



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN GEÇİŞLİ
GÖZENEKLİ YAPILARDA TASARIM DEĞİŞKENLERİNİN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Çağrı TÜZEMEN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Çağrı TÜZEMEN

28/06/2021

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN GEÇİŞLİ GÖZENEKLİ
YAPILARDA TASARIM DEĞİŞKENLERİNİN FİZİKSEL VE MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)

Mehmet Çağrı TÜZEMEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Eklemeli imalat ile implantlarda kullanılabilecek kemik benzeri işlevsel geçişli gözenekli yapıların üretimi oldukça kolaylaşmış ve bu alanda yapılan araştırmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada üç farklı birim hücre yapısı ve üç farklı kolon kalınlığına sahip toplam dokuz işlevsel geçişli gözenekli yapı seçici lazer ergitme (SLE) cihazı ile Ti6Al4V tozu kullanılarak üretilmiştir. Numunelerin hacimsel boşluk oranları Arşimet ve kuru tartım yöntemleriyle ölçülmüştür. Tasarım ile üretim hacimsel boşluk oranları (kuru tartım) arasında kolonlardaki kalınlaşmalar ve sarkmalardan dolayı %20'lere varan sapmalar meydana gelmiştir. Basma deneyleri sonucunda yapıların kırılma davranışının kolonların kuvvetin geldiği doğrultuyla yaptığı açılardan etkilendiği gözlemlenmiştir. Aynı hacimsel boşlukta birim hücre yapıların elastisite modülleri büyükten küçüğe doğru sırasıyla kübik, sekizyüzlü ve elmas olarak bulunmuştur. Üç nokta eğme deneyinde ise bu sıralama elmas, sekizyüzlü ve kübik olarak bulunmuştur. Üretim hataları, ölçüm ve analizlerdeki sapmalar ve deneylerdeki kırılma davranışları mikro-BT, optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile yorumlanmıştır. Birim hücre yapısından yola çıkarak oluşturulan matematiksel modeller ile tasarım değişkenleri olan birim hücre boyutu ve kolon kalınlığına bağlı hacimsel boşluk oranını ve elastisite modülünü veren genelleştirilmiş matematiksel modeller türetilmiştir. Matematiksel modeller ile kişiye özel implant tasarımında uyumluluğun artırılması amaçlanmıştır.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, seçici lazer ergitme, işlevsel geçişli gözenekli yapılar, Ti6Al4V, elastisite modülü, matematiksel model
Sayfa Adedi : 191
Danışman : Doç. Dr. Elmas SALAMCI

INVESTIGATION OF EFFECTS OF DESIGN VARIABLES ON PHYSICAL AND
MECHANICAL PROPERTIES IN GRADED POROUS STRUCTURES PRODUCED
BY SELECTIVE LASER MELTING

(Ph. D. Thesis)

Mehmet Çağrı TÜZEMEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

With additive manufacturing, the production of bone-like functionally graded porous structures that can be used in implants has become much easier and research in this area has gained momentum. In this study, a total of nine functional graded porous structures with three different unit cell structures and three different column thicknesses were produced using a selective laser melting (SLM) machine and Ti6Al4V powder. The porosity of the specimens was measured by Archimedes and dry weighing methods. Deviations up to 20% occurred between design and production porosities (dry weighing) due to thickening and sagging in the columns. As a result of the compression tests, it was observed that the fracture behavior of the structures was affected by the angles of the columns with the direction of the force. The modulus of elasticity of unit cell structures with the same porosity was found as cubic, octahedroid, and diamond in descending order, respectively. In the three-point bending test, this order was found as diamond, octahedroid, and cubic. Manufacturing errors, deviations in measurements and analysis, and fracture behavior in experiments were interpreted with micro-CT, optical microscope, and SEM images. With the mathematical models created from the unit cell structure, generalized mathematical models that give the porosity and modulus of elasticity depending on the unit cell size and column thickness, which are the design variables, are derived. It is aimed to increase compatibility in personalized implant design with mathematical models.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, selective laser melting, functional graded porous structures, Ti6Al4V, modulus of elasticity, mathematical model

Page Number : 191

Supervisor : Doç. Dr. Elmas SALAMCI

TEŞEKKÜR

Tez sürecinde çok kıymetli bilgi birikimi ile bana rehberlik eden, desteğini ve güvenini eksik etmeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Elmas SALAMCI'ya, proje kapsamında yapmış olduğumuz çalışmalar boyunca ve sonrasında deneyimleri ve yönlendirmeleri için Prof. Dr. Rahmi ÜNAL'a, tez izleme komitelerindeki değerli katkıları ve yapıcı eleştirilerinden dolayı Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a, tez savunma jürisindeki katkılarından dolayı Doç. Dr. Ulaş YAMAN ve Doç. Dr. Tunç APATAY'a, proje süresince desteğini esirgemeyen Ahmet Murat DURSUN'a ve Gülhane Medikal Tasarım ve Üretim Merkezi'ne, analizler konusunda destek veren Dr. Öğr. Üyesi Emre YURTKURAN'a, SEM görüntülemesindeki desteğinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Nazım BABACAN'a, başta analizler olmak üzere pek çok konuda fikir alışverişi yaptığım Dr. Arif BALCI'ya, deneylerdeki yardımlarından dolayı Yunus USLAN'a, ANSYS lisansı ve altyapı desteği için Gazi Üniversitesi'ne, MAG-116R021 kodlu TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında projede vermiş oldukları desteklerden dolayı TÜBİTAK'a ve bu sürecin herhangi bir aşamasında emeği geçen değerli mesai arkadaşlarım ve dostlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Üzerimde kuşkusuz çok büyük emeği olan sevgili aileme anlayışları ve destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. EKLEMELİ ÜRETİM	5
2.1. Eklemeli İmalatın Aşamaları.....	7
2.1.1. Eklemeli imalat teknolojileri.....	10
2.1.2. Yönlendirilmiş enerji biriktirme	11
2.1.3. Tabaka laminasyonu	12
2.1.4. Kazan fotopolimerizasyonu	12
2.1.5. Bağlayıcı püskürtme	13
2.1.6. Malzeme ekstrüzyonu	14
2.1.7. Malzeme püskürtme.....	15
2.1.8. Toz yataklı birleştirme	16
2.2. Eklemeli İmalatın Kullanım Alanları.....	19
2.3. Eklemeli İmalatın Güçlü ve Zayıf Yönleri.....	21
2.4. Gözenekli Yapılar	22
2.4.1. Tekdüze gözenekli yapılar	25
2.4.2. Değişken gözenekli yapılar	25

	Sayfa
2.5. Literatür Taraması	27
2.5.1. Basma deneyi	27
2.5.2. Eğme deneyi.....	31
2.6. Literatüre Katkı	33
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	35
3.1. Tasarım.....	35
3.1.1. Basma deneyi numunelerinin tasarımı	36
3.1.2. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin tasarımı	38
3.2. Üretim	39
3.3. Görüntüleme Yöntemleri	43
3.4. Hacimsel Boşluk Oranlarının Belirlenmesi	47
3.4.1. Arşimet ve kuru tartım	47
3.4.2. Matematiksel model.....	50
3.5. Sonlu Elemanlar Analizi	51
3.6. Basma Deneyi	53
3.7. Üç Nokta Eğme Deneyi	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	59
4.1. Hacimsel Boşluk Oranları	59
4.1.1. Matematiksel model.....	59
4.1.2. Altlıklı numunelerin hacimsel boşluk oranları	78
4.1.3. Altlıksız numunelerin hacimsel boşluk oranları	84
4.2. Basma Deneyi	100
4.2.1. Isıl işlemin elastisite modülü üzerine etkisi	117
4.2.2. Sonlu elemanlar analizi.....	124
4.2.3. Tasarım girdilerinden elastisite modülünün kestirimi	134
4.3. Üç Nokta Eğme Deneyi	143

Sayfa

4.3.1. Tasarım girdilerinden eğme elastisite modülünün kestirimi.....	155
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	165
KAYNAKLAR.....	169
ÖZGEÇMİŞ.....	189



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Geleneksel ve eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması	6
Çizelge 2.2. Eklemeli imalat yöntemlerinin uygulama alanları.....	10
Çizelge 2.3. Eklemeli imalatın üstünlükleri ve kısıtlamaları	22
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V (ELI grade 23) tozunun kimyasal bileşimi	39
Çizelge 3.2. Numunelerin üretim değişkenleri	40
Çizelge 4.1. Altlıklı basma deneyi numunelerinin tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve farkları	79
Çizelge 4.2. Altlıklı üç nokta eğme deneyi numunelerinin tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve farkları.....	82
Çizelge 4.3. Altlıksız basma deneyi numunelerinin tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve farkları	84
Çizelge 4.4. Basma deneyi numunelerinin kuru tartım (altlıksız) ve matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranları	88
Çizelge 4.5. Altlıksız üç nokta eğme deneyi numunelerinin tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve farkları.....	93
Çizelge 4.6. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin kuru tartım (altlıksız) ve matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranları.....	96
Çizelge 4.7. Isıl işlem uygulanmış numuneler ile ısıtıl işlem uygulanmamış numunelerin elastisite modülleri ve ısıtıl işlemin etkisi	118
Çizelge 4.8. Modeller üzerinde yapılan farklı analiz girdilerinin elastisite modülüne etkisi.....	125
Çizelge 4.9. Basma deneyi ile sonlu elemanlar analizi yapılmış modellerin elastisite modülleri ve arasındaki sapma	126
Çizelge 4.10. Basma deneyi ile denklemlerden elde edilen sonlu elemanlar analizi elastisite modülleri ve arasındaki sapma.	134
Çizelge 4.11. Numunelerin basma elastisite modülleri ile altlıklı tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları	135

