EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ PARÇALARIN ÇOK ÖLÇEKLİ SONLU ELAMANLAR MODELİNİN OLUŞTURULMASI

İbrahim Erdem TEKİN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ PARÇALARIN ÇOK ÖLÇEKLİ SONLU ELAMANLAR MODELİNİN OLUŞTURULMASI

İbrahim Erdem TEKİN
502110008

Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN
(Danışman)

Dr. Remzi Ecmel ECE
(2.Danışman)

YÜKSEK LİSANS
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ PARÇALARIN ÇOK ÖLÇEKLİ SONLU ELAMANLAR MODELİNİN OLUŞTURULMASI

İbrahim Erdem TEKİN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

Eklemeli imalatın hızla yaygınlaşması, kullanım alanlarını prototip üretiminden son kullanıcıya yönelik fonksiyonel parçalara genişletmiştir. Ancak, özellikle FDM (Fused Deposition Modelling) yönteminde fonksiyonel parçaların üretimindeki en büyük zorluk, yöntemin malzemeye kazandırdığı karakteristik ve mekanik özelliklerin öngörülmesidir. Bu çalışmada, FDM ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini tahmin etmek amacıyla Lamina teorisi ve homojenleştirme yöntemleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Homojenleştirme yöntemi kapsamında, ham filamentlerin mekanik özellikleri çekme testleriyle belirlenmiş ve temsili hacim elemanları BT (Bilgisayarlı Tomografi) görüntülerinden oluşturulmuştur. Çalışmada, Ultem9085 ve Nylon12CF malzemelerle farklı oryantasyon ve tarama açılarında üretilen çekme numuneleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. BT görüntülerinin analiz edilmesiyle, el çizimiyle oluşturulan temsili hacim elemanlarından elastisite modülü hesaplanmış ve deneysel verilerle maksimum %6,6 sapma ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, BT görüntülerinden alınan kesitler, ham halde Digimat FE yazılımı kullanılarak üç farklı ölçekte analiz edilmiştir ve sonuçlar paylaşılmıştır. Lamina teorisiyle yapılan analizlerde, farklı tarama stratejileri için elastisite modülleri hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla maksimum %10 sapma ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çalışma, FDM ile üretilen malzemelerin mekanik davranışlarını anlamak ve tahmin etmek için etkili yöntemler sunmakta ve bu yöntemlerin hassasiyetine dair önemli bulgular ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Homojenleştirme, Klasik Laminasyon Teorisi, FDM, FFF, Ultem 9085, Nylon12CF, Bilgisayarlı Tomografi, Temsili Hacim Elemanı
2025, vii + 40 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DEVELOPMENT OF A MULTI-SCALE FINITE ELEMENT MODEL FOR ADDITIVELY MANUFACTURED PARTS

İbrahim Erdem TEKİN

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

The rapid growth of additive manufacturing has expanded its applications from prototyping to functional parts for end-users. However, the greatest challenge in producing functional parts, especially with the FDM method, is predicting the material's properties and mechanical characteristics resulting from the process. This study investigates and compares Classic Lamina Theory and homogenization methods to predict the mechanical properties of materials produced using FDM. Within the scope of the homogenization method, the mechanical properties of raw filaments were determined through tensile tests, and representative volume elements (RVEs) were created from CT images. Experiments were conducted on tensile specimens produced with Ultem 9085 and Nylon 12CF materials using different orientations and raster angles. By analyzing CT images, elastic moduli were calculated from manually drawn RVEs and showed a maximum deviation of 6.6% from experimental results. Additionally, cross-sections CT images obtained from FDM build samples were analyzed in their raw state using Digimat FE software at three different scales. The results showed that error margins varied with scale size. In the application of Lamina Theory, elastic moduli for different raster strategies were calculated and found to deviate by a maximum of 10% from experimental results. This study provides effective methods for understanding and predicting the mechanical behavior of materials produced using FDM and presents significant findings regarding the accuracy of these methods.

Key words: Homogenization, Classic Laminate Theory, FDM, FFF, CT, RVE, Ultem9085, Nylon12CF
2025, vii + 40 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Üniversite öğrenimim süresince rehberliği ve desteğiyle yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca hem akademik hem de profesyonel hayatımda desteğini ve rehberliğini esirgemeyen ikinci danışmanım Dr. Remzi Ecmel ECE hocama en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca yönlendirmeleri ve değerli katkılarıyla bana destek olan Prof. Dr. Serkan TOROS hocama en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince desteklerini esirgemeyen Dr. Çağlar KAHYA hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecimin başlarında araştırmalarıma rehberlik eden ve konu seçiminde yol gösteren Assoc. Prof. Dr. Celal SOYARLAN hocama en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca tam zamanlı olarak görev yaptığım **TUSAŞ** bünyesindeki değerli ekip arkadaşlarıma ve kurumuma, araştırma konuma verdikleri destek için içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, her zaman yanımda olan aileme, eşime ve üzerimde emeği bulunan herkese, verdikleri destek ve emekleri için en içten teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim Erdem TEKİN
20/01/2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
1. GİRİŞ…… 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. FDM Üzerine Genel Literatür İncelemesi 3
2.2. Modelleme Yaklaşımları 6
2.3. Homojenleştirme ve Mikro Yapısal Modeller 8
2.4. Klasik Laminasyon Teorisi (KLT) 11
3. MATERYAL ve YÖNTEM 16
3.1. Deneysel Çalışmalar 16
3.2. Homojenleştirme Yöntemi Uygulamaları 23
3.3. Klasik Laminasyon Teorisi Uygulaması 25
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 27
4.1. Deneysel Sonuçlar 27
4.2. Homojenleştirme Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar 30
4.3. Klasik Laminasyon Teorisi 36
5. SONUÇ… 39
KAYNAKLAR 41
EKLER 46
ÖZGEÇMİŞ 47

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
N	Düzlem vektörü
ε	Düzlem şekil değiştirme vektörü
E_{11}	Dikey yöndeki elastisite modülü
σ	Gerilme
G	Kayma modülü
M	Moment vektörü
ν	Poison oranı
Q	Rijitlik matrisi
E_{22}	90° yönündeki elastisite modülü
E_{33}	0° yönündeki elastisite modülü

Kısaltmalar	**Açıklama**
CAD	Computer Aided Design
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
KLT	Klasik Laminasyon Teorisi
PEI	Polyetherimide
PA	Polyamide
RVE	Representative Volume Element
SLS	Selective Laser Sintering
SLA	Stereolithography

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	FDM üretim prosesi şematik gösterimi	3
Şekil 2.2.	FDM yönteminde polimer kaynağı mekanizması ile katman yapışmasının gösterimi.	4
Şekil 2.3.	Boşlukların sınıflandırılması	5
Şekil 2.4.	G-Code dosyasından elde edilen tasarım dosyasının sonlu elemanlar analizi gösterimi	7
Şekil 2.5.	Genel homojenizasyon şematik gösterimi	8
Şekil 2.6.	Mori-Tanaka ve Double-Inclusion homojenleştirme yöntemleri gösterimi.	9
Şekil 2.7.	FDM parçanın laminasyon teorisinde mikro yapıdan parçaya kadar olan ölçekli gösterimi	12
Şekil 3.1.	Çekme testlerin yapıldığı video ekstansometreli cihaz.	16
Şekil 3.2.	Çekme numunelerinin tarama açısı ve oryantasyonu gösterimi	17
Şekil 3.3.	Ultem 9085 yatay ve dikey (stabilizasyon duvarı ile) numunelerin yazıcıdan çıktığı halinin görseli.	18
Şekil 3.4.	Filament çekme testlerinin gösterimi.	19
Şekil 3.5.	Farklı malzemeler için BT görüntüleri ve boşluklu yapı.	20
Şekil 3.6.	0°, 45° ve 90° numunelerin kesitinde oluşan çarpık ve dikdörtgen desenlerin gösterimi.	21
Şekil 3.7.	Farklı iso değerlerinde Ultem 9085, 0° numunenin enine kesit görüntüsü.	22
Şekil 3.8.	BT görüntülerinden alına üç ölçekteki temsili hacim elemanlarının gösterimi.	23
Şekil 3.9.	İdeal temsili hacim elemanları gösterimi.	24
Şekil 4.1.	Ultem 9085 çekme testi eğrileri.	26
Şekil 4.2.	Nylon12CF malzeme içi çekme testi eğrileri.	27
Şekil 4.3.	Ultem 9085 Filament çekme testi eğrileri ve elastisite modülü eğri uydurma grafiği.	28
Şekil 4.4.	Düşük ve yüksek çözünürlük oranlarında BT görüntüsü gösterimleri. Kırmızı alanlar boşluk, gri alanlar malzemeyi temsil etmektedir.	30
Şekil 4.5.	İdeal 1-2 ve ideal 3 temsili hacim elemanlarında dikey ve yanal yapışma uzunluklarının gösterimi.	32
Şekil 4.6.	BT görüntülerinde yanal yapışmanın olmadığı bölümler işaretlenmiştir.	34
Şekil 4.7.	BT görüntüsünün 1903% ölçekte büyütülmüş halinin farklı iso değerlerinde filaman yapışma arayüz bölgesi ölçümleri.	34

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 4.1.	Çekme numuneleri için ortalama eğrilerden elde edilen elastisite modülleri ve maksimum gerilmeler.	27
Çizelge 4.2.	Filament çekme testlerinden elde edilen elastisite modülleri.	28
Çizelge 4.3.	Farklı iso değerlerinde BT görüntülerinden elde edilen boşluk oranları ve çarpık desenden kaynaklı boşluk artışı.	29
Çizelge 4.4.	Ultem 9085 malzeme için, ideal geometriler ve farklı iso değerlerindeki BT görüntülerinin homojenleştirme analiz sonuçları.	30
Çizelge 4.5.	Düşük çözünürlüklü temsili hacim elemanlarında ölçek farkının analiz sonuçlarına etkisi.	31
Çizelge 4.6.	İdeal 3 temsili hacim elemanının Mori-Tanaka ve Sonlu elemanlar yöntemi ile homojenleştirme sonuçları	33
Çizelge 4.7.	İdeal ve BT temsili hacim elemanlarının farklı tarama desenlerinde yapışma yüzeyi uzunluğu ile toplam yüzey uzunluğu oranları	34

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, malzemenin katmanlar halinde biriktirilmesine dayanan ve geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinden farklı bir üretim teknolojisidir. Bu yöntem, geleneksel yöntemlerle üretilemeyen veya yüksek maliyetle üretilebilen karmaşık geometrilere sahip parçaların imalatında kullanılır.

Eklemeli imalat süreçleri genel olarak şu adımlardan oluşur: Öncelikle, bilgisayar destekli tasarım (CAD) programlarında üç boyutlu model oluşturulur ve dilimleme yazılımlarına aktarılır. Bu yazılımlarda, istenilen katman kalınlığında dilimlenen parça verisi eklemeli imalat tezgahlarına gönderilir. Tezgahlarda her bir katman, üst üste eklenerek nihai şekil oluşturulur. Üretim sonrasında, parçanın kullanım alanına ve üretim teknolojisine bağlı olarak gerekirse çeşitli ardıl işlemler uygulanır.

Eklemeli imalat teknolojilerindeki hızlı gelişmeler, kullanım alanlarını önemli ölçüde genişletmiştir. Başlangıçta yalnızca prototip üretimi için kullanılan bu teknoloji, artık fonksiyonel parça üretiminde de yaygın olarak tercih edilmektedir. Örneğin, havacılık sektöründe roket motorları, uçak içi kozmetik parçalar, uydu braketleri ve iklimlendirme kanalları gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, otomotiv, biyomedikal ve inşaat gibi farklı sektörlerde fonksiyonel parça üretimine katkı sağlamakta veya sağlaması beklenmektedir (Chekal, 2021; Ngo vd., 2018).

Uygulama alanlarına göre farklı polimer eklemeli imalat teknolojileri geliştirilmiştir. Bu teknolojiler arasında SLS (Selective Laser Sintering), FFF (Fused Filament Fabrication) ve SLA (Stereolithography) gibi yöntemler yer almaktadır. FDM (Fused Deposition Modeling) veya diğer adıyla FFF yöntemi, termoplastik polimer parçaların katmanlı imalatında yaygın olarak kullanılan başlıca yöntemdir. Bu yöntemde, hammadde olarak filament formundaki termoplastik malzeme kullanılır. Filament, motorlar yardımıyla polimerin ergime sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılmış nozüle iletilir ve ergiyen polimer, nozülden akıtılarak istenilen geometrik özellikte nihai parça oluşturulur (Gibson vd., 2021; Shapiro vd., 2016; Vyavahare vd., 2020).

Ancak, FDM yöntemiyle üretilen parçalarda katmanlar arasındaki yapışma sorunları veya iç yapıdaki boşluklar nedeniyle mekanik mukavemetin düştüğü gözlemlenmektedir. Bu durum, FDM yönteminin kullanım alanlarını kısıtlamakta ve üretim doğruluğunu olumsuz yönde etkilemektedir. Üretim sonrası ortaya çıkan mekanik özelliklerdeki düşüşlerin tahmin edilebilmesi, fonksiyonel parça üretimi açısından büyük önem taşımaktadır(Bakır vd., 2021; Cuan-Urquizo vd., 2019).

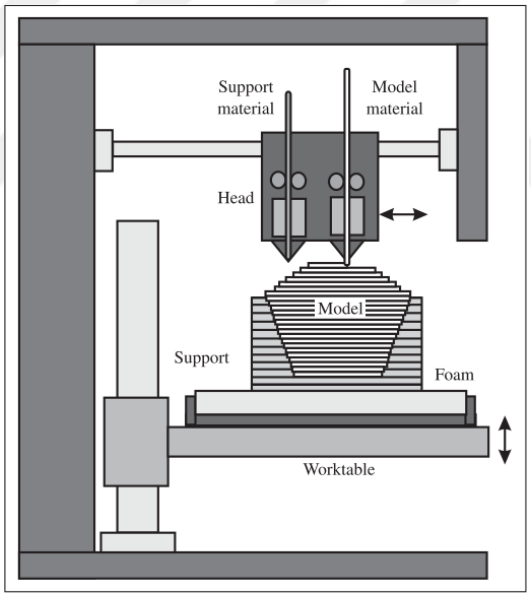
Bu çalışmada, FDM yöntemiyle Ultem 9085 ve Nylon12CF malzemeleri kullanılarak farklı oryantasyon ve tarama açılarında numuneler üretilmiş ve bu numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Bazı numunelerden elde edilen BT görüntüleri kullanılarak, bir nümerik yöntem olan homojenleştirme yöntemi ile üretim sonrası mekanik özelliklerin tahmini yapılmaya çalışılmıştır. Bu süreçte, homojenleştirme yöntemi için gerekli olan hammaddenin mekanik özellikleri filament çekme testlerinden elde edilerek analizlerde kullanılmıştır. Ayrıca, analitik bir yöntem olan klasik laminasyon teorisi (KLT) ile farklı serim açılarındaki mekanik özellikler tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çalışmada, iki farklı tahmin yöntemi değerlendirilmiş; deneysel ve teorik yaklaşımlar arasındaki hata payları hesaplanarak bu farkların olası sebepleri incelenmiştir. KLT ve Homojenleştirme yöntemleri ayrıntılı bir şekilde analiz edilerek, FDM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özelliklerini tahmin etmedeki etkinlikleri karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. FDM Üzerine Genel Literatür İncelemesi

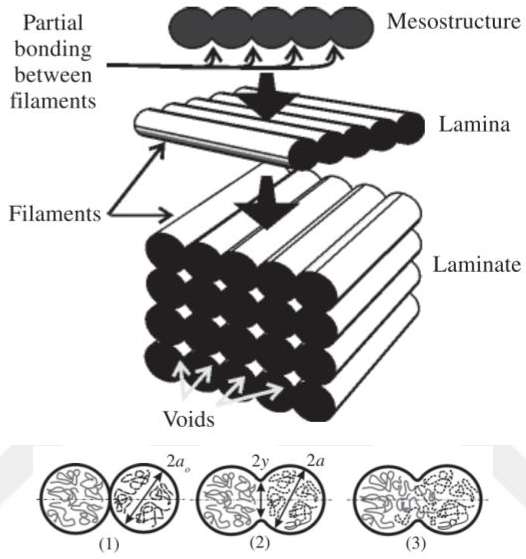
FDM prosesi, yarı-ergimiş filamentin ısıtılmış bir nozuldan belirlenen bir desen doğrultusunda bir platform üzerine katman katman ekstrüzyon edilmesi ile parçaların üretilmesini sağlar (Şekil 2.1). Ekstrüzyon işlemi sırasında, yarı-ergimiş malzeme tablaya yerleştirildikten sonra soğumaya başlar ve çevresindeki malzemelerle difüzyon yoluyla bağlanır (Polimer kaynağı). Aynı katman içindeki yolların birbirine bağlanması ve komşu katmanlar arasındaki bağlantılar, yarı-ergimiş termoplastik malzemenin sahip olduğu termal enerji ile gerçekleşir. FDM süreçlerinde, polyetherimide (PEI) ve polyamide (PA) gibi çeşitli malzemeler kullanılarak prototipler veya işlevsel parçalar üretilir.



