

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ERİMİŞ FİLAMANT FABRİKASYONU SÜREÇ PARAMETRELERİNİN,
ÜRETİLEN LATİS YAPILARIN ETKİN ELASTİK MALZEME
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Satı Cansın ERSOY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN

NİSAN 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ERİMİŞ FİLAMANT FABRİKASYONU SÜREÇ PARAMETRELERİNİN, ÜRETİLEN LATİS YAPILARIN ETKİN ELASTİK MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Satı Cansın ERSOY

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN

Tarih: Nisan 2021

Eklemeli İmalat Teknolojisi, ilk ortaya çıktığı zaman hızlı prototipleme için kullanılmış olsa da günümüzde özellikle havacılık-uzay ve savunma sanayinde, otomotivde, medikalde ve enerji sektöründe sıklıkla başvurulan bir yöntem dönüşmüştür. Özellikle latis yapılar gibi boşluklu yapıları sayesinde hafiflik sağlayan karmaşık yapıların katman katman üretilebilmesi, latis yapıların bu üretim teknikleri ile üretilebilirliği ve endüstride kullanılabilirliği üzerine yapılan araştırmaları artırmıştır. Birçok farklı eklemeli imalat tekniği bulunmakla birlikte, erimiş filament fabrikasyonu (EFF) tekniği düşük maliyetli olmasından dolayı yaygın olarak tercih edilmektedir. Fakat, EFF proses parametrelerinin üretilen parçaların mekanik özelliklerine etkisinin yüksek olduğu bilinmektedir. Literatürde EFF proses parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi üzerine yapılan araştırmaların büyük çoğunluğu tam dolu numuneler üzerinedir. O yüzden, bu çalışmanın amacı, erimiş filament fabrikasyonu (EFF) ile üretilen latis yapıların etkin malzeme özelliklerine

proses parametrelerinin etkisinin incelenmesidir. Bu teknik ile üretilecek numunelerin malzemesi için Polilaktik Asit (PLA) kullanılmıştır. Bu çalışmada üç farklı temel latis yapı türü olan Basit Kübik (BK), Hacim Merkezli Kübik (HMK) ve Yüzey Merkezli Kübik (YMK) seçilmiştir. Elde edilecek numunelerin etkin elastik malzeme özelliklerine en çok etkisi olan ve literatürde yer alan araştırmalarla desteklenen parametreler seçilmiştir. Bu amaçla, EFF için süreç parametreleri olan katman kalınlığı, nozül sıcaklığı ve baskı hızı başlıklarının her biri için üçer seviye belirlenmiştir. Deney tasarımı oluşturulurken Taguchi Metoduna başvurulmuştur. Taguchi metodu ile belirlenen farklı süreç parametre değer grupları için üretilen latis numunelerin basma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden basma modülü ve basma dayanımı sonuçları elde edilmiştir. EFF süreç parametrelerinin bu özelliklere etkilerini kıyaslayabilmek adına, MATLAB programı yardımıyla varyans analizi (analysis of variance - ANOVA) yöntemi kullanılmıştır. Bu kafes yapıların üretiminde en yüksek elastik özelliklere sahip olmaları için gerekli parametre değerleri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, latis yapılarla ilgili çalışmalara ışık tutması ve mühendislik uygulamalarında kullanılan tam dolu yapıların yerini latis yapıların almaya başlaması adına yararlı bir kaynak olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Erimiş Filament Fabrikasyonu, Süreç Parametresi, Latis Yapı, Taguchi Yöntemi

ABSTRACT

Master of Science

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PROCESS PARAMETERS OF FUSED FILAMENT FABRICATION ON THE EFFICIENT ELASTIC MATERIAL PROPERTIES OF THE LATTICE STRUCTURES PRODUCED

Satı Cansın ERSOY

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Asst. Prof. Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN

Date: April 2021

Although Additive Manufacturing Technology was used for rapid prototyping when it first emerged, it has been frequently used in the aviation-space and defense industry, automotive, medical and energy sector today. Especially, due to their hollow structures such as lattice structures, the ability to produce complex structures that provide lightness, layer by layer, it has increased the research on the producibility of lattice structures with these production techniques and their usability in industry. Although there are many different Additive Manufacturing techniques, Fused Filament Fabrication (FFF) technique is widely preferred due to its low cost. However, it is known that FFF process parameters have major effects on the mechanical properties of the produced parts. In the literature, most of the studies on the effects of FFF process parameters on mechanical properties are on fully filled samples. Therefore, the purpose of this study is to examine the effects of process parameters on the effective material properties of lattice structures produced by FFF. Polylactic Acid (PLA) was used for the material of the samples to be produced with this technique. In this study, three different basic lattice structure types, Simple Cubic (SC), Body Centered Cubic (BCC)

and Face Centered Cubic (FCC) were selected. The parameters which have the greatest effect on the effective elastic material properties of the samples are supported by the research in the literature have been selected. For this purpose, three levels were determined for each of the process parameters for FFF, such as layer thickness, nozzle temperature and printing speed. While designing the experiments, Taguchi Method was used. Compression tests of lattice samples produced for different process parameter value groups determined by Taguchi method were performed. Compressive modulus and compression strength results were obtained from these tests. In order to compare the effects of FFF process parameters on these properties, analysis of variance (ANOVA) method was used with the help of MATLAB program. In the production of these lattice structures, the required parameter values have been determined in order to have the highest elastic properties. The findings obtained will be a useful resource to throw light on studies on lattice structures and to start replacing fully filled structures used in engineering applications with lattice structures.

Keywords: Additive Manufacturing, Fused Filament Fabrication, Process Parameters, Lattice Structure, Taguchi Method

TEŞEKKÜR

Öncelikle, çalışmamda ve eğitimime devam ettiğim bu süreçte, gerek yol göstermesiyle gerek yardımlarıyla yadsınamayacak desteği, anlayışı ve emekleri için danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN'a teşekkürü borç bilirim. Öğrenim hayatımda asistanlık görevini yapma şerefine nail olduğum, engin bilgilerinden feyz aldığım ve ufkumu açan hocam Sayın Doç. Dr. Cihan TEKOĞLU'na ve kıymetli yorumları ile bana yol gösteren saygıdeğer hocam Sayın Doç. Dr. Ulaş YAMAN'a en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. ASTOR A.Ş. firmasında çalışmaya başladığım günden bugüne, desteğini ve yardımlarını daimi hissettiğim şefim Gökhan ÖZER'e teşekkürü borç bilirim. Okulda bulunamadığım zamanlarda baskı almama yardımcı olan arkadaşlarım Ali Merih KARADEMİR ve Utku GÜNGÖR'e de emekleri ve uğraşları için teşekkür ederim. Öğrenim hayatım boyunca yardımlarını ve desteklerini asla unutamayacağım hocalarım ve dostlarım Saeid RAHEİMPOUR ve Berk ÇEVİRİM'e ne kadar teşekkür etsem az olacaktır. Manen desteklerini her zaman yanımdalarmışçasına hissettiğim dostlarım Ezgi KARASU ve Murat KAHRAMAN'a, teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın her anında olduğu gibi, her daim sevgisini ve desteğini hissettiğim sevgili eşime, hayat ağacıma, bana ayna olmaktan asla vazgeçmediği için sonsuz minnettarım. Son olarak, kalem tuttuğum ilk günden bugüne kadar yanımda olan, sonsuz motivasyon desteği ve sabır gösteren, benden çok bana inanan ve kanatlarını her zaman üzerimde hissettiren anneme bütün şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xv
SEMBOL LİSTESİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Araştırması.....	4
2. GENEL BİLGİLER VE KAVRAMLAR	35
2.1 Latis Yapı ve Süreç Parametresi Tanımları.....	35
2.2 Deney Tasarımı.....	37
2.3 Sinyal/Gürültü Oranı ve ANOVA Yöntemi.....	42
3. DENEY UYGULANMASI ve HESAPLAMALAR	45
3.1 Kullanılan Kafes Yapı Türleri ve Boyutları.....	45
3.2 EFF Süreç Parametreleri ve Seviyelerinin Belirlenmesi.....	45
3.3 Numunelerin Üretimi.....	47
3.4 Basma Deneyi Sonuçları.....	51
3.5 Kafes Yapıların Basma Testi Davranışlarının İncelenmesi.....	60
3.5.1 BK numuneler için basma testi davranışları.....	61
3.5.2 HMK numuneler için basma testi davranışları.....	64
3.5.3 YMK numuneler için basma testi davranışları.....	67
3.6 S/N Oranı ve ANOVA Sonuçları.....	71
3.6.1 BK numuneler için S/N oranı ve ANOVA sonuçları.....	71
3.6.2 HMK numuneler için S/N oranı ve ANOVA sonuçları.....	75
3.6.3 YMK numuneler için S/N oranı ve ANOVA sonuçları.....	78
3.7 S/N Oranı ve ANOVA Sonuçlarının Genel Değerlendirmesi.....	81
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Numunelerin CAD Çizimleri (a) BK (b) HMK (c) YMK	2
Şekil 1.2 : EFF Şematik Gösterimi	6
Şekil 1.3 : Köpek Kemiği Şeklindeki Numune ve Ölçüleri [4]	8
Şekil 1.4 : Üretilen Numunelerin Doldurma Desenleri [4]	9
Şekil 1.5 : Üretilen Numunelerin Doldurma Desenleri [17]	10
Şekil 1.6 : Numune Ölçüleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Bölgeleri [12]	12
Şekil 1.7 : Çekme Testi için Üretilen Numune (ölçek = 10 mm) [18].....	13
Şekil 1.8 : Sürünme Testi için Üretilen Numune (ölçek = 10 mm) [18].....	13
Şekil 1.9 : Yorulma Testi için Üretilen Numune (ölçek = 20 mm) [18].....	13
Şekil 1.10 : Test Numunelerinin Yığılma Oryantasyonları [5]	14
Şekil 1.11 : Yığılma Oryantasyonlarına göre Numunelerin Görünüşleri [19]	15
Şekil 1.12 : Test Numunelerinin Görünüşleri [20]	16
Şekil 1.13 : Üretilen Numunelerin Doldurma Desenleri [22]	17
Şekil 1.14 : Çekme Testi Numuneleri Baskı Oryantasyonları [23]	18
Şekil 1.15 : Hazırlanan Numunelerin Gerçek Görüntüleri [24].....	19
Şekil 1.16 : Test Numunesi Öncesi ve Sonrası Görselleri [28].....	22
Şekil 1.17 : Test Numunelerinin Baskı Oryantasyonu [29]	23
Şekil 1.18 : Test Numunelerinin Baskı Oryantasyonu [30]	24
Şekil 1.19 : Çift Konsol Kiriş Testi için Numune Örneği [31]	25

Şekil 1.20 : Kompakt Gerilme (KG) ve Tek Kenarlı Çentikli Bükme (TKÇB) Test Numune Geometrileri [32]	26
Şekil 1.21 : Çekme Testi Numuneleri Baskı Oryantasyonları [33].....	27
Şekil 1.22 : Çekme Testi Numuneleri Baskı Oryantasyonları [34].....	28
Şekil 1.23 : Çekme Testi Numuneleri Baskı Oryantasyonları [35].....	30
Şekil 1.24 : BHMK Numune Geometrisi CAD Modeli [7]	31
Şekil 1.25 : Yatay ve Eğimli Dikmelere ait CAD Görselleri [7]	32
Şekil 2.1 : Doğada Kendiliğinden Oluşan Hücresel Yapı Örnekleri [36]	35
Şekil 2.2 : Temel Tip Kafes Yapılardan Oluşturulan Bileşik Kübik Kafesler [8]	36
Şekil 2.3 : Taguchi Ortogonal Dizi Seçilim Tablosu [51].....	40
Şekil 2.4 : ASTM-D1621 Standardına Göre Basma Dayanımı Hesaplama (a) P noktasından önce akma gerçekleşmişse (b) P noktasından önce akma gerçekleşmemişse.....	42
Şekil 3.1 : Numunelerin Baskı Alındıktan Hemen Sonraki Raftlı Görüntüsü	47
Şekil 3.2 : Numunelerin Basma Testine Maruz Bırakılma Halleri	48
Şekil 3.3 : Varsayılan Numunelerin Önden Görünüşleri	49
Şekil 3.4 : Basit Kübik Numunelerin Önden Görünüşleri	49
Şekil 3.5 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerin Önden Görünüşleri	50
Şekil 3.6 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Önden Görünüşleri.....	50
Şekil 3.7 : Varsayılan Parametre Değerleri ile Basma Testi Sonuçları BK, HMK ve YMK.....	51
Şekil 3.8 : Basit Kübik Numunelerin Basma Modülleri	54
Şekil 3.9 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerin Basma Modülleri	55
Şekil 3.10 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Basma Modülleri.....	56
Şekil 3.11 : Basit Kübik Numunelerin Basma Dayanımları	57
Şekil 3.12 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerin Basma Dayanımları	58
Şekil 3.13 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Basma Dayanımları.....	59

Şekil 3.14 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunenin Basma Testi Öncesi Görüntüsü.....	61
Şekil 3.15 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Önden Görüntüsü	62
Şekil 3.16 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Çaprazdan Görüntüsü.....	62
Şekil 3.17 : Tüm Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 1.Basamak Önden Görüntüsü.....	65
Şekil 3.18 : Tüm Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 1.Basamak Çaprazdan Görüntüsü	65
Şekil 3.19 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunenin Basma Testi Öncesi Görüntüsü.....	61
Şekil 3.20 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Önden Görüntüsü.....	65
Şekil 3.21 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Çaprazdan Görüntüsü	66
Şekil 3.22 : Tüm Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 1.Basamak Önden Görüntüsü	65
Şekil 3.23 : Tüm Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 1.Basamak Çaprazdan Görüntüsü.....	65
Şekil 3.24 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunenin Basma Testi Öncesi Görüntüsü.....	61
Şekil 3.25 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Önden Görüntüsü.....	68
Şekil 3.26 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Çaprazdan Görüntüsü	69
Şekil 3.27 : Tüm Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 2.Basamak Önden Görüntüsü	65

Şekil 3.28 : Tüm Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 2.Basamak Çaprazdan Görüntüsü.....	70
Şekil 3.29 : Yüzey Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin 2.Basamak Önden Çaprazdan Görüntüsü.....	70
Şekil 3.30 : Basit Kübik Numunelerin S/N Oranı Sonuçları.....	72
Şekil 3.31 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerin Taguchi Metodu Sonuçları	75
Şekil 3.32 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Taguchi Metodu Sonuçları.....	78



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : Numune Süreç Parametre Değerleri [4].....	9
Çizelge 1.2 : Taguchi L9'a Dayalı Deneysel Plan [17]	10
Çizelge 1.3 : Taguchi L9 Deney Tasarımı [12].....	11
Çizelge 1.4 : Test Matrisi Deneysel Planı [23]	18
Çizelge 1.5 : Oluşturulan Deney Seti [25]	20
Çizelge 16 : Hem XY Hem ZX Yönelimi için Oluşturulan Deney Seti [26]	21
Çizelge 1.7 : Belirlenen Parametrelere göre Oluşturulan Deney Seti [29]	23
Çizelge 1.8 : Çift Konsol Kiriş Testi için Deney Seti [31]	25
Çizelge 1.9 : Taguchi L27 Deney Seti [33].....	27
Çizelge 1.10 : Yorulma Testi için Taguchi L9 Deney Seti [34]	28
Çizelge 1.11 : Yorulma Testi için Taguchi L9 Deney Seti [35]	29
Çizelge 1.12 : Optimum Süreç Parametre Değerleri [35].....	30
Çizelge 1.13 : Bazı Çalışmalara ait Süreç Parametre ve Test Seçimleri.....	31
Çizelge 1.14 : Belirlenen Parametreler ve Seviyeleri [7].....	32
Çizelge 1.15 : Belirlenen Parametreler ve Seviyeleri [7].....	32
Çizelge 2.1 : Taguchi L9 Ortogonal Dizi Dizilimi	40
Çizelge 3.1 : Sabit Tutulan Süreç Parametreleri	46
Çizelge 3.2 : Süreç Parametre Seviyeleri.....	46
Çizelge 3.3 : Varsayılan Numuneye ait Süreç Parametre Değerleri	46

Çizelge 3.4 : Deney Tasarımı.....	47
Çizelge 3.5 : BK Numunelere ait Basma Modülü Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları	54
Çizelge 3.6 : HMK Numunelere ait Basma Modülü Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları	55
Çizelge 3.7 : YMK Numunelere ait Basma Modülü Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları	56
Çizelge 3.8 : BK Numunelere ait Basma Dayanımı Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları	57
Çizelge 3.9 : HMK Numunelere ait Basma Dayanımı Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları.....	58
Çizelge 3.10 : YMK Numunelere ait Basma Dayanımı Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları.....	59
Çizelge 3.11 : Basma Modülü ve Basma Dayanımı Sonuçları Kıyaslaması	60
Çizelge 3.12 : Basit Kübik Numunelerinin Basma Modülü S/N Yanıtları	72
Çizelge 3.13 : Basit Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı S/N Yanıtları	79
Çizelge 3.14 : Basit Kübik Numunelerinin Basma Modülü Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları.....	79
Çizelge 3.15 : Basit Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları	75
Çizelge 3.16 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Modülü S/N Yanıtları	72
Çizelge 3.17 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı S/N Yanıtları	79
Çizelge 3.18 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Modülü Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları	79
Çizelge 3.19 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları.....	78

Çizelge 3.20 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Modülü S/N Yanıtları	72
Çizelge 3.21 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı S/N Yanıtları	79
Çizelge 3.22 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Modülü Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları	80
Çizelge 3.23 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları.....	80
Çizelge 3.24 : Tüm Numunelere ait Doluluk Oranları.....	81
Çizelge 4.1 : BK, HMK ve YMK Numunelerin Basma Modülünde ve Basma Dayanımında Süreç Parametrelerinin Önem Sıralaması.....	85
Çizelge 4.2 : BK Numuneler için Mevcut Parametrelerle Ulaşılabileceği Öngörülen Maksimum Değerler için Seviyelerin Kombinasyonu.....	85
Çizelge 4.3 : HMK Numuneler için Mevcut Parametrelerle Ulaşılabileceği Öngörülen Maksimum Değerler için Seviyelerin Kombinasyonu.....	86
Çizelge 4.4 : YMK Numuneler için Mevcut Parametrelerle Ulaşılabileceği Öngörülen Maksimum Değerler için Seviyelerin Kombinasyonu.....	87
Çizelge 4.5 : Numunelerin En Yüksek ve En düşük Değerleri ile Varsayılan Numunenin Kıyaslaması	87

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
AKT	: Ardışık Kareler Toplamı (Sequential Sums of Squares)
ANOVA	: Varyans Analizi (Analysis of Variance)
ASTM	: American Society for Testing Materials
BH	: Baskı Hızı
BK	: Basit Kübik
DKT	: Düzeltilmiş Kareler Toplamı (Adjusted Sums of Squares)
DOK	: Düzeltilmiş Ortalama Kareler (Adjusted Mean Squares)
EFF	: Erimiş Filament Fabrikasyonu (Fused Filament Fabrication)
EYM	: Ergiterek Yığıma Modelleme (Fused Deposition Modelling)
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
KG	: Kompakt Gerilme
KK	: Katman Kalınlığı
KO	: Katkı Oranı (Contribution)
N	: Gürültü Faktörü (Noise)
NS	: Nozül Sıcaklığı
OD	: Ortogonal Dizi
PC	: Polikarbonat
PCU	: Polikarbonat Üretan
PLA	: Polilaktik Asit
S	: Sinyal Faktörü (Signal)
SD	: Serbestlik Derecesi (Degree of Freedom)
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
S/N	: Sinyal/Gürültü Oranı (Signal/Noise Ratio)
T	: Taguchi
TKÇB	: Tek Kenarlı Çentikli Bükme
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılan semboller aşağıda verilmiştir. İhtiyaç duyulan bilgiler, konu anlatımıyla birlikte verilmiştir.

°	: Derece
°C	: Derece Santigrat
log	: Logaritma
Σ	: Toplam
%	: Yüzde

1. GİRİŞ

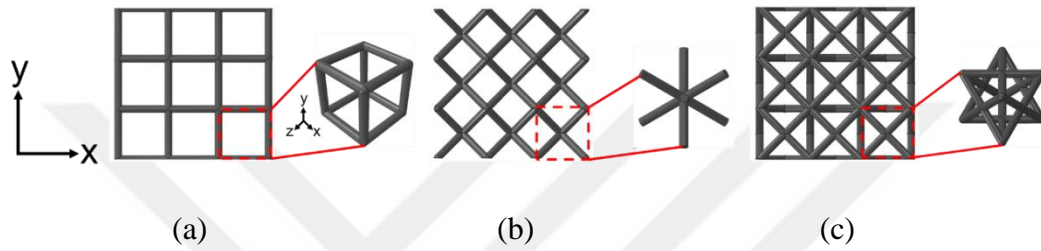
Hızlı prototipleme ve ikincil bir işleme (finishing) gerek duymadan çıkarılan numunelerin hemen her alanda beklentiyi karşılaması, 3 boyutlu (3B) yazıcılar olarak da bilinen eklemeli imalat tekniklerinin yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır. Eklemeli İmalat yöntemlerinden Malzeme Ekstrüzyonu tekniği adıyla da bilinen Erimiş Filament Fabrikasyonu (EFF) günümüzde düşük maliyet ve kolay erişilebilirliğinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. İsteyen herkesin “Do It Yourself” adıyla kendi 3 boyutlu yazıcısını yapabilmesi ve akademik çalışmalar dahil bu yazıcıların kullanılması, yaygınlaştığının en belirgin örneğidir [1].

Kullanım alanı ve istenen performans göz önüne alındığında, EFF ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri büyük önem taşımaktadır. Bununla ilgili olarak yapılan çalışmaların ışığında, birçok tanımlanmış etki parametresinin sürece, makineye, kullanılan malzemeye ve fiziksel olaylara atanabilir olduğu sonucuna varılmıştır [2]. Bu parametrelerin farklı kombinasyonlarıyla birlikte, elde edilen numunelerin çekme dayanımı, akma dayanımı, basma dayanımı, yorulma dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, kayma gerilmesi, darbe dayanımı gibi mekanik özellikleri üzerindeki etkileri hakkında çok sayıda çalışma yapılmıştır [3]. Bu çalışmada, basma dayanımı ve basma modülü verileri incelenmiştir. Daha detaylı bilgilendirme bir sonraki bölümde yapılacaktır.

Literatürde bulunan çalışmalar, genel olarak süreç parametrelerinin içi tamamen dolu basit geometrilerin üretimindeki etkilerini inceleyen çalışmalardır. Dolu numunelerle yapılan çalışmalarda geometri için köpek kemiği (dogbone) çekme numunesi sıklıkla tercih edilmiştir [4], [5], [6].

Eklemeli imalat tekniğinin en önemli avantajı ise latis yapılar gibi karmaşık geometriye sahip ve diğer imalat yöntemleri ile üretimi yapılamayan veya çok zor olan yapıların üretilmesidir. Latis yapılar düğüm, kiriş ve dikmelerden oluşan, belirli düzende kendini tekrarlayan boşluklu yapılardır [7]. Bu yapılar, yapısal

bütünlüğünden ödün verilmeden ağırlığı azaltılırken, aynı zamanda beklenen performansı sağlayacak şekilde farklı türlerde tasarlanabilmektedir. Bu çalışmada, üç farklı latis yapı türü olan; Basit Kübik (BK), Hacim Merkezli Kübik (HMK) ve Yüzey Merkezli Kübik (YMK) seçilmiştir. Bu latis türleri için kullanılan numune modelleri Şekil 1.1’de verilmiştir. Bu üç latis yapı türü, bir kübik hücreyi dolduran farklı latis türlerinin temel bileşenlerini oluşturmaktadır [8]. Bölüm 1.2’de detaylandırılan literatür taramasında bu latis yapı türlerinin malzeme özelliklerine EFF süreç parametrelerinin etkisini inceleyen çalışma bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu sebeplerden dolayı, bu tez çalışmasında, bu üç latis yapı türü kullanılmıştır.



Şekil 1.1 : Numunelerin CAD Çizimleri (a) BK (b) HMK (c) YMK

Latis numunelerin etkin elastik malzeme özelliklerine etki edebilecek süreç parametreleri seçilmiştir. Bunun için EFF süreç parametrelerine bakıldığında, bunlardan bazıları; tabaka kalınlığı/yüksekliği, nozül çapı, biriktirme hızı, dolgu yüzdesi, yığma oryantasyonu, nozül sıcaklığı, raster açısı, akış hızı ve hava boşluğudur [3]. Deney tasarımı gerçekleştirilirken, Bölüm 1.2’de detaylandırılan literatür taraması neticesinde, en çok kullanılan süreç parametrelerinden katman kalınlığı, nozül sıcaklığı ve baskı hızı seçilerek, bu parametrelere ait üçer seviyeli set oluşturulmuştur. Bunun için seçilen deney tasarımı yöntemi Taguchi Metodu’dur. Özellikle EFF uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan Taguchi Metodu, süreç parametrelerinin etkilerini daha kısa sürede ve daha az sayıda deneyle elde edilebilmek için başvurulan yöntemdir. Önceki yapılan çalışmalara bakıldığında bunu gözlemlemek mümkündür [9]. İlerleyen sayfalarda yer alan Bölüm 1.2 Literatür Araştırması kısmında daha detaylı örnekleme yapılacaktır.

Taguchi metodu ile belirlenen farklı süreç parametre grupları için kafes yapı numuneleri EFF tekniği ile üretilmiştir. Üretilen numunelere basma testleri uygulanarak basma modülü ve basma dayanımı değerleri etkin malzeme özellikleri olarak elde edilmiştir. Basma deneyleri sonucu ASTM 1621 Standardına [44] göre

ele alınmıştır. Burada yer alan yönetmeliklere göre, basma makinasından alınan değerlerle oluşturulan veriler anlamlı grafiklere dönüştürülmüş, basma modülü ve basma dayanımları her bir numune için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Taguchi Metodu ile oluşturulan süreç parametre değerleri grupları dışında, üç parametrenin de ortanca seviyelerinden oluşan “Varsayılan” ismi verilen bir süreç parametre grubu da deney tasarımına eklenmiştir. Bölüm 2.2 Deney Tasarımı kısmında daha detaylı anlatım yapılacaktır.

Elde edilen verilerin, etkin malzeme özelliklerine etkilerini kıyaslayabilmek adına, bir çok çalışmada da yer alan varyans analizi (analysis of variance – ANOVA) yöntemi kullanılmıştır [10], [11], [12]. Seçilen parametrelerin, elde edilen sonuca etkisini anlamlandırmak ve bu etkinin önem sırasını belirlemek için kullanılmıştır. Birbirine bağımlı olan ve farklı seviyelerde uygulanan süreç parametrelerinin, numunelerin etkin malzeme özellikleri üzerindeki etki önem sıralaması bu yöntem vasıtasıyla yapılmıştır. Bunun için, MATLAB programında oluşturulan kodlama yardımıyla sonuçlar grafiğe dökülüp, anlamlı veriler haline getirilmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Kullanım alanı ve beklentiyi karşılamak söz konusu olduğunda, EFF yöntemi ile diğer imal usüllerinden çok daha hızlı ve kolay sonuç almak mümkündür. Temel prensibi ortaya çıkarılmak istenen parçanın katmanlar halinde oluşturulması ve ek bir işleme (finishing) gerek duyulmaması bu yöntem olan yönetime ve araştırmalara sebep olmuştur. Fakat üretim parametrelerinin değişimi ile numunenin özellikleri üzerinde farklılıkların tespit edilmesi sonucunda, farklı parametre değerlerinin EFF ile üretilen numunelerin malzeme özellikleri üzerine etkisini inceleyen çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Özellikle tam dolu numuneler üzerine pek çok çalışma bulunmaktayken, boşluklu yapısı ile hafiflik kazandıran latis yapılar hakkında çalışmalar sınırlı sayıda bulunmaktadır. Latis yapılar, yapısal bütünlüğünü bozmadan ağırlığı azaltırken, aynı zamanda mekanik davranış anlamında beklentiyi karşılayacak şekilde tasarlanır. Bir çok latis hücre modeli bulunmakla birlikte, temel olarak kabul edilebilecek üç geometri bu çalışmada seçilmiştir.

Bu geometriler için, yapılan araştırmalar sonucu etkin elastik malzeme özelliklerini en çok etkileyen süreç parametreleri seçilmiştir. Literatürde bulunan çoğu süreç parametresi latis yapılar için geçerli değildir. Doluluk oranı, dolgu deseni, hava boşluğu vb. parametreler tam dolu numuneler için uygulanmıştır. Latis yapılar için en uygun parametreler katman kalınlığı, nozül sıcaklığı ve baskı hızı olarak saptanmıştır. Bu üç parametrenin dışında geriye kalan tüm parametreler sabit tutulmuştur.

Taguchi metodu ile süreç parametre değerleri grupları oluşturulmuş ve her bir grup için kafes yapı numuneleri EFF ile üretilmiştir. Elde edilen numuneler basma testine maruz bırakılmıştır ve her deney seti 3 kez tekrar edilmiştir. Bu deney setine ek olarak tüm parametrelerin ortanca seviyeleri seçilerek, ayrı bir numune eklenmiştir. Kontrol amaçlı eklenen bu numune grubunun, oluşturulan setin başarısı ve başarısızlığı arasında nerede kaldığı saptanmıştır.

Bu tez çalışmasındaki amaç, süreç parametrelerinin EFF tekniği ile üretilen latis yapıların mekanik davranışlarına etkisini deneysel olarak incelemektir. Basma deneylerinden elde edilen etkin malzeme özellikleri kullanılarak, MATLAB programında ANOVA yöntemi kullanılarak çıkarılan etki grafikleri ile, seçilen parametrelerin baskı sonucu alınan numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etki oranlarını öğrenmek hedeflenmiştir.

İleride yapılacak latis yapılarla ilgili çalışmalara ışık tutması ve mühendislik uygulamalarında kullanılan tam dolu yapıların yerini latis yapıların almaya başlaması adına yararlı bir kaynak olabilmesi de hedefler arasındadır.

1.2 Literatür Araştırması

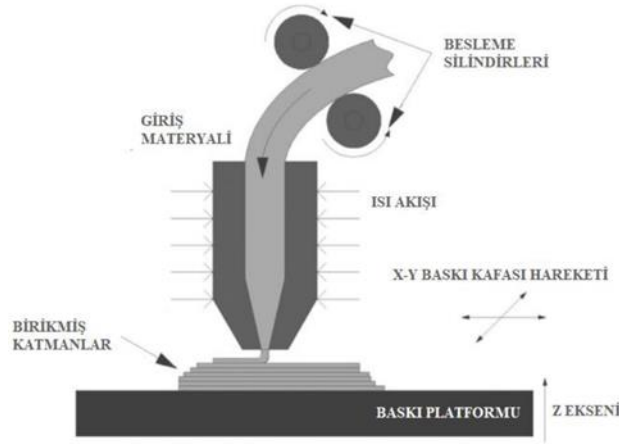
Eklemeli İmalat Yöntemleri, bir tasarımın ilk örneğini (prototip) çıkarmak adına kullanılan bir yöntem olarak 1980'li yıllarda ortaya çıkmıştır [12]. Elde edilmek istenen üç boyutlu geometrinin, bilgisayar ortamında CAD modelini sahip olduğu verilerden oluşturularak, katmanlara bölünmesini (slicing) sağlayan ara basamak program vasıtasıyla, katman üzerine katmanlar ekleyerek birleştiren imal usulüdür. Yaygın olarak kullanılan bazı eklemeli imalat yöntemlerine örnek olarak Seçmeli Lazer Ergitme (SLE), Sterolitografi (SLA), Elektronik Işını Ergitme (EIE), Seçmeli

Lazer Sinterleme (SLS), Laminalı Nesne İmalatı (LNİ) ve malzeme ekstrüzyonu yöntemleri verilebilir [13], [14], [15]. Bu yöntemler, oluşturulmak istenen parçanın doğrudan oluşturulması adına hem zamanı kısaltmış hem de maliyetten tasarruf edilmesine olanak sağlamıştır.

Malzeme ekstrüzyonu yöntemi ilk olarak Eriyik Yığıma ile Modelleme (EYM) (Fused Deposition Modelling – FDM) adıyla 1988 yılında, Stratasys Ltd.’nin kurucu ortaklarından olan S. Scott Crump’ın kızı için oyuncak kurbağa yapmanın daha basit bir yolunu ararken, sıcak bir tutkal tabancası kullanarak plastiği eritip ince tabakalar halinde dökmesiyle ortaya çıkmıştır. Kurucu ortaklardan biri olan eşi Lisa Crump ile EYM teknolojisini icat etmiş ve 1989 yılında patentini almıştır. Stratasys Ltd.’e ait bu patentin 2009 yılında süresi dolmak üzereyken, benzer teknoloji için yeni bir isim bulunması gerekmiştir. Bu sayede tüm üreticiler patent süresi dolmadan ve telif haklarını ihlal etmeden kullanabilmeyi ve hakkında konuşabilmeyi hedeflemişlerdir. Bunun üzerine Erimiş Filament Fabrikasyonu (EFF) (Fused Filament Fabrication – FFF) ismi uygun bulunmuştur. Stratasys Ltd.’nin EYM teknolojisi için patentlerinin süresi dolduktan sonra, diğer üreticiler tarafından yapılan kaliteli ve aynı mantıkla çalışan yazıcılar sayesinde 3 boyutlu yazıcılar yaygınlaşmıştır. Bu şekilde, “EYM” ve “EFF” terimleri temel olarak aynı anlama gelmiştir. Bu çalışmada, literatürde genel olarak tercih edilen ve bu çalışmada “EFF” olarak kısaltılan Erimiş Filament Fabrikasyonu olarak kullanılmıştır.