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.12. Numunelerin basma elastisite modülleri ile altlıksız tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları	136
Çizelge 4.13. Numunelerin eğme elastisite modülleri ile altlıklı tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları	156
Çizelge 4.14. Numunelerin eğme elastisite modülleri ile altlıksız tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları	157



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Malzeme çıkarılarak yapılan geleneksel imalat ve malzeme eklenerek yapılan eklemeli imalat	5
Şekil 2.2. Eklemeli ve geleneksel imalat için üretim hacmine ve ürün karmaşıklığına veya kişiselleştirmesine karşı birim maliyeti	7
Şekil 2.3. STL dosyası çözünürlük örnekleri.....	8
Şekil 2.4. Numunenin konumlandırılmasına göre destek yapıları ve üretime etkisi; a) en az destek, b) destek yapılarının kolay sökümü ve c) en kısa üretim süresi.....	9
Şekil 2.5. Eklemeli imalat süreci	10
Şekil 2.6. Yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemi.....	11
Şekil 2.7. Tabaka laminasyonu yöntemi	12
Şekil 2.8. Kazan fotopolimerizasyonu yöntemi.....	13
Şekil 2.9. Bağlayıcı püskürtme yöntemi	14
Şekil 2.10. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi.....	15
Şekil 2.11. Malzeme püskürtme yöntemi	16
Şekil 2.12. Toz yataklı birleştirme yöntemi.....	17
Şekil 2.13. Eklemeli imalatın uygulama alanları	20
Şekil 2.14. Eklemeli imalatı kullanan endüstri alanları	20
Şekil 2.15. Biyomedikal implantlarda kullanılan gözenekli yapıların farklı birim hücre tasarımları a) CAD tabanlı, b) yüzey tabanlı ve c) topoloji tabanlı birim hücreler	24
Şekil 2.16. Tekdüze gözenekli yapı örnekleri.....	25
Şekil 2.17. Değişken gözenekli yapı örnekleri	26
Şekil 2.18. Tekdüze ve değişken gözenekli yapıların tasarımı, gerilme-gerinim eğrisi ve elastisite modülü	31
Şekil 2.19. Gözenekli yapıda üç nokta eğme deneyi sırasında oluşan çatlak ilerlemesi	32

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Birim hücre yapıları a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü	35
Şekil 3.2. Numuneleri kodlama sistemi	36
Şekil 3.3. Basma deneyi numune boyutları ve tasarımı	37
Şekil 3.4. Basma deney numuneleri tasarımlarının kesit görüntüleri ve her bir geçişteki birim hücre boyutları a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü	37
Şekil 3.5. Üç nokta eğme deneyi numune boyutları ve tasarımı	38
Şekil 3.6. Üç nokta eğme deney numuneleri tasarımlarının kesit görüntüleri ve her bir geçişteki birim hücre boyutları a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü	39
Şekil 3.7. Birim küp içerisindeki a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü birim hücre yapısı	50
Şekil 3.8. Analizi yapılmak üzere Ansys programına aktarılmış gözenekli yapı	51
Şekil 3.9. Ağ yapısı oluşturulmuş model.....	52
Şekil 3.10. Model üzerinde oluşturulan mesnetleme	52
Şekil 3.11. Model üzerinde uygulanan kuvvet ve deplasman.....	52
Şekil 4.1. Elmas birim hücre yapısı	60
Şekil 4.2. Kübik birim hücre yapısı	61
Şekil 4.3. Sekizyüzlü birim hücre yapısı	63
Şekil 4.4. Sekizyüzlü yapıda iki boyutta farklı kalınlıktaki kolonların kesişim alanları	63
Şekil 4.5. Sekizyüzlü yapıda kolonların kesişim alanlarının geometrik gösterimi.....	64
Şekil 4.6. Belirli birim hücre boyutları için kolon kalınlığına bağlı hacimsel boşluk oranları.....	66
Şekil 4.7. Belirli kolon kalınlıkları için birim hücre boyutuna bağlı hacimsel boşluk oranları.....	67
Şekil 4.8. Basma numunelerinin geçişli a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü birim hücre yapıları.....	68
Şekil 4.9. Basma deneyi numunelerinin geçişli yapılarının boyutları	69

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. Basma deneyi numunesi tasarımı için İşlevsel geçişli gözenekli yapının geliştirilmiş hali	72
Şekil 4.11. Üç nokta eğme numunelerinin geçişli a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü birim hücre yapıları	74
Şekil 4.12. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin geçişli yapılarının boyutları	74
Şekil 4.13. Üç nokta eğme deneyi numunesi tasarımı için işlevsel geçişli gözenekli yapının geliştirilmiş hali	77
Şekil 4.14. Kolonlardaki sarkmalar ve yarı ergimiş tozların SEM görüntüleri	80
Şekil 4.15. Altlıklı basma deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı hacimsel boşluk oranları	81
Şekil 4.16. Altlıklı üç nokta eğme deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı hacimsel boşluk oranları	83
Şekil 4.17. Basma deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı altlıksız hacimsel boşluk oranları	87
Şekil 4.18. Basma deneyi numunelerinin altlıksız hacimsel boşluk oranları	88
Şekil 4.19. Basma deneyi numunelerinin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları	89
Şekil 4.20. Basma deneyi numunelerinin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları veren eğilim çizgileri ve denklemleri	90
Şekil 4.21. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı altlıksız hacimsel boşluk oranları	95
Şekil 4.22. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin altlıksız hacimsel boşluk oranları	96
Şekil 4.23. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları	97
Şekil 4.24. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları veren eğilim çizgileri ve denklemleri	98

Şekil	Sayfa
Şekil 4.25. Farklı kolon kalınlıklarındaki elmas birim hücre yapısına sahip numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri.....	102
Şekil 4.26. Elmas numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafikleri	103
Şekil 4.27. Farklı kolon kalınlıklarındaki kübik birim hücre yapısına sahip numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri.....	105
Şekil 4.28. Kübik numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafikleri	106
Şekil 4.29. Farklı kolon kalınlıklarındaki sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri.....	108
Şekil 4.30. Sekizyüzlü numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafikleri.....	109
Şekil 4.31. a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü birim hücre yapılarının basma yükü altında kırılma davranışları.....	111
Şekil 4.32. Basma deneyi ilk hasar sonrası kolonların SEM görüntüleri a) bE3, b) bE5, c) bE7, d) bK3, e) bK5, f) bK7, g) bS3, h) bS5 ve i) bS7	113
Şekil 4.33. Kayma gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan basma eksen, kayma düzlemi ve kayma yönü arasındaki geometrik ilişkiler	115
Şekil 4.34. Farklı kolon kalınlıklarındaki kübik numunelerin kolonlarının kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) bK3 ve b) bK7	116
Şekil 4.35. a-b) 0,4 mm kolon kalınlığına c-d) 1,2 mm kolon kalınlığına sahip kübik numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri	117
Şekil 4.36. Isıl işlemsiz ve ısıtılmış numunelerin elastisite modülleri.....	119
Şekil 4.37. Elmas numunelerin ısıtılmış farkını gösteren basma deneyi gerilme-gerinim grafiği.....	121
Şekil 4.38. Kübik numunelerin ısıtılmış farkını gösteren basma deneyi gerilme-gerinim grafiği.....	122
Şekil 4.39. Sekizyüzlü numunelerin ısıtılmış farkını gösteren basma deneyi gerilme-gerinim grafiği.....	123
Şekil 4.40. Model üzerinde yapılan analizler sonucunda alınan gerilim, gerinim ve deformasyon sonuçları.....	124

