de üretim sürecini hızlandırır. Kalıptaki sıcaklık dengesizlikleri, ürün üzerinde yüzey hataları veya boyutsal bozukluklara neden olabilir. Conditioner, kalıp içindeki soğutma kanalları aracılığıyla sıcaklığı düzenler.

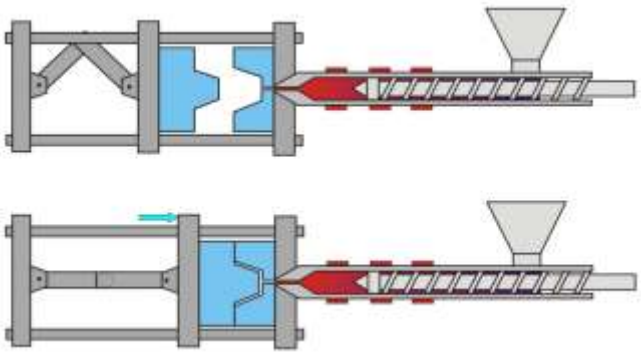


Şekil 3.1. Plastik enjeksiyon makinesi

3.1.1. Plastik enjeksiyon süreci adımları

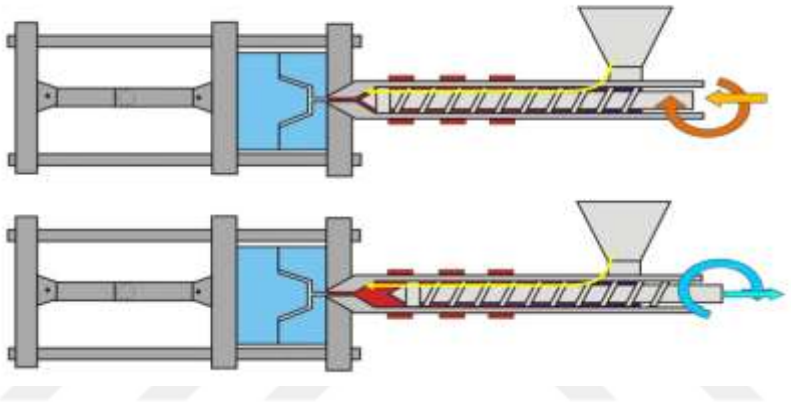
Plastik enjeksiyon süreci aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir.

- Kurutma: Plastik granüller, nem içeriğinin uzaklaştırılması için dryer (kurutucu) kullanılarak kurutulur.
- Eritme ve Karıştırma (Dozaj Aşaması): Kurutulan plastik granüller, barrel (namlu) içinde eritilir ve homojen bir eriyik haline getirilir. Eriyik, ön odaya (antechamber) taşınarak bir sonraki döngü için hazırlanır.
- Kalıp Kapanması: Kalıp, enjeksiyon işlemi için tamamen kapanır ve sıkıca mühürlenir (Şekil 3.2.).



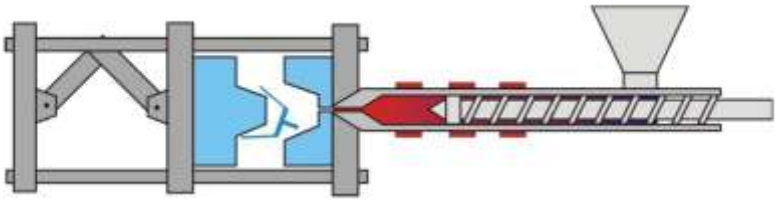
Şekil 3.2. Plastik enjeksiyon makinesi kalıbın kapanması (Radzi vd. 2021'den değiştirilerek alınmıştır)

- Enjeksiyon: Eriyik halindeki plastik, yüksek basınçla kalıp boşluğuna enjekte edilir. Bu aşamada, eriyik plastiğin tüm boşluğu doldurması sağlanır (Şekil 3.3.).
- Tutma Aşaması: Kalıp tamamen dolduğunda, basınç kontrollü tutma aşamasına geçilir. Bu aşama, soğuma sırasında oluşan hacim küçülmesinin telafi edilmesini sağlar. Tutma sırasında, toplam hacmin %10'una kadar bir miktar kalıba aktarılır.
- Soğutma: Plastik, kalıp içinde soğuyarak katılaşır. Bu aşama, parçanın şekil ve dayanıklılık kazanmasını sağlar.



Şekil 3.3. Plastiğin kalıba enjekte edilmesi (Radzi vd. 20212021'den değiştirilerek alınmıştır)

- Parça Çıkartma: Kalıp açılır ve robot kol yardımıyla parça kalıptan çıkarılır. Parça, kalıp dışında ortam sıcaklığına kadar soğumaya devam eder (Şekil 3.4.).



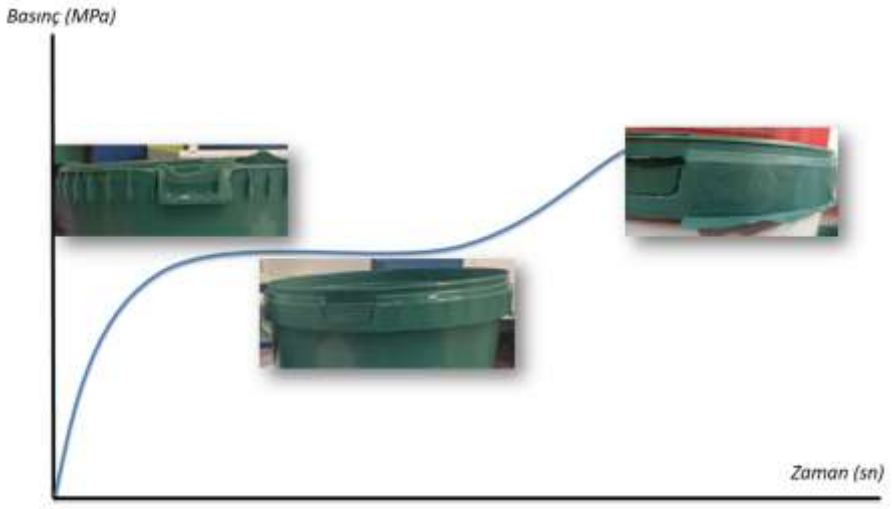
Şekil 3.4. Parçanın kalıptan çıkarılması (Radzi vd. 20212021'den değiştirilerek alınmıştır)

3.1.2. Plastik enjeksiyon sürecini etkileyen parametreler

Plastik enjeksiyon prosesi sırasında parça kalitesini etkileyen parametreler, en az etkili olandan en çok etkili olana doğru sıralandığında şu şekilde açıklanabilir: Kalıp sıcaklıkları önemli bir parametre olarak karşımıza çıkar. Özellikle, hareketli kalıp yarısı sıcaklığı ve sabit kalıp yarısı sıcaklığı, enjeksiyon sürecinde kaliteyi etkilerken orta düzeyde bir öneme sahiptir. Ancak, bu parametreler, eriyik yastığı veya eriyik sıcaklığı gibi diğer işlem parametreleri kadar etkili değildir.

Enjeksiyon prosesi parametreleri arasında, enjeksiyon hızı ve dozaj süresi, parça kalitesine doğrudan etkisi olan önemli parametreler arasında yer alır. Çevrim süresi ise, genellikle üretim hızını artırmak için optimize edilse de, kalite üzerindeki etkisi görece daha düşüktür.

Bununla birlikte, maksimum kavite basıncı ve kavite basıncı integrali, kaliteyi etkileyen en kritik parametrelerdir. Bu parametreler, parçanın doğru şekillenmesi ve homojen bir yapının sağlanması açısından en büyük etkiye sahiptir. Özellikle, bu parametrelerin doğru ayarlanması, kalıptaki hataları en aza indirirken, ürün kalitesini maksimum seviyeye çıkarabilir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Basınç parametresinin parça kalitesine etkisi

Sonuç olarak, plastik enjeksiyon prosesinde kalite üzerinde en az etkili olan parametre çevrim süresi iken, kavite basıncı integrali ve maksimum kavite basıncı en kritik öneme sahiptir. Diğer tüm parametreler ise kaliteyi belirli oranlarda etkileyerek sürecin genel performansını şekillendirir.

3.1.3. Enjeksiyon sonucu oluşabilecek muhtemel hatalar

Plastik enjeksiyon sürecinin sonrasında çeşitli hatalar meydana gelebilir. Bu hatalar, üretim sürecindeki parametrelerin doğru bir şekilde ayarlanmaması durumunda ortaya çıkabilir. Aşağıda, plastik enjeksiyon sonrası oluşabilecek bazı hatalar ve bu hataların açıklamaları yer almaktadır (Şekil 3.6.):



Şekil 3.6. Plastik enjeksiyon hataları (Brightworks Engineering, 2025; Fluent Co., 2025; Teknikde, 2025)

- Değişik Yönlere Bükülme (Warping): Plastik enjeksiyon sırasında, parçanın soğuma süreci sırasında meydana gelen sıcaklık farkları, parçanın farklı bölgelerinde farklı büzülmelere yol açabilir. Bu durum, parçanın şekil bozukluğuna, yani warping'e (değişik yönlere bükülme) neden olabilir. Özellikle, kalıp sıcaklıklarının eşit olmaması, bu tür hataların en yaygın sebeplerindendir.
- Çökmeler (Sink Marks): Sink mark, parçanın yüzeyinde bir çökme veya girinti gibi görünen, genellikle büyük hacimli bölgelerde meydana gelen bir hatadır.

Bu, plastik malzemenin hızlı soğuyarak yoğunlaşması sırasında, kalıp içinde eriyik malzemenin yetersiz kalmasından kaynaklanır. Enjeksiyon hızı ve kavite basıncı gibi parametreler düzgün bir şekilde ayarlanmazsa bu hata daha belirgin hale gelebilir.

- Baloncuklar ve Boşluklar (Bubbles and Voids): Eğer plastik malzeme içeriğinde fazla nem veya gaz varsa, bu gazın kalıp içinde hapsolmasına neden olabilir. Soğuma sırasında bu gazlar baloncuklar ya da boşluklar (voids) oluşturur. Kurutma sürecinin düzgün yapılmaması ve malzeme içindeki nem oranının yüksek olması bu tür hataların başlıca sebeplerindendir. Ayrıca, enjeksiyon hızı çok düşük olursa, gazın kalıp içinde hapsolması daha olasıdır.
- Yarım Doldurma (Short Shot): Kalıbın yeterince dolmaması ve istenilen şeklin tam olarak alınamaması durumuna short shot denir. Bu hatanın başlıca sebepleri arasında enjeksiyon basıncı, sıcaklık ve enjeksiyon hızı gibi parametrelerin yetersiz ayarlanması yer alır. Ayrıca, kavitenin doğru şekilde doldurulamaması ve yetersiz eriyik akışı da bu hataya neden olabilir.
- Taşma (Flash): Flash, enjeksiyon sırasında plastik malzemenin kalıp birleşim hattından taşması durumudur. Bu, genellikle kalıp arasındaki açıklıkların fazla olması veya kavite basıncının aşırı yüksek olması nedeniyle oluşur. Bu tür bir hata, parçanın yüzeyinde kalıp birleşim izlerinin oluşmasına neden olabilir.
- Soğuk Yastık (Cold Slug): Enjeksiyon sırasında, kalıp boşluğuna soğuk ve katılaşmış plastik yastıkların girmesi cold slug adı verilen hataya yol açar. Bu, genellikle eriyik sıcaklığı düşük olduğunda ve enjeksiyon hızı düşük ayarlandığında meydana gelir. Soğuk yastıklar, kalıpta malzemenin düzgün bir şekilde dağılmasını engeller.
- Çıkarma Pimi İzleri (Ejector Pin Marks): Üretilen parçaların kalıptan çıkarılması sırasında, çıkarıcı pimler tarafından parçanın yüzeyinde izler bırakılabilir. Bu, genellikle kuru koşullar veya hatalı robot kolu yerleşimi gibi unsurlar nedeniyle meydana gelir. Bu izler, özellikle estetik olarak önemli parçalar için kabul edilemez.
- Aşırı Doldurma (Overpacking): Kalıp tamamen dolduktan sonra, plastik malzeme üzerindeki basıncın aşırı artması, parçanın bazı bölgelerinde aşırı

büzülmelere neden olabilir. Bu tür hatalar genellikle kavite basıncı ve enjeksiyon süresi parametrelerinin hatalı ayarlanmasından kaynaklanır.

- Birleşme İzi (Weld Line): Plastik enjeksiyon sırasında, malzemenin birden fazla akış yolundan geçip birleştiği bölgelerde meydana gelir. Bu bölgelerde malzeme birleştikçe, birleşme sırasında meydana gelen yüzey hataları birleşme izi (weld line) olarak bilinir. Bu izler genellikle parçanın estetik ve mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir. Enjeksiyon hızı, kavite basıncı ve eriyik sıcaklıkları gibi parametrelerin uygun bir şekilde ayarlanması, birleşme izlerinin oluşumunu en aza indirebilir.

Plastik enjeksiyon prosesinde bu tür hataların önlenmesi için, parametrelerin dikkatlice ayarlanması gereklidir. Enjeksiyon hızı, kavite basıncı, eriyik sıcaklığı ve kalıp sıcaklıkları gibi kritik parametrelerin doğru kontrol edilmesi, parça kalitesini doğrudan etkiler. Bu hataların minimize edilmesi, üretim sürecinin verimliliğini artırırken, son ürünün mekanik ve estetik özelliklerini iyileştirir.

3.2. Kalıp Akış Analizi, Fiber Oryantasyon ve Birleşme İzi Etkisi

Plastik enjeksiyon prosesinde kaliteyi etkileyen parametrelerin doğru ayarlanması kadar, kalıp akışının ve parçanın iç yapısının da doğru şekilde analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Kalıp akış analizi, fiber oryantasyonu ve birleşme izlerinin (weld line) etkisi, parçanın mekanik ve estetik özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

3.2.1. Kalıp akış analizi önemi ve etkileri

Kalıp akış analizi, plastik enjeksiyon sürecinin en kritik aşamalarından biridir ve parçanın şekil ve dayanıklılığını doğrudan etkileyen bir süreçtir (Zhou vd., 2013). Bu analiz, eriyik plastiğin kalıp içinde nasıl hareket ettiğini, dolum sürecinde hangi bölgelere daha fazla akış sağlandığını ve potansiyel olarak oluşabilecek hataları (örneğin, birleşme izleri, çökmeler, baloncuklar vb.) belirlemeye yönelik bir modelleme tekniğidir. Kalıp akış analizinin doğru bir şekilde yapılması, parçaların üretiminde verimlilik sağlar, hataları minimize eder ve son ürünü optimize eder.

Enjeksiyon sırasında, plastik eriyiği kalıba enjekte edilirken malzemenin nasıl hareket edeceği ve kalıp içinde ne şekilde dağılıp şekilleneceği, üretim sürecinin başarısını etkileyen temel faktörlerden biridir. Kalıp akış analizi sayesinde, kavitelerin dolum süreleri, akış hızları ve baskı uygulama süreleri önceden tahmin edilebilir. Bu, kalıp tasarımının optimize edilmesine ve potansiyel hataların erken aşamada tespit edilmesine olanak sağlar. Ayrıca, doğru akış sağlanamazsa, parçanın şekli bozulabilir veya istenilen dayanıklılık elde edilemeyebilir (Shahid ve Gukhool, 2020) .

Kalıp akış analizi, malzemenin eşit olmayan şekilde dağılmasının, farklı bölgelere farklı akış hızlarının uygulanmasının ve özellikle soğuma sırasında oluşan büzülme gibi etkilerin önüne geçilmesini sağlar. Bu da sonuçta parçaların hatasız ve estetik olarak daha düzgün olmasını sağlar. Ayrıca, kavite basıncı, eriyik sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi parametreler doğru bir şekilde belirlenerek parçaların doğru şekilde şekillendirilmesine yardımcı olur.

Karmaşık geometriler, parçaların şekil ve fonksiyonel gereksinimlerini karşılarken, akışkanın kalıp içinde düzgün bir şekilde hareket etmesini zorlaştırabilir. Özellikle dar ve uzun kanallar, ince duvarlar veya zor erişilebilen alanlar, akışkanın yeterli şekilde dağılmasını engelleyebilir. Bu tür bölgelere yeterli akış sağlanamadığında, birleşme izleri, soğuma hataları veya yetersiz dolum gibi problemler ortaya çıkabilir.

Kalıp akış analizinin bu tür geometrik zorluklara nasıl çözüm sunduğu büyük önem taşır. Akış simülasyonları, malzemenin bu karmaşık bölgelerde nasıl hareket edeceğini ve hangi parametrelerin en iyi sonucu vereceğini belirlemeye yardımcı olur. Aynı zamanda dolum bölgeleri üzerinde yapılan analizler, enjeksiyon sırasındaki sıcaklık ve basınç dengesizliklerini minimize etmeye yönelik çözümler geliştirilmesini sağlar. Örneğin, bazı bölgelerde fazla akışa neden olan yüksek basınçlar, malzemenin dengesiz soğumasına yol açabilir. Diğer bölgelerde ise düşük akış, kalıp boşluğunun tam olarak doldurulamamasına ve parça hatalarına yol açabilir. Bu nedenle, kalıp akış analizleri, akışın her bölgedeki etkisini dikkatlice değerlendirerek en uygun enjeksiyon parametrelerinin belirlenmesini sağlar.

Günümüzde, kalıp akış analizini yapmak için yaygın olarak kullanılan yazılımlar arasında Moldex3D, Autodesk Moldflow, Simpoe-Mold ve Fluent gibi programlar bulunmaktadır. Bu yazılımlar, enjeksiyon sürecindeki akışkan davranışlarını simüle eder ve parçanın çeşitli parametreler altındaki davranışını öngörmeye olanak tanır (Osswald, 1998; Wang 1991).

Özellikle Moldex3D gibi yazılımlar, kalıp içindeki akışkanın dinamiklerini detaylı bir şekilde modelleyebilir ve analiz edebilir. Moldex3D, akışkanların kalıp içinde nasıl hareket ettiğini, kavitelerin nasıl doldurulduğunu, eriyik sıcaklığını, basıncı ve soğuma davranışlarını simüle eder. Bu yazılım, kalıp tasarımının optimizasyonu ve parametrelerin doğru ayarlanması için güçlü araçlar sunar. Ayrıca, fiber oryantasyonu ve birleşme izlerinin oluşumunu modelleyerek, parçanın mekanik özelliklerini iyileştirmeye yönelik bilgiler sağlar.

Kalıp Akış Analizinin Temel Adımları:

- Modelleme ve Geometri Oluşturma: İlk adımda, parça ve kalıp geometrisi detaylı bir şekilde oluşturulur. Bu, yazılımın doğru bir şekilde simülasyon yapabilmesi için önemlidir.
- Malzeme Özelliklerinin Girişi: Kullanılacak plastik malzemenin özellikleri (örneğin, viskozite, akışkanlık, sıcaklık davranışı) sisteme girilir.
- Sınır Koşulları ve Parametrelerin Belirlenmesi: Enjeksiyon hızı, basınç, sıcaklık ve soğuma gibi parametreler belirlenir. Bu parametrelerin doğru seçilmesi, akış simülasyonunun doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir.
- Simülasyon ve Akış Analizi: Yazılım, akışın simülasyonunu gerçekleştirir ve kalıp içinde eriyik plastik malzemenin nasıl hareket edeceğini tahmin eder. Bu aşama, potansiyel hataları (örneğin, birleşme izleri, çökmeler) önceden tespit etmeye yönelik sonuçlar sunar.
- Sonuçların Yorumlanması: Simülasyon sonuçları, kalıp içindeki sıcaklık, basınç ve akış hızlarını gösteren haritalarla birlikte analiz edilir. Bu, kalıp tasarımının ve parametrelerin iyileştirilmesine yönelik bilgi sağlar.

- Optimizasyon: Son olarak, analiz sonuçlarına dayanarak kalıp tasarımında veya enjeksiyon parametrelerinde gerekli değişiklikler yapılır.

3.2.2. Fiber oryantasyonunun önemi ve etkileyen faktörler

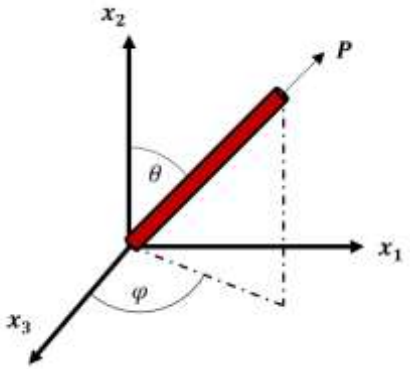
Fiber oryantasyonu, fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle, fiberlerin doğru yönde yerleşmesi, parçanın mukavemetini, rijitliğini ve dayanıklılığını doğrudan etkileyebilir. Fiberler, plastik enjeksiyon sürecinde genellikle akış yönüne paralel olarak yerleşirken, bu oryantasyonun optimize edilmesi, malzemenin istenilen özelliklere sahip olmasını sağlar. Yanlış oryantasyon, zayıf bölgelere yol açarak parçanın mekanik performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Örneğin, fiberlerin yönlenmesinin hatalı olması, parçanın çekme dayanımını düşürebilir ve kırılma eğilimini artırabilir (Chawla, 2013).

Fiberlerin yönlenmesi, plastik enjeksiyon sürecinde birçok parametreden etkilenir. Bu parametreler arasında dolum hızı, kalıp sıcaklığı ve kalıp geometrisi en kritik olanlardır.

- Dolum Hızı: Enjeksiyon hızı, fiberlerin yönlenmesinde önemli bir rol oynar. Yüksek dolum hızları, fiberlerin akışa paralel olarak daha iyi yerleşmesini sağlar. Ancak çok yüksek enjeksiyon hızları, fiberlerin karışmasına ve homojen olmayan bir yönelme meydana gelmesine yol açabilir. Düşük enjeksiyon hızları ise fiberlerin kalıp içinde daha düzensiz bir şekilde dağılmasına sebep olabilir. Bu nedenle, enjeksiyon hızının dikkatlice ayarlanması, fiberlerin düzgün bir şekilde yönlenmesini ve malzemenin mekanik özelliklerinin optimize edilmesini sağlar (Zhou ve Hrymark, 2024; Hopmann ve Köbel; 2024).
- Kalıp Sıcaklığı: Kalıp sıcaklığı, fiberlerin oryantasyonunu doğrudan etkileyen bir başka önemli parametredir. Yüksek kalıp sıcaklıkları, malzemenin eriyik haldeyken daha akışkan olmasına neden olur ve bu, fiberlerin yönlenmesini kolaylaştırır. Ancak çok yüksek sıcaklıklar, malzemenin viskozitesinin düşmesine ve akışın kontrolsüz hale gelmesine yol açabilir. Düşük kalıp sıcaklıkları ise, akışkanlığın azalmasına ve fiberlerin akışa daha dirençli olmasına yol açarak yönlenmelerini zorlaştırabilir (Oubellaouch vd., 2024;.Nega vd., 2024; Salomone vd., 2024)

- Kalıp Geometrisi: Karmaşık geometrilere sahip kalıplarda, akışın yönü ve hızı farklı bölgelerde değişir, bu da fiberlerin farklı yönlerde yerleşmesine neden olabilir. Özellikle, kalıptaki dar bölgeler ve köşe kısımları, akışın yavaşlamasına ve fiberlerin burada daha sıkı bir şekilde yönlenmesine yol açabilir. Kalıp geometrisinin tasarımı, fiberlerin düzgün bir şekilde yönlenmesini ve parçanın istenilen mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Hsieh vd., 2024; Jiang vd., 2024).

Fiber oryantasyonu teorik olarak, her bir fiberin yönelimi ile ilişkilendirilmiş birim vektör P kullanılarak tanımlanan tensörler ile ifade edilmektedir. Şekil 3.7., fiber oryantasyonunun tensörel temsili gösterilmekte olup, tensörlerin malzeme içindeki fiberlerin yönsel özelliklerini nasıl kapsadığını açıklamaktadır (SadAbadi ve Ghasemi, 2007).



Şekil 3.7. Oryantasyon vektörünün tanımı

$$A_{ij} = \langle P_i P_j \rangle = \int P_i P_j \psi\,(P) dP \tag{3.1}$$

Burada $\psi(P)$ oryantasyon dağılım fonksiyonunu ifade etmektedir. P bileşenleri θ ve φ ile ilişkilidir. Her fiberin belirli bir yönelime sahip olması gerektiğinden, normalizasyon şartı şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \psi(\theta, \varphi) sin\theta d\theta d\varphi = 1 \tag{3.2}$$

Ayrıca, *Aij* simetrik bir tensördür:

$$A_{ij} = A_{ji} \tag{3.3}$$

$$A_{11} + A_{22} + A_{33} = 1 \tag{3.4}$$

Burada A_{11}, 0 ile 1 arasında değişen bir değerle akış yönündeki fiber oryantasyonunu; A_{33} ise akışa dik yöndeki fiber oryantasyonunu temsil etmektedir. Koordinat sistemi açısından $X = x_3$, $Y = x_1$ ve $Z = x_2$ olarak tanımlanmaktadır.

Oryantasyon tensöründeki diyagonal değerler, ilişkili oldukları ilgili eksendeki fiber oryantasyonunun yoğunluğunu tanımlar. Özel durumlar için oryantasyon tensörünün bazı örnekleri aşağıda sunulmuştur.

- Tüm fiberler ilk ana yönde yönlendirildiğinde, yönlendirme şu şekilde gösterilir:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

- Fiberler, birinci ve ikinci ana yönün iki boyutlu (2D) düzleminde rastgele yönlendirildiğinde, yönlendirme şu şekilde gösterilir:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ & \frac{1}{2} & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

- Fiberler üç boyutlu (3D) uzayda rastgele yönlendirildiğinde yönlendirme şu şekilde gösterilir:

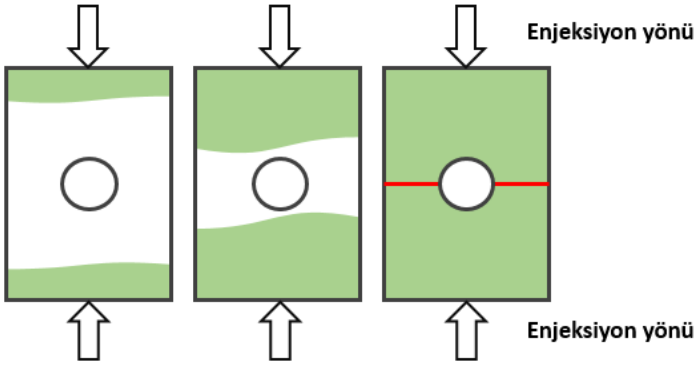
$$A_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ & \frac{1}{3} & 0 \\ & & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Karmaşık geometrilerde fiberlerin yönlenmesi, özellikle akış yolunun tortu, yavaşlama ve yoğunlaşma gibi faktörlere bağlı olarak daha karmaşık hale gelir. Bu durum, özellikle parçanın güçlü bölgelerinde fiberlerin hizalanmasını zorlaştırabilir. Ancak doğru parametrelerle yapılan bir enjeksiyon süreci, fiberlerin yönlenmesinin optimize edilmesini sağlayarak parçanın tüm yüzeylerinde mekanik özelliklerin düzgün bir şekilde dağılmasını mümkün kılar. Örneğin, parçanın bir tarafında daha yoğun bir fiber oryantasyonu, diğer tarafına göre daha fazla mukavemet ve rijitlik sağlayabilir. Bu, fiberlerin doğru şekilde yönlendirildiği ve kalıplama sürecinin optimize edildiği durumlarda daha verimli bir parça tasarımı elde edilmesini sağlar.

Fiber oryantasyonu, parçanın mekanik özellikleri için temel bir faktördür ve plastik enjeksiyon sürecinde dolum hızı, kalıp sıcaklığı ve kalıp geometrisi gibi parametreler bu oryantasyonu doğrudan etkiler. Karmaşık geometrilere sahip parçalar söz konusu olduğunda, bu parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanması, fiberlerin homojen bir şekilde yönlenmesini ve dolayısıyla parçanın genel performansının iyileştirilmesini sağlar.

3.2.3. Birleşme izi oluşumu ve etkisi

Birleşme izi, plastik enjeksiyon kalıplama sürecinde, eriyik plastik akışının kalıp içinde birden fazla akış yolundan birleştiği noktada oluşan çizgi veya hatlardır (Şekil 3.8.). Bu hatlar, enjeksiyon sırasında akışın iki veya daha fazla akış yolundan geçtiği bölgelerde meydana gelir. Çoğu zaman, bu hatlar estetik ve mekanik açıdan olumsuz sonuçlar doğurabilir, çünkü birleşim bölgesinde materyalin homojenliği bozulur. Bu da, parçanın dayanıklılığını ve estetiğini olumsuz etkileyebilir. Birleşme izinin oluşumu, özellikle karmaşık geometrilerde ve çok sayıda akış yolunun olduğu kalıplarda daha belirgin hale gelir.



Şekil 3.8. Eriyik akışının birleştiği bölgedeki birleşme izi

Enjeksiyon işlemi sırasında eriyik plastiğin farklı akış yollarından gelen malzeme akışlarının birleşmesiyle oluşur. Enjeksiyon sırasında, malzeme kalıp içinde hızla hareket eder ve kalıp boşluğuna doldurulmaya başlar. Akış yolları genellikle, kalıbın farklı bölgelerine yerleştirilen enjeksiyon nozulundan malzeme akarken iki ya da daha fazla yöneltilmiş alanda birleşir. Bu birleşim bölgesinde, plastik malzeme arasında birleştirici bağlar oluşur, ancak bu bağlar genellikle orijinal materyale göre daha zayıf olur. Bu nedenle, birleşim hattı boyunca genellikle bir zayıflama noktası ve viskozite farklılıkları gözlemlenir.

Birleşme izi oluşumu, çeşitli parametrelerin etkisi altındadır. Bunlar arasında enjeksiyon hızı, sıcaklık ve dolum bölgesi önemli rol oynamaktadır:

- Enjeksiyon Hızı: Enjeksiyon hızının düşük olması, akışın kalıp içinde yavaş hareket etmesine yol açar ve bu durum, akış yollarının birleşmesini zorlaştırabilir. Düşük hızda, eriyik plastik kalıbın içinde yeterince yayılmadığı için birleşme sırasında bağlar zayıf olabilir. Yüksek enjeksiyon hızları, birleşme bölgesinin düzgün olmasını sağlasa da, aşırı hız fiber yönlenmesini engelleyebilir ve fazla basınca yol açarak malzemenin homojen olmayan akışına neden olabilir (Liu vd., 2024; Uyen vd., 2024; Pieressa vd., 2024; Tang vd., 2024).
- Sıcaklık: Kalıp sıcaklığı, melt (eriyik) plastiğin viskozitesini etkiler. Yüksek sıcaklıklar, eriyik plastiğin daha akışkan hale gelmesini sağlar, bu da akış yollarının birleşme bölgesinde malzemenin daha kolay kaynaşmasına yardımcı olabilir. Ancak, çok yüksek sıcaklıklar birleşme bölgesindeki malzemenin aşırı

sıvı hale gelmesine ve buna bağlı olarak birleşme yerlerinde zayıflıklara yol açabilir. Düşük sıcaklıklar ise birleşme noktasında malzemenin yeterince akışkan olmamasına ve dolayısıyla zayıf bağların oluşmasına neden olabilir (Truong vd., 2024).

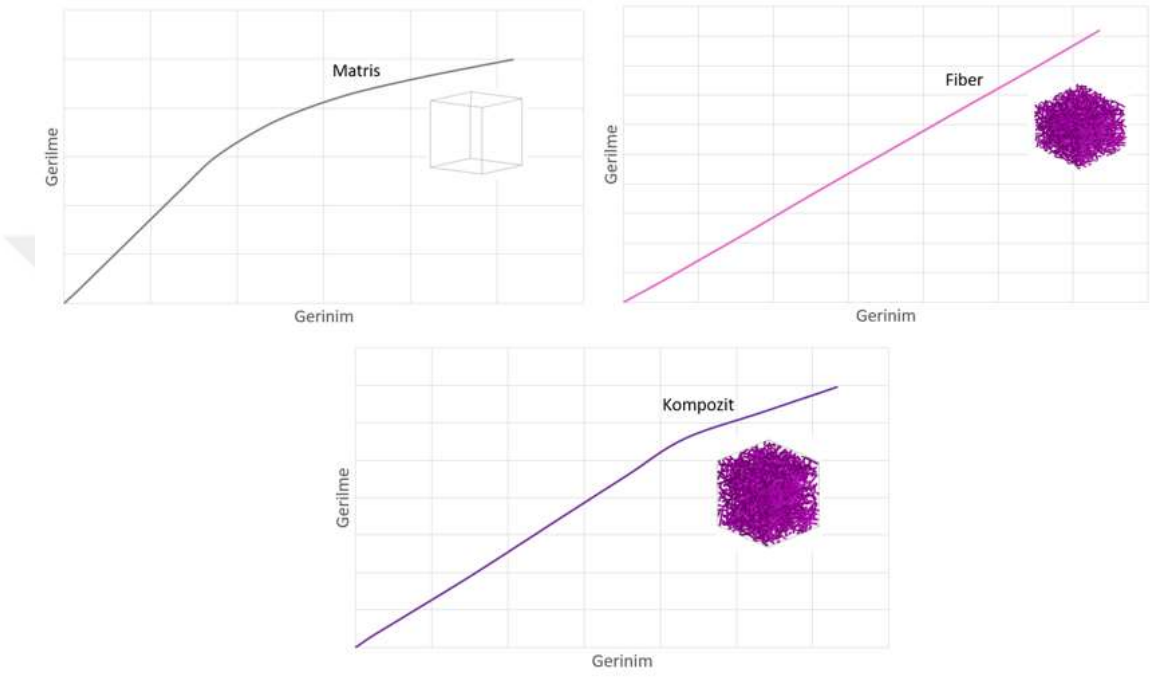
- Dolum Bölgesi: Dolum bölgesindeki basınç ve hız, birleşme izinin oluşumunu etkiler. Kalıp içinde farklı dolum bölgeleri arasında geçişler, birleşme bölgesindeki akışın düzgün olmamasına yol açabilir. Örneğin, kalıp içinde dar geçiş noktaları veya keskin köşeler varsa, eriyik malzeme burada daha yavaş ilerler ve birleşme sırasında bağlar zayıflayabilir (Kameya vd., 2024).

Karmaşık geometrilere sahip kalıplar, birleşme izlerinin daha belirgin şekilde oluşmasına neden olmaktadır. Bu tür geometrilerde akış yolları farklı hızlarla ve yönlerde hareket etmekte, bu durum birleşim noktalarındaki akışın düzensizliğine yol açmaktadır. Keskin köşeler veya dar alanlar gibi bölgelerde eriyik plastik malzemenin akışı yavaşlamakta, birleşme bölgesindeki malzeme akışının zayıflaması sonucunda birleşme izleri ortaya çıkmaktadır. Özellikle parçanın dayanıklılığı açısından kritik olan bölgelerde birleşme izi oluşumu artmaktadır.

Birleşme izleri, yalnızca estetik sorunlara yol açmakla kalmayıp, aynı zamanda parçanın mekanik özelliklerini de olumsuz etkilemektedir. Zayıf birleşim bölgeleri, parçanın çekme dayanımını, darbe dayanımını ve genel mukavemetini azaltmaktadır. Bu durum, özellikle yapısal uygulamalar için üretilen parçalarda ciddi problemlere neden olmaktadır. Birleşme bölgelerinde oluşan zayıf bağlar, parçanın kırılma noktalarını oluşturarak kullanım ömrünü kısaltmaktadır. Bu nedenle, plastik enjeksiyon sürecinde birleşme izlerinin oluşumu, doğru parametrelerin ve kalıp tasarımının optimize edilmesi ile kontrol altına alınabilmektedir. Enjeksiyon hızı, sıcaklık, dolum bölgesi ve karmaşık geometriler, birleşme izlerinin oluşumunu etkileyen temel faktörlerdir. Bu izlerin azaltılması veya önlenmesi, parçaların estetik ve mekanik özelliklerini iyileştirmekte, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmaktadır.

3.3. Ortalama Alan Homojenizasyon Yaklaşımı

Homojenizasyon, kompozit malzemelerin faz özellikleri ve mikro yapı tanımlamaları kullanılarak makro yapıdaki özelliklerinin ve performansının elde edilmesi sürecidir (Şekil 3.9.). Bu süreçte, malzemenin mikro yapısal düzeydeki bileşenleri dikkate alınarak, makroskobik düzeydeki etkili özellikler hesaplanır (Tariq vd., 2024).



Şekil 3.9. Kompozit malzemelerde matris ve fiber katkısının mekanik etkisi

Digimat yazılımında iki farklı homojenizasyon yöntemi bulunmaktadır: doğrudan sonlu elemanlar tabanlı (FEA) homojenizasyon ve ortalama alan homojenizasyonu (MFH). FEA yöntemi, malzeme mikro yapısının detaylı alan sonuçlarını sağlayarak karmaşık analizler için faydalıdır. Ancak MFH yöntemi, faz özellikleri ve mikro yapı tanımlarını temel alarak, kompozit malzemelerin makroskobik özelliklerini hızlı bir şekilde hesaplayabilen pratik bir alternatiftir. MFH yöntemi özellikle doğrusal elastiklik analizlerinde tercih edilir, çünkü daha basit ve hızlıdır, ayrıca CPU ve bellek kullanımını minimize eder.

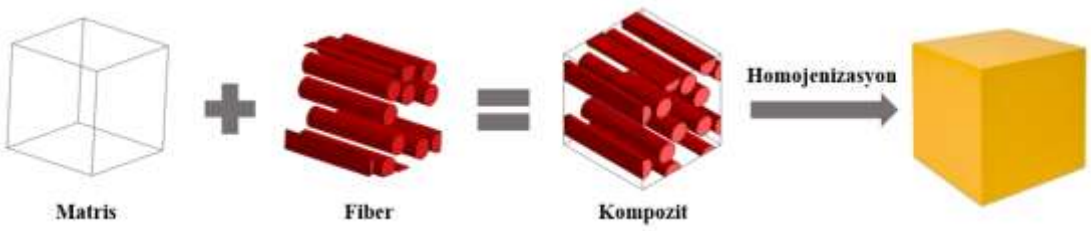
MFH içerisinde iki alt yöntem bulunmaktadır: Çift kapanım yöntemi ve Mori-Tanaka yöntemi. Çift kapanım yöntemi, Hori ve Nemat-Nasser (1993) tarafından önerilen bir model olup, elipsoidal fiberlerin başka bir elipsoidal matris içinde yer aldığı bir yapıyı

tanımlar. Bu yöntem, fiber ve matris fazları arasındaki gerilme yoğunlaşma tensörünü dikkate alarak, farklı fiber konfigürasyonlarına sahip kompozitlerin etkin özelliklerini belirler (Trzepieciński vd., 2018). Mori-Tanaka yöntemi (1973) ise, seyrek olmayan fiberlere sahip çok fazlı malzemelerin etkin özelliklerini değerlendiren bir yöntemdir. Bu yöntem, fiberlerin elipsoidal bir şekilde rastgele yönlendirildiği varsayımına dayanır ve genellikle düşük ve orta hacim oranına sahip kompozitler için hesaplama açısından verimlidir. Fiber-matris gerinim etkileşimlerini matris gerinimi üzerinden ortalarken, çift kapanım modeli fiber ve matris arasındaki etkileşimleri daha ayrıntılı bir şekilde temsil eder ve bu nedenle daha karmaşık analizlerde gerekli olabilir. Mori-Tanaka yöntemi, doğruluk ve hesaplama verimliliği arasında bir denge sağladığı için genellikle tercih edilen homojenizasyon yöntemidir.