EFF tekniği, filament halindeki malzemenin, yarı ergimiş halde üst üste biriktirilmesi ile ürün oluşturmayı sağlayan eklemeli imalat tekniğidir. Filament (giriş materyali), zıt yönlerde çalışan besleme silindirlere yardımıyla, dışarıdan ısıtılan bir nozüle doğru itilerek, baskı platformu üzerinde kısmen oluşturulmuş parça üzerine yerleştirilir [6]. Kullanılan malzeme yarı eriyik halde, belirlenen yönde bırakıldığı için, halihazırda döşenmiş olan malzeme ile birleşir. Mevcut katmanda izleyeceği rotayı tamamlayan nozül, yeni bir katman için başlangıç noktasına dönerek kaldığı yerden devam eder. Bu rota ve döngü ise, geometrinin bilgisayar ortamında hazırlanmış çiziminin, bir ara program kullanılarak, dilimlere bölünmesi ile elde edilen bir geometrik kod (g-code) ile tanımlanır. Bu kod, tüm katmanların oluşumu için belirli koordinatları işaret eder ve yazıcının nozülü bu yolu takip eder. Nozül, her bir katman için izleyeceği döngüyü

tamamlar ve parça oluşturulana kadar bu süreç işler. EFF tekniği ile ilgili şematik gösterim Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2 : EFF Şematik Gösterimi [16]

EFF, 25 yılı aşkın bir zamandır araştırmalara konu olmuştur [3]. Bu çalışmaların başında, süreç parametrelerinin farklı seviyelerinin üretilen numunelerin geometrik ve malzeme özellikleri üzerine etkilerini görmek gelmektedir. Bununla ilgili olarak yapılan çalışmalara bakıldığında ise sıkça karşılaşılan süreç parametrelerinden bazıları şunlardır : Yığılma oryantasyonu, nozül sıcaklığı, katman yüksekliği, dolgu yüzdesi, dolgu deseni, baskı hızı, tabla (baskı platformu) sıcaklığı ve fan hızı. Bu parametrelerin açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

- Yığılma oryantasyonu, numune baskısı yönünün x, y veya z eksenine doğrultusunda olmasıdır. Bununla birlikte uygulanacak test için numunenin göstereceği davranışın değiştiği ilerleyen bölümlerde detaylandırılacaktır.
- Nozül sıcaklığı, numunenin hammaddesi olan filamentin bırakıldığı sıcaklığı etkilemektedir. Bu da filamentin bir alt tabakaya yapışma miktarını ve birleşmesini etkilemektedir.
- Katman yüksekliği, oluşturulacak parçanın, her bir katmanına yığılma için bırakılacak ergiyik haldeki filamentin boyutsal ölçüsüdür. Dilimlere bölünen parçanın üst üste eklenecek tabaka sayısını değiştirmektedir.

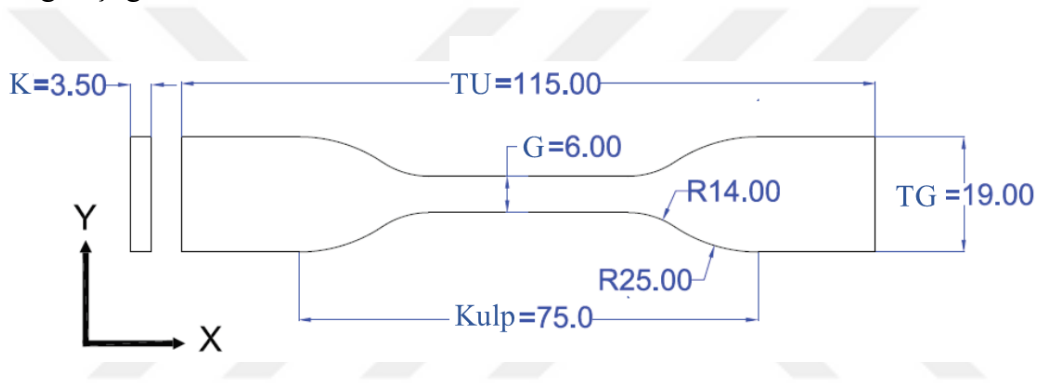
- Dolgu yüzdesi, parçanın iç kısmının doluluk oranıdır. Tam dolu veya daha az yüzdelerde doluluk parçaya ait bilhassa mekanik özellikleri farklı skalalara taşımaktadır.
- Dolgu deseni, örneklerin iç yapısını oluşturan örüntülerden oluşmaktadır. Numunelerin oluşturulurken, filamentin bırakan kafanın izlediği aynı yolların oluşturduğu desenlerdir.
- Baskı hızı, ergiyik haldeki filamentin bırakılma hızıdır. Bu hızın optimum olacak şekilde ayarlanamaması ipliksi ve ağsı yapılar oluşmasına veya filamentin tam nüfuz edememesine sebep olabilmektedir.
- Tabla sıcaklığı, özellikle ilk katmanların basılmasında tam yapışma sağlanması için büyük önem taşımaktadır. Üzerine baskı yapılan tablanın mevcut sıcaklığı, üst katmanlara da sirayet edecek hatayı önleyebilmektedir.
- Fan hızı, bırakılan filamentin soğutulması için hayati önem taşımaktadır. Yüksek sıcaklıkta bırakılan filament, bırakıldıktan sonra soğutulmuş bir sonraki katmanda üzerine eklenecek malzeme için hazır hale gelmektedir.

Literatürde çoğunlukla, bu süreç parametreleriyle alakalı olarak numunelere ait geometrik ve malzeme özellikleri üzerine etkilerini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Kullanılan geometriler, uygulanan testler ve seçilen parametreler çeşitlilik göstermektedir. Deney setleri oluşturulurken sabit tutulan parametreler ve seviyeli olarak artıp azalan parametrelerin birbiriyle eş zamanlı değişmesi de farklılık yaratan bir diğer maddedir. Baskı alınırken, oluşturulan bu deney setleri ile, birbirini etkileyen veya birbirinden bağımsız olarak seçilen değişkenlerin elde edilen veriler üzerindeki tesirleri de başkılık göstermiştir. Yapılan yazın araştırmaları doğrultusunda bunlara aşağıda yer verilmiştir.

Alafaghani vd. [4] köpek kemiği (dogbone) şeklindeki numunelerin mekanik özellikleri ve boyutsal hassasiyetleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi uygulamışlardır. Kaydedilen veriler doğrultusunda numunelerin Young modülünü, %0,1 akma dayanımını, maksimum çekme dayanımını ve sünekliğini hesaplamışlardır. Süreç parametrelerinin boyutsal doğruluk ve tekrarlanabilirlik üzerindeki etkilerini değerlendirmek için basılan tüm numuneler mikrometre ile ölçülüp CAD model ile kıyaslanmıştır. Taramalı Elektron

Mikroskobu ile numunelerin görüntülerini incelemiş ve görünür yoğunlukları kullanarak Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yaklaşımı kurmuşlardır. Tüm süreç parametrelerinin referans değerleri ile oluşturulan 3 numaralı numune, diğer numunelerin sonuçlarını karşılaştırmak için ve bunun yanı sıra Sonlu Elemanlar Analizi'nde referans veri olarak kullanılmıştır. Her numune için elde edilen boyutsal hassasiyet ve mekanik özelliklerde tekrarlanabilirlik etkisini araştırmak adına üçer numune basılmıştır. Tüm deney seti PLA filament kullanılarak oluşturulmuş ve orijinal PLA filamentin mekanik özellikleri de çekme testi uygulanarak ölçülmüştür.

Geometri olarak seçtikleri köpek kemiği numunesine ait CAD modeli ve ölçüleri Şekil 1.3'te verilmiştir. Burada, K kalınlığı, TU tüm uzunluğu, G genişliği ve TG toplam genişliği ifade etmektedir.



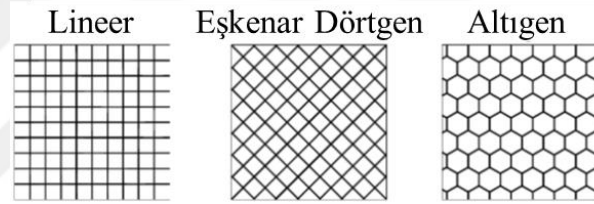
Şekil 1.3: Köpek Kemiği Şeklindeki Numune ve Ölçüleri [4]

Bu çalışmada altı farklı süreç parametresini ele almışlardır. Bu süreç parametreleri; yığılma oryantasyonu (x, y ve z doğrultusunda), doluluk oranı (%20, %50, %80 ve %100), baskı hızı (70 mm/s, 90 mm/s, 120 mm/s ve 170 mm/s), nozül sıcaklığı (175°C, 180°C, 185°C ve 205°C) katman yüksekliği (0,10 mm, 0,25 mm, 0,3 mm ve 0,4 mm) ve doldurma deseni (linear, eşkenar dörtgen ve altıgen) olarak belirlenmiştir. Doldurma desenlerine ait görüntü Şekil 1.1'te verilmiştir.

Her bir sette sadece tek bir parametreyi değiştirerek, o parametrenin parçanın son halindeki mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Burada şuna dikkat edilmelidir ki, tüm süreç parametrelerinin birbirinden bağımsız etkileri incelenmiştir. Oluşturulan deney seti Çizelge 1.1'de verilmiştir. Kırmızı çerçeve ile gösterilen değerler, o numunede yapılan değişikliği göstermektedir. Diğer sütunlarda yer alan tüm değişkenler görülebileceği üzere sabit tutulmuştur.

Çizelge 1.1 : Numune Süreç Parametre Değerleri [4]

Numune No	Yığıma Yöntü	Doluluk Oranı	Baskı Hızı	Nozül Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Doldurma Deseni
1	X	100	90 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
2	Y	100	90 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
3	Z	100	90 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
4	Z	20	90 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
5	Z	50	90 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
6	Z	80	90 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
7	Z	100	170 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
8	Z	100	120 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
9	Z	100	70 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
10	Z	100	90 mm/s	175 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
11	Z	100	90 mm/s	180 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
12	Z	100	90 mm/s	205 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
13	Z	100	90 mm/s	185 C°	0.40 mm	Eşkenar Dörtgen
14	Z	100	90 mm/s	185 C°	0.25 mm	Eşkenar Dörtgen
15	Z	100	90 mm/s	185 C°	0.10 mm	Eşkenar Dörtgen
16	Z	100	90 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen
17	Z	100	90 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen Lineer
18	Z	100	90 mm/s	185 C°	0.30 mm	Eşkenar Dörtgen Lineer Altgen



Şekil 1.4 : Üretilen Numunelerin Doldurma Desenleri [4]

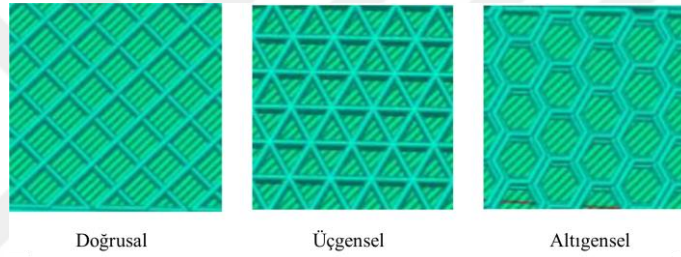
Çıkan sonuçlara göre, boyutsal doğruluğun yığıma yönü, nozül sıcaklığı ve katman yüksekliği değişikliklerinden diğer parametrelerden daha fazla etkilendiğini belirlemişlerdir. Mekanik özelliklerin ise yine yığıma yönü, nozül sıcaklığı ve katman yüksekliğinden daha fazla etkilendiği gözlemlenmiştir.

Yine Alafaghani vd. [17]'ne ait başka bir çalışmada ise, dört farklı süreç parametresinin köpek kemiği şeklindeki numunelerin mekanik özellikleri ve boyutsal hassasiyetleri üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir, bu çalışmanın farkı ise süreç parametrelerinin diziliminin Taguchi Metodu ile oluşturulmasıdır. Bu sayede, belirlenen süreç parametrelerinin birbirleriyle etkileşimli olarak elde edilen sonuçları kıyaslanmıştır. Burada seçilen süreç parametreleri, dolgu yüzdesi, dolgu deseni, katman kalınlığı ve nozül sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Her bir parametre için üçer seviye seçilmiş ve her bir numune için üçer kere baskı alınmıştır. Tüm deney seti PLA filament kullanılarak oluşturulmuştur ve deney seti Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.2 : Taguchi L9'a Dayalı Deneysel Plan [17]

Numune Numarası	Nozül Sıcaklığı (°C)	Katman Kalınlığı (mm)	Dolgu Deseni	Dolgu Yüzdesi (%)	Numune Tekrar Sayısı
1	190	0.20000	Doğrusal	20	3
2	190	0.30000	Üçgensel	60	3
3	190	0.40000	Altıgensel	100	3
4	200	0.20000	Üçgensel	100	3
5	200	0.30000	Altıgensel	20	3
6	200	0.40000	Doğrusal	60	3
7	210	0.20000	Altıgensel	60	3
8	210	0.30000	Doğrusal	100	3
9	210	0.40000	Üçgensel	20	3

Çizelgede belirtilen numunelerin dolgu desenlerine ait şematik gösterimine Şekil 1.5'te yer verilmiştir.



Şekil 1.5 : Üretilen Numunelerin Doldurma Desenleri [17]

Çekme testi uygulanan numunelerin Young modülünü, %0,1 akma dayanımını, maksimum çekme dayanımını ve sünekliğini hesaplamışlardır. Hesaplanan gerilme ve diğer mekanik özellikler, her numunenin gerçek boyutlarına göre yapılmıştır. Numunelere çekme testi yapılmadan önce boyutsal doğruluğu için CAD model ile karşılaştırılmıştır. Daha iyi boyutsal doğruluk için, daha düşük nozül sıcaklığı (190°C), daha düşük katman kalınlığı (0,2 mm), daha düşük dolgu yüzdesi (%20) ve altıgen dolgu deseni gerektiğini bulmuşlardır. Tüm boyutların eşzamanlı olarak iyileştirilmesi için ortak bir süreç parametresi bulunmamakla beraber, bir önceki cümlede verilen değerlerin en düşük hata toplamını vereceğini bulmuşlardır. Mekanik özellikleri için ise, daha yüksek nozül sıcaklığıyla daha yüksek rijitliğe, mukavemete ve sünekliğe sahip parçalar oluşturulduğu gözlemlenmiştir. Altıgensel dolgu deseninin, en yüksek rijitliğe ve mukavemete ancak en düşük sünekliğe sebebiyet verdiğini saptamışlardır. Dolgu yüzdesi ile numunelerin rijitliği ve

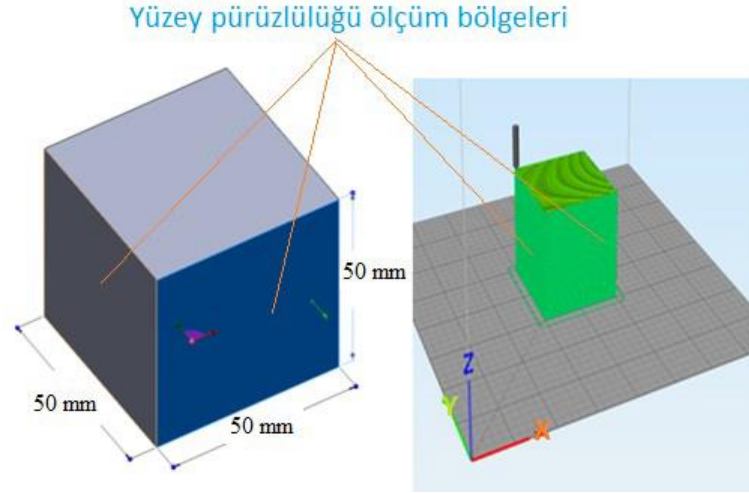
mukavemetinin paralel arttığını tespit etmişlerdir. Sünekliğin ise dolgu yüzdesinden hemen hiç etkilenmediğini bulmuşlardır. EFF süreç parametrelerinin değerlerini ayarlarken hem mekanik özelliklerini maksimize edip hem de boyutsal hataları minimize etmenin mümkün olmadığını keşfetmişlerdir. Mukavemeti ve Young modülünü maksimize edecek parametre değerlerinin 210°C nozül sıcaklığı, 0,3 mm katman kalınlığı, üçgensel dolgu deseni ve %100 dolgu yüzdesi olması gerektiği çıkarımında bulunmuşlardır. Diğer taraftan boyutsal hataları minimize etmek için ise, seçilmesi gereken süreç parametrelerinin 190°C nozül sıcaklığı, 0,2 mm katman kalınlığı, altıgensel dolgu deseni ve %20 dolgu yüzdesi olması gerektiği önceden bahsedilmiştir. Bu sebeple, çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirmek için boyutsal doğruluktan veya mekanik özelliklerden ödün vermek gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Bir başka çalışma olan Kartal [12] ise üç farklı süreç parametresiyle Taguchi Metodu ile oluşturduğu setin sonucunda üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğünün değişimini incelemiştir. Kullanılan parametreler tabla sıcaklığı, nozül sıcaklığı ve katman yüksekliği olarak belirlenmiş olup her biri için üçer seviye seçilmiştir. Üç parametre ve bunların üçer seviyeleri için oluşturulan Taguchi L9 deney tasarımı Çizelge 1.3'te verilmiştir.

Çizelge 1.3 : Taguchi L9 Deney Tasarımı [12]

Deney no	Tabla sıcaklığı (C°)	Nozul sıcaklığı (C°)	Katman yüksekliği (µm)
1	40	210	150
2	40	220	200
3	40	230	250
4	50	210	200
5	50	220	250
6	50	230	150
7	60	210	250
8	60	220	150
9	60	230	200

Baskı alınacak numuneler için malzeme olarak PLA tercih edilmiştir. Numune geometrisi için 50x50x50 mm ölçülerine sahip küp kullanılmıştır. Basılan küplerin dört farklı yanal yüzünden yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Bunun sebebi, alt yüzeyin tablaya teması olduğu için pürüzsüz olması ve üst yüzeyin ölçüm yapılamayacak kadar pürüzlü olmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm yerleriyle ilgili görsele Şekil 1.6'da yer verilmiştir.



Şekil 1.6 : Numune Ölçüleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Bölgeleri [12]

Elde edilen veriler sonucunda, boyutsal doğruluğu ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için uygulanacak parametre seviyeleri; tabla sıcaklığı 50°C, nozül sıcaklığı 230°C ve katman yüksekliği 200 µm olarak belirlenmiştir. Parametrelerden, boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğüne en çok etki edeninin nozül sıcaklığı olduğu, ikinci sırada katman yüksekliğinin takip ettiği ve en az etkili olanın tabla sıcaklığı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

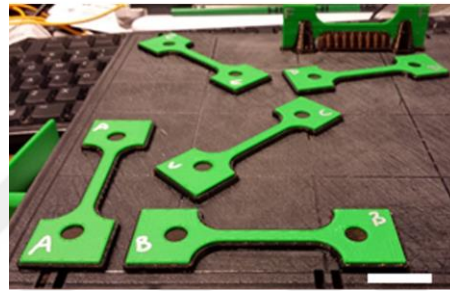
Benzer şekilde, ABS malzeme ile baskı alınan numunelerde yığılma oryantasyonunun mekanik özelliğe etkilerini Zhang vd. [18] çekme, sürünme ve yorulma testlerini uygulayarak test etmişlerdir. Bunun için üç farklı geometride test numunesi hazırlamışlardır. Yığılma oryantasyonu dışındaki geri kalan parametreler sabit tutulmuştur. Nozül sıcaklığı 220-230°C arasında, baskı hızı 30 mm/s, katman yüksekliği 0.1 mm ve dolgu yüzdesi %100 olacak şekilde ayarlama yapılmıştır. Tek değişkenler yığılma oryantasyonu (çekme ve sürünme testleri için) ve yükleme (yorulma testi için) olarak belirlenmiştir.

Çekme testi için üretilen numuneye ait görsele Şekil 1.7'de yer verilmiştir. Yığılma oryantasyonunun etkisini görebilmek için x-y düzleminde 0°, 45° ve 90°'lik açılar seçilmiştir. 0° x eksenini boyunca basılan örneği belirtirken, 90° y eksenini boyunca basılan örneği belirtmektedir. 45° ise x eksenini ile y eksenini arasına yerleştirilmiş örneği temsil etmektedir. Her yığılma oryantasyonu için üçer numune test edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına dayanarak Young modülü ve kopma dayanımları hesaplanmıştır.



Şekil 1.7 : Çekme Testi için Üretilen Numune (ölçek = 10 mm) [18]

Sürünme testi için, çekme testine benzer şekilde, ABS numunelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak için x-y düzleminde üç baskı oryantasyonu olan 0° , 45° ve 90° seçilmiştir. Sürünme testi için oluşturulan numune Şekil 1.8’de verilmiştir. Uzama-zaman grafiğine bağlı olarak sünme direnci hesapları yapılmıştır.



Şekil 1.8 : Sürünme Testi için Üretilen Numune (ölçek = 10 mm) [18]

Yorulma testi için, yükleme test parçasının üzerine ağırlık konarak uygulanmıştır. Yükleme 30N, 40N, 50N ve 60N olarak ayarlanmıştır. Numuneye ait görsel Şekil 1.9’da verilmiştir. Asılı ağırlığın hareket etmediği ancak numunenin döndürüldüğü deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu sayede, numune simetrik çevrimsel eğilme gerilimine maruz bırakılmıştır. Numunenin yorulması kırıldığı zaman makinadaki ani yük değişimi ile durmuş ve çevrim sayısı kaydedilmiştir.

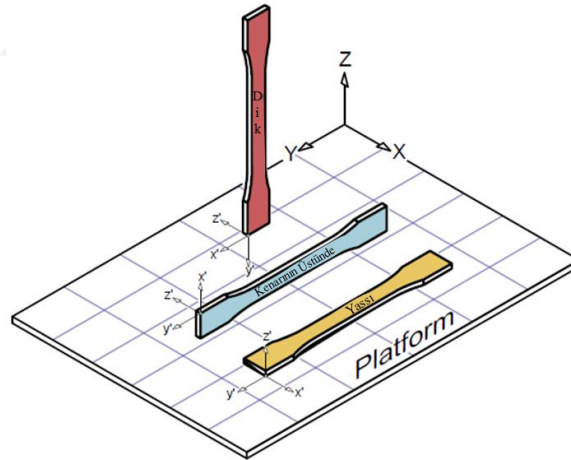


Şekil 1.9 : Yorulma Testi için Üretilen Numune (ölçek = 20 mm) [18]

ABS kullanarak basılan 0° , 45° ve 90° ’lik yığılma oryantasyonları ile hazırlanan numunelerin çekme, sürünme ve yorulma testlerinin sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır: Yorulma testinden elde edilen veriler sonucunda 30N yük altındayken elde edilen çevrim sayısının 3796 döngü, 60N yük altındayken 128 döngü olduğuna ulaşılmıştır. Çekme testi sonucunda, 0° oryantasyon en yüksek Young modülü ve

kopma dayanımına sahip numune olmuştur. Sürünme testi sonucunda, 90° oryantasyon en iyi sünme direnci özelliğini sağlamaktadır. Sonuç olarak, sürünme testi numunelerinin yığma oryantasyonuna duyarlılığı, çekme testi numunelerinden daha fazla olduğu elde edilen verilerle ortaya konulmuştur.

Yine köpek kemiği numune kullanan Chacón vd. [5] süreç parametrelerinden yığma oryantasyonunun, katman kalınlığının ve ilerleme hızının, numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini çekme ve üç nokta eğme testi ile gözlemlemişlerdir. Seçilen süreç parametrelerine ait seviyeler şu şekildedir: yığma oryantasyonu için üç seviye (yassı, kenarının üstünde ve dik), katman kalınlığı için dört seviye (0,06 mm, 0,12 mm, 0,18 mm ve 0,24 mm) ve ilerleme hızı için üç seviye (20 mm/s, 50 mm/s ve 80 mm/s). Numunelere ait yığma oryantasyonuna ait görsele Şekil 1.10'da yer verilmiştir. Tüm parametrelerin tüm setlerine ait kombinasyon için test yapmışlardır, bu da çekme için 36 adet ve eğme testi için 36 adet numune kullandıklarını göstermektedir. Her bir numune seti 5 kez tekrar edildiği için toplam 360 adet numune ile çalışmışlardır. Nozül sıcaklığı sabit ve 210°C olarak belirlenmiştir ve tüm deney seti PLA malzemeden basılmıştır.



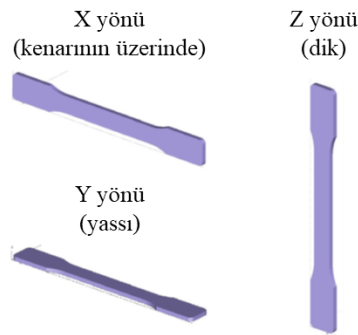
Şekil 1.10 : Test Numunelerinin Yığma Oryantasyonları [5]

ASTM standartlarına göre yapılan çekme ve üç nokta eğme testi sonuçlarına göre bazı çıkarımlarda bulunmuşlardır. Yığma oryantasyonunun dik basılan numunelerde gevrek kırılma davranışına ve kenarının üstünde ve yassı numunelerde sünek kırılma davranışına sebebiyet verdiğini vurgulamışlardır. Kenarının üstünde numunelerin en

iyi eğilme performansına sahip olduğunu, mukavemet ve süneklik açısından da optimum mekanik performansı gösterdiği sonucuna varmışlardır. Katman kalınlığının, yığılma oryantasyonunun bir fonksiyonu olarak, baskı alınan numunelerin çekme testi ve üç nokta eğme testleri sonucu elde edilen gerilme ve eğilme mukavemetleri üzerinde farklı etkileri olmuştur. Dik basılan numunelerde, katman kalınlığı arttıkça çekme ve eğilme mukavemetlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Katman kalınlığı arttıkça sünekliğin azaldığını belirlemişlerdir.

İlerleme hızının artması dik numunelerde çekme ve eğilme mukavemetlerinin azalmasına yol açmıştır. Kenarının üstünde ve yassı numuneler için daha az önem arz ettiğini saptamışlardır. Katman kalınlığında olduğu gibi, ilerleme hızı arttıkça sünekliğin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır.

Yığılma oryantasyonunu gözlemlemek için Fischer vd. [19] ise, Ultem 9085 ismi verilen mukavemet/ağırlık oranı yüksek olan, temel olarak havacılık endüstrisinde kullanılan malzeme ile köpek kemiği geometrisinde ve üç farklı yönde baskı alarak statik ve dinamik testler ile yorulma davranışını incelemişlerdir. Numunelere ait yığılma oryantasyonuna Şekil 1.11’de yer verilmiştir. Her bir yığılma yönü için beş adet numune baskısı alınmıştır. Statik ve dinamik testlere maruz bırakılan numunelerin hepsi Ultem 9085 malzemesi kullanılarak oluşturulmuştur. Diğer parametreler sabit ve aynı tutulmuştur.

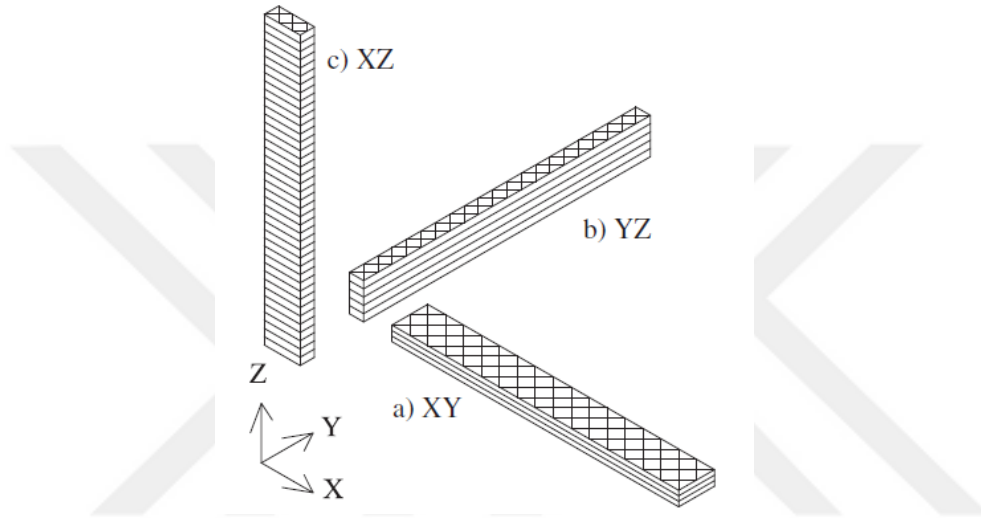


Şekil 1.11 : Yığılma Oryantasyonlarına göre Numunelerin Görünüşleri [19]

Statik test sonuçlarına dayanarak çekme mukavemetleri ve kopma uzamaları hesaplanmıştır. Dinamik testle ise titreşimli çekme gerilimi altında kırılma gerçekleşene kadar dayanabildiği çevrim sayısına bakılmıştır. Elde edilen verilerle birlikte X yönünde (kenarının üzerinde) basılan numunelerin daha yüksek çekme

mukavemeti ve kopma uzamasına sahip olduğu, onu Y yönü (yassı) ve ardından Z yönünde (dik) basılan numunelerin takip ettiği görülmüştür. Dinamik test sonuçları da statik test sonuçlarıyla aynı doğrultuda çıkmıştır.

Baskı almak için tercih edilen başka bir malzeme çeşidi olan Polikarbonat (PC) dikdörtgenler prizması şeklindeki parçaların eğilme yorgunluğu (flexural bending) davranışları üzerindeki etkilerine dair Forcada vd. [20] deneysel araştırma yapmışlardır. Baskı alınan test numunelerine ait görsel Şekil 1.12’de verilmiştir.

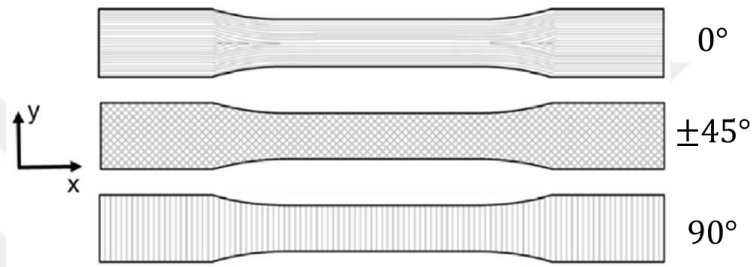


Şekil 1.12 : Test Numunelerinin Görünüşleri [20]

Yapılan yorulma testleri sonucunda, YZ yığılma oryantasyonuna sahip numunenin en uzun ömre sahip olduğunu ve onu XY yığılma oryantasyonuna sahip numunenin takip ettiği sonucuna ulaşmışlardır. Bunun sebebinin, XY ve YZ yönelimlerinde yük kırıe uygulanırken, XZ numunelerinde ara katmanlara uygulandığı için gerçekleştiği çıkarımını yapmışlardır.

Üç boyutlu yazıcı ile elde edilen köpek kemiği numuneleri, biyo uyumluluğu ve yüksek mukavemeti sebebiyle biyomedikal uygulamalarda kullanılan Polikarbonat Üretan (PCU) ile baskı alan Miller vd. [21], bir düzen içerisinde değişen oranlardasert segment eklenmesine bağlı olarak mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada, sert ve yumuşak segment içerikli üç farklı seviye numunenin enjeksiyonla kalıplama ve EFF tekniği ile üretimi sonucu yorulma performansları değerlendirilmiştir. EFF ile üretilen numuneler kısmen uygun baskı

parametrelerine bağılı olarak, monotonik gerilme, basma, kesme ve yorulma değerleri açısından enjeksiyonla kalıplanmış numunelerin performansıyla eşlenik değerler göstermiştir. EFF tekniği ile üretilen parçaların geometrik veya mekanik özelliklerini etkileyebilecek parametrelerin incelemesine yer verilmemiştir. ABS malzeme ile basılan köpek kemiği biçimindeki numuneler üzerinde Koch vd. [22] çekme deneyi ile üç farklı kürecik oryantasyonu ile 0° , $\pm 45^\circ$, 90° açılarını kullanarak baskı almış ve çekme dayanımlarıyla alakalı çıkarım yapmıştır. Kürecik oryantasyonu, X eksenine göre bir katman içindeki ekstrüze edilmiş küreciklerin yönünü belirtmektedir. Basılan test numunelerine ait görsel Şekil 1.13'te verilmiştir.



Şekil 1.13 : Üretilen Numunelerin Doldurma Desenleri [22]

Numunelere uygulanan bir dizi kimyasal işlemden sonra çekme testine maruz bırakılmıştır. Elde edilen verilere göre, kürecik oryantasyonunun EFF tekniği ile üretilen parçaların gerilme mukavemeti üzerinde büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. 0° yönelimli parçaların gerilme dayanımlarının en yüksek değere sahip olduğu, 90° yönelimli parçaların ise en düşük değere sahip olduğu çıkarımında bulunmuşlardır. Bunun en önemli sebebi, uygulanan çekme kuvvetinin 90° yönelimli parçalarda iki kürecik arasındaki arayüze doğrudan uygulanmasıdır. 45° 'den daha fazla sapma açısına sahip numunelerde, uygulanacak çekme kuvveti iki katman arasına etki ettiği için, dayanımlarının daha düşük olacağı çıkarımı yapmışlardır.

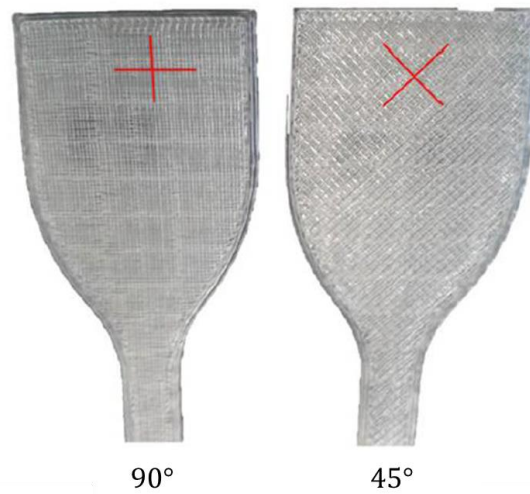
Buna benzer olarak, 45° ve 90° basma oryantasyonu ile tam faktörlü deney tasarımı oluşturan Melenka vd. [23], katman kalınlığı ve doluluk oranını da ikişer seviye olarak belirleyip, köpek kemiği numuneleri üzerinde çekme deneyi yapmışlardır. Bu üç süreç parametresi ile oluşturulan deney setine izelge 1.4'te yer verilmiştir. Burada yer alan 1'den 8'e kadar numune örnekleri  parametreye ait ikişer seviyeden oluşan tüm olasılıkları içermektedir. 9'dan 12'ye kadar olan numune

örnekleri ise dolgu yüzdesi parametresi için sapmaların olup olmadığını değerlendirmek için kullanılan orta noktalardır. Nozül sıcaklığını 230°C , baskı hızını 90 mm/s ve malzemeyi PLA olarak belirlemişlerdir.

