

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN LATİS YAPILARDAKİ
BELİRSİZLİKLERİN RASSAL ALAN YÖNTEMİ KULLANILARAK
MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olgun Utku Güngör

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN

AĞUSTOS 2021

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Olgun Utku Güngör

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN LATİS YAPILARDA KONUMA BAĞLI
BELİRSİZLİKLERİN RASSAL ALAN YÖNTEMİ KULLANILARAK
MODELLENMESİ

Olgun Utku Güngör

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

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet Görgülüarslan

Tarih: Ağustos 2021

Latis yapılar, birbirine bağlı çubuk veya yüzey eleman ağından oluşan yapılar olarak tanımlanır. Söz konusu yapıların mikro seviyelerde tasarımı, hafif, dayanımı yüksek, güçlü mühendislik uygulamaları özelinde sağladığı avantajlar nedeniyle dünya literatüründe öncelikli alanlarda yer almıştır. Farklı uygulamalarda sağladığı avantajların yanı sıra, mikro seviyelerde tasarlanan karmaşık eleman ağı nedeniyle, bu yapıların üretilebilmesi, geleneksel imalat teknolojileriyle çok zor olmakta veya mümkün olamamakta; ancak son zamanlarda geliştirilen eklemeli imalat (Eİ) yöntemlerinin kullanılmasıyla mümkün olabilmektedir. Öte yandan, bu yöntemlerin katman katman üretim stratejisine dayanması nedeniyle, tasarlanan latis yapılar üretildiğinde çubuk elemanların geometri ve malzeme özellikleri üzerinde mikro ve milimetre seviyesinde değişkenlikler ve belirsizlikler oluşmaktadır. Literatürde latis

yapılardaki belirsizliklerin karakterize edilmesi konusunda birçok çalışma bulunmaktadır; fakat bu belirsizlikler sadece rassal değişkenlerle modellendiğinden elemanlar üzerindeki konuma bağlı değişimler göz ardı edilmektedir. Dolayısıyla, bilgisayar ortamında modellenen latis yapılar, Eİ ile üretildiğinde, modellenen yapının performansı ile üretilen yapının performansı arasında bir farklılık oluşmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, bu soruna çözüm sağlamak için, latis yapılarıdaki çubuk elemanların bir Eİ tekniğı olan ergimiş filament fabrikasyonu (EFF) yöntemi kullanılarak üretimi sürecinde meydana gelen geometri ve malzeme özelliklerindeki belirsizliklerin, rassal alan yöntemi kullanarak konuma bağlı modellenmesidir. Bu amaç doğrultusunda, kafes yapıların çubuk elemanları, farklı açı ve çap değerlerinde, EFF yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Numuneler, dijital kameralı ışık mikroskobu altında görüntülenmiş ve görüntüler üzerinden üretilen her bir katmanda geometrik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler, rassal alan yöntemi kullanılarak konuma bağlı değişimlerin karakterize edilmesinde kullanılmıştır. Rassal alan yöntemiyle modellenen değişimler, voksel çözüm ağı elemanları kullanılarak çubuk eleman modellerine dahil edilmiş, belirsizlikler içeren sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Konuma bağlı değişimleri içeren modeller, çekme testi sınır koşulları altında analiz edilerek, çubuk elemanlar için etkin geometri ve malzeme özellikleri elde edilmiştir. EFF yöntemi ile üretilen latis yapıların üretim sürecinde meydana gelen belirsizliklerin karakterize edilmesi için önerilen bu yöntem, farklı Eİ yöntemleri için genişletilebilir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Ergimiş filament fabrikasyonu, Latis yapı, Belirsizlik karakterizasyonu, Rassal alan.



ABSTRACT

Master of Science Thesis

RANDOM FIELD MODELLING OF SPATIAL VARIATIONS IN ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

Olgun Utku Güngör

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

Supervisor: Assist. Prof. Recep Muhammet Görgülüarslan

Date: August 2021

Lattice structures are known as structures that consist of a network of interconnected strut members. The design of these lattice structures in the material at micro and millimeter scales have become prevalent in the literature worldwide to attain lightweight and strong engineering applications. However, due to the complex network of strut members designed at small scales, the fabrication of these lattice structures is either very difficult or not possible using the conventional manufacturing technologies. The fabrication of these lattice structures is only possible by using the recently advanced additive manufacturing Technologies. On the other hand, because of the layer-by-layer manufacturing strategy, there exist micro- and milli-meter scale variations and uncertainties on the geometry and material properties of the strut members in the designed lattice structures when fabricated. Therefore, differences and uncertainties are occurred between the computer-aided design (CAD) model and fabricated strut members of lattice structures in terms of both geometrical and mechanical properties.

In literature, several research works have been performed to characterize AM induced uncertainties of lattice structures with using random variable approach. However, random variable approach ignores spatial variations, therefore differences occur between mechanical performance of designed lattice structures and corresponding AM fabricated structures.

The aim of this study is random field modelling of geometrical and Material uncertainties caused by fabrication of lattice structures with FFF process which is an AM technique. To evaluate differences between designed and AM fabricated lattice structures, strut members of lattice structures are fabricated using material extrusion technique with different build angles and built diameters. The specimens are examined by a digital light microscope and the measurements are done for the fabricated diameter variations. These variations are characterized using advanced statistical methods, based on the spatial dependency, and investigating their inclusion to the simulation models. In this context, experimental data are modelled by the Random Field Method (RFM) which is commonly used for Modeling the spatially dependent variations. These variations modelled by the RFM are integrated into the finite element (FE) models by using voxel mesh elements. In house scripts are developed to represent fabricated strut members of lattice structures with these voxel elements. FE simulations of voxel models are performed with tensile boundary conditions. Efficient geometrical and Material properties are specified with the results of the FE analysis. The developed model can be extended to different AM techniques and the variations observed in the fabricated geometry and material properties can be characterized.

Keywords: Additive manufacturing, Fused filament fabrication, Lattice structure, Uncertainty quantification, Random field.

TEŞEKKÜR

Değerli hocam ve tez danışmanım Dr. Recep Muhammet Görgülüarslan'a yüksek lisans eğitimim süresince bana birçok konuda yol gösterdiği, her zaman öğretmeyi önceliklendirerek tecrübeleri ve derin bilgi birikimini bizlerle paylaştığı, tavsiye ve yardımlarını bizlerden esirgemediği için teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans tez çalışmasını, "Latis yapıların optimizasyon ile tasarımında eklemeli imalattan dolayı oluşan değişimlerin etkin bir şekilde hesaba katılacağı bir metodoloji geliştirilmesi" başlıklı 118M715 numaralı proje kapsamında destekleyen TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU'na teşekkür ederim. Laboratuvar imkanlarını kullandığımız TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Yürüttüğümüz proje kapsamında birlikte çalıştığımız değerli arkadaşlarım Saltuk Yıldız'a, Erdem Erem'e, Yusuf Yamaner'e ve Mehmet Demir Tunç'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteklerini esirgemeyen, birlikte çalıştığımız değerli arkadaşlarım, Görkem Can Ateş'e, İstemihan Gökdağ'a, Batuhan Şener'e, Gökberk Serin'e, Fırat Memu'ya ve Uğur Güdeleğ'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamı, hayatımın her evresinde bana destek olan ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, sevgi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli ailem'e adıyorum. Bu başarıyı birlikte elde etmiş olmaktan ötürü ayrıca mutluyum.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	viii
TEŞEKKÜR	x
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ	15
1.1 Tezin Kapsamı	15
1.2 Literatür Araştırması	16
2. METOTLAR	23
2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	23
2.1.1 Eklemeli İmalat Yöntemlerine Giriş	23
2.1.2 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	25
2.1.2.1 Ergimiş Filament Fabrikasyonu (EFF).....	26
2.1.2.2 Stereolitografi (SLA)	29
2.1.2.3 Toz Yataklı Sistemler (TYS)	30
2.1.2.4 Lamine Nesne Üretimi (LNÜ)	32
2.2 Hücresel Yapılar	33
2.2.1 Hücresel Yapıların Sınıflandırılması	34
2.2.1.1 Periyodik Dizilim.....	36
2.2.1.2 Stokastik Dizilim.....	36
2.2.2 Latis Yapılar.....	37
2.2.3 Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilen Latis Yapılar	39
2.3 Olasılıksal Süreçler ve Rassal Alan Tanımı	43
2.3.1 Rassal Değişkenler.....	47
2.3.2 Rassal Alan	48
2.3.2.1 Durağanlık Kavramı	51
2.3.2.2 Oto-kovaryans ve Oto-korelasyon Tanımı.....	51
2.3.3. Rassal Alanın Ayırıklaştırılması	53
2.3.3.1 Karhunen-Loeve Açılımı	53

2.3.3.2 Açılım Temelli Optimal Doğrusal Tahmin	55
2.3.3.3 Rassal Alan için Çözüm Ağı Boyutu	55
3. DENEYSEL YÖNTEM	57
3.1 Latis Hücre Numunelerinin Üretimi ve Veri Toplama	57
3.1.1 Deney Numunelerinin ve Boyutlarının Belirlenmesi.....	57
3.1.2 Açık değerleri ve Bilgisayar Modelleri	60
3.2 Numunelerin EFF Yöntemi ile Üretimi	61
3.3 Mikroskop Görüntüleri ve Deneysel Veri Toplama	64
3.3.1 Çap değişimleri ve merkez sapmaları	65
3.3.2 Boşluklar	67
3.3.3 Görüntü İşleme ve Otomatik Ölçüm Alma Algoritmasının Geliştirilmesi	69
4. RASSAL ALAN YÖNTEMİNİN UYGULANMASI VE SONLU ELEMENLAR YAKLAŞIMI	70
4.1 Rassal Alan Modellemesi Aşamaları	70
4.2 Değişimleri İçeren Detay Modellerin Oluşturulması.....	71
4.2.1 Voksel Çözüm Ağı Elemanları Kullanılarak Detay Çubuk Eleman Modellerinin Oluşturulması	71
4.2.2 Boşlukların Detay Modele Dahil Edilmesi	74
4.2.3 Voksel Çubuk Eleman Modelleri	75
4.3 Detay Çubuk Eleman Modellerinin Sonlu Elemanlar Analizleri	77
5. SONUÇLAR	80
5.1 Deneysel Ölçüm Verilerinin Olasılık Dağılımları	80
5.2 Oto-Korelasyon Fonksiyonlarının Uygulanması ve Sonuçlar	83
5.3 Rassal Alan Yönteminin Uygulanması ve Sonuçlar	87
5.4 Etkin Çubuk Eleman Özelliklerinin Belirlenmesi ve Sonuçlar.....	90
5.5 Rassal alan ve rassal değişkenler yöntemlerinin karşılaştırılması	93
6. Değerlendirme ve Öneriler	95
KAYNAKLAR.....	97
EKLER.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	Error! Bookmark not defined.



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1-1: Çalışmada önerilen metodolojinin üç ana aşaması.....	16
Şekil 2-1: Eklemeli imalat prosesinin akış şeması [1].	24
Şekil 2-2: Birleştirmeli yığma modellemesi yöntemine ait şematik [45].....	27
Şekil 2-3 Stereolitografi yöntemine ait şematik [45].	30
Şekil 2-4 Seçmeli lazer sinterlemesi yöntemine ait şematik [45].	31
Şekil 2-5: Bağlayıcı püskürtme ile eklemeli imalat yöntemine ait şematik [61].	32
Şekil 2-6: LNÜ yönteminin şematik gösterimi	33
Şekil 2-7: Doğada bulunan bazı hücresel yapılar [63].	34
Şekil 2-8: Doğadan ilham alınarak geliştirilen bazı mühendislik uygulamaları (a) F1 yarış aracına ait fren pedalı, (b) uydu braketi, (c) dört pervaneli robot helikopter [64]	34
Şekil 2-9 Farklı dizilim tipine sahip bazı hücresel yapılar (a) tam periyodik dizilim, (b) yarı periyodik dizilim, (c) kuvaterner dizilim, (d) örtüşmeli periyodik dizilim [66].	36
Şekil 2-10: Stokastik dizilime sahip hücresel yapılar (a) Voronoi diyagramı, (b) A-sütunu, (c) Kanat profili	37
Şekil 2-11:Farklı latis birim hücreler için bilgisayarlı tasarım modelleri [76].	38
Şekil 2-12: Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen latis hücre tipleri [39].....	39
Şekil 2-13: Latis yapıların eklemeli imalat yöntemleriyle üretimi sırasında meydana gelen kusurlar (a) EFF yöntemiyle üretilen YMK-Z latis yapı; saçaklar ve doğruluk hassasiyeti düşük yan profil [23], (b) SLE yöntemiyle üretilen HMK latis yapı; birleşme noktalarında fazla malzeme yığılımı, düşük boyut hassasiyeti [81], (c) SLE yöntemiyle üretilen YMK latis yapı; düşük yüzey kalitesi, metal tozunun çubuk eleman boyunca yerel küreleşmesi [82].	41
Şekil 2-14: Deterministik yaklaşım [87].	49
Şekil 2-15: Rassal alan yaklaşımı [87].	50
Şekil 3-1: Farklı numune alternatifleri (a) Latis birim hücre numuneleri [29,30], (b) Örümcek ağı geometrisi [27], (c) Bileşik çubuk eleman grubu [31], (d) Çerçeve tek çubuk	57
Şekil 3-2: Farklı açı değerlerine sahip çubuk eleman modelleri; (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 75, (f) 90°	61
Şekil 3-3: Numunelerin üretim sürecinden bir kesit; (a) ArtıBoyut A1 Pro EFF cihazı, (b) Numune belirlemede kullanılan alternatif modellerin üretimi, (c) Üretilmiş tek çerçeve tek çubuk modelleri	63
Şekil 3-4: Çubuk elemanların farklı limit açı değerleri ile üretimi	64
Şekil 3-5 : Numunelerin dijital kameralı ışık mikroskopu altında görüntülenmesi; Nikon Eclipse LV150N DKIM ve 5x büyücü, (a) Önden görünüm, (b) Yandan görünüm	65
Şekil 3-6: Numunelerin ölçümlerinde kullanılan yaklaşım (a) Mikroskop görüntüleri üzerinden ölçülecek yarıçap değişkenleri (b) Ölçümü yapılan r_1, r_2, r_3, r_4 yarıçaplarının çubuk eleman kesiti üzerinde karşılıkları	66

Şekil 3-7: Ölçümleri gerçekleştirilen 8 farklı yarıçap değişkeninin çubuk eleman kesitleri üzerinde karşılıkları.....	67
Şekil 3-8: Eklemeli imalat ile üretilen çubuk elemanların kesitlerinde görülen merkez eksenden sapmalar	67
Şekil 3-9: EFF yöntemiyle çubuk elemanların üretimi (a) EFF tipi yazıcıya ait şematik (b) çubuk elemanların eklemeli imalat ile üretimine ait şematik (c) Komşu iki filament kesiti ve kesitler arasında görülen boşluklar	68
Şekil 3-10: 45° ve 4mm çap değerine sahip çubuk eleman kesitine ait mikroskop görüntüleri (a) Filamentler arasında oluşan mikro boşluklar (b) Boşlukların Imagej açık kaynaklı görüntü işleme yazılımı ile ölçülme	68
Şekil 3-11: Mikroskop görüntüleri üzerinden ölçümlerin alınması için geliştirilen görüntü işleme algoritması.....	69
Şekil 4-1: Sınırları yarıçap değişkenleriyle belirlenen voksel elemanları oluşturacak noktalar kümesi (a) Modellenen yarıçap değişkenleri kullanılarak ($r_{1l, s}, r_{2l, s}, r_{3l, s}, r_{4l, s}$) oluşturulan noktalar kümesi (b) Çubuk eleman kesiti içerisinde kalan voksel elemanların oluşturulmasına şematik.....	72
Şekil 4-2: Voksel elemanlar ile oluşturulan çubuk modeli (a) Tüm çubuk modeli (b) Tek bir voksel eleman (c) Tüm çubuk içerisinde belirlenen katmanın XZ ekseninde görünümü.....	73
Şekil 4-3: Elips formunda katman kenarlarının voksel elemanlar kullanılarak detay çubuk modellerine dahil edilmesi (a) Katman kenarının mikroskop altında görüntüsü (b) Elips formunda kenarların voksel elemanlar kullanılarak oluşturulması (c) Süreçte kullanılan yöntemle ait şematik	74
Şekil 4-4: Eklemeli imalat sırasında oluşan mikro seviyede boşlukların detay voksel modellerine dahil edilmesi (a) Boşlukların mikroskop altında incelenmesi (b) Voksel modellere boşlukların dahil edilmesi	75
Şekil 4-5: 90° açı ve 1 mm çap değerinde üretilen çubuk elemana ait voksel modeller, modellerin karşılık gelen mikroskop görüntüleriyle karşılaştırılması (a) Voksel çubuk model XZ görünüşü (b) Voksel çubuk model XY görünüşü (c) 90° açı ve 1 mm çap değerinde numunenin mikroskop görüntüsü.....	76
Şekil 4-6: 0° açı ve 1 mm çap değerinde üretilen çubuk elemana ait voksel modeller, modellerin karşılık gelen mikroskop görüntüleriyle karşılaştırılması (a) ° açı ve 2 mm çap değerinde numunenin mikroskop görüntüsü (b-c) Voksel çubuk model XY görünüşü (d) Voksel çubuk model YZ görünüşü.....	76
Şekil 4-7: 45° açı ve 1 mm çap değerinde üretilen çubuk elemana ait voksel modeller, modellerin karşılık gelen mikroskop görüntüleriyle karşılaştırılması (a) Voksel çubuk model XZ görünüşü, (b) 45° açı ve 2 mm çap değerinde numunenin mikroskop görüntüsü, (c) Voksel çubuk model XY görünüşü	77
Şekil 4-8: Detay çubuk eleman modellerine uygulanan çekme testi sınır koşullarına ait şematik	79
Şekil 5-1: 90° açı ve 1 mm çap değerine sahip çubuk elemanın $r_{1l}, r_{2l}, r_{3l}, r_{4l}$, yarıçap değişkenleri için olasılık dağılım fonksiyonları a) r_{1l} , b) r_{2l} , c) r_{3l} , d) r_{4l}	81
Şekil 5-2: 90° açı ve 1 mm çap değerine sahip çubuk elemanın $r_{1s}, r_{2s}, r_{3s}, r_{4s}$, yarıçap değişkenleri için olasılık dağılım fonksiyonları a) r_{1s} , b) r_{2s} , c) r_{3s} , d) r_{4s}	82
Şekil 5-3: 90° açı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanlar için r_{1l} değişkenine ait oto-korelasyon $R\tau$ -mesafe (τ) eğrileri.....	83
Şekil 5-4: Oto-korelasyon $R(\tau)$ -mesafe (τ) eğrileri (a) Ortalama eğri, (b) Aday oto-korelasyon modelleri ile gerçekleştirilen eğri uydurma.....	84
Şekil 5-5: 90° açı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanın $r_{1l}, r_{2l}, r_{3l}, r_{4l}$, yarıçap değişkenleri için $R(\tau)$ -(τ) eğrileri a) r_{1l} , b) r_{2l} , c) r_{3l} , d) r_{4l}	85

Şekil 5-6: 90° açılı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanın r_{1s} , r_{2s} , r_{3s} , r_{4s} , yarıçap değişkenleri için $R(\tau)$ - (τ) eğrileri a) r_{1s} , b) r_{2s} , c) r_{3s} , d) r_{4s}	86
Şekil 5-7: 90° açılı ve 2 mm çap değerinde çubuk elemanın r_{2s} değişkeni için deneysel çap değerleri ve karşılık gelen rassal alan modelinin 1 gerçekleştirilişi	89
Şekil 5-8: 90° açılı $D_m=1$ mm çubuk eleman için homojenize özellikler (a) Detay modelin $N=200$ adet çekme testi simülasyonundan elde edilen reaksiyon kuvvetleri (N) (b) Etkin çap (DE) (c) Etkin elastik modülü (EE).....	91
Şekil 5-9: 90° açılı $D_m=4$ mm çubuk eleman için homojenize özellikler (a) Detay modelin $N=200$ adet çekme testi simülasyonuna ait reaksiyon kuvvetleri (N) (b) Homojenize çap (DE) (c) Homojenize elastik modülü (EE)	91
Şekil 5-10: $\alpha=0^\circ$ ve $D_m=1$ çap değerinde çubuk eleman voksel modellerinin xz - xy görünüşleri (a) rassal alan yöntemi, (b) rassal değişkenler yöntemi	93



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2-1. ASTM'ye göre eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması [38]... 26	
Çizelge 2-2: Oto-korelasyon modelleri, $R(\tau)$	52
Çizelge 3-1: Numunelerin belirlenmesi için gerekli kriterler ve numune alternatifleri	59
Çizelge 3-2: EFF ile üretim parametreleri	62
Çizelge 5-1: 90° , $D_m=1$ çubuk elemanların yarıçap değişkenleri için istatistiksel sonuçlar	82
Çizelge 5-2: 1mm çap değerine sahip çubuk elemanlar için belirlenen r_{maks} , L_{RF} değerleri.....	87
Çizelge 5-3: 90° açılı çubuk elemanlara ait etkin özellikler (DE , EE)	92
Çizelge 5-4: $\alpha=0^\circ$ ve $D_m=1$ çubuk elemanların çap değişkenleri için ortalama mutlak hataların yüzde değerleri	94

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Butadiyen Sitren
ATODT	: Açılım Temelli Optimal Doğrusal Tahmin
BT	: Bilgisayarlı Tomografi
EFF	: Ergimiş Filament Fabrikasyonu
BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
DKIM	: Dijital Kameralı Işık Mikroskopi
EDE	: Elektron Demetiyle Ergitme
Eİ	: Eklemeli İmalat
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
MLT	: Merkezi Limit Teoremi
MKS	: Monte Karlo Simülasyonları
ODF	: Olasılık Dağılım Fonksiyonları
OKF	: Oto-korelasyon Fonksiyonları
PC	: Polikarbonat
PLA	: Polilaktik Asit
PVA	: Polivinil alkol
SL	: Strelithografi
RA	: Rassal Alan
SLE	: Seçmeli Lazer Ergitme
SLS	: Seçmeli Lazer Sinterleme
TEM	: Taramalı Elektron Mikroskopi
TYE	: Toz Yataklı Ergitme
TYFO	: Toz Yataklı Füzyon Olmayan
YEB	: Yönlendirilmiş Enerjili Biriktirme
YHS	: Yüksek Hızlı Sinterleme
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte verilmiştir.

Simgeler	Açıklama
Ω	Örnek uzay
w_i	Örnek uzay içerisinde her örneklem noktası
X	Rassal süreç
$\{x_i\}$	Rassal değişkenler
E	Gerçekleşmiş
$H(x, \theta)$	Rassal alan
R_{HH}	Oto-korelasyon fonksiyonu
C_{HH}	Oto-kovaryans fonksiyonu
τ	Bağıl mesafe, gecikme
μ_x	Ortalama
σ_x^2	Varyans
c	Korelasyon uzunluğu, ilişki mesafesi
λ_i	Oto-kovaryans fonksiyonuna ait öz değerler
$f_i(x)$	Oto-kovaryans fonksiyonuna ait öz fonksiyonlar
r	Açılım terim sayısı
ξ_i	Standart normal dağılıma sahip rassal değişkenler
$H(x)_X$	Düğüm noktalarına ait doğrusal fonksiyonlar
L_{RA}	Rassal alan için çözüm ağı boyutu
R^2	Belirleme katsayısı
R	Korelasyon katsayısı
k	Korelasyon mesafesi ve çözüm ağı boyutu oranı
D_m	Üretim çap değeri
D_E	Etkin çap değeri
E_E	Etkin elastik modülü
$r_{i,l}$	Çubuk eleman kesitlerine ait uzun yarıçap değişkeni
$r_{i,s}$	Çubuk eleman kesitlerine ait kısa yarıçap değişkeni

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Kapsamı

Latis yapılar, birbirine bağlı karmaşık çubuk, plaka veya yüzey ağı içeren milimetre seviyelerdeki kafes yapılar olarak bilinmektedir. Atomların diziliminden ilham alınarak oluşturulan bu yapılar hafif ve dayanımı yüksek yapılar olarak da bilinmektedir. Eklemeli imalat (Eİ) yöntemlerindeki gelişmelerle birlikte üretimleri mümkün kılınan bu yapılar, ağırlık kısıtının önem arz ettiği uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Latis yapıların mikro ve milimetre seviyelerinde parça geometrisi içerisinde, düşük ağırlık ve yüksek mukavemet özellikleri eş zamanlı olarak sağlanabilir. Latis yapıların sağladığı avantajların yanı sıra, milimetre seviyesinde karmaşık ağ yapısı, latis yapıları oluşturan çubuk elemanların mikro seviyelerde çap değerleri ve katman katman üretim stratejisi nedeniyle, bu yapıların üretimi sırasında oluşan kusurlar geometri ve malzeme özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır. Birim latis hücresinde, mikro ve milimetre seviyesinde oluşan bu değişimler ve belirsizlikler, makro seviyede tüm latis yapının mekanik özelliklerini ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, üretim sürecinde meydana gelen değişim ve belirsizliklerin karakterize edilerek tasarım ve analiz süreçlerine dahil edilmesi, kafes yapının farklı sınır ve yükleme koşulları altında davranışlarının tahmin edilmesinde kilit bir rol oynar.

Bu çalışmada, bir Eİ tekniği olan ergimiş filament fabrikasyonu (EFF) yöntemi kullanılarak üretilen latis yapıların temel bileşenleri olan çubuk elemanların üretim sürecinde meydana gelen belirsizlikler, rassal alan modellemesi yöntemiyle konuma bağlı olarak modellenmiştir. Rassal alan yöntemiyle modellenen belirsizlikler, geliştirilen algoritmalar aracılığıyla bilgisayar modellerine dahil edilmiştir. Hacimsel çözüm ağı elemanları kullanılarak sonlu elemanlar modellerine dahil edilen değişim ve belirsizliklerle birlikte, üretilene benzer simülasyon modelleri oluşturulmuş, belirsizlikler altında çubuk elemanların mekanik davranışları incelenmiştir.

Rassal alan yöntemiyle belirsizliklerin karakterizasyonu, Şekil 1-1’de gösterildiği üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, çubuk elemanların bilgisayar modellerinin oluşturulması ve farklı açı ve çap değerlerinde üretimini içermektedir. İkinci aşamada, çubuk elemanlar mikroskop altında incelenmiş ve alınan görüntüler üzerinden üretilen her bir katmanda geometrik parametrelerin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel veri analizi olarak belirtilen son aşamada, elde edilen ölçümlerin konuma bağlı değişkenliği irdelenmiş ve rassal alan yöntemi kullanılarak karakterize edilmiştir. Bu üç aşama tez içerisinde alt bölümlerde detaylandırılmıştır.



Şekil 1-1: Çalışmada önerilen metodolojinin üç ana aşaması

Tez çalışmasında; birinci bölümde, çalışmanın motivasyonu, Eİ yöntemleri kullanılarak üretilen latis yapılar da üretim sürecinde meydana gelen belirsizliklerin karakterize edilmesi hakkında literatür araştırması yer almaktadır. İkinci bölümde ana başlıklar; eklemeli imalat yöntemleri, hücresel yapıların sınıflandırılması ve latis yapılar, rassal alan modellemesi ve aşamaları detaylı olarak incelenmiş, literatür araştırması genişletilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışma kapsamında kullanılan deneysel yöntemler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, deneysel verilerin rassal alan yöntemiyle modellenmesi ve detay sonlu elemanlar analiz (SEA) modellerinin oluşturulması aşamaları detaylandırılmıştır. Deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler beşinci bölümde verilmiştir. Son olarak, çalışmanın genişletilmiş özeti, önerilen metodun katkı ve kısıtları altıncı bölümde incelenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Eİ teknolojileri, geleneksel üretim yöntemlerinin aksine, çeşitli formda malzemeleri üretim yönü boyunca birbirine ekleyerek nihai parçanın üretildiği yöntemlerdir.

Malzemelerin katman katman yığılması stratejisi, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi zor veya imkânsız olan parçaların üretilmesini mümkün kılmıştır [1]. Eİ yöntemlerinin sağladığı bu avantajlar, özellikle havacılık [2], otomotiv [3,4], biyomedikal [5] endüstrilerinde prototipleşmenin ötesinde karmaşık geometriye sahip, daha hafif ve dayanımı yüksek yapıların üretilmesini mümkün kıldığından, bu yöntemlere ilgi her geçen gün artmaktadır.

Hücrel yapıların, düşük ağırlık, yüksek dayanım, direngenlik ve güçlü enerji sönmeme kabiliyetine sahip olduğu, köpük yapılar, voroni, bal peteği ve latis yapılar dahil olmak üzere benzersiz kombinasyonlara sahip olduğu süregelen çalışmalarla gösterilmiştir [6]. Bu hücrel yapılar arasında kafes yapı tabanlı latis yapılar, son zamanlarda potansiyel olarak üst bir sınıf olarak ortaya çıkmıştır [7]. Eİ teknolojilerinin karmaşık hiyerarşiye sahip geometrilerin üretiminde sağladığı avantajların yanı sıra, üretilen latis yapıların mekanik performansı, üretim sürecinden kaynaklanan belirsizlikler sergiler. Bu belirsizlikler, kafes yapıları oluşturan en küçük bileşenler, çubuk elemanlardaki değişimler nedeniyle ortaya çıkar. Yapıyı oluşturan çubuk elemanlar, mikro ve milimetre seviyesinde üretildiğinden ve eklemeli imalat teknolojilerinin katman katman üretim stratejisi nedeniyle her katmandaki geometrik ve malzeme özelliklerini değişim gösterebilmektedir. Bu belirsizlikler, üretilen kafes yapısının genel mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılarının genel mekanik performansını yüksek doğrulukla tahmin etmek için çubuk eleman seviyelerinde belirsizliklerin doğru bir şekilde karakterize edilmesi son derece önemlidir.

Son on yıl içerisinde, birçok araştırmacı, eklemeli imalat yöntemleriyle üretim süreçlerinin, üretilen latis yapıların geometrisi ve mekanik performansı üzerine etkileri üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen ilk çalışmalar, üretilen çubuk elemanların geometri ve malzeme özelliklerinde bazı değişimlerin meydana geldiğini göstermiştir [8,9]. Eİ yöntemleriyle katı bir parça geometrisi üretildiğinde, üretim sürecinden kaynaklı değişim ve belirsizlikler nispeten küçüktür ve göz ardı edilebilir, ancak latis yapıları oluşturan çubuk elemanlar küçük ölçekte üretildiğinden, üretim sürecinde meydana gelen değişimler nedeniyle üretilen parçanın geometrisi ve bilgisayar destekli modeli arasında fark edilebilir bir uyumsuzluk ve önemli ölçüde farklılıklar oluşmaktadır. Bu konunun önemi literatürde bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Cahil vd. [10] üretim sürecinde oluşan, çubuk

eleman yüzeyleri ve enine kesitleri üzerinde oluşan değişimlerin sonlu elemanlar modellerinde dikkate alınmaması durumunda kafes yapının mekanik davranışının yanlış tahmin edildiğini göstermişlerdir. Tsopanos vd. [11] ve Gümrük vd. [12] kullanılan malzeme özelliklerinin üretilen çubuk elemanlara benzer olarak modellere dahil edilmesi durumunda, latis yapıların simülasyon sonuçlarının doğruluğunun arttığını göstermişlerdir. Benzer çalışmalarda, Seçici Lazer Eritme (SLE) yöntemiyle üretilen çubuk eleman çaplarının bilgisayar modellerine kıyasla daha yüksek değerlere evirildiği gösterilmiştir [13,14]. Qiu vd. [15] belirlenen üretim parametrelerine bağlı olarak çap artışının bilgisayar modeline kıyasla iki katına kadar çıkabileceğini göstermişlerdir. Benzer çalışmalarda, Eİ üretim süreçlerinin, yüzey pürüzlülüğü, çap ve gözeneklilik gibi çubuk eleman geometri özelliklerinin üzerine etkilerini incelemiştir [16,17]. Bu etkilerin kafes yapıların SEA çalışmalarında dikkate alınması, beklenen mekanik performans tahminlerinde doğruluğun arttırdığını göstermiştir. Mueller ve Shea [18] kafes yapı simülasyonlarında, çeşitli uzunluk, çap ve açılarda üretilmiş çubuk elemanların deneysel olarak karakterize edilen malzeme özellikleri kullanıldığında deneylerle daha uyumlu sonuçlar elde edildiğini göstermişlerdir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün çap değerlerinden bağımsız değişkenlik gösterirken, çubuk eleman üretim yönüyle ilişkili olduğunu ve çap değerlerinin küçülmesiyle birlikte mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkilerinin kuvvetlendiğini gözlemlemişlerdir. Dressler vd. [19] SLE yöntemiyle üretilen beş paralel çubuk eleman kullanarak oluşturduğu çekme testi numuneleri ile dikmelerin yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çubuk elemanların etkin mekanik özelliklerinin büyük değişkenliğe sahip olduğunu ve esas olarak çubuk eleman numunelerinin yüzey pürüzlülüğü nedeniyle ideal özelliklerden saptığını göstermişlerdir.

Yukarıda bahsi geçen çalışmalarda yapılan deterministik yaklaşımlardan farklı olarak değişim ve belirsizliklerin karakterizasyonu için gerçekleştirilen diğer çalışmalarda, çubuk elemanların geometrik özellikleri, deneysel ölçümlere dayalı istatistiksel dağılımları elde edilerek rassal değişkenler cinsinden ele alınmıştır. İstatistiksel modelleme, herhangi bir malzeme ve Eİ işlemi için yapılabilir de basitlik açısından ilgili literatür polimer malzemeye gerçekleştirilen Eİ çalışmaları ve metal Eİ çalışmaları olarak ayrılmıştır.

Polimer tabanlı Eİ yöntemleri için gerçekleştirilen çalışmalara bakıldığında, Park vd. [20] Akrilonitril Butadiyen Sitren (ABS) malzemesi kullanılarak ergimiş filament fabrikasyonu (EFF) yöntemiyle farklı üretim açılarında üretilen çubuk eleman çap değerlerinde oluşan değişimlerin modellenmesinde Gaussian eğilimli olasılık dağılım kullanmıştır. Gorguluarslan vd. [21] ekstrüzyon nozul ucu, üretim açısı, katman kalınlığı ve malzeme özelliklerinde meydana gelen değişimleri Gaussian eğilimli rassal değişkenler cinsinden modellemişlerdir. Burada, farklı açılarda üretilen çubuk eleman çap değerleri için en uygun olasılık dağılım fonksiyonlarının belirlenmesinde Bayesian Information Criteration (BIC) yöntemini kullanmışlardır. Sonraki diğer bir çalışmalarında Gorguluarslan vd. [22] çubuk elemanların etkin özelliklerinin belirlenmesinde, EFF yöntemiyle üretim sürecinden kaynaklanan gözenekleri tekdüze dağılımlı rassal değişkenler cinsinden modellemişlerdir. Ravari vd. [23] EFF yöntemiyle üretilen latis yapı örneklerinde dikey ve çapraz çubuk elemanların çap değerlerini ölçerek, uygun olasılık dağılımını ve histogram eğrilerini elde etmişlerdir. McGregor vd. [24] üç farklı polimerle Sürekli Sıvı Arayüz Üretimi (SSAÜ) işlemini kullanarak kafes yapıları üretmişler ve bilgisayarlı tomografi (BT) tarayıcı verilerine dayalı olarak çubuk eleman kalınlığı, uzunluğu ve açılarını karakterize etmişlerdir.

Metal Eİ yöntemleri için de benzer çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Campoli vd. [25] SLE yöntemiyle üretilen çubuk elemanların çap değişimlerinin standart sapma değerini ve gözenek miktarlarını Taramalı Elektron Mikroskopu (TEM) görüntüleri aracılığıyla incelemişler ve Gaussian dağılımıyla karakterize etmişlerdir. Benzer bir şekilde, Ravari vd. [26] SLE yöntemiyle üretilen latis yapılarında, çubuk eleman çap değişimlerini TEM görüntüleri aracılığıyla incelemişlerdir. Bagheri vd. [27] Dijital Kameralı Işık Mikroskopu (DKIM) altında farklı üretim açıları ve kalınlıklarında çubuk örneklerindeki değişimleri gözlemlemişler, değişimler hesaba katılarak latis yapı modellerinin oluşturulması durumunda tahmin hatalarının azaltılabileceğini göstermişlerdir. Liu vd. [28] ve Melancon vd. [29] üretilene benzer simülasyon modellerini oluşturmak için SLE yöntemiyle üretilmiş kafes yapıları, mikro bilgisayarlı tomografi (μ -BT) kullanmışlardır. Çubuk eleman kesitlerinde gözlemlenen merkez eksen dalgalanmaları ve çubuk çapı istatistiksel varyasyonları, açığa bağlı olarak rassal değişkenler cinsinden karakterize etmişler ve SEA tahmin doğruluğunu iyileştirmek için bu varyasyonları dikkate alarak latis birim hücrelerini modellemişlerdir. Görgülüarslan vd. [30] çapraz çubuk elemanların eliptik kesitlerinin

uzun ve kısa çap değerlerini, üretim açısını, boşluk boyutlarını, SLE yöntemiyle üretilmiş latis yapı örneklerinin μ -BT ile taranarak oluşturulmuş voksel model üzerinden ölçmüşlerdir. Geometri değişimlerinin istatistiksel parametrelerini belirlemek için deneysel veriye en uygun olasılık dağılımları belirlenmiş, latis yapı değişimlerinin rassal değişkenler yöntemiyle yüksek doğrulukta modellenebileceğini göstermişlerdir. Lozanovski vd. [31] SLE yöntemiyle farklı çaplarda üretilen çubuk elemanların, eliptik kesitlerinin ağırlık merkezi konumunun olasılık dağılımlarını, atalet momentlerini ve eğim açılarındaki değişimlerini karakterize etmek için μ -BT ile taranmış verileri kullanmışlardır.

Mevcut literatür, çubuk elemanların malzeme ve geometrik özelliklerinde meydana gelen belirsizliklerinin deneysel ölçümlere dayalı olarak rassal değişkenler olarak karakterize edilebileceğini ve Eİ yöntemleriyle üretilen latis yapıların daha iyi temsil edilmesi için tasarım süreçlerinde ve simülasyonlarda kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, rassal değişken yaklaşımı, geometrik özellikleri tek bir değişkenle temsil edebilir. Diğer bir deyişle, değişim ve belirsizliklerdeki rastgeleliğin çubuk üzerindeki farklı konumlardan bağımsız olduğu, uzay içerisindeki farklı noktaların birbiriyle korelasyon ilişkisine sahip olmadığı yaklaşımına dayanmaktadır. Rassal değişken yaklaşımında, uzaysal değişimlerin konuma bağımlılığı göz ardı edildiğinden tahminlerin doğruluğu etkilenebilir. Bu nedenle, rassal alan modellerinin geliştirilmesi, malzeme ve geometri özelliklerinin sergilediği uzaysal korelasyonların hesaba katılması gerekir. Burada kısıt, rassal alan modellemesinde kullanılacak, numuneler üzerindeki farklı konumlardan gelen verileri ölçmek için numunelerin dikkatli bir şekilde hazırlanması ve ölçülebilmesidir. Her bir konumdan alınacak ölçümler, rassal alan karakterizasyonu için deneysel çalışmaların nispeten daha pahalı ve zor olduğunu ancak kesin belirsizlik temsili için gerekli olduğunu gösterir.

Rassal alan modellemesi, fiziksel davranış ve değişimlerin olasılıksal süreçlerle temsil edilmesinde yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [32]. Pratik uygulamalarda, konuma veya zamana bağlı, durağan veya durağan olmayan değişimlerin istatistiksel temsiliinde, Karhunen-Loève (KL) ile kovaryans fonksiyonunun açılımı en verimli yöntemlerden biridir [33].

Literatürde rassal alan yaklaşımını Eİ ile üretilen kafes yapılarda kullanan birkaç çalışma bulunmaktadır. Kim vd. [34] stereolitografi (SL) yöntemiyle üretilmiş çubuk

elemanlar için yüzey pürüzlülüğünü uzaysal karakterize etmek için bir Gauss süreç modeli sunmuşlar ve örnekleme işlemi için Markov Chain Monte Carlo algoritmasını kullanmışlardır. Burada, uzaysal belirsizlik, çubuk uzunluğu boyunca katmanlar arasında dikkate alınmak yerine, yalnızca her katman içinde dikkate alınmışlardır. Diğer bir çalışmada, Lozanovski vd. [35] SLE ile üretilmiş çubuk elemanların uzunlukları boyunca kesit özelliklerinin değişim ve belirsizliklerini modellemek için Markov Chain yöntemini kullanmayı önermişlerdir. Markov Chain yaklaşımı uzaysal belirsizliği temsil edebiliyor olmasına rağmen, kullanılacak örnek sayısının bu yöntemde fazla olması hesaplama maliyeti açısından kısıt oluşturmaktadır. Bu sorun, belirsizliklerin rassal alan yöntemi için boyut küçültme teknikleri kullanılarak çözülebilir. Rassal alanın ayrıklaştırılması sürecinde kullanılan bu boyut düşürme teknikleri farklı mühendislik uygulamaları için kullanılmışken, eklemeli imalat sürecinden kaynaklı belirsizliklerin modellenmesinde bu amaca yönelik herhangi bir çalışma bulunmamaktadır [36,37].

Bu sorunun çözümü için, bu tez çalışmasının amacı, Eİ süreçlerinde meydana gelen geometrik belirsizliklerin uzaysal değişkenliğini irdelemek ve bu uzaysal belirsizlikleri rassal alan yaklaşımını kullanarak çubuk eleman çap değişimlerini karakterize etmektir. “Eklemeli İmalat için tasarım” kapsamında analiz ve optimizasyon süreçlerinde kullanılacak malzeme özelliklerini doğru bir şekilde elde edebilmek için süreçle ilgili belirsizliklerin karakterizasyonu gereklidir. Ayrıca, latis yapıları kullanarak Eİ için tasarım yapılabilmesi, geometri, malzeme özellikleri ve üretilmiş parça performansını etkileyen diğer belirsizlikleri irdelemek önem arz etmektedir. Bu belirsizliklerin karakterizasyonu, özellikle havacılık endüstrisinde tercih edilen güvenilirliğe dayalı veya sağlam tasarım süreçleri için kritik öneme sahiptir.

Mevcut literatür, temel olarak çubuk elemanlardaki belirsizliklerin uzaysal değişimlerini göz ardı ederek rassal değişkenler kullanılarak temsil edilmesine odaklanmaktadır. Eİ yöntemlerinin uzaysal değişimlerini hesaba katıldığı çalışmalar, literatürde sınırlıdır [34,35]. Burada, ilk çalışmada [34], uzaysal belirsizliği sadece her bir katman içinde ele alırken, diğer çalışmada [35] daha önce belirtildiği gibi yüksek hesaplama maliyetine sahiptir. Ayrıca, bu çalışmalar iki farklı Eİ yöntemiyle (SL ve SLE) üretim sürecinde oluşan belirsizliklerin rassal alan yöntemiyle modellenmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi olan EFF ise en yaygın

olarak kullanılan Eİ yöntemi ve yapısal belirsizliklerin rassal alan yöntemiyle konuma bağlı olarak modellenmesi farklı mühendislik uygulamalarında sıkça kullanılan bu yöntem için avantaj sağlamaktadır. Bu sorunları ele almak için, bu çalışmada EFF yöntemiyle üretilen latis yapılarda çubuk elemanlarda gözlemlenen geometri ve malzeme özelliklerindeki uzaysal değişkenliğin karakterizasyonu için verimli bir rassal alan ayrıklaştırma yöntemi önerilmiştir.

Spesifik olarak, Polilaktik Asit (PLA) malzeme kullanılarak, EFF yöntemiyle farklı açı ve çap değerlerinde üretilen tek çubuk eleman numuneleri üzerinde belirsizlikler, uzaysal değişimlerin verimli bir şekilde temsil edildiği modeller geliştirmek için rassal alan yöntemiyle karakterize edilmiştir. Bu amaçla, değişimlerin doğru temsili için üretilmiş çubuk elemanlar DKIM altında görüntülenmiş ve görüntüler üzerinden çubuk eleman boyunca kesit alanlarının uzun ve kısa yarıçap değişkenleri ölçülmüştür. Çap değişimleri, rassal alan parametresi olarak kabul edilerek, deneysel verinin otokorelasyon fonksiyonları hesaplanarak konuma bağlı korelasyon ilişkisi elde edilmiştir. Rassal alanın boyutunun düşürülmesi ve hesaplama maliyetinin azaltılması amacıyla, Karhunen-Loève (KL) ve Açılım Temelli Optimal Doğrusal Tahmin (ATDT) yöntemleri olmak üzere iki farklı rassal alan ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Modellenen değişim ve belirsizlikleri içeren çubuk eleman simülasyon modellerinin üretilen çubuklar ile karşılaştırılması gerçekleştirilerek, EFF yöntemiyle üretim sürecinde meydana gelen değişimlerin önerilen rassal alan yöntemiyle verimli bir şekilde konuma bağlı olarak temsil edilebildiği gösterilmiştir. Böylece, rassal alan ile karakterize edilen belirsizlikleri içeren üretilene benzer SEA modelleri oluşturulmuş, mikro seviyede, çubuk eleman, makro seviyede ise tüm latis yapının mekanik davranışının yüksek doğrulukta öngörülebilmesi sağlanmıştır.