Şekil 2.1. FDM üretim prosesi şematik gösterimi (Li vd., 2002)

FDM yöntemi, termoplastik polimerlerin birbiri üzerine kaynak edilmesi prensibine dayanır. Bu nedenle, yöntemi anlamak için polimer kaynak mekanizmasının incelenmesi önemlidir. Yanyana ve üst üste yapılan termoplastik polimer kaynakları ile oluşan nihai parçanın kalitesini yapılan bu termoplastik kaynaklarının kalitesi doğrudan etkilemektedir. (Bellehumeur vd., 2004) healing modeli kullanarak FDM sürecindeki termoplastik polimer kaynaklarını açıklamıştır. Şekil 2.2. ile filamanların yan yana

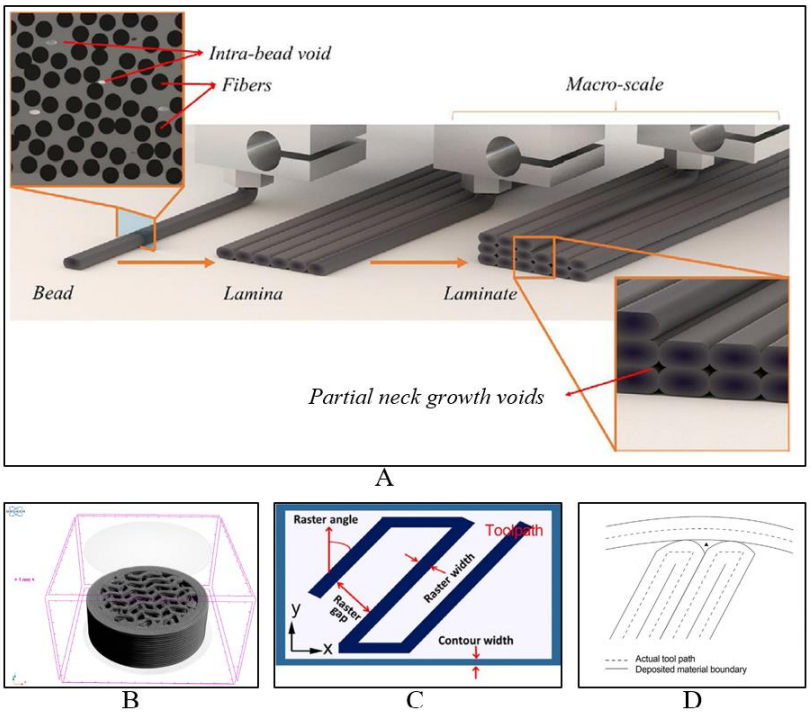
yapışması ile laminalar ve laminaları üst üste yapışması ile laminatlar oluşmaktadır. Yapışma mekanizması üç aşamadan oluşur: 1) Filamentlerin yaklaşması, 2) Polimer zincirlerinin ıslanarak serbestçe hareket etmesi, 3) Zincirlerin birbiriyle karışması. Mekanizmada yapışma kuvvetini, iki filamanın polimer zincirlerinin birbiri ile karışma oranı ve ıslatma miktarının belirleyici olduğu görülmektedir (Sun vd., 2008).



Şekil 2.2. FDM yönteminde polimer kaynağı mekanizması ile katman yapışmasının gösterimi. 1) Yaklaşma 2) Islatma 3) Karışma (Bellehumeur vd., 2004)

Yapılan deneysel çalışmalar, yapışma kuvvetini belirleyen temel parametreleri ortaya çıkarmaya çalışmıştır. Bu parametreler arasında makineden kaynaklanan nozul sıcaklığı, katman kalınlığı, üretim hızı ve fırın sıcaklığı gibi faktörler yer alırken; çevresel faktörler olarak ise nem miktarı, termoplastik polimer türü, katkı miktarı ve türü belirtilebilir. Bu konudaki kapsamlı çalışmaların derlemesi (Bakır vd., 2021; Sanei & Popescu, 2020)'de verilmiştir.(Bähr & Westkämper, 2018) Proses parametrelerini detaylıca incelemiş ve üretilen parçaların mekanik, geometrik ve yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini önem dereceleri ile vermiştir.

Üretim yönteminin doğası gereği parça içerisinde boşluklar oluşmaktadır. Mevcut literatüre göre, (Tao et al., 2021) bu boşluklu yapılar 5 farklı sınıfa ayrılmıştır. Şekil 2.3. ile verilen boşluk yapıları; dolgudaki bitişik filaman çizgileri arasında oluşan boşluklar (raster gap voids), dökülen filamentler arasındaki tam birleşmenin sağlanamamasından kaynaklanan boşluklar (partial neck growth voids), dış çevre veya kabuk altında oluşan boşluklar (sub-perimeter voids), fiber takviyeli matris malzemelerde görülen filament malzemesi içindeki boşluklar (intra-bead voids) ve parçanın dolgu bölgesindeki tasarlanmış boşluklar (infill voids) olarak sınıflandırılmıştır. Boşluklu yapılar mekanik özelliklerde değişime sebep olduğu gibi tahmin edilmesini de zorlaştırmaktadır. Yapışma kuvveti ve boşluklu yapının parçaya kazandırdığı karakteristik davranışlar nedeniyle yöne bağlı mekanik özelliklerin farklılaşmaktadır. Proses parametreleri ve çevresel şartların optimizasyonu ile mekanik özelliklerde iyileştirmeler elde edilebilse bile aynı malzemeden enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen parçalara kıyasla daha düşük mekanik özellikler elde edilmektedir (Dawoud vd., 2016; Rodriguez vd., 2000).



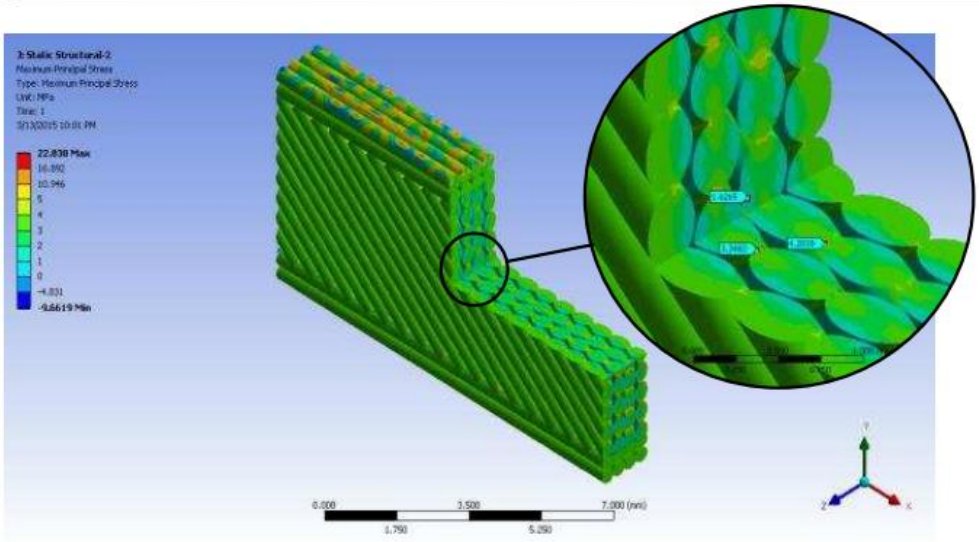
Şekil 2.3. Boşlukların sınıflandırılması A) Fiberli matris içerisindeki boşluklar (Intra-bead voids), filamanlar arası oluşan boşluklar (Partial neck growth voids), B) Tasarımsal boşluklu yapı (Infill Voids), C) Dolgu filamanları arasında oluşan boşluklar (Raster gap voids), D) "▲" İşareti ile gösterilen kısım dolgu ile duvar arasında oluşan boşluklar (sub-perimeter voids) (Tao vd., 2021)

Çalışmada FDM yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin üretim öncesinde tahmin edilmesine yönelik yaklaşımlar derlenmiştir. Yapılan literatür araştırması bu çalışmanın da ana konusu olan çok ölçekli yaklaşımlar ve lamina teorisi şeklinde iki temel kategoriye ayrılmıştır. Bu sınıflandırma dışında kalan yaklaşımlar modelleme yaklaşımları başlığı altında verilmiştir.

2.2. Modelleme Yaklaşımları

Üretim süreci ile birlikte gelen boşluklu yapı, yapışma kuvveti, parça hataları gibi tahmin edilmesi zor durumlar parçaların modellenmesini zorlaştırmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinin çalışma mantığının karmaşık oluşu ile birlikte yalnızca FDM yönteminde değil genel olarak prosesteki bu bilinmezlerin tahmini için literatürde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. (Choren vd., 2013) Boşluklu yapıların modellenmesinde kullanılan analitik ve yarı analitik yöntemlerin eklemeli imalat proseslerine uygulanmasını değerlendirmiştir. Eklemeli imalattaki boşlukların nispeten belirsiz şekillerde oluşu ve heterojen dağılımı teorik modellerin çoğunun uygulanmasını zorlaştırdığı belirtilmiş. (Croccolo vd., 2013) Geliştirdiği analitik modelin kalibrasyonu ve doğrulaması için deneysel verilerden yararlanmıştır. Model homojen ve boşluksuz bir yapı kabulü ile deneysel verilerle maksimum %6,6 elastisite modülünde sapma ile hesaplama yapmıştır. (Garzon-Hernandez vd., 2020) Deneysel temelli bir metodoloji ile farklı üretim parametrelerinin yapıya kattığı özellikleri belirleyip bunlar ışığında mekanik özellikleri öngörmeye çalışmıştır. Kurulan analitik model filamanlar arasındaki yapışmayı, boşluklu yapıyı ve üretim parametrelerini içine alacak şekilde geliştirilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen model deneysel sonuçlar ile %14 ten daha düşük bir hata payı ile uyum göstermiştir. (Zarbakhsh vd., 2015) FDM tezgahı için oluşturulan ve üretim sırasında tezgahın tüm hareketlerini içeren G-code dosyasını kullanarak CAD veri oluşturmuştur. Bu CAD verisi, Şekil 2.4. ile gösterildiği gibi üretim sonrası parçanın iç yapısını ayrıntılı bir şekilde temsil etmiştir. Bu tasarım, yüksek hassasiyetli meshleme teknikleri kullanılarak sonlu elemanlar analizine tabi tutulmuştur. Ancak, bu tür bir analizin çok yüksek hesaplama gücü gerektirdiği vurgulanmıştır. Çalışmada, bu hesaplama yükünün sub-modelleme yöntemiyle azaltılabileceği belirtilmiş, kritik bölgelerdeki detaylı

analizlerin doğruluğu artırılmıştır.(Abbot vd., 2019) Farklı doluluk oranları ve farklı malzemelerle yaptığı basma testlerinden elde edilen malzeme verileri ile sonlu elemanlar analizleri oluşturmuştur. Malzeme modelinin eksik olmasından dolayı elastik bölgede daha doğru sonuçlar vermiştir. (Bhandari & Lopez-Anido, 2018) İç dolgu bölgesindeki kafes yapıları, bir boyutlu uzay çerçeve kafesi (space frame lattice) olarak modellenmiş ve dış çerçeve ise homojen malzeme özelliklerine sahip iki boyutlu kabuk elemanları (shell elements) kullanılarak modellenmiştir. Bu amaçla, ULTEM filamentinin elastisite modülü filament çekme testi ile ve poison oranı FDM ile üretilmiş basma kuponlarının testi ile elde edilmiştir. Basma, çekme ve kesme mekanik özelliklerinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile değerlendirildiği yaklaşımda çekme deneyleri ile maksimum %5,5 hata payı ile analiz gerçekleştirilmiştir.

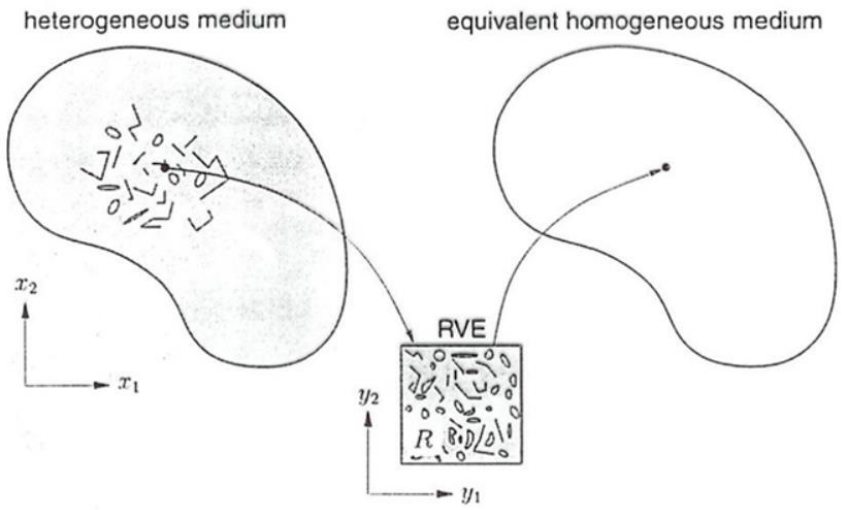


Şekil 2.4. G-Code dosyasından elde edilen tasarım dosyasının sonlu elemanlar analizi gösterimi (Zarbakhsh vd., 2015)

FDM yöntemi ile üretilmiş parçaların modellenmesi üzerine yapılan bu çalışmalarda parçaların karmaşık yapısı, üretimden gelen karakteristik özellikler (boşluklu yapı, yapışma kuvveti gibi), üretimde oluşan hatalar gibi etkilerin simüle edilmesi için gerekli hesaplama yükü çok yüksek olmaktadır. Bu bağlamda literatürde hesaplama yükünü azaltmak ve üretimden gelen hataları da hesaba katabilmek için çok ölçekli yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır (El Moumen vd., 2019).

2.3. Homojenleştirme ve Mikro Yapısal Modeller

Homojenleştirme, heterojen malzemelerin mikro ölçekteki özelliklerini, makro ölçekte eşdeğer ve homojen bir yapı olarak modellenmesidir. Bu sürecin gerçekleştirilmesi için, malzemenin mikro yapısını temsil eden en küçük temsili hacim elemanının periyodik sınır şartları ile detaylı bir şekilde analiz edilmesi gereklidir. Mikro yapının en küçük temsili hacim elemanının makro yapıda eşdeğer homojen malzeme özelliklerinin tanımlanması Şekil 2.5 ile gösterilmiştir. Temsili hacim elemanı, makro ölçekte homojen bir malzeme olarak görülebilmesi için yeterince küçük olmalıdır. Mikro ölçekte ise heterojen mikro yapıyı temsil edebilecek kadar büyük olmalıdır. (Bargmann vd., 2018) Heterojen malzemeler için temsili hacim elamanı oluşturma teknikleri detaylıca incelenmiştir.