3.4. Farklı Tipte Elyafla Güçlendirilmiş Kompozitlerin Makine Öğrenimi Algoritmaları Kullanılarak Makroskobik Davranışın Tahmin Edilmesi

Bu bölümde, elastik matrisli sürekli elyaf takviyeli kompozitler ile elastoplastik matrise sahip kısa elyaf takviyeli kompozitlerin homojenizasyonu Mori-Tanaka yöntemi ve Tariq vd. (2024) tarafından geliştirilen makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak incelenmiştir. Her iki çalışma kapsamında, girdi parametreleri ve bu parametrelerin minimum ile maksimum değerleri belirlenmiş, bu doğrultuda bir tasarım alanı oluşturularak sanal veri üretilmiştir. Bu veriler, makine öğrenimi algoritmaları ile işlenmiş ve kompozit malzemelerin makroskobik davranışlarının tahmini gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Elastik matrisli sürekli elyaf takviyeli kompozit için Mori-Tanaka yöntemi



Şekil 3.10. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin homojenizasyonu

İki fazlı kompozitler bağlamında, v_m matrisin hacmini, v_f lifin hacmini ve v_c ise temsil edici hacim elemanının (RVE) hacmini ifade eder (Şekil 3.10). Matris ve lifin hacim oranı şu şekilde ifade edilebilir (m matris, *f* lifler için kullanılmıştır):

$$\mathrm{V}_m = \frac{\mathrm{v}_m}{\mathrm{v}_c} = 1 - \mathrm{V}_f \tag{3.8}$$

$$\mathrm{V}_f = \frac{\mathrm{v}_f}{\mathrm{v}_c} = 1 - \mathrm{V}_m \tag{3.9}$$

Matris ve fiber hacimlerinin RVE hacmine oranlarının toplamı 1'e eşittir. Aşağıdaki ifade, RVE üzerindeki ortalama bir büyüklüğü tanımlamaktadır; burada $f\,(x, \bar{x})$, RVE içerisindeki mikro alanı temsil etmekte olup, entegrasyon mikro koordinatlara göre gerçekleştirilmektedir.

$$\langle f(x, \bar{x}) \rangle = \frac{1}{\mathrm{v}_c} \int_{\omega} f(x, \bar{x}) d\mathrm{v}_c \tag{3.10}$$

İki fazlı kompozitler için hacim ortalaması aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\langle f \rangle = \mathrm{V}_f \langle f \rangle_f + \mathrm{V}_m \langle f \rangle_m \tag{3.11}$$

Buna göre RVE, fiber fazı ve matris fazı üzerindeki gerinim alanının hacim ortalamaları arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\langle \bar{\varepsilon} \rangle = \mathrm{V}_f \langle \varepsilon \rangle_f + \mathrm{V}_m \langle \varepsilon \rangle_m \tag{3.12}$$

Bir gerinim yoğunlaşma tensörü B^f, faz başına gerinim ortalamalarını birbirine bağlamaktadır:

$$\langle \varepsilon \rangle_f = B^f : \langle \varepsilon \rangle_m \tag{3.13}$$

Makroskobik gerilme ve her fazın gerilme ortalamaları şu şekilde bağlanır:

$$\langle \varepsilon \rangle_m = \left[\mathrm{V}_f B^f + \left(1 - \mathrm{V}_f\right) I \right]^{-1} : \langle \bar{\varepsilon} \rangle \tag{3.14}$$

$$\langle \varepsilon \rangle_f = B^f : \left[\mathrm{V}_f B^f + \left(1 - \mathrm{V}_f\right) I \right]^{-1} : \langle \bar{\varepsilon} \rangle \tag{3.15}$$

Mori-Tanaka modeli, Eshelby çözümünün yaklaşık kullanımına dayanmaktadır (Pierard vd., 2004). Gerilme konsantrasyon tensörü, gerilmenin hacim ortalamasını, ortalama matris gerilmesiyle ilişkilendiren şekilde şu şekilde formüle edilir:

$$B^f = H^f(I, C_m, C_f) = \left[I + \mathrm{V}_m S C_m^{-1} \left(C_f - C_m\right) \right]^{-1} \tag{3.16}$$

Burada, *Cm* ve *Cf* uniform sertlik, *I* bir tek fiberin elipsoidal hacmi, *H* tek fiber gerilme konsantrasyon tensörü ve *S* Eshelby tensörünü temsil etmektedir. Bu model için gerilme konsantrasyon tensörü, tek fiberin problemi ile aynıdır (Benveniste, 1987). İki fazlı lineer elastik kompozitlerde, makroskobik sertlik, gerilme konsantrasyon tensörü ile tanımlanan herhangi bir homojenizasyon modeli kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$C = \left[\mathrm{V}_f H^f \left(C_f - C_m\right) \right] + C_m I \tag{3.17}$$

Denklem 3.17, Denklem 3.16'ya göre şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$C = \left[\mathrm{V}_f \left(C_f - C_m\right) \right] \left[I + \mathrm{V}_m S C_m^{-1} \left(C_f - C_m\right) \right]^{-1} + C_m I \tag{3.18}$$

Denklem 3.18'deki tek bilinmeyen nicelik *S*'dir. Genel bir anizotropik malzeme verildiğinde, birim küre yüzeyi üzerinde parametrize edilmiş yüzey integrali, Eshelby tensörü için aşağıdaki değeri verir:

$$S_{ijkl} = \frac{1}{8\pi} C_{m_{mnkl}} \int_{-1}^{+1} d\zeta_3 \int_0^{2\pi} \{G_{imjn}(\bar{\xi}) + G_{jmin}(\bar{\xi})\}\, d\omega \tag{3.19}$$

Burada

$$\begin{gathered} G_{ijkl}(\bar{\xi}) = \bar{\xi}_k \bar{\xi}_l N_{ij}(\bar{\xi}) / D(\bar{\xi}) \\ \bar{\xi}_i = \frac{\zeta_i}{a_i} \\ \zeta_1 = (1-\zeta_3^2)^{1/2} \cos w, \\ \zeta_2 = (1-\zeta_3^2)^{1/2} \sin w \\ \zeta_{3=}\zeta_{3=} \\ D(\bar{\xi}) = \epsilon_{mnl} K_{ml} K_{n2} K_{l3} \\ N_{ij}(\bar{\xi}) = \frac{1}{2} \epsilon_{ikl} \epsilon_{jmn} K_{km} K_{ln} \\ K_{ik} = C_{m_{ijkl}} \bar{\xi}_j \bar{\xi}_l \end{gathered} \tag{3.20}$$

Burada $C_{m_{ijkl}}$, C_m matris sertlik tensörünün elemanlarını ve ε_{ijk} permütasyon tensörünü temsil etmektedir. a_i notasyonu, i=1,2,3, elipsoidal inklüzyonun üç ana eksenini ifade eder. $G_{ijkl}(\bar{\xi}) = \bar{\xi}_k \bar{\xi}_l N_{ij}(\bar{\xi}) / D(\bar{\xi})$ denklemi içindeki çift entegrasyonu gerçekleştirmek için aşağıdaki Gauss kuadratür formülü kullanılır.

$$S_{ijkl} = \frac{1}{8\pi} \sum_{p-1}^{M} \sum_{q=1}^{N} C_{0_{mnkl}} \{G_{imjn}(\omega_q, \zeta_{3p}) + G_{jmin}(\omega_q, \zeta_{3p})\} W_{pq} \tag{3.21}$$

M ve *N*, Eshelby tensörünü değerlendirmek için çift entegrasyonu gerçekleştiren Gauss kuadratür formülünde kullanılan nokta sayısını (toplamları) ifade eder. Özellikle, *M* ve *N* sırasıyla $\zeta 3$ ve ω üzerindeki integrasyon için kullanılan nokta sayılarını belirtir. *M* ve *N* seçimleri, a_1/a_2 ve a_1/a_3 boyut oranlarına dayanır. Transvers izotropik malzemeler için, dairesel kesitli silindirik sürekli bir fiber için *S*'yi değerlendirmede a_1/a_2 = 1 oranı dikkate alınır. Bu yapılandırmaya göre, *M* ve *N* değerleri sırasıyla 2 ve 16 olarak seçilir ve bu değerler Çizelge 3.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. İzotropik bir malzemede eliptik kesitli silindirik fiberler için *S*'nin belirlenmesindeki doğruluk

Boyut oranı (a_1/a_2)	**Toplam sayısı (M)**	**Toplam sayısı (N)**
1	2	16
2	2	46
5	2	100
10	2	160
20	2	280
50	2	400

DİGİMAT'taki tüm analizler, her bir RVE'deki sürekli fiberler dikkate alınarak, bu teorik arka plana uygun şekilde lineer elastik olarak gerçekleştirilmiştir. En genel formuyla, gerilme-gerinim ilişkisine dayanarak, transvers izotropik malzemenin sertlik matrisi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

Transvers izotropi durumunda, aşağıdaki ilişkiler elde edilir.

$$C_{22} = C_{33}, C_{12} = C_{13},\ C_{44} = C_{66}, C_{55} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2} \tag{3.23}$$

Bu nedenle, transversely izotropik kompozit RVE'nin homojenleştirilmiş davranışını temsil etmek için bir rijitlik matrisinin yalnızca beş elemanının (C_{11}, C_{12}, C_{22}, C_{23}, C_{44}) yeterli olduğu söylenebilir.

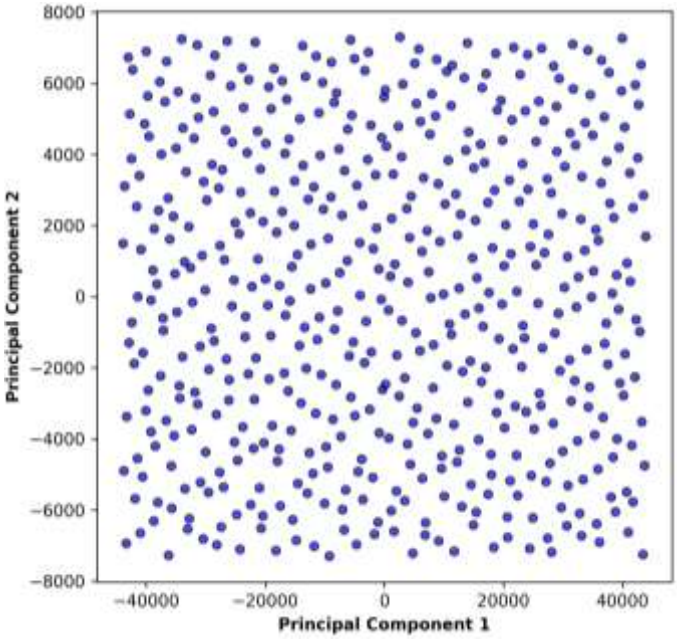
3.4.1.1. RVE simülasyonları için deney tasarımı

RVE simülasyonları için deney tasarımında, dengeli ve homojen bir veri dağılımı sağlamak amacıyla Sobol dizisi kullanılmıştır. Çizelge 3.2'deki parametreler kullanılarak 512 veri noktası oluşturulmuş ve düşük discrepancy değeri (7.17e-05) ile bu noktaların eşit dağıldığı gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Parametrelerin alt ve üst sınırları

	E_M (MPa)	ν_M	E_F (MPa)	ν_F	V_f (%)
Minimum Değer	350	0.2	7000	0.2	0.05
Maximum Değer	15000	0.45	95000	0.4	0.30

Yüksek boyutlu veri kümesinin görselleştirilmesi için Temel Bileşen Analizi (PCA) kullanılmış ve 5 boyutlu veri 2 boyuta indirgenmiştir. Şekil 3.11, oluşturulan veri kümesinin düzgün dağılımını göstermektedir.



Şekil 3.11. PCA ile 2 boyuta indirgeme sonrası dağılım grafiği (Tariq vd., 2024)

Tüm veri noktaları, sürekli fiber takviyeli kompozit RVE'nin homojenleştirilmesinde kullanılmıştır. Bu işlem, Mori-Tanaka yöntemi ile DIGIMAT yazılımında gerçekleştirilmiş ve tüm analizler doğrusal elastik model temel alınarak yapılmıştır. Homojenleştirme süreci Çizelge 3.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Son veri tabanının genel görünümü

GİRDİ PARAMETRELERİ					**ÇIKTI PARAMETRELERİ**					
E_M (MPa)	ν_M	E_F (MPa)	ν_F	V_f (%)	C_{11} (MPa)	C_{12} (MPa)	C_{22} (MPa)	C_{23} (MPa)	C_{44} (MPa)	C_{55} (MPa)
2770	0.280	41900	0.334	0.083	6940	1580	3970	1540	1250	1220
13500	0.326	9480	0.246	0.299	16700	7190	16400	7110	4670	4660
10300	0.233	10800	0.318	0.245	12700	4350	12700	4360	4160	4160
6250	0.31	11500	0.274	0.203	9810	4130	9520	4160	2700	2680
9470	0.224	56900	0.213	0.119	16700	3590	12500	3640	4590	4450

3.4.1.2. Veriye dayalı model geliştirme metodolojisi

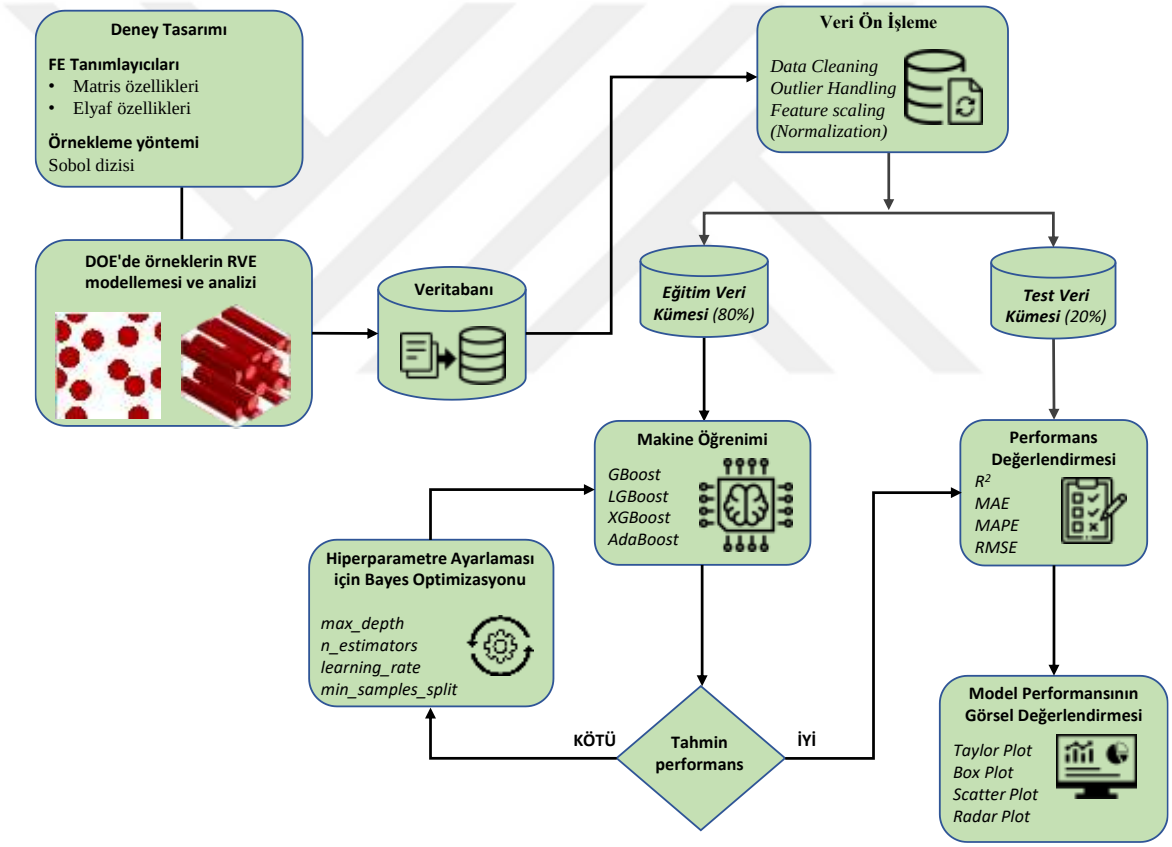
Bu alt bölümde, kompozitlerin homojenleştirilmiş makroskobik davranışlarını tahmin etmek için boosting tabanlı veriye dayalı bir model geliştirme süreci tanıtılmaktadır. Adaptive boosting, gradient boosting, light gradient boosting ve extreme gradient boosting algoritmaları, düşük hesaplama maliyetiyle yüksek doğruluk sağlamak için kullanılmıştır. Eğitim verileri, Sobol örnekleme yöntemiyle fiber hacim oranı, elastisite modülü ve Poisson oranı gibi parametreler üzerinden üretilmiştir. Modellerin performansı, R^2, MAE, MAPE ve RMSE gibi metriklerle ve görselleştirme araçlarıyla değerlendirilmiştir.

Homojenleştirme için genel çerçeve:

- Örnekleme: Deney tasarımı için çeşitli parametre kombinasyonları oluşturulur.
- RVE Analizi: Digimat-MF kullanılarak her örnek için RVE modellenir ve analiz edilir.
- Veri Ön İşleme: Eğitim performansını artırmak için veri düzenlenir.

- Model Eğitimi: RVE'nin homojenleştirilmiş sertlik matrisini tahmin etmek için boosting algoritmaları eğitilir.
- Optimizasyon: Hiperparametreler Bayesian optimizasyon ile belirlenir.
- Performans Değerlendirmesi: Modellerin doğruluğu istatistiksel ve görsel araçlarla analiz edilir.

Boosting modelleri, mikromekanik simülasyonların yerini alabilecek veya onları tamamlayabilecek etkili bir alternatif sunmaktadır. Şekil 3.12'de çalışma süreci gösterilmiştir.

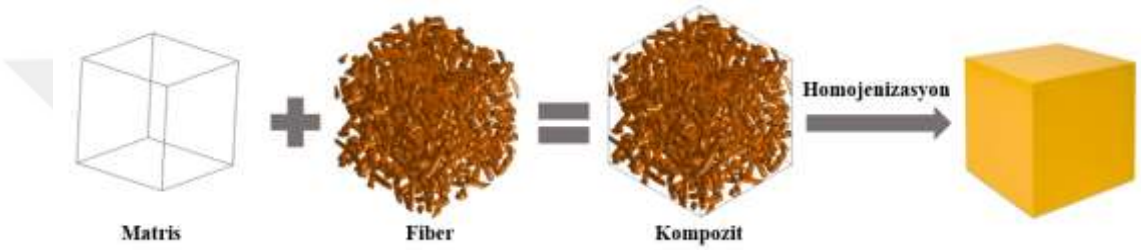


Şekil 3.12. Kompozit RVE'nin makine öğrenimi ile homojenleştirilmesi için genel çerçeve (Tariq vd., 2024)

3.4.2. Elastoplastik matrisli kısa elyaf takviyeli kompozit için Mori-Tanaka yöntemi

Eliptik şekilli düzensizlikler içeren kompozit malzemelerin efektif malzeme özellikleri, malzeme içerisindeki gerilme analizi için Eshelby'nin (1957) dahil etme çözümüne

dayalı çeşitli ortalama yöntemleri kullanılarak belirlenir. En yaygın kullanılan yöntemler, kendi içinde tutarlı yöntem (Hill, 1965) ve Mori-Tanaka yöntemleridir (Mori-Tanaka, 1973; Benveniste 1987; Lagoudas vd., 1991). Bu modeller arasındaki temel fark, gerçek kompozit malzemeyi temsil eden eşdeğer veya efektif ortamın seçimi ile ilgilidir; bu ortam, güçlendirme fazı malzemesinin yerleştirildiği ortamdır (Dvorak, 1999). Örneğin, kendi içinde tutarlı yöntemde efektif ortamın kompozit malzemenin özelliklerine sahip olduğu varsayılırken, Mori-Tanaka yaklaşımında matris malzemenin özelliklerine sahip olduğu kabul edilir.



Şekil 3.13. Kısa elyaf takviyeli kompozitlerin homojenizasyonu

Homojenizasyonun (Şekil 3.13) amacı, mikro yapısal bileşenlerin mekanik özelliklerine dayanarak makro seviyede anlık etkin rijitlik tensörünü (C_{eff}) hesaplamaktır.

$$\dot{\sigma} = \mathrm{C}_{eff} : \dot{\varepsilon} \tag{3.24}$$

Burada $\dot{\sigma}$ makroskopik gerilme hız tensörünü, $\dot{\varepsilon}$ makroskopik şekil değiştirme hız tensörünü ve C_{eff} belirlenmesi gereken etkin elastik rijitlik tensörünü temsil eder.

Mori-Tanaka (MT) yöntemi, sonlu hacim konsantrasyonlarına sahip çeşitli türdeki heterojenlikler arasındaki etkileşimleri, bu heterojenliklerin etkin termomekanik özelliklere sahip bir ortam içine yerleştirilmesiyle yaklaşık olarak hesaba katar.

MT yöntemi, kompozitlerin etkin özelliklerini aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplar (Jain, 2019):

$$C_{eff} = C_m + v_f\left(C_f - C_m\right)A_f \tag{3.25}$$

Burada C_m; matrisin rijitlik tensörü, C_f; fiberin rijitlik tensörü ve v_f; fiber hacim fraksiyonudur. Anlık gerilme yoğunlaşma faktörü şu şekilde tanımlanır:

$$\mathrm{A}_f=\left[\mathrm{I} + \mathrm{S}\ (\mathrm{C}_m)^{-1}\ (\mathrm{C}_f - \mathrm{C}_m)\right]^{-1} \tag{3.26}$$

Burada I birim tensörü ifade ederken, S Eshelby tensörünü temsil eder. Eshelby tensörü S, kompozit malzemelerde kullanılan fiberlerin şekline, boyut oranlarına ve yönelimlerine bağlıdır.

$$\mathrm{S}_{\mathrm{ijkl}} = \mathrm{f}(\mathrm{v}_\mathrm{m}, \text{aspect ratios}, \text{orientation of fibers}) \tag{3.27}$$

Fiber yönelimlerinin kompozitlerin etkili mekanik davranışı üzerindeki etkisini hesaba katmak için yönelim dağılım tensörü Θ ile Eshelby tensörü S_{ijkl}'in kombinasyonu kullanılır. Rastgele yönlendirilmiş elyaflara sahip kompozitlerle ilgilenildiğinde, etkili özellikler tüm olası elyaf yönelimleri üzerinde ortalamaya alınır. Yönelim dağılım tensörü Θ, bu ortalamayı kolaylaştırır. Yönelim dağılım tensörü Θ 'yi Eshelby tensörü kullanarak mikromekanik çerçeveye dahil ederek elde edilen yönelim ortalamalı Eshelby tensörü şu şekilde ifade edilir:

$$\bar{S}_{ijkl} = \int S_{ijkl}\,(n) \cdot f(n) d\Omega \tag{3.28}$$

Burada; $S_{ijkl}(n)$, belirli bir elyaf oryantasyonu n için Eshelby tensörüdür. $f(n)$, elyafların n yönünde oryantasyonlanma olasılık yoğunluğunu tanımlayan oryantasyon dağılım fonksiyonudur (ODF). $d\Omega$, birim küre üzerinde diferansiyel katı açı elemanıdır. Oryantasyon ortalamasına alınmış Eshelby tensörü, oryantasyon dağılım tensörü kullanılarak da ifade edilebilir.

$$\bar{S}_{ijkl} = \langle S_{ijkl}(n) \rangle = \int S_{ijkl}\, n_i n_j n_k n_l f(n) d\Omega \tag{3.29}$$

Oryantasyon dağılım tensörü, Θ şu şekilde verilmiştir:

$$\Theta_{ijkl} = \langle n_i n_j n_k n_l \rangle = \int n_i n_j n_k n_l\, f(n) d\Omega \tag{3.30}$$

Burada *n*, elyafın mikroskobik yönelimini tanımlayan birim vektördür. Digimat yazılımlar, bu entegrasyonu verimli bir şekilde gerçekleştirir, simetri ve sayısal optimizasyon tekniklerinden yararlanır. Advani ve Tucker tarafından önerilen formülasyonda, elyaf yönelimi, oryantasyon dağılım tensörü *O* (ya da daha genel olarak, a_{ij} ve a_{ijkl}) kullanılarak modellenir. Bu durumda, $a_{ij} = O$ 'dur, çünkü a_{ij} ikinci dereceden bir oryantasyon tensörüdür ve rastgele yönlendirilmiş elyaflar için elyaf yöneliminin ortalamasını temsil eder.

Mori-Tanaka yöntemini kullanarak, elyaf yönelim dağılımı doğrudan sertlik matrisi bileşenlerini etkiler ve bu da Advani-Tucker formülasyonunda kullanılan *B* katsayılarını etkiler (Advani ve Tucker, 1987). Bu nedenle, rastgele yönlendirilmiş elyaflar için, *O* oryantasyon dağılım tensörü, rijitlik tensörü (C_{ijkl}) hesaplamalarına dahil edilir.

$$\begin{aligned} C_{ijkl} = {} & B_1 a_{ijkl} + B_2(a_{ij}\delta_{kl} + a_{kl}\delta_{ij}) + B_3(a_{ik}\delta_{jl} + a_{il}\delta_{jk} + \\ & a_{jl}\delta_{ik} + a_{jk}\delta_{il}) + B_4(\delta_{ij}\delta_{kl}) + B_5(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \end{aligned} \tag{3.31}$$

a_{ijkl} ve a_{ij} bileşenleri sırasıyla dördüncü dereceden ve ikinci dereceden elyaf oryantasyon tensörü bileşenleridir. δ_{ij}, ikinci dereceden birim tensörün bileşenlerini temsil eder. *B* katsayıları, bir transvers izotropik tek yönlü kompozitin sertlik matrisinin bileşenleriyle ilişkilidir (Gusev, 2017).

Kısa elyafla güçlendirilmiş kompozitleri basitleştirilmiş ancak gerçekçi bir şekilde modellemek için, elyaf fazının tamamı boyunca elastik kaldığı, matris fazının ise

elastoplastik davranış sergilediği varsayılmaktadır. Bu varsayım, matris fazının ortalama konsantrasyon faktörlerinin gerilme durumu ve iç durum değişkenlerine (örneğin, izotropik sertleşme, kinomatik sertleşme veya hasar) bağlı olmasına yol açar. Matris fazının artımlı elastoplastik davranışı aşağıdaki denklemlerle tanımlanmaktadır:

$$\begin{gathered}\dot{\sigma} = C:(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^p) \\ \dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda}\frac{\partial f}{\partial \sigma} \\ \dot{R} = [k(1+mp) - m(R - R_\infty)]\dot{p} \\ \dot{p} = \dot{\lambda} \\ \dot{f} = \frac{\partial f}{\partial \sigma}\dot{\sigma} + \frac{\partial f}{\partial R}\dot{R} = 0 \\ f = J_2(\sigma) - R(p) - \sigma_{yp}\end{gathered} \tag{3.32}$$

$R(p) = kp + R_\infty[1 - \exp(-mp)]$ ile gösterilir. Doğrusal ve üssel yasa ile karakterize edilen doğrusal olmayan izotropik sertleşme, σ_{yp} malzemenin akma dayanımını ifade eder. k, m ve R_∞, malzemeye bağlı sabitlerdir. Yukarıda özetlenen teorik çerçeve, kısa elyafla güçlendirilmiş kompozitlerin mekanik davranışını doğru bir şekilde modellemek ve optimize etmek için temel bir yaklaşım sunmaktadır. Ancak, bu teorilerin gerçek dünya uygulamalarındaki geçerliliği ve uygulanabilirliği, elyaf oryantasyonu, elastik modül, akma özellikleri ve sertleşme davranışı gibi parametrelerin doğru bir şekilde belirlenmesine kritik olarak bağlıdır.

Digimat RP ve Moldex3D gibi yazılım araçları, bu parametrelerin modellenmesi için önemli yetenekler sunar ve bu araçların entegrasyonu, kompozit malzemelerin daha doğru ve güvenilir simülasyonlarını mümkün kılar. Digimat'ta malzeme parametrelerinin tanımlaması Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Digimat'ta Kullanılan Malzeme Parametreleri: İsimler, Semboller, Boyutlar ve Birimler

Name	Symbol	Dimensions	SI Unit

		M, L, T, θ, I	
Young's modulus	E	$ML^{-1}T^{-2}$	$Pa=N/m^2$
Poisson's ratio	ϑ	1	-
Yield stress	σ_y	$ML^{-1}T^{-2}$	$Pa=N/m^2$
Linear hardening modulus	k	$ML^{-1}T^{-2}$	$Pa=N/m^2$
Hardening modulus	R_∞	$ML^{-1}T^{-2}$	$Pa=N/m^2$
Hardening exponent	m	1	-
Prestrain	p_0	1	-

3.4.2.1. RVE simülasyonları için deney tasarımı

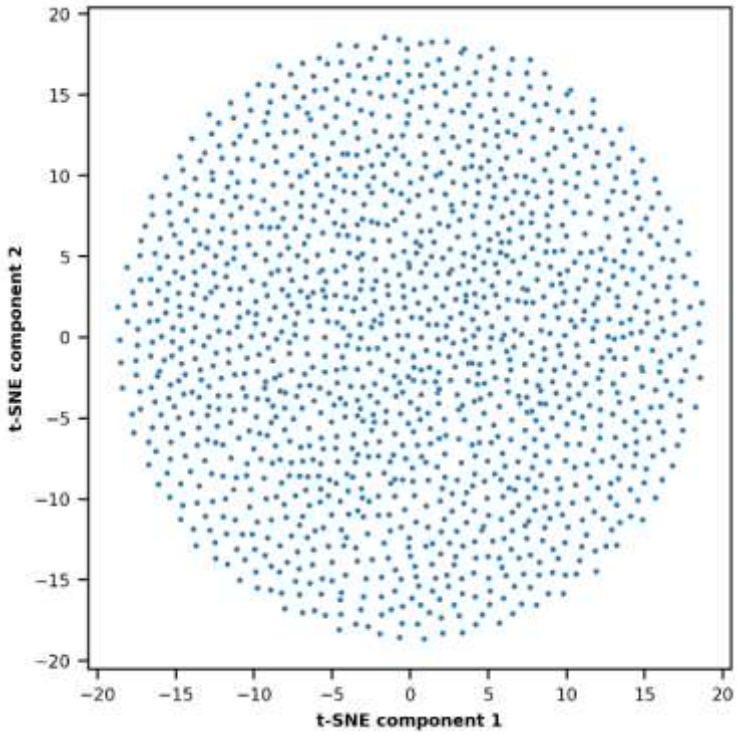
Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polipropilen malzeme için 9 girdi parametresi (matris ve fiberin Young modülü, Poisson oranı, fiber hacim oranı, en-boy oranı ve fiber oryantasyon tensörleri) kullanılarak bir RVE modeli oluşturulmuştur. Parametrelerin aralıkları Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Cam elyaf takviyeli polipropilen malzeme parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri

	E_M (MPa)	ν_M	E_F (MPa)	ν_F	V_f (%)	λ	a_{11}	a_{22}	a_{33}
Minimum	1300	0.3	70000	0.14	0.1	10	0	0	0
Maximum	1800	0.45	95000	0.26	0.6	30	1	1	1

Sobol örnekleme yöntemi ile 4096 örnek üretilmiş ve fiber oryantasyon tensörlerinin toplamı (a_{11}, a_{22}, a_{33}) bire eşit olacak şekilde düzenlenmiştir. Örnekler için düşük bir tutarsızlık değeri (7.17e-05) elde edilmiştir.

Yüksek boyutlu parametrelerin iki boyutta görselleştirilmesi için t-SNE kullanılmıştır. Şekil 3.14, örneklerin düzgün bir şekilde dağıldığını ve kümelenme veya boşluk olmadığını göstermektedir.



Şekil 3.14. Örnek verilerin t-SNE dağılımı (Tariq vd., 2024)

3.4.2.2. Veriye dayalı model geliştirme metodolojisi

Bu çalışmada, kısa elyaf takviyeli polimer kompozitlerin elastoplastik davranışını tahmin etmek amacıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Extreme Gradient Boosting (XGB) gibi ileri düzey makine öğrenimi (MÖ) modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerin eğitiminde, Digimat ticari yazılımı ile Mori-Tanaka ortalama alan homojenleştirme yönteminden elde edilen kapsamlı veri kümeleri kullanılmıştır.

Eğitilen modellerin doğruluğu ve etkinliği, tahmin edilen elastoplastik tepkilerin simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, kısa elyaf takviyeli polimer kompozitlerin davranışını etkileyen temel parametrelerin rolü, MÖ modelleri yardımıyla detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, hem doğruluk hem de hesaplama verimliliği sağlayarak, geleneksel yöntemlere alternatif bir çözüm sunmaktadır.

3.5. Anizotropik Kompozit Malzemeler için Sistematik Hesaplamalı Modelleme Yöntemi

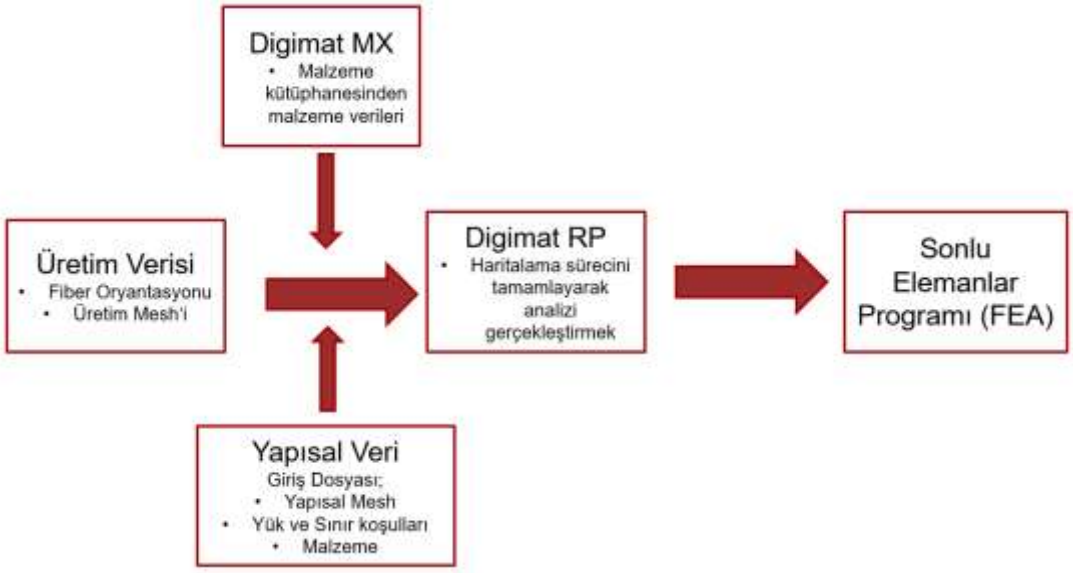
Tabakalı takviye fiberli termoplastik malzemelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen ana parametreler; ara yüzey dayanımı, kaynak hattı, fiber hacim oranı, fiber şekli, fiber dağılımı ve fiber ile matris arasındaki yapışma kalitesidir. Enjeksiyon akışı nedeniyle, özellikle kısa fiberlerle güçlendirilmiş termoplastik polimerlerin üretimi sırasında rastgele bir dağılım gözlemlenmektedir. Bu durumun, bu dağılımla bölgeye bağlı olarak mekanik davranışın değişmesine yol açması beklenmektedir. Ayrıca, bir diğer önemli parametre kaynak hattı yani birleşme izidir. Kaynak hattı birleşme açıları ve sıcaklıkları, enjeksiyon giriş yeri ve sayısına bağlı olarak değişir. Bu fark, mekanik dayanımı ve görsel etkileri doğrudan etkiler.

Sayısal analizler genellikle homogenizasyon yöntemi kullanarak yapılır, bu nedenle malzeme izotropik olarak kabul edilir; ancak, parça anizotropik bir yapıya sahip olduğundan, sayısal analizlerin sonuçları ile gerçek parça arasında önemli farklar bulunur. Tek bir elastisite modülü ve Poisson oranı belirlenerek kurulan geleneksel model, malzemenin izotropik olduğunu ve malzemenin kalıba akışının boşluksuz olduğunu varsayar. Örneğin, %40 cam fiber (GF) oranına sahip malzeme, geleneksel modele karşılık heterojen bir dağılıma sahiptir. Dağılım ve fiber yönelimi bölgeye göre değişir. Enjeksiyon girişinin yerleşimi ve sayısı, kaynak hattı sayısını ve birleşme açılarını etkiler (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Geleneksel model ve gerçek malzeme verilerinin sonlu elemanlar programına doğrudan aktarımı olan model

Şekil 3.16, önerilen ve tez kapsamında uygulanan karmaşık yaklaşımın adımlarını gösteren bir akış diyagramını sunmaktadır. Bu diyagramda gösterilen teknik, fiber takviyeli kompozitlerin simülasyonlarının gerçek hayattaki malzeme davranışını yakından simüle ederek özgüllüğünü ve doğruluğunu artırır. Modern endüstriyel uygulamalarda tasarım parametrelerini iyileştirmek ve en iyi performansı elde etmek için yaygın olarak kullanılan optimizasyon teknikleri bu diyagramda yer almamıştır. Bu diyagramda açık bir optimizasyon bloğunun olmamasının nedeni, bu iş akışının temel amacının doğru ilk simülasyonlar için malzeme verisi ve üretim parametrelerinin entegrasyonuna odaklanmasıdır.



Şekil 3.16. Digimat RP çalışma prensibi

Yukarıdaki diyagramda açıklanan prosedür birkaç önemli adımdan oluşmaktadır:

- Üretim Verisi: Bu ilk aşamada, üretim süreci parametreleri, üretim ağı, fiber yönelimi ve kaynak hattı gibi önemli bilgiler toplanır. Bu bilgi, doğru simülasyonlar için kritik öneme sahiptir çünkü nihai malzeme özelliklerini doğrudan etkiler.
- Yapısal Veri: Malzeme özellikleri, yük durumları ve montaj verileri gibi yapısal veriler, simülasyon sonuçlarına göre sürekli olarak güncellenebilir ve değiştirilebilir. Esneklikleri sayesinde, bileşen tasarımı gerçek veri ve

simülasyon bulguları kullanılarak iteratif olarak iyileştirilebilir ve optimize edilebilir.

- Digimat MX: Digimat MX kullanılarak büyük bir kütüphaneden belirli malzeme verileri seçilir. Bu modül, kompozitin matris ve fiber özellikleri gibi belirli malzeme özelliklerini belirtmek için kritik öneme sahiptir ve doğru malzeme modelleri oluşturmak için gereklidir. Anizotropik ölçümler ve ilgili malzeme modelleri için kapsamlı bir veri deposu olarak işlev görür. Elastik, plastik, elastik-plastik, elastik-viskoplastik ve viskoelastik-viskoplastik modeller dahil olmak üzere çeşitli karmaşıklık ve mekanik davranış seviyelerini destekler. Bu esneklik, farklı yükleme koşulları altında malzeme tepkilerinin doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlar.
- Digimat RP: Digimat RP burada, toplanan üretim verilerini Digimat MX'ten alınan malzeme verileriyle birleştirir. Verilerin uygun şekilde temsil edilmesini ve analiz için uygun hale getirilmesini sağlamak için kapsamlı bir eşleme işlemi gerçekleştirir. Bu kritik aşama, entegre verileri sonlu eleman analiz araçları ile birleştirmeyi kolaylaştırır ve doğru ve kapsamlı simülasyonlar için temel hazırlar.
- Sonlu Eleman Programı: Veriler işlendikten sonra, bir sonlu eleman analiz uygulamasına, örneğin ABAQUS'a girilir. Bu yazılım, malzemenin farklı yükleme koşulları altındaki davranışını simüle ederek yapısal bütünlüğü analiz eder ve olası hata noktalarını tespit eder.

Kısa elyafla güçlendirilmiş termoplastik kompozitlerin performansını ve hatalarını tahmin etme zorluklarını aşmak amacıyla tez kapsamında kapsamlı bir simülasyon çerçevesi geliştirilmektedir. Moldex3D, Digimat RP ve ABAQUS yazılımlarından faydalanarak, bu çerçeve, elyaf yönelimi ve kaynak hattı etkileri gibi kritik üretim verilerini sonlu eleman modellerine entegre etmektedir. Cam elyafla güçlendirilmiş termoplastik malzemeler kullanılarak yapılan analizler, çeşitli enjeksiyon kalıplama konfigürasyonları doğrusal olmayan anizotropik davranışına odaklanmaktadır. Bu yaklaşım, simülasyonların tahmin güvenilirliğini artırmakta, üretim süreçleri ile yapısal performans arasındaki boşluğu kapatarak, yük taşıma gerektiren uygulamalar için hafif,

yüksek performanslı kompozit yapıları tasarlama ve optimize etme sürecine katkı sağlamaktadır.

3.6. Fiber Oryantasyon Etkisinin Entegre Edildiği Model ile Geleneksel Model Analizleri

Bu çalışmada, fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin plastik enjeksiyon kalıplama sürecini doğru bir şekilde simüle etmek için sistematik hesaplamalı modelleme yaklaşımı kullanılmıştır.

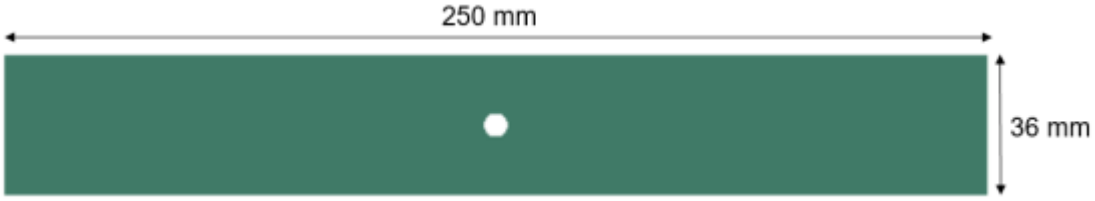
- İlk olarak, %30 cam elyaf takviyeli polipropilen (PP) malzemesi için kalıp akış simülasyonu, MOLDEX3D kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonun çıktısı, üretim ağı ve fiber yönelimi verisi olarak kullanılarak DIGIMAT programına aktarılmıştır.
- Fiber yöneliminin, malzeme anizotropisini temsil ettiği etkisi, mekanik analiz için sonlu elemanlar modeline dahil edilmiştir. Bu, fiber yönelimi etkilerini entegre etmek için DIGIMAT RP ile ABAQUS'un birleştirilmesiyle sağlanmıştır.
- Yaklaşımın doğrulamak için, açık delikli çekme numunesi üzerinde ABAQUS kullanılarak çekme analizi yapılmıştır. İlk olarak, malzeme, tek bir elastisite modülü ve Poisson oranı ile doğrusal izotropik olarak kabul edilmiştir. Bu geleneksel modelin sonuçları, fiber yönelimi entegre edilmiş modelin sonuçlarıyla karşılaştırılmış, maksimum gerilme değeri, maksimum yer değiştirme ve akış yönüne bağlı olarak bölgesel gerilme değişimi üzerine odaklanılmıştır.
- Yaklaşımın güvenilirliğini doğrulamak amacıyla, bir braket parçası için sonlu elemanlar modeli ABAQUS'ta geliştirilmiş, PA6-GF30 kullanılarak doğrusal izotropik analiz yapılmıştır. Braket parçasının doldurma analizi MOLDEX3D'de gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, fiber yönelimi ve dağılım verileri, doğrusal anizotropik analiz için ABAQUS'a DIGIMAT RP aracılığıyla aktarılmıştır.