Çizelge 1.4 : Test Matrisi Deneysel Planı [23]

Numune Numarası	Tekrar Sayısı	Katman Kalınlığı (mm)	Baskı Oryantasyonu (derece)	Doluluk (%)
1	3	0.10	45	10
2	3	0.10	45	80
3	3	0.10	90	10
4	3	0.10	90	80
5	3	0.25	45	10
6	3	0.25	45	80
7	3	0.25	90	10
8	3	0.25	90	80
9	2	0.10	45	45
10	2	0.10	90	45
11	2	0.25	45	45
12	2	0.25	90	45

Çekme testi numunelerine ait görsel Şekil 1.14'te verilmiştir. Çekme testi sonuçlarına bağlı olarak boylamasına elastisite modül hesabı yapılmıştır. Dolgu yüzdesinin en önemli etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Onu katman yüksekliğinin takip ettiğini ve en az etkiye sahip olan parametrenin baskı oryantasyonu olduğu çıkarımında bulunmuşlardır.



Şekil 1.14 : Çekme Testi Numuneleri Baskı Oryantasyonları [23]

Başka bir çalışma olarak çekme, üç nokta eğme testi ve yorulma testi ile PLA filament kullanarak köpek kemiği numunelerle çalışan Letcher vd. [24], ayrıca kullandıkları filament de çekme testine maruz bırakmışlardır. Yine 0° , 45° ve 90° lik yığıma oryantasyonları kullanılarak hazırlanan numunelerin çekme testi sonuçlarıyla kopma gerilmesi, kopma uzaması ve elastik modül hesapları; üç nokta eğme testi sonuçlarıyla kopma gerilmesi, kopma gerinmesi ve eğme modülü hesapları yapılmıştır. Hazırlanan örneklerin 50 kat büyütülmüş görselleri Şekil 1.15'te verilmiştir. Numuneler PLA malzeme kullanılarak, nozül sıcaklığı 230°C 'de, %100 doluluk oranıyla ve baskı hızı 100 mm/s olacak şekilde hazırlanmıştır. Her bir oryantasyon için beşer numune (çekme testi için ve eğme testi için ayrı ayrı) test edilmiştir.



Şekil 1.15 : Hazırlanan Numunelerin Gerçek Görüntüleri [24]

Çekme testi sonucuna göre, 45° oryantasyona sahip numunelerin daha yüksek kopma dayanıma ve elastisite modülüne sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Üç nokta eğme testi sonucuna göre, 0° oryantasyona sahip numunelerin açık ara daha yüksek kopma gerilimi ve eğme modülü değerlere ulaştığı kaydedilmiştir. Yorulma testi sonuçlarına göre, 90° oryantasyona sahip numunelerin en az dirençli olduğu belirlenmiştir. Yorulma ömürleri 0° ve 45° numuneler için benzer bulunmuştur, ancak 45° numunelerin en yüksek yorulma dayanım sınırına ulaştığı belirtilmiştir.

Bu çalışmaya benzer olarak Farbman vd. [25] farklı dolgu şekilleri ile çekme testi yaptıkları köpek kemiği numunelerin sonlu elemanlar analizini de yaparak karşılaştırmada bulunmuşlardır. Burada parametre olarak seçilen dolgu yüzdesi, dolgu geometrisi ve yığıma oryantasyonu ile oluşturulan deney seti Çizelge 1.5'te verilmiştir. Tüm numuneler PLA malzeme ile üretilmiştir.

Çizelge 1.5 : Oluşturulan Deney Seti [25]

Numune Numarası	Dolgu Yüzdesi (%)	Dolgu Geometrisi	Yığılma Oryantasyonu
1	20	Doğrusal	XY
2	20	Altıgensel	XY
3	20	Doğrusal	XY
4	20	Doğrusal	XY
5	20	Doğrusal	XZ
6	15	Doğrusal	XY
7	15	Altıgensel	XY
8	0	Kabuk	-
9	100	Katı	-
10	15	Altıgensel	XY
11	0	Kabuk	-
12	15	Altıgensel	XY
13	15	Doğrusal	XY

Çekme testi sonuçlarından yola çıkarak, özgül kopma mukavemetinin dolgu yüzdesi azaldıkça azaldığı ve altıgensel dolgu geometrisinin doğrusal dolgu geometrisinden daha güçlü ve sert olduğu çıkarımında bulunmuşlardır. Yapılan sonlu elemanlar analizine göre ise, doğrusal dolgulu numune altıgensel dolgulu numuneden daha az deformasyon göstermiştir. Deneysel verilerle sonlu elemanlar analizi değerlerinin tutarsızlığını, gerilme yığılmasının numunelerin zamanından önce kırılmasına neden oluşuna bağlamışlardır.

ABS kullanılan bir diğer çalışma ise Abbott vd.'ne [26] ait olup; nozül sıcaklığı, baskı hızı, baskı yönü ve katman yüksekliği olarak seçtikleri süreç parametrelerinin tam faktörlü deney tasarımını kullanarak, çekme testi uygulamışlardır. Her bir süreç parametresi için ikişer seviye belirlenmiştir. Baskı yönü olarak seçilen XY ve ZX doğrultuları için iki ayrı tablo oluşturmuşlardır. Diğer üç parametreye ait ikişer seviyeden oluşan tüm seviyelerin kombinasyonlarına göre oluşturulan deney setine Çizelge 1.6'da yer verilmiştir.

Çizelge 1.6 : Hem XY Hem ZX Yönelimi için Oluşturulan Deney Seti [26]

Nozül Sıcaklığı (°C)	Baskı Hızı (mm/s)	Katman Yüksekliği (mm)
230	10	0.1
230	10	0.3
230	50	0.1
230	50	0.3
270	10	0.1
270	10	0.3
270	50	0.1
270	50	0.3

Her iki yönde alınan baskılarda, artan baskı hızı çekme dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. XY oryantasyonu için daha büyük katman yüksekliği daha yüksek değerlerde çekme dayanımı sağlarken, ZX oryantasyonu için bu durumun tam tersi yaşandığını gözlemlemişlerdir. Nozül sıcaklığının yüksek olduğu değerlerde her iki oryantasyon yönü için de daha yüksek dayanımlara ulaşıldığını belirlemişlerdir.

Tymrak vd. [27] dört farklı marka üç boyutlu yazıcıda hem ABS hem PLA köpek kemiği numune baskıları alarak, gerçekçi çevre koşullarında gerilme dayanımları ve elastisite modüllerini ölçmüşlerdir. Bunun için baskı oryantasyonu için iki seviye ve katman yüksekliği için üç seviye belirlenmiştir, dolgu yüzdesi her biri için %100'dür. Baskı oryantasyonu için seçilen seviyeler $0^{\circ}/90^{\circ}$ ve $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ olurken, katman yüksekliği için 0,2 mm, 0,3 mm ve 0,4 mm seçilmiştir. Bu değerlerin her bir kombinasyonu için 10'ar adet numune test edilmiştir. Belirlenen parametreler dışında, baskı almak için kullanılan dört farklı yazıcıya ait nozül sıcaklığı, tabla sıcaklığı, nozül çağı gibi parametreler makinaya has olacak şekilde bırakılmıştır. Bu sebeple de her bir yazıcıdan alınan örneklerin ortalaması alınarak yorumlama yapmışlardır. Elde edilen sonuçlarla birlikte, 0,2 mm katman yüksekliğinde basılan örneklerin en yüksek gerilme dayanımına sahip olduğu, 0,4 mm katman yüksekliğindeki örneklerin en büyük elastisite modülüne sahip olduğu çıkarımında bulunmuşlardır. İki basma yönelimi kıyaslanacak olursa, $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ en güçlüyken $0^{\circ}/90^{\circ}$ daha büyük elastisite modülüne sahip olduğu sonucuna varmışlardır. PLA malzemenin, parametrelerin değişiminden ABS'den daha fazla etkilendiği gözlemlenmiştir. En yüksek değerlere hem ABS hem PLA numunelerin 0,2 mm katman yüksekliğinde ve $0^{\circ}/90^{\circ}$ baskı oryantasyonunda ulaştıkları sonucuna ulaşmışlardır.

Erimiş Filament Fabrikasyonu yönteminde en sık karşılaşılan malzemelerden biri de Polilaktik Asit olarak geçen PLA filament çeşididir. Bununla alakalı yapılmış çalışmalara bakılacak olduğunda, Tsouknidas vd. [28] tabaka yükseklikleri, dolgu desenleri ve yoğunluğunun, PLA kullanılarak basılan silindir şeklindeki numunelerin enerji dağıtma özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Belirlenen süreç parametrelerinin tüm seviye kombinasyonlarıyla toplamda 27 örnek türü için test yapılmıştır. Örnek numune görseli Şekil 1.16'da verilmiştir.

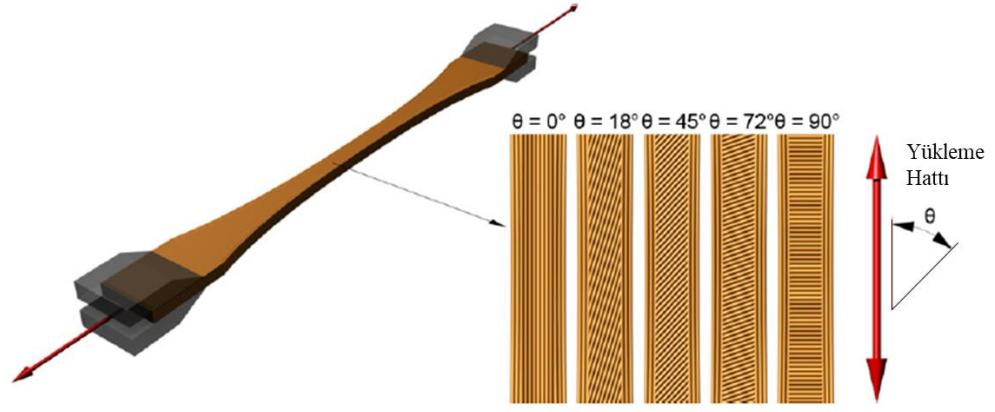


Öncesi Darbe Sonrası

Şekil 1.16 : Test Numunesi Öncesi ve Sonrası Görselleri [28]

Dolgu deseni için belirlenen üç seviye doğrusal, sekizgen ve eşmerkezli; katman yüksekliği için belirlenen üç seviye 0,1 mm , 0,2 mm ve 0,3 mm; dolgu yüzdesi için belirlenen üç seviye %25, %50 ve %100 olmuştur. Her bir test üç kere tekrar edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla birlikte, enerji emilimi ve kuvvet hafifletme açısından optimum süreç parametreleri %25 dolgu yüzdesine göre belirlenmiştir. Doğrusal dolgu deseninin yüksek kinetik enerji değerlerini daha düşük kuvvet oranlarında dağıtabildiği ve bu sayede taşıyıcı yapıya karşı koruyucu davranış sergilediği gözlemlenmiştir. 0,1 mm katman yüksekliğinin, üretilen numunelerin yapısal bütünlüğüne faydalı olduğunu, daha yüksek katman yüksekliklerinin çarpma sırasında erken bozulduğu çıkarımında bulunmuşlardır.

Lanzotti vd. [29] PLA kullanarak çekme dayanımını ve kopma anındaki anma gerinimini üç süreç parametresi olan tabaka kalınlığı, baskı oryantasyonu ve perimetre sayılarını değiştirerek ölçmüşlerdir. Daha önce bahsedilen çalışmalardan farklı olarak burada verilen süreç parametrelerinden perimetre sayısı, parçanın dış kaplaması için kullanılan kabuk sayısı olarak ifade edilebilir. Numunelere ait görsele Şekil 1.17'de yer verilmiştir. Seçilen parametrelerin seviyelerine ait deney seti ise Çizelge 1.7'de mevcuttur. 60 adet numune teste tabi tutulmuştur.



Şekil 1.17 : Test Numunelerinin Baskı Oryantasyonu [29]

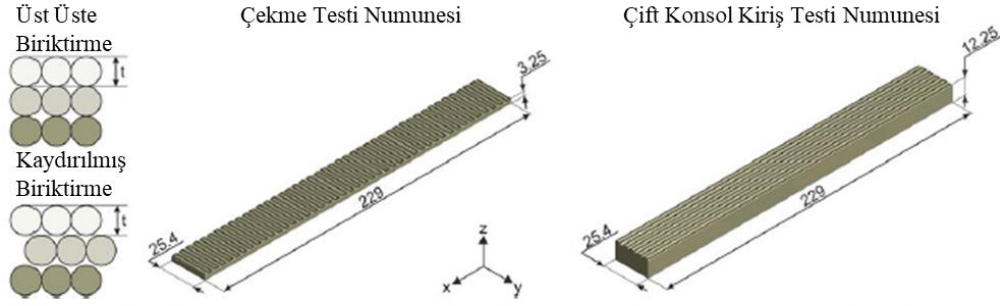
Çizelge 1.7 : Belirlenen Parametrelere göre Oluşturulan Deney Seti [29]

Numune Numarası	Tekrar Sayısı	Katman Kalınlığı (mm)	Baskı Oryantasyonu (derece)	Kabuk Perimetre Sayısı
1	3	0.12	18	3
2	3	0.18	18	3
3	3	0.12	72	3
4	3	0.18	72	3
5	3	0.12	18	5
6	3	0.18	18	5
7	3	0.12	72	5
8	3	0.18	72	5
9	3	0.1	45	4
10	3	0.2	45	4
11	3	0.15	0	4
12	3	0.15	90	4
13	3	0.15	45	2
14	3	0.15	45	6
15	18	0.15	45	4

Deney setinden de görülebileceği üzere, her kademedeki bir değer değiştirilmiştir. Dolgu yönelimi 90°'ye yaklaştıkça mukavemette azalma gözlemlenmiştir. Kabuk perimetre sayısı arttıkça ve katman kalınlığı 0,18 mm'ye yaklaştıkça mukavemet değerlerinde artış kaydetmişlerdir. Maksimum çekme dayanımı ile elastisite modülü değerlerini maksimize eden kombinasyonun, katman kalınlığının 0,2 mm, dolgu oryantasyonunun 0° ve kabuk perimetre sayısının 3 seçileceği durumda elde edileceği çıkarımında bulunmuşlardır.

Baskı esnasındaki birbirlerine tutunma miktarlarını ölçmek için Spoerk vd. [30] yaptığı çalışmada ise, PLA filament ile alınan baskının tabaka içi ve tabakalar arası

birleşmesini ölçmek için çekme ve çift konsol kiriş testi kullanılmıştır. Bu çalışmanın diğerlerinden en önemli farkı, üst üste yığılan erimiş filamentlerin Üst Üste ve Kaydırılmış olarak iki farklı katman tasarımının araştırılmış olmasıdır. Kaydırılmış numuneler için kaydırma miktarı yarım iplik çapı kadardır. Bununla birlikte, testler için oluşturulan numunelere ait şematik gösterim Şekil 1.18’de mevcuttur.



Şekil 1.18 : Test Numunelerinin Baskı Oryantasyonu [30]

Çekme testi için oluşturulan numunelerin katman kalınlığı için belirlenen seviyeler 0,2 mm, 0,3 mm ve 0,4 mm’dir. Çift konsol kiriş testinde bu seviyelere ek olarak 0,25 mm de eklenmiştir. Nozül sıcaklığı için seçilen değerler 200°C , 210°C , 220°C ve 250°C ’dir. Araştırılan her bir numunenin beş tekrarı yapılmıştır.Çift konsol kiriş testi için başlangıç çatlak 40 mm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çekme testi için 0,2 mm katman kalınlığıyla Üst Üste yığılarak 250°C nozül sıcaklığında baskı alınan numunenin neredeyse mükemmel birleşme sağladığını ve en yüksek gerilme mukavemeti değerine sahip olduğunu görmüşlerdir. Çift konsol kiriş testi için ise bu durum, 0,25 mm katman kalınlığıyla Üst Üste yığılarak 250°C nozül sıcaklığında baskı alındığında katmanların ideal sıkışma oranı sayesinde maksimize edilmiş katmanlar arası mukavemet değerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kaydırılmış katman tasarımının, tabaka içi yüklemeler için önerilebileceğini; Üst Üste katman tasarımının tabakalar arası kohezyonun ön plana çıktığı yükleme koşullarında daha uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Baskı işlemi ve kırılma davranışı arasındaki ilişkiyi görmek isyen Aliheidari vd. [31], ABS filament kullanarak çift konsol kiriş test numuneleri basmış, nozül ve yatak sıcaklığı ile katman yüksekliği ve genişliği olarak dört parametrenin üçer seviyelerini ele alarak incelemişlerdir. Belirli nozül çapı ve katman yüksekliğinde, ekstrüzyon

akış oranı ile katman genişliğini kontrol etmişlerdir. Buna göre oluşturulan deney seti Çizelge 1.8’de mevcuttur.

Çizelge 1.8 : Çift Konsol Kiriş Testi için Deney Seti [31]

Numune Numarası	Nozül Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Katman Yüksekliği (mm)	Katman Genişliği (mm)
1	220	95	0.2	0.35
2	230	95	0.2	0.35
3	240	95	0.2	0.35
4	230	85	0.2	0.35
5	230	95	0.2	0.35
6	230	105	0.2	0.35
7	230	95	0.1	0.35
8	230	95	0.2	0.35
9	230	95	0.3	0.35
10	230	95	0.2	0.25
11	230	95	0.2	0.35
12	230	95	0.2	0.45

Her numunede bir parametre seviyesi değişecek şekilde düzenleme yapmışlardır, geri kalan parametrelerin ortanca seviyelerini kullanmayı tercih etmişlerdir. Numunelere ait görsele Şekil 1.19’da yer verilmiştir.

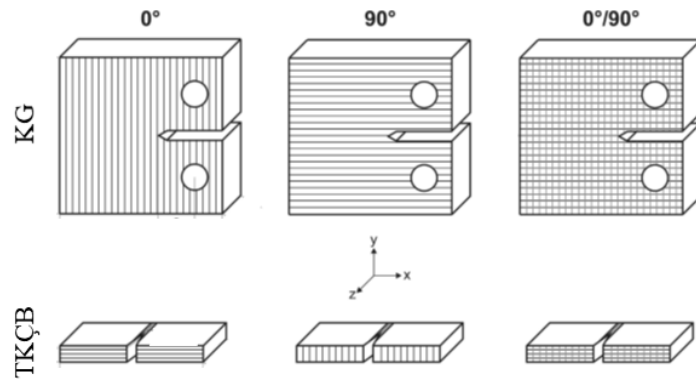


Şekil 1.19 : Çift Konsol Kiriş Testi için Numune Örneği [31]

Yapılan testler sonucunda, nozül sıcaklık artışının katmanlar arası kırılma direncini de arttırdığı görülmüştür. Bunun nedeninin, daha yüksek nozül sıcaklığının moleküller arası daha yüksek difüzyona ve bu sayede yüzeyler arası oluşan bağın daha kuvvetli olmasıyla kırılma direncinin artmasına sebep olduğu çıkarımında bulunmuşlardır. Tabla sıcaklığının artması da ara tabaka kırılma direncini arttırmıştır. Sıcaklığın arttıkça, ara tabaka boşluklarının boyutunun azaldığını gözlemlemişlerdir.

Katman yüksekliğinin 0,2 mm olması maksimum kırılma direncini gösteren optimum boyut olarak görülmüştür. Katman genişliğinin artışı, numunelerin kırılma direncini de arttırmıştır. Üst ve alt tabakalar arasında temas yüzeylerinin artmasının, nüfuziyeti de arttırdığını belirlemişlerdir.

Kompakt gerilme ve tek kenarlı çentikli bükme testleri ile bambaşka bakış açısı getiren Arbeiter vd. [32], baskı oryantasyonunun değişimi ile EFF ile üretilen PLA numunelerin ömür süresinin tahminleri üzerine çıkarımlarda bulunmuşlardır. Uygulanan testler için hazırlanan numunelere Şekil 1.20’de yer verilmiştir.



Şekil 1.20 : Kompakt Gerilme (KG) ve Tek Kenarlı Çentikli Bükme (TKÇB) Test Numune Geometrileri [32]

Nozül sıcaklığı 250°C , tabla sıcaklığı 70°C , katman kalınlığı 0,25 mm ve baskı hızı 80 mm/s olarak sabitlenmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda, ideal süreç parametre setine bağlı olarak kırılma davranışının baskı oryantasyonuna büyük ölçüde bağlı olmadığı anlaşılmıştır. Çatlakların kaynak çizgileri boyunca ilerlediği 90° yönelimli numuneler, diğer yönelimlere kıyasla biraz daha yüksek süneklik göstermiştir. Ayrıca 0° ve 0°/90° yönelimli numuneler neredeyse aynı kırılma davranışını sergilerken, 90° oryantasyonlu numuneler biraz daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Buradan elde edilen sonuçlarla, aynı bileşenler kullanılarak yorulma ömür tahminleri yapılırsa, EFF tekniği ile üretilen parçaların endüstride de kullanımı için uygunluğunun tahkikinin yapılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Başka bir çalışmada, PLA malzeme kullanarak numunelerin yorulma davranışlarını inceleyen Mesa vd. [33], dört farklı parametre seçmişlerdir, bunlar katman yükseliği, nozül çapı, doluluk oranı ve baskı hızıdır, deney setini ise Taguchi Yöntemi’ne göre

oluşturmuşlardır. Seçilen parametrelerin her biri için üçer seviye belirlenmiştir. Taguchi ile oluşturulan deney düzeneği Çizelge 1.9'da verilmiştir.

Çizelge 1.9 : Taguchi L27 Deney Seti [33]

Numune Numarası	Katman Yüksekliği (mm)	Nozül Çapı (mm)	Doluluk Oranı (%)	Baskı Hızı (mm/dak)	Numune Numarası	Katman Yüksekliği (mm)	Nozül Çapı (mm)	Doluluk Oranı (%)	Baskı Hızı (mm/dak)
1	0,1	0,3	25	25	15	0,2	0,4	75	30
2	0,1	0,3	50	30	16	0,2	0,5	25	25
3	0,1	0,3	75	35	17	0,2	0,5	50	30
4	0,1	0,4	25	30	18	0,2	0,5	75	35
5	0,1	0,4	50	35	19	0,3	0,3	25	35
6	0,1	0,4	75	25	20	0,3	0,3	50	25
7	0,1	0,5	25	35	21	0,3	0,3	75	30
8	0,1	0,5	50	25	22	0,3	0,4	25	25
9	0,1	0,5	75	30	23	0,3	0,4	50	30
10	0,2	0,3	25	30	24	0,3	0,4	75	35
11	0,2	0,3	50	35	25	0,3	0,5	25	30
12	0,2	0,3	75	25	26	0,3	0,5	50	35
13	0,2	0,4	25	35	27	0,3	0,5	75	25
14	0,2	0,4	50	25					

Nozül sıcaklığını 200°C , tabla sıcaklığını 0°C ve dolgu desenini bal peteği olarak seçmişlerdir. Her bir parametre kombinasyonu için beş kez yorulma testi yapılmıştır. Numunelere ait görsele Şekil 1.21'de yer verilmiştir.

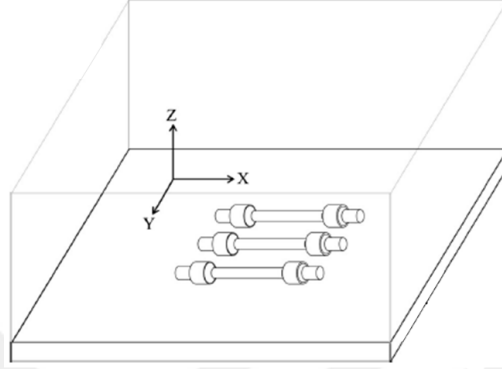


Şekil 1.21 : Çekme Testi Numuneleri Baskı Oryantasyonları [33]

Yapılan deneylerin sonucunda, katman yüksekliğinin yorulma ömürleri üzerinde en etkili parametre olduğu görülmüştür. Nozül çapının artışının daha iyi sonuçlar verdiği kaydedilmiştir. Baskı hızının yorulma ömrü üzerinde önemli bir etkisi olmadığını belirlemişlerdir. Bu sebeple proses verimliliğini arttırmak için her zaman maksimum hızın seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Katman kalınlığı ve nozül çapı arasında yüksek derecede uyumsuzluğun, yorulma ömrü üzerinde zararlı etkiye sebep olacağını ortaya koymuşlardır. Optimum parametrelerin %75 doluluk oranı, 0,5 mm nozül çapı, 0,3 mm katman yüksekliği olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Burulma testi düzeneği hazırlayan Torres vd. [34], üç süreç parametresinin üçer seviyesinden oluşan Taguchi Yöntemi ile deney düzeneği hazırlayıp, nihai kayma

dayanımı ve akma dayanımı ile kayma modülü ve kırılma gerinmesini de hesaplamışlardır. Seçilen süreç parametreleri katman aklınlığı, dolgu yüzdesi ve Test numuneleri XY oryantasyonunda üretilmiştir, ZX ya da ZY yönünde üretilen numunelerin yapılan ön çalışma sonucunda deforme olmadan delamine olacağı görülmüştür. Numunelere ait görsele Şekil 1.22’de yer verilmiştir.



Şekil 1.22 : Çekme Testi Numuneleri Baskı Oryantasyonları [34]

Taguchi ile oluşturulan deney düzeneği Çizelge 1.10’da verilmiştir.

Çizelge 1.10 : Yorulma Testi için Taguchi L9 Deney Seti [34]

Numune Numarası	Katman Kalınlığı (mm)	Doluluk Yüzdesi (%)	Isıl İşlem Süresi (dak)
1	0.1	20	0
2	0.1	60	5
3	0.1	100	20
4	0.2	20	5
5	0.2	60	20
6	0.2	100	0
7	0.3	20	20
8	0.3	60	0
9	0.3	100	5

Oluşturulan deney seti dışında, 0,1 mm katman kalınlığına ve %20 doluluk oranına sahip 8 adet numunenin, baskı alındıktan sonra farklı sürelerde ısıl işleme tabi tutulmasıyla (0 / 5 / 10 / 20 / 30 / 40 / 50 / 60 dakika boyunca 100°C sabit sıcaklıkla) birlikte elde edilen sonuçlara göre kayma gerilme-gerinme grafiği çıkarılmıştır. Buna göre, 20 dakikadan daha fazla süre ısıl işleme maruz kalan numunelerin yüksek gerilme ve düşük gerinme seviyeleri göstererek kırılma davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir. Bu sebeple Taguchi L9 deney seti oluşturulurken üst seviye için 20 dakika belirlenmiştir. Sünekliği ve güvenilirliği korurken aynı zamanda mukavemeti de arttırmak için düşük seviye ısıl işlem gerektiği sonucuna varmışlardır. Akma

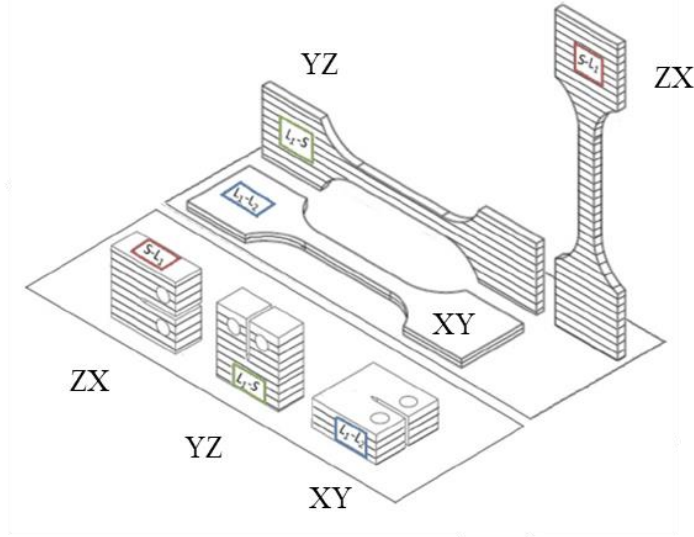
mukavemeti, nihai kayma dayanımı, kırılma gerinimi ve kayma modülü üzerinde dolgu yüzdesinin etkisinin, diğer iki parametreye göre daha fazla olduğu çıkarımında bulunmuşlardır. Esnekliğin neredeyse tamamen ve eşit bir şekilde hem katman kalınlığına hem de dolgu yüzdesine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Kırılma gerinimi için en önemli ikinci parametre ısı işlem süresi olurken, araştırılan diğer üç değer olan akma dayanımı, nihai kayma gerilmesi ve kayma modülü için bu parametrenin katman kalınlığı olduğu sonucuna varmışlardır.

Yine Torres vd. [35] başka bir çalışmada, EFF ile üretilen PLA tabanlı numuneler çekme ve kırılma testlerine maruz bırakılarak; genel ve yükleme altındaki optimum değerleri ölçülmüştür. Araştırılmak için seçilen parametreler nozül sıcaklığı, baskı hızı, yığma oryantasyonu, dolgu yüzdesi, perimetre tabakasının olup olmaması ve katman kalınlığıdır. Her bir parametre için ikişer seviye belirlenmiştir. Hazırlanan deney seti Çizelge 1.11’de verilmiştir.

Çizelge 1.11 : Yorulma Testi için Taguchi L9 Deney Seti [35]

Numune Sayısı	Nozül Sıcaklığı (°C)	Baskı Hızı (mm/s)	Dolgu Yönü (°)	Dolgu Yüzdesi (%)	Katman Kalınlığı (mm)	Perimetre Tabakası
1	215	60	90/180	35	0.1	Yok
2	215	60	90/180	100	0.3	Var
3	215	120	45/135	35	0.1	Var
4	215	120	45/135	100	0.3	Yok
5	230	60	45/135	35	0.3	Yok
6	230	60	45/135	100	0.1	Var
7	230	120	90/180	35	0.3	Var
8	230	120	90/180	100	0.1	Yok

Hem çekme hem de kırılma testleri için oluşturulan numunelere Şekil 1.23’te yer verilmiştir. Tabloda verilen seviyeler dışında, numuneleri oluşturulurken yığma oryantasyonu (XY, YZ ve ZX yönlerinde) değiştirilerek, her biri için ayrı test yapılmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre, en yüksek elastisite modülüne, %0,2 akma dayanımına, tokluk modülüne ve maksimum çekme dayanımına sahip numuneler YZ yönünde baskı alınanlar olmuştur. Kırılma deneyi sonuçlarına göre ise, en yüksek kritik gerilim yoğunluğu çarpanına, kritik yüke, emilen kırılma enerjisine ve dayanım oranına sahip numuneler XY yönünde baskı alınanlar olmuştur.



Şekil 1.23: Çekme Testi Numuneleri Baskı Oryantasyonları [35]

Değerlendirmeler doğrultusunda, optimum parametreler Çizelge 1.12’de verilmiştir.

Çizelge 1.12 : Optimum Süreç Parametre Değerleri [35]

Süreç Parametresi	Genel	Yükleme Durumunda	
		Çekme	Kırılma
Doluluk Yüzdesi	100%	100%	100%
Katman Kalınlığı	0.30 mm	0.30 mm	0.10 mm
Nozül Sıcaklığı	230°C	230°C	230°C
Perimetre Varlığı	Var	Var	Var
Baskı Hızı	90 mm/s	60-90 mm/s	90-120 mm/s
Dolgu Yönü	45/135°	90/180°	45/135°
Oryantasyon	ZX	YZ	XY

Genel olarak adlandırılan kısmı, kullanıcıların spesifik olarak çekme ve kırılma özellikleriyle ilgilenmedikleri, fakat üretilen bileşenlerin mukavemetleri ve genel malzeme özellikleri konusunda bazı endişeleri olabileceği her tür genelleştirilmiş yükleme için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

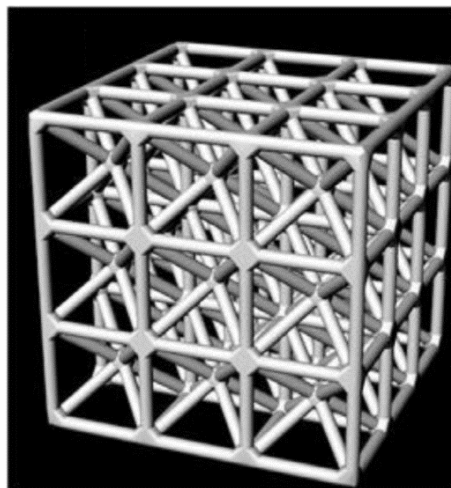
İncelenen bu çalışmalarda kullanılan süreç parametrelerinin en sık kullanılanları için oluşturulan tablo Çizelge 1.13’te verilmiştir. Seçilen parametrelerin farklı kombinasyonlarıyla, çeşitli geometrilerde baskı alınarak oluşturulan numuneleri kullanarak geometrik veya mekanik özelliklerini inceleyen bir çok çalışma mevcuttur.