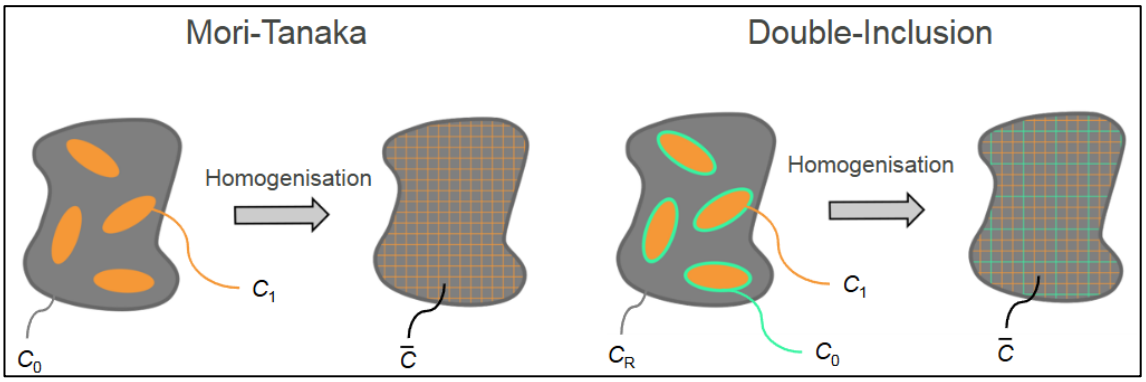


Şekil 2.5 Genel homojenizasyon şematik gösterimi (Nemat-Nasser & Hori, 1993)

Homojenleştirme yaklaşımları analitik ve numerik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Nispeten basit mikro yapıların analizi için analitik yöntemler yeterli gelse bile daha kompleks mikro yapıların analizi için sonlu elamanlar gibi nümerik yöntemlerin uygulanması gerekmektedir (El Moumen vd., 2019; Hassani & Hinton, 1998). Analitik yöntemlerin sonlu elamanlar analizlerine göre en büyük artısı gerekli olan hesaplama miktarının düşük olmasıdır. Her ne kadar sonlu elamanlar analizleri daha doğru sonuçlar

verse bile karmaşık veya gerçekçi mikro yapılar için mesh oluşturmak, kullanıcının zamanı açısından çok zor ve maliyetli olabilir ayrıca non-lineer problemlerde işlemci ve hafıza kullanımı engelleyici olabilir. Analitik yöntemler işlemci ihtiyacının düşük olması ve hızlı cevap verebilmesi açısından tercih edilebilmektedir. Analitik yöntemler arasında en popüler olan Full-Field homojenleştirme ve yarı analitik bir yöntem olan Mean-Field homojenleştirme yöntemleridir. Full-Field homojenleştirme, sabit mikro yapıya sahip heterojen malzemelerin mekanik özelliklerini elde etmek için güçlü bir araçtır. Ancak, takviyeli fiberlerde olduğu gibi, yerel olarak değişken mikro yapılara gelindiğinde hesaplama maliyeti aşırı artmaktadır. Mean-Field homojenleştrime bu soruna bir çözüm sunar. Bu yaklaşım, homojenleştirilmiş gerinim (veya gerilme) alanının fazlardaki ortalama gerinim (veya gerilme) değerlerinden türetildiği, çok fazlı kompozitlerin modellenmesi için verimli bir yarı-analitik yöntemdir (Adam vd., 2020). Ancak bu yöntem yalnızca, gerilme ve şekil değişimlerinin hacim ortalamalarına yaklaşık değerler sunar.

Farklı Mean-Field homojenleştirme modelleri sunulmuştur. Bunlardan en basit olanı Rule of Mixtures yani diğer adı ile Voigt-Reuss modelidir. Bu modelde Temsili hacim elamanı içerisindeki stres dağılımı homojen kabul edilir. Bunu sonucu olarak makro yapıdaki rijitlik mikro yapıdaki ortalama rijitliğe tekabül eder (Musa Batır, 2023).



Şekil 2.6 Mori-Tanaka ve Double-Inclusion homojenleştirme yöntemleri gösterimi

(Eshelby, 1957) Sunduğu matematiksel çözüm ile kompozit malzemelerde efektif elastisite matrisinin hesaplanmasına olanak tanımıştır. Bu matematiksel temele dayanarak

Mori-Tanaka ve Double-Inclusion gibi modeller geliştirilmiştir. Mori-Tanaka modelinde matris malzeme içerisine gömülmüş katkı fiberlerinin yalnızca tek çeşit olduğu ve her bir fiberin aynı özellikte olduğu kabul edilmektedir (Mori & Tanaka, 1973). Mori-Tanaka modeli katkı oranı %50 ve altı için daha doğru sonuçlar vermektedir. Daha yüksek katkı oranlarında Double-Inclusion modelinin kullanımı tavsiye edilmektedir ancak hesaplama yükü yaklaşık iki kat artmaktadır. Double-Inclusion modelinde her bir fiberin (katkı) etrafı matris içerisine gömülü başka bir katman ile çevrilmiştir. Şekil 2.6 ile kabuk-çekirdek modelinin gösterimi verilmiştir burada C_1 katkı maddesini yani fiberi temsil ederken C_0 fiber etrafında oluşan kabuğu temsil etmektedir ve C_R matris malzemesini temsil etmektedir. Bu modelde Mori-Tanaka'nın aksine birden fazla katkı malzemesi modellenebilmektedir.

$$C_{eff} = C_m + V_f(C_p - C_m) \tag{2.1}$$

Formül 2.1 ile Mori-Tanaka yönteminin temel fonksiyonu verilmiştir. Burada C_{eff} homojenleştirilmiş elastik modülü, C_m matris fazının elastik modülü, C_p takviye fazının elastik modülü, V_f takviye fazının hacimsel oranı olarak verilebilir.

Mikro yapının makro davranış üzerindeki etkilerini incelemek üzere temelde, birinci dereceden (First order) ve ikinci dereceden (Second order) olmak üzere iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Birinci dereceden homojenleştirme doğrusal elastik analizler için kullanılır, hızlı ve hesaplama maliyeti düşüktür. Mikro yapıdan kaynaklanan gerilme ve şekil değiştirme farklılıkları (Takviye fiber çevresindeki gerilme ve şekil değiştirme alanları) dikkate alınmaz ve makro ölçekte ortalama gerilme ve şekil değiştirme değerlerini dikkate alır. İkinci dereceden homojenleştirme yönteminde ise mikro yapıda meydana gelen gerilme ve şekil değiştirme gradyanları dikkate alınır ve hesaplama maliyeti birinci dereceden homojenleştirmeye göre daha yüksektir ancak daha yüksek doğruluk ve plastik bölgede analizler yapabilme kabiliyeti gibi sebeplerden dolayı tercih edilebilmektedir (Otero vd., 2015).

Nümerik bir yöntem olan sonlu elemanlar yöntemi analitik yöntemlere kıyasla en doğru sonucu vermektedir. Periyodik sınır şartları uygulanarak mikro yapının makro davranış üzerindeki etkilerinin görülebildiği sonlu elamanlar yönteminde daha karmaşık geometriler modellenebilmektedir. Bu yöntemde en büyük engeli CPU ve hafıza maliyetleri oluşturmaktadır. Sonlu elamanlar yöntemi ile gerçek mikro yapı, temsili hacim elemanı BT görüntüleri ile veya elektron mikroskobu ile oluşturularak daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir (Biswas vd., 2020; El Moumen vd., 2019).
(Dialami vd., 2021) FDM yöntemiyle üretilen parçaların mekanik davranışlarını nümerik homojenleştirme yöntemi ile analiz etmiş deneysel yöntemler ile doğrulamıştır. Parçaları dolgu ve kontur olacak şekilde iki farklı bölgeye ayırmış kontur için izotropik malzeme modeli kullanırken dolgu için homojenleştirme yöntemi ile elde ettiği anizotropik malzeme modeli kullanılmıştır. Çalışma, kontur ve dolgu yapıların mekanik farklılıklarını detaylı bir şekilde ortaya koymuştur

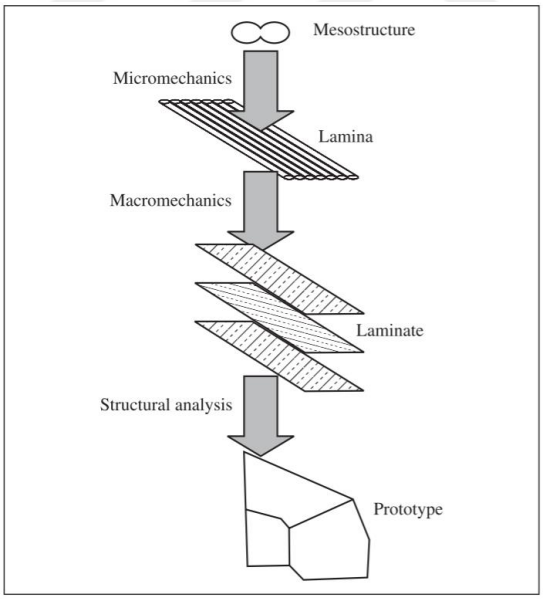
(Dialami vd., 2022) Çalışmada farklı yazdırma desenlerinden kaynaklanan mikro yapısal farklılıkların makro ölçekteki etkisi sonlu elamanlar yöntemi ile homojenleştirme yapılarak ortaya konulmuştur. Yapılan analizlerin doğrulaması deneysel yöntemler ile ortaya konulmuştur. Bulgular yazdırma deseninin malzeme özellikleri üzerinde büyük etkisi olduğunu göstermektedir.

(Rivet vd., 2021) Çalışmada parça kontur, dolgu ve kapak olacak şekilde üç ayrı malzeme olarak tanımlanacak bölgelere ayrılmıştır. Kontur ve kapak bölgelerinin malzeme özellikleri için çekme testleri yapılırken dolgu bölgesinin malzeme özelliklerini belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi ile homojenleştirme yapılmıştır.

2.4. Klasik Laminasyon Teorisi (KLT)

KLT, kompozit malzemelerin yapısal analizinde kullanılan analitik bir yöntemdir. Bu analitik yaklaşımla laminaların özelliklerinden laminatların özellikleri ve parçanın mekanik özellikleri elde edilir (Şekil 2.7). Özellikle katmanlı kompozit malzemelerin elastik özelliklerini ve mekanik davranışlarını tahmin etmek amacı ile geliştirilmiştir. KLT temelinde bazı kabuller yaparak hesaplama yapmaktadır. Her katmandaki

düzlemlerin yükleme sonrasında da düzlemliklerini koruduğu kabul edilir ve bu varsayım kayma deformasyonlarının ihmal edilmesi anlamına gelir. Yüksek kesme kuvvetlerine maruz kalan laminatların analizinde doğruluğu düşmektedir. Parçanın maruz kaldığı deformasyonların elastik sınırlar içerisinde kaldığı varsayılır ve malzeme lineer elastik kabul edilir. Her katmanın malzeme özelliklerinin homojen olarak dağıldığı varsayılır. Boşluklar ve fiber-matris bağlanma kalitesi ihmal edilir, ancak makro düzeyde analiz için yeterli doğruluğu sağlar. Malzeme özellikleri farklı eksenlere göre değişebilir (fiberlerin yönüne bağlı olarak). Katmanlar arasındaki bağlanmanın mükemmel olduğu varsayılır. Katmanların, yük transferini eksiksiz bir şekilde gerçekleştirdiği kabul edilir. Dikey gerilmeler ve şekil değiştirmeler analize dahil edilmez. Düzleme dik bileşenlerin ihmal edilmesi kalın laminatların analizinde ve üç boyutlu gerilme durumlarında doğruluğu düşürmektedir. Her bir katman aynı kalınlıkta kabul edilir ve katmanların kalınlığı yükleme esnasında değişmez.



Şekil 2.7. FDM parçanın laminasyon teorisinde mikro yapıdan parçaya kadar olan ölçekli gösterimi (Li vd., 2002)

KLT uygulamak için laminanın E_1, E_2, ν_{12}, G_{12} sırasıyla E elastisite modülü, ν poisson oranı, G kayma modülü özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Katman kalınlığı (t) ve serim açısı FDM yazıcılarda tarama açısı olacak şekilde bilinmesi gerekmektedir.

Malzemeye ve parçaya dair bu özellikler bilindikten sonra indirgenmiş rijitlik matrisi (Q) formül 2.2 ile hesaplanır.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - v_{12}v_{21}}, \qquad Q_{12} = \frac{v_{12}E_2}{1 - v_{12}v_{21}}, \qquad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - v_{12}v_{21}} \tag{2.2}$$

Burada

$$v_{21} = \frac{v_{12}E_2}{E_1}$$

olarak tanımlanır.

Laminaların serim açısını "θ" (tarama açısı) dikkate alarak global eksene dönüştürmek için dönüşüm matrisi [T] tanımlanmalıdır.

$$[T(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Global rijitlik matrisi $[Q']$ tanımlanır.

$$[Q'] = [T]^{-1}[Q][T] \tag{2.4}$$

[A] düzlem rijitliği, [B] eğilme kayma rijitliği, [D] eğilme rijitliği matrisleri laminatın tüm tabakaları için tanımlanır.

$$[A] = \sum_{i=1}^{n} [Q_i'] \cdot (z_i - z_{i-1}) \tag{2.5a}$$

$$[B] = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} [Q_i'] \cdot (z_i^2 - z_{i-1}^2) \tag{2.5b}$$

$$[D] = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{n} [Q_i'] \cdot (z_i^3 - z_{i-1}^3) \tag{2.5c}$$

Burada z_i tabakanın üst yüzey koordinatı, z_{i-1} tabakanın alt yüzey koordinatı, $[Q_i']$ tabakanın global rijitlik matrisi olarak temsil edilmektedir. Burada [A], [B], [D] matrislerini kullanarak denklem 2.6 ile ε_x bulunur.

$$\begin{bmatrix} N_{\mathrm{x}} \\ N_{\mathrm{y}} \\ N_{\mathrm{xy}} \\ M_{\mathrm{x}} \\ M_{\mathrm{y}} \\ M_{\mathrm{xy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{\mathrm{x0}} \\ \varepsilon_{\mathrm{y0}} \\ \gamma_{xy0} \\ \kappa_{\mathrm{x}} \\ \kappa_{y} \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Burada N düzlem vektörü (N_x, N_y, N_{xy}), M moment vektörü (M_x, M_y, M_{xy}), ε düzlem şekil değiştirme vektörü (ε_x, ε_y, γ_{xy0}), κ eğilme eğrilik vektörü olarak tanımlanmaktadır. Elde edilen eşitlikte x yönünde kuvvete (N_x) değer verilir. Böylece ε_x elde edilir. N_x değerinden gerilme σ_x hesaplanıp, $E_x = \sigma_x / \varepsilon_x$ hesaplanır. Bu değer KLT ile elde edilen kuvvet yönündeki elastisite modülüdür.

(Li vd., 2002) Klasik laminasyon teorisinin filamanlar ve laminalar arasındaki yapışma kuvveti mükemmel kabul edildiğinde FDM parçalara uygulanabileceğini ancak gerçek durumda bu yapışma kuvvetlerinin mükemmel olmadığını belirtmiştir. Klasik laminasyon teorisini filamanların yan yana ve üst üste yapışma faktörlerini tanımlayarak, deneysel ve teorik olarak bulduğu boşluk oranları ile birlikte, hesaplanan elastisite modülleri ile daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır.

(Monaldo & Marfia, 2021) Malzemenin mikro yapı özelliklerini (filament yönelimi, boşluk oranı) makro düzey mekanik davranışlarla ilişkilendiren çok ölçekli bir yaklaşım sunmaktadır. Mikro düzeyde elastoplastik bir model uygulanırken, makro düzeyde lamina teorisi kullanılarak yapıların genel performansı tahmin edilmiştir.

(Magalhães vd., 2014) KLT kullanarak farklı tarama stratejileriyle üretilen FDM numunelerinin elastik modülünü teorik olarak tahmin etmiş ve sonuçları çekme ve eğilme testleri ile karşılaştırmıştır. Çalışma, teorik ve deneysel sonuçlar arasında belirli sapmalar olduğunu göstermiştir. Bu sapmaların temel nedenleri, FDM üretim sürecinin doğasından kaynaklanan boşlukların varlığı ve katmanlar arası yapışma kalitesindeki farklılıklar olarak belirlenmiştir. Teorik model, bu mikro yapısal faktörleri hesaba katmamış, bu da elastik modül tahminlerinde sapmalara yol açmıştır.