3.6.1. Açık delikli numunenin çekme testi analizi

Önerilen yaklaşım, ABAQUS kullanılarak açık delikli çekme numuneleri üzerinde gerçekleştirilen çekme analizi ile doğrulanmıştır. İlk olarak, malzeme tek bir elastisite modülü ve Poisson oranı ile doğrusal izotropik olarak ele alınmıştır. Bu geleneksel modelden elde edilen sonuçlar, fiber yöneliminin entegre edildiği modelin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, maksimum gerilme değeri, maksimum yer değiştirme ve akış yönüne bağlı bölgesel gerilme dağılımı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

3.6.1.1. Geleneksel model kullanılarak çekme testinin sonlu elemanlar analizi

Çekme numunesi için sonlu eleman modeli, ASTM D5766 standardına uygun numune boyutları kullanılarak oluşturulmuştur. %30 oranında lif takviyeli polipropilen (PP) malzemeden oluşan numune, tek bir elastiklik modülü ve Poisson oranı ile doğrusal izotropik olarak modellenmiştir. Numunelerin boyutları 36 mm x 250 mm x 2,5 mm olup, 6 mm çapında bir deliğe sahiptir. Modelleme, ABAQUS yazılımında C3D8R olarak adlandırılan 8 düğümlü üç boyutlu hegzagonal tuğla elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



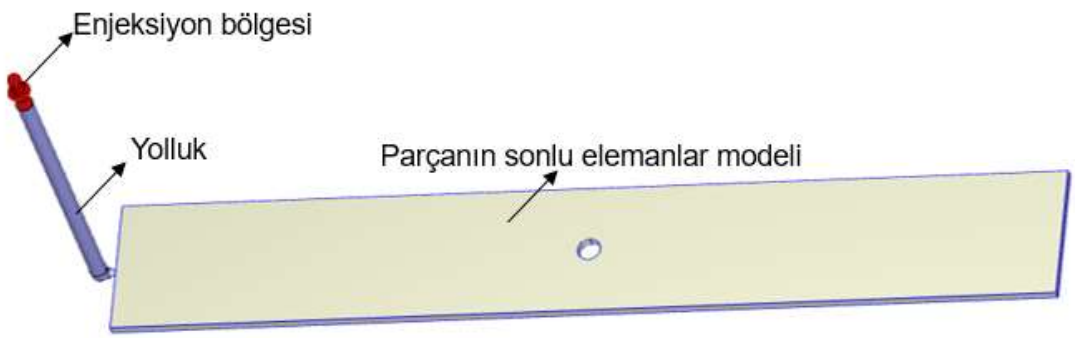
Şekil 3.17. Numune geometrisi

Sonlu eleman modelinde, %30 cam elyaf takviyeli polipropilen için elastisite modülü 6,5 GPa ve Poisson oranı 0,35 olarak tanımlanmıştır. Numunenin üst yüzeyinde yük ekseni doğrultusundaki hareket kısıtlanmazken, diğer yönlerdeki hareketler kısıtlanmıştır (DOF 1, 3). Buna karşılık, alt yüzeyde tüm yönlerdeki hareketler kısıtlanmıştır (DOF 1, 2, 3). Numuneye 3,5 kN'lik bir yük uygulanmıştır.

3.6.1.2. Gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği modelde çekme testinin sonlu eleman analizi

3.6.1.2.1. Kalıp akış analizi

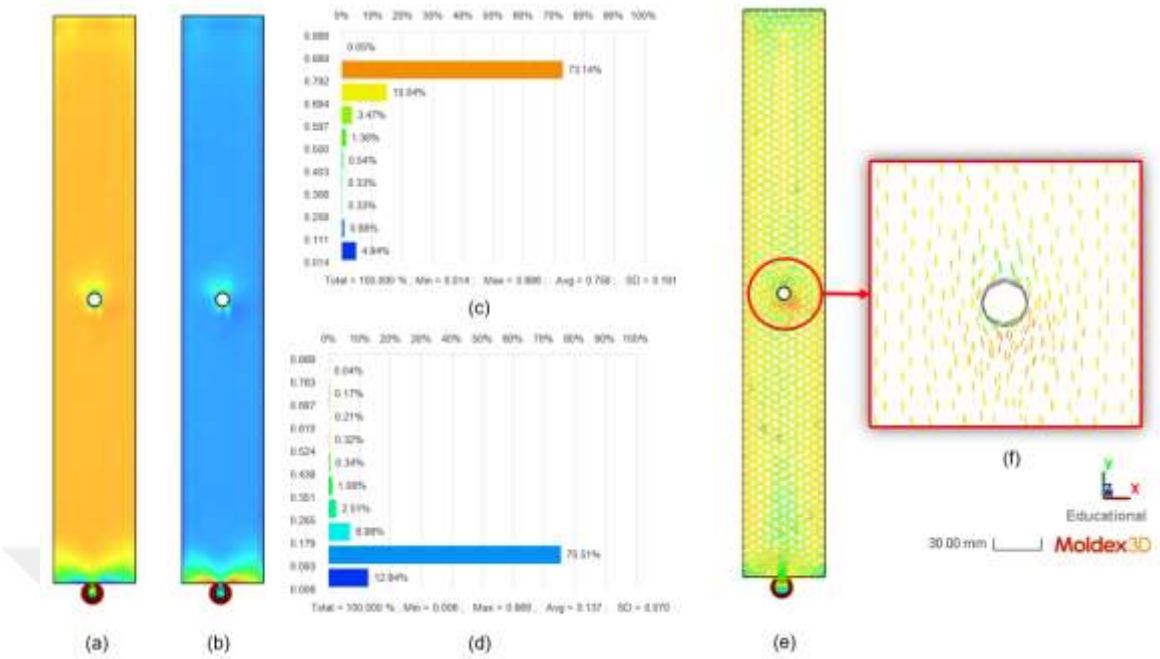
Kompozit bir malzemenin açık delikli çekme numunesi üzerinden enjeksiyon kalıplama sürecinin simülasyonu, MOLDEX3D programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18, açık delikli numune için yolluk ve eriyik akışını göstermektedir. Eriyik sıcaklığı 250 °C, kalıp sıcaklığı ise 55 °C olarak belirlenmiştir. Maksimum kalıp basıncı 140 MPa'ya ulaşmış ve %30 cam elyaf takviyeli polipropilen malzeme, kalıba 1,19 saniye içerisinde enjekte edilmiştir. Kalıp akış simülasyonu, toplam 26,44 saniyelik bir çevrim süresi ile başarıyla tamamlanmıştır.



Şekil 3.18. Kalıp akış simülasyonu için hazırlanan model

Şekil 3.19, MOLDEX3D simülasyonu sonucunda X ve Y yönlerindeki lif yönelimlerini, ayrıca deliğin çevresindeki liflerin yayılım ve dağılımını göstermektedir.

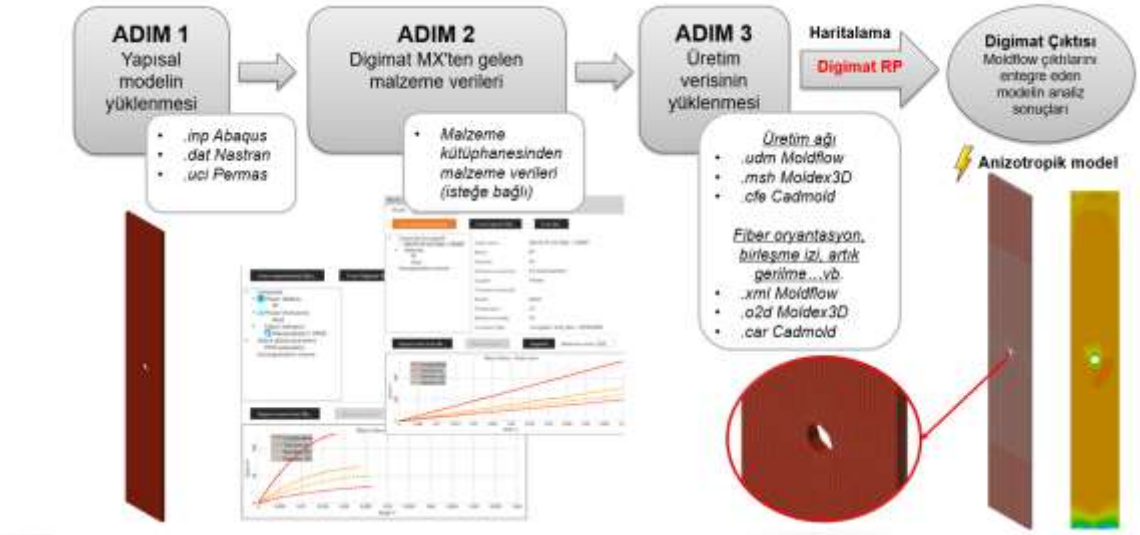
Şekil 3.19'da gösterildiği üzere, kompozit içerisindeki lif yönelimi ve dağılımı, eriyik giriş yeri, sıcaklık ve basınç gibi işletim parametrelerine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir. Bu değişkenlik, söz konusu faktörlerin kompozit malzemenin yapısal özellikleri üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.



Şekil 3.19. (a) Y yönündeki cam elyaf yönelimi, (b) X yönündeki cam elyaf yönelimi, (c) Dolum sürecinde Y yönündeki elyaf yönelimi istatistikleri, (d) Dolum sürecinde X yönündeki elyaf yönelimi istatistikleri, (e) Cam elyaf yönelimi, (f) Deliğin çevresindeki cam elyaf yönelimi

3.6.1.2.2. Gerçek malzeme verilerinin sonlu elemanlar programına aktarılması

Çekme numunesinin yapısal ağ bilgileri, Bölüm 3.6.1.1'de açıklandığı şekilde, oluşturulan giriş dosyasının (.inp) içe aktarılmasıyla Digimat RP programına entegre edilmiştir. Ayrıca, PP GF30 malzemesinin özellikleri, Digimat MX aracı kullanılarak Digimat RP programına aktarılmıştır. Ardından, MOLDEX3D simülasyonundan elde edilen üretim ağı ve fiber yönelimi verileri, Bölüm 3.6.1.2.1'de açıklandığı şekilde, Digimat RP içinde haritalama süreciyle entegre edilmiştir. Lif takviyeli termoplastik kompozitler için plastik enjeksiyon kalıplama sürecinin tamamı, Şekil 3.20'de gösterilen akış diyagramında özetlenmiştir.



Şekil 3.20. Gerçek malzeme verilerinin (fiber oryantasyonu) Digimat RP ile sonlu elemanlar programına aktarılmasının işlem adımları

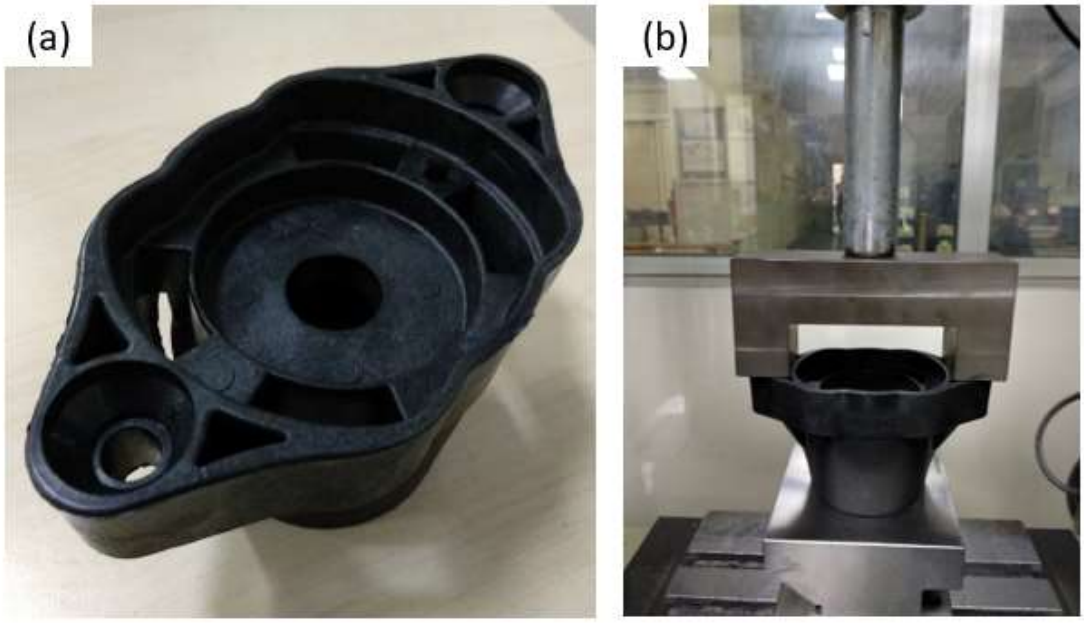
3.6.2. Braket dayanım testi analizleri

3.6.2.1. Braket dayanım testi

PA6 GF30 numuneleri kullanılarak yapılan braket dayanım testi, malzemenin yüksek yükleri taşıma kapasitesine ilişkin değerli veriler sağlamıştır. Kontrollü test prosedürü, sonuçların doğru ve güvenilir olmasını sağlamış, PA6 GF30'un yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalar için uygunluğunu belirlemeye yardımcı olmuştur. Braket parçası, önerilen kalıp akış simülasyonu katkısının, malzemenin farklı yükleme koşulları altında davranışını tahmin etme, yapısal bütünlüğü analiz etme ve potansiyel hasar noktalarını belirleme konusundaki sağlamlığını ve güvenilirliğini değerlendirmek için iyi bir adaydır. Çünkü kompozit malzemenin braket parçası numunesindeki enjeksiyon kalıplama süreci, braket parçasındaki farklı bölgelerde karmaşık bir elyaf yönelimi oluşturmaktadır.

Her biri %30 cam elyaf takviyeli PA6 GF30 (polyamid 6) malzemeden yapılan iki braket numunesi test için hazırlanmıştır. Numuneler, test sonuçlarını etkileyebilecek herhangi bir görünür kusurdan arındırılmış olduğundan emin olmak için dikkatlice incelenmiştir. Test cihazı, braketlerin mekanik testleri için standart prosedüre göre

kurulmuştur. Braketler, test sırasında hareket veya kaymayı önlemek amacıyla test makinesine güvenli bir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. (a) Prototip üretimi için braket numunesi, (b) Braket dayanım test aparatı

Şekil 3.21'de gösterilen test düzeneklerinde, braketlere 45 kN'lik bir yük uygulanmıştır. Bu yük, braketlerin gerçek dünya uygulamalarında karşılaşabileceği maksimum gerilme seviyesini simüle etmek amacıyla seçilmiştir. Yük, dakikada 10 mm'lik sabit bir hızla uygulanmıştır. Bu kontrollü yükleme hızı, gerilmenin düzgün bir şekilde dağıtılmasını sağlamış ve braketlerin yüke karşı verdikleri tepkinin doğru bir şekilde ölçülmesine olanak tanımıştır. Yük uygulanırken, test makinesi braketlerin maruz kaldığı gerilme ve deformasyonu kaydetmiştir. Bu veriler, stres-gerilme grafiklerinin oluşturulması için kullanılmış ve daha fazla analiz yapılmıştır. Braketlerin deformasyonu ve herhangi bir arıza ya da çatlama belirtisi dikkatle izlenmiştir.

Test sonrası, toplanan veriler analiz edilerek braketlerin mekanik dayanımı belirlenmiştir. Stres-gerilme grafikleri, braketlerin performansı hakkında bilgi sunmuş, elastik limitleri ve nihai çekme dayanımlarını içeren veriler sağlamıştır.

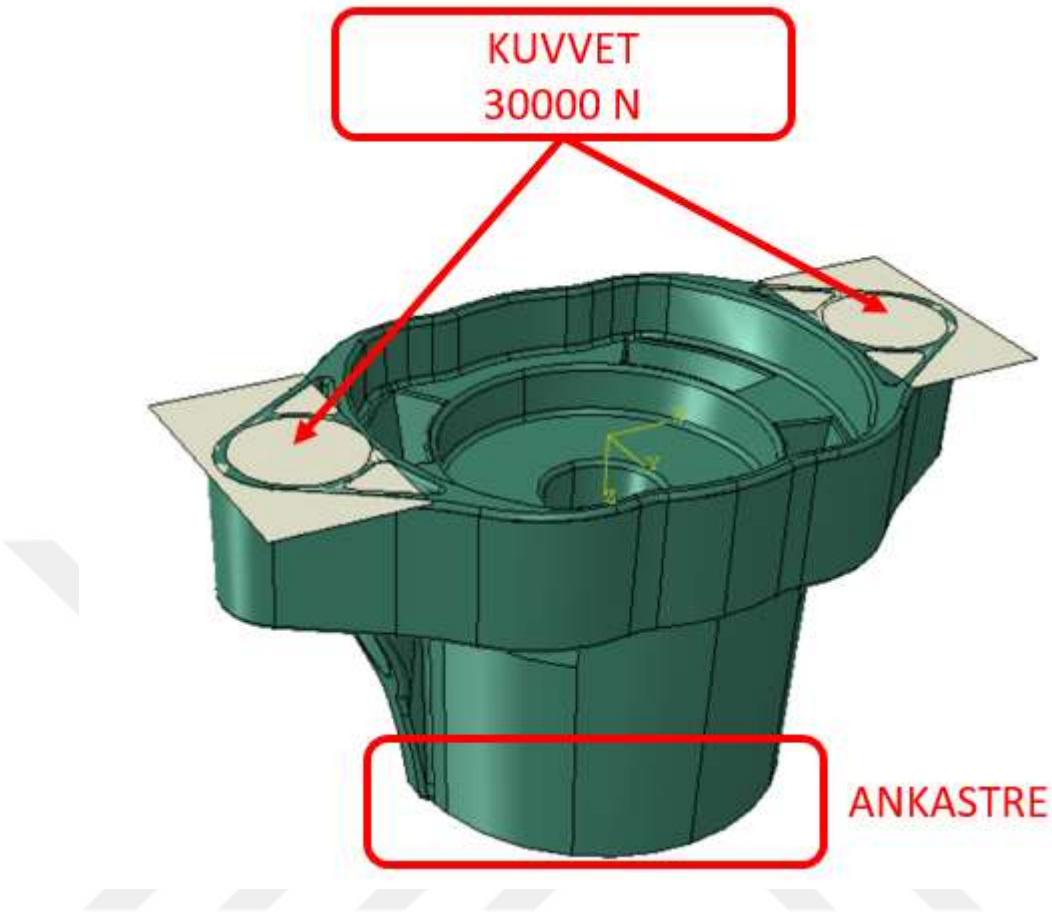
3.6.2.2. Geleneksel model kullanarak braket dayanım testinin sonlu elemanlar analizi

PA6-GF30 kullanarak önerilen yöntemin güvenilirliğini doğrulamak amacıyla, hem sonlu eleman modellemesi hem de simülasyon içeren detaylı bir süreç uygulanmıştır:

- PA6-GF30 malzemesi için tek bir elastik modül ve Poisson oranı tanımlanarak, başlangıçta doğrusal izotropik bir malzeme olarak davranacağı varsayılmıştır.
- Bu malzeme özellikleri, sonlu eleman analizleri (FEA) için yaygın olarak kullanılan ABAQUS yazılımında braket parçasının sonlu eleman modelini oluşturmak için kullanılmıştır.
- Braket parçası, tanımlanan malzeme özellikleri ile ABAQUS'ta modellenmiştir. Braketin geometri, boyutlar ve yük taşıma özellikleri modelde doğru bir şekilde temsil edilmiştir.
- MOLDEX3D simülasyonundan elde edilen lif yönelimi ve dağılım verileri, DIGIMAT RP programına aktarılmıştır. DIGIMAT RP, süreç simülasyonu (MOLDEX3D gibi) ile yapısal analiz (ABAQUS gibi) arasındaki boşluğu dolduran özel bir araçtır. DIGIMAT RP'den içe aktarılan veriler, daha sonra ABAQUS'ta doğrusal anizotropik analiz yapmak için kullanılmıştır.

Geleneksel modelde, malzeme verisi olarak tek bir elastik modül ve Poisson oranı tanımlanmıştır. Model, "Braket Dayanım Testi"nde belirtilen sınır koşulları ve yükleme şartlarına göre oluşturulmuştur. Bu koşullar aşağıdaki gibidir:

- Braket, alt kısımdan tüm yönlerde kısıtlanmıştır (DOF 1, 2, 3).
- 30 kN yükün uygulandığı iki bölge için, kinematik bağlantı bölgesinde yalnızca bir yönde hareketine izin verilmiştir. Diğer tüm yönlerde hareket kısıtlanmıştır (DOF 1, 2), Şekil 3.22'de gösterildiği gibi.
- Numunenin sonlu eleman modellemesi, ABAQUS'ta, C3D10 olarak adlandırılan 10 düğümlü ikinci dereceden tetrahedron elemanları kullanılarak yapılmıştır.



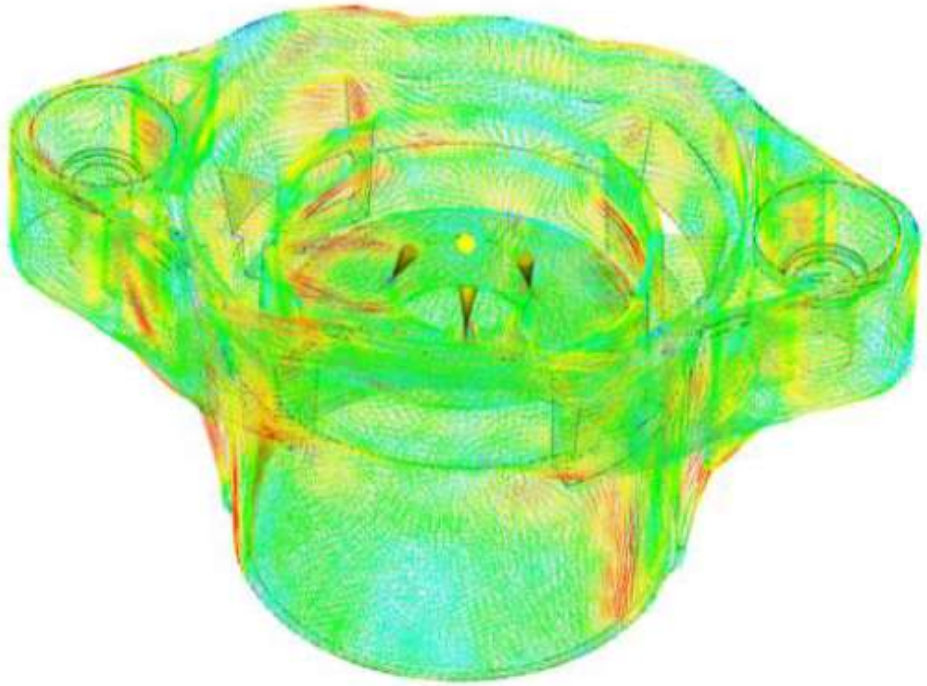
Şekil 3.22. Braket sınır ve yükleme koşulları

3.6.2.3. Gerçek malzeme verisinin entegre edildiği modelde braket dayanım testinin sonlu elemanlar analizi

Bu kapsamlı yaklaşım, PA6-GF30 malzemesinin üretim sürecinden kaynaklanan anizotropik özellikleri ve karmaşık davranışı dikkate alınarak braketin mekanik performansının doğru bir şekilde tahmin edilebilmesini sağlamıştır.

3.6.2.3.1. Kalıp akış analizi

MOLDEX3D yazılımı, braket bileşeninin dolum analizini yapmak için kullanılmıştır. Bu analiz, eriyik PA6-GF30 malzemesinin kalıp boşluğunu nasıl doldurduğunu simüle edilerek enjeksiyon kalıplama süreci incelenmiştir. Dolum analizi, parçanın merkez bölgesindeki dört farklı noktadan malzeme akışıyla gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, fiber dağılımı ve yönelimi verileri elde edilmiştir, Şekil 3.23'te gösterildiği gibi.

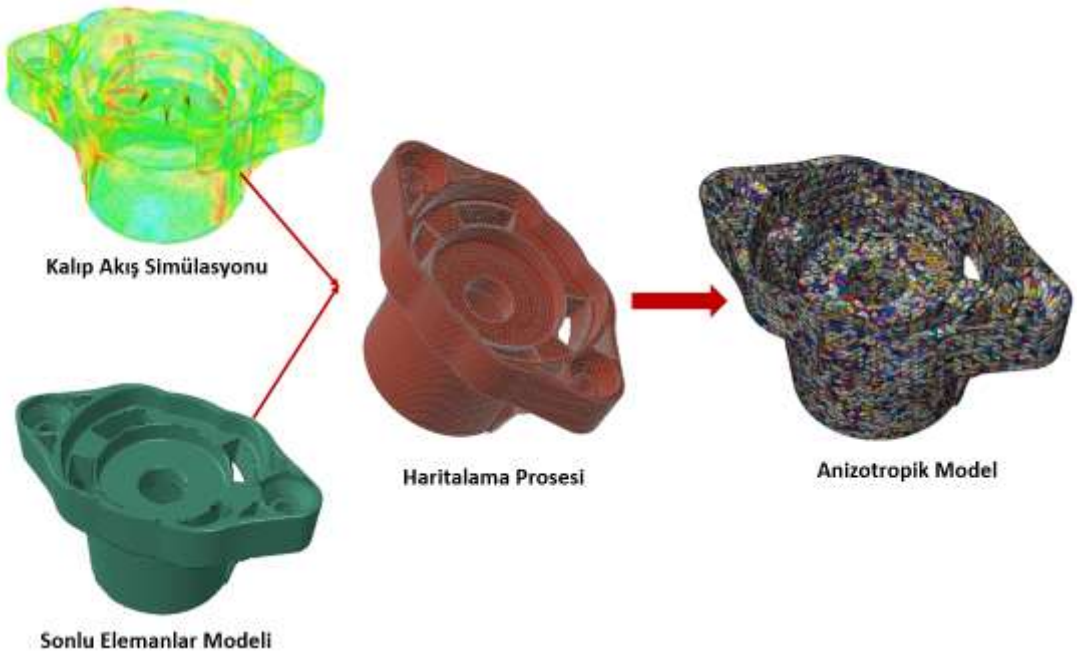


Şekil 3.23. Fiber dağılım tensörleri

3.6.2.3.2. Gerçek malzeme verilerinin sonlu elemanlar programına aktarılması ve braket dayanım testi analizi

Geleneksel modelin yapısal ağ yapısı, DİGİMAT MX'ten seçilen PA6 GF30 malzeme verisi, kalıp akış simülasyonundan elde edilen üretim ağı ve lif yönelimi verileri DİGİMAT RP'ye aktarıldı. Haritalama sürecinde, kalıp akış simülasyonu verileri yapısal ağa aktarılmıştır.

Anizotropik modelde, Şekil 3.24'te gösterildiği gibi, fiber yönelimine dayalı anizotropik malzeme verileri her bir elemana atanmıştır. Bu nedenle, elastisite modülü ve Poisson oranı gibi mekanik özellikler, her bir eleman için farklılık göstermektedir. Braket için, 26.791 adet elaman için anizotropik malzeme verisi sonlu eleman modeline aktarılmış ve analiz aynı sınır ve yükleme koşulları altında tekrar edilmiştir.



Şekil 3.24. Fiber dağılımı ve yöneliminin aktarılmasıyla elde edilen anizotropik model

3.7. Fiber Oryantasyon, Birleşme İzi, Enjeksiyon Dolum Yeri ve Sayısının Mekanik Dayanım Üzerine Etkisi

Bu çalışmada, sistematik hesaplamalı modelleme tekniği kullanılarak fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin tüm plastik enjeksiyon kalıplama sürecini tam olarak simüle edilmiştir:

- İlk olarak açık delikli çekme numunesi, %40 cam elyaf takviyeli poliamid (PA6) malzemesi kullanılarak MOLDEX3D'de iki farklı şekilde simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, üretim ağı, fiber yönelimi ve birleşme izi verilerini entegre etmek için DIGIMAT yazılımı kullanılmıştır.
- Sonlu elemanlar modeli, fiber yönelimi ve birleşme izi etkileri dahil ederek malzeme anizotropisini gösterecek şekilde değiştirilmiştir. Fiber yönelimi ve birleşme izi etkilerinin entegrasyonu, ABAQUS ve DIGIMAT RP'nin birleşimiyle sağlanmıştır.
- Daha sonra bir kapak parçası, PA6-GF40 malzemesiyle tek bir elastisite modülü ve Poisson oranı kullanılarak doğrusal olmayan izotropik analiz için sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Birleşme izinin mekanik dayanım üzerindeki

etkisini görmek amacıyla, kapak parçasının doldurma simülasyonları dört farklı konfigürasyonla gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda, enjeksiyon giriş sayısı, sırasıyla 1, 2, 4 ve 8 olmak üzere değişmektedir. Fiber yönelimi, dağılma verileri ve birleşim izi MOLDEX3D yazılımından, ABAQUS'a DIGIMAT RP aracılığıyla aktarılmış ve doğrusal olmayan anizotropik analiz yapılmıştır.

3.7.1. Açık delikli numunenin doğrusal olmayan çekme testi analizi

İlk olarak, malzemenin doğrusal olmayan izotropik olduğunu varsayarak geleneksel model tanımlandı. Elastik davranış, Poisson oranı ve tek bir elastik modül kullanılarak karakterize edildi ve Abaqus'te elastik malzeme tanımı ile uygulandı. Ayrıca, malzemenin plastik davranışı, ilgili plastik özellikler tanımlanarak modele dahil edildi, bu da malzemenin doğrusal olmayan yükleme koşullarındaki yanıtının doğru bir şekilde temsil edilmesini sağladı. Bu yaklaşım, hem ilk elastik yanıtı hem de sonrasındaki plastik deformasyonu yakalayarak, malzeme davranışının değişken gerilme durumları altındaki kapsamlı bir simülasyonunu sağlar. Geleneksel modelin, maksimum gerilme değeri, maksimum yer değiştirme ve akış yönüne göre bölgesel gerilme değişimi üzerine odaklanan sonuçları, fiber yönelimi ve birleşme izini içeren modelin sonuçlarıyla karşılaştırıldı.

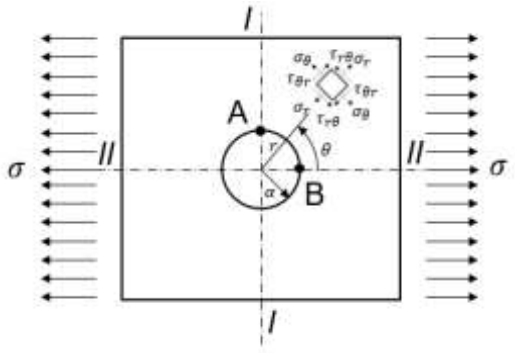
3.7.1.1. Geleneksel model kullanılarak çekme testinin sonlu elemanlar analizi

Numune boyutları Bölüm 3.6.1.1'de olduğu gibi ASTM D5766 standardına uygun olarak çekme numunesinin sonlu eleman modelini oluşturmak için kullanılmıştır. Numune, 40% kısa cam elyaf takviyeli poliamid (PA6) malzemesini temsil eden doğrusal olmayan izotropik bir malzeme olarak modellenmiş ve özellikleri tanımlamak için tek bir elastisite modülü ve Poisson oranı kullanılmıştır. Numunede 6 mm çapında bir delik bulunmaktadır ve 36 mm x 250 mm x 2.5 mm boyutlarındadır (Şekil 3.12).

%40 cam elyaf takviyeli poliamidin elastik modülü ve Poisson oranı, sonlu eleman model malzeme özelliklerinde sırasıyla 12,6 GPa ve 0,35 olarak belirlenmiştir. Numunenin üst kısmında diğer yönlerde hareket kısıtlanmışken, yük doğrultusunda

hareket serbest bırakılmıştır (DOF 1, 3). Alt kısımda ise tüm yönlerde hareket kısıtlanmıştır (DOF 1, 2, 3). Açık delik numunenin sonlu elemanlar modeli, C3D8R olarak tanımlanan 8 düğümlü üç boyutlu hexahedral tuğla elemanları kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Numune üzerine 10 kN'lik bir yük uygulanmıştır.

3.7.1.1.1. Ağ (mesh) yakınsama çalışması



Şekil 3.25. Gerilim yükü altında delikli sonsuz ince eleman

Burada α deliğin yarıçapı, r ve θ ise Şekil 3.25'te gösterildiği gibi elemandaki bir noktanın kutupsal koordinatlarıdır. Deliğin kenarında, r = α olduğunda

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_\theta = \sigma(1 - 2cos2\theta) \qquad (3.33)$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

At noktasında A, $\theta = \pi/2$ veya $3\pi/2$

$$\sigma_{\theta A} = 3\sigma \qquad (3.34)$$

Delik kenarındaki σ_θ dağılımı Şekil 3.20'de gösterilmektedir. B noktasında, $\theta = 0$ olduğunda, Denklem 3.35 aşağıdaki şekildedir:

$$\sigma_{\theta B} = -\sigma \tag{3.35}$$

İlk olarak, açık delikli çekme numunesinin doğrusal izotropik çekme analizi yapılmıştır. Bu numunedeki ilgili noktalara karşılık gelen temsili nokta A'daki gerilme, Çizelge 3.6'daki temsili nokta B'deki gerilmenin yaklaşık 3 katıdır. Bu değerler elde edilene kadar numunenin ağ boyutu küçültülmüştür. ABAQUS'te 8 düğümlü üç boyutlu heksagonal tuğla elemanları (C3D8R) kullanılarak modellenmiştir. Yaklaşık eleman boyutunun 4 olarak belirlendiği saptanmıştır. Deliğin çevresindeki eleman boyutu, bu oranı yaklaşık hale gelene kadar küçültülmüştür.

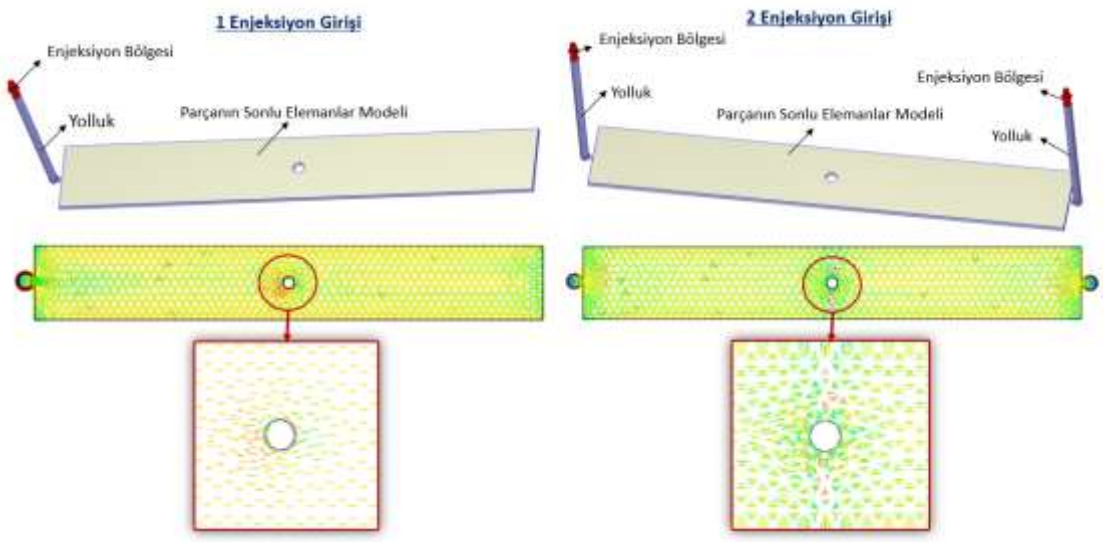
Çizelge 3.6. Ağ boyutuna bağlı değişim oranları

Ağ Boyutu	A Noktasındaki Maks. Gerilme [MPa]	B Noktasındaki Maks. Gerilme [MPa]	A/B oranı
4	186.1	129.8	1.434
1.33	224.8	63.22	3.556
0.80	267.8	70.97	3.773
0.45	**94.95**	**30.43**	**3,120**

3.7.1.2. Gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği modelde çekme testinin sonlu eleman analizi

3.7.1.2.1. Kalıp akış analizi

Açık delikli çekme numunesi üzerinden bir kompozitin enjeksiyon kalıplanması MOLDEX3D programı kullanılarak simüle edildi. Delikli numune için iki farklı dolum tipi Şekil 3.26'da gösterilmektedir. 1 enjeksiyon girişi ve 2 enjeksiyon girişi için erime sıcaklığı 260 santigrat dereceye ayarlanırken, kalıp sıcaklığı 85 santigrat derecede tutuldu. Maksimum kalıp basıncı 155 MPa'ya ulaştı. 1 girişli %40 cam elyaf takviyeli poliamid malzeme için; 1,19 saniye içinde kalıba enjekte edildi. Kalıp akış simülasyonu 27,75 saniyelik toplam çevrim süresiyle başarıyla tamamlandı. 2 girişli için; 1,26 saniye içinde kalıba enjekte edildi ve toplam çevrim süresi 26,9 saniye oldu. Her iki dolum için sonlu eleman modeline göre ağ boyutu (mesh size) seçildi.



Şekil 3.26. Kalıp akış simülasyonu için yapılmış modeller

3.7.1.2.2. Gerçek Malzeme Verilerinin Sonlu Elemanlar Programına Entegre Edilmesi

Oluşturulan giriş dosyasını (.inp) içeri aktararak, 3.7.1.1 Bölümünde detaylandırılan çekme numunesinin yapısal ağ bilgisi Digimat RP yazılımı ile birleştirilmiştir. Ayrıca, Digimat MX aracı kullanılarak PA6 GF40 malzemesinin özellikleri Digimat RP programına aktarılmıştır. Daha sonra, Digimat RP'nin haritalama prosedürü, 3.7.1.2.1 Bölümünde açıklanan MOLDEX3D simülasyonundan elde edilen üretim ağı, fiber yönelimi ve birleşme izi verileri ile birleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.20'de sunulan akış diyagramı, elyafla güçlendirilmiş termoplastik kompozitlerin tam plastik enjeksiyon kalıplama sürecini göstermektedir.

3.7.2. Kapak parçasının mekanik dayanım testi analizi

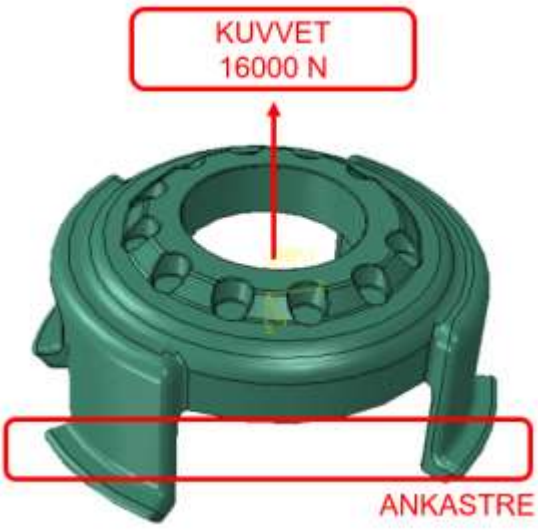
3.7.2.1. Geleneksel model kullanarak kapak dayanım testinin sonlu elemanlar analizi

PA6-GF40 malzemesinin başlangıçta doğrusal olmayan izotropik bir malzeme olarak davrandığı varsayılmış, tek bir elastisite modülü, Poisson oranı ve plastik malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Bu malzeme özellikleri, popüler bir sonlu elemanlar analiz (FEA) programı (Hibbitt vd., 1997) kapak parçası sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

ABAQUS, belirtilen malzeme özelliklerine sahip bir kapak modeli sunmaktadır. Model, kapak geometrisini, boyutlarını ve yük taşıma kapasitesini doğru bir şekilde yakalamıştır. MOLDEX3D simülasyonlarından elde edilen birleşme izi, fiber yönelimi ve dağılım verileri, DİGİMAT RP'ye aktarılmıştır. DİGİMAT RP adı verilen özel bir araç, yapısal analiz (örneğin ABAQUS) ile süreç simülasyonu (örneğin MOLDEX3D) arasındaki boşluğu doldurur. Daha sonra, ABAQUS'taki doğrusal olmayan anizotropik analiz, DİGİMAT RP'den aktarılan verilerle gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel modelindeki malzeme verileri, plastik malzeme özellikleri, Poisson oranı ve tek bir elastisite modülü olarak tanımlanmıştır. Modelin oluşturulmasında belirtilen sınır ve yükleme koşullarına uyulmuştur. Bu önkoşullar aşağıda sıralanmıştır:

- Kapak parçası tüm yönlerde kısıtlanmıştır (DOF 1, 2, 3).
- Kinematik bağlantı bölgesinde, 16 kN yük uygulandığında harekete sadece bir yönde izin verilmiştir. Şekil 3.27'de görüldüğü gibi, diğer tüm yönlerde hareket sınırlıdır (DOF 1, 2).
- Kapak parçasını geleneksel modelinin sonlu elemanlar modellemesi, C3D10 olarak tanımlanan 10 düğüm üç boyutlu tetrahedral elemanlar kullanılarak ayrıklaştırılmıştır.