2. METOTLAR

2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri

2.1.1 Eklemeli İmalat Yöntemlerine Giriş

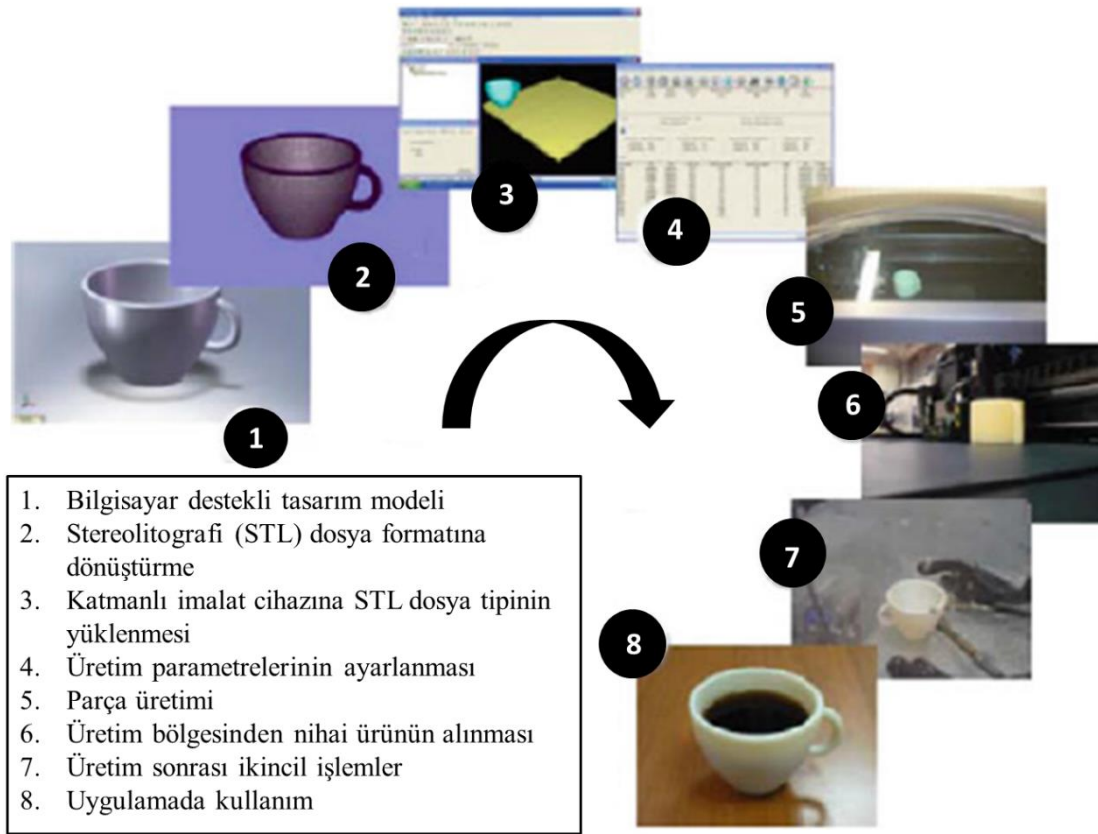
Eklemeli imalat teknolojileri genellikle hızlı prototipleme için yaygın olarak kullanılan üç boyutlu (3B) yazıcı adıyla bilinmektedir. Hızlı prototipleme terimi, çeşitli endüstrilerde, nihai ürünün ticarileştirmeden önceki tasarım süreçlerinde hızlı bir şekilde temsili ürün oluşturmaya yönelik bir süreci tanımlamak için kullanılır. İlk zamanlarda hızlı protipleme amacıyla geliştirilen eklemeli imalat yöntemleri, teknolojinin ileri uygulamalarının etkili bir şekilde kullanılması ve üretim kalitesinin iyileştirilmesiyle birlikte doğrudan nihai parçanın üretiminde kullanılabilir hale gelmiştir [1].

Eklemeli imalat alanında ilk gelişmeler, uygulamada büyük kolaylıklar sağlaması nedeniyle hızlı prototipleme alanında gerçekleşmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar 1950-60 dönemlerinden beri süregeliyor olsa da patent başvuruları ve ticarileşme adımları 1980'lerin başlarından itibaren gerçekleştirmiştir. 1987'de 3D Systems, stereolitografi (SL) tekniği olarak bilinen plastik işleme yöntemini ilk kez ticarileştirerek endüstriyel uygulamalarda çözümler sağlamıştır. Bu yöntemde, morötesi ışığa duyarlı polimerler bir lazer yardımıyla katman katman dondurulmakta özellikle mühendis ve tasarımcılara etkili prototip, mokaç çözümleri sağlanmaktadır. Polimer tabanlı eklemeli imalat teknolojileri, 1989'da Stratasys tarafından birleştirmeli yığıma modellemesi (Fused Deposition Modeling, FDM) yönteminin patentinin alınması ve ticarileşmesiyle birlikte yaygınlaşmıştır. Genel olarak malzeme ekstrüzyonu prensibine dayanan bu yöntem aynı zamanda erimiş filament fabrikasyonu (EFF) (fused filament fabrication, FFF) ismiyle de bilinmektedir. Toz malzemelerin ergitilerek birleştirilmesi işlemine dayanan Seçmeli Lazer Sinterlemesi (Selective Laser Sintering, SLS) yöntemi, yine bu dönemde DTM ticari kuruluşu tarafından geliştirilmiştir. 1994'te EOS firması, doğrudan metal tozu sinterlemesi (Direct Metal Laser Sintering, DMLS) tekniğini geliştirmiştir.

Eİ yöntemleri, dijital bir 3 boyutlu tasarım dosyasından farklı formdaki malzemeleri birbirine ve üst üste ekleme stratejisine dayanarak fiziksel bir obje yaratma teknolojisidir. Bu teknoloji, bilgisayar destekli tasarım verilerinden karmaşık 3

boyutlu nesnelere üretme sürecini önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Bu teknolojiyi geleneksel aşındırma imalat yöntemlerinden ayıran en temel özellik; üretim sürecinde blok bir malzemedeki talaş kaldırmak yerine, çeşitli formlardaki malzemeleri katman katman birbirlerine ekleyerek ve bütünleştirerek üretimin tamamlanmasıdır [1].

Üretim yöntemi fark etmeksizin eklemeli imalat prosesinin temel bazı işlem adımları mevcuttur. Masaüstü tipi 3 boyutlu yazıcılardan büyük ölçekli, endüstriyel eklemeli imalat cihazlarına kadar tüm üretim süreci bilgisayar destekli modeliyle başlayarak devam eden birkaç adıma dayanmaktadır. Eklemeli imalat prosesinin temel adımları Şekil 2-1’de gösterilmiştir.



Şekil 2-1: Eklemeli imalat prosesinin akış şeması [1].

1. Bilgisayar destekli tasarım (BTM) modeli: Üretilecek parça geometrisini tamamıyla temsil edecek bilgisayar modelinin oluşturulması aşamasıdır.
2. Standart Triangle Language (STL) dosya formatına dönüştürme: Bilgisayar destekli tasarım modelinin üçgen çözüm ağı elemanları kullanılarak temsil edilmesidir [38].

3. Eklemeli imalat cihazına STL dosyasının yüklenmesi: STL formatına dönüştürülen parça modeli, ardışık iki nokta arasında katman kalınlığı kadar mesafe kalacak şekilde yatay dilimlere ayrıştırılır. Bu veri eklemeli imalat cihazına ait ekstrüzyon kafasının izleyeceği yığma yolunu belirler. Bir katmanın birbiri ardına üretimi, en üst yüzey katmanı üretilene kadar devam eder [38].
4. Üretim parametrelerinin ayarlanması: Üretimde kullanılacak malzeme, parçanın kullanılacağı uygulama ve eklemeli imalat yöntemine göre üretim parametrelerinin; katman kalınlığı, tarama genişliği, tarama tipi, yatak sıcaklığı, doluluk oranı vb. belirlenmesidir [39].
5. Parça üretimi: STL formatına çevrilerek üçgen çözüm ağı elemanlarıyla temsil edilen parça geometrisinin, dilimleme bilgileri ve üretim parametreleri G-kod dosya tipine aktarılır. Parçanın oluşturulması otomatik bir süreçtir ve büyük ölçüde denetim olmadan devam edebilir. Üretim malzemesinin kontrolü, yazılım ve üretim hatalarını önlemek amacıyla üretim süreci görüntüleme uygulamalarıyla izlenebilir [1].
6. Üretim bölgesinden nihai ürünün alınması: Üretimin tamamlanmasının ardından nihai parça üretim tablası yüzeyinden alınması ve ikincil işlemler için hazırlanması aşamasıdır.
7. Üretim sonrası ikincil işlemler: Eklemeli imalat sürecinde kullanılan destek yapıları, üretim sürecinde oluşan kalıntı ve çapak gibi orijinal bilgisayar modeli geometrisi haricindeki malzemelerin parça yüzeyinden arındırılması işlemidir. Hedeflenen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için uygulanan; ısıl, kimyasal ve metalografik işlemlerin tamamıdır.
8. Uygulamada kullanım: Nihai bir model veya ürün oluşturmak için diğer mekanik veya elektronik bileşenlerle birlikte üretilen parçanın montajlanarak veya doğrudan çeşitli uygulamalarda kullanılmasıdır.

2.1.2 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Eklemeli imalat teknolojilerini sınıflandırmanın sayısız yolu vardır. Popüler bir yaklaşım, bu yöntemleri üretim sürecinin kullandığı temel teknolojiye göre; lazer, yazıcı teknolojisi, ekstrüzyon teknolojisi vb. sınıflandırmaktır [40,41]. Diğer bir yaklaşım ise eklemeli imalat yöntemlerini kullandığı hammadde girdi türüne göre bir sınıflandırmaktır. Bu sınıflandırma yöntemleriyle ilgili sorun, bazı işlemlerin birden

fazla, hibrit, teknolojiler kullanıyor olması veya benzer sonuçlar veriyor gibi görünen bazı işlemlerin sonunda ayrılmasıdır. Bu nedenle, tek bir sınıflandırma yaklaşımı kullanmak uygun değildir [42]. Diğer bir taraftan, süreç ve yöntem açısından aynı eklemeli imalat yöntemleri, patent ve ticarileşme süreçlerinden kaynaklı farklı isimlendirmelere sahip olabilmektedir. Uluslararası Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu (American Society for Testing and Materials, ASTM) eklemeli imalat yöntemlerini 7 grup altına incelemiştir. Sınıflandırma Çizelge 2-1’de gösterilmiştir. Sınıflandırma içerisinde en yaygın yöntemler; EFF olarak da bilinen malzeme ekstrüzyonu, toz yataklı ergitme (Powder Bed Fusion) ve yönlendirilmiş enerjili biriktirme (Directed Energy Deposition) yöntemleridir.

Çizelge 2-1. ASTM’ye göre eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması [38].

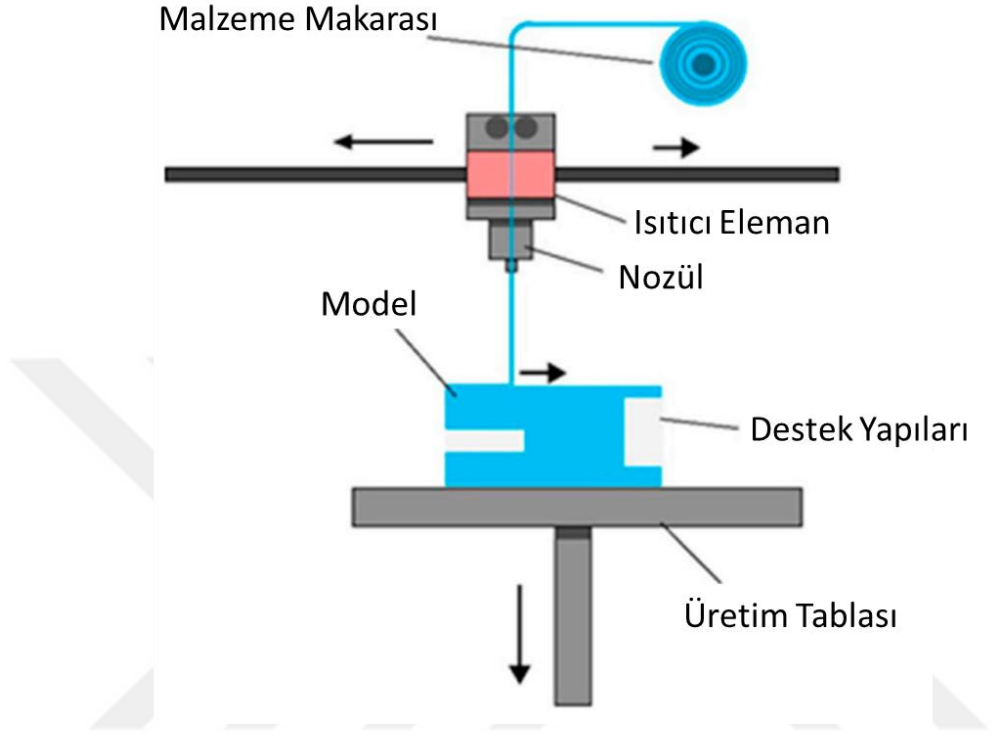
Kategori	Yöntem
1	Bağlayıcı püskürtme ile eklemeli imalat (Binder jetting)
2	Yönlendirilmiş enerjili biriktirme (Directed Energy Deposition)
3	Malzeme ekstrüzyonu (Material Extrusion)
4	Malzeme jeti (Material Jetting)
5	Toz yataklı ergitme (Powder Bed Fusion)
6	Katman laminasyonu (Sheet Lamination Object)
7	Polimerizasyon, Stereolithografi (Photopolymerization, SLA)

2.1.2.1 Ergimiş Filament Fabrikasyonu (EFF)

Erimiş filament fabrikasyonu (Fused Filament Fabrication) olarak da bilinen malzeme ekstrüzyonu temelli eklemeli imalat yöntemidir. Eklemeli imalat teknolojileri arasında en yaygın kullanıma sahip, hızla büyüyen prototipleme teknolojileri arasındadır. Bu teknoloji ilk olarak 1990’ların başında Amerika Birleşik Devletlerin de Stratsys ticari kuruluşu tarafından geliştirilen ve pazarlanan en eski eklemeli imalat yöntemlerindedir [43]. Yöntemin potansiyel uygulamaları; üretim öncesi tasarımlar, geçici veya kritik olmayan parçalardan yük taşıyan araç bileşenlerine kadar geniş bir yelpazededir.

Bu yöntemde, katı haldeki polimer filament malzeme, ısıtılmış nozul içerisinde ergitilir ve sıcaklık kontrollü bir yatak üzerinde katman katman yığılır [44]. Akışkan hale getirilen tel şeklindeki filament, üretim yönü boyunca sabit bir hızla yığma yolunu

takip ederek baskıyı tamamlamaktadır. Ekstrüzyon nozülünden çıkan eriyik malzeme hava temasıyla birlikte hızlıca katılaşır, Katılaşan malzemenin ardışık yığılmasıyla birlikte üç boyutlu (3B) parçalar üretilir. Birleştirmeli yığma modellemesi yöntemine ait şematik Şekil 2-2’de gösterilmiştir.



Şekil 2-2: Birleştirmeli yığma modellemesi yöntemine ait şematik [45].

Birleştirmeli yığma modellemesi yönteminde yaygın olarak kullanılan malzemeler; Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS), poliaktik asit (PLA), poliamidler, polikarbonat (PC) ve politerimid (ULTEM) veya bu malzemelerin karışımlarıdır. ABS malzemeler biyo uyumluluğun önem arz ettiği; tıp, medikal, ilaç endüstrisi vb. uygulamalarda kullanılmaktadır. Polikarbonat içerikli filament malzemeler, boyut hassasiyeti, dayanıklılık ve mekanik özelliklerin önemli olduğu; otomotiv, havacılık, medikal endüstrisi gibi boyut hassasiyeti ve dayanıklılığın önemli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Politerimid sınıfında yer alan Ultem malzemeler alevlenme noktası geciktirici özelliğine yüksek performanslı bir termoplastiktir. Düşük ağırlık ile yüksek dayanım sağlayabilen bu malzemeler havacılık, kara ve deniz taşımacılığında yaygın olarak kullanılmaktadır [43]. Son zamanlarda maliyet ve karbon ayak izinin azaltılması amacıyla malzeme ekstrüzyon yönteminde geri dönüştürülmüş plastik malzemelerin, filament üretimi ve birleştirmeli yığma modellemesi cihazlarında kullanımları yaygınlaşmıştır [44]. Kompozit malzemelerin EFF sürecinde doğrudan

kullanımı için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlara metal/polimer kompozitler [46], güçlendirilmiş polimer kompozitler [47], nano kompozitler [48], seramik ve polimer kompozitler dahildir [49].

Birleştirmeli Yığılma Modellemesi üretim süreçlerinde birçok avantaj sağlamaktadır [43,50];

- Ekstrüzyon yöntemine dayalı bir işlem olarak, parçayı ve destek yapılarını oluşturmak için sadece gerekli miktarda filament malzemesi kullanılır. EFF cihazlarına ait yazılımlar, üretim öncesinde, parça üretimi için gerekli malzeme miktarı, üretim simülasyonu ve üretim süresinin bir tahminini sağlar.
- EFF proses yazılımı, tarama genişliği, dolgu deseni, tarama açısı ve hava boşlukları gibi en uygun üretim parametrelerini değiştirerek her katmanda kullanılan takım yolu oluşturma stillerinin kapsamlı olanaklarına izin verir. Bu, kullanıcıların karmaşık topoloji ve mimariye sahip parçaların üretimi, uyarlanabilir doluluk oranı ve değişken boşluk oranına sahip üretimlerin gerçekleştirilebilmesini sağlar.
- EFF sistemleri, yüksek mukavemetli ve yüksek mekanik özelliklere sahip çeşitli mühendislik malzemelerinin kullanılmasına imkân sağlar. Bu nedenle, bu malzemelerden üretilen parçalar uygulamanın gerekliliklerine göre uyarlanabilir ve işlevsel testler için avantaj sağlar.
- Destek yapıları üretilen parçalardan kolayca ayrılabilir. Suda çözünebilir destek yapılarının kullanabiliyor olması üretim sonrasında ikincil işlemler açısından avantaj sağlamaktadır.

Birleştirmeli yığılma modellemesi yönteminin sıralanan avantajlarının yansın bazı kısıtlara sahiptir [38,43,50];

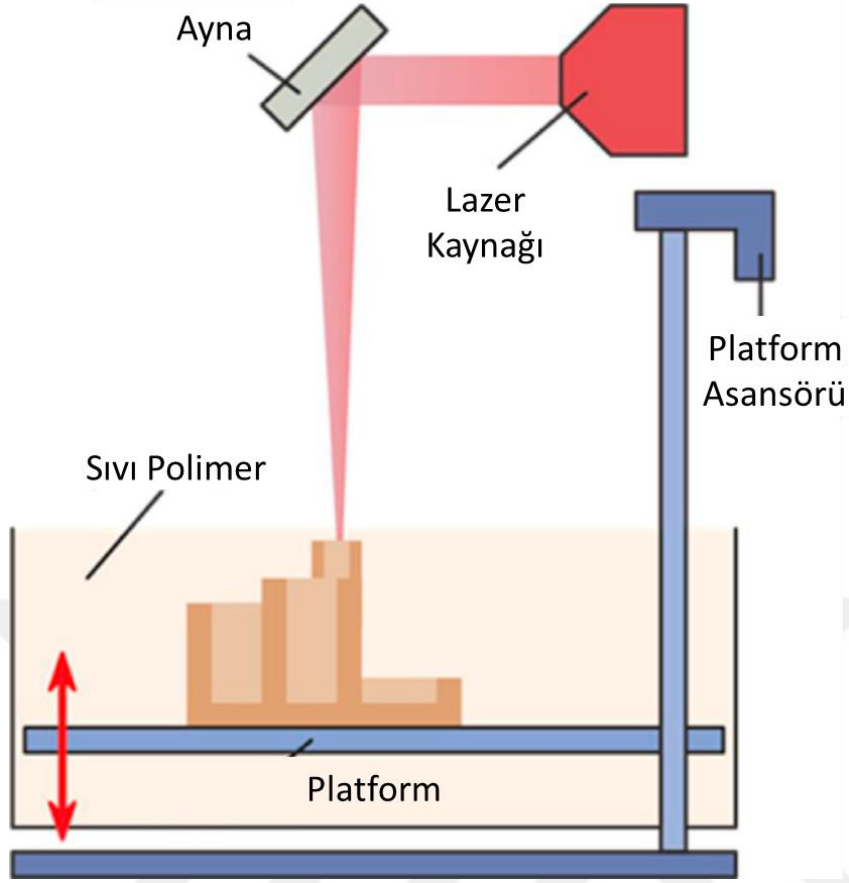
- Filament malzeme, ekstrüzyon nozül ucundan dairesel yığıldığından, üretim yönü boyunca yığılan katmanlar açılı üretimlerde eliptik kesitlere sahip olabilmektedir. Bu durum, parçaların boyut hassasiyeti açısından kısıt oluşturmaktadır. Ayrıca, katman katman biriktirme işlemi nedeniyle, eğimli veya kavisli yüzeyler üzerindeki merdiven etkisi genellikle pütürlü ve pürüzlülüğü yüksek yüzeylere neden olur.
- Genel olarak üretim hızı yavaştır. Parçanın her bir katmanı, tarama yönü boyunca her bir konturun tek bir nozül ucuyla doldurulur. Eriyik filamentin

yüksek vizkozitesi malzemenin nozül ucundan akış hızını kısıtlar. Bu durum, üretim sürelerinin uzamasında neden olmaktadır.

- Parçalar, ekstrüde edilmiş katman yollarının biriktirilmesiyle oluşturulduğu için parçaların mekanik özellikleri her yönde aynı değildir. Özellikle üretim boyunca oluşabilen boşluklar, gözenekler, saçaklar ardışık iki katman yüzeyinin birbiriyle temas yüzeyini azaltır. Bu, üretim yönü boyunca dayanımın düşük olması ve izotropik olmayan mekanik özelliklerin gözlemlenmesine neden olur. Üretim yönü boyunca ve katman yüzey alanı üzerinde farklı mekanik özellikleri gözlemlenir.
- Katman kalınlığının yüksek olması üretilen parçanın çözünürlük ve hassasiyeti açısından kısıt oluşturur.

2.1.2.2 Stereolitografi (SLA)

Stereolitografi yöntemi geliştirilen en eski eklemeli imalat teknolojilerinden biridir. SLA yönteminin temel konsepti, epoksi veya akrilik olmak üzere, ışıkla sertleştirilebilir reçine haldeki malzemenin belirli dalga boyundaki ultraviyole (UV) ışığına maruz bırakılmasına dayanmaktadır. UV ışığının uygulanmasıyla oluşan iki boyutlu (2B) desenli reçine katmanları, fotopolimerizasyon adı verilen bir işlemle katı hale getirilir. Bu işlem üretim yönü boyunca tekrar edilerek nihai parça geometrisi elde edilir [51]. Bir platform reçine içeren rezervuar içerisine daldırılır. UV lazeri, bir ayna aracılığıyla sıvı polimer yüzeyine yansıtılır. 3B modelin her bir dilimindeki yığılma yolunun tamamına, UV lazerinden yansıtılan ışın dolaştırılır. Platform katman yüksekliği kadar yükselerek ardışık katmana ilerler. Baskı döngüsü model oluşturulana kadar tekrar eder [45]. SLA yönteminin diğer yöntemlere göre avantajı, lazer aracılığıyla uygulanan fotonların sayısı ile doğru orantılı olarak yüksek çözünürlüklü baskı elde edilmesidir. Malzeme ekstrüzyonu temeline dayanan yöntemlerin aksine nozül ucu tıkanma problemi yaşanmaz. İlk yatırım maliyetinin yüksek olması yöntemin dezavantajlarından [52,53]. SLA yöntemine ait şematik Şekil 2-3'de verilmiştir.



Şekil 2-3 Stereolitografi yöntemine ait şematik [45].

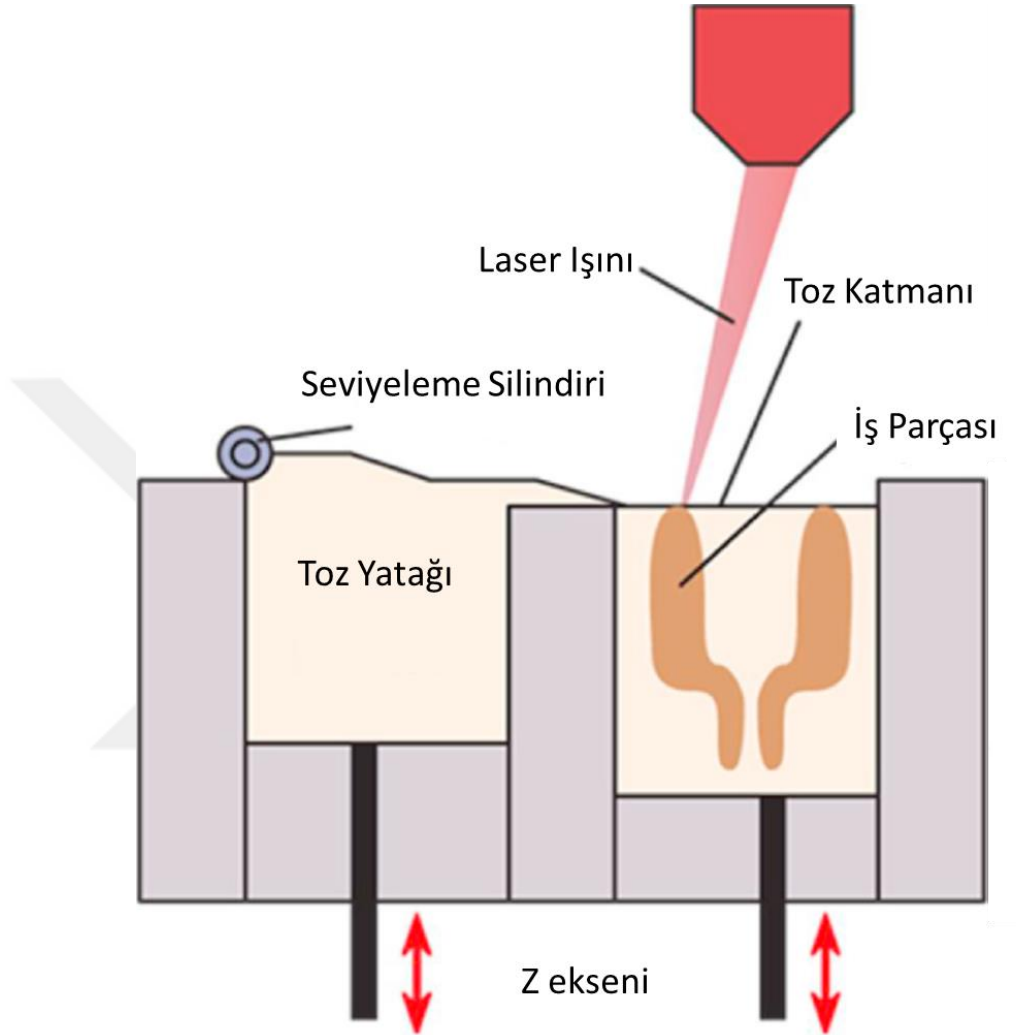
2.1.2.3 Toz Yataklı Sistemler (TYS)

TYS, üç boyutlu parça geometrisinin toz yatağı üzerinde belirli bölgelerin seçili ergitilerek katman katman birleştirildiği eklemeli imalat yöntemlerinin genel adıdır. Toz yatağı, bir platform veya bir yere yayılmış ince toz tabakasıdır [54].

Toz halindeki ham metal istenilen noktalara, lazer veya elektron ışını gibi enerji kaynakları ile ısıtılıp eritilerek püskürtülür. Lazer ışını, dilimlenmiş parça modelinin her bir katmanına ait iki boyutlu kesiti boyunca uygulanır. Toz içeren üretim platformu katman yüksekliği kadar alçaltılarak parçayı oluşturacak ardışık toz katmanları bir rulo veya bıçak aracılığıyla yeniden serilir. Lazer ışını uygulanan toz tabakası tekrar füzyon işlemine maruz bırakılarak ergitilir [55].

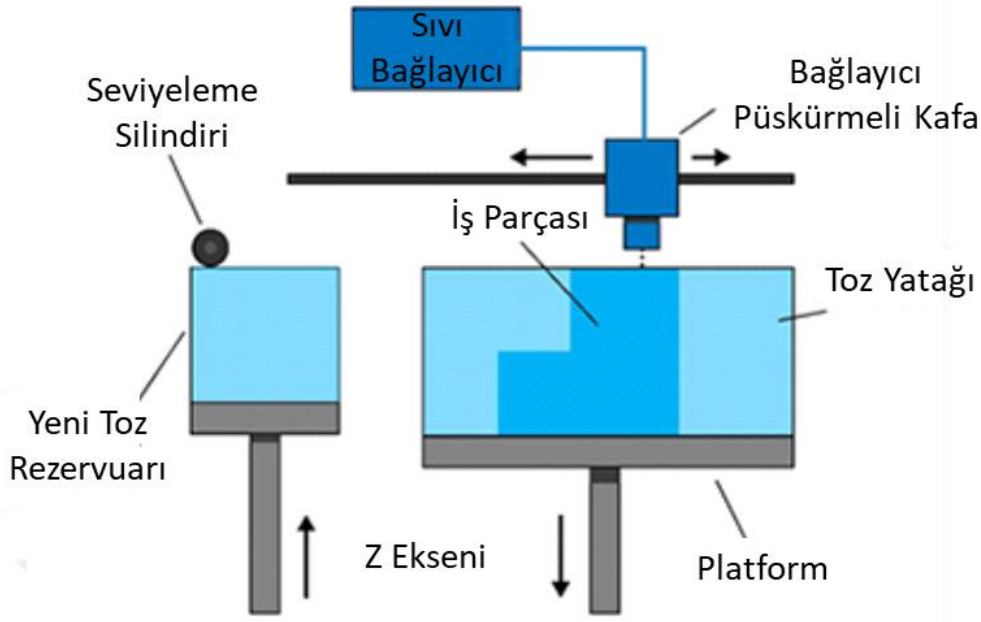
Toz yataklı sistemler iki ana grupta incelenir; toz yataklı ergitmeli (TYE) sistemler, toz yataklı füzyon olmayan (TYFO) sistemlerdir. TYE, katmanların birleştirilmesi için yoğun ısı altında kısmen veya tamamen ergitme mekanizmasını kullanan sistemlerdir.

TYE sınıfında incelenen en yaygın eklemeli imalat yöntemleri; seçmeli lazer sinterleme (SLS) [56], seçmeli lazer ergitme (SLM) , elektron demetiyle ergitme (EDE) [57], yüksek hızlı sinterleme (YHS) [58] şeklinde sıralanır. Toz yataklı sistem, SLS yönteminin temel prensibi Şekil 2-4'te gösterilmiştir.



Şekil 2-4 Seçmeli lazer sinterlemesi yöntemine ait şematik [45].

TYFO sistemlerde ise, tozlar ergitilmez, birleştirme işlemi bağlayıcılar kullanılarak gerçekleştirilir. Örneğin; bağlayıcı püskürtmeyle üç boyutlu baskı (BP3BB) [59], seçici tutma sinterlemesi (STS) [60] şeklinde sıralanabilir. Bu yöntemlerden, bağlayıcı püskürtme yönteminin temel prensibi Şekil 2-5'te gösterilmiştir.



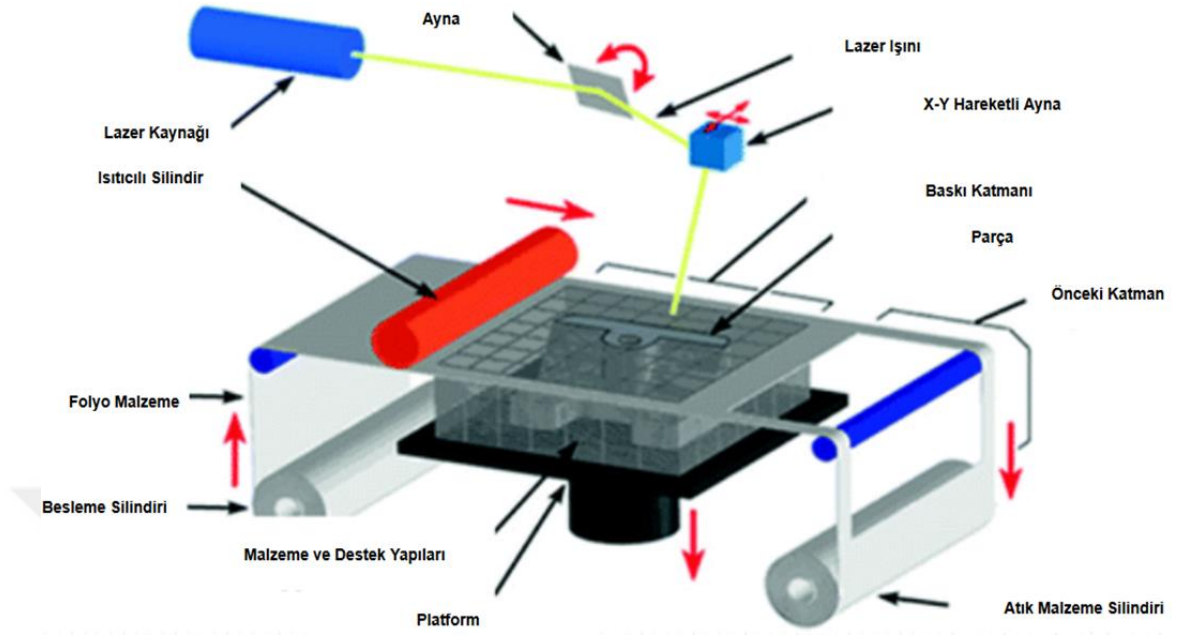
Şekil 2-5: Bağlayıcı püskürtme ile eklemeli imalat yöntemine ait şematik [61].

Toz yataklı sistemlerde geniş yelpazede, polimer ve metal tozları kullanılmaktadır. Polimer tozlarına kıyasla metal tozlarının ergitme işlemi daha zordur. Metal tozlarının ergitilmesi sürecinde kusurlar; tamamıyla ergitilmemiş toz taneciklerinin birleşerek oluşturduğu kürenleme etkisi, kalıntı gerilmeler, gözenekler ve boşluklar meydana gelebilir. Metal tozları kullanıma uygun hale getirilmek için genellikle, gaz atomizasyonu yöntemiyle olabildiğince küçük çaplı ve eşit boyda toz kürecikleri haline getirilir [61].

2.1.2.4 Lamine Nesne Üretimi (LNÜ)

Birden fazla folyo, levha ya da sac halindeki kâğıt, plastik, metal ya da seramik gibi malzemelerin yapıştırıcı, ultrasonik ya da kaynak işlemleri yardımıyla üst üste birleştirilmesi, serilen katmanların lazer, bıçak ya da freze mekanizması aracılığıyla kesilerek istenilen geometriye kesilmesi ile gerçekleştirilen eklemeli imalat metodudur. LNÜ yöntemi, masif ve büyük hacimli parçaların kolaylıkla, üst üste birleştirilerek üretilmesine olanak sağlar. Folyo, levha veya sac halindeki malzemelerin birbirine yapıştırıcı ile bağlanmasıyla işlem başlar. Yapıştırıcı ısı ile aktivite olabilen malzeme olarak seçilir. Lazer, yapıştırılmış katmanda kontur kesim işlemi için kullanılır. Mühendislik uygulamalarında, üretilecek geometri içerisine

devre, sistem veya sensörler yerleştirilerek akıllı parçaların üretimini olanak sağlayan üretim yöntemidir [62].



Şekil 2-6: LNÜ yönteminin şematik gösterimi

2.2 Hücresel Yapılar

Doğa, çevresindeki güçlü koşulların üstesinden gelmek için yüksek verimli sistemler ve malzemeler sunar. Kemik, bal peteği, kanat, kuş gagası, ağaç kovuğu vb. birçok doğal yapı, çevresel koşullara dayanacak kadar güçlü ve gerekli her türlü harekete izin verecek minimum ağırlığa sahiptir. Bu yapılar incelendiğinde, doğanın gözenekli bir hücresel yapı ürettiği ve malzemenin, yapının kritik bölgelerinde yoğunlaştığı hafif yine de güçlü özellik gösterdiği gözlemlenmiştir. Doğanın bu eğilimine örnek yapılar Şekil 2-7’de gösterilmiştir.



Şekil 2-7: Doğada bulunan bazı hüresel yapılar [63].

Mühendislik uygulamalarında, doğal yapılardan esinlenen yaklaşımlar sıklıkla kullanılmaktadır. Bahsi geçen doğal yapılara karşılık bazı mühendislik uygulamalarına ait görseller Şekil 2-8’de gösterilmiştir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 2-8: Doğadan ilham alınarak geliştirilen bazı mühendislik uygulamaları (a) F1 yarış aracına ait fren pedalı, (b) uydu braketi, (c) dört pervaneli robot helikopter [64]

2.2.1 Hüresel Yapıların Sınıflandırılması

Hüresel malzemeleri mühendislik uygulamalarında kullanmak isteyen tasarımcılar sonsuz sayıda birim hücre alternatifi arasından seçim yapabilme imkanına sahiptir. Bu durum, sağladığı avantajların yanı sıra değerlendirme sürecini karmaşıklaştırabilir. Tasarımcıların alternatifleri değerlendirme sürecini somutlaştırmanın temel yolu

hücresele yapıları sınıflandırmak, bu sınıfları fayda ve fonksiyonelliklerine göre ilişkilendirmektir.

Hücresele yapıların sınıflandırılmasında, deterministik ve stokastik yaklaşımlar kullanılmıştır. En yaygın sınıflandırma yaklaşımı, hücresele malzemeleri petek veya köpük yapılar olarak sınıflandırmayı öneren Gibson ve Ashby [65] tarafından önerilen yaklaşımdır. Petek yapılar, iki boyutlu bir geometri şablonunun üretim yönü boyunca ekstrüde edildiği prizmatik hücresele yapılar olarak tanımlanır ve isimlendirmesini bal arısı tarafından inşa edilen yuvalara borçludur. Petek yapıların aksine, köpük yapılar, tipik bir köpürme işleminin sonucu olarak genellikle rastgele, stokastik bir forma sahiptirler.

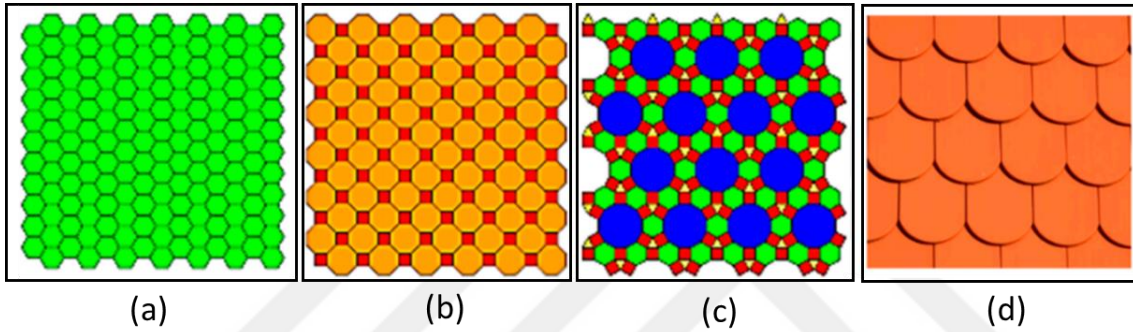
Petek ve köpük yapılar, mevcut teknolojilerle üretilebilen iki hücresele malzeme sınıfıdır. Bu yapıların mühendislik uygulamalarında süregelen yaygın kullanıma hâkim olması, daha detaylı bir sınıflandırma ihtiyacı oluşturmamıştır. Buna rağmen, belirli bir süre kullanılan söz konusu basit sınıflandırma, malzeme alanındaki tüm olasılıkları ve karmaşık hiyerarşileri tanımlamada yetersiz kalmaktadır. Mevcut yetersizlik, matematik ve kristolografi alanlarının birim hücre şekilleri üzerine detaylı çalışmalarıyla giderilmiştir. Matematikte mozaikleme alanı, belirli bir uzayın daha küçük birimlere veya hücrelere bölünmesiyle ilgilendir [66]. Kristal yapı bilimi olan kristalografi, düzenli hücresele yapıların incelenmesinde uygun sınıflandırma şemaları geliştirmiştir. Bunlara örnek olarak; Hacim Merkezli Kübik (HMK), Yüzey Merkezli Kübik (YMK) kristal yapılar gösterilmektedir. Bu yaklaşım kafes tabanlı yapılarla sınırlıdır. Başlangıçta, hücresele yapılar aşağıda sıralanan üç kriter ışığında sınıflandırılır [63];

- Mozaikleme; alanın belirli bir şekle sahip bağımsız hacimlere bölünmesi,
- Elemanlar; mozaik boşluk uzayı içerisine giriş, kabuk veya çubuk elemanların kullanımı,
- Bağlantı; mozaik boşluk uzayı içerisindeki elemanların diziliş düzeni

Sıralanan sınıflandırma kriterlerini kullanarak bir tasarımcı belirli bir dizi seçenek arasından seçim yapılabilir. Diğer bir deyişle, bir mozaik uzayı tanımlayarak, mozaik içinde hangi elemanların bulunduğu, elemanların periyodik veya periyodik olmayan diziliş düzenine sahip olması ve öğelerin birbirine nasıl bağlı olduğuna göre hücresele yapılar sınıflandırılabilir, kısıtlara göre tasarım seçimi yapılabilir.

2.2.1.1 Periyodik Dizilim

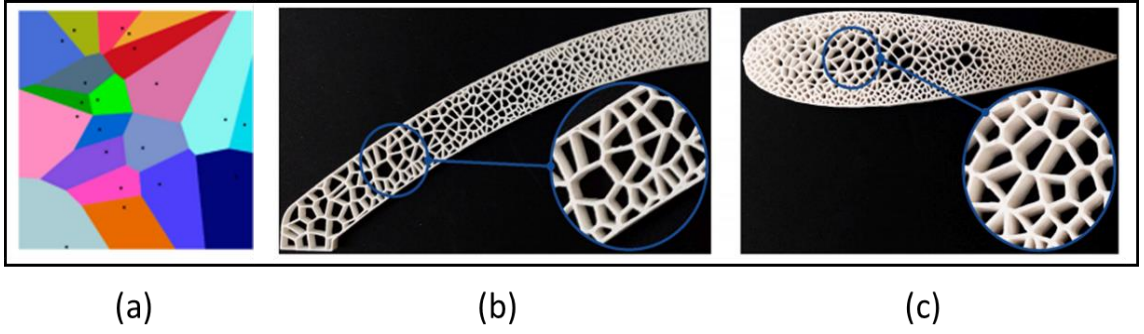
Periyodik dizilim, bir veya daha fazla 2B veya 3B şeklin seçimi ve bunların bağlantıları arasındaki ilişkilerle ilgilidir. Bu nedenle iki tanımlayıcı düzeyi vardır; bunlardan ilki şeklin tipi, ikincisi ise şekillerin birbiriyle ilişkisidir. Tekrarlayan birim hücre varlıkları tekli, ikili, üçüncül ve kuvaterner olarak adlandırılır. En yaygın olarak incelenen (ve izlenebilir) mozaikler, iki çokgenin birden fazla noktada kesiştiğinde her zaman tam kenarları paylaşmalarını sağlayan bir dizilim sınıfı olan kenar kenar mozaiklemesidir. Kenardan Kenara mozaiklemelerde, çokgenler düzenli veya yarı düzenli olabilir. Hücreler eşit yoğunlukta geometri içerisine yerleştirilir. Farklı dizilim türlerine sahip periyodik hücresel yapılar Şekil 2-9’da gösterilmiştir [63].



Şekil 2-9 Farklı dizilim tipine sahip bazı hücresel yapılar (a) tam periyodik dizilim, (b) yarı periyodik dizilim, (c) kuvaterner dizilim, (d) örtüşmeli periyodik dizilim [66].

2.2.1.2 Stokastik Dizilim

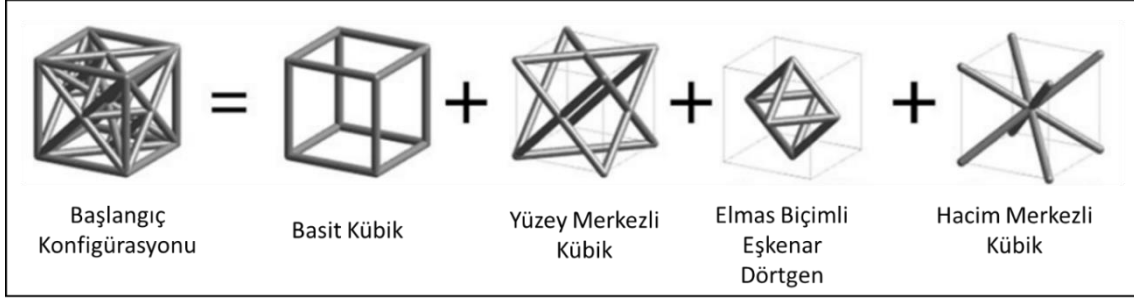
Stokastik dizilim, yapıyı oluşturan bir veya daha fazla çokgenin (veya çokyüzlü) süper pozisyonuna dayanmaz. Bunun yerine, stokastik yönelim, içerisinde rastgele dağılıma sahip mekanizmaya dayanır. Stokastik dizilimi temsil etmenin en yaygın yolu n-boyutlu dizimleri tanımlayan ve genelleştiren matematikçi Georgy Vorono’i ye atfedilen Voronoi diyagramını kullanmaktır [67]. Diğer yöntemler, Poisson çizgisi yöntemini ve kristal büyüme modellerini kullanmayı içerir [68]. En genel çerçevede, bir Voronoi diyagramı, uzayda rastgele dağılmış sonlu sayıda noktanın dağılımından oluşur. Uzayda tanımlanan noktaların birleştirilmesiyle birbiriyle kesişen rastgele dağılıma sahip hücreler elde edilir. Stokastik dizilime sahip Voronoi diyagramı ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilen bazı voronoi yapılar Şekil 2-10’da gösterilmiştir.



