T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATMANLI İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN POLİMERİK MALZEMELERİN SICAKLIĞA BAĞLI ANİZOTROPİK ELASTİK DAVRANIŞININ KARAKTERİZASYONU VE MODELLENMESİ

Kubilay ÖNGİDER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Yüksek Lisans Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR

Temmuz, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilen Polimerik Malzemelerin Sıcaklığa Bağlı Anizotropik Elastik Davranışının Karakterizasyonu ve Modellenmesi

Kubilay ÖNGİDER tarafından hazırlanan tez çalışması 20.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Yüksek Lisans Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi İlyas İSTİF, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Özge ÖZDEMİR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilen Polimerik Malzemelerin Sıcaklığa Bağlı Anizotropik Elastik Davranışının Karakterizasyonu ve Modellenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Kubilay ÖNGİDER

İmza

Aileme

ve

sevdiklerime

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatımın en önemli aşamalarından biri olan yüksek lisans eğitimimin sonuna gelmenin ve tezimi tamamlamış olmanın büyük gurur ve mutluluğu içerisindeyim.

Öncelikle bu çalışmanın oluşturulmasında tez konumun belirlendiği ilk günden çalışmalarımızın tamamlandığı son güne kadar değerli bilgilerini, kıymetli vaktini ve tecrübesini benimle paylaşan danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde çalışmamız için gerekli olan numunelerin üretiminde bizlere yardımcı olan sayın Arş. Gör. Resul SÖNMEZ'e, bu numunelere gerekli testleri uygulayan Yıldız Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı ve sayın Dr. Duygu Ceylan ERDOĞAN'a ve yüksek lisans sürecimde verdikleri dersler ve bilgilerle beni yetiştiren bütün hocalarıma çok teşekkür ederim.

Son olarak başta annem ve babam olmak üzere her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen bütün aileme ve dostlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Kubilay ÖNGİDER

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR **v**
SİMGE LİSTESİ **vii**
KISALTMA LİSTESİ **viii**
ŞEKİL LİSTESİ **ix**
TABLO LİSTESİ **xi**
ÖZET **xii**
ABSTRACT **xiv**
1 GİRİŞ **1**
1.1 Katmanlı İmalat....1
1.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri....3
2 ERGİYİK YIĞARAK MODELLEME **12**
2.1 Ergiyik Yığarak Modelleme....12
2.2 Ergiyik Yığarak Modelleme Yönteminin Çalışma Prensibi....13
2.3 Ergiyik Yığarak Modelleme Parametreleri....14
2.4 Üretim Parametreleri ile Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler....16
3 TEORİ VE MODEL **28**
3.1 Depolama Modülü ve Dinamik Mekanik Özellikler....28
3.2 Richeton Modeli....30
3.3 Anizotropi Davranışının Modele Dahil Edilmesi....31
3.4 Gözeneklilik Davranışının Modele Dahil Edilmesi....38
3.5 Modelin Prensibi ve Ön Çalışma....39
4 NUMUNE ÜRETİMİ VE DMA TESTİ **43**
4.1 Malzeme Seçimi ve Numunelerin Üretilmesi....43
4.2 Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Testi....47
5 DENEY SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMALAR **48**
5.1 Deney Sonuçları ve Karşılaştırmalar....48
6 SONUÇ **62**
KAYNAKÇA **65**
A KOD DOSYASI **70**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **74**

SİMGE LİSTESİ

T_f	Akış Sıcaklığı
ΔH_β	Beta Aktivasyon Enerjisi
T_β	Beta Geçiş Sıcaklığı
k	Boltzman Sabiti
T_g	Camsı Geçiş Sıcaklığı
s	Duyarlılık Sabiti
E_i	Elastisite Modülü (veya Depolama Modülü)
f	Frekans
σ	Gerilme
ε	Gerinim
S	Gevşeklik Matrisi
P	Gözeneklilik
C	Katılık Matrisi
G_{ij}	Kayma Modülü
v_{ij}	Poisson Oranı
T	Sıcaklık
m	Spriggs Malzeme Sabiti
m_i	Weibull Modülü
C_{iref}	William-Landel-Ferry Parametresi

KISALTMA LİSTESİ

ABS	Akrilonitril Bütadiyen Stiren
ASTM	American Society for Testing and Materials
BİTUAM	Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
BJT	Binder Jetting
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymers
DED	Directed Energy Deposition
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
FDM	Fused Deposition Modeling
ISO	International Organization for Standardization
MEX	Material Extrusion
MJT	Material Jet
PBF	Powder Bed Fusion
PC	Polycarbonate
PEEK	Polyether ether ketone
PEİ	Polyetherimide
PLA	Polylactic acid
PMMA	Polymethyl methacrylate
SHL	Sheet Lamination
STL	Stereolitografi
TPU	Termoplastik Poliüretan
UV	Ultraviyole
VPP	Vat Photopolymerization
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Katmanlı imalat ile üretilen bir HPT türbin kanadı 2
Şekil 1.2 Bağlayıcı püskürtme (BJT) yönteminin şematik gösterimi 4
Şekil 1.3 Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yöntemi şematik gösterimi 5
Şekil 1.4 Malzeme ekstrüzyonu (MEX) yönteminin şematik gösterimi 7
Şekil 1.5 Malzeme jeti (MJT) yönteminin şematik gösterimi 8
Şekil 1.6 Toz yatağı füzyonu (PBF) yönteminin şematik gösterimi 9
Şekil 1.7 Sac laminasyon (SHL) yönteminin şematik gösterimi 10
Şekil 1.8 Vat fotopolimerizasyonu (VPP) yönteminin şematik gösterimi 11
Şekil 2.1 Ergiyik yığarak modelleme yönteminin şematik gösterimi 12
Şekil 2.2 Üretim parametreleri 15
Şekil 2.3 Katman kalınlığının gösterimi 17
Şekil 2.4 İmal yönü parametresinin gösterimi 19
Şekil 2.5 Örgü açılarına örnekler 19
Şekil 2.6 Ergiyik yığarak modelleme ile üretilmiş bir parçadaki hava boşlukları (Dijital Mikroskop Görüntüsü) 22
Şekil 3.1 Ortotropik Malzemenin Şematik Gösterimi 34
Şekil 3.2 Gerilme Sadece 1 ekseninde olduğu durum 35
Şekil 3.3 Gerilme Sadece 2 ekseninde oluğu durum 35
Şekil 3.4 Gerilme Sadece 3 ekseninde oluğu durum 36
Şekil 3.5 Ön modelleme sonucu hesaplanan üç farklı yöndeki sıcaklığa bağlı depolama modülü değerleri 42
Şekil 4.1 DMA testi numunelerinin ölçüleri 44
Şekil 4.2 Fusion 360 programı üzerinde imal yönlerinin temsili gösterimi 44
Şekil 4.3 ABS malzemeden üretilmiş numuneler 46
Şekil 5.1 Katman kalınlığı 0.2 mm ve E1 için model karşılaştırması 51
Şekil 5.2 Katman kalınlığı 0.2 mm ve E2 için model karşılaştırması 51
Şekil 5.3 Katman kalınlığı 0.2 mm ve E3 için model karşılaştırması 52
Şekil 5.4 Katman kalınlığı 0.28 mm ve E1 için model karşılaştırması 52
Şekil 5.5 Katman kalınlığı 0.28 mm ve E2 için model karşılaştırması 53
Şekil 5.6 Katman kalınlığı 0.28 mm ve E3 için model karşılaştırması 53
Şekil 5.7 Oda sıcaklığında modül ve katman kalınlığı karşılaştırması 54
Şekil 5.8 Katman kalınlığı 0.12mm ve x ekseni için değerlerin karşılaştırılması 55
Şekil 5.9 Katman kalınlığı 0.2mm ve x ekseni için değerlerin karşılaştırılması 55

Şekil 5.10 Katman kalınlığı 0.28mm ve x ekseni için değerlerin karşılaştırılması 56
Şekil 5.11 Katman kalınlığı 0.12mm ve y ekseni için değerlerin karşılaştırılması 56
Şekil 5.12 Katman kalınlığı 0.20mm ve y ekseni için değerlerin karşılaştırılması 57
Şekil 5.13 Katman kalınlığı 0.28mm ve y ekseni için değerlerin karşılaştırılması 57
Şekil 5.14 Katman kalınlığı 0.12mm ve z ekseni için değerlerin karşılaştırılması58
Şekil 5.15 Katman kalınlığı 0. 2mm ve z ekseni için değerlerin karşılaştırılması 58
Şekil 5.16 Katman kalınlığı 0.28mm ve z ekseni için değerlerin karşılaştırılması59
Şekil 5.17 Katman kalınlığı değerlerinin karşılaştırma grafiği (E1) 60
Şekil 5.18 Katman kalınlığı değerlerinin karşılaştırma grafiği (E2) 60
Şekil 5.19 Katman kalınlığı değerlerinin karşılaştırma grafiği (E3) 61

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Parametreler ve mekanik özellikler arası bağ içeren makaleler 24
Tablo 2.1 Parametre ve mekanik özellik bağlantısı içeren makaleler (devamı) ... 25
Tablo 2.1 Parametre ve mekanik özellik bağlantısı içeren makaleler (devamı) ... 26
Tablo 2.1 Parametre ve mekanik özellik bağlantısı içeren makaleler (devamı) ... 27
Tablo 3.1 Gerilme- Gerinim İlişkileri 37
Tablo 3.2 Bellini ve arkadaşlarının makalesindeki mühendislik sabitleri 40
Tablo 3.3 Richeton ve Arkadaşlarının Çalışmasındaki Model Parametreleri 41
Tablo 4.1 Ekstrüze edilmiş ABS malzemenin mekanik özellikleri (ortalama değerler) 43
Tablo 4.2 Numunelerin imal yönü ve katman kalınlığı değerleri 45
Tablo 4.3 Üretim sırasında sabit tutulan parametreler 45
Tablo 4.4 DMA testi analiz parametreleri 47
Tablo 5.1 Katman kalınlığı 0.12 mm için mühendislik sabitleri 49
Tablo 5.2 Katman kalınlığı 0.2 mm için mühendislik sabitleri 49
Tablo 5.3 Katman kalınlığı 0.28 mm için mühendislik sabitleri 49

ÖZET

Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilen Polimerik Malzemelerin Sıcaklığa Bağlı Anizotropik Elastik Davranışının Karakterizasyonu ve Modellenmesi

Kubilay ÖNGİDER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR

Katmanlı imalat, üretilecek parça geometrisinin verilerinin bilgisayar programları yardımıyla dilimlenmesi ve sonrasında bu dilimlerin katmanlar şeklinde üst üste eklenerek imal edilmesi esasına dayanmaktadır. Katmanların birbiri üzerine eklenmesi şeklinde yapılan bu üretimde, metodun doğası gereği oluşan anizotropi ve gözeneklilik davranışı bulunmaktadır. Bunun yanı sıra parçanın çalışma sıcaklığı ve yöntemde kullanılan üretim parametreleri de üretilen parçanın mekanik dayanımını etkilemektedir. Literatürde yapılan araştırmalarda çok eksenli hal için mekanik özellikleri tahmin eden model eksikliği karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple, bu çalışmada katmanlı imalat ile üretilen parçaların mekanik davranışlarını sıcaklığa ve üretim parametrelerine bağımlı olarak yöne bağlı bir şekilde tahmin edebilecek bir model geliştirmek amaçlanmıştır. Polimerler üzerinde yapılacak karakterizasyon ve modelleme çalışması için polimerlerin üretiminde sıklıkla kullanılan Ergiyik Yığarak Modelleme yöntemi ve bu yöntem ile üretilen parçaların sıcaklık değişimi ve dinamik mekanik özelliklerini bir arada veren depolama modülü incelenmiştir. Bu amaçla bu yöntem ile parçalar üretildiğinde iyi termal ve

mekanik özellikler gösteren Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) malzemesi kullanılarak dinamik mekanik analiz (DMA) testlerinde kullanılacak numuneler üretilmiştir. Bu numuneler üç farklı imal yönü ve üç farklı katman kalınlığında üretilip DMA testlerinde kullanılmış ve bu sayede depolama modülü değerlerini içeren deneysel veriler elde edilmiştir. Literatürde katmanlı imalat ile üretilen parçaları mekanik özelliklerini sıcaklığa bağlı bir şekilde ve anizotropik olarak hesaplayabilen model olmasa da polimerlerin farklı sıcaklık ve şekil değiştirme hızları için, depolama modülünü tahmin etmeyi amaçlayan modeller bulunmaktadır. Bununla birlikte polimer malzemeler için tek eksen üzerinde çalışan bu modeller katmanlı imalat ile üretilen malzemelerin anizotropi durumunu karşılamamaktadır. Bu sebeple polimerler için tek eksenli bir şekilde hesaplama yapabilen bir model, Genelleştirilmiş Hooke Kanunu kullanılarak anizotropik hal için çok eksenli bir şekilde hesaplama yapabilen bir modele dönüştürülmüştür. Ayrıca katmanlı imalat ile üretilen malzemelerdeki bir diğer önemli davranış olan gözeneklilik davranışı da incelenmiştir. Gözeneklilik davranışının dahil edilebilmesi için literatürdeki gözeneklilik modelleri arasından bu parametrenin davranışına uygun bir model katman kalınlığı parametresi için düzenlenmiş ve elde edilen bu yeni model oluşturulan çok eksenli ve sıcaklığa bağlı olarak önerilen modele bir fonksiyon olarak eklenmiştir. Sonuç olarak, literatürde bulunan ancak katmanlı imalat için uygun olmayan modeller ve kanunlar, katmanlı imalat sonucu elde edilecek parçaların davranışlarını tahmin edebilecek bir şekilde geliştirilerek ve bu farklı modeller tek bir amaç için birleştirilerek yeni bir model elde edilmiştir. Bu model ergiyik yığarak modelleme yöntemi kullanılarak üretilmiş parçalardaki anizotropik katılık matrisini, farklı katman kalınlıklarında ve değişen sıcaklık değerlerinde tahmin edebilmektedir. Modelin doğrulanması için yapılan deneysel çalışmalar ve model tahminleri karşılaştırılmıştır ve elde edilen sonuçlara göre deneysel sonuçlar ve model arasında olumlu bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katmanlı imalat, depolama modülü, sıcaklık, anizotropi, gözeneklilik

ABSTRACT

Characterization and Modeling of Temperature Dependent Anisotropic Elastic Behavior of Polymeric Materials Produced by Additive Manufacturing

Kubilay ÖNGİDER

Department of Mechanical Engineering

Master of Science

Supervisor: Dr. Alperen ACAR

Additive manufacturing is based on the principle of slicing the data of the geometry of the part to be produced with the help of computer programs and then manufacturing these slices by adding layers on top of each other. In this production, which is made by adding layers on top of each other, there is anisotropy and porosity behavior due to the nature of the method. In addition, the working temperature of the part and the production parameters used in the method also affect the mechanical strength of the produced part. There is a large correlation between these behaviors and the production parameters of additive manufacturing methods. By studying the effects of these parameters on the mechanical behavior, greater benefits can be obtained from the method. In the literature, there is a lack of models predicting the mechanical properties for the multiaxial state. For this reason, in this study, it is aimed to develop a model that can predict the mechanical behavior of the parts produced by additive manufacturing in a direction-dependent manner depending on the temperature and production parameters. Additive manufacturing methods are divided into several subclasses. Each subclass has its own advantages and disadvantages. In addition, these methods differ from each other according to

different areas of use and materials that can be used. For this characterization and modeling work on polymers, fused deposition modeling method, which is frequently used in the production of polymers, will be a suitable choice. One of the best parameters showing the mechanical properties and temperature dependency of the material is the storage module. The storage module is calculated with the help of dynamic mechanical analysis test. During the test, the mechanical properties of the material can be obtained under increasing temperature and dynamic load. For this reason, it will be possible to correctly examine the relationship between the model and the mechanical behavior by examining the storage module, which combines the temperature change and dynamic mechanical properties of the parts produced by the fused deposition modeling method. For this purpose, samples to be used in dynamic mechanical analysis (DMA) tests were produced by using Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) material, which shows good thermal and mechanical properties when parts are produced with this method. These samples were produced in three different manufacturing directions to examine the anisotropy behavior and in three different layer thicknesses to examine the porosity behavior and used in dynamic mechanical analysis tests. In this way, experimental data including storage modulus values in different directions and layer thicknesses were obtained. These experimental data are of great importance to examine the predictive ability of the proposed model. In the literature review for the proposed model, although the model that can calculate the mechanical properties of the parts produced by additive manufacturing in a temperature-dependent and anisotropic manner is not encountered, models aiming to predict the storage modulus for different temperatures and strain rates of polymers have been found. However, these models working on a single axis for polymer materials do not meet the anisotropy status of materials produced by additive manufacturing. For this reason, a model that can calculate uniaxially for polymers has been transformed into a model that can calculate multiaxially for the anisotropic state by using the Generalized Hooke's Law. Thanks to this improvement, it has become able to calculate the anisotropy behavior together with the temperature dependence. In addition, porosity behavior, which is another important behavior in materials produced by additive manufacturing, has also been examined in the literature. Although porosity, also known as air voids, appears depending on various parameters, it mostly affects the mechanical behavior depending on the layer

thickness parameter. In order to include the porosity behavior, a model suitable for the behavior of this parameter among the porosity models in the literature was arranged for the layer thickness parameter, and this new model was added as a function to the model proposed in the previous step depending on the created multi-axis and temperature. As a result, models and laws in the literature that are not suitable for additive manufacturing have been developed in a way that can predict the behavior of the parts to be obtained as a result of additive manufacturing, and a new model has been obtained by combining these different models for a single purpose. This model is able to predict the anisotropic stiffness matrix of parts produced using the fused deposition modeling method at different layer thicknesses and varying temperature values. Experimental studies obtained with the help of dynamic mechanical analysis tests carried out for the verification of the model and the values calculated by the required values and constants of the proposed model were compared. According to the results and graphics obtained after this comparison, it has been observed that there is a positive relationship between the experimental results and the model results. Based on this situation, it has been proven that the predictive ability of the model is good and it can predict the temperature dependence and porosity behavior in a multiaxial way.

Keywords: Additive manufacturing, storage module, temperature, anisotropy, porosity

1
GİRİŞ

1.1 Katmanlı İmalat

Eklemeli ya da katmanlı imalat, konvansiyonel imalat yöntemleri olan, talaşlı imalat, döküm ya da plastik şekillendirmede uygulanan esaslardan farklı olarak, nihai parça geometrisine ait verinin sanal olarak dilimlenmesi ve daha sonra bu dilim ya da katmanların üst üste konarak imal edilmesi esasına dayanır. Bu yöntemde kullanılan tezgahların hemen her zaman nümerik kontrollü olması, ayrıca yöntemin işleyişi, geleneksel imalat yöntemleri ile imal edilmesi mümkün olmayacak geometrilerin üretilebilmesine imkân vermektedir. Ayrıca yine katmanlı imalat yöntemlerinin gelişimi ile ortaya çıkan, talebe yönelik imalat kavramının da geleneksel stok yönetimine göre avantajları nedeniyle, lojistik sistemlerini oldukça radikal şekilde değiştirmeye başladığı görülmektedir. Başlangıç aşamasında Hızlı Prototipleme (Rapid Prototyping) olarak bilinen ve tasarımcının fikirlerini somut hale getirmesini sağlamak amacıyla ortaya çıkan katmanlı imalat yukarıda sayılan avantajlar sayesinde günümüzde fonksiyonel parçaların imalatında da sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır [1], [2]. Katmanlı imalatın temel avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibidir:

Avantajlar

- Nümerik kontrollü olması
- Tasarımı uygulama kolaylığı,
- Karmaşık geometrilerin üretimine izin vermesi,
- Parametre kontrolü yardımıyla isteğe uygun parçaların üretilebilmesi,
- İşlem sonrası prosedürlere genellikle ihtiyaç duyulmaması,
- Üretim aşamalarındaki adımların azalması,
- Toplam maliyette sağladığı azaltma
- Lojistik konusundaki avantajları,
- Düşük atık malzeme çıkışı ve
- Ölçeklenebilirliktir [3].

Dezavantajlar

- Toplu üretimlerde çok yavaş kalması,
- Üretilebilecek parça boyutlarındaki sınırlamalar,
- Anizotropi ve
- Gözeneklilik davranışıdır [3].

Katmanlı imalatta çeşitli malzemeler kullanılabilmektedir. Metal, seramik, polimer, kompozit ve hibrit malzemeler farklı formlarda (katı, sıvı veya toz) işlenebilmektedir. Bu malzemelerin tamamı katmanlı imalatın her alt yöntemi için geçerli olmasa da her biri için kullanıma uygun yöntemler bulunmaktadır. Katmanlı imalat ile üretilen bazı ürünler Şekil 1.1'de görünmektedir.



Şekil 1.1 Katmanlı imalat ile üretilen bir HPT türbin kanadı [4]

Katmanlı imalatın yukarıda sayılan çeşitli avantajları ve malzeme konusundaki çeşitliliği sayesinde kullanım alanı konusunda geniş bir yelpazeye sahiptir. Bu alanlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Otomotiv Endüstrisi
- Havacılık Endüstrisi
- İlaç Endüstrisi
- Sağlık Endüstrisi

- Spor Endüstrisi
- İnşaat Sektörü
- Makine parçaları üretimi
- Prototipleme
- Yedek parça
- Aksesuar üretimi [3].

1.2 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli İmalat çatısı altında çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlar malzemenin tipine (katı, sıvı, toz), enerji kaynağına (termal, UV ışını, elektron ışını vb.) veya kullanılabilen malzemelerin (metal, polimer, seramik, kompozit, hibrit) çeşitliliğine göre farklı sınıflara ayrılabilir. Bununla birlikte çalışma prensibine göre yapılacak bir sınıflandırma daha sağlıklı bir sonuç verecektir. Bu doğrultuda ISO/ASTM 52900:2021 standardına göre katmanlı imalat yöntemleri 7 farklı alt sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflar;

1) Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting, BJT) Yöntemi,
2) Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition, DED) Yöntemi,
3) Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion, MEX) Yöntemi,
4) Malzeme Jeti (Material Jet, MJT) Yöntemi,
5) Toz Yatağı Füzyonu (Powder Bed Fusion, PBF) Yöntemi,
6) Sac Laminasyon (Sheet Lamination, SHL) Yöntemi,
7) Vat Fotopolimerizasyonu (Vat Photopolymerization, VPP) Yöntemidir [5].

1.2.1 Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting, BJT)

Bağlayıcı Püskürtme (BJT) yöntemi, sıvı bir yapıştırıcının seçici bir şekilde toz halindeki malzemenin üzerine püskürtülmesi ile birbirine bağlanması sağlanarak katmanların oluşturulduğu bir yöntemdir [5]. Toz malzeme bir rulo yardımıyla yayılır ve yapıştırıcı seçici bir şekilde malzeme üzerine püskürtülür. İşlem yapılan katman tamamlandıktan sonra tabla katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve işlem

son ürün halini alana kadar devam eder. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 1.2'de verilmiştir. Yöntemin avantajları ve dezavantajları şunlardır:

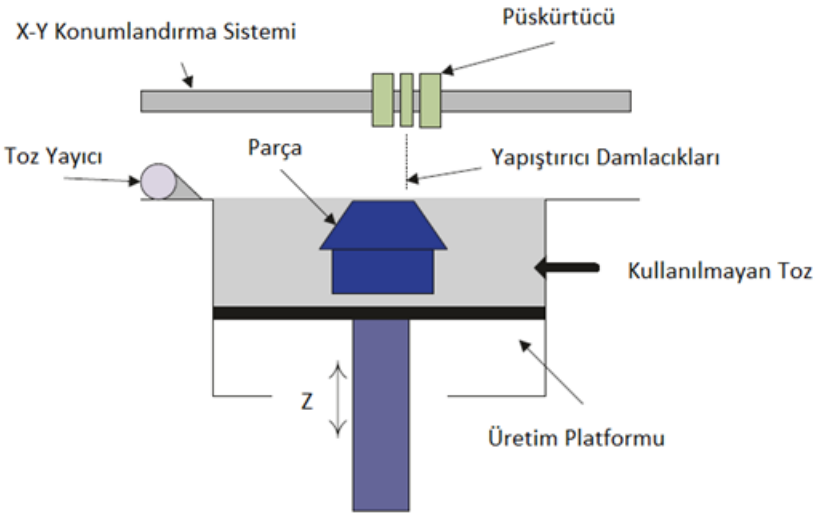
Avantajlar

- Tasarım serbestliği,
- Destek ihtiyacının olmaması,
- Büyük ölçeklerde üretim yapılabilmesi,
- Hızlı bir yöntem olması ve
- Maliyet açısından nispeten uygun olmasıdır.

Dezavantajlar

- Mekanik özellikler açısından çok üstün parçalar üretememesi,
- Üretilen parçalarda gözeneklilik davranışı ve
- Kullanım öncesi son işlem ihtiyacıdır [3].

Yöntemde toz materyal olarak seramik ve metal tozları kullanılabilmektedir. Bu durumların yanı sıra yöntemin sıcaklığa bağlı olmaması termal etkilerden uzak bir son ürün ortaya koyacaktır [6].



Şekil 1.2 Bağlayıcı püskürtme (BJT) yönteminin şematik gösterimi [7]

1.2.2 Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition, DED)

Yönlendirilmiş Enerji Biriktirme (DED) yöntemi, odaklanmış bir termal enerji kaynağının malzeme biriktirilirken bu malzemeyi eritip kaynaştırarak bir katman oluşturma prensibiyle çalışmaktadır [5]. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 1.3'te verilmiştir. Yöntemin avantajları ve dezavantajları şunlardır:

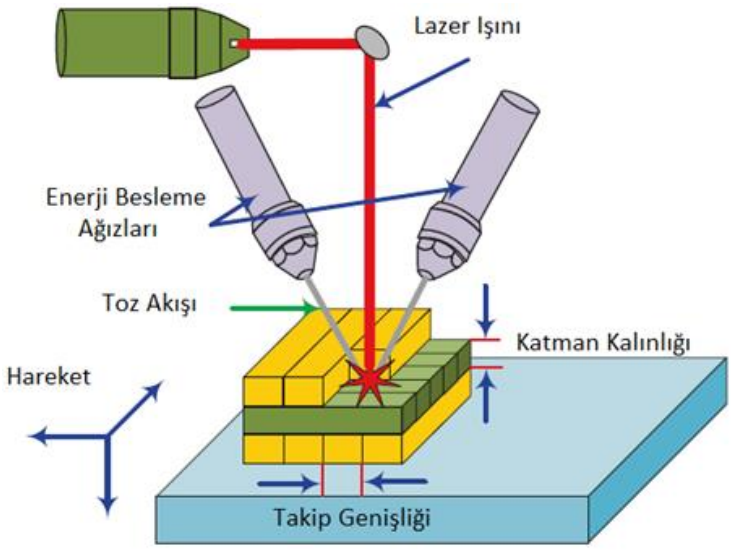
Avantajlar

- Yüksek kalite parçaların üretilmesi,
- Tane yapısının kontrol edilebilir olması ve
- Parça tamiri açısından başarılı bir yöntem olmasıdır.