Şekil 3.27. Kapak parçasının yük ve sınır koşulları

3.7.2.1.1. Ağ (mesh) yakınsama çalışması

Ağ boyutunun belirlenmesi genellikle yinelemeli bir süreçtir. İlk olarak, kaba bir ağ kullanılır ve sonuçlar incelenir. Ardından, belirli bölgelerde ağ yoğunluğu artırılarak sonuçların doğruluğu kontrol edilir. Bu süreç, istenilen doğruluk ve hesaplama süresi sağlanana kadar devam eder.

Abaqus analizleri, C3D10, 10-düğüm ikinci dereceden tetrahedron elemanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ağ boyutu başlangıçta 10 olarak belirlenmiştir. Sonrasında ağ boyutları sırasıyla 6, 5, 4, 3 olarak değiştirilmiş ve analizler tekrarlanmıştır. En yüksek gerilme ve en yüksek yer değiştirme değerleri, eleman bazında ortalama değerler olarak alındığından, en yüksek değerlerin belirlendiği bölgeler, ağ boyutu azaldıkça daha spesifik hale gelecektir. Ancak, ağ boyutunun aşırı küçültülmesi mühendislik süresi kaybına yol açacaktır. Bu nedenle, optimum bir ağ boyutunun belirlenmesi önemlidir.

Çalışmada, analizlerin değişim oranları önceki analiz değerlerine göre hesaplanmıştır. Bu oran %1'in altına düştüğünde süreç sonlandırılmış ve dikkate alınan ağ boyutunun yeterliliği sağlanmıştır. Bu nedenle, ağ boyutu Çizelge 3.7'de gösterildiği gibi 4 olarak seçilmiştir.

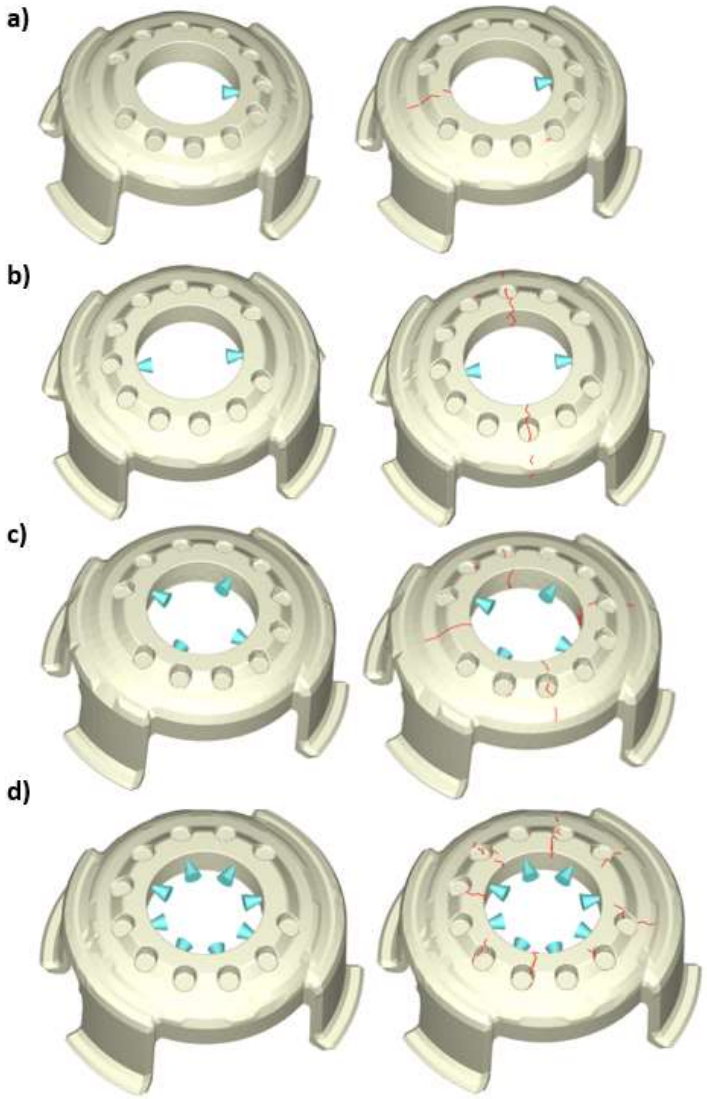
Çizelge 3.7. Ağ boyutuna bağlı değişim oranları

Ağ Boyutu	Maks. Gerilme [MPa]	Değişim Oranı [%]	Maks. Yer Değiştirme [mm]	Değişim Oranı [%]
10	175.5	---	0.231	---
6	164.7	6.1538	0.242	4.5455
5	167.7	1.7889	0.246	1.6260
4	**166.1**	0.9541	**0.248**	0.8065
3	166.7	0.3599	0.249	0.4016

3.7.2.2. Gerçek malzeme verisinin entegre edildiği modelde kapak parçasının dayanım testinin sonlu elemanlar analizi

3.7.2.2.1. Kalıp akış analizi

Kapak parçasının anizotropik malzeme özelliklerini elde etmek amacıyla dolum analizleri gerçekleştirilmiştir. Dolum analizleri, MOLDEX3D yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Gao vd., 2022). Bu analiz, enjeksiyon kalıplama sürecini simüle etmiş ve erimiş PA6-GF40 malzemesinin kalıp boşluğunu nasıl doldurduğuna odaklanmıştır. Analiz, dört farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.28'de gösterildiği gibi, Kapak parçası bir, iki, dört ve sekiz girişten doldurularak analiz edilmiştir. Buradaki amaç, eriyik birleşme bölgelerinin sayısına bağlı olarak mekanik performans üzerindeki etkisini incelemektir (Mathieu vd., 2022; Jong vd., 2018; Kazmer vd., 2018; Ryu ve Lyu, 2014). Haritalamada geleneksel model ile uyumluluğu sağlamak amacıyla tüm kalıp akış analizlerinde ağ boyutu 4 seçilmiş ve tetrahedron elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 3.28. Birleşme izi oluşmuş alanlar a) bir giriş, b) iki giriş, c) dört giriş, d) sekiz giriş

3.7.2.2.2. Birleşme izi ve fiber oryantasyon verilerinin sonlu elemanlar programına aktarılması ve kapak parçasının dayanım testi analizi

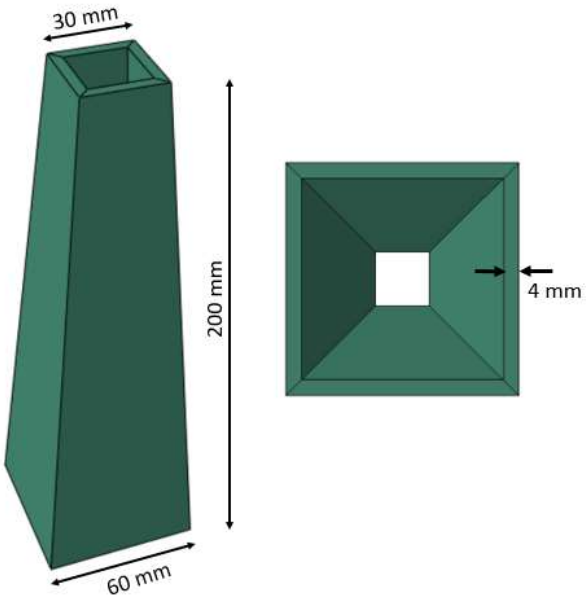
Geleneksel modelin yapısal ağ verileri, DİGİMAT MX'ten seçilen PA6 GF40 malzeme verileri, üretim ağı verileri, fiber yönelimleri ve kalıp akış simülasyonundan elde edilen birleşme izi verileri DİGİMAT RP'ye aktarılmıştır. Haritalama işlemi sırasında, kalıp akış simülasyonu verileri yapısal ağa entegre edilmiştir. Kapak parçası için anizotropik malzeme verileri sonlu eleman modeli içerisine aktarılmış ve analiz aynı sınır ve yükleme koşulları altında tekrarlanmıştır.

3.8. İnce Duvarlı ve Değişken Kesitli Kolonlarda Dolum Yeri ve Sayısının Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi

PA6-GF40 malzemesi, tek bir elastisite modülü ve Poisson oranı kullanılarak geleneksel olarak modellenmiştir. Kaynak hatlarının (birleşme izinin) ve fiber oryantasyonun kritik burkulma yükü ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla sekiz farklı konfigürasyonda enjeksiyon kalıplama simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonlardan elde edilen fiber oryantasyonu, dağılımı ve kaynak hattı verileri, kritik burkulma yükü hesaplamaları için Digimat RP aracılığıyla ABAQUS'a aktarılmıştır (Polat vd., 2025). Ardından, taşıma kapasitelerini karşılaştırmak amacıyla doğrusal olmayan anizotropik analizler yapılmıştır.

3.8.1. İnce duvarlı ve değişken kesitli kolonlarda geleneksel model kullanarak sonlu elemanlar burkulma analizi

Şekil 3.29'da gösterilen 60×60 mm taban kesitinden başlayıp üst kısmında 30×30 mm'ye daralan, toplam uzunluğu 200 mm olan, 4 mm sabit et kalınlığına sahip içi boş bir kare kesitli kolon, ABAQUS kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 3.29. İnce duvarlı değişken kesitli kolon geometrisi

Sonlu elemanlar modeline göre, %40 cam elyaf takviyeli poliamidin elastisite modülü 12.6 GPa ve Poisson oranı 0.35 olarak belirlenmiştir. Yük ekseni boyunca hareket kısıtlanmamışken, numunenin üst kısmındaki diğer hareket yönleri (DOF 1, 2) kısıtlanmıştır. Alt kısımda ise tüm yönlerde hareket sınırlıdır (DOF 1, 2, 3). İnce duvarlı değişken kesitli kolon modelini sonlu elemanlar modellemesi için ayrıştırmak amacıyla, sekiz düğümlü üç boyutlu hexahedral prizmatik elemanlar olan C3D8R kullanılmıştır. Kritik burkulma yükünü hesaplamak için, kolona 1 N yük uygulanmış ve 'Buckle' (burkulma) analizi gerçekleştirilmiştir.

3.8.1.1. Ağ yakınsama çalışması

Özyinelemeli yöntemler genellikle ağ boyutunu belirlemek için kullanılır. İlk olarak, kaba bir ağ kullanılır ve sonuçlar analiz edilir. Verilerin doğruluğu, belirli bölgelerde ağ yoğunluğu artırılarak doğrulanır. Gerekli doğruluk ve hesaplama süresi elde edilene kadar bu işlem tekrarlanır. Abaqus analizleri, C3D8R, sekiz düğümlü üç boyutlu hexahedral prizmatik elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ağ boyutu başlangıçta 4 olarak belirlenmiştir. Ardından ağ boyutları sırasıyla 3, 2.8, 2.6, 2.4, 2.2, 2 olarak değiştirilmiş ve analizler tekrar edilmiştir. İlk modun kritik burkulma yükü bir referans olarak alındığından, ağ boyutunun küçültülmesi çözümün doğruluğunu artırır ve daha hassas sonuçlar sağlar. Bu süreç, genellikle ağ yakınsaması olarak bilinir ve daha ince bir ağın sistemin geometrisini ve yük davranışını daha iyi yakalayarak sonuçların güvenilirliğini artırmasına olanak tanır. Ancak, aşırı küçük ağ boyutları kullanmak, hesaplama süresini ve kaynak taleplerini önemli ölçüde artırır. Bu nedenle, doğruluk ve hesaplama verimliliği arasında bir denge kurmak çok önemlidir. Bu çalışmada, kritik burkulma yüklerinin değişim oranları, önceki ağ boyutlarının sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Değişim oranı %0.5'in altına düştüğünde, çözümün ağ bağımsızlığına yaklaştığı ve sonuçların ağ boyutu 2.4 veya daha küçük olduğunda yeterince doğru kabul edilebileceği belirtilmiştir. Ağ boyutu 2.4 ile 2 arasında hesaplama süresi açısından belirgin bir fark olmadığından, çözüm doğruluğunu artırmak için 2 seçilmiştir. Bu karar, aynı zamanda yük taşıma kapasitesini değerlendirmek için planlanan ikinci aşama doğrusal olmayan analizleri de göz önünde bulundurur. Bu

nedenle, daha doğru sonuçlar sağlamak amacıyla Çizelge 3.8'de sunulan ağ boyutu 2 olarak seçilmiştir.

Çizelge 3.8. Ağ boyutuna bağlı değişim oranları

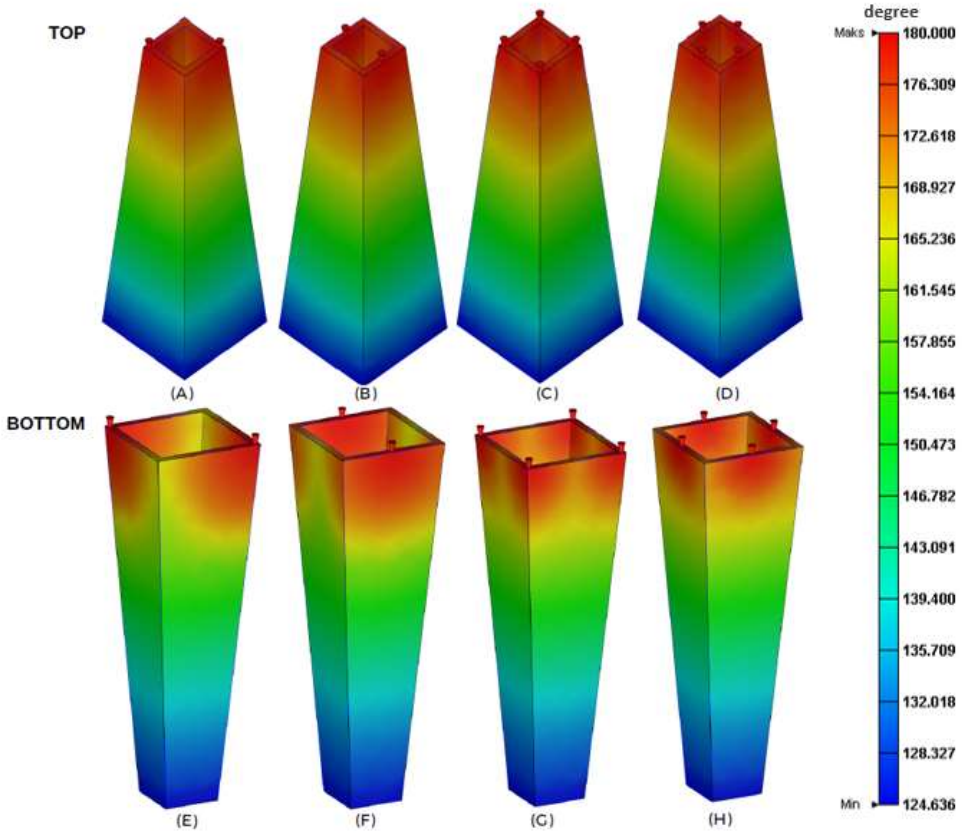
Ağ Boyutu	Kritik Burkulma Yükü [N]	Değişim Oranı [%]
4	4272.4	---
3	205524	97.92
2.8	243420	15.57
2.6	242761	0.27
2.4	242191	0.24
2.2	241902	0.20
2	241543	0.07

3.8.2. İnce duvarlı ve değişken kesitli kolonlarda gerçek malzeme verisinin entegre edildiği modelde sonlu elemanlar burkulma analizi

3.8.2.1. Kalıp akış analizi

İnce duvarlı değişken kesitli kolon, Moldex3D yazılımı kullanılarak %40 cam elyaf takviyeli poliamid 6 (PA6-GF40) malzemesi ile sekiz farklı konfigürasyonda simüle edilmiştir. Bu konfigürasyonlar, Moldex3D'de enjeksiyon giriş sayısını ve yerleşimini (kenarlara veya köşelere yerleştirilen 2 veya 4 giriş, dolumun üstten veya alttan başlanması) değiştirmiştir, Şekil 3.30'da gösterilmiştir.

Her dolum analizinde, eriyik sıcaklığı 260 derece ve kalıp sıcaklığı sırasıyla 85 derece olarak belirlenmiştir. En yüksek kalıp basıncı 155 MPa'ya çıkarılmıştır. Tüm dolumlar için kalıba eriyik enjeksiyon süresi ve toplam döngü süresi bilgileri Çizelge 3.9'da verilmiştir. Sekiz dolum için sonlu eleman modeline göre ağ boyutu 2 seçilmiştir.



Şekil 3.30. Kalıp akış analizi için yapılan modeller (A) üstte iki köşe, (B) üstte iki kenar, (C) üstte dört köşe, (D) üstte dört kenar, (E) altta iki köşe, (F) altta iki kenar, (G) altta dört köşe, (H) altta dört kenar

Çizelge 3.9. Dolum ve çevrim süreleri

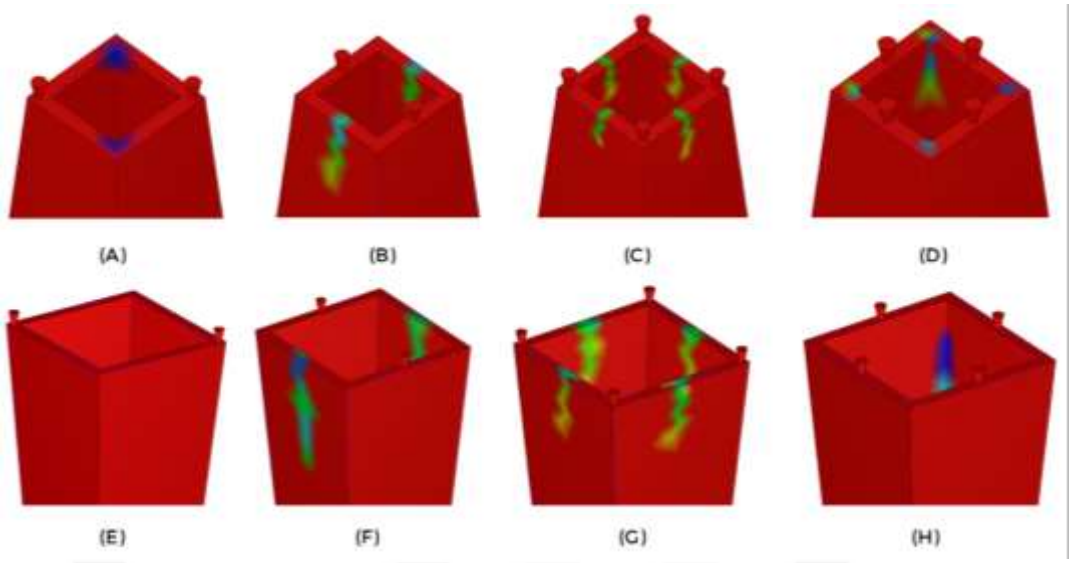
Dolum Tipi	Dolum Süresi (s)	Çevrim Süresi (s)
Üstte iki köşe (A)	2.18	19.58
Üstte iki kenar (B)	2.17	19.56
Üstte dört köşe (C)	2.20	18.90
Üstte dört kenar (D)	2.19	18.89
Altta iki köşe (E)	2.20	18.90
Altta iki kenar (F)	2.19	19.59
Altta dört köşe (G)	2.23	18.33
Altta dört kenar (H)	2.21	18.91

Simülasyon sonuçları, Digimat yazılımının gerektirdiği üretim ağı, fiber yönelimi (Şekil 3.31) ve kaynak hattı (Şekil 3.32) bilgileri gibi kritik verileri sağlamıştır. Buradaki amaç, elyaf yönelimi ve eriyik birleşme bölgelerinin, enjeskiyon giriş sayısı ve

yerleşimine dayalı olarak mekanik performansı nasıl etkilediğini incelemektir (Mathieu vd., 2022; Jong vd., 2018; Kazmer vd., 2018; Ryu ve Lyu, 2014).



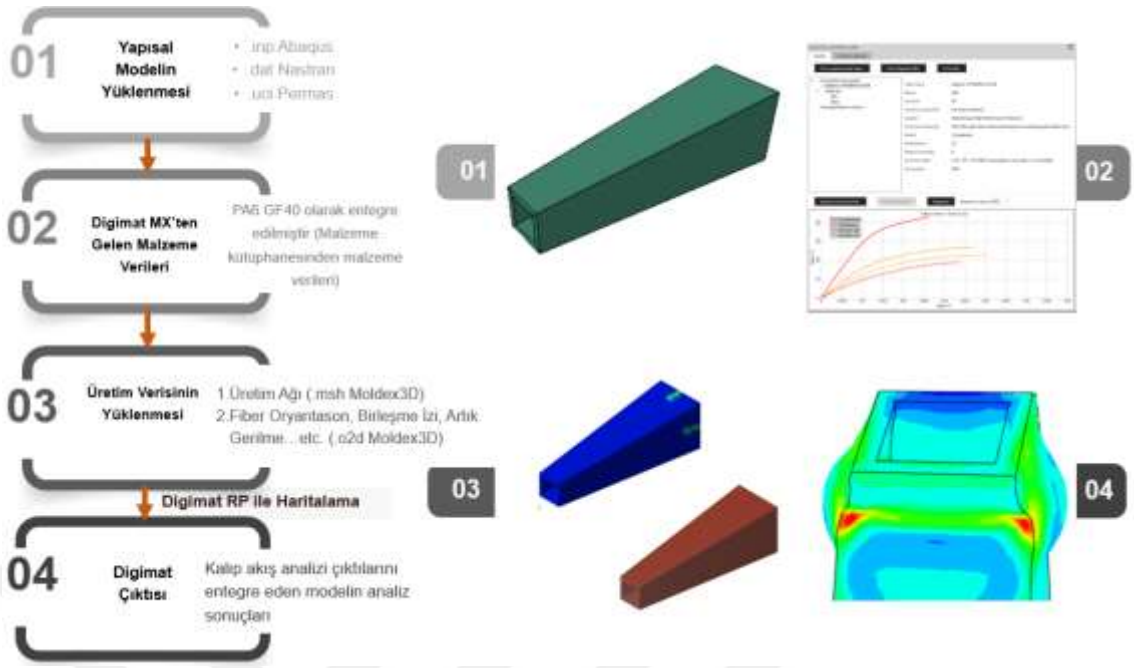
Şekil 3.31. Dolum tipine göre fiber yönelimi bilgisi (A) üstte iki köşe, (B) üstte iki kenar, (C) üstte dört köşe, (D) üstte dört kenar, (E) altta iki köşe, (F) altta iki kenar, (G) altta dört köşe, (H) altta dört kenar



Şekil 3.32. Doldurma tipine göre kaynak hattı bilgisi (A) üstte iki köşe, (B) üstte iki kenar, (C) üstte dört köşe, (D) üstte dört kenar, (E) altta iki köşe, (F) altta iki kenar, (G) altta dört köşe, (H) altta dört kenar

3.8.2.2. Gerçek Malzeme Verisinin Sonlu Elemanlar Programına Aktarılması

3.8.1. bölümüde detaylı olarak açıklanan ince cidarlı değişken kesitli kolonun yapısal ağ bilgisi, Digimat RP yazılımına, yani giriş (.inp) dosyası olarak aktarılmıştır. Ayrıca, PA6 GF40 malzemesinin özellikleri, Digimat MX aracı kullanılarak Digimat RP programına dahil edilmiştir. Üretim ağı ile beraber MOLDEX3D simülasyonundan elde edilen ilgili fiber oryantasyonu ve birleşme izi verileri (3.8.2.1. bölümde açıklanmıştır), Digimat RP'nin haritalama süreciyle işlenmiştir. Elyaf takviyeli termoplastik kompozitler için plastik enjeksiyon kalıplama sürecinin tamamı, Şekil 3.33'teki akış diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 3.33. Gerçek malzeme verilerinin (fiber oryantasyonu ve kaynak hattı) Digimat RP ile sonlu elemanlar programına aktarılmasının işlem adımları

3.8.3. İnce duvarlı ve değişken kesitli kolonlarda yük taşıma kapasitesi analizi

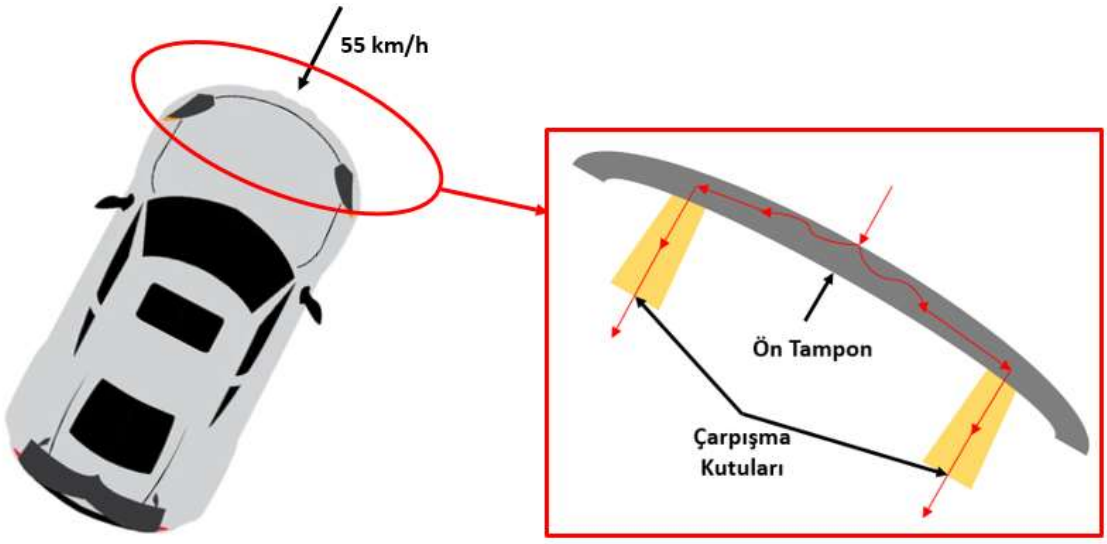
Hem geleneksel model hem de sekiz farklı kofigürasyonda kalıp akış verilerinin entegre edildiği modellerin ilk üç moda ait kritik burkulma yükleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarından gözlemlendiği üzere, enjeksiyon girişlerinin sayısındaki ve eriyik enjeksiyonunun gerçekleştirildiği bölgelerdeki değişimler, her analizde farklı fiber yönelimleri ve birleşme izi verileriyle sonuçlanmıştır. Bu veriler kullanılarak, hem geleneksel model hem de kalıp akış simülasyonu verilerini içeren modellerin yük taşıma kapasitelerini belirlemek ve karşılaştırmak amacıyla doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir.

Her bir durumda, geleneksel modelde hesaplanan kritik burkulma yükü kolonlara uygulanmıştır. Kolonlar, 295 kN'lik bir basınç yüküne maruz bırakılmıştır. Ayrıca, her burkulma analizi için .inp dosyasında 'Node fill' (Düğüm doluluk) verilerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde, özellikle burkulma problemlerinde, çözümün doğru bir şekilde yakınsaması ve malzemenin yük altındaki davranışını doğru bir şekilde temsil etmesi için kararlılık büyük önem taşımaktadır. Bu

durumda, her burkulma analizi için elde edilen 'Node fill' verileri kullanılarak kararlılık sağlanmıştır. Bu veriler, yüklerin ve deformasyonların düğümler arasında nasıl dağıldığını göstermekte ve çözümün daha kararlı ilerlemesine olanak tanımaktadır.

Ayrıca, doğrusal olmayan analizlerde kararlılığı sağlamak için yakınsama kriterleri uygulanmış ve ardışık iterasyonlar arasındaki farkların kabul edilebilir bir eşik değerinin altında kalması sağlanmıştır. Yüklerin kademeli olarak uygulanması, ani büyük deformasyonları ve buna bağlı olarak kararsızlığı önlemiştir. Malzeme modellemesi de kritik bir rol oynamış; elastik ve plastik davranış arasındaki geçişin doğru bir şekilde tanımlanması, plastik deformasyon bölgelerinin uygun şekilde öngörülmesini sağlamıştır. Sonuç olarak, çözümün kararlılığı, dikkatli yük dağılımı, ağ (mesh) iyileştirmesi ve doğru malzeme modellemesi ile güvence altına alınmıştır.

3.9. Çarpışma Kutusu (Crash-Box) Analizinde Fiber Oryantasyon ve Birleşme izi Etkilerinin İncelenmesi



Şekil 3.34. Çarpışma kutusu (crash-box) yapısı ve araçtaki konumu

Trafik kazaları, son yıllarda hem can hem de mal kayıplarına yol açarak önemli bir toplumsal sorun haline gelmiştir. Ulaşım sektöründeki hızlı gelişmeler, bu kazaların etkilerini daha ciddi boyutlara taşıma potansiyeline sahiptir (Zhou vd., 2016). Bu

durum, araç güvenliği performansının mühendisler ve tasarımcılar tarafından daha yoğun bir şekilde ele alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Araç güvenliği konusunda yapılan çalışmaların önemli bir bölümü, çarpışma dayanıklılığı ve enerji emme mekanizmaları üzerine yoğunlaşmıştır. Çarpışma dayanıklılığını artırmada kilit bir bileşen olan çarpışma kutusu yapısı, özellikle önden çarpışma durumlarında, ön tampon ile birlikte enerji emici bir görev üstlenmektedir (Şekil 3.34).

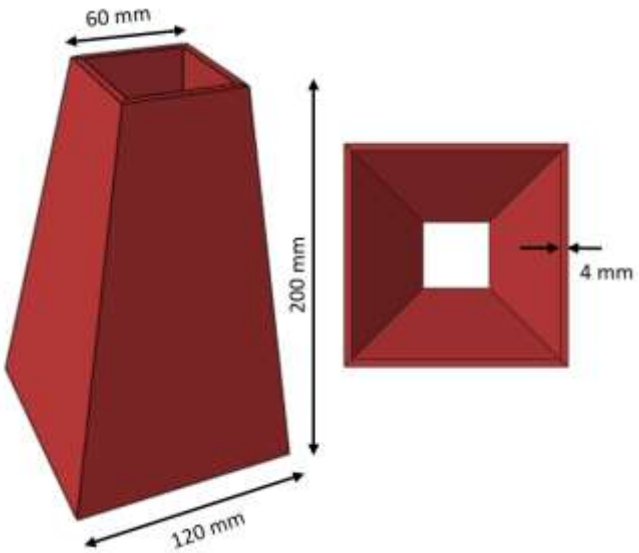
Çarpışma dayanıklılığı, plastik deformasyon davranışlarının incelendiği bir çalışma alanıdır ve araç şasileri, helikopter alt döşemeleri, otoyol bariyerleri gibi farklı yapılarda uygulanmaktadır. Bu çalışmaların temel amacı, bireyleri darbeler, çarpışmalar ve diğer kazaların olumsuz etkilerinden korumaktır (Abdullah vd., 2020). Araç güvenliği çalışmalarında, tampon ve çarpışma kutusu gibi enerji emen yapılar, bu alandaki başlıca odak noktalarını oluşturur (Yusof vd., 2017). Çarpışma kutusu, aracın ön kısmına sabitlenen veya monte edilen, genellikle metal ya da kompozit malzemelerden üretilmiş ince duvarlı bir yapıdır. Çarpışma anında enerjiyi emerek aracın genel güvenlik performansını artırır (Hussain vd., 2017).

Çarpışma kutusunun tasarımı, literatürde en çok tartışılan konulardan biridir. Silindirik, kare/çokgen, konik ve şapka kesitli kiriş gibi farklı ince duvarlı yapıların plastik deformasyon davranışları detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu yapıların enerji emici bileşenler olarak uygunlukları karşılaştırılmıştır (Hussain vd., 2017; Wang vd., 2018). Bununla birlikte, ince duvarlı yapıların boyutlarının ve malzeme kalınlığının çarpışma davranışı üzerindeki etkileri de araştırılmıştır (Wang vd., 2018; Woelke vd., 2012; Xu vd., 2018).

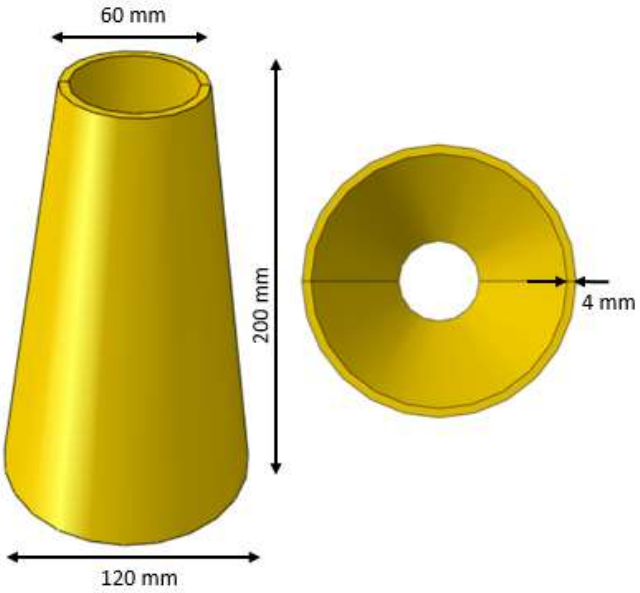
Bu çalışmada ise literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı olarak, plastik enjeksiyon prosesi sırasında oluşan enjeksiyon giriş yerleri ve sayılarına bağlı olarak değişen fiber oryantasyonu ile birleşme izi etkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Çalışma kapsamında, üç farklı çarpışma kutusu geometrisi değerlendirilerek, enerji emme mekanizmalarındaki değişimler kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

3.9.1. Çarpışma kutularının geleneksel model kullanarak sonlu elemanlar analizi

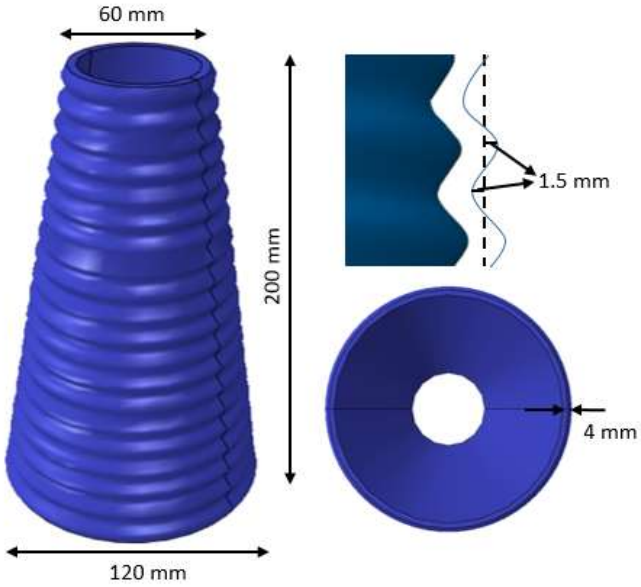
120×120 mm taban kesitinden başlayıp üst kısmında 60×60 mm'ye daralan, toplam uzunluğu 200 mm olan, 4 mm sabit et kalınlığına sahip içi boş kare (Şekil 3.35), daire (Şekil 3.36) ve ondüle (Şekil 3.37) kesitli kolonlar, ABAQUS kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 3.35. İnce duvarlı değişken kare kesitli kolon geometrisi



Şekil 3.36. İnce duvarlı değişken daire kesitli kolon geometrisi



Şekil 3.37. İnce duvarlı değişken ondüle kesitli kolon geometrisi

Sonlu elemanlar modellemesine göre, %40 cam elyaf takviyeli poliamidin elastisite modülü 12.6 GPa, Poisson oranı ise 0.35 olarak belirlenmiştir. Modelde, 3D ayrık rijit (discrete rigid) özelliklere sahip alt ve üst konum için iki plaka tanımlanmıştır. Alttaki plaka, kolona sabit bağlanma (tie bağlantısı) bağlanmıştır ve modelde genel temas tanımı (general contact) kullanılmıştır.

Analiz kapsamında, numuneye ön tanımlı bir hız alanı (predefined field) olarak 15,600 mm/s'lik bir yük uygulanmıştır. Yük ekseni boyunca hareket kısıtlanmazken, numunenin üst kısmındaki diğer hareket yönleri (DOF 1 ve DOF 2) sınırlandırılmıştır. Alt kısımda ise tüm serbestlik dereceleri (DOF 1, 2, 3) kısıtlanmıştır. İnce duvarlı değişken kesitli kolon modelinin sonlu elemanlar analizi için sekiz düğümlü, üç boyutlu hegzagonal prizmatik elemanlar olan C3D8R elemanları kullanılmıştır.

Analiz, zaman aralığı (time period) 0.013 saniye olacak şekilde gerçekleştirilmiş ve dinamik explicit çözüm yöntemi uygulanmıştır. t zaman aralığı, $t = \frac{L}{V}$ formülizasyonuna göre hesaplanmış ve L kolon boyu ve V çarpışma hızını ifade etmektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitin Makroskopik Davranışını Tahmin Etmek için Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Performans Değerlendirmesi

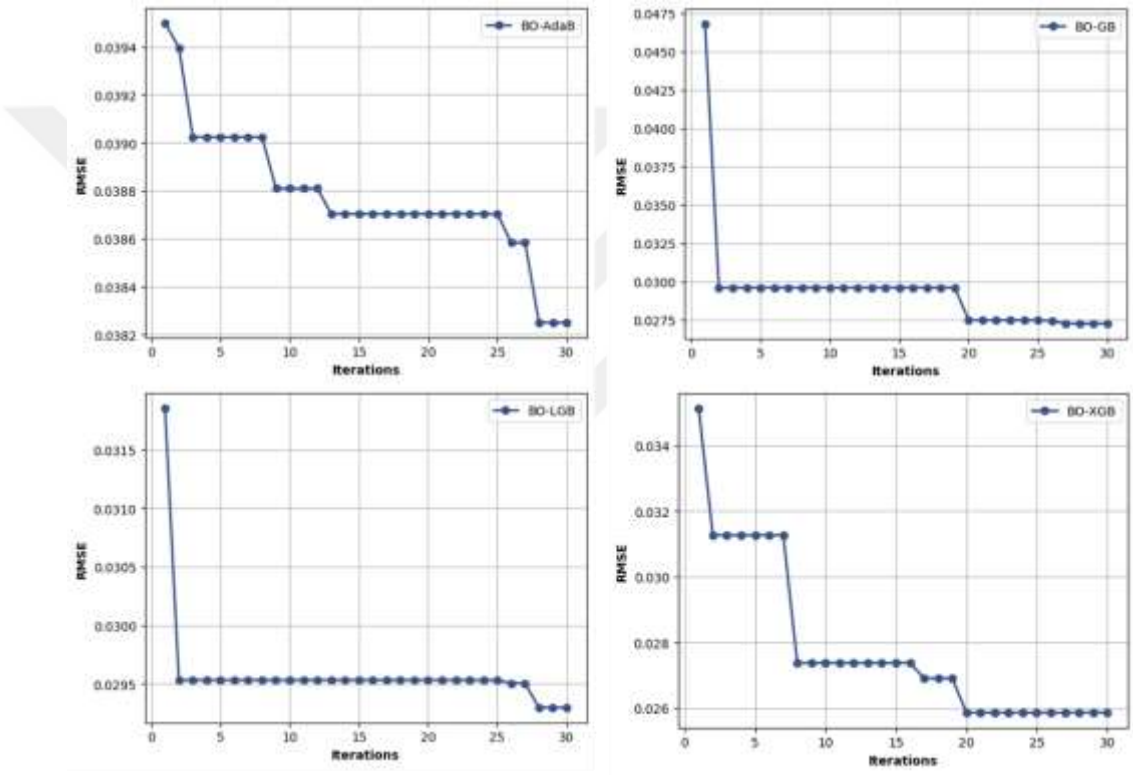
4.1.1 Bayes optimizasyonu ile parametre ayarlama sonuçları

Kompozit RVE'nin homojenleştirilmiş sertlik matrisini tahmin etmek için Bayes optimizasyon (BO) algoritması AdaB, GBR, XGB ve LGB modelleriyle ayrı ayrı entegre edilmiştir. BO'nun boosting modelleriyle bu entegrasyonu, hiperparametrelerin optimizasyonunu kolaylaştırmaktadır. Optimize edilmiş hiperparametreler genellikle varsayılan ayarlara kıyasla tahmin doğruluğunu artırmaktadır. Hiperparametre ayarı için BO, temel tahmin edici (base estimator) olarak Gauss modelini kullanarak 30 ardışık yinelemeyi çalıştıracak şekilde ayarlanmıştır. Bu süreç, temel tahmin ediciyle yaklaştırmadan önce boosting modellerinin 10 ilk değerlendirmesini gerçekleştirmektedir. Boosting modellerinin her bir hiperparametresi için üst ve alt sınırlar Çizelge 4.6'da özetlenmiştir. Model, eğitimden sonra beş kat çapraz doğrulama (5 fold cross validation) ile elde edilen RMSE değerleri ile değerlendirilmiştir. Daha sonra, en düşük çapraz doğrulama RMSE değerine dayalı olarak boosting modelleri için optimum hiperparametreler belirlenmiştir. Şekil 4.1, her bir boosting modeli için optimizasyon sürecinin sonucunu göstermekte ve artan iterasyonlarla RMSE'de kademeli bir düşüş olduğunu ortaya koymaktadır. Boosting modelleri için belirlenen optimum hiperparametreler Çizelge 4.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. Parametre arama uzayı ve optimum değerler

Boosting modeli	Hyperparameter	Alt sınır	Üst limit	Optimal değerler
AdaB	Max. derinlik	3	15	13
	Tahminci sayısı	50	400	340
	Öğrenme oranı	0.1	0.8	0.56
GBR	Max. derinlik	2	8	4
	Tahminci sayısı	100	500	135

	Öğrenme oranı	0.1	1	0.15
XGB	Max. derinlik	3	15	3
	Tahminci sayısı	50	400	393
	Öğrenme oranı	0.01	0.8	0.18
LGB	Tahminci sayısı	50	400	206
	Yaprak sayısı	10	100	10
	Öğrenme oranı	0.1	0.8	0.06



Şekil 4.1. Hiperparametre optimizasyonu sırasında boosting modellerinin RMSE değerleri

4.1.2 Boosting modellerinin performans değerlendirmesi

Boosting modellerini etkili bir şekilde eğitmek için gereken optimum veri örneği sayısını bir yakınsama çalışması gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Bu çalışma için 128, 256 ve 512 örnek içeren veri kümeleri kullanılmıştır. 128 ve 256 örnek üzerinde eğitilen modeller yetersiz uyum (underfitting) belirtileri göstermiş ve daha düşük doğruluk sağlamıştır. Buna karşılık, 512 örnek üzerinde eğitilen modeller daha yüksek R^2

değerleri ve daha iyi performans elde etmiştir. Bu da 512 örneğin modellerin temel ilişkileri yakalaması için yeterli veri sağladığını ve bu problem için uygun bir veri kümesi boyutu olduğunu göstermektedir.