Şekil 2-10: Stokastik dizilime sahip hüresel yapılar (a) Voronoi diyagramı, (b) A-sütunu, (c) Kanat profili

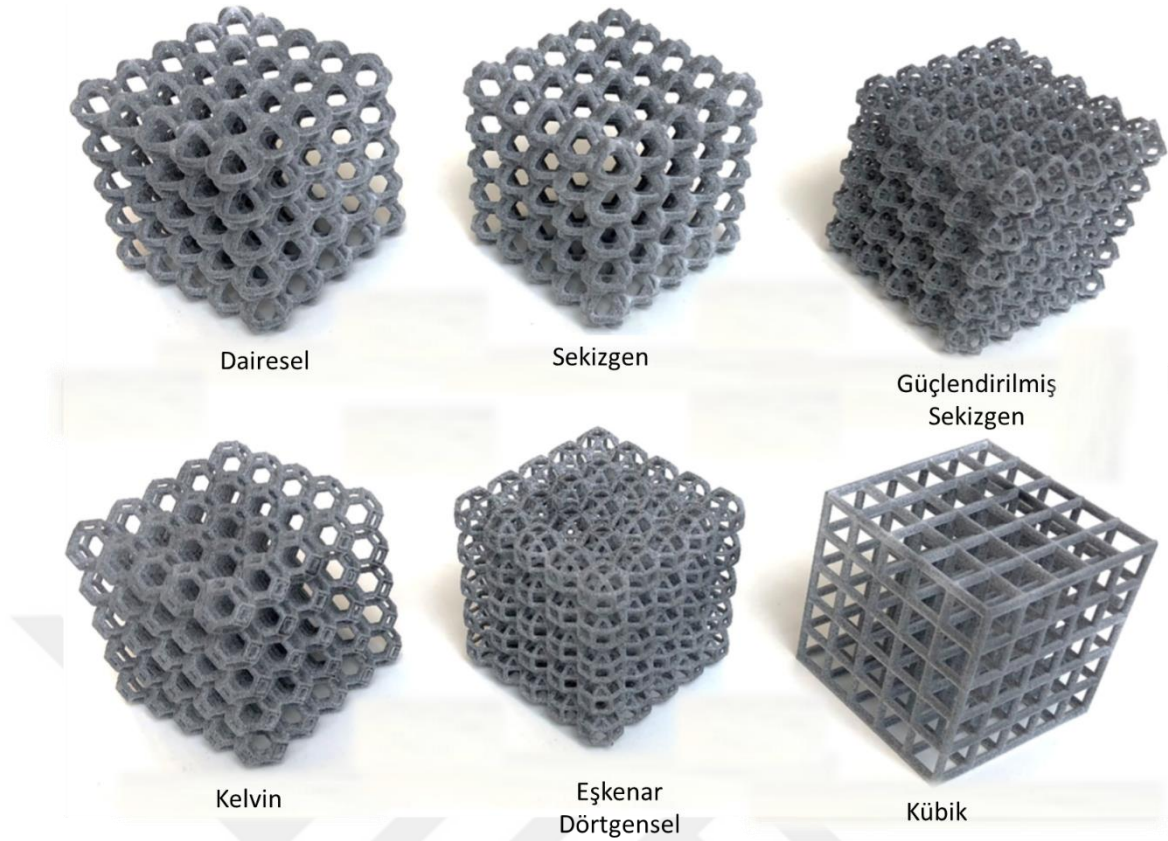
2.2.2 Latis Yapılar

Ultra hafif hüresel yapılar, olağanüstü mekanik performansları ve yüksek mukavemet/ ağırlık oranı, negatif Poisson oranı, ısı yalıtımı, enerji ve akustik sönümleme yetenekleri gibi benzersiz çok işlevli özellikleri nedeniyle literatürde süregelen araştırmaların ilgi odağı olmuştur [69]. Tipik bir 3B hüresel malzeme olarak latis yapılar, mühendislik uygulamalarında önemli bir potansiyele sahip olmuştur. Doğada atomların diziliminden ilham alınarak geliştirilen bu yapılar, eklemeli imalat yöntemlerinin, karmaşık hiyerarşiye sahip geometrilerin üretilebilmesini mümkün kılmasıyla birlikte, birkaç on yıl içerisinde önem kazanmış ve çeşitli latis hücre konfigürasyonları geliştirilmiştir. En yaygın ve kendine özgü özelliklere sahip olan örnekler: Kagome [70], Piramidal [71], Oktet ve Kevin [72], Hacim Merkezli Kübik (HMK) [73], dikey çubuk elemanlar içeren hacim merkezli kübik (HMK-Z) [74], Yüzey Merkezli Kübik (YMK) [75], eşkenar dörtgensel on iki yüzlü hücre ve sekiz köşeli [39] hücre tipleri topoloji optimizasyonu yöntemleriyle elde edilmiştir. Belirli sınır ve yükleme koşulları altında belirlenen tasarım uzayı içerisinde, malzemeyi kuvvet ve gerilme yoğunluğunun olduğu kritik bölgelerde tutma prensibine dayanan topoloji optimizasyonu ile yüksek mekanik özelliklere sahip bu yapılar geliştirilebilmiştir. Optimizasyonla farklı sınır ve yükleme koşullarına göre başlangıç konfigürasyonundan elde edilen ve yaygın olarak kullanılan bazı latis yapı modelleri gösterilmiştir.



Şekil 2-11:Farklı latis birim hücreler için bilgisayarlı tasarım modelleri [76].

Konvansiyonel çıkartmalı imalat yöntemleri, karmaşık geometrilerin üretilmesinde maliyet ve zaman kısıtları oluşturduğundan latis yapıları için ideal değildir. Eklemeli imalat yöntemleri latis yapıların imalatında yeni fırsatlar sunmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinin, istenen sınırlar boyunca, kesilmiş, biriktirilmiş veya eritilmiş katmanların tekrar tekrar istiflenmesine dayanması, geleneksel yöntemlerde olduğu gibi takım veya ek ekipmanlar gerektirmez. Bu sayede karmaşık hiyerarşiye sahip geometrileri uzun hazırlık ve kurulum süreleri olmaksızın özel araçlara gerek duymadan üretebilir [77]. Literatürde yaygın olarak kullanılan, SLE yöntemiyle üretilmiş latis hücre tipleri Şekil 2-12’de gösterilmiştir.



Şekil 2-12: Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen latis hücre tipleri [39].

2.2.3 Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilen Latis Yapılar

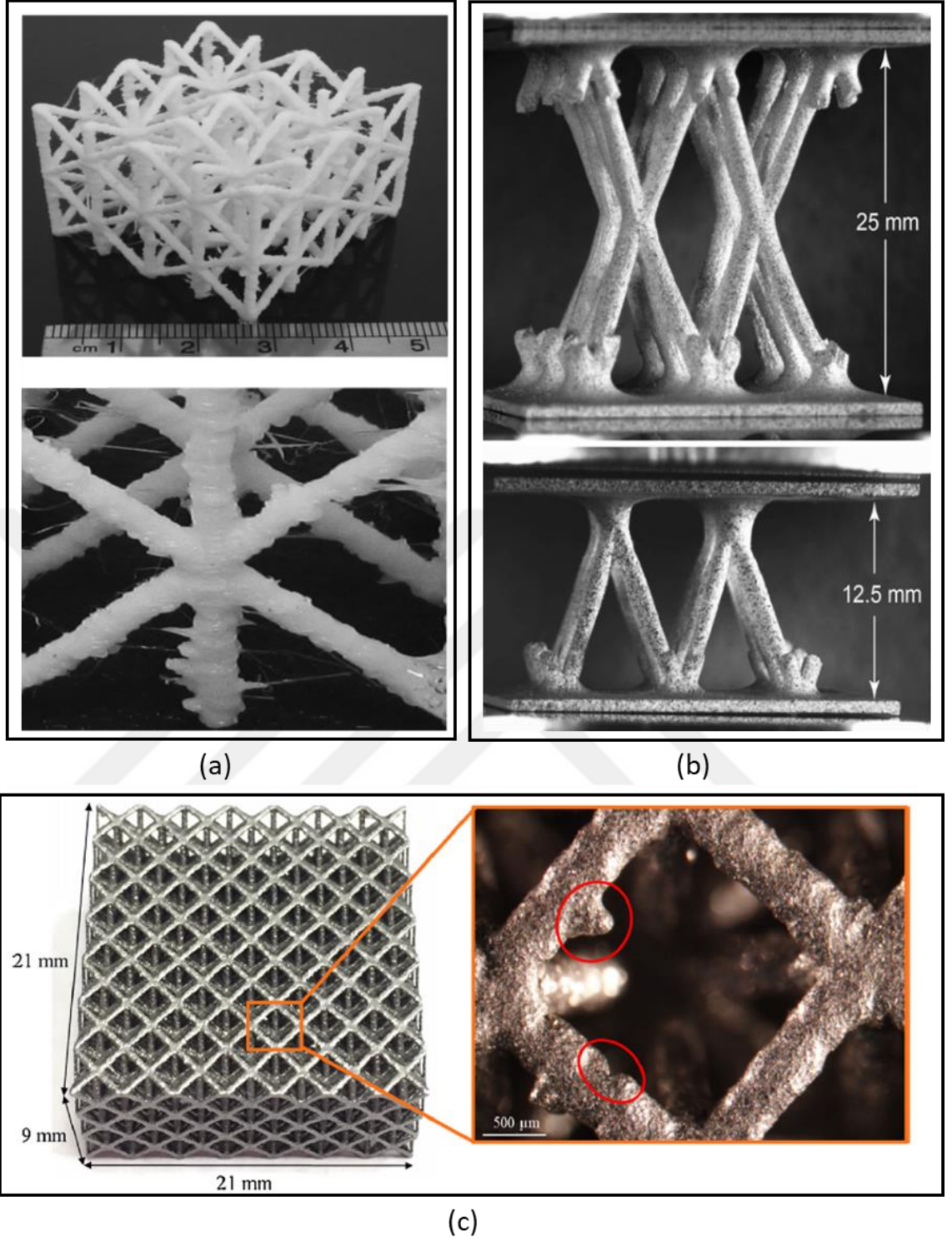
Eklemeli imalat yöntemleri karmaşık hiyerarşiye sahip farklı ölçeklerde hücresel yapıların üretilme kabiliyetine sahip olsa da mevcut teknolojiler beklenen doğruluk ve hassasiyetle hücresel yapıların yeniden üretilmesini sağlayamamaktadır. Katman katman üretim strateji nedeniyle her bir farklı üretim grubunda, farklı geometrik ve malzeme özellikleri gözlemlenebilmektedir [28]. Bu nedenden ötürü, tasarlanan latis yapıların bilgisayar destekli modeli ile üretilen yapı geometrisi arasında farklılıklar sıkça görülebilir [69]. Latis yapıların geometri ve malzeme özelliklerinde görülen değişimler, mikro seviyede, latis yapıların en küçük bileşeni çubuk elemanlar seviyesinde, orta ölçekte birim hücre seviyesinde veya büyük ölçekte, tüm latis yapı seviyesinde incelenebilir. Literatürde mevcut birçok çalışma, üretimde gerçekleşen bu değişimleri, çubuk elemanlar seviyesinde inceleyerek, değişim ve belirsizlikler yüksek hassasiyetle karakterize etmişlerdir [13,34,78,79].

Çubuk elemanların mekanik özellikleri üretim hızı, üretim yönü ve ısıl işlemler gibi üretim ve ikincil işlem parametrelerine bağlıdır. Mikro seviyede, çubuk elemanlarda

gözlemlenen geometrik kusurlar; boşluklar, gözenekler, saçaklar, yapının mekanik ve deformasyon davranışı açısından önemli bir etkiye sahiptir. Geometrik kusurlar ve homojen olmayan malzeme tabakasının biriktirilmesi sırasında kaçınılmazdır. Bu kusurlar, özellikle imalat sınırlarına yakın inşa edilmiş özelliklere sahip hücresel yapılarda oldukça büyüktür [34]. Kusurlar, latis yapıların fonksiyonel kullanımı için değil, aynı zamanda elastik ve deformasyon davranışlarını ciddi şekilde etkilemektedir [25,27].

EFF yöntemi kafes yapıların üretimi için iyi bir teknik olmasına rağmen, bu yöntemle üretilen parçalar üretim özelliklerinden ötürü düşük geometrik tolerans ve istenmeyen yüzey pürüzlülük değerlerine sahip olabilmektedir [80].

Latis yapıların eklemeli imalat yöntemleriyle üretimi sırasında gözlemlenen en yaygın değişim ve belirsizlikler; merkez sapmaları, saçaklar, birleşme noktalarında fazla malzeme yığılması, boşluklar ve gözeneklerdir. Söz konusu yaygın kusurlar ve üretim sırasında oluşan değişimler Şekil 2-13'de gösterilmiştir.



Şekil 2-13: Latis yapıların eklemeli imalat yöntemleriyle üretimi sırasında meydana gelen kusurlar (a) EFF yöntemiyle üretilen YMK-Z latis yapı; saçaklar ve doğruluk hassasiyeti düşük yan profil [23], (b) SLE yöntemiyle üretilen HMK latis yapı; birleşme noktalarında fazla malzeme yığılması, düşük boyut hassasiyeti [81], (c) SLE yöntemiyle üretilen YMK latis yapı; düşük yüzey kalitesi, metal tozunun çubuk eleman boyunca yerel küreleşmesi [82].

Latis yapılarda oluşan kusurlar literatürde farklı yaklaşımlar kullanılarak karakterize edilmiştir. Birçok çalışma değişim ve belirsizliklerin modellenmesinde stokastik yaklaşımları kullanmışlardır. Stokastik yaklaşımlarda ilk alternatif değişimleri rassal değişkenler yöntemi kullanarak modellemektir. Burada merkez sapmaları, çap değişimleri gibi kusurlar üretilen numuneler üzerinden sağlanan ölçümlerin bir dağılımı cinsinden ifade edilmektedir. Bu çerçevede; Park vd. [20] EFF yöntemiyle üretilen çubuk elemanlarda, yığılmış her bir katman kesit alanında gerçekleşen değişimleri rassal değişkenler yöntemiyle modellemişlerdir. Lozanovski vd. [31] farklı açı değerleriyle üretilen çubuk elemanlarda merdiven etkisi nedeniyle gözlemlenen eliptik kesit alanı oluşum eğilimini ve kesit alanı parametrelerini; kütle atalet momenti, merkezden sapmalar, rassal değişkenler yöntemiyle modellemiştir. Görgülüarslan vd. [21] üretilen çubuk elemanların çap değerlerinde gözlemlenen değişimleri, deneysel numuneler üzerinden elde ettiği fiziksel veriye rassal değişkenler aracılığıyla farklı olasılık dağılım fonksiyonları uydurarak modellemiştir. Burada söz konusu değişimler, homojenizasyon yöntemi kullanarak yüksek hassasiyetle modellenmiş, üretilene benzer özelliklere sahip çubuk eleman modellerinin karakterizasyonu sağlanmıştır.

Üretim sırasında oluşan değişimlerin karakterize edilmesine kullanılan diğer bir stokastik yaklaşım rassal alan modellemesidir. Rassal alan modellemesi, rassal değişkenler yönteminin aksine belirli bir uzay içerisinde zamana ve konuma bağlı durağan veya durağan olmayan değişimlerin temsil edilmesinde sıkça kullanılan gürbüz bir yöntemdir. Literatürde konuma bağlı belirsizliklerin karakterize edilmesinde bu yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Kim vd. [34] eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen parçaların mekanik davranışını önemli ölçüde etkileyebilecek kusurların; merdiven etkisi nedeniyle dalgalanmalar gözlemlenen yan profil, yüzey pürüzlülüğü, uzaysal değişimlerini Gaussian süreçler yaklaşımıyla irdeleyen matematiksel bir metot önermiştir. Lozanovski vd. [35] latis yapıların belirsizlik altında rijitlik davranışının tahmin edilmesinde deneysel veriye dayalı, Markov zincirleri (Markov Chains) [68] ve Monte Karlo simülasyonları (Monte Carlo Simulations) [83] tekniklerini birleştiren yeni bir yöntem önermiştir. Bu tez çalışmasının da temelini oluşturan çalışmada, Gungor ve Gorguluarslan [84] EFF yöntemiyle üretilen latis yapılarıdaki geometrik belirsizliklerin konuma bağlı değişimlerini karakterize etmek için; farklı açı ve çap değerlerinde üretilen çubuk

elemanlar üzerinden elde edilen deneysel ölçüm verilerini rassal alan modellemesiyle karakterize etmişlerdir. Burada rassal alanın ayrıklaştırılmasında Karhunen-Loève (KL) açılımı ve Açılım Temelli Optimal Doğrusal Tahmin (ATODT) tekniklerini kullanmışlardır. Belirsizlikler ve değişimleri içeren üretilene benzer çubuk elemanların sonlu elemanlar modellerini, voksel çözüm ağı elemanları kullanılarak oluşturmuşlardır.

Latis yapıların üretiminde meydana gelen kusurların incelenmesi ve belirsizlikler içeren sayısal hesaplama modellerinin oluşturulması, latis yapıların mekanik özelliklerinin öngörülebilmesi, istenilen parça performansını sağlayacak uyarlanabilir üretim parametrelerinin kullanılabilmesi, üretilen parçanın kalite değerlendirmesi için gerekli deneysel ölçüm sayısının azaltılabilmesi ve üretim maliyetlerinin düşürülebilmesi açısından avantajlar sağlamaktadır.

2.3 Olasılıksal Süreçler ve Rassal Alan Tanımı

Bu bölümde rassal alan modellemesi için gerekli istatistiksel kavramlar ve metotlar incelenmiştir. ‘Rasgelelik’ kavramı bir model veya düzen eksikliği olarak tanımlanabilir. Bu özellik, bir uzay-zaman ortamında tanımlanan çoğu nesnenin fiziksel gerçekleştirmelerinde görülebilir. ‘Rasgelelik’ kavramı için genel olarak iki kaynak kabul edilir. Kaynaklardan ilki, gözlemlenen olgunun doğasında var olan bir düzensizlik ve ayrıntılı bir deterministik tanımlamanın imkansızlığıdır. Örneğin, kuantum mekaniğindeki Belirsizlik Prensibi ve gazın kinetik teorisi bu sınıfta irdelenir. Diğer bir kaynak ise, ilgili süreçler hakkında genelleştirilmiş bir bilgi eksikliği ve buna bağlı deterministik tanımlamanın yetersizliğiyle olabilir [85]. Bu sorun sınıfıyla ilişkili belirsizlik düzeyi genellikle eldeki işlem veya problem hakkında daha fazla gözlem kaydedilmesi ve işlemin gözlemlendiği ölçüm cihazlarının iyileştirilmesiyle azaltılabilir. Örneğin, finansal piyasa davranışının bir olasılık süreci olarak modellendiği ekonometrik bir seri, bu kategori içerisinde değerlendirilmektedir. Veri sayısının artırılması ve verilerin güvenilirliği olasılık sürecinin modellenmesinde avantaj sağlar. Diğer bir taraftan, eksiksiz veri kümesi sağlanmış en küçük seviyelerde gerçekleşen bir malzeme akışı, tamamen deterministik anlamda değerlendirilebilir. Farklı bir örnek olarak; bir yağ ortamının özellikleri, ortam içerisinde belirli bir uzaysal konumda benzersiz olarak tanımlanabilir ancak uzay içerisindeki farklı noktalarda değişkenlik gösterebilir. Bu ortam için yüksek doğrulukta deterministik bir

değerlendirme, bu özelliklerin tüm noktalarda, hatta nispeten fazla sayıda noktada ölçülmesini gerektirir. Bu uygulamada oldukça maliyetli ve pratik değildir. Sonlu sayıda gözlemden, bu özellikler rassal değişkenler olarak veya daha yüksek bir karmaşıklıkla birlikte, gerçek ortam özelliklerine sahip rassal süreçler olarak modellenebilir [32].

Bir sistemin cevabındaki rasgelelik, girdi ya da sistem kullanıcısı tarafından uyarılabilir. Nedensellik perspektifinden bakıldığında, çıktı, bir uyarma veya kullanıcı üzerindeki bazı başlangıç koşulları olmadan mevcut olamaz. Paralel bir olasılık argümanı, girdi veya kullanıcı rastgele olmadan çıktının rasgele olamayacağı yönünde yapılabilir [32].

Zaman ve uzayda rastgele dalgalanmalar içeren birçok fiziksel nicelik, olasılıksal süreçler, alanlar kullanılarak tanımlanabilir. Genel mühendislik alanlarından örnekler; deprem yer hareketi, deniz dalgaları, rüzgâr türbülansı, yol pürüzlülüğü, geometrik değişimler ve süreksizlikler, rastgele ortamlardaki dalgalı özelliklerdir. Bu miktarlar için, sürecin olasılık özellikleri, geçmişte alınan ölçümler ve yapılan araştırmalardan bilinmektedir. Yapı mühendisliğinde, yüklemeyi veya mekanik sistemi etkileyen parametrelerin rastgele olasılık özellikleri, karmaşıklıkları nedeniyle çoğu zaman sistemin yapısal cevabının rastgele sürecini hesaba atmak için direkt olarak kullanılmaz. Bunun yerine ilgili olasılıksal süreç örnek fonksiyonlar ve simülasyonlar ile temsil edilir. Örneğin, ince kabuk yapılarının kararlılık analizlerinde, yapısal tepki genel olarak doğrusal olmayan ve çözüm yolu boyunca kritik noktalar sergileyecektir. Bu durumda cevabın olasılıksal özelliklerini Monte Carlo simülasyonları haricinde diğer yöntemler kullanılarak hesaplamak çok zor olabilir. Bu örnek fonksiyonlar olasılıksal değişken veya alanların özelliklerini doğru bir şekilde temsil etmelidir [86].

Fiziksel davranışın gerçekçi temsil edilmesinin doğruluğu ve istatistiksel verilerin gerekliliğine bağlı olarak fonksiyonlar, durağan veya durağan olmayan, homojen veya homojen olmayan, tek boyut veya çok boyutlu, Gaussian eğilimli veya Gaussian eğilime sahip olmayan özellik gösterebilir. Örnek fonksiyondaki temel gereksinim, işlemin mevcut olasılıksal bilgisinin doğru gösterimidir. İlgili matematiksel model, gerekli olasılıksal özellikleri ürettiği sürece uygun şekilde seçilebilir olduğundan olasılıksal süreç veya rassal alan için farklı temsil yöntemleri geliştirilmiştir. Olasılık süreçler için en yaygın temsil yöntemleri [86];

- Spektral gösterim
- Karhunen-Loève açılımı
- Polynomial Chaos açılımı
- Wavelet gösterimleri

Olarak sınıflandırılır.

Pratik uygulamalar için, Karhunen-Loève ile kovaryans fonksiyonunun açılımı en verimli yöntemdir [85]. Bu yöntem, yalnızca Gaussian işlemleri için geçerli olduğundan, ikincil istatistiksel momentler (ortalama, kovaryans) açısından belirsizlikler büyük yapısal sistemler için bile kolayca ölçülebilir. Polynomial Chaos açılımı, Karhunen-Loève açılımının bir genellemesi olarak görülebilir ve Gaussian olmayan olasılıksal süreçler ve alanlar için de uygulanabilir. İstatistiksel olarak uyarılmış deterministik veya olasılıksal özelliklere sahip yapıların tepkisini hesaplamak için en genel olarak uygulanabilir araç Monte Carlo Simülasyon prosedürüdür. Monte Carlo Simülasyonu yanıtın değişkenliği hakkında bilgi almak için istatistik yasalarının kullanıldığı rasgele örnekleme dayanmaktadır. Cevabın güvenilirliğini hesaplamak için istatistiksel tahmin prosedürleri uygulanır. Bu yöntem, aynı zamanda, tahmin edicinin kesin bir doğruluğuna ulaşmak için gereken simülasyon sayısını da yönetir.

Doğrusal olmayan sistemler için istatistiksel olarak eşdeğer doğrusallaştırma yöntemi oldukça sık uygulanmaktadır. Monte Carlo simülasyon prosedürü tüm olasılık yapısının bilgisini verirken, eşdeğer doğrusallaştırma cevabın sadece ikinci derece moment karakteristiklerini sağlar, doğrusal olmayan daha büyük sonlu elemanlar sistemleri için, doğrusal sistemler için geçerli olan süperpozisyon ilkesinin korunması özellikle hesaplamaların verimliliği ve maliyetin düşürülmesi açısından oldukça önemlidir. Olasılıksal yanıtın hesaplanması için temel fikir bu yöntemde de KL açılımına dayanmaktadır. Bu, olasılıksal yükleme işleminin her bir Karhunen-Loève vektörü için karşılık gelen KL yanıt vektörünün hesaplanması ile gerçekleştirilir. Her serbestlik derecesinin tüm ikinci moment karakteristikleri eşit öneme sahip olmadığı için, hesaplama maliyeti, problemin boyutunun azaltılmasıyla önemli ölçüde azaltılabilir [9].

Rassal değişkenler yöntemi, ilgili probleme ait özelliklerinde gözlemlenen değişim ve belirsizlikleri tek bir değişken aracılığıyla temsil eder. Bu durum, ilgilenilen problemin

uzay ve alanı içerisinde var olabilecek konuma bağılı varyasyonların ihmal edildiği anlamına gelir. Uzay içerisinde özelliklerin homojenleştirilmesi ve konuma bağılı değişimlerin ihmal ediliyor olması güvenilirlik hesaplamalarına yayılan ek epistemik belirsizliklerin ortaya çıkarır, bu da hasar olasılığı tahminlerinin doğruluğunu etkiler.

Rassal alan modellemesi, varyasyona sahip belirsizliklerin uzaysal alan içerisindeki değişimlerini hassasiyetle inceler, her bir serbestlik derecesinde değişim trendi incelenerek güvenilirlik hesaplamalarında ek epistemik belirsizliklerin oluşması önlenir [37].

Yukarıda açıklanan rassal değişkenler ve rassal alan yöntemleri, uygulamada ayrıntılı olarak ele alınan yaygın temsil yöntemleridir. Örnek olarak; ince kabuklu yapıların kararlılık problemlerinde, deneyler ile elde edilen değerler ve yüklerin sayısal hesaplamaları arasındaki belirgin farklar nedeniyle dünya genelinde özel bir ilgi görmüştür. Burada deneysel ve sayısal hesaplama değerleri arasında gözlemlenen farklar, doğrusal olmayan davranış ve kusur, değişim ve belirsizliklerin bir arada gerçekleşmesine bağlıdır. Bu alanda yapılan araştırma çalışmalarının çoğu geleneksel, yani geometrik kusurların etkileri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bununla birlikte, diğer kusur kaynakları; kalınlık değişimleri, mükemmel olmayan sınır koşulları, yükte yanlış hizalama, malzeme özelliklerinde dalgalanmalar vb. kritik yük üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabilir. Yine, örnek olarak; deney numunelerinin üretimi sırasında yapılan incelemeler aynı üretim sürecinden çıkan kabukların bile şekil ve büyüklük bakımından farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Üretim sürecinde ortaya çıkan geometrik ve diğer kusurlardaki bu doğal rasgelelik, kritik yükün deterministik tahminlerinin özellikle silindirik kabuklarda önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, belirli klasik deterministik, asimptotik veya amaçlara dayalı genel lineer olmayan analizlere dayanan ince kabuk yapı tasarımlarının, potansiyel olarak aşırı konservatif tasarımlara yönelik deneysel veriler kullanılarak deneysel veriler temelinde düzeltilmesi gerekmektedir. Geometrik kusurlar, mükemmel olmayan sınır koşulları, yükte görülen yanlış hizalama ve malzeme özelliklerinde dalgalanmalar vb. kusurların istatistiksel süreç analizleri, literatürde rassal değişken ve rassal alan yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir [86].

2.3.1 Rassal Değişkenler

Rasgele bir değişken X , $-\infty < x < \infty$ aralığında farklı değerler alabilir. Burada rassal değişken, X , rassal değişkenin özel değeri ise x ile temsil edilmektedir. Rassal değişkenler ayrık ve sürekli olmak üzere iki tiptedir. Eğer rassal değişkenin sadece ayrık değerler $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, almasına izin verilirse, söz konusu değişkenler ayrık rassal değişkenler olarak sınıflandırılır [87]. Örneğin, bir üretim hattında kullanılan kalıbın yuvarlanması gerçekleşmesi yalnızca tamsayı değerlerini alabilir. Bu nedenle, ayrık bir rassal değişkendir. Nehir üzerinde bir noktadaki yıllık taşkın sayısı yalnızca tamsayı değerleri alabilir, bu nedenle ayrık rastgele değişken davranışı gösterir. Diğer bir taraftan, rassal değişkenin belirtilen bir aralık dahilinde herhangi bir gerçek değeri almasına izin verilirse, sürekli rastgele değişken olarak adlandırılır. Örneğin, olası maksimum 100 puana sahip bir testteki tüm puanların ortalaması, tamsayı olmayanlar da dahil olmak üzere 0 ile 100 arasında herhangi bir değer alabilir; bu nedenle, sınıf ortalaması belirli değerler aralığında, sürekli bir rastgele değişken olacaktır [88].

Bir sürekli rassal değişkenin örnek alanı üzerindeki dağılımını tanımlayan matematiksel fonksiyona olasılık dağılım fonksiyonu denir ve $f_X(x)$ olarak gösterilir. Olasılık dağılım fonksiyonu, rastgele bir değişkenin belirli bir aralıkta alabileceği tüm olası değerleri ve gerçekleşme olasılıklarını tanımlayan istatistiksel bir fonksiyondur.

X rassal değişkeninin x_1 ile x_2 aralığında yer alma olasılığı şu şekilde ifade edilir;

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f_X(x) dx \quad (1)$$

Burada, $f_X(x)$ olasılık dağılım fonksiyonudur. Eğer aralık sonsuz derecede küçülürse, x_1 ve x_2 birbirine neredeyse eşit hale gelir, $P(x_1 \leq X \leq x_2)$ gerçekleşmiş olasılığı sıfıra yakınsar. Diğer bir deyişle, integral tek bir noktada çizgi integral haline gelir ve sıfır değerine eşit olur. Bu özellik ayrık ve sürekli değişkenleri birbirinden ayıran bir özelliktir. Benzer şekilde Eşitlik 1'de verilen integral sınırlarının $-\infty < x < \infty$ olması durumunda $P(x_1 \leq X \leq x_2)$ olasılığı 1 değerine yakınsamalıdır. Bu olasılık dağılım fonksiyonlarının gerekli özelliğidir. Spesifik olarak, sürekli bir rastgele değişkenin belirli bir tamsayı değeri alma olasılığı sıfıra eşittir; yani sürekli rasgele değişkenler için olasılıklar bir aralık üzerinden tanımlanmalıdır [88].

İrdelenen problemlerde çok sayıda gözlem veya veri kaydı mevcutsa, verinin dağılım eğiliminin görülebilmesi için bir frekans şeması veya histogram çizilebilir. Veri aralığı, yaklaşık olarak benzer büyüklükteki aralıklara bölünerek ve aralık içinde düşen gözlem sayısı ile orantılı bir alanla her aralıkta bir dikdörtgen oluşturularak bir histogram oluşturulabilir.

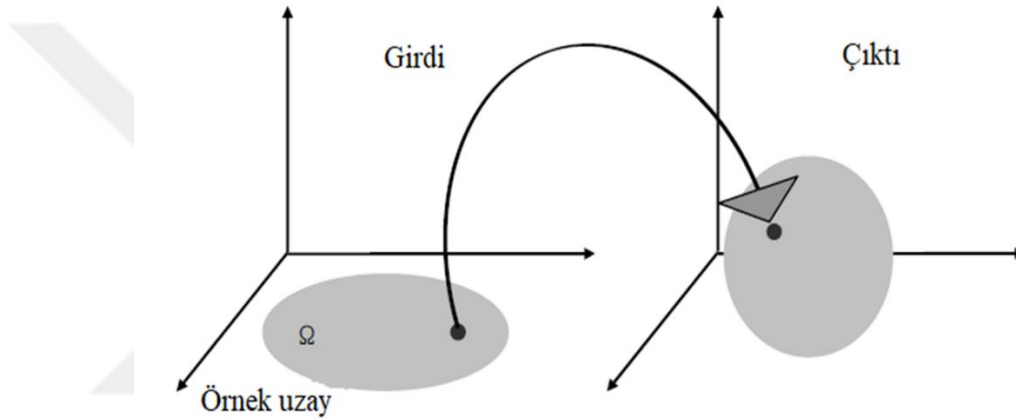
Histogram, veri ve konumlardaki yayılma gibi özellikleri görselleştirmek için kullanışlı bir araçtır. Oluşturulan histogram sütunları, alanların toplamı ile normalleştirildiğinden, histogram örnek popülasyonun olasılık dağılımını temsil eder. Histogram fazla sayıda gözlemle oluşturulur ise gözlem sayısının artışıyla birlikte aralıklar sınırsız olarak küçülecektir ve olasılık dağılımı sürekli bir eğri haline gelecektir. Dağılımlar genellikle bir veya daha fazla parametreye sahiptir. Bu parametreler, araştırılan probleme ve koşullara özgü belirli değerleri alır. Bir dağılımın parametreleri, momentleri (örneğin, ortalama, varyans ve çarpıklık) cinsinden ifade edilebilir. Bu parametre moment ilişkilerini bilmek, örnekleme ve istatistik yoluyla elde edilen ortalama ve standart sapma gibi parametreleri tahmin etmek için oldukça yararlıdır. Literatürde sürekli rassal değişkenler için sıkça kullanılan olasılık dağılım fonksiyonları; Normal, Lognormal, Weibull, Gaussian, Üstel ve Gamma, ayrık rassal değişkenler için ise Bernoulli, Binomial ve Poisson dağılım fonksiyonlarıdır [88].

2.3.2 Rassal Alan

Pratik bir mühendislik yapısının yükler, geometri, malzeme özellikleri, üretim süreçleri ve operasyonel ortamlardaki belirsizlikleri vardır. Bu belirsizlikler uzay ve zaman alanları içerisinde dalgalanabilir ve yapının tepkisi bu parametrelerde görülen değişimlere bağlı olarak değişir. Uzaysal ve zamana göre değişen verilerin tahmini ve temsili, belirsizlik analizini içeren gerçekçi simülasyonlar için son derece önemli hale gelmiştir. Farklı konumlar arasındaki korelasyon ile ilişkilendirilen değişkenliğin matematiksel modeli, rassal alan modellemesi aracılığıyla elde edilebilir [87].

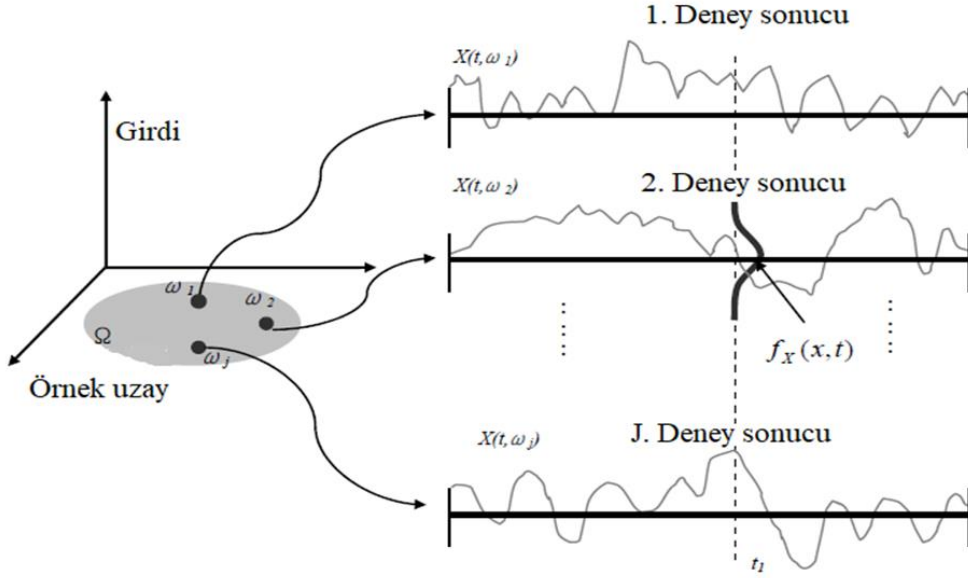
Rassal alan bir veya daha fazla değişkenin rastgele bir fonksiyonudur. Yapısal problemlerde birçok dağınık özellik rastgeledir. Örneğin, yapısal mekanik problemler, yükler, dayanım ve malzeme özellikleri rassal alanları içerir. Girdilerin verimli ve gerçekçi temsili, rasgele yanıt olasılıkları için doğru tahminlerin yapılmasını kolaylaştıracaktır. Bu nedenle, mühendisler bu rassal alan girdilerini hassas bir şekilde

analiz etmeli ve yapıların güvenilirliğini belirlemek için gerilme, yer değiştirme, doğal frekans vb. rastgele yanıtları izin verilen sınırlar içerisinde değerlendirebilmelidir. Sonlu elemanlar yöntemi gibi geleneksel deterministik analizler, yeterli olduğu düşünüldüğünde, tek bir tasarım noktası kullanabilir (Bkz. Şekil 24), fakat tek bir tasarım noktası, bu simülasyonu değişen yükler ve malzeme özellikleri altındaki sistemleri karakterize ederken yetersiz kalacak ve gerçekçi olmayacaktır. Örneğin, bir uçağın ani rüzgâr yüklerine tepkisinin incelendiği durumda, her bir ani rüzgâr türü ve hızı tek bir simülasyonla temsil edilemez ve gerçekleştirilemez [12]. Deterministik yaklaşımın, uzay içerisinde tek bir tasarım noktası düşünerek girdi ve yanıt değerlendirmesinin görsel anlatımı Şekil 2-14'te gösterilmiştir.



Şekil 2-14: Deterministik yaklaşım [87].

Uzaysal değişkenliğin matematiksel modeli, iki farklı konum arasındaki korelasyon ile temsil edilen, rassal alan kullanılarak tanımlanabilir. Genel olarak, rassal alan ve rassal süreç terminolojileri literatürde birbirini yerine kullanılabilir, ancak rassal alan çok boyutlu değişimleri ele alırken, rassal süreçler tek bir koordinat için kullanılır ve bu koordinat genellikle zaman değişkeni olmaktadır [89]. Rassal sürecin temel fikri, her deneyin sonucunun, tek bir değer yerine belirli etki aralığında tanımlı bir fonksiyondur. Bu nedenle, rassal sürecin analizi, sadece bir noktadan sonuç yerine bütün bir tasarım alanı oluşturabilen gerçekçi bir yaklaşımdır. Belirli bir örnek uzaya uygulanan rassal süreç Şekil 2-15'te gösterilmiştir. Örnek uzay (Ω) içerisinde, farklı tasarım noktalarında örneklemeler alınmış, her bir deney sonucu zaman (t) fonksiyonu olarak incelenmiştir.



Şekil 2-15: Rassal alan yaklaşımı [87].

Örnek uzay, Ω , içerisinde, her bir nokta ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$) için oluşturulan yanıt fonksiyonu rassal sürecin gerçekleşmesi olarak bilinmektedir. Uzay içerisinde tüm gerçekleşmelerin toplamı genel uyum veya trend olarak bilinmektedir. $[t_0, t_n]$ aralığında bir örnek kümesi düşünüldüğünde, n adet X rassal değişkeninin bileşik olasılık dağılımları, belirli bir rassal alanı tanımlar.

Böylece, $X(t)$ rassal süreci için ikincil moment karakteristikleri; ortalama ve otokovaryans fonksiyonu, rassal değişkenler için kullanılan formüllere benzer şekilde tanımlanabilir [12].

Burada $X(t)$ rassal süreci için ortalama;

$$\mu_X(t) = E[X(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x, t) dx \quad (2)$$

$X(t)$ rassal alanı için kovaryans;

$$\begin{aligned} C_{XX}(t_1, t_2) &= E[(X(t_1) - \mu_X(t_1))(X(t_2) - \mu_X(t_2))] \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} (x_1 - \mu_X(t_1))(x_2 - \mu_X(t_2)) f_{XX}(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Eşitlikleri kullanılarak elde edilebilir.

2.3.2.1 Durağanlık Kavramı

Yaygın zaman serilerini tanımlamada durağanlık kavramı önemli bir stokastik sınıflandırma ölçütüdür. Durağan modeller, sürecin zaman içerisinde değişmeyen, sabit bir ortalama ve varyans değeriyle değişen olasılık özellikleriyle istatistiksel dengede kaldığını varsayarlar. Bununla birlikte, birçok zaman serisinin genellikle durağan olmayan ve özellikle zaman içinde değişen ortalama değeriyle daha iyi tahmin ve temsil edildiği deneyimlenmiş bir gerçektir. Bu nedenle, ekonomik tahmin yöntemlerinin çoğunun, durağan olmayan süreçler için daha uygun olduğu gösterilmiştir.

Durağan olmayan süreçler, zamana bağlı olarak ikincil moment karakteristikleri; ortalama ve varyans değerlerinin değiştiği stokastik sınıflandırma türüdür. Pratikte zaman serilerinin çoğunu ortalama hata karelerinin minimum değerleriyle temsil eden tahmin modelleri, otoregresif entegre hareketli ortalama süreçleri adı verilen durağan olmayan süreçler sınıfının bir üyesidir [90].

$X(t)$ rassal alanına ait olasılık dağılım fonksiyonu $f_X(x, t)$ zamandan bağımsız ise, yani $f_X(x, t) = f_X(x)$ ise, rassal süreç durağan sınıfta incelenir. Buna göre, durağan sürecin tüm momentleri zaman değişkeninden, t , bağımsızdır. Diğer bir taraftan, rassal alan içerisinde ikincil moment karakteristikleri (μ_X, C_{XX}) her bir zaman adımı için değişkense rassal süreç durağan olmayan sınıfta incelenir [87].

2.3.2.2 Oto-kovaryans ve Oto-korelasyon Tanımı

Durağan ve Gaussian eğilime sahip rassal alan $H(x, \theta)$, rassal alan $\Omega \in \mathbb{R}^d$ içerisinde ayrıklaştırılmış rassal değişkenlerin tamamı; $x = \{x_i\}$ and $i = \{1, 2, \dots, n\}$ olmak üzere, bir boyutlu deneysel oto-korelasyon fonksiyonu (OKF) şu şekilde tanımlanır[90];

$$R_{HH}(\tau) = \frac{C_{HH}(\tau)}{\sigma_x^2} = \frac{1}{(n-1)\sigma_x^2} \left(\sum_{i=1}^{n-j} (x_i - \mu_x)(x_{i+j} - \mu_x) \right) \quad (4)$$

Burada, $j = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$, rassal alan içerisinde veri sayısı veya ayrıklaştırılmış rassal değişken sayısı, C_{HH} , oto-kovaryans fonksiyonunu, $\tau = |x_i - x_{i+j}|$, iki nokta veya konum arasındaki gecikme veya bağlı mesafeyi, σ_x^2 ve μ_x , rassal alanın varyans ve ortalama değerini temsil etmektedir. Bu bileşenlerle birlikte OKF, R_{HH} , alan içerisinde

iki nokta, (x_i, x_{i+j}) , arasındaki istatistiksel ilişkiyi tanımlar. Başlangıçta yapılan homojen ve durağan rassal alan yaklaşımı, rassal alanın konumdan bağımsız sabit bir ortalama ve varyans değeriyle temsil edilebileceğine dayanmaktadır. Eşitlik 4'te tanımlanan deneysel oto-korelasyon, eğri uydurma yöntemiyle aday OKF modelleri kullanılarak da modellenebilir. Literatürde deneysel oto-korelasyonun eğri uydurma yöntemiyle temsilinde sıkça kullanılan OKF modelleri Çizelge 2-2'de listelenmiştir, burada τ gecikmeyi temsil eder ve c , rastgele bir alanın dalgalanma oranının bir ölçüsü olan korelasyon uzunluğudur [91,92].

Çizelge 2-2: Oto-korelasyon modelleri, $R(\tau)$

Model Numarası	Eşitlik	Model İsmi
I	$R(\tau) = \exp\left(-\frac{ \tau }{c}\right)$	Üstel
II	$R(\tau) = \exp\left(-\left(\frac{ \tau }{c}\right)^2\right)$	Gaussian
III	$R(\tau) = \left(1 - \frac{ \tau }{c}\right) \exp\left(-\frac{ \tau }{c}\right)$	Genişletilmiş Üstel
IV	$R(\tau) = \left(1 - \frac{ \tau }{c}\right)$	1. Derece Küresel
IV	$R(\tau) = \left(1 - \frac{3 \tau }{2c} + \frac{1}{2}\left(\frac{ \tau }{c}\right)^3\right)$	3. Derece Küresel

Rassal alan içerisinde τ 'nin sabit olduğu durumda, korelasyon uzunluğunun, c , sonsuza yakınsaması durumunda Çizelge 2-2'de sağlanan eşitliklerle hesaplanan korelasyon katsayıları, R , 1 değerine yakınsar. Diğer bir deyişle, rassal alan içerisindeki noktalar birbiriyle mükemmel ilişkilidir ve sabit bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Öte yandan, c , sifıra yaklaşacak kadar küçük olduğunda, R değerleri sifıra yakınsar; yani rassal alanın içerisindeki dalgalanmalar yüksektir ve noktalar arasında neredeyse korelasyon yoktur. Bu durumda veriler rassal değişkenler ile modellenebilir. Diğer bir deyişle, verilerin rassal alan yöntemiyle modellenebilmesi için iki nokta arasında bir korelasyon ilişkisi olmalı, c değeri tanımlanabilir olmalıdır. Sabit bir τ için, daha büyük bir c , rassal alanın yüksek ilişkili olduğu ve yüksek korelasyonla dalgalandığı anlamına gelir; veriler rassal alan aracılığıyla modellenebilir.