Çizelge 1.13 : Bazı Çalışmalara ait Süreç Parametre ve Test Seçimleri

Makale No	Malzeme	Yığılma Oryantasyonu	Nozül Sıcaklığı	Katman Yüksekliği	Dolgu Yüzdesi	Dolgu Deseni	Baskı Hızı	Tabla Sıcaklığı	Fan Hızı	Deney Tipi	İlk Yazar vd. (Yıl)
1	PLA		+	+				+		Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	Kartal, F. (2017)
2	ABS		+	+			+		+	Basma Deneyi	Dong, G. vd. (2018)
3	ABS									Basma Deneyi	Lee, B.H. vd. (2005)
4	PLA	+	+	+	+	+	+			Çekme Deneyi	Alafaghani, A. vd. (2017)
5	PLA	+			+	+				Çekme Deneyi	Farbman, D. vd. (2016)
6	PLA		+	+	+	+				Çekme Deneyi	Alafaghani, A. vd. (2018)
7	PLA	+		+			+			Çekme ve 3 Nokta Eğme Testi	Chacón, J.M. vd. (2017)
8	PLA	+		+	+					Çekme Deneyi	Melenka, G.W. vd. (2015)
9	ABS		+	+				+		Çift Konsol Kiriş Testi	Alheidari, N. vd. (2018)
10	PLA			+	+		+			Yorulma ve Ömür Testi	Mesa, R.J. vd. (2017)

Bu araştırmaların hepsinin ortak özelliği, tam dolu numuneler üzerine çalışmış olmalarıdır. Dolgu yüzdesi ile doluluk oranları üzerinde çalışan makaleler de mevcuttur, ancak tam dolu numunelerle kıyaslamak adına süreç parametre seviyeleri olarak değerlendirilmiştir.

Yapılan literatür araştırmasında latis yapılar üzerine EFF süreç parametrelerinin etkisini inceleyen sadece bir çalışmaya rastlanmıştır. Dong vd. [7] ait olan çalışmada, yatay ve eğimli dikmeler için süreç parametre etkilerinin farklı olduğu bilindiği için, numune geometrisi seçimini, bu çalışmada ayrı ayrı ele alınan BK ve HMK'nın birleşimi olan BHMK ile yapmışlardır. Numune geometrisine ait CAD modele Şekil 1.24'te yer verilmiştir. Bu çalışma için ABS malzeme tercih edilmiştir.



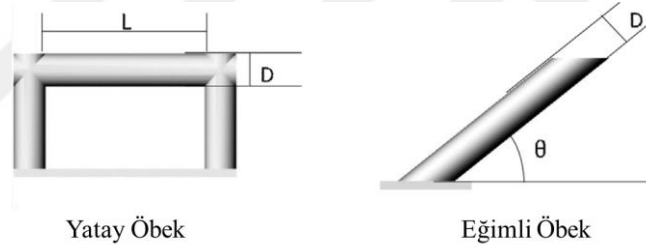
Şekil 1.24 : BHMK Numune Geometrisi CAD Modeli [7]

Erimiş Filament Fabrikasyonu mevzu bahis olduğunda sıkça karşılaşılabilecek süreç parametreleri seçilmiştir; bunlar nozül sıcaklığı, baskı hızı, fan hızı ve katman yüksekliğidir. Nozül sıcaklığı ve baskı hızı için dörder seviye, fan hızı için üç ve katman yüksekliği için iki seviye belirlenmiş olup, parametrelere seviye değerleri Çizelge 1.14’te verilmiştir. Deney tasarımı için Taguchi Yöntemi seçilmiştir.

Çizelge 1.14 : Belirlenen Parametreler ve Seviyeleri [7]

Süreç Parametreleri	Birimi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Nozül Sıcaklığı	°C	225	235	245	255
Baskı Hızı	mm/dak	600	1200	1800	2400
Fan Hızı	%	0	50	100	-
Katman Yüksekliği	mm	0.1	0.2	-	-

Bunun için öncelikle, eğimli ve yatay dikmeler için tam faktörlü deney tasarımı oluşturulup; bu dikmelerin tek halde optimum nasıl olabileceği üzerine çalışılmıştır. Yatay ve eğimli dikmelere ait CAD görselleri Şekil 1.25’te ve dizayn parametreleri Çizelge 1.15’te verilmiştir.



Şekil 1.25 : Yatay ve Eğimli Dikmelere ait CAD Görselleri [7]

Burada L yatay uzunluk, θ eğimli açı ve D her iki dikmeye de ait çap ölçüsüdür. Her bir parametre seti iki tip yapıyı yazdırmak için kullanılmıştır. Dikmeler için tam faktöriyel tasarım gerçekleştirilmiştir, 9 yatay 12 eğimli örnek basılmıştır.

Çizelge 1.15 : Belirlenen Parametreler ve Seviyeleri [7]

Geometri Öbekleri	Dizayn Parametresi	Birimi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Eğimler	Yatayla Yaptığı Açı	°	15	30	60	90
Yatay Dikmeler	Çap	mm	2	4	6	-
	Uzunluk	mm	10	30	50	-
	Çap	mm	2	4	6	-

Ek deney olarak yapılan bu çalışma, latis yapıların mekanik özellikleri üzerindeki süreç parametrelerinin etkileri hakkında fikir yürütebilmek adına yol gösterici olmuştur. Eğimli ve yatay dikmelerden oluşan BHMK latis numuneler, her yönde 3 adet toplamda yirmi yedi adet birim küpten oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Birim hücre uzunluğu 15 mm ve dikme kalınlığı 2 mm'dir. Oluşturulan numunelerin bir kısmının baskısı, Taguchi Yöntemi'ne göre tasarlanan süreç parametre setindeki çok çeşitli baskı değerlerinden dolayı başarısız olmuştur. Baskısı başarısız olan numuneler basma testine tabi tutulmamıştır. İhmal edilen veriler için başarısızlık yöntemleri (failure methods) kullanarak, eksik verileri tamamlamışlardır. Bu yöntemler arasında dikkatli bir karşılaştırma yaparak sonuca ulaşmışlardır. Burada Taguchi Yöntemi, hem eğimli dikmeler hem de yatay dikmeler için optimum süreç parametrelerini saptamak için kullanılmıştır. Latis yapıların baskısında süreç parametrelerini optimize etmek adına S/N oran analizi ve ANOVA kullanılmıştır. Elde edilen verilere bakılarak, eğimli dikmelerin boyutsal doğruluğu için en etkili süreç parametresinin fan hızı olduğu saptanmıştır. Yatay dikmelerin boyutsal doğruluğu içinse bu, katman yüksekliği olmuştur. Hem eğimli hem de yatay dikmeler mevcut olduğu için, yukarıda bahsi geçen makale EFF ile imal edilen latis yapılar üzerindeki süreç parametrenin etkileri hakkında en faydalı makale olmuştur. Fakat bu makalede sadece tek bir latis yapı için süreç parametrelerinin etkisi incelendiğinden, farklı latis yapı türleri için süreç parametre değerlerinin malzeme özellikleri üzerinde ne şekilde farklılıklar oluşturabileceği üzerinde durulması gereken önemli bir eksikliklerdir.

Bu çalışmada amaç, literatürde bulunan EFF ile içi tam dolu veya farklı dolgu yapısı ile dolu üretilen numuneler ile yapılan nice çalışmanın aksine, hafiflik ve yüksek dayanım sağladığı için son zamanlarda mühendislik uygulamaları için önem kazanan latis yapılar için süreç parametrelerinin etkin malzeme özellikleri üzerine etkisini belirlemektir. Ayrıca, latis yapılar ile yapılan çalışmadan farklı olarak, farklı kafes türleri için süreç parametrelerinin etkin malzeme özellikleri üzerindeki önem sırasını belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda latis yapıların temel taşı sayılabilecek üç farklı latis yapı türü seçimi yapılmıştır. Bu farklı latis yapı türlerinin hem farklı çubuk açalarına sahip olmaları hem de doluluk oranlarının birim hücrelerinden kaynaklı farklı yüzdelere sahip olmaları, aynı çalışmanın içerisinde bir çok farklı soruya cevap

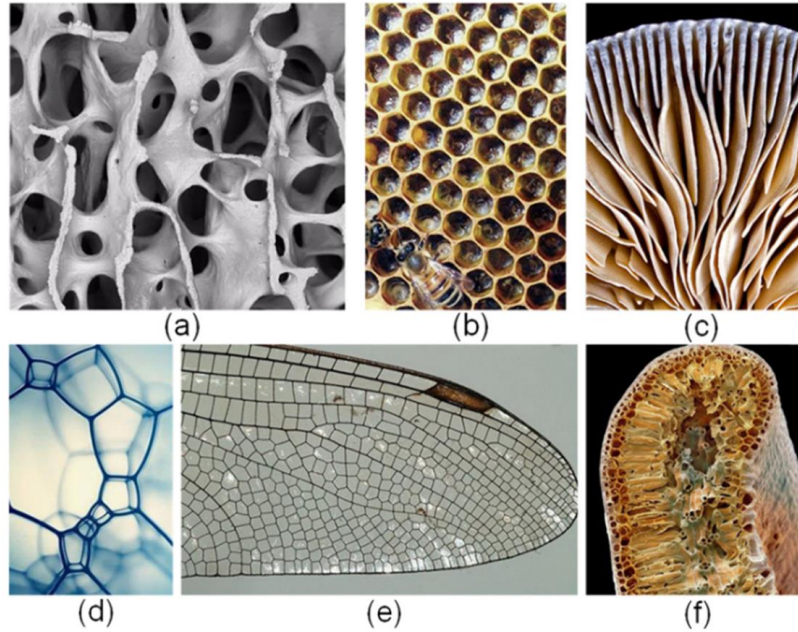
bulmaya imkan tanımıştır. Bu doğrultuda, süreç parametreleri, literatürde EFF ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri üzerine en çok etkisi olan ve latis yapı üzerinde de etkisinin yüksek olacağı belirlenen parametreler olarak seçilmiştir. Araştırmaların çok büyük bir kısmı tam dolu numuneler üzerine olduğu için, makro seviyede gözle görülür farklılık yaratan bazı süreç parametreleri, mikro seviyede (bu koşulda çapı 2 mm olan numunelerde) nispeten etkisi olmayan değişimler yaratabileceğinden etkisinin her koşulda sonucu değiştireceği bilinen parametreler seçilmiştir. Bu parametrelere ait seviyeler her ne kadar yazıcı ve filamentin sınırladığı değerler arasında seçilmiş de olsa, sadece latis yapılar basılırken karşılaşılabilecek problemlerle başa çıkılacak şekilde seçilmiştir. Dolu basılabilecek numunelere kıyasla daha özverili ve dikkatli çalışma gerektiren bu latis yapılar, küçük ölçeklere sahip oldukları için çok hassas davranılması gerekmektedir. Olumsuz hava şartlarından, ufacık bir darbeden veya ortamdaki toz miktarından, kısacası hemen her etmenden etkilenen yapıya sahiptir. Bu sebeplerden dolayı bu çalışma, literatürde yeterli araştırma mevcut olmadığı için, basma deneyleri sonuçları ilerideki çalışmalara ışık tutması ve mühendislik uygulamalarında kullanılan dolu numunelerin yerini latis yapılara bırakması adına yararlı bir kaynak olmayı hedeflemektedir.

2. GENEL BİLGİLER VE KAVRAMLAR

Bu bölümde, çalışmada kullanılan terimlerin açıklaması ve yapılan deneyle alakalı yöntem ve bilgilere yer verilmiştir.

2.1 Latis Yapı ve Süreç Parametresi Tanımları

İnsanlar yüzyıllardır doğanın kendi içerisindeki düzeni ve dengeyi taklit ederek modern teknik malzemeler elde etmişlerdir. Özellikle boşluklu yapıya sahip doğal hücresel yapıların, (Örn. Taramalı elektron mikroskobu altında insan kemiği (a), bal peteği yapısı (b), fungi mantarları (c), baloncuklarda oluşan voronoi yapı (d), yusufçuk kanadı (e) ve yaprak yapısı (f) vb.) bazı mühendislik uygulamalarında kullanıldığı bilinmektedir [36]. Verilen örneklere ait görsellere Şekil 2.1’de yer verilmiştir.



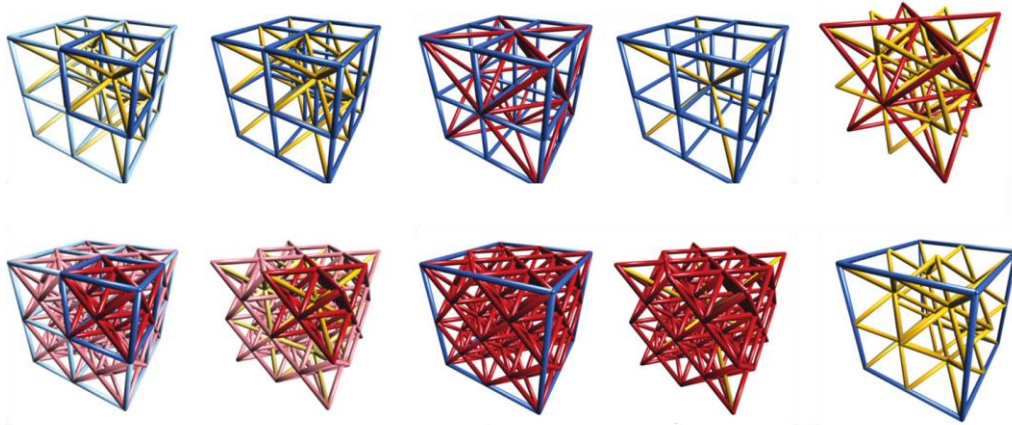
Şekil 2.1 : Doğada Kendiliğinden Oluşan Hücresel Yapı Örnekleri [36]

Hücresel yapılar, sahip oldukları geometriden dolayı, hem hafif olması hem de yüksek özgül mukavemet ve rijitliğe sahip olması sebebiyle bir çok alanda kullanım

için elverişlidir [37]. Bu yapıların deformasyona uğradıklarında verdikleri tepkilerden, enerji soğurma konusunda da işe yarar olduğu görülmüştür [38].

Kafes yapı olarak da literatürde yer alan latis yapılar, temel bazda birbirini tekrar eden birim hücrelerden meydana gelen, kesişen düğüm ve dikmelerden veya kabuklardan oluşan kafes kiriş sistemidir [7], [38]. Ashby [39], bir hücresel yapı çeşidi olan latis yapıların, büyük ölçekli mühendislik yapılarından farklı olarak milimetre veya mikrometre seviyesinde ölçeğe sahip olduğunu belirtmiştir. Buna dayanarak, Maconachie vd. [40], latis yapıları oluşturan birim hücrelerin uzay kafes olarak analiz edilebileceğini, kafes yapısının kendine ait mekanik özelliğe sahip olduğunu, kafes yapı ile onu oluşturan malzemenin kıyaslanabilmesinin mümkün olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Birçok farklı kafes yapı türü mevcuttur, temeline inildiği zaman aslında birkaç farklı kafes yapısının birbirlerine eklenerek yeni kafes yapıların elde edildiği görülür. Bunun üzerine çalışma yapan Zok vd. [8] kafes kiriş yapı tiplerinin sınıflandırılması için sistem oluşturmuşlardır. Bunun için, temel kafes yapılarından BK, HMK ve YMK'yı seçmişlerdir. Yaptıkları tanıma göre, bir temel kübik yapı, üç kübik uzay kafesinden birinin, en yakın noktalarının dikmelerle birleştirilmesinden oluşmaktadır. Seçilen üç temel tip kafes yapısının farklı kombinasyonlarıyla oluşturulan birleşik yapılara ait görsele Şekil 2.2'de yer verilmiştir. Birim hücreler daha koyu renkler ile vurgulanmıştır.



Şekil 2.2 : Temel Tip Kafes Yapılardan Oluşturulan Bileşik Kübik Kafesler [8]

Süreç parametrelerinin, EFF tekniği için önemiyle alakalı çok sayıda makale bulunmakla birlikte, farklı tarafından konuyu ele alanlardan biri de Palmić vd. [41] ait olan altı parametrenin (baskı hızı, tabla sıcaklığı, nozül sıcaklığı, katman yüksekliği, ekstrüzyon oranı ve iz boşluğu) elektrik iletkenlerindeki uygulamalarda kullanılan Elctrifi isimli filament üzerindeki etkileridir. Bunun yanı sıra en geniş kapsamlı araştırmalardan biri de Bähr vd. [2] ait olan “Etki Mekanizması” ismini verdikleri tabloda yer alan toplam 42 adet parametrenin malzemeye, sürece, makineye ve fiziksel olaylara etki oranları verilmiştir. Araştırılan parametrelerin tüm bileşen özellikleri üzerindeki toplam etki oranlarına göre en etkili olan parametreler şu şekildedir : artık gerilme, çekme payı, vizkozite, baskı hızı, katman kalınlığı, besleme oranı, nozül sıcaklığı, sıvılaştırma sıcaklığı, perimetre sıcaklığı, nozül çapı, malzeme bileşimi (katkılar), dilimleme ve biriktirme stratejisi, yığma oryantasyonu, üçgenleştirme, soğutma prosesi, süreç dengeliliği, mekanik bitirme. Bahsedilen parametrelerin hepsi tam dolu numuneler için araştırılmıştır, bu sebeple latis yapılar için de geçerliliği olacak şekilde belirleme yapılmıştır. Bu çalışmada hem en sık karşılaşılan hem de etki oranının yüksek olduğu bilinen üç parametre seçilmiştir. Bunlar, nozül sıcaklığı, katman kalınlığı ve baskı hızıdır.

2.2 Deneysel Tasarım

Deneysel tasarımı, saptanmış bir soru ya da sorun hakkında, çözüme ulaşmak adına oluşturulan, belirlenen parametrelerin deney kombinasyonlarının hepsini barındıran ve optimize eden istatistiksel bir yöntemdir. Deneysel tasarımın amacı, çözüm ya da cevap aranan problem hakkında bilgilerin toplanarak, araştırılan sürecin kalite karakteristikleri üzerinde etkisi olan parametrelerin belirlenmesi ve bu sürecin iyileştirilebilmesi adına bu parametrelerin hangi seviyede olması gerektiğini belirlemektir [42]. Bu amaçla oluşturulan deney tasarım yöntemlerinden bazıları şunlardır: yapay sinir ağları, tam faktöriyel tasarım, kesirli faktöriyel tasarım, yanıt yüzeyi tasarımı ve Taguchi yöntemi.

Yapay sinir ağları, sistemin analizinde kullanılan hesaplama modelidir ve sistemin performansını tahmin etmek için kullanılır [11]. Yapay sinir ağları, birbirine bağlanan düğümlerden (nöronlardan) ve katman ağlarından oluşmaktadır. Bir ağ gibi birbirine bağlı nöronlarla insan beyninin işleyişini andıran yapıya sahiptir ve

mühendislik uygulamalarında hesaplamaları uzun sürecek sorunlara hızlı cevap bulabilmeyi sağlamaktadır [43]. Yapay sinir ağları, düğümlerle birbirine bağlı süreç birimleri adı verilen birçok yapay nörondan oluşmaktadır. Süreç birimleri ise giriş ve çıkış birimlerinden oluşmaktadır. Giriş birimi, yapay sinir ağlarının istenen çıktıyı üretmek için öğrendiğidir [44]. Ağ örgüsü, üretilen gerçek çıktıyı istenen çıktıyla karşılaştırılır ve her iki sonuç arasındaki fark, geri yayılım adı verilen yapay sinir ağlarını yönlendirmek için başvuru kuralları kümesini kullanarak, ayarlanır. Bu sayede, ağ örüntüsünün gerçek ve istenen sonuç arasındaki fark mümkün mertebe en az hatayı üretene kadar birimler arasındaki etkisini ayarlamak adına, çıktı biriminden giriş birimine giderek geriye doğru çalıştığı anlamına gelmektedir [45].

Tam faktöriyel tasarım, deneydeki parametre seviyelerinin olası tüm kombinasyonlarını inceleyen deney tasarımı yöntemidir [23]. İki veya daha fazla parametrenin bir yanıt üzerindeki etkileri, seviyelerini eşzamanlı olarak değiştirerek gözlemlenebilir [46]. Tam faktöriyel tasarımın en büyük sınırlaması, yapılacak deney için üzerinde çalışılacak parametreler ve seviyelerinin dörtten az veya eşit olması gerekmektedir [47].

Kesirli faktöriyel tasarım, kaynaklar sınırlı olduğu zaman ya da faktör sayısı çok olduğunda tam faktöriyel tasarım yerine kullanılır. Kritik kalite özelliklerini etkileyen en önemli parametreleri ve seviyelerini incelemek için kesirli faktöriyel tasarım tercih edilmektedir [46]. Kesirli faktör tasarımının amacı, faktörlere ait bilgileri ve süreçlerin yanıtına büyük katkısı olan düşük dereceli etkileşimleri ortaya çıkarmaktır [48].

Yanıt yüzeyi tasarımı, çeşitli kontrol faktörlerinin sisteme ait farklı tepkileri üzerindeki etkilerini ölçmektedir [49]. Tam faktöriyel tasarıma ihtiyaç duymadan, yanıt değişkeni için ikinci dereceden bir model oluşturabilmek için sıklıkla başvurulmaktadır [29]. Yanıt ve faktörler arasındaki ilişkide eğriyi modellemek amacıyla kullanılır. Buradaki amaç, yanıt ve faktörler arasındaki etkileşimi öngören bir modelini geliştirerek süreci optimize etmektir [49].

Deney tasarımı yapılırken, Erimiş Filament Fabrikasyonu ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında en sık rastlanan yöntemlerden biri olan Taguchi Yöntemi seçilmiştir. Dr. Genichi Taguchi tarafından yaratılan bu yöntemde, farklı

parametrelerin farklı seviyeleri arasından, istenilen değere ulaşmak için optimum kombinasyonu saptamak adına oldukça yararlı bir yöntemdir [50]. Taguchi yöntemi, teknik özellik ve ortalama yanıtlara dayanan geleneksel deney tasarımı yöntemlerinin aksine, yanıtlardaki değişkenliğin azaltılmasına yöneliktir [9]. Geniş parametre kombinasyonunun etkisini değerlendirebilmek adına çok sayıda parametre ve seviyenin birleşimini, deney sayısını azaltarak yapmaya imkan verir [33]. Bu durum, özellikle EFF tekniği ile baskı alınan numunelerin geometrik ya da mekanik özellikleri üzerinde, optimum tasarım yapmak isteyen ya da mevcut durumu iyileştirmek için çalışmalarda bulunan araştırmacıların Taguchi yöntemini daha çok tercih etmesini sağlamaktadır [7], [9], [10], [12], [14], [17], [33], [34], [34], [35].

Deney tasarımı yapılırken, öncelikle sistem tasarımı yapılmalıdır. Bu ilk adımda mevcut tüm materyaller değerlendirilir. İkinci sırada gelen parametre tasarımında, üretilecek ya da geliştirilecek olan ürünün özelliklerini en iyi seviyeye getirebilmek için kullanılacak parametrelerin iyileştirilmesi sağlanır. Üçüncü ve son adım olan tolerans tasarımında, parametrelerin belirlenmesinin, sonucu istenilen hedefe ulaştıramadığı zaman yapılan ilave çalışmalardır [51].

Parametreler belirlendikten sonra, en uygun ortogonal dizi (OD) seçimi yapılmalıdır. ortogonal dizi, tüm parametrelerin kapsamını araştırırken, deney sayısını olabilecek asgari miktarda tutarak, parametrenin seviyeleri ile benzersiz kombinasyonlar elde edebilmek için kullanılmaktadır [7]. Taguchi ortogonal dizi için seçim tablosu Şekil 2.3'te verilmiştir. Tabloda yer alan P parametre sayısını, S seviye sayısını göstermektedir. Seçilen parametre ve onların seviye sayısının kesiştiği hücre, tercih edilmesi gereken ortogonal diziyi vermektedir. Ortogonal diziler latin kareden türetildiğinden L, latin kareyi temsil etmektedir. L'nin yanındaki sayılar, deney setinde yer alacak parametrelerin kombinasyon sayısını vermektedir.

Ortogonal dizilerdeki parametrelerin seviyelerinin kombinasyonlarına literatürde yer verilmiştir [52]. Bu çalışmada, üç parametre ve parametrelere ait üçer seviye kullanıldığı için $P=3$ ve $S=3$ olarak belirlenen değerlerin kesiştiği hücrenin L9 olduğu Şekil 2.3'ten görülebilir. L9 ortogonal dizi için oluşturulan düzene Çizelge 2.1'de yer verilmiştir. Burada A, B, C parametreleri; 1, 2, 3 seviyelerini temsil etmektedir.

Çizelge 2.1: Taguchi L9 Ortogonal Dizi Dizilimi

TAGUCHI L9 ORTOGONAL DİZİ			
	A	B	C
T1	1	1	1
T2	1	2	2
T3	1	3	3
T4	2	1	2
T5	2	2	3
T6	2	3	1
T7	3	1	3
T8	3	2	1
T9	3	3	2

		Seviye Sayısı						
		2	3	4	5			
Parametre Sayısı	P = 2, S = 2	L4	P = 2, S = 3	L9	P = 2, S = 4	L'16	P = 2, S = 5	L25
	P = 3, S = 2		P = 3, S = 3		P = 3, S = 4		P = 3, S = 5	
	P = 4, S = 2	L8	P = 4, S = 3	L18	P = 4, S = 4	L'32	P = 4, S = 5	L50
	P = 5, S = 2		P = 5, S = 3		P = 5, S = 4		P = 5, S = 5	
	P = 6, S = 2		P = 6, S = 3		P = 6, S = 4		P = 6, S = 5	
	P = 7, S = 2	L11	P = 7, S = 3	L27	P = 7, S = 4	L'32	P = 7, S = 5	L50
	P = 8, S = 2		P = 8, S = 3		P = 8, S = 4		P = 8, S = 5	
	P = 9, S = 2		P = 9, S = 3		P = 9, S = 4		P = 9, S = 5	
	P = 10, S = 2		P = 10, S = 3		P = 10, S = 4		P = 10, S = 5	
	P = 11, S = 2	L16	P = 11, S = 3	L36			P = 11, S = 5	L50
	P = 12, S = 2		P = 12, S = 3				P = 12, S = 5	
	P = 13, S = 2		P = 13, S = 3					
	P = 14, S = 2		P = 14, S = 3					
	P = 15, S = 2		P = 15, S = 3					
	P = 16, S = 2	L32	P = 16, S = 3	L36				L50
	P = 17, S = 2		P = 17, S = 3					
	P = 18, S = 2		P = 18, S = 3					
	P = 19, S = 2		P = 19, S = 3					
	P = 20, S = 2		P = 20, S = 3					
	P = 21, S = 2		P = 21, S = 3					
	P = 22, S = 2	L32	P = 22, S = 3	L36				L50
	P = 23, S = 2		P = 23, S = 3					
	P = 24, S = 2							
	P = 25, S = 2							
	P = 26, S = 2							
	P = 27, S = 2							
	P = 28, S = 2							
	P = 29, S = 2							
	P = 30, S = 2							
	P = 31, S = 2							

Şekil 2.3: Taguchi Ortogonal Dizi Seçim Tablosu [51]

İlerleyen bölümlerde, A, B ve C olarak sembolleştirilen parametrelerin ve 1, 2 ve 3 olarak gösterilen seviyelerinin değerlerinden bahsedilecektir.

Hazırlanan deney tasarımına uygun olarak baskılar alındıktan sonra basma testleri TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Malzeme Test Laboratuvarında bulunan Instron marka üniversal test sistemi ile gerçekleştirilmiştir.

Tüm numunelerin basma testi sonuçları ASTM-D1621 (Rijit Hücresel Plastiklerin Basma Özellikleri için Standart Test Yöntemi) standardına ait yönergeler izlenerek hesaplanmıştır [53]. Test makinasından alınan gerilme-gerinme ve yük-uzama verileriyle çizdirilen grafiklerin üzerinde Şekil 3.7’de gösterildiği gibi elastik bölgeyi temsil eden çizginin eğimi takip edilerek, numunelere ait basma modülleri ve basma dayanımları hesaplanmıştır. Basma modülü hesapları, elastik bölgeden alınan noktalar üzerinden Denklem (2.1) kullanılarak elde edilir.

$$E_c = WH/AD \quad (2.1)$$

Burada, W seçilen noktada uygulanan yükü, H numune başlangıç yüksekliğini, A numunenin başlangıç kesit alanını ve D deformasyonu temsil etmektedir.

Elastik bölgenin, x eksenini (yer değiştirme) üzerine izdüşümü ile elde edilen O noktası “Sıfır Deformasyon” noktası olarak anılmaktadır. O noktasından %10 deformasyona (bu çalışmadaki numuneler için bu değer 3mm’dir.) tekabül eden mesafe uzaklıktaki noktaya M noktası adı verilmiştir. M noktasından yukarı doğru düz bir çizgi çizildiğinde elde edilen yükleme noktasına P noktası denilmiştir. Basma testi uygulanırken, gerinimde artışın devam ettiği ancak gerilmede artışın olmadığı ilk nokta (akma noktası) L noktası olarak adlandırılmıştır. Standartta yer alan görsele Şekil 2.4’te yer verilmiştir. ASTM-D1021 standardına göre, basma dayanımını hesaplamak için iki durum bulunmaktadır: Asıl kistas ve sınırlayıcı olan P noktasından önce akma gerçekleşmişse, bu durumda Şekil 2.4’te (a), akmanın gerçekleştiği noktadaki (L noktasındaki) yükü ölçüp, başlangıç kesit alanına bölerek basma dayanımı hesaplanmıştır. P noktasından önce akma gerçekleşmemişse, bu durumda Şekil 2.4’te (b), P noktasındaki yükü ölçüp, başlangıç kesit alanına bölerek basma dayanımı elde edilmiştir.

değerlerinin sayısını simgelemektedir. “Nominal En İyi” kriterinin denklemi Denklem (2.4) (2.2)’te yer alan s , verilen faktör seviyesi kombinasyonu için tüm gürültü faktörlerinin yanıtlarına ait standart sapmadır.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log(s^2) \quad (2.4)$$

Bir diğer husus, modeldeki yanıtla terimler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için regresyon denklemleri kullanılır. Bu denklem, bir bağımlı değişken ve onu etkileyen çok sayıda bağımsız değişkenlerden oluşmaktadır. Aralarındaki bağıntıyı doğrusal bir model olarak ifade etmektedir.

ANOVA (varyans analizi) ise, önerilen modelin deneysel sonuçlara uygunluğunu gösteren bir dizi gözlem için modellemenin duyarlılığını belirlemenin matematiksel bir yoludur [56]. Herhangi bir giriş parametresinin, işleme süreci için deney tasarımıyla bir grup deneysel sonuçtan etkisini belirlemek için yararlıdır ve deneysel verileri yorumlamak için kullanılır [57]. Ortalama performanstaki farklılıkların tespitinde istatistiksel bazda karar verme aracı olması ve tüm ana faktörlere ait katkı paylarını anlamlandırması [58] sebebiyle, Taguchi metodu ile kurulan deney tasarımına sahip çalışmalarda sıklıkla ANOVA’yla karşılaşılmaktadır. Parametre değişikliklerinin, belirlenen ürün ya da sürece ait performans özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için, süreç parametrelerinin toplam kare sapmalarının tümüne katkı yüzdesi hesaplanır [54]. ANOVA analizinde karşılaşılan bazı terimlerin tanımları aşağıda yer almaktadır.

Serbestlik Derecesi (SD – Degree of Freedom), bilinmeyen popülasyon parametrelerinin değerlerini tahmin etmek ve bu tahminlerin değişkenliğini hesaplamak için kullanılacak verilerin sağladığı bilgi miktarıdır. Bu değer süreçte yer alan gözlem ve parametre sayısına bağlıdır. İstatistiksel parametreleri tahmin

ederken, değişmesi serbest olan verilerdeki gözlemlerin sayısı olarak da ifade edilebilir.

Düzeltilmiş Kareler Toplamı (DKT – Adjusted Sums of Squares), modelin farklı unsurları için varyasyon ölçüleridir. Bir kavram için DKT, sadece diğer kavramlara sahip bir modele kıyasla regresyon kareler toplamındaki artıştır. Modelde yer alan her parametre tarafından ifade edilen yanıt verilerindeki varyasyon miktarını ölçmektedir.

Düzeltilmiş Ortalama Kareler (DOK – Adjusted Mean Squares), bir parametrenin ne kadar varyasyonu açıkladığını ölçen değerdir. Düzeltilmiş Kareler Toplamı'ndan farkı, serbestlik derecelerini de dikkate alarak hesap yapılmasıdır.

Ardışık Kareler Toplamı (AKT – Sequential Sums of Squares), modelin farklı parametreleri için varyasyon ölçüleridir. Düzeltilmiş Kareler Toplamı'ndan farklı olarak, parametrelerin modele girme sırasına bağlıdır. Ortogonal bir tasarımda, DKT ile AKT aynıdır.

Katkı Oranı (KO – Contribution), parametrelerin her birinin Ardışık Kareler Toplamı'na yüzdeler katkısını gösterir. Daha yüksek yüzde oranı, yanıtta daha fazla varyasyonu açıkladığını göstermektedir.

F Değeri (F Value), numune ortalamaları arasındaki varyasyonun numuneler içindeki varyasyona oranıdır. Parametrenin yanıtla ilişkili olup olmadığını tespit etmek için kullanılır. Büyük F Değeri, parametrenin önemli olduğunu hakkında bilgi sağlar.

P Değeri (P Value), elde edilen yanıtın parametrelerle ilişkisinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını, boş hipotez olup olmadığını, belirlemek için kullanılır. Boş hipotez, parametre ile yanıtın arasında ilişki olmadığını gösterir. Bunun için belirlenen anlamlılık düzeyi genellikle 0,05'tir. Elde edilen P Değeri 0,05'ten büyük olursa, o parametrenin yanıt üzerinde etkisi olmadığı kanısına varılabilir.

Yukarıda yer alan kavramların ve hesaplamalarının yapıldığı tablolar sonuç kısmında yer almaktadır.

3. DENEY UYGULANMASI ve HESAPLAMALAR

Bu bölümde, oluşturulan numunelerin baskı alınma süreci, basma testine maruz bırakılması ve elde edilen verilerin yorumlanmasına kadar olan süreçte uygulanan prosedüre yer verilmiştir.