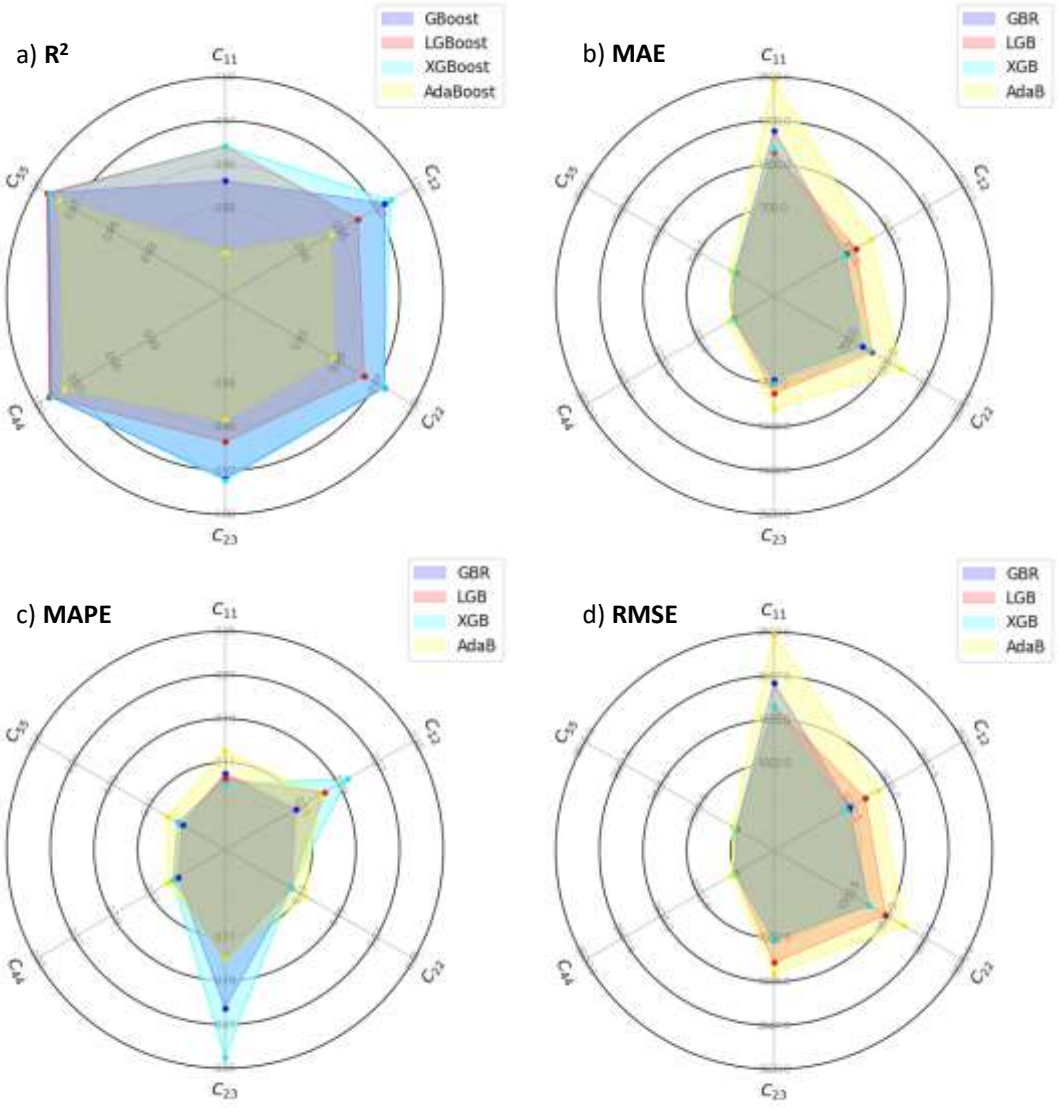
R^2, MAE, MAPE ve RMSE metrikleri üzerinden eğitim ve test verileri için boosting modellerinin tahmin performansı Çizelge 4.2'de özetlenmiştir. Tüm modeller arasında XGB hem eğitim hem de test veri kümeleri için yaklaşık 0.99 ile en yüksek R^2 değerini elde etmiştir. Bu yüksek R2 değeri, XGB modelinin verilere çok iyi uyduğunu ve çıktılardaki varyansın %99'unu açıkladığını göstermektedir. Test aşamasında, XGB modeli sırasıyla 599.6, 0.125 ve 1027.7 ile en düşük MAE, MAPE ve RMSE değerlerini göstermiştir. Bu metrikler XGB modelinin doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermektedir. XGB modeli tarafından üretilen tahminler gerçek sonuçlarla yakından eşleşmektedir. Buna karşılık AdaB, bir RVE'nin homojenleştirilmiş rijitlik matrislerini tahmin etmede en düşük performansı sergilemektedir. AdaB'nin R^2 değeri daha düşük, MAE ve RMSE değerleri ise test aşamasındaki tüm boosting modellerinden daha yüksektir. Bu, AdaB modelinin tahminlerinin gerçek verilerle daha az tutarlı olduğunu göstermektedir. GBR ve LGB modelleri AdaB'den daha iyi performans gösterse de XGB'nin performansının gerisinde kalmaktadır. GBR ve LGB yüksek R^2 değerleri elde etse de diğer hata metrikleri (MAE, MAPE, RMSE) XGB'den daha yüksektir.

Çizelge 4.2. Tüm boosting modellerinin performans değerleri

Model	**Eğitim aşaması**				**Test aşaması**			
	R^2	**MAE**	**MAPE**	**RMSE**	**R^2**	**MAE**	**MAPE**	**RMSE**
AdaB	0.999	95.1	0.031	259.58	0.945	1077.9	0.114	1936.0
GBR	0.999	54.6	0.007	91.38	0.977	709.2	0.101	1330.0
XGB	0.999	45.1	0.008	70.09	0.985	599.6	0.125	1027.7
LGB	0.993	255.2	0.05	637.5	0.971	744.4	0.138	1405.9

Şekil 4.2 (a-d), AdaB, GBR, XGB ve LGB modellerini sırasıyla R2, MAE, MAPE ve RMSE metrikleri açısından görsel olarak karşılaştırmak için bir radar grafiği sunmaktadır. Bu şekildeki her bir alt grafik, homojenleştirilmiş rijitlik matrisindeki

elemanların tahmin edilen ve gerçek değerleri arasındaki karşılaştırmayı gösteren bir hata metriğini vurgulamaktadır. Şekil 4.20 ayrıntılı olarak incelendiğinde, XGB'nin değerlendirilen tüm metriklerde diğer boosting modellerinden sürekli olarak daha iyi performans gösterdiği ve üstün tahmin doğruluğuna işaret ettiği görülmektedir. İlginç bir şekilde, GBR performans açısından XGB'yi yakından takip ederek, bir RVE'nin homojenleştirilmiş rijitlik matrisini verimli bir şekilde tahmin etmede karşılaştırılabilir sağlamlık göstermektedir.



Şekil 4.2. R2, MAE, MAPE ve RMSE değerlerini karşılaştıran tüm boosting modellerinin radar grafikleri

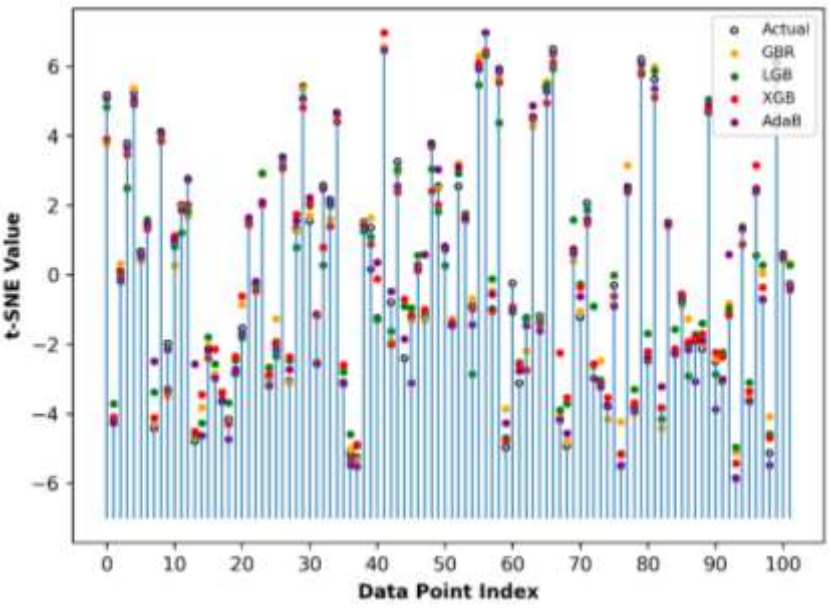
En iyi performans gösteren model olan XGB, daha önce görülmemiş veriler üzerinde tahminler yapmak için kullanılmış ve bu tahminler DIGIMAT'tan elde edilen RVE analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3, Digimat'tan elde edilen rijitlik matrisi elemanlarının tahmin edilen değerlerle karşılaştırılmasını sunmaktadır. Sonuçlar, XGB modeli tarafından üretilen tahmini değerler ile farklı malzeme konfigürasyonlarındaki gerçek değerler arasında çok yakın bir uyum olduğunu göstermektedir. Her bir gerçek ve tahmin edilen rijitlik matrisi elemanı arasındaki fark tüm RVE örnekleri için %1'den azdır. Bu, XGB modelinin malzeme rijitlik matrisi için doğru tahminler yapmadaki etkinliğini göstermektedir.

Çizelge 4.3. Digimat ve XGB tahmininden elde edilen rijitlik matrisinin elemanları

E_M (MP)	ν_M	E_F (MP)	ν_F	V_f (%)		C_{11} (MP)	C_{12} (MP)	C_{22} (MPa)	C_{23} (MPa)	C_{44} (MPa)	C_{55} (MPa)
13000	0.32	32200	0.29	0.25	**Gerçek**	23000	8850	21400	9210	6210	6090
					Tahmin	23041	8797	21381	9180	6196	6081
3770	0.426	69200	0.249	0.22	**Gerçek**	24800	8580	13100	9270	1980	1910
					Tahmin	24753	8541	12966	9243	1992	1914
2440	0.374	23900	0.34	0.27	**Gerçek**	10900	3520	6180	3519	1400	1330
					Tahmin	10933	3461	6179	3550	1391	1308
7220	0.432	77300	0.266	0.23	**Gerçek**	37200	17600	26100	18900	3740	3630
					Tahmin	37182	17475	26126	18873	3731	3619

Van der Maaten ve Hinton (2008) tarafından tanıtılan t-SNE analizi, boosting modelleri tarafından tahmin edilen yüksek boyutlu veri kümelerini görselleştirmek için kullanılan bir araçtır. Öncelikle veri varyansını korumaya odaklanan PCA'nın aksine, t-SNE daha düşük boyutlu bir uzayda veri noktaları arasındaki ilişkileri korumaktadır. Bu özellik, t-SNE'yi karmaşık çok boyutlu verileri iki boyutlu bir grafik üzerinde görselleştirmek için ideal hale getirmektedir. Şekil 4.3'de test veri setindeki çeşitli endekslerde gerçek ve tahmin edilen verilerin t-SNE dağılım grafiği sunulmaktadır. Grafikteki boosting

modellerine ait t-SNE değerleri, yüksek boyutlu tahmin verilerin t-SNE algoritması kullanılarak iki boyutlu uzaya indirgenmesiyle elde edilmiştir. Grafikte, tahmin edilen t-SNE değerlerinin endekslerin çoğu için gerçek değerler etrafında yakın bir şekilde kümelendiği gözlemlenebilir. Bu yakınlık, boosting modellerinin gerçek verilerin altındaki ilişkileri etkili bir şekilde yakaladığını ve veri setindeki karmaşık örüntüleri temsil etme kabiliyetlerini gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.3. Tüm boosting modelleri için gerçek ve tahmin t-SNE değerlerinin karşılaştırılması

4.2. Kısa Elyaf Takviyeli Polimerlerin Elastoplastik Davranışını Tahmin Etmek için Eğitilmiş Makine Öğrenimi Modellerinin Performans Değerlendirmesi

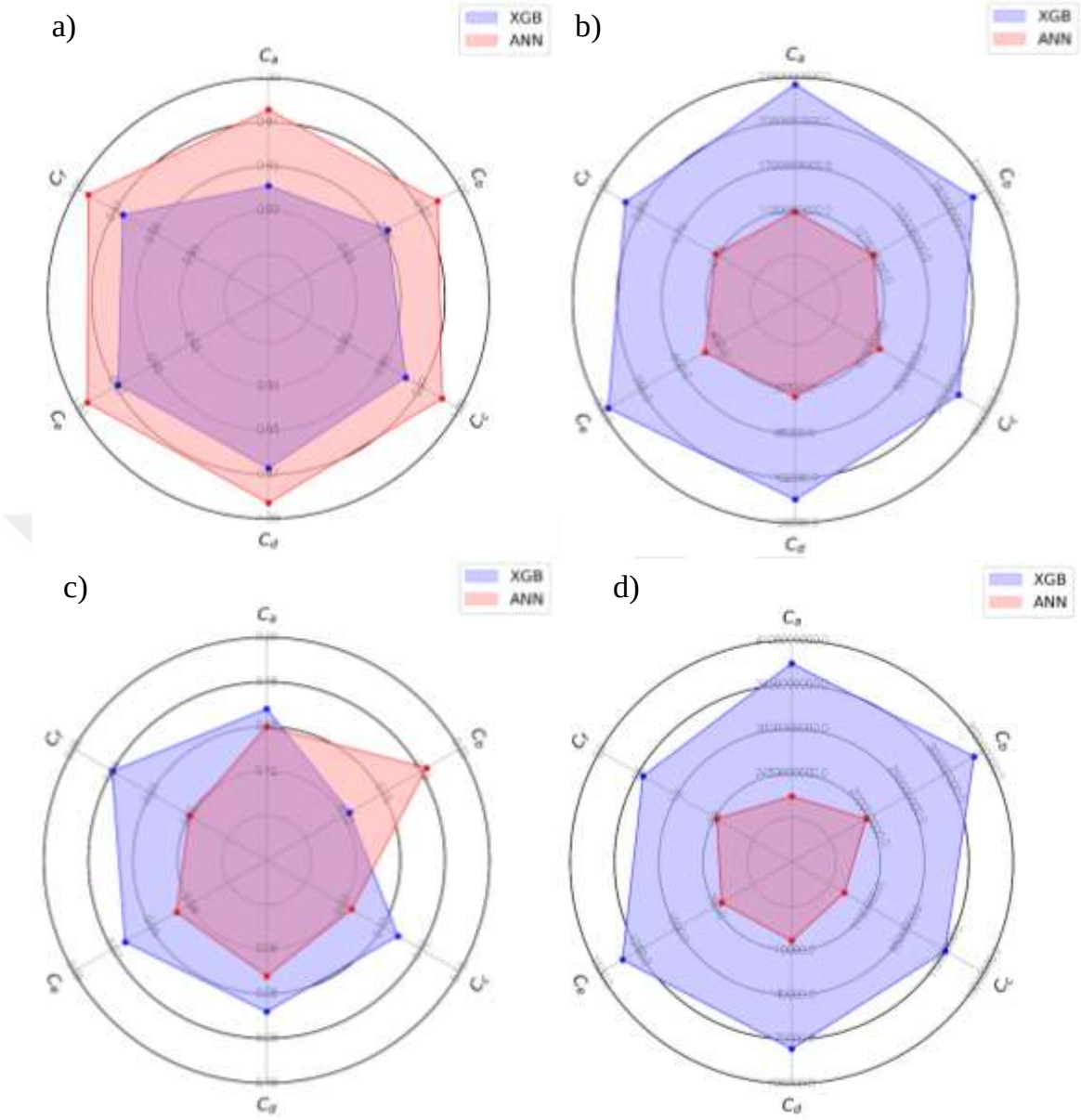
Bu alt bölümde, optimum hiperparametreler kullanılarak eğitilen XGB ve YSA modelinin performansı hem eğitim hem de test veri kümeleri üzerinde değerlendirilmektedir. Buradaki amaç, cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin doğrusal olmayan davranışını tahmin etmede bu MÖ modellerin doğruluğunu ve genelleme yeteneklerini değerlendirmektir. Modellerin performansı R^2, MAE, MAPE ve RMSE olmak üzere dört istatistiksel metrik kullanılarak değerlendirilmiştir. Çizelge 4.4, eğitim ve test setlerinde her iki MÖ modeli için değerlendirme metriklerini sunmaktadır. Bu çizelgeden YSA'nın her bir değerlendirme

metrikte güçlü performans gösterdiği ve daha iyi genelleme kabiliyetine sahip olduğu gözlemlenebilir. Buna karşılık, XGB'nin test verilerinde daha düşük R^2 ve daha yüksek MAE, MAPE, RMSE değerleriyle gösterildiği gibi aşırı uyum (overfitting) sergilemektedir.

Çizelge 4.4. Farklı istatistiksel metriklere göre modellerin performansı

Model	Eğitim aşaması				Test aşaması			
	R^2	**MAE**	**MAPE**	**RMSE**	**R^2**	**MAE**	**MAPE**	**RMSE**
XGB	0.999	38935180	0.013	127550013	0.962	409550872	0.096	1562067438
YSA	0.997	140348130	0.049	406386218	0.989	254506585	0.090	887571275

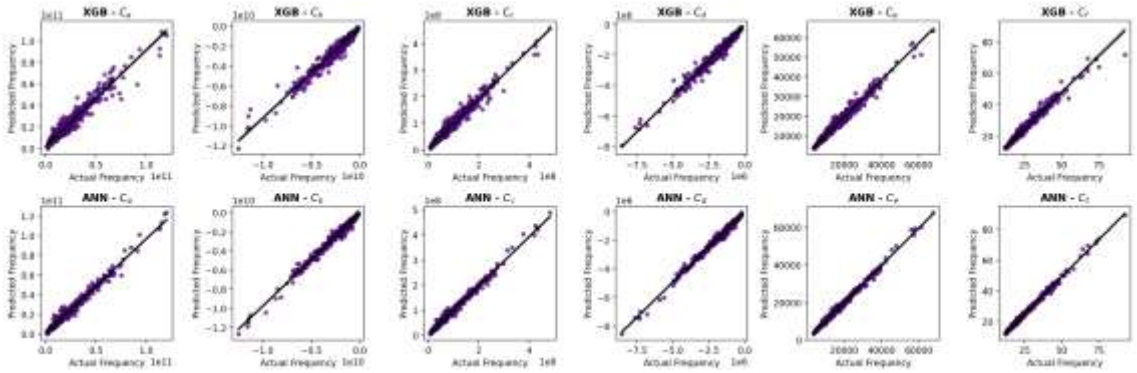
XGB ve YSA modellerinin farklı performans metrikleri üzerinde bütünsel (holistic) bir karşılaştırması Şekil 4.4 (a-d)'de radar grafikleri kullanılarak gösterilmiştir. Bu grafiklerde, daha küçük bir kapalı alan daha iyi model performansını temsil etmektedir. Bu şekillerden, YSA modelinin çevrelediği alanın dört metriğin hepsinde XGB'den daha küçük olduğu açıkça görülmektedir. Bu da YSA modelinin beşinci dereceden polinom fonksiyonunun katsayılarına ilişkin daha doğru tahminler sunduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, YSA tahmin doğruluğunda XGB'den daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4. MÖ modellerin a) R^2, b) MAE, c) MAPE ve d) RMSE değerlerini karşılaştıran radar grafikleri

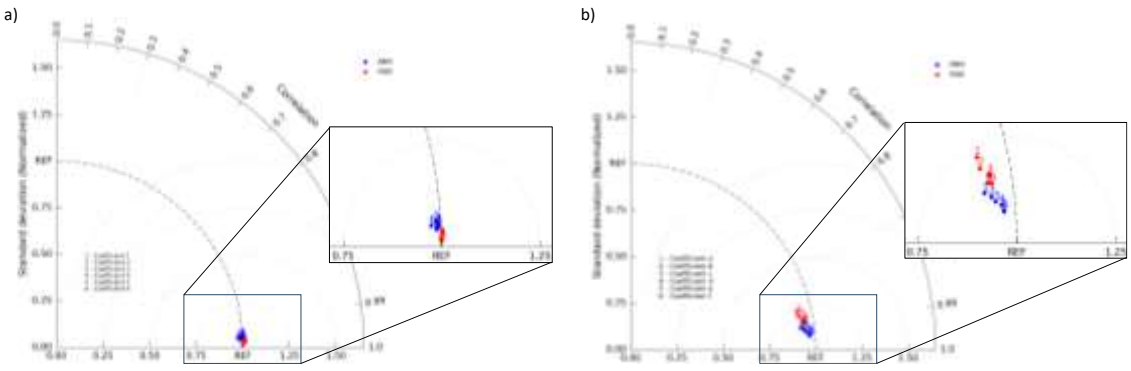
Beşinci dereceden polinom denkleminin her bir katsayısı için dağılım grafikleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu şekil, gerçek ve tahmin edilen değerlerin birbirlerinden ne kadar saptığını görsel olarak göstermektedir. YSA modeli için, çoğu veri noktasının polinom denkleminin tüm katsayılarında 45 derecelik diyagonal çizgiye yakın olduğu görülebilir. Bu, tahmin edilen ve gerçek değerlerin birbiriyle iyi bir uyum içinde olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, YSA modeli test verileri üzerinde katsayıları çok iyi bir doğrulukla tahmin etmiştir. Bununla birlikte, XGB tarafından sergilenen veri

noktalarında önemli bir dağılım vardır. Bu, XGB tarafından yapılan tahminlerin altı katsayının tümü için gerçek değerlerinden büyük ölçüde saptığı anlamına gelmektedir.



Şekil 4.5. Polinom denkleminin altı katsayısı için XGB (üst sıra) ve YSA (alt sıra) modellerinin dağılım grafikleri

Taylor diyagramı, korelasyon katsayısı ve standart sapma gibi metrikleri kullanarak makine öğrenimi modellerini değerlendirmek için etkili bir araçtır. Şekil 4.24'te hem eğitim hem de test veri kümeleri için XGB ve YSA modelinin Taylor diyagramları gösterilmektedir. Eğitim verilerinde (Şekil 4.6a), tüm modeller referans noktasına yakın bir şekilde kümelenmiştir, bu da düşük standart sapmalar ve 1'e yakın korelasyon değerleri ile yüksek doğruluğa işaret etmektedir. Test verilerinde (Şekil 4.6b), XGB biraz daha yüksek standart sapmalar ve daha düşük korelasyonlar göstererek hafif bir aşırı uyuma işaret etmektedir. Bununla birlikte, YSA'nın tahmin ettiği katsayılar referans noktasına yakın kalarak güçlü genelleme ve yüksek doğruluk sergilemektedir.

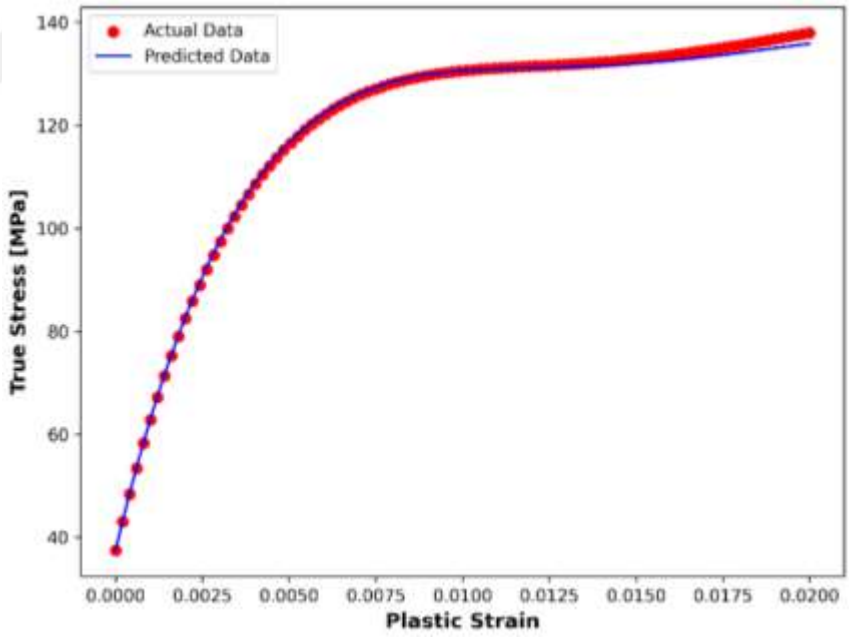


Şekil 4.6. a) Eğitim ve b) test veri kümesi için XGB ve YSA modellerin Taylor diyagramları

YSA modelinin yüksek doğruluğu ve sağlam performansı nedeniyle, cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin doğrusal olmayan analizini gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Bu amaçla, Çizelge 4.5'te verilen özelliklere sahip kompozit malzeme, bir polinom fonksiyonunun katsayılarını tahmin etmek için YSA modelinin girdisi olarak kullanılmıştır. YSA modeli tarafından tahmin edilen katsayılar, homojenleştirilmiş elastoplastik gerilme-gerinim eğrisini temsil etmek üzere yeniden yapılandırılmıştır. Şekil 4.7'te gösterildiği gibi tahmin edilen gerilme-gerinim eğrisi digimat sonuçlarıyla karşılaştırıldığında çok iyi bir uyum sağlamıştır. Bu sonuç, YSA modelinin doğruluğunu ve güvenilirliğini daha da kanıtlamaktadır.

Çizelge 4.5. Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin malzeme parametreleri

E_M	ν_M	E_F	ν_F	V_f	λ	a_{11}	a_{22}	a_{33}
1500	0.42	72000	0.21	0.25	0.25	0.333	0.333	0.333

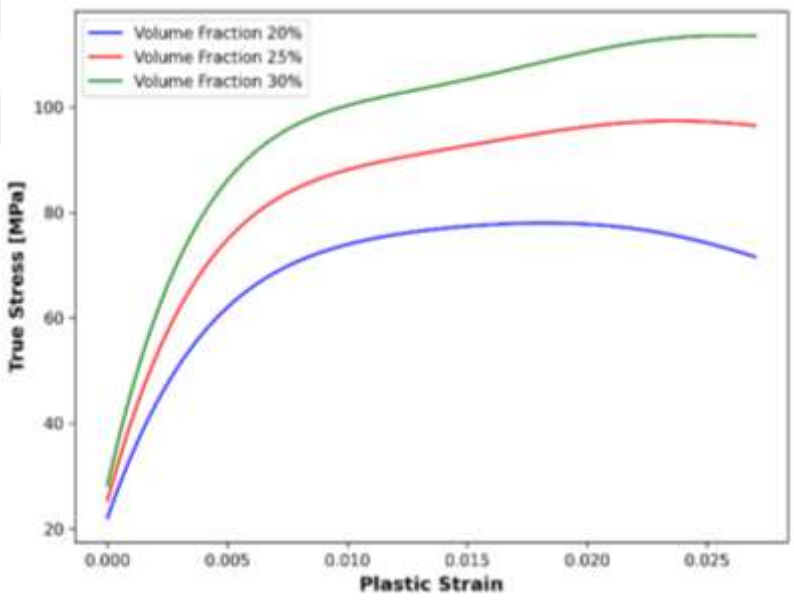


Şekil 4.7. Digimat ve YSA'dan elde edilen gerilme-gerinim eğrisinin karşılaştırılması

YSA tarafından tahmin edilen gerilme-gerinim eğrisinin doğrulanmasının ardından, YSA modeli kullanılarak hacim oranı ve en-boy oranının elasto-plastik davranış üzerindeki etkileri ile ilgili parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmanın

amacı iki yönlüdür. Birincisi, YSA modelinin sağlamlığını kontrol etmektir. İkincisi, kompozit malzemenin bileşen parametrelerinin değişimi nedeniyle mukavemet özelliklerindeki değişiklikleri anlamaktır. Bir cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin tüm yöneten parametreleri arasında, hacim oranı mukavemet özelliklerine önemli ölçüde katkıda bulunur.

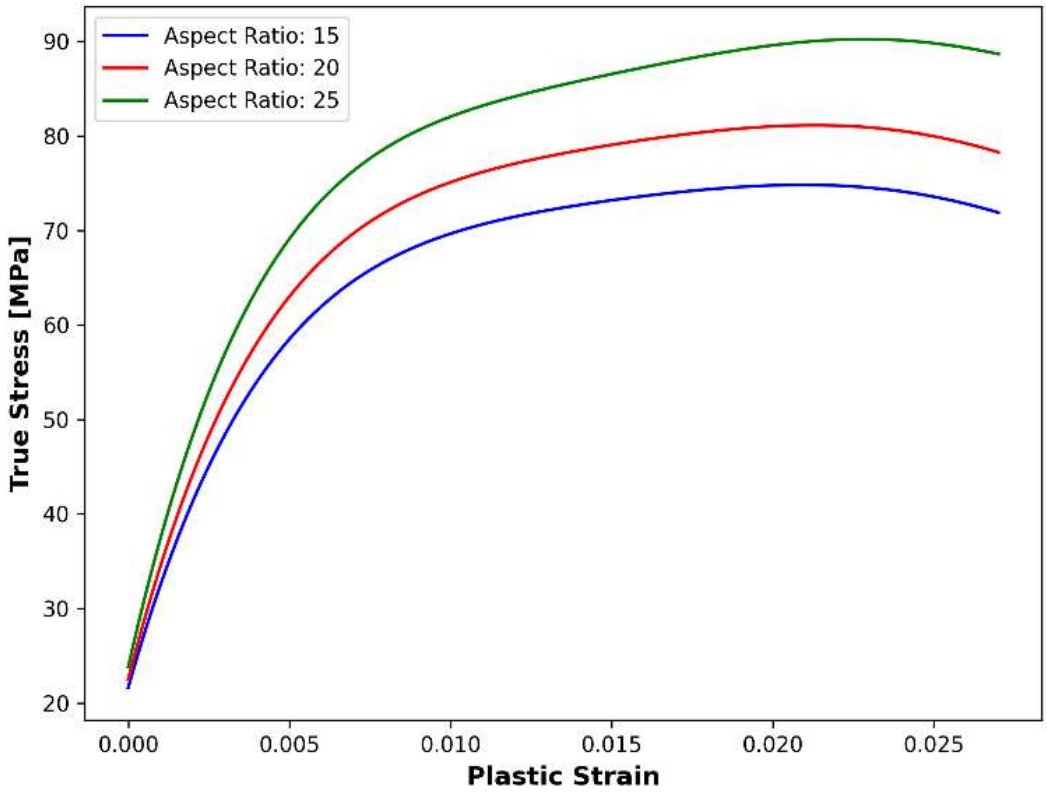
Bu çalışmada, Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, farklı hacim oranlarında YSA'dan elde edilen gerilme-gerinim eğrilerinin değişimleri incelenmiştir. Hacim oranları %20, %25 ve %30 olarak alınmıştır, çünkü bu değerler SFRP literatüründe yaygın olarak bulunmaktadır. Şekil 4.8'de hacim oranının artmasıyla birlikte malzemenin elastik rijitliğinin, akma gerilmesinin ve nihai mukavemetinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir.



Şekil 4.8. Farklı hacim oranları için YSA tarafından tahmin edilen gerilme-gerinim eğrileri

Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit malzemenin bir diğer belirgin parametresi ise elyaf en-boy oranıdır. Bu malzemeler, daha küçük en-boy oranlarına sahip liflerle partiküllü kompozitler gibi davranırken, bir yönde aşırı en-boy oranlarına sahip liflerle sürekli kompozitler gibi davranmaktadır. Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin 15, 20 ve 25 gibi yaygın olarak kullanılan en-boy oranlarının değişimi ile

elastoplastik tepkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Sonuçlar, daha küçük gerinimlerde, gerilme-gerinim eğrilerinin elastik modüllerde önemli bir değişiklik göstermediğini ortaya koymaktadır. Ancak, akma noktası en-boy oranındaki artışla birlikte yükselmektedir. Ayrıca gerilme- gerinim eğrilerinin plastik rejimlerinde nihai mukavemetinin önemli ölçüde arttığı anlaşılmaktadır.



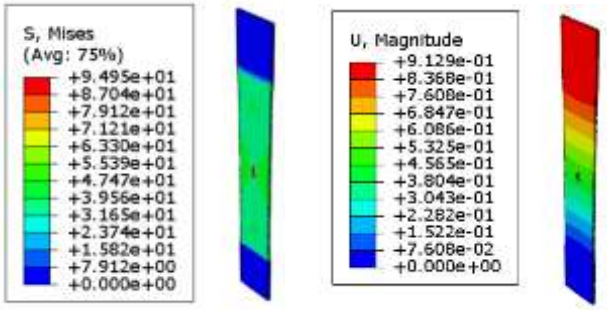
Şekil 4.9. Farklı en-boy oranları için YSA tarafından tahmin edilen gerilme-gerinim eğrileri

4.3. Fiber Oryantasyon Etkisinin Entegre Edildiği Model ile Geleneksel Model Analiz Sonuçları

4.3.1. Açık delikli numune çekme testinin analiz sonuçları

4.3.1.1. Geleneksel model analiz sonuçları

Sonlu eleman analizlerinin sonuçları, numune üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımını gösteren kontur grafikler olarak sunulmuş ve Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

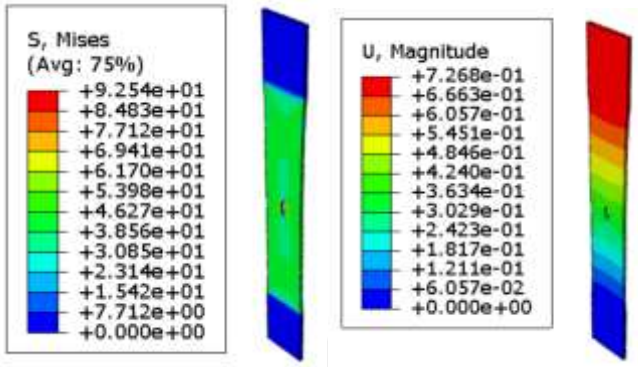
	Gerilme	Yer Değiştirme
Çekme		
Maksimum Değerler	94.95 MPa	0.9129 mm

Şekil 4.10 Geleneksel çekme deneyi numunesindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımının kontur grafikleri

Şekilde görüldüğü üzere, sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen maksimum gerilme değeri 94 MPa olarak belirlenmiş, buna karşılık gelen maksimum yer değiştirme ise 0,9129 mm olarak hesaplanmıştır.

4.3.1.2. Gerçek malzeme verisinin entegre edildiği model analiz sonuçları

Digimat RP'ye entegre edilen ve haritalanan veriler, yani gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği açık delikli çekme testi simülasyonu için sonlu elemanlar analiz programı olan ABAQUS'a input olarak verilmiştir. Sonlu eleman analizlerinin sonuçları, numune üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımını gösteren kontur grafikler olarak sunulmuş ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

	Gerilme	Yer Değiştirme
Çekme	
Maksimum Değerler	92.54 MPa	0.7268 mm

Şekil 4.11. Gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği çekme testi modelinin, numune üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımını gösteren kontur grafikleri

4.3.1.3. Analiz sonuçlarının karşılatırılması

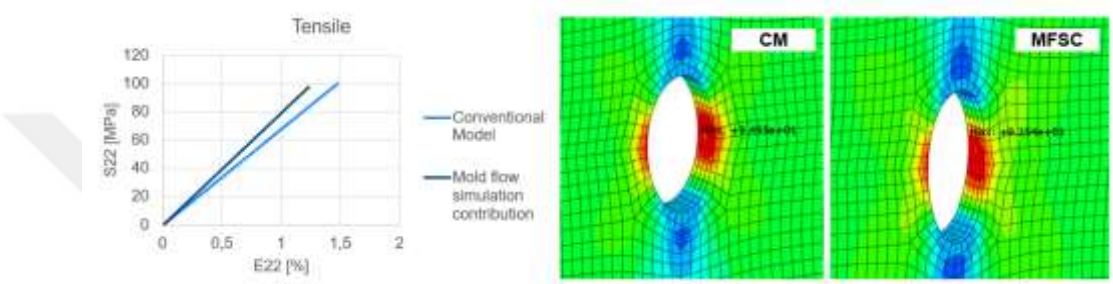
Hem geleneksel modelin hem de fiber oryantasyon etkisinin entegre edildiği gerçek veri modelinin 3.5 kN yük altındaki çekme testi analiz sonuçlarının karşılaştırması, Çizelge 4.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.6. Çekme analizi sonuçlarının özeti

Çekme Analizi	Fiber Oryantasyonun Dahil Edilmediği	Fiber Oryantasyonun Dahil Edildiği	Değişim Yüzdesi [%]
Maks. Gerilme [MPa]	94.95	92.54	2.54
Maks. Yer Değiiştirme [mm]	0.9129	0.7268	2.04

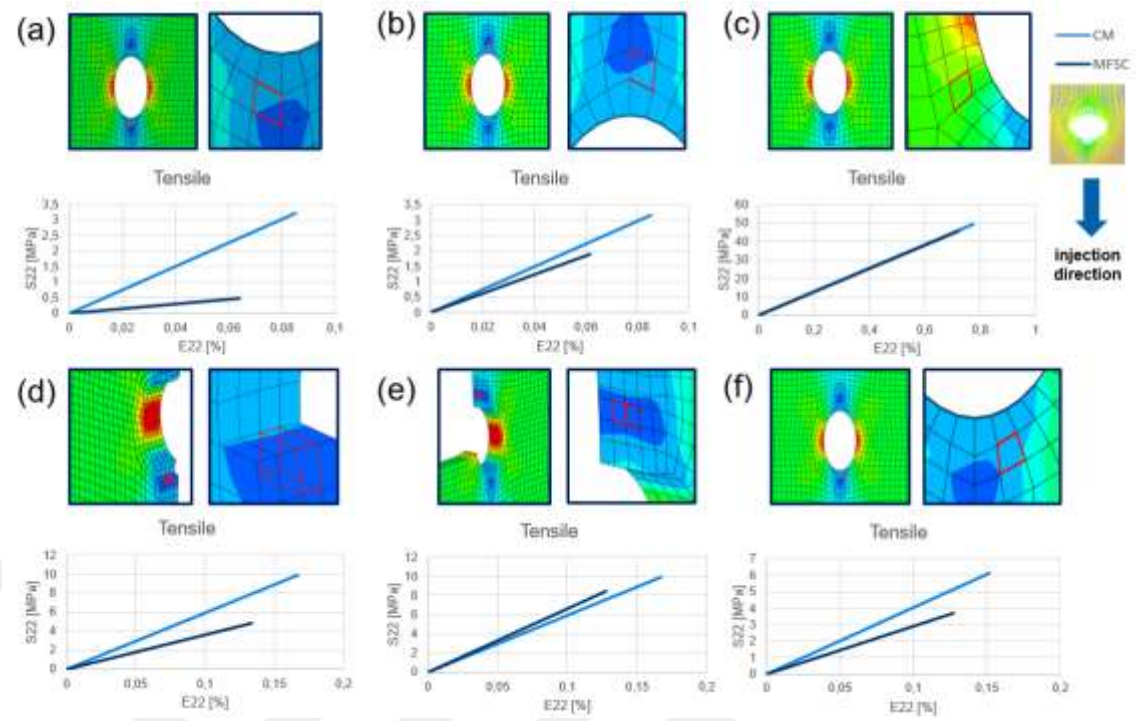
Sonuçlar, fiber yöneliminin dahil olduğu modelde, fiber yöneliminin dahil olmadığı modele kıyasla en yüksek gerilme ve en yüksek yer değiştirme değerlerinde bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu, fiber yöneliminin dikkate alınmasının, çekme testlerinde gerilme ve yer değiştirme tahminlerinin doğruluğunu artırdığını öne sürmektedir.