Dezavantajlar

- Yüzey kalitesinin düşük olması ve
- Sadece metal ve metal bazlı malzemelerde kullanılabilir olmasıdır [3].

Bu yöntem kullanılan enerji kaynağına göre alt yöntemlere ayrılmaktadır. Yöntemde lazer enerjisi kullanılırsa işlem, argon gazı ile doldurulmuş bölmede gerçekleşir ve toz şeklindeki metaller kullanılır. Elektron ışını ise hem toz hemde metal kablo kullanımına izin vermektedir ancak işlem vakumlu bir bölmede yapılmaktadır [2], [6].



Şekil 1.3 Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yöntemi şematik gösterimi [7]

1.2.3 Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion, MEX)

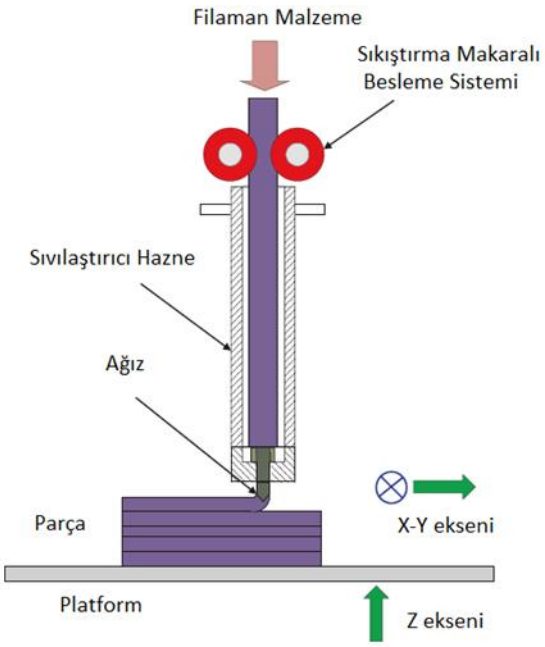
Malzeme Ekstrüzyonu (MEX) yöntemi, kullanılacak malzemenin bir ağız yardımıyla baskı sıcaklığına getirilip seçici olarak tabla üzerine ekstrüde edilerek katmanların oluşturulduğu yöntemdir [5]. Her katman oluşumu tamamlandıktan sonra z-ekseni üzerindeki hareket ile parçanın tamamı oluşana kadar malzeme ekstrüzyonu devam eder. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 1.4'te verilmiştir. Malzeme Ekstrüzyonu yönteminin farklı ticari adları bulunsa da en bilinen ismiyle Ergiyik Yığarak Modelleme (Fused Deposition Modeling, FDM) bu yöntemi temsil etmektedir. Yöntemin avantajları ve dezavantajları şunlardır:

Avantajlar

- Geniş kullanım alanı,
- Fonksiyonel parça üretimi,
- Uygun maliyet,
- Ölçeklendirilebilir parçaların üretimi ve
- Kürleme ihtiyacının bulunmamasıdır.

Dezavantajlar

- Anizotropi,
- Gözeneklilik,
- İnce detay konusundaki yetersizlik,
- Pürüzsüz bir yüzey için ek işleme ihtiyaç duyulması ve
- Sadece polimer ve kompozitler için kullanılabilir olması söylenebilir [2], [3].



Şekil 1.4 Malzeme ekstrüzyonu (MEX) yönteminin şematik gösterimi [7]

1.2.4 Malzeme Jeti (Material Jet, MJT)

Malzeme Jeti (MJT) yöntemi, malzemenin damlacık şeklinde seçici olarak bırakıldığı yöntemdir [5]. Bu damlacıklar foto polimer malzemeler olup tabla üzerinde biriktirildikten sonra ultraviyole lambalar yardımıyla kürlenerek son halini alır [2]. Katman tamamlandıktan sonra tabla hareket mekanizması yardımıyla katman kalınlığı kadar indirilerek yeni katmanın üretimine geçilir ve parça tamamlanana kadar prosedür devam eder. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 1.5'te verilmiştir. Yöntemin avantajları ve dezavantajları şunlardır:

Avantajlar

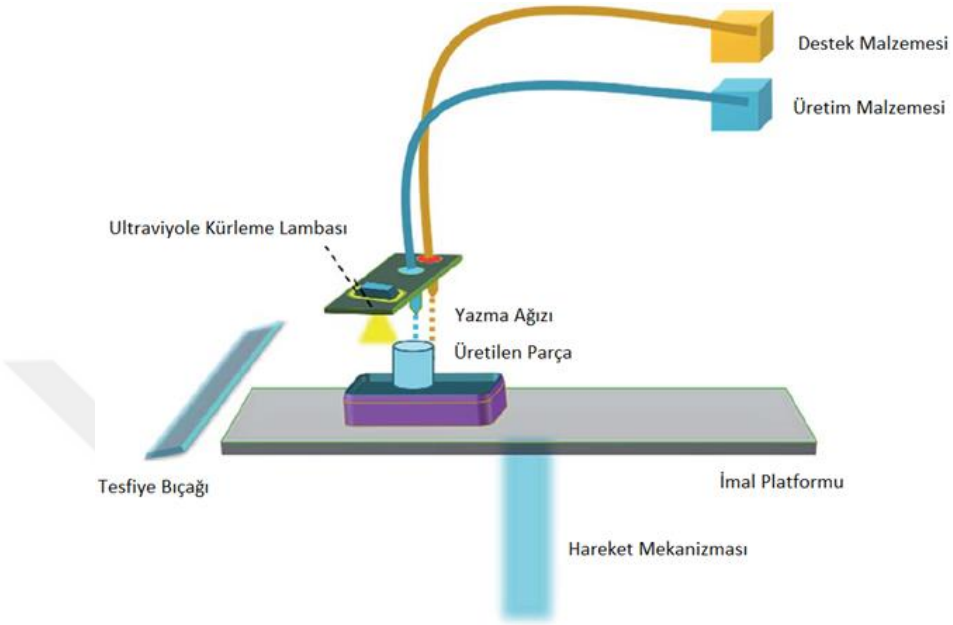
- Yüksek doğrulukta damlacık biriktirmesi,
- Az atık malzeme,
- Aynı anda çoklu parça imalatı ve
- Aynı anda farklı renklerde üretimdir.

Dezavantajlar

- Çoğunlukla termosetler ve fotopolimerler üzerinde kullanılabilir olması,

- İmal sırasında bir destek yapıya ihtiyaç duymasıdır [3].

Bu durumların dışında kalan bir artı yönü ise farklı malzemeler kullanılabildiği için destek yapıları kolay ayırılabilen bir malzemeden yapmak mümkündür [6]. Bu sayede destek yapılardan daha kolay bir şekilde kurtulunabilmektedir.



Şekil 1.5 Malzeme jeti (MJT) yönteminin şematik gösterimi [8]

1.2.5 Toz Yatağı Füzyonu (Powder Bed Fusion, PBF)

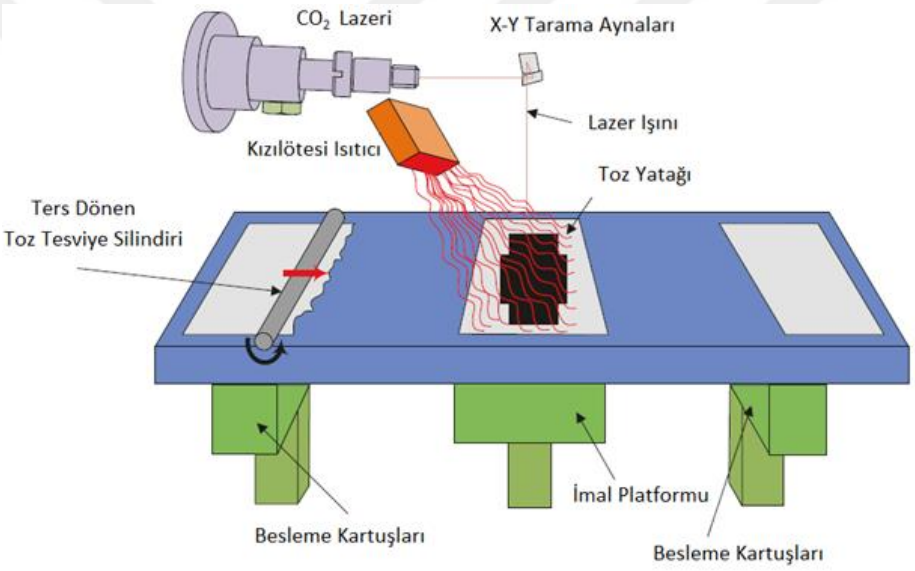
Toz Yatağı Füzyonu (PBF) yöntemi, toz halindeki malzemelerin bulunduğu toz yatağının bir bölgesini termal bir enerji yardımıyla seçici bir şekilde kaynaştırılarak eklendiği bir yöntemdir [5]. İlk katman tamamlandıktan sonra imal platformunun hareketi sonrası toz tesviye silindiri yardımıyla yeni toz malzeme bir önceki katmanın üzerine yayılarak imalat devam etmektedir. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 1.6'da verilmiştir. Seçici Lazer Sinterleme, Seçici Lazer Ergitme, Direkt Metal Lazer Sinterleme olarak alt alanlara ayrılmaktadır. Seçici Lazer Sinterleme ile Seçici Lazer Ergitme arasındaki fark malzemenin sinterlemede toz malzemenin tamamen eritilmeden, ergitmede ise tam bir ergime ile imal edilmesidir. Burada avantaj sinterlenmeyen tozların destek parça davranışı göstermesi ve imalat sonrası kolay bir şekilde ayrıştırılması olacaktır. Direkt Metal Lazer Sinterleme ise mikro boyutta kaynaştırma sağlamaktadır [6]. Yöntemin avantajları ve dezavantajları şunlardır:

Avantajlar

- Malzeme çeşitliliği,
- Nispeten uygun maliyetli olması ve
- Kendi destek yapısını oluşturabilmesidir.

Dezavantajları

- Yavaş olması,
- Yüksek enerji ihtiyacı,
- Küçük ölçekteki parçaların üretimine izin vermesi ve
- Yapısal bütünlük konusunda üstün performans verememesidir [3].



Şekil 1.6 Toz yatağı füzyonu (PBF) yönteminin şematik gösterimi [7]

1.2.6 Sac Laminasyon (Sheet Lamination, SHL)

Sac Laminasyon (SHL) yöntemi, sac tabaka halindeki malzemelerin basınç, ısı ve termal yapışkan yardımıyla birleştirilerek bir bütün oluşturduğu ve sonrasında bir lazer yardımıyla istenilen şekilde kesildiği bir yöntemdir [5]. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 1.7'de verilmiştir. Yöntemin avantajları ve dezavantajları şunlardır:

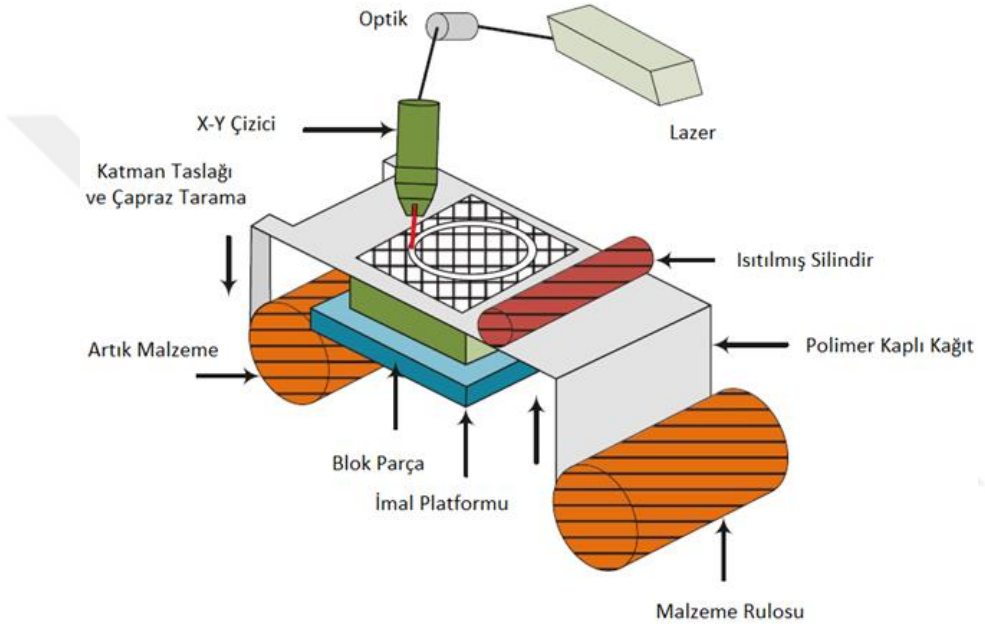
Avantajlar

- Malzeme kolaylığı,

- Uygun maliyetli olması ve
- Hızlı bir yöntem olmasıdır.

Dezavantajlar

- Parçanın mukavemeti ve bütünlüğü kullanılan yapışkana bağlı olması,
- Son işlem gereksinimi,
- Kullanılabilir malzeme sınırı,
- Üretilebilir parça boyutunun küçük ölçeklerde olmasıdır [3].



Şekil 1.7 Sac laminasyon (SHL) yönteminin şematik gösterimi [9]

1.2.7 Vat Fotopolimerizasyonu (Vat Photopolymerization, VPP)

Vat Fotopolimerizasyonu (VPP) yöntemi, sıvı foto polimer dolu bir havuz içerisindeki malzemenin bir ışık kaynağı yardımıyla foto polimerizasyon yapılarak bu sıvı malzemeyi katı hale getirmek suretiyle katman oluşturan yöntemdir [5]. Hareketli platform yardımıyla ilk katman bittikten sonra platform katman kalınlığı kadar aşağı indirilerek yeni katmanın imalatına başlanır. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 1.8'de verilmiştir. Stereolitografi ve Dijital Işık İşleme alt yöntemleridir. Stereolitografi ultraviyole lazer ışını kullanarak seçici bir şekilde sıvıyı kürleme prensibini kullanır. Dijital Işık İşlemenin, Stereolitografiden farkı

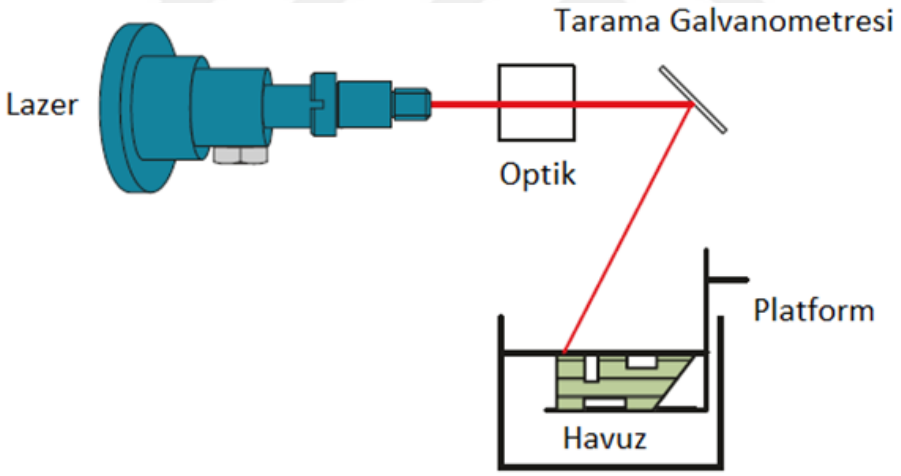
ise havuzun altından bir projektör yardımıyla kürleme yapmasıdır [2]. Yöntemin avantajları ve dezavantajları şunlardır:

Avantajlar

- Detaylı ve yüksek doğrulukta parça imalatı,
- Pürüzsüz yüzeyler ve
- Büyük ölçekli parçaların üretimine izin vermesidir.

Dezavantajlar

- Düşük raf ömrü,
- Düşük mekanik özellikler,
- Pahalı bir yöntem olması
- Yavaş olması ve
- Sadece fotopolimerler için kullanılabilir olmasıdır [3].

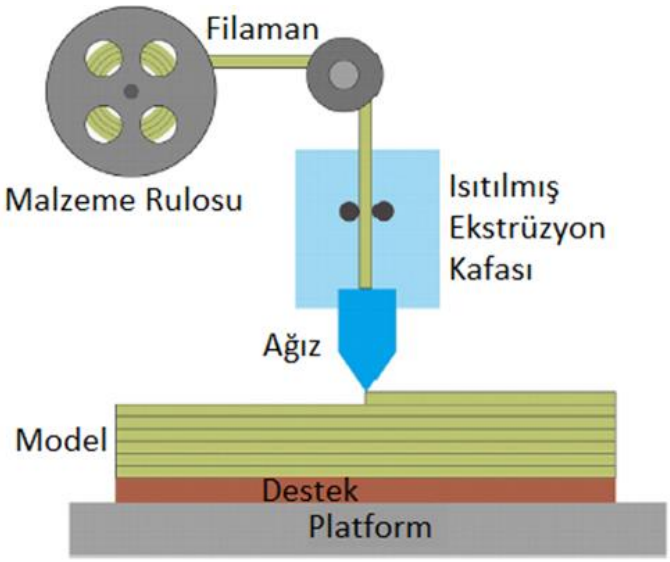


Şekil 1.8 Vat fotopolimerizasyonu (VPP) yönteminin şematik gösterimi [7]

2
ERGİYİK YIĞARAK MODELLEME

2.1 Ergiyik Yığarak Modelleme

Ergiyik Yığarak Modelleme (Fused Deposition Modeling, FDM) yöntemi, katmanlı imalat yöntemlerinden malzeme ekstrüzyonu prensibine dayanan bir yöntemdir. Temel olarak filaman malzemeyi yarı sıvı halde bir ağız yoluyla ekstrüde ederek önce katmanları daha sonrasında ise bütün ürünü imal etme yöntemine dayanır [10]. Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Ergiyik yığarak modelleme yönteminin şematik gösterimi [11]

Katmanlı imalat yöntemleri bir önceki bölümde görüldüğü üzere çok sayıda alt yönteme ayrılmaktadır. Literatürdeki çalışmalara göre bu yöntemler içerisinde polimer malzemeler için sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri Ergiyik Yığarak Modelleme yöntemidir [12]. Bu yöntemin tercih edilmesinin ve polimerler için çokça kullanılmasının sebepleri olarak;

- Karmaşık parçaların kolay elde edilebilmesi,
- Düşük maliyeti,
- Düşük atıkla çalışması,
- Numerik kontrollü olması,

- Tutarlılığı,
- Bakım kolaylığı,
- Toksik malzeme içermemesi,
- Cihaz boyutunun büyük olmaması ve
- Düşük sıcaklıkta çalışabilmesi gösterilmektedir [10], [11], [13]

Bununla birlikte yöntemin belirtilmesi gereken bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar;

- Yavaş olması,
- Seri üretime uygun olmaması,
- Pürüzlü son yüzey,
- Kısıtlı boyutlar,
- Anizotropi ve
- Gözeneklilik davranışı olarak karşımıza çıkıyor [10].

Ergiyik Yığarak Modelleme yöntemi için kullanılabilecek geniş bir malzeme yelpazesi bulunmaktadır. Popescu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada literatürde en çok araştırılan FDM malzemeleri sırasıyla ABS, PLA, PEEK, PC ve PEI olarak verilmiştir [14]. Yap ve arkadaşları da en çok kullanılan malzemeler olarak ABS, PLA, TPU ve PC malzemeleri olduğunu bunun dışında da çeşitli malzemelerinde FDM için kullanıldığını raporlamışlardır. Ayrıca ABS malzemenin etkileyici ısı direnci, darbe dayanımı, tokluk, eğilme mukavemeti ve düşük termal iletkenliği özellikleriyle en çok kullanılan malzeme olduğunu belirtmişlerdir [15].

2.2 Ergiyik Yığarak Modelleme Yönteminin Çalışma Prensibi

Ergiyik Yığarak Modelleme yönteminin kullanılması için her katmanlı imalat yönteminde olduğu gibi bilgisayar üzerinde bir üç boyutlu modele ihtiyaç duyulmaktadır. Stereolitografi (STL) formatında işlenen bu dosya piyasada çoğu bilgisayar destekli çizim programında tasarlanıp bu formata dönüştürülebilmektedir. Daha sonra bu dosya bir dilimleyici yazılıma aktarılarak model imalat aşamasında kullanılacak katmanlar ve örgülere bölünmektedir [16].

Bu dilimlenmiş haldeki boyutlar ve bütün parametreler G-Kodu adı verilen bir bilgiler ile yazıcıya aktarılır ve yazıcı bu G-Kodları ile üretime başlar [17].

Bu aşamada kullanılan malzeme filamanı sıvılaştırma bölmesi yardımıyla istenen sıcaklığa kadar ısıtır ve bu malzeme iki tahrik tekerleği tarafından beslenerek ekstrüde edilmeye başlar. Ergiyen malzeme ağız aracılığıyla imal tablası üzerine ekstrüde edilir. Ekstrüde edile malzeme soğuyarak önceden birikmiş malzeme ile birleşir. Bu ağız yapısı imal tablası üzerinde yatay düzlemde hareket ederek örgüler şeklinde üretime devam eder. Bu örgüler belirli bir kalınlık değeri için tamamlandığında ilk katman elde edilmiş olur. Daha sonra imal platformu dikey olarak hareketle bir katman kalınlığı mesafesinde aşağı inerek bir sonraki katmanın imalatı için makineyi hazır hale getirir. Bu işlem bütün katmanlar tamamlanana kadar devam eder [17].

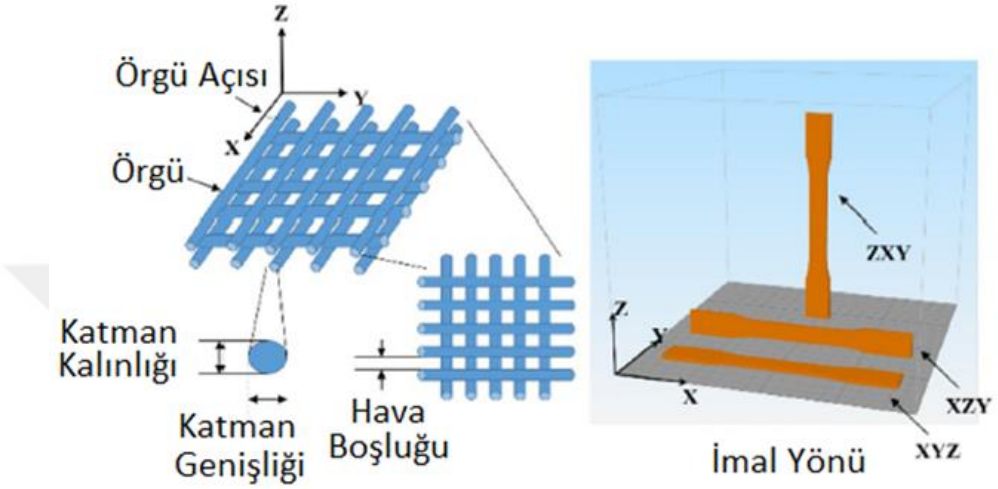
İmalat sırasında destek yapılarak ihtiyaç duyulabilir. Modelde sarkma açısı 45 dereceden fazla olan bir bölge için destek yapı kullanılır. Çoğu makine bu durum için ikinci bir ağız yapısına sahiptir. Bu yapı aynı malzemeyi kullanarak destek yapı oluşturmakla birlikte bazı makinelerde daha kolay ayrıştırılabilecek farklı malzemelerde kullanılabilmektedir [16].

Belirli bir sürenin sonunda yazıcı ilk başta dilimleyiciye gönderilen modeli birebir şekilde üretmiş olur. Bu aşamadan sonra ürün tabladan ayrılır destek yapılar söküldükten sonra (bazı durumlarda son işlemler gerekebilir) kullanıma hazır hale gelmiş olur.

2.3 Ergiyik Yığarak Modelleme Parametreleri

Ergiyik Yığarak Modelleme yönteminin geleneksel imalat yöntemlerine göre nispeten yeni ve gelişmekte olan bir yöntem olması sebebiyle mühendislik açısından bu yöntemden en yüksek faydayı sağlamak gerekmektir. Bu yöntemin kendine özgü parametreleri bulunmaktadır. Literatürde yer alan çalışmaların büyük çoğunluğu bu üretim parametrelerini optimize etmek, bu yolla mekanik dayanımı maksimize etmek veya mevcut teknoloji ile kaçınılmaz görünen anizotropi ve diğer davranışları belirlemek üzerinedir. Popescu ve arkadaşları bu parametreleri üç ana sınıfa ayırmışlardır. Bunlar;

- Dilimleme parametreleri: katman kalınlığı, ağız çapı (katman genişliği), yazma hızı, örgü açısı, örgü deseni, hava boşlukları, dolgu oranı, kontur sayısı,
- İmal Yönü (Oryantasyonu)
- Sıcaklık koşulları: ortam sıcaklığı, ekstrüzyon sıcaklığı ve tabla sıcaklığıdır [14].



Şekil 2.2 Üretim parametreleri [18]

Bu parametrelerin bazıları Şekil 2'de verilmiştir. Üretim parametrelerin tanımları aşağıda verilmiştir.

Katman Kalınlığı: Malzemenin biriktirildiği aşamada ağzın dikey doğrultuda tablaya veya bir önceki katmana olan mesafesidir. Katman yüksekliği olarak da bilinir.

Ağız Çapı: Ergimiş malzemenin imal aşamasında aktığı genişliktir. Katman genişliği bu parametreye bağlıdır ve katman kalınlığı bu değerden daha büyük olamaz.

Yazma Hızı: Belirli bir örgü uzunluğunun biriktirildiği süreyi tanımlar. Akış hızı, biriktirme hızı olarak da bilinir. Katmanların soğuma süresi doğrudan bu parametreye bağlıdır.

Örgü Açısı: Malzemenin belirli bir eksen üzerinde o eksen ile yaptığı açıyı tanımlar. Örgü yönü olarak da bilinir.

Örgü Deseni: Tasarım aşamasında örgü açıları ve imal yönüyle birlikte gerek katman içi gerek katmanlar arası uygulanan farklı yapıları tanımlar.

Hava Boşlukları: Biriktirme sırasında örgüler ve katmanlar arası meydana gelen hava boşluklarını tanımlar. Gözeneklilik ile doğrudan ilgilidir.

Dolgu Oranı: İmal aşamasında hava boşluklarının aksine bilinçli bir şekilde örgü desenleri ve kafes yapıları sayesinde düzenlenen malzeme yoğunluğunu tanımlar. Malzeme yüzdesi olarak da bilinir.

Kontur Sayısı: Üretilen malzemenin çevresini saran yapıyı tanımlar. Çevre sayısı olarak da bilinir.

İmal Yönü: İmal edilen ürünün hangi eksen üzerinde imal edildiğini belirtir. Üretim oryantasyonu olarak da bilinir.