3.1 Kullanılan Kafes Yapı Türleri ve Boyutları

Literatürde yer alan latis yapılara bakıldığında, bir kübik hücreyi dolduran latis yapıların temelinin oluşturulan üç farklı geometri ele alınmıştır. Bunlar Basit Kübik (BK), Hacim Merkezli Kübik (HMK) ve Yüzey Merkezli Kübik (YMK) olarak adlandırılmaktadır. Basit Kübik, hücre yüzeylerinde bulunan ve XY düzleminde 0° ve 90° açılara sahip çubuk elemanlardan oluşmaktadır (bkz. Şekil 1.1'de (a)). Hacim Merkezli Kübik hücre köşe noktaları ile hücre merkezi arasında bulunan ve XY düzlemine göre $35,26^\circ$ açılara sahip çubuk elemanlardan meydana gelmektedir (bkz. Şekil 1.1'de (b)). Yüzey Merkezli Kübik ise, hücre yüzeylerinde köşe noktaları ile yüzey merkezleri arasında bulunan ve XY düzlemine göre 45° açılara sahip çubuk elemanlardan oluşmaktadır (bkz. Şekil 1.1'de (c)). Oluşturulan her bir numune, $30 \times 30 \times 30$ mm boyutlarında bir küpün içinde her yönde 3 adet birim hücre, dolayısıyla toplamda 27 adet birim hücrenin birleşiminden ortaya çıkmaktadır (bkz. Şekil 1.1).

Çubuk çapları 2 mm olarak modellenmiştir. Latis yapıların bilgisayar ortamında katı modelleri ve üretim için gerekli olan .stl uzantılı dosya formatına dönüştürme işlemleri ABAQUS (Versiyon 6.14) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir

3.2 EFF Süreç Parametreleri ve Seviyelerinin Belirlenmesi

Bölüm 1.2'de verilen önceki çalışmalara bakıldığında, Erimiş Filament Fabrikasyonu tekniği ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri üzerinde en etkili olan süreç

parametrelerinin katman kalınlığı, nozül sıcaklığı ve baskı hızı olduğu belirlenmiştir. Araştırılacak süreç parametreleri dışında geri kalan parametreler üretim için kullanılan Artıboyut A1 Pro yazıcı ile PLA malzeme üretiminde “Varsayılan” olarak belirtilen değerler ile sabit tutulmuştur. Bu parametrelere Çizelge 3.1’de yer verilmiştir.

Çizelge 3.1: Sabit Tutulan Süreç Parametreleri

	Parametre	Değer
I.	Model Malzemesi	PLA+
II.	Destek Malzemesi	Kullanılmadı
III.	Tablaya Tutunma Biçimi	Raft
IV.	Tabla Sıcaklığı	60°C
V.	Nozül Çapı	0,4 mm
VI.	Fan Hızı	% 100
VII.	Oryantasyon	Z Eksenine Simetrik
VIII.	Geri Çekilme Hızı	40 mm/s
IX.	Baskı Esnasında Z Ekseninde Kafanın Yukarı Kalkma Mesafesi	1 mm

Bu çalışmada Taguchi Metodu ile oluşturulan deney tasarımı için seçilen üç parametrenin seviyeleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Bu seviyeler belirlenirken, yine üretim için kullanılan Artıboyut A1 Pro yazıcı ile PLA malzeme üretiminde “Varsayılan” olarak belirtilen ve Çizelge 3.3’te verilen değerler orta değerler olarak alınmıştır. Diğer iki seviye bu orta değerlerin altında üstünde değerler olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2: Süreç Parametre Seviyeleri

Süreç Parametreleri	Birimi	Seviyeleri
Katman Kalınlığı	mm	0,1 / 0,2 / 0,3
Nozül Sıcaklığı	°C	205 / 215 / 225
Baskı Hızı	mm/s	40 / 50 / 60

Çizelge 3.3: Varsayılan Numuneye ait Süreç Parametre Değerleri

Numune Adı	Katman Kalınlığı	Nozül Sıcaklığı	Baskı Hızı
Varsayılan	0,2 mm	215 °C	50 mm/s

Çizelge 3.2 ile verilen parametrelerin her birinden eşit sayıda seviyeye sahip olduğumuz için, L9 Taguchi ortogonal dizisi seçilerek setler oluşturulmuştur. Tüm setlerin sahip olduğu değerlere Çizelge 3.4’te yer verilmiştir. “T” harfleri Taguchi Yöntemini temsil ederken, yanında yer alan numaralar ise yöntemin sıra numarasını göstermektedir.

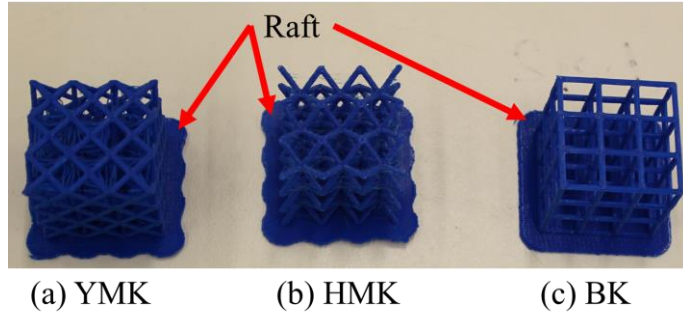
Çizelge 3.4: Deney Tasarımı

TAGUCHI L9 ORTOGONAL DİZİ			
	KATMAN KALINLIĞI (mm)	NOZÜL SICAKLIĞI °C	BASKI HIZI (mm/s)
T1	0,1	205	40
T2	0,1	215	50
T3	0,1	225	60
T4	0,2	205	50
T5	0,2	215	60
T6	0,2	225	40
T7	0,3	205	60
T8	0,3	215	40
T9	0,3	225	50

Burada gösterilen numuneler dışında bir adet tüm parametrelerin ortanca seviyelerine sahip olan ve Çizelge 3.3 ile verilen “Varsayılan” ismi verilen parametre değerleri de kıyaslama yapabilmek için eklenmiştir.

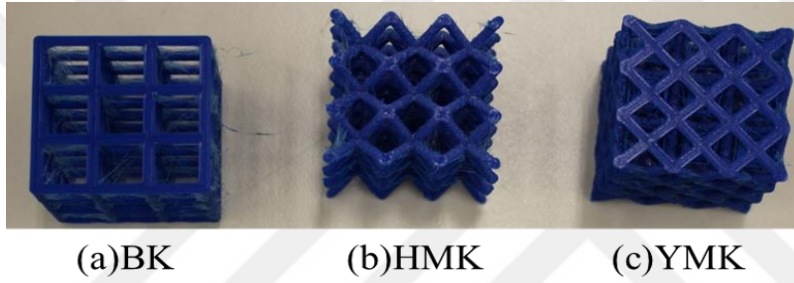
3.3 Numunelerin Üretimi

Çizelge 3.3’te ve Çizelge 3.4’te yer alan verilere göre, ArtıBoyut markasının A1 Pro Akıllı 3D Yazıcı’sı kullanılarak numuneler basılmıştır. Baskı almak için ABAQUS programında oluşturulan üç boyutlu numune geometrilerinin .stl uzantılı dosyaları yazıcıya aktarılırken CURA (Versiyon 3.4.1) isminde dilimleme (slicing) programı kullanılmıştır. Tablaya daha kolay tutunmasını ve düzgün baskı alınması için latis numunelerin altlarına raft eklenmiştir.



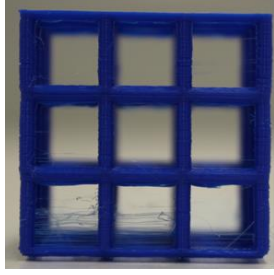
Şekil 3.1: Numunelerin Baskı Alındıktan Hemen Sonraki Raftlı Görüntüsü

Bunlar, numuneler basma testine maruz bırakılmadan hemen önce çıkarılmışlardır. Basma testine maruz bırakılan tüm numunelerin görüntüsü Şekil 3.2’de yer alan görseldeki gibidir.

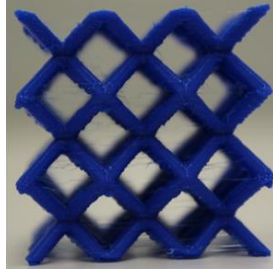


Şekil 3.2: Numunelerin Basma Testine Maruz Bırakılma Halleri

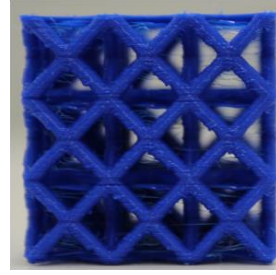
Her setten üçer tekrar yapılmış olup, toplamda 90 adet numune verisi elde edilmiştir. Varsayılan süreç parametreleri ile üretilen numunelerin önden görünüşleri Şekil 3.3’te verilmiştir. BK modellere ait numuneler Şekil 3.4’te, HMK ve YMK numune setlerinin önden görünüşleri de sırasıyla Şekil 3.5’te ve Şekil 3.6’da verilmiştir. Tüm deney seti (Varsayılan numuneler dahil olmak üzere) verilerin doğruluğunu sağlamak adına 3 kez tekrar edilmiştir. Detaylı açıklamalar ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak verilmiştir.



Varsayılan

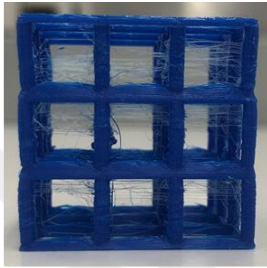


Varsayılan

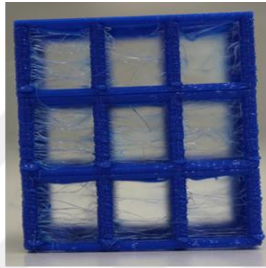


Varsayılan

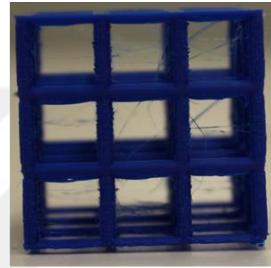
Şekil 3.3 : Varsayılan Numunelerin Önden Görünüşleri



T1



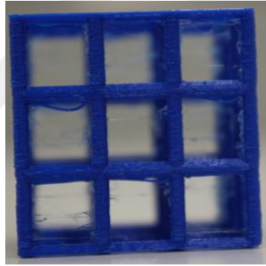
T2



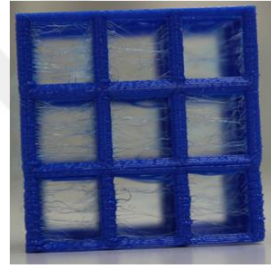
T3



T4



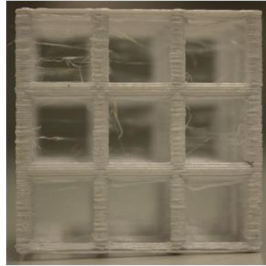
T5



T6



T7

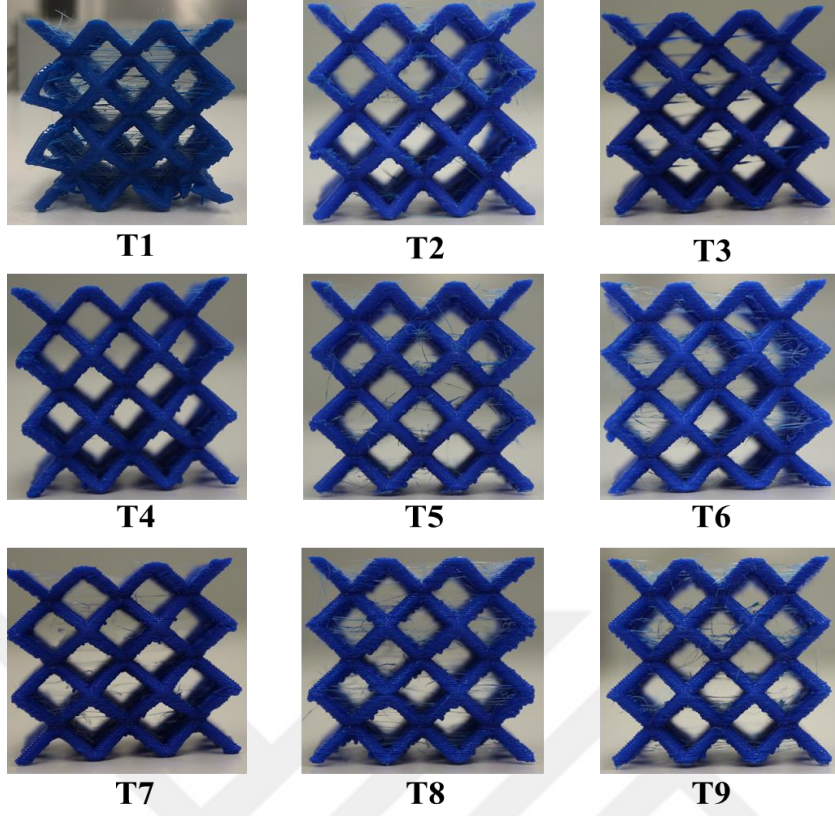


T8

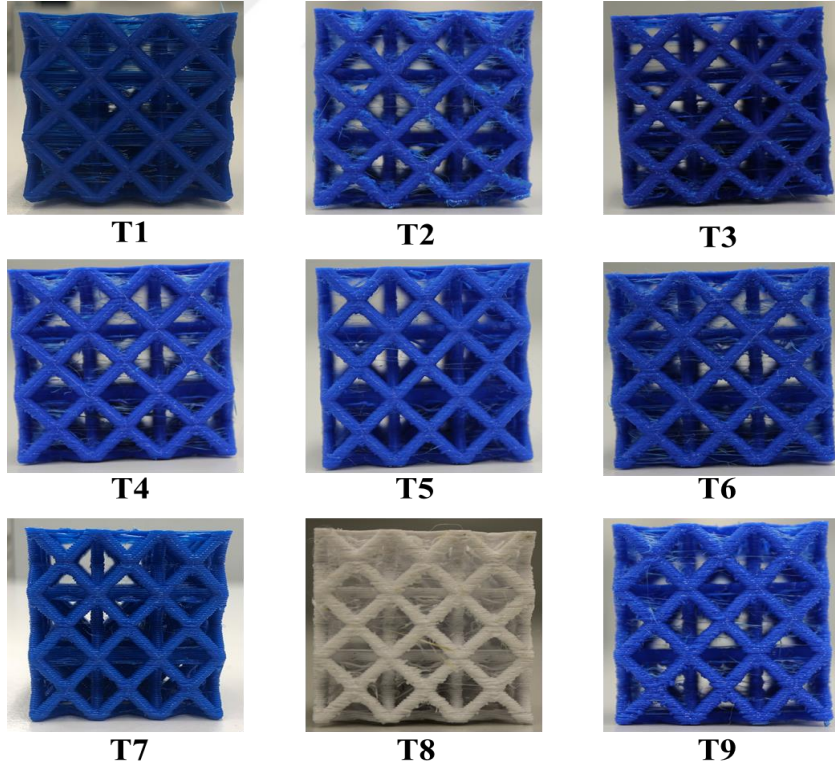


T9

Şekil 3.4 : Basit Kübik Numunelerin Önden Görünüşleri



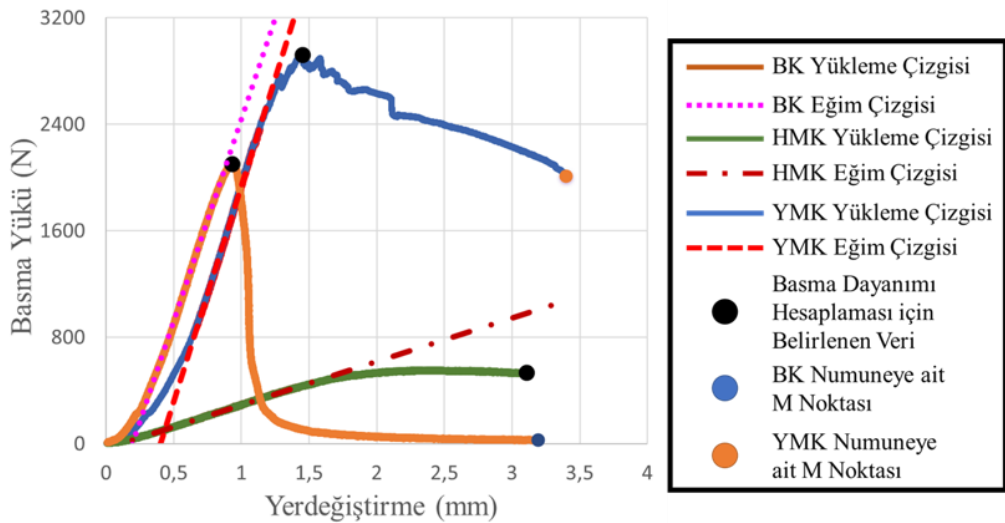
Şekil 3.5 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerin Önden Görünüşleri



Şekil 3.6 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Önden Görünüşleri

3.4 Basma Deneyi Sonuçları

Bu bölümde üretilen latis yapılar için basma deneylerinin yapılmasına ve sonuçlara yer verilmiştir. Bölüm 3.3'te açıklanan basma deneyleri 1.3 mm/dk hızla öncelikle Çizelge 3.3'teki varsayılan parametre değerleri ($KK = 0,2$ mm, $NS = 215^{\circ}C$, $BH = 50$ mm/s) ile üretilen numuneler için gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden BK, HMK ve YMK numuneler için elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 3.7'de verilmiştir. Grafikten de görülebileceği üzere, BK ve YMK numunelerin davranışı Şekil 2.4(a)'da yer alan basma davranışıyla örtüşmektedir. HMK numunelere ait davranış ise Şekil 2.4(b)'de basma davranışıyla benzerlik göstermektedir. Burada %10 deformasyon olarak adlandırılan ölçü, numune boyu 30 mm olduğu için, 3 mm'dir. Basma testi ile elde edilen grafikler üzerinden, akma gerçekleşmeden hesaplanan eğim ile, x eksenindeki izdüşümü olan O noktasından itibaren, 3 mm (%10 deformasyon) uzaklıkta yer alan nokta, M noktasıdır. Buna göre, Şekil 3.7'de siyah noktalar ile belirtilen verilere göre basma dayanımı hesabı yapılmaktadır. BK ve YMK numunelerde akma, hesaplanan M noktasından önce gerçekleştiği için, BK Yükleme Çizgisi ve YMK Yükleme Çizgisi üzerindeki siyah noktalar L noktasını temsil etmektedir. HMK numunelerde akma henüz gerçekleşmediği için, HMK Yükleme Çizgisi üzerindeki siyah nokta olan M noktasına tekabül eden veriye göre basma dayanımı hesaplanmıştır. Ayrıca BK ve YMK numunelerinin M noktası verileri sırasıyla mavi ve turuncu noktalar ile gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Varsayılan Parametre Değerleri ile Basma Testi Sonuçları BK, HMK ve YMK

Basma dayanımı hesapları yukarıda yer alan grafikte siyah noktaların temsil ettiği Basma Yüğü değerlerinden yapılmıştır. Bunun için kullanılan formülasyonlara örnek olarak, yukarıdaki grafikte yer alan veriler için yapılan hesaplamalar, Denklem (3.1)'de, Denklem (3.2)'de ve Denklem (3.3)'te verilmiştir.

$$Basma\ Dayanımı_{BK} = \frac{Basma\ Yüğü_{L\ noktası}}{Alan} = \frac{2100,17}{900} \quad (3.1)$$

$$Basma\ Dayanımı_{BK} = 2,334\ MPa$$

$$Basma\ Dayanımı_{HMK} = \frac{Basma\ Yüğü_{M\ noktası}}{Alan} = \frac{527,49}{900} \quad (3.2)$$

$$Basma\ Dayanımı_{HMK} = 0,586\ MPa$$

$$Basma\ Dayanımı_{YMK} = \frac{Basma\ Yüğü_{L\ noktası}}{Alan} = \frac{2917,1}{900} \quad (3.3)$$

$$Basma\ Dayanımı_{YMK} = 3,241\ MPa$$

Basma modülü hesaplamaları ise Denklem (2.1)'de verildiği gibi yapılmıştır. Eğim çizgisi belirlenirken, her numune için elastik bölgede yer alan üç farklı noktadan veri alınmıştır. Bu üç noktayı da temsil edecek bir eğim çizgisi çizilip, x eksenini kestiği nokta (O noktası) tespiti yapılmıştır. Ayrıca basma modülleri de bu seçilen üç noktanın ortalaması olarak (doğrusallığı sağlamak adına) not edilmiştir. Bu çalışmada tasarımı yapılan kübik numuneler için numune başlangıç yüksekliği (H) 30 mm, numunenin başlangıç kesit alanı (A) 900 mm² olarak alınmıştır. Basma modülü hesaplamalarına bir örnek olarak, yukarıdaki grafikte yer alan veriler kullanılarak, Denklem (3.4)'te, Denklem (3.5)'de ve Denklem (3.6)'da hesaplamalar verilmiştir.

$$\begin{aligned} &Basma\ Modülü_{BK} \\ &= \frac{Basma\ Yüğü_{Elastik\ Bölgede\ Seçilen\ Değer} * H}{A * Deformasyon_{Elastik\ Bölgede\ Seçilen\ Değer - O\ Noktası\ Değeri}} \\ &= \frac{1304,862 * 30}{900 * (0,626 - 0,198)} \quad (3.4) \end{aligned}$$

$$Basma\ Modülü_{BK} = 101,583\ MPa$$

$$\begin{aligned}
& \text{Basma Modülü}_{HMK} \\
&= \frac{\text{Basma Yüğü}_{\text{Elastik Bölgede Seçilen Değer}} * H}{A * \text{Deformasyon}_{\text{Elastik Bölgede Seçilen Değer-O Noktası Değeri}}} \\
&= \frac{221,1431 * 30}{900 * (0,789 - 0,111)} \quad (3.5)
\end{aligned}$$

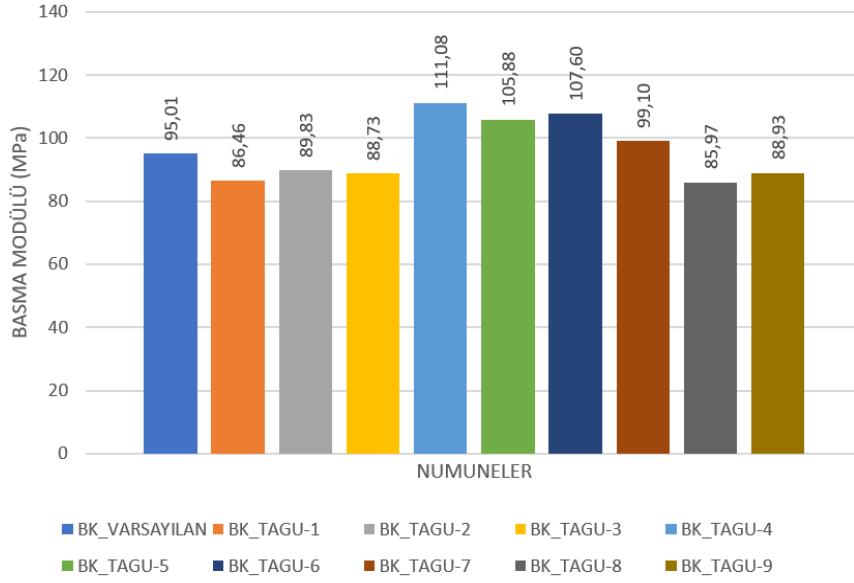
$$\text{Basma Modülü}_{HMK} = 10,878 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Basma Modülü}_{YMK} \\
&= \frac{\text{Basma Yüğü}_{\text{Elastik Bölgede Seçilen Değer}} * H}{A * \text{Deformasyon}_{\text{Elastik Bölgede Seçilen Değer-O Noktası Değeri}}} \\
&= \frac{2348,315 * 30}{900 * (1,13 - 0,403)} \quad (3.6)
\end{aligned}$$

$$\text{Basma Modülü}_{YMK} = 107,6382 \text{ MPa}$$

Tüm Taguchi serilerinde aynı kafes türleri için aynı davranışlar elde edildiğinden bu grafiklerin ve hesaplamaların hepsinin gösterimi yapılmamıştır. Basma modülü hesabı için yapılan elastik bölgede yer alan üç noktadan veri alınması işlemi her bir numune için tekrarlanmıştır. Ayrıca deney düzeneği de tüm numuneler için üç kez tekrar edilmiştir. Basma modülü hesabı için, her bir parametre kombinasyonuna ait dokuz adet nokta bulunmaktadır. Aşağıda yer alan tablolarda her bir numune için dokuz noktanın ortalama değerleri ve standart sapmaları gösteren çizelgelere yer verilmiştir. Standart sapma değeri yükseldikçe, verilerin güvenilirliği azalır.

Tüm Taguchi serileri ve varsayılan parametre için elde edilen grafiklerden, yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen ortalama basma modülleri BK, HMK ve YMK için sırasıyla Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir. Standart sapmaları ve basma modülleri tam değerleri Çizelge 3.5, Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7'de yer almaktadır.



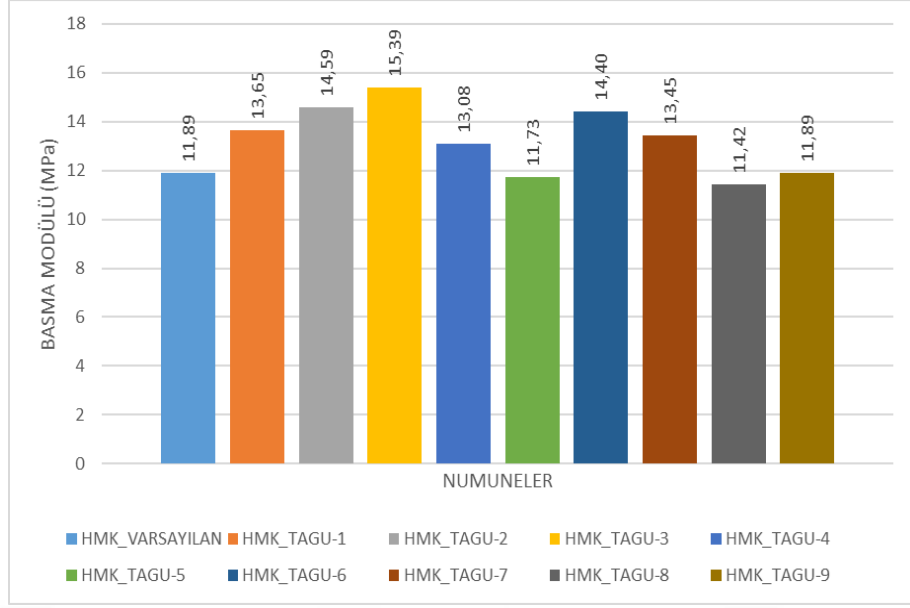
Şekil 3.8 : BK Numunelerin Basma Modülleri

Çizelge 3.5 : BK Numunelere ait Basma Modülü Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları

BK Basma Modülleri																			
Varsayılan	92,22	T1	89,83	T2	89,95	T3	91,90	t4	112,27	T5	97,75	T6	122,98	T7	109,67	T8	92,46	T9	83,45
Varsayılan	83,35	T1	89,27	T2	85,64	T3	90,66	t4	109,35	T5	92,77	T6	124,25	T7	89,08	T8	85,56	T9	81,29
Varsayılan	84,55	T1	91,36	T2	86,83	T3	89,83	t4	110,37	T5	94,02	T6	123,69	T7	91,74	T8	87,51	T9	81,78
Varsayılan	108,27	T1	88,62	T2	95,35	T3	86,65	t4	108,54	T5	111,83	T6	92,94	T7	111,92	T8	83,43	T9	85,51
Varsayılan	101,58	T1	83,28	T2	87,07	T3	88,19	t4	106,81	T5	108,07	T6	92,73	T7	92,23	T8	84,94	T9	84,39
Varsayılan	102,33	T1	86,53	T2	88,70	T3	89,21	t4	110,19	T5	108,61	T6	93,75	T7	93,72	T8	86,02	T9	85,73
Varsayılan	96,21	T1	84,80	T2	93,08	T3	85,42	t4	114,06	T5	113,46	T6	105,93	T7	106,76	T8	88,83	T9	99,80
Varsayılan	92,90	T1	81,58	T2	90,00	T3	86,51	t4	113,64	T5	112,76	T6	106,31	T7	98,16	T8	81,53	T9	99,42
Varsayılan	93,65	T1	82,83	T2	91,89	T3	90,19	t4	114,51	T5	113,70	T6	105,86	T7	98,62	T8	83,39	T9	98,95
Ortalamalar	95,01		86,46		89,83		88,73		111,08		105,88		107,60		99,10		85,97		88,93
Standart Sapmalar	8,17		3,49		3,18		2,18		2,68		8,60		13,27		8,41		3,29		7,99

BK numunelerin basma modülü için yapılan hesaplamalara göre, en iyi sonuç T4 (KK = 0,2 mm, NS = 205°C, BH = 50 mm/s) iken, en kötü sonuç T8 (KK = 0,3 mm, NS = 215°C, BH = 40 mm/s) olmuştur.

BK numunelere ait basma modülünün standart sapma değerleri için yapılan işlemler sonucunda en az standart sapmaya sahip sonuç T3 (KK = 0,1 mm, NS = 225°C, BH = 60 mm/s) iken, en çok standart sapmaya sahip sonuç T6 (KK = 0,2 mm, NS = 225°C, BH = 40 mm/s) olmuştur.



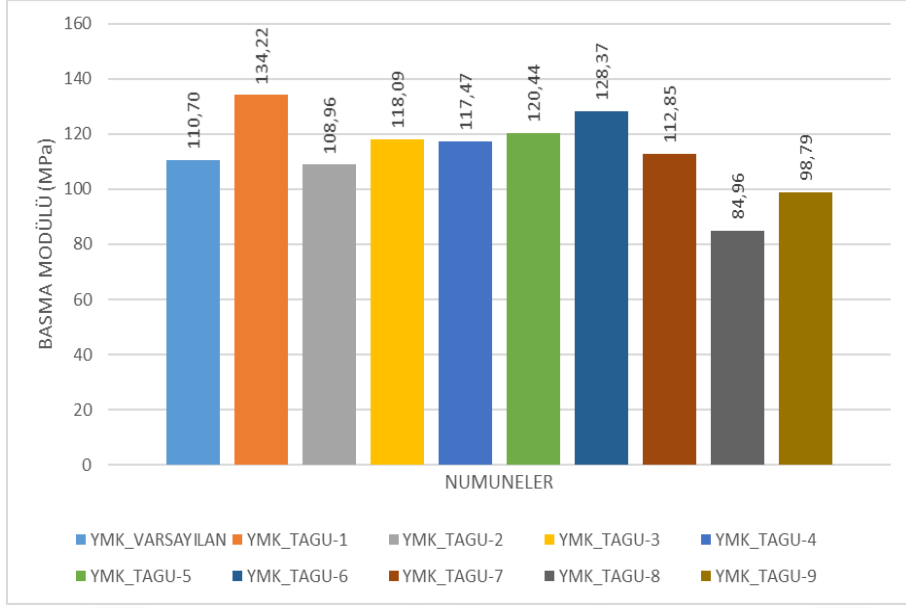
Şekil 3.9: HMK Numunelerin Basma Modülleri

Çizelge 3.6 : HMK Numunelere ait Basma Modülü Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları

HMK Basma Modülleri																			
Varsayılan	10,49	T1	13,52	T2	15,90	T3	14,63	t4	12,78	T5	11,90	T6	15,56	T7	13,35	T8	11,58	T9	12,01
Varsayılan	10,87	T1	13,83	T2	14,92	T3	14,76	t4	12,94	T5	11,88	T6	15,66	T7	13,54	T8	11,49	T9	12,29
Varsayılan	10,84	T1	13,41	T2	15,10	T3	14,59	t4	12,72	T5	11,65	T6	15,62	T7	13,53	T8	11,71	T9	12,17
Varsayılan	10,88	T1	14,50	T2	13,75	T3	15,42	t4	13,02	T5	11,19	T6	13,52	T7	13,32	T8	11,00	T9	11,67
Varsayılan	10,97	T1	14,45	T2	13,21	T3	15,33	t4	13,26	T5	11,23	T6	12,91	T7	13,17	T8	11,00	T9	11,67
Varsayılan	10,93	T1	14,28	T2	13,42	T3	15,01	t4	13,07	T5	11,19	T6	13,04	T7	13,31	T8	10,76	T9	11,97
Varsayılan	13,79	T1	12,79	T2	15,40	T3	16,05	t4	13,48	T5	12,06	T6	14,26	T7	13,47	T8	11,75	T9	11,63
Varsayılan	14,16	T1	13,03	T2	14,81	T3	16,46	t4	13,27	T5	12,35	T6	14,73	T7	13,72	T8	11,81	T9	11,78
Varsayılan	14,12	T1	13,02	T2	14,82	T3	16,30	t4	13,15	T5	12,10	T6	14,27	T7	13,61	T8	11,67	T9	11,80
Ortalamalar	11,89		13,65		14,59		15,39		13,08		11,73		14,40		13,45		11,42		11,89
Standart Sapmalar	1,61		0,65		0,92		0,72		0,24		0,44		1,09		0,17		0,39		0,24

HMK numunelerin basma modülü için yapılan hesaplamalara göre, en iyi sonuç T3 (KK = 0,1 mm, NS = 225°C, BH = 60 mm/s) iken, en kötü sonuç T8 (KK = 0,3 mm, NS = 215°C, BH = 40 mm/s) olmuştur.

HMK numunelere ait basma modülünün standart sapma değerleri için yapılan işlemler sonucunda en az standart sapmaya sahip sonuç T7 (KK = 0,3 mm, NS = 205°C, BH = 60 mm/s) iken, en çok standart sapmaya sahip sonuç Varsayılan (KK = 0,2 mm, NS = 215°C, BH = 50 mm/s) olmuştur.