Şekil	Sayfa
Şekil 4.41. Kübik birim hücre yapısına sahip basma deneyi numunesinin tasarım (a ve d), mikro-BT (b ve e), makro (c) ve SEM (f) görüntüleri	127
Şekil 4.42. bK5 numunesinin tasarım ve mikro-BT taramadan elde edilen üç boyutlu modelinin üst üste getirilmiş görüntüsü	128
Şekil 4.43. Tel erozyon ile kesilmiş numunenin farklı kesitlerindeki kolonlarının mikroskop görüntüleri ile mikro-BT görüntüsü (b).....	130
Şekil 4.44. Üretim sürecinde oluşan kolon içi kusurlar	131
Şekil 4.45. Analiz ile deneysel elastisite modülü arasındaki ilişki	133
Şekil 4.46. Numunelerin altlıksız hacimsel boşluk oranlarına bağlı basma elastisite modülleri.....	137
Şekil 4.47. Numunelerin matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı basma elastisite modüllerini veren eğilim çizgileri ve denklemleri	139
Şekil 4.48. Farklı kolon kalınlıklarındaki elmas birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri.....	144
Şekil 4.49. Elmas numunelerin üç nokta eğme deneyi gerilme-gerinim grafikleri	145
Şekil 4.50. Farklı kolon kalınlıklarındaki kübik birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri.....	147
Şekil 4.51. Kübik numunelerin üç nokta eğme deneyi gerilme-gerinim grafikleri	148
Şekil 4.52. Farklı kolon kalınlıklarındaki sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri.....	150
Şekil 4.53. Sekizyüzlü numunelerin üç nokta eğme deneyi gerilme-gerinim grafikleri	151
Şekil 4.54. Üç nokta eğme deneyinde numunelerin kırılma davranışları	152
Şekil 4.55. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin hasar bölgelerinden SEM görüntüleri a) eE3, b) eE5, c) eE7, d) eK3, e) eK5, f) eK7, g) eS3, h) eS5 ve i) eS7	153
Şekil 4.56. Kolonların a) basmaya ve b) çekmeye maruz kalan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri	154

Şekil	Sayfa
Şekil 4.57. eE7 numunesinden alınan kolonların a) basmaya, b) çekmeye maruz kalan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri	154
Şekil 4.58. Kolon içinde oluşan kapalı gözenekler	155
Şekil 4.59. Numunelerin altlıksız hacimsel boşluk oranlarına bağlı eğme elastisite modülleri.....	158
Şekil 4.60. Numunelerin matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı eğme elastisite modüllerini veren eğilim çizgileri ve denklemleri	159



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Üretimde kullanılan Concept Laser M2 Cusing SLE cihazı	40
Resim 3.2. Isıl işlemlerde kullanılan Proterm Furnaces marka fırın	41
Resim 3.3. Numunelerin üretim anı ve sonrasına ait fotoğraflar	42
Resim 3.4. Numunelerin ses ötesi temizleyicide olası artık tozlardan arındırılması	42
Resim 3.5. Mikro-BT cihazı ve numunelerin taranması.....	43
Resim 3.6. Numunelerin görüntülerinin alındığı SEM cihazı	44
Resim 3.7. Numunelerin optik görüntülerinin alındığı Olympus GX71 cihazı.....	45
Resim 3.8. Tel erozyon cihazı ve numunenin kesilme işlemi.....	46
Resim 3.9. Bantla sarılmış numune ve Arşimet deney düzeneği.....	48
Resim 3.10. Numunenin havada ve suda tartılması.....	49
Resim 3.11. Numuneden sökülen bantların havada ve suda tartılması.....	49
Resim 3.12. Paralelliğin sağlanması amacıyla numunelerin zımparalanması	53
Resim 3.13. Basma deney düzeneği	55
Resim 3.14. Üç nokta eğme deney düzeneği	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
%	Yüzde
%HB	Yüzde hacimsel boşluk oranı
°	Derece
°C	Derece santigrat
Σ	Toplam
μm	Mikrometre
μA	Mikroamper
ρ	Yoğunluk
a	Birim hücre boyutu
Al	Alüminyum
arccos	Kosinüsün ters fonksiyonu
cm	Santimetre
Co	Kobalt
cos	Kosinüs
Cr	Krom
d	Kolon kalınlığı
dk.	Dakika
E	Elastisite modülü
g	Gram
i	İçten dışa geçiş sırası
kV	Kilovolt
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
n	Toplam geçiş sayısı
r	Yarıçap
Si	Silisyum
sin	Sinüs

Simgeler**Açıklamalar****Ti**

Titanyum

V

Vanadyum

W

Ağırlık

Kısaltmalar**Açıklamalar****3B**

Üç boyutlu

ASTM

American society for testing and materials

BDT

Bilgisayar destekli tasarım

ETÜ

Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

ing.

İngilizcesi

METÜM

Gülhane Medikal Tasarım ve Üretim Merkezi

Mikro-BT

Mikro bilgisayarlı tomografi

PLA

Polilaktik asit

SEM

Scanning electron microscope

SLE

Seçici lazer ergitme

SLS

Seçici lazer sinterleme

STL

Stereolitografi

TOBB

Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği

TUSAŞ

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.

1. GİRİŞ

İnsanoğlu tarih boyunca karşı konulamaz bir merak ve keşfetme dürtüsüyle sürekli gelişim göstermiştir. Bu merak ve keşfetme dürtüsü, akıl ve bilgiyle yoğrularak günümüz dünyasını oluşturmuştur. Tarih boyunca yaşanan çoğu gelişmede ve üretilen teknolojilerde ise insanoğlunun kullandığı en önemli yeteneği, yaratılanı taklit etme yeteneği olmuştur. Dördüncü sanayi devriminin en önemli sac ayaklarından biri olarak da adlandırılan üç boyutlu yazıcılar veya eklemeli imalat ise insanoğlunun teknolojik gelişimine yeni bir kapı aralamıştır. Eklemeli imalatla farklı yöntemler geliştirilmiş ve başta medikal, havacılık ve uzay sanayinde olmak üzere çok çeşitli kullanım alanı oluşmuştur.

Eklemeli imalatın çok çeşitli yöntemleri bulunmakla birlikte özellikle implant üretiminde toz yataklı birleştirme yöntemi öne çıkmaktadır. Bu yöntemde metal tozlardan oluşan bir yatak içinde enerji kaynağı ile ürün tozların katman katman ergitilmesiyle üretilmektedir. Geleneksel yöntemlerle üretilmesi çok zor veya olası olmayan gözenekli yapılar bu yöntem ile üretilebilmektedir. Ayrıca bu yöntemle düzenli tekrarlı gözenekli yapılar üretilebilmektedir. Gözenekli yapının geometrisi, büyüklüğü ve yapıdaki dağılımı parçanın mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Eklemeli imalat ile gözenek dağılımı istenildiği gibi yönetilebilmektedir. Bu sayede geçişli değişken veya düzenli değişken işlevsel yapılar oluşturulabilmektedir. İşlevsel yapıların oluşturulması ise implant üretiminde önemli bir sayfa açmaktadır. Kemik yapısı cinsiyet, yaş, fiziksel aktivite ve beslenme gibi kişiden kişiye değişmekle birlikte kişinin hangi kemiği olduğuna bağlı olarak da değişiklik gösterebilmektedir. Bu durum kemiğin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. İşlevsel yapılar ile kişinin kemiğinin fiziksel özelliklerine uygun tasarımı yapılar oluşturulabilmektedir. Böylece implantlar fiziksel olarak uyumlu olabilmektedir.

İmplantların yerleştirildikleri bölgeye uyumlu olabilmesi için fiziksel özelliklerinin yanında mekanik özellikleri de uyumlu olmalıdır. Titanyum alaşımları gibi metal malzemeler ortopedik implantların klinik uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, endoprostetik işlemlerde tam yoğunluktaki implant uygulamalarında aseptik gevşeme gibi komplikasyonlar sonucu kararsızlık ve erken revizyon gibi sorunlar ile karşılaşmaktadır. Kemik kaybına neden olan etkenlerden birisi implantın elastisite modülünün yüksek olması

nedeniyle gerilme kalkanı etkisi olarak bilinen kemik dokusuna yetersiz ve az yük aktarılmasıdır. Elastisite modülünü azaltarak kemik dokusuna gerilme aktarılmasını ve implantın uzun süreli tutunmasını sağlamak amacıyla kişiye özel implantlarda işlevsel gözenekli yapılar öne çıkmaktadır. Kemik yapısının katı (kortikal) ve süngerimsi (trabeküler) değişken yapıya sahip olması kendi içinde de gözenekliliğinin değişmesi anlamına gelmektedir. İşlevsel değişken yapılar ile implantın istenilen bölgesi katı istenilen bölgesi süngerimsi yapıya uygun olacak şekilde gözenekli olarak üretilebilmektedir. Böylece implantın yerleştirileceği kemiğin fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek uyumlulukta tasarım ve üretimler yapılabilmektedir.