Ortam Sıcaklığı: Biriktirme sırasındaki çevre sıcaklığıdır.

Biriktirme Sıcaklığı: Kullanılan filaman malzemenin biriktirme sırasındaki sıcaklığıdır. Zarf sıcaklığı olarak da bilinir.

Tabla Sıcaklığı: Biriktirme sırasında tablanın sıcaklığıdır.

Tüm bu parametreler üretim sırasında hem katman içi hem de katmanlar arası bağları etkilemektedir. Bu sebeple ürünün bütün mekanik özellikleri üzerinde etkide bulunurlar. Popescu ve arkadaşlarına göre, bu parametrelerin hepsinin malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkisi bulunsa da bunlar arasından en önemlileri imal yönü, örgü açısı, katman kalınlığı, dolgu oranı ve hava boşluklarıdır. Ayrıca polimer malzemeler için sıcaklık parametreleri de büyük önem arz etmektedir [14].

2.4 Üretim Parametreleri ile Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkiler

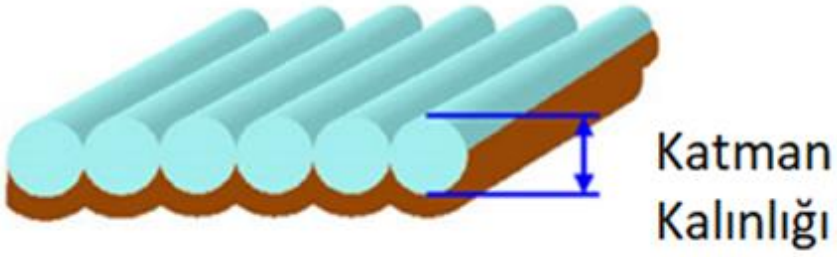
Ergiyik Yığarak Modelleme ile üretilen parçalarda dikkat edilmesi gereken en önemli davranışlar yöntemin yapısı gereği karşımıza çıkan anizotropi ve gözeneklilik davranışlarıdır. Somireddy ve arkadaşlarının çalışmasında anizotropi durumunun katmanlı şekilde imal edilirken oluşan mikro yapı değişiklilerine bağlı olduğu belirtilmektedir. Bunun yanı sıra ilk malzemenin izotropik olmasına rağmen

üretilen parçanın anizotropik davranış sergilediği bu çalışmada raporlanmıştır [19]. Yao ve arkadaşlarının çalışmasında ise basılan parçanın bu davranışını açıklamak için lif yönü, katman içi ve katmanlar arası yön olarak üç malzeme yönü tanımlanmıştır [20]. Gözeneklilik davranışı da mekanik özellikler üzerinde önemli etkisi olan bir durumdur. Brackett ve arkadaşları gözenekliliği mekanik performansı engelleyen yaygın bir kusur olarak tanımlamışlardır [21].

Bu davranışlar katmanlı imalat sırasında katmanlar arası ve katmanlar içi bağların sürekliliğini, kalitesini ve yük altındaki kırılma davranışlarını etkileyerek parçanın mekanik özelliklerini belirlerler. Üretim parametreleri de yine bu davranışlar çerçevesinde mekanik özellikleri etkiler. Bu sebeple her birinin detaylı incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Literatürde Ergiyik Yığarak Modelleme ve bu yöntem sonucu üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar üretim parametreleri için gruplandırılmıştır.

2.4.1 Katman Kalınlığı

Katman kalınlığı literatür çalışmalarında çok sayıda ele alınan bir parametredir. Şekil 2.3'te gösterimi verilmiştir. Wang ve arkadaşları elastik modül, çekme dayanımı, kopma uzaması, depolama modülü değerleri için yaptıkları çalışmada düşük katman kalınlığının daha yüksek değerler verdiğini raporlamışlardır. Buna sebebi olarak yüksek katman kalınlığının imal sırasında yeterli basınç oluşturmaması ve bunun sonucunda oluşan gözeneklilik davranışını vermişlerdir [22]. Benzer sebep ve sonuçlar diğer çalışmalarda da bulunmaktadır (Uddin ve arkadaşları, Garzon-Hernandez ve arkadaşları, Rankoui ve arkadaşları, Vicente ve arkadaşları [12], [23]–[25]).



Şekil 2.3 Katman kalınlığının gösterimi [26]

Ning ve arkadaşları, düşük katman kalınlığında, katmanların ağız tarafından sıkıştırıldığı, böylece ara katmanların birbirleriyle sıkı bir şekilde kaynaştığı ve bunun da büyük bir ara bağlanma kuvvetine yol açtığını belirtmişlerdir [27].

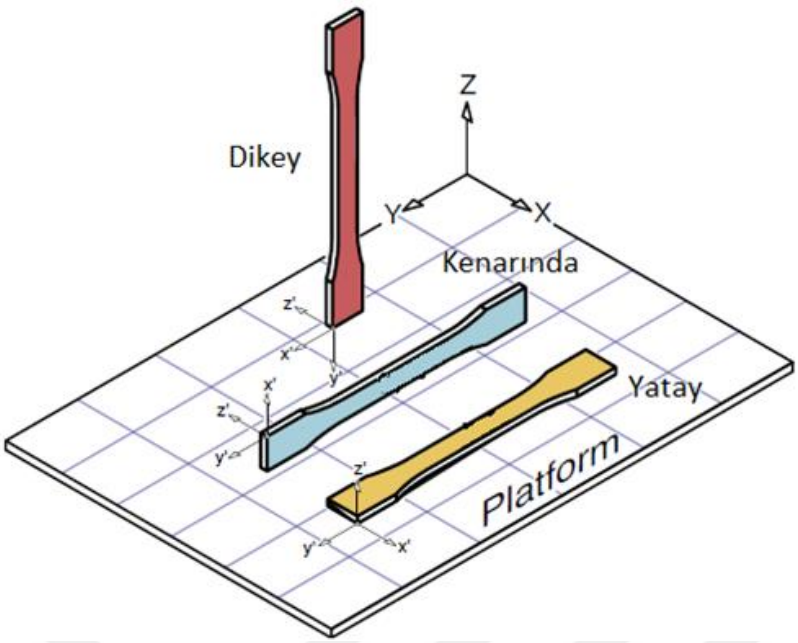
Mohamed ve arkadaşlarının çalışmasında farklı bir bakış açısı olarak katman kalınlığının artışının sabit numune kalınlığında katman sayısını azalttığı ve dolayısıyla ısıma ve soğutma döngüsü sayısının azaldığı belirtilmiştir. Bu sebeple de yüksek kalınlık değerlerinde üniform olmayan termal gradyan artışının katmanlar arası bozulmaya ve iç gerilim artışına sebep olarak mekanik özellikleri olumsuz etkilediği raporlanmıştır [26]. Samykano ve arkadaşlarının çalışmasında da benzer bir sebep sonuç ilişkisi verilmiştir [28].

Rajpurohit ve arkadaşlarının çalışmasında da düşük katman kalınlığı değeriyle yüksek bir bağlanma alanı ve az miktarda gözeneklilik oluşumuyla yüksek mekanik performanslı ürünler elde edilebileceği belirtilirken, He ve arkadaşlarının çalışmasında yorulma dayanımı için düşük katman kalınlığının mikro boşluk alanını ve potansiyel çatlak yolundaki birim alan miktarını azalttığını ve daha yüksek bir yorulma direncine yol açtığını raporlamışlardır [29], [30].

Bütün çalışmalardan özetle yüksek mekanik özellikler için düşük katman kalınlığı önerilmektedir.

2.4.2 İmal Yönü

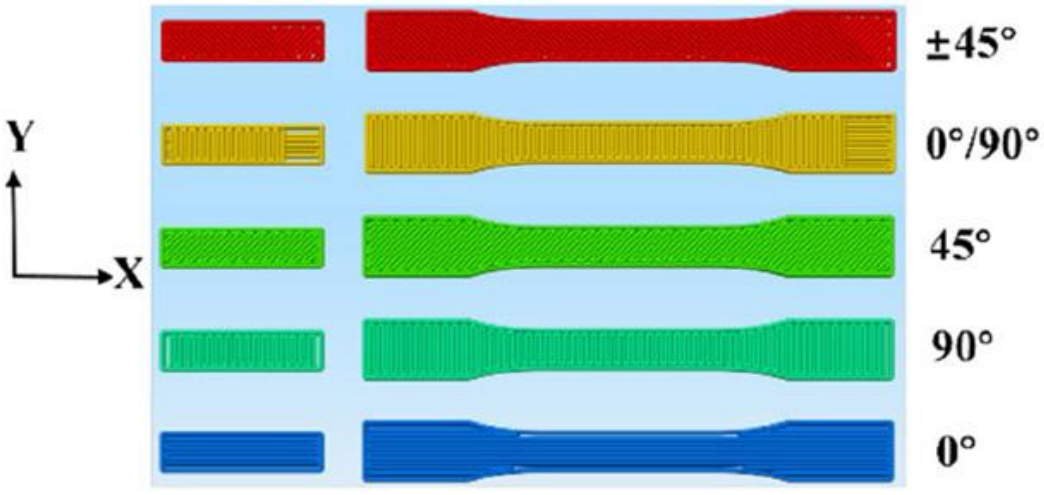
İmal oryantasyonu olarak da bilinen bu parametre üretim sırasında parçanın hangi eksen doğrultusunda üretildiğini belirtir. Bu sebeple doğrudan anizotropi davranışını etkiler. Durgun ve Ertan'ın çalışmasında yer çekimi yönünde imal edilen parçaların biriktirme sırasında zayıf bağ oluşturacağını raporlamışlardır. Yatay yönde imal edilen parçaların ise daha üstün bağ kalitesi gösterdiğini belirtmişlerdir. He ve arkadaşlarının çalışmasında da bu durumu destekler sonuçlar bulunmaktadır [10], [30]. İmal yönü parametresinin gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir. Bütün çalışmalardan özetle yüksek mekanik özellikler için yükleme yönünde imal önerilmektedir.



Şekil 2.4 İmal yönü parametresinin gösterimi [31]

2.4.3 Örgü Açısı

Örgü açısı parametresi literatürde çok kez çalışılmış bir diğer parametredir. Uygulanan yükün taşınması ile doğrudan bağlantılı olan bu parametre temelde anizotropi davranışıyla ilişkilidir. Şekil 2.5'te örgü açısına örnekler verilmiştir.



Şekil 2.5 Örgü açılarına örnekler [18]

Durgun ve Ertan'ın çalışmasında küçük örgü açılarının yük doğrultusundaki etkin uzunlukları nedeniyle yüksek mukavemet gösterdiği raporlanmıştır [10].

Ahn ve arkadaşları daha başarılı parçaların üretimi için önerdiği kurallar listesinde örgü açısı için çekme yüklerini lifler boyunca eksenel olarak taşıyacak parçalar oluşturulmasını tavsiye etmektedir [16].

Rankhoui ve arkadaşları 0° örgü açısının çekme mukavemeti ve elastik modül için en yüksek değerleri verdiğini raporlamışlardır. Bunun nedeni olarak ise yükün örgü yönünün ekseni üzerinde olmasıyla katmanlar arası bağlantı hatalarından az ölçüde etkilenmesini vermişlerdir [24]. Benzer sebep ve sonuçlar diğer çalışmalarda da bulunmaktadır (Rajpurohit ve arkadaşları, Yao ve arkadaşları, Zhang ve arkadaşları, Ziemian ve arkadaşları, Sood ve arkadaşları [18], [20], [29], [32], [33]).

Wang ve arkadaşlarının çalışmasında çekme mukavemeti, kopma uzaması ve depolama modülü değerlerinin gerilme doğrultusunda olan örgü açılarında en yüksek değerleri verdiğini belirtmişlerdir. Bunun sebebini gerilme doğrultusunda kırılma modunun katman içerisinde olması olarak raporlamışlardır [22]. Mohamed ve arkadaşları da parçaların viskoelastik özellikleri için gerilme doğrultusundaki örgü açılarını önermişlerdir [26].

Samykano ve arkadaşları yüksek örgü açısının, biriktirme yönü boyunca gerilme birikimini arttırdığını, bunun da daha fazla bozulma ve zayıf bağlanma ile sonuçlandığını raporlamıştır [28].

Bütün çalışmalardan özetle yüksek mekanik özellikler için 0° örgü açısı önerilmektedir.

2.4.4 Dolgu Oranı

Günay ve Arkadaşlarının çalışmasında dolgu oranının artışıyla birlikte çekme mukavemetinin arttığı raporlanmıştır. Bu durumun sebebi olarak numunenin kesit alandaki doluluk oranının yüksek olmasının birim alana düşen çekme yükü taşıma kapasitesini arttırması verilmiştir [34].

Brackett ve Arkadaşlarının çalışmasında artan dolgu oranının gözenekliliği azalttığını ve dolayısıyla çekme mukavemetini elastisite modülünü arttırdığını raporlamışlardır [21]. Samykano ve arkadaşları ile Wang ve arkadaşlarının çalışmalarında da benzer sebep sonuç ilişkisi verilmiştir [22], [28].

Vicente ve arkadaşlarının çalışmasından dolgu oranının artışıyla çekme dayanımıyla birlikte sertlik değerinin de arttığı raporlanmıştır [25].

Baich ve arkadaşlarının çalışmasında farklı dolgu oranı değerlerini, farklı örgü desenleri kullanarak karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuca göre yüksek dolgu oranlı tasarımın daha iyi mekanik özellikler göstermesine rağmen örgü deseninin tasarımı ile düşük dolgu oranlarıyla birlikte de yakın mukavemet değerleri elde edilirken maliyet yükünden kurtulunabileceğini belirtmişlerdir [35].

Bütün çalışmalardan özetle yüksek mekanik özellikler için yüksek dolgu oranı (%100) önerilmektedir.

2.4.5 Hava Boşlukları

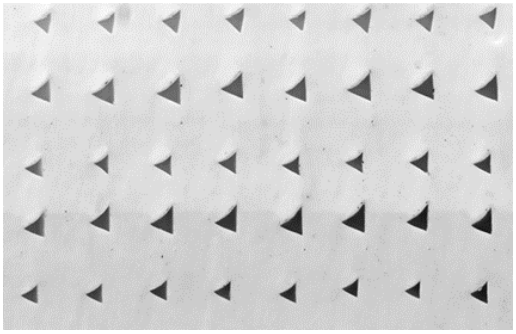
Sood ve arkadaşları çalışmalarında hava boşluklarının olmaması örgülerin arasındaki difüzyonu iyileştirerek bağ kalitesini arttıracağını belirtmiştir [33]. Benzer bir sonuç Somireddy ve arkadaşlarının çalışmasında verilmiştir [19].

Mohamed ve arkadaşları sıfır hava boşluğunun örgüleri yakınlaştırıp yoğun bir mikro yapı ve düşük gözeneklilik oluşturduğunu böylece de yüksek dinamik mekanik özellikler sağladığını raporlamışlardır [26].

Ahn ve arkadaşları ise çalışmalarında hem mukavemeti hem de sertliği artırmak için negatif bir hava boşluğu kullanılmasını önermiştir [16].

Popescu ve arkadaşlarının çalışmasında da negatif hava boşluklarının mekanik özellikleri iyileştirdiği belirtilmiştir [14].

Hava boşluklarının görseli Şekil 2.6'te verilmiştir. Bütün çalışmalardan özetle yüksek mekanik özellikler için minimum hava boşluğu önerilmektedir.



Şekil 2.6 Ergiyik yığarak modelleme ile üretilmiş bir parçadaki hava boşlukları (Dijital Mikroskop Görüntüsü)[24]

2.4.6 Sıcaklık

Katı polimerik malzemelerden imal edilecek parçalarda, parçanın çalışma sıcaklığı mekanik dayanımı üzerinde göz ardı edilemeyecek etkileri bulunmaktadır.

Wang ve arkadaşları ağız sıcaklığının doğrudan malzemenin akışkanlığını etkilediği ve bütün mekanik özellikler açısından bir optimum değere sahip olduğu belirtilmiştir. Düşük sıcaklığın zayıf akışkanlık yüksek sıcaklığında termal olarak bozulmaya yol açacağı ve katılaşma sürecinin sağlanamayacağı yazılmıştır [22]. Ning ve arkadaşları da benzer bir şekilde bir optimum sıcaklık olduğunu raporlamışlardır [27]. Shubham ve arkadaşları da düşük ağız sıcaklığının mikro boşluklar oluşturarak mekanik özellikleri olumsuz etkileyeceğini belirtmişlerdir [36].

Sun ve arkadaşlarının çalışmasında imal ve çevre sıcaklığının mezo yapı ve katmanlar arası bağ kuvvetini etkilediğini belirtmişlerdir [37].

Vicente ve arkadaşları katmanlar arası soğuma süresinin düşük tutulması gerektiğini belirtmişlerdir. Buna sebep olarak yüksek sıcaklıkların difüzyon katsayısını arttırdığını bunun da polimer zincirlerinin hareketliliğini arttırarak genel olarak difüzyon akışını iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Bu sayede katmanlar arasında daha iyi bir bağ oluşur ve parçalar daha yüksek performans sağlar [25]. Rajpurohit ve arkadaşlarının çalışmasında da parçanın performansının katılaşma sırasındaki termal difüzyondan büyük ölçüde etkilendiği belirtilmiştir [29].

He ve arkadaşları yorulma dayanımı için yaptıkları çalışmalarında daha yüksek sıcaklığın, muhtemelen daha aktif moleküler hareket nedeniyle yorulma ömrünü azalttığını raporlamışladır [30].

Bütün çalışmalardan özetle yüksek mekanik özellikler için optimum ağız sıcaklığı değerinin belirlenip kullanılması önerilmektedir.

2.4.7 Ağız Çapı

Vicente ve arkadaşlarının çalışmasında düşük ağız çapının malzemedeki boşlukları azaltarak katmanlar arası bağı güçlendirdiğini ve böylece çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinin arttığını raporlamışlardır [25].

Ahn ve arkadaşları da düşük ağız çağının işlem süresini arttıracağını ancak yüzey kalitesini yükselteceğini belirtmişlerdir [16].

Bütün çalışmalardan özetle yüksek mekanik özellikler için düşük ağız çapı önerilmektedir.

2.4.8 Yazma Hızı

Ning ve arkadaşları yüksek yazma hızının örgüler arası daha az etkileşim ve düşük ara bağ oluşumuyla mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir [27]. Yap ve arkadaşları ile Günay ve arkadaşları da benzer sonuçlar ortaya koymuşlardır [15], [34].

2.4.9 Literatür Çalışmaları Özeti ve Tablosu

Literatürde yapılan çalışmalara ve parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki etkilerine bakıldığında ergiyik yığarak modelleme yönteminde mekanik özellikler yardımıyla daha üstün parçalar elde etmek mümkün gözükmektedir. Bununla birlikte süre, maliyet ve genel istekler göz önünde bulundurulduğunda bazı parametreleri öne çıkarmak ve tek bir parametre yerine bu parametrelerin kombinasyonlarıyla birlikte çalışmak daha verimli sonuçlar verecektir.

Tablo 2.1'te literatür taraması sırasında parametreler üzerine bilgiler içeren çalışmalar içerdiği parametreler, kullanılan malzemeler ve çıktıların olduğu mekanik özellikler olarak düzenlenmiştir.

Tablo 2.1 Parametreler ve mekanik özellikler arası bağ içeren makaleler

Makale	Malzeme	Parametreler	Mekanik özellikler
Domingo-Espin ve Ark. [1]	PC	İmal Yönü	Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti, Çekme Gerinimi
Durgun Ertan ve Ark. [10]	ABS	Örgü Açısı, İmal Yönü	Yüzey Pürüzlülüğü, Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti, Bükülme Mukavemeti
Zou ve Ark. [11]	ABS	Örgü Açısı	Elastisite Modülü, Poisson Oranı, Çekme Mukavemeti, Maksimum Uzama
Garzon-Hernandez ve Ark. [12]	ABS	Katman Kalınlığı, Hava Boşluları	Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti
Vălean ve Ark. [13]	PLA	İmal Yönü, Katman Kalınlığı, Ağız Çapı	Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti
Yap ve Ark. [15]	PC, ABS, PC/ABS	Ağız Çapı, Yazma Hızı, Dolgu Oranı	Çekme Mukavemeti, Elastisite Modülü, Yüzde Uzama, Eğilme Mukavemeti, Eğilme Modülü
Ahn ve Ark. [16]	ABS	Hava Boşluğu, Katman Genişliği, İmal Yönü, Sıcaklık, Renk	Çekme Mukavemeti, Basma Mukavemeti
Cantrell ve Ark. [17]	ABS, PC	İmal Yönü, Örgü Açısı	Poisson Oranı, Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti, Akma Mukavemeti, Kopma Uzaması, Gerinim Enerjisi
Zhang ve Ark. [18]	PLA, Cu/PLA	Örgü Açısı	Çekme Mukavemeti, Elastisite Modülü, Yüzde Uzama, Depolama Modülü, Tan Delta
Somireddy ve Ark. [19]	ABS	Hava Boşluları	Elastisite Modülü
Yao ve Ark. [20]	PLA	İmal Yönü, Katman Kalınlığı	Elastisite Modülü, Poisson Oranı, Kayma Modülü
Brackett ve Ark. [21]	ABS	Katman Kalınlığı, Dolgu Oranı	Yoğunluk, Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti

Tablo 2.1 Parametre ve mekanik özellik bağlantısı içeren makaleler (devamı)

Makale	Malzeme	Parametre	Mekanik özellikler
Wang ve Ark. [22]	PLA	Yazma Açısı, Katman Kalınlığı, Dolgu Oranı, Ağız Sıcaklığı	Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti, Yüzde Kopma Uzaması, Depolama Modülü, Kayıp Modülü, Kayıp Oranı
Uddin ve Ark. [23]	ABS	İmal yönü, Örgü açısı, Katman Kalınlığı	Elastisite Modülü, Akma Gerilmesi, Kopma Gerilmesi, Akma Gerinimi
Rankouhi ve Ark. [24]	ABS	Katman Kalınlığı, Katman Sayısı, Örgü Açısı	Çekme Mukavemeti, Elastisite Modülü
Vicente ve Ark. [25]	ABS	Ağız Çapı, Dolgu Oranı, Örgü Açısı, Katman Kalınlığı	Çekme Mukavemeti, Elastisite Modülü
Mohamed ve Ark. [26]	PC-ABS	Katman Kalınlığı, Hava Boşluğu, Yazma Açısı, İmal Yönü, Katman Genişliği, Kontur Sayısı	Depolama Modülü, Kayıp Modülü, Tan Delta
Ning ve Ark. [27]	CFRP	Yazma Hızı, Ağız Sıcaklığı, Katman Kalınlığı	Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti, Sertlik, Süneklik, Akma Mukavemeti
Samykano ve Ark. [28]	PLA	Katman Kalınlığı, Örgü Açısı, Dolgu Oranı	Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti, Akma Mukavemeti, Enerji Sönümleme, Hasar Uzaması
Rajpurohit ve Ark.[29]	PLA	Katman Kalınlığı, Örgü Açısı, Katman Genişliği	Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti
He ve Ark. [30]	ABS	İmal Yönü, Ağız Çapı, Katman Kalınlığı, Çevre Sıcaklığı	Depolama Modülü, Yorulma Mukavemeti
Chacón ve Ark. [31]	PLA	Katman Kalınlığı, İmal Yönü	Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti, Bükülme Modülü, Bükülme Mukavemeti
Ziemian ve Ark. [32]	ABS	İmal Yönü, Örgü Açısı	Çekme Mukavemeti, Elastisite Modülü, Bükülme Modülü, Darbe Dayanımı

Tablo 2.1 Parametre ve mekanik özellik bağlantısı içeren makaleler (devamı)

Makale	Malzeme	Parametre	Mekanik özellikler
Sood ve Ark. [33]	ABS	Katman Kalınlığı, İmal yönü, Örgü Açısı, Katman Genişliği, Hava Boşukları	Çekme Mukavemeti, Bükülme Mukavemeti, Darbe Dayanımı
Günay ve Ark. [34]	PLA	Dolgu Oranı, Baskı Hızı, Tarama Açısı	Çekme Mukavemeti
Baich ve Ark. [35]	ABS	Örgü Düzeni, Dolgu Oranı, Hava Boşlukları	Çekme Mukavemeti, Elastisite Modülü, Basma Mukavemeti, Basma Modülü, Bükülme Mukavemeti, Bükülme Modülü
Shubham ve Ark. [36]	ABS	Katman Kalınlığı, Ağız Sıcaklığı, Dolgu Oranı	Depolama Modülü, Kayıp Modülü, Mekanik Sönümleme
Sun ve Ark. [37]	ABS	İmal Sıcaklığı, Soğuma Süresi	Sıcaklık
Huang ve Ark. [38]	PPSF	Örgü Açısı, Katman Genişliği, Üretim Deseni, Frekans	Depolama Modülü, Kayıp Modülü, Tan Delta, Camsı Geçiş Sıcaklığı, Kompleks Viskozite Modülü
Bertoldi ve Ark. [39]	ABS	İmal Yönü	Çekme Mukavemeti, Elastisite Modülü
Cassavola ve Ark. [40]	ABS, PLA	Örgü Açısı	Elastisite Modülü
Dai ve Ark. [41]	PLA	İmal Yönü	Elastisite Modülü, Akma Mukavemeti
Gorski ve Ark. [42]	ABS	Örgü Açısı	Çekme Mukavemeti, Yüzde Uzama, Elastisite Modülü, Bükülme Mukavemeti, Darbe Dayanımı

Tablo 2.1 Parametre ve mekanik özellik bağlantısı içeren makaleler (devamı)

Makale	Malzeme	Parametre	Mekanik özellikler
Deng ve Ark. [43]	PEEK	Yazma Hızı, Katman Kalınlığı, Dolgu Oranı, Yazma Sıcaklığı	Çekme Mukavemeti, Yüzde Uzama, Elastisite Modülü, Darbe Dayanımı
Torres ve Ark. [44]	PLA	Dolgu Oranı, Katman Kalınlığı, Isıl İşlem	Kayma Modülü, Kesme Mukavemeti, Kırılma Gerinimi, Orantı Sınırı, Akma Dayanımı
Priya ve Ark. [45]	ABS, PLA	Örgü Düzeni, Katman Kalınlığı, Frekans	Elastisite Modülü, Çekme Mukavemeti, Bükülme Modülü, Bükülme Mukavemeti, Darbe Dayanımı, Depolama Modülü, Kayıp Modülü
Li ve Ark. [46]	PLA	Katman Kalınlığı, Dolgu Oranı, Yazma Hızı, Yazma Sıcaklığı	Çekme Mukavemeti, Bağlanma Oranı

3
TEORİ VE MODEL

3.1 Depolama Modülü ve Dinamik Mekanik Özellikler

Bir önceki bölümde üretim parametrelerinin malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde büyük ölçüde etkisinin olduğu literatürdeki çalışmalardan örneklerle verilmiştir. Ergiyik Yığarak Modelleme ile üretilen parçalardaki bu bağlantıyı bir model yardımıyla kurabilmek için temel davranışları göz önüne alarak aşamalı bir şekilde ilerlemek gerekmektedir.