Benzer şekilde oto-kovaryans fonksiyonu rassal alan içerisinde x_i ve x_{i+j} noktalarının arasında kovaryans ilişkisini göstermektedir. Rassal alan ortalamasının, μ_x , sabit olmasıyla benzer, varyans ve kovaryans değerlerinin durağan olduğu ve alan içerisinde konuma bağlı değişmediği, noktaların gerçek konumlarından bağımsız olarak iki nokta arasında sabit ayırma mesafesinin olduğu varsayımı da yapılabilmektedir. Bu varsayım, ikinci derece durağanlık olarak tanımlanır; ortalama değerine benzer şekilde alan içerisinde sabit bir varyans ve kovaryans değeri mevcuttur [33,90]. İkinci derece durağan varsayımıyla birlikte, oto-korelasyon ve oto-kovaryans fonksiyonları arasında ilişki şu şekildedir;

$$R_{HH}(\tau) = \frac{C_{HH}(\tau)}{\sigma_x^2} \quad (5)$$

Oto-kovaryans ve oto-korelasyon fonksiyonları kullanılarak rassal alan içerisindeki uzaysal değişimler, her bir noktanın birbiriyle korelasyon ilişkisi elde edilir.

2.3.3. Rassal Alanın Ayırıklaştırılması

Rassal alan ayırıklaştırması, uzaysal değişimlerin temsilinde önemli bir aşamadır. Birçok mühendislik problemlerinde uzaysal değişkenliği karakterize etmek için çeşitli ayırıklaştırma yöntemleri uygulanmıştır, özellikle kompozit yapıların konuma bağlı değişen, homojen olmayan malzeme özelliklerinin karakterize edilmesinde farklı ayırıklaştırma yöntemleri gerçekleştirilmiştir [93–95].

Seri açılımı yöntemlerine dayanan ve uzay içerisindeki değişimleri hassas bir şekilde temsil edebilme kabiliyetine sahip olan Karhunen-Loève ve Açılım Temelli Optimal Doğrusal Tahmin yöntemleri en verimli yöntemlerdir [96]. Bu çalışmada rassal alanın ayırıklaştırılması aşamasında bu yöntemler kullanılmıştır.

2.3.3.1 Karhunen-Loeve Açılımı

Bazı durumlarda problemin çözümü için gerekli fonksiyonların kapalı formu elimizde bulunmayabilir, fonksiyonlar parçalı davranışa sahip olabilir veya kesin çözümleri elde edilemeyebilir. Bu durumlarda, fonksiyonların seri açılımı cinsinden ifade edilmesi matematikte sıkça kullanılan bir yöntemdir. Ayırıklaştırma aşamasından sonra, sürekli rassal bir süreç, sonsuz sayıda rassal değişken dizininden oluşan bir kümedir. Ortogonal polinomların kullanımı, Taylor serisi açılımı ve seri açılımı tabanlı

diğer yöntemler, uygun katsayıların elde edilmesiyle birlikte fonksiyonun kesin çözümüne yaklaşık çözümler sağlarlar [87]. Örneğin, karmaşık bir integral problemi bir seri açılımı cinsinden ifade edilerek, benzer şekilde kompleks bir optimizasyon probleminde gerekli zorlu türevler Taylor serisi açılımı aracılığıyla çözülebilir.

KL açılımı, rassal alanı seri açılımına dayanarak rassal değişkenler kümesi olarak temsil eder Homojen ve Gaussian eğilime sahip bir rassal alanın KL açılımı aracılığıyla n adet rassal değişken cinsinden ifade edilmesi Fredholm integral eşitliğinin farklı konumlarda (x_1, x_2) çözülmesini gerektirir [32].

$$\int_{\Omega} C(x_1, x_2) f_i(x_2) dx_2 = \lambda_i f_i(x_1) \quad (6)$$

Burada, $C(x_1, x_2)$ kovaryans kernel fonksiyonunu, λ_i ve $f_i(x)$ sırasıyla kovaryans kernel fonksiyonunun öz değer ve öz fonksiyonlarını temsil etmektedir. Diğer bir deyişle, KL açılımı kovaryans matrisinin spektral ayrıştırılarak öz değer ve öz fonksiyonlar cinsinden temsil edilmesidir. Buradaki zorluk Eşitlik 6'da verilen integral denkleminin, tüm korelasyon fonksiyonları için kesin çözümünü elde etmektir. Bu sorunu çözmek için Galerkin [32], Nyström [36] ve çözüm ağı temeline dayanmayan diğer yöntemler [97] kullanılabilir. Bu çalışmada Eşitlik 6'nın çözümü için, ayrık integrasyon [98] ve üstel kernel kovaryans fonksiyonunun spektral ayrıklaştırılması yaklaşımları kullanılmıştır. Böylece, rassal alanın her bir gerçekleşmesi, $H(x, \theta)$, şu şekilde gösterilebilir;

$$H(x, \theta) = \mu(x) + \sum_{i=1}^r \sqrt{\lambda_i} f_i(x) \xi_i(\theta) \quad (7)$$

Burada, $\bar{H}(x)$ rassal alanın ortalama değerini, r KL açılımındaki terim sayısını, λ_i ve $f_i(x)$ sırasıyla kovaryans kernel fonksiyonunun öz değer ve öz fonksiyonlarını ve ξ_i , standart normal dağılıma sahip rassal değişkenleri temsil etmektedir.

Sıfır ortalama ve birim varyansa sahip rassal alanı için üstel kovaryans kernel fonksiyonu Eşitlik 8'de verilmiştir. Rassal alanın oto-kovaryansı, iki nokta arasındaki bağıl mesafeye bağlı tanımlanan, $\tau = |x_i - x_{i+j}|$, bağıl mesafeler ve korelasyon uzunlukları (c) ile hesaplanmıştır.

$$C(x_1, x_2) = \sigma_X^2 \left(\exp \left(-\frac{|x_1 - x_2|}{c} \right) \right) \quad (8)$$

Rassal alanın temsili için, bu kovaryans matrisinin ayrıklaştırılması gerçekleştirilir ve en anlamlı olanların belirlenebilmesi için öz değerler azalan bir düzende sıralanır. Bu sayede, rassal alan yalnızca en anlamlı öz değerler ve karşılık gelen öz fonksiyonlar kullanılarak temsil edilebilir. Hassasiyetten ödün vermeksizin problemin karmaşıklığı azaltılır [84].

2.3.3.2 Açılım Temelli Optimal Doğrusal Tahmin

ATODT yöntemi, rassal alan ayrıklaştırılmasında kullanılan diğer bir verimli yöntemdir. Bu yöntemde, KL açılımına benzer şekilde fonksiyonun temsil edilmesinde seri açılımını kullanan bir yöntemdir. ATODT yönteminde, alan içerisinde ayrıklaştırılan düğüm noktaları üzerinden optimal şekil fonksiyonları oluşturularak korelasyon davranışı bu şekilde ele alınmaktadır. Böylece rassal alan şu şekilde temsil edilir;

$$H(x, \theta) = \mu(x) + \sum_{i=1}^r \frac{\xi_i(\theta)}{\sqrt{\lambda_i}} f_i(x)^T \sum_{H(x)_X} \quad (9)$$

Burada, $X = \{H(x_1), H(x_2), \dots, H(x_r)\}$, düğüm noktalarının doğrusal fonksiyonlarını temsi etmektedir. Eşitlikle verilen diğer bileşenler KL yöntemiyle benzer olup, bölüm 2.3.3.3.1'de verilmiştir.

2.3.3.3 Rassal Alan için Çözüm Ağı Boyutu

Rassal alanın ayrıklaştırılmasında kullanılacak çözüm ağı, (L_{RA}) , boyutunun belirlenmesi önem arz etmektedir. İdeal çözüm ağı boyutu probleme bağlıdır ve korelasyon uzunluğu, c , ile ilişkilidir [98–100].

Çözüm ağı boyutunun gereğinden fazla küçük veya büyük olarak belirlenmesi ayrıklaştırma işlemi sırasında nümerik kararsızlıklara neden olabilir. Çözüm ağı boyutunun yüksek belirlenmesi seri açılımındaki terim sayısını düşürmekte ve ayrıklaştırma işleminin doğruluğundan ödün verilmesine neden olmaktadır [99]. Öte yandan, gereğinden küçük çözüm ağı elemanları, düğüm noktalarının birbirine yaklaşması ve neredeyse çakışık hale gelmesi nedeniyle nümerik kararsızlıklara

neden olmaktadır. Çözüm ağı boyutunun söz konusu probleme ve kullanılan ayrıklaştırma yöntemine göre değişmesi nedeniyle, doğru ayrıklaştırmayı sağlamak için farklı çözüm ağı boyutlarında yakınsama çalışması yapılmalıdır.



3. DENEYSEL YÖNTEM

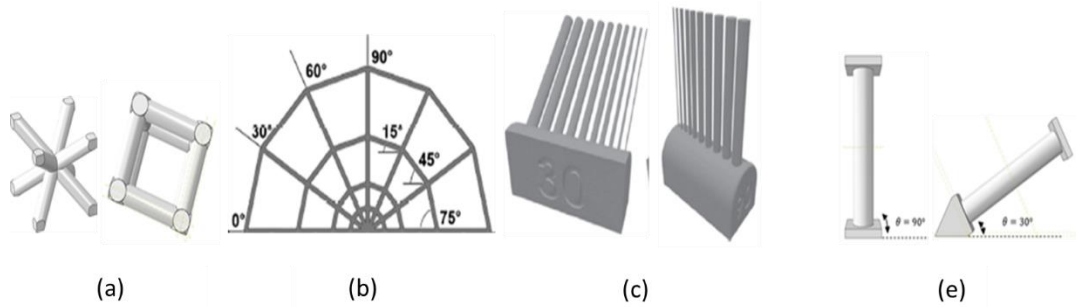
3.1 Latis Hücre Numunelerinin Üretimi ve Veri Toplama

Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen latis yapılarda üretim sürecinde meydana gelişen değişim ve kusurların modellenmesi, üretilmiş latis yapı elemanları üzerinden yüksek doğrulukta veri toplama gerektirir. Bu bağlamda, üretilecek numunelerin, latis yapıların en küçük yapı taşı olan çubuk elemanlar şeklinde üretilerek değişim ve kusurlar için hassasiyeti yüksek veri toplanması hedeflenmiştir.

Çubuk elemanlar, baskı yüzeyi ile 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° açılarla ve 1, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2, 2,5, 3, 3,5, ve 4 mm çap değerleri ile 10 mm uzunlukta üretilmesi kararlaştırılmıştır. Toplanacak deneysel verinin istatistiksel modellenmesi için çubuk elemanlar her bir numune 3 tekrar halinde olmak üzere üretilmiştir.

3.1.1 Deney Numunelerinin ve Boyutlarının Belirlenmesi

Numune tiplerini belirlemek için bir karşılaştırma çizelgesi oluşturulmuştur. Olası numune alternatifleri olarak literatürde kullanılan numuneler de göz önünde bulundurularak gösterilen dört farklı alternatif düşünülmüş ve bu kriterleri sağlayıp sağlamadıkları gösterilmiştir.



Şekil 3-1: Farklı numune alternatifleri (a) Latis birim hücre numuneleri [29,30], (b) Örümcek ağı geometrisi [27], (c) Bileşik çubuk eleman grubu [31], (d) Çerçeve tek çubuk [31]

Şekil 3-1(a)'da gösterilen latis hücreler, bütün halde bilgisayarlı tomografi taramalarının yapıldığı ölçüm yöntemleri için kolaylık sağlamaktadır; fakat mikroskop

cihazı gibi bireysel çubukların bakılması gerektiği durumlarda her bir çubuğun hücreden kesilmesi gerekmekte ve bu ikincil işlem ek zaman ve uğraş gerektirmektedir. Ayrıca tüm numuneler için aynı konumlamayı yapabilmeyi zorlaştırmaktadır. Bunun yanında latis hücre içerisinde gerek olmayan açılarda üretim de yapılacağı için hızlı üretim ve en az malzeme kullanımının mümkün olmamaktadır.

Şekil 3-1(b)'de gösterilen örümcek ağ geometrisi numune çok ince olduğundan eklemeli imalat cihazının üretim tablasında sabitlenmesi problem oluşturabilir. Ayrıca çubukların sadece bir yüzeyinden inceleme yapılabilir, diğer yüzeylerinden inceleme yapmak için çubuğu uzunluk yönünün etrafında çevirmek gereklidir; fakat bunun için çubukların ağdan kesilip incelenmesi gereklidir. Bu durum, yine ikincil işlem ihtiyacı doğuracaktır. Diğer bir alternatif, çubukların farklı çap ve açılarda bir grup halinde Şekil 3-1(c)'de gösterildiği gibi üretilmesidir. Numunelerin sabitlenmesi için kalın bir alt destek oluşturulan bu modelde, bu kalın alt kısmın tabladan sökülmesi ve numunelerin birbirlerinden ayrılması ek uğraş gerektirecektir. Çubuk elemanların mikroskopta incelenmek üzere bu numunelerden kesilerek çıkarılması işlemi, numunelerde deformasyona ve mevcut belirsizliklere ek olarak, epistemik, istenmeyen belirsizliklere neden olacaktır. Tüm bu sebeplerden ötürü bu çalışmada Şekil 3-1(d)'de gösterilen ve alt ve üst kısmında kare kesitli bir destek bulunun tek çubuk numuneleri önerilmiştir. Bu kare kesitler tek çubukların üretim tabanına sabitlenmesini sağlarken, aynı zamanda da mikroskop üzerine numuneler yatırıldığında sabit bir şekilde ölçümlerin alınmasını sağlayacak ve de tüm numuneler için aynı konumlamayı yapabilme imkânı sağlayacaktır. Bu kare çerçeve sayesinde 90°'lik aralıklarla çubuk eleman döndürülerek ölçümler alınabilecek, böylece numune üzerinde farklı yüzlerden her bir çap ve açı değeri için görüntüler elde edilebilecektir.

Çizelge 3-1: Numunelerin belirlenmesi için gerekli kriterler ve numune alternatifleri

Kriterler	Numune 1 – Latis hücre	Numune 2 – Örümcek ağı	Numune 3 – Çubuk eleman grubu	Numune 4 – Çerçevesi Tek çubuk
i) Kolay ve hızlı üretim (En az malzeme kullanımı)	1	1	2	2
ii) Numunenin üretim esnasında üretim tabanına sabitlenebilmesi.	2	1	2	2
iii) Üretim sonrası numunenin kolay sökülebilmesi.	1	1	1	2
iv) Üretim sonrası numunelerin hazır olması için ikincil işlemlerin en minimum seviyede tutulması.	0	1	1	2
v) Numunelerin mikroskop tablasına düzgün bir şekilde yerleştirilebilmesi	0	0	1	2
vi) Tüm numuneler için aynı konumlanmanın yapılabilmesi.	1	1	1	2
TOPLAM	5	6	8	12
*0: Mümkün değil 1: Az mümkün 2: Mümkün				

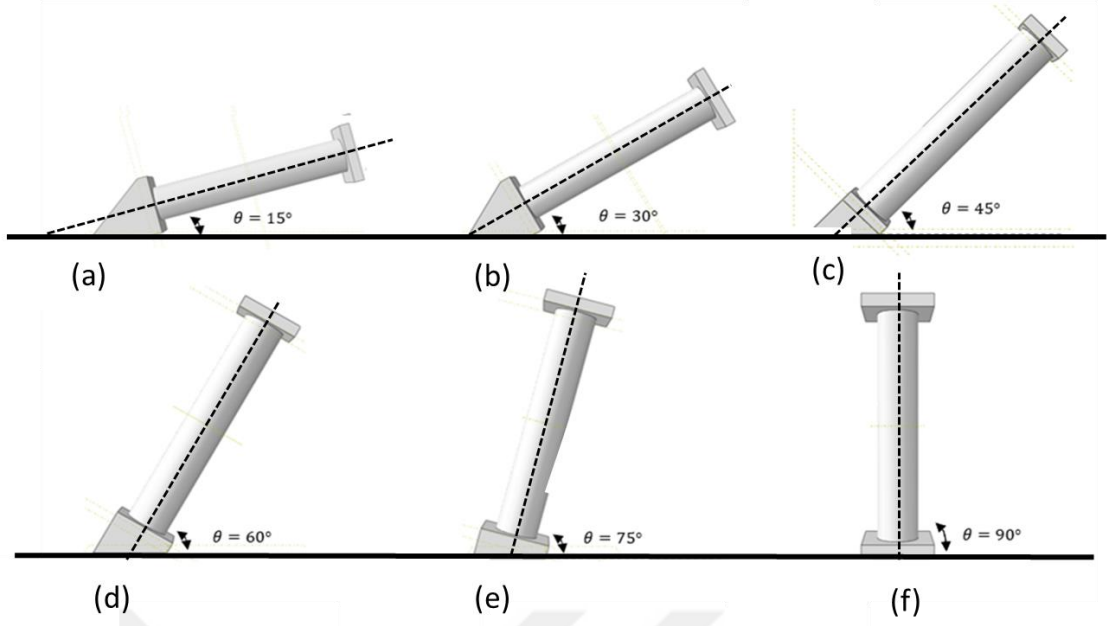
Numune boyutlarının belirlenmesinde, üretimde kullanılacak eklemeli imalat cihazı, mikroskop ölçümleri gibi farklı kısıtlar göz önünde bulundurulmuştur. Tez çalışmasında kullanılacak numunelerin üretiminde, EFF tekniğine dayanan, ArtıBoyut A1 Pro makinesi kullanılmıştır. Bilindiği üzere, EFF yönteminde belirli bir delik çapına sahip nozul, üretilecek parça geometrisinin sınırları üzerinde eriyik malzemeyi biriktirmektedir. Bu sebeple nozulün üretebileceği minimum bir çap değeri olacaktır. Tez çalışmasında numune geometrilerinin üretiminde de 1 mm çap değerinin her açıda üretilebilecek en küçük çap değeri olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, farklı çap değerlerinde üretilecek ve mikroskop altında incelenecek çubuk elemanlar için üretilebilir minimum çap değeri $d_{min} = 1$ mm olarak belirlenmiştir. Öte yandan, latis

hücrelerin karmaşık hiyerarşisini verebilecek bir üst çap limiti belirlenmelidir. Daha yüksek çaptaki çubuklar da üretilebilir; fakat büyük çaplar latis hücrelerin yoğunluğunu artırır ve katı malzemelere daha yakın hale getirir. Bu nedenle, en üst çap değeri, d_{maks} , 4 mm olarak belirlenmiştir. EFF ekstrüzyonu yönteminde minimum çap değerine yakın çaplarda katman katman üretim stratejisi nedeniyle yüzeyde meydana gelen belirsizlikler daha da belirgin hale gelir. Bu nedenle, mikroskop ile ölçülebilecek alan da dikkate alındığında 1 mm ile 2 mm arasında 0.2 mm aralıklarla çubuk elemanların modellenmesi ve üzerinden ölçümlerin bu mikroskop ile alınması kararlaştırılmıştır (1 mm, 1.2 mm, 1.4 mm, 1.6 mm, 1.8 mm). Çap değerinin artışına bağlı olarak geometrik belirsizlikler nispeten azalarak daha karalı bir üretim gözlemlenir. 2 mm ve üstü çap değerleri için bu aralık 0.5 mm olarak belirlenmiştir (2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 3.5. mm, 4 mm).

3.1.2 Açı değerleri ve Bilgisayar Modelleri

Latis yapılarında, farklı birim hücre tipleri için çubuk elemanlar farklı açı değerlerine sahip olabilir. Bu nedenle, çubuk numunelerin farklı açılarda üretilip üretim açısının çap değerlerine etkisi incelenmelidir. Tez çalışmasında, çubukların yatay düzlemle, yazıcının üretim düzlemi olan x-y düzlemi, 0° - 90° arasında 15° aralıklarla modellenmesi planlanmıştır.

Tüm bu belirlemeler sonrası, 0° ile 90° arasında 7 farklı çap değerinde, her bir açı değeri için 1 mm ve 4 mm aralığında 10 farklı çap değerinde numune üretilmesi; toplamda 70 farklı çubuk numunesi üretilmiştir. Her bir numuneden de 3'er adet üretilmiş ve toplamda 210 adet numuneden ölçümler alınmıştır. Farklı açı ve çap değerlerinde çubuk elemanların bilgisayar modelleri Şekil 3-2'de gösterilmiştir.



Şekil 3-2: Farklı açı değerlerine sahip çubuk eleman modelleri; (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°, (d) 60°, (e) 75°, (f) 90°.

3.2 Numunelerin EFF Yöntemi ile Üretimi

Farklı açı ve çap değerlerindeki kare çerçeveli tek çubuk eleman modelleri 3 farklı set olarak Artı Boyut A1 Pro birleştirmeli yığma makinesi ile PLA malzeme kullanılarak üretilmiştir. Numunelerin bilgisayar destekli modelleri ABAQUS ticari yazılımı içerisinde parametrik kodlar ile gerçekleştirilmiştir. STL formatına dönüştürülen modeller, üretim için dilimleme işlemi ve g-kodlarının belirlenmesi için CURA isimli üç boyutlu yazıcı programına aktarılmıştır.

İmalat sırasında kullanılan üretim parametreleri yazıcı için önerilen değerler olarak alınıp tüm numunelerin üretimi için sabit kabul edilmiş ve CURA yazılımında bu değerler üretim yolunu belirleyen g-kodların belirlenmesi için kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde kullanılan parametreler Çizelge 3-2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3-2: EFF ile üretim parametreleri

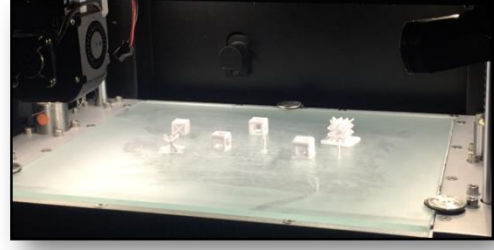
Parametre	Değer
Baskı kafası nozül çapı (mm)	0,4
Katman kalınlığı (mm)	0,2
Doluluk oranı (%)	100
Üretim sıcaklığı (C°)	215
Alt tabla sıcaklığı (C°)	60
Baskı hızı (mm/s)	50
Fan Hızı	%100
Filament kalınlığı (mm)	1,75
Filament Malzeme	PLA
Elastik Modülü (MPa)	3642
Filament Çapı (mm)	1,75

Çalışma kapsamında üretilen numunelerden bazıları Şekil 3-3'de gösterilmiştir. Burada, dikkat edilmesi gereken husus, Şekil 3'te gösterilen farklı açılardaki çubuk elemanların belirli bir açıdan küçük açılarda üretildiğinde katmanların alt taraftan desteklenememesinden dolayı sarkma oluşması ve istenilen modelin üretilmemesidir. Bu nedenle belirli bir açının altındaki üretimler için destek yapıların kullanılması gerekmektedir. Bu destek yapılarının üretilen çubuk eleman numunelerinden temizlenmesi süreci de çubuk eleman üzerinde deformasyonlara neden olarak yüzey hassasiyetini düşürmektedir. Bu nedenle, çubuk elemanların yatay ile yaptığı açığa bağlı olarak üretilebilmesi için belli bir açının altında numunelerin üretimi için suda eriyebilen ESUN marka Polivinil alkol (PVA) malzeme içerikli filament kullanılmıştır. Bu filament suda eriyebildiği için latis yapılar için çok uygundur; çünkü bu tür karmaşık yapılarda destek malzemelerin temizlenmesi önemli bir sorundur. Fakat suda eriyebildiği için herhangi bir uğraş gerektirmeden su içerisinde erimesi gerçekleştirilebilir.

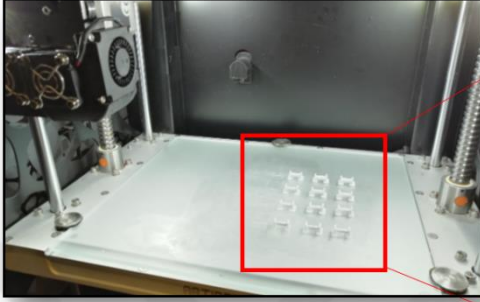
Destek malzemelerin kullanımı hem üretim zamanı hem de maliyet açısından istenmez. Bu nedenle, destek malzemesinin kullanımını minimize etmek için bir limit açı değeri belirlenmesi gerekir. Literatürdeki incelemelerde 45°'nin altında destek malzeme kullanılması önerilmektedir [50].



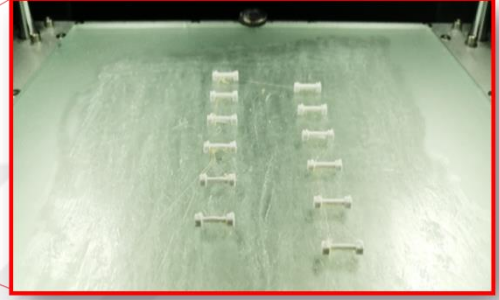
(a)



(b)

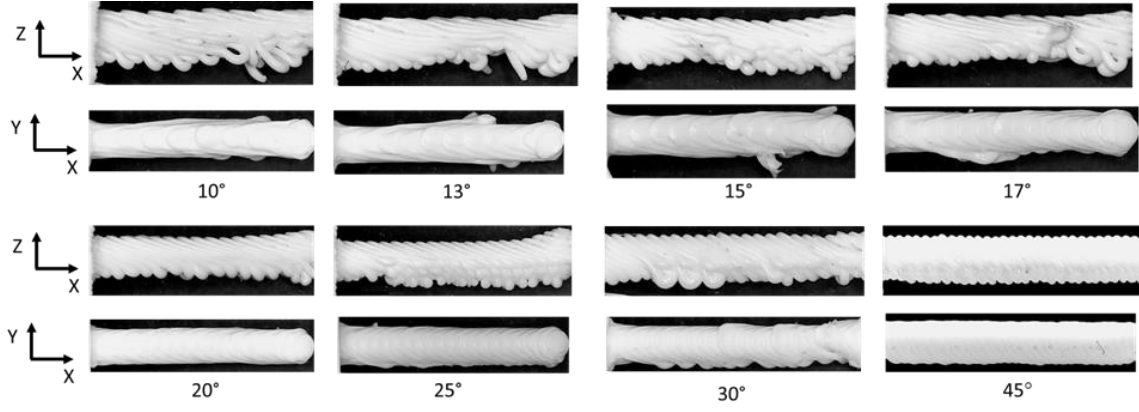


(c)



Şekil 3-3: Numunelerin üretim sürecinden bir kesit; (a) ArtıBoyut A1 Pro EFF cihazı, (b) Numune belirlemede kullanılan alternatif modellerin üretimi, (c) Üretilmiş tek çerçeveli çubuk modelleri

Üretim tekniğine ve kullanılan eklemeli imalat cihazına bağlı olarak limit açı değeri değişebilmektedir. Bu amaçla, çalışmada farklı çubuk açılarında üretimler gerçekleştirilmiş ve çubukların bu açılarda destek yapısı kullanılmaksızın üretilebilirliği incelenmiştir. 10° 'den 45° 'ye kadar belirli aralıklarda açılar ile üretimler 1.6 mm çap ve 10 mm uzunluk için desteksiz olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3-4'te bu üretilen çubuk numunelerin üstten (x-z düzlemi) ve yandan (x-y düzlemi) görüntüleri verilmiştir. Tüm çubukların resimleri yatay olacak şekilde verilmiştir; çubuk açıları ise z-x düzlemindeki her bir katmanın açı değişimlerinden anlaşılabilir.

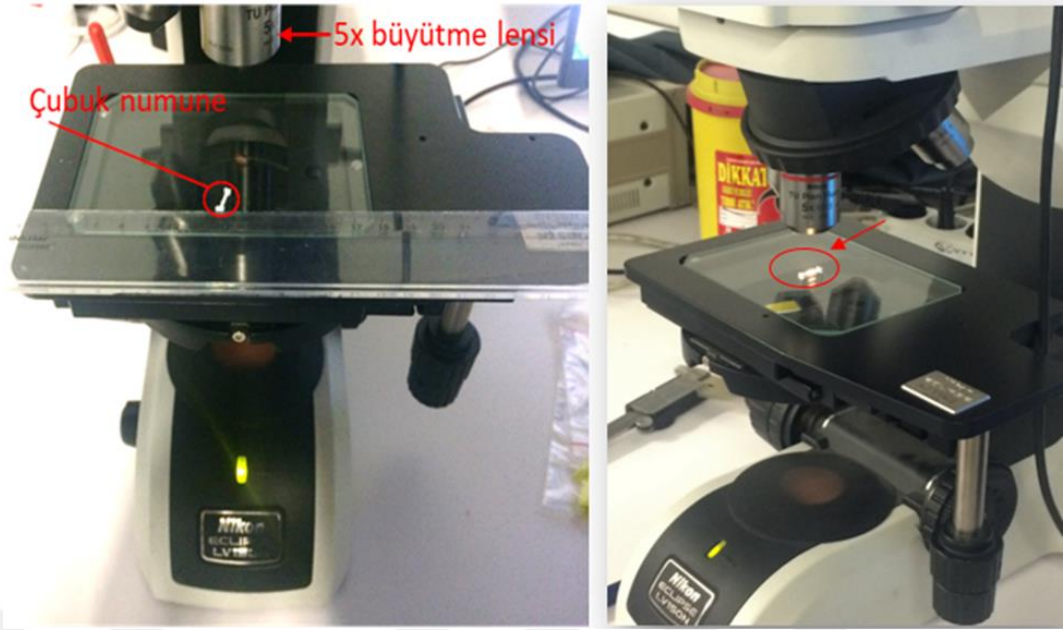


Şekil 3-4: Çubuk elemanların farklı limit açı değerleri ile üretimi

Şekil 3-4'teki x-z düzlemi için verilen görsellerde de görüldüğü üzere özellikle üretim eksenini, z ekseninde, alt kısımda destek malzemesi kullanılmamıştır. Sarkmalardan kaynaklanan istenmeyen yüzey bozuklukları, düşük boyut hassasiyeti oluşmuştur. Kusurlar özellikle 10° ile 20° arasında belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. 20° ve sonrasında ise sarkmadan dolayı oluşan bozuklukların azaldığı gözükmemektedir. Açı arttıkça numunenin alt kısmı, beklenen yüzey kalitesi olan üst kısma daha yakın şekilde üretilmiştir. Özellikle 45° açıda üst taraf ile alt taraf birbirine oldukça yakın eğilimde üretilmiştir. Bu üretimler ve görseller 45° açının literatürde üretim için neden limit açı değeri olduğu açıkça göstermektedir.

3.3 Mikroskop Görüntüleri ve Deneysel Veri Toplama

Numunelerin belirlenmesi ve üretilmesinin ardından Eklemeli üretim sürecinde oluşan belirsizliklerin gözlenebilmesi için optik mikroskop ölçümleri gerçekleştirilmiştir. TOBB ETÜ Nanoteknoloji ve Malzeme Laboratuvarında bulunan, Nikon Eclipse LV150N dijital kameralı ışık mikroskobu (DKIM) ile 5x büyütücü kullanılarak üretimi tamamlanan numuneler üzerinden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin ölçümlerinden bir kesit Şekil 3-5'de gösterilmiştir.



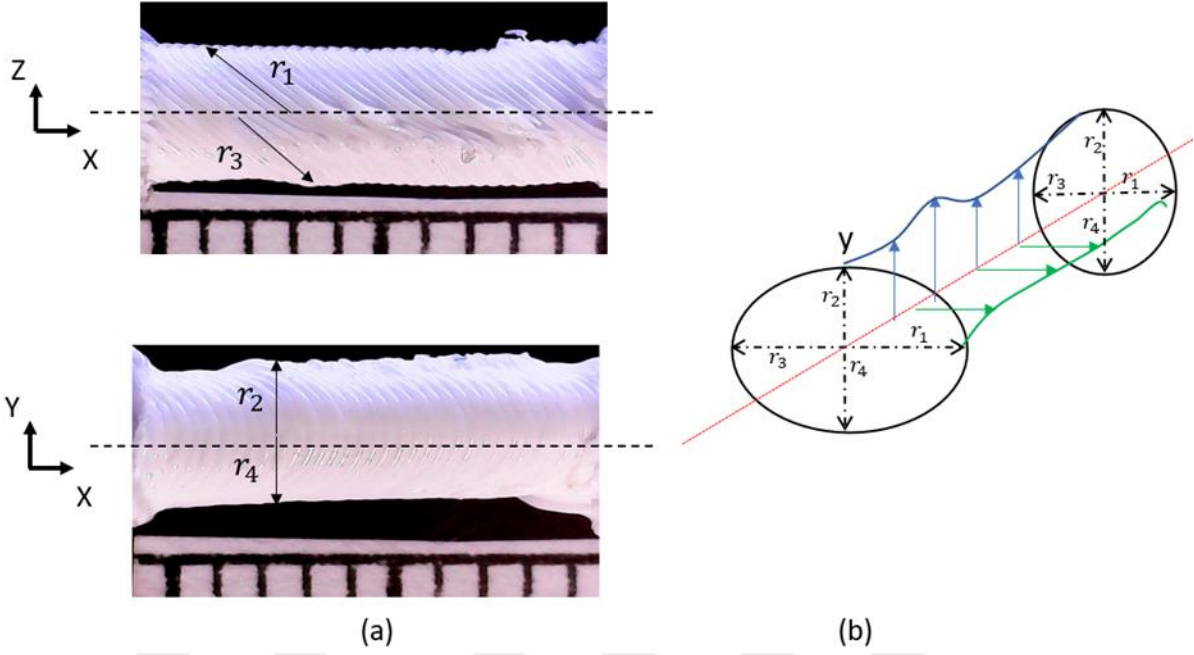
(a)

(b)

Şekil 3-5 : Numunelerin dijital kameralı ışık mikroskobu altında görüntülenmesi; Nikon Eclipse LV150N DKIM ve 5x büyücü, (a) Önden görünüm, (b) Yandan görünüm

3.3.1 Çap değişimleri ve merkez sapmaları

Çubuk elemanlarda mikro seviyede gözlenen bu değişimlerin ölçümleri, rassal alan yöntemi ile modellenmesinde önem arz etmektedir. Şekil 3-6(a)'da gösterildiği üzere, ölçümde kullanılan yöntemde, numunenin merkez çizgisi referans alınarak iki farklı numune görünüşü üzerinde, merkez çizgisinin altında ve üstünde kalan yarıçap değerleri ölçülebilmektedir. Bu sayede, çubuk elemanların kesitleri Şekil 3-6 (b)'de gösterildiği üzere yarıçaplar cinsinden elde edilebilmiştir ve alt ve üst çubuk eleman sınırlarındaki değişimler çubuk eleman boyunca rassal alan yöntemiyle modellenebilmiştir.

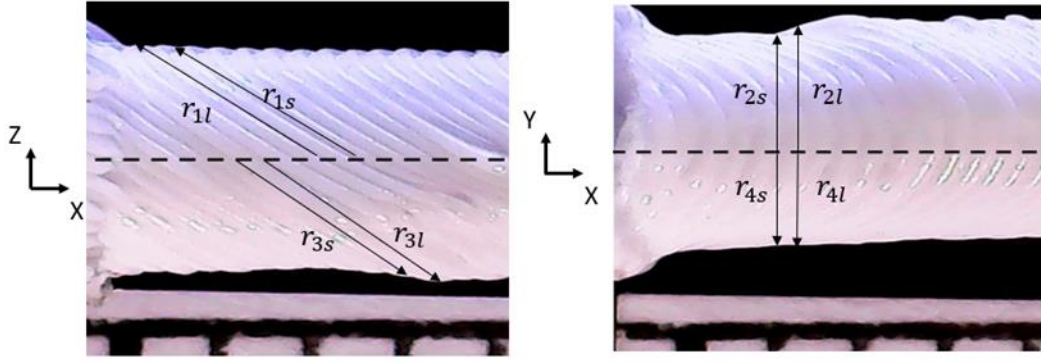


Şekil 3-6: Numunelerin ölçümlerinde kullanılan yaklaşım (a) Mikroskop görüntüleri üzerinden ölçülecek yarıçap değişkenleri (b) Ölçümü yapılan r_1, r_2, r_3, r_4 yarıçaplarının çubuk eleman kesiti üzerinde karşılıkları

Burada ölçülen 8 yarıçap değerleri sırasıyla;

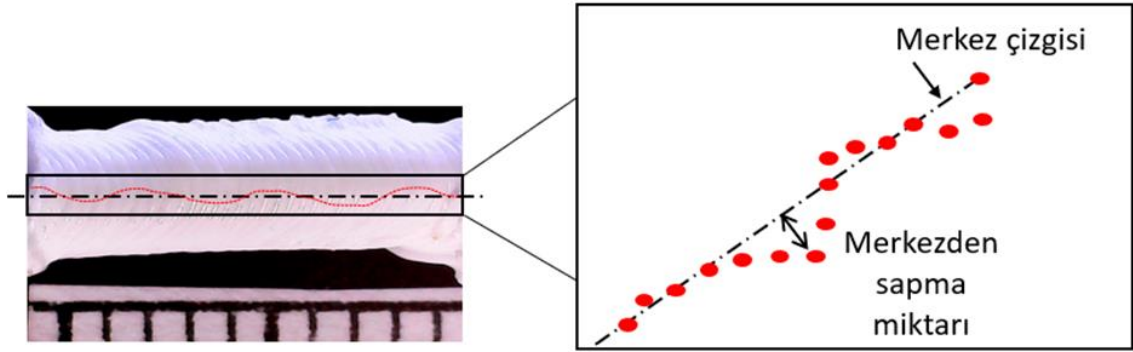
- i) xz düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde uzun yarıçaplar, r_{1l} ve r_{3l} .
- ii) xy düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde uzun yarıçaplar, r_{2l} ve r_{4l} .
- iii) xz düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde kısa yarıçaplar, r_{1s} ve r_{3s} .
- iv) xy düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde kısa yarıçaplar, r_{2s} ve r_{4s} .

Yarıçap değerlerin çubuk eleman kesitleri üzerindeki karşılıkları Şekil 3-7’de gösterilmiştir.



Şekil 3-7: Ölçümleri gerçekleştirilen 8 farklı yarıçap değişkeninin çubuk eleman kesitleri üzerinde karşılıkları

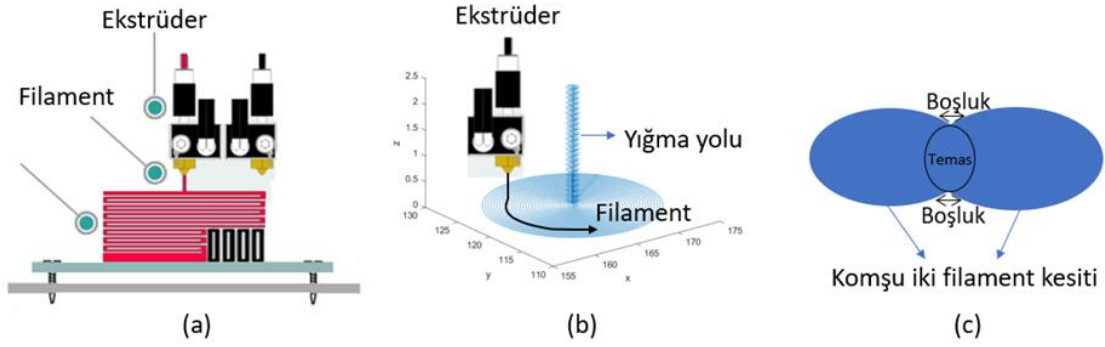
Eklemeli imalat yöntemi her bir katmanın birbiri üzerine yığılması stratejisine dayanmaktadır. Bu nedenle, üretilen çubuk elemanların merkez noktalarında Şekil 3-8’de gösterildiği gibi eleman boyunca değişimler meydana gelmektedir. Yukarıda detaylı olarak irdelenen ölçüm yaklaşımının kullanılmasıyla birlikte, merkez sabit alınarak r_{1l} , r_{1s} , r_{2l} , r_{2s} , r_{3l} , r_{3s} , r_{4l} , r_{4s} yarıçapları üzerinden ölçülebilmektedir.



Şekil 3-8: Eklemeli imalat ile üretilen çubuk elemanların kesitlerinde görülen merkez eksen sapmaları

3.3.2 Boşluklar

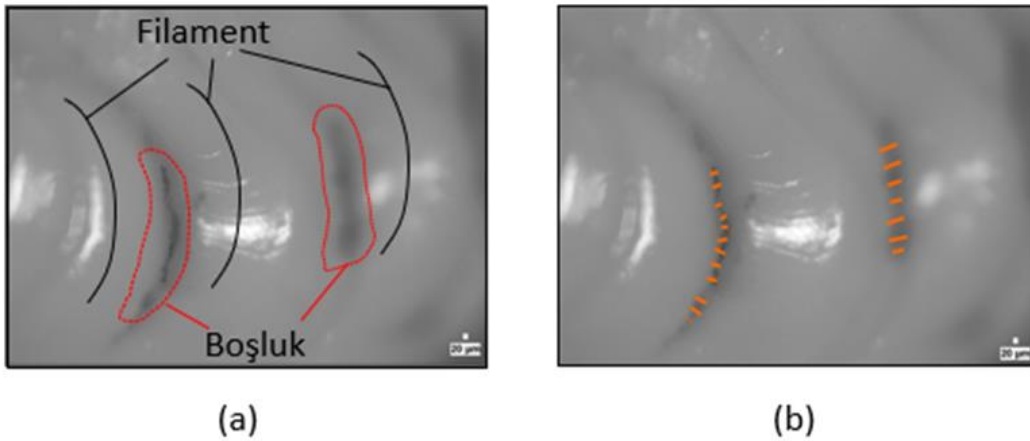
Bölüm 1’de incelenen EFF yöntemiyle üretim sürecinde, filament üretim yönü boyunca sabit bir hızda gösterilen yığılma yolunu takip ederek baskıyı sağlamaktadır. Nozul içerisinden eriyik halde ekstrüzyonu yapılan filament ara açı değerlerinde, 15° - 75° , üretilen numunelerde eliptik, yatay ve dikey üretilen çubuk elemanlarda ise silindirik kesite sahip olmaktadır. Bu nedenle baskı sırasında birbirine komşu iki filament arasında Şekil 3-9(c)’de gösterilen mikro seviyede boşluklar meydana gelmektedir. Rassal modellemesi sonrasında elde edilecek olan çubuk elemanların sonlu eleman modellerine bu boşlukların dahil edilmesi ve detay modelin oluşturulması elde edilecek sonuçların hassasiyeti açısından avantaj sağlayacaktır.



Şekil 3-9: EFF yöntemiyle çubuk elemanların üretimi (a) EFF tipi yazıcıya ait şematik (b) çubuk elemanların eklemeli imalat ile üretimine ait şematik (c) Komşu iki filament kesiti ve kesitler arasında görülen boşluklar

Üretilen numune kesitlerinde boşlukların etkisini görebilmek, ancak mikroskop altında inceleme ile mümkün olabilecektir. Bu nedenle üretilen çubuk eleman numuneleri arasından belirlenen çubuk eleman kesitleri, mikroskop altında incelenmiştir.

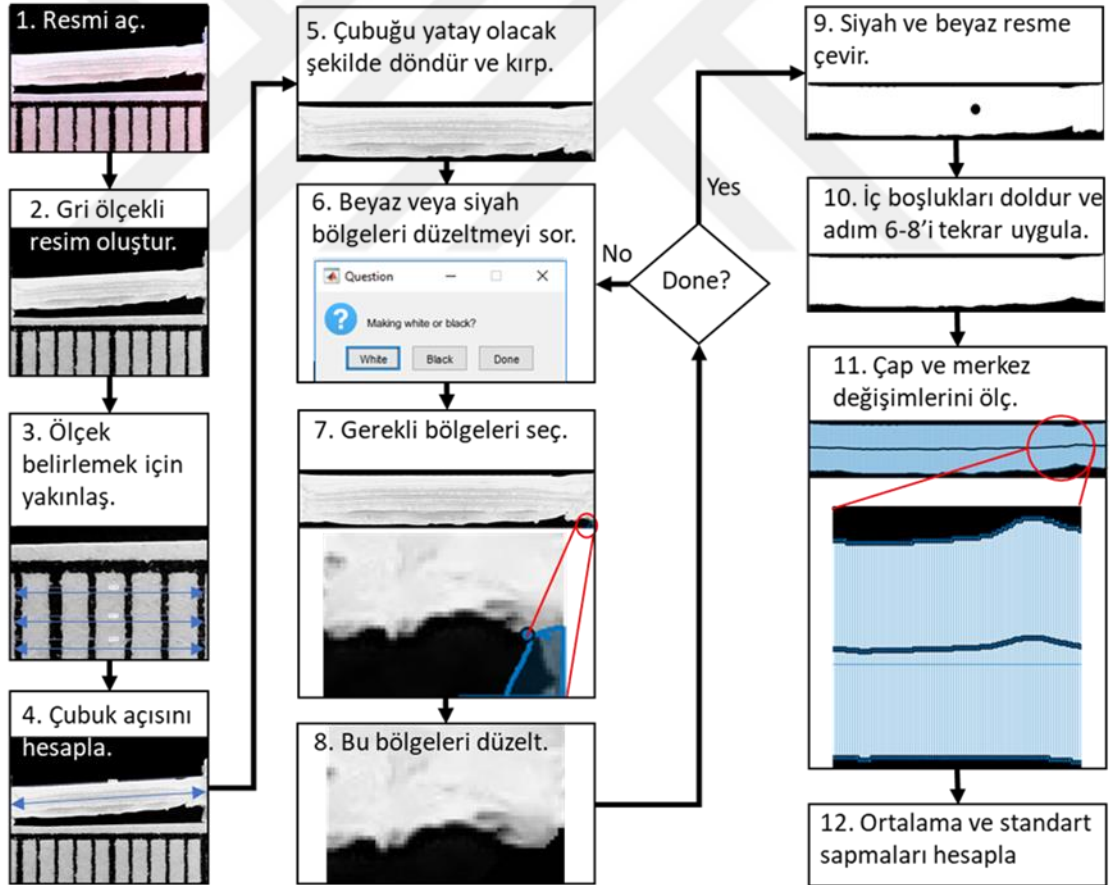
Bu numuneler arasında; 45° açı ve 4 mm çap değerinde üretilen çubuk eleman kesitinin mikroskop görüntüsü Şekil 3-10(a)'da gösterilmiştir. Görüntü incelendiğinde filamentler arasındaki mikro boşlukların yığıma yolu boyunca sürekli oluşmadığı bölge-bölge olduğu görülebilmektedir. Görüntüsü verilen çubuk eleman kesiti üzerinden Imagej açık kaynaklı görüntü işleme programı kullanılarak boşlukların ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3-10: 45° ve 4mm çap değerine sahip çubuk eleman kesitine ait mikroskop görüntüleri (a) Filamentler arasında oluşan mikro boşluklar (b) Boşlukların Imagej açık kaynaklı görüntü işleme yazılımı ile ölçülme

3.3.3 Görüntü İşleme ve Otomatik Ölçüm Alma Algoritmasının Geliştirilmesi

90° ve 15° arasında üretilen tüm çubuk numunelerin görüntülerinden ölçümler, her katman belirli olduğundan ve de teker teker uzun ve kısa çaplar seçilerek alınması gerektiği için ImageJ yazılımı kullanılarak alınmıştır. Fakat 0° açığa sahip çubukta çap doğrultusunda katmanlar bulunmamaktadır. İşlemi parametrik hale getirebilmek için çapları görüntülerden otomatik ölçecek bir algoritma geliştirilmiş MATLAB Image Processing Toolbox kullanılarak kodu oluşturulmuştur. Bu kodun amacı, çubuk mikroskop görüntüsünün sadece siyah ve beyaz renklerden oluşan bir resme çevrilmesi ve renk zıtlığı sayesinde pikseller üzerinden istenilen ölçümlerin otomatik olarak alınabilmesidir. Geliştirilen algoritmanın akış diyagramı Şekil 3-11'de adımlarıyla birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3-11: Mikroskop görüntüleri üzerinden ölçümlerin alınması için geliştirilen görüntü işleme algoritması

4. RASSAL ALAN YÖNTEMİNİN UYGULANMASI VE SONLU ELEMANLAR YAKLAŞIMI

4.1 Rassal Alan Modellemesi Aşamaları

Bölüm 2.3 başlığı altında açıklanan rassal alan yöntemi ve teorisi Bölüm 3'teki deneysel yöntem ile elde edilen ölçümlerin konuma bağlı değişimlerin modellenmesinde kullanılmıştır. Bu ölçümler aracılığıyla eklemeli imalat sürecinde meydana gelen değişim ve belirsizliklerin rassal alan yöntemiyle modellenmesi amaçlanmıştır. Deneysel verilerin rassal alan modellemesi için gerçekleştirilecek aşamalar şu şekildedir;

I). Ölçümleri tamamlanan, modellenecek veri kümesine ait deneysel oto-korelasyon fonksiyonu, Eşitlik (4) aracılığıyla hesaplanır.