(Casavola vd., 2016) FDM parçaların mekanik davranışları KLT ile analiz edilmiştir. Çalışmada, ABS ve PLA malzemelerinden üretilen numunelerde, elastik modül (E_1, E_2), mekanik parametreler KLT yardımıyla teorik olarak tahmin edilmiş ve bu tahminler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Farklı tarama stratejileri için teorik hesaplar, ABS için %1.07, PLA için %5.37 hata ile deneysel verilerle uyum göstermiştir. Bununla birlikte, KLT'nin boşluklar ve katmanlar arası bağlanma kalitesini dikkate almaması, teorik tahminlerdeki hataların sebepleri olarak görülmüştür.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışmalar

Çalışmada kullanılan malzemelerden Polyetherimide (PEI) ticari adı ile Ultem9085 malzemesi amorf yapıda termoplastik bir malzemedir. Yüksek mekanik özellikleri, yanma direnci ve kimyasal dayanımı FDM yönteminde kullanımını oldukça yaygınlaştırmıştır. Üretimi için gerekli ortam koşullarını sağlayabilecek tezgahların maliyetli oluşu sebebi ile yüksek kapasiteli endüstriyel yazıcılar ile üretimi mümkün olmaktadır. Stratasys firmasından filament şeklinde temin edilen malzeme sertifikalı olarak Ultem9085CG (certified grade) ismi ile temin edilmiştir. Çalışmada yalnızca Ultem 9085 ismi ile kullanılmıştır.

Karbon katkılı polyamide12 (PA12) ticari adı ile Nylon12CF malzemesi 35% oranında karbon fiber parçacıklarının PA12 termoplastik malzeme ile karıştırılması sonucu elde edilmiştir. Karbon fiber parçacıklarının yapıya kattığı ekstra rijitlik kullanımını oldukça yaygınlaştırmıştır.

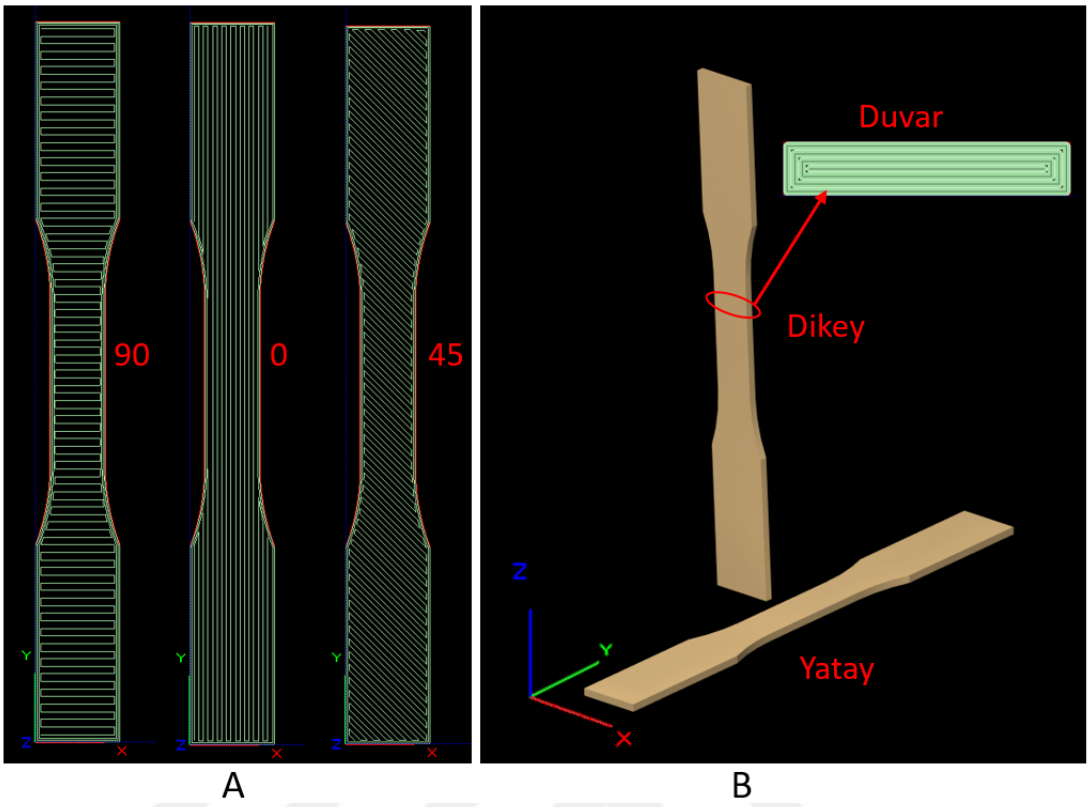
Çalışmada malzeme özelliklerini belirlemede çekme testleri icra edilmiştir. Yapılan çekme testleri Şekil 3.1 ile gösterilen çekme test cihazında video ekstansometre kullanılarak 1 mm/dakika hızda gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri ASTM-D638-Type3 standardına uygun şekilde üretilmiştir (ASTM International, 2022).



Şekil 3.1. Çekme testlerin yapıldığı video ekstansometreli cihaz. A) Ultem9085 numune B) Nylon12CF numune gösterimi

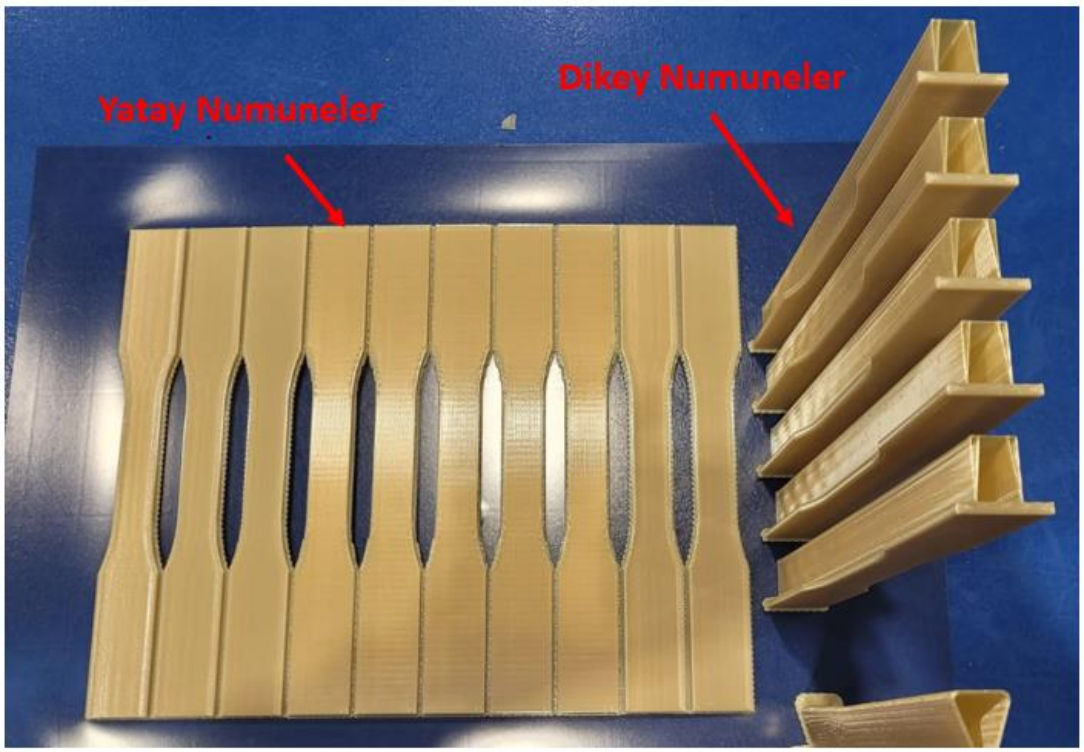
Nylon12CF numunelerden yalnızca yatay oryantasyonda olacak şekilde 0°, 90°, 45°, +45°/-45°, 0°/30°/60°, 0°/90° tarama açılarında dörder adet numune üretilmiştir (Şekil 3.2). Üretimler Stratasys F900 üç boyutlu yazıcısından alınmıştır.

Ultem 9085 numuneler Şekil 3.2 ile gösterilen yatay ve dikey oryantasyonlarda üretilmiştir. Dikey oryantasyonda yalnızca duvar tarama stratejisi ile üretilen numuneler, yatay oryantasyonda üretimlerde ise 0°, 90°, 45°, +45°/-45°, 0°/30°/60°, 0°/90° olacak şekilde üretilmiştir. Numuneler dörder adet olacak şekilde Stratasys F900 üç boyutlu yazıcısında üretilmiştir.



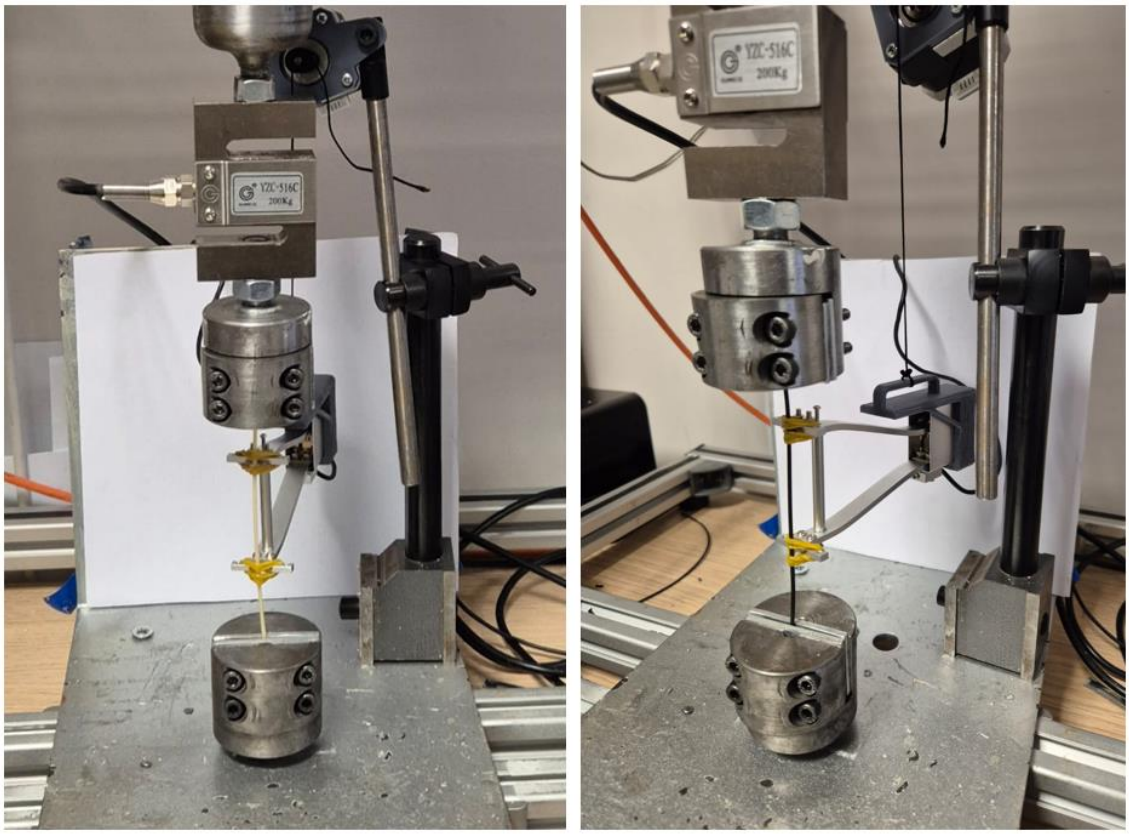
Şekil 3.2. Çekme numunelerinin tarama açısı ve oryantasyonu gösterimi. A) Yatay numuneler için tarama açısı gösterimi B) Üretim oryantasyonu ve dikey oryantasyonda üretilen numunenin tarama stratejisinin gösterimi

Üretimlerin tamamında 0.254 mm katman kalınlığı 0.508 mm filaman genişliği kullanılarak üretilmiştir. Yatay numunelerde bir kontur kullanılmış ve konturun filaman genişliği dolgu yapısı ile aynı alınmıştır. Kontur-dolgu ve dolgu-dolgu arası boşluk sıfır alınmıştır. Ultem 9085 üretimler Stratasys firmasından sağlanan Ultem 9085 malzemeden, T16A nozül ucu kullanılarak üretilmiştir. Nylon12CF numuneler T20C nozül ucu kullanılarak üretilmiştir. Üretimler tamamlandıktan sonra "auto cooldown" prosesi uygulanarak numunelerde termal çarpılma olmasının önüne geçilmiştir. Dikey üretimlerde stabilizasyon duvarı kullanılmıştır. Şekil 3.3 ile Ultem 9085 üretimlerin üç boyutlu yazıcıdan çıktığı halinin görseli paylaşılmıştır.



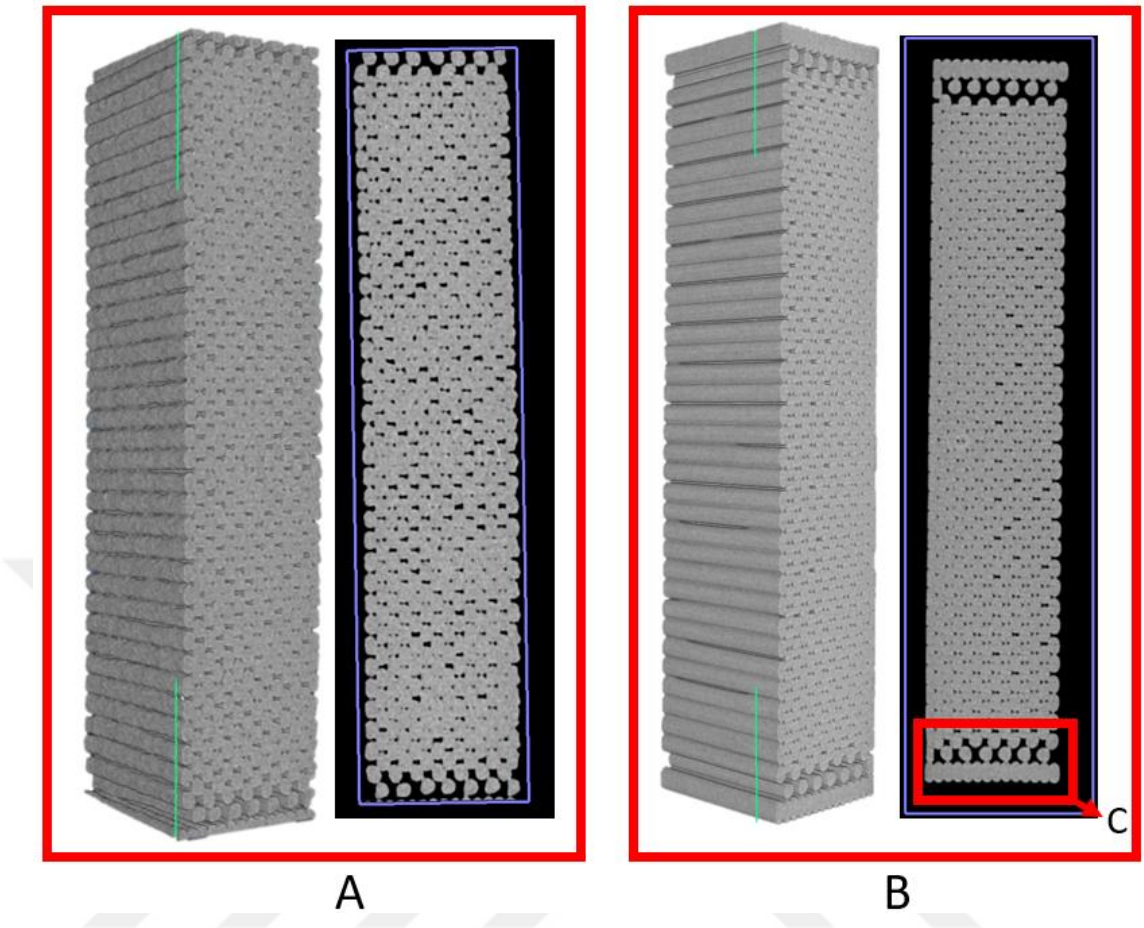
Şekil 3.3. Ultem 9085 yatay ve dikey (stabilizasyon duvarı ile) numunelerin yazıcıdan çıktığı halinin görseli

Malzemelerin FDM prosesi öncesinde elastisite modüllerini belirleyebilmek için filament çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler özel yapım çekme cihazında, temaslı ekstansometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekilde 3.4 ile Ultem 9085 ve Nylon12CF malzemenin filament çekme testlerinin yapıldığı cihaz paylaşılmıştır. Filament çapı TDS'te 1,75 mm olarak belirtilmiştir. Test öncesi dijital kumpas ile numunenin 5 farklı bölgesinden çap ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde ortalama çap 1,80 mm olarak belirlenmiştir. Bu çap değeri gerilmenin hesaplanması için kullanılmıştır. Filamentler çeneye sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Numune sıkışma bölgesinde filamente zarar vermeyecek şekilde, ancak çenelerden kaymasını da önleyecek şekilde bağlanmıştır.