Polimer malzemeler için sıcaklık çok önemli bir parametredir. Malzemenin mekanik özellikleri ve sıcaklık bağını gösteren en iyi parametrelerden biri ise depolama modülüdür. Depolama modülü, sıcaklığın fonksiyonu olarak, Dinamik Mekanik Analiz (DMA) testi ile belirlenmektedir. DMA testi artan sıcaklık ve dinamik yük altında malzemenin mekanik özelliklerini ölçen bir testtir. Çoğunlukla polimer malzemeler için kullanılan bu test, depolama modülü, kayıp modülü ve kompleks modül gibi bilgileri vermesi yanı sıra camsı geçiş sıcaklığı gibi önemli parametrelere de çok duyarlı bir yöntemdir [47]. Depolama modülü, enerjiyi emme yeteneğini ifade eden sertlik özelliğini temsil ederken, kayıp modülü, enerjinin dağılmasını belirtir [36].

Literatürde yapılan birçok çalışma statik yükler altında yapılmıştır. Wang ve arkadaşlarının çalışmasında otomotiv sektörü örnek verilerek kullanılacak parçaların çoğunun dinamik gerilmelere, titreşime ve deformasyonlara maruz kalacağı söylenmiştir. Böyle bir durumda da incelenmeyen dinamik yükleme koşullarının döngüsel deformasyonlarla birlikte problemler çıkarabileceği belirtilmiştir. Bu sebeple de dinamik mekanik özelliklerin araştırılması gerekliliğini vurgulamışlardır [22]. Mohamed ve arkadaşları da benzer şekilde dinamik yükler altında oluşacak döngüsel deformasyonların viskoelastik özellikler göstereceğini ve bu durumun incelenmesi gerekliliğini belirtmişlerdir [26].

Zhang ve arkadaşlarının çalışmasında depolama modülünün polimer zincirlerinin düzenlenmesinden, bağlar arası kuvvetten ve lif sertliğinden etkilenen bir modül

olduğu belirtilmiştir [18]. Arivazgahan ve arkadaşlarının çalışmasında bu polimer zincirlerinin hareketliliğinin sıcaklık artışı ile artmakta olduğu söylenmektedir. Sıcaklık artışının depolama modülünü azalttığı ve kayıp modülünü arttırdığı raporlanmıştır. Bunun nedeni olarak da polimer zincirindeki gevşeme ile enerji depolama eğilimi azalması verilmiştir [48].

Depolama modülü, özetle malzemenin elastik şekil değişimi ile ilişkili bir modüldür. Tanım olarak çekme veya basma testleri ile ölçülen elastisite modülünün de tanımıyla benzerlik göstermektedir. Buradan yola çıkarak bu iki modülün aynı fiziksel durumun sayısal ifadesi olan farklı modül tanımları gibi görünmektedir. Farklı testler ile ölçülseler de iki modülde elastik şekil değişimi ile alakalıdır ve aralarında bir korelasyon olması mümkün görünmektedir. Deng ve arkadaşlarının çalışmalarında dört farklı tipte epoksi malzeme için depolama modülü ve sıcaklık kontrollü çekme testlerinden elde edilmiş elastisite modülü değerlerini karşılaştırmışlar, değerlerin birbirinden farklı olduğu, bununla birlikte sıcaklık değişimi ile her iki modülün değerlerindeki değişimin aynı trendi izlediği sonucuna ulaşmışlardır [43]. Acar ve arkadaşlarının Richeton ve arkadaşları [49] tarafından kullanılan elastisite modülü tanımını kullandıkları bir başka modelleme çalışmada [50], depolama modülü değerleri yerine ilgili sıcaklıktaki elastisite modülü değerleri modül parametresi olarak kullanılmış, sıcaklığa bağlı mekanik davranışı oldukça başarılı şekilde tahmin eden model sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmalarla model parametresi olarak depolama modülü değerleri yerine elastisite modülü değerlerinin de kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Bu durumdan yola çıkarak anizotropik bir malzemenin mühendislik sabitlerini kullanarak, yine bu malzemenin yöne bağlı depolama modülünü hesaplayabilmek mümkün görünmektedir.

Önerilecek modelin ilk aşamasında Ergiyik Yığarak Modelleme yönteminin parametreleri için hem sıcaklık değişikliğine hem de dinamik yükleme durumuna duyarlı depolama modülünün hesaplanabilmesi yöntem ile mekanik özellikler arasındaki bağ hakkında önemli bilgiler verecektir.

3.2 Richeton Modeli

Richeton ve arkadaşları, daha önce Mahieux ve Reifsnider'ın çalışmasını geliştirerek polimerlerin değişik sıcaklık ve şekil değiştirme hızı için, depolama modülünü tahmin edebilen bir model sunmuşlardır [49], [51].Bu modele göre depolama modülünü hesaplayan eşitlik, Denklem 3.1'te verilmiştir.

$$E(T,f) = \big(E_1(f) - E_2(f)\big) * \exp\left(-\left(\frac{T}{T_\beta * (f)}\right)^{m_1}\right) + \big(E_2(f) - E_3(f)\big) * \exp\left(-\left(\frac{T}{T_g * (f)}\right)^{m_2}\right) + \big(E_3(f)\big) * \exp\left(-\left(\frac{T}{T_f * (f)}\right)^{m_3}\right) \quad (3.1)$$

Burada $E_i(f)$, frekansın fonksiyonu olarak, üç sıcaklık geçişi değerindeki anlık katılık değerleridir. $T_ß$, T_g ve T_f termal geçiş sıcaklıkları olmakla birlikte m_i değerleri ise Weibull modülleridir. $T_ß$, T_g , T_f ve E_i değerlerinin denklemleri Denklem 3.2, Denklem 3.3, Denklem 3.4 ve Denklem 3.5'te verilmiştir [49].

$$\frac{1}{T_\beta} = \frac{1}{T_\beta^{ref}} + \frac{k}{\Delta H_\beta} * ln\left(\frac{f^{ref}}{f}\right) \quad (3.2)$$

$$T_g = T_g^{ref} + \frac{-c_2^{ref} * \log\left(f^{ref}/f\right)}{c_1^{ref} + \log\left(f^{ref}/f\right)} \quad (3.3)$$

$$T_f = T_f^{ref} * \left(1 + 0.01 * log\left(\frac{f}{f^{ref}}\right)\right) \quad (3.4)$$

$$E_i = E_i^{ref} * \left(1 + s * log\left(\frac{f}{f^{ref}}\right)\right) \quad (3.5)$$

Burada $T_ß$, beta geçişi sıcaklığı, T_g, camsı geçiş sıcaklığı ve T_f, ergime sıcaklığıdır. $\Delta H_ß$, ß-aktivasyon enerjisi, c_1^{ref} ve c_2^{ref},camsı geçiş sıcaklığına bağlı Williams-Landel-Ferry (WLF) parametreleri ve s, modülün duyarlılık sabitidir [49].

Bu model yukarıda anılan hali ile polimerler için oluşturulmuş tek eksenli çalışan bir modeldir. Katmanlı imalat ile üretilmiş parçalar için kullanılması, yapısı gereği var olan anizotropiden kaynaklı olarak, çok eksenli anizotropik bir hal için genişletilmesi ile mümkün olacaktır.

3.3 Anizotropi Davranışının Modele Dahil Edilmesi

Ergiyik Yığarak Modelleme için Richeton ve arkadaşlarının modeline anizotropi davranışını dahil etmek bir sonraki aşama olacaktır. Somireddy ve arkadaşları Ergiyik Yığarak Modelleme yönteminde ilk filaman malzemenin izotropik olmasına rağmen ortotropik bir malzeme gibi davrandığını belirtmişlerdir [19]. Bu bilgiden yola çıkarak anizotropi ve ortotropi arasındaki makro mekanik gerilme ve gerinim ilişkileri incelemek önem arz etmektedir.

3.3.1 Genelleştrilmiş Hooke Kanunu

Bir elastik malzemede bir noktadaki her gerilme bileşeni 9 gerinim bileşeninin bir fonksiyonudur. En genel halde malzemenin anizotropik durumunu tanımlamak için "Genelleştirilmiş Hooke Kanunu" kullanılır. Bu durumu tanımlayan eşitlik Denklem 3.6'da verilmiştir. Bu durumda elimizde 81 adet bileşeni olan Denklem 3.7'deki gibi bir katılık matrisi oluşur.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} * \varepsilon_{kl} \tag{3.6}$$

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\\ \sigma_{12}\\ \sigma_{32}\\ \sigma_{13}\\ \sigma_{21}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} & C_{1132} & C_{1113} & C_{1121}\\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} & C_{2232} & C_{2213} & C_{2221}\\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3332} & C_{3313} & C_{3321}\\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} & C_{2332} & C_{2313} & C_{2321}\\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3113} & C_{3132} & C_{3113} & C_{3121}\\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} & C_{1232} & C_{1213} & C_{1221}\\ C_{3211} & C_{3222} & C_{3233} & C_{3223} & C_{3231} & C_{3212} & C_{3232} & C_{3213} & C_{3221}\\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1331} & C_{1312} & C_{1332} & C_{1313} & C_{1321}\\ C_{2111} & C_{2122} & C_{2133} & C_{2123} & C_{2131} & C_{2112} & C_{2132} & C_{2113} & C_{2121}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \varepsilon_{23}\\ \varepsilon_{31}\\ \varepsilon_{12}\\ \varepsilon_{32}\\ \varepsilon_{13}\\ \varepsilon_{21}\end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Bu aşamadan sonra aşağıdaki simetri koşulları kullanılarak tensörel sadeleştirmeler uygulanır. Bu koşulların eşitlikleri Denklem 3.8-16'daki denklemler ile verilmiştir [52].

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} \tag{3.8}$$

1. Koşul:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} * \varepsilon_{kl} \Rightarrow \sigma_{ji} = C_{jikl} * \varepsilon_{kl} \tag{3.9}$$

$$C_{ijkl} * \varepsilon_{kl} = C_{jikl} * \varepsilon_{kl} \Rightarrow C_{ijkl} = C_{jikl} \tag{3.10}$$

2. Koşul:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} * \varepsilon_{kl} = C_{ijlk} * \varepsilon_{lk} \Rightarrow C_{ijkl} = C_{ijlk} \tag{3.11}$$

3. Koşul: Gerilme ve gerinimler arasındaki ilişkiyi elastik enerji fonksiyonundan yararlanarak denklem 11'deki eşitlikler elde edilir.

$$U = \frac{1}{2} * \sigma * \varepsilon \, , \sigma_{ij} = C_{ijkl} * \varepsilon_{kl} \tag{3.12}$$

$$U = \frac{1}{2}\left(C_{ijkl} * \varepsilon_{kl}\right) * \sigma_{ij} \tag{3.13}$$

$$U = \frac{1}{2}\left(C_{jilk} * \varepsilon_{lk}\right) * \sigma_{ji} \tag{3.14}$$

$$U = \frac{1}{2}\left(C_{jikl} * \varepsilon_{kl}\right) * \sigma_{ji} \tag{3.15}$$

$$C_{ijkl} = C_{jikl} \, , C_{ijkl} = C_{klij} \tag{3.16}$$

Uygulanan simetri koşullarıyla birlikte Denklem 3.17'deki bileşenlerin kısaltmaları kullanılarak Denklem 3.18'deki anizotropik katılık matrisi ve Denklem 3.19'daki anizotropik gevşeklik matrisi formları elde edilir. Bu form **anizotropik** malzemeyi tanımlar ve 81 adet bileşenden 36 adet bileşene indirgenmiş olur [53].

$$\begin{gathered}
\sigma_{11} = \sigma_1 \, , \varepsilon_{11} = \varepsilon_1 \\
\sigma_{22} = \sigma_2 \, , \varepsilon_{22} = \varepsilon_2 \\
\sigma_{33} = \sigma_3 \, , \varepsilon_{33} = \varepsilon_3 \\
\sigma_{23} = \sigma_{32} = \sigma_4 \, , 2\varepsilon_{23} = 2\varepsilon_{32} = \gamma_{23} = \gamma_{32} = \varepsilon_4 \\
\sigma_{13} = \sigma_{31} = \sigma_5 \, , 2\varepsilon_{13} = 2\varepsilon_{31} = \gamma_{13} = \gamma_{31} = \varepsilon_5
\end{gathered} \tag{3.17}$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma_6 \text{ , } 2\varepsilon_{12} = 2\varepsilon_{21} = \gamma_{12} = \gamma_{21} = \varepsilon_6$$

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16}\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26}\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36}\\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46}\\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56}\\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix} \tag{3.18}$$

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16}\\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26}\\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36}\\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46}\\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56}\\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix} \tag{3.19}$$

Bu aşamada C_{ij} ve C_{ji} eşitliği kullanılarak elde ettiğimiz 36 tane bileşenin simetrik olanlarıyla birlikte aslında 21 adet bağımsız bileşen olduğunu görmekteyiz. Malzemenin bu durumuna Triklinik malzeme adı verilir. Bu aşamadan sonra eğer malzeme tek simetri düzlemine (1-2 veya z=0) sahip ise bu malzeme Monoklinik malzeme olarak adlandırılır ve 16 bileşeni sıfır değerini alacağından bağımsız bileşen sayısı 13 adete indirgenir. Monoklinik malzemenin Denklem 3.20'deki verilen hali katılık matrisini ve Denklem 3.21'deki hali ise gevşeklik matrisi formlarıdır [53].

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16}\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26}\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36}\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0\\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix} \tag{3.20}$$

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16}\\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26}\\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36}\\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_{45} & S_{55} & 0\\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & 0 & 0 & S_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix} \tag{3.21}$$

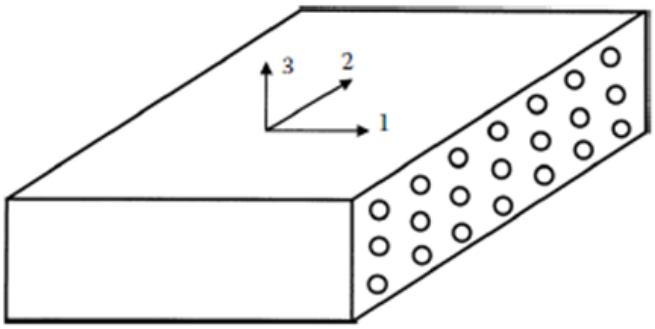
Bir malzemenin birbirine dik üç malzeme simetrisi düzlemi varsa bu malzemeye ortotropik malzeme adı verilir. Ortotropik malzeme durumu, monoklinik malzemenin simetri durumuna iki simetri düzlemi daha eklenmiş hali olarak görülebilir. Denklem 3.22'de Ortotropik malzemenin katılık matrisi formu ve Denklem 3.23'te ortotropik malzemenin gevşeklik matrisi formu verilmiştir [53].

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix} \tag{3.22}$$

$$\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\\ \varepsilon_4\\ \varepsilon_5\\ \varepsilon_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0\\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0\\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\\ \sigma_4\\ \sigma_5\\ \sigma_6\end{bmatrix} \tag{3.23}$$

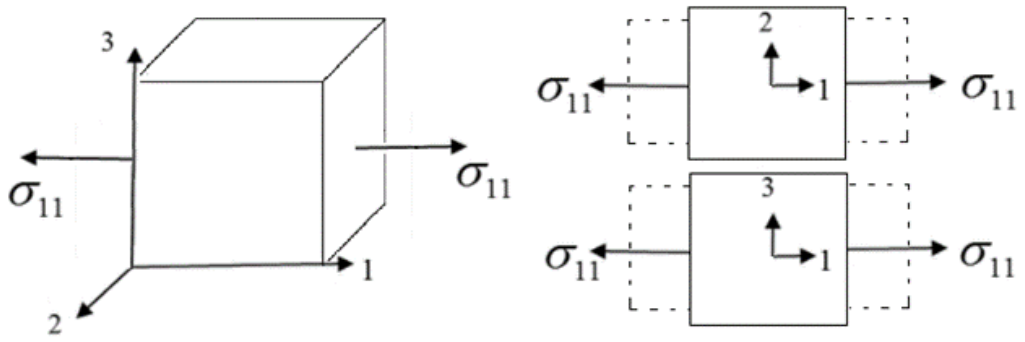
3.3.2 Ortotropik Malzemenin Mühendislik Sabitleri Cinsinden Hesaplanması

Gerilme-gerinim ilişkilerinin tanımlanmasında malzeme sabitleri önemli rol oynamaktadır. Elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranıyla birlikte Şekil 3.1'de görülen ortotropik malzemenin gevşeklik matrisini adım adım karakterize edebiliriz [54].



Şekil 3.1 Ortotropik Malzemenin Şematik Gösterimi [54]

Tek eksenli gerilme durumu için gerilme sadece 1 ekseninde olursa Şekil 3.2'deki gibi bir durum karşımıza çıkar ve Denklemler 3.24-26 elde edilir.



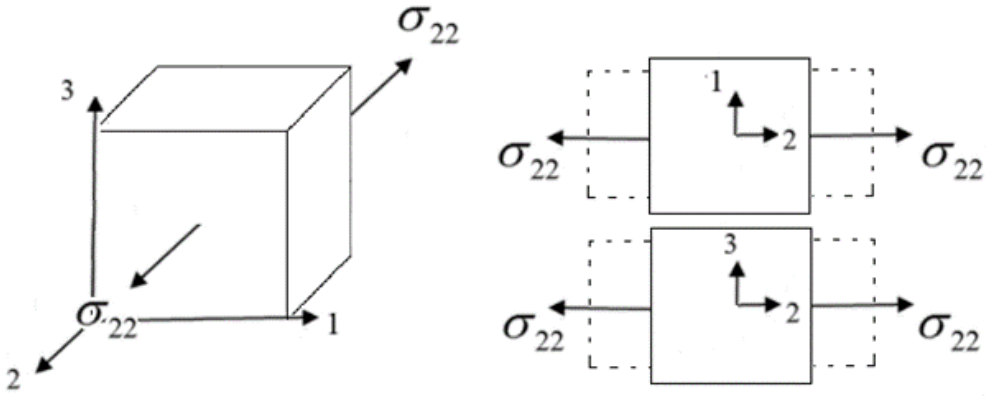
Şekil 3.2 Gerilme Sadece 1 ekseninde olduğu durum

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_1} \tag{3.24}$$

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}},\ \varepsilon_{22} = -\nu_{12} * \varepsilon_{11} \Rightarrow \varepsilon_{22} = -\nu_{12} * \frac{\sigma_{11}}{E_1} \tag{3.25}$$

$$\nu_{13} = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}},\ \varepsilon_{33} = -\nu_{13} * \varepsilon_{11} \Rightarrow \varepsilon_{33} = -\nu_{13} * \frac{\sigma_{11}}{E_1} \tag{3.26}$$

Tek eksenli gerilme durumu için gerilme sadece 2 ekseninde olursa Şekil 3.3'teki gibi bir durum karşımıza çıkar ve Denklemler 3.27-29 elde edilir.



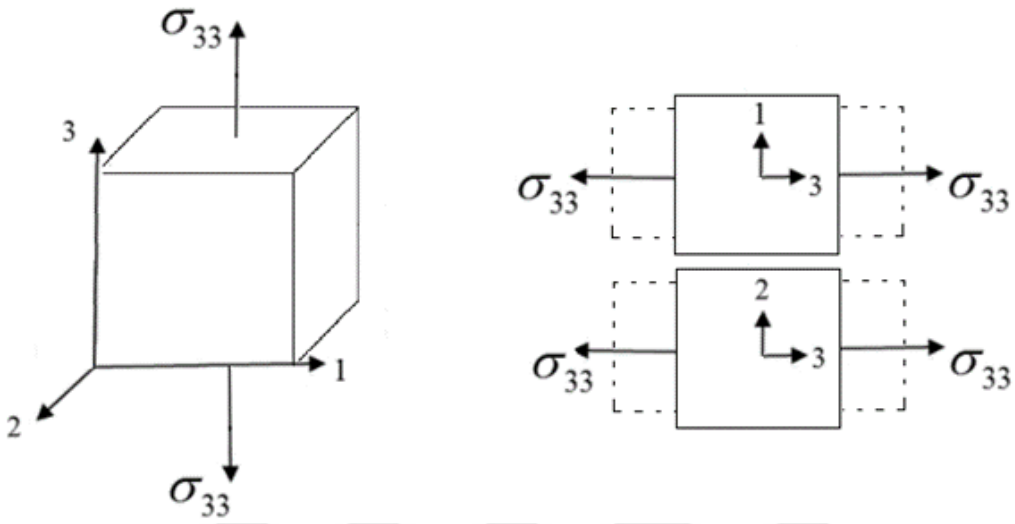
Şekil 3.3 Gerilme Sadece 2 ekseninde oluğu durum

$$\varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_2} \tag{3.27}$$

$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}},\ \varepsilon_{11} = -\nu_{21} * \varepsilon_{22} \Rightarrow \varepsilon_{11} = -\nu_{21} * \frac{\sigma_{22}}{E_2} \tag{3.28}$$

$$\nu_{23} = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{22}},\ \varepsilon_{33} = -\nu_{23} * \varepsilon_{22} \Rightarrow \varepsilon_{33} = -\nu_{23} * \frac{\sigma_{22}}{E_2} \tag{3.29}$$

Tek eksenli gerilme durumu için gerilme sadece 3 ekseninde olursa Şekil 3.4'teki gibi bir durum karşımıza çıkar ve Denklemler 3.30-32 elde edilir.



Şekil 3.4 Gerilme Sadece 3 ekseninde oluğu durum

$$\varepsilon_{33} = \frac{\sigma_{33}}{E_3} \tag{3.30}$$

$$\nu_{31} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{33}},\ \varepsilon_{11} = -\nu_{31} * \varepsilon_{33} \Rightarrow \varepsilon_{11} = -\nu_{31} * \frac{\sigma_{33}}{E_3} \tag{3.31}$$

$$\nu_{32} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{33}},\ \varepsilon_{22} = -\nu_{32} * \varepsilon_{33} \Rightarrow \varepsilon_{22} = -\nu_{32} * \frac{\sigma_{33}}{E_3} \tag{3.32}$$

Elde edilen sonuçlardan hareketle Denklemler 3.24-31 düzenlenerek tablo haline getirilirse Tablo 3.1 elde edilir. Tablo 3.1'deki değerler düşey olarak toplanırsa Denklemler 3.33-35'teki bağıntılar elde edilir. Buradaki bağıntılar kullanılarak ortotropik malzemenin gevşeklik matrisi Denklem 36'da görüldüğü şekliyle mühendislik sabitleri tarafından elde edilmiş olur [52].

Tablo 3.1 Gerilme- Gerinim İlişkileri

	ε_{11}	ε_{22}	ε_{33}
σ_{11}	σ_{11}/E_1	$-\nu_{12} * \frac{\sigma_{11}}{E_1}$	$-\nu_{13} * \frac{\sigma_{11}}{E_1}$
σ_{22}	$-\nu_{21} * \frac{\sigma_{22}}{E_2}$	σ_{22}/E_2	$-\nu_{23} * \frac{\sigma_{22}}{E_2}$
σ_{33}	$-\nu_{31} * \frac{\sigma_{33}}{E_3}$	$-\nu_{32} * \frac{\sigma_{33}}{E_3}$	σ_{33}/E_3

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_1} - \nu_{21} * \frac{\sigma_{22}}{E_2} - \nu_{31} * \frac{\sigma_{33}}{E_3},\ \gamma_{23} = \frac{\sigma_{23}}{G_{23}} \tag{3.33}$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_2} - \nu_{12} * \frac{\sigma_{11}}{E_1} - \nu_{32} * \frac{\sigma_{33}}{E_3},\ \gamma_{13} = \frac{\sigma_{13}}{G_{13}} \tag{3.34}$$

$$\varepsilon_{33} = \frac{\sigma_{33}}{E_3} - \nu_{13} * \frac{\sigma_{11}}{E_1} - \nu_{23} * \frac{\sigma_{22}}{E_2},\ \gamma_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}} \tag{3.35}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & \frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{31}}{E_3} & \frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \tag{3.36}$$

3.3.3 Ortotropik Gevşeklik Matrisinin Katılık Matrisine Dönüştürülmesi

Ortotropik gevşeklik matrisi, mühendislik sabitleriyle hesaplama kolaylığı sebebiyle kullanılacaktır ancak bu aşamadan sonra depolama modülü hesaplanması için ortotropik katılık matrisine ihtiyaç duyulmaktadır. Ortotropik gevşeklik

matrisinden, ortotropik katılık matrisine çevrim için Denklem 3.37'de verilen eşitlikler kullanılmaktadır [53]. Bu C değerleri ortotropik katılık matrisinin bileşenleridir.

$$C_{11} = \frac{S_{22} * S_{33} - S_{23}^2}{S}, \qquad C_{12} = \frac{S_{13} * S_{23} - S_{12} * S_{33}}{S},$$

$$C_{13} = \frac{S_{12} * S_{23} - S_{13} * S_{22}}{S}, \qquad C_{22} = \frac{S_{33} * S_{11} - S_{13}^2}{S},$$

$$C_{23} = \frac{S_{12} * S_{13} - S_{23} * S_{11}}{S}, \qquad C_{33} = \frac{S_{11} * S_{22} - S_{12}^2}{S}, \tag{3.37}$$

$$C_{44} = \frac{1}{S_{44}}, \qquad C_{55} = \frac{1}{S_{55}}, \qquad C_{66} = \frac{1}{S_{66}},$$

$$S = S_{11} * S_{22} * S_{33} - S_{11} * S_{23}^2 - S_{22} * S_{13}^2 - S_{33*} S_{12}^2 + 2 * S_{12} * S_{23} * S_{13}$$

Bu aşamada elde edilen ortotropik katılık matrisi Richeton Modelinde anlık katılık değerlerinin hesaplandığı Denklem 3.5'teki değerler yerine referans değeri olarak girilecektir. Bu da modeli Ergiyik Yığarak Modelle yönteminin anizotropik davranışını hesaplayacak şekilde çok eksenli bir hale getirecektir.