II). Deneysel oto-korelasyon eğrilerinin gösterdiği eğilim ve davranış, lineer olmayan eğri uydurma yöntemi kullanılarak Çizelge 2-2'de verilen oto-korelasyon modelleriyle eşleştirilir. Bu sayede, deneysel oto korelasyon eğrisi, kendisini temsil edebilecek en uygun oto korelasyon modeli cinsinden temsil edilebilmiştir.

III). Eşleştirme işlemiyle 5 farklı oto korelasyon modeli arasından, deneysel oto korelasyona en uygun korelasyon fonksiyonu için korelasyon mesafesi (c) bileşeni belirlenmiş olur. Çizelge 2-2 'de görüleceği üzere, oto korelasyon modellerinin, gecikme (lag), τ ve korelasyon mesafesi (c) olmak üzere iki bileşeni bulunmaktadır. Durağan ve gaussian davranışa sahip olduğu varsayımıyla, rassal alan içerisinde τ değerlerinin, noktalar arasındaki bağıl mesafe olarak hesaplandığı Bölüm 2.3.2.2'de verilmiştir. Dolayısıyla, oto korelasyon modellerinin eğri uydurma yöntemiyle belirlenecek değişkeni, korelasyon mesafesi, c , olacaktır. III. Aşamayla birlikte her bir açı ve çap değeri deneysel oto korelasyon eğilimine en uygun korelasyon modelinin c değişkenleri belirlenmiştir.

IV). Elde edilen c ve τ bileşenleri Çizelge 2-2 verilen oto korelasyon fonksiyonlarına ait eşitliklerde ilgili yerlere konularak oto korelasyon matrisleri elde edilir. Diğer bir deyişle, rassal alan içerisindeki her bir noktanın kendisiyle ve birbiriyle olan korelasyon ilişkisi, korelasyon matrisleri aracılığıyla temsil edilmiştir.

V). Oto korelasyon ve oto kovaryans arasındaki cebirsel ilişki Eşitlik 5’te verilmişti. IV. aşamada hesaplanan oto korelasyon matrisi üzerinden, Eşitlik 5 aracılığıyla oto kovaryans matrisi hesaplanmıştır.

VI). Bir önceki aşamada elde edilen kovaryans matrisleri, spektral ayrıştırılarak matrise ait öz değer-öz fonksiyonları elde edilmiştir. Spektral ayrıştırma yöntemiyle öz değer ve öz fonksiyonlar cinsinden fonksiyonların temsil edilmesi Bölüm 2.3.3.3’te detaylı olarak incelenmiştir.

VII). Önceki aşamalarla birlikte, KL açılımının tüm bileşenleri elde edilmiştir. Söz konusu bileşenler ve Eşitlik 7’de uygulanarak rassal alan modellemesi tamamlanmıştır.

4.2 Değişimleri İçeren Detay Modellerin Oluşturulması

Çubuk elemanların temsili için kullanılacak homojenize özelliklere sahip basit modellerin oluşturulması için değişimleri içeren detay çubuk eleman modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Çubuk eleman için 8 farklı yarıçap değişkeni rassal alan yöntemiyle modellenmiş, Eklemeli imalat sürecinde oluşan kusurlar ve değişimler, Bölüm 3’te mikroskop görüntüleri üzerinden sağlanan ölçümlerle boşluklar detaylı olarak incelenmiştir. Bu aşamada, incelenen değişimler voksel elemanlar kullanılarak çubuk elemanlar için detay sonlu elemanlar modelleri elde edilmiştir.

4.2.1 Voksel Çözüm Ağı Elemanları Kullanılarak Detay Çubuk Eleman Modellerinin Oluşturulması

Voksel elemanlar basitçe hacimsel piksel (volumetric pixel) elemanlardır. Diğer bir deyişle küp şeklindeki elemanlardır. Bu elemanlar kullanılarak tüm parça geometrisi modellenebilir ve değişimler mevcut geometrilere dahil edilebilir. Voksel elemanlar kullanılarak detay modellerin oluşturulmasında izlenen aşamalar şu şekildedir;

I.) Modelleneyecek numune üzerinden ölçülen ve rassal alan yöntemiyle modellenen yarıçap değerleri ($r_{1l, s}, r_{2l, s}, r_{3l, s}, r_{4l, s}$) sınır oluşturacak şekilde noktalar kümesi oluşturulur. Bu aşama Şekil 4-1 (a)’da gösterilmiştir.

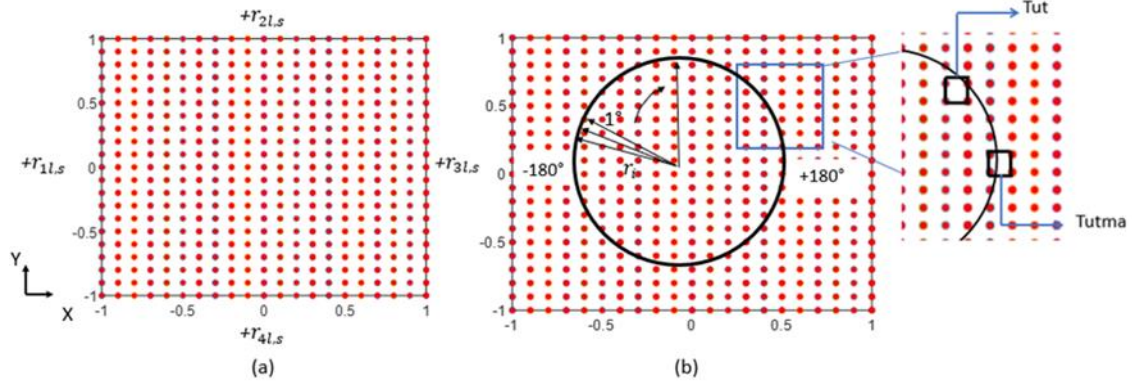
II.) Çubuk eleman kesiti 4 farklı yarıçap değişkeninden ($r_{1l, s}, r_{2l, s}, r_{3l, s}, r_{4l, s}$) oluştuğu için Şekil 4-1(a)’da gösterilen ($r_{1l, s}, r_{2l, s}, r_{3l, s}, r_{4l, s}$) aralıkları 4 bölge olarak düşünülmüştür. Nokta kümesi içerisinde kesitin oluşturulabilmesi $\pm 180^\circ$ aralığında 4

bölge oluşturularak her 1° karşılık gelen yarıçap değerleri hesaplanır. Bu aşama Şekil 4-1(b)'de gösterilmiştir.

III.) Şekil 4-1(a)'da gösterilen her bir nokta XY koordinatlarına sahiptir. X ve Y ekseninde her bir nokta sırasıyla seçilerek farklı kombinasyonlarda nokta ikilisi oluşturulur. Noktaların birbirine olan uzaklıkları norm işlemiyle, aralarındaki açı basit geometrik ilişkilerle hesaplanır.

IV.) III. adımda oluşturulan noktalar kümesi içerisinde belirlenen iki nokta arasındaki mesafeye uzaklık 1, II. adımda rassal alan yöntemiyle modellenen ve deneysel çap değerlerinin 1° açılara karşılık gelen mesafesi ise uzaklık 2 olarak temsil edilsin. Uzaklık 1 değerinin uzaklık 2'den küçük ve eşit olduğu durumlar noktalar kümesi içerisinde seçilen noktanın çap kesiti içerisinde olduğu anlamına gelir ve bu nokta istenen durumu sağlar. Bu noktaya bir indeks atanarak bir matris içerisinde tutulur.

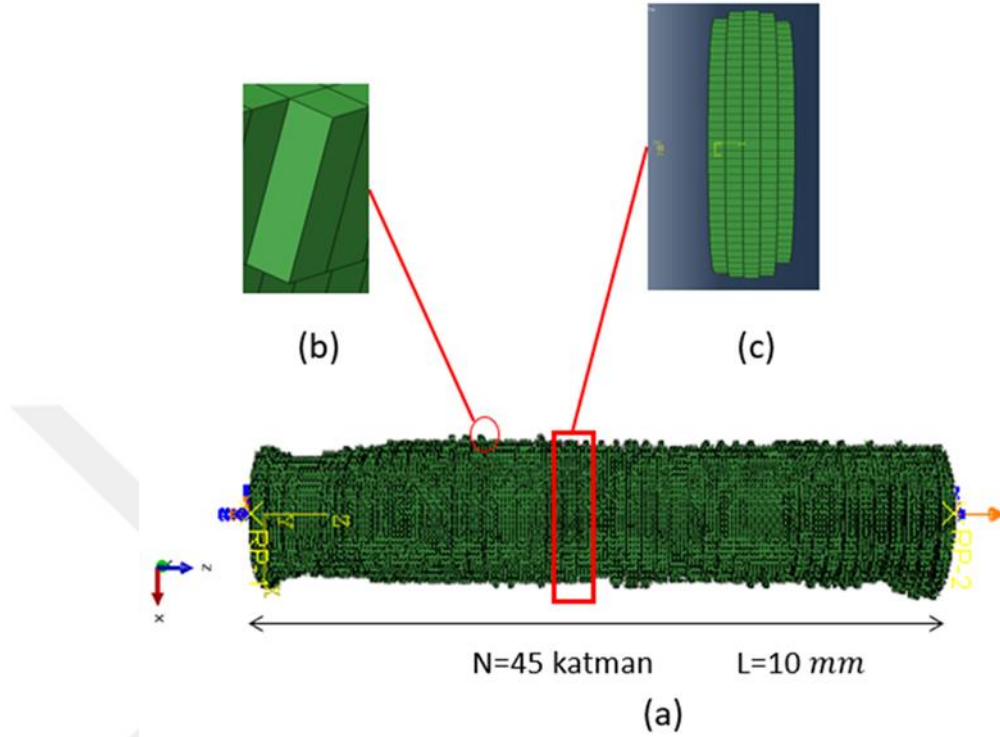
V.) Şekil 4-1 (a)'da verilen her bir nokta kombinasyonu denendikten sonra, adım IV'te elde edilen istenilen koşulu sağlayan noktaların oluşturduğu matris üzerinden 4'lü noktalar seçilir. Burada amaç Şekil 4-1(b)-sağ üst kısımda gösterildiği gibi XY ekseninde voksel elemanları oluşturmaktır. Burada bir koşul kontrolü daha yapılır. Matris içerisinde seçilen birbirine komşu 4'noktanın en az 2'si sınır içerisindeyse bu 4'lü nokta voksel elemanın XY ekseninde sınırını oluşturur.



Şekil 4-1: Sınırları yarıçap değişkenleriyle belirlenen voksel elemanları oluşturacak noktalar kümesi (a) Modellenen yarıçap değişkenleri kullanılarak ($r_{1l,s}$, $r_{2l,s}$, $r_{3l,s}$, $r_{4l,s}$) oluşturulan noktalar kümesi (b) Çubuk eleman kesiti içerisinde kalan voksel elemanların oluşturulmasına şematik

VI.) Adım V'in tamamlanmasıyla voksel kare elemanların XY ekseninde sınırları belirlenmiş olur. Seçilen 4'nokta yükseklik (Z) ekseninde katman kalınlığı kadar ötelenerek 8 nokta küp voksel eleman oluşturulur. Oluşturulan voksel elemanlar

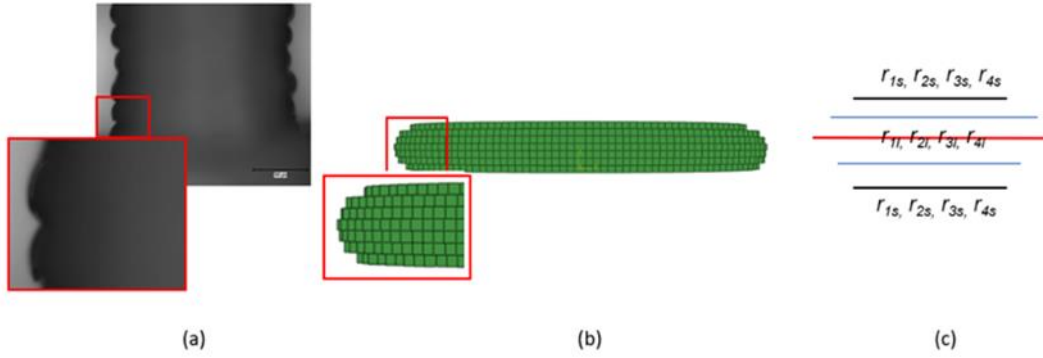
eklemeli imalat yöntemine benzer olarak üst üste yığılarak çubuk elemanların voksel modelleri oluşturulur. Voksel elemanların birleştirilmesiyle oluşturulan çubuk eleman modeli Şekil 4-2’de gösterilmiştir.



Şekil 4-2: Voksel elemanlar ile oluşturulan çubuk modeli (a) Tüm çubuk modeli (b) Tek bir voksel elemanı (c) Tüm çubuk içerisinde belirlenen katmanın XZ ekseninde görünümü

Voksel modellerin deneysel numuneyle en iyi örtüşecek şekilde oluşturulması önem arz etmektedir. Bu amaçla voksel modeller çubuk eleman numunesini en iyi temsil edecek şekilde oluşturulmalıdır. Mikroskop altında incelenen çubuk elemanlarının kenar bölgelerinin eliptik formda olduğu Şekil 4-3’de gösterilmiştir. Numunenin yan kenar profilinin, detay modele aktarılabilmesi için tek bir katman Şekil 4-3(b)’de gösterildiği gibi dört voksel elemana bölünmüştür. Bu işlem Şekil 4-3(c)’de gösterildiği gibi rassal alan modellemesinden elde edilen uzun yarıçap değerleri ($r1l$, $r2l$, $r3l$, $r4l$) ve kısa yarıçap değerleri ($r1s$, $r2s$, $r3s$, $r4s$) arasına elips formunu verecek, yapay olarak oluşturulan ek iki çap eklenmesiyle oluşturulur. Burada, rassal alan modellemesinden gelen, uzun ($r1l$, $r2l$, $r3l$, $r4l$) ve kısa ($r1s$, $r2s$, $r3s$, $r4s$) yarıçap değerleri sırasıyla Şekil 4-3(c)’de siyah ve kırmızı çizgiler olarak verilmiştir. Uzun ve kısa yarıçap değerleri arasında elips formülü uygulanarak, formülü sağlayacak iki ek çap değeri yapay olarak eklenmiştir. Söz konusu voksel elemanlar oluşturulan

kesit içerisine yerleştirilerek katman kenarlarının formu deneysel numuneleri temsil edebilecek şekilde oluşturulmuştur.

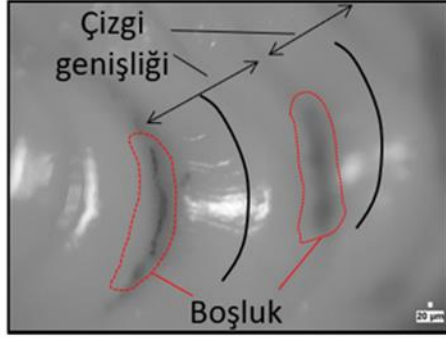


Şekil 4-3: Elips formunda katman kenarlarının vksel elemanlar kullanılarak detay çubuk modellerine dahil edilmesi (a) Katman kenarının mikroskop altında görüntüsü (b) Elips formunda kenarların vksel elemanlar kullanılarak oluşturulması (c) Süreçte kullanılan yöntemle ait şematik

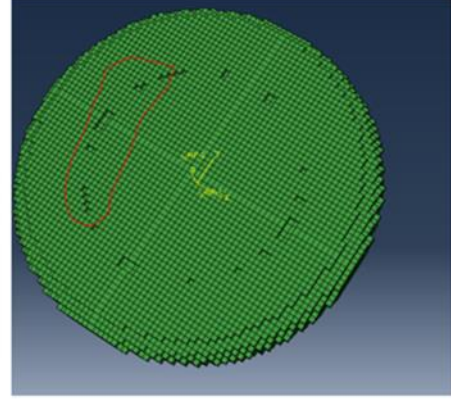
4.2.2 Boşlukların Detay Modele Dahil Edilmesi

Detay modelin geliştirilmesine yönelik diğer bir aşama Bölüm 3.3.2’de incelenen, eklemeli imalat sırasında oluşan boşlukların çubuk eleman kesitlerine dahil edilmesidir. Şekil 3-9’da gösterilen iki filament arasında oluşan boşlukların mikroskop altında incelemeleri, bu boşlukların bölge-bölge oluştuğu ve çubuk eleman kesitinin yaklaşık %0,1 boyutlarında oluştuğu görülmüştür.

Boşlukların vksel elemanlara dahil edilmesi işlemi, Bölüm 4.2.1’de irdelenen, sınır içerisinde kalan bölgelerde vksel elemanların oluşturulması stratejisinin tersine, sınırlar içerisinde kalan nokta bulutunun silinmesi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kesit üzerinde iki filament arasına karşılık gelen bölgelerde ölçülen boşluk miktarı kadar bir sınır hattı oluşturularak hat içerisinde kalan vksel elemanlar silinir. Boşluklarla birlikte oluşturulan çubuk eleman modeline ait kesit Şekil 4-4’te gösterilmiştir.



(a)

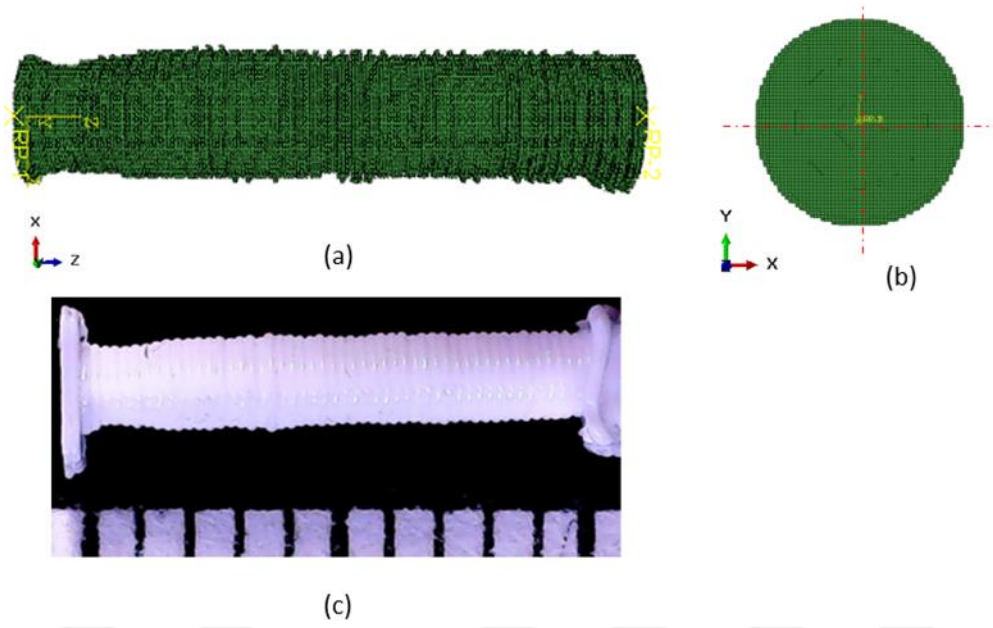


(b)

Şekil 4-4: Eklemeli imalat sırasında oluşan mikro seviyede boşlukların detay voksel modellerine dahil edilmesi (a) Boşlukların mikroskop altında incelenmesi (b) Voksel modellere boşlukların dahil edilmesi

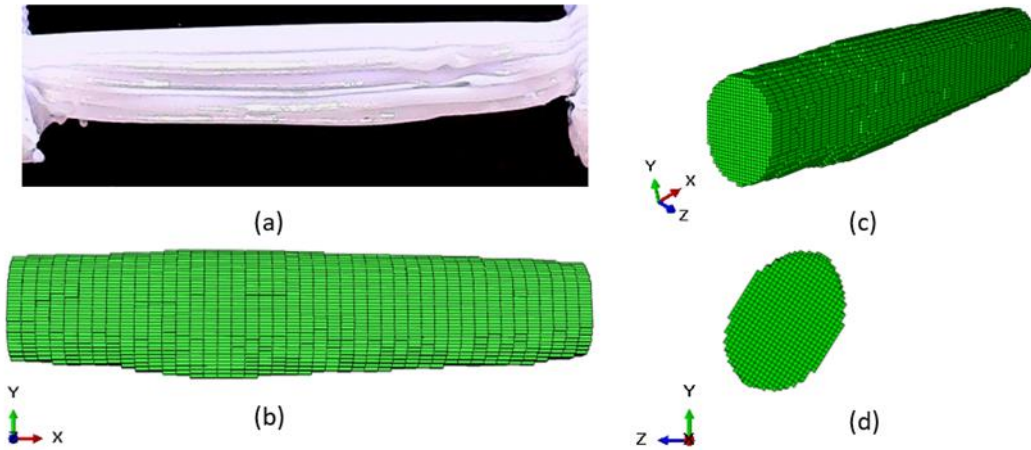
4.2.3 Voksel Çubuk Eleman Modelleri

Tamamlanan adımlarla birlikte oluşturulan voksel modeller, kenarlarının eliptik formda oluşturulması ve boşlukların dahil edilmesiyle birlikte üretilene benzer detay modeller haline getirilmiştir. Böylece farklı açı ve çap değerine sahip çubuk elemanların homojenize geometri ve malzeme özelliklerinin elde edilmesinde kullanılacak detay çubuk eleman modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan detay modellerin deneysel numuneleri temsil edebilirliği, 90° açı ve 1mm çap değerine sahip çubuk elemanın mikroskop görüntüsü ve karşılık gelen voksel modeli üzerinden Şekil 4-5'te gösterilmiştir.

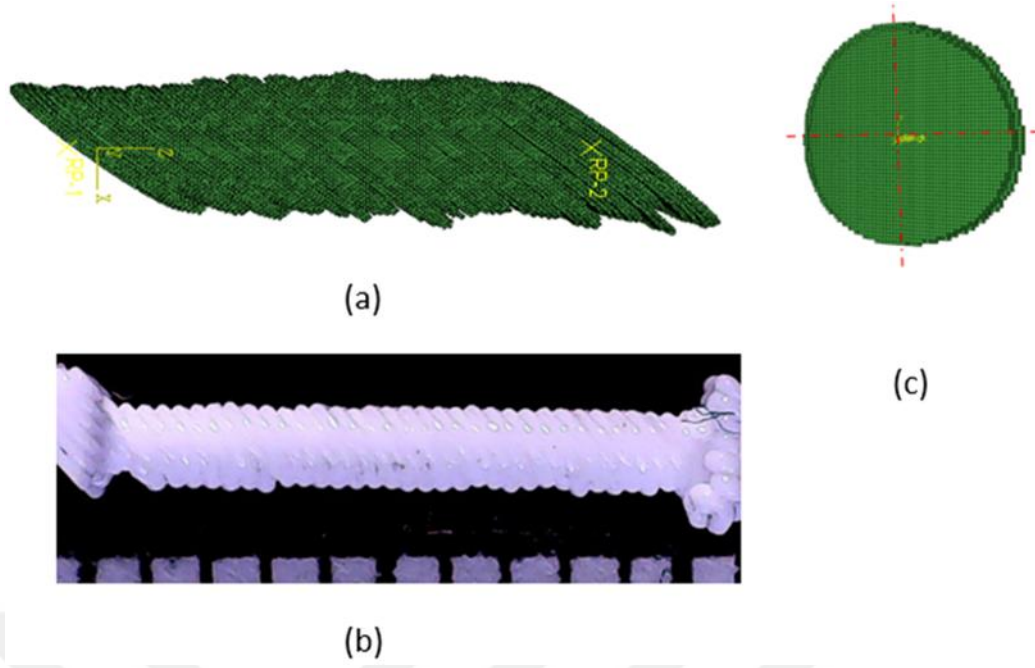


Şekil 4-5: 90° açı ve 1 mm çap değerinde üretilen çubuk elemana ait voksel modeller, modellerin karşılık gelen mikroskop görüntüleriyle karşılaştırılması (a) Voksel çubuk model XZ görünüşü (b) Voksel çubuk model XY görünüşü (c) 90° açı ve 1 mm çap değerinde numunenin mikroskop görüntüsü

Benzer görüntüler, 0° açı ve 1 mm çap değerinde çubuk elemanlar için Şekil 4-6, 45° açı ve 1mm çap değerinde çubuk elemanlar için ise Şekil 4-7’de gösterilmiştir.



Şekil 4-6: 0° açı ve 1 mm çap değerinde üretilen çubuk elemana ait voksel modeller, modellerin karşılık gelen mikroskop görüntüleriyle karşılaştırılması (a) 0° açı ve 2 mm çap değerinde numunenin mikroskop görüntüsü (b-c) Voksel çubuk model XY görünüşü (d) Voksel çubuk model YZ görünüşü



Şekil 4-7: 45° açı ve 1 mm çap değerinde üretilen çubuk elemana ait voksel modeller, modellerin karşılık gelen mikroskop görüntüleriyle karşılaştırılması (a) Voksel çubuk model XZ görünüşü, (b) 45° açı ve 2 mm çap değerinde numunenin mikroskop görüntüsü, (c) Voksel çubuk model XY görünüşü

4.3 Detay Çubuk Eleman Modellerinin Sonlu Elemanlar Analizleri

Bu aşamada, Bölüm 4.2’de sıralanan adımlar aracılığıyla oluşturulan detay çubuk eleman modellerinin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilme süreci anlatılmıştır. Bu sayede, değişim ve belirsizlikler altında latis yapıların davranış ve eğilimleri mikro seviyede, çubuk elemanlar, incelenmiştir.

Analiz türü elastik davranışın karakterizasyonu için gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, simülasyonlardan elde edilecek malzeme özelliği çubuk elemanın elastik modülü (E) olacaktır. Gerçekleştirilen analizler Monte Karlo Simülasyon (MKS) yaklaşımıyla, N tekrar için gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, malzeme özelliği E değerlerinin yanı sıra, çubuk elemanın ortalama bir çap değeri, D , elde edilmiştir.

Farklı açı, 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° ve çap değerlerinde 1, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2, 2,5, 3, 3,5, 4 mm, her bir çubuk eleman için, Bölüm 4.1’de sıralanan aşamaların tamamlanmasıyla oluşturulan detay voksel modelleri, çekme testi sınır koşulları altında incelenmiştir.

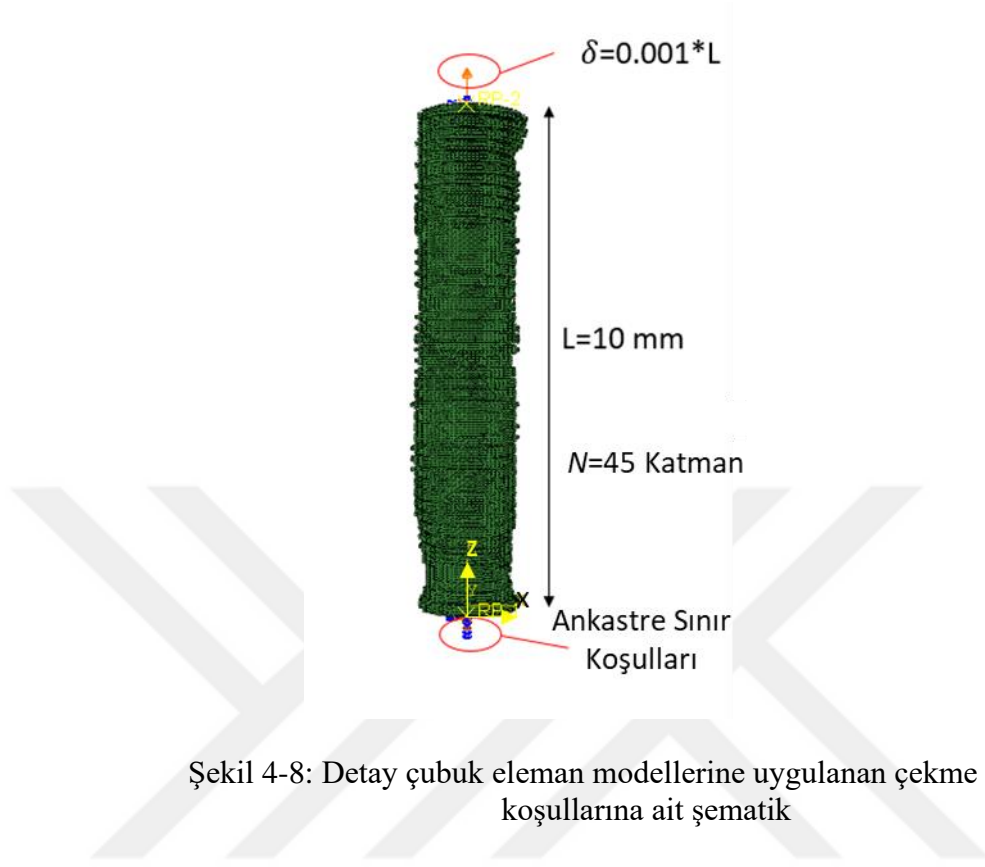
Çubuk eleman detay modelleri için kullanılan sınır koşulları, çubuk eleman seti içerisinde temsil olarak belirlenen, 90° açı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk eleman detay modeli üzerinden gösterilmiştir. Üretilene benzer kenar profillerinin hassasiyetle temsil edilebilmesi için her bir katman kalınlığının 4 voksel eleman sığdırılarak modellendiği Şekil 4-3'te gösterilmiştir. N 'inci katmanın üst katmana, $N+1$ 'inci katmanın alt katmanına karşılık gelmekte, komşu katmanlar ortak yüzey kullanmaktadır. Diğer bir deyişle, N katman sayısına sahip bir çubuk eleman, katmanların serildiği yükselme eksenini olan Z ekseninde, $4N+1$ adet voksel eleman kullanılarak modellenmiştir.

EFF yöntemiyle çubuk elemanların üretimlerinde kullanılan katman kalınlığı, Bölüm 3.2'de 0,2 mm olarak gösterilmiştir. Her bir katman için yan kenar profiline 4 voksel çözüm ağı elemanın yerleştirilmesi nedeniyle, voksel elemanın Z eksenindeki boyutu (V_z), 0,05 mm olarak alınmıştır.

Sonlu elemanlar analizlerinde çözüm ağı elemanları için genel kabul görmüş en/boy oranı 5'tir [101]. Bu değer, XY eksenindeki voksel çözüm ağı boyutunun belirlenmesinde üst sınır oluşturmuştur. Voksel eleman boyutunun belirlenmesinde diğer rol belirleyici parametre, ABAQUS sonlu elemanlar yazılım programında gerçekleştirilen simülasyon süreleridir. Voksel çözüm ağı elemanlarının boyutlarının küçülmesiyle birlikte söz konusu simülasyon süreleri oldukça uzamaktadır. Bu parametreler dikkate alınarak voksel elemanın kesit alanı, XY, ekseninde boyutları, Z ekseninde belirlenen yükseklik (V_z) değerine bağlı olarak $1-3,5(V_z)$ aralığında alınmıştır. Çubuk elemanlar sabit yükseklik değeri, 10 mm, üretilmiş olsa da çap değerinin artışına bağlı olarak simülasyon süreleri lineer olmayan eğilimle, ikincil ya da daha yüksek derecede artmaktadır. Bu nedenle, veri kümesi içerisinde görece yüksek çap değerlerine, 2,5-4 mm, sahip çubuk elemanlar için çözüm ağı elemanı boyutu artırılmıştır.

Voksel çözüm ağı boyutlarının belirlenmesinin ardından oluşturulan detay çubuk modeline uygulanan çekme testi sınır koşulları şu şekildedir; çubuk eleman modelinin alt noktaları Şekil 4-8'de gösterildiği gibi bağlayıcı eleman (RBE3) aracılığıyla, referans bir noktaya bağlanmıştır. Burada referans noktaya, ankastre sınır koşulları uygulanarak, 6 ekseninde öteleme ve dönme hareketleri (U_x , U_y , U_z , R_x , R_y , R_z) kısıtlanmıştır. Detay çubuk modelinin en üst katmanında bulunan noktalar kümesi

benzer şekilde bir referans noktaya bağlanmış, referans noktaya, Z ekseninde çubuk eleman boyunun (L) %0,1'i kadar ($0.0001L$) yer değiştirme sınır koşulu uygulanmıştır.



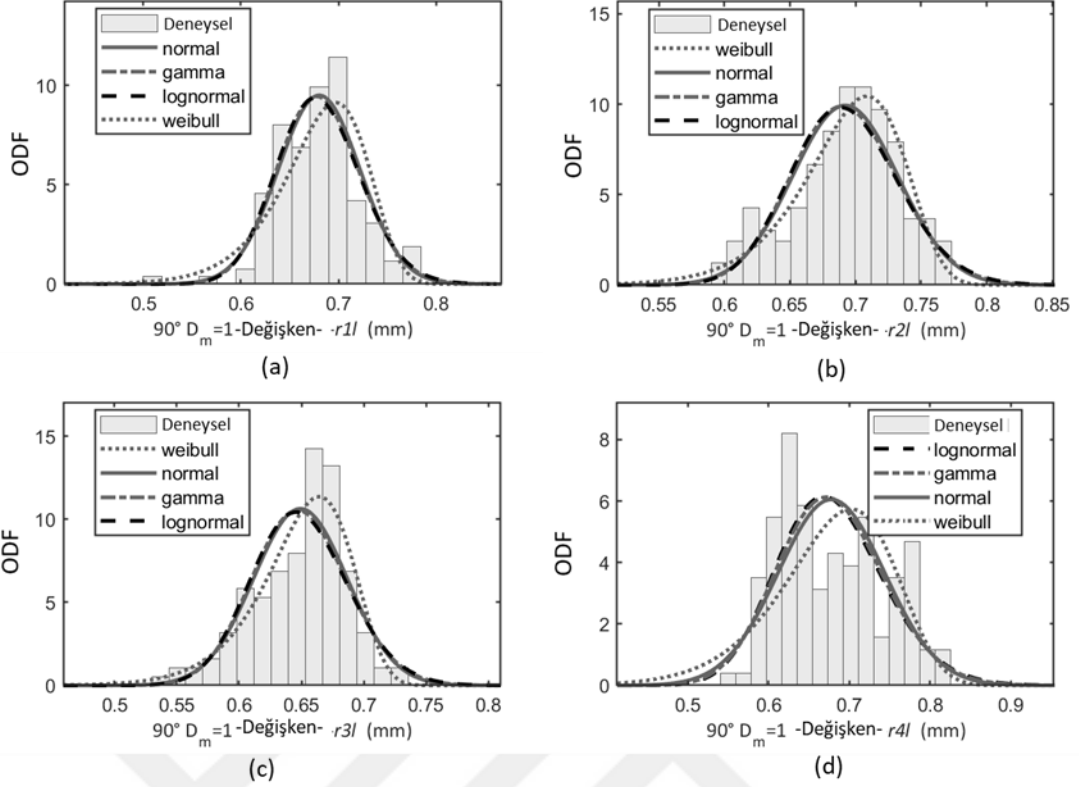
Şekil 4-8: Detay çubuk eleman modellerine uygulanan çekme testi sınır koşullarına ait şematik

5. SONUÇLAR

Bu bölümde, farklı açı ve çap değerleri için alınan deneysel ölçümlerin olasılık dağılımları, deneysel oto-korelasyon eğilimlerine en uygun aday oto-korelasyon fonksiyonları ve rassal alan parametreleri karakterize edilerek sonuçları verilmiş, bunlarla oluşturulan voksel detay modeller için $N=200$ tekrar ile gerçekleştirilen MKS sonuçları literatür ile karşılaştırmalı olarak yorumlanıp değerlendirilmiştir.

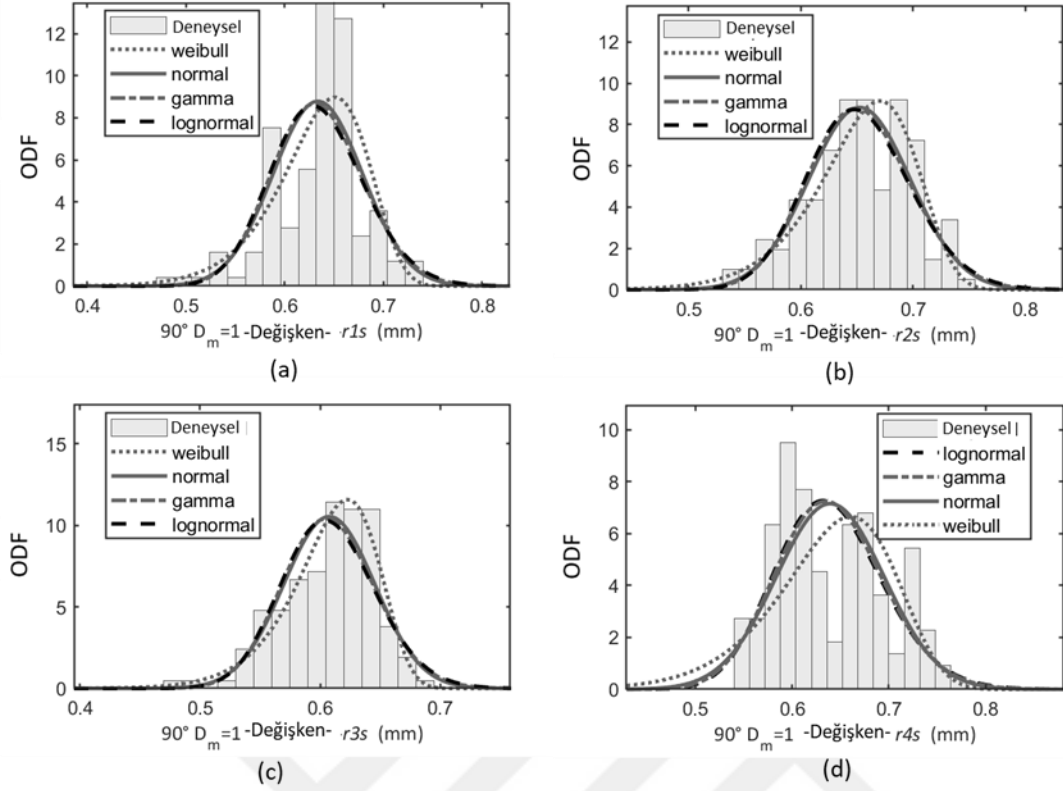
5.1 Deneysel Ölçüm Verilerinin Olasılık Dağılımları

Farklı açı ve çap değerlerinde üç tekrar olarak üretilen veri kümesinin olasılık dağılım fonksiyonları, veri kümesine ait istatistiksel momentler, ortalama (μ), standart sapma ve varyans (σ^2) değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. İstatistiksel momentler, rassal alan ayırıklaştırma yöntemleri, KL ve ATODT açılımları için Eşitlik 7 ve Eşitlik 9'da gösterilen ortalama, $\mu(x)$, bileşenidir. Deneysel verilerin dağılımları üzerinden belirlenen μ ve σ^2 bileşenleri, farklı aday olasılık dağılım fonksiyonlarının eğri uydurma yöntemi aracılığıyla deneysel dağılımla eşleştirilmesi, en uygun ODF için model parametrelerinin belirlenmesiyle elde edilmiştir. Merkezi Limit Teoremi 'ne (MLT) göre bir veri kümesinin, istatistiksel olarak anlamlı olabilmesi için en az 30 adet veri içermesi gerekir [102]. Çizelge 5.1'de veri sayılarından görüleceği üzere MLT'ye uygun olacak şekilde her bir yarıçap değeri için 30'dan fazla veri bulunmaktadır. Deneysel veri kümesi içerisinde, 90° açı, $D_m=1$ mm çap değerlerine sahip çubuk elemanların ölçüm verilerinin olasılıksal dağılımları ve dağılımı temsil edebilecek aday olasılık dağılım fonksiyonları, uzun ve kısa yarıçap değişkenleri için sırasıyla Şekil 5-1 ve Şekil 5-2'de gösterilmiştir.



Şekil 5-1: 90° açılı ve 1 mm çap değerine sahip çubuk elemanın r_{1l} , r_{2l} , r_{3l} , r_{4l} , yarıçap değişkenleri için olasılık dağılım fonksiyonları a) r_{1l} , b) r_{2l} , c) r_{3l} , d) r_{4l} .

Olasılık dağılımına uydurulan farklı dağılım fonksiyonları için model parametreleri Çizelge 5-1’de gösterilmiştir. Dağılım fonksiyonları ve model parametreleri farklı açılı ve çap değerlerinde üretilen tüm çubuk eleman veri kümesi için Çizelge Ek. 1’de gösterilmiştir. Farklı açılı ve çap değerlerinde çubuk elemanların olasılık dağılımları incelendiğinde, eğilime uygun dağılım fonksiyonunun weibull ağırlıklı olduğu gözlemlenmiştir [84]. Olasılık dağılım fonksiyonlarından elde edilen istatistiksel momentlerle, μ ve σ^2 , rassal alanın ayrıklaştırılması süreçlerinde kullanılacak bileşenler elde edilmiştir.



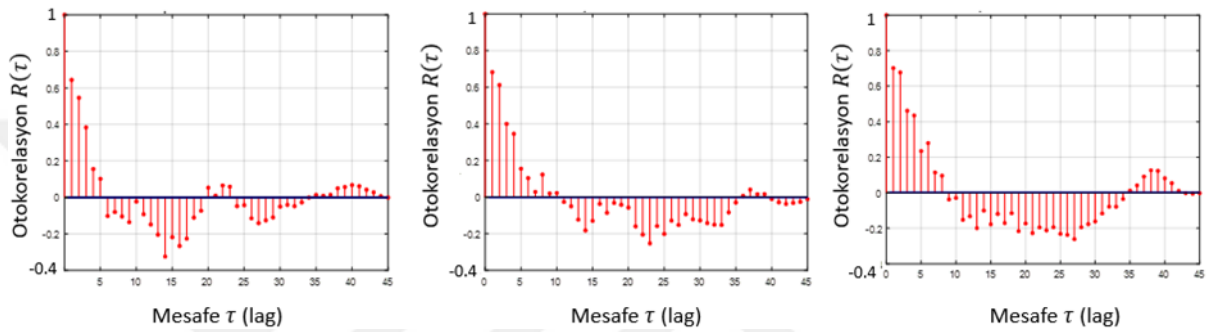
Şekil 5-2: 90° açı ve 1 mm çap değerine sahip çubuk elemanın r_{1s} , r_{2s} , r_{3s} , r_{4s} , yarıçap değişkenleri için olasılık dağılım fonksiyonları a) r_{1s} . b) r_{2s} , c) r_{3s} . d) r_{4s} .