Bu çalışmanın amacı kemik benzeri geçişli yapı oluşturularak yapının fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, yapının değişkenleri ile implantın uyumunun artmasını dolayısıyla ömrünün artmasını sağlayacak fiziksel ve mekanik özellikleri arasında bir matematiksel model kurulmasıdır. Bu kapsamda birim hücre yapılarından yola çıkarak yapıların gözeneklilik oranını veren matematiksel modeller kurulmuştur. Ayrıca basma ve üç nokta eğme deneyi ile numunelerin elastisite modülleri bulunarak tasarım değişkenleri ile bulunan elastisite modülleri arasında da matematiksel modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan matematiksel modeller geliştirilerek bu çalışmanın sınırları dışında da oluşturulabilecek implant tasarımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin tahmin edilebilmesi sağlanmıştır. Bu sayede kişiye özel implantlarda tasarım değişkenleriyle, gözeneklilik ve elastisite modülünün istenilen değerlerde tasarlanıp üretilebilmesi böylece implantların uyumunu en yüksek seviyeye çıkarılması amaçlanmıştır. Böylece implant kaybı ve tekrarlayan ameliyatlar azaltılmış olacaktır.

Yapılan çalışma beş ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde çalışmanın konusu ve amacına yönelik genel bir bakış açısı sunulmuş ve kapsamı belirtilmiştir. İkinci bölümünde eklemeli imalatın aşamaları, üretim yöntemleri, kullanım alanları, güçlü ve zayıf yönleri ile eklemeli imalatla üretilen gözenekli yapılarla ilgili genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca literatürde yapılan benzer çalışmaların özeti sunularak bu çalışmanın literatüre katkısı belirtilmiştir. Üçüncü bölümde numunelerin tasarımı, üretimi, görüntüleme yöntemleri, hacimsel boşluk oranlarının belirlenmesi, sonlu elemanlar analizi, basma deneyi ve üç nokta eğme deneyi detaylı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ilk olarak üretilen numunelerin hacimsel boşluk oranları belirlenmiştir. Birim hücre yapısından yola çıkarak tasarım değişkenlerine bağlı hacimsel oranlarını veren matematiksel modeller oluşturulmuştur. Ardından üç nokta

eğme deneyi bulguları, basma deneyi ile sonlu elemanlar arasındaki sapmalar ve ısıtıl işlemin etkisi literatürle karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Son olarak, tasarım değişkenleri ile basma ve üç nokta eğme deneyi sonucunda bulunan değişken gözenekli yapıların elastisite modülleri arasında bağıntılar kurularak matematiksel modeller oluşturulmuştur. Beşinci bölümde ise sonuçlar özetlenmiş ve gelecek çalışmalar için çeşitli öneriler sunulmuştur.



2. EKLEMELİ ÜRETİM

Eklemeli imalat son yıllarda hızla gelişen yeni teknoloji bir üretim yöntemidir. Eklemeli imalat ile geleneksel imalat yöntemlerini kısaca karşılaştırmak gerekirse geleneksel yöntemde blok parça ile işe başlanır ve tornalama frezeleme vb. yöntemlerle gereksiz kısımlar blok parçadan çıkarılarak son ürüne ulaşılır. Eklemeli imalatla ise sıfırdan başlanıp her seferinde bir kat olacak şekilde üst üste katmanların üretilmesiyle istenilen ürün elde edilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Malzeme çıkarılarak yapılan geleneksel imalat ve malzeme eklenerek yapılan eklemeli imalat [1]

Eklemeli imalat ile ilgili en eski konseptler 19. yy. sonlarına uzansa da çağdaş eklemeli imalatın ilk patenti 20. yy. ortalarında alınmıştır. Günümüz toz yataklı birleştirme teknolojilerinin temelleri ise 1971 yılında Ciraud tarafından atılmış ve 1979 yılında Housholder toz yataklı seçici lazer sinterleme (SLS) yönteminin patentini almıştır. Bu patentte, düzlemsel toz katmanların ardışık olarak serilmesi ve bunların seçici olarak katılaştırılması yer almıştır. Katılaştırmanın, ısı ve seçilen bir maske kullanılarak veya bir lazer gibi kontrollü bir ısı tarama işlemi kullanılarak gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir [1].

Son 30 yılda eklemeli imalatın terimleri de değişimler yaşamıştır. İlk zamanlar hızlı prototipleme, üç boyutlu yazma ve katmanlı imalat terimleri kullanılmıştır. Ancak 2009 yılında uluslararası ASTM komitesi eklemeli imalat terimini standartlaştırmıştır. ASTM

F2792 standartına göre eklemeli imalat “geleneksel işleme gibi eksiltici imalat yöntemlerinin aksine, genellikle katman üzerine katman olan 3D model verilerinden nesneler yapmak için malzemelerin birleştirilmesi işlemi” olarak tanımlanmıştır [2].

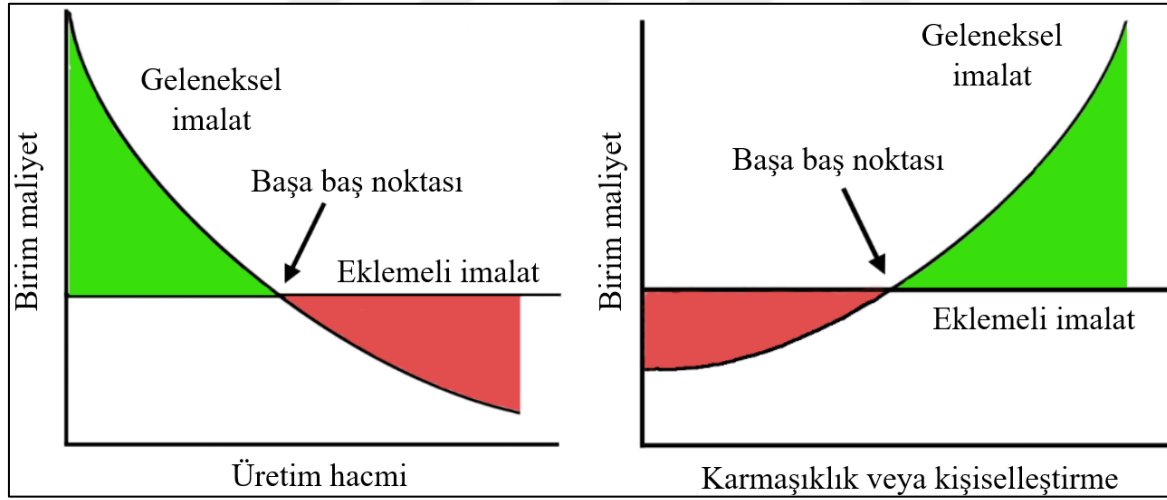
Çizelge 2.1’de geleneksel imalat yöntemleri ile eklemeli imalat yöntemlerinin farklı açılardan karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 2.2’de ise eklemeli imalat ile geleneksel imalat için imalat hacmine ve ürün karmaşıklığına veya kişiselleştirmesine karşı birim imalat maliyetini gösteren grafikler verilmiştir. Eklemeli imalatta birim maliyetin üretim hacmine veya üretilen parçanın karmaşıklığına bağlı olmadığı görülmektedir. Geleneksel imalatta ise birim maliyet bu iki değişkene bağlı olarak değişmektedir. Düşük üretim hacimlerinde eklemeli imalatın maliyeti daha düşük iken üretim hacmi arttıkça geleneksel imalatın birim maliyeti düşmektedir. Üretilen parçanın karmaşıklığı veya kişiselliği arttıkça geleneksel yöntemlerle üretilmesi zorlaşacağı için birim maliyeti artmaktadır.

Çizelge 2.1. Geleneksel ve eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması [3]

	Geleneksel imalat	Eklemeli imalat
İşlem	Döküm, dövme, ekstrüzyon vb.	Geleneksel süreçlerin yeni bir şekilde kullanılması. Örneğin, FDM’de ekstrüzyon, LENS’de mikro döküm
Ekipman kurulumu	Her malzeme ve işlem için özel. Her tasarım yeni bir kurulum veya yeni süreç kontrolleri gerektirir	Birçok malzeme için çok yönlü. Ancak, her yeni malzeme için teknik dikkatlice en iyileştirilmeli ve birçok kez test edilmelidir.
Yeniden üretilebilirlik	Yüksek oranda tekrarlanabilir. Döküm gibi işlemler bazen binlerce parti halinde gerçekleştirilir. İnsan / operatör hatası veya farklılığı daha az	İşlem optimize edildiğinde ve operatörler yetenekli olduğu sürece oldukça tekrarlanabilir. Birçok süreçte insan etkeni çok önemlidir
Üretim hacmi	Çok sayıda üretim için etkilidir. Tüm işlem parça başına maliyeti düşürmek için en iyileştirilmiştir	Düşük hacimli özel üretim için en uygundur. Tek bir parçanın maliyeti yüksek olabilir, ancak geleneksel yöntemler kadar yüksek üretim hacmi tercih edilmez.
Çıktı	Çıktının artması, yüksek başlangıç maliyetleri gerektiren ancak parça başına maliyetleri azaltan bir durumdur.	Çıktının artması, daha fazla makine satın alınması ve aynı anda çalıştırılması anlamına gelir
İkincil işleme	Her zaman gerekli	Bazı yöntemler mükemmel yüzey kalitesi olan parçalar üretebileceğinden her zaman gerekli değildir