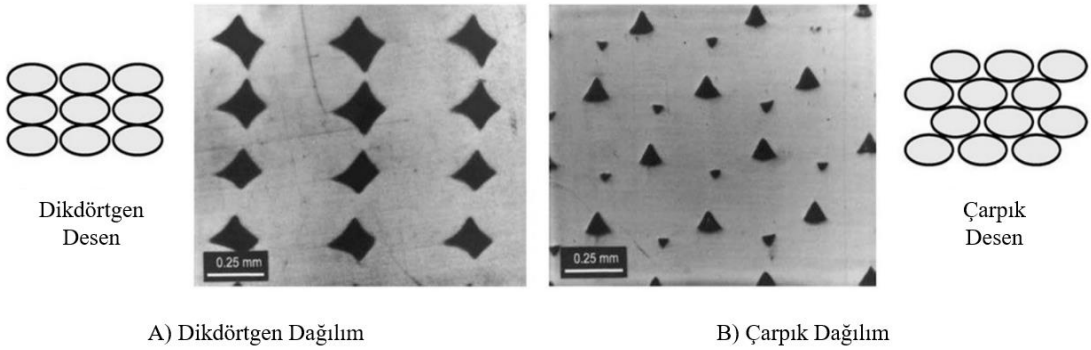
Şekil 3.4. Filament çekme testlerinin gösterimi. A) Ultem 9085 malzeme B) Nylon12CF malzeme

0° tarama açısına sahip yatay test numunelerinin enine kesitinden BT görüntüleri alınmıştır. Görüntüler North Star Imaging X5000 tomografi cihazından alınmıştır. Görüntüler 25.1 mikron çözünürlük ile alınmıştır. MikroCT cihazının kapasitesinin 6 mikron çözünürlüğe kadar inmesine rağmen malzemenin yoğunluğunun düşük olması sebebi ile alınabilecek en yüksek çözünürlükte, 25.1 mikron ile sınırlanmıştır. Şekil 3.5 ile 0° tarama açısı ile yatay üretilen numunelerden BT ile alınan görüntülerin üç boyutlu ve kesit görüntülerinin görseli paylaşılmıştır.



Şekil 3.5. Farklı malzemeler için BT görüntüleri ve boşluklu yapı. A) Nylon12CF 0° yatay numune BT görüntüsü B) Ultem 9085 0° yatay numune BT görüntüsü C) Çarpık desenden dolayı dolgu ve kontur birleşimlerinde oluşan boşluk

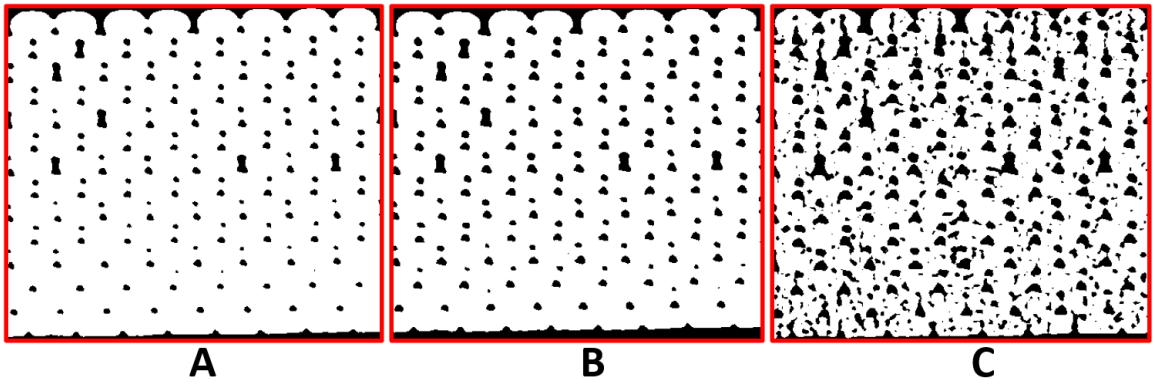
Insight 17.8 yazılımı, parça dilimlemelerini yaptığımız Stratasys firmasının FDM yazıcıları için geliştirdiği dilimleme yazılımıdır. Dilimleme yazılımı varsayılan tarama şekli olarak bir sonraki katmanı bir öncekinin üzerine 90° çevirerek yerleştirmektedir. Bu özellik, XY eksenlerinden mekanik özelliklerdeki değişimi azaltsa bile, çalışmada malzeme özelliklerinin farklı eksenlerde belirlenebilmesi için kapatılması gerekmiştir. Bu özelliğin kapatıldığı 0°, 90° ve 45° numunelerde malzeme fark etmeksizin Şekil 3.5 ile BT görüntülerinde görüldüğü gibi çarpık desen oluşmuştur. Şekil 3.6 ile dikdörtgen ve çarpık desen gösterilmiştir. Tarama açısı her katmanda aynı ayarlandığında otomatik olarak bir üst katmanı filaman genişliğinin yarısı kadar kaydırmaktadır. Bu durum boşluklu yapının azaltılması için gerçekleştirilse bile duvar ve dolgu birleşim noktalarında Şekil 3.5 ile gösterilen boşluğa sebep olmaktadır.



Şekil 3.6. 0°, 45° ve 90° numunelerin kesitinde oluşan çarpık ve dikdörtgen desenlerin gösterimi (Rodriguez vd., 2000)

BT görüntüleri VG Studio Max yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Görüntülere yazılım üzerinde yüzey belirleme işlemi uygulanmıştır. Yüzey belirleme işlemi, elde edilen görüntüde boşluk ve parça bölgelerinin hangi gri değerlerine karşılık geldiğinin tespit edilmesini sağlar. Bu sayede, boşluk oranının hesaplanması ve farklı fazların ayrıştırılması mümkün hale gelir. Yüzey belirleme işlemi Ultem 9085 malzeme için histogramda ortalama değer olan 7,5 iso değerinden ve en üst sınır olan 8,55 iso değerlerinden iki farklı şekilde yapılmıştır. Şekil 3.7'de farklı iso değerlerindeki BT görüntülerinde görüldüğü üzere, iso değeri 8,55'in üzerine çıkıldığında parazitlenmeler meydana gelmiştir. Bu nedenle, 8,55 iso değeri üst sınır olarak belirlenmiştir. Nylon12CF numuneleri için ise yüzey belirleme işlemi 7,0 iso değerinden yapılmıştır. 25,1 mikron voksel veri çözünürlüğüne sahip görüntü üzerinde belirlenen gri değerlerinde malzeme ve boşluk ayrıldıktan sonra, voksel çözünürlüğünü artırmak amacı ile VGStudio yazılımı kullanılarak belirlenen yüzey sınırları üzerinden yüksek çözünürlüklü stl veri oluşturulmuş, bu veri üzerinden 5 mikron voksel çözünürlüğüne sahip yeni hacim verisi oluşturulmuştur. Analizlerde çözünürlüğün etkisini göstermek amacı ile iki veri de kullanılmıştır.

Yüzey belirleme işlemi hesaplanan boşluk oranına doğrudan etki etmektedir. Şekil 3.7 ile görüldüğü gibi belirli bir iso değerinden alınan yüzey sınırları iso değeri değiştikçe daralmakta veya genişlemektedir. Ultem 9085 için bu değerler 7,5 ve 8,55 olarak şekil 3.7'deki gibi belirlenmiş ve iki değer içinde boşluk analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.7. Farklı iso değerlerinde Ultem 9085, 0° numunenin enine kesit görüntüsü. A) 7,5 iso değeri B) 8,55 iso değeri C) 9,5 iso değeri

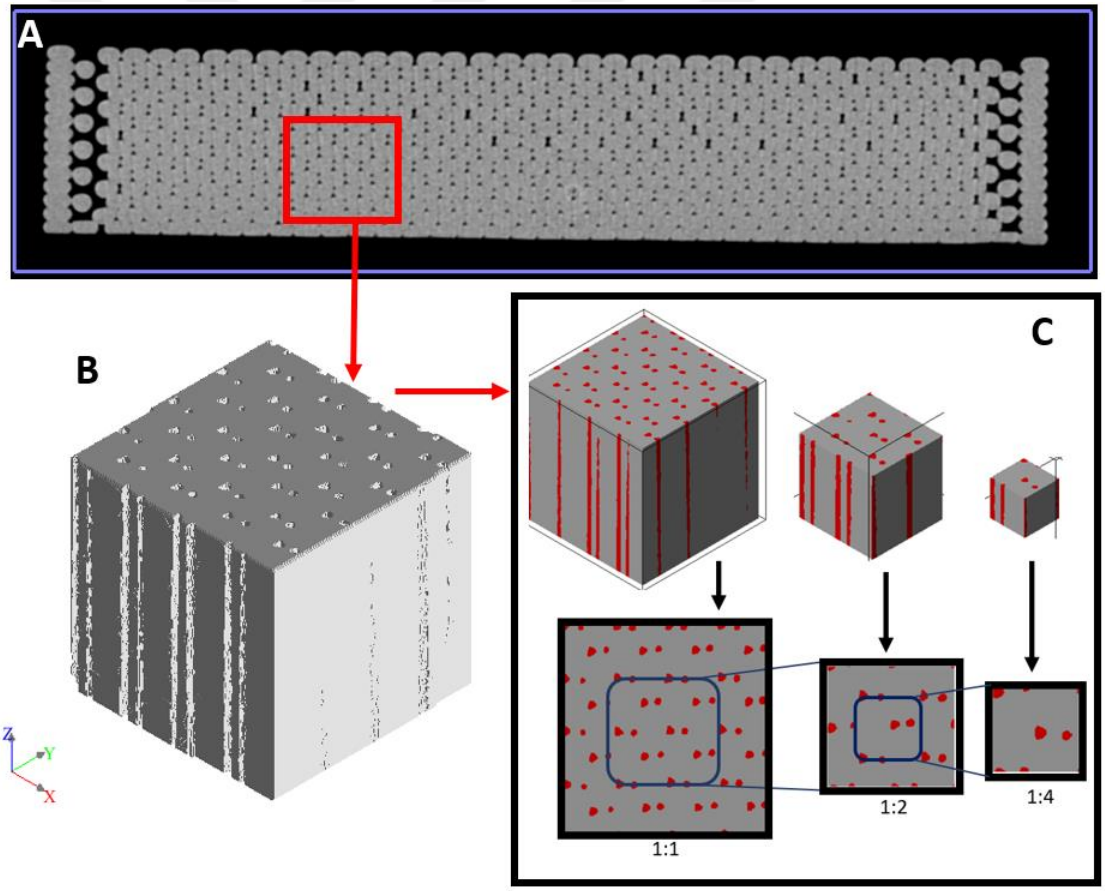
Digimat FE yazılımında homojenleştirme yapılabilmesi için VG Studio Max yazılımından görüntüler RAW veri formatında dışarı alınmıştır. Verilerin Digimat FE yazılımında işlenebilmesi için faz bölgelerini ayıracak binarization (veri çiftleme) işlemi Matlab görüntü işleme aracı üzerinden gerçekleştirilmiştir.

3.2. Homojenleştirme Yöntemi Uygulamaları

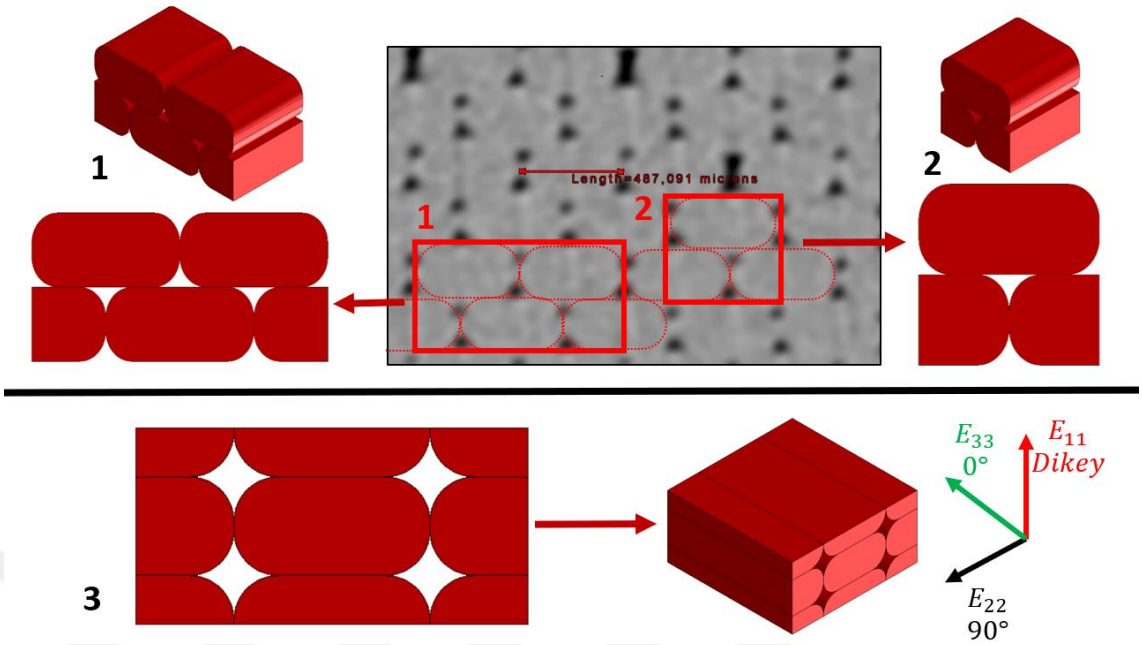
Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan homojenleştirme çalışmaları Digimat-FE yazılımı ile, Mori-Tanaka yöntemi kullanılarak yapılan homojenleştirme ise Digimat-MF yazılımı üzerinden yapılmıştır. Temsili hacim elemanlarının tamamı sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Mori-Tanaka yöntemi ile yapılan homojenleştirme işleminde yalnızca dikdörtgen desene sahip (dikey numune) temsili hacim elamanı modellenebilmiştir. Homojenleştirme çalışmasında kullanılan Ultem 9085 malzeme izotropik ve elastik kabul edilmiştir. Elastisite modülleri filament çekme testlerinden elde edilmiştir. Poison oranı değeri için üretici firmanın sağladığı değerler kullanılıştır (Sabic, 2024).

Temsili hacim elemanları dilimleme yazılımına girilen parametreler ve BT görüntülerinden alınan veriler doğrultusunda ilk olarak el ile çizilmiştir. Ek olarak Şekil 3.8 ile görülen BT görüntülerinden alınan üç farklı ölçekteki temsili hacim elemanları ham hali ile analiz edilmiştir.