Çizelge 5-1: 90°, $D_m=1$ çubuk elemanların yarıçap değişkenleri için istatistiksel sonuçlar

Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	normal	0,6802	0,0617	0,6802	0,0420
	r_{2l}	45x3	weibull	0,622	0,0580	0,7104	20,1449
	r_{3l}	45x3	weibull	0,6492	0,0577	0,6659	20,5634
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,6777	0,0660	-0,3937	0,0967
	r_{1s}	30x3	weibull	0,6334	0,07168	0,6535	15,9158
	r_{2s}	30x3	weibull	0,6522	0,0451	0,6728	16,704
	r_{3s}	30x3	normal	0,6076	0,0379	0,6243	19,6188
	r_{4s}	30x3	weibull	0,6393	0,0871	-0,4509	0,086

5.2 Oto-Korelasyon Fonksiyonlarının Uygulanması ve Sonuçlar

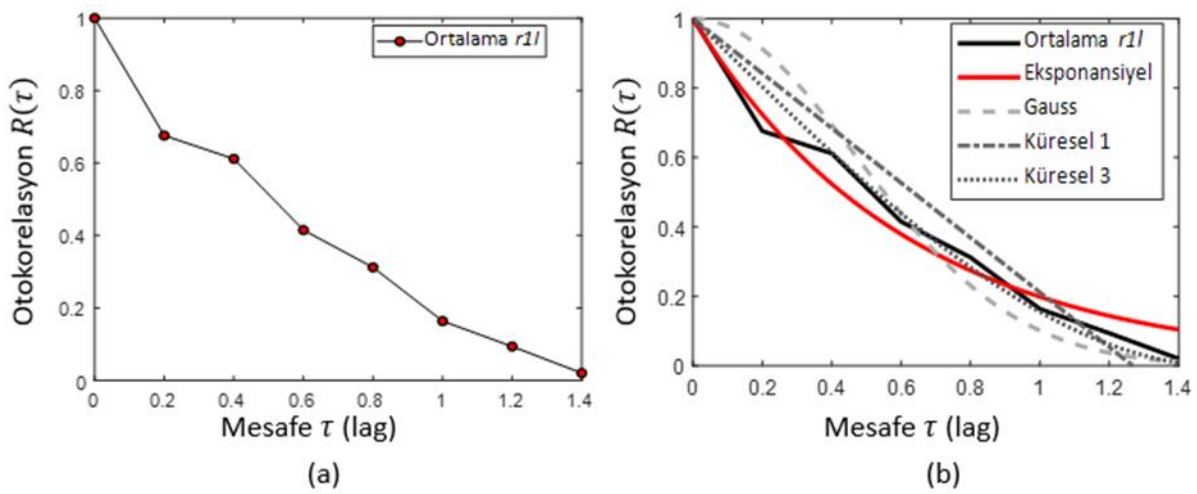
Farklı açı ve çap değerlerin için 3 tekrar olarak üretilen numune ölçümlerininim her biri için, Eşitlik (4) aracılığıyla oto-korelasyon $R(\tau)$ -mesafe (τ) eğrileri elde edilmiştir. Oto-korelasyon süreci için gerçekleştirilen adımlar, deneysel veri kümesi içerisinde temsil olarak seçilen 90° açı ve 2 mm çap değerinde üretilen numuneler için gösterilmiştir. 90° açı ve 2mm çap değerinde üretilen 3 numunenin r_{II} yarıçap değişkeni için Eşitlik (4) kullanılarak elde edilen deneysel oto-korelasyon $R(\tau)$ -mesafe (τ) eğrileri Şekil 5-3'de gösterilmiştir.



Şekil 5-3: 90° açı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanlar için r_{II} değişkenine ait oto-korelasyon $R(\tau)$ -mesafe (τ) eğrileri

Söz konusu r_{II} değişkeni için, için elde edilen bu eğriler incelendiğinde korelasyon değerlerinin artan mesafeye bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur gerek r_{II} değişkeni gerek diğer yarıçap değişkenleri çubuk eleman boyunca eklemeli imalat yönteminden kaynaklı varyasyon ve dalgalanmalara sahip olmaktadır. Burada ölçülen iki veri noktası arasındaki mesafenin artması söz konusu iki değer korelasyon ilişkisini olumsuz etkileyecektir. Eşitlik (4) ile n veri noktasında hesaplanan korelasyon değerleri ∓ 1 alt ve üst sınırları arasında değişebilmektedir. Burada pozitif korelasyon iki değişkenin birlikte arttığı veya azaldığı durumlarda, negatif korelasyon ise iki verinin farklı yönde değişim eğiliminde olduğu durumlarda oluşmaktadır [103]. Oto-korelasyon fonksiyonlarının diğer bir özellikleri simetrik, pozitif tanımlı ve sınırlı olmalarıdır [90]. Oto-korelasyon fonksiyonlarının sahip olduğu simetri (0 etrafında) özelliği nedeniyle Şekil 5-3'te gösterilen eğrilerinin sadece pozitif kısmının irdelenmesi yeterlidir [95]. Bu nedenle farklı açı ve çap değerleri için Eşitlik (4) ile elde edilecek deneysel oto-korelasyon eğrilerinin sadece pozitif kısmı dikkate alınmıştır.

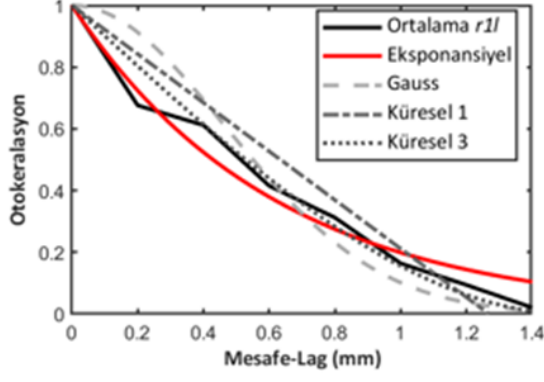
Rassal alanın ayrıklaştırılması için gerekli c korelasyon mesafesinin hesaplanmasının diğer aşamasında, 3 numunenin her biri için elde edilen oto korelasyon-mesafe eğrilerinin ortalamasının alınması, 3 deney verisinin oto korelasyon davranışının eş değer bir eğriyle temsil edilmesidir. 90° açı ve 2 mm çap değeri için 3 numuneye ait oto korelasyon değerlerinin ortalama eğrisi Şekil 5-4(a)'da gösterilmiştir. Ortalama oto korelasyon eğrisinin yalnızca pozitif kısmı elde edilmiştir. Şekil 5(a)'da gösterilen eğri aynı çap ve açı değerinde üretilen 3 farklı numunenin korelasyon davranışını temsil etmektedir. Burada amaç eklemeli imalat ile her bir yeni üretimde oluşacak değişimleri, konuma göre korele bir şekilde temsil edebilmektir.



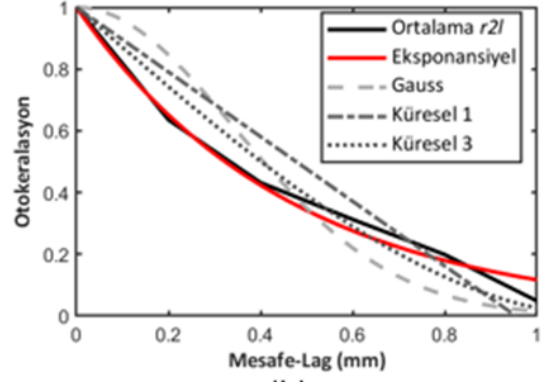
Şekil 5-4: Oto-korelasyon $R(\tau)$ -mesafe (τ) eğrileri (a) Ortalama eğri, (b) Aday oto-korelasyon modelleri ile gerçekleştirilen eğri uydurma

Korelasyon mesafesi, c 'nin bulunmasına yönelik son aşama, Çizelge 2-2'de verilen farklı oto korelasyon modellerinin, deneysel verilerden elde edilen ortalama oto korelasyon eğrisine lineer olmayan eğri uydurma yöntemiyle uydurulmasıdır. Bu aşama Bölüm 4.1'de verilen rassal alan modellemesine yönelik aşamalardan II. aşamaya karşılık gelmektedir.

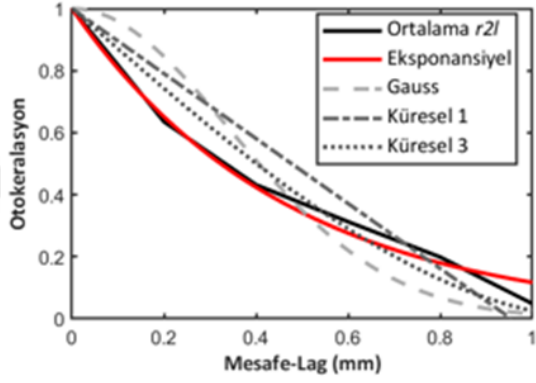
90° açı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanın r_{1l} değişkeni için ortalama oto-korelasyon eğrisine uydurulan farklı oto-korelasyon modellerine ait eğriler Şekil 5-5 ve Şekil 5-6'da gösterilmiştir. Söz konusu numunenin 8 farklı yarıçap değişkeni için elde edilen oto-korelasyon-mesafe eğrileri ve gösterilmiştir.



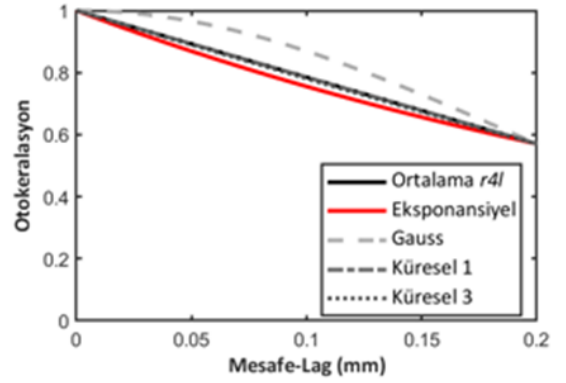
(a)



(b)

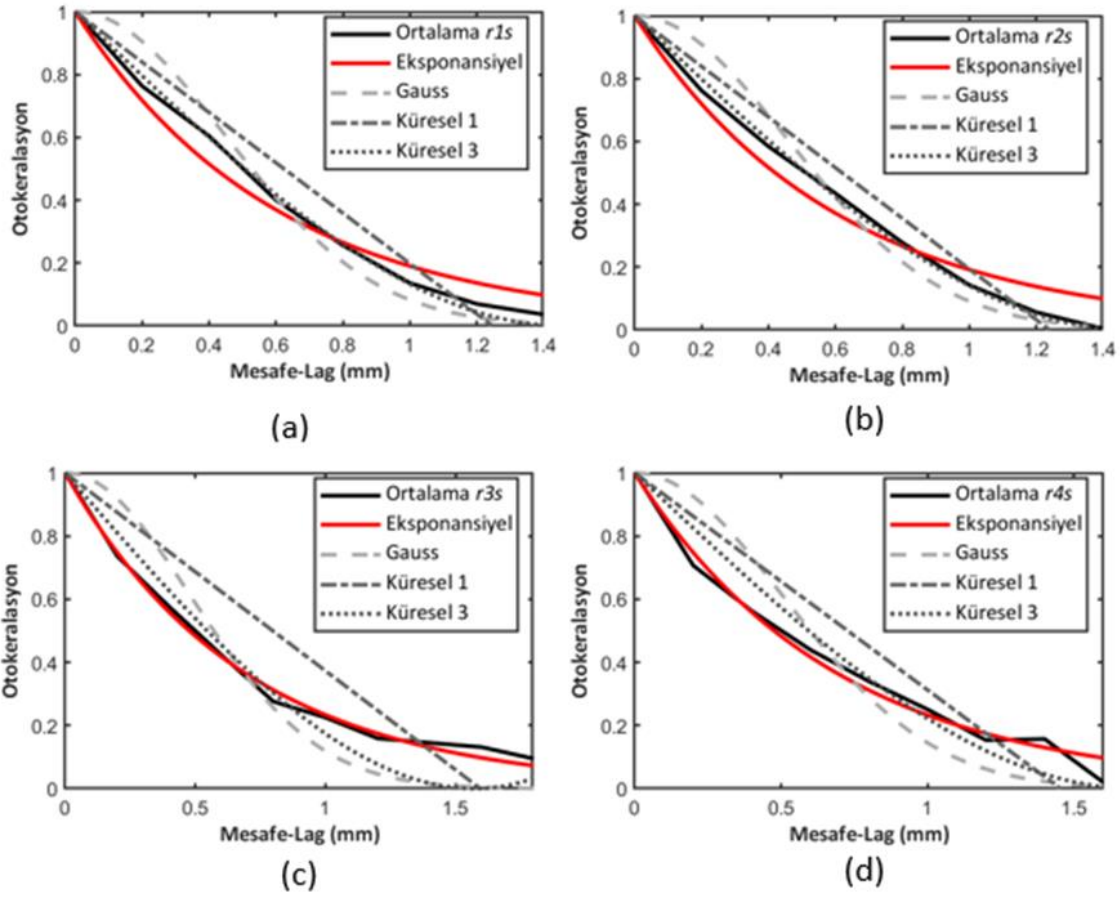


(c)



(d)

Şekil 5-5: 90° açılı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanın r_{1l} , r_{2l} , r_{3l} , r_{4l} , yarıçap değişkenleri için $R(\tau)$ - (τ) eğrileri a) r_{1l} . b) r_{2l} , c) r_{3l} . d) r_{4l} .



Şekil 5-6: 90° açı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanın r_{1s} , r_{2s} , r_{3s} , r_{4s} , yarıçap değişkenleri için $R(\tau)$ - (τ) eğrileri a) r_{1s} , b) r_{2s} , c) r_{3s} , d) r_{4s} .

DeneySEL verilere ait korelasyon davranışının farklı oto-korelasyon modelleri ile temsili için gerçekleştirilen eğri uydurma işleminde iki eğrinin örtüşme düzeyi, belirleme katsayısı (Coefficient of Determination- R^2) [104] metriği ile ölçülür. R^2 metriği 0-1 aralığında değişmektedir. Burada, 1 değeri gerçekleştirilen eğri uydurma işleminin yüksek hassasiyete sahip olduğunu gösterirken, eğrilerin örtüşme düzeyinin azalmasıyla doğru orantılı olarak 0 değerine yakınsar.

Her bir yarıçap değişkeni için, Çizelge 2-2’de verilen korelasyon modelleri ile lineer olmayan uydurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir korelasyon modeli için R^2 değerleri hesaplanarak, 1 değerine en yakın değere sahip oto korelasyon modeli deneysel veriyle örtüşen en iyi model olarak belirlenmiştir.

Tüm deneysel veri kümesi için, farklı çap ve açı değerlerinde çubuk elemanın 8 farklı yarıçap değişkeni için hesaplanan c değerleri Çizelge Ek. 2’de gösterilmiştir.

5.3 Rassal Alan Yönteminin Uygulanması ve Sonuçlar

Rassal alan modellemesinin son aşaması ölçümü yapılan çap değerlerinin için konuma bağlı değişimleri hesaba katabilecek bir tahmin modeli geliştirilmesidir. Bölüm 5.2’de hesaplanan c değerleriyle birlikte, Bölüm 4.1’de verilen rassal alan modellemesine ilişkin aşamalardan 3’ü tamamlanmıştır. Bu bölüm içerisinde 4-6 aşamaları uygulanarak sonuçlar irdelenmiştir.

Rassal alanın sınırları çubuk eleman boyutlarına eşit olarak belirlenmiştir. Rassal alanın ayrıklaştırılmasında kullanılacak çözüm ağı boyutu, c değerleriyle orantılıdır [99]. Bu tez çalışmasında, rassal alan içerisindeki iki nokta arasındaki mesafe L_{RF} , elde edilen c değerlerine bağlı olarak alınan farklı değerlerle yapılan yakınsama çalışmasıyla belirlenmiştir. Yakınsama çalışması için belirlenen hata metriği, rassal alan ayrıklaştırma yöntemlerinin hassasiyetini karşılaştırılmasında sıkça kullanılan varyans hata metriğidir [98]. Literatürde KL yöntemi için ideal çözüm ağı boyutu, $L_{RA} \cong \left(\frac{c}{2}, \frac{c}{4}\right)$ aralığında, ATODT yöntemi için ise $L_{RA} \cong \left(\frac{c}{6}, \frac{c}{10}\right)$ aralığında verilmiştir [99]. Yapılan yakınsama çalışmasında, en düşük varyans hata değerlerini sağlayan çözüm ağı boyutlarının, literatürde verilen aralıklar arasında elde edilmiştir. KL ve ATODT yöntemleri için belirlenen ideal çözüm ağı boyutları, korelasyon mesafesi ve ideal çözüm ağı boyutu arasındaki katsayı ($k=c/L_{RA}$), açılımlarda kullanılan maksimum terim sayısı sonuçları, deneysel veri kümesi içerisinde belirlenen temsili açı ve çap değerleri için Çizelge 5-2’de verilmiştir.

Çizelge 5-2: 1mm çap değerine sahip çubuk elemanlar için belirlenen r_{maks} , L_{RF} değerleri

Değişken	KL			ATODT		
	r_{maks}	L_{RA}	$k = c/L_{RA}$	r_{max}	L_{RA}	$k = c/L_{RA}$
90° d_{1l}	55	0.185	2.803	128	0.079	6.593
90° d_{2l}	18	0.588	2.878	38	0.270	6.264
90° d_{1s}	50	0.204	2.795	117	0.086	6.618
90° d_{2s}	49	0.2083	2.8085	108	0.0935	6.2606
45° d_{1l}	92	0.110	2.826	211	0.048	6.521
45° d_{2l}	55	0.185	2.824	128	0.079	6.641
45° d_{1s}	207	0.049	2.837	410	0.024	5.632
45° d_{2s}	184	0.055	2.833	426	0.024	6.579

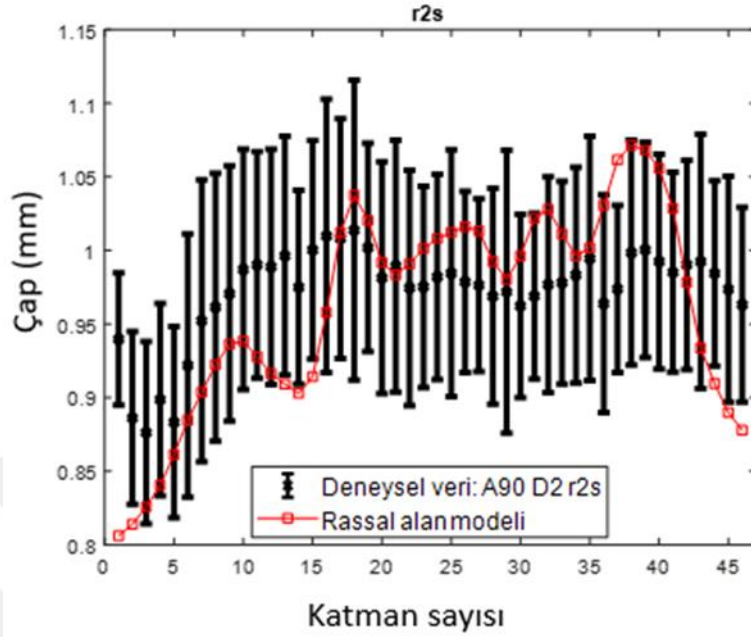
Rassal alan belirlenen L_{RA} parametresi aracılığıyla n adet ayrık noktaya ayrıklaştırılmıştır. Bu aşamayla birlikte rassal alan içerisindeki noktalar arasındaki bağıl mesafeler, $\tau = |x_i - x_{i+j}|$, durağan ve gaussian varsayımıyla hesaplanmıştır. Belirlenen en uygun oto-korelasyon modeline ait eşitlikler kullanılarak her bir veri kümesi için oto-korelasyon matrisleri elde edilmiştir. Eşitlik 5 kullanılarak oto-kovaryans matrisleri de hesaplanarak matrislerin spektral ayrıklaştırılması gerçekleştirilmiştir. Burada spektral ayrıklaştırılacak oto-kovaryans matrislerinin genel formu Eşitlik 10'da gösterilmiştir [99].

$$\begin{pmatrix} C_{HH}(i,j) & C_{HH}(i+1,j) & \dots & C_{HH}(i+n,j) \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ C_{HH}(i,j+n) & C_{HH}(i+1,j) & \dots & C_{HH}(i+n,j+n) \end{pmatrix} \quad (10)$$

Burada C_{HH} , oto-kovaryans fonksiyonu, $i, j=1, 2, \dots, (n-1)$ ve n rassal alan içerisindeki noktaları temsil etmektedir. Verilen formda elde edilen oto-kovaryans matrisinin spektral ayrıklaştırılarak, öz değer ve öz fonksiyonlarının elde edilmesiyle birlikte Bölüm 4.1'de verilen 6 aşama tamamlanmıştır. Son aşama, tüm değişkenlerin, sırasıyla KL ve ATODT, Eşitlik 7 ve Eşitlik 9, eşitliklerinde uygulanmasıdır.

Bölüm 5.1'de, deneysel verilerin ölçümlerinin olasılık dağılımlarından elde edilen ortalama değerleri, Eşitlik 7'de, rassal alanın ortalamasını μ_{HH} , yine ölçümlerin olasılık dağılımından elde edilen varyans değeri, rassal alanın varyans değerine, σ_{HH} , karşılık gelmektedir. Öz değerler, λ_i ve öz fonksiyonlar, $f_i(x)$, oto-kovaryans matrisinin spektral ayrıklaştırılmasıyla elde edilmiştir. KL açılımının son bileşeni, ξ_i , durağan ve gaussian eğilimli bir rassal alan varsayımıyla, standart normal dağılımlı rassal değişkenleri ifade etmektedir. Bu rassal değişkenler MATLAB ticari yazılımında istatistik araç kutusu içerisinde yer alan, 'rndn' kullanılarak oluşturulmuştur. Sıralı aşamalarla elde edilen bileşenlerinin, KL eşitliğine uygulanmasıyla birlikte rassal alan modellemesi tamamlanmıştır.

Rassal alan modellemesiyle geliştirilen, konuma bağlı belirsizlikleri hesaba katabilen ve üretimde olduğu gibi her bir simülasyonda farklı değerler verecek tahmin modelinin 1 gerçekleşişi, deneysel veri kümesi içerisinde temsil olarak belirlenen, 90° açılı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanlar için Şekil 5-7'te gösterilmiştir.



Şekil 5-7: 90° açı ve 2 mm çap değerinde çubuk elemanın r_{2s} değişkeni için deneysel çap değerleri ve karşılık gelen rassal alan modelinin 1 gerçekleşimi

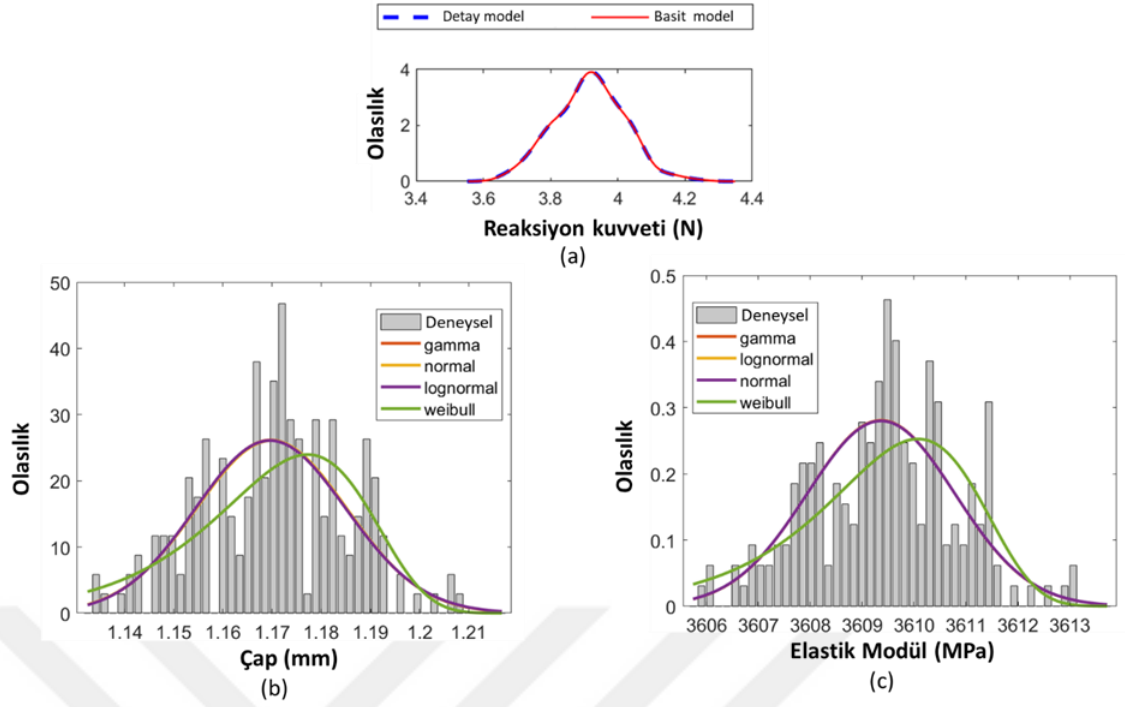
Burada önemli husus, rassal alan modellemesinin motivasyonunun, diğer regresyon yöntemlerinden farklı olarak, veriye doğrudan fit etmekten ziyade, alan içerisindeki noktaların birbiriyle olan korelasyonunu mesafeye bağlı olarak hesaba katarak, verinin eğilimini yansıtmasıdır. Burada modelleme ile elde edilen çap değerlerinin, deneysel verinin eğilimini ve değişim noktalarını yakalaması önem arz etmektedir. Bilindiği üzere, 3 tekrar olarak üretilerek elde edilen deneysel veri kümesi, her bir yeni üretimde farklı belirsizliklerin oluşması nedeniyle değişecektir. Her bir üretimde oluşacak farklı çap değerleri için tahmini yapılabilecek kesin bir çap değeri olmamaktadır, fakat 3 ölçümün konuma bağlı korelasyon davranışının karakterize edilmesi, verinin değişim eğiliminin ön görülmesine olanak sağlayacaktır. Şekil 5-7’de görüldüğü üzere deneysel verinin eğilimi rassal alan ile elde edilerek değişimler çubuk eleman seviyesinde karakterize edilmiştir.

Farklı açı ve çap değerlerinde üretilen numuneler için rassal alan modellemesinden elde edilen yarıçap değişkenleri, homojenize çubuk eleman özelliklerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Sonuçlar bir sonraki bölümde verilecektir.

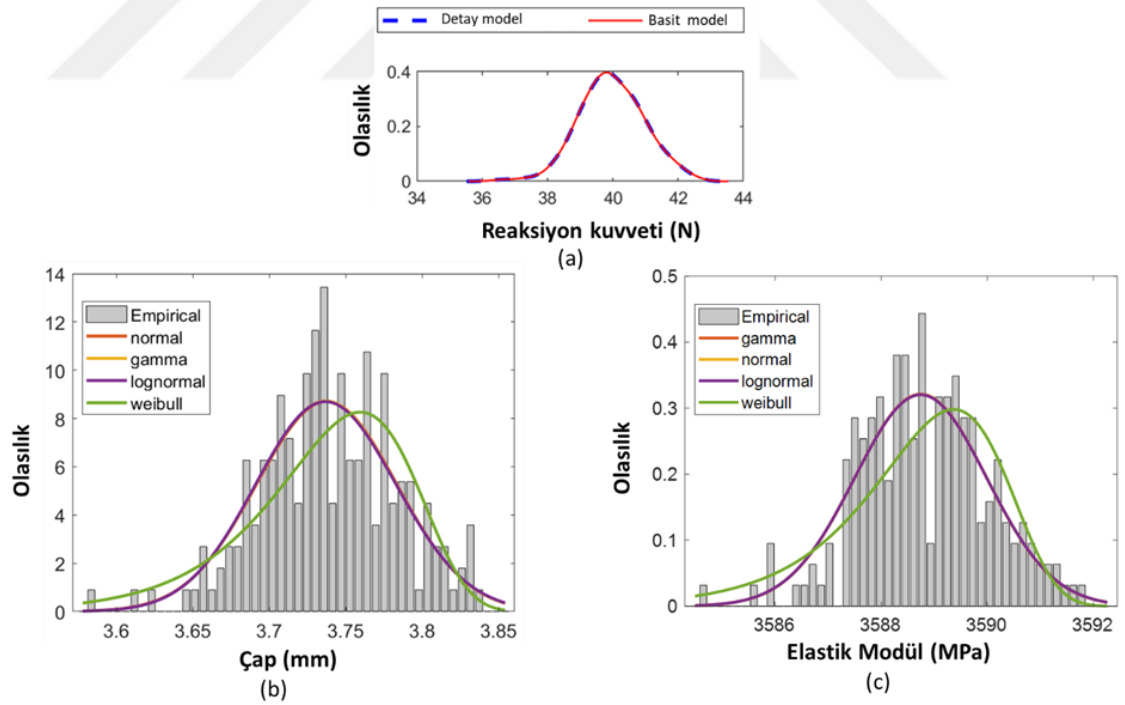
5.4 Etkin Çubuk Eleman Özelliklerinin Belirlenmesi ve Sonuçlar

Çubuk elemanların, değişim ve belirsizliklerin karakterize edilerek dahil edildiği etkin özelliklerinin belirlenebilmesi için sırasıyla; Bölüm 3'te üretilen deney numuneleri üzerinden deneysel veri toplanmış, Bölüm 4.1'de sıralanan aşamalar ile deneysel verinin rassal alan modellemesi sağlanmış, modellenen değişim ve belirsizlikler Bölüm 4.2'de, dahil edilerek üretilene benzer detay çubuk eleman modelleri oluşturulmuştur. Bölüm 4.3'te farklı açı ve çap değerlerine sahip tüm çubuk elemanlar detay modellerine çekme testi sınır koşulları uygulanarak. $N=200$ tekrar için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. $N=200$ simülasyondan elde edilen reaksiyon kuvveti (F) ve yer değiştirmelere (δ), karşılık etkin çap (D_E) ve elastik modülü (E_E) değerlerinin hesaplanabilmesi için homojenizasyon yöntemi kullanılmıştır. Homojenizasyon yöntemi için kullanılan yükseltme yöntemi [21,105], mikro seviyede kusurlar içeren detay modele eşdeğer malzeme ve geometri özelliklerini doğru bir şekilde temsil edecek daha basit bir modelin etkin parametrelerini belirleme yaklaşımına dayanır. Burada yükseltme yöntemi, mikro seviyede detayların makro seviyeye yükseltilmesini ifade eder. Bu geçiş için eşdeğer özellikleri sağlayacak etkin özellikler belirlenir. Söz konusu yükseltme yöntemi kullanılarak, çıktı parametresi $N=200$ simülasyondan elde edilen reaksiyon kuvvetlerinin olasılık dağılımına karşılık girdi parametreleri, çap değerleri, Polynomial Chaos açılımı yöntemiyle elde edilmiştir. Etkin çap (D_E) ve elastik modülü (E_E) değerleri, farklı olasılık dağılım modellerinin yükseltme yöntemi kullanılarak simülasyon reaksiyon kuvvetlerine karşılık girdi olarak elde edilen çap ve elastik modülü dağılımlarına eğri uydurma yöntemlerinin uygulanmasıyla elde edilmiştir. Bu işlem için kullanılan olasılık dağılım modelleri ve karşılık gelen model numaraları sırasıyla; log-normal (I) [106], gamma (II) [107], normal (III) [108], weibull (IV) [109], ve generalized extreme values (V) [110] olarak belirlenmiştir. Aday olasılık dağılım fonksiyonları içerisinde, simülasyon dağılımına en uygun modeller, model parametreleriyle verilmiştir.

Deneysel veri kümesi içerisinde temsili olarak belirlenen, 90° açılı çubuk elemanların $D_m=1$ ve $D_m=4$ mm üretim çap değerleri için, $N=200$ simülasyondan elde edilen reaksiyon kuvveti dağılımları ve bu 200 simülasyon karşılık gelen etkin çap ve elastik modül değerlerinin dağılımı, sırasıyla Şekil 5-8 ve Şekil 5-9'de gösterilmiştir.



Şekil 5-8: 90° açılı $D_m=1$ mm çubuk eleman için homojenize özellikler (a) Detay modelin $N=200$ adet çekme testi simülasyonundan elde edilen reaksiyon kuvvetleri (N) (b) Etkin çap (D_E) (c) Etkin elastik modülü (E_E)



Şekil 5-9: 90° açılı $D_m=4$ mm çubuk eleman için homojenize özellikler (a) Detay modelin $N=200$ adet çekme testi simülasyonuna ait reaksiyon kuvvetleri (N) (b) Homojenize çap (D_E) (c) Homojenize elastik modülü (E_E)

Burada, 90° açılı tüm çubuk elemanlar için elde edilen etkin çap ve elastik modülü değerleri, en uygun olasılık dağılım modeli ve model parametreleri ise Çizelge 5-3’de gösterilmiştir.

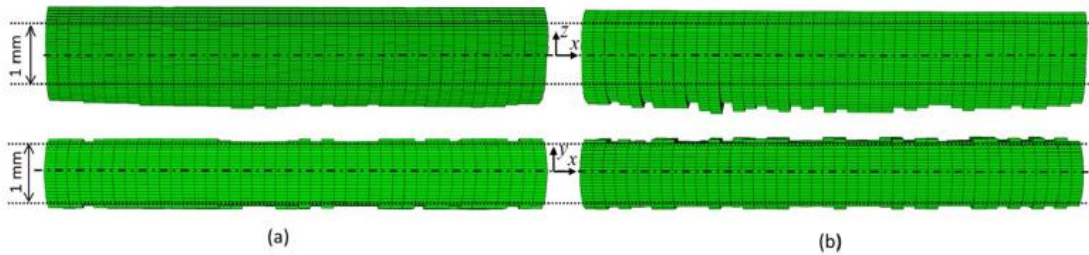
Çizelge 5-3: 90° açılı çubuk elemanlara ait etkin özellikler (D_E , E_E)

90°										
Çap (mm)	Etkin Çap (D_E) (mm)					Homojenize Elastik Modül (E_E) (MPa)				
	Ort.	Std	Model	Par. (a)	Par. (b)	Ort.	Std	Model	Par. (a)	Par. (b)
1	1.170	0.015	IV	5.9E3	2E-4	3609	1.425	IV	6.5E6	6E-4
1.2	1.226	0.009	III	1.226	0.009	3612	1.378	II	6.9E6	5E-4
1.4	1.298	0.015	III	1.298	0.015	3626	5.995	I	8.195	0.001
1.6	1.470	0.011	III	1.470	0.011	3638	2.610	I	8.199	7E-4
1.8	1.622	0.016	IV	1.629	1E2	3611	1.520	IV	3.6E3	3E3
2	1.778	0.014	III	1.778	0.014	3605	0.694	III	3.6E3	0.694
2.5	2.384	0.016	III	2.384	0.016	3605	0.523	II	4.8E7	8E-5
3	2.982	0.018	III	2.982	0.018	3589	1.703	III	3.6E3	1.703
3.5	3.512	0.011	III	3.512	0.011	3576	9.861	I	8.182	3E-3
4	3.738	0.046	III	3.738	0.046	3588	1.245	II	8.3E6	4E-4

Benzer şekilde, farklı açı ve çap değerlerinde üretilen tüm veri kümesi için etkin çap ve elastik modül değerleri Çizelge Ek. 2 ’de gösterilmiştir. Belirlenen c değerleri farklı açı ve çap değerleri için incelendiğinde; düşük üretim çap değerlerinde, $D_m=1$ ve $D_m=1.2$ mm, karşılık gelen etkin çap değerlerinin üretim için belirlenen değerlere göre yüksek olması, kullanılan EFF makinesinin düşük çap değerlerinde çubuk elemanların boyut hassasiyetini sağlayamaması ve tasarım çapına göre daha büyük veya daha küçük çap değerlerinde üretmesidir. Diğer bir deyişle, düşük çap değerlerinde boyut hassasiyeti düşmekte, üretilen çap değerleri, hedeflenen çap değerlerinden daha yüksek veya daha düşük olabilmektedir. Geliştirilen yöntem sayesinde, üretim için planlanan çap değerlerinin kıyasla daha büyük veya daha küçük gelebilecek çap değerleri doğrudan kullanılabilir.

5.5 Rassal alan ve rassal değişkenler yöntemlerinin karşılaştırılması

Rassal alan yöntemiyle konuma bağlı modelleme yaklaşımının, rassal değişkenler yöntemine göre sağladığı avantajlar, her iki yöntemin karşılaştırılmasıyla doğrulanabilir. Bu nedenle, farklı açı ve çap değerlerinde üretilen çubuk elemanların rassal alan yöntemiyle modellenen çap değişkenleri, aynı zamanda rassal değişkenler yöntemiyle de modellenerek karşılaştırılmıştır. Her iki modelleme yaklaşımının, karşılaştırılabilmesi için farklı açı ve çap değerlerinde tüm veri seti içerisinde belirlenen 90° , 45° ve 0° açı, $D_m=1$ mm çap değerinde çubuk eleman değişkenleri kullanılmıştır. Her iki yaklaşımla modellenen $\alpha=0^\circ$ ve $D_m=1$ çap değerine sahip çubuk eleman voksel modelleri Şekil 5-10'da gösterilmiştir. Şekil 5-10(a)'da görüldüğü üzere, rassal alan yöntemiyle modellenerek oluşturulan voksel modeller, Şekil 5-10(b)'de verilen rassal değişkenler yöntemine kıyasla, çubuk eleman merkezi boyunca çap değişkenlerinde daha az ve komşu iki kenar arasında korele bir eğilime sahiptir. Diğer taraftan, rassal değişkenler yöntemiyle modellenen çap değişkenleri, Şekil 5-10(b)'de görüldüğü üzere, birbirinden bağımsız tamamen rastgele bir trende sahiptir. Ek olarak, rassal alan yöntemiyle modellenen değişimlerin, Şekil 4-6'da gösterilen, 0° açı değeriyle üretilen çubuk eleman geometrilerine benzeyen; ortaya bölgelerde yerçekimi nedeniyle oluşan sarkmaları hassas temsil edebilen eğilimde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5-10: $\alpha=0^\circ$ ve $D_m=1$ çap değerinde çubuk eleman voksel modellerinin $xz-xy$ görünüşleri (a) rassal alan yöntemi, (b) rassal değişkenler yöntemi

Üretilen numunelerin mikroskop görüntüleri ve rassal alan yöntemiyle modellenen değişimlerin voksel modelleri arasında yapılan bu görsel karşılaştırmanın yanı sıra, üç tekrar üretilen çubuk elemanların ölçülen çap değerleriyle, sırasıyla rassal alan ve rassal değişkenler yöntemiyle modellenen çap değerleri arasında hata oranı hesaplanmıştır. Böylece, her iki yöntemin üretilen numune çap değerlerini temel alan

karşılaştırılması yapılarak hesaplanan hata oranları ile sayısal doğrulama yapılmıştır. 90°, 45° ve 0° açı, $D_m=1$ mm çap değerinde üretilen çubuk eleman numunelerinin, mikroskop ölçümlerinden elde edilen deneysel çap değerlerinin, rassal alan ve rassal değişkenler yöntemiyle modellenen çap değerleriyle karşılaştırılması Çizelge 5-4'te gösterilmiştir. Burada, deneysel veriler ve her iki yaklaşımla modellenen çap değerlerinin karşılaştırılmasında, hata metriği olarak ortalama mutlak hataların yüzdesi kullanılmıştır [104].

Çizelge 5-4: $\alpha=0^\circ$ ve $D_m=1$ çubuk elemanların çap değişkenleri için ortalama mutlak hataların yüzde değerleri

Değişken	Rassal Değişkenler (%)	Rassal Alan (%)	Fark (%)
90° d_{1l}	7,70	5,30	2,20
90° d_{2l}	7,47	4,73	2,74
90° d_{1s}	7,26	5,29	1,97
90° d_{2s}	7,07	6,70	0,37
45° d_{1l}	8,01	5,17	2,84
45° d_{2l}	9,54	5,73	3,81
45° d_{1s}	8,49	6,86	1,63
45° d_{2s}	8,31	5,63	2,68
0° d_1	4,94	3,81	1,13
0° d_2	6,10	6,01	0,09

Çizelge 5-4'de görüldüğü üzere gerek rassal alan gerek rassal değişkenler yöntemlerinin hata değerleri %10'un altındadır. Elde edilen sonuçlar, her iki yöntemle modellenen değişimlerle oluşturulan voksel modellerin, üretilen çubuk eleman numuneleri üzerinden alınan deneysel ölçüm verileriyle gerekli hassasiyette örtüştüğünü göstermektedir. Diğer taraftan, rassal alan yönteminin daha düşük hata yüzdelere sahip olduğu ve üretilen numunelerin modellenmesinde daha güçlü bir tahmin modellemesi olduğu doğrulanmıştır.

6. Değerlendirme ve Öneriler

Bu çalışmada, latis yapıların eklemeli imalat yöntemleriyle üretimi sırasında, geometri ve malzeme özelliklerinde gözlemlenen belirsizliklerin konuma bağlı değişimleri çubuk eleman seviyesinde incelenmiştir. Literatürde gerçekleştirilen mevcut çalışmaların aksine, rassal alan ayırıklaştırma yaklaşımları kullanılarak çap değişimlerinin uzaysal değişimleri dikkate alınmış ve deneysel ölçümlerin korelasyon davranışına dayalı uzaysal değişkenlik karakterize edilmiştir.

Değişimleri incelemek için, latis yapıların en küçük yapı elemanları, çubuk elemanlar seviyesinde farklı açı ve çap değerlerinde üretimler gerçekleştirilmiş, her bir katman üzerinden deneysel ölçümler elde edilmiştir. Her bir çubuk eleman için üç tekrar üretim yapılarak, geliştirilen algoritmalar aracılığıyla mikroskop görüntüleri üzerinden deneysel ölçümler alınmıştır. Üretilen her bir çubuk eleman veri kümesinin uzaysal değişkenliğinin incelenmesi için oto korelasyon fonksiyonları oluşturulmuştur. Rassal alan yaklaşımı, iki yaygın ayırıklaştırma yöntemi, KL ve ATODT kullanılarak çap değişimleri karakterize edilmiştir. Bu çalışmadaki önemli bulgular şu şekilde özetlenmiştir;

- Tasarım sürecinde dairesel çubuk eleman kesitlerinin, belirli bir açıyla (15° - 90°) üretilmesiyle eliptik form aldığı gözlemlenmiştir. Bu durum sadece ara açılarda değil, dikey (90°) çubuk elemanların mikroskop görüntülerinde de eliptik olarak görülebildiği gözlemlenmiştir.
- Eklemeli imalat ile üretilen latis yapılar uzaysal değişkenliğe sahiptir. Değişimler, rassal değişkenler yaklaşımından daha ziyade, oto-korelasyon davranışını esas alan rassal alan yaklaşımı ile modellenmelidir. Çubuk eleman uzunluğu boyunca çap değerleri için elde edilen ölçüm verilerinin oto-korelasyon davranışı için üstel oto korelasyon fonksiyonunun en uygun olduğu görülmüştür.
- Üretilen 0° çubuk elemanların, çapraz (45°) elemanlara kıyasla üretim yönü boyunca daha pürüzsüz yan profile sahip olması nedeniyle, 0° açılı elemanların daha uzun korelasyon mesafelerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Rassal alan gösterimi, her iki ayırıklaştırma yöntemi, KL ve AODT, yöntemi ile hassas bir şekilde gerçekleştirilebildiği görülmüştür. İncelenen varyans hata metriği değerleri, KL yönteminin genel olarak daha yüksek doğruluğa

sahipken, AODT yönteminin yerel olarak hassas sonuçlar verdiğini göstermektedir.

- Rassal alan çözüm ağı boyutu belirlemede, yapılan yakınsama çalışmasıyla hem KL hem de ATODT yöntemleri için elde edilen korelasyon uzunluğu ile çözüm ağı boyutu oranları, ($k=c/L_{RF}$), literatürde önerilen aralıklar içerisinde yer almaktadır.
- Rassal alan modellemesine dayanarak geliştirilen voksel eleman tabanlı çubuk eleman modellerinin, üretilen çubuk geometrilerini en iyi şekilde temsil edebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmada önerilen metodoloji EFF yöntemi için önerilmiş olsa da SLE, EDE yöntemleri gibi, diğer farklı eklemeli imalat yöntemlerinde üretim süreçlerinde gözlemlenen malzeme ve geometri belirsizliklerinin karakterizasyonu için genişletilebilir.

Çalışmanın limitasyonu olarak, gerçekleştirilen rassal alan modellemesi süreçlerinde uzaysal değişimlerin durağan ve gaussian eğilime sahip olduğu varsayımıyla, uzay içerisinde sabit ortalama değeri kullanılması belirtilebilir. Bu varsayım gerçekleştirilen hesaplama yükünü azaltıyor olsa da gaussian eğilime sahip olmayan ve uzay içerisinde her bir noktada değişken ortalama değerlerinin kullanılması rassal alan modellemesinin hassasiyetini artıracaktır. Durağan olmayan ve Gaussian eğilime sahip olmayan durumlar için rassal alan çalışmalarının yapılması gelecekte yapılacak çalışmalar olarak belirtilebilir. Durağan olmayan ve gaussian olmayan yaklaşımıyla rassal alan modellemesi gerçekleştirilebilir [94,111].