3.4 Gözeneklilik Davranışının Modele Dahil Edilmesi

Yapılan literatür çalışmasında da görüldüğü üzere gözeneklilik durumu büyük bir oranda katman kalınlığı parametresine bağlıdır. Katman kalınlığı ve gözeneklilik arasındaki bağlantı ile malzemenin elastisite modülü ile olan ilişkisini tanımlayabilecek bir fonksiyonun önerilecek modele eklenmesi ile gözeneklilik davranışının tanımlanması sağlanacaktır. Bu ilişkiyi sağlayacak çeşitli mikro-mekanik modeller bulmaktadır ancak Ang ve arkadaşlarının çalışmasında mekanik özellikler ile gözeneklilik arasındaki ilişkinin logaritmik olduğunu belirtmişlerdir [55]. Bu sebeple üstel bir mikro-mekanik model kullanmak daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

Spriggs Gözeneklilik Modeli, Duckworth Gözeneklilik Modelini elastik modül için genişleterek elde edilen bir modeldir [56]. Model Denklem 3.38'de verilmiştir.

$$\frac{E_p}{E_0} = \exp(-mP) \tag{3.38}$$

Burada m, malzemeye bağlı bir katsayıdır ve deneysel sonuçlar yardımıyla elde edilir. Spriggs'in çalışmasında bu değerin 2.7 ile 4.3 arasında değiştiği belirtilmektedir [56]. P ise gözenekliliği belirtmektedir. Bizim katman kalınlığı (katman genişliğini de dahil edilerek) parametresi için önerdiğimiz eşitlik denklem 3.39'daki gibidir. Bu denklemde eşitliğin sağ tarafındaki üstel kısım Denklem 3.5'e bir çarpan olarak eklenirse modelimiz gözeneklilik durumuna cevap verebilecek bir hal alacaktır.

$$P = (\text{Katman Kalınlığı} \times \text{Katman Genişliği})^2 \quad (3.39)$$

3.5 Modelin Prensibi ve Ön Çalışma

Önerilen model Ergiyik Yığarak Modelleme (FDM) ile üretilmiş parçaların yapısal analizlerde kullanılması gereken anizotropik katılık matrisini, değişen sıcaklık değerleri ve katman kalınlığı değerleri için tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen model, Ergiyik Yığarak Modelleme ile üretilmesi planlanan fonksiyonel parçalarda dayanımın maksimize edilmesi ve kütlenin minimize edilmesine hizmet edecektir. Bu model Octave Programı üzerinde bir kod dosyası halinde oluşturulmuştur.

Modelin çalışması için ilk aşamada Richeton Modelinin ilgili parametre bilgileri girilmelidir. Bu bilgiler girildikten sonra Richeton Modeli geçiş sıcaklıklarına denk gelen referans katılık değerlerini kullanmaktadır. Bununla birlikte bu katmanlı imalat ile üretilen polimer için anizotropi davranışını karşılamamaktadır. Bu sebeple Denklem 3.36 ve Denklem 3.37'deki eşitlikler kullanılarak model üç eksenli anizotropi davranışını hesaplayabilecek hale gelecektir. Bu aşamada model beta geçiş sıcaklığı (Beta relaxation) için o sıcaklıktaki mühendislik sabitlerini kullanarak beta geçiş sıcaklığı için referans katılık matrisi hesaplanmış olacaktır. Bir sonraki aşamada camsı geçiş (glass transition) sıcaklığı ve akış (flow) sıcaklığı için gerekli olan referans katılık matrisleri gerekli mühendislik sabitleri yardımıyla hesaplanmaktadır.

Referans katılık matrisleri hesaplandıktan sonra program tarafından bu değerler kontrol amacıyla gösterilmektedir. Daha sonra referans geçiş sıcaklıkları ve Denklem 3.2, Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanılarak kullanılacak sıcaklık

değerleri hesaplanmaktadır. Daha sonra Denklem 3.5 kullanılarak kullanılacak katılık matrisleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan bütün değerler kontrol amacıyla program üzerinde gösterilmektedir.

Gereken hesaplamalar yapıldıktan sonra modelin farklı sıcaklık değerleri için çalıştırılma aşamasına gelinmektedir. Model 200K ile 500K arasında 5'er derece aralıklarla arttırılarak daha önceki aşamalarda hesaplanan değerler ile Denklem 3.1'de kullanılmaktadır. Bu sıcaklık aralığı istenilen şekilde düzenlenebilmektedir. Çevrimler ile oluşturulan değerler matris içerisinde saklanarak devam etmektedir. Birim çevrimleri ve logaritmik düzenlemeler yapıldıktan sonra ise bu değerlerin grafikleri oluşturulmaktadır. Böylece model döngüsü tamamlamaktadır. Sonuç olarak grafikler ekrana yansıtılır. Hesaplanan her değer ise Octave programının Workspace bölümden görülebilmektedir. Bu modelin Octave programı üzerindeki kod dosyasının bulunduğu görseller Ekler kısmında verilmiştir.

Model bu haliyle anizotropi davranışını hesaplayabilmekte ve katman kalınlığı değerini girmeden önceki referans değerlerini oluşturabilmektedir. Bu aşamada literatürdeki çalışmalardan faydalanılarak bir ön çalışma yapılmıştır. Bellini ve arkadaşları tarafından verilen, ABS malzeme için mühendislik sabitleri değerleri modele referans katılık matrisi hesaplanması için girilmiştir [57]. Modele ait diğer parametreler ise Richeton ve arkadaşlarının makalesinde kullanıldığı şekliyle girilmiştir [49]. Bu değerler Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.2 Bellini ve arkadaşlarının makalesindeki mühendislik sabitleri [57]

E_x	E_y	E_z
1072.9	1653	1391.7
G_{xy}	G_{xz}	G_{yx}
369.6	540.5	554
ν_{xy}	ν_{zx}	ν_{yz}
0.3209	0.3511	0.4391

Tablo 3.3 Richeton ve Arkadaşlarının Çalışmasındaki Model Parametreleri [49]

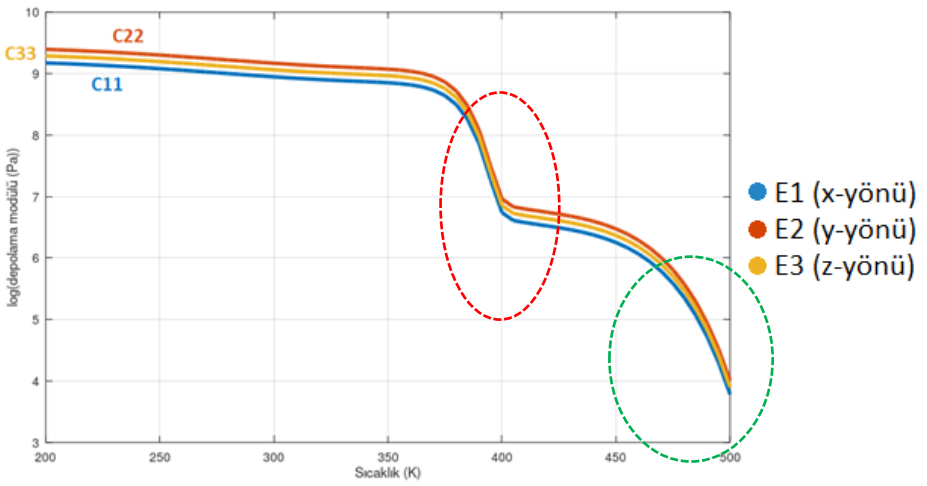
f^{ref} (Hz)	f (Hz)	T_β^{ref} (K)	T_g^{ref} (K)	T_f^{ref} (K)
1	1	270	384	460
m_1	m_2	m_3	s	k
5	40	20	0.087	1,38E-26
ΔHβ	C_1g (℃)	C_2g (℃)		
90	34	80		

Bu parametrelerle model üç boyutlu hal için çalıştırılmış, Bellini ve arkadaşlarının çalışmasındaki Referans E1 değerinin sağlanması için hesaplanan katılık matrisi Denklem 3.40'ta verilmiştir. Sonuçlar Bellini ve Arkadaşlarının çalışmasında verilen değerle karşılaştırıldığında ve kabuller göz önüne alındığında modelin Referans E1 değerini doğru bir şekilde hesaplayabildiğini göstermiştir.

$$C = 1.0e+003\ x \begin{bmatrix} 1.8529 & 1.4346 & 1.1809 & 0 & 0 & 0 \\ 1.4346 & 3.0841 & 1.6439 & 0 & 0 & 0 \\ 1.1809 & 1.6439 & 2.4140 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5540 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5405 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3696 \end{bmatrix} x\ M\text{Pa} \quad (3.40)$$

Ayrıca üç yöndeki sıcaklığa bağlı depolama modülü değerleri hesaplanarak Şekil 3.5'te verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Model sonucu Şekil 3.5'te görüleceği üzere, model, üç farklı yöndeki depolama modüllerini, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplayabilmektedir. Eğrilerin trendlerinde, beklendiği üzere camsı geçiş bölgesi (kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiş) ve ergime bölgesi (yeşil kesikli çizgi ile gösterilmiş) net olarak görülmektedir. Eğrilerin değişim trendlerinde beklenmeyen bir hata ya da değişim görülmemiştir. Böylece modelin üç boyutlu hal için çalıştığı kanıtlanmıştır.



Şekil 3.5 Ön modelleme sonucu hesaplanan üç farklı yöndeki sıcaklığa bağlı depolama modülü değerleri

Bu doğrulama aşamasından sonra modelin gözeneklilik durumunu da hesaplayabilecek hale getirilmesi için Bölüm 3.4'teki denklemler eklenmiştir. Spriggs Modelinin bizim eklediğimiz gözeneklilik eklentili varyant hali Denklem 3.5'e bir çarpan olarak eklenmiştir. Bu eklentinin kod dosyası üzerindeki hali Denklem 3.41'de gösterilmektedir. Kodun önceki hali 3.41-a'da, çarpanın eklenmiş hali ise 3.41-b'de gösterilmiştir. Bu sayede model hem anizotropi hem de gözeneklilik davranışını tanımlayacak son haline erişmiş olacaktır.

$$Ei = (Ei_{ref}) * (1 + (s * log10(f/f_{ref}))) \quad (3.41\text{-a})$$

$$Ei = (Ei_{ref}) * (\exp(-m * p)) * (1 + (s * log10(f/f_{ref}))) \quad (3.41\text{-b})$$

Modelin iki hali bulunmaktadır. Modelin ilk durumunun olmasının sebebi üretimlerin katman kalınlığına bağlı yapılacağından zaten bir gözeneklilik değerinin olmasıdır. Çarpan eklenmiş halinin amacı ise tek bir katman kalınlığı değerinin mühendislik sabitleri ile çok sayıda katman kalınlığı değeri için tahmin oluşturmaktır. Bu sebeple modelin Denklem 3.41'deki hallerinin her ikisi de karşılaştırma için kullanılacaktır. Modelin Denklem 3.41-a'daki hali ile üretilmiş sonuçlar katman kalınlığı referans değerlerimizi oluştururken, Denklem 3.41-b'deki hali için üretilmiş sonuçlar son model sonuçları olacaktır.

4
NUMUNE ÜRETİMİ VE DMA TESTİ

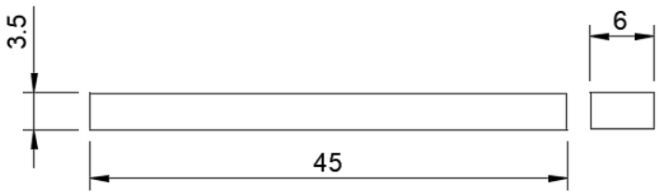
4.1 Malzeme Seçimi ve Numunelerin Üretilmesi

Ergiyik Yığarak Modelleme yönteminde kullanılan malzemeler büyük önem teşkil etmektedir. Çoğunlukla polimerler için kullanılan bu yöntem için ABS, PLA, PEEK vb. malzemeler sıklıkla kullanılan ve literatürde çalışılan malzemeler olsa da özellikle sıcaklığa olan duyarlılığı sebebiyle bu çalışmada yapılacak numune üretimi için ABS olarak bilinen Acrylonitrile Butadiene Styrene malzemesi seçilmiştir. Shubham ve arkadaşlarının çalışmasında yüksek kimyasal direnci, yüksek mukavemeti ve diğer malzemelere göre düşük ergime noktası ve uygun maliyeti malzemenin öne çıkan özellikleri arasında gösterilmiştir [36]. Matweb verilerine göre oluşturulan ektrüze edilmiş ABS malzemenin mekanik özelliklerini veren tablo, Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Ekstrüze edilmiş ABS malzemenin mekanik özellikleri (ortalama değerler) [58]

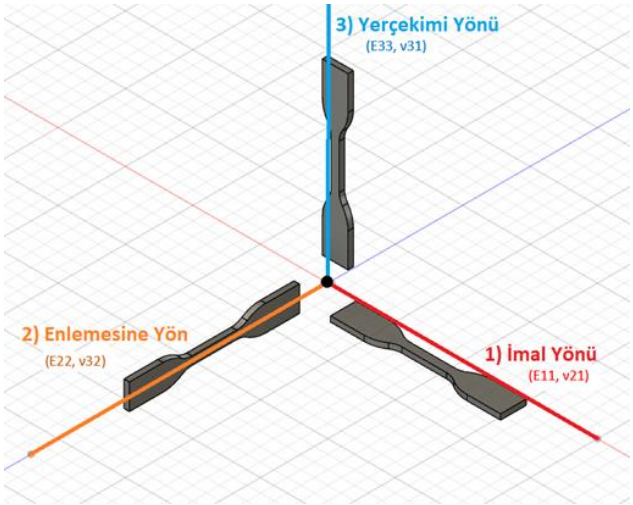
Elastisite Modülü	1.00-2.65 GPa
Yoğunluk	1.07 g/cc
Maksimum Çekme Mukavemeti	38.4 MPa
Akma Mukavemeti	44.7 MPa
Akma Uzaması	5.41 %
Kopma Uzaması	48.5 %
Camsı Geçiş Sıcaklığı	108 °C
Ergime Sıcaklığı	260 °C

Katmanlı imalat için üretilecek numuneler ve bunların dinamik mekanik analiz testleri için herhangi bir standart bulunmamaktadır. ASTM D5418-01 Plastikler için Standart Test Yöntemi: Dinamik Mekanik Özellikler: Eğilme Halinde (Çift Konsollu Kiriş) [59] adlı standartlar kullanılabilecek en yakın standart olduğu için bu standartlar üzerinden hareket edilmiştir. Numune boyutları için belirli değerler verilse de farklı boyutların çalışmalarda belirtilerek kullanılabileceği açıklamasında bulunmuştur. Bu sebeple literatürdeki diğer çalışmalarında incelenmesi sonucunda ABS numunelerin STL dosyasındaki ölçüleri Şekil 4.1'deki şeklinde belirlenmiştir. Çizim Fusion 360 programı yardımıyla çizilmiş ve STL dosyasına dönüştürülmüştür.



Şekil 4.1 DMA testi numunelerinin ölçüleri

Üretilen bu numunelerin imal yönlerinin temsili gösterimi Fusion 360 programı üzerinde çizilmiş ve Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Fusion 360 programı üzerinde imal yönlerinin temsili gösterimi

Numunelerin imal yönünün ve katman kalınlığının parametre değerleri numune numaraları ile Tablo 4.2'de verilmiştir. Üretim sırasında sabit tutulan parametre değerleri ise Tablo 4.3'te verilmektedir.

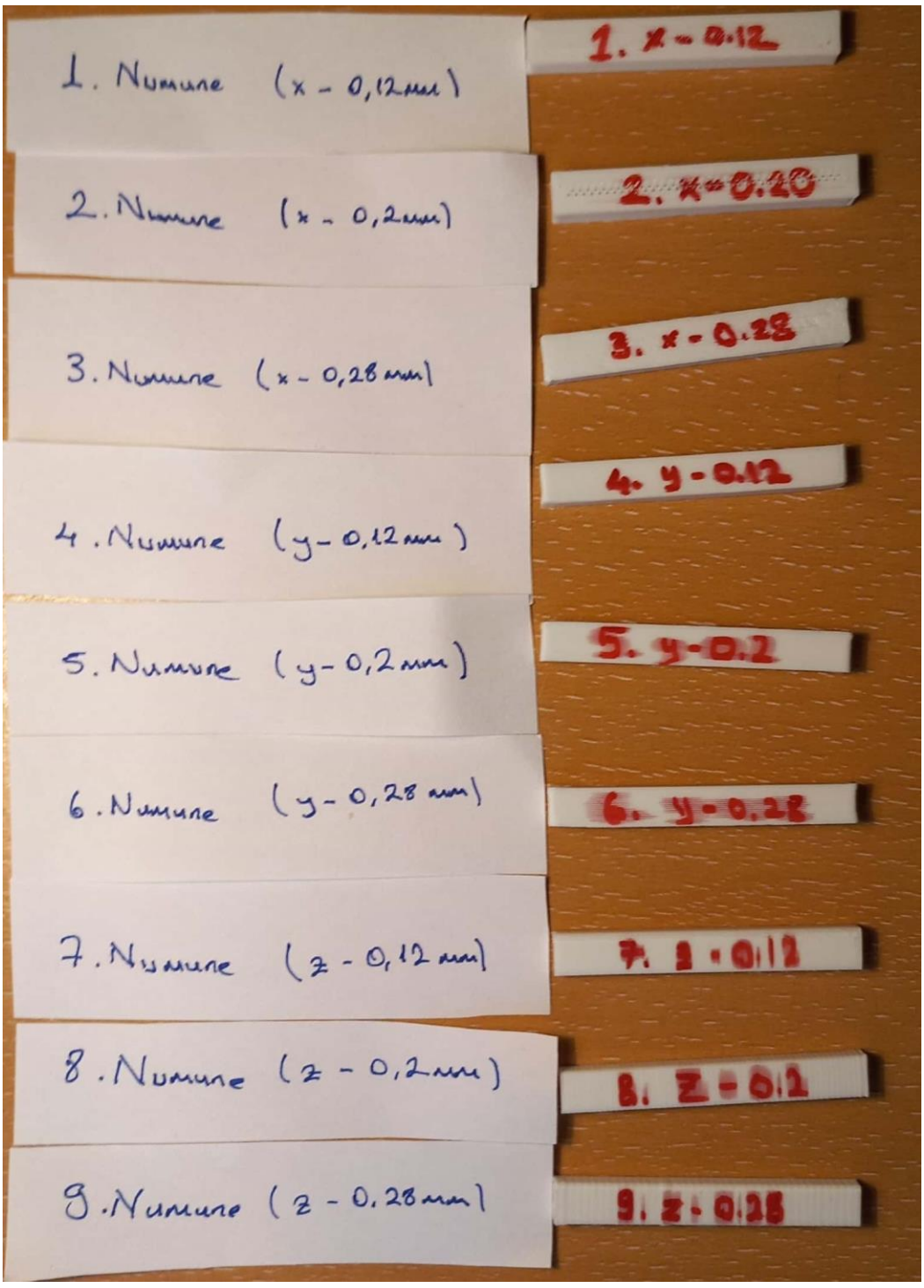
Tablo 4.2 Numunelerin imal yönü ve katman kalınlığı değerleri

Numune No	Katman Kalınlığı	İmal Yönü
1	0.12 mm	Fiber Yönü (1-x)
2	0.20 mm	Fiber Yönü (1-x)
3	0.28 mm	Fiber Yönü (1-x)
4	0.12 mm	Enine Yön (2-y)
5	0.20 mm	Enine Yön (2-y)
6	0.28 mm	Enine Yön (2-y)
7	0.12 mm	Yerçekimi Yönü (3-z)
8	0.20 mm	Yerçekimi Yönü (3-z)
9	0.28 mm	Yerçekimi Yönü (3-z)

Tablo 4.3 Üretim sırasında sabit tutulan parametreler

Parametreler	Değerler
Dolgu Oranı	%100
Ağız Çapı	0.4 mm
Üretim Hızı (İlk Katman)	50 mm/s
Üretim Hızı	100 mm/s
Üretim Sıcaklığı (İlk Katman)	230°
Üretim Sıcaklığı	210°
Tabla Sıcaklığı	95°

Üretilen numunelerin resmi Şekil 4.3'te verilmiştir. Numuneler Tablo 4.2'deki halleriyle isimlendirilmiş ve teste gönderilmiştir.



Şekil 4.3 ABS malzemeden üretilmiş numuneler

4.2 Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Testi

Üretilen numuneler üzerinden Dinamik Mekanik Analiz testleri yapılmıştır. Bu testler Yıldız Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (BİTUAM) yapılmıştır. YTÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Perkin Elmer, DMA 8000 isimli dinamik mekanik analiz cihazı testlerde kullanılmıştır. Bu testler sırasında kullanılan analiz parametreleri değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Katmanlı imalat ile üretilen malzemelerin DMA testleri için herhangi bir standart bulunmadığından testlerin yüksek maliyeti göz önüne alınarak test tekrarı yapılmamıştır.

Tablo 4.4 DMA testi analiz parametreleri

Parametreler	Bilgiler
Konsol Durumu	Tek Konsol Testi
Sıcaklık Aralığı	25°-200°
Sıcaklık Artış Değeri	5°
Frekans	1 Hz
Yer Değiştirme	0.05mm
Çevre Sıcaklığı	23°

5
DENEY SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMALAR

5.1 Deney Sonuçları ve Karşılaştırmalar

Bölüm 4'te belirtilen dinamik mekanik analiz (DMA) testleri yardımıyla modelin tahmin kabiliyetini incelenecektir. Model son haliyle üç farklı yöndeki, farklı sıcaklık durumlarındaki ve katman kalınlığı değerlerindeki katılık matrisini yani depolama modülünü hesaplayacak bir hal almıştır. Bu amaçla öncelikle modelde kullanılacak mühendislik sabitleri belirlenmiştir. Depolama modülü ile elastisite modülü değerleri arasında kurduğumuz korelasyon sebebiyle geçiş sıcaklıkları üzerindeki anlık katılık değerlerini elastisite modülü değeri olarak kabul edebiliriz. Bu aşamada yapılan 3 farklı katman kalınlığı (0.12mm, 0.20mm ve 0.28mm) için üç geçiş sıcaklığındaki anlık katılık değerleri alınarak Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3 oluşturulmuştur. Yapılan testlerde DMA makinesi başlangıç sıcaklığı olarak 25°C olarak başladığı için daha düşük bir değer olmadığı için referans beta geçiş sıcaklığı değeri bu değer alınmıştır. Referans camsı geçiş sıcaklığı Tablo 4.1'de verilen 108°C olarak kabul edilmiştir. Yapılan testlerde 4. Numune için elde edilen en son depolama modülü değeri 130,3°C için bulunmaktadır. Tüm değerlerde kullanılan bir akış sıcaklığı değeri olması için akış sıcaklığı yaklaşık 130°C olarak seçilmiş ve bu sıcaklık değeri için depolama modülleri kullanılarak tablolar oluşturulmuştur (Numune 7'de test sonuçlarında 130°C için değer negatif olduğundan 123,5°C'nin değeri kullanılmıştır). Shubham ve arkadaşlarının çalışmasında ABS malzemenin poisson oranı değeri için 0.33 değerini vermiştir. Bu çalışmada bütün poisson oranı değerleri 0.33 kabul edilerek tabloya eklenmiştir [36]. Dai ve arkadaşlarının çalışmasında ise kayma modülünü hesaplamak için Denklem 5.1 verilmiştir [41]. Bu denklem yardımıyla tablolardaki kayma modülü değerleri hesaplanmıştır.

$$G_{ij} = \frac{E_i}{2(1 + v_{ij})} \tag{5.1}$$

Tablo 5.1 Katman kalınlığı 0.12 mm için mühendislik sabitleri

0,12 mm					
Beta Geçiş Sıcaklığı		Camsı Geçiş Sıcaklığı		Akış Sıcaklığı	
E1 (MPa)	900	E1 (MPa)	500	E1 (MPa)	9,3
E2 (MPa)	938,3	E2 (MPa)	449,6	E2 (MPa)	19,5
E3 (MPa)	974,6	E3 (MPa)	316,6	E3 (MPa)	16,7
v12	0,33	v12	0,33	v12	0,33
v31	0,33	v31	0,33	v31	0,33
v23	0,33	v23	0,33	v23	0,33
G12 (MPa)	338,34586	G12 (MPa)	187,96992	G12 (MPa)	3,4962406
G31 (MPa)	366,39098	G31 (MPa)	119,02256	G31 (MPa)	6,2781955
G23 (MPa)	352,74436	G23 (MPa)	169,02256	G23 (MPa)	7,3308271

Tablo 5.2 Katman kalınlığı 0.2 mm için mühendislik sabitleri

0,20 mm					
Beta Geçiş Sıcaklığı		Camsı Geçiş Sıcaklığı		Akış Sıcaklığı	
E1 (MPa)	887,1	E1 (MPa)	412,1	E1 (MPa)	7,79
E2 (MPa)	991,5	E2 (MPa)	373,4	E2 (MPa)	1,9
E3 (MPa)	939,8	E3 (MPa)	312,8	E3 (MPa)	1,16
v12	0,33	v12	0,33	v12	0,33
v31	0,33	v31	0,33	v31	0,33
v23	0,33	v23	0,33	v23	0,33
G12 (MPa)	333,49624	G12 (MPa)	154,92481	G12 (MPa)	2,9285714
G31 (MPa)	353,30827	G31 (MPa)	117,59398	G31 (MPa)	0,4360902
G23 (MPa)	372,74436	G23 (MPa)	140,37594	G23 (MPa)	0,7142857

Tablo 5.3 Katman kalınlığı 0.28 mm için mühendislik sabitleri

0,28 mm					
Beta Geçiş Sıcaklığı		Camsı Geçiş Sıcaklığı		Akış Sıcaklığı	
E1 (MPa)	784,1	E1 (MPa)	357,1	E1 (MPa)	2,03
E2 (MPa)	1035	E2 (MPa)	327,3	E2 (MPa)	2,1
E3 (MPa)	817,8	E3 (MPa)	304,8	E3 (MPa)	1,87
v12	0,33	v12	0,33	v12	0,33
v31	0,33	v31	0,33	v31	0,33
v23	0,33	v23	0,33	v23	0,33
G12 (MPa)	294,77444	G12 (MPa)	134,24812	G12 (MPa)	0,7631579
G31 (MPa)	307,44361	G31 (MPa)	114,58647	G31 (MPa)	0,7030075
G23 (MPa)	389,09774	G23 (MPa)	123,04511	G23 (MPa)	0,7894737

Bununla birlikte Richeton modeline ait parametreler için bu çalışmada kullanılan ABS malzemesinin değerleri bulunmamaktadır. Bu parametreler içerisinden en önemli olan değerler geçiş sıcaklıklarıdır. Bu değerler tablolar hesaplanırken kullanılan değerler olarak girilmiş ve geriye kalan değerler Richeton ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan PMMA malzemenin değerleri olarak girilmiştir [49]. Bu değerler (geçiş sıcaklıkları değerleri hariç) Tablo 3.3'te mevcuttur.