Şekil 3.9 ile üretim parametreleri referans alınarak oluşturulan bir ve iki numaralı, çarpık desene sahip temsili hacim elamanları gösterilmiştir. Üç numaralı temsili hacim elemanı dikey numunelerin dikdörtgen deseni için çizilmiştir. Temsili hacim elemanlarının geometrisi, boşluk yüzdesi deneysel verilerle uyum sağlayacak şekilde düzenlenmiştir. Temsili hacim elemanlarının tamamı yapışma bölgelerinde mükemmel yapışma olduğu kabul edilerek ve periyodik sınır şartları uygulanarak çözülmüştür. Çözücü olarak Digimat-FE-FEA kullanılmıştır. Bir ve iki numaralı temsili hacim elemanlarından elde edilen elastisite modülleri 0° ve 90° çekme numunelerinden elde edilen elastisite modülü ile karşılaştırılmıştır. Üç numaralı temsili hacim elemanı Digimat-MF ve Digimat-FE modüllerinde ayrı ayrı analiz edilmiş ve elde edilen elastisite modülleri dikey çekme numunesinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.8. BT görüntülerinden alına üç ölçekteki temsili hacim elemanlarının gösterimi. A) BT görüntüsünden alınan enine kesit görüntüsü, B) Temsili hacim elemanının alındığı kesit bölge, C) Homojenleştirme yapılan ölçekli bölgelerin gösterimi



Şekil 3.9. İdeal temsili hacim elemanları gösterimi. Bir ve iki numaralı çarpık desene sahip ideal temsili hacim elemanları, BT görüntüsü üzerinde gösterilmiştir. Üç numaralı görsel dikey numuneyi temsil eden dikdörtgen desene sahip temsili hacim elemanıdır

BT görüntüsünden elde edilen ham veri, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi, üç farklı ölçekte Digimat FFT (Fast Fourier Transform) çözücüsü ile analiz edilmiştir. BT görüntüsü 25,1 mikron çözünürlükte alındığı için, ilk aşamada 25,1 mikron boyutunda voksel mesh kullanılmıştır. Ancak, voksel mesh kalitesini artırmak için VGStudio-Max yazılımı kullanılarak hacim verisi STL formatına dönüştürülmüş ve ardından 5 mikron boyutunda yeni bir voksel mesh oluşturulmuştur. Bu uygulama sayesinde BT görüntüsünün 25,1 mikron olan voksel çözünürlüğü 5 mikrona indirgenmiş ve yapılan analizlerde daha tutarlı sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir

3.3. Klasik Laminasyon Teorisi Uygulaması

Laminasyon teorisinin uygulanması için gerekli olan E_1, E_2, G_{12} değerleri çekme testleri ile elde edilmiştir ve v_{12} değeri literatürden alınmıştır (Polyzos, Ravindranath, vd., 2021). E_1 ve E_2 değerleri için 0° ve 90° numunelerden elde edilen elastisite modülü kullanılmıştır. G_{12} kesme modülü 45° numuneden Formül 3.1 ile alınmıştır.

$$\frac{1}{G_{12}} = \left(\frac{4}{E_x} + \frac{2v_{12}}{E_1}\right) - \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right) \tag{3.1}$$

Burada Nylon12CF malzeme için E_1=14364 MPa, E_2=3610 MPa, E_x=4319 MPa, $v_{12} = 0{,}42$, değerleri kullanılırsa, G_{12} = 1567 MPa olarak bulunur.

Formül 2.4 ile verilen A, B, D matrislerinin hazır yazılmış kodlar kullanılarak hesaplanmıştır. (Engineering Fundamentals, 2025). Formül 2.5 ile verilen denklemin açık hali ve ters matris alınmış hali Formül 3.1 ile görülebilir. Burada A, B, D matrisleri yerine konulmuş ve ters matris işlemleri Microsoft Excel kullanılarak yapılmıştır.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{33} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

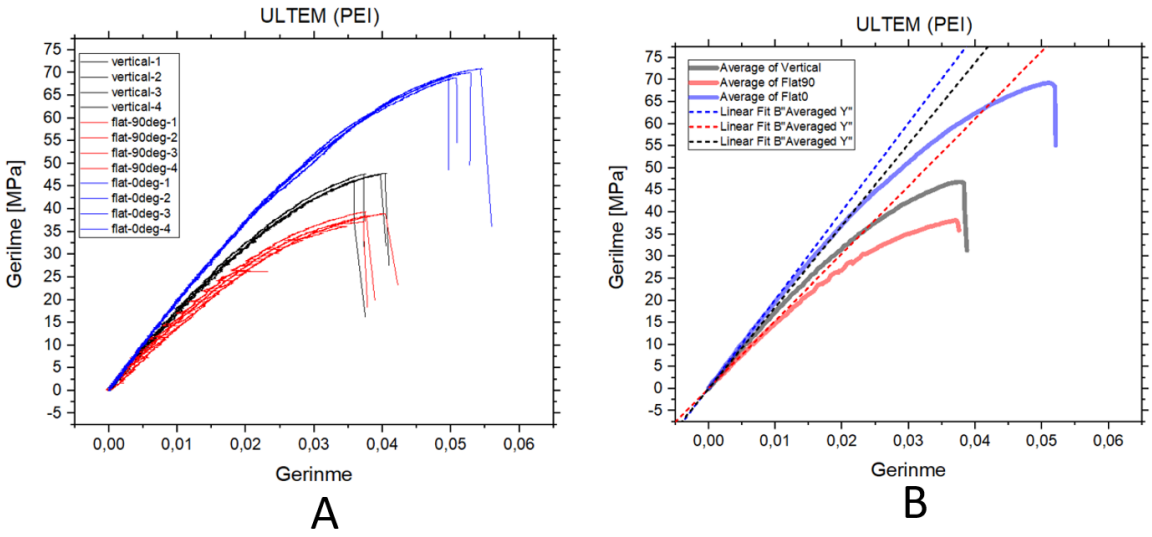
Eşitlikte x yönündeki kuvvete (N_x) değer verilir ve ε_x elde edilir. N_x değerinden gerilme (σ_x) hesaplanır. $E_x = \sigma_x / \varepsilon_x$ formülü ile elastisite modülü hesaplanır. Bu değer KLT metodu ile hesaplanan kuvvet yönündeki elastisite modülüdür.

Her bir katmanın kalınlığı 0,254 mm alınarak ve numunelerde 15 katman olduğunu göz önüne alarak 45°/-45°, 0°/90°, 0°/30°/60° tarama açılarına sahip çekme numunelerinin elastisite modülleri KLT'ye göre tahmin edilir. Sonrasında deneysel veriler ile karşılaştırılır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

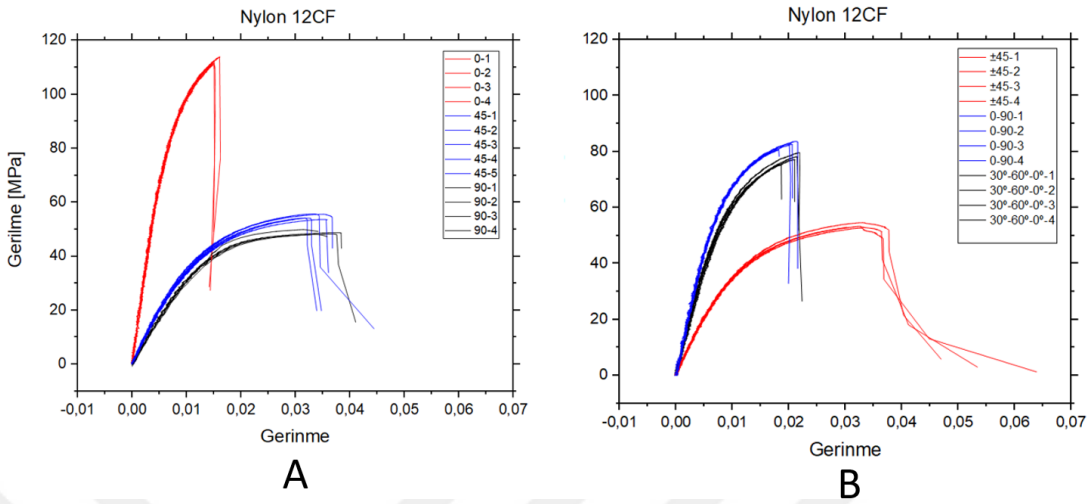
4.1. Deneysel Sonuçlar

Ultem 9085 numuneler için çekme testinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.1 ile sunulmuştur. 0, 90 ve dikey tarama stratejisine sahip numuneler için alınan test sonuçlarında, dikey oryantasyonda üretilen numuneler, ortalama 47 MPa maksimum çekme dayanımı gösterirken, yatay oryantasyonda ve 90° tarama açısında üretilen numunelerin maksimum çekme dayanımı ortalama 40 MPa olarak gözlemlenmiştir. Çekme yönüne paralel 0° tarama açısına sahip numuneler ise ortalama 70 MPa ile en yüksek maksimum çekme dayanımına ulaşmıştır. Elastisite modülleri, Şekil 4.1'de verilen ortalama çekme eğrilerine doğrusal eğri uydurma ve hesaplanan eğim ile elde edilmiştir. Deneysel verilerden hesaplanan elastisite modülleri ortalama, dikey oryantasyonda üretilen numuneler için 1848 MPa, 90° tarama açısına sahip numuneler için 1527 MPa ve 0° tarama açısına sahip numuneler için 2001 MPa olarak bulunmuştur. Çizelge 4.1'de, deneysel verilerden elde edilen elastisite modülleri ve maksimum gerilme değerleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Ultem 9085 çekme testi eğrileri. A) Ultem 9085 malzeme 0°, 90° ve dikey numune çekme eğrileri. B) 0°, 90° ve dikey numunelerin ortalama çekme eğrileri ve doğrusal eğri uydurma yöntemi

Nylon12CF numuneler için çekme testinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.2 ile sunulmuştur. Maksimum gerilme değeri her eğriden ayrı ayrı belirlenip ortalamaları alınmıştır. Nylon12CF numuneler için çekme testlerinden elde edilen maksimum gerilme değerleri ve elastisite modülleri Çizelge 4.1 ile verilmiştir.

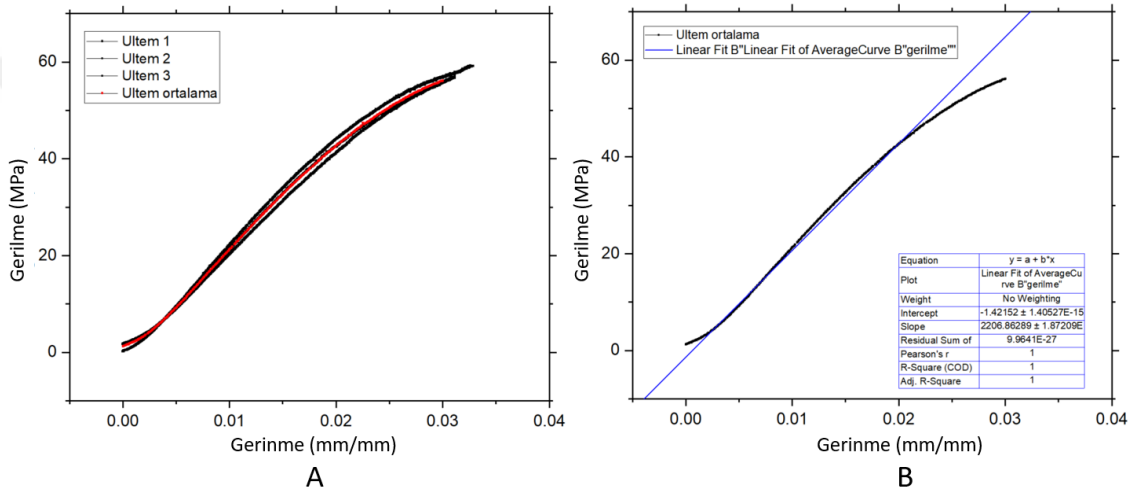


Şekil 4.2. Nylon12CF malzeme içi çekme testi eğrileri. A) 0°, 45°, 90° numuneler. B) ±45°, 0°/90°, 0°/30°/60° numuneler

Çizelge 4.1. Çekme numuneleri için ortalama eğrilerden elde edilen elastisite modülleri ve maksimum gerilmeler

Malzeme	Numune	Elastisite Modülü (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)
Ultem 9085	Dikey	1848	47.2
	0°	2001	69.5
	90°	1527	38
	30/60/0	2212	63,5
	45/-45	2131	58,5
	0/90	2218	61,6
Nylon12CF	0°	14364	113,2
	90°	3610	50,5
	45°	4319	56,7
	45°/-45	4385	55,5
	0°/90°	9417	84,5
	0°/30°/60°	8027	79,8

Filament çekme testlerinden elde edilen gerilme şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.3 ile verilmiştir. Ultem 9085 filament için yapılan testlerde ortalama elastisite modülü 2200 MPa olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.2 ile filament çekme testlerinden elde edilen ortalama elastisite modülleri verilmiştir. Ultem 9085 malzemenin poison oranı değeri üretici firmanın verilerinden alınmıştır (Sabic, 2024). Nylon12CF malzemenin poison oranı değeri literatürden alınmıştır (Polyzos, Van Hemelrijck, vd., 2021). Nylon12 CF malzeme için yoğunluk değerinde ise üretici firmanın verileri kullanılmıştır (Stratasys, 2017).



Şekil 4.3. A) Ultem 9085 filament çekme testi eğrileri. B) Ortalama eğri üzerinden elastisite modülü çıkarma.

Çizelge 4.2. Filament çekme testlerine ait analizlerde kullanılan mekanik özellikler

Mekanik Özellik	Ultem 9085	Nylon12CF
Elastisite Modülü	2200 MPa	10547 MPa
Yoğunluk	1,34 g/cm^3	1,07 g/cm^3
Poison Oranı	0,34	0,42

Yoğunluk ölçümleri filament üzerinden deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. 290 mm uzunluğunda Ultem 9085 filament Sartorius marka kalibrasyonlu tartı ile 0,01 gr hassasiyetle tartılmıştır. Filament çapı ortalama 1,75 mm olarak alınmış ölçüm sonucunda ağırlık 0,94 gr elde edilmiştir ve yoğunluk 1,34 gr/cm^3 olarak hesaplanmıştır.

Ultem 9085 malzemesi için, Şekil 3.8'de gösterilen 7,5 ve 8,55 iso değerlerinde numunenin enine kesitindeki boşluk oranları VG Studio Max yazılımı vasıtası ile sırasıyla %8,81 ve %11,5 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.8'de gösterilen dolgu bölgesinden alınan 2x2x2 mm kesit üzerinden, iso 7,5 ve 8,55 değerleri için boşluk oranları sırasıyla %5,61 ve %8,38 olarak hesaplanmıştır. Çarpık desenin dolgu bölgesinde boşluk oranını azalttığına dair çalışmalar bulunmakla birlikte (Rodriguez vd., 2000), ASTM-D638-Type3 numunesinin ölçüm uzunluğu (gauge lenght) kısmından alınan tam kesit görüntüsü, 2x2x2 mm'lik dolgu bölgesinden alınan kesit ile karşılaştırıldığında, dolgu ve kontur bölgelerindeki boşluğun ortalama %3,16 oranında arttığını gözlemlenmiştir. Bu durum Çizelge 4.3'te özetlenmiştir.

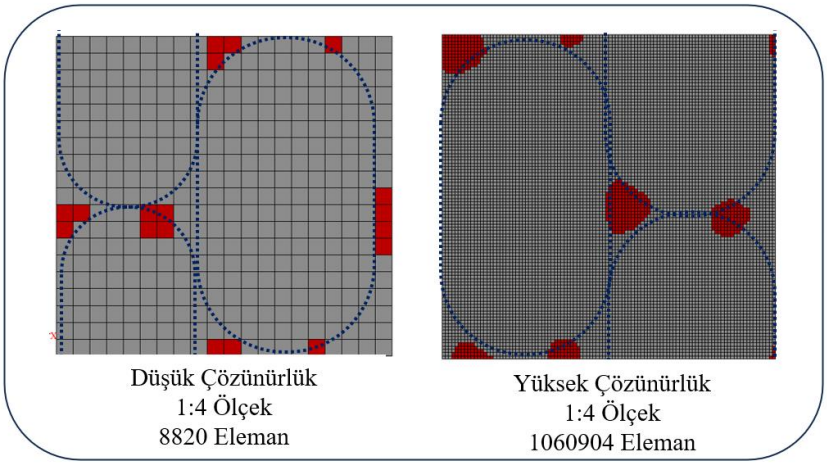
Çizelge 4.3. Farklı iso değerlerinde BT görüntülerinden elde edilen boşluk oranları ve çarpık desenden kaynaklı boşluk artışı

Malzeme	İso Değeri	Hesaplama Alanı	% Boşluk	% Fark
Ultem 9085	7,5	Tüm Kesit	8,81	3,2
	7,5	Doldurma Bölgesi Kesit	5,61	
	8,55	Tüm Kesit	11,5	3,12
	8,55	Doldurma Bölgesi Kesit	8,38	
Nylon12CF	7,0	Tüm Kesit	11,4	3,4
	7,0	Doldurma Bölgesi Kesit	8	

4.2. Homojenleştirme Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar

Ultem 9085 malzeme için homojenleştirme yöntemi ile elde edilen elastisite modülü sonuçları Çizelge 4.4 ile sunulmuştur. Homojenleştirme sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılmasında elde edilen farklar yüzdesel olarak ifade edilmiştir. İdeal temsili hacim elemanları Şekil 3.9 ile verilen geometrilerdir. İdeal 1 ve İdeal 2 hacim elemanlarında elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bu durum, ideal hacim elemanındaki ölçek değişiminin analiz sonuçlarının doğruluğunu etkilemediğini göstermektedir. Benzer şekilde, BT görüntülerinden farklı ölçeklerde alınan temsili hacim elemanlarıyla yapılan analizlerde de ölçek farkının analiz sonucunu etkilemediği gözlemlenmiştir.