Çizelge 2.1 (devam) Geleneksel ve eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması [3]

Isıl işlem	Özellikleri iyileştirmek için birçok kez gereklidir. Örneğin, tavlama işlemi gibi	Genellikle gerekli değildir. Isıl işlem bazen artık gerilmeleri azaltmak ve parçanın sünekliğini arttırmak için yapılır
Çoklu malzeme sistemi	Mümkün değil. Kaynak gibi işlemlere ihtiyaç vardır	Bazı yöntemlerde, gereksinime göre aynı bileşende farklı malzemelerle çok malzemeli üretim yapılabilir
İlk kurulum maliyeti	Genellikle yüksek, ancak parça sayısı arttıkça maliyetler düşmekte	Başlangıç makine maliyetleri yüksek
Hammadde / bakım maliyeti	Yüksek ancak yüksek hacimli üretim için verimli	Malzemeye bağlıdır. Çelik tozları kg başına 20 ile 40 \$ arasında olabilirken, Ti6Al4V tozunun maliyeti 15-20 kat daha fazla olabilmektedir
Özgün tanımlama	Tek tasarım, yüksek başlangıç maliyeti, yüksek üretim hacmi, düşük parça maliyeti	Özel tasarım, yüksek başlangıç maliyeti, parça başına maliyetten bağımsız olarak düşük özel üretim

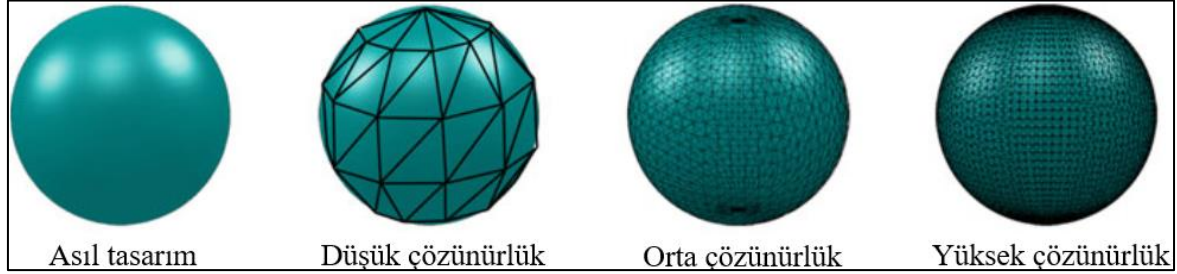


Şekil 2.2. Eklemeli ve geleneksel imalat için üretim hacmine ve ürün karmaşıklığına veya kişiselleştirmesine karşı birim maliyeti [4]

2.1. Eklemeli İmalatın Aşamaları

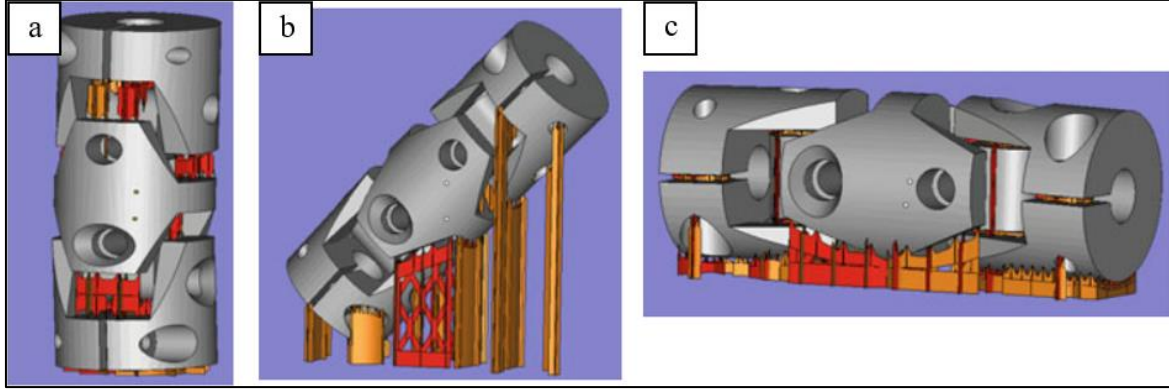
Eklemeli imalat süreci üç boyutlu modelin tasarımı ile başlamaktadır. Tasarlanan modeller eklemeli imalata uygun olmalıdır. Örneğin çok ince yüzeyler bu yöntem için uygun değildir [5, 6]. Daha sonra bu tasarımlar eklemeli imalat makinelerinin tanıyabileceği dosya formatlarına çevrilmelilerdir. Günümüzde çeşitli formatlar olmakla birlikte en çok stereolitografi (STL) dosya formatı kullanılmaktadır. Bu format 3 boyutlu modeli üçgenlere

bölmektedir. Üçgen sayısı arttıkça modelin çözünürlüğü ve dolayısıyla kalitesi artmaktadır (Şekil 2.3). Ancak yine de dosya formatı değişikliği modelin kalitesini düşürmektedir.



Şekil 2.3. STL dosyası çözünürlük örnekleri [1]

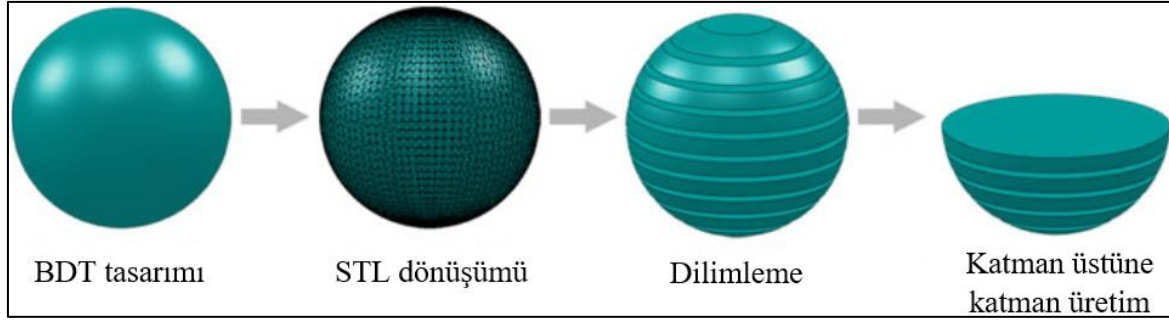
Dönüştürülen STL dosyası eklemeli imalat cihazının yazılımına aktarılır. Burada sanal üretim platformu üzerine en uygun yönlendirme ile konumlandırılır. Yönlendirme üretilen parçanın fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir [7–9]. Modelin şekline veya konumlandırılmasına göre gerekli yüzeylere destek yapıları uygulanır (Şekil 2.4). Bu destek yapıları modelin yatayla 45° 'den az açı yapan yüzeylerine uygulanmaktadır. Böylece üretim esnasında yerçekiminden dolayı o yüzeylerde sarkma tarzı bozulma ihtimali azalacaktır. Özellikle metal toz yataklı imalat sistemleri için destek yapılarının model üzerindeki ısıyı uzaklaştırma gibi önemli bir işlevi daha vardır [10–12]. Destek yapılarının hacmi, geometrisi, konumu ve parçayla temas geometrisi önemli değişkenler olmakla birlikte üretilen parçaya da bağlıdır. Dolayısıyla parçaya uygun destek yapılarının oluşturulması üretimin başarıyla sonuçlanmasında önemli bir ön şart olduğu söylenebilir. Destek yapıları üretimin bir parçası değil yardımcı elemanıdır ve üretim sonrası parçadan ayrılır. Dolayısıyla malzeme tüketimini ve üretim süresini arttırarak maliyeti arttırmaktadır [12, 13]. Bu nedenle destek yapısı oluşturulurken olumlu etkilerinden dolayı gereğinden fazla kullanımının olumsuz etkileri olabileceğini göz ardı etmemek gerekmektedir.



Şekil 2.4. Numunenin konumlandırılmasına göre destek yapıları ve üretime etkisi; a) en az destek, b) destek yapılarının kolay sökülmesi ve c) en kısa üretim süresi [14]

Eklemeli imalat makinesinin yazılımı yardımıyla STL dosyası ince katmanlara dilimlenir. Metal toz yataklı sistemler için katman kalınlıkları genellikle 25 μm ile 100 μm arasında değişmektedir [15]. Katman kalınlığının az olması üretilen parçanın yüzey düzgünlüğünü artırırken üretim hızını düşürmektedir. Katman kalınlıkları gibi üretim değişkenleri makine yazılımı üzerinden ayarlanabilir. Makinedeki yazılım değişkenleri açık veya kapalı olabilmektedir. Açık olanlarda üretim değişkenlerine (katman kalınlığı, tarama stratejisi, tarama hızı, lazer gücü vb.) müdahale edilebilmektedir. Üretim değişkenlerinin de son ürünün fiziksel özelliklerinden mekanik özelliklerine kadar pek çok özelliğine etkisi bulunmaktadır [16–22]. Katman kalınlığı aynı zamanda kullanılan tozun boyutlarına da bağlıdır. İdeal olarak katman kalınlığı ortalama toz boyutundan biraz daha yüksek olmalıdır. Çok kalın katmanlar ise ergimenin tam gerçekleşmemesine neden olabilmektedir [23].