Hem geleneksel modelin hem de kalıp akış simülasyonu katkısı bulunan modelin (fiber dağılımı ve yöneliminin entegre olduğu model) analiz edilen örneklerinin sonuçları, geleneksel modelde fiber yönelimi olmadan elde edilen en yüksek gerilme değeri ile fiber yönelimi dikkate alınan modeldeki en yüksek gerilme değerinin aynı elemanda ortaya çıktığını göstermektedir (Şekil 4.12). Bu karşılaştırma, lif yönelimi farkları olsa da, her iki modelde de kritik gerilme bölgelerinin tutarlı olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 4.12. Çekme analiz sonuçlarının karşılaştırılması, maksimum gerilme bölgesi

Analiz edilen numunenin sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, eriyik enjeksiyon sırasında delik varlığı akışı değiştirerek, deliğin arkasında doğrusal akış yerine eriyik malzemenin açısal bir birleşim yapmasına neden olmaktadır. Bu durum, deliği fiber yönelimi ve dağılımı açısından numunenin en kritik bölgesi haline getirmektedir. Bu nedenle, geleneksel model ve gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği modelde, fiber yönelimi ile bunların gerilme ve yer değiştirme üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak amacıyla, eleman bazında yerel olarak karşılaştırılmıştır. Deliğe yakın altı farklı bölge seçilerek, geleneksel modelden hesaplanan gerilme-şekil değiştirme (stress-strain) eğrileri çıkarılmıştır.



Şekil 4.13. Eleman bazında çekme analizi sonuçlarının karşılaştırılması

Çalışmada yapılan analizlerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri çıkarıldı. Şekil 4.13'te, hem geleneksel model hem de gerçek malzeme verisinin entegre edildiği model simülasyonlarından elde edilen sonuçları karşılaştırmak için delik çevresindeki altı bölge seçildi. Şekilde, malzeme akış yönü belirtilmiş olup, fiber akış yönü iki ayrı dalın birleşimini göstermektedir. Sonuç olarak, bu bölgede enjeksiyon yönünde fiberlerin doğrusal bir şekilde yönlenememesi söz konusu olmuştur.

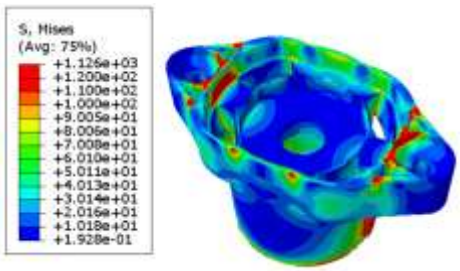
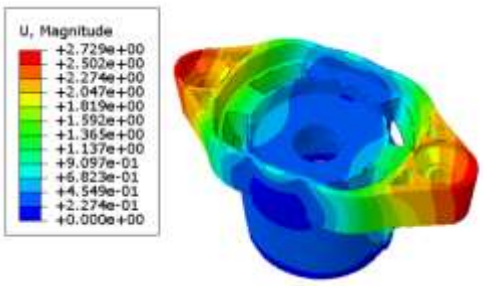
Delik arkasındaki (a), (d) ve (f) bölgelerinde, yönelim ve dağılımın bozulmasından kaynaklanan farklar geleneksel model ve gerçek malzeme verisinin entegre edildiği model sonuçları arasında gözlemlenmiştir. Geleneksel modelde her bir bölge için tek bir elastisite modülü tanımlanmış ve malzemenin her bölgede homojen bir şekilde dağıldığı varsayılmıştır. Ayrıca, tüm bölgelerde %30 fiber dağılımı olduğu kabul edilmiştir. Ancak, Şekil 4.13'te görüldüğü gibi, üretim verilerinden elde edilen fiber dağılımı, kritik bölgelerde dağılım ve yönelimin farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır.

Enjeksiyon işlemi sonucu, %30 fiber oranına sahip altı farklı bölgede farklı oranlar belirlenmiştir: %30 fiber oranının (a) bölgesinde yaklaşık %45'i, (d) bölgesinde %50'si, (f) bölgesinde %45-50'si, (b) bölgesinde %95'i, (c) bölgesinde %80-85'i, ve (e) bölgesinde %90'ı. Hem geleneksel model hem de gerçek malzeme verisinin entegre edildiği model simülasyonlarından elde edilen karşılaştırma sonuçlarında, yük yönünde fiber yöneliminin ve fiber dağılım oranının mekanik dayanımı artırdığı görülmüştür. (b) ve (e) bölgelerini karşılaştırdığında, (b) bölgesindeki fiber oranı (e) bölgesine göre daha yüksektir. Ancak enjeksiyon sırasında oluşan basınç nedeniyle, delik çevresine yakın bölgelerde yönelim açısında bir değişim meydana gelmiştir. Bu nedenle, (e) bölgesindeki mekanik dayanım, (b) bölgesine göre oldukça iyidir. Benzer şekilde, (c) bölgesi ile (b) bölgesi karşılaştırıldığında, (c) bölgesinin analiz sonuçları, sadece %80-85 fiber oranına sahip olmasına rağmen oldukça tatmin edicidir. (c) bölgesinde, fiberlerin yük yönünde yönlenmesi nedeniyle mekanik dayanım artmıştır.

4.3.2. Braket dayanım testinin analiz sonuçları

4.3.2.1. Geleneksel model analiz sonuçları

Geleneksel model simülasyonundan elde edilen sonuçlar, braket parçası üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımının kontur grafiği olarak Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

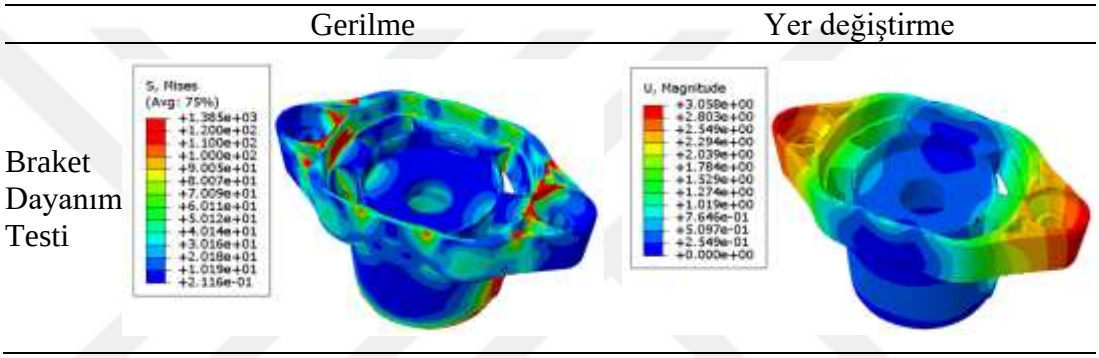
	Gerilme	Yer değiştirme
Braket Dayanım Testi		

Şekil 4.14. Geleneksel model braket testinin parça üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımına ait kontur grafikleri

Şekilde gösterildiği üzere, sonlu elemanlar analizinden elde edilen maksimum gerilme değeri 1126 MPa, buna karşılık gelen maksimum yer değiştirme ise 2.729 mm olarak hesaplanmıştır.

4.3.2.2. Gerçek malzeme verisinin entegre edildiği model analiz sonuçları

Gerçek malzeme verisinin entegre edildiği model simülasyonundan elde edilen sonuçlar, braket parçası üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımının kontur grafiği olarak Şekil 4.15'de gösterilmiştir.

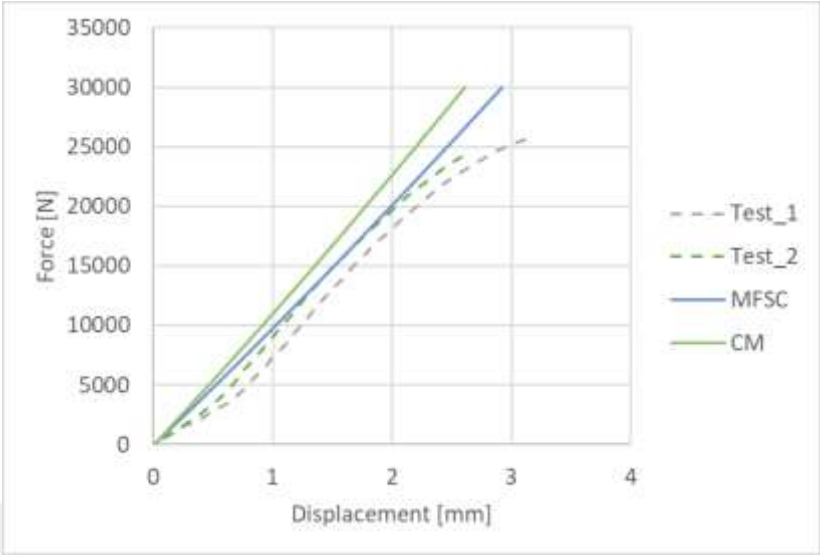


Şekil 4.15. Gerçek malzeme verisi entegre edildiği modelde braket testinin parça üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımına ait kontur grafikleri

Şekilde gösterildiği üzere, sonlu elemanlar analizinden elde edilen maksimum gerilme değeri 1385 MPa, buna karşılık gelen maksimum yer değiştirme ise 3.058 mm olarak hesaplanmıştır.

4.3.2.3. Analiz sonuçlarının karşılatırılması

Test sonuçları ile analiz sonuçlarını karşılaştıran grafik Şekil 4.7'de gösterilmektedir. İki braket numunesinin test sonuçları, geleneksel model analiz sonucu (ABAQUS) ve gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği model analiz sonucu (DIGIMAT RP) ile karşılaştırıldığında, fiber yönelimi ve dağılım verilerini içeren modelin test sonuçlarına oldukça yakın olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum, gerçek malzeme verilerinin kullanılarak braketin mekanik performansının tahmin edilmesinin doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermektedir.



Şekil 4.16. Braket Dayanım Testi ve analiz sonuçları

4.4. Fiber Oryantasyon ve Birleşme İzinin Entegre Edildiği Farklı Enjeksiyon Dolum Yeri ve Sayısına Sahip Modellerin Mekanik Dayanım Analiz Sonuçları

4.4.1. Açık delikli numune doğrusal olmayan çekme testinin analiz sonuçları

4.4.1.1. Analiz sonuçlarının karşılatırılması

10 kN yük altında, hem geleneksel model hem de gerçek malzeme versinin entegre edildiği model için çekme testi analiz sonuçlarının karşılaştırması Çizelge 4.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.7. Doğrusal olmayan çekme analizi sonuçlarının özeti

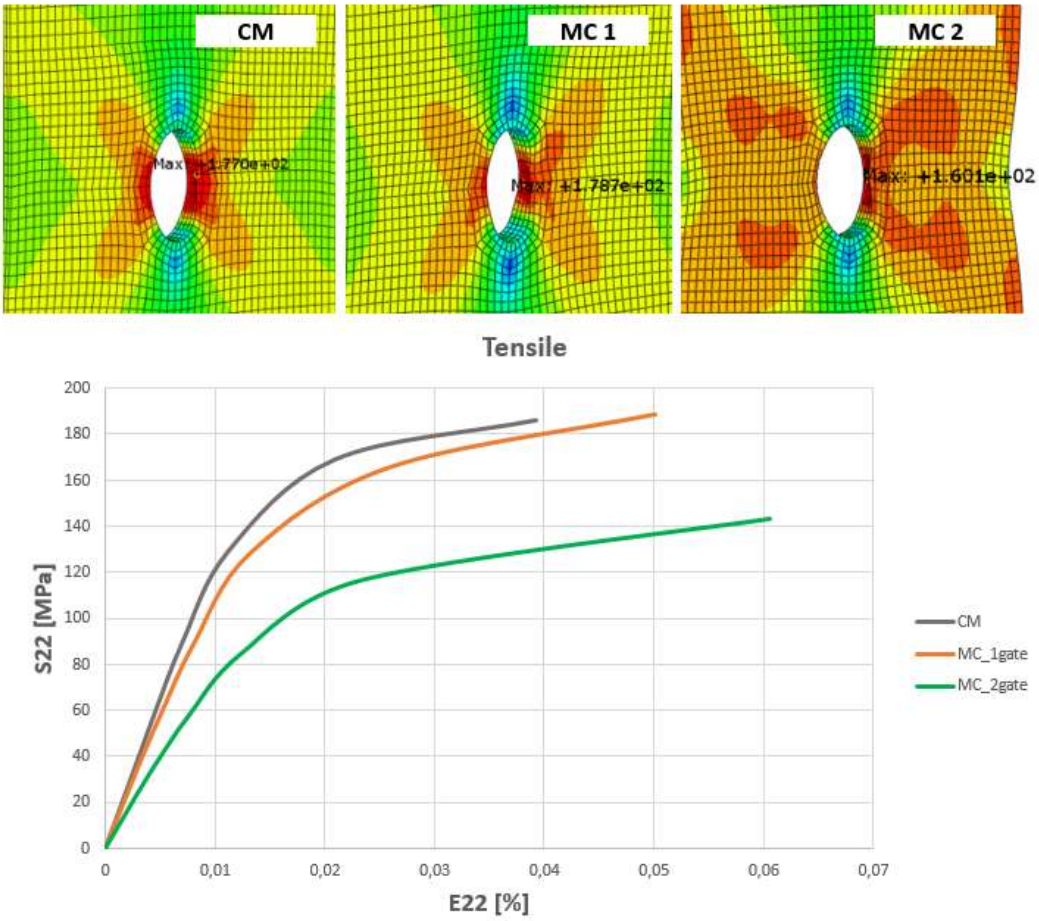
Çekme Analizi	Maks. Gerilme [MPa]	Maks. Yer Değiştirme [mm]
Geleneksel Model	177	1.478
1 Girişe Sahip Model	178.7	1.512
2 Girişe Sahip Model	160.1	1.825

Birleşme izi ve fiber yönelimi içeren modelin, tek enjeksiyon giriş noktasına sahip olduğunda, geleneksel modelle karşılaştırılabilir sonuçlar ürettiği gözlemlenebilir. İki

enjeksiyon girişine sahip modelde ise, diğer iki varyanta kıyasla en yüksek gerilme değerinde bir azalma ve en yüksek yer değiştirme değerinde bir artış gözlemlenmiştir. Parça üzerinde malzemelerin birleştiği yerler birleşme izi bölgeleriyle temsil edilir. Birleşme açısına bağlı olarak, birleşim bölgelerinde mekanik dayanımda bölgesel bir kayıp meydana gelir. Bu durum, çekme testi sırasında gerilme ve yer değiştirme tahminlerinin doğruluğunun, fiber yönelimi ve birleşim izi bilgileri eklendiğinde arttığını göstermektedir.

Geleneksel model ile kalıp akış simülasyonu eklenmiş modeller (1 giriş, 2 giriş) için en yüksek gerilme değerinin aynı elemanda elde edildiği, Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Bu karşılaştırma, fiber yönelimi ve birleşme izi bölgelerindeki farklılıklara rağmen, kritik gerilme bölgelerinin üç modelde de tutarlı kaldığını vurgulamaktadır.

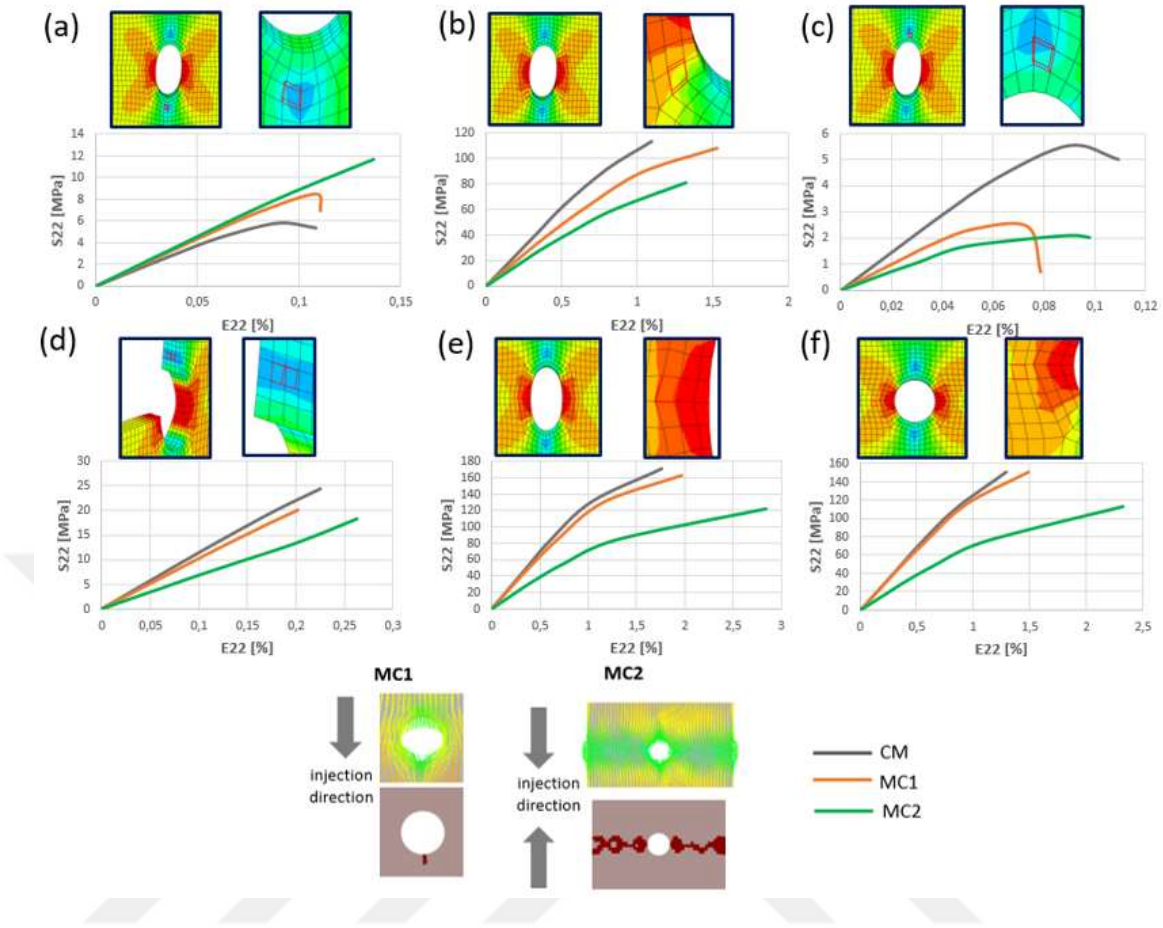
Analiz edilen numunelerin sonuçları dikkate alındığında; tek girişli eriyik malzeme enjeksiyonu sırasında, deliğin varlığı akışı değiştirerek deliğin arkasında doğrusal bir akış yerine açısal bir birleşmeye neden olur ve bir kaynak hattı yani birleşme izi oluşur. İki girişli modelde eriyik malzeme enjeksiyonunda ise eriyik malzemenin birleşmesi numunenin orta bölgesinde, deliğin yanlarında açısal bir birleşme meydana getirir ve bu bölgede bir kaynak hattı oluşturur. Bu durum, ergimiş malzeme birleşim bölgelerini, lif yönelimi ve birleşme izi açısından numunenin en kritik bölgeleri yapar. Bu nedenle, geleneksel model ile gerçek malzeme verilerini birleştiren iki model, lif yönelimi ve birleşme izi bölgelerindeki farklılıkları ve bunların gerilme ve yer değiştirme üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için yerel olarak, eleman bazında karşılaştırılmıştır. Malzeme birleşimlerinin bulunduğu altı farklı bölge incelenmiştir.



Şekil 4.17. Doğrusal olmayan çekme analizi sonuçlarının karşılaştırılması: maksimum gerilme bölgesi

Belirlenen 6 eleman için gerilme-gerinim grafikleri hazırlanmıştır. Şekil 4.18'de, hem geleneksel model hem de 1 girişe ve 2 girişe sahip modellerin simülasyonlarından elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla delik etrafındaki altı bölge seçilmiştir. Şekilde malzeme akış yönleri belirtilmiş olup, enjeksiyon giriş sayısına bağlı olarak eriyik birleşim bölgelerinin farklılık gösterdiği görülmektedir. Sonuç olarak, eriyik birleşim bölgelerine kıyasla, bu bölgelerdeki fiberler doğrusal şekilde yönlendirilememiş ve birleşme açısına bağlı olarak bir kaynak hattı oluşmuştur. Bu durum, bölgesel bazda elastisite modülündeki değişimle tanımlanabilir.

Tek enjeksiyon girişli model, çift enjeksiyon girişli model ve geleneksel model karşılaştırıldığında, dolum kaynaklı bölgesel farklılıkların olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18. Eleman bazında doğrusal olmayan çekme analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Geleneksel modelde, parçanın her bölgesi için homojen bir malzeme dağılımı varsayılarak tek bir elastisite modülü tanımlanmıştır. Ayrıca, tüm bölgelerde %40 fiber dağılımı olduğu ve bölgesel mukavemeti azaltan bir kaynak hattının bulunmadığı kabul edilmiştir. Ancak, Şekil 4.18'de görüldüğü gibi, üretim verilerinden elde edilen fiber dağılımı ve eriyik birleşim izleri, kritik bölgelerin değişebileceğini göstermektedir.

Enjeksiyon süreci sonucunda altı kritik alan belirlenmiştir. Burada, 1 enjeksyon girişli modelinin akış yönü birleşim izi ve fiber yönlenme dağılımı dikkate alındığında, (b), (e) ve (f) bölgelerinde geleneksel modele oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu üç bölgenin ortak özelliği, delik kenarlarında yer almaları ve bu bölgelerde akışın yönlenme kaybı olmadan ilerlemesi ve kaynak hattının oluşmamasıdır. 2 enjeksiyon girişine sahip modelin ise, delik kenarlarında yönlenme değişiklikleri olmuş ve bu

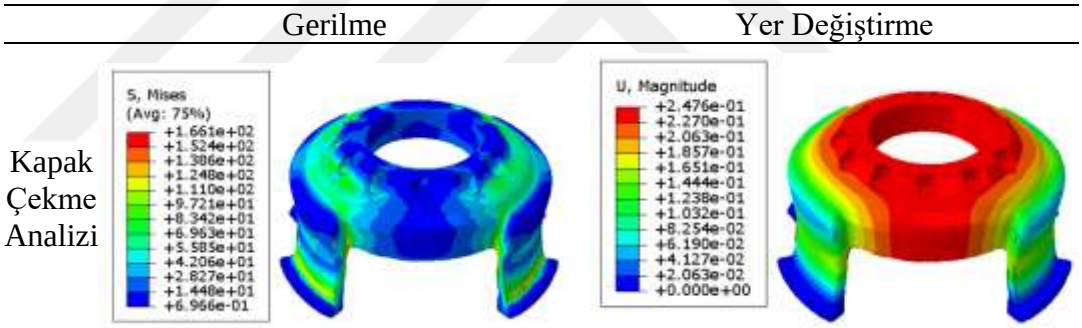
bölgeler, modelde kaynak hattı boyunca yer alan bölgeler haline gelmiştir. Bu nedenle, mukavemet açısından geleneksel model ve 1 girişli modele kıyasla daha zayıf bir performans sergilemektedir.

(a), (c) ve (d) bölgelerinde kaynak hattı olmamasına rağmen mekanik mukavemette bölgesel farklılıklar gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, enjeksiyon giriş sayısı ve konumunun, delik çevresindeki lif yönlenmesini ve yoğunluğunu değiştirmesidir.

4.4.2. Kapak parçasının mekanik dayanım testi analiz sonuçları

4.4.2.1. Geleneksel model analiz sonuçları

Şekil 4.19, geleneksel model simülasyon sonuçlarını temsil eden kapak kesiti üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımının kontur grafiklerini göstermektedir.

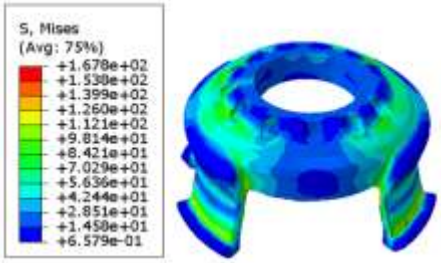
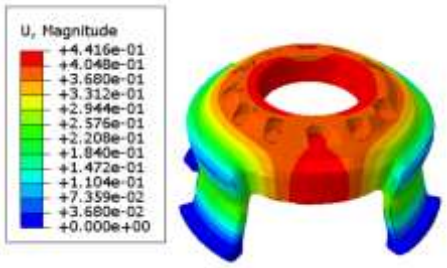
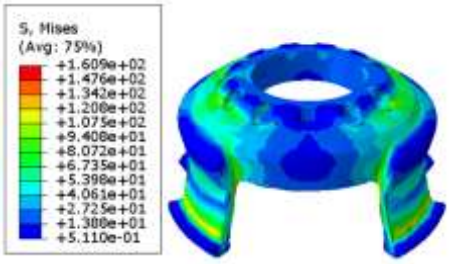
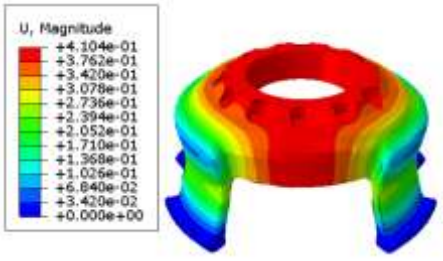
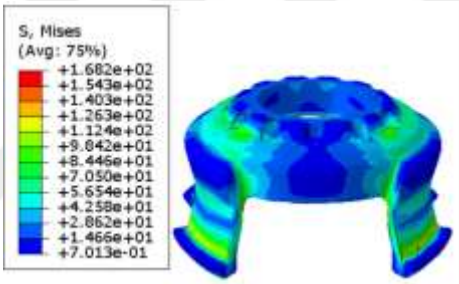
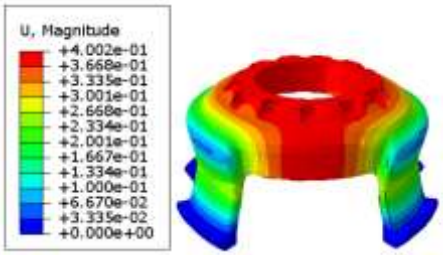
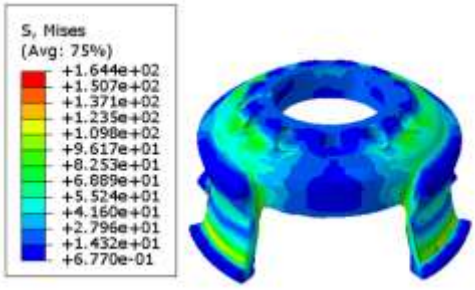
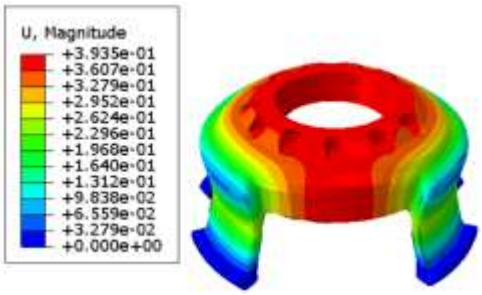


Şekil 4.19. Geleneksel model kapak parçası üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımının kontur grafikleri

Sonlu elemanlar analizi, Şekil 4.19'da gösterildiği gibi, maksimum 166.1 MPa gerilme değeri vermiştir. İlgili maksimum yer değiştirme ise 0.248 mm olarak belirlenmiştir.

4.4.2.1. Gerçek malzeme verisinin entegre edildiği model analiz sonuçları

Gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği model simülasyonundan elde edilen sonuçlar, Şekil 4.20'de gösterildiği gibidir. Kapak parçası üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımını içeren kontur grafiği olarak sunulmuştur.

	Gerilme	Yer Değiştieme
1 Giriş		
2 Giriş		
4 Giriş		
8 Giriş		

Şekil 4.20. Gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği kapak parçası modeli üzerindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımına ait kontur grafikleri

Şekilde gösterildiği gibi, sonlu elemanlar analizinden elde edilen 1 giriş için maksimum gerilme değeri 167,8 MPa olarak belirlenmiş, buna karşılık gelen maksimum yer değiştirme 0,442 mm olarak hesaplanmıştır. 2 giriş için maksimum gerilme değeri 160,9 MPa, buna karşılık gelen maksimum yer değiştirme ise 0,410 mm olarak belirlenmiştir.

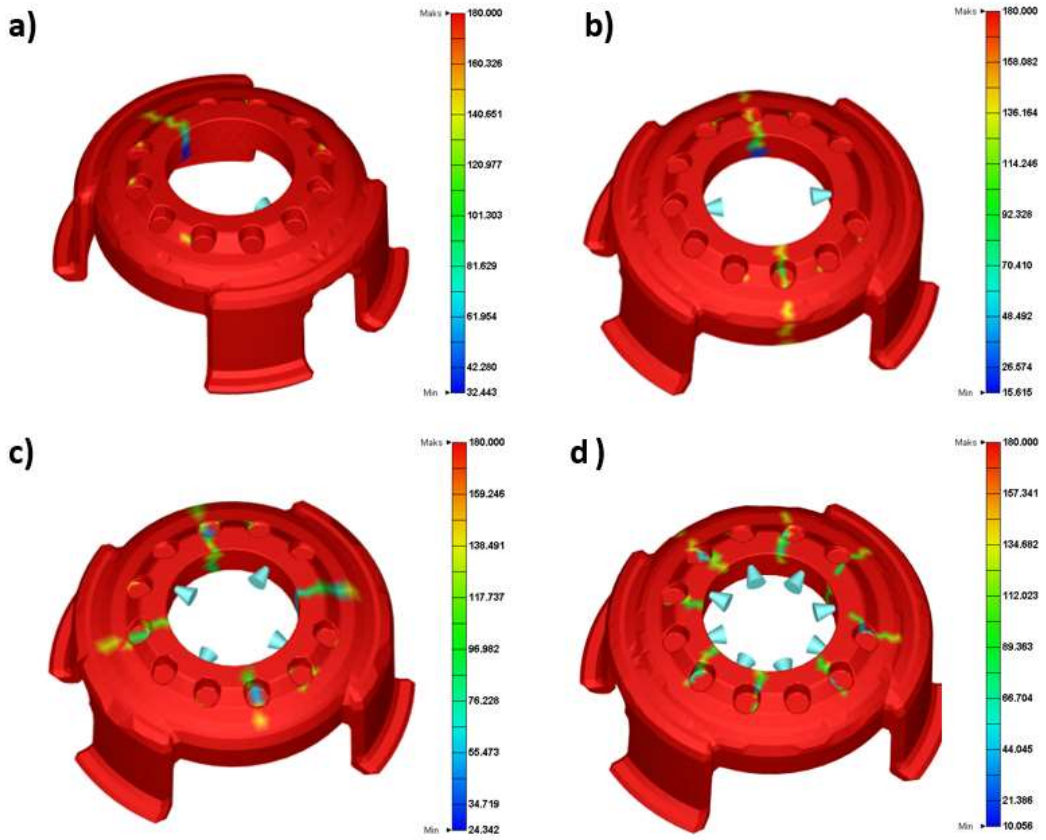
4 giriş için maksimum gerilme değeri 168,2 MPa, buna karşılık gelen maksimum yer değiştirme 0,400 mm olarak hesaplanmıştır. 8 giriş için ise maksimum gerilme değeri 164,4 MPa, buna karşılık gelen maksimum yer değiştirme 0,394 mm olarak tespit edilmiştir.

4.4.2.3. Analiz sonuçlarının karşılatırılması

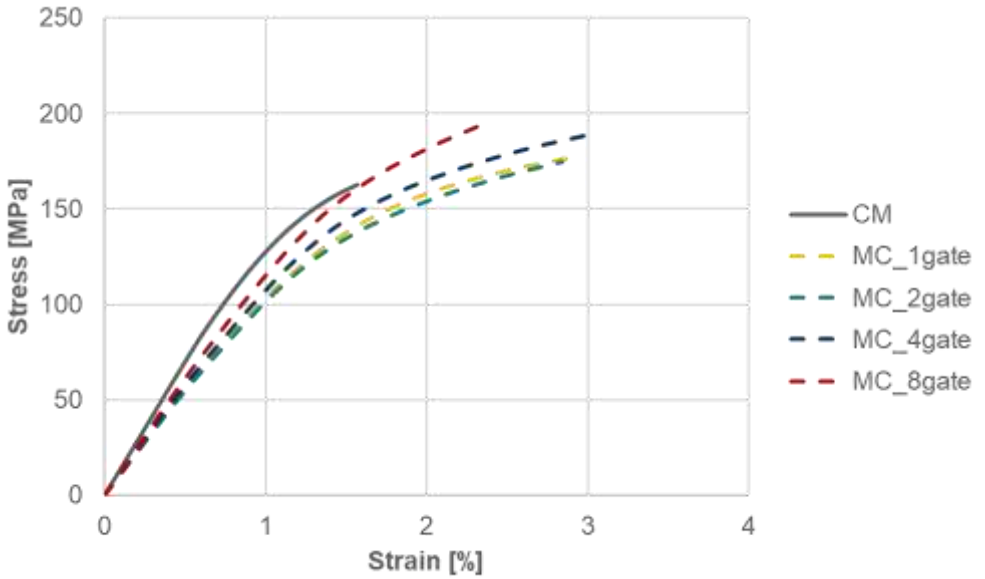
Kalıp akış analizi simülasyonlarından elde edilen kaynak hattı eriyik birleşme açıları Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Bu açı, eriyiklerin birleştiği noktadaki akış çizgilerinin oluşturduğu açıyı temsil etmektedir. Kaynak hattı oluştuğunda, bu bölgeler moleküller arası bağların tam olarak oluşmaması nedeniyle malzemenin geri kalanına kıyasla daha zayıf olabilir. Birleşme açıları 0 derece ile 135 derece arasında değişebilmektedir (Fellahi vd., 1995; Liu vd., 2020; Fathi ve Behravesh, 2008). Birleşme açısı ne kadar küçük olursa, birleşme de o kadar zayıf olur. Bunun sebebi, o bölgedeki moleküller arası bağların daha zayıf olmasıdır (Zhou ve Li, 2004; Xie vd., 2011).

1 girişe sahip modelin yaklaşık %35'inde birleşme açısı 50 derecenin altındadır. 2 girişe sahip modelin %25'inin birleşme açısının 50 derecenin altında olduğunu göstermektedir. 4 girişe sahip modelin %15-20'sinde birleşme açısı 50 derecenin altında, 8 girişe sahip modelin girişinin ise %10'unda birleşme açısı 50 derecenin altındadır.

Geleneksel model analiz sonuçları ile gerçek malzeme verisinin entegre edildiği model analiz sonuçlarını karşılaştıran grafik Şekil 4.22'de verilmiştir. Buradan incelebileceği üzere kaynak hattı bölge sayısının artmasına rağmen birleşme açısının etkisi açıkça görülmektedir. 8 enjeksiyon girişine sahip model, geleneksel modele en yakın sonucu vermiştir (Ding vd., 2013).



Şekil 4.21. Kaynak hattı birleşme açıları; a) 1 giriş, b) 2 giriş, c) 4 giriş, d) 8 giriş

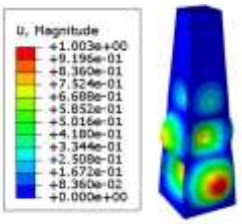
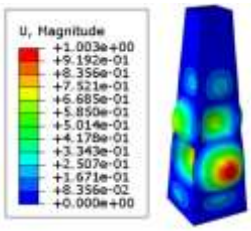
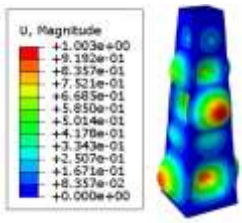


Şekil 4.22. Kapak parçası geleneksel model ve gerçek malzeme verisinin aktarıldığ modeller analiz sonuçları

4.5. İnce Duvarlı ve Değişken Kesitli Kolonlarda Farklı Dolum Yeri ve Sayısına Sahip Modellerin Burkulma ve Yük Taşıma Kapasitesi Analiz Sonuçları

4.5.1. Geleneksel model burkulma analiz sonucu

Şekil 4.23, kolonun burkulma modlarını göstermektedir ve bu, geleneksel model simülasyonunun sonuçlarını temsil etmektedir.

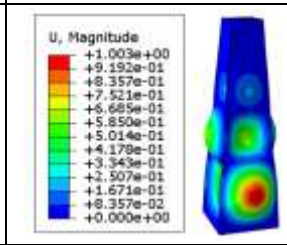
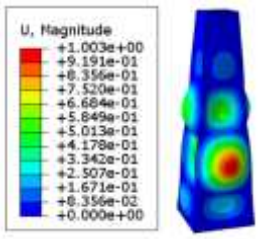
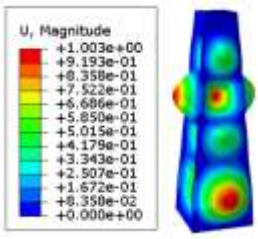
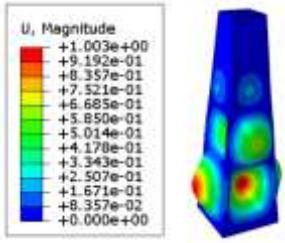
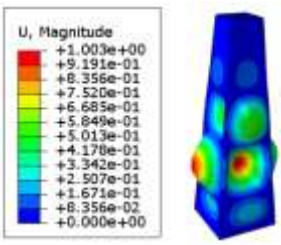
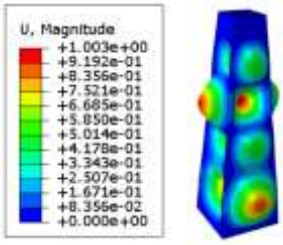
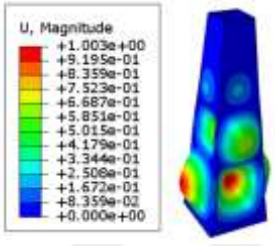
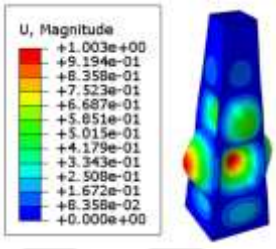
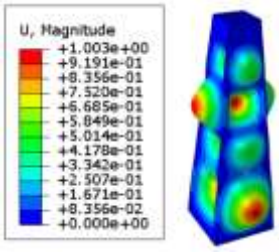
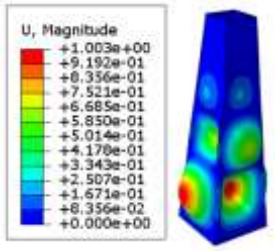
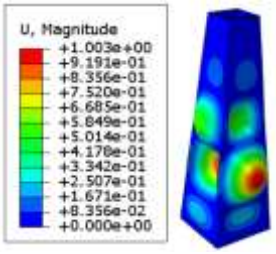
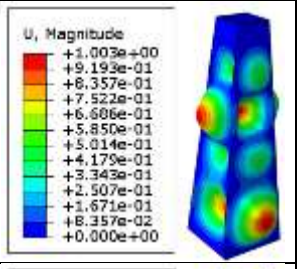
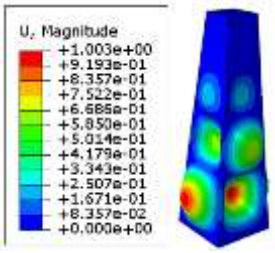
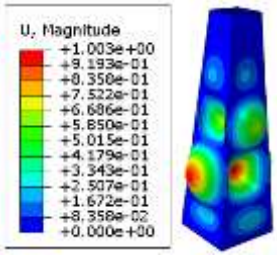
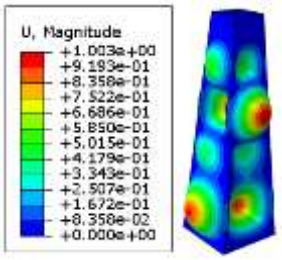
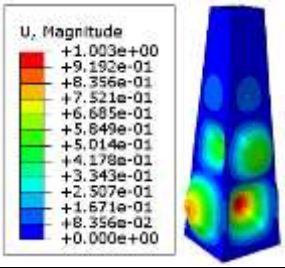
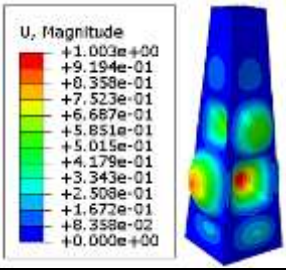
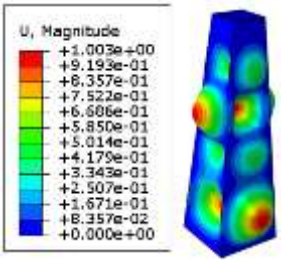
	Mod 1	Mod 2	Mod 3
Geleneksel Model			

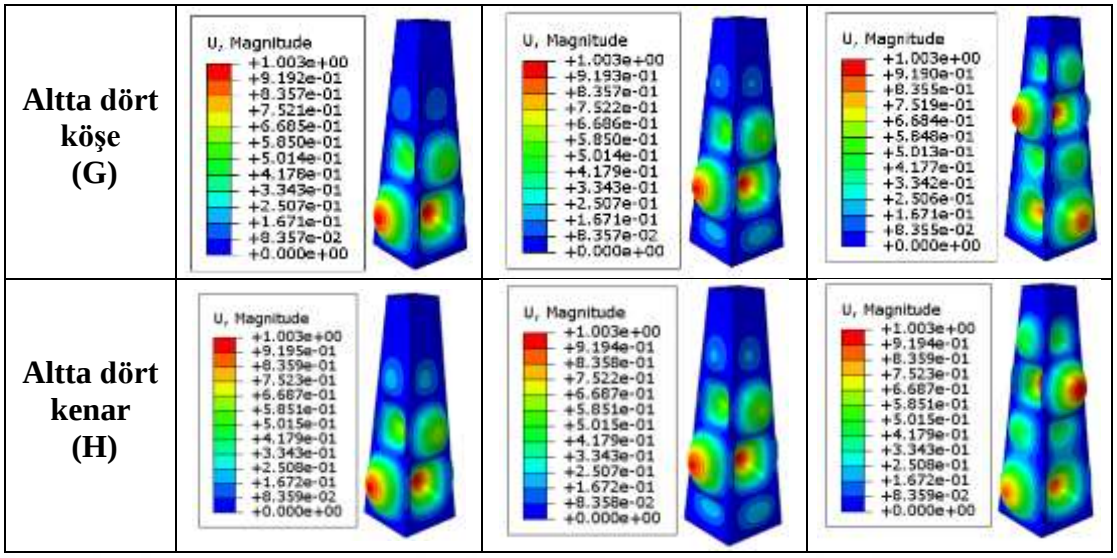
Şekil 4.23. Geleneksel model kolon burkulma analiz modları

Burkulma analizi, kritik burkulma yüklerini sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü modlarda 242 kN, 252 kN ve 295 kN olarak hesaplamıştır, Şekil 4.23'te gösterildiği gibidir.