Çalışmanın bir başka potansiyel gelecek çalışması olarak deneysel verinin toplanmasında hesaplama maliyetinin azaltılması için basit kriging yöntemi kullanılması verilebilir [112]. Kriging tahmin yönteminin kullanılması deneysel veri toplama sürecindeki yükü hafifletecektir, yanı sıra bu yöntemle artırılacak veri noktası sayısı rassal alanın modelleme hassasiyetini artıracaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B.**, (2010), *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer US.
- [2] **Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., Santos, R., Pedro Mortágua, J.**, (2016), Selective Laser Melting (SLM) and Topology Optimization for Lighter Aerospace Components, *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 289–296.
- [3] **Gorgularslan, R. M., Gandhi, U. N., Song, Y., Choi, S. K.**, (2017), An Improved Lattice Structure Design Optimization Framework Considering Additive Manufacturing Constraints, *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 305–319.
- [4] **Jankovics, D., Barari, A.**, (2019), Customization of Automotive Structural Components Using Additive Manufacturing and Topology Optimization, *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 212–217.
- [5] **Hejripour, F., Salam, M. A., Bowlin, G. L., Asadi, E.**, (2020), Laser-Based Powder-Bed Fusion Strategies for the Fabrication of Cellular Structures with a Fine Resolution, *Materialia*, 13, 100829.
- [6] **Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Fleck, N. A., Ashby, M. F., Wadley, H. N. G.**, (2001), The Topological Design of Multifunctional Cellular Metals, *Progress in Materials Science*, 46(3–4), 309–327.
- [7] **Hammett, C. I., Rinaldi, R. G., Zok, F. W.**, (2013), Pyramidal Lattice Structures for High Strength and Energy Absorption, *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 80(4).
- [8] **Cansizoglu, O., Harrysson, O., Cormier, D., West, H., Mahale, T.**, (2008), Properties of Ti-6Al-4V Non-Stochastic Lattice Structures Fabricated via Electron Beam Melting, *Materials Science and Engineering A*, 492(1–2), 468–474.
- [9] **Harrysson, O. L. A., Cansizoglu, O., Marcellin-Little, D. J., Cormier, D. R., West, H. A.**, (2008), Direct Metal Fabrication of Titanium Implants with Tailored Materials and Mechanical Properties Using Electron Beam Melting Technology, *Materials Science and Engineering C*, 28(3), 366–373.
- [10] **Cahill, S., Lohfeld, S., McHugh, P. E.**, (2009), Finite Element Predictions Compared to Experimental Results for the Effective Modulus of Bone Tissue Engineering Scaffolds Fabricated by Selective Laser Sintering, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 20(6), 1255–1262.
- [11] **Tsopanos, S., Mines, R. A. W., McKown, S., Shen, Y., Cantwell, W. J., Brooks, W., Sutcliffe, C. J.**, (2010), The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel

- Micro-lattice Structures, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 132(4), 0410111–0410112.
- [12] **Gümrük, R., Mines, R. A. W.**, (2013), Compressive Behaviour of Stainless Steel Micro-Lattice Structures, *International Journal of Mechanical Sciences*, 68, 125–139.
- [13] **Van Bael, S., Kerckhofs, G., Moesen, M., Pyka, G., Schrooten, J., Kruth, J. P.**, (2011), Micro-CT-Based Improvement of Geometrical and Mechanical Controllability of Selective Laser Melted Ti6Al4V Porous Structures, *Materials Science and Engineering A*, 528(24), 7423–7431.
- [14] **Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Raymont, D.**, (2014), Advanced Lightweight 316L Stainless Steel Cellular Lattice Structures Fabricated via Selective Laser Melting, *Materials and Design*, 55, 533–541.
- [15] **Qiu, C., Yue, S., Adkins, N. J. E., Ward, M., Hassanin, H., Lee, P. D., Withers, P. J., Attallah, M. M.**, (2015), Influence of Processing Conditions on Strut Structure and Compressive Properties of Cellular Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting, *Materials Science and Engineering A*, 628, 188–197.
- [16] **Doyle, H., Lohfeld, S., McHugh, P.**, (2014), Predicting the Elastic Properties of Selective Laser Sintered PCL/ β -TCP Bone Scaffold Materials Using Computational Modelling, *Annals of Biomedical Engineering*, 42(3), 661–677.
- [17] **Suard, M., Martin, G., Lhuissier, P., ... R. D.-A., 2015, undefined**, Mechanical Equivalent Diameter of Single Struts for the Stiffness Prediction of Lattice Structures Produced by Electron Beam Melting, *Elsevier*.
- [18] **Mueller, J., Shea, K.**, (2018), Buckling, Build Orientation, and Scaling Effects in 3D Printed Lattices, *Materials Today Communications*, 17, 69–75.
- [19] **Dressler, A. D., Jost, E. W., Miers, J. C., Moore, D. G., Seepersad, C. C., Boyce, B. L.**, (2019), Heterogeneities Dominate Mechanical Performance of Additively Manufactured Metal Lattice Struts, *Additive Manufacturing*, 28, 692–703.
- [20] **Park, S. I., Rosen, D. W., Choi, S. kyum, Duty, C. E.**, (2014), Effective Mechanical Properties of Lattice Material Fabricated by Material Extrusion Additive Manufacturing, *Additive Manufacturing*, 1, 12–23.
- [21] **Gorguluarslan, R. M., Park, S. I., Rosen, D. W., Choi, S. K.**, (2015), A Multilevel Upscaling Method for Material Characterization of Additively Manufactured Part under Uncertainties, *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 137(11), 1–12.
- [22] **Gorguluarslan, R. M., Grandhi, R. V., Choi, H. J., Choi, S. K.**, (2019), Prediction Assessment and Validation of Multiscale Models for Additively Manufactured Lattice Structures under Uncertainty, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(3), 1365–1379.
- [23] **Karamooz Ravari, M. R., Kadkhodaei, M., Badrossamay, M., Rezaei, R.**, (2014), Numerical Investigation on Mechanical Properties of Cellular Lattice Structures Fabricated by Fused Deposition Modeling, *International Journal of Mechanical Sciences*, 88, 154–161.

- [24] **McGregor, D. J., Tawfick, S., King, W. P.**, (2019), Automated Metrology and Geometric Analysis of Additively Manufactured Lattice Structures, *Additive Manufacturing*, 28, 535–545.
- [25] **Campoli, G., Borleffs, M. S., Amin Yavari, S., Wauthle, R., Weinans, H., Zadpoor, A. A.**, (2013), Mechanical Properties of Open-Cell Metallic Biomaterials Manufactured Using Additive Manufacturing, *Materials and Design*, 49, 957–965.
- [26] **Karamooz Ravari, M. R., Nasr Esfahani, S., Taheri Andani, M., Kadkhodaei, M., Ghaei, A., Karaca, H., Elahinia, M.**, (2016), On the Effects of Geometry, Defects, and Material Asymmetry on the Mechanical Response of Shape Memory Alloy Cellular Lattice Structures, *Smart Materials and Structures*, 25(2).
- [27] **Bagheri, Z. S., Melancon, D., Liu, L., Johnston, R. B., Pasini, D.**, (2017), Compensation Strategy to Reduce Geometry and Mechanics Mismatches in Porous Biomaterials Built with Selective Laser Melting, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 70, 17–27.
- [28] **Liu, L., Kamm, P., García-Moreno, F., Banhart, J., Pasini, D.**, (2017), Elastic and Failure Response of Imperfect Three-Dimensional Metallic Lattices: The Role of Geometric Defects Induced by Selective Laser Melting, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 107, 160–184.
- [29] **Melancon, D., Bagheri, Z. S., Johnston, R. B., Liu, L., Tanzer, M., Pasini, D.**, (2017), Mechanical Characterization of Structurally Porous Biomaterials Built via Additive Manufacturing: Experiments, Predictive Models, and Design Maps for Load-Bearing Bone Replacement Implants, *Acta Biomaterialia*, 63, 350–368.
- [30] **Gorguluarslan, R. M., Choi, S. K., Saldana, C. J.**, (2017), Uncertainty Quantification and Validation of 3D Lattice Scaffolds for Computer-Aided Biomedical Applications, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 71(March), 428–440.
- [31] **Lozanovski, B., Leary, M., Tran, P., Shidid, D., Qian, M., Choong, P., Brandt, M.**, (2019), Computational Modelling of Strut Defects in SLM Manufactured Lattice Structures, *Materials and Design*, 171, 107671.
- [32] **Ghanem, R. G., Spanos, P. D.**, (1991), *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*.
- [33] **Webster, R., Oliver, M. A.**, (2008), *Geostatistics for Environmental Scientists: Second Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, England.
- [34] **Kim, N., Yang, C., Lee, H., Aluru, N. R.**, Spatial Uncertainty Modeling for Surface Roughness of Additively Manufactured Microstructures via Image Segmentation, *mdpi.com*.
- [35] **Lozanovski, B., Downing, D., Tran, P., Shidid, D., Qian, M., Choong, P., Brandt, M., Leary, M.**, (2020), A Monte Carlo Simulation-Based Approach to Realistic Modelling of Additively Manufactured Lattice Structures, *Additive Manufacturing*, 32, 101092.
- [36] **Uribe, F., Papaioannou, I., Betz, W., Straub, D.**, (2020), Bayesian Inference of Random Fields Represented with the Karhunen–Loève Expansion, *Computer*

Methods in Applied Mechanics and Engineering, 358, 112632.

- [37] **Sasikumar, P., Suresh, R., Vijayaghosh, P. K., Gupta, S.**, (2015), Experimental Characterisation of Random Field Models for CFRP Composite Panels, *Composite Structures*, 120, 451–471.
- [38] **Kumar, S.**, (2020), *Additive Manufacturing Processes*, Springer International Publishing.
- [39] **Habib, F. N., Iovenitti, P., Masood, S. H., Nikzad, M.**, (2018), Fabrication of Polymeric Lattice Structures for Optimum Energy Absorption Using Multi Jet Fusion Technology, *Materials and Design*, 155, 86–98.
- [40] **Kruth, J. P., Leu, M. C., Nakagawa, T.**, (1998), Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47(2), 525–540.
- [41] **Burns, M.**, (2018), Automated Fabrication: The Future of Manufacturing, *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, Laser Institute of America, 1–5.
- [42] (2010), Rapid Prototyping, Principles and Applications, *Assembly Automation*, 30(4).
- [43] **Masood, S. H.**, (2014), Advances in Fused Deposition Modeling, *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier Ltd, 69–91.
- [44] **Seppala, J. E., Kotula, A. P., Snyder, C. R., eds.**, (2019), *Polymer-Based Additive Manufacturing: Recent Developments*, American Chemical Society, Washington, DC.
- [45] **Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., Advincula, R. C.**, (2018), Mechanical Characterization of 3D-Printed Polymers, *Additive Manufacturing*, 20, 44–67.
- [46] **Bandyopadhyay, A., Panda, R. K., Janas, V. F., Agarwala, M. K., Danforth, S. C., Safari, A.**, (1997), Processing of Piezocomposites by Fused Deposition Technique, *Journal of the American Ceramic Society*, 80(6), 1366–1372.
- [47] **Gray IV, R. W., Baird, D. G., Bøhn, J. H.**, (1998), Effects of Processing Conditions on Short TLCP Fiber Reinforced FDM Parts, *Rapid Prototyping Journal*, 4(1), 14–25.
- [48] **Shofner, M. L., Lozano, K., Rodríguez-Macías, F. J., Barrera, E. V.**, (2003), Nanofiber-Reinforced Polymers Prepared by Fused Deposition Modeling, *Journal of Applied Polymer Science*, 89(11), 3081–3090.
- [49] **Bandyopadhyay, A., Das, K., Marusich, J., Onagoruwa, S.**, (2006), Application of Fused Deposition in Controlled Microstructure Metal-Ceramic Composites, *Rapid Prototyping Journal*, 12(3), 121–128.
- [50] **Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B.**, (2015), *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition*, Springer New York.
- [51] **Lee, J. Y., An, J., Chua, C. K.**, (2017), Fundamentals and Applications of 3D Printing for Novel Materials, *Applied Materials Today*, 7, 120–133.
- [52] **Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., Hui, D.**, (2017), 3D Printing of

Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective, *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458.

- [53] **De Leon, A. C., Chen, Q., Palaganas, N. B., Palaganas, J. O., Manapat, J., Advincula, R. C.**, (2016), High Performance Polymer Nanocomposites for Additive Manufacturing Applications, *Reactive and Functional Polymers*, 103, 141–155.
- [54] **Kumar, P., Schmidleithner, C., Larsen, N. B., Sigmund, O.**, (2021), Topology Optimization and 3D Printing of Large Deformation Compliant Mechanisms for Straining Biological Tissues, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63(3), 1351–1366.
- [55] **Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C.**, (2016), Additive Manufacturing of Metals, *Acta Materialia*, 117, 371–392.
- [56] **Kumar, S., Czekanski, A.**, (2017), Optimization of Parameters for SLS of WC-Co, *Rapid Prototyping Journal*, 23(6), 1202–1211.
- [57] **Körner, C.**, (2016), Additive Manufacturing of Metallic Components by Selective Electron Beam Melting - A Review, *International Materials Reviews*, 61(5), 361–377.
- [58] **Brown, R., Morgan, C. T., Majewski, C. E.**, *Not Just Nylon... Improving the Range of Materials for High Speed Sintering*.
- [59] **Enneti, R. K., Prough, K. C., Wolfe, T. A., Klein, A., Studley, N., Trasorras, J. L.**, (2018), Sintering of WC-12%Co Processed by Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Technology, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 71, 28–35.
- [60] **Fateri, M., Xiao, Z.**, (2014), *CERAMICS 3D PRINTING BY SELECTIVE INHIBITION SINTERING RegoLight View Project Moon Energy Storage and Generation (MESG) View Project*.
- [61] **Değerlendirme, S., Ağustos', R.**, *Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları*.
- [62] **Ahn, D., Kweon, J., Choi, J., Processing, S. L.-J. of M.**, 2012, **undefined**, Quantification of Surface Roughness of Parts Processed by Laminated Object Manufacturing, *Elsevier*.
- [63] **Bhate, D., Penick, C. A., Ferry, L. A., Lee, C.**, (2019), Classification and Selection of Cellular Materials in Mechanical Design: Engineering and Biomimetic Approaches, *Designs*, 3(1), 1–31.
- [64] **du Plessis, A., Broeckhoven, C., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., Hands, C. H., Kunju, R., Bhate, D.**, (2019), Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing, *Additive Manufacturing*, 27, 408–427.
- [65] **Gibson, L. J., Ashby, M. F.**, (2014), *Cellular Solids: Structure and Properties, Second Edition*, Cambridge University Press.
- [66] **Chavey, D.**, (1989), Tilings by Regular Polygons-II. A Catalog of Tilings, *Computers and Mathematics with Applications*, 17(1–3), 147–165.
- [67] **Jesper Møller, by, Stoyan, D., Bajers, F., Møller, J.**, (2007), Stochastic

Geometry and Random Tessellations, *Research Report Series*.

- [68] **Lieshout, M. N. M. va.**, (2012), An Introduction to Planar Random Tessellation Models, *Spatial Statistics*, 1, 40–49.
- [69] **Lei, H., Li, C., Meng, J., Zhou, H., Liu, Y., Zhang, X., Wang, P., Fang, D.**, (2019), Evaluation of Compressive Properties of SLM-Fabricated Multi-Layer Lattice Structures by Experimental Test and μ -CT-Based Finite Element Analysis, *Materials and Design*, 169.
- [70] **Schaedler, T. A., Jacobsen, A. J., Torrents, A., Sorensen, A. E., Lian, J., Greer, J. R., Valdevit, L., Carter, W. B.**, (2011), Ultralight Metallic Microlattices, *Science*, 334(6058), 962–965.
- [71] **Queheillalt, D. T., Wadley, H. N. G.**, (2005), Pyramidal Lattice Truss Structures with Hollow Trusses, *Materials Science and Engineering A*, 397(1–2), 132–137.
- [72] **Yusuf, S. M., Hoegden, M., Gao, N.**, (2020), Effect of Sample Orientation on the Microstructure and Microhardness of Additively Manufactured AlSi10Mg Processed by High-Pressure Torsion, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9–10), 4321–4337.
- [73] **Shen, Y., McKown, S., Tsopanos, S., Sutcliffe, C. J., Mines, R. A. W., Cantwell, W. J.**, (2010), The Mechanical Properties of Sandwich Structures Based on Metal Lattice Architectures, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 12(2), 159–180.
- [74] **Mazur, M., Leary, M., Sun, S., Vcelka, M., Shidid, D., Brandt, M.**, (2016), Deformation and Failure Behaviour of Ti-6Al-4V Lattice Structures Manufactured by Selective Laser Melting (SLM), *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5–8), 1391–1411.
- [75] **Leary, M., Maconachie, T., Sarker, A., Faruque, O., Brandt, M.**, (2019), Mechanical and Thermal Characterisation of AlSi10Mg SLM Block Support Structures, *Materials and Design*, 183, 1–15.
- [76] **Gorguluarslan, R. M.**, Multi-Objective Design Optimization of Additively Manufactured Lattice Structures for Improved Energy Absorption Performance.
- [77] **Rosen, D. W., Ruzzene, M., Choi, S.-K., Duty, C., Wang, Y.**, (2016), ESTIMATING MECHANICAL PROPERTIES OF CELLULAR SOLID MATERIALS FROM ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES, Georgia Institute of Technology.
- [78] **De Pasquale, G., Luceri, F., Riccio, M.**, (2019), Experimental Evaluation of Selective Laser Melting Process for Optimized Lattice Structures, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(4), 763–775.
- [79] **Beckmann, C., Hohe, J.**, (2014), Effects of Material Uncertainty in the Structural Response of Metal Foam Core Sandwich Beams, *Composite Structures*, 113(1), 382–395.
- [80] **Boschetto, A., Bottini, L., Veniali, F.**, (2016), Integration of FDM Surface Quality Modeling with Process Design, *Additive Manufacturing*, 12, 334–344.
- [81] **Hammett, C. I., Rinaldi, R. G., Zok, F. W.**, (2013), Pyramidal Lattice

Structures for High Strength and Energy Absorption, *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 80(4), 041015.

- [82] **Weißmann, V., Drescher, P., Bader, R., Seitz, H., Hansmann, H., Laufer, N.**, (2017), Comparison of Single Ti6Al4V Struts Made Using Selective Laser Melting and Electron Beam Melting Subject to Part Orientation, *Metals*, 7(3).
- [83] **Liu, W. K., Belytschko, T., Mani, A.**, (1986), Random Field Finite Elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 23(10), 1831–1845.
- [84] **Gungor, O. U., Gorguluarslan, R. M.**, (2020), Experimental Characterization of Spatial Variability for Random Field Modeling on Struts of Additively Manufactured Lattice Structures, *Additive Manufacturing*, 36, 101471.
- [85] **Matheron, G.**, (2012), Estimating and Choosing: An Essay on Probability in Practice.
- [86] **Schenk, C. A., Schuëller, G. I.**, (2005), Uncertainty Assessment of Large Finite Element Systems, *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, 24.
- [87] **Choi, S. K., Canfield, R. A., Grandhi, R. V.**, (2007), *Reliability-Based Structural Design*, Springer London.
- [88] **Richardson, M., Ayyub, B. M., McCuen, R. H.**, (1998), *Probability, Statistics, and Reliability for Engineers*.
- [89] **Mahadevan, S., Haldar, A.**, (1991), Practical Random Field Discretization in Stochastic Finite Element Analysis, *Structural Safety*, 9(4), 283–304.
- [90] **Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C.**, (2013), *Time Series Analysis: Forecasting and Control: Fourth Edition*.
- [91] **Lin, Y.-K.**, (1967), Probabilistic Theory of Structural Dynamics(Book on Probabilistic Theory of Structural Dynamics, Analyzing Responses of Structures to Random Vibrations), *New York, Mcgraw-Hill Book Co.*, 1967. 366 P.
- [92] **Center, P. A.-N. R. C.**, 1997, **undefined**, A Review of Gaussian Random Fields and Correlation Functions, *nr.no*.
- [93] **Noh, H. C., Park, T.**, (2011), Response Variability of Laminate Composite Plates Due to Spatially Random Material Parameter, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(29–32), 2397–2406.
- [94] **Sasikumar, P., Suresh, R., Gupta, S.**, (2014), Analysis of CFRP Laminated Plates with Spatially Varying Non-Gaussian Inhomogeneities Using SFEM, *Composite Structures*, 112(1), 308–326.
- [95] **Sriramula, S., Chryssanthopoulos, M. K.**, (2013), An Experimental Characterisation of Spatial Variability in GFRP Composite Panels, *Structural Safety*, 42, 1–11.
- [96] **Sasikumar, P., Venketeswaran, A., Suresh, R., Gupta, S.**, (2015), A Data Driven Polynomial Chaos Based Approach for Stochastic Analysis of CFRP Laminated Composite Plates, *Composite Structures*, 125, 212–227.
- [97] **Rahman, S., Xu, H.**, (2005), A Meshless Method for Computational Stochastic

- Mechanics, *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 6(1), 41–58.
- [98] **Li, C. C., Kiureghian, A. Der.** (1993), Optimal Discretization of Random Fields, *Journal of Engineering Mechanics*, 119(6), 1136–1154.
- [99] **Sudret, B., California, A. D. K.-U. of, Berkeley, U., 2000, U.**, Stochastic Finite Elements and Reliability: A State-of-the-Art Report.
- [100] **Mukherjee, D., Mahadevan, S.**, (1995), *Reliability-Based Structural Design*.
- [101] **Reddy, J. N.**, (2010), *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*, Oxford University Press.
- [102] **Ayyub, B. M., McCuen, R. H.**, (2016), *Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists*.
- [103] **Taylor, R.**, (1990), Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review, *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 6(1), 35–39.
- [104] **Devore, J. L.**, (1991), Probability and Statistics for Engineering and the Sciences., *Biometrics*, 47(4), 1638.
- [105] **Gorgularslan, R., Choi, S.-K.**, (2014), A SIMULATION-BASED UPSCALING TECHNIQUE FOR MULTISCALE MODELING OF ENGINEERING SYSTEMS UNDER UNCERTAINTY, *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 12(6), 549–566.
- [106] **Gaddum, J. H.**, (1945), Lognormal Distributions, *Nature*, 156(3964), 463–466.
- [107] **Stacy, E. W.**, (1962), A Generalization of the Gamma Distribution, *The Annals of Mathematical Statistics*, 33(3), 1187–1192.
- [108] **Azzalini, A., Dalla Valle, A.**, (1996), The Multivariate Skew-Normal Distribution, *Biometrika*, 83(4), 715–726.
- [109] **Lai, C. D., Xie, M., Murthy, D. N. P.**, (2003), A Modified Weibull Distribution, *IEEE Transactions on Reliability*, 52(1), 33–37.
- [110] **Hosking, J. R. M., Wallis, J. R., Wood, E. F.**, (1985), Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments, *Technometrics*, 27(3), 251–261.
- [111] **Sasikumar, P., Suresh, R., Gupta, S.**, (2015), Stochastic Model Order Reduction in Uncertainty Quantification of Composite Structures, *Composite Structures*, 128, 21–34.
- [112] **Everett, R. K., Duffy, M. E., Storck, S. M., Zupan, M.**, (2020), A Variogram Analysis of Build Height Effects in an Additively Manufactured AlSi10Mg Part, *Additive Manufacturing*, 35, 101306.



EKLER

Çizelge Ek. 1. $D_m=1,2-4$ mm çubuk elemanların yarıçap değişkenleri için istatistiksel sonuçlar

$D_m=1,2$							
Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	normal	0,6802	0,0617	0,6802	0,0420
	r_{2l}	45x3	weibull	0,622	0,0580	0,7104	20,1449
	r_{3l}	45x3	weibull	0,6492	0,0577	0,6659	20,5634
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,6777	0,0660	-0,3937	0,0967
	r_{1s}	30x3	weibull	0,6334	0,07168	0,6535	15,9158
	r_{2s}	30x3	weibull	0,6522	0,0451	0,6728	16,704
	r_{3s}	30x3	normal	0,6076	0,0379	0,6243	19,6188
	r_{4s}	30x3	weibull	0,6393	0,0871	-0,4509	0,086
75°	r_{1l}	45x3	weibull	0,7261	0,1162	0,7630	10,0753
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,5797	0,0725	-0,5479	0,0711
	r_{3l}	45x3	normal	0,6080	0,1070	0,6080	0,0650
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,6502	0,1356	-0,4395	0,1354
	r_{1s}	30x3	weibull	0,6977	0,1261	0,7357	9,4704
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,5376	0,0746	-0,6234	0,0736

	r_{3s}	30x3	lognormal	0,5980	0,1188	-0,5211	0,1181
	r_{4s}	30x3	lognormal	0,6287	0,1571	-0,4761	0,1545
60°	r_{1l}	45x3	lognormal	0,8162	0,1084	-0,2088	0,1066
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,6784	0,0796	-0,3910	0,0783
	r_{3l}	45x3	weibull	0,7509	0,0943	0,7825	12,2249
	r_{4l}	45x3	weibull	0,6726	0,0898	0,6996	12,8306
	r_{1s}	30x3	gamma	0,7816	0,1128	78,9546	0,0099
	r_{2s}	30x3	normal	0,6684	0,0745	0,6684	0,0498
	r_{3s}	30x3	normal	0,7736	0,0956	0,7736	0,0739
	r_{4s}	30x3	normal	0,6703	0,0931	0,6703	0,0624
45°	r_{1l}	45x3	normal	0,9690	0,0681	0,9690	0,0660
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,6455	0,1222	-0,4446	0,1159
	r_{3l}	45x3	weibull	0,9962	0,1386	1,0523	9,9820
	r_{4l}	45x3	weibull	0,7671	0,0685	0,7887	19,5846
	r_{1s}	30x3	normal	0,8990	0,0845	0,8990	0,0759
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,6250	0,1407	-0,4790	0,1317
	r_{3s}	30x3	weibull	0,9715	0,1040	1,0130	13,1617
	r_{4s}	30x3	weibull	0,7366	0,0815	0,7607	16,3613
30°	r_{1l}	45x3	lognormal	1,4719	0,1289	0,3786	0,1264

	r_{2l}	45x3	normal	0,6514	0,0758	0,6514	0,0494
	r_{3l}	45x3	lognormal	1,4762	0,1935	0,3711	0,1934
	r_{4l}	45x3	normal	0,6772	0,1081	0,6772	0,0732
	r_{1s}	30x3	lognormal	1,3799	0,1453	0,3120	0,1408
	r_{2s}	30x3	gamma	0,6302	0,0796	159,563	0,0039
	r_{3s}	30x3	lognormal	1,3582	0,1991	0,2868	0,1983
	r_{4s}	30x3	normal	0,6421	0,1079	0,6421	0,0693
15°	r_{1l}	45x3	weibull	2,3025	0,1022	2,4008	13,3979
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,6126	0,0807	-0,4931	0,0798
	r_{3l}	45x3	weibull	2,3800	0,1520	2,5269	7,7847
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,5510	0,0937	-0,6003	0,0923
	r_{1s}	30x3	weibull	2,0644	0,0918	2,1470	13,2433
	r_{2s}	30x3	normal	0,5613	0,0849	0,5613	0,0477
	r_{3s}	30x3	lognormal	2,4096	0,1626	0,8669	0,1604
	r_{4s}	30x3	gamma	0,5148	0,0858	139,859	0,0037
0°	r_1	45x3	normal	0,7387	0,0649	0,7387	0,0480
	r_2	45x3	lognormal	0,6634	0,0884	-0,4140	0,0842
	r_3	45x3	lognormal	1,0186	0,2125	-0,0038	0,2107
	r_4	45x3	lognorma	0,6391	0,0803	-0,4509	0,0797

$D_m=1,4$							
Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	normal	0,7328	0,0457	0,7328	0,0335
	r_{2l}	45x3	weibull	0,7186	0,0553	0,7362	22,6386
	r_{3l}	45x3	weibull	0,7263	0,0503	0,7429	22,9757
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,6962	0,0656	-0,3643	0,0650
	r_{1s}	30x3	normal	0,6885	0,0538	0,6885	0,0370
	r_{2s}	30x3	weibull	0,6685	0,0582	0,6859	20,7054
	r_{3s}	30x3	normal	0,6711	0,0503	0,6711	0,0337
	r_{4s}	30x3	lognormal	0,6538	0,0732	-0,4275	0,0727
75°	r_{1l}	45x3	normal	0,7385	0,0495	0,7385	0,0365
	r_{2l}	45x3	normal	0,7376	0,0531	0,7376	0,0392
	r_{3l}	45x3	lognormal	0,7024	0,0453	-0,3542	0,0451
	r_{4l}	45x3	normal	0,7171	0,0425	0,7171	0,0305
	r_{1s}	30x3	normal	0,6906	0,0486	0,6906	0,0336
	r_{2s}	30x3	gamma	0,6776	0,0639	246,586	0,0027
	r_{3s}	30x3	gamma	0,6607	0,0590	2,243	0,0023
	r_{4s}	30x3	normal	0,6725	0,0413	0,6725	0,0278
60°	r_{1l}	45x3	lognormal	0,8233	0,1135	-0,2008	0,1129

	r_{2l}	45x3	weibull	0,6895	0,0596	0,7080	19,9635
	r_{3l}	45x3	weibull	0,8487	0,0606	0,8711	19,6641
	r_{4l}	45x3	weibull	0,7251	0,0805	0,7505	15,3621
	r_{1s}	30x3	normal	0,7870	0,1073	0,7870	0,0844
	r_{2s}	30x3	weibull	0,6773	0,0623	0,6957	20,5877
	r_{3s}	30x3	weibull	0,8322	0,0779	0,8609	15,5591
	r_{4s}	30x3	weibull	0,7056	0,0843	0,7309	15,2373
45°	r_{1l}	45x3	lognormal	0,9744	0,1247	-0,0336	0,1237
	r_{2l}	45x3	weibull	0,6973	0,1182	0,7333	9,9104
	r_{3l}	45x3	normal	1,0732	0,0662	1,0732	0,0710
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,7674	0,0900	-0,2687	0,0898
	r_{1s}	30x3	lognormal	0,9028	0,1333	-0,1110	0,1328
	r_{2s}	30x3	gamma	0,6801	0,0871	132,762	0,0051
	r_{3s}	30x3	normal	1,0423	0,0807	1,0423	0,0841
30°	r_{4s}	30x3	gamma	0,7590	0,0771	170,000	0,0045
	r_{1l}	45x3	normal	1,4423	0,1118	1,4423	0,1612
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,6745	0,0984	-0,3982	0,0928
	r_{3l}	45x3	lognormal	1,5141	0,3910	0,3798	0,2290
	r_{4l}	45x3	normal	0,7714	0,1624	0,7714	0,1253

	r_{1s}	30x3	gamma	1,3489	0,1511	44,0593	0,0306
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,6569	0,0829	-0,423	0,0812
	r_{3s}	30x3	gamma	1,4565	0,1815	30,2377	0,0482
	r_{4s}	30x3	gamma	0,7155	0,1437	48,6079	0,0147
15°	r_{1l}	45x3	lognormal	2,7771	0,0718	1,0190	0,0706
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,7233	0,0678	-0,3261	0,0666
	r_{3l}	45x3	normal	2,3814	0,1679	2,3814	0,3998
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,6751	0,0891	-0,3967	0,0870
	r_{1s}	30x3	lognormal	2,6307	0,1187	0,9605	0,1167
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,6881	0,0708	-0,3762	0,0700
	r_{3s}	30x3	gamma	2,4782	0,1348	55,9930	0,0443
	r_{4s}	30x3	lognormal	0,6539	0,0925	-0,4288	0,0893
0°	r_1	45x3	weibull	0,8587	0,1461	0,9106	9,3817
	r_2	45x3	lognormal	0,7079	0,0643	-0,3475	0,0632
	r_3	45x3	weibull	1,0487	0,1207	1,1010	10,3418
	r_4	45x3	weibull	0,7001	0,0912	0,7287	12,6460

$D_m=1,6$							
Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	lognormal	0,8075	0,0592	-0,2155	0,0582
	r_{2l}	45x3	normal	0,8241	0,0425	0,8241	0,0350
	r_{3l}	45x3	normal	0,8228	0,0630	0,8228	0,0519
	r_{4l}	45x3	gamma	0,8291	0,0483	432,689	0,0019
	r_{1s}	30x3	lognormal	0,7591	0,0520	-0,2770	0,0519
	r_{2s}	30x3	normal	0,7670	0,0403	0,7670	0,0309
	r_{3s}	30x3	weibull	0,7779	0,0582	0,7985	20,3786
	r_{4s}	30x3	normal	0,7760	0,0472	0,7760	0,0366
75°	r_{1l}	45x3	weibull	0,8352	0,0615	0,8582	18,7972
	r_{2l}	45x3	normal	0,8173	0,0603	0,8173	0,0493
	r_{3l}	45x3	weibull	0,8286	0,0743	0,8545	18,2454
	r_{4l}	45x3	normal	0,8236	0,0453	0,8236	0,0373
	r_{1s}	30x3	normal	0,8095	0,0600	0,8095	0,0486
	r_{2s}	30x3	normal	0,7667	0,0594	0,7667	0,0456
	r_{3s}	30x3	weibull	0,8102	0,0606	0,8320	20,2609
	r_{4s}	30x3	normal	0,7844	0,0438	0,7844	0,0344
60°	r_{1l}	45x3	normal	0,8877	0,0605	0,8877	0,053

	r_{2l}	45x3	weibull	0,6738	0,2001	0,7279	6,4709
	r_{3l}	45x3	normal	0,9214	0,0662	0,9214	0,0610
	r_{4l}	45x3	weibull	0,7288	0,1558	0,7765	7,9955
	r_{1s}	30x3	weibull	0,8361	0,0652	0,8609	17,7827
	r_{2s}	30x3	weibull	0,6731	0,2024	0,7276	6,4124
	r_{3s}	30x3	normal	0,8830	0,0716	0,8830	0,0632
	r_{4s}	30x3	weibull	0,7156	0,1709	0,7662	7,3882
45°	r_{1l}	45x3	gamma	1,2007	0,0905	123,451	0,0097
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,8414	0,1271	-0,1802	0,1213
	r_{3l}	45x3	weibull	1,2269	0,0901	1,2745	13,4500
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,9301	0,0538	-0,0739	0,0530
	r_{1s}	30x3	normal	1,1412	0,0900	1,1412	0,1027
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,8115	0,1329	-0,2171	0,1265
	r_{3s}	30x3	weibull	1,2183	0,0756	1,2585	16,3943
	r_{4s}	30x3	normal	0,8906	0,0646	0,8906	0,0575
30°	r_{1l}	45x3	normal	1,3934	0,1436	1,3934	0,2002
	r_{2l}	45x3	gamma	0,7218	0,1835	29,8098	0,0242
	r_{3l}	45x3	weibull	1,5345	0,1303	1,6174	8,9697

	r_{4l}	45x3	weibull	0,6934	0,1879	0,7469	6,3022
	r_{1s}	30x3	gamma	1,2853	0,1441	48,4883	0,0265
	r_{2s}	30x3	gamma	0,7029	0,1911	27,1499	0,0259
	r_{3s}	30x3	weibull	1,5569	0,1284	1,6397	9,7708
	r_{4s}	30x3	weibull	0,6624	0,1783	0,7106	6,8626
15°	r_{1l}	45x3	gamma	3,2636	0,0748	183,854	0,0178
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,8161	0,0528	-0,2046	0,0523
	r_{3l}	45x3	lognormal	3,1770	0,1222	1,1487	0,1216
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,8152	0,0736	-0,2070	0,0735
	r_{1s}	30x3	lognormal	3,1813	0,0965	1,1523	0,0946
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,7907	0,0510	-0,2361	0,0506
	r_{3s}	30x3	normal	3,0989	0,1000	3,0989	0,3098
	r_{4s}	30x3	lognormal	0,7927	0,0789	-0,2353	0,0786
0°	r_1	45x3	weibull	0,9383	0,0502	0,9601	22,8356
	r_2	45x3	lognormal	0,7927	0,0404	-0,2331	0,0400
	r_3	45x3	weibull	1,1512	0,1183	1,2108	9,7274
	r_4	45x3	lognormal	0,8063	0,0564	-0,2168	0,0550

$D_m=1,8 \text{ mm}$							
Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	weibull	0,9155	0,0974	0,9553	12,2465
	r_{2l}	45x3	normal	0,9360	0,0518	0,9360	0,0485
	r_{3l}	45x3	normal	0,9219	0,0488	0,9219	0,0450
	r_{4l}	45x3	normal	0,8877	0,0431	0,8778	0,0383
	r_{1s}	30x3	normal	0,8756	0,0951	0,8756	0,0833
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,8715	0,0634	-0,1395	0,0625
	r_{3s}	30x3	weibull	0,8743	0,0517	0,8951	22,8084
	r_{4s}	30x3	normal	0,8385	0,0466	0,8385	0,0391
75°	r_{1l}	45x3	lognormal	0,8816	0,0470	-0,1271	0,0468
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,8675	0,0484	-0,1433	0,0483
	r_{3l}	45x3	weibull	0,9080	0,0456	0,9263	27,0436
	r_{4l}	45x3	normal	0,8233	0,0504	0,8233	0,0415
	r_{1s}	30x3	lognormal	0,8180	0,0457	-0,2019	0,0457
	r_{2s}	30x3	normal	0,9384	0,0496	0,9384	0,0466
	r_{3s}	30x3	weibull	0,8595	0,0496	0,8787	24,2372
	r_{4s}	30x3	weibull	0,9022	0,0475	0,9218	25,5377
60°	r_{1l}	45x3	normal	1,0410	0,0423	1,0410	0,0441

	r_{2l}	45x3	normal	0,8106	0,0585	0,8106	0,0474
	r_{3l}	45x3	lognormal	0,9366	0,0898	-0,0694	0,0881
	r_{4l}	45x3	normal	0,9380	0,0339	0,9380	0,0318
	r_{1s}	30x3	normal	0,9838	0,0534	0,9838	0,0525
	r_{2s}	30x3	weibull	0,8125	0,0395	0,8272	29,8684
	r_{3s}	30x3	lognormal	0,8862	0,0894	-0,1247	0,0884
	r_{4s}	30x3	weibull	0,9309	0,0545	0,9516	24,5791
45°	r_{1l}	45x3	weibull	1,2374	0,0761	1,2777	17,5465
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,8723	0,0615	-0,1385	0,0608
	r_{3l}	45x3	weibull	1,2188	0,0705	1,2570	17,0614
	r_{4l}	45x3	normal	0,9613	0,0587	0,9613	0,0565
	r_{1s}	30x3	weibull	1,1710	0,0810	1,2118	15,4969
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,8449	0,0570	-0,1701	0,0563
	r_{3s}	30x3	gamma	1,1982	0,0668	226,428	0,0053
30°	r_{4s}	30x3	normal	0,9307	0,0603	0,9307	0,0562
	r_{1l}	45x3	weibull	1,5770	0,0975	1,6451	12,1510
	r_{2l}	45x3	gamma	0,8873	0,0689	213,124	0,0042
	r_{3l}	45x3	weibull	1,6528	0,1269	1,7438	9,4433
	r_{4l}	45x3	lognormal	0,9478	0,0869	-0,0572	0,0859

	r_{1s}	30x3	normal	1.4869	0.0962	1.4869	0.1431
	r_{2s}	30x3	weibull	0.8862	0.0632	0.9111	18.5173
	r_{3s}	30x3	weibull	1.6209	0.1153	1.6997	11.2308
	r_{4s}	30x3	normal	0.9356	0.0728	0.9356	0.0681
15°	r_{1l}	45x3	lognormal	3.5993	0.0703	1.2784	0.0703
	r_{2l}	45x3	normal	0.9523	0.0671	0.9523	0.0639
	r_{3l}	45x3	lognormal	3.7940	0.1318	1.3252	0.1295
	r_{4l}	45x3	gamma	0.9275	0.0535	359.284	0.0026
	r_{1s}	30x3	normal	3.5116	0.0684	1.2538	0.0679
	r_{2s}	30x3	lognormal	0.9144	0.0701	0.9144	0.0641
	r_{3s}	30x3	lognormal	3.6417	0.1552	1.2802	0.153
	r_{4s}	30x3	weibull	0.8955	0.0505	0.9161	24.4336
0°	r_1	45x3	normal	0.8860	0.0433	0.8860	0.0383
	r_2	45x3	lognormal	0.8270	0.0489	-0.1911	0.0472
	r_3	45x3	weibull	1.1357	0.0948	1.1821	13.4158
	r_4	45x3	lognormal	0.8298	0.0355	-0.1872	0.0352

$D_m=2$ mm							
Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	weibull	0,9761	0,0422	0,9948	27,6073
	r_{2l}	45x3	weibull	1,0265	0,0664	1,0576	17,9353
	r_{3l}	45x3	normal	0,9444	0,0502	0,9444	0,0474
	r_{4l}	45x3	normal	0,9526	0,0494	0,9526	0,0471
	r_{1s}	30x3	normal	0,9178	0,0462	0,9178	0,0424
	r_{2s}	30x3	weibull	0,9722	0,0714	1,0034	17,5665
	r_{3s}	30x3	normal	0,8975	0,0505	0,8975	0,0453
	r_{4s}	30x3	normal	0,9043	0,0473	0,9043	0,0428
75°	r_{1l}	45x3	lognormal	0,9838	0,0645	-0,0184	0,0634
	r_{2l}	45x3	normal	1,0569	0,0507	1,0569	0,0536
	r_{3l}	45x3	lognormal	1,0067	0,0520	0,0054	0,0517
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,0168	0,0567	0,0151	0,0555
	r_{1s}	30x3	lognormal	0,9398	0,0640	-0,0641	0,0631
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,0213	0,0456	0,0200	0,0456
	r_{3s}	30x3	lognormal	0,9655	0,0544	-0,0365	0,0542
	r_{4s}	30x3	lognormal	0,9875	0,0531	-0,0140	0,0524

60°	r_{1l}	45x3	weibull	1,2143	0,0591	1,2457	21,4855
	r_{2l}	45x3	lognormal	1,0687	0,0483	0,0653	0,0478
	r_{3l}	45x3	normal	1,1703	0,0681	1,1703	0,0797
	r_{4l}	45x3	weibull	1,0718	0,0593	1,1009	19,6469
	r_{1s}	30x3	normal	1,1598	0,0536	1,1598	0,0622
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,0686	0,0530	0,0650	0,0525
	r_{3s}	30x3	normal	1,1256	0,0614	1,1256	0,0691
	r_{4s}	30x3	normal	1,0671	0,0619	1,0671	0,0660
45°	r_{1l}	45x3	weibull	1,2990	0,1058	1,3581	11,6613
	r_{2l}	45x3	weibull	0,9938	0,1365	1,0503	9,7098
	r_{3l}	45x3	weibull	1,4007	0,1422	1,4850	8,1484
	r_{4l}	45x3	weibull	0,9928	0,0919	1,0339	12,6457
	r_{1s}	30x3	weibull	1,2598	0,1149	1,3193	12,3307
	r_{2s}	30x3	weibull	0,9532	0,1359	1,0074	9,6814
	r_{3s}	30x3	normal	1,4165	0,1063	1,4165	0,1506
	r_{4s}	30x3	weibull	0,9568	0,0918	0,9956	13,3814
30°	r_{1l}	45x3	lognormal	2,1275	0,0759	0,7521	0,0755
	r_{2l}	45x3	lognormal	0,9925	0,0725	-0,0100	0,0699
	r_{3l}	45x3	normal	1,9723	0,1079	1,9723	0,2128

	r_{4l}	45x3	weibull	1,1762	0,0957	1,2234	14,0822
	r_{1s}	30x3	normal	2,0226	0,1428	2,0226	0,2889
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,9496	0,0806	-0,0547	0,0767
	r_{3s}	30x3	lognormal	1,9345	0,1058	0,6544	0,1045
	r_{4s}	30x3	weibull	1,1323	0,1109	1,1849	11,9749
15°	r_{1l}	45x3	normal	4,0348	0,0722	4,0348	0,2912
	r_{2l}	45x3	lognormal	1,0115	0,0680	0,0092	0,0677
	r_{3l}	45x3	weibull	4,1278	0,0687	4,2562	17,3038
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,0237	0,0803	0,0204	0,0792
	r_{1s}	30x3	lognormal	3,8470	0,1106	1,3414	0,1096
	r_{2s}	30x3	lognormal	0,9863	0,0646	-0,015	0,0641
	r_{3s}	30x3	normal	4,0909	0,0998	4,0909	0,4083
	r_{4s}	30x3	lognormal	0,9985	0,0696	-0,0039	0,0693
0°	r_1	45x3	lognormal	1,0777	0,0355	0,0742	0,0351
	r_2	45x3	lognormal	1,0413	0,0473	0,0394	0,0458
	r_3	45x3	weibull	1,1949	0,0607	1,2270	20,5142
	r_4	45x3	lognormal	1,0474	0,0349	0,0457	0,0344

$D_m=2.5$ mm							
Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	lognormal	1,2795	0,0486	0,2453	0,0481
	r_{2l}	45x3	weibull	1,3063	0,0557	1,3396	20,8386
	r_{3l}	45x3	weibull	1,2893	0,0440	1,3138	27,5196
	r_{4l}	45x3	weibull	1,2912	0,0689	1,3301	18,7820
	r_{1s}	30x3	lognormal	1,2379	0,0512	0,2121	0,0509
	r_{2s}	30x3	weibull	1,2511	0,0594	1,2841	20,9664
	r_{3s}	30x3	weibull	1,2481	0,0471	1,2733	27,4242
	r_{4s}	30x3	weibull	1,2493	0,0728	1,2888	18,3724
75°	r_{1l}	45x3	normal	1,3817	0,0390	1,3817	0,0539
	r_{2l}	45x3	lognormal	1,3546	0,0280	0,3031	0,0280
	r_{3l}	45x3	normal	1,3158	0,0219	1,3158	0,0288
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,3467	0,0492	0,2965	0,0484
	r_{1s}	30x3	normal	1,3334	0,0383	1,3334	0,0511
	r_{2s}	30x3	normal	1,3358	0,0316	1,3358	0,0422
	r_{3s}	30x3	normal	1,2790	0,0232	1,2790	0,0296
	r_{4s}	30x3	lognormal	1,3306	0,0467	0,2846	0,0465
60°	r_{1l}	45x3	weibull	1,4297	0,1089	1,4968	10,4458

	r_{2l}	45x3	lognormal	1,3470	0,0735	0,2953	0,0731
	r_{3l}	45x3	weibull	1,3010	0,0645	1,3348	20,1494
	r_{4l}	45x3	weibull	1,3302	0,0902	1,3835	13,3337
	r_{1s}	30x3	weibull	1,4485	0,1045	1,5092	12,3625
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,3411	0,0766	0,2906	0,0760
	r_{3s}	30x3	weibull	1,3165	0,0574	1,3457	23,9468
	r_{4s}	30x3	weibull	1,3202	0,0902	1,3732	13,0233
45°	r_{1l}	45x3	weibull	1,7007	0,0828	1,7586	16,4964
	r_{2l}	45x3	lognormal	1,2963	0,1173	0,2530	0,1141
	r_{3l}	45x3	weibull	1,7899	0,0760	1,8504	16,0798
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,4047	0,0709	0,3374	0,0703
	r_{1s}	30x3	weibull	1,6366	0,0708	1,6876	17,4266
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,2644	0,1093	0,2289	0,1063
	r_{3s}	30x3	gamma	1,8016	0,0905	123,250	0,0146
30°	r_{1l}	45x3	normal	2,1005	0,0630	2,1005	0,1323
	r_{2l}	45x3	lognormal	1,3092	0,0434	0,2685	0,0428
	r_{3l}	45x3	weibull	2,5531	0,1079	2,6676	12,1528
	r_{4l}	45x3	weibull	1,3838	0,0629	1,4228	19,7568

	r_{1s}	30x3	lognormal	1,9894	0,0700	0,6854	0,0695
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,2680	0,0460	0,2364	0,0453
	r_{3s}	30x3	weibull	2,4645	0,1038	2,5718	12,1639
	r_{4s}	30x3	weibull	1,3260	0,0648	1,3653	18,1774
15°	r_{1l}	45x3	lognormal	4,7466	0,1276	1,5506	0,1139
	r_{2l}	45x3	lognormal	1,2899	0,0429	0,2537	0,0423
	r_{3l}	45x3	lognormal	5,2501	0,072	1,6557	0,0720
	r_{4l}	45x3	gamma	1,2842	0,0489	429,789	0,0030
	r_{1s}	30x3	lognormal	4,7185	0,1242	1,5447	0,1157
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,2675	0,0474	0,236	0,0468
	r_{3s}	30x3	normal	5,2910	0,0734	5,2910	0,3882
	r_{4s}	30x3	normal	1,2562	0,0549	1,2562	0,0690
0°	r_1	45x3	weibull	1,4468	0,0269	1,4648	44,3892
	r_2	45x3	lognormal	1,3147	0,0188	0,2734	0,0186
	r_3	45x3	gamma	1,6166	0,0726	189,334	0,0085
	r_4	45x3	lognormal	1,3299	0,0223	0,2849	0,0220