BT cihazından gelen 25,1 mikron voksel çözünürlüğü elde edilen görüntüler farklı ölçeklerde analiz edildiğinde tutarsız sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 4.5). Görüntü yeniden işlenip çözünürlük 5 mikron seviyesine indirildiğinde ölçek farkından kaynaklı sonuçlarda tutarsızlığın ortadan kalktığı görülmüştür. BT görüntüsünden alınan çözünürlük, Şekil 4.4 ile çözünürlük farkının geometrideki etkisi gösterildiği gibi ölçek azaldıkça hacim elemanını doğru şekilde temsil edilememiştir.



Şekil 4.4. Düşük ve yüksek çözünürlük oranlarında BT görüntüsü gösterimleri. Kırmızı alanlar boşluk, gri alanlar malzemeyi temsil etmektedir

Çizelge 4.4. Ultem 9085 malzeme için, ideal geometriler ve farklı iso değerlerindeki BT görüntülerinin homojenleştirme analiz sonuçları

Numune		**E_{11} [MPa] (Dikey)**	**E_{11} %Hata**		**E_{22} [MPa] (90°)**	**E_{22} %Hata**		**E_{33} [MPa] (0°)**	**E_{33} %Hata**	
İdeal 1		1058	Deneysel E_{11}= 1848 MPa	**-42,7**	1579	Deneysel E_{22}= 1527 MPa	**3,4**	2016	Deneysel E_{33}= 2001 MPa	**0,7**
İdeal 2		1031		**-44,2**	1476		**-3,3**	2016		**0,7**
İdeal 3		1686		**-8,7**	1538		**0,7**	2016		**0,7**
İso 7,5	**BT 1:1**	1994		**7,9**	1989		**30,2**	2125		**6,2**
	BT 1:2	1997		**8,0**	1993		**30,5**	2131		**6,5**
	BT 1:4	1996		**8,0**	1998		**30,8**	2130		**6,4**
İso 8,55	**BT 1:1**	1857		**0.4**	1833		**20,0**	2066		**3,2**
	BT 1:2	1864		**0,8**	1834		**20,1**	2074		**3,6**
	BT 1:4	1851		**0,1**	1853		**21,3**	2073		**3,6**

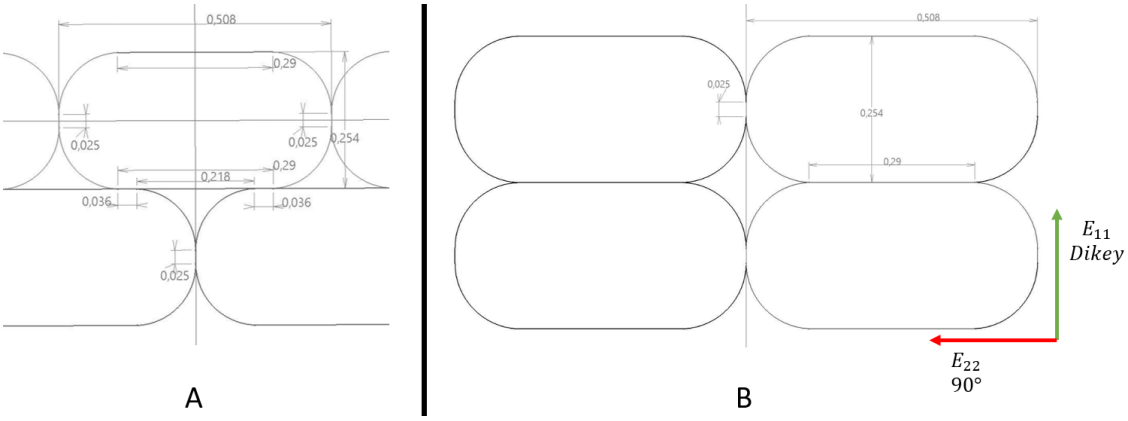
Çizelge 4.5. Düşük çözünürlüklü temsili hacim elemanlarında ölçek farkının analiz sonuçlarına etkisi

Numune	E_{11} [MPa] (Dikey)	E_{11} %Hata	E_{22} [MPa] (90°)	E_{22} %Hata	E_{33} [MPa] (0°)	E_{33} %Hata
BT Ölçek 1:1	1857	**0.4**	1811	**18.5**	2072	**3.5**
BT Ölçek 1:2	1861	**0.7**	1788	**17.0**	2067	**3.2**
BT Ölçek 1:4	1934	**4.6**	1918	**25.6**	2092	**4.5**

Çizelge 4.4 ile çarpık deseni temsil eden İdeal 1 ve İdeal 2 temsili hacim elemanlarından elde edilen sonuçlar, E_{22} ve E_{33} yönlerindeki deneysel verilerle uyum göstermektedir. Ancak, E_{11} yönündeki deneysel sonuçların dikdörtgen desenli dikey numuneden alınmış olması, çarpık deseni temsil eden İdeal 1 ve İdeal 2 elemanlarının dikey yöndeki elastisite modüllerinde deney sonuçlarıyla uyumsuzluk oluşmasına neden olmuştur.

Öte yandan, İdeal 3 temsili hacim elemanı, tüm yönlerde deneysel sonuçlarla en yüksek uyumu sağlayan model olmuştur. İdeal 2 ve İdeal 3 elemanları arasındaki bu farklılık, E_{33} yönünde yapışma yüzeyindeki azalmayla ilişkilidir (Şekil 4.5). Çarpık desenli ideal hacim elemanlarında E_{11} yönünde toplam dikey yapışma uzunluğu 0,072 mm (0,036 + 0,036 mm) olarak hesaplanırken, dikdörtgen desende bu alan 0,29 mm'ye ulaşmaktadır. Yanal yapışma uzunluklarının her iki desende de 0,025 mm olarak sabit kaldığı belirlenmiştir.

Bu farklılık, İdeal 3 temsili hacim elemanı için yapılan analizlerde elastisite modüllerinin artmasına yol açmış ve deneysel sonuçlarla daha iyi bir uyum sağlanmasına katkıda bulunmuştur.



Şekil 4.5. İdeal 1-2 ve ideal 3 temsili hacim elemanlarında dikey ve yanal yapışma uzunluklarının gösterimi A) Çarpık desen (İdeal 1-2) B) Dikdörtgen desen (İdeal 3)

İdeal 3 temsili hacim elemanının Mori-Tanaka yöntemiyle birinci dereceden yapılan analiz sonuçları ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarının karşılaştırması Çizelge 4.6'da sunulmuştur. Aynı temsili hacim elemanı için iki farklı homojenleştirme yönteminden elde edilen sonuçlar arasındaki E_{11} ve E_{22} yönlerindeki farklılık, Bölüm 2.3'te açıklanan analitik yöntemlerin varsayımsal yaklaşımından kaynaklanmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi, doğrudan çözüm sunduğundan homojenleştirme sürecinde daha doğru sonuçlar vermektedir. Ancak, karmaşık geometrilere sahip yapılar için sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm üretmek yüksek hesaplama maliyeti gerektirdiğinden, Mori-Tanaka gibi analitik yöntemler varsayımsal yaklaşımlarıyla kabul edilebilir bir hata payı içinde çözümler sunabilmektedir.

Çizelge 4.6. İdeal 3 temsili hacim elemanının Mori-Tanaka ve sonlu elemanlar yöntemi ile homojenleştirme sonuçları

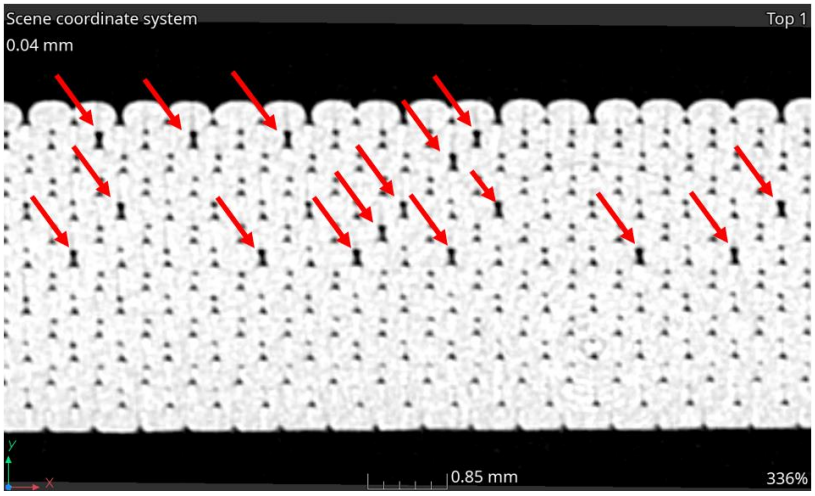
Numune	**E_{11} (Dikey) MPa**	**E_{11} Hata**	**E_{22} (90°) MPa**	**E_{22} Hata**	**E_{33} (0°) MPa**	**E_{33} Hata**
Mori-Tanaka	1607	**-13%**	1401	**-8,2%**	1996	**-0,2%**
Sonlu elemanlar	1686	**-8,7%**	1538	**0,7%**	2016	**0,7%**
Analitik ve Nümerik Karşılaştırma	**4.6%**		**8.9%**		**1%**	

BT görüntüleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, iso değerindeki artışın boşluk oranını %5,61'den %8,61'e yükselttiği gözlemlenmiştir. Bu durum, analiz sonuçlarında iso 7.5 ile alınan temsili hacim elemanının, iso 8.55 ile alınan hacim elemanına kıyasla her yönde daha yüksek elastisite modülü değerine sahip olmasıyla sonuçlanmıştır. Şekil 4.7'de de görüldüğü üzere, iso değerindeki artış, temsilî hacim elemanında yapışma arayüzlerinin azalmasına neden olmuş ve bu durum, elastisite modüllerinin düşmesine yol açmıştır. Boşluk oranı arttıkça, deneysel sonuçlarla elde edilen uyumun da arttığı belirlenmiştir.

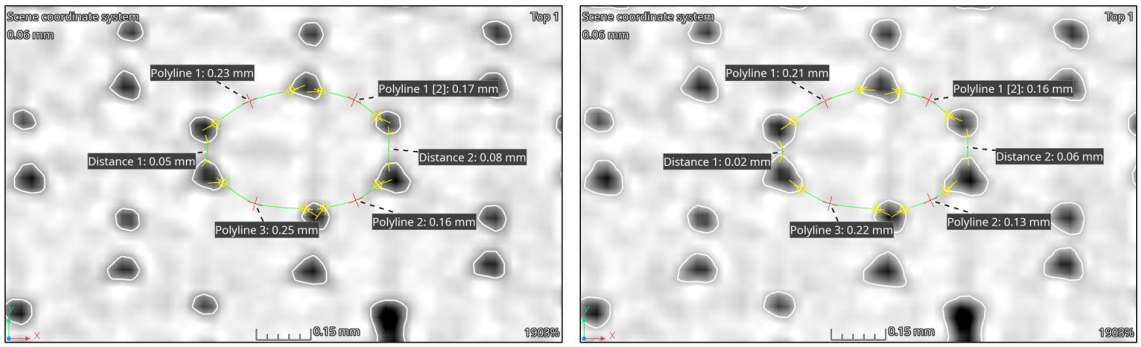
Çarpık desene sahip numuneden elde edilen BT görüntülerine dayalı analizlerde, E_{22} ve E_{33} yönlerinde deneysel verilerle yüksek uyum sağlanması beklenirken, E_{22} yönünde hesaplanan elastisite modülü deneysel sonuçlarla %20 hata payı ile elde edilmiştir. Hata payının sebepleri arasında Şekil 3.8 ile gösterilen temsili hacim elemanının alındığı kesit bölgesinin, Şekil 4.6'daki üretim hatalarının bulunmadığı bölgeden alınmış olması bulunmaktadır. Ayrıca yapışma arayüzlerinin mükemmel bağlandığı varsayımı ile analizlerin gerçekleştirilmesi, elde edilen bu hata payının sebepleri arasındadır. Bu faktörler, özellikle yanal yöndeki deneysel sonuçlarla olan uyumsuzluğu açıklamaktadır. Ancak, dikey yönde elde edilen elastisite modülü, dikdörtgen desene sahip deney numunesinden elde edilen sonuçlarla uyumlu bulunmuştur.

Çizelge 4.7. İdeal ve BT temsili hacim elemanlarının farklı tarama desenlerinde yapışma yüzeyi uzunluğu ile toplam yüzey uzunluğu oranları

Temsili Hacim elemanı	**Desen**	**Yanal Yapışma uzunluğu (mm)**	**Yapışma/Yanal uzunluk oranı**	**Dikey yapışma uzunluğu (mm)**	**Yapışma/Dikey uzunluk oranı**
İdeal	Çarpık	0,025	0,098	0,072	0,14
	Dikdörtgen	0,025	0,098	0,29	0,57
BT (Çarpık)	İso 8.55	0,04	0,16	0,36	0,70
	İso 7.5	0,07	0,27	0,40	0,79



Şekil 4.6. BT görüntülerinde yanal yapışmanın olmadığı bölümler işaretlenmiştir.



A B

Şekil 4.7. BT görüntüsünün 1903% ölçekte büyütülmüş halinin farklı iso değerlerinde filaman yapışma arayüz bölgesi ölçümleri. A) İso 7.5 B) İso 8.55

İdeal geometri üzerinde gerçekleştirilen yapışma yüzeyi analizi, BT görüntüleri üzerinde de uygulandığında (Şekil 4.7), dikey yapışma bölgelerinin ideal temsili hacim elemanlarından önemli ölçüde yüksek olduğu tespit edilmiştir. İso 8.55 değeri için ortalama dikey yapışma uzunluğu 0,36 mm, yanal yapışma uzunluğu ise 0,04 mm olarak hesaplanırken, iso 7.55 için bu değerler sırasıyla 0,40 mm ve 0,07 mm olarak belirlenmiştir. Her iki iso değerinde, ideal temsili hacim elemanlarına kıyasla daha büyük yapışma arayüzleri gözlemlenmiştir. Yapışma uzunluklarını ve bunların toplam uzunluğa oranlarını içeren özet Çizelge 4.7 ile paylaşılmıştır. Bu durum, BT görüntüleri kullanılarak yapılan homojenleştirme sonuçlarının, ideal geometrilerden elde edilen değerlere kıyasla daha yüksek çıkmasının temel nedeni olarak değerlendirilmiştir.

İdeal 3 temsili hacim elemanının, İdeal 2'ye kıyasla daha yüksek yapışma arayüzlerine sahip olması, gerçek görüntülerle olan uyumunu artırmış ve Çizelge 4.4 ile gösterilen analiz sonuçlarının deneysel verilere daha yakın çıkmasını sağlamıştır.

Iso 8.55 BT görüntülerinde, E_{33} yönünde elde edilen ortalama %3,6'lık hata payının, kontur ve dolgu arasında oluşan fazladan boşluktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu boşluk, Çizelge 4.3 ve Şekil 3.5'te gösterilen temsili hacim elemanında bulunmamakta, ancak test numunesinde gözlemlenmektedir.

Şekil 4.6'da görülen enine kesit BT görüntüsünde, üst katmanlara doğru yanal yapışmanın olmadığı üretim hatalarının sayısının ve katmanlar arası boşluğun arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, tezgah kalibrasyonundaki yetersizlikler olarak değerlendirilmektedir. Nozül ile tabla arasındaki mesafenin yeterli hassasiyette ayarlanamaması, kalibrasyon hatalarına yol açarak analiz sonuçlarında sapmalara neden olmaktadır.