Gaz atmosferinde üretim yapılacaksa gaz basıncı, debi ayarları ile hammaddenin hazneye yüklenmesi gibi işlemler tamamlanıp gerekli tüm kontroller yapıldıktan sonra üretim başlatılır. Bu hazırlık aşaması üretim yöntemine göre değişmektedir. Model, bilgisayar destekli tasarım (BDT) ile tasarlandıktan sonra STL dosyasına çevrilip dilimlere ayrılarak üst üste ince katmanlar halinde üretilir (Şekil 2.5). Üretim süresi pek çok faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemlilerinden birisi parça yüksekliğidir. Katman sayısı parça yüksekliğiyle doğru orantılı olduğundan üretim süresini oldukça fazla etkilemektedir. Üretim saatler hatta günler sürebilir.



Şekil 2.5. Eklemeli imalat süreci [1]

Üretim bittikten sonra son işlemler için parça makineden çıkarılır. Üretim yöntemine bağlı olarak genellikle fazla tozlar veya reçineler temizlenir. Sonrasında destek yapıları çıkarılır. Daha iyi bir yüzey kalitesi veya boyutsal tolerans gerekliliğinde tornalama gibi işlemler yapılabilir. Metal parçalar için ısıtma işlemi gibi üretim sonrası işlemler de yapılabilmektedir.

2.1.1. Eklemeli imalat teknolojileri

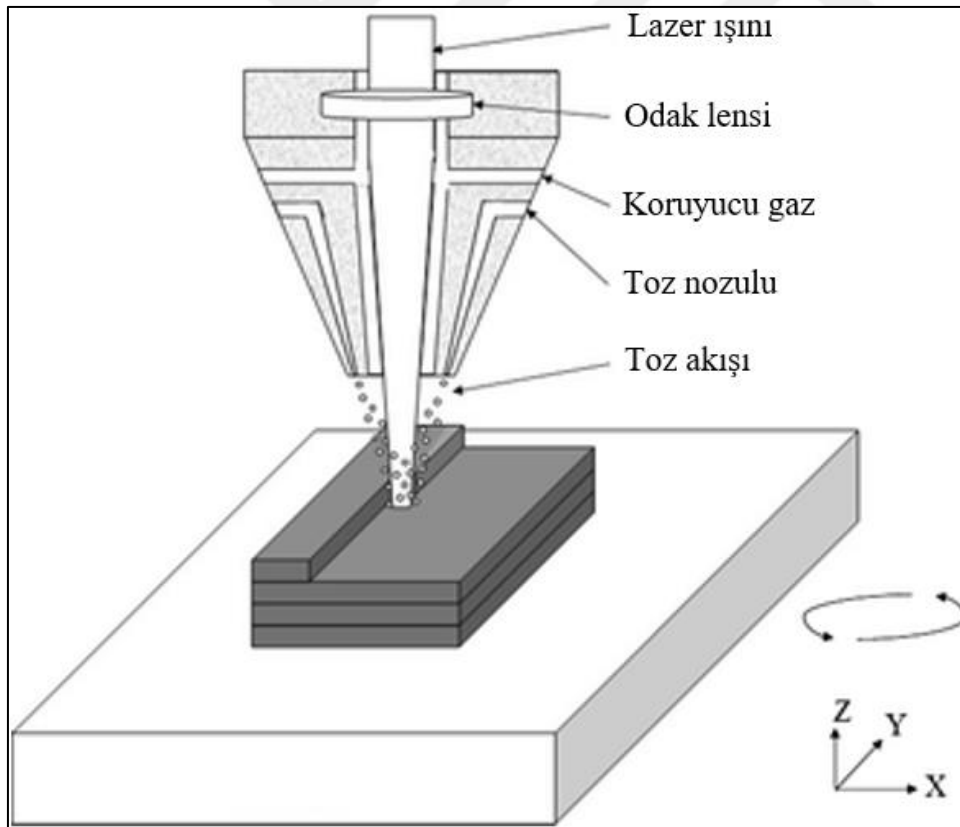
ASTM F2792 standartına göre eklemeli imalat teknolojileri yedi sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar yönlendirilmiş enerji biriktirme (ing. directed energy deposition), tabaka laminasyonu (ing. sheet lamination), kazan fotopolimerizasyonu (ing. vat photopolymerization), bağlayıcı püskürtme (ing. binder jetting), malzeme ekstrüzyonu (ing. material extrusion), malzeme püskürtme (ing. material jetting) ve toz yataklı birleştirmedir (ing. powder bed fusion) [2]. Bu yedi sınıfın genel kullanım alanları Çizelge 2.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. Eklemeli imalat yöntemlerinin uygulama alanları [24]

İşlem	Uygulama
Yönlendirilmiş enerji biriktirme	İlk örnekleme, işlevsel parçalar, metal parçaların onarımı
Tabaka laminasyonu	İlk örnekleme
Kazan fotopolimerizasyonu	İlk örnekleme, yüksek yüzey kaliteli parçalar
Bağlayıcı püskürtme	İlk örnekleme, hassas döküm
Malzeme ekstrüzyonu	Plastik ilk örnekleme
Malzeme püskürtme	Görsel ilk örnekleme
Toz yataklı birleştirme	İşlevsel ilk örnekleme, işlevsel mühendislik parçaları

2.1.2. Yönlendirilmiş enerji biriktirme

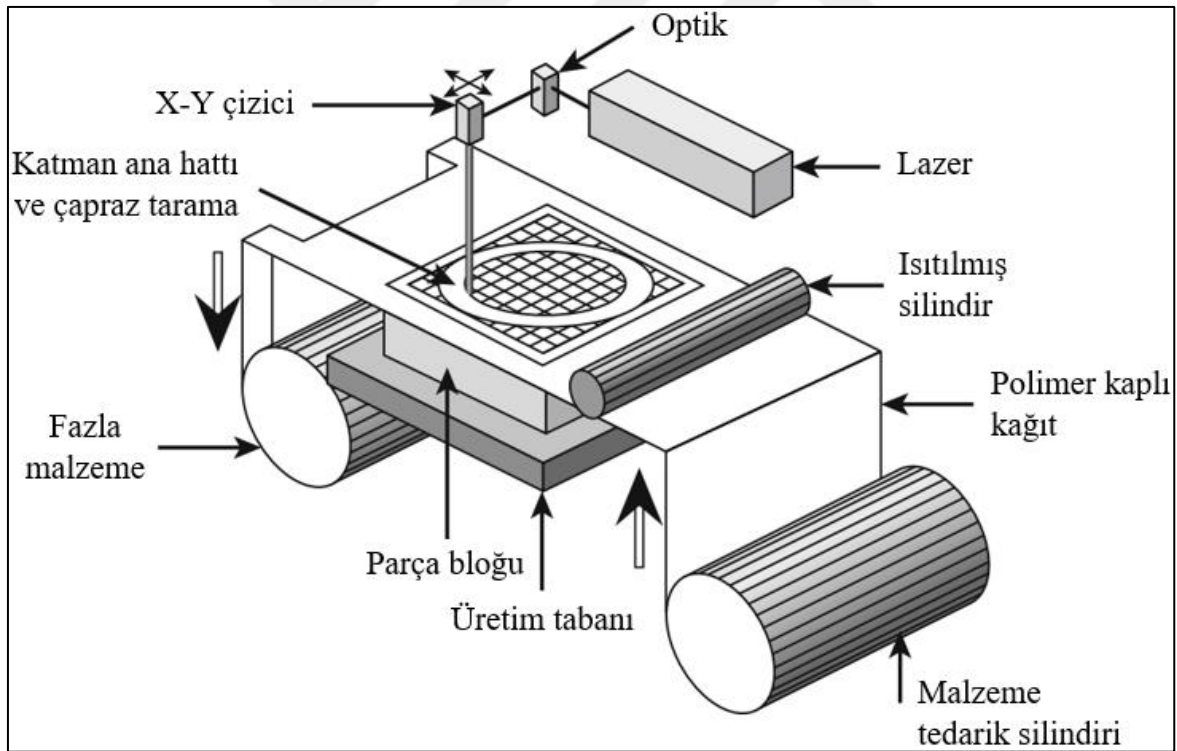
Bir nozul yardımıyla biriktirilen malzeme üzerine onları ergiterek birleştirmek için odaklanmış termal enerjinin kullanıldığı bir yöntemdir. Çok eksenli bir yöntem olması sebebiyle düz olmayan yüzeylerde de uygulanabilir. Malzeme olarak kaynak yapılabilen neredeyse bütün metal malzemeler toz veya tel formunda kullanılabilir. Enerji kaynağı olarak lazer, elektron ışını, plazma ve elektrik ark kullanılmaktadır [25]. Herhangi bir parçaların tamiri veya parçalara yeni malzeme eklenmesi amacıyla kullanılabilir [26, 27]. İstenilen şekle yakın sonuç veren hızlı bir üretim yöntemidir. Bütün eklemeli imalat yöntemleri istenilen şekle yakın sonuç veren yöntemler olarak kabul edilse de diğer yöntemlere göre bu yöntemde üretilen parçalarda daha yüksek yüzey pürüzlülüğü ve daha düşük boyutsal tutarlılık elde edilir. Dolayısıyla çoğu durumda ek işlemler gerektirmektedir [15, 28]. Şekil 2.6'da yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemi [24]