4.5.2. Gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği model burkulma analiz sonuçları

DİGİMAT RP, geleneksel modelin yapısal ağ bilgisini, üretim ağını, kalıp akış simülasyonundan elde edilen fiber oryantasyonu ve birleşme izi verilerini ve DİGİMAT MX aracılığıyla seçilen PA6 GF40 malzeme verilerini aktarmak için kullanılmıştır. Kalıp akış simülasyon verileri, haritalama işlemi sırasında yapısal ağ ile entegre edilmiştir. Kolon için anizotropik malzeme verileri sonlu eleman modeline aktarılmış ve aynı sınır koşulları ve yükleme şartları altında burkulma analizi tekrarlanmıştır. Kalıp akış verilerinin entegre edildiği simülasyon sonuçları ile kolonun burkulma modları elde edilmiş olup, Şekil 4.24'te gösterilmektedir.

Dolum Tipi	Mod 1	Mod 2	Mod 3
Üstte iki köşe (A)			
Üstte iki kenar (B)			
Üstte dört köşe (C)			
Üstte dört kenar (D)			
Altta iki köşe (E)			
Altta iki kenar (F)			



Şekil 4.24. Gerçek malzeme veri modelinin entegre edildiği kolonun dolgu tipine göre burkulma modları

Çizelge 4.8'de görüldüğü üzere, burkulma analizinden elde edilen birinci, ikinci ve üçüncü kritik burkulma yükleri, enjeksiyon giriş konumu ve sayısına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kalıp akış verilerinin entegre edildiği ve "üstte iki köşe, üstte iki kenar, üstte dört köşe, üstte dört kenar, altta iki köşe, altta iki kenar, altta dört köşe ve altta dört kenar" olarak adlandırılan modellerde, birinci mod değerleri 144 - 150 kN arasında, ikinci mod değerleri 152 - 158 kN arasında ve üçüncü mod değerleri 182 - 186 kN arasında değişmektedir.

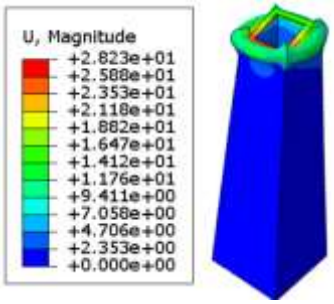
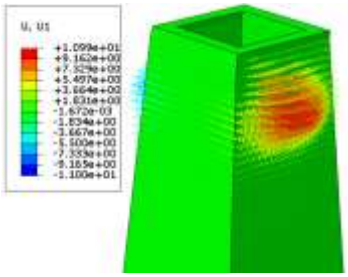
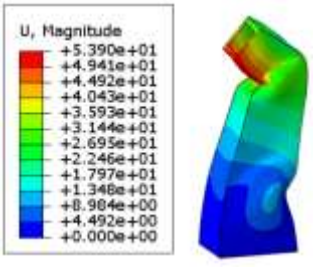
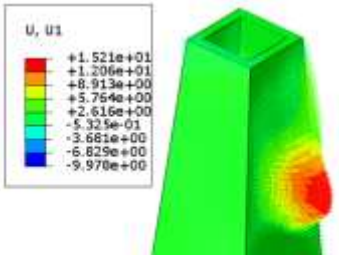
Çizelge 4.8. Kalıp akış verilerinin entegre edildiği modellerin birinci, ikinci ve üçüncü modlarındaki kritik burkulma yükleri

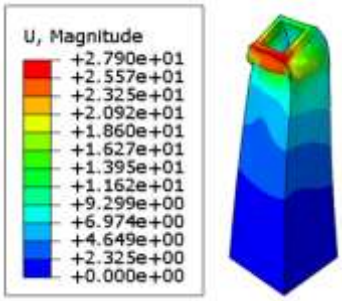
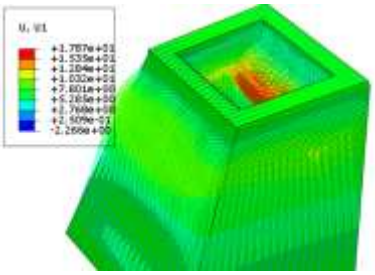
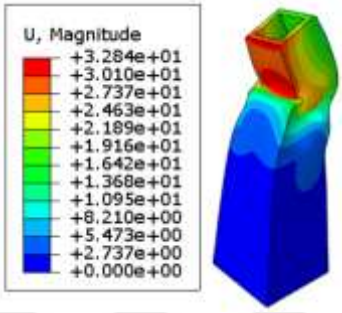
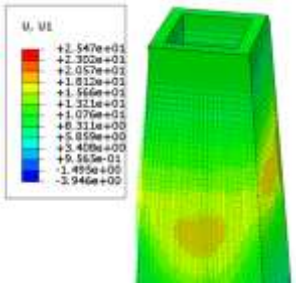
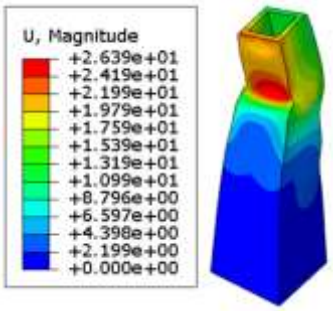
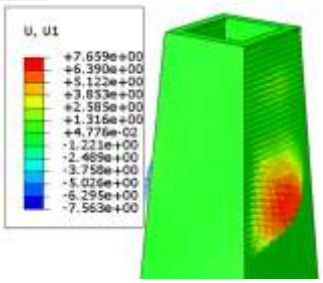
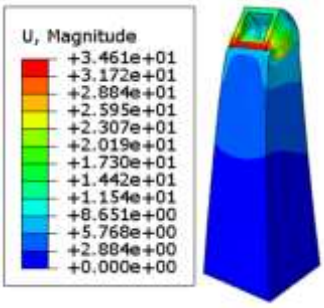
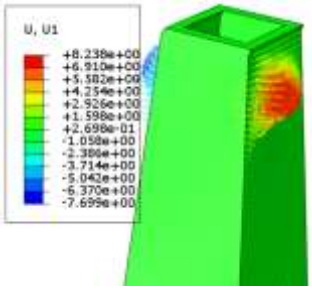
	Kritik Burkulma Yükü [N]		
Dolum Tipi	Mod 1	Mod 2	Mod 3
Üstte iki köşe (A)	144123	152691	182739
Üstte iki kenar (B)	143897	152510	182162
Üstte dört köşe (C)	144528	152739	182905

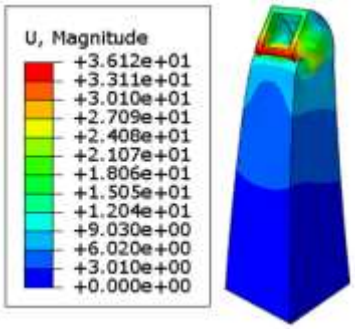
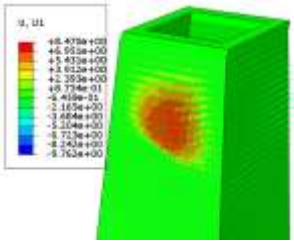
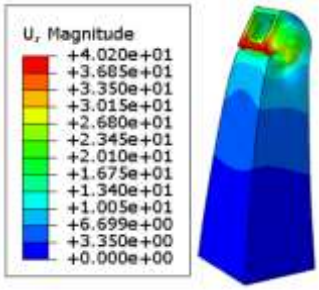
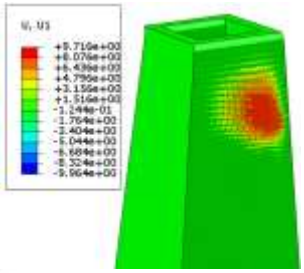
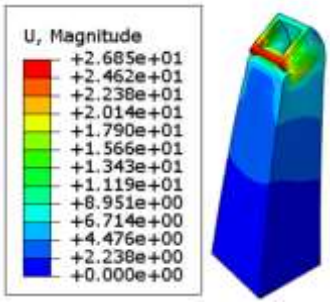
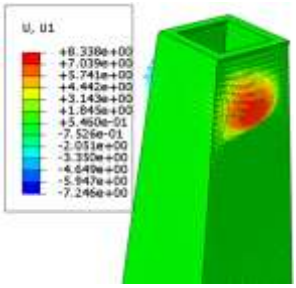
Üstte dört kenar (D)	144082	152598	182498
Altta iki köşe (E)	149559	157343	185115
Altta iki kenar (F)	145209	155314	179081
Altta dört köşe (G)	144746	155821	182897
Altta dört kenar (H)	148483	157301	185435

4.5.3. İnce duvarlı ve değişken kesitli kolonlarda yük taşıma kapasitesi analizi sonuçları

Kolonun yüklenmesi sırasında malzemenin hangi bölgelerinde plastik deformasyon meydana geldiği ve bu deformasyonların hangi noktalarda gerçekleştiği karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu sonuçlara ilişkin karşılaştırma, Şekil 4.25'te sunulmuştur.

	Plastik deformasyon bölgesi	
Geleneksel Model		
Üstte iki köşe (A)		

Üstte iki kenar (B)		
Üstte dört köşe (C)		
Üstte dört kenar (D)		
Altta iki köşe (E)		

Altta iki kenar (F)		
Altta dört köşe (G)		
Altta dört kenar (H)		

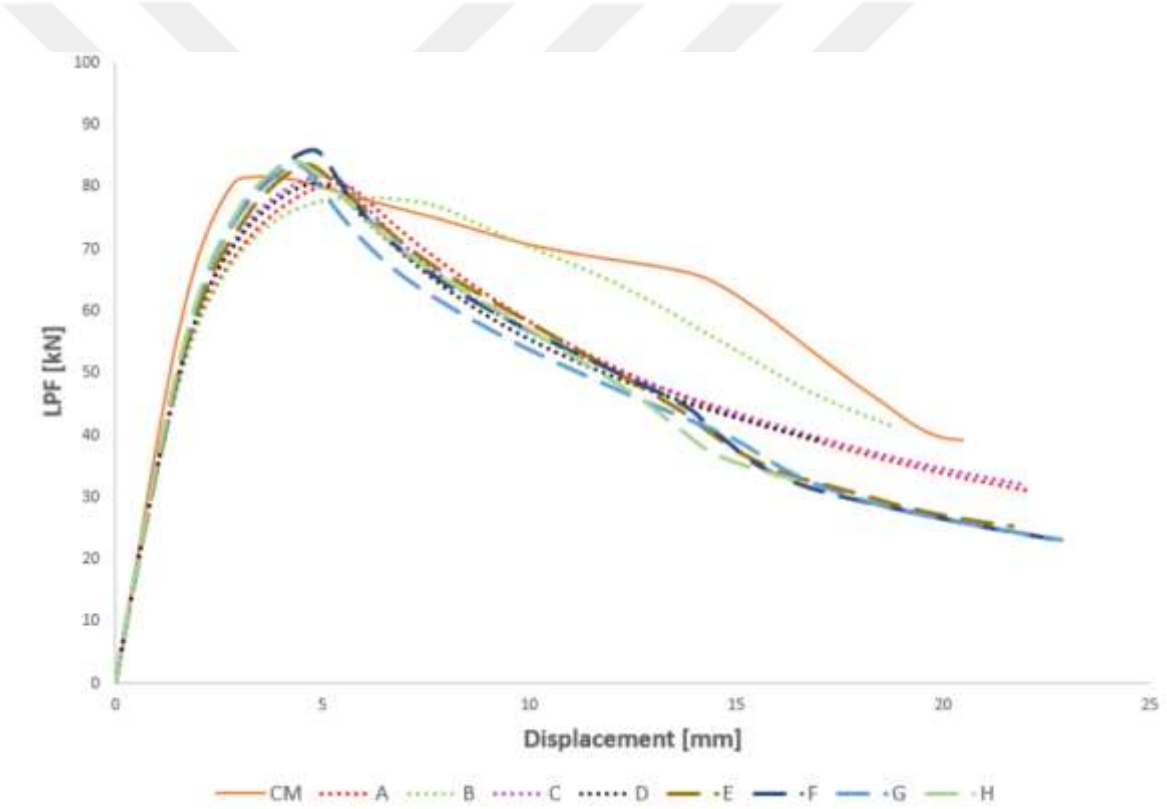
Şekil 4.25. Geleneksel model ve kalıp akış verilerinin entegre edildiği modellerde plastik deformasyon bölgeleri

Yük Orantı Faktörü (LPF) ve yer değiştirme (U) grafikleri, özellikle doğrusal olmayan analizlerde, bir yapının yük taşıma kapasitesini ve davranışını anlamak için kritik araçlardır (Chai vd., 2023; Xia vd., 2024; Zhang vd., 2024). LPF, uygulanan yükün bir referans yük seviyesine göre orantılı bir ölçüsünü temsil eder. LPF'nin tepe noktası, yapının maksimum yük taşıma kapasitesini gösterir; bu noktanın ötesinde yapı genellikle burkulma veya hasar gibi kararlılık kayıpları yaşar.

Gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği modellerde, maksimum yük taşıma kapasitesine, geleneksel modellere kıyasla daha yüksek yer değiştirme değerlerinde

ulaşıldığı görülmüştür. Bu durum, gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği modellerin daha düşük deformasyon direncine sahip olduğunu göstermektedir.

Üstten ve alttan doldurulan modeller karşılaştırıldığında, alttan doldurulan modellerde fiber yoğunluğunun üst bölgeye doğru arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, daralan üst kesimdeki kritik burkulma bölgesinin güçlenmesine yol açarak, alttan doldurulan modellerde üstten doldurulanlara kıyasla daha yüksek maksimum yük taşıma kapasitesinin elde edilmesini sağlamaktadır. Yük orantı faktörü (LPF) ve yer değiştirme (U) grafikleri elde edilmiş ve gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği model, geleneksel modelle karşılaştırılarak Şekil 4.26'da sunulmuştur.

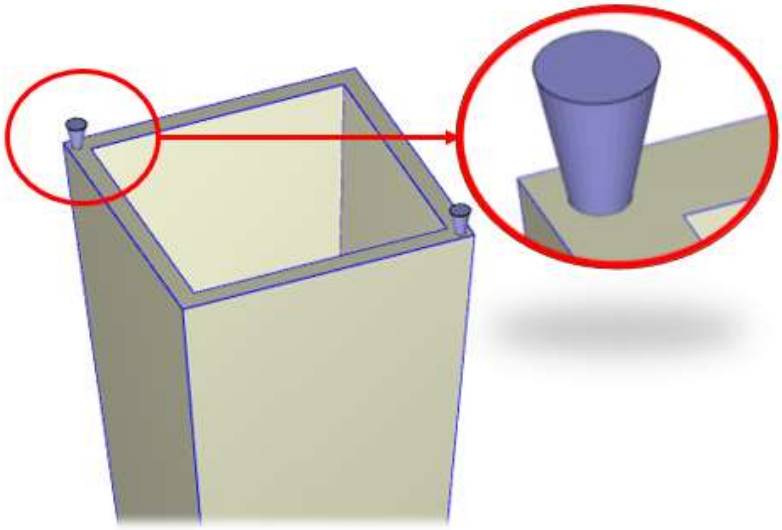


Şekil 4.26. Geleneksel ve gerçek malzeme verilerine sahip modellerin (A, B, C, D, E, F, G, H) yük orantı faktörü (LPF) ve yer değiştirme (U) grafikleri

4.5.2.1. Enjeksiyon girişi parmetre analizi

Alttan doldurulmuş modeller üzerinde yapılan analizler sonucunda daha yüksek bir yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir. Bu nedenle, 2 mm eriyik enjeksiyon giriş genişliği

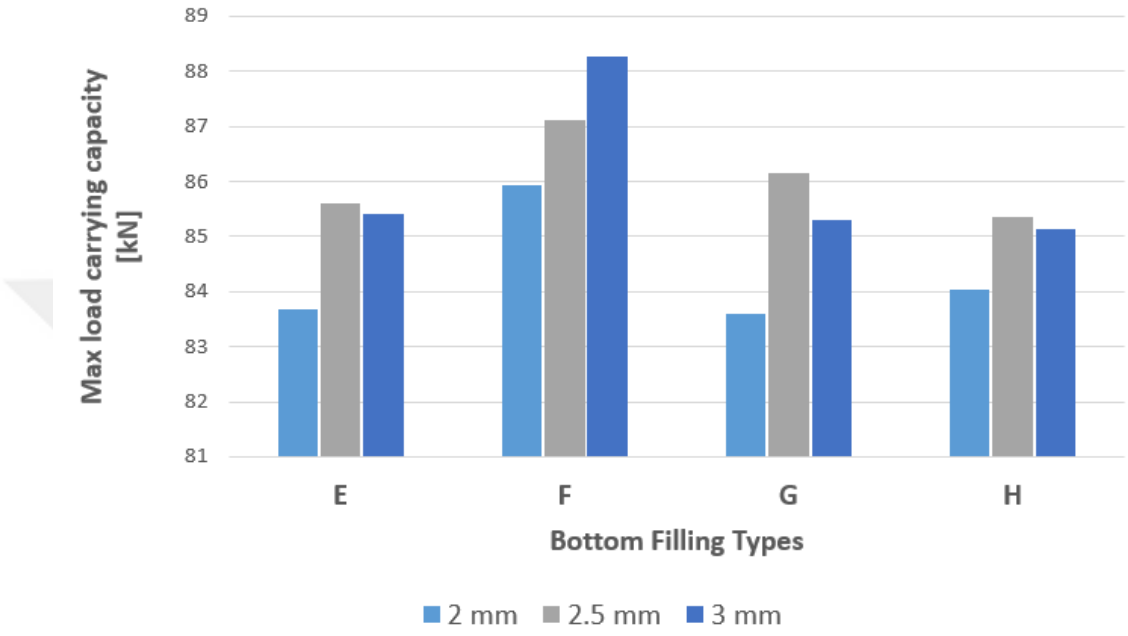
modeline ek olarak, 2.5 mm ve 3 mm eriyik enjeksiyon giriş genişliğine sahip modeller için dolum analizleri tekrar edilmiştir. Burada belirtilen değerler, eriyik giriş bölgesinin çapını temsil etmektedir. Bu durum, Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. Eriyik enjeksiyon girişinin temsili gösterimi

Şekil 4.28'de görüldüğü gibi, kapak çapındaki değişikliğe bağlı olarak kolonun yük taşıma kapasitesindeki değişim, sonlu elemanlar analizi yapılarak gösterilmiştir. 4 mm duvar kalınlığına sahip ince duvarlı, değişken kesitli bir kolon için PA6 GF40 malzemesinin enjeksiyon kalıplama sürecinde, 2 mm, 2.5 mm ve 3 mm eriyik girişi çaplarıyla gözlemlenen performans farkları, akışkanlık, basınç düşüşü ve elyaf oryantasyonu arasındaki dengeyle açıklanabilir. 2.5 mm giriş çapı, basınç düşüşü ve akış birliği arasındaki dengeyi optimize ettiği için en iyi performansı sağlar. Bu çap, uygun dolumu sağlarken, kesme etkilerini sınırlayarak elyaf oryantasyonunu korur ve malzemenin mekanik özelliklerini artırır. Buna karşın, 2 mm giriş çapı aşırı kesmeye ve önemli bir basınç düşüşüne yol açar, bu da akış hatalarına ve mekanik performans düşüşüne neden olur. Öte yandan, 3 mm giriş çapı basınç düşüşünü azaltırken, artan akış hızı, türbülans yaratabilir ve elyaf oryantasyonunu bozarak potansiyel hatalara yol açabilir.

Elyaf oryantasyonu ve kesme koşullarına oldukça duyarlı bir malzeme olan PA6 GF40 için, giriş çapı optimizasyonu kritik bir öneme sahiptir. Bu durumda, 2.5 mm kapak çapı, hem malzeme hem de parça geometrisinin gereksinimlerini karşılayan en uygun sonucu sağlar.



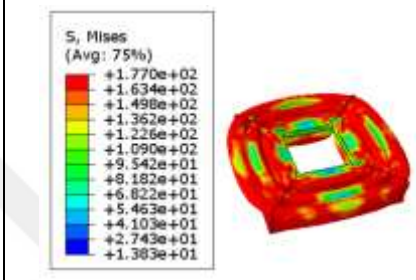
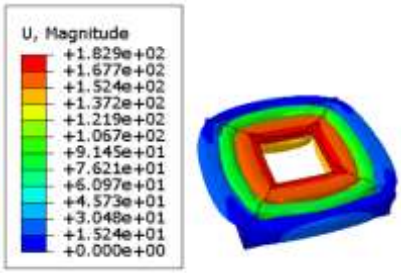
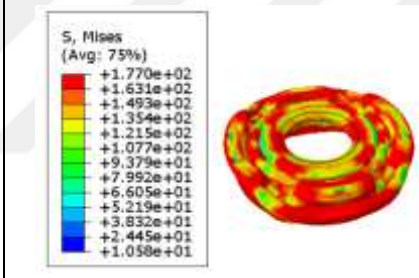
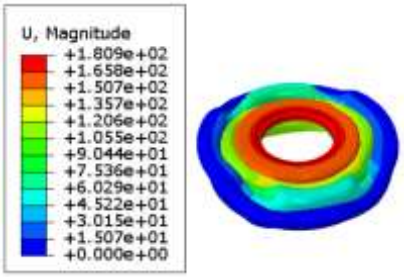
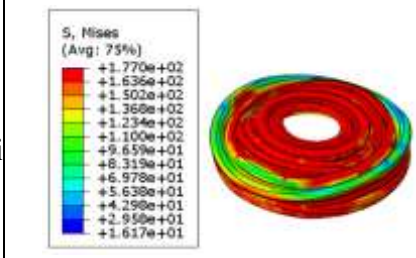
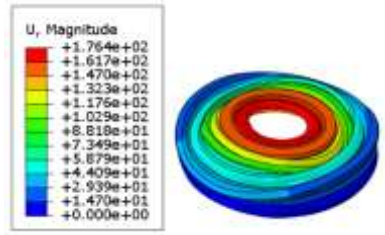
Şekil 4.28. Alttan dolum tipinde eriyik giriş çapının bölgesel parametre analizi ile maksimum yük taşıma kapasitesinin değişimi

4.6. Farklı Dolum Yeri ve Sayısına Sahip Modellerin Çarpışma Kutusu (Crash-Box) Analiz Sonuçları

4.6.1. Geleneksel model çarpışma kutusu analiz sonucu

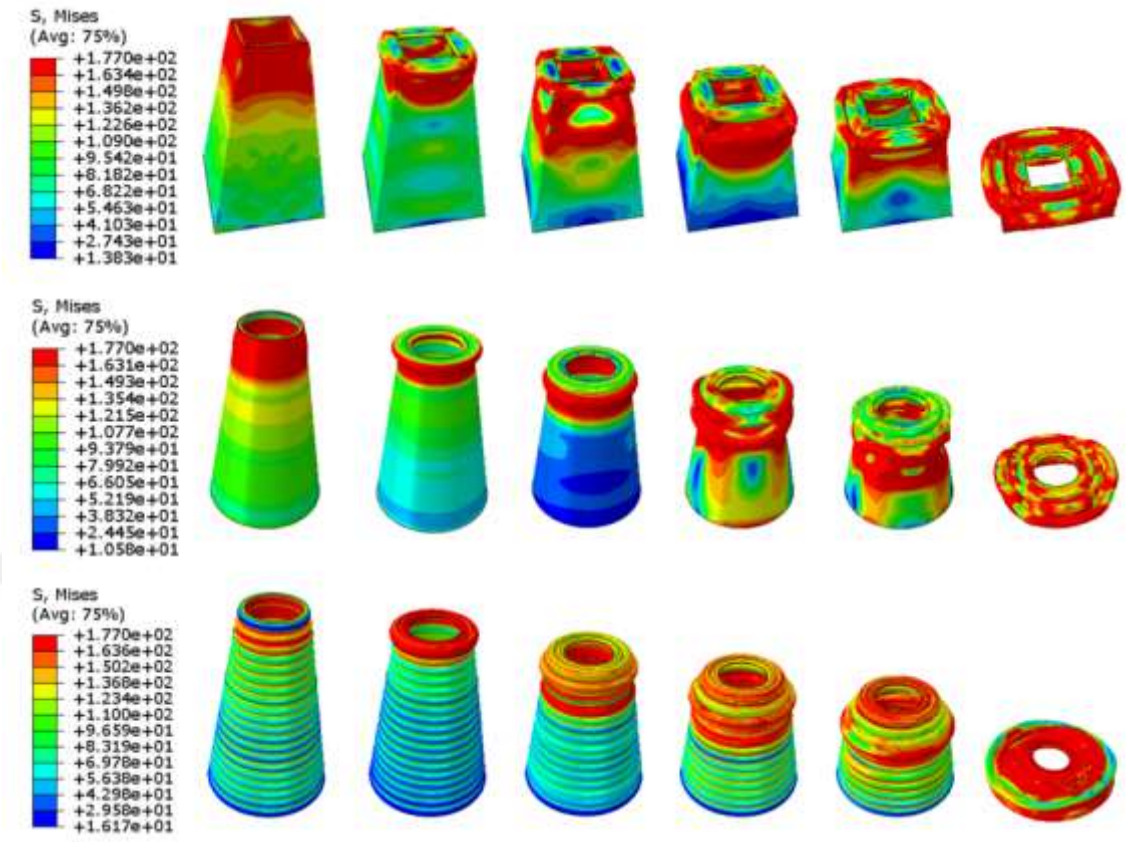
Gerilme dağılımı incelendiğinde, kare kesitli geometride maksimum gerilmesinin 177 MPa civarında olduğu ve köşe bölgelerinde gerilme yığılmalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, keskin geometrik geçişler nedeniyle kırılma riskini artırabilir. Maksimum yer değiştirme ise yaklaşık 183 mm olarak belirlenmiştir. Gerilme dağılımı kare kesite kıyasla daire kesitlide daha homojen olup, maksimum gerilme 177 MPa seviyesindedir. Dairesel yapının, gerilme yığılmasını azaltarak çarpışma enerjisini daha dengeli dağıttığı görülmüştür. Maksimum yer değiştirme 181

mm civarındadır. Ondüle Kesitte ise gerilme seviyesi diğer kesitlerle benzer şekilde 177 MPa olmakla birlikte, ondüleli yapı sayesinde gerilme farklı bölgelere yayılmıştır. Bu durum, enerjinin daha verimli absorbe edilmesini sağlamaktadır. Maksimum yer değiştirme ise 181 mm olarak ölçülmüştür. Ancak, deformasyonun daha fazla bölgeye yayıldığı ve kutunun enerji sönümleme kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.29).

	Gerilme	**Yer Değiştirme**
Kare Kesitli		
Daire Kesitli		
Ondüle Kesitli		

Şekil 4.29. Geleneksel modelde çapışma kutuları analizlerinde gerilme ve yer değiştirme dağılımına ait kontur grafikleri

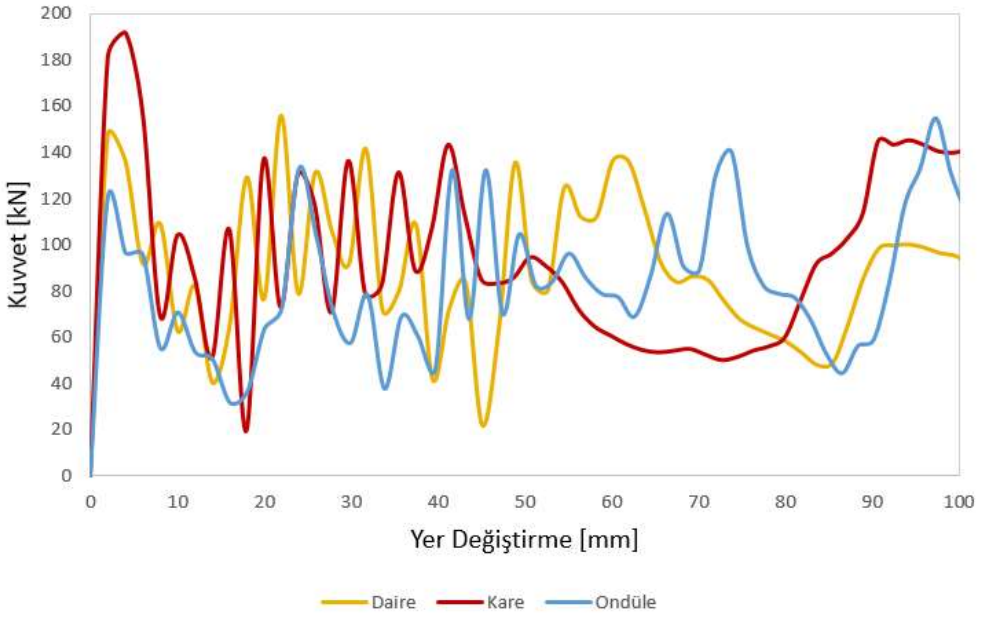
Şekil 4.30 geleneksel modelin çarpışma analizi sonucunda çarpışma kutusunun, sırasıyla 5, 25, 50, 100 mm yer değiştirme ve nihai konum için gerilme-gerinim evrimini üç geometri karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



Şekil 4.30. 5, 25, 50, 100 mm yer değiştirme ve nihai konum için gerilme-gerinim evrimi

Şekil 4.31 üzerinde incelenen kuvvet-yer değiştirme grafiği, çarpışma kutularının farklı geometrik kesitlere sahip olması nedeniyle belirgin dalgalanmalar içermektedir. Bu dalgalanmalar, malzemenin plastik deformasyonu sırasında oluşan burkulma ve katlanma mekanizmalarına bağlı olarak gelişmektedir. Kare kesitli yapı, başlangıçta yüksek bir kuvvet seviyesine ulaştıktan sonra daha dengeli bir plato bölgesi sergilemekte olup, kontrollü bir katlanma mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. Dairesel ve ondüle kesitler ise daha değişken bir kuvvet yanıtı sunmakta ve yüksek frekanslı dalgalanmalar içermektedir; bu durum, ani stabilite kayıpları ve burkulma modlarının düzensizliğine işaret etmektedir. Literatürde de benzer kuvvet-yer değiştirme grafiklerinde gözlemlenen dalgalanmaların, çarpışma sırasında kesit geometrisi, malzeme içindeki boşluklar ve temas koşullarına bağlı olduğu belirtilmektedir (Wang C., vd., 2018; Hou vd., 2023; De Biasio, 2025; Xing vd.,

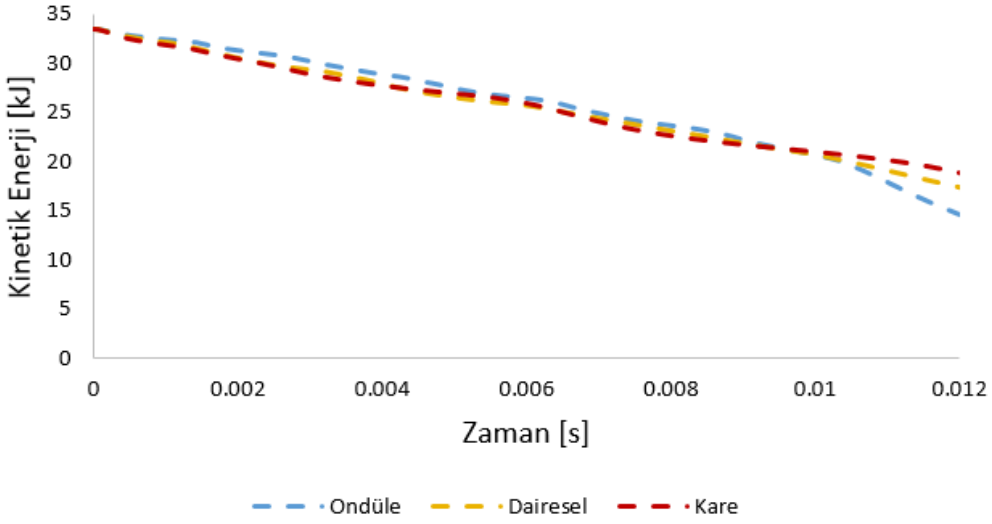
2025; Astuti vd., 2025). Dolayısıyla, elde edilen grafik, çarpışma kutularının enerji emme mekanizmalarının kesit şekline bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.



Şekil 4.31. Kare, dairesel ve ondüle kesitler için kuvvet- yer değiştirme grafiği

Şekil 4.32'deki grafik, zaman ile kinetik enerji arasındaki ilişkiyi göstermekte olup, farklı geometri türlerinin (Ondüle, Dairesel, Kare) çarpışma sırasında kinetik enerjiyi nasıl kaybettiğini karşılaştırmaktadır.

Tüm geometriler, çarpışmanın başlangıcında yaklaşık 35 kJ'luk bir kinetik enerjiyle başlamakta olup, bu da modellerin başlangıç koşullarının (örneğin hız) aynı olduğunu göstermektedir. Çarpışma boyunca, kinetik enerji tüm modellerde düzenli olarak azalmaktadır. Bu, kinetik enerjinin çarpışma sırasında deformasyon ve enerji emilimiyle başka enerji türlerine (örneğin plastik deformasyon enerjisi) dönüştüğünü göstermektedir. Zaman aralığı yaklaşık 0.013 saniyede, geometrilerin kinetik enerjisi neredeyse sıfıra yaklaşmaktadır. Bu, çarpışma sırasında kinetik enerjinin tamamen absorbe edildiğini ve hareketin sona erdiğini göstermektedir.

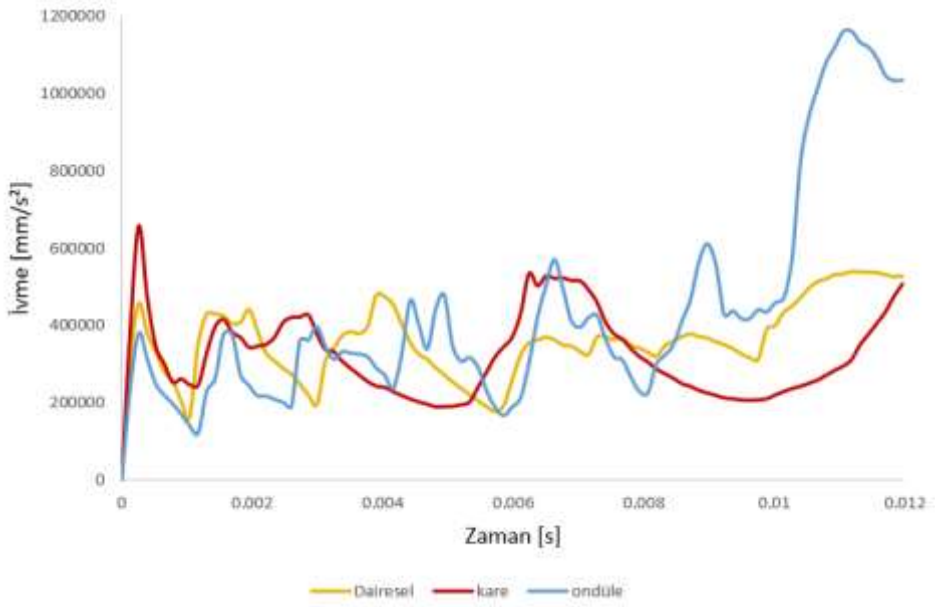


Şekil 4.32. Kare, dairesel ve ondüle kesitler için kinetik enerji zaman grafiği

Ondüle geometrisi, kinetik enerjiyi diğer geometrilere göre biraz daha erken kaybetmeye başlamaktadır. Bu, ondüle geometrisinin daha hızlı bir deformasyon süreci yaşadığını ve enerjiyi daha erken absorbe ettiğini göstermektedir. Dairesel ve Kare geometrileri ise enerji kaybı açısından çok benzer bir performans sergilemektedir. Ondüle geometrisi, zamanın sonlarına doğru (0.012-0.013 saniye arasında) kinetik enerjiyi tamamen kaybederken, diğer iki geometri biraz daha gecikmeli olarak sıfıra ulaşmaktadır. Bu, ondüle geometrisinin çarpışma sırasında daha yüksek bir enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olabileceğini düşündürmektedir.

Şekil 4.33'deki ivme-zaman grafiği, üç farklı kesit geometrisinin çarpışma sırasında ivme değişimlerini karşılaştırmaktadır. Ondüle kesit, başlangıçta yüksek ivme piklerinden birini göstererek çarpışma anında ani bir tepki verdiğini ortaya koymaktadır. Takip eden süreçte, ivme seviyesinde belirgin dalgalanmalar gözlemlenmekte olup, bu durum yapının düzensiz bir deformasyon sürecine maruz kaldığını ve stabil olmayan bir burkulma mekanizması geliştirdiğini göstermektedir (Rostro-González vd., 2024). Özellikle 0.01 saniyeden sonra ivmenin tekrar keskin bir şekilde artması, yapının tamamen çöktüğü veya ani bir rijitlik artışı yaşadığı bir noktayı işaret edebilir. Kare kesit ise başlangıçta yüksek bir ivme tepkisi vermekle birlikte ondüle kesite kıyasla daha kontrollü bir dalgalanma yapısına sahiptir. Yaklaşık 0.002 saniyeden itibaren ivme

seviyesinin nispeten daha düzenli bir seyir izlediği görülmektedir. Kare kesitli yapıların daha rijit olması nedeniyle burkulma mekanizmalarının daha öngörülebilir olduğu ve dolayısıyla ivme değişimlerinin daha az kaotik gerçekleştiği söylenebilir. Dairesel kesit ise diğer kesitlere kıyasla daha düşük ve dengeli bir ivme başlangıcı göstermekte, çarpışma süreci boyunca daha az dalgalanma sergileyerek kontrollü bir deformasyon mekanizması oluşturduğu izlenimini vermektedir. Bu bulgular, dairesel kesitin daha homojen bir deformasyon mekanizmasına sahip olduğunu ve çarpışma sırasında daha az ani burkulma yaşadığını düşündürmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, ondüle kesit en fazla ivme dalgalanmasını ve en düzensiz deformasyon sürecini sergileyerek yüksek frekanslı dalgalanmalar nedeniyle ani stabilite kayıplarına yol açmaktadır. Kare kesit, yüksek rijitliği sebebiyle başlangıçta büyük ivmelere maruz kalmasına rağmen daha stabil bir davranış göstermektedir. Dairesel kesit ise en düşük ve en dengeli ivme değişimini sunarak çarpışma sürecinde daha iyi bir stabilite sağlamaktadır. Grafik çarpışma kutularının ivme stabilitesi açısından değerlendirilmesi gerektiğini ve kesit geometrisinin bu stabiliteyi önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle ondüle kesitin yüksek ivme dalgalanmaları nedeniyle çarpışma sırasında istenmeyen stabilite problemlerine yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 4.33. Kare, dairesel ve ondüle kesitler için ivme zaman grafiği

Yapılan analizler, çarpışma kutularının kesit geometrisinin kuvvet-yer değiştirme davranışı, kinetik enerji kaybı ve ivme dalgalanmaları üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Dairesel kesit, daha homojen bir deformasyon mekanizması sağlayarak stabil bir enerji emilimi sunarken, kare kesit kontrollü bir katlanma mekanizması ile öngörülebilir bir davranış sergilemiştir. Ondüle kesit ise enerjiyi daha geniş bir alana yayarak yüksek enerji absorpsiyon kapasitesi göstermiş, ancak yüksek frekanslı dalgalanmalar ve ani stabilite kayıpları nedeniyle yapısal bütünlük açısından belirli riskler barındırmıştır. Elde edilen bulgular, çarpışma performansının artırılması açısından kesit geometrisinin dikkatle seçilmesi gerektiğini ve her kesitin farklı avantajlar sunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, kesit geometrisi kritik bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, ilk olarak kısa ve sürekli fiber takviyeli kompozitlerin homojenizasyonu üzerinde durulmuştur. DİGİMAT programının homojenizasyon konusundaki teorik altyapısı detaylı bir şekilde incelenmiş ve deneyimlenmiştir. Ardından geliştirilen yapay zeka algoritmaları ile her iki durum için makroskobik özellikler yüksek bir doğrulukla tahmin edilmiştir.

Sistematik hesaplama modelinin uygulanması ile ilgili olarak ilk çalışma; açık delikli bir numune üzerinde gerilme analizi yapılmıştır. Geleneksel modelin sonuçları, gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği model ile karşılaştırılmış ve enjeksiyon akış yönüne odaklanılmıştır. Malzeme akışı bir engelle karşılaştığında, delik çevresindeki fiber yönelimi ve dağılımı değişir.