Şekil 3.10 : YMK Numunelerin Basma Modülleri

3.7 : YMK Numunelere ait Basma Modülü Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları

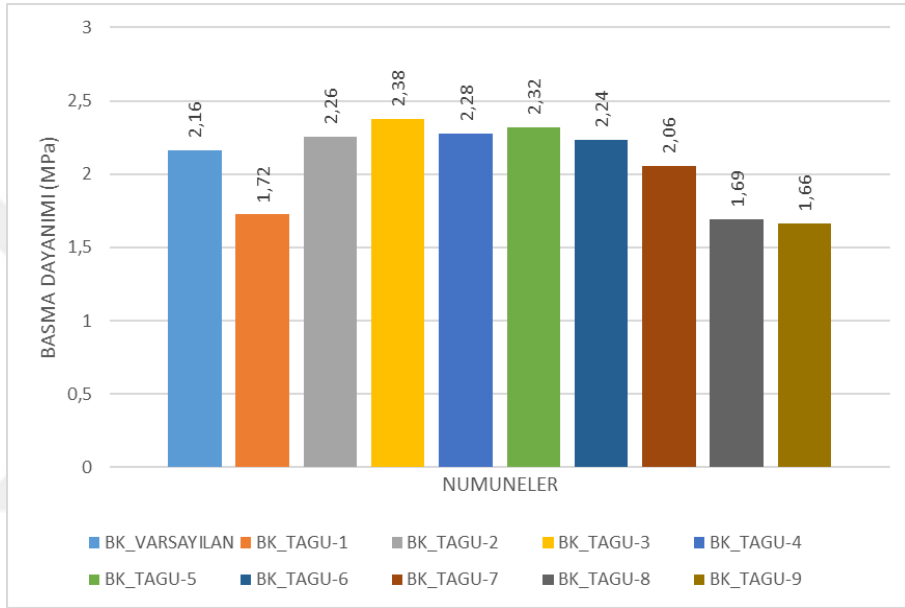
YMK Basma Modülleri																			
Varsayılan	102,78	T1	138,15	T2	108,96	T3	117,24	t4	129,76	T5	116,53	T6	135,62	T7	112,60	T8	79,46	T9	99,77
Varsayılan	102,43	T1	136,79	T2	109,91	T3	118,95	t4	132,73	T5	134,65	T6	132,70	T7	113,53	T8	82,64	T9	101,92
Varsayılan	105,15	T1	133,72	T2	108,87	T3	117,24	t4	130,20	T5	116,07	T6	132,66	T7	111,49	T8	80,83	T9	99,18
Varsayılan	107,23	T1	130,87	T2	105,33	T3	119,37	t4	101,57	T5	120,94	T6	133,05	T7	117,67	T8	80,97	T9	94,05
Varsayılan	107,30	T1	133,54	T2	105,60	T3	121,78	t4	103,60	T5	122,39	T6	133,50	T7	115,16	T8	82,64	T9	98,54
Varsayılan	107,64	T1	132,26	T2	105,50	T3	119,84	t4	102,17	T5	119,90	T6	132,42	T7	112,52	T8	81,66	T9	97,12
Varsayılan	123,28	T1	*	T2	112,84	T3	117,72	t4	118,56	T5	115,64	T6	117,92	T7	111,52	T8	93,91	T9	96,11
Varsayılan	120,50	T1	*	T2	112,87	T3	115,64	t4	119,37	T5	120,49	T6	119,53	T7	112,09	T8	91,48	T9	102,25
Varsayılan	120,02	T1	*	T2	110,79	T3	115,04	t4	119,28	T5	117,33	T6	117,97	T7	109,11	T8	91,07	T9	100,14
Ortalamalar	110,70		134,22		108,96		118,09		117,47		120,44		128,37		112,85		84,96		98,79
Standart Sapmalar	8,19		2,75		2,98		2,12		12,42		5,85		7,50		2,43		5,53		2,67

YMK numunelerin basma modülü için yapılan hesaplamalara göre, en iyi sonuç T1 (KK = 0,1 mm, NS = 205°C, BH = 40 mm/s) iken, en kötü sonuç T8 (KK = 0,3 mm, NS = 215°C, BH = 40 mm/s) olmuştur.

YMK numunelere ait basma modülünün standart sapma değerleri için yapılan işlemler sonucunda en az standart sapmaya sahip sonuç T3 (KK = 0,1 mm, NS = 225°C, BH = 60 mm/s) iken, en çok standart sapmaya sahip sonuç Varsayılan (KK = 0,2 mm, NS = 215°C, BH = 50 mm/s) olmuştur.

Çizelgede yer alan “*” ile gösterilen hücreler, baskı alınamayan tek numuneyi temsil etmektedir. Ortalama değer, altı farklı noktadan alınan verilere göre hesaplanmıştır. Tüm deney setinde sadece 1 numunede bu durum yaşanmıştır.

Aynı şekilde, tüm Taguchi serileri ve varsayılan parametre için elde edilen grafiklerden, yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen basma dayanımları BK, HMK ve YMK için sırasıyla Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’te verilmiştir. Standart sapmaları ve basma dayanımları Çizelge 3.8, Çizelge 3.9 ve Çizelge 3.10’da yer almaktadır.



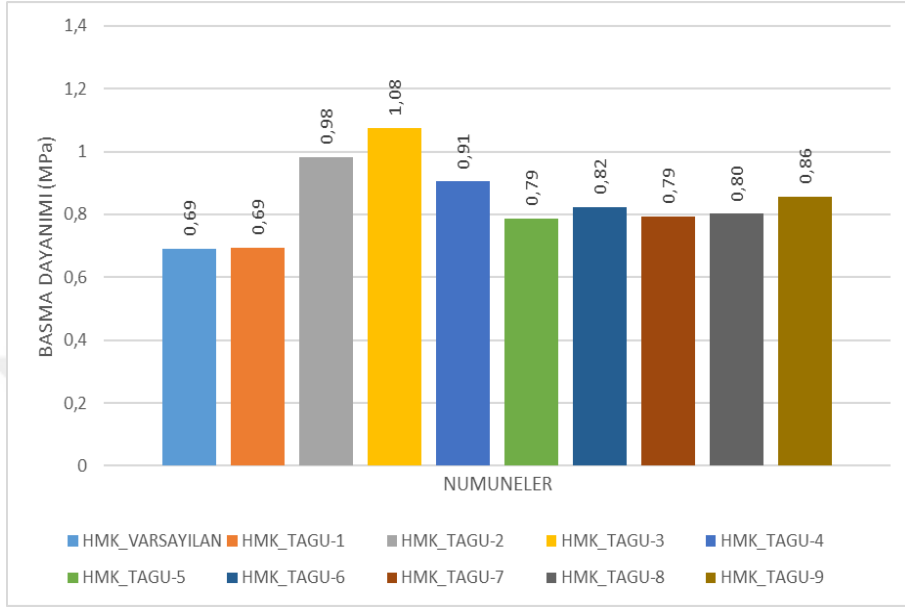
Şekil 3.11 : Basit Kübik Numunelerin Basma Dayanımları

Çizelge 3.8 : BK Numunelere ait Basma Dayanımı Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları

BK Basma Dayanımları																			
Varsayılan	2,11	T1	1,78	T2	2,20	T3	2,28	t4	2,26	T5	2,27	T6	2,29	T7	2,00	T8	1,72	T9	1,73
Varsayılan	2,33	T1	1,72	T2	2,22	T3	2,43	t4	2,22	T5	2,19	T6	2,21	T7	2,09	T8	1,66	T9	1,33
Varsayılan	2,04	T1	1,68	T2	2,35	T3	2,43	t4	2,35	T5	2,51	T6	2,22	T7	2,08	T8	1,68	T9	1,93
Ortalamalar	2,16		1,72		2,26		2,38		2,28		2,32		2,24		2,06		1,69		1,66
Standart Sapmalar	0,15		0,05		0,08		0,08		0,07		0,17		0,04		0,05		0,03		0,31

BK numunelerin basma dayanımı için yapılan hesaplamalara göre, en iyi sonuç T3 (KK = 0,1 mm, NS = 225°C, BH = 60 mm/s) iken, en kötü sonuç T9 (KK = 0,3 mm, NS = 225°C, BH = 50 mm/s) olmuştur.

BK numunelere ait basma dayanımının standart sapma değerleri için yapılan işlemler sonucunda en az standart sapmaya sahip sonuç T8 (KK = 0,3 mm, NS = 215°C, BH = 40 mm/s) iken, en çok standart sapmaya sahip sonuç T9 (KK = 0,3 mm, NS = 225°C, BH = 50 mm/s) olmuştur.



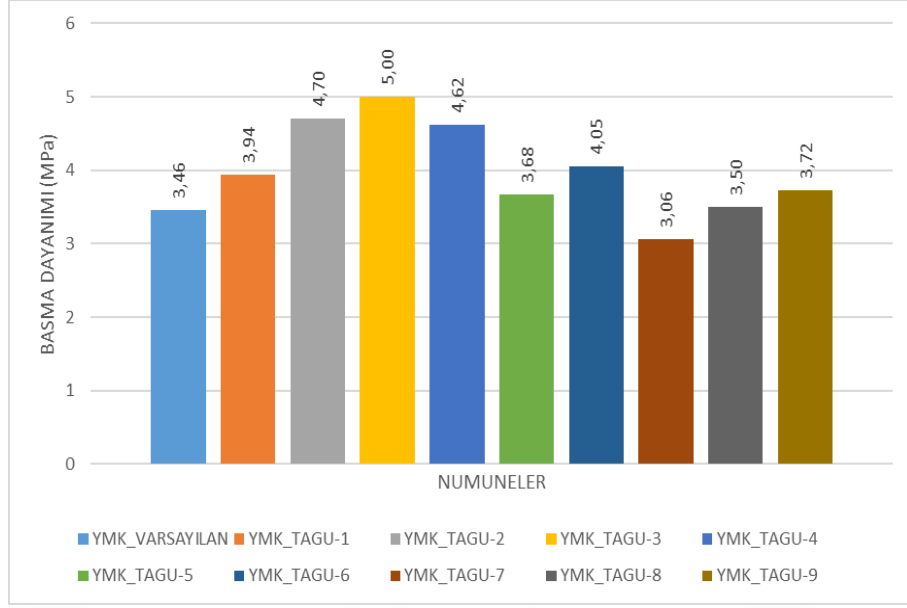
Şekil 3.12 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerin Basma Dayanımları

Çizelge 3.9: HMK Numunelere ait Basma Dayanımı Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları

HMK Basma Dayanımları																			
Varsayılan	0,62	T1	0,69	T2	0,96	T3	1,10	t4	0,89	T5	0,73	T6	0,83	T7	0,79	T8	0,80	T9	0,87
Varsayılan	0,59	T1	0,67	T2	0,99	T3	1,06	t4	0,92	T5	0,72	T6	0,79	T7	0,79	T8	0,79	T9	0,86
Varsayılan	0,87	T1	0,72	T2	0,99	T3	1,06	t4	0,91	T5	0,91	T6	0,85	T7	0,80	T8	0,82	T9	0,85
Ortalamalar	0,69		0,69		0,98		1,07		0,91		0,79		0,82		0,79		0,80		0,86
Standart Sapmalar	0,16		0,02		0,02		0,02		0,02		0,11		0,03		0,01		0,02		0,01

HMK numunelerin basma dayanımı için yapılan hesaplamalara göre, en iyi sonuç T3 (KK = 0,1 mm, NS = 225°C, BH = 60 mm/s) iken, en kötü sonuç Varsayılan (KK = 0,2 mm, NS = 215°C, BH = 50 mm/s) olmuştur.

HMK numunelere ait basma dayanımının standart sapma değerleri için yapılan işlemler sonucunda en az standart sapmaya sahip sonuç T9 (KK = 0,3 mm, NS = 225°C, BH = 50 mm/s) iken, en çok standart sapmaya sahip sonuç Varsayılan (KK = 0,2 mm, NS = 215°C, BH = 50 mm/s) olmuştur.



Şekil 3.13 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Basma Dayanımları

Çizelge 3.10 : YMK Numunelere ait Basma Dayanımı Değerleri (MPa), Ortalamaları ve Standart Sapmaları

YMK Basma Dayanımları																			
Varsayılan	3,29	T1	4,09	T2	4,97	T3	5,16	t4	4,87	T5	3,73	T6	3,74	T7	3,12	t8	3,43	T9	3,55
Varsayılan	3,24	T1	3,80	T2	4,19	T3	4,83	t4	4,19	T5	3,59	T6	3,62	T7	3,05	t8	3,42	T9	3,72
Varsayılan	3,86	T1	*	T2	4,95	T3	4,83	t4	4,79	T5	3,71	T6	4,81	T7	3,02	t8	3,66	T9	3,90
Ortalamalar	3,46		3,94		4,70		4,94		4,62		3,68		4,05		3,06		3,51		3,72
Standart Sapmalar	0,35		0,20		0,44		0,19		0,37		0,08		0,65		0,05		0,13		0,18

YMK numunelerin basma dayanımı için yapılan hesaplamalara göre, en iyi sonuç T3 (KK = 0,1 mm, NS = 225°C, BH = 60 mm/s) iken, en kötü sonuç T7 (KK = 0,3 mm, NS = 205°C, BH = 60 mm/s) olmuştur.

YMK numunelere ait basma dayanımının standart sapma değerleri için yapılan işlemler sonucunda en az standart sapmaya sahip sonuç T5 (KK = 0,2 mm, NS = 215°C, BH = 60 mm/s) iken, en çok standart sapmaya sahip sonuç T6 (KK = 0,2 mm, NS = 225°C, BH = 40 mm/s) olmuştur.

Elde edilen sonuçların toplu hali Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Basma Modülü ve Basma Dayanımı Sonuçları Kıyaslaması

Hücre Tipi	Basma Modülü		Basma Dayanımı	
	En İyi	En Kötü	En İyi	En Kötü
BK	T4	T8	T3	T9
HMK	T3	T8	T3	Varsayılan
YMK	T1	T8	T3	T7

Görüldüğü üzere, yapılan deneylerin sonucunda basma modülü için her üç geometrinin de ortak olarak en kötü değere sahip olduğu parametre seti T8 (KK = 0,3 mm, NS = 215°C, BH = 40 mm/s) olmuştur. Basma dayanımı için ise, her üç geometrinin de ortak olarak en iyi değere sahip olduğu parametre seti T3 (KK = 0,1 mm, NS = 225°C, BH = 60 mm/s) olmuştur. Bununla alakalı çıkarımlar, bir sonraki bölümde hesaplanacak olan S/N oranı ve ANOVA sonuçları ile birleştirilerek yapılacaktır.

3.5 Kafes Yapıların Basma Testi Davranışlarının İncelenmesi

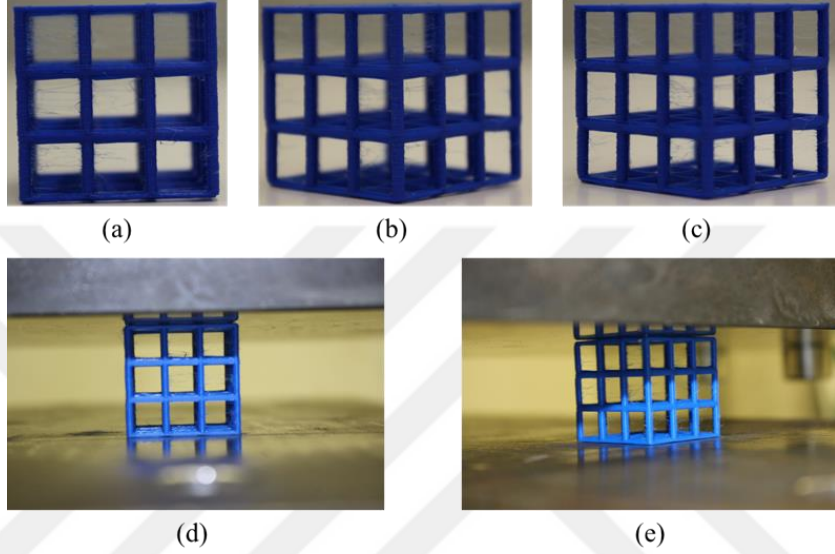
Basma testine tabi tutulan numunelerle ilgili, varsayılan parametrelerden başlanarak T9 setine kadar toplam 90 adet numunenin her birinin ayrı ayrı fotoğrafı çekilerek belgelenmiştir. Testler uygulanırken, basma testi cihazı levhaları ile numune yüzeyi arasına sürtünmeyi artırmak için herhangi bir şey sürülmemiştir. Gözlemlenen tüm davranışlar, sınır koşulu olarak tam yapışık ve tam serbest durum arasında gerçekleşmiştir.

Ezilmeye başladığı andan, basma testinin sıkışma testine dönmeye başladığı ana kadarlık aralıkta, numunelerin kırılma davranışları da gözlemlenmiştir. Özellikle BK numunelerde daha net olarak, kırılma gerçekleşmeden hemen önce, kısa bir süreliğine burkulma (buckling) olduğu tespit edilmiştir. Hücrelerde saptanan bu burkulma davranışı HMK ve YMK hücrelerde daha anlık ve dikkatli bakılmadan farkedilemeyecek düzeyde olmuştur.

Farklılıklar ve ortak noktalar barındırmakla birlikte, tüm numunelerde kendi içlerinde uyumlu davranışlar gözlemlenmiştir. Her bir kafes türü için basma testindeki davranışlar alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

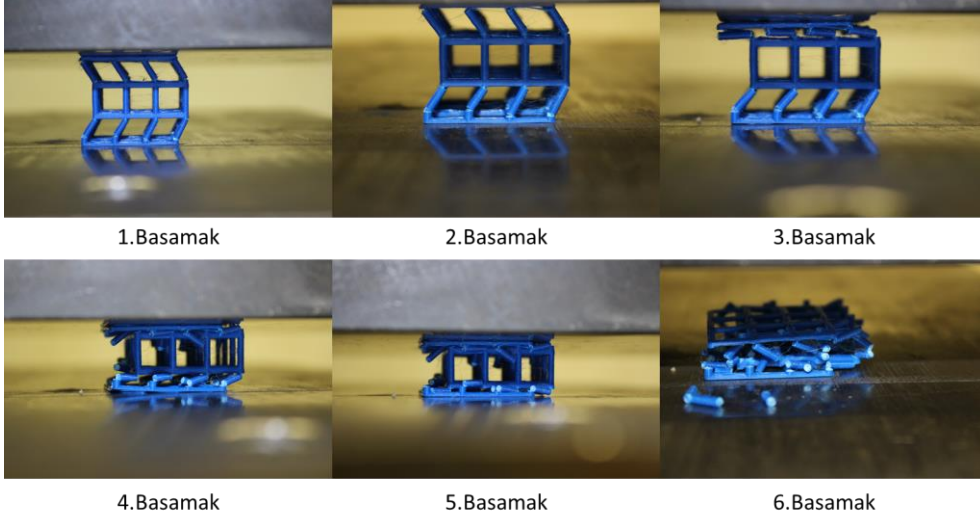
3.5.1 BK numuneler için basma testi davranışları

Şekil 3.7’de varsayılan parametrelerle oluşturulan çizelge, aslında tüm numunelerden elde edilen verilerin göstergesidir. Varsayılan parametrelerle basılan BK numunenin test öncesi görünüşü Şekil 3.14’te, basma testi esnasındaki önden görünüşü Şekil 3.15’te ve tam çaprazdan görünüşü Şekil 3.16’da verilmiştir. Varsayılan Parametreleri : $KK = 0,2 \text{ mm}$, $NS = 215^\circ\text{C}$, $BH = 50 \text{ mm/s}$

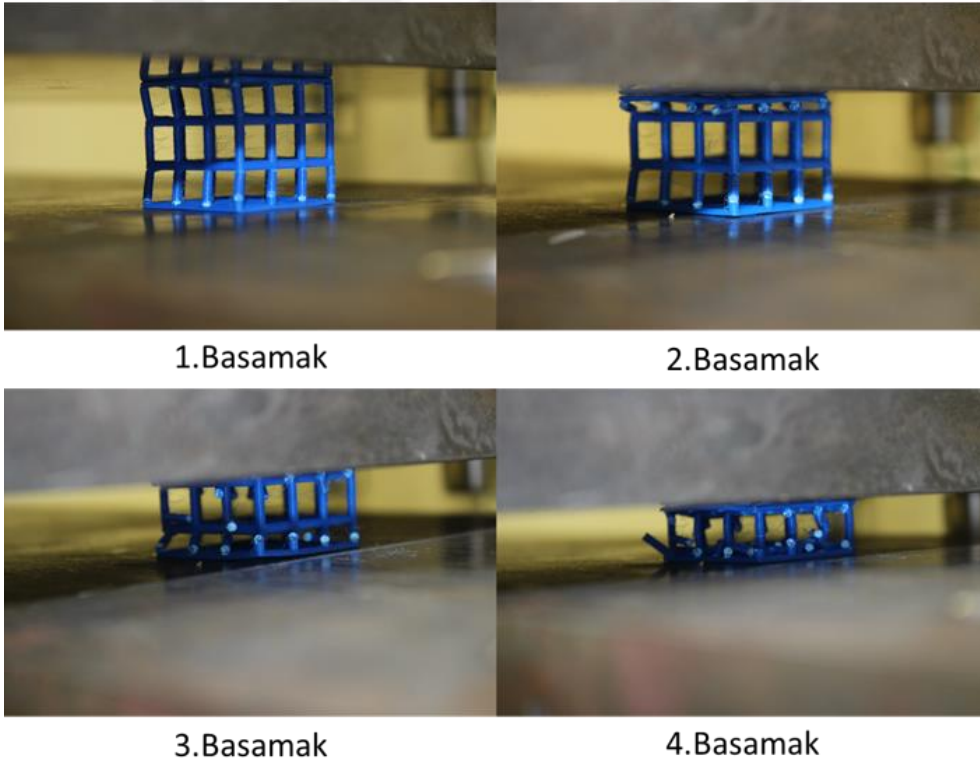


Şekil 3.14 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunenin Basma Testi Öncesi Görüntüsü (Numunenin test makinasına yerleştirilmeden önce Ön (a), Sol Çapraz (b), Sağ Çapraz (c) görüntüsü ile test makinasındaki Ön (d) ve Sol Çapraz (e) görüntüsü)

BK numunelerin, basma testine verdikleri karakteristik tepki, tıpkı Şekil 3.15’te yer alan 1.Basamak’ta da görülebileceği gibi, orta tabakanın bozulmadan üst ve alttaki tabakaların kırılmaya başlaması olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.16’da ise, 1.Basamak görüntüsünde numunenin kırılmaya başladığı anda dikmelerin üst ve alt tabanlarına bağlı oldukları yerden açılı kopmaya başladığı daha net olarak gözlemlenebilir.

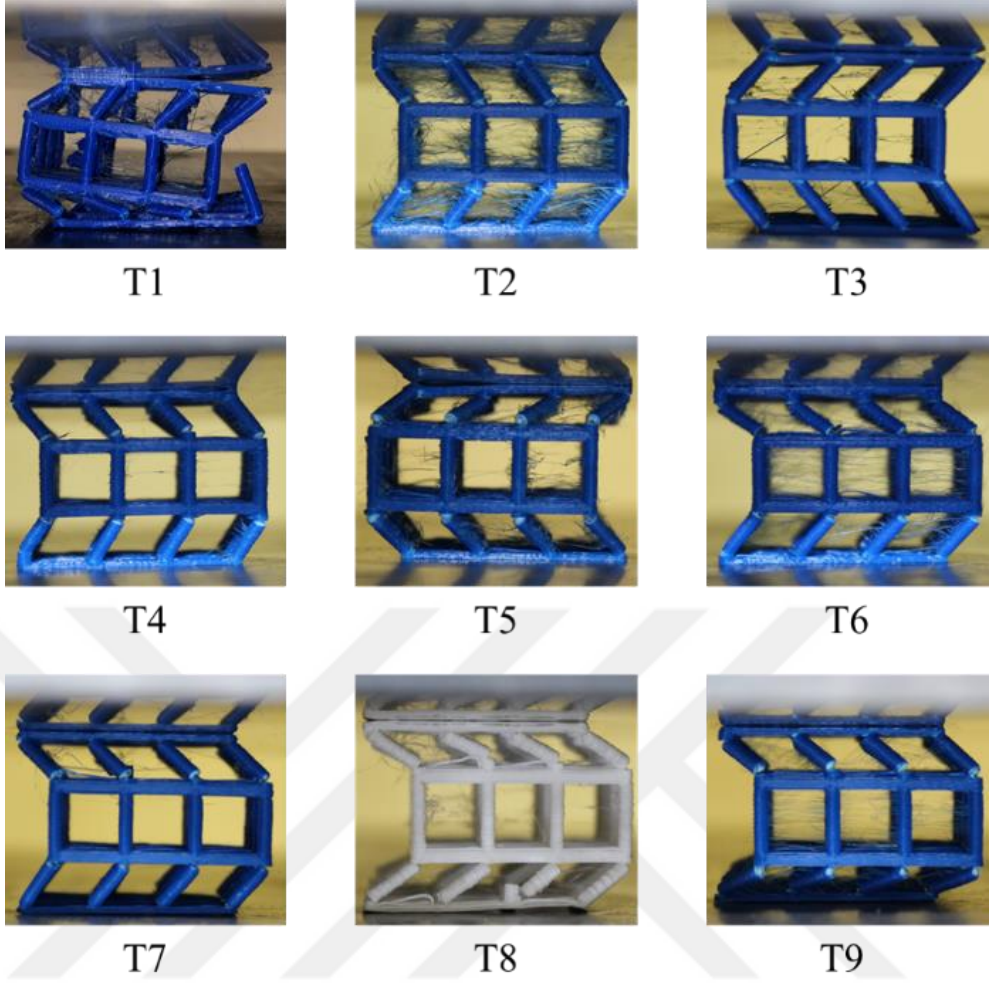


Şekil 3.15 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Önden Görüntüsü

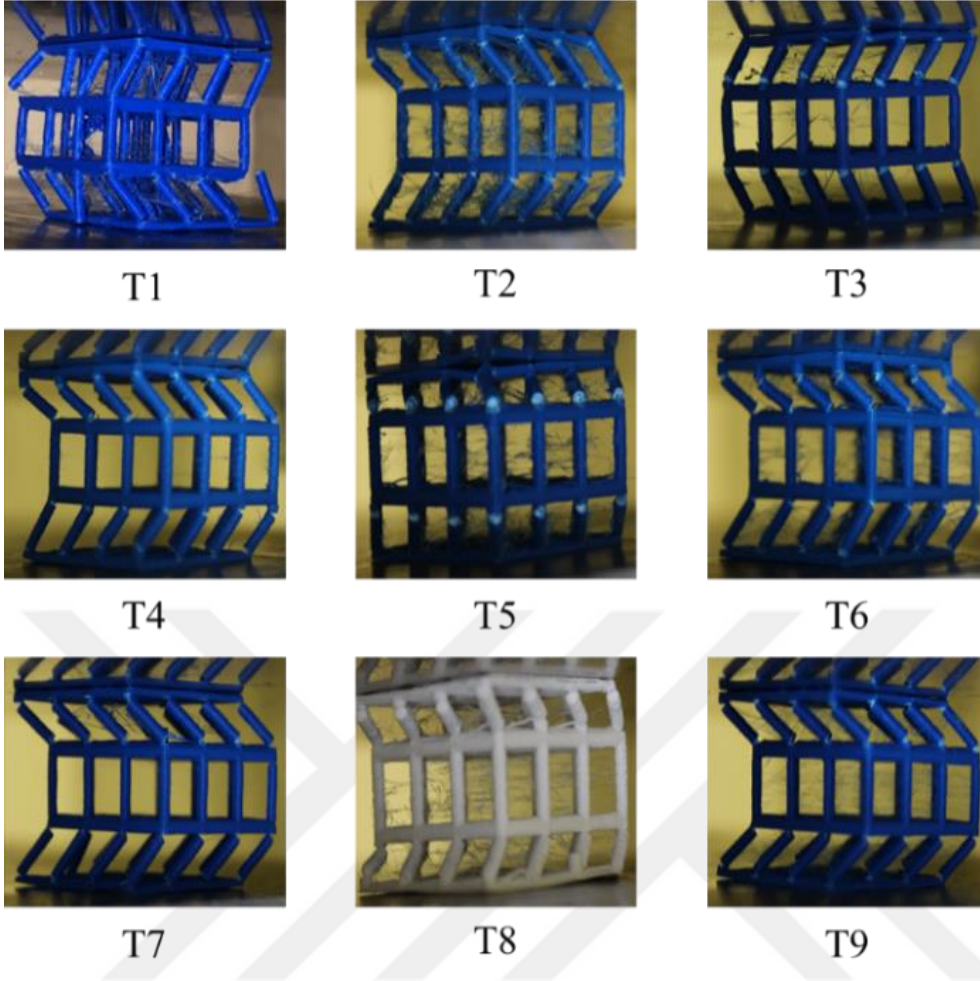


Şekil 3.16 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Çaprazdan Görüntüsü

Varsayılan numune dışında geri kalan parametrelerle oluşturulan numunelere ait 1.Basamak görüntüleri önden ve çaprazdan Şekil 3.17 ve Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.17 : Tüm Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 1.Basamak Önden Görüntüsü

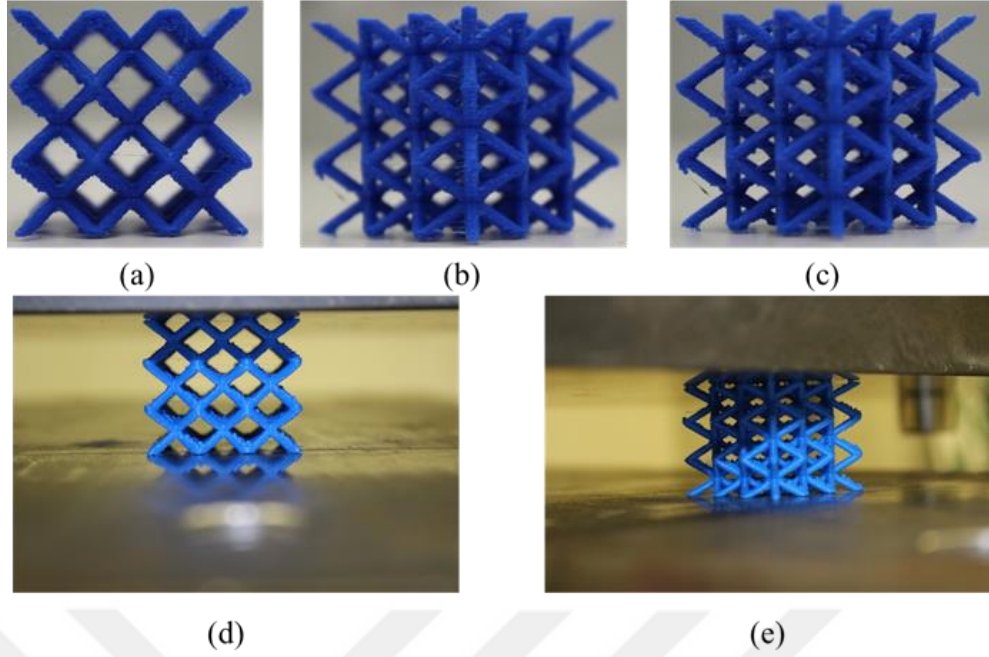


Şekil 3.18 : Tüm Parametrelerle Basılan Basit Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 1.Basamak Çaprazdan Görüntüsü

Tüm BK numunelerinde basma testi boyunca yukarıda yer alan şekillerde verildiği üzere test boyunca aynı davranış gözlemlenmiştir.

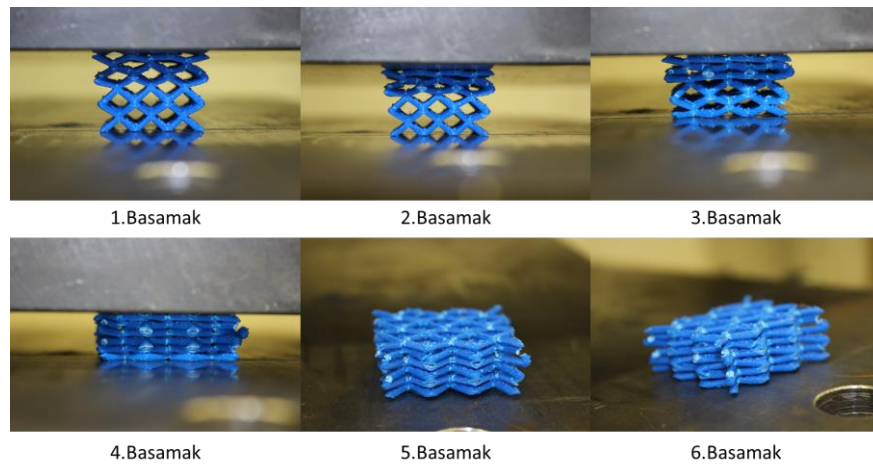
3.5.2 HMK numuneler için basma testi davranışları

Varsayılan parametrelerle basılan HMK numunenin test öncesi görünüşü Şekil 3.19'da, basma testi esnasındaki önden görünüşü Şekil 3.20'de ve tam çaprazdan görünüşü Şekil 3.21'de verilmiştir. Varsayılan Parametreleri : $KK = 0,2 \text{ mm}$, $NS = 215^\circ\text{C}$, $BH = 50 \text{ mm/s}$

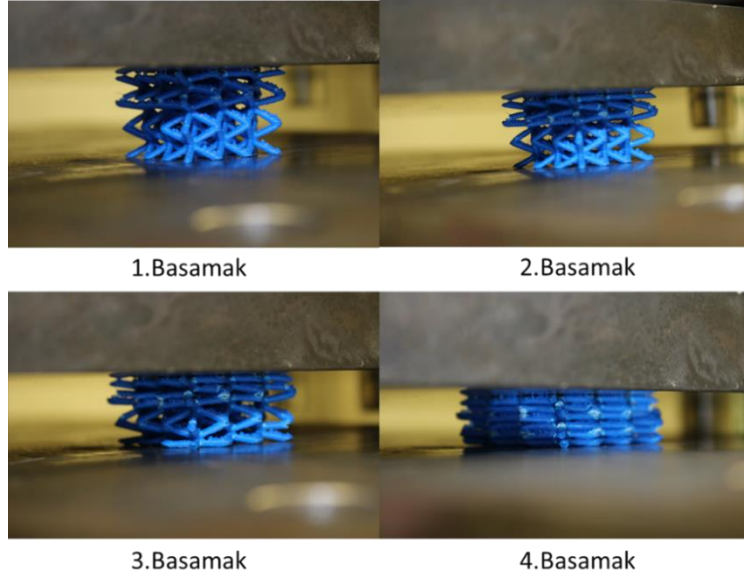


Şekil 3.19 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunenin Basma Testi Öncesi Görüntüsü (Numunenin test makinasına yerleştirilmeden önce Ön (a), Sol Çapraz (b), Sağ Çapraz (c) görüntüsü ile test makinasındaki Ön (d) ve Sol Çapraz (e) görüntüsü)

HMK numunelerin, basma testine verdikleri kendilerine özgü tepki, tıpkı Şekil 3.20'de yer alan 1.Basamak ve 2.Basamak'ta da görülebileceği gibi, yavaşça sıkıştırılan yay gibi davranmasıdır. En dışta yer alan dikmelerin birleştiği düğüm noktalarından kırılmaya başlamıştır. Şekil 3.21'deki 1.Basamak ve 2.Basamak görüntülerinde bu kırılma daha belirgindir.