2.1.3. Tabaka laminasyonu

Bir nesne oluşturmak için tabaka şeklindeki malzemelerin birleştirildiği bir yöntemdir. Bu malzemeler kağıt veya polimer film olabilir. Tabakalar halinde serilen malzemeler yapıştırıcı yardımıyla birbirine yapıştırılır ve bir bıçak yardımıyla istenilen ölçülerde kesilir. Genellikle estetik ve görsel amaçlarla kullanılır, malzemesi kağıt veya polimer film olanlar yapısal kullanım için uygun değildir. Yüzey kalitesi çok iyi olmamakla birlikte kumlama ve boyama gibi işlemler ile görünüm iyileştirilebilir. Metal sac levhaların kullanıldığı yöntem de mevcuttur [29]. Alüminyum, paslanmaz çelik, bakır ve titanyum kullanılan malzemelerden bazılarıdır. Bu yöntemde yapıştırma yerine ultrasonik kaynak yapılır. Her katmanda veya üretim sonunda frezelemeye gerek duyulur. Metal erimediği için daha az enerji kullanır. Her katmanda farklı malzemeler kullanılabilir. Düşük maliyetli, hızlı bir yöntemdir [24, 28, 30, 31]. Şekil 2.7’de tabaka laminasyonu yöntemi gösterilmektedir.

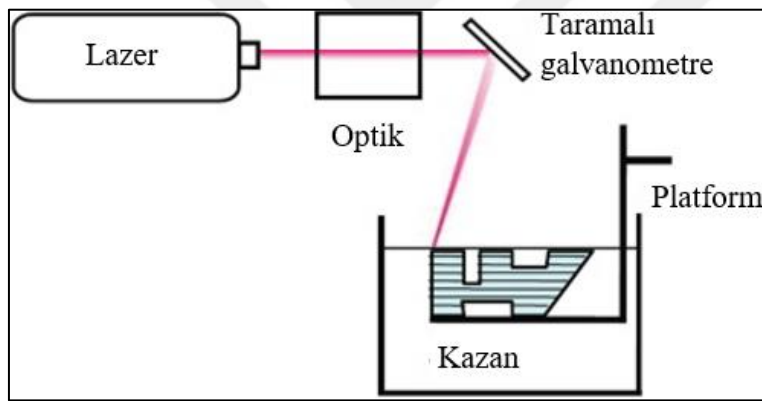


Şekil 2.7. Tabaka laminasyonu yöntemi [30]

2.1.4. Kazan fotopolimerizasyonu

Bir kazan içindeki sıvı fotopolimerin (reçine) ışınlı aktifleştirilen polimerizasyonu ile seçici olarak sertleştirildiği bir yöntemdir. Ultraviyole lazer ışını reçinenin yüzeyini seçici olarak

tarayarak sertleştirir. Tabla katman kalınlığı kadar aşağı iner ve epoksi tüm yüzeyi kaplar. Bu hareket tekrarlanarak istenilen parça elde edilmiş olur. Üsten alta üretim sisteminin yanında alttan üste üretim sistemi de vardır [32, 33]. Bu sistemde lazer ışını reçinenin bulunduğu cam kazanın altından gönderilir. Sonuçta plastik benzeri bir malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu yöntemde oldukça iyi yüzey kalitesi elde edilebilir. Hatta cilalama işlemi sonrası optik berraklık elde edilebildiğinden lens üretiminde dahi kullanılabilir. Üretim bittikten sonra tamamen sertleşmesi için ultraviyole fırında kürleme yapılabilir. Reçine içine seramik tozlarının katıldığı yöntemler de mevcuttur. Bu yöntemle üretilen parçayı fırında sinterlemek gerekmektedir. Bu işlem %15 ile %30 arasında büzölmeye neden olmaktadır. Dolayısıyla tasarım yapılırken dikkat edilmesi gereken bir durumdur. Kazan fotopolimerizasyonu ile üretilen parçaların malzeme özellikleri zamanla değişebilmektedir [31, 32, 34]. Şekil 2.8’de kazan fotopolimerizasyonu yöntemi gösterilmektedir.

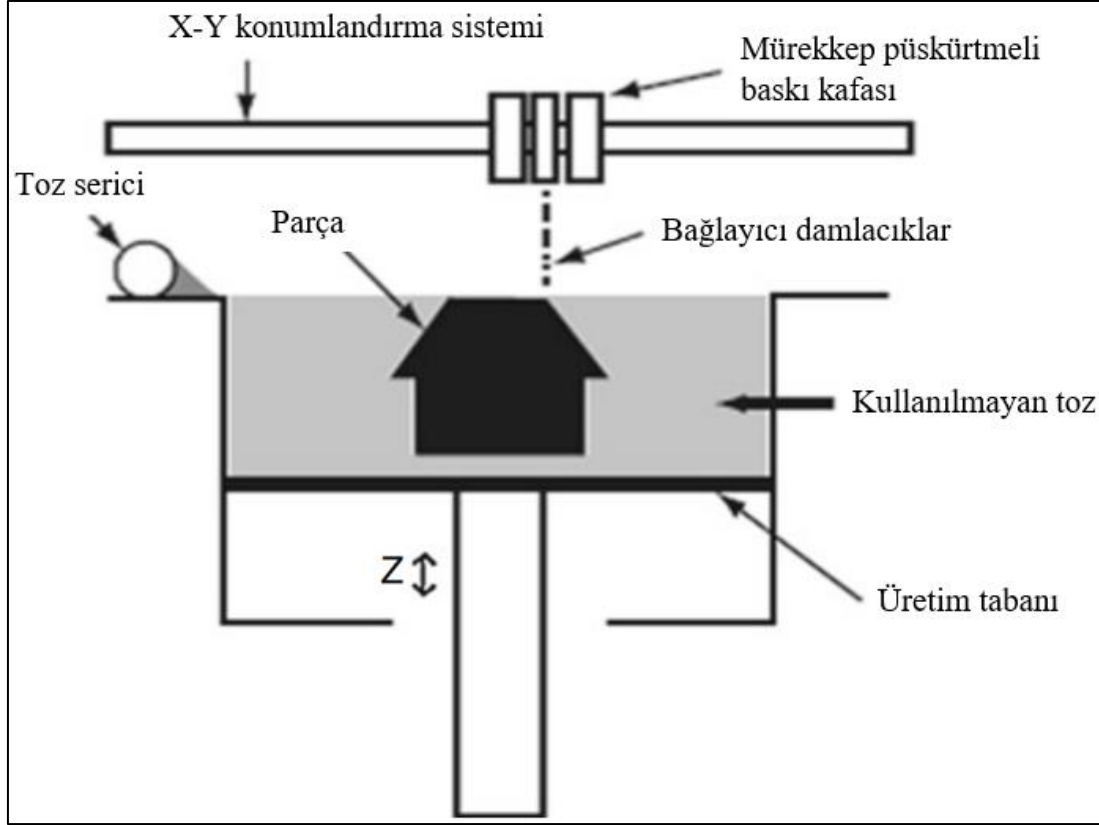


Şekil 2.8. Kazan fotopolimerizasyonu yöntemi [32]

2.1.5. Bağlayıcı püskürtme

Toz malzemeyi birleştirmek için sıvı bağlayıcı malzemenin seçici olarak püskürtüldüğü bir üretim yöntemidir. Üretim tablası üzerindeki toz katmanının istenilen bölgelerine bağlayıcı sıvı püskürtülerek o bölgenin katılaşması sağlanır. Üretim tamamlanana kadar üretim tablası bir katman kalınlığı kadar aşağı iner ve o katmanın üstüne bir katman daha toz serme ve istenilen bölgelere bağlayıcı sıvı püskürtme işlemleri tekrarlanır. Üretim tamamlanınca tabla yukarı hareket eder ve bağlayıcı sıvı püskürtülmeyen bölgelerdeki tozlar temizlenir. Bu yöntemin en avantajlı yönlerinden birisi metal, akrilik, nişasta, şeker, cam, hidroksiapatit, kum, seramik ve alçıtaşı tozu gibi çok çeşitli tozların kullanılabilir olmasıdır. Sanayi kullanımı açısından en kolay eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Döküm için kum kalıp

ve maça, hassas döküm için ise akrilik kalıplar yapılabilir. Akrilik veya alçıtaşı ile renkli parçalar üretilmektedir. Metal malzeme kullanılarak üretilen parçalara sinterleme yapılması gerekmektedir [35–39]. Şekil 2.9’da bağlayıcı püskürtme yöntemi gösterilmektedir.