- Açık delikli gerilme test numuneleri, önerilen kapsamlı yaklaşımın doğruluğunu test etmek için hem geleneksel model hem de gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği model simüle edilmiştir. Geleneksel model, homojen malzeme dağılımı ve mükemmel yönelim varsayar. Gerçek malzeme verileri, fiber yönelimi ve dağılımının homojen olmadığını, özellikle küçük ve karmaşık geometrilerde ve delikler ile oyuklar gibi doldurulması zor alanlarda değiştiğini gösterir. Geleneksel model, tek bir elastisite modülü ve Poisson oranı kullanarak test sonuçlarından sapmalara yol açar. Gerçek malzeme verilerinin simülasyona aktarılması, fiziksel test sonuçları ile uyumu artırır.
- Daha sonra, braket testleri yapılmış ve hem geleneksel model hem de gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği model simüle edilmiştir, böylece önerilen kapsamlı yaklaşımın doğruluğu ve güvenilirliği doğrulanmıştır. Geleneksel model, parçanın test sonuçları ve gerçek malzeme verileriyle yapılan model ile karşılaştırılmıştır. Geleneksel model, homojen dağılım ve mükemmel yönelim varsayar. Gerçek malzeme verileri modeli, plastik enjeksiyon sürecine dayalı olarak heterojen fiber yönelimi ve dağılımını dikkate alır. Sonuçlar, gerçek malzeme verilerini içeren modelin test sonuçları ile yakından örtüştüğünü göstermiştir.

İkinci olarak, açık delikli numune üzerinde doğrusal olmayan çekme testi analizi yapılmıştır. Fiber oryantasyonu ve kaynak hattı verilerinin entegrasyonu, sonlu elemanlar analizi (FEA) modellerinin doğruluğunu önemli ölçüde artırarak, parçaların performans tahminlerinin iyileştirilmesine yol açmaktadır. Bu analizler, doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel modelin sonuçları, gerçek malzeme verilerinin enjeksiyon akış yönlerine odaklandığı ve oluşan kaynak hattının buna göre aktarıldığı modelle karşılaştırılmıştır. Kaynak hattı bölgesi, enjeksiyon girişinin yeri ve sayısına bağlı olarak değişir.

- Uygulanan kapsamlı yaklaşımı doğrulamak amacıyla, açık delikli çekme test numunesi geleneksel model ve gerçek malzeme verilerinin aktarıldığı modeller kullanılarak simüle edilmiştir. Geleneksel model, homojen malzeme dağılımı ve mükemmel oryantasyonu varsayar. Gerçek malzeme verileri ise fiber oryantasyonu ve kaynak hattı bölgelerinin dağılımını içerir. Kaynak hattı bölgeleri, farklı akış hatlarının birleştiği yerlerde meydana gelir ve bu bölgeler genellikle mekanik olarak zayıf noktalardır. Bunun nedeni, bu bölgelerde moleküler bağların tam olarak oluşmamasıdır.
- Daha sonra, Kapak parçası analizleri, geleneksel model ve gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği modeller kullanılarak kapsamlı yaklaşımın uygulanması ile yapılmıştır. Geleneksel model analizi, enjeksiyon girişinin sayısına bağlı olarak kaynak hattı etkisiyle gerçek malzeme verileri ile karşılaştırılmıştır. Geleneksel model, parçanın homojen dağılımı ve kaynak hattı bölgesi olmadığı varsayar. Gerçek malzeme verileri modeli, plastik enjeksiyon sürecine dayalı olarak heterojen elyaf oryantasyonunu, giriş sayısı ve konumuna göre eriyik bağ açılarının değişimini ve moleküler bağların oluşumuna göre mekanik performans üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, kaynak hattı bölgesinin derinliği ve bağ açılarının dikkate alınması durumunda, giriş sayısının parça mekanik performansı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Üçüncü olarak, PA6-GF40 malzemesinden üretilmiş ince duvarlı, değişken kesitli kolonların burkulma davranışını incelemekte olup, üretim parametrelerinin (elyaf oryantasyonu ve birleşme izleri gibi) mekanik performans üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır.

- İlk olarak, geleneksel model kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analizi ile kritik burkulma yükleri ve modları belirlenmiştir. Ancak, geleneksel modelin gerçek malzeme davranışını tam olarak yansıtma sınırlamaları nedeniyle, Moldex3D simülasyonlarından elde edilen elyaf oryantasyonu ve birleşme hattı verilerinin Digimat RP aracılığıyla ABAQUS'a entegrasyonu önemli bir gelişme sağlamıştır.
- Analizin ikinci aşamasında, gerçek malzeme verilerinin entegrasyonu, kolonların yük taşıma kapasitesini artırmış ve geleneksel modele kıyasla daha düşük deformasyon direnciyle sonuçlanmıştır. Enjeksiyon giriş sayısı ve yerleşimi, elyaf oryantasyonunu doğrudan etkileyerek yük taşıma kapasitesini etkilemiştir. Alt taraftan doldurulan modeller, üst taraftan doldurulan modellere göre daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur. Ayrıca, giriş çapı analizleri, 2.5 mm çapın ideal performansı sağlamak için en uygun olduğunu göstermiştir.

Son olarak çarpışma kutularının geleneksel model analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerilme dağılımı açısından incelendiğinde, farklı geometrilerin maksimum gerilme seviyelerinin benzer olduğu ancak dağılımın değiştiği görülmüştür. Kare kesitte, köşe bölgelerinde gerilme yığılmaları oluşurken, dairesel kesitte gerilme daha homojen dağılmış ve çarpışma enerjisi daha dengeli şekilde absorbe edilmiştir. Ondüle kesitte ise gerilme farklı bölgelere yayılarak, enerjinin daha etkin bir şekilde absorbe edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, kinetik enerji incelendiğinde, tüm geometrilerin başlangıçta yaklaşık 35 kJ kinetik enerjiye sahip olduğu, çarpışma sürecinde bu enerjinin düzenli olarak azaldığı ve yaklaşık 0.013 saniye sonunda tamamen absorbe edildiği belirlenmiştir. Özellikle ondüle geometrisinin enerjiyi daha erken absorbe ettiği ve deformasyon sürecinin daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, ondüle yapının çarpışma sırasında daha yüksek bir enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, otomotiv, havacılık ve elektronik gibi endüstrilerde kullanılan termoplastik kompozitlerde, malzeme anizotropisinin sonlu elemanlar simülasyonlarında dikkate alınmasının ne kadar kritik olduğunu vurgulamaktadır. Özellikle karmaşık bileşen

tasarımlarında, üretim parametrelerinin simülasyonlarla entegrasyonu, parça tasarımını ve üretim süreçlerini optimize etmeye, ayrıca bileşenlerin performans gereksinimlerini karşılamasına yardımcı olmaktadır.

Sonuç olarak, fiber yönelimi verilerinin sonlu elemanlar analizine (FEA) entegrasyonu, prediktif modelleri iyileştirir ve kısa elyaf güçlendirilmiş termoplastik kompozitlerin davranışını daha iyi anlamamıza olanak sağlar. Bu yaklaşım, daha iyi tasarlanmış, sıkı performans kriterlerini karşılayan bileşenlerin üretilmesine yardımcı olur ve nihai ürünlerin genel güvenilirliğini ile güvenliğini artırır. Aynı zamanda üretim parametreleri ile simülasyon girdileri arasındaki boşluğu kapatarak, simülasyonların tahmin edilebilirliği ve güvenilirliği artırılmaktadır.

Gelecek çalışmalar ve öneriler;

Bu tezde elde edilen bulgular ve geliştirilen yöntemler, ileride yapılacak çalışmalar için birçok önemli araştırma fırsatı sunmaktadır. Bu bağlamda öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Farklı geometrilere sahip çarpışma kutularının gerçek malzeme verilerinin entegrasyonu ile analizler gerçekleştirilerek, gerilme dağılımı ve enerji absorpsiyon mekanizmaları daha gerçekçi bir şekilde incelenebilir. Özellikle, fiber oryantasyonu ve birleşme izi verilerinin entegrasyonu ile gerilme yığılmalarının oluştuğu bölgeler ve hasar başlangıç noktaları tahmin edilebilir. Sonuç kısmında elde edilen bulgular doğrultusunda, ondüle geometrisinin çarpışma sırasında daha yüksek enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olduğu belirlenmiş olup, gelecekte bu tür yapıların daha detaylı malzeme ve kırılma analiziyle desteklenmesi, tasarım optimizasyonu açısından faydalı olabilir.
- Kalıp Akış Analizi Verilerinin Entegrasyonu: Çalışmada kullanılan sistematik hesaplamalı yaklaşımın işlem adımlarını azaltmak amacıyla, doğrudan kalıp akış analizinden elde edilen verilerin sonlu elemanlar analizi (FEA) simülasyonlarına entegrasyonu sağlanabilir. Bu amaçla bir kullanıcı tanımlı malzeme modeli (UMAT) kullanılabilir. UMAT, özelleştirilmiş malzeme modelleri oluşturmak için kullanılan bir alt program olup, fiber yönelimi ve diğer üretim

parametrelerini malzeme modeline dâhil ederek simülasyonların doğruluğunu artırma potansiyeline sahiptir.

- Kalıp Akış Parametrelerinin Detaylı İncelenmesi: Kalıp akış analizini etkileyen parametreler (örneğin, enjeksiyon hızı, giriş çapı, kalıp sıcaklığı) üzerine detaylı bir çalışma yürütülebilir. Değişen her parametre için hata tahminleri yapılabilir ve bu tahminler simülasyon doğruluğunun iyileştirilmesine katkıda bulunabilir. Bu süreçte, malzeme davranışını etkileyen mikro yapı değişiklikleri de göz önünde bulundurulabilir.
- Artık Gerilme ve Çarpılma Etkileri: Tez kapsamında fiber oryantasyonu ve birleşme izi verilerinin etkisi incelenmiştir. Ancak üretim sürecinden kaynaklanan çarpılma ve artık gerilme gibi kusurların mekanik dayanım üzerindeki etkileri ayrı bir çalışma konusu olarak ele alınabilir. Bu tür kusurların analizi, nihai ürün performansının daha iyi tahmin edilmesini sağlayabilir.
- Yorulma Davranışı ve Hasar Modellemesi: Fiber oryantasyonu, birleşme izi, çarpılma ve artık gerilme gibi parametrelerin yorulma davranışı üzerindeki etkileri analiz edilebilir. Bu tür çalışmalar, özellikle otomotiv ve havacılık gibi uzun süreli yükleme altındaki yapıların güvenilirliğini artırmaya yönelik önemli bilgiler sağlayabilir. Hem geleneksel model hem de gerçek malzeme verilerinin entegre edildiği modeller ile yapılan analizlerin test sonuçlarıyla doğrulanması, modellerin güvenilirliğini artıracaktır.
- Hasar Modellemesi ve Validasyon: Mevcut modellerde hasar analizine odaklanılarak, malzeme kırılma mekanizmaları ve birleşme izleri gibi kusurların hasar davranışına etkileri incelenebilir. Hasar ilerlemesinin tahmini, özellikle zorlu yükleme durumlarında malzeme ömrünün daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bunun yanı sıra, test sonuçları ile modellerin validasyonu sağlanarak, sonuçların güvenilirliği artırılabilir.
- Yeni Malzeme Modellerinin Geliştirilmesi: Farklı türlerde termoplastik kompozitlerin (örneğin, yüksek sıcaklık dayanımlı veya darbe dayanımı yüksek malzemeler) benzer yöntemlerle analiz edilmesi, önerilen yaklaşımın kapsamını genişletebilir. Ayrıca, farklı katkı maddeleri içeren malzemelerin davranışlarının modellenmesi, simülasyonlarda kullanılabilirliği artırabilir.

- Optimizasyon Çalışmaları: Enjeksiyon sürecinde kullanılan üretim parametrelerinin optimizasyonu, fiber yönelimi ve kaynak hatları gibi mekanik dayanımı etkileyen unsurların kontrol altına alınmasını sağlayabilir. Örneğin, makine öğrenimi teknikleri ile parametre optimizasyonu yapılarak, daha hızlı ve doğru sonuçlar elde edilebilir.
- Termomekanik Analizler: Malzemenin sıcaklık etkisi altında davranışı incelenerek, özellikle yüksek sıcaklıklarda kullanılan parçaların termomekanik özellikleri modellenebilir. Bu, özellikle motor parçaları gibi yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalar için önemli olacaktır.

Bu öneriler, geliştirilen kapsamlı yaklaşımın daha geniş uygulama alanlarında test edilmesine, yeni bilgiler elde edilmesine ve daha dayanıklı kompozit malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

KAYNAKLAR

Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. Thin-Walled Structures, 153, 106795.

Adam, L. A. U. R. E. N. T., & Assaker, R. O. G. E. R. (2014, July). Integrated nonlinear multi-scale material modelling of fiber reinforced plastics with Digimat: application to short and continuous fiber composites. In Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics (pp. 20-25).

Advani, S. G., & Tucker III, C. L. (1987). The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites. Journal of rheology, 31(8), 751-784.

Al Rashid, A., & Koç, M. (2022). Numerical simulations on thermomechanical performance of 3D printed chopped carbon f iber-reinforced polyamide-6 composites: Effect of infill design. Journal of Applied Polymer Science, 139(44), e53081.

Astuti, F. A. F., Choiron, M. A., Purnowidodo, A., & Irawan, Y. S. (2025). Quasi-static test data set of honeycomb hybrid tubes by FDM 3D printing. Data in Brief, 58, 111233.

Barral, M., Chatzigeorgiou, G., Meraghni, F., & Léon, R. (2020). Homogenization using modified Mori-Tanaka and TFA framework for elastoplastic-viscoelastic-viscoplastic composites: Theory and numerical validation. International Journal of Plasticity, 127, 102632.

Belhouideg, S. (2018). Prediction of effective mechanical properties of composite materials using homogenization approach: Application to tungsten fiber reinforced bulk metallic glass matrix composite. European mechanical science, 2(2), 68-75.

Benveniste, Y. (1987). A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials. Mechanics of materials, 6(2), 147-157.

Brightworks Engineering. (2025). Shrinkage and Warpage in Plastic Injection Molding. Erişim adresi: https://tr.brightworksengineering.com/training/shrinkage-warpage/. Erişim tarihi: 11 Ocak 2025.

Campbell, F. C. (2010). Structural Composite Materials. ASM International, 14.

Chai, J. H., Zhong, J. P., Xu, B., Zhang, Z. J., Shen, Z., Zhang, X. L., & Shen, J. M. (2023). Finite element analysis and experimental validation of the failure characteristic of pressurized cylinder. International Journal of Structural Integrity, 14(6), 874-890.

Chai, W., Liu, X., Shan, Y., Wan, X., & Jiang, E. (2019). Finite element analysis of the residual stress of automotive wheel made of long glass fiber-reinforced thermoplastic composite. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 233(10), 3592-3602.

Chawla, K. K. (2013). Ceramic matrix composites. Springer Science & Business Media.

Chen, C. S., Chen, T. J., Chien, R. D., & Chen, S. C. (2007). Investigation on the weldline strength of thin-wall injection molded ABS parts. International Communications in Heat and Mass Transfer, 34(4), 448-455.

Das Lala, S., Sadikbasha, S., & Deoghare, A. B. (2020). Prediction of elastic modulus of polymer composites using Hashin–Shtrikman bound, mean field

homogenization and finite element technique. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 234(8), 1653-1659.

De Biasio, A., Ghasemnejad, H., Srimanosaowapak, S., & Watson, J. W. (2025). Development of multi aluminium foam-filled crash box systems to improve crashworthiness performance of road Service vehicle. European Journal of Mechanics-A/Solids, 109, 105433.

Dean, A., Reinoso, J., Sahraee, S., & Rolfes, R. (2016). An invariant-based anisotropic material model for short fiber-reinforced thermoplastics: Coupled thermo-plastic formulation. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 90, 186-199.

Digimat User's Manual, V. (2017). e-Xstream Engineering.

Ding, Y. M., Wang, X. H., Xie, P. C., Zhang, Y. C., & Yang, W. M. (2013). Effects of gate locations on the tensile strength of injection molded weld lines. Key Engineering Materials, 561, 64-69.

Dogossy, G., Morauszki, T., & Ronkay, F. (2022). Experimental investigation and applicability of multi-stage simulations in the case of a thick-walled injection-moulded composite. Applied Sciences, 12(17), 8415.

Dvorak, G. J., & Srinivas, M. V. (1999). New estimates of overall properties of heterogeneous solids. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 47(4), 899-920.

Dzulkipli, A. A., & Azuddin, M. (2017). Study of the effects of injection molding parameter on weld line formation. Procedia engineering, 184, 663-672.

Eik, M. (2014). Orientation of short steel fibres in concrete: measuring and modelling. Aalto University.

Elmoghazy, Y., Abuelgasim, E. M. O., Osman, S. A., Afaneh, Y. R. H., Eissa, O. M. A., & Safaei, B. (2023). Effective Mechanical Properties Evaluation of Unidirectional and Bidirectional Composites Using Virtual Domain Approach at Microscale. Archives of Advanced Engineering Science, 1(1), 27-37.

Eshelby, J. D. (1957). The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences, 241(1226), 376-396.

Fathi, S., & Behravesh, A. H. (2008). Visualization analysis of flow behavior during weld-line formation in injection molding process. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 47(7), 666-672.

Fellahi, S., Meddad, A., Fisa, B., & Favis, B. D. (1995). Weldlines in injection-molded parts: A review. Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute, 14(3), 169-195.

Ferrano, F., Lipka, A., Stanko, M., & Stommel, M. (2016, October). Estimation of the lifetime of short fiber-reinforced plastic parts in steering systems. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1779, No. 1). AIP Publishing.

Feyel, F. (2003). A multilevel finite element method (FE2) to describe the response of highly non-linear structures using generalized continua. Computer Methods in applied Mechanics and engineering, 192(28-30), 3233-3244.

Fluent Co. (2025). Weld Line Defect Analysis in Injection Molding. Erişim adresi: https://fluent.co.th/weld-line-defect-analysis/. Erişim tarihi: 11 Ocak 2025.

Frącz, W. I. E. S. Ł. A. W., & Janowski, G. (2016). Zaawansowana analiza wytrzymałościowa wypraski z kompozytu WPC z uwzględnieniem powtryskowej orientacji włókien w osnowie polimerowej. Mechanik, 7, 628-630.

Fu, S. Y., Lauke, B., & Mai, Y. W. (2019). Science and engineering of short fibre-reinforced polymer composites. Woodhead Publishing.

Fujita, Y., Noda, S., Takahashi, J., Greenhalgh, E. S., & Pimenta, S. (2024). Predicting failure in injection-moulded short-fibre subcomponents under varied environmental conditions through fracture mechanics. Composites Part B: Engineering, 275, 111343.

Furuya, K., Nikawa, M., Tuyen, N. B., Nakamura, Y., Ueno, R., Chiba, A., ... & Matsumura, Y. (2017). Prediction of Static and Dynamic Mechanical Properties of GFRTP Product through Injection Molding. Key Engineering Materials, 749, 223-228.

Gandhi, U., Goris, S., Osswald, T. A., & Song, Y. Y. (2020). Discontinuous fiber-reinforced composites: fundamentals and applications. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

Gao, R., Chen, H., Hu, Z., Cheng, X., Gao, S., Zhou, S., & Zhao, P. (2022). An integrated simulation method for analyzing mechanical properties of injection molded fiber-reinforced polymers. Polymer Composites, 43(7), 4530-4543.

Gommers, B., Verpoest, I., & Van Houtte, P. (1998). The Mori–Tanaka method applied to textile composite materials. Acta Materialia, 46(6), 2223-2235.

Guan, C., Lou, R., Chen, Y., Qin, C., Shi, Z., Liang, L., & Li, H. (2024). A homogenization method for natural frequencies and damping of sandwich panels based on representative volume elements. Composite Structures, 329, 117740.

Guedes, J., & Kikuchi, N. (1990). Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods. Computer methods in applied mechanics and engineering, 83(2), 143-198.

Gusev, A. A. (2017). Finite element estimates of viscoelastic stiffness of short glass fiber reinforced composites. Composite Structures, 171, 53-62.

Haramburu, E., Collombet, F., Ferret, B., Vignes, J. S., Devos, P., Levaillant, C., & Schmidt, F. (2002). Short-fibre Reinforced Thermoplastic for Semi-structural Parts: Process-properties. In Proceeding of the 8th Euro-Japanese Symposium.

Heidari-Rarani, M., Bashandeh-Khodaei-Naeini, K., & Mirkhalaf, S. M. (2018). Micromechanical modeling of the mechanical behavior of unidirectional composites–A comparative study. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 37(16), 1051-1071.

Hibbitt, Karlsson, & Sorensen. (1997). ABAQUS/standard: User's Manual (Vol. 1). Hibbitt, Karlsson & Sorensen.

Higuchi, R., Yokozeki, T., Nishida, K., Kawamura, C., Sugiyama, T., & Miyanaga, T. (2024). High-fidelity computational micromechanics of composite materials using image-based periodic representative volume element. Composite Structures, 328, 117726.

Hill, R. (1965). A self-consistent mechanics of composite materials. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 13(4), 213-222.

Hirsch, P., John, M., Leipold, D., Henkel, A., Gipser, S., Schlimper, R., & Zscheyge, M. (2021). Numerical simulation and experimental validation of hybrid injection

molded short and continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. Polymers, 13(21), 3846.
Hopmann, C., & Köbel, T. (2024). Influence of the injection velocity profile on the properties of injection moulded parts. International Polymer Processing, 39(3), 378-391.
Hori, M., & Nemat-Nasser, S. (1993). Double-inclusion model and overall moduli of multi-phase composites. Mechanics of materials, 14(3), 189-206.
Hou, W., He, P., Yang, Y., & Sang, L. (2023). Crashworthiness optimization of crash box with 3D-printed lattice structures. International Journal of Mechanical Sciences, 247, 108198.
Hsieh, F. L., Chen, C. T., Hwang, S. S., Hwang, S. J., Huang, P. W., Peng, H. S., ... & Huang, C. T. (2024). Study on the Influence of Runner and Overflow Area Design on Flow–Fiber Coupling in a Multi-Cavity System. Polymers, 16(9), 1279.
Hussain, N. N., Regalla, S. P., & Rao, Y. V. D. (2017). Comparative study of trigger configuration for enhancement of crashworthiness of automobile crash box subjected to axial impact loading. Procedia Engineering, 173, 1390-1398.
Isaincu, A., Dan, M., Ungureanu, V., & Marșavina, L. (2021). Numerical investigation on the influence of fiber orientation mapping procedure to the mechanical response of short-fiber reinforced composites using Moldflow, Digimat and Ansys software. Materials today: proceedings, 45, 4304-4309.
Isametova, M., Abilezova, G., Dishovsky, N., & Velev, P. (2021). Development and verification of mechanical characteristics of a composite material made of a thermoplastic matrix and short glass fibers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(12), 113.
Islam, M., Tudryn, G. J., & Picu, C. R. (2016). Microstructure modeling of random composites with cylindrical inclusions having high volume fraction and broad aspect ratio distribution. Computational Materials Science, 125, 309-318.
Jadhav, G., Gaval, V., Solanke, S., Divekar, M., Darade, N., Satpute, A., & Goutham, G. P. (2023). Weld-lines and its strength evaluation in injection molded parts: A review. Polymer Engineering & Science, 63(11), 3523-3536.
Jain, A. (2019). Micro and mesomechanics of fibre reinforced composites using mean field homogenization formulations: A review. Materials Today Communications, 21, 100552.
Jansson, J., Gustafsson, T., Salomonsson, K., Olofsson, J., Johansson, J., Appelsved, P., & Palm, M. (2018). An anisotropic non-linear material model for glass fibre reinforced plastics. Composite structures, 195, 93-98.
Jiang, Q., Zhang, W., Wan, Z., Zhou, H., Jiang, S., & Nie, H. (2024). Experimental and numerical investigations on formation mechanisms of hollow structures in overflow water-assisted injection-molded parts of short-glass-fiber-reinforced polypropylene. Journal of Applied Polymer Science, 141(36), e55916.
Jong, W. R., Hwang, S. S., Wu, C. C., Kao, C. H., Huang, Y. M., & Tsai, M. C. (2018). Using a visualization mold to discuss the influence of gas counter pressure and mold temperature on the fountain flow effect. International Polymer Processing, 33(2), 255-267.
Kameya, K., Ogata, H., & Tanohata, N. (2024). Simulation-based analysis of weld line strength of glass fiber-reinforced polymer in injection molding. Polymer Engineering & Science, 64(2), 852-864.

Kanters, M. J., Douven, L. F., & Savoyat, P. (2019). Fatigue life prediction of injection moulded short glass fiber reinforced plastics. Procedia Structural Integrity, 19, 698-710.

Kazmer, D. O., Grosskopf, C. M., & Venoor, V. (2018). Vortical fountain flows in plasticating screws. Polymers, 10(8), 823.

Khosravani, M. R., Nasiri, S., & Reinicke, T. (2022). Intelligent knowledge-based system to improve injection molding process. Journal of industrial information Integration, 25, 100275.

Klusemann, B., & Svendsen, B. J. T. M. (2010). Homogenization methods for multi-phase elastic composites: Comparisons and benchmarks. Technische Mechanik-European Journal of Engineering Mechanics, 30(4), 374-386.

Kufel, A., Para, S., & Kuciel, S. (2021). Basalt/glass fiber polypropylene hybrid composites: Mechanical properties at different temperatures and under cyclic loading and micromechanical modelling. Materials, 14(19), 5574.

Kurkin, E. I., Kishov, E. A., Lukyanov, O. E., & Barcenas, O. E. (2021, May). Technique of considering the material anisotropy in topology optimization of short fibers composite structures. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1925, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.

Kurkin, E. I., Spirina, M. O., Zakhvatkin, Y. V., & Chertykovtseva, V. O. (2020, May). The influence of the weld line location on the mechanical characteristics of lugs from short fibers reinforced composite material. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 868, No. 1, p. 012028). IOP Publishing.

Lagoudas, D. C., Gavazzi, A. C., & Nigam, H. (1991). Elastoplastic behavior of metal matrix composites based on incremental plasticity and the Mori-Tanaka averaging scheme. Computational Mechanics, 8, 193-203.

Lee, S., & Ryu, S. (2018). Theoretical study of the effective modulus of a composite considering the orientation distribution of the fillers and the interfacial damage. European Journal of Mechanics-A/Solids, 72, 79-87.

LINDHULT, J. A., & Ljungberg, M. (2015). Fatigue analysis of anisotropic short fibre reinforced polymers-by use of Digimat and nCode DesignLife.

Li, X. J., Zuo, Z. M., Mi, H. Y., Dong, B. B., Antwi-Afari, M. F., Liu, C. T., & Shen, C. Y. (2024). A review of research progress on the minimization of weld lines in injection molding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-32.

Liu, L., & Huang, Z. (2014). A note on Mori-Tanaka's method. Acta Mechanica solida sinica, 27(3), 234-244.

Liu, Q., Liu, Y., Jiang, C., & Zheng, S. (2020). Modeling and simulation of weld line location and properties during injection molding based on viscoelastic constitutive equation. Rheologica Acta, 59, 109-121.

Liu, Y., Zhao, H., Dong, S., Zhao, X., Peng, Y., & Chen, J. A. (2023). Multiscale model construction and modulus prediction of needle-punched carbon/carbon composites. Polymers and Polymer Composites, 31, 09673911231158999.

Liu, Z., Bessa, M. A., & Liu, W. K. (2016). Self-consistent clustering analysis: an efficient multi-scale scheme for inelastic heterogeneous materials. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 306, 319-341.

Lu, J., & Papadopoulos, P. (2000). A covariant constitutive description of anisotropic non-linear elasticity. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP, 51, 204-217.

Manzari, M. T., & Yonten, K. (2014). On implementation and performance of an anisotropic constitutive model for clays. International Journal of Computational Methods, 11(02), 1342009.

Mathieu, L., Stockmann, L., Haudin, J. M., Monasse, B., Vincent, M., Barthez, J. M., ... & Roux, D. C. (2022). Flow marks in injection molding of PP: influence of processing conditions and formation in fountain flow. International Polymer Processing, 16(4), 404-411.

Melchior, M. A., & Alsteens, B. (2021). ICME SOLUTION TO PREDICT CREEP OF SHORT FIBERREINFORCED THERMOPLASTIC AT PART LEVEL.

Mentges, N., Çelik, H., Hopmann, C., Fagerström, M., & Mirkhalaf, S. M. (2023). Micromechanical modelling of short fibre composites considering fibre length distributions. Composites Part B: Engineering, 264, 110868.

Michel, J. C., & Suquet, P. (2003). Nonuniform transformation field analysis. International journal of solids and structures, 40(25), 6937-6955.

Mishra, N., & Das, K. (2022). A Comparative Study of Incremental Selfconsistent and Eshelby–Mori–Tanaka Models for Estimating the Electroelastic Properties of Piezoelectric Polymer Composites with an Orthotropic Matrix. Mechanics of Composite Materials, 58(5), 657-672.

Modhaffar, I., Gueraoui, K., Men-la-yakhaf, S., & Tourroug, H. E. (2017). Simulation of Short Fiber Orientation in Thermoplastic Matrix. Journal of Materials and Environmental Science, 8(1), 44-9.

Mori, T., & Tanaka, K. (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. Acta metallurgica, 21(5), 571-574.

Navrátil, L., Leveuf, L., Le Saux, V., Marco, Y., Olhagaray, J., Leclercq, S., ... & Le Saux, M. (2020). A model to describe the cyclic anisotropic mechanical behavior of short fiber-reinforced thermoplastics. Mechanics of Time-Dependent Materials, 24, 481-503.

Nega, B. F., Pierce, R. S., Yi, X., & Liu, X. (2024). Full-field effect of flow-induced fiber orientation during compression molding of carbon fiber sheet molding compounds. Polymer Composites.

Ogierman, W., & Kokot, G. (2013). Mean field homogenization in multi-scale modelling of composite materials. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering, 61(2), 343-348.

Osswald, T. A. (1998). Polymer processing fundamentals. (No Title).

Oubellaouch, K., Pelaccia, R., Bonato, N., Bettoni, N., Carmignato, S., Orazi, L., ... & Reggiani, B. (2024). Assessment of fiber orientation models predictability by comparison with X-ray μCT data in injection-molded short glass fiber-reinforced polyamide. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 130(9), 4479-4492.

Pedro, E. (2017). Structural Analysis of Injection Molded Components Using Digimat As an Interface Software. Instituto Superior Técnico.

Peng, X., Hu, N., Zheng, H., & Fukunaga, H. (2009). Evaluation of mechanical properties of particulate composites with a combined self-consistent and Mori–Tanaka approach. Mechanics of Materials, 41(12), 1288-1297.

Pierard, O., Friebel, C., & Doghri, I. (2004). Mean-field homogenization of multi-phase thermo-elastic composites: a general framework and its validation. Composites Science and Technology, 64(10-11), 1587-1603.

Pieressa, A., Baruffa, G., Sorgato, M., & Lucchetta, G. (2024). Enhancing weld line visibility prediction in injection molding using physics-informed neural networks. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-14.

Polat, A., Deliktaş, B., Yazıcı, M., & Voyiadjis, G. Z. (2025). Computational modeling of weld-line impacts on mechanical behavior of fiber-reinforced thermoplastics. European Journal of Mechanics-A/Solids, 109, 105485.

Postawa, P., & Gnatowski, A. (2007). Anisotropy of physical properties injection moulded parts and its analysis. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 23(2), 35-38.

Quintana, M. C., & Frontini, P. (2020). Weld line strength factors in a reinforced injection molded part: Relationship with predicted fiber orientation. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 39(5-6), 219-230.

Rad, A. A., Pastukhov, L., Govaert, L. E., & van Dommelen, J. H. (2019, September). Modeling anisotropic and rate-dependent plasticity in short-fiber reinforced thermoplastics. In XV International Conference onComputational Plasticity. Fundamentals and Applications (pp. 385-394). International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE).

Radzi, M. K. F. M., Muhamad, N., Sulong, A. B., Radzuan, N. A. M., Khalid, M. R. M., Ahmad, M. R., ... & Bakri, M. A. M. (2021). Problems and Constraints Involved in the Injection Moulding Process of Biocomposites: A Review. Advances in Agricultural and Food Research Journal, 2(1).

Renard, J., & Marmonier, M. F. (1987). Etude de l'initiation de l'endommagement dans la matrice d'un matériau composite par une méthode d'homogénéisation. La Recherche aérospatiale, (6), 43-51.

Rostro-González, H., Puigoriol-Forcada, J. M., Pérez-Peña, A., Menacho, J., & Garcia-Granada, A. A. (2024). Optimizing crash box design to meet injury criteria: a protocol for accurate simulation and material selection. Structural and Multidisciplinary Optimization, 67(8), 156.

Rösler, J., Bäker, M., & Harders, H. (2008). Mechanisches Verhalten der Werkstoffe (Vol. 3). Wiesbaden: Vieweg+ Teubner.

Ryu, J. B., & Lyu, M. Y. (2014). A study on the mechanical property and 3D fiber distribution in injection molded glass fiber reinforced PA66. International Polymer Processing, 29(3), 389-401.

SadAbadi, H., & Ghasemi, M. (2007). Effects of some injection molding process parameters on fiber orientation tensor of short glass fiber polystyrene composites (SGF/PS). Journal of Reinforced Plastics and Composites, 26(17), 1729-1741.

Safaei, M., Lee, M. G., Zang, S. L., & De Waele, W. (2014). An evolutionary anisotropic model for sheet metals based on non-associated flow rule approach. Computational Materials Science, 81, 15-29.

Salomone, R., Liparoti, S., Speranza, V., Pantani, R., Čermák, R., & Jaška, D. (2024, May). Tuning the properties of injection molding polypropylene parts by in-mold annealing. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3158, No. 1). AIP Publishing.

Schulenberg, L., Seelig, T., Andrieux, F., & Sun, D. Z. (2017). An anisotropic elasto-plastic material model for injection-molded long fiber-reinforced thermoplastics

accounting for local fiber orientation distributions. Journal of Composite Materials, 51(14), 2061-2078.
Schürmann, H. (2007). Konstruieren mit faser-kunststoff-verbunden (Vol. 2). Berlin: Springer.
Selmi, A., Doghri, I., & Adam, L. (2011). Micromechanical simulations of biaxial yield, hardening and plastic flow in short glass fiber reinforced polyamide. International Journal of Mechanical Sciences, 53(9), 696-706.
Shahid, S., & Gukhool, W. (2020). Experimental testing and materialmodeling of anisotropy in injectionmoulded polymer materials.
Sielicki, P. W., Sumelka, W., & Łodygowski, T. (2019). Close range explosive loading on steel column in the framework of anisotropic viscoplasticity. Metals, 9(4), 454.
Sim, J. H., Yu, S. H., Yoon, H. S., Kwon, D. J., Lee, D. H., & Bae, J. S. (2021). Characteristic evaluation and finite element analysis of glass fiber/recycled polyester thermoplastic composites by cross-sectional shape of glass fiber. Composites Part B: Engineering, 223, 109095.
Stommel, M., Stojek, M., & Korte, W. (2018). FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
Sumelka, W., Nowak, M., Nassr, A. A., Al-Rifaie, H., Malendowski, M., Gajewski, T., ... & Sielicki, P. W. (2021). Dynamic failure of the aluminium plate under air-blast loading in the framework of the fractional viscoplasticity model-theory and validation. International Journal of Impact Engineering, 158, 104024.
Tan, H., Huang, Y., Liu, C., & Geubelle, P. (2005). The Mori–Tanaka method for composite materials with nonlinear interface debonding. International Journal of Plasticity, 21(10), 1890-1918.
Tang, J., Qiu, J., Sakai, E., Zhang, G., Wu, H., Zhao, W., ... & Guo, S. (2024). Optimization of polypropylene high-strength injection molding welding and interface structure analysis. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 08927057241296486.
Tariq, A., Polat, A., & Deliktaş, B. (2024). Boosting machine learning algorithms for predicting the macroscopic material behavior of continuous fiber reinforced composite. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 07316844241292694.
Teknikde. (2025). Çöküntüler: Plastik Parçada Çökme. Erişim adresi: https://www.teknikde.com/2022/11/cokuntuler-plastik-parcada-cokme.html. Erişim tarihi: 11 Ocak 2025.
Tikarrouchine, E., Benaarbia, A., Chatzigeorgiou, G., & Meraghni, F. (2021). Non-linear FE2 multiscale simulation of damage, micro and macroscopic strains in polyamide 66-woven composite structures: Analysis and experimental validation. Composite Structures, 255, 112926.
Truong Giang, N., Son Minh, P., Anh Son, T., Nguyen, V. T., Minh The Uyen, T., Do, T. T., & Nguyen, V. T. T. (2024). External gas-assisted mold temperature control and optimization molding parameters for improving weld line strength in polyamide plastics. PloS one, 19(8), e0307485.
Trzepieciński, T., Ryzińska, G., Gromada, M., & Biglar, M. (2018). 3D microstructure-based modelling of the deformation behaviour of ceramic matrix composites. Journal of the European Ceramic Society, 38(8), 2911-2919.

Tseng, H. C., Hsu, C. H., & Chang, R. Y. (2017). Long fiber orientation and structural analysis using MOLDEX3D, digimat and ABAQUS simulations. SPE ANTEC, Anaheim, CA.

Uyen, T. M. T., Nguyen, H. T., Nguyen, V. T., Minh, P. S., Do, T. T., & Nguyen, V. T. T. (2024). Optimizing the Tensile Strength of Weld Lines in Glass Fiber Composite Injection Molding. Materials, 17(14), 3428.

Voyiadjis, G. Z., Abu Al-Rub, R. K., & Palazotto, A. N. (2003). Non-local coupling of viscoplasticity and anisotropic viscodamage for impact problems using the gradient theory. Archives of Mechanics, 55(1), 39-89.

Wang, C., Li, Y., Zhao, W., Zou, S., Zhou, G., & Wang, Y. (2018). Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure. International Journal of Mechanical Sciences, 138, 489-501.

Wang, J., Zhang, Y., He, N., & Wang, C. H. (2018). Crashworthiness behavior of Koch fractal structures. Materials & Design, 144, 229-244.

Wang, K. K. (1991). Cornell Injection Molding Program Progress Report No. 16: Covering the Period from January 1990 Through December 1991. College of Engineering, Cornell University.

Wang, Z., Wang, X., Zhang, J., Liang, W., & Zhou, L. (2011). Automatic generation of random distribution of fibers in long-fiber-reinforced composites and mesomechanical simulation. Materials & Design, 32(2), 885-891.

Woelke, P., Abboud, N., Tennant, D., Hansen, E., & Mcarthur, C. (2012). Ship impact study: Analytical approaches and finite element modeling. Shock and Vibration, 19(4), 515-525.

Xia, F., Wang, Z., Wang, Y., Liu, H., & Xue, J. (2024). Post-Buckling Response of Carbon/Epoxy Laminates with Delamination under Quasi-Static Compression: Experiments and Numerical Simulations. Materials, 17(20), 5047.

Xie, L., Tian, X. Y., Wu, W. Q., Li, D. C., Jiang, B. Y., & Ziegmann, G. (2011). Effect of Weld Line Defects on Electrical Conductivity of Injection Molded Parts with Carbon Nano Fibers/PP Composites. Advanced Materials Research, 233, 1136-1140.

Xing, S., Jiang, Z., Zhao, J., Sun, X., & Wang, Y. (2025). Failure mechanism and crashworthiness optimization of variable stiffness nested origami crash box. Engineering Failure Analysis, 167, 108953.

Xu, X., Zhang, Y., Wang, J., Jiang, F., & Wang, C. H. (2018). Crashworthiness design of novel hierarchical hexagonal columns. Composite Structures, 194, 36-48.

Yusof, N. S. B., Sapuan, S. M., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., & Maleque, M. A. (2017). Design and materials development of automotive crash box: a review. Ciência & Tecnologia dos Materiais, 29(3), 129-144.

Yvonnet, J., & He, Q. C. (2007). The reduced model multiscale method (R3M) for the non-linear homogenization of hyperelastic media at finite strains. Journal of Computational Physics, 223(1), 341-368.

Zhang, S., Zhao, B., Zhu, S., & Liu, Y. (2024). Buckling behaviors prediction of biological staggered composites with finite element analysis and machine learning coupled method. Composite Structures, 345, 118357.

Zhou, C., Wang, B., Ma, J., & You, Z. (2016). Dynamic axial crushing of origami crash boxes. International journal of mechanical sciences, 118, 1-12.

Zhou, H., & Li, D. (2004). Modelling and prediction of weld line location and properties based on injection moulding simulation. International Journal of Materials and Product Technology, 21(6), 526-538.

Zhou, H., Hu, Z., Zhang, Y., & Li, D. (2013). Numerical Implementation for the Filling and Packing Simulation. Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control, 71-128.

Zhou, S., & Hrymak, A. N. (2024). Injection Molding of Polymers and Polymer Composites. Polymers, 16(13), 1796.

Zhu, L., Wang, J., Shen, W., Chen, L., & Zhu, C. (2022). Design and Analysis of Solid Rocket Composite Motor Case Connector Using Finite Element Method. Polymers, 14(13), 2596.