4.3. Klasik Laminasyon Teorisi

Örnek olması açısından 30°/60°/0° tarama stratejisine sahip numunelerin KLT yöntemi ile elastisite modülünün çıkartılışı verilmiştir. Bölüm 2.4 ile teorik temelleri verilen KLT metodu uygulaması için gerekli E_1, E_2, v_{12}, G_{12} verileri deneysel olarak elde edilmiştir. E_1= 14360 MPa, E_2= 3610 MPa, G_{12}= 1567 MPa değerleri deneysel testlerden elde edilen değerlerdir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{33} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

A, B, D matrisleri yerine konulur ve N_x=10 olacak şekilde kuvvet verilirse denklem 4.2 elde edilir

$$\begin{bmatrix} 0{,}304975545 \\ -0{,}100686666 \\ -0{,}122976974 \\ 0{,}019405037 \\ -0{,}004458662 \\ -0{,}027103744 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 39{,}06 & 10{,}63 & 6{,}336 & -1{,}512 & 0{,}5826 & 1{,}141 \\ 10{,}63 & 24{,}43 & 6{,}336 & 0{,}5826 & 0{,}3466 & 0{,}4683 \\ 6{,}336 & 6{,}336 & 10{,}56 & 1{,}141 & 0{,}4683 & 0{,}5826 \\ -1{,}512 & 0{,}5826 & 1{,}141 & 47{,}69 & 12{,}81 & 7{,}682 \\ 0{,}5826 & 0{,}3466 & 0{,}4683 & 12{,}81 & 29{,}2 & 7{,}511 \\ 1{,}141 & 0{,}4683 & 0{,}5826 & 7{,}682 & 7{,}511 & 12{,}72 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Burada 0,304975545 değeri ε_x değerini temsil etmektedir. Katman kalınlığı 0,254 mm 15 katman ise 0,254 x 15= 3,81mm toplam kalınlık gelmektedir. $\sigma_x = N_x \,/\, A$ buradan $\sigma_x = 2{,}62467$ GPa bulunur. Elastisite modülü buradan $E_x = \sigma_x \,/\, \varepsilon_x$ formülü ile E_x = 8606 MPa olarak bulunur. Bu değer 0°/30°/60° tarama açılarına sahip numunenin KLT yöntemi ile bulunan elastisite modülü değeridir.

Nylon12CF ve Ultem 9085 malzemeleri ile üretilen numunelere uygulanan KLT analizi sonucunda, deneysel verilerle karşılaştırıldığında hata payları Çizelge 4.6'da yüzdesel olarak verilmiştir. 0°, 45° ve 90° yönelimli numuneler analizde doğrudan giriş parametresi olarak kullanıldığından, deneysel verilerle birebir karşılaştırma yapılamamıştır. Ancak, 0°/90°, 30°/60°/0° ve 45°/-45° yönelimli numuneler için hesaplanan elastisite modülü, maksimum %10 hata payı ile elde edilmiştir (Çizelge 4.6).

Analitik bir yöntem olan KLT yöntemi, Bölüm 2.4'te belirtilen varsayımlar doğrultusunda hesaplamalar yapmaktadır. Bu varsayımlar çerçevesinde elde edilen sonuçlar, genel olarak deneysel verilerle uyumlu bulunmuştur. Ancak, kesme gerilmelerinin ve dikey yöndeki gerilmelerin göz ardı edilmesi gibi sınırlamalar nedeniyle, KLT yönteminin FDM teknolojisindeki uygulama alanının kısıtlı olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6. Nylon12CF malzeme için KLT sonucunda alınan elastisite modülleri ve hata hesaplamaları

Malzeme	Numune	Klasik Laminasyon Hesaplanan (MPa)	Deneyden Gelen Elastisite Modülü (MPa)	%Hata
Nylon12CF	0	14364	14364	0
	45	4319	4319	0
	90	3610	3610	0
	30/60/0	8606	8027	7
	45/-45	4888	4385	10
	0/90	9644	9417	2
Ultem 9085	0	2001	2001	0
	45	1986	1987	0
	90	1528	1528	0
	30/60/0	1966	2212	11
	45/-45	2002	2131	6
	0/90	1784	2218	20

5. SONUÇ

Filament çekme testleri ile üretim öncesinde malzeme özellikleri belirlenmiş ve bu özellikler kullanılarak, üretim sonrası mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler tahmin edilmiştir. Tahminler, KLT ve homojenleştirme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tahminler, farklı oryantasyon ve tarama açılarıyla üretilen Ultem9085 ve Nylon12CF numuneleri üzerinde doğrulanmış ve hata payları hesaplanmıştır.

Homojenleştirme yöntemi kapsamında, temsili hacim elemanları, BT görüntülerine dayalı olarak ve dilimleme yazılımına girilen üretim parametrelerine göre iki farklı şekilde oluşturulmuştur. BT görüntüleri kullanılarak, üretim sonrası numunelerin gerçek iç yapısı elde edilmiş ve bu görüntüler üzerinden alınan temsili hacim elemanları üzerinde homojenleştirme uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, dilimleme yazılımına girilen parametreler doğrultusunda oluşturulan (ideal) temsili hacim elemanları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ideal temsili hacim elemanları ile BT görüntülerinden elde edilen hacim elemanları arasındaki yapışma yüzeyleri analiz edilmiş ve bu farklılıkların kaynakları tartışılmıştır.

İdeal temsili hacim elemanları ile nümerik ve analitik homojenleştirme yapılmış sonuçlar değerlendirilmiştir. Analitik yöntemle yapılan homojenleştirme işlemlerinde, sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırıldığında hesaplama maliyetinin oldukça düşük olduğu görülmüştür.

Sonuçlar, ideal temsili hacim elemanları ile BT görüntülerinden elde edilen hacim elemanlarının yapışma arayüzleri arasında belirgin farklılıklar olduğunu göstermektedir. İdeal temsili hacim elemanlarının yapışma yüzey alanları, BT görüntülerinden elde edilen geometrilere kıyasla oldukça düşük gelmiştir. Gerçek geometriyi temsil eden BT görüntüleri ile yapılan analizler deneysel sonuçlardan yüksek elastisite modülü değerleri vermiştir. Gerçek görüntülerde gözlemlenen üretim hataları ve yapışma kuvvetleri gibi parametreler, BT görüntüleri kullanılarak yapılan homojenleştirme analizlerinin, deneysel sonuçlara kıyasla daha yüksek çıkmasının başlıca nedenleri arasında

gösterilmiştir. Ancak, homojenleştirme yöntemi ile elde edilen sonuçların, gerçek deneysel verilerle önemli ölçüde uyum sağladığı belirlenmiştir.

KLT yönteminin uygulanabilirliği incelendiğinde, bu yöntemde dikey gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin dikkate alınmaması ile kesme gerilmelerinin göz ardı edilmesi, FDM ile üretilen parçalara doğrudan uygulanmasını zorlaştırmıştır. İnce ve tam dolu üretilen numunelerde oluşan hata payları, bu çalışmada araştırma konusu olarak ele alınmıştır. Yapılan analizlerde, deneysel sonuçlara kıyasla maksimum 10% sapma gözlemlenmiştir.

Öte yandan, çok ölçekli yaklaşıma dayalı homojenleştirme yöntemi, karmaşık boşluk yapısına sahip FDM ile üretilen parçaların analizlerinde uygulanabilir bulunmuştur. Bu çalışmada, homojenleştirme yönteminin FDM üretimi parçalar üzerindeki etkinliği değerlendirilmiş ve belirli seviyede doğru sonuçlar üretebilen analiz metotları irdelenmiştir.

Literatür incelemesi sonucunda, FDM teknolojisinin plastik bölgedeki analizlerine yönelik yeterli çalışmanın bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu alanda araştırma yapmayı planlayan bilim insanlarının, plastik bölgedeki analizlere çok ölçekli yaklaşımlar ile odaklanması, literatürün zenginleşmesine önemli katkı sağlayacaktır. Ayrıca, yorulma ve sürünme gibi farklı mekanik özelliklerin analizlerine ilişkin çalışmaların da literatürde sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle eklemeli imalat teknolojilerinin fonksiyonel havacılık parçaları üretiminde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için yapılan analizlerin daha detaylı ve tutarlı olması gerekmektedir. Bu doğrultuda, farklı yaklaşımlar geliştirilerek bu yöntemlerin verimliliği kapsamlı bir şekilde incelenmelidir.

KAYNAKLAR

Abbot, D. W., Kallon, D. V. V., Anghel, C., & Dube, P. (2019). Finite element analysis of 3D printed model via compression tests. *Procedia Manufacturing*, *35*, 164-173. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.001

Adam, L., Lietaer, O., Mathieu, S., & Doghri, I. (2020). Numerical simulation of additive manufacturing of polymers and polymer-based composites. Içinde *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components* (ss. 115-146). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819535-2.00005-3

ASTM International. (2022). *Test method for tensile properties of plastics*. https://doi.org/10.1520/D0638-22

Bähr, F., & Westkämper, E. (2018). Correlations between Influencing Parameters and Quality Properties of Components Produced by Fused Deposition Modeling. *Procedia CIRP*, *72*, 1214-1219. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.048

Bakır, A. A., Atik, R., & Özerinç, S. (2021). Mechanical properties of thermoplastic parts produced by fused deposition modeling:a review. Içinde *Rapid Prototyping Journal* (C. 27, Sayı 3, ss. 537-561). Emerald Group Holdings Ltd. https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2020-0061

Bargmann, S., Klusemann, B., Markmann, J., Schnabel, J. E., Schneider, K., Soyarslan, C., & Wilmers, J. (2018). Generation of 3D representative volume elements for heterogeneous materials: A review. Içinde *Progress in Materials Science* (C. 96, ss. 322-384). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.003

Bellehumeur, C., Li, L., Sun, Q., & Gu, P. (2004). Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. *Journal of Manufacturing Processes*, *6*(2), 170-178. https://doi.org/10.1016/S1526-6125(04)70071-7

Bhandari, S., & Lopez-Anido, R. (2018). Finite element analysis of thermoplastic polymer extrusion 3D printed material for mechanical property prediction. *Additive Manufacturing*, *22*, 187-196. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.009

Biswas, P., Guessasma, S., & Li, J. (2020). Numerical prediction of orthotropic elastic properties of 3D-printed materials using micro-CT and representative volume

element. *Acta Mechanica*, *231*(2), 503-516. https://doi.org/10.1007/s00707-019-02544-2

Casavola, C., Cazzato, A., Moramarco, V., & Pappalettere, C. (2016). Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory. *Materials and Design*, *90*, 453-458. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.009

Chekal, J. (2021). *Study of 3D-Printed Polymers for Aerospace Structural Applications*. University of Washington.

Choren, J. A., Heinrich, S. M., & Silver-Thorn, M. B. (2013). Young's modulus and volume porosity relationships for additive manufacturing applications. Içinde *Journal of Materials Science* (C. 48, Sayı 15, ss. 5103-5112). https://doi.org/10.1007/s10853-013-7237-5

Croccolo, D., De Agostinis, M., & Olmi, G. (2013). Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. *Computational Materials Science*, *79*, 506-518. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.06.041

Cuan-Urquizo, E., Barocio, E., Tejada-Ortigoza, V., Pipes, R. B., Rodriguez, C. A., & Roman-Flores, A. (2019). Characterization of the mechanical properties of FFF structures and materials: A review on the experimental, computational and theoretical approaches. *Materials*, *16*(6). https://doi.org/10.3390/ma12060895

Dawoud, M., Taha, I., & Ebeid, S. J. (2016). Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, *21*, 39-45. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.11.002

Dialami, N., Chiumenti, M., Cervera, M., Rossi, R., Chasco, U., & Domingo, M. (2021). Numerical and experimental analysis of the structural performance of AM components built by fused filament fabrication. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, *17*(1), 225-244. https://doi.org/10.1007/s10999-020-09524-8

Dialami, N., Rivet, I., Cervera, M., & Chiumenti, M. (2022). Computational characterization of polymeric materials 3D-printed via fused filament fabrication. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2032496

El Moumen, A., Tarfaoui, M., & Lafdi, K. (2019). Additive manufacturing of polymer composites: Processing and modeling approaches. *Composites Part B: Engineering*, *171*, 166-182. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.029

Engineering Fundamentals. (2025). *Finding stiffness matrices A, B and D*. https://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/composites/calc_ufrp_abd_layout.cfm

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. https://doi.org/10.1098/rspa.1957.0133

Garzon-Hernandez, S., Garcia-Gonzalez, D., Jérusalem, A., & Arias, A. (2020). Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. *Materials and Design*, *188*. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108414

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies* (Third Edition). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7

Hassani, B., & Hinton, E. (1998). A review of homogenization and topology optimization I—homogenization theory for media with periodic structure. *Computers & Structures*, *69*(6), 707-717. https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00131-X

Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C., & Gu, P. (2002). Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties. *Journal of Manufacturing Processes*, *4*(2), 129-141. https://doi.org/10.1016/S1526-6125(02)70139-4

Magalhães, L. C., Volpato, N., & Luersen, M. A. (2014). Evaluation of stiffness and strength in fused deposition sandwich specimens. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *36*(3), 449-459. https://doi.org/10.1007/s40430-013-0111-1

Monaldo, E., & Marfia, S. (2021). Multiscale technique for the analysis of 3D-printed materials. *International Journal of Solids and Structures*, *232*. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111173

Mori, T., & Tanaka, K. (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, *21*(5), 571-574. https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3

Musa Batır. (2023). *A two-step computational homogenization approach for determination of elastic constants of hybrid composites*. Middle East Technical University.

Nemat-Nasser, S. ., & Hori, M. . (1993). *Micromechanics : overall properties of heterogeneous materials*. North-Holland.

Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Içinde *Composites Part B: Engineering* (C. 143, ss. 172-196). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012

Otero, F., Oller, S., Martinez, X., & Salomón, O. (2015). Numerical homogenization for composite materials analysis. Comparison with other micro mechanical formulations. *Composite Structures*, *122*, 405-416. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.041

Polyzos, E., Ravindranath, S. B., Hemelrijck, D. Van, & Pyl, L. (2021). Analytical and numerical modeling of voids in additively manufactured thermoplastic parts. *Additive Manufacturing*, *48*. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102356

Polyzos, E., Van Hemelrijck, D., & Pyl, L. (2021). Numerical modelling of the elastic properties of 3D-printed specimens of thermoplastic matrix reinforced with continuous fibres. *Composites Part B: Engineering*, *211*. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108671

Rivet, I., Dialami, N., Cervera, M., Chiumenti, M., Reyes, G., & Pérez, M. A. (2021). Experimental, computational, and dimensional analysis of the mechanical performance of fused filament fabrication parts. *Polymers*, *13*(11). https://doi.org/10.3390/polym13111766

Rodriguez, J. F., Thomas, J. P., & Renaud, J. E. (2000). Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials. *Rapid Prototyping Journal*, *6*(3), 175-186. https://doi.org/10.1108/13552540010337056

Sabic. (2024). *ULTEM™ resin 9085 global technical data sheet*. https://www.sabic.com/en/products/specialties/ultem-resin-family-of-high-heat-solutions/ultem-resin?grade=9085

Sanei, S. H. R., & Popescu, D. (2020). 3d-printed carbon fiber reinforced polymer composites: A systematic review. Içinde *Journal of Composites Science* (C. 4, Sayı 3). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/jcs4030098

Shapiro, A. A., Borgonia, J. P., Chen, Q. N., Dillon, R. P., McEnerney, B., Polit-Casillas, R., & Soloway, L. (2016). Additive manufacturing for aerospace flight applications. Içinde *Journal of Spacecraft and Rockets* (C. 53, Sayı 5, ss. 952-959). American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. https://doi.org/10.2514/1.A33544

Stratasys. (2017). *Stratasys nylon12CF material specifications*. https://info.stratasysdirect.com/rs/626-SBR-192/images/LS_Nylon_12_CF_Material_Datasheet_201703.pdf

Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., & Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, *14*(2), 72-80. https://doi.org/10.1108/13552540810862028

Tao, Y., Kong, F., Li, Z., Zhang, J., Zhao, X., Yin, Q., Xing, D., & Li, P. (2021). A review on voids of 3D printed parts by fused filament fabrication. Içinde *Journal of Materials Research and Technology* (C. 15, ss. 4860-4879). Elsevier Editora Ltda. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.108

Vyavahare, S., Teraiya, S., Panghal, D., & Kumar, S. (2020). Fused deposition modelling: a review. Içinde *Rapid Prototyping Journal* (C. 26, Sayı 1, ss. 176-201). Emerald Group Holdings Ltd. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106

Zarbakhsh, J., Iravani, A., & Amin-Akhlaghi, Z. (2015). Sub-modeling Finite Element Analysis of 3D printed structures. *2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, 1-4. https://doi.org/10.1109/EuroSimE.2015.7103095

EKLER