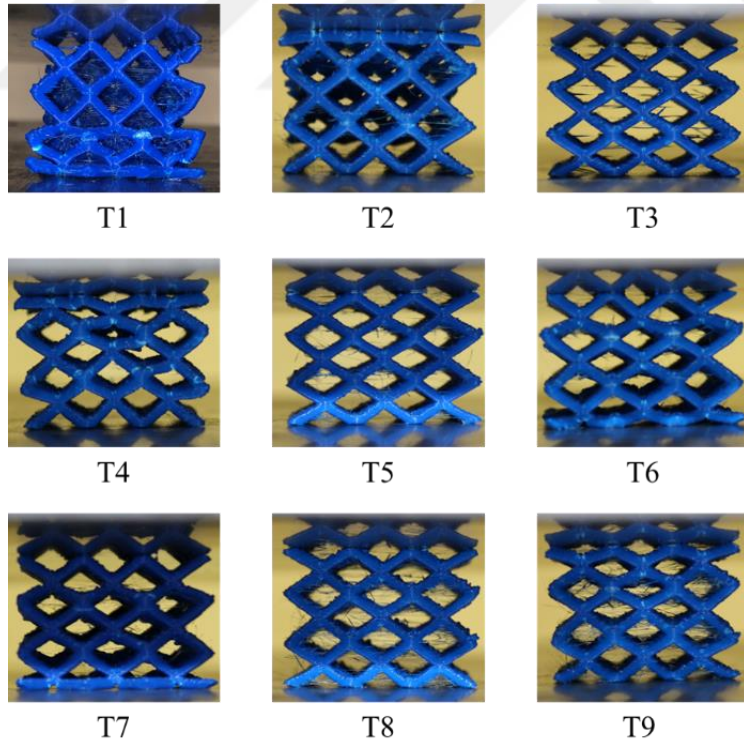


Şekil 3.20: Varsayılan Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Önden Görüntüsü

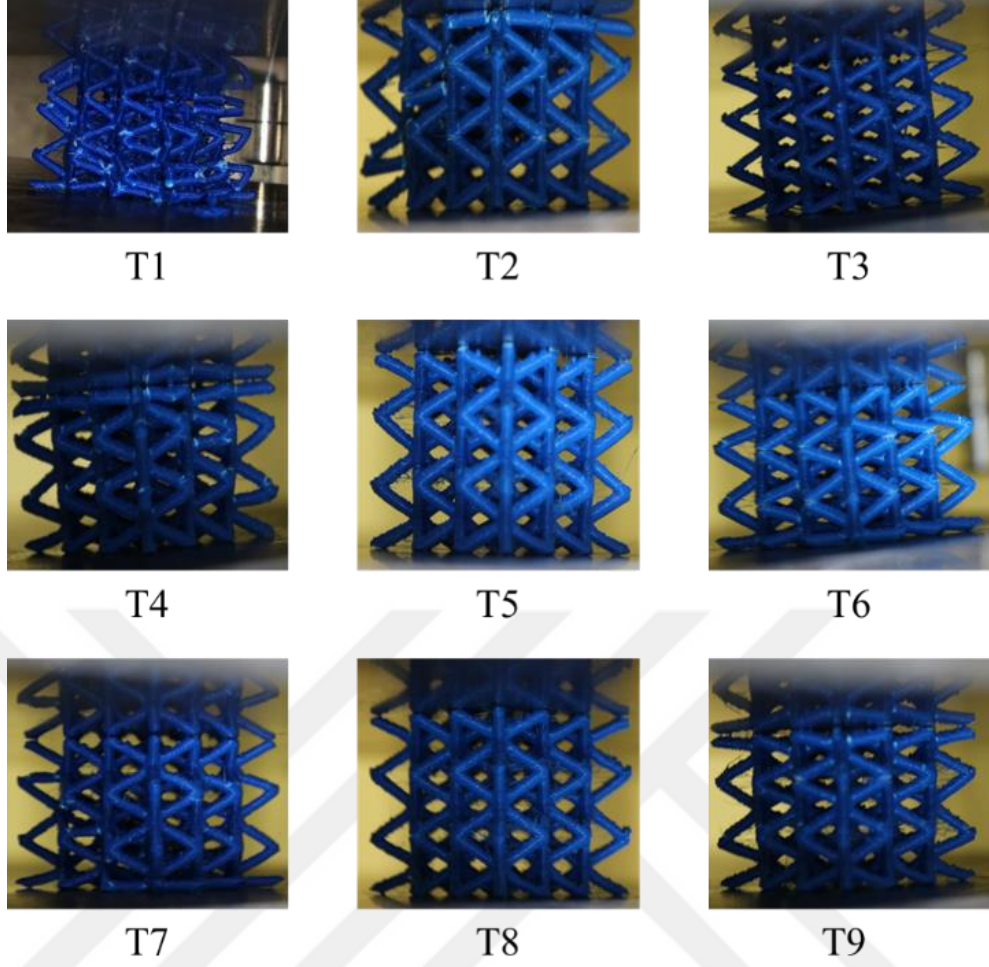


Şekil 3.21: Varsayılan Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Çaprazdan Görüntüsü

Varsayılan numune dışında geri kalan parametrelerle oluşturulan numunelere ait 1.Basamak görüntüleri önden ve çaprazdan Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.22: Tüm Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 1.Basamak Önden Görüntüsü

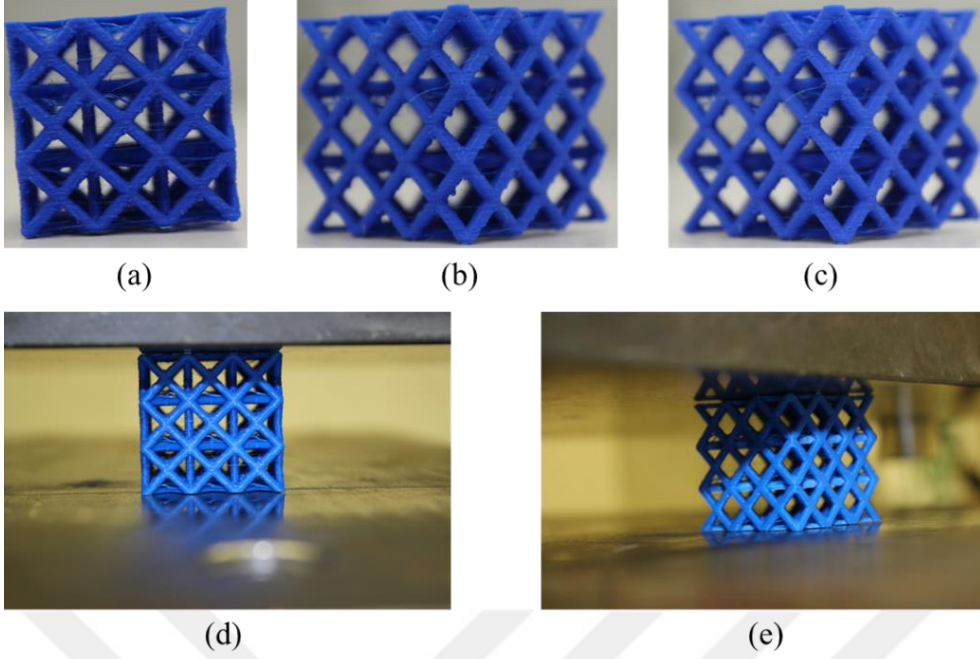


Şekil 3.23: Tüm Parametrelerle Basılan Hacim Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin 1.Basamak Çaprazdan Görüntüsü

Tüm HMK numunelerinde basma testi boyunca yukarıda yer alan şekillerde verildiği üzere test boyunca aynı davranış gözlemlenmiştir.

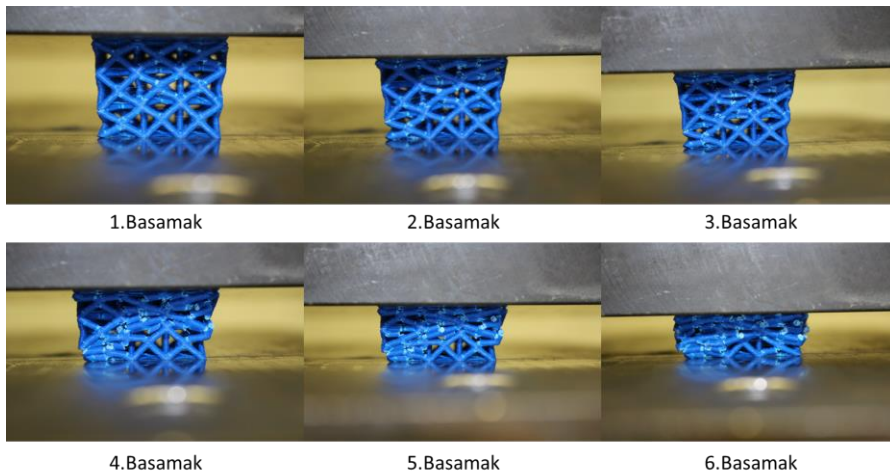
3.5.3 YMK numuneler için basma testi davranışları

Varsayılan parametrelerle basılan YMK numunenin test öncesi görünüşü Şekil 3.24'te, basma testi esnasındaki önden görünüşü Şekil 3.25'te ve tam çaprazdan görünüşü Şekil 3.26'da verilmiştir. Varsayılan Parametreleri : $KK = 0,2 \text{ mm}$, $NS = 215^\circ\text{C}$, $BH = 50 \text{ mm/s}$

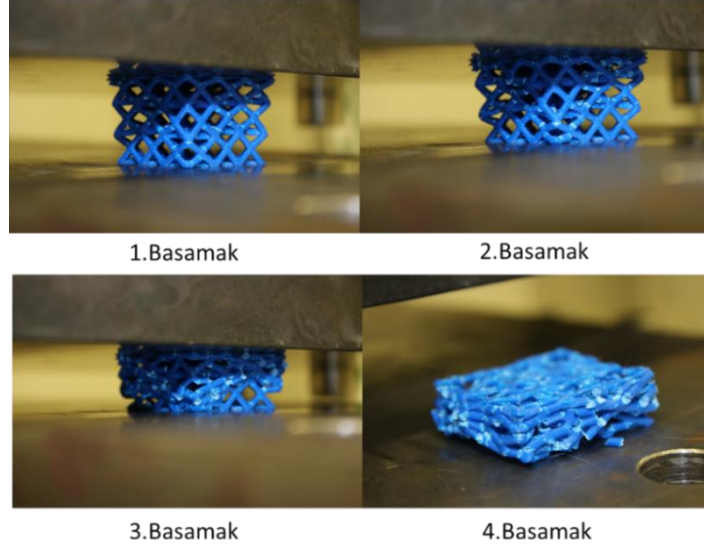


Şekil 3.24: Varsayılan Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunenin Basma Testi Öncesi Görüntüsü (Numunenin test makinasına yerleştirilmeden önce Ön (a), Sol Çapraz (b), Sağ Çapraz (c) görüntüsü ile test makinasındaki Ön (d) ve Sol Çapraz (e) görüntüsü)

YMK numunelerin, basma testine verdikleri kendilerine özgü tepki, tıpkı Şekil 3.25'te yer alan 2.Basamak ve 3.Basamak'ta da görülebileceği gibi, çaprazdan üçgen piramit oluşturacak şekildedir. Dikkatli bakıldığı zaman numuneye ait çapraz görüntülerin bulunduğu Şekil 3.26'da yer alan 2.Basamak'ta bu piramit gözlemlenebilir. Detaylandırma konunun devamında yapılacaktır.

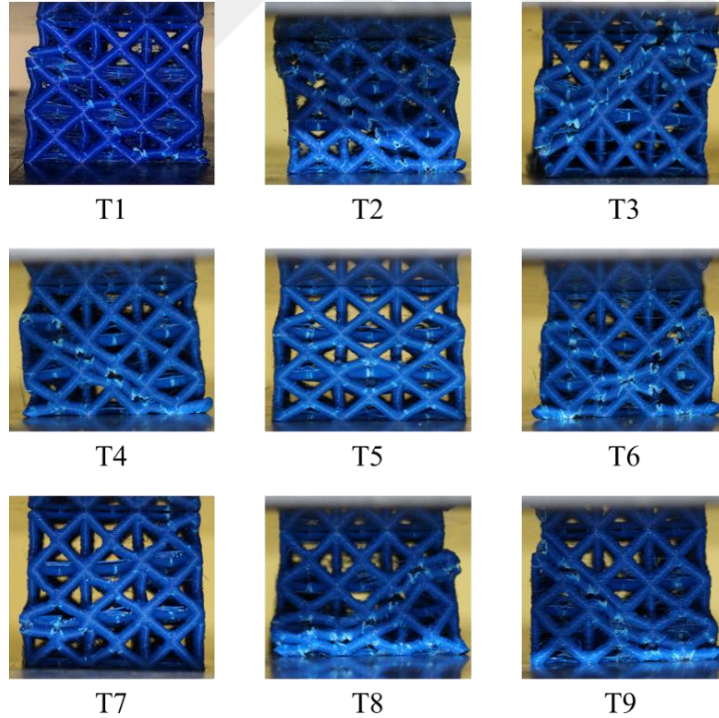


Şekil 3.25: Varsayılan Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Önden Görüntüsü

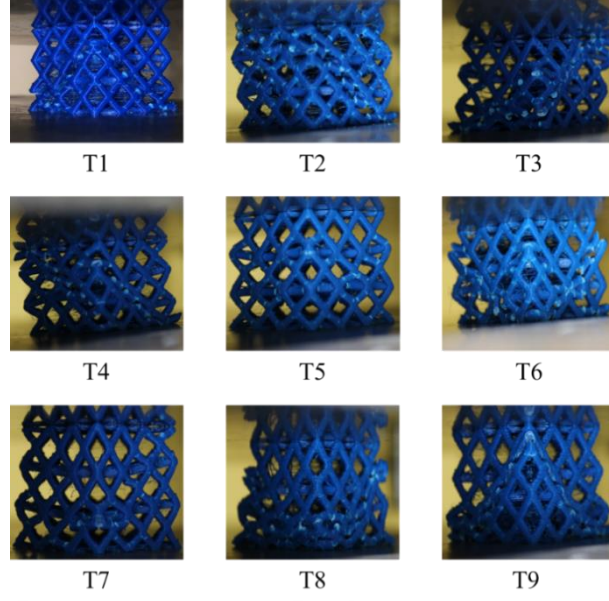


Şekil 3.26 : Varsayılan Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin Aşama Aşama Çaprazdan Görüntüsü

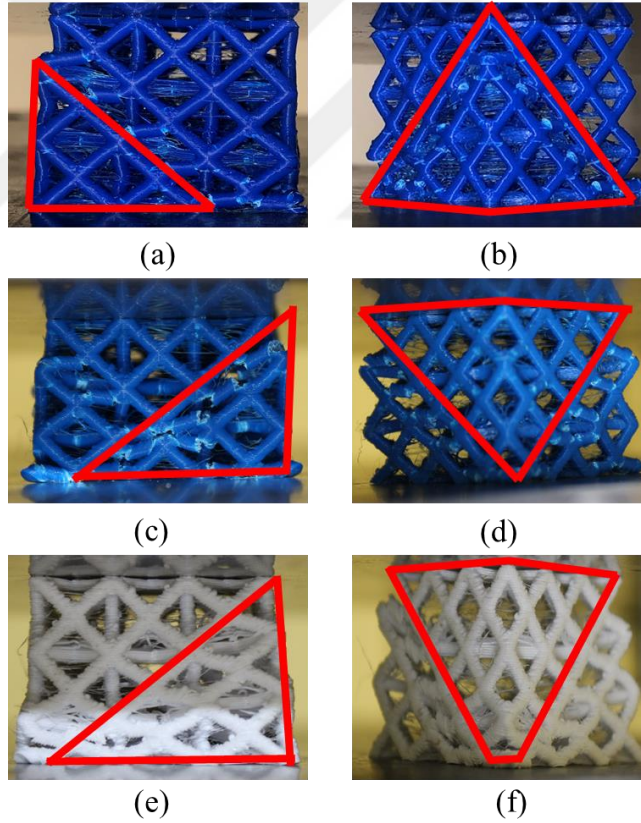
Varsayılan numune dışında geri kalan parametrelerle oluşturulan numunelere ait 1.Basamak görüntüleri önden ve çaprazdan Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de verilmiştir. Ayrıca piramit kırılma için görsele Şekil 3.29’da yer verilmiştir.



Şekil 3.27: Tüm Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 2.Basamak Önden Görüntüsü



Şekil 3.28: Tüm Parametrelerle Basılan Yüzey Merkezli Kübik Numunelerin Basma Testine Verdiği Tepkinin 2.Basamak Çaprazdan Görüntüsü



Şekil 3.29 : Yüzey Merkezli Kübik Numunenin Basma Testine Verdiği Tepkinin 2.Basamak Önden Çaprazdan Görüntüsü (T1 parametreleri ile basılan numunenin Ön (a) ve Sol Çapraz (b); T6 parametreleri ile basılan numunenin Ön (c) ve Sol Çapraz (d); T8 parametreleri ile basılan numunenin Ön (e) ve Sol Çapraz (f) Görüntüleri)

Tüm YMK numunelerinde kırılma başlangıcı Şekil 3.29'da verildiği gibi çapraz olarak gerçekleşmiştir. T1 parametreleri (KK = 0,1 mm, NS = 205°C, BH = 40 mm/s), T6 parametreleri (KK = 0,2 mm, NS = 225°C, BH = 40 mm/s) ve T8 parametreleri (KK = 0,3 mm, NS = 215°C, BH = 40 mm/s) ile baskı alınan numunelerin, aynı baskı hızıyla üretilmesi dışında diğer iki parametreleri farklı seviyelerde olmasına karşın, aynı piramit kırılmayla karşılaşmıştır. Önden ve çapraz olarak verilen görüntülere bakıldığında, hücrenin köşegen çizgisinden ya da paralelinden geçen kırılma çizgisinin, YMK numuneler için standart basma deneyi davranış olduğu gözlemlenmiştir.

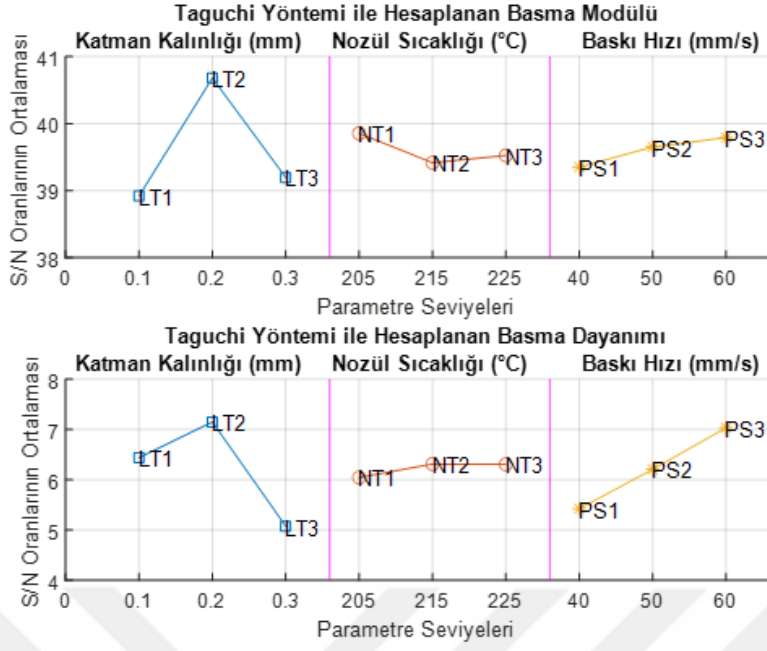
Yapılan testlerde ortak olarak gözlemlenen durum, numunelerin sahip olduğu dikmeler kırılmanın etkisiyle farklı konumlara gelerek baskı dayanımlarını arttırmıştır. Buna, pekleşme (gerinim sertleşmesi – strain hardening) [38] sebep olsa da bu çalışmada etkisi özel olarak incelenmemiştir. BK ve HMK numunelerde bu durum üst ve alt katmanlarda gözlemlenirken, YMK numunelerde ise hücreye ait köşegen çizgisinde gerçekleşmiştir.

3.6 S/N Oranı ve ANOVA Sonuçları

Bölüm 2.3'te anlatılan S/N oranı sonuçları, Bölüm 3.4'te basma deneylerinden elde edilen basma modülü ve basma dayanımı verileri için hesaplanmış ve varsayılan parametre seti hariç tüm Taguchi Metodu setlerinin sonuçları üç tip geometrik numune tipi için grafikleştirilmiştir.

3.6.1 BK numuneler için S/N oranı ve ANOVA sonuçları

BK numunelere ait basma modülü ve basma dayanımı için S/N oranları hesaplanıp Şekil 3.30'da grafikleştirilmiştir.



Şekil 3.30 : BK Numunelerin S/N Oranı Sonuçları

Bu sonuçların tablolaştırılmış hali Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12: Basit Kübik Numunelerinin Basma Modülü S/N Yanıtları

Seviye	Katman Kalınlığı	Nozül Sıcaklığı	Baskı Hızı
1	38,92	39,86	39,35
2	40,68	39,42	39,65
3	39,20	39,53	39,79
Δ	1,76	0,44	0,44
Sıra	1	3	2

BK numunelere ait basma dayanımı sonuçlarının tablolaştırılmış hali Çizelge 3.13’te verilmiştir.

Çizelge 3.13 : Basit Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı S/N Yanıtları

Seviye	Katman Kalınlığı	Nozül Sıcaklığı	Baskı Hızı
1	6,44	6,05	5,43
2	7,15	6,32	6,21
3	5,08	6,31	7,03
Δ	2,08	0,27	1,61
Sıra	1	3	2

Bu çizelgeye ve Şekil 3.30'a bakıldığında, BK numunelerin basma dayanımı için, en baskın ve etkili parametre katman kalınlığı olurken, ikinci sıradaki baskı hızını, üçüncü sırada nozül sıcaklığı izlemektedir.

Çizelgelerdeki verilere bakıldığında, sırasıyla her bir seviye için hesaplanan S/N değerleri bulunmaktadır. Aynı parametrenin seviyelerinin sonuçlarından en büyük değer ve en küçük değer arasındaki fark Δ (delta) ile gösterilmiştir (Örn. 40,68-38,92 = 1,76 gibi). Bulunan delta değerlerinden en yüksek olan değer, o geometriyi daha çok etkilediğini göstermektedir. Bu durumda, BK numunelerin basma modülü için $\Delta = 1,76$ en yüksek olarak katman kalınlığı için bulunduğu en baskın ve etkili parametre katman kalınlığı olurken, ikinci sıradaki baskı hızını, üçüncü sırada nozül sıcaklığı izlemektedir.

Grafikten elde edilen değerler ile regresyon denklemleri, Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) elde edilmiştir. Bu denklemler ile farklı süreç parametre değerlerinde malzeme özellikleri belirlenebilecektir. Denklemde yer alan KK katman kalınlığını, NS nozül sıcaklığını ve BH baskı hızını temsil etmektedir.

$$BK_{BasmaModülü} = 122 + 15 KK - 0,19 NS + 0,228 BH \quad (3.7)$$

$$BK_{BasmaDayanımı} = 0,68 - 1,59 KK + 0,0036 NS + 0,0184 BH \quad (3.8)$$

Regresyon denklemleri, bağımsız değişkenlerdeki değişikliklerin bağımlı değişkende yarattığı değişiklikleri nasıl ilişkilendirildiğini belirlemeye yaramaktadır. Faktörlerin başlarında yer alan katsayılar, bu değişiklikleri anlatır [59]. Regresyon katsayıları, modelde yer alan diğer değişkenlerin sabit tutulduğu zaman, tahmin değişkeninin bir birimlik değişiminin yanıtta ortalama değişikliği temsil etmektedir [60]. Her katsayının önündeki işaret, bir faktör ile yanıt arasındaki ilişkinin yönünü göstermektedir. Pozitifse, değişken arttıkça yanıt da artacaktır. Negatifse, bu durumun tam tersi görülecektir.

BK numunelere ait Çizelge 3.11'te basma modülü ANOVA sonuçları, Çizelge 3.22'te basma dayanımı ANOVA sonuçları verilmiştir. Tabloda yer alan kısaltmaların açılımı şu şekildedir: SD – Serbestlik Derecesi, AKT – Ardışık Kareler Toplamı, KO – Katkı Oranı, DKT – Düzeltilmiş Kareler Toplamı, DOK –

Düzeltilmiş Ortalama Kareler. Kısaltmalara ait ayrıntılı bilgi Bölüm 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.14 : Basit Kübik Numunelerinin Basma Modülü Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları

Kaynak	SD	AKT	KO	DKT	DOK	F Değeri	P Değeri
KK	2	687,19	%85,68	687,19	343,60	16,75	0,056
NS	2	40,65	%5,07	40,65	20,32	0,99	0,502
BH	2	33,20	%4,14	33,20	16,60	0,81	0,553
Hata	2	41,02	%5,11	41,02	20,51		
Toplam	8	802,06	%100				

Çizelge 3.14'e bakıldığında, katman kalınlığının diğer parametrelerin yanında en düşük P Değerine (en yüksek F Değerine) sahip olduğu görülmektedir, bu da en önemli parametre olduğunu göstermektedir. Diğer bir açıdan nozül sıcaklığı ve baskı hızı, sonuç üzerinde önemli parametreler olmadığını işaret eden yüksek P Değerleri (0,05'ten yüksek) sergilemişlerdir [61].

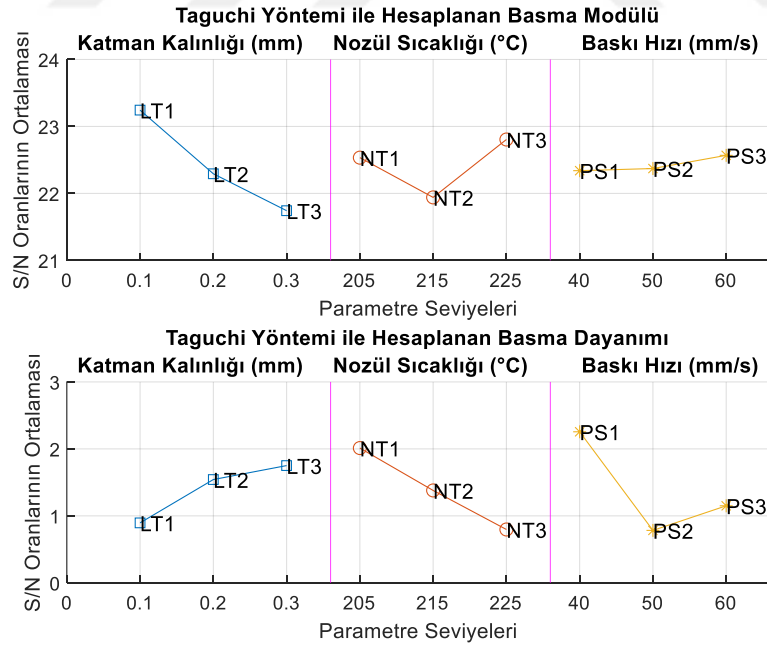
Çizelge 3.15'e bakıldığında ise basma dayanımı söz konusu olduğunda aynı durum yine katman kalınlığı için geçerliliğini korumaktadır.

Çizelge 3.15 : Basit Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları

Kaynak	SD	AKT	KO	DKT	DOK	F Değeri	P Değeri
KK	2	0,35	%50,71	0,35	0,18	2,75	0,267
NS	2	0,01	%1,48	0,01	0,01	0,08	0,926
BH	2	0,2	%29,37	0,2	0,1	1,59	0,386
Hata	2	0,13	%18,44	0,13	0,06		
Toplam	8	0,69	%100				

3.6.2 HMK numuneler için S/N oranı ve ANOVA sonuçları

HMK numunelere ait basma modülü ve basma dayanımı için S/N oranları hesaplanıp Şekil 3.31’de grafikleştirilmiştir.



Şekil 3.31: HMK Numunelerin S/N Oranı Sonuçları

Bu sonuçların tablolaştırılmış hali Çizelge 3.16’da verilmiştir.

Çizelge 3.16 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Modülü S/N Yanıtları

Seviye	Katman Kalınlığı	Nozül Sıcaklığı	Baskı Hızı
1	23,24	22,53	22,34
2	22,29	21,94	22,37
3	21,74	22,80	22,57
Δ	1,50	0,86	0,23
Sıra	1	2	3

HMK numunelerin basma modülü için en baskın ve etkili parametre katman kalınlığı olurken, ikinci sıradaki nozül sıcaklığını, üçüncü sırada baskı hızı izlemektedir. HMK numunelere ait basma dayanımı verilerinin tablolaştırılmış hali Çizelge 3.17’de verilmiştir.

Çizelge 3.17 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı S/N Yanıtları

Seviye	Katman Kalınlığı	Nozül Sıcaklığı	Baskı Hızı
1	0,9	2,01	2,26
2	1,54	1,38	0,78
3	1,75	0,8	1,15
Δ	0,86	1,22	1,47
Sıra	3	2	1

HMK numunelerin basma dayanımı için en baskın ve etkili parametre baskı hızı olurken, ikinci sıradaki nozül sıcaklığını, üçüncü sırada katman kalınlığı izlemektedir. Grafikten elde edilen değerler ile regresyon denklemleri olan Denklem (3.9) ve Denklem (3.10) elde edilmiştir.

$$HMK_{BasmaModülü} = 9,3 - 11,47 KK + 0,0252 NS + 0,0185 BH \quad (3.9)$$

$$HMK_{BasmaDayanımı} = -0,623 - 0,498 KK + 0,00605 NS + 0,0056 BH \quad (3.10)$$

Regresyon denklemleriyle çizelgeler karşılaştırıldığında da görülebileceği üzere, basma modülü için katsayısı en yüksek olan parametrenin yanıt üzerinde de en etkili olduğu görülmektedir.

HMK numunelere ait Çizelge 3.18’de basma modülü ANOVA sonuçları, Çizelge 3.3’da basma dayanımı ANOVA sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3.18 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Modülü Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları

Kaynak	SD	AKT	KO	DKT	DOK	F Değeri	P Değeri
KK	2	8,11	%52,5	8,11	4,06	1,82	0,355
NS	2	2,63	%17,02	2,63	1,32	0,59	0,629
BH	2	0,25	%1,63	0,25	0,13	0,06	0,947
Hata	2	4,46	%28,86	4,46	2,23		
Toplam	8	15,45	%100				

Çizelge 3.18’e bakıldığında, katman kalınlığının diğer parametrelerin yanında en düşük P Değerine (en yüksek F Değerine) sahip olduğu görülmektedir, bu da en önemli parametre olduğunu göstermektedir. Diğer bir açıdan nozül sıcaklığı ve baskı hızı, sonuç üzerinde önemli parametreler olmadığını işaret eden yüksek P Değerleri (0,05’ten yüksek) sergilemişlerdir [61].

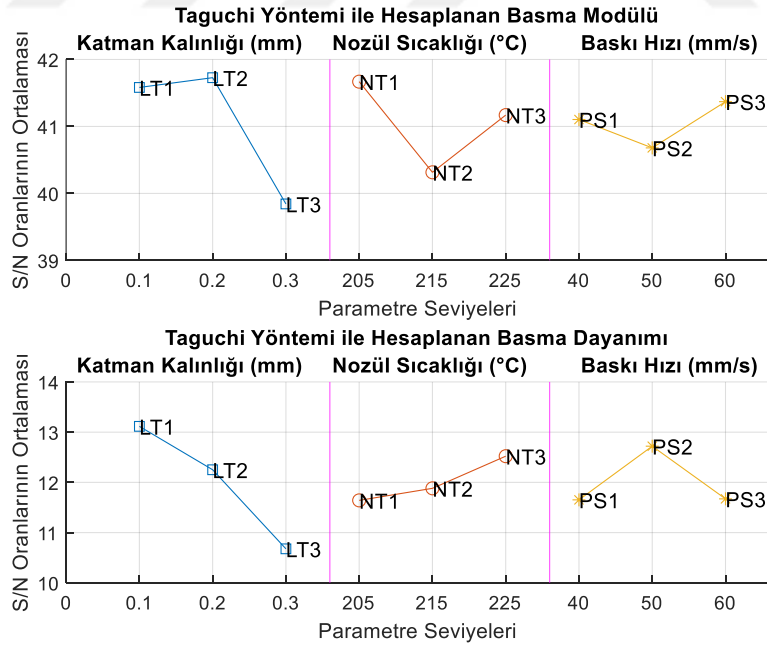
Çizelge 3.19’a bakıldığında ise basma dayanımı söz konusu olduğunda baskı hızının en önemli parametre olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.19 : Hacim Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları

Kaynak	SD	AKT	KO	DKT	DOK	F Değeri	P Değeri
KK	2	0,02	%15,74	0,02	0,01	0,5	0,667
NS	2	0,02	%20,83	0,02	0,01	0,66	0,602
BH	2	0,03	%31,85	0,03	0,02	1,01	0,498
Hata	2	0,03	%31,58	0,03	0,02		
Toplam	8	0,11	%100				

3.6.3 YMK numuneler için S/N oranı ve ANOVA sonuçları

YMK numunelere ait basma modülü ve basma dayanımı için S/N oranları hesaplanıp Şekil 3.32’de grafikleştirilmiştir.