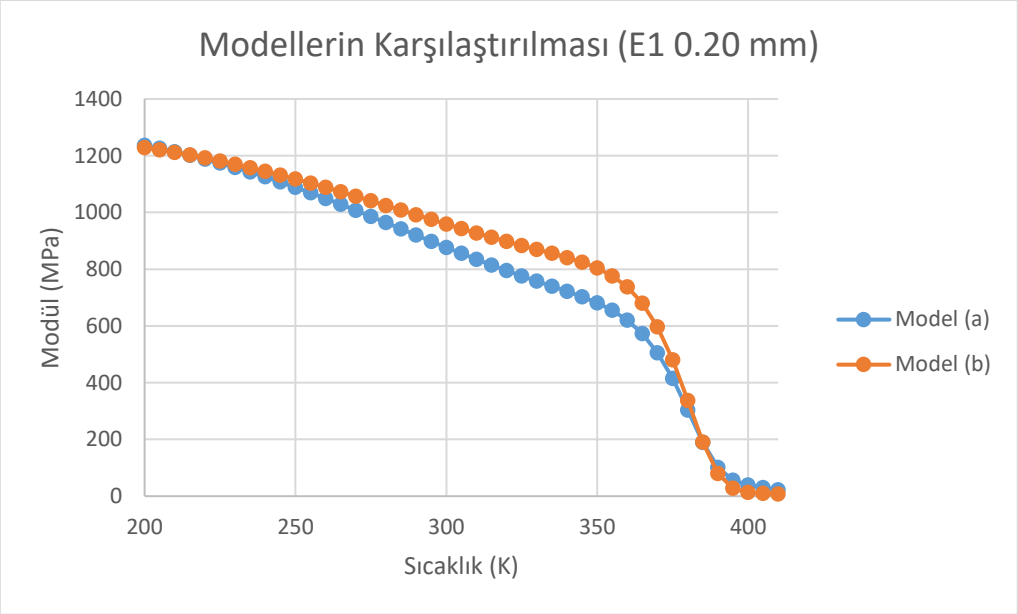
Model sonuçları hesaplanırken öncelikle modelin gözeneklilik fonksiyonunu eklenmeden önceki hali (Denklem 5.2-a) ile model referans sonuçları oluşturulmuştur. Bunun sebebi zaten test uygulanan numunelerin hali hazırda bir katman değeriyle imal edilmesi ve bu sebeple zaten gözeneklilik değerine sahip olmasıdır. Modelin gözeneklilik fonksiyonunu eklendikten sonraki halinin (Denklem 5.2-b) kullanım amacı ise belirlenen bir referans değeri sonuçlarını bu fonksiyon yardımıyla herhangi bir farklı katman kalınlığı değeri için dönüştürerek sadece tek katman kalınlığı değerinin üretim ve testleri ile çok sayıda değer için üretim ve teste gerek kalmadan bilgi sahibi olmayı sağlamasıdır. Ayrıca bu referans değerleri yardımıyla gözeneklilik fonksiyonunun dahil edilmiş hali ile elde edilen sonuçlar kıyaslanabilecektir.

$$Ei = (Ei_{ref}) * (1 + (s * log10(f/f_{ref}))) \quad (5.2\text{-a})$$

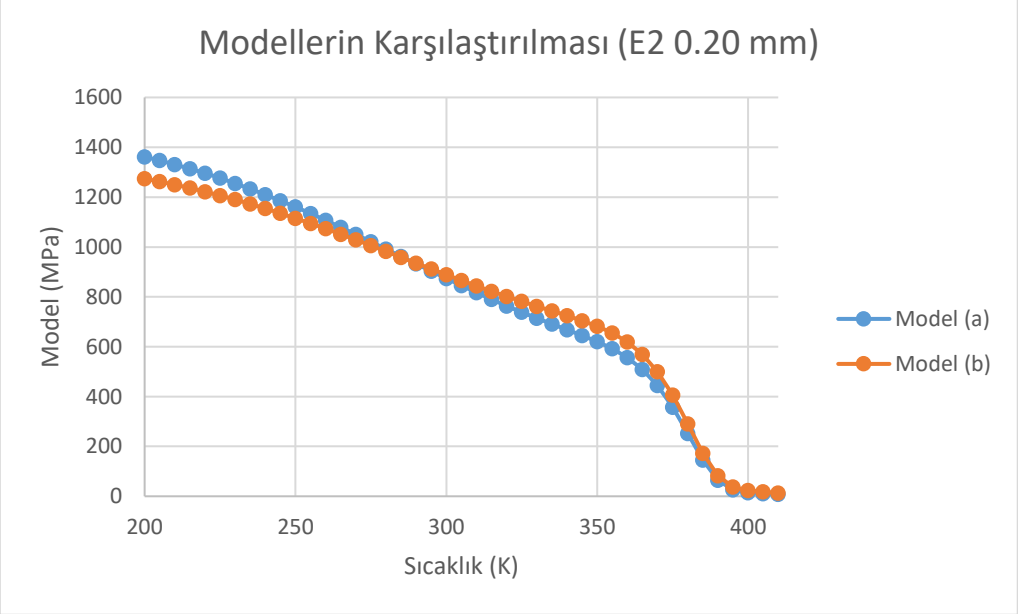
$$Ei = (Ei_{ref}) * (\exp(-m * p)) * (1 + (s * log10(f/f_{ref}))) \quad (5.2\text{-b})$$

Modelin gözeneklilik durumunu dahil eden halini (Denklem 5.2-b) çalıştırmak için bir referans katman kalınlığı seçilmedir. Bu değer ana referans olacak ve onun mühendislik sabitleri için modelin gözeneklilik fonksiyonunu dahil eden hali çalıştırılacaktır. Katman kalınlığı 0.12 mm bu referans değeri olarak seçilip onun mühendislik sabitleri kullanılarak Denklem 5.2-b'deki durum için model çalıştırılmıştır. Burada girilen katman kalınlığı değerleri 0.2 mm ve 0.28 mm için hesaplamalar yapılmıştır. Aynı zamanda modelin bu iki katman kalınlığı değerlerinin modelin gözeneklilik parametresi girilmeden önceki halinden (Denklem 5.2-a) karşılaştırma yapılabilecek değerleri bulunmaktadır. Bu karşılaştırma yardımıyla tek bir katman kalınlığı değerinin mühendislik sabitlerine

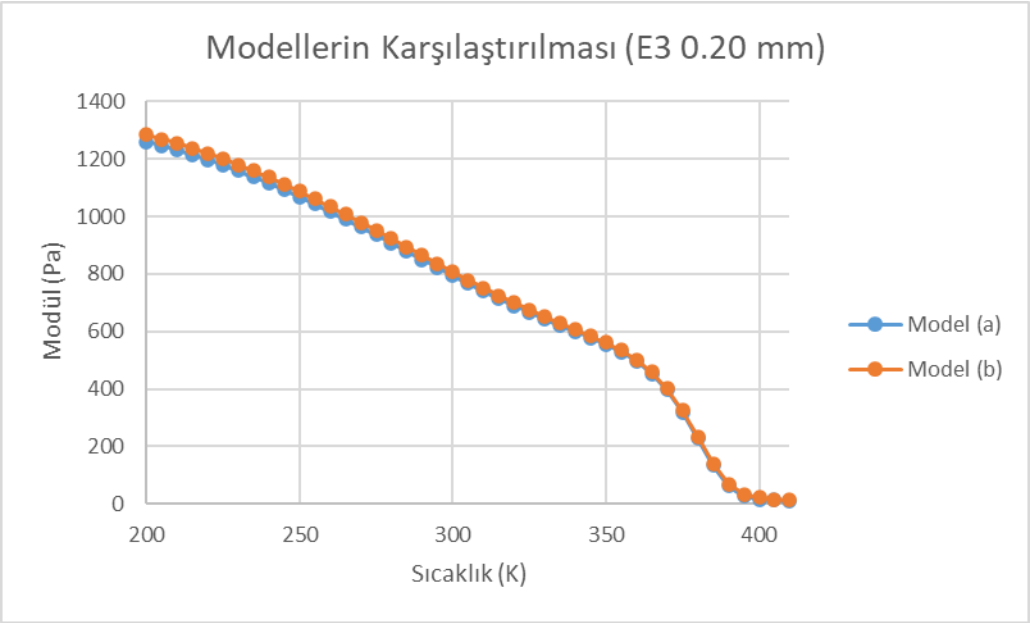
sahip olarak birden fazla katman kalınlığı için depolama modülü değerleri elde etmek amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan karşılaştırma grafiklerinde 0.2 mm katman kalınlığı için Şekilde 5.1'de E1 için, Şekil 5.2'de E2 için ve Şekil 5.3'te E3 için model karşılaştırmaları yapılmıştır.



Şekil 5.1 Katman kalınlığı 0.2 mm ve E1 için model karşılaştırması

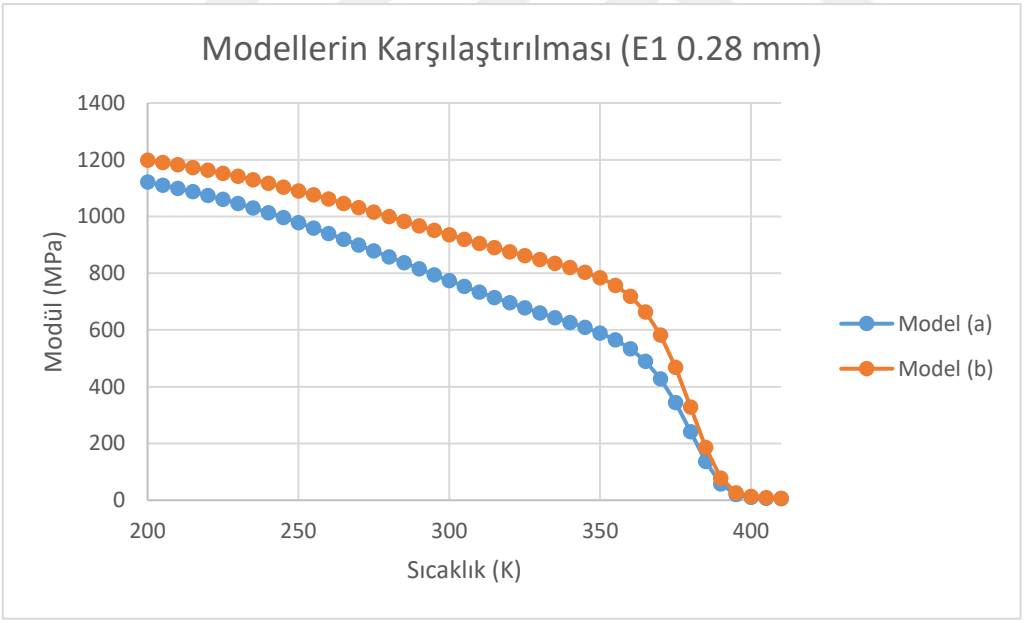


Şekil 5.2 Katman kalınlığı 0.2 mm ve E2 için model karşılaştırması

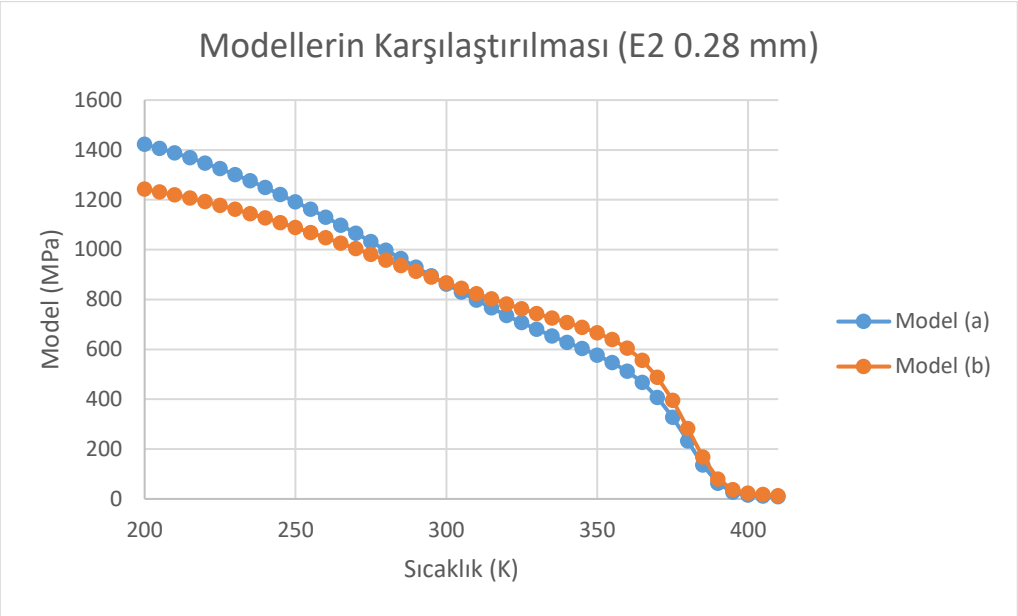


Şekil 5.3 Katman kalınlığı 0.2 mm ve E3 için model karşılaştırması

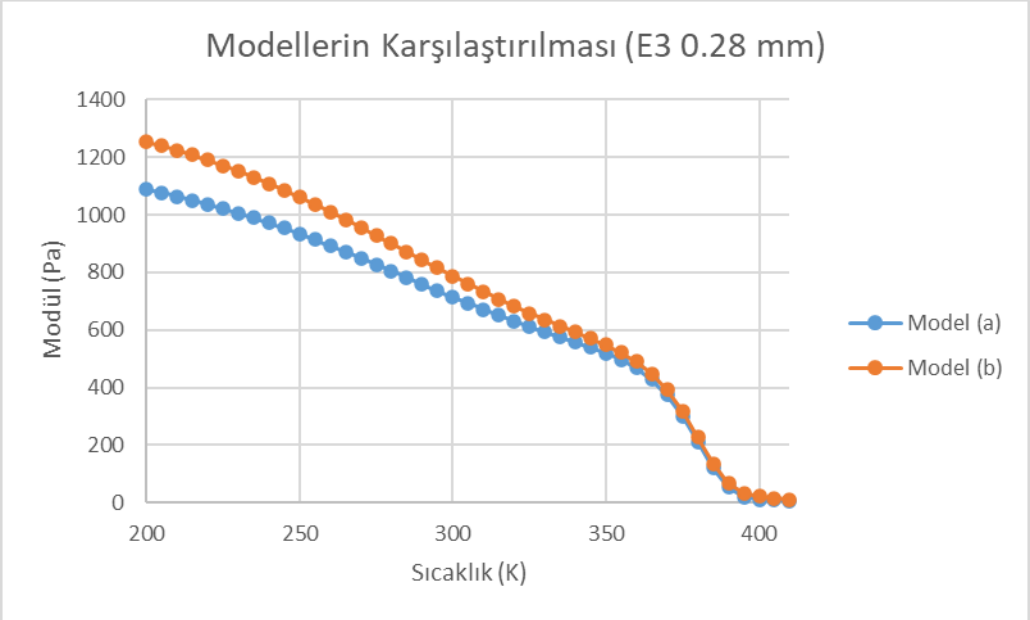
Yine aynı şekilde 0.28 mm katman kalınlığı için Şekilde 5.4'te E1 için, Şekil 5.5'te E2 için ve Şekil 5.6'da E3 için model karşılaştırmaları yapılmıştır.



Şekil 5.4 Katman kalınlığı 0.28 mm ve E1 için model karşılaştırması



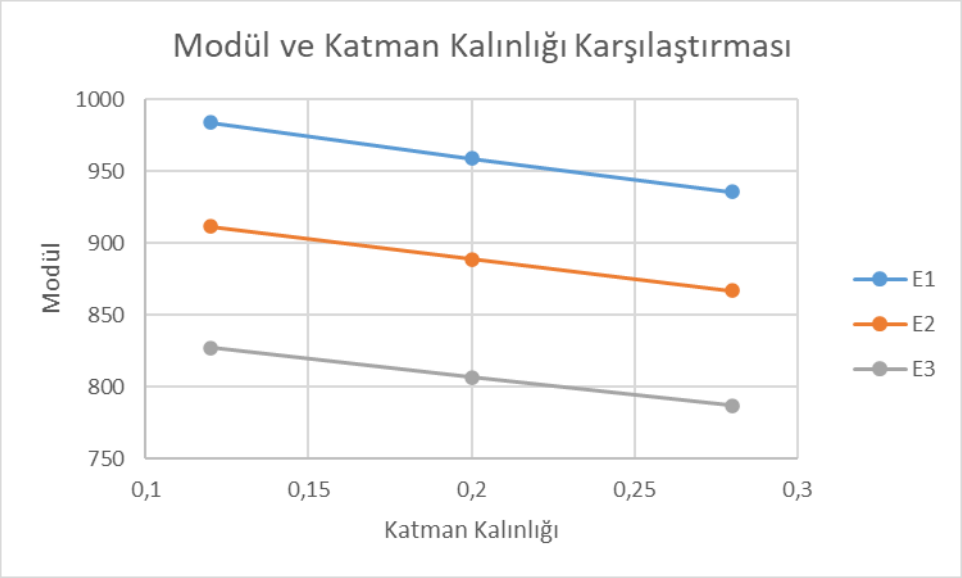
Şekil 5.5 Katman kalınlığı 0.28 mm ve E2 için model karşılaştırması



Şekil 5.6 Katman kalınlığı 0.28 mm ve E3 için model karşılaştırması

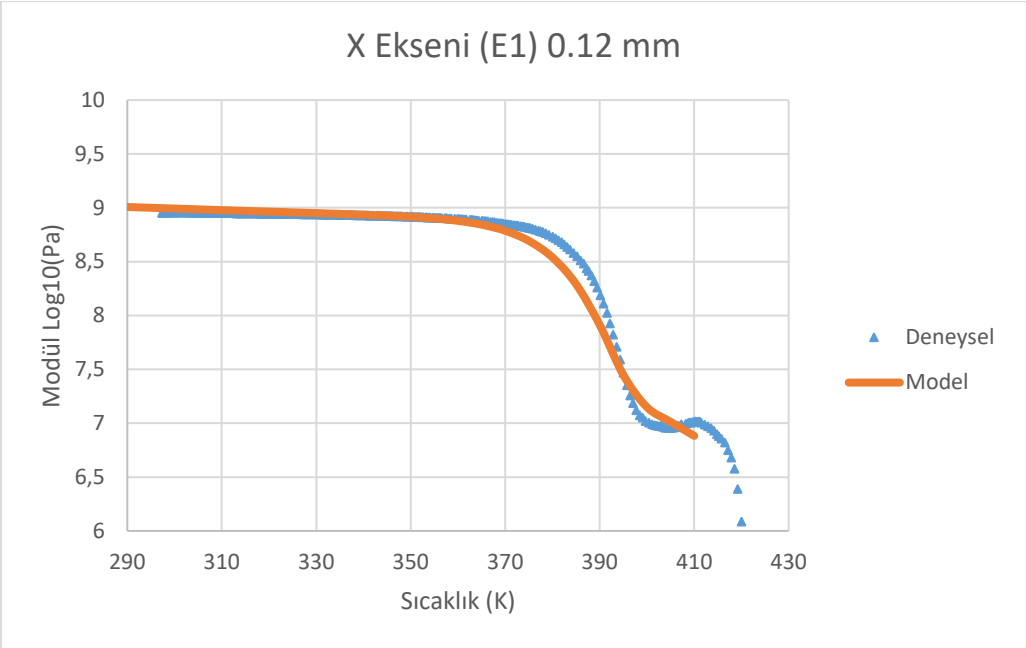
Modellerin karşılaştırma grafiklerinden görüleceği üzere değerler birbiri ile yakın ve trendleri uyumlu bir haldedir. Bu sayede de modelin gözeneklilik davranışının dahil edilmiş halinin çok yönlü ve sıcaklığa bağımlı bir şekildeki tahmin kabiliyeti incelenmiş olup tahmin gücünün başarılı olduğu grafiklerle gösterilmiştir.

Model sonuçlarının oda sıcaklığındaki (300K olarak kabul alınmıştır) modül ve katman kalınlığına göre karşılaştırmasının grafiği ise Şekil 5.7'da verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere katman kalınlığı artışı ile depolama modülü değerleri azalma göstermiştir. Bu durum beklenilen bir durumdur ve beklenen trendi karşılamaktadır.

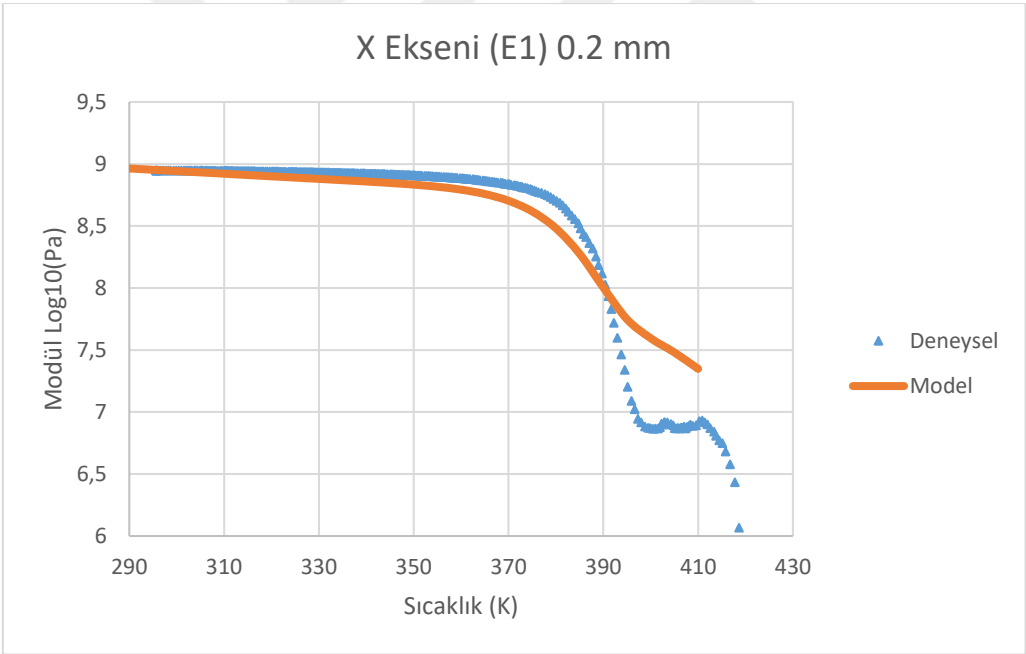


Şekil 5.7 Oda sıcaklığında modül ve katman kalınlığı karşılaştırması

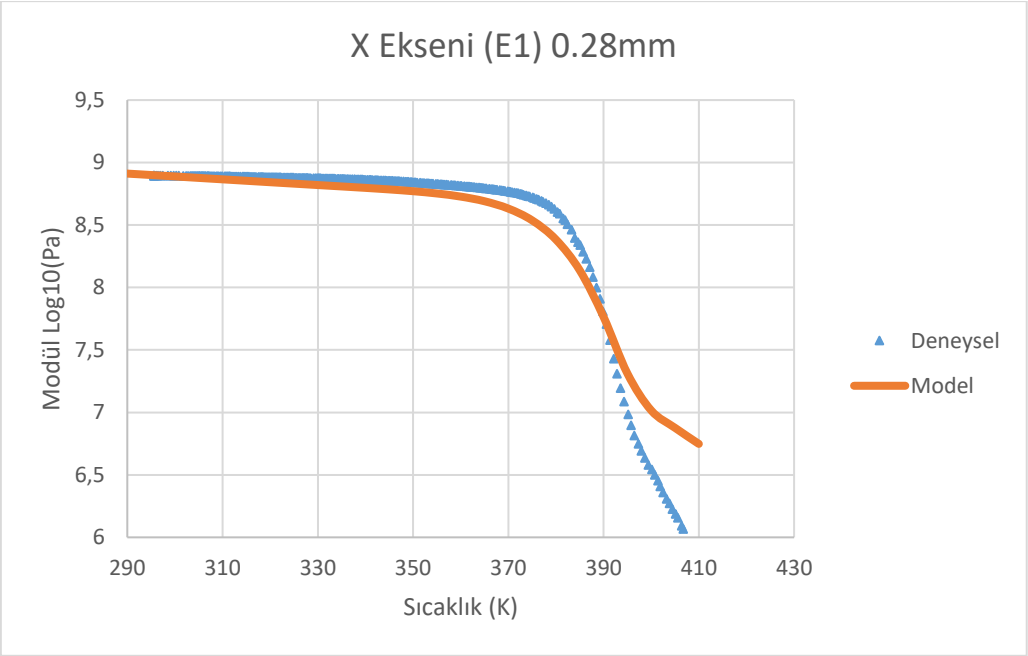
Elde edilen sonuçlarının doğruluğunun kontrolü için modelin gözeneklilik hali dahil edilmeden önceki hali deney sonuçlarıyla ayrıca karşılaştırılmıştır. Denklem 5.2-a'daki model 0.12 mm, 0.20 mm ve 0.28 mm için, gözeneklilik çarpanı dahil edilmeden önceki hali, Tablo 5.1-2-3 ve Tablo 3.3'teki değerler (geçiş sıcaklıkları hariç) kullanılarak çalıştırılmıştır. Model sonucu elde edilen sıcaklıklara ve yöne bağlı depolama modülü değerleri DMA testi sonucu olarak elden edilen depolama modülü değerleri ile karşılaştırılmış ve grafikleri oluşturulmuş. Bu grafikler x, y, z eksenleri (E1, E2, E3) için ve katman kalınlığı değerleri için ayrılmış ve 9 farklı grafikte verilmiştir. Şekil 5.8'de x ekseni için 0.12 mm katman kalınlığı değerinin deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması, Şekil 5.9'da x ekseni için 0.2 mm katman kalınlığı değerinin deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması, Şekil 5.10'da x ekseni için 0.28 mm katman kalınlığı değerinin deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 5.8 Katman kalınlığı 0.12mm ve x ekseni için değerlerin karşılaştırılması