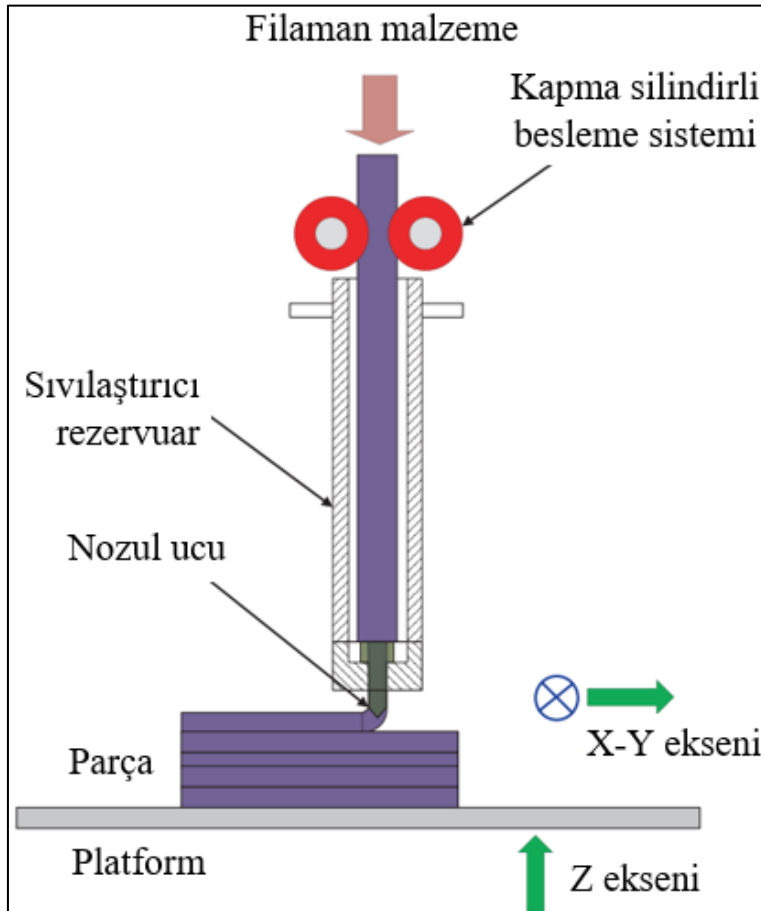


Şekil 2.9. Bağlayıcı püskürtme yöntemi [38]

2.1.6. Malzeme ekstrüzyonu

Malzemenin bir nozul veya delikten seçici olarak dağıtıldığı bir yöntemdir. Bu yöntemin en bilineni ergiyik biriktirmeli modellemedir (ing. fused deposition modelling). Genellikle polimer bir ince tel malzemenin üretim platformu üzerindeki hareketli bir nozulda ısıtılarak dağıtılır. İlk kat bittikten sonra üretim tablasının bir kat kalınlığı kadar aşağı inmesi veya nozulun yukarı çıkması ile diğer katların üretimi tamamlanır. Bazı sistemlerde destek malzemesinin kullanıldığı ikinci bir nozul daha bulunmaktadır. Destek malzemesi üretim tablası ile üretilcek parça arasında destek görevi görmektedir. Sürekli karbon elyafların yanı sıra kırılmış cam, karbon gibi tellerde kullanılabilir. Polimer matris malzeme kırılmış takviye elemanı ile önceden karıştırılmış olarak üretilirken, sürekli takviye

elemanıyla eşzamanlı olarak matrisin ekstrüzyonu da yapılabilir. Ayrıca ince polimer tellerin içine metal tozu katılmış malzemeler de kullanılabilir. Diğer yöntemlere göre biraz daha fazla anizotropik sonuçlar vermektedir. Tabakalar arası bağın zayıflığından dolayı dikey eksenle yatay eksenlere göre daha düşük çekme mukavemeti göstermektedir. Bir diğer zayıf yanı ise bu yöntemle üretilen parçaların eklemeli imalat yöntemleri içerisinde en kötü yüzey kalitesine sahip olmasıdır. Kullanımı kolaydır, hammadde ve cihazın kendisi görece ucuzdur [31, 40–43]. Şekil 2.10’da malzeme ekstrüzyonu yöntemi gösterilmektedir.

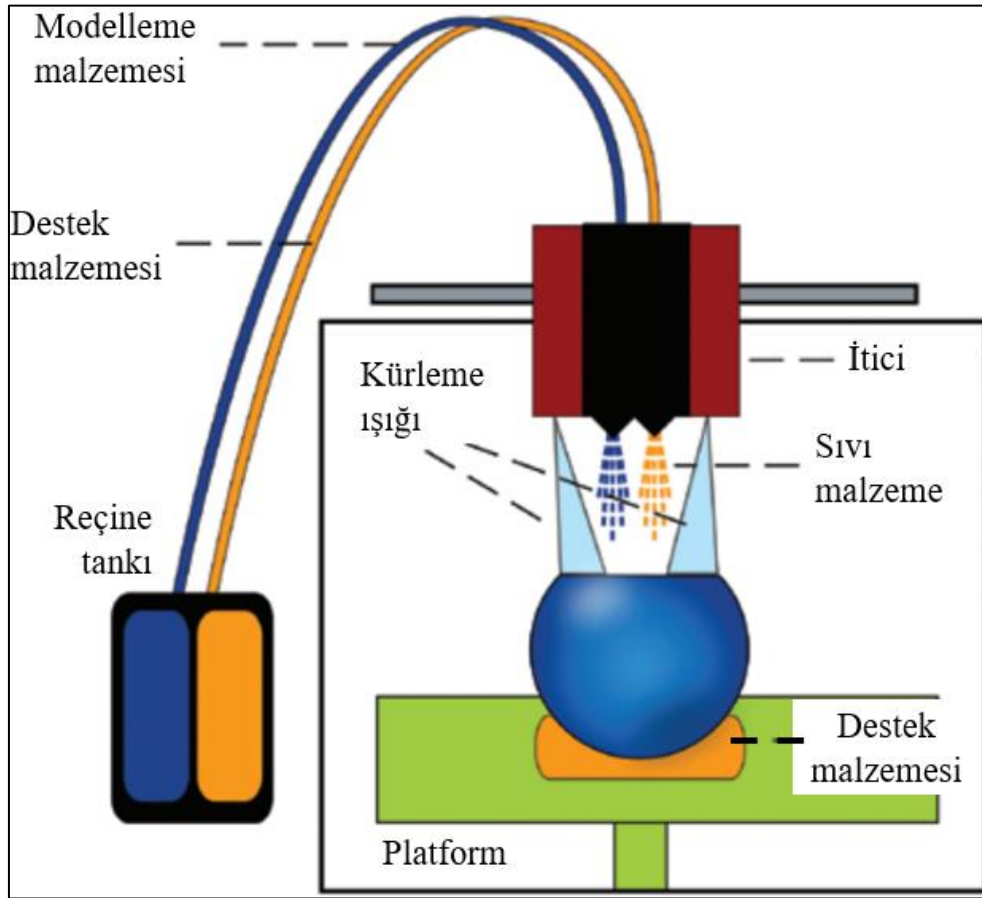


Şekil 2.10. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi [43]

2.1.7. Malzeme püskürtme

Yapı malzemesi damlacıklarının seçici olarak püskürtüldüğü bir üretim yöntemidir. Tıpkı mürekkep püskürtmeli yazıcılar gibi bir yazma başlığına sahiptir. Bu başlık sıvı fotopolimer malzemeyi damlacıklar halinde püskürtürken aynı başlığa bağlı ultraviyole ışık kaynağı da bu damlacıkları kürlemektedir. Bu şekilde parça katman katman yazdırılmış olur. Gerekli görülen yerlerde başlık destek yapısı da püskürtebilmektedir. Bu yöntemde diğer eklemeli

imalat yöntemlerine göre daha iyi yüzey kalitesine sahip parçalar üretilebilmektedir. Dolayısıyla hassas döküm modelleri oluşturulmak için uygundur. Aynı anda farklı malzemeler kullanılarak da üretim yapabilmek mümkündür. Üretim sonrası kürelemeye ihtiyaç duyulmamaktadır. Destek yapısı genellikle su jeti ile uzaklaştırılır. Güneş ışını gibi ultraviyole ışınlardan etkilenebilmektedir. Uzun süre maruz kaldığında malzeme özellikleri ve renkleri değişebilmektedir [39, 44, 45]. Şekil 2.11’de malzeme püskürtme yöntemi gösterilmektedir.