Şekil 3.32 : YMK Numunelerin S/N Oranı Sonuçları

Bu sonuçların tablolaştırılmış hali Çizelge 3.20’de verilmiştir.

Çizelge 3.20 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Modülü S/N Yanıtları

Seviye	Katman Kalınlığı	Nozül Sıcaklığı	Baskı Hızı
1	41,58	41,67	41,10
2	41,73	40,32	40,68
3	39,84	41,17	41,37
Δ	1,88	1,35	0,69
Sıra	1	2	3

YMK numunelerin basma modülü için en baskın ve etkili parametre katman kalınlığı olurken, ikinci sıradaki nozül sıcaklığını, üçüncü sırada baskı hızı izlemektedir. YMK numunelere ait basma dayanımı verilerinin tablolaştırılmış hali Çizelge 3.21’de verilmiştir.

Çizelge 3.21: Yüzey Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı S/N Yanıtları

Seviye	Katman Kalınlığı	Nozül Sıcaklığı	Baskı Hızı
1	13,12	11,64	11,65
2	12,25	11,88	12,72
3	10,68	12,52	11,67
Δ	2,44	0,88	1,07
Sıra	1	3	2

YMK numunelerin basma dayanımı için en baskın ve etkili parametre katman kalınlığı olurken, ikinci sıradaki baskı hızını, üçüncü sırada nozül sıcaklığı izlemektedir. Grafikten elde edilen değerler ile regresyon denklemleri olan Denklem (3.11) ve Denklem (3.12) elde edilmiştir.

$$YMK_{BasmaModülü} = 201 - 107,8 KK - 0,322 NS + 0,064 BH \quad (3.11)$$

$$YMK_{BasmaDayanımı} = 0,79 - 5,6 KK + 0,0193 NS + 0,0041 BH \quad (3.12)$$

YMK numunelere ait Çizelge 3.22’de basma modülü ANOVA sonuçları, Çizelge 3.23’te basma dayanımı ANOVA sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3. 4 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Modülü Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları

Kaynak	SD	AKT	KO	DKT	DOK	F Değeri	P Değeri
KK	2	1006,9	%56,36	1006,9	503,47	4,59	0,179
NS	2	427,2	%23,91	427,2	213,61	1,95	0,339
BH	2	133,1	%7,45	133,1	66,54	0,61	0,622
Hata	2	219,4	%12,28	219,4	109,7		
Toplam	8	1786,6	%100				

Çizelge 3.22'ye bakıldığında, katman kalınlığının diğer parametrelerin yanında en düşük P Değerine (en yüksek F Değerine) sahip olduğu görülmektedir, bu da en önemli parametre olduğunu göstermektedir. Diğer bir açıdan nozül sıcaklığı ve baskı hızı, sonuç üzerinde önemli parametreler olmadığını işaret eden yüksek P Değerleri (0,05'ten yüksek) sergilemişlerdir [61].

Çizelge 3.23'e bakıldığında ise basma dayanımı söz konusu olduğunda aynı durum yine katman kalınlığı için geçerliliğini korumaktadır.

Çizelge 3.23 : Yüzey Merkezli Kübik Numunelerinin Basma Dayanımı Varyans Analizi (ANOVA) Sonuçları

Kaynak	SD	AKT	KO	DKT	DOK	F Değeri	P Değeri
KK	2	1,91	%59,89	1,91	0,96	3,35	0,23
NS	2	0,25	%7,73	0,25	0,12	0,43	0,698
BH	2	0,46	%14,51	0,46	0,23	0,81	0,552
Hata	2	0,57	%17,87	0,57	0,29		
Toplam	8	3,19	%100				

3.7 S/N Oranı ve ANOVA Sonuçlarının Genel Değerlendirmesi

Bölüm 3.6’da her üç kafes yapı türü için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, basma modülü için ortak olarak en etkin parametrenin katman kalınlığı olduğu görülmüştür. Literatür araştırmalarından da bu sonucun olacağı öngörülmüştür. BK numuneler için ikinci sırada baskı hızı önem taşırken, HMK ve YMK numuneler için nozül sıcaklığı daha etkili parametrelerdir.

Numunelerin görsellerine önceki bölümde yer verilmiştir. Tamamının dolu olduğu durumu %100 doluluk oranı olarak tasvirlersek, numunelerin doluluk oranlarına dair hazırlanan tabloya Çizelge 3.24’te yer verilmiştir. Mevcut numune verileri çizilen model üzerinden alınmıştır.

Çizelge 3.24 : Tüm Numunelere ait Doluluk Oranları

Hücre Tipi	Tam Dolu Numune Hacmi (mm ³)	Mevcut Hacim (mm ³)	Doluluk Oranı (%)
BK	27000 mm ³	3368,16 mm ³	%12,48
HMK	27000 mm ³	4954,56mm ³	%18,35
YMK	27000 mm ³	7160,84 mm ³	%26,52

Çubuk çaplarının 2 mm olması ve HMK ile YMK numunelerin, BK numunelere göre doluluk oranının fazla olmasından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Doluluk oranının artması daha fazla ergiyik halde filament kullanılacağı anlamına gelmekle birlikte, basılan çubukların açılı yapısı bakımından nozülün mevcut sıcaklığının daha büyük önem arz ettiğine işaret etmektedir.

Çizelge 3.13’te ve Çizelge 3.21’deki sonuçlara bakıldığında basma dayanımı için BK ve YMK numunelerin aynı önem sırasını takip ettiği görülmektedir. Bunun sebebi, basma dayanımlarının ASTM-1621 Standardına göre hesaplama yapıldığında da belirtildiği gibi Şekil 3.2(a)’da yer alan grafikteki davranışı göstermeleridir. Hem BK hem de YMK numunelerin basma dayanımları elastik bölge kısmında aynı tarz reaksiyonu verdikleri için, aynı parametrelere olan duyarlılıklarının önem sıralamasının aynı çıkması kaçınılmazdır. En önemli parametrenin katman kalınlığı olurken, onu baskı hızı takip etmektedir. En az etkileyen parametre nozül sıcaklığı olmuştur. Bunun yanında HMK numunelerin basma dayanımı için en önemli

parametre baskı hızı olurken, ikincil öneme sahip olan parametre nozül sıcaklığı olmuştur. En az etkileyen parametre baskı hızı olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.8’de ve Şekil 3.11’de BK numuneler için ve Şekil 3.10 ile Şekil 3.13’te YMK numuneler için elde edilen verilerle yapılan hesaplamalar sonucu; Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13’te BK numunelere ait olan etki sıralamaları ve Çizelge 3.20 ve Çizelge 3.21’de YMK numunelere ait etki sıralaması verilmiştir. Her ikisi için de en önemli etkenin katman yükseliği olması tesadüf değildir. BK numuneler, 0° ve 90°’lik çubuklardan oluşurken, YMK numuneler 45°’lik çubuklardan oluşmaktadır. Basma deneyi Z eksenine yönünde uygulandığı için, numunelerin dirençleri mevcut açısız çubukları 0° olmaya doğru itmiştir. Katman kalınlığının artması, bu itme kuvvetine olan direnci artmasıyla doğrudan ilgili olduğu için en etkin parametre olmuştur.

Şekil 3.9’da ve Şekil 3.12’de HMK numuneler için yapılan test sonuçlarına değinilirken, bu verilerle hesaplanan parametrelerin etki sıralaması Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17’de verilmiştir. Basma modülü için en etkili parametre diğer numune tipleri gibi katman kalınlığı olurken, basma dayanımı için bu baskı hızı olmuştur. HMK numunelerin 35,26°’lik çubuklardan oluşması, baskı alındığı esnada nozül kafasının hızına bağlı olarak hem iplik sarkmalarına hem de bıraktığı akışkan filamentin bir alt katmana yapışmasının gerekliliğine dayanarak, en etkin parametresinin baskı hızı olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Elde edilen tüm sonuçların toplamı Çizelge 4.1’de verilmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, içi tam dolu geometriler yerine latis yapılar üzerinde süreç parametrelerinin etkileri incelenmiştir. 3 boyutlu yazıcıyla üretilen latis yapıların birim hücre geometrisinin değişmesi, süreç parametrelerinin basma modülünü ve basma dayanımına etkisini değiştirmektedir. Bu sebeple seçilen geometrilerin kendi içinde farklılıklar göstermesi, Erimiş Filament Fabrikasyonu tekniği için süreç parametrelerinin ne kadar önemli olduğunu belirtmektedir. Deney tasarımı hazırlanırken Taguchi Yöntemi'ne başvurulması yapılacak deney sayısını önemli oranda azaltırken, aynı zamanda parametreler ve seviyeleri arasında eşsiz eşleşmeler sağlamıştır. Numunelerin baskı alma işlemleri bitirildikten sonra uygulanan basma deneyi sonuçları ASTM-D1621 Standardına bağlı kalınarak grafikleştirilmiş ve yorumlanmıştır.

Buna göre, numunelere ait varyans analizleri tablosu olan Çizelge 3.14, Çizelge 3.18 ve Çizelge 3.22'den de görülebileceği üzere, BK, HMK ve YMK numunelerinin basma modülünü en çok etkileyen parametre katman kalınlığı olarak saptanmıştır. HMK ve YMK numuneler için ikinci sırada nozül sıcaklığı daha etkin bir parametreyken, BK numuneler için ikinci sırada baskı hızı gelmektedir.

Basma dayanımı için durum biraz daha farklıdır. Numunelere ait varyans analizleri tablosu olan Çizelge 3.15, Çizelge 3.19 ve Çizelge 3.23'ten de görülebileceği üzere, Burada BK ve YMK numune davranışarı ve etkilendikleri parametreler benzerdir. İkisi için de en önemli parametre katman kalınlığıdır. HMK numuneler için ise baskı hızı daha etkilidir. İkinci sırada HMK için nozül sıcaklığı gelirken, BK ve YMK numuneler için baskı hızı daha önemlidir.

Çizelge 4.1 : BK, HMK ve YMK Numunelerin Basma Modülünde ve Basma Dayanımında Süreç Parametrelerinin Önem Sıralaması (1:En çok etkili, 2:Orta derece etkili, 3:En az etkili)

	Basma Modülü			Basma Dayanımı		
	Katman Kalınlığı	Nozül Sıcaklığı	Baskı Hızı	Katman Kalınlığı	Nozül Sıcaklığı	Baskı Hızı
BK	1	3	2	1	3	2
HMK	1	2	3	3	2	1
YMK	1	2	3	1	3	2

Şekil 3.31’de verilen grafikte de görülebileceği üzere BK numuneler için bireysel olarak katman kalınlığının 0,2 mm olması, nozül sıcaklığının 205°C olması ve baskı hızının 60 mm/s olması basma modülünün en yüksek değerde olmasını sağlayacaktır. Basma dayanımı için ise yine BK numuneler için bireysel olarak katman kalınlığının 0,2 mm olması, nozül sıcaklığının 215°C olması ve baskı hızının 60 mm/s olması basma dayanımının en yüksek değerde olmasını sağlayacaktır.

Buna ilave olarak, BK numuneler için basma modülünü ve basma dayanımını hem ayrı ayrı hem de birlikte maksimum yapacak parametre seviyelerine ait değerlere Çizelge 4.2’de yer verilmiştir.

Çizelge 4.2 : BK Numuneler için Mevcut Parametrelerle Ulaşılabileceği Öngörülen Maksimum Değerler için Seviyelerin Kombinasyonu

	KK (mm)	NS (°C)	BH (mm/s)	Öngörülen Ulaşılabilecek En Yüksek Değer (MPa)
Basma Modülünü Maksimize Edeceği Öngörülen Seviye Kombinasyonu	0,2	205	60	111,08
Basma Dayanımını Maksimize Edeceği Öngörülen Seviye Kombinasyonu	0,2	225	60	2,49
Basma Modülünü ve Basma Dayanımını Maksimize Edeceği Öngörülen Seviye Kombinasyonu	0,2	205	60	BM = 113,07 BD = 2,42

Şekil 3.32’de verilen grafikte de görülebileceği üzere HMK numuneler için bireysel olarak katman kalınlığının 0,1 mm olması, nozül sıcaklığının 225°C olması ve baskı hızınının 60 mm/s olması basma modülünün en yüksek değerde olmasını sağlayacaktır. Basma dayanımı için ise yine HMK numuneler için bireysel olarak katman kalınlığının 0,3 mm olması, nozül sıcaklığının 205°C olması ve baskı hızınının 40 mm/s olması basma dayanımının en yüksek değerde olmasını sağlayacaktır.

Buna ilave olarak, HMK numuneler için basma modülünü ve basma dayanımını hem ayrı ayrı hem de birlikte maksimum yapacak parametre seviyelerine ait değerlere Çizelge 4.3’te yer verilmiştir.

Çizelge 4.3 : HMK Numuneler için Mevcut Parametrelerle Ulaşılabileceği Öngörülen Maksimum Değerler için Seviyelerin Kombinasyonu

	KK (mm)	NS (°C)	BH (mm/s)	Öngörülen Ulaşılabilecek En Yüksek Değer (MPa)
Basma Modülünü Maksimize Edeceği Öngörülen Seviye Kombinasyonu	0,1	225	60	15,39
Basma Dayanımını Maksimize Edeceği Öngörülen Seviye Kombinasyonu	0,1	225	50	1,04
Basma Modülünü ve Basma Dayanımını Maksimize Edeceği Öngörülen Seviye Kombinasyonu	0,1	225	50	BM = 15,05 BD = 1,04

Şekil 3.33’te verilen grafikte de görülebileceği üzere YMK numuneler için bireysel olarak katman kalınlığının 0,2 mm olması, nozül sıcaklığının 205°C olması ve baskı hızınının 60 mm/s olması basma modülünün en yüksek değerde olmasını sağlayacaktır. Basma dayanımı için ise yine YMK numuneler için bireysel olarak katman kalınlığının 0,1 mm olması, nozül sıcaklığının 225°C olması ve baskı hızınının 50 mm/s olması basma dayanımının en yüksek değerde olmasını sağlayacaktır.

Buna ilave olarak, YMK numuneler için basma modülünü ve basma dayanımını hem ayrı ayrı hem de birlikte maksimum yapacak parametre seviyelerine ait değerlere Çizelge 4.4'te yer verilmiştir.

Çizelge 4.4 : YMK Numuneler için Mevcut Parametrelerle Ulaşılabileceği Öngörülen Maksimum Değerler için Seviyelerin Kombinasyonu

	KK (mm)	NS (°C)	BH (mm/s)	Öngörülen Ulaşılabilecek En Yüksek Değer (MPa)
Basma Modülünü Maksimize Edeceği Öngörülen Seviye Kombinasyonu	0,2	205	60	133,15
Basma Dayanımını Maksimize Edeceği Öngörülen Seviye Kombinasyonu	0,1	225	50	5,1
Basma Modülünü ve Basma Dayanımını Maksimize Edeceği Öngörülen Seviye Kombinasyonu	0,1	225	60	BM = 125,04 BD = 4,66

Tüm numuneler için elde edilen değerler ve Varsayılan numunelerin karşılaştırılması Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Numunelerin En Yüksek ve En düşük Değerleri ile Varsayılan Numunenin Kıyaslaması

Değer	BK Numuneler		HMK Numuneler		YMK Numuneler	
	BD	BM	BD	BM	BD	BM
En Yüksek	111,08	2,38	15,39	1,08	134,22	5
En Düşük	85,97	1,66	11,42	0,6943	84,96	3,06
Varsayılan Numune	95,01	2,16	11,89	0,6912	110,70	3,46

Tabloya bakıldığında, HMK numunelerin basma dayanımı hariç tüm numunelerin en yüksek ve en düşük aralığında kalmayı başaran Varsayılan numuneler, belirlenen seviyelerin ortancalarından seçilmiştir. Tüm deney setlerinde, her bir numune için dokuz noktadan veri alınarak hesaplanan basma modülü değeri için de basma dayanımı hesabı yapıldığında da ortalamanın altında kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, her zaman ortanca değer istenen sonucu vermediğini göstermiştir. Yukarıda yer alan Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'e bakıldığında genellikle ya en yüksek seviyenin ya da en düşük seviyenin istenen değeri maksimize ettiği görülmektedir. Yine de BK numunelerde katman kalınlığının ortanca seviye ve Varsayılan numunelerle ortak olan 0,2 mm olması, ancak diğer geometrilere bu durumun tekrarlamaması, basılan dikmelerin düğüm ve kırımlarının birbirleriyle olan konumlarının da bu konuda büyük önem arz ettiğini göstermektedir. HMK numunelerde hem basma modülü hem de basma dayanımının ortak paydada maksimize eden değerin baskı hızının ortanca seviyesi olan 50 mm/s çıkması, Çizelge 4.1'de de görülebileceği üzere, basma dayanımı için en etkili parametre baskı hızı iken basma modülü için en az etkili parametrenin yine baskı hızı olmasından kaynaklandığı öne sürülebilir. YMK numuneler için ise, basma modülünün maksimize edilmesinde kullanılan ortanca parametre katman kalınlığı ile aynı şekilde basma dayanımının maksimize edilmesinde kullanılan baskı hızının ortanca parametresi, elde edilen verilere bakıldığında şaşırtıcı olmamıştır. Basma dayanımının YMK numuneler için ikinci önem sırasına sahip olması ve ortanca parametre seçilmesi eğilimli ve düz dikmelerden oluşan bu geometri için daha uygun olacaktır. Basma modülü içinse en etkili parametre olmasından kaynaklı olarak, diğer iki parametrenin değerlerini dengelemek için bu sonuca ulaştığımızı düşünebiliriz.

Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda, çubuk çaplarının 2 mm yerine, bu çalışmada kullanılan nozül çapından daha düşük çapa sahip nozüller yardımıyla, 1.5 mm ve 1 mm olacak şekilde tüm setin tekrar edilmesi bulunmaktadır. Farklı ve daha düşük nozül çapı değerleri (0,3 mm, 0,2 mm, 0,1 mm vb.) ile oluşturulacak bir deney seti oluşturularak, numunelerin geometrik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmalıdır. Bulunan değerlerin dikme çapı ve nozül çapı değişimiyle birlikte nasıl etkileceğini görmek adına yararlı bir çalışma olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, parametre ve seviye sayıları artırılarak, basma modülü ve basma dayanımına

nelerin etki edebileceği, üzerine tartışılabılıncek bir konudur. Bunların dışında başka geometriler, farklı sayıda birim hücreler oluşturmak da yeni bir kapı aralayabilir. Geometri bakımından basma testine mükemmele yakın tepki veren bu numuneler yerine, şekilleri değiştirilerek farklı testlere maruz bırakılabilir. Oluşturulan bu geometrilerde, nozül kafasının katmanlardaki kesit üzerinde her bir çemberi oluştururken başlangıç noktası dilimleme programında yer alan koordinatlara göre değişkenlik gösterebilir. Gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra her bir çemberi yazmaya aynı başlangıç noktasından başlayacak şekilde bir deney seti hazırlanabilir. Temel hücre olarak seçilen bu geometrilerin farklı sayılarda birleşimleriyle birlikte, daha fazla parametre eklenerek yeni bir deney seti oluşturulabilir. Uygulama alanına bağlı olarak malzeme özelliklerinin değişimi için kullanılabilcek parametre ve seviye kombinasyonları için bu çalışma güzel bir başlangıçtır. Bu çalışmanın geliştirilerek, daha geniş perspektiften etkin elastik malzeme özellikleri üzerinde süreç parametrelerinin etkileri üzerine tablo oluşturmak da birçok soru işaretini ortadan kaldıracaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Dawood, M. ; Taha, I. and Ebeid S.J.** (2016), "Mechanical Behaviour of ABS: An Experimental Study Using FDM and Injection Moulding Techniques", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.21, pp 39-45
- [2] **Bähr, F. and Westkämper, E.,** (2018), "Correlations between Influencing Parameters and Quality Properties of Component Produced by Fused Deposition Modeling", *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, CIRP 72, pp 1214-1219
- [3] **Popescu, D. ; Zapciu A. ; Amza, C. ; Baci, F. and Marinescu, R.** (2018), "FDM Process Parameters Influence over The Mechanical Properties of Polymer Specimens: A Review", *Polymer Testing* 69, pp 157-166
- [4] **Alafaghani, A. ; Quattawi, A. ; Alrawi B. and Guzman A.** (2017), "Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: a Design-for-Manufacturing Approach", *45th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 45*, pp 791-803
- [5] **Chacón, J.M. ; Caminero M.A. ; García-Plaza, E. and Núñez, P.J.** (2017), "Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection", *Materials and Design*, Vol.124, pp 143-157
- [6] **Croccolo, D. ; Agostinis, M.D. ; Olmi, G.** (2013), "Experimental Characterization and Analytical Modelling of the Mechanical Behaviour of Fused Deposition Processed Parts Made of ABS-M30", *Computational Materials Science* , Vol.79, pp 506-518
- [7] **Dong, G. ; Wijaya, G. ; Tang, Y. and Zhao, Y.F.** (2018), "Optimizing Process Parameters of Fused Deposition Modeling by Taguchi Method for The Fabrication of Lattice Structures", *Additive Manufacturing*, Vol.19, pp 62-72
- [8] **Zok, F.W. ; Latture, R.M. and Begley, M.R.** (2016), "Periodic Truss Structures" , *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.96, pp 184-203
- [9] **Srivastava, M. and Rathee, S.** (2018), "Optimisation of FDM Process Parameters by Taguchi Method for Imparting Customized Properties to Components", *Virtual and Physical Prototyping*, Vol.13, Issue: 3, pp 414-421
- [10] **Lee, B.H. ; Abdullah, J. and Khan, Z.A.** (2005), "Optimization of Rapid Prototyping Parameters for Production of Flexible ABS Object", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.169, pp 54-61

- [11] **Bayraktar, Ö. ; Uzun, G. ; Çakiroğlu, R. and Guldas, A.** (2016), "Experimental Study on The 3D-Printed Plastic Parts and Predicting The Mechanical Properties Using Artificial Neural Networks", *Polymers for Advanced Technologies*, Vol.15
- [12] **Kartal, F.,** (2017), "Taguchi Metodolojisi ile Eriyik Yiğma Modelleme Süreci Parametrelerinin Optimizasyonu", *International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry* 1-1, pp 49-56
- [13] **Özsoy, K. ; Duman, B.** (2017), " Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği", *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, Vol.1, pp 36-48
- [14] **Mahmood, S. ; Qureshi, A.J. and Talamona, D.** (2018), "Taguchi Based Process Optimization for Dimension and Tolerance Control for Fused Deposition Modelling", *Additive Manufacturing*, Vol.21, pp 183-190
- [15] **Song, Y. ; Li, Y. ; Song, W. ; Yee, K. ; Lee, Y.K. ; Tagarielli, V.L.** (2017), "Measurements of the Mechanical Response of Unidirectional 3D-Printed PLA", *Materials and Design*, Vol.123, pp 154-164
- [16] **Ünver, H.Ö ; Serin, G. ; Şener, B. ve Çelik, B.B.** (2020), "Eriyik Filament Fabrikasyonu, 3B Yazıcılar İçin Kompozit Filament Ekstrüder Makinesi Geliştirilmesi", *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, Vol.17, pp 65-76
- [17] **Alafaghani, A. and Quattawi, A.** (2018), "Investigating The Effect of Fused Deposition Modeling Processing Parameters Using Taguchi Design of Experiment Method", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.36, pp 164-174
- [18] **Zhang, H. ; Cai L. ; Golub, M. ; Zhang, Y. ; Yang, X. ; Schlarman, K. and Zhang, J.** (2017), "Tensile, Creep, and Fatigue Behaviors of 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.27, pp 57-62
- [19] **Fischer, M. ; Schöppner, V.** (2016), "Fatigue Behavior of FDM Parts Manufactured with Ultem 9085", *The Minerals, Metals & Materials Society*, DOI : 10.1007/s11837-016-2197-2
- [20] **Forcada, J.M.P. ; Alsina, A. ; Martín, A.G.S ; Gras, G.G. and Pérez, M.A.** (2018), "Flexural Fatigue Properties of Polycarbonate Fused-Deposition Modelling Specimens", *Materials and Design*, Vol.155, pp 414-421
- [21] **Miller, A.T. ; Safranski, D.L. ; Smith, K.E. ; Sycks, D.G. ; Guldberg, R.E. ; Gall, K.** (2017), "Fatigue of Injection Molded and 3D Printed Polycarbonate Urethane in Solution", *Polymer*, Vol.108, pp 121-134
- [22] **Koch, C. ; Hulle, L.V ; Rudolph, N.** (2017), "Investigation of Mechanical Anisotropy of the Fused Filament Fabrication Process via Customized Tool Path Generation" , *Additive Manufacturing*, Vol.16, pp 138-145
- [23] **Melenka, G.W. and Schofield, J.S.** (2015), "Evaluation of Dimensional Accuracy and Material Properties of The Makerbot 3D Desktop Printer", *Rapid Prototyping Journal*, Vol.21, Issue: 5, pp 618-627

- [24] **Letcher, T. ; Waytashek, M.** (2014), "Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in Pla On An Entry-Level 3D Printer" , Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2014-39379
- [25] **Farbmann, D. ; McCoy, C.** (2016), "Materials Testing of 3D Printed Abs and Pla Samples to Guide Mechanical Design" , Proceedings of the ASME 2016 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC2016-8668
- [26] **Abbott, A.C. ; Tandon, G.P. ; Bradford, R.L. ; Koerner, H. and Baur, J.W.** (2018), "Process-Structure-Property Effects on ABS Bond Strength in Fused Filament Fabrication", Additive Manufacturing, Vol.19, pp 29-38
- [27] **Tymrak, B.M. ; Kreiger, M. ; Pearce, J.M** (2014), "Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3-D Printers under Realistic Environmental Conditions", Materials and Design, Vol.58, pp 242-246
- [28] **Tsouknidas, A. ; Pantazopoulos, M. ; Katsoulis, I. ; Fasnakis, D. ; Maropoulos, S. ; Michailidis, N.** (2016), "Impact Absorption Capacity of 3D-Printed Components Fabricated by Fused Deposition Modelling", Materials and Design, Vol.102, pp 41-44
- [29] **Lanzotti, A. ; Grasso, M. ; Staiano, G. ; Martorelli, M.** (2015), "The Impact of Process Parameters on Mechanical Properties of Parts Fabricated in PLA with An Open-Source 3-D Printer", Rapid Prototyping Journal, Vol.21(5), pp 604-617
- [30] **Spoerk, M. ; Arbeiter, F. ; Cajner, H. ; Sapkota, J. ; Holzer, C.** (2017), "Parametric Optimization of Intra- and Inter-Layer Strengths in Parts Produced by Extrusion-Based Additive Manufacturing of Poly(Lactic Acid)", Journal of Applied Polymer Science, DOI: 10.1002/app.45401
- [31] **Aliheidari, N. ; Christ, J. ; Tripuraneni, R. ; Nadimpalli, S. ; Ameli, A.** (2018), "Interlayer Adhesion and Fracture Resistance of Polymers Printed Through Melt Extrusion Additive Manufacturing Process", Materials and Design, Vol.156, pp 351-361
- [32] **Arbeiter, F. ; Spoerk, M. ; Wiener, J. ; Gosch, A. ; Pinter, G.** (2018), "Fracture Mechanical Characterization and Lifetime Estimation of Nearhomogeneous Components Produced By Fused Filament Fabrication", Polymer Testing, Vol.66, pp 105-113
- [33] **Mesa, R.J. ; Rodriguez, J.A.T. ; Fuentes, J.L. ; Gras, G.G. and Puig, D.** (2017), "Fatigue Lifespan Study of PLA Parts Obtained by Additive Manufacturing", Procedia Manufacturing, Vol.13, pp 872-879
- [34] **Torres, J. ; Coteló, J. ; Karl, J. and Gordon, A.P.** (2015), "Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives", The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, Vol.67, No: 5
- [35] **Torres, J. ; Cole, M. ; Owji, A. ; DeMastry, Z. ; Gordon, A.P.** (2016), "An Approach for Mechanical Property Optimization of Fused Deposition Modeling with Polylactic Acid via Design of Experiments", Rapid prototyping

- [36] **Nazir, A. ; Abate, K.M. ; Kumar, A. ; Jeng, J.Y.** (2019), "A State-of-Art Review on Types, Design, Optimization and Additive Manufacturing of Cellular Structures", *The International Journal of Advanced manufacturing Technology*, Vol.104, pp 3489-3510 DOI: 10.1007/s00170-019-04085-3
- [37] **Banhart, J. ; Seeliger, H.W.** (2008), "Aluminium Foam Sandwich Panels: Metallurgy, Manufacture and Applications", *Advanced Engineering Materials*, DOI: 10.1002/adem.200800091
- [38] **Zhu, F. ; Lu, G. ; Ruan, D. ; Wang, Z.** (2010), " Plastic Deformation, Failure and Energy Absorption of Sandwich Structures with Metallic Cellular Cores", *International Journal of Protective Structures*, Vol.1, Number.4
- [39] **Ashby, M.F** (2006), "The properties of foams and lattices", *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, Vol.364, pp 15-30
- [40] **Maconachie, T. ; Leary, M. ; Lozanovski, B. ; Zhang, X. ; Qian, M. ; Faraque, O. ; Brandt, M.** (2019), "SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges", *Materials and Design*, Vol.183, Number.108137
- [41] **Palmić, T.B. ; Slavič, J. ; Boltežar, M.** (2020), "Process Parameters for FFF 3D-Printed Conductors for Applications in Sensors", *Sensors*, Vol.20, doi:10.3390/s20164542
- [42] **Sarıkaya, G. ; Sağbaşı, A. ; İkiş, Y.** (2016), "Faktöriyel Deneysel Tasarım Uygulanarak Kumaş Konfor Özelliklerine Etki Eden Parametrelerin Tahmin Edilmesi", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(3), 165-172, doi: 10.21923/jesd.37908
- [43] **Haykin, S.;** "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", New Jersey, ABD, 1994
- [44] **Hagan, M.T.; Demuth, H.B.; Beale, M.H.;** "Neural Network Design", PWS Publishing, Boston, 1996
- [45] **Zain, A.M.; Haron, H.; Sharif, S.** (2010), "Prediction of Surface Roughness in The End Milling Machining Using Artificial Neural Network", *Expert System with Applications*, Vol.37, No.2, pp 1755-1768
- [46] **Antony, J.;** "Design of Experiments for Engineers and Scientists (Second Edition)", Massachusetts, ABD, 2014
- [47] **Ahn, S.H.; Montero, M.; Odell, D.; Roundy, S.; Wright, P.K.** (2002), "Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS", *Rapid Prototyping Journal*, Vol.8, No.4, pp 248-257
- [48] **Rathi, A.K.** (2021), "To Study Effect of Submerged Arc Welding Parameters on Bead Geometry and Hardness for Mild Steel (IS-2062A) Using Fractional Factorial Design", *Materials Today: Proceedings* Vol.34, No.2, pp 525-530
- [49] **Kazemian, A.; Basati, Y.; Khatibi, M.; Ma, T.** (2021), "Performance Prediction and Optimization of a Photovoltaic Thermal System Integrated

- with Phase Change Material Using Response Surface Method", Journal of Cleaner Production Vol.290, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125748
- [50] **Turgut, E.; Dikici, A.** (2011), "EĞ Eksenli Bir Isı Değiştiricisinin Tasarım Parametrelerinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu", 6th International Advanced Technologies Symposium, LATS' 110
- [51] **Şirvancı, M.;** "Kalite İçin Deney Tasarımı Yaklaşımı, Taguchi Yaklaşımı", Wisconsin Üniversitesi İşletme Fakültesi, ABD, 1997
- [52] **Peace, G.S.;** "Taguchi Methods", Addison-Wesley Publishing Company, London, 1993
- [53] **ASTM International Designation: D 1621-00** Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics
- [54] **Pervez, N. ; Shafiq, F. ; Sarwar, Z. ; Jilani, M.M. ; Cai, Y.** (2018), " Multi-Response Optimisation of Resin Finishing by Using a Taguchi-Based Grey Relational Analysis ", Materials 2018 11(3) Vol.426
- [55] **Moghaddam, M.A. ; Kolahan, F.** (2014), "Modeling and Optimization of Surface Roughness of AISI2312 Hot Worked Steel in EDM based on Mathematical Modeling and Genetic Algorithm ", International Journal of Engineering Vol.27, No.3, pp 417-424
- [56] **Luo, Y. ; Zhang, Z. ; Yu, C. ; Zhang, Y.** (1988), "Mirror Surface Edm by Electric Field Partically Induced", CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol.37, No.1, pp 179-181
- [57] **Gopalsamy, B.M. ; Mondal, B. ; Ghosh, S.** (2009), "Taguchi Method and ANOVA : An Approach for Process Parameters Optimization of Hard Machining while Machining Hardened Steel", Journal of Scientific and Industrial Research, Vol.68, pp 686-695
- [58] **Wahyudin ; Kharisma, A. ; Murphiyanto R.D.J. ; Perdana, M.K. ; Kasih, T.P.** (2017), "Application of Taguchi Method and ANOVA in the Optimization on Dyeing Process on Cotton Knit Fabric to Reduce Re-Dyeing Process ", The International Conference on Eco Engineering Development 2017 (ICEED 2017), IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, Vol.109, doi:10.1088/1755-1315/109/1/012023
- [59] **Frost, J.;** "Regression Analysis: An Intuitive Guide for Using and Interpreting Linear Models", 2019
- [60] **Nandagopal, M.; Sivakumar, K.; Sengottuvelan, M.** (2021), "Process Parameter Optimization to Reduce Cold Metal Defect in Ferrous Casting Using taguchi Technique and Regression Analysis", Materials Today: Proceedings, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.748>
- [61] **Celep, G.K.; Dincer, K.** (2017), "Application of Taguchi Method for the Synthesis of Nano-Sized TiO₂ Powders by Acid-Used Sol-Gel Method", Material Science, doi: 10.18038/aubtda.277814