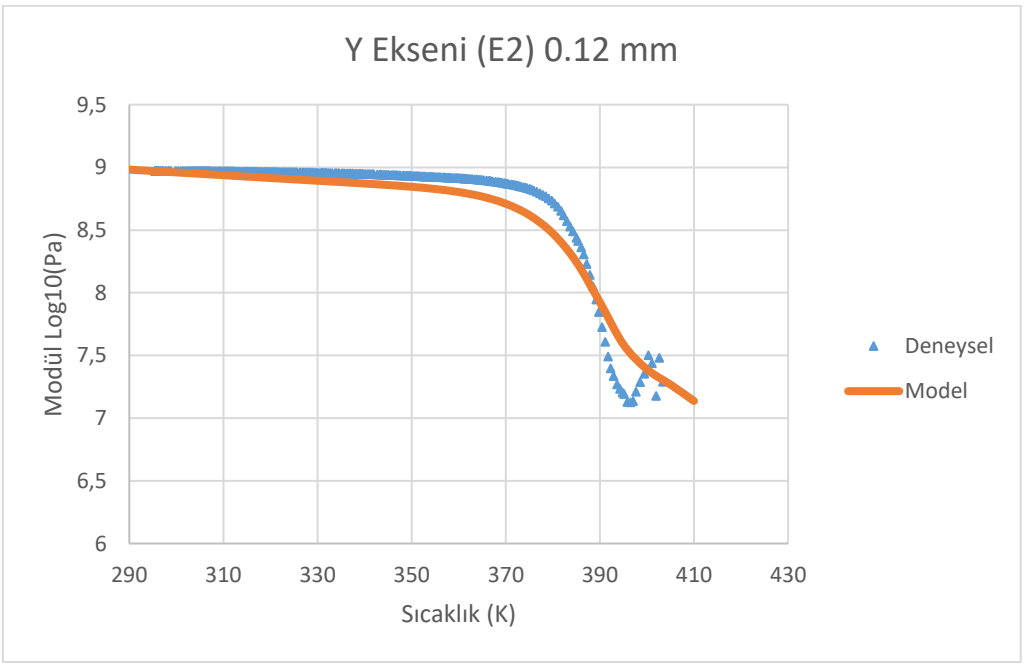


Şekil 5.9 Katman kalınlığı 0.2mm ve x ekseni için değerlerin karşılaştırılması

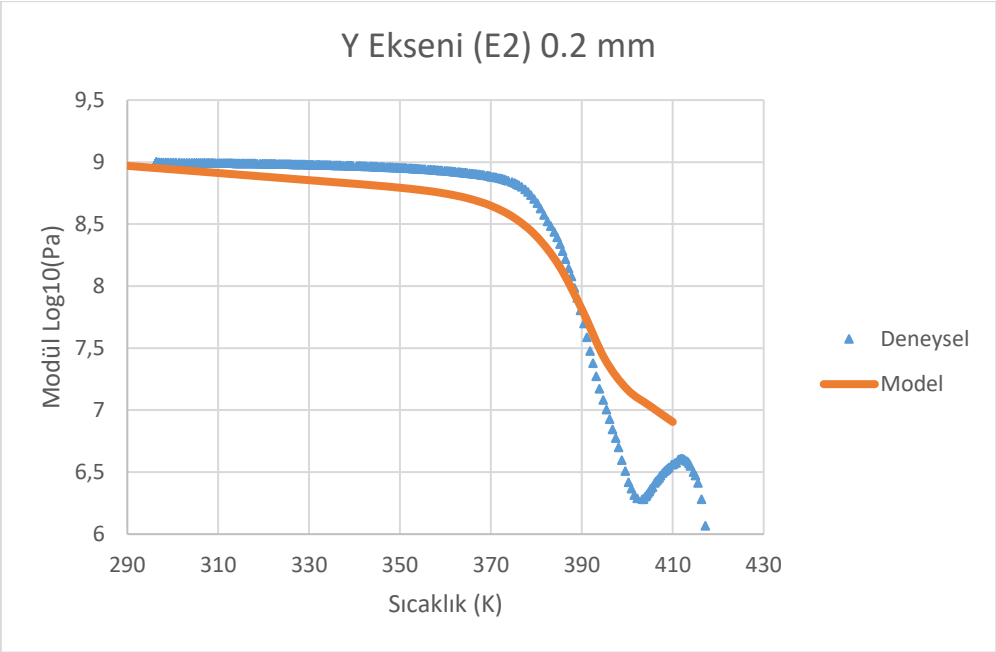


Şekil 5.10 Katman kalınlığı 0.28mm ve x ekseni için değerlerin karşılaştırılması

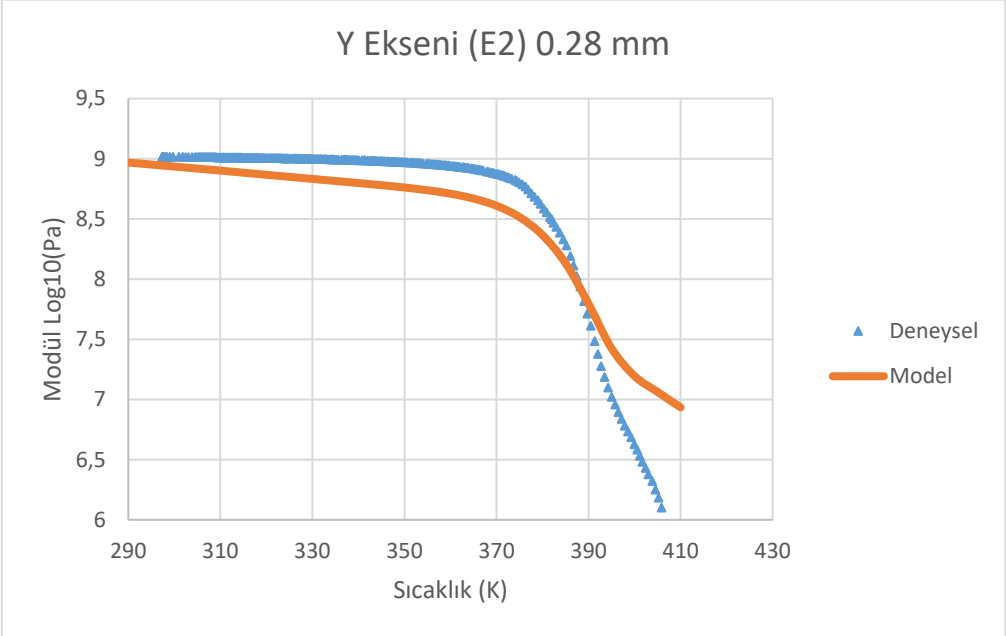
Şekil 5.11'de y ekseni için 0.12 mm katman kalınlığı değerinin deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması, Şekil 5.12'de y ekseni için 0.2 mm katman kalınlığı değerinin deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması, Şekil 5.13'te y ekseni için 0.28 mm katman kalınlığı değerinin deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 5.11 Katman kalınlığı 0.12mm ve y ekseni için değerlerin karşılaştırılması

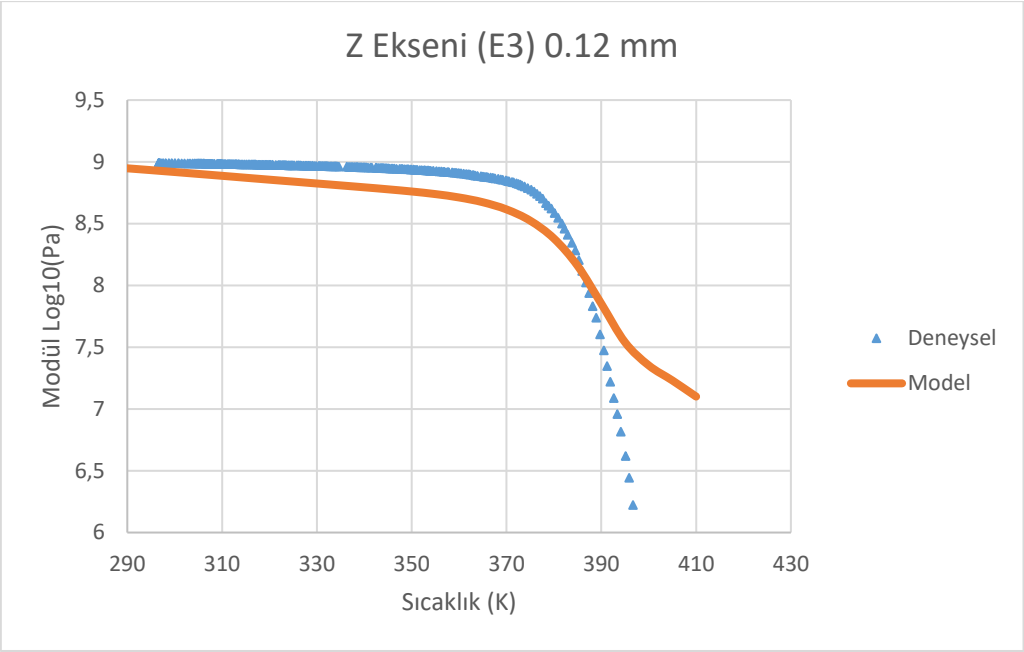


Şekil 5.12 Katman kalınlığı 0.20mm ve y ekseni için değerlerin karşılaştırılması

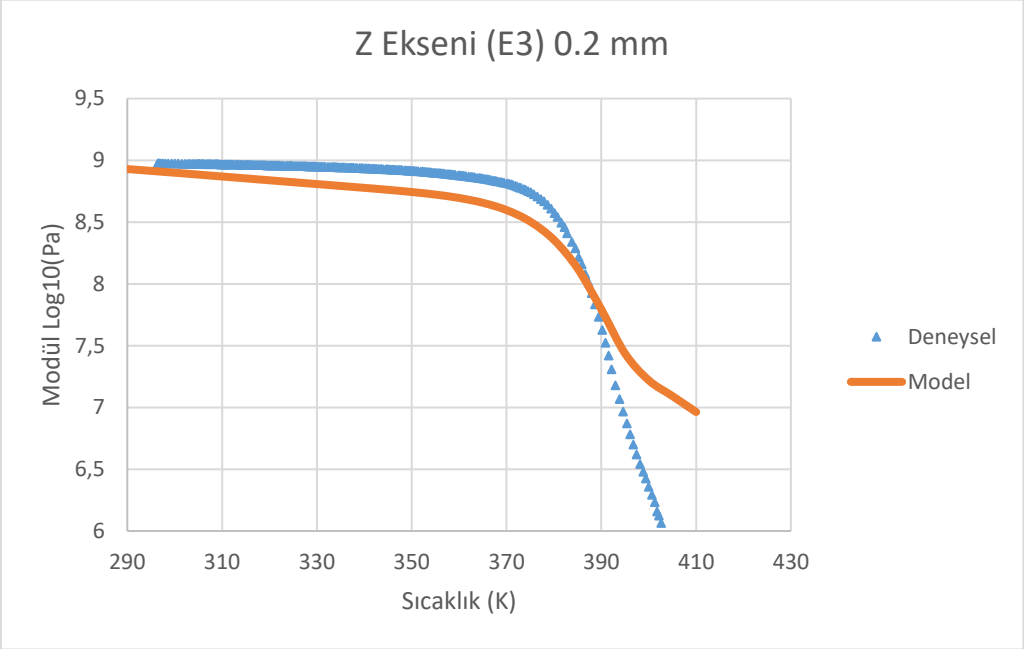


Şekil 5.13 Katman kalınlığı 0.28mm ve y ekseni için değerlerin karşılaştırılması

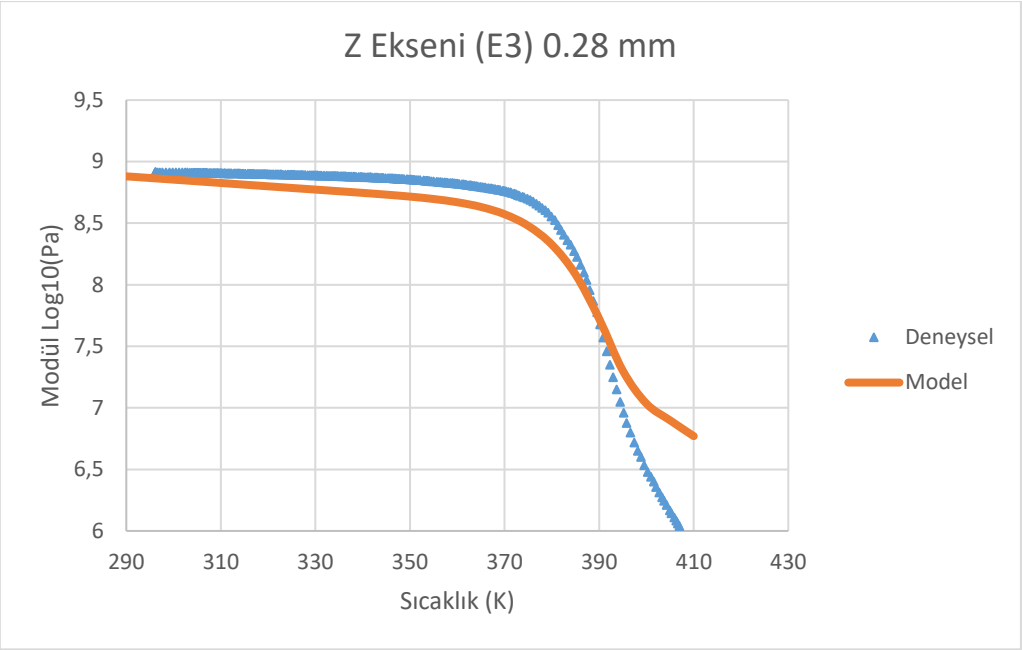
Şekil 5.14'te z ekseni için 0.12 mm katman kalınlığı değerinin deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması, Şekil 5.15'te z ekseni için 0.2 mm katman kalınlığı değerinin deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması ve Şekil 5.16'da z ekseni için 0.28 mm katman kalınlığı değerinin deneysel ve model verilerinin karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 5.14 Katman kalınlığı 0.12mm ve z ekseni için değerlerin karşılaştırılması



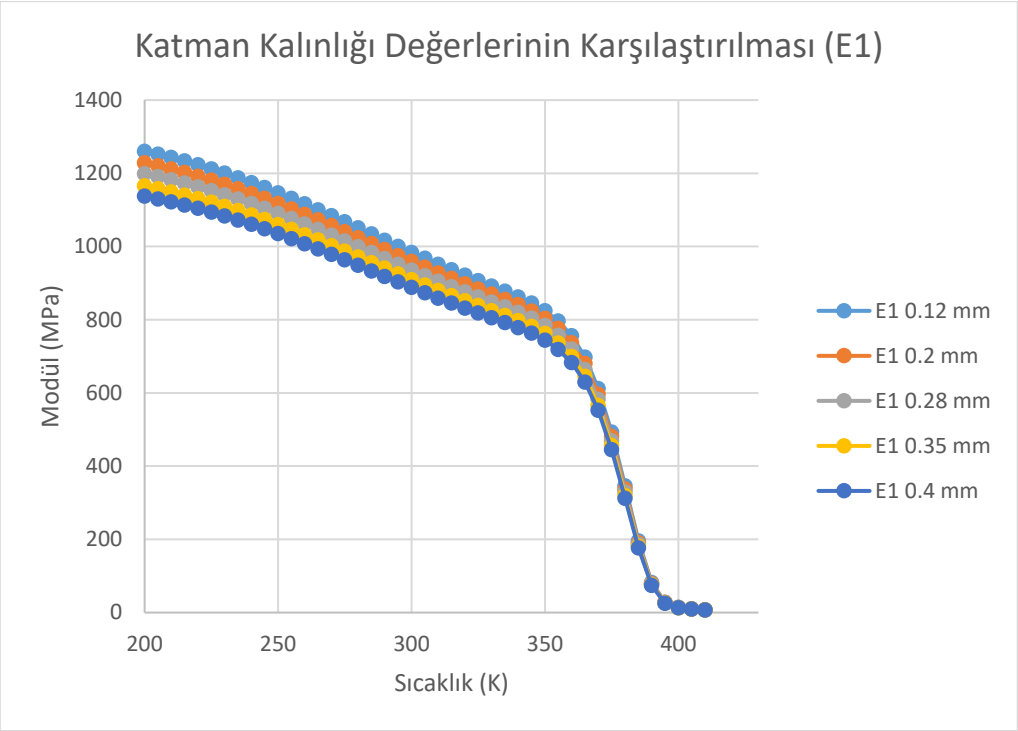
Şekil 5.15 Katman kalınlığı 0. 2mm ve z ekseni için değerlerin karşılaştırılması



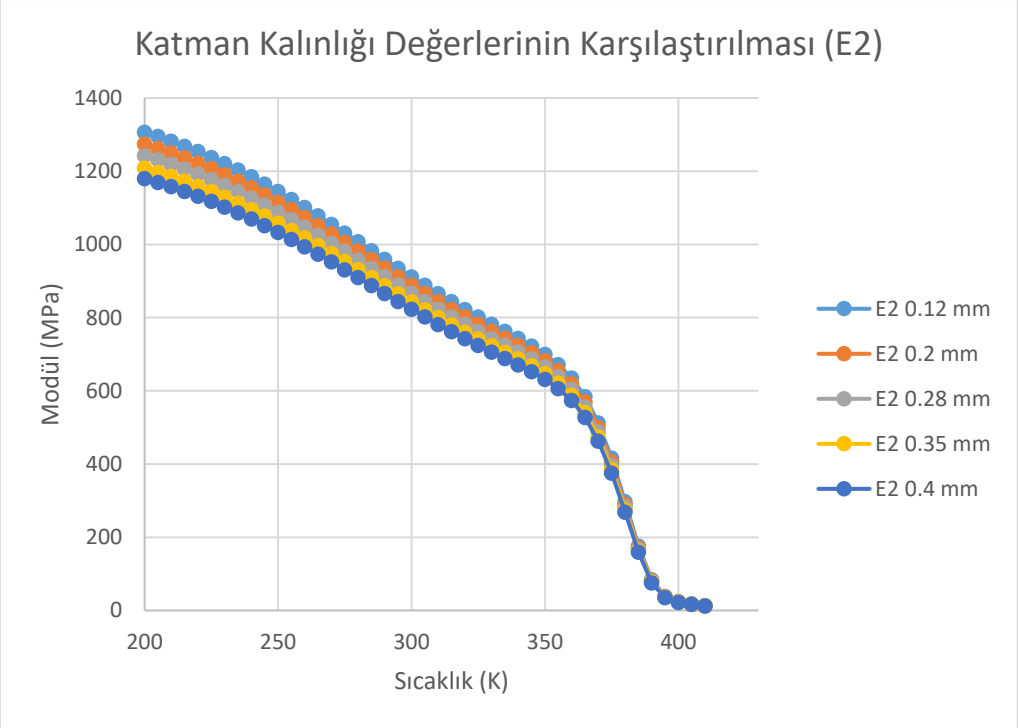
Şekil 5.16 Katman kalınlığı 0.28mm ve z ekseni için değerlerin karşılaştırılması

Yukarıdaki grafiklerden görüleceği üzere model sonuçları deneysel veriler ile uyumlu bir şekilde hareket etmektedir. Alınan kabuller göz önüne alındığında modelin tahmin gücünün başarılı olduğu görülmektedir. Mühendislik çalışmalarında camsı geçiş bölgesi öncesindeki kısmın hesaplamalarda kullanılması ve bu bölgede daha yüksek doğrulukta tahmin kabiliyetinin bulunması modelin asli amacına uygunluğunu göstermektedir.

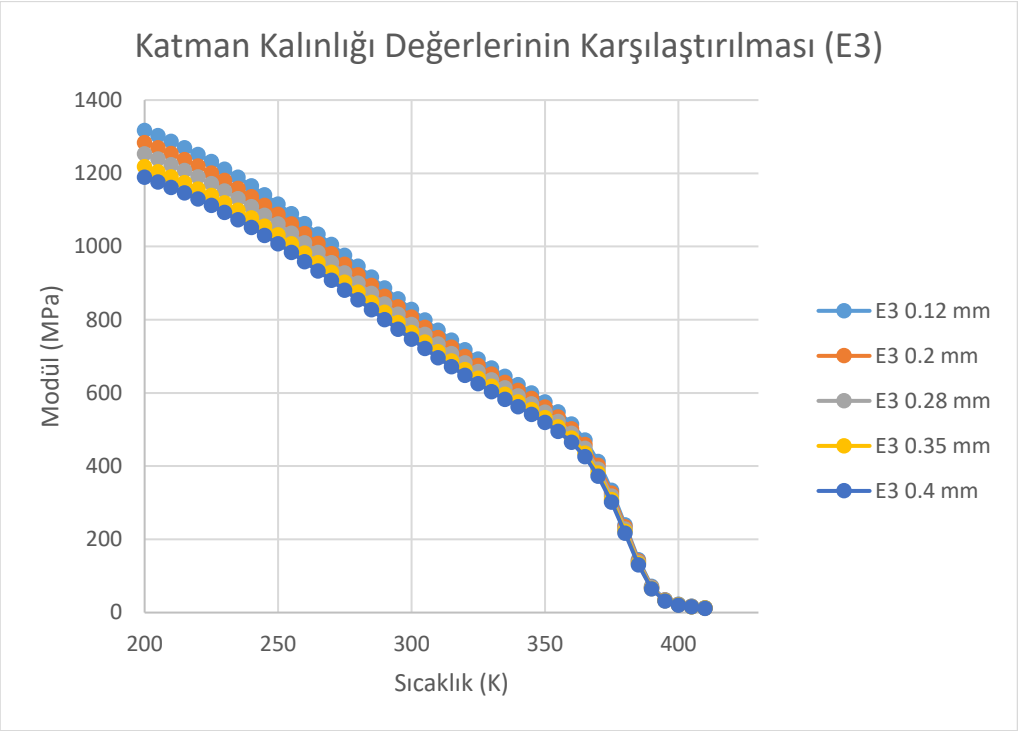
Son olarak elimizde karşılaştıracak referans değerler bulunmasa da modelin hem anizotropi hem de gözeneklilik durumunu sıcaklık değişimine bağlı olarak verdiği göz önünde bulundurularak elde edilen katman kalınlığı değerleri dışında 0.35mm ve 0.4mm değerleri için de model çalıştırılmıştır. Daha yüksek bir katman kalınlığı değeri seçilmemiştir. Bunun sebebi üretilen ve teste gönderilen numunelerin ağız çapı değerinin 0.4 mm olmasıdır. Teorik olarak katman kalınlığı değeri ağız çapı değerinden büyük olmamalıdır. Bu katman kalınlığı değerleri hesaplanırken 0.12 mm katman kalınlığı değerinin mühendislik sabitleri kullanılmıştır. Kendi değerleri için modelin Denklem 5.2-a'daki hali ile değerler hesaplanırken diğer değerler için modelin Denklem 5.2-b'deki hali kullanılmıştır. Şekil 5.17'de E1 değerleri, Şekil 5.18'de E2 değerleri ve Şekil 5.19'da E3 değerleri için karşılaştırma grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.17 Katman kalınlığı değerlerinin karşılaştırma grafiği (E1)



Şekil 5.18 Katman kalınlığı değerlerinin karşılaştırma grafiği (E2)



Şekil 5.19 Katman kalınlığı değerlerinin karşılaştırma grafiği (E3)

Yukarıdaki grafiklerden görüleceği üzere farklı katman kalınlığı değerleri için tek bir katman kalınlığı değerinin mühendislik sabitleri yardımıyla depolama modülü değerleri tahmin edilebilecektir. Temel olarak katman kalınlığı değerinin artışıyla modül değerlerinin düşeceği yargısıyla oluşturduğumuz bu model, fikrimizi doğru bir şekilde yansıtabilmekte ve bu doğrultuda hesaplar yapabilmektedir. Ayrıca eğriler üzerinde geçiş noktaları görülmektedir.

6
SONUÇ

Katmanlı imalat yöntemi temel olarak üretilecek parçaları bilgisayar üzerinde dilimleme programları yardımıyla katmanlara ayırıp, bu katmanları birbiri üzerine ekleme suretiyle imal ederek parçayı oluşturma prensibine dayanır. Bu süreçte yöntemin doğası gereği bir anizotropi ve gözeneklilik davranışı meydana gelir. Bununla birlikte yöntemin numerik kontrollü olması ve karmaşık geometrilerin kolay imal edilmesi gibi çok sayıda avantajının bulunması yöntemi cazip bir yöntem olarak karşımıza çıkarmaktadır. Bu durumda bu faydalardan mümkün olduğunca yararlanmak için yöntemin davranışlarını tahmin edebilecek bir karakterizasyon ve modelleme çalışması yapmak gerekmektedir. Katmanlı imalat yöntemleri İSO ve ASTM'nin ortak standardına göre yedi alt sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma yöntem farklılığına göre yapılmıştır. Her yöntemin birine göre üstünlükleri ve zayıflıklarına bulunmakla birlikte uygulanılabilir malzeme durumu da önemli bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Polimerler üzerinde yapılacak bir çalışma için Ergiyik Yığarak Modelleme yöntemi hem malzeme uygunluğu hem de diğer yöntemlere göre olan bazı avantajları sebebiyle bu çalışmada tercih edilen yöntem olmuştur. Filaman malzemeyi sıvılaştırarak bir ağız yardımıyla tabla üzerine ekstrüde etme prensibine dayanan bu yöntem bu sıvılaştırma göz önüne alındığında sıcaklık parametresiyle doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Ayrıca polimerik malzemelerin tamamında sıcaklık davranışının çok önemli olması sebebiyle bu durum büyük önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra ilk başta yöntemden dolayı karşımıza çıkacak anizotropi ve gözeneklilik davranışını doğrudan etkilen çok sayıda yöntem parametresi bulunmaktadır. Bu çalışmada imal yönü parametresi temel olarak anizotropi ile ve gözeneklilik davranışı temel olarak katman kalınlığı ile bağdaştırılarak hareket edilmiştir. Bu bağlantılar literatürde yapılan geniş kapsamlı literatür çalışması sonucu çok sayıda makaleden elde edilen bir ortak görüş sonucu kabul alınmıştır. Hem yöntemin hem de polimerlerin doğrudan sıcaklık bağlılığını kontrol edebileceğimiz ayrıca mekanik davranışları göz önüne alabileceğimiz en iyi parametrelerden biri depolama modülüdür. Depolamam modülü artan sıcaklık değerlerinde ve dinamik yükler altında dinamik

mekanik analiz (DMA) testleri yardımıyla belirlenmektedir. Malzeme seçiminde ise ergiyik yığarak modelleme yöntemi ile iyi termal ve mekanik özellikler gösteren ABS malzemesi seçilmiştir. Seçilen bu yöntem, test ve malzeme kombinasyonu ile yapılacak karakterizasyon ve modelle çalışmasının ilk aşaması tamamlanmıştır. Önerilecek modeli oluşturmak için literatür üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Polimerler için sıcaklığa bağlı mekanik özellikleri hesaplayabilen modeller bulunsa da bunların tamamı tek eksenli bir şekilde çalışmakta ve katmanlı imalat sonucu karşımız çıkan çok eksenli anizotropi durumunu hesaplayamamaktadır. Bu sebeple bu yöntemlerden biri Genelleştirilmiş Hooke Kanunu kullanılarak sıcaklığa bağımlı ve çok eksenli bir şekilde depolama modülünü hesaplayabilen bir model haline getirilmiştir. Model bu hali ile anizotropi davranışını hesaplayabilse de gözeneklilik davranışının dahil edilebilmesi için bir geliştirme daha yapılmıştır. Bunun için literatürde bulunan gözeneklilik tahmini için sunulmuş mikro-mekanik modeller içerisinden genel trendi yakalayabilecek bir model gözeneklilik ile bağdaştırdığımız katman kalınlığı ve katman genişliği parametreleri için geliştirilerek bir varyant modele dönüştürülmüştür. Elde edilen bu varyant modelin bir kısmı daha önce elde ettiğimiz sıcaklığa bağlı bir şekilde anizotropik depolama modülünü hesaplayan modele bir fonksiyon olarak eklenmiştir. Bu sayede elde edilen son model hem anizotropi davranışını hem de gözeneklilik davranışını sıcaklığa bağlı bir şekilde tahmin edebilecek bir hal almıştır. Bu modeli doğrulamak için seçilen ABS malzeme ve ergiyik yığarak modelleme yöntemi ile üç farklı katman kalınlığında ve üç farklı imal yönünde numuneler üretilmiştir. Bu numunelere dinamik mekanik analiz (DMA) testleri uygulanmış ve deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Bu deneysel veriler sayesinde önerilen modelin doğrulaması yapılmış ve tahmin kabiliyeti incelenmiştir. Üretilen her parçanın zaten bir katman kalınlığı değeri ile üretilmesi bize alınacak referans değerlerini vermektedir. Bu durumda tek bir katman kalınlığı değerini referans alarak bu değerin mühendislik sabitleri ve önerilen model ile çok sayıda katman kalınlığı için depolama modülü değerleri hesaplanabilecektir. Elimizde bulunan referans değerler ile model ile üretilen değerler karşılaştırıldığında deneysel sonuçlar ve model sonuçları arasında olumlu bir ilişki gözlemlenmiştir. Ayrıca mühendislik çalışmalarında kullanılacak değerlerin camsı geçiş bölgesi öncesindeki değerler olması ve bu değerleri ise yüksek doğrulukta tahmin edilebilmesi model açısından

çok önemli bir durumdur. Bu durumdan yola çıkarak da tek bir katman kalınlığı değerinin mühendislik sabitleri yardımıyla çok sayıda değer için depolama modülün hesaplanabileceği de doğrulanmış olup bu doğrultuda üretilen grafik incelendiğinde, literatürden elde edilen katman kalınlığı artışı ile depolama modülünün düşeceği yargısı doğrultusunda bir sonuç çıktığı gözlemlenmiştir. Daha sonrasında ise modelin katman kalınlığı davranışını dahil etmeyen halini doğrudan ham veriler ile karşılaştırılarak bir ek kontrol yapılmış ve değerlerin bu açıdan da birbirini sağlayan sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tüm bu sonuçlardan özetle Ergiyik Yığarak Modelleme (FDM) yöntemi ile üretilmiş parçaların yapısal analizlerde kullanılması gereken anizotropik katılık matrisini, değişen sıcaklık değerleri ve katman kalınlığı değerleri için tahmin edebilen bir model önerilmiştir. Bu model literatürde olan modeller ve kanunların gerekli geliştirmeler ve sentezlenmesi şeklinde oluşturulmuş ve çalıştırılmıştır. Bu modeli doğrulamak maksadıyla çeşitli numuneler üretilmiş ve bu numunelere dinamik mekanik analiz testleri uygulanmıştır. Modelin tahmin gücü deneysel veriler ve model verileri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda test sürecindeki limitler ve gerekli parametrelerin elde edilmesi için yapılan bazı kabuller göz önüne alınarak çıkarılan değerler yorumlanmış ve bu değerlerden oluşturulan grafikler yardımıyla model ile deneysel sonuçlar arasında olumlu bir ilişki gözlemlenmiştir. Bu durumdan yola çıkarak önerilen modelin Ergiyik Yığarak Modelleme yöntemi ile üretilen parçaların anizotropik katılık matrisini değişen katman kalınlığı ve sıcaklık değerleri için tahmin edebildiği ortaya konulmuştur.