$D_m=3$ mm							
Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	normal	1,5900	0,0391	1,5900	0,0621
	r_{2l}	45x3	weibull	1,6081	0,0266	1,6277	45,1531
	r_{3l}	45x3	normal	1,5871	0,0274	1,5871	0,0435
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,5761	0,0236	0,4547	0,0235
	r_{1s}	30x3	normal	1,5433	0,0413	1,5433	0,0638
	r_{2s}	30x3	weibull	1,5592	0,0251	1,5775	46,4529
	r_{3s}	30x3	normal	1,5499	0,0270	1,5499	0,0419
	r_{4s}	30x3	lognormal	1,5336	0,0254	0,4273	0,0251
75°	r_{1l}	45x3	normal	1,6474	0,0623	1,6474	0,1027
	r_{2l}	45x3	weibull	1,6181	0,0212	1,6338	55,2245
	r_{3l}	45x3	weibull	1,5238	0,0636	1,5678	18,3745
	r_{4l}	45x3	normal	1,6275	0,0189	1,6275	0,0308
	r_{1s}	30x3	normal	1,6005	0,0646	1,6005	0,1034
	r_{2s}	30x3	weibull	1,5808	0,0202	1,5952	60,6155
	r_{3s}	30x3	normal	1,4966	0,0631	1,4966	0,0945
	r_{4s}	30x3	normal	1,5975	0,0180	1,5975	0,0288
60°	r_{1l}	45x3	weibull	1,7247	0,0499	1,7644	22,8907

	r_{2l}	45x3	lognormal	1,5395	0,0488	0,4303	0,0483
	r_{3l}	45x3	weibull	1,7388	0,0531	1,7806	22,5842
	r_{4l}	45x3	normal	1,5605	0,0434	1,5605	0,0678
	r_{1s}	30x3	weibull	1,6739	0,0505	1,7128	22,8036
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,5356	0,0510	0,4276	0,0502
	r_{3s}	30x3	weibull	1,6987	0,0485	1,7361	24,7682
	r_{4s}	30x3	normal	1,5403	0,0430	1,5403	0,0662
45°	r_{1l}	45x3	weibull	2,0112	0,0688	2,0703	18,8099
	r_{2l}	45x3	lognormal	1,4931	0,0431	0,4000	0,0430
	r_{3l}	45x3	weibull	2,2682	0,0857	2,3526	14,7430
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,6976	0,0384	0,5285	0,0383
	r_{1s}	30x3	weibull	1,9233	0,0731	1,9846	16,4945
	r_{2s}	30x3	weibull	1,4770	0,0414	1,5056	28,1756
	r_{3s}	30x3	weibull	2,2122	0,0875	2,2971	14,0438
30°	r_{4s}	30x3	normal	1,6779	0,0394	1,6779	0,0661
	r_{1l}	45x3	normal	2,9098	0,0598	2,9098	0,1740
	r_{2l}	45x3	lognormal	1,5504	0,0394	0,4377	0,0394
	r_{3l}	45x3	normal	2,6385	0,0905	2,6385	0,2387
	r_{4l}	45x3	weibull	1,6108	0,0517	1,6478	24,1559

	r_{1s}	30x3	weibull	2,7726	0,0615	2,8500	18,5932
	r_{2s}	30x3	normal	1,5270	0,0414	1,570	0,0632
	r_{3s}	30x3	lognormal	2,6209	0,0944	0,9592	0,0938
	r_{4s}	30x3	weibull	1,5750	0,0484	1,6090	25,9268
15°	r_{1l}	45x3	lognormal	5,9398	0,0613	1,7799	0,0604
	r_{2l}	45x3	gamma	1,5641	0,0210	2332,58	0,0007
	r_{3l}	45x3	gamma	6,3324	0,1019	98,3669	0,0644
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,5846	0,0383	0,4597	0,0380
	r_{1s}	30x3	lognormal	5,8278	0,0669	1,7605	0,0668
	r_{2s}	30x3	gamma	1,5417	0,0209	2354,54	0,000
	r_{3s}	30x3	weibull	6,1882	0,0928	6,4425	12,8371
	r_{4s}	30x3	lognormal	1,5682	0,0423	0,4490	0,0420
0°	r_1	45x3	lognormal	1,5713	0,0482	0,4508	0,0480
	r_2	45x3	lognormal	1,5991	0,0346	0,4688	0,0344
	r_3	45x3	weibull	1,8588	0,0571	1,9014	25,7426
	r_4	45x3	normal	1,6290	0,0321	1,6290	0,0523

Dm=3,5 mm							
Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	normal	1,8980	0,0247	1,8980	0,0468
	r_{2l}	45x3	normal	1,8701	0,0149	1,8701	0,0279
	r_{3l}	45x3	normal	1,8469	0,0195	1,8469	0,0361
	r_{4l}	45x3	normal	1,8515	0,0130	1,8515	0,0241
	r_{1s}	30x3	normal	1,8388	0,0264	1,8388	0,0486
	r_{2s}	30x3	normal	1,8146	0,0139	1,8146	0,0252
	r_{3s}	30x3	weibull	1,8055	0,0189	1,8214	59,7463
	r_{4s}	30x3	normal	1,8109	0,0132	1,8109	0,0238
75°	r_{1l}	45x3	weibull	1,9437	0,0271	1,9650	55,7121
	r_{2l}	45x3	lognormal	1,9196	0,0260	0,6518	0,0257
	r_{3l}	45x3	lognormal	1,8358	0,0317	0,6070	0,0316
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,9182	0,0217	0,6512	0,0215
	r_{1s}	30x3	weibull	1,9017	0,0298	1,9252	49,4486
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,8798	0,0251	0,6309	0,0248
	r_{3s}	30x3	normal	1,8074	0,0316	1,8074	0,0572
	r_{4s}	30x3	lognormal	1,8868	0,0201	0,6347	0,0199
60°	r_{1l}	45x3	lognormal	2,0348	0,0615	0,7086	0,0613

	r_{2l}	45x3	lognormal	1,8468	0,0401	0,6127	0,0400
	r_{3l}	45x3	lognormal	2,0339	0,0613	0,7081	0,0609
	r_{4l}	45x3	gamma	1,8378	0,0370	738,887	0,0025
	r_{1s}	30x3	lognormal	1,9855	0,0587	0,6842	0,0578
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,8491	0,0417	0,6138	0,0416
	r_{3s}	30x3	lognormal	1,9969	0,0596	0,6899	0,0591
	r_{4s}	30x3	normal	1,8365	0,0409	1,8365	0,0750
45°	r_{1l}	45x3	lognormal	2,4256	0,2050	0,8746	0,1342
	r_{2l}	45x3	weibull	1,7799	0,0412	1,8138	28,0317
	r_{3l}	45x3	weibull	2,6878	0,0919	2,7947	13,4350
	r_{4l}	45x3	normal	1,9712	0,0488	1,9712	0,0963
	r_{1s}	30x3	lognormal	2,3252	0,2143	0,8316	0,1373
	r_{2s}	30x3	normal	1,7794	0,0345	1,7794	0,0613
	r_{3s}	30x3	weibull	2,6699	0,0907	2,7706	14,8817
30°	r_{4s}	30x3	weibull	1,9752	0,0538	2,0228	22,0064
	r_{1l}	45x3	lognormal	3,4274	0,0599	1,2300	0,0593
	r_{2l}	45x3	normal	1,8358	0,0395	1,8358	0,0725
	r_{3l}	45x3	normal	3,4468	0,0661	3,4468	0,2280
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,8156	0,0397	0,5956	0,0396

	r_{1s}	30x3	lognormal	3,3047	0,0595	1,1936	0,0586
	r_{2s}	30x3	normal	1,8315	0,0415	1,8315	0,0759
	r_{3s}	30x3	normal	3,3452	0,0683	3,3452	0,2284
	r_{4s}	30x3	gamma	1,8115	66,4015 8	664,715 0,0027	0,0027
15°	r_{1l}	45x3	lognormal	6,8661	0,0364	1,9260	0,0362
	r_{2l}	45x3	normal	1,8703	0,0170	1,8703	0,0317
	r_{3l}	45x3	gamma	6,9554	0,0956	112,356	0,0619
	r_{4l}	45x3	lognormal	1,8851	0,0335	0,6334	0,0330
	r_{1s}	30x3	lognormal	6,6122	0,0390	1,8882	0,0388
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,8459	0,0188	0,612	0,018
	r_{3s}	30x3	lognormal	6,8553	0,0978	1,9204	0,0972
	r_{4s}	30x3	lognormal	1,8643	0,0307	0,6225	0,0302
0°	r_1	45x3	weibull	1,9990	0,0314	2,0280	37,3234
	r_2	45x3	lognormal	1,8419	0,0228	0,6105	0,0227
	r_3	45x3	weibull	2,2367	0,0586	2,2967	20,0270
	r_4	45x3	lognormal	1,8261	0,0243	0,6019	0,0242

$D_m=4$ mm							
Açı	Değişken	Deneysel Veri Sayısı	ODF	Ort.	Varyasyon Katsayısı	Model Parametreleri	
90°	r_{1l}	45x3	weibull	2,0787	0,0679	2,1410	19,9671
	r_{2l}	45x3	weibull	2,0576	0,0836	2,1319	16,3695
	r_{3l}	45x3	weibull	2,0385	0,0697	2,1006	20,0147
	r_{4l}	45x3	weibull	2,0174	0,0470	2,0609	26,2096
	r_{1s}	30x3	weibull	2,0315	0,0705	2,0946	19,0991
	r_{2s}	30x3	weibull	2,0046	0,0856	2,0784	16,0547
	r_{3s}	30x3	weibull	2,0002	0,0699	2,0617	19,6188
	r_{4s}	30x3	weibull	1,9738	0,0469	2,0166	25,7543
75°	r_{1l}	45x3	weibull	2,1522	0,0283	2,1805	40,7856
	r_{2l}	45x3	normal	2,1732	0,0211	2,1732	0,0458
	r_{3l}	45x3	normal	2,1367	0,0259	2,1367	0,0554
	r_{4l}	45x3	weibull	2,2042	0,0296	2,2342	42,1349
	r_{1s}	30x3	normal	2,1048	0,0285	2,1048	0,0600
	r_{2s}	30x3	normal	2,1276	0,0202	2,1276	0,0429
	r_{3s}	30x3	normal	2,1216	0,0285	2,1216	0,0604
	r_{4s}	30x3	weibull	2,1802	0,0284	2,2074	47,7020
60°	r_{1l}	45x3	normal	2,4205	0,0297	2,4205	0,0720

	r_{2l}	45x3	gamma	2,1352	0,0422	567,495	0,0038
	r_{3l}	45x3	lognormal	2,3256	0,0217	0,8438	0,0216
	r_{4l}	45x3	normal	2,1033	0,0363	2,1033	0,0764
	r_{1s}	30x3	lognormal	2,3547	0,0281	0,8560	0,0280
	r_{2s}	30x3	normal	2,1329	0,0440	2,1329	0,0938
	r_{3s}	30x3	normal	2,3084	0,0249	2,3084	0,0576
	r_{4s}	30x3	weibull	2,1006	0,0383	2,1368	31,4435
45°	r_{1l}	45x3	lognormal	2,7488	0,0513	1,0099	0,0508
	r_{2l}	45x3	lognormal	2,0086	0,0502	0,6962	0,0490
	r_{3l}	45x3	gamma	3,0570	0,0444	512,935	0,0060
	r_{4l}	45x3	weibull	2,2475	0,0506	2,2988	24,2694
	r_{1s}	30x3	lognormal	2,6616	0,0577	0,9773	0,0569
	r_{2s}	30x3	lognormal	1,9915	0,0482	0,6878	0,0472
	r_{3s}	30x3	normal	3,0335	0,0466	3,0335	0,1413
30°	r_{4s}	30x3	weibull	2,2257	0,0508	2,2767	24,3757
	r_{1l}	45x3	lognormal	3,8977	0,0419	1,3595	0,0411
	r_{2l}	45x3	normal	2,1110	0,0228	2,1110	0,0481
	r_{3l}	45x3	normal	4,2914	0,0590	4,2914	0,2534
	r_{4l}	45x3	normal	2,1246	0,0279	2,1246	0,0593

	r_{1s}	30x3	lognormal	3,7921	0,0455	1,3319	0,0446
	r_{2s}	30x3	lognormal	2,1085	0,0203	0,7458	0,0202
	r_{3s}	30x3	weibull	4,1930	0,0654	4,3151	17,9389
	r_{4s}	30x3	normal	2,1286	0,0274	2,1286	0,0584
15°	r_{1l}	45x3	lognormal	7,9818	0,0595	2,0755	0,0592
	r_{2l}	45x3	gamma	2,1458	0,0205	2454,75	0,0009
	r_{3l}	45x3	weibull	8,0386	0,0704	8,2879	17,1711
	r_{4l}	45x3	lognormal	2,1283	0,0233	0,7550	0,0229
	r_{1s}	30x3	lognormal	7,7140	0,0668	2,0409	0,0660
	r_{2s}	30x3	lognormal	2,1391	0,0175	0,760	0,0174
	r_{3s}	30x3	weibull	7,9339	0,0780	8,2066	15,8282
	r_{4s}	30x3	lognormal	2,1212	0,0162	0,7518	0,0160
0°	r_1	45x3	lognormal	2,2359	0,0245	0,8043	0,0244
	r_2	45x3	lognormal	2,0727	0,0164	0,7287	0,0162
	r_3	45x3	weibull	2,3842	0,0345	2,4199	40,7340
	r_4	45x3	lognormal	2,0678	0,0160	0,7263	0,0160

Çizelge Ek. 2: Farklı açı ve çap değerlerine sahip çubuk elemanlar için korelasyon mesafeleri (c), eşleştirilmiş oto-korelasyon modeli ve belirleme katsayıları

0° Destek Malzemesi ile Üretilen Numuneler												
Çap (mm)	r_1			r_2			r_3			r_4		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	1,353	0,95	1	1,831	0,99	4	1,777	0,99	4	2,208	0,99	4
1.2	3,187	0,96	4	1,007	1,00	3	2,438	0,98	4	2,326	1,00	4
1.4	0,556	0,98	1	1,073	0,99	1	1,428	1,00	4	0,783	0,95	1
1.6	0,843	0,91	1	1,128	0,98	1	1,876	1,00	4	0,563	0,99	1
1.8	0,627	0,99	1	2,396	0,99	4	2,160	0,99	4	0,815	0,99	1
2	1,513	0,98	4	0,841	0,99	1	0,602	0,98	1	0,639	0,99	1
2.5	0,661	0,99	1	0,662	0,99	1	1,553	0,99	4	0,808	0,99	1
3	0,466	0,94	1	0,741	0,87	1	1,172	1,00	4	1,252	1,00	4
3.5	0,676	0,98	1	0,847	0,97	1	0,985	1,00	4	2,516	1,00	4
4	1,701	0,98	4	2,396	0,98	4	1,142	1,00	4	0,912	0,94	1

0° Destek Malzemesi Kullanılmaksızın Üretilen Numuneler

Çap (mm)	r_1			r_2			r_3			r_4		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	1,242	0,99	1	0,717	0,99	1	0,620	0,97	1	1,537	1,00	4
1.2	2,674	1,00	4	0,761	1,00	1	0,814	0,99	1	2,806	0,99	4
1.4	2,634	0,98	4	2,680	0,99	4	1,784	1,00	3	1,088	1,00	1
1.6	2,607	1,00	3	1,879	0,99	4	2,764	1,00	4	3,164	0,99	4
1.8	1,071	1,00	4	1,365	1,00	4	3,047	1,00	4	1,000	0,99	1
2	0,771	0,96	1	0,648	0,99	1	0,796	0,99	1	1,529	1,00	4
2.5	0,398	0,99	1	0,350	1,00	1	1,936	1,00	3	0,380	0,99	1
3	0,602	0,99	1	2,281	0,99	4	0,638	0,99	1	1,385	0,98	1
3.5	1,355	0,99	1	0,804	0,98	1	2,664	1,00	4	1,030	0,99	1
4	1,591	0,95	1	0,571	0,99	1	2,578	1,00	4	1,627	0,99	4

15°

Çap (mm)	r_{1l}			r_{2l}			r_{3l}			r_{4l}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.209	1.00	<i>III</i>	0.232	1.00	<i>III</i>	0.239	1.00	<i>III</i>	0.902	0.96	<i>IV</i>
1.2	0.197	0.97	<i>I</i>	0.177	1.00	<i>I</i>	0.214	1.00	<i>III</i>	0.222	0.98	<i>I</i>
1.4	0.517	1.00	<i>IV</i>	0.207	1.00	<i>II</i>	0.571	1.00	<i>IV</i>	0.381	1.00	<i>III</i>
1.6	0.375	1.00	<i>I</i>	0.319	0.99	<i>I</i>	0.329	1.00	<i>I</i>	0.295	0.99	<i>I</i>
1.8	0.278	1.00	<i>I</i>	0.663	1.00	<i>IV</i>	0.694	0.99	<i>IV</i>	0.330	1.00	<i>I</i>
2	0.202	1.00	<i>I</i>	0.817	1.00	<i>IV</i>	0.226	0.99	<i>I</i>	0.284	1.00	<i>III</i>
2.5	0.257	1.00	<i>III</i>	0.257	1.00	<i>III</i>	0.183	1.00	<i>I</i>	0.699	1.00	<i>IV</i>
3	0.505	1.0	<i>IV</i>	0.122	1.0	<i>I</i>	0.315	1.0	<i>IV</i>	0.139	1.0	<i>I</i>
3.5	0.824	1.00	<i>IV</i>	0.273	0.99	<i>I</i>	0.097	1.00	<i>I</i>	0.440	1.00	<i>IV</i>
4	0.269	0.99	<i>I</i>	0.221	1.00	<i>I</i>	0.177	1.00	<i>I</i>	0.192	1.00	<i>II</i>
Çap (mm)	r_{1s}			r_{2s}			r_{3s}			r_{4s}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.102	1.00	<i>I</i>	0.244	1.00	<i>III</i>	0.287	1.00	<i>III</i>	0.295	0.98	<i>I</i>
1.2	0.134	0.98	<i>I</i>	0.238	1.00	<i>III</i>	0.193	0.98	<i>I</i>	0.221	1.00	<i>I</i>
1.4	0.152	1.00	<i>I</i>	0.303	1.00	<i>III</i>	0.332	0.99	<i>I</i>	0.705	1.00	<i>IV</i>
1.6	0.529	1.00	<i>IV</i>	0.442	1.00	<i>III</i>	0.170	1.00	<i>I</i>	0.455	1.00	<i>IV</i>

1.8	0.310	0.99	IV	0.575	1.00	IV	0.186	1.00	II	0.243	1.00	I
2	0.210	1.00	I	0.501	1.00	IV	0.290	0.99	I	0.777	0.99	IV
2.5	0.645	1.00	IV	0.204	1.00	I	0.192	1.00	I	0.272	0.94	I
3	0.340	1.0	III	0.132	1.0	II	0.181	1.0	I	0.341	1.0	I
3.5	0.336	0.99	I	0.314	0.99	I	0.360	0.86	III	0.248	1.00	III
4	0.209	1.00	I	0.663	1.00	IV	0.239	1.00	III	0.103	1.00	I

30°												
Çap (mm)	r_{1l}			r_{2l}			r_{3l}			r_{4l}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.335	0.99	<i>I</i>	0.498	1.00	<i>III</i>	0.267	1.00	<i>I</i>	0.305	0.99	<i>I</i>
1.2	1.173	1.00	<i>IV</i>	1.104	0.99	<i>IV</i>	0.190	0.94	<i>I</i>	0.242	1.00	<i>III</i>
1.4	0.818	1.00	<i>IV</i>	0.293	0.99	<i>I</i>	0.245	1.00	<i>III</i>	0.481	1.00	<i>IV</i>
1.6	0.635	0.99	<i>IV</i>	0.693	1.00	<i>IV</i>	0.339	0.98	<i>I</i>	0.405	0.98	<i>I</i>
1.8	0.951	1.00	<i>IV</i>	1.050	1.00	<i>IV</i>	0.198	1.00	<i>I</i>	0.302	0.99	<i>I</i>
2	0.624	0.99	<i>I</i>	0.245	0.92	<i>I</i>	0.378	0.99	<i>I</i>	0.336	1.00	<i>I</i>
2.5	1.342	0.98	<i>IV</i>	0.326	0.98	<i>I</i>	0.334	0.99	<i>I</i>	0.255	0.99	<i>I</i>
3	0.558	1.00	<i>I</i>	0.547	0.99	<i>I</i>	1.018	1.00	<i>IV</i>	0.954	1.00	<i>IV</i>
3.5	1.398	1.00	<i>III</i>	1.370	1.00	<i>III</i>	0.588	1.00	<i>III</i>	0.540	1.00	<i>III</i>

4	1.065	0.99	IV	0.898	1.00	IV	0.712	1.00	IV	0.300	1.00	I
Çap (mm)	r_{1s}			r_{2s}			r_{3s}			r_{4s}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.965	1.00	IV	0.260	0.99	I	0.288	1.00	I	0.236	0.99	I
1.2	0.916	0.99	IV	0.849	1.00	III	0.369	0.89	III	0.314	1.00	III
1.4	0.270	0.94	I	0.218	1.00	I	0.305	0.99	I	0.290	0.98	I
1.6	0.861	0.99	IV	0.296	1.00	I	0.530	1.00	IV	0.551	1.00	IV
1.8	0.595	1.00	III	0.552	1.00	III	0.287	0.99	I	0.403	0.99	I
2	0.832	0.99	IV	0.334	0.99	I	0.521	0.99	I	0.597	0.99	I
2.5	0.814	1.00	III	0.446	0.99	II	1.316	0.98	IV	0.595	0.98	I
3	0.825	1.00	IV	0.702	1.00	IV	0.962	1.00	IV	0.645	1.00	III
3.5	0.265	1.00	I	0.597	1.00	IV	1.243	1.00	IV	1.094	0.98	IV
4	1.022	1.00	IV	1.039	1.00	IV	1.017	0.99	IV	0.381	1.00	I

45°												
Çap (mm)	r_{1l}			r_{2l}			r_{3l}			r_{4l}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.482	0.98	<i>I</i>	0.508	0.98	<i>I</i>	0.277	1.00	<i>I</i>	0.180	1.00	<i>I</i>
1.2	0.404	0.99	<i>I</i>	0.543	0.89	<i>I</i>	0.232	0.96	<i>I</i>	0.269	1.00	<i>I</i>
1.4	0.272	0.97	<i>I</i>	0.360	1.00	<i>I</i>	0.401	0.99	<i>I</i>	0.379	0.99	<i>I</i>
1.6	0.265	0.99	<i>I</i>	0.255	1.00	<i>I</i>	0.361	0.98	<i>I</i>	0.370	0.99	<i>I</i>
1.8	0.703	0.99	<i>I</i>	0.712	0.99	<i>I</i>	0.408	0.91	<i>I</i>	0.606	0.97	<i>I</i>
2	0.296	1.00	<i>I</i>	0.324	0.99	<i>I</i>	0.236	0.99	<i>I</i>	0.300	0.98	<i>I</i>
2.5	1.200	0.99	<i>III</i>	1.212	1.00	<i>III</i>	0.526	0.97	<i>I</i>	1.165	0.99	<i>IV</i>
3	1.350	1.00	<i>III</i>	1.488	1.00	<i>III</i>	0.296	0.96	<i>I</i>	0.436	0.98	<i>I</i>
3.5	0.508	0.97	<i>I</i>	0.488	0.98	<i>I</i>	0.428	0.99	<i>I</i>	0.457	0.99	<i>I</i>
4	0.706	1.00	<i>III</i>	0.718	1.00	<i>III</i>	0.439	0.99	<i>I</i>	0.482	0.99	<i>I</i>
Çap (mm)	r_{1s}			r_{2s}			r_{3s}			r_{4s}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.599	1.00	<i>IV</i>	0.361	0.96	<i>I</i>	0.198	0.99	<i>I</i>	0.347	0.98	<i>I</i>
1.2	0.926	0.99	<i>IV</i>	0.232	1.00	<i>I</i>	0.355	0.97	<i>I</i>	0.410	0.96	<i>I</i>
1.4	0.358	0.87	<i>III</i>	0.108	1.00	<i>I</i>	0.251	1.00	<i>III</i>	0.180	1.00	<i>II</i>
1.6	0.516	0.97	<i>I</i>	0.530	0.89	<i>I</i>	0.220	0.99	<i>I</i>	0.218	0.96	<i>I</i>

1.8	1.041	1.00	<i>IV</i>	1.065	0.99	<i>IV</i>	0.245	0.99	<i>I</i>	0.174	0.93	<i>I</i>
2	0.611	0.99	<i>IV</i>	0.518	1.00	<i>IV</i>	0.613	0.92	<i>I</i>	0.525	0.94	<i>I</i>
2.5	1.192	1.00	<i>IV</i>	1.277	1.00	<i>IV</i>	0.437	0.99	<i>I</i>	0.459	1.00	<i>I</i>
3	1.108	1.00	<i>III</i>	1.199	1.00	<i>III</i>	0.742	0.99	<i>IV</i>	0.234	0.99	<i>I</i>
3.5	1.172	1.00	<i>IV</i>	1.053	0.99	<i>IV</i>	0.368	1.00	<i>II</i>	1.051	0.98	<i>IV</i>
4	0.961	1.00	<i>IV</i>	0.980	1.00	<i>IV</i>	0.691	0.99	<i>III</i>	0.742	1.00	<i>III</i>

60°												
Çap (mm)	r_{1l}			r_{2l}			r_{3l}			r_{4l}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.421	1	<i>I</i>	0.390	0.99	<i>I</i>	0.279	0.92	<i>I</i>	0.589	0.94	<i>I</i>
1.2	0.490	0.98	<i>I</i>	0.489	0.99	<i>I</i>	0.403	0.98	<i>I</i>	0.410	0.99	<i>I</i>
1.4	0.877	0.89	<i>I</i>	0.763	0.83	<i>I</i>	0.472	0.93	<i>I</i>	0.999	0.90	<i>I</i>
1.6	0.563	0.99	<i>I</i>	0.508	0.98	<i>I</i>	0.416	0.99	<i>I</i>	0.425	0.99	<i>I</i>
1.8	0.377	0.97	<i>I</i>	0.293	0.98	<i>I</i>	0.602	0.88	<i>I</i>	0.489	0.88	<i>I</i>
2	0.444	1.00	<i>I</i>	0.476	0.99	<i>I</i>	0.392	1.00	<i>I</i>	0.409	0.99	<i>I</i>
2.5	0.616	0.93	<i>I</i>	0.616	0.93	<i>I</i>	0.547	0.97	<i>I</i>	0.545	0.93	<i>I</i>
3	0.466	0.98	<i>I</i>	0.475	0.98	<i>I</i>	0.539	0.96	<i>I</i>	0.781	0.98	<i>I</i>
3.5	1.379	1.00	<i>IV</i>	1.484	1.00	<i>IV</i>	0.317	0.98	<i>I</i>	0.261	0.99	<i>I</i>

4	1.4105	0.98	IV	1.19	0.99	IV	0.702	1	I	0.4201	0.96	I
Çap (mm)	r_{1s}			r_{2s}			r_{3s}			r_{4s}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.242	1.00	III	0.388	1.00	III	0.401	0.96	I	1.013	0.98	IV
1.2	0.315	0.92	I	0.255	1.00	3	0.209	0.99	I	0.217	1.00	I
1.4	0.293	0.95	I	0.228	0.98	I	0.749	0.97	I	0.896	1.00	I
1.6	0.472	0.99	I	0.578	1.00	I	0.282	0.96	I	0.273	0.96	I
1.8	0.965	0.98	I	1.046	0.98	I	0.313	0.98	I	0.353	0.94	I
2	0.601	0.95	I	0.623	0.94	I	2.421	0.99	IV	2.368	0.99	IV
2.5	0.239	1.00	I	0.250	0.99	I	0.421	0.92	I	0.436	0.91	I
3	2.194	1.00	IV	2.210	0.99	IV	0.314	0.96	I	0.366	0.82	III
3.5	1.083	0.95	I	1.082	0.99	I	0.472	1.00	IV	0.151	1.00	I
4												

75°												
Çap (mm)	r_{1l}			r_{2l}			r_{3l}			r_{4l}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.416	0.89	I	0.304	0.92	I	0.445	0.91	I	0.613	0.99	I

1.2	0.695	0.69	<i>I</i>	0.816	0.88	<i>I</i>	0.368	0.98	<i>I</i>	0.616	0.98	<i>I</i>
1.4	0.423	0.98	<i>I</i>	0.520	0.91	<i>I</i>	0.692	0.96	<i>I</i>	1.131	0.98	<i>I</i>
1.6	0.917	0.95	<i>I</i>	0.669	0.96	<i>I</i>	0.650	0.98	<i>I</i>	0.715	0.99	<i>I</i>
1.8	0.461	0.93	<i>I</i>	0.363	0.95	<i>I</i>	0.285	1.00	3	0.412	0.97	<i>I</i>
2	0.738	0.89	<i>I</i>	0.931	0.96	<i>I</i>	1.031	0.92	<i>I</i>	0.634	0.93	<i>I</i>
2.5	0.696	0.91	<i>I</i>	0.808	0.84	<i>I</i>	0.761	0.88	<i>I</i>	0.611	0.97	<i>I</i>
3	0.800	0.99	<i>I</i>	0.908	0.98	<i>I</i>	0.303	0.97	<i>I</i>	0.389	0.98	<i>I</i>
3.5	0.563	0.93	<i>I</i>	0.604	0.94	<i>I</i>	0.924	0.99	<i>IV</i>	0.959	0.99	<i>IV</i>
4	0.915	0.99	<i>I</i>	0.880	0.99	<i>I</i>	0.337	0.98	<i>I</i>	0.452	0.99	<i>I</i>
Çap (mm)	r_{1s}			r_{2s}			r_{3s}			r_{4s}		
	<i>c</i> (mm)	R^2	Model	<i>c</i> (mm)	R^2	Model	<i>c</i> (mm)	R^2	Model	<i>c</i> (mm)	R^2	Model
1	0.422	0.89	<i>I</i>	0.754	0.88	<i>I</i>	0.322	0.91	<i>I</i>	0.563	0.98	<i>I</i>
1.2	0.567	0.85	<i>I</i>	0.626	0.94	<i>I</i>	0.411	0.93	<i>I</i>	0.423	0.98	<i>I</i>
1.4	0.124	0.99	<i>I</i>	0.232	0.98	<i>I</i>	0.547	0.93	<i>I</i>	0.679	0.96	<i>I</i>
1.6	0.825	0.96	<i>I</i>	0.739	0.98	<i>I</i>	0.484	0.83	<i>I</i>	0.508	0.97	<i>I</i>
1.8	0.554	0.96	<i>I</i>	0.563	0.98	<i>I</i>	0.307	1.00	<i>III</i>	0.490	0.99	<i>I</i>
2	0.376	0.94	<i>I</i>	0.845	0.97	<i>I</i>	0.661	0.92	<i>I</i>	0.477	0.95	<i>I</i>
2.5	0.311	0.96	<i>I</i>	0.286	1.00	<i>I</i>	0.623	0.96	<i>I</i>	0.956	0.91	<i>I</i>
3	1.198	0.98	<i>I</i>	1.316	0.96	<i>I</i>	0.339	0.96	<i>I</i>	0.444	0.99	<i>I</i>
3.5	2.046	0.99	<i>IV</i>	1.969	1.00	<i>IV</i>	0.293	1.00	<i>I</i>	0.437	0.99	<i>I</i>

4	0.349	1.00	<i>I</i>	1.230	0.99	<i>IV</i>	0.746	0.99	<i>I</i>	0.500	1.00	<i>I</i>
---	-------	------	----------	-------	------	-----------	-------	------	----------	-------	------	----------

90°												
Çap (mm)	r_{1l}			r_{2l}			r_{3l}			r_{4l}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.87	0.97	<i>I</i>	2.46	0.99	<i>IV</i>	0.60	1.00	<i>III</i>	0.94	0.98	<i>I</i>
1.2	0.282	1.00	<i>III</i>	0.633	0.94	<i>I</i>	0.576	0.96	<i>I</i>	0.627	0.98	<i>I</i>
1.4	0.556	0.99	<i>I</i>	0.771	0.99	<i>I</i>	0.409	0.96	<i>I</i>	0.541	0.99	<i>I</i>
1.6	0.340	0.95	<i>I</i>	0.454	1.00	<i>I</i>	0.466	0.98	<i>I</i>	0.477	0.99	<i>I</i>
1.8	0,339	1,00	<i>III</i>	0,939	0,98	<i>I</i>	0,352	1,00	<i>III</i>	2,945	0,99	<i>IV</i>
2	1.520	0.98	<i>IV</i>	1.459	1.00	<i>IV</i>	0.466	0.99	<i>I</i>	1.478	1.00	<i>IV</i>
2.5	0.355	0.99	<i>I</i>	0.865	1.00	<i>IV</i>	0.435	0.96	<i>I</i>	0.441	1.00	<i>I</i>
3	0.463	0.97	<i>I</i>	0.564	0.96	<i>I</i>	1.013	0.96	<i>I</i>	1.040	0.98	<i>I</i>
3.5	0.617	0.97	<i>I</i>	0.672	0.92	<i>I</i>	0.308	0.97	<i>I</i>	0.425	0.99	<i>I</i>
4	0.408	0.99	<i>I</i>	0.453	0.99	<i>I</i>	0.709	0.97	<i>I</i>	0.919	0.98	<i>I</i>
Çap (mm)	r_{1s}			r_{2s}			r_{3s}			r_{4s}		
	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model	c (mm)	R^2	Model
1	0.66	1.00	<i>I</i>	0.82	0.99	<i>I</i>	0.59	0.95	<i>I</i>	0.87	0.98	<i>I</i>

1.2	0.585	0.93	<i>I</i>	0.745	0.96	<i>I</i>	0.277	0.98	<i>I</i>	0.556	0.99	<i>I</i>
1.4	0.632	0.99	<i>I</i>	0.624	0.98	<i>I</i>	0.682	0.97	<i>I</i>	0.895	0.96	<i>I</i>
1.6	0.496	0.99	<i>I</i>	0.504	0.99	<i>I</i>	0.478	0.98	<i>I</i>	1.409	0.98	<i>IV</i>
1.8	0,763	0,96	<i>I</i>	0,692	0,89	<i>I</i>	0,374	0,92	<i>I</i>	2,699	0,97	<i>IV</i>
2	0.615	0.99	<i>I</i>	0.688	1.00	<i>I</i>	0.465	1.00	<i>III</i>	0.687	0.99	<i>I</i>
2.5	0.502	0.98	<i>I</i>	0.707	0.98	<i>I</i>	0.198	1.00	<i>I</i>	0.310	0.97	<i>I</i>
3	1.340	0.92	<i>I</i>	1.383	0.93	<i>I</i>	0.735	0.94	<i>I</i>	0.415	0.98	<i>I</i>
3.5	0.290	0.94	<i>I</i>	0.473	0.96	<i>I</i>	0.269	0.92	<i>I</i>	0.485	0.97	<i>I</i>
4	0.320	0.97	<i>I</i>	0.423	0.98	<i>I</i>	0.475	0.88	<i>I</i>	0.690	0.95	<i>I</i>

Çizelge Ek. 3: Farklı açı ve çap değerlerine sahip çubuk elemanlara için belirlenen etkin geometri ve malzeme özellikleri (D_E , E_E)

0° Destek malzemesi kullanılarak üretilen çubuk elemanlar										
Çap (mm)	Etkin Çap (D_E) (mm)					Etkin Elastik Modül (E_E) (MPa)				
	Ort.	Std.	Model	Par. (a)	Par. (b)	Ort.	Std.	Model	Par. (a)	Par. (b)
1	1.115	0.023	I	0.109	0.020	3628.891	1.027	II	1.3E7	3E-4
1.2	1.230	0.026	I	0.207	0.021	3628.896	2.684	I	8.191	7E-4

1.4	1.529	0.023	I	0.424	0.015	3628.534	0.260	I	8.197	7E-5
1.6	1.631	0.018	I	0.489	0.011	3629.168	1.187	I	8.197	3E-4
1.8	1.571	0.023	I	0.452	0.014	3629.121	0.935	I	8.197	2E-4
2	2.019	0.023	III	2.019	0.023	3628.550	0.944	II	1.5E7	2E-4
2.5	2.607	0.034	III	2.607	0.034	3627.108	2.117	III	3.6E3	2.117
3	3.097	0.017	I	1.130	0.006	3627.805	1.890	I	8.196	0.001
3.5	3.722	0.029	I	1.314	0.008	3627.859	1.092	II	1E7	3E-4
4	4.098	0.024	III	4.098	0.024	3625.725	3.777	III	3.6E3	3.777

0° Destek malzemesi kullanılmaksızın üretilen çubuk elemanlar										
Çap (mm)	Etkin çap (D_E) (mm)					Etkin Elastik modül (E_E) (MPa)				
	Ort.	Std.	Model	Par. (a)	Par. (b)	Ort.	Std.	Model	Par. (a)	Par. (b)
1	1,261	0,021	I	0,232	0,016	2588,453	57,72	II	7,859	2E-2
1,2	1,464	0,027	I	0,381	0,019	2584,688	43,22	I	7,857	0,017
1,4	1,594	0,034	I	0,466	0,021	2594,398	60,73	I	7,861	2E-2
1,6	1,788	0,032	I	0,582	0,017	2611,124	40,60	I	0,582	0,017
1,8	1,786	0,027	I	0,580	0,015	2602,860	60,61	I	7,864	0,023
2	2,134	0,016	I	0,758	0,008	2620,469	82,93	III	2,6E3	82,93

2,5	2,792	0,026	I	1,027	0,009	2606,578	82,75	III	2,6E3	82,75
3	3,247	0,030	III	3,247	0,030	2516,778	86,23	III	2,5E3	86,23
3,5	3,866	0,035	III	3,866	0,035	2458,892	98,10	I	7,807	0,040
4	4,313	0,026	I	1,462	0,006	2507,904	98,92	I	2,5E3	98,92

15°										
Çap (mm)	Etkin Çap (D_E) (mm)					Etkin Elastik Modül (E_E) (MPa)				
	Ort.	Std.	Model	Par. (a)	Par. (b)	Ort.	Std.	Model	Par. (a)	Par. (b)
1	1,014	0,014	I	0,014	0,014	3621,614	1,906	I	8,194	5E-4
1,2	1,085	0,018	I	0,082	0,016	3618,239	1,688	II	4,6E6	8E-4
1,4	1,270	0,020	I	0,239	0,016	3613,250	0,899	III	3,6E3	0,899
1,6	1,526	0,030	IV	1,540	56,329	3615,973	0,798	III	3,6E3	0,798
1,8	1,761	0,029	IV	1,774	68,781	3617,063	0,756	III	3,6E3	0,756
2	1,931	0,016	IV	1,936	264,74	3615,886	0,035	III	3,6E3	0,035
2,5	2,345	0,038	IV	2,452	73,781	3617,329	1,264	IV	3,6E3	3E34
3	2,990	0,053	IV	3,011	78,873	3618,025	1,310	IV	3,6E3	3866
3,5	3,463	0,087	IV	3,498	56,695	3616,787	0,581	IV	3,6E3	8790
4	3,997	0,092	IV	4,034	66,534	3615,269	1,204	IV	3,6E3	4560

30°										
Çap (mm)	Etkin Çap (D_E) (mm)					Etkin Elastik Modül (E_E) (MPa)				
	Ort,	Std,	Model	Par, (a)	Par, (b)	Ort,	Std,	Model	Par, (a)	Par, (b)
1	1,11	0,02	I	0,11	0,02	3614,56	2,53	I	8,19	0
1,2	1,23	0,02	I	0,21	0,02	3612,07	0,24	II	2,2E8	0
1,4	1,31	0,02	III	1,31	0,02	3599,29	18,48	I	8,19	0,01
1,6	1,28	0,02	I	0,24	0,02	3613,10	0,16	I	8,20	4E-5
1,8	1,58	0,02	III	1,58	0,02	3612,41	0,57	II	4,1E7	0
2	1,88	0,03	III	1,88	0,03	3608,96	0,86	III	3,6E3	0,86
2,5	2,30	0,03	III	2,30	0,03	3611,57	1,76	III	3,6E3	1,76
3	2,76	0,04	IV	2,77	79,49	3608,75	0,40	IV	3608	1E5
3,5	3,31	0,05	IV	3,34	80,98	3605,21	1,91	IV	3606	2E4
4	3,98	0,05	IV	4	96,90	3607,10	2,04	III	3,6E3	2,04

45°										
Çap (mm)	Etkin Çap (D_E) (mm)					Etkin Elastik Modül (E_E) (MPa)				
	Ort,	Std,	Model	Par, (a)	Par, (b)	Ort,	Std,	Model	Par, (a)	Par, (b)
1	1,157	0,023	III	1,157	0,023	3612,752	0,302	II	1,4E8	3E-5
1,2	1,219	0,016	III	1,219	0,016	3601,523	0,012	III	3,6E3	1E-2
1,4	1,284	0,017	III	1,284	0,017	3601,326	0,702	II	2,7E7	1E-4
1,6	1,495	0,020	I	0,435	0,013	3610,304	5,001	I	8,198	1E-3
1,8	1,617	0,017	I	0,481	0,011	3575,571	0,511	I	8,182	1E-4
2	1,680	0,031	I	0,518	0,018	3609,693	1,671	I	8,191	5E-4
2,5	2,293	0,035	I	0,830	0,015	3602,045	0,104	II	1,2E9	3E-6
3	2,882	0,039	II	5,6E3	5E-4	3590,462	3,560	II	8,5E5	4E-3
3,5	3,197	0,077	IV	1,162	0,024	3574,121	0,457	III	3,6E3	4E-1
4	3,897	0,034	I	1,360	0,009	3591,117	1,539	I	8,186	4E-4

60°										
Çap (mm)	Etkin Çap (D_E) (mm)					Etkin Elastik Modül (E_E) (MPa)				
	Ort,	Std	Model	Par, (a)	Par, (b)	Ort,	Std	Model	Par, (a)	Par, (b)
1	0,896	0,033	III	0,896	0,033	3615,139	0,532	II	4,6E7	8E-5
1,2	1,198	0,015	I	0,180	0,012	3596,801	0,412	II	7,8E7	5E-5
1,4	1,276	0,019	III	1,276	0,019	3597,963	0,115	II	1E9	4E-6
1,6	1,219	0,028	II	1,9E3	6E-4	3609,453	0,001	I	6E12	6E-10
1,8	1,579	0,017	III	1,579	0,017	3570,926	3,147	II	1,3E6	3E-3
2	1,918	0,020	I	0,651	0,103	3609,034	0,123	II	8,7E8	4E-6
2,5	2,226	0,026	I	0,800	0,011	3579,476	0,931	I	8,182	3E-4
3	2,812	0,020	III	2,812	0,020	3573,970	2,170	III	3,6E3	2,170
3,5	3,342	0,028	I	1,207	0,008	3553,097	0,903	I	8,176	3E-4
4	3,927	0,021	IV	3,937	2,2E2	3575,415	6,044	III	3,6E3	6,044

75°										
Çap (mm)	Etkin Çap (D_E) (mm)					Etkin Elastik Modül (E_E) (MPa)				
	Ort,	Std	Model	Par, (a)	Par, (b)	Ort,	Std	Model	Par, (a)	Par, (b)
1	1,125	0,017	III	1,125	0,017	3617,828	0,639	II	3,2E7	1E-4
1,2	1,226	0,009	III	1,226	0,009	3612,638	1,378	II	6,9E6	5E-4
1,4	1,278	0,010	III	1,278	0,010	3615,962	0,385	II	8,9E7	4E-5
1,6	1,478	0,013	I	0,391	0,009	3615,800	0,572	II	4,7E7	9E-5
1,8	1,604	0,010	II	2,7E4	6E-5	3611,884	1,940	III	3,6E3	1,940
2	1,816	0,016	I	0,596	8E-3	3608,223	1,076	I	8,190	3E-4
2,5	2,483	0,014	III	2,483	0,014	3601,323	0,845	I	8,189	0,002
3	2,926	0,027	I	1,073	0,009	3591,989	4,027	III	3,6E3	4,027
3,5	3,547	0,013	III	3,547	0,013	3550,019	0,729	I	8,174	2E-4
4	4,038	0,019	I	1,395	0,004	3536,927	0,785	I	8,171	2E-4