Bu çalışma burada sınırlı kalmayıp ileriye yönelik bir fikirde sunmaktadır. Malzemenin elastik davranışı üzerinde çalıştığımız bu çalışma ileride viskoelastik ve viskoplastik davranışlar için geliştirilme fikrini aklımıza getirmektedir. Özellikle sürünme davranışını tahmin edebilmek amacıyla çalışmalar yapılması ileri dönük bir fikir olarak düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

[1] M. Domingo-Espin, J. M. Puigoriol-Forcada, A.-A. Garcia-Granada, J. Llumà, S. Borros, ve G. Reyes, "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts", *Mater. Des.*, c. 83, ss. 670-677, Eki. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.074.

[2] K. V. Wong ve A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing", *ISRN Mech. Eng.*, c. 2012, ss. 1-10, Ağu. 2012, doi: 10.5402/2012/208760.

[3] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, ve C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities", *Mater. Today*, c. 21, sy 1, ss. 22-37, Oca. 2018, doi: 10.1016/j.mattod.2017.07.001.

[4] L. Magerramova, B. Vasilyev, ve V. Kinzburskiy, "Novel Designs of Turbine Blades for Additive Manufacturing", *Proc. ASME Turbo Expo 2016 Turbine Tech. Conf. Expo. GT2016*, 2016.

[5] F42 Committee, "Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology", ASTM International. doi: 10.1520/F3177-21.

[6] H. K. Sürmen, "EKLEMELİ İMALAT (3B BASKI): TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR", *Uludağ Univ. J. Fac. Eng.*, c. 24, sy 2, ss. 373-392, Eyl. 2019, doi: 10.17482/uumfd.519147.

[7] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, ve M. Khorasani, *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-56127-7.

[8] M. Sireesha, J. Lee, A. S. Kranthi Kiran, V. J. Babu, B. B. T. Kee, ve S. Ramakrishna, "A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry", *RSC Adv.*, c. 8, sy 40, ss. 22460-22468, 2018, doi: 10.1039/C8RA03194K.

[9] D. I. Wimpenny, B. Bryden, ve I. R. Pashby, "Rapid laminated tooling", *J. Mater. Process. Technol.*, c. 138, sy 1-3, ss. 214-218, Tem. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00074-8.

[10] I. Durgun ve R. Ertan, "Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost", *Rapid Prototyp. J.*, c. 20, sy 3, ss. 228-235, Nis. 2014, doi: 10.1108/RPJ-10-2012-0091.

[11] R. Zou *vd.*, "Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material", *Compos. Part B Eng.*, c. 99, ss. 506-513, Ağu. 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.06.009.

[12] S. Garzon-Hernandez, A. Arias, ve D. Garcia-Gonzalez, "A continuum constitutive model for FDM 3D printed thermoplastics", *Compos. Part B Eng.*, c. 201, s. 108373, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108373.

[13] C. Vălean, L. Marșavina, M. Mărghitaș, E. Linul, J. Razavi, ve F. Berto, "Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed

specimens", *Procedia Struct. Integr.*, c. 26, ss. 313-320, 2020, doi: 10.1016/j.prostr.2020.06.040.

[14] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baciu, ve R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review", *Polym. Test.*, c. 69, ss. 157-166, Ağu. 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.

[15] P.-V. Yap, M.-Y. Chan, ve S.-C. Koay, "Preliminary Study on Mechanical Properties of 3D Printed MultimaterialsABS/PC Parts: Effect of Printing Parameters", *J. Phys. Sci.*, c. 32, sy 2, ss. 87-104, Ağu. 2021, doi: 10.21315/jps2021.32.2.7.

[16] S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, ve P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", *Rapid Prototyp. J.*, c. 8, sy 4, ss. 248-257, Eki. 2002, doi: 10.1108/13552540210441166.

[17] J. T. Cantrell *vd.*, "Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts", *Rapid Prototyp. J.*, c. 23, sy 4, ss. 811-824, Haz. 2017, doi: 10.1108/RPJ-03-2016-0042.

[18] X. Zhang, L. Chen, T. Mulholland, ve T. A. Osswald, "Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling", *SN Appl. Sci.*, c. 1, sy 6, s. 616, Haz. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-0639-5.

[19] M. Somireddy, A. Czekanski, ve C. V. Singh, "Development of constitutive material model of 3D printed structure via FDM", *Mater. Today Commun.*, c. 15, ss. 143-152, Haz. 2018, doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.03.004.

[20] T. Yao, H. Ouyang, S. Dai, Z. Deng, ve K. Zhang, "Effects of manufacturing micro-structure on vibration of FFF 3D printing plates: Material characterisation, numerical analysis and experimental study", *Compos. Struct.*, c. 268, s. 113970, Tem. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113970.

[21] J. Brackett *vd.*, "The impact of infill percentage and layer height in small-scale material extrusion on porosity and tensile properties", *Addit. Manuf.*, c. 58, s. 103063, Eki. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103063.

[22] S. Wang, Y. Ma, Z. Deng, S. Zhang, ve J. Cai, "Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials", *Polym. Test.*, c. 86, s. 106483, Haz. 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106483.

[23] M. S. Uddin, M. F. R. Sidek, M. A. Faizal, R. Ghomashchi, ve A. Pramanik, "Evaluating Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Fused Deposition Modeling Acrylonitrile Butadiene Styrene Parts", *J. Manuf. Sci. Eng.*, c. 139, sy 8, s. 081018, Ağu. 2017, doi: 10.1115/1.4036713.

[24] B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, ve T. Letcher, "Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation", *J. Fail. Anal. Prev.*, c. 16, sy 3, ss. 467-481, Haz. 2016, doi: 10.1007/s11668-016-0113-2.

[25] C. M. S. Vicente, T. S. Martins, M. Leite, A. Ribeiro, ve L. Reis, "Influence of fused deposition modeling parameters on the mechanical properties of ABS parts", *Polym. Adv. Technol.*, c. 31, sy 3, ss. 501-507, Mar. 2020, doi: 10.1002/pat.4787.

[26] O. A. Mohamed, S. H. Masood, ve J. L. Bhowmik, "Characterization and dynamic mechanical analysis of PC-ABS material processed by fused deposition modelling: An investigation through I-optimal response surface methodology", *Measurement*, c. 107, ss. 128-141, Eyl. 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.05.019.

[27] F. Ning, W. Cong, Y. Hu, ve H. Wang, "Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties", *J. Compos. Mater.*, c. 51, sy 4, ss. 451-462, Şub. 2017, doi: 10.1177/0021998316646169.

[28] M. Samykano, S. K. Selvamani, K. Kadirgama, W. K. Ngui, G. Kanagaraj, ve K. Sudhakar, "Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, c. 102, sy 9-12, ss. 2779-2796, Haz. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03313-0.

[29] S. R. Rajpurohit, H. K. Dave, ve K. P. Rajurkar, "Prediction of tensile strength of fused deposition modeling (FDM) printed PLA using classic laminate theory", *Eng. Solid Mech.*, c. 10, sy 1, ss. 13-24, 2022, doi: 10.5267/j.esm.2021.12.002.

[30] F. He ve M. Khan, "Effects of Printing Parameters on the Fatigue Behaviour of 3D-Printed ABS under Dynamic Thermo-Mechanical Loads", *Polymers*, c. 13, sy 14, s. 2362, Tem. 2021, doi: 10.3390/polym13142362.

[31] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, ve P. J. Núñez, "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection", *Mater. Des.*, c. 124, ss. 143-157, Haz. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.

[32] C. Ziemian, M. Sharma, ve S. Ziemi, "Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling", içinde *Mechanical Engineering*, M. Gokcek, Ed., InTech, 2012. doi: 10.5772/34233.

[33] A. K. Sood, R. K. Ohdar, ve S. S. Mahapatra, "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts", *Mater. Des.*, c. 31, sy 1, ss. 287-295, Oca. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.06.016.

[34] M. Günay, S. Gündüz, H. Yılmaz, N. Yaşar, ve R. Kaçar, "PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı İçin 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu", *J. Polytech.*, Mar. 2019, doi: 10.2339/politeknik.422795.

[35] L. Baich, G. Manogharan, ve H. Marie, "Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts", *Int. J. Rapid Manuf.*, c. 5, sy 3/4, s. 308, 2015, doi: 10.1504/IJRAPIDM.2015.074809.

[36] P. Shubham, C. Aggarwal, ve S. Joshi, "Optimization of Process Parameter to Improve Dynamic Mechanical Properties of 3d Printed Abs Polymer Using Taguchi Method", *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, Haz. 2018.

[37] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, ve P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments", *Rapid Prototyp. J.*, c. 14, sy 2, ss. 72-80, Mar. 2008, doi: 10.1108/13552540810862028.

[38] B. Huang, S. H. Masood, M. Nikzad, P. R. Venugopal, ve A. Arivazhagan, "Dynamic Mechanical Properties of Fused Deposition Modelling Processed Polyphenylsulfone Material", *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, c. 9, sy 1, ss. 1-11, Oca. 2016, doi: 10.3844/ajeassp.2016.1.11.

[39] M. Bertoldi, M. Yardimci, C. M. Pistor, S. I. Guceri, ve G. Sala, "Mechanical Characterization of Parts Processed via Fused Deposition", 1998, doi: 10.26153/TSW/646.

[40] C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco, ve C. Pappalettere, "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory", *Mater. Des.*, c. 90, ss. 453-458, Oca. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.009.

[41] S. Dai, Z. C. Deng, Y. J. Yu, K. Zhang, S. H. Wang, ve J. Ye, "Orthotropic elastic behaviors and yield strength of fused deposition modeling materials: Theory and experiments", *Polym. Test.*, c. 87, s. 106520, Tem. 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106520.

[42] F. Górski, R. Wichniarek, W. Kuczko, P. Zawadzki, ve P. Buń, "STRENGTH OF ABS PARTS PRODUCED BY FUSED DEPOSITION MODELLING TECHNOLOGY – A CRITICAL ORIENTATION PROBLEM", *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, c. 9, ss. 12-19, 2015, doi: 10.12913/22998624/2359.

[43] S. Deng, M. Hou, ve L. Ye, "Temperature-dependent elastic moduli of epoxies measured by DMA and their correlations to mechanical testing data", *Polym. Test.*, c. 26, sy 6, ss. 803-813, Eyl. 2007, doi: 10.1016/j.polymertesting.2007.05.003.

[44] J. Torres, J. Cotelo, J. Karl, ve A. P. Gordon, "Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives", *JOM*, c. 67, sy 5, ss. 1183-1193, May. 2015, doi: 10.1007/s11837-015-1367-y.

[45] M. Selva Priya, K. Naresh, R. Jayaganthan, ve R. Velmurugan, "A comparative study between in-house 3D printed and injection molded ABS and PLA polymers for low-frequency applications", *Mater. Res. Express*, c. 6, sy 8, s. 085345, Haz. 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab2776.

[46] H. Li, T. Wang, J. Sun, ve Z. Yu, "The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties", *Rapid Prototyp. J.*, c. 24, sy 1, ss. 80-92, Oca. 2018, doi: 10.1108/RPJ-06-2016-0090.

[47] J. Bergstrom, *Mechanics of solid polymers: theory and computational modeling*. Amsterdam: Elsevier, 2015.

[48] A. Arivazhagan, A. Saleem, S. H. Masood, M. Nikzad, ve K. A. Jagadeesh, "STUDY OF DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF FUSED DEPOSITION MODELLING PROCESSED ULTEM MATERIAL", *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, c. 7, sy 3, ss. 307-315, Mar. 2014, doi: 10.3844/ajeassp.2014.307.315.

[49] J. Richeton, G. Schlatter, K. S. Vecchio, Y. Rémond, ve S. Ahzi, "A unified model for stiffness modulus of amorphous polymers across transition temperatures and strain rates", *Polymer*, c. 46, sy 19, ss. 8194-8201, Eyl. 2005, doi: 10.1016/j.polymer.2005.06.103.

[50] A. Acar, O. Colak, J. P. M. Correia, ve S. Ahzi, "Cooperative-VBO model for polymer/graphene nanocomposites", *Mech. Mater.*, c. 125, ss. 1-13, Eki. 2018, doi: 10.1016/j.mechmat.2018.06.005.

[51] C. A. Mahieux ve K. L. Reifsnider, "Property modeling across transition temperatures in polymers: application to thermoplastic systems", *J. Mater. Sci.*, c. 37, sy 5, ss. 911-920, 2002, doi: 10.1023/A:1014383427444.

[52] O. U. Colak, "Yıldız Teknik Üniversitesi Viskoelastisite Ders Notları".

[53] R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*, 2nd ed. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1999.

[54] A. K. Kaw, *Mechanics of composite materials*, 2nd ed. içinde Mechanical engineering, no. v. 29. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.

[55] K. Chin Ang, K. Fai Leong, C. Kai Chua, ve M. Chandrasekaran, "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures", *Rapid Prototyp. J.*, c. 12, sy 2, ss. 100-105, Mar. 2006, doi: 10.1108/13552540610652447.

[56] R. M. Spriggs, "Expression for Effect of Porosity on Modulus of Polycrystalline Refractory Materials, Particularly Aluminum Oxide", *J. Am. Ceram. Soc.*, sy 44, ss. 628-629, 1961.

[57] A. Bellini ve S. Güçeri, "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling", *Rapid Prototyp. J.*, c. 9, sy 4, ss. 252-264, Eki. 2003, doi: 10.1108/13552540310489631.

[58] Matweb, "ABS Malzeme Bilgiler". [Çevrimiçi]. Erişim adresi: www.matweb.com

[59] D20 Committee, "Test Method for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: In Flexure (Dual Cantilever Beam)", ASTM International. doi: 10.1520/D5418-15.

A
KOD DOSYASI

```
fref=;
f=;
Tbetaref=;
Tglassref=;
Tflowref=;
m1=;
m2=;
m3=;
s=;
k=;
DeltaHbeta=;
c1ref=;
c2ref=;

E1refComp=zeros(6,6);
E1b=;
E2b=;
E3b=;
v12b=;
v31b=;
v23b=;
G12b=;
G31b=;
G23b=;
E1refComp(1,1)=1/E1b;
E1refComp(1,2)=(-1)*(v12b/E1b);
E1refComp(1,3)=(-1)*(v31b/E3b);
E1refComp(2,1)=(-1)*(v12b/E1b);
E1refComp(2,2)=1/E2b;
E1refComp(2,3)=(-1)*(v23b/E2b);
E1refComp(3,1)=(-1)*(v31b/E3b);
E1refComp(3,2)=(-1)*(v23b/E2b);
E1refComp(3,3)=1/E3b;
E1refComp(4,4)=1/G23b;
E1refComp(5,5)=1/G31b;
E1refComp(6,6)=1/G12b;
E1ref=zeros(6,6);
S1=((E1refComp(1,1)*E1refComp(2,2)*E1refComp(3,3))-(E1refComp(1,1)*E1refComp(2,3)*E1refComp(2,3))....
-(E1refComp(2,2)*E1refComp(1,3)*E1refComp(1,3))-(E1refComp(3,3)*E1refComp(1,2)*E1refComp(1,2))....
+(2*E1refComp(1,2)*E1refComp(2,3)*E1refComp(3,1)));
E1ref(1,1)=(((E1refComp(2,2)*E1refComp(3,3))-(E1refComp(2,3)*E1refComp(2,3)))/S1);
E1ref(1,2)=(((E1refComp(1,3)*E1refComp(2,3))-(E1refComp(1,2)*E1refComp(3,3)))/S1);
E1ref(1,3)=(((E1refComp(1,2)*E1refComp(2,3))-(E1refComp(1,3)*E1refComp(2,2)))/S1);
E1ref(2,1)=(((E1refComp(1,3)*E1refComp(2,3))-(E1refComp(1,2)*E1refComp(3,3)))/S1);
E1ref(2,2)=(((E1refComp(3,3)*E1refComp(1,1))-(E1refComp(1,3)*E1refComp(1,3)))/S1);
E1ref(2,3)=(((E1refComp(1,2)*E1refComp(1,3))-(E1refComp(2,3)*E1refComp(1,1)))/S1);
E1ref(3,1)=(((E1refComp(1,2)*E1refComp(2,3))-(E1refComp(1,3)*E1refComp(2,2)))/S1);
E1ref(3,2)=(((E1refComp(1,2)*E1refComp(1,3))-(E1refComp(2,3)*E1refComp(1,1)))/S1);
E1ref(3,3)=(((E1refComp(1,1)*E1refComp(2,2))-(E1refComp(1,2)*E1refComp(1,2)))/S1);
E1ref(4,4)=(1/E1refComp(4,4));
E1ref(5,5)=(1/E1refComp(5,5));
E1ref(6,6)=(1/E1refComp(6,6));

```

```
E2refComp=zeros(6,6);
E1g=;
E2g=;
E3g;
v12g=;
v31g=;
v23g=;
G12g=;
G31g=;
G23g=;
E2refComp(1,1)=1/E1g;
E2refComp(1,2)=(-1)*(v12g/E1g);
E2refComp(1,3)=(-1)*(v31g/E3g);
E2refComp(2,1)=(-1)*(v12g/E1g);
E2refComp(2,2)=1/E2g;
E2refComp(2,3)=(-1)*(v23g/E2g);
E2refComp(3,1)=(-1)*(v31g/E3g);
E2refComp(3,2)=(-1)*(v23g/E2g);
E2refComp(3,3)=1/E3g;
E2refComp(4,4)=1/G23g;
E2refComp(5,5)=1/G31g;
E2refComp(6,6)=1/G12g;
E2ref=zeros(6,6);
S2=((E2refComp(1,1)*E2refComp(2,2)*E2refComp(3,3))-(E2refComp(1,1)*E2refComp(2,3)*E2refComp(2,3))....
-(E2refComp(2,2)*E2refComp(1,3)*E2refComp(1,3))-(E2refComp(3,3)*E2refComp(1,2)*E2refComp(1,2))....
+(2*E2refComp(1,2)*E2refComp(2,3)*E2refComp(3,1)));
E2ref(1,1)=(((E2refComp(2,2)*E2refComp(3,3))-(E2refComp(2,3)*E2refComp(2,3)))/S2);
E2ref(1,2)=(((E2refComp(1,3)*E2refComp(2,3))-(E2refComp(1,2)*E2refComp(3,3)))/S2);
E2ref(1,3)=(((E2refComp(1,2)*E2refComp(2,3))-(E2refComp(1,3)*E2refComp(2,2)))/S2);
E2ref(2,1)=(((E2refComp(1,3)*E2refComp(2,3))-(E2refComp(1,2)*E2refComp(3,3)))/S2);
E2ref(2,2)=(((E2refComp(3,3)*E2refComp(1,1))-(E2refComp(1,3)*E2refComp(1,3)))/S2);
E2ref(2,3)=(((E2refComp(1,2)*E2refComp(1,3))-(E2refComp(2,3)*E2refComp(1,1)))/S2);
E2ref(3,1)=(((E2refComp(1,2)*E2refComp(2,3))-(E2refComp(1,3)*E2refComp(2,2)))/S2);
E2ref(3,2)=(((E2refComp(1,2)*E2refComp(1,3))-(E2refComp(2,3)*E2refComp(1,1)))/S2);
E2ref(3,3)=(((E2refComp(1,1)*E2refComp(2,2))-(E2refComp(1,2)*E2refComp(1,2)))/S2);
E2ref(4,4)=(1/E2refComp(4,4));
E2ref(5,5)=(1/E2refComp(5,5));
E2ref(6,6)=(1/E2refComp(6,6));

```

```
E3refComp=zeros(6,6);
E1f=;
E2f=;
E3f=;
v12f=;
v31f=;
v23f=;
G12f=;
G31f=;
G23f=;
E3refComp(1,1)=1/E1f;
E3refComp(1,2)=(-1)*(v12f/E1f);
E3refComp(1,3)=(-1)*(v31f/E3f);
E3refComp(2,1)=(-1)*(v12f/E1f);
E3refComp(2,2)=1/E2f;
E3refComp(2,3)=(-1)*(v23f/E2f);
E3refComp(3,1)=(-1)*(v31f/E3f);
E3refComp(3,2)=(-1)*(v23f/E2f);
E3refComp(3,3)=1/E3f;
E3refComp(4,4)=1/G23f;
E3refComp(5,5)=1/G31f;
E3refComp(6,6)=1/G12f;
E3ref=zeros(6,6);
S3=((E3refComp(1,1)*E3refComp(2,2)*E3refComp(3,3))-(E3refComp(1,1)*E3refComp(2,3)*E3refComp(2,3))....
-(E3refComp(2,2)*E3refComp(1,3)*E3refComp(1,3))-(E3refComp(3,3)*E3refComp(1,2)*E3refComp(1,2))....
+(2*E3refComp(1,2)*E3refComp(2,3)*E3refComp(3,1)));
E3ref(1,1)=(((E3refComp(2,2)*E3refComp(3,3))-(E3refComp(2,3)*E3refComp(2,3)))/S3);
E3ref(1,2)=(((E3refComp(1,3)*E3refComp(2,3))-(E3refComp(1,2)*E3refComp(3,3)))/S3);
E3ref(1,3)=(((E3refComp(1,2)*E3refComp(2,3))-(E3refComp(1,3)*E3refComp(2,2)))/S3);
E3ref(2,1)=(((E3refComp(1,3)*E3refComp(2,3))-(E3refComp(1,2)*E3refComp(3,3)))/S3);
E3ref(2,2)=(((E3refComp(3,3)*E3refComp(1,1))-(E3refComp(1,3)*E3refComp(1,3)))/S3);
E3ref(2,3)=(((E3refComp(1,2)*E3refComp(1,3))-(E3refComp(2,3)*E3refComp(1,1)))/S3);
E3ref(3,1)=(((E3refComp(1,2)*E3refComp(2,3))-(E3refComp(1,3)*E3refComp(2,2)))/S3);
E3ref(3,2)=(((E3refComp(1,2)*E3refComp(1,3))-(E3refComp(2,3)*E3refComp(1,1)))/S3);
E3ref(3,3)=(((E3refComp(1,1)*E3refComp(2,2))-(E3refComp(1,2)*E3refComp(1,2)))/S3);
E3ref(4,4)=(1/E3refComp(4,4));
E3ref(5,5)=(1/E3refComp(5,5));
E3ref(6,6)=(1/E3refComp(6,6));

disp(E1ref);
disp(E2ref);
disp(E3ref);

Tbetaneg=(1/Tbetaref)+((k/DeltaHbeta)*(log(fref/f)));
Tbeta=Tbetaneg^(-1);
Tglass=(Tglassref)+((((-1)*c2ref)*(log10(fref/f)))/((c1ref)+(log10(fref/f))));
Tflow=(Tflowref)*(1+((0.01)*(log10(f/fref))));

m=;
P=;

```

```
E1=(E1ref)*(exp(-m*P))*(1+(s*log10(f/fref)));
E2=(E2ref)*(exp(-m*P))*(1+(s*log10(f/fref)));
E3=(E3ref)*(exp(-m*P))*(1+(s*log10(f/fref)));

fprintf('Tbeta= %g\n', Tbeta);
fprintf('Tglass= %g\n', Tglass);
fprintf('Tflow= %g\n', Tflow);
disp(E1);
disp(E2);
disp(E3);

j=410;
E ={};
R1 ={};
R2 ={};
R3 ={};
for T = 200:5:j
   storage =((E1-E2)*(exp((-1)*(((T)/(Tbeta)).^m1))))+(((E2-E3))*(exp((-1)*
   E = [E; storage];           (((T)/(Tglass)).^m2))))+((E3)*(exp((-1)*(((T)/(Tflow))
   R1 = [R1; storage(1,1)];
   R2 = [R2; storage(2,2)];
   R3 = [R3; storage(3,3)];
end

T=200:5:j;

figure
plot(T,log10((cell2mat(R1)*1000000)),'LineWidth',3);
hold on
plot(T,log10((cell2mat(R2)*1000000)),'LineWidth',3);
hold on
plot(T,log10((cell2mat(R3)*1000000)),'LineWidth',3);
xlabel('Sicaklik (K)')
ylabel('log(depolama modulu (Pa))')
set(gca, 'FontSize', 14)
```

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. K. Ongider, A. Acar, "Modeling of Temperature Dependent Anisotropic Elastic Behavior of Polymers Produced by Fused Deposition Modeling (FDM) Method", 3th International Congress of Engineering and Natural Sciences Studies Abstracts Booklet, ss 32, 2023, ISBN: 978-625-6488-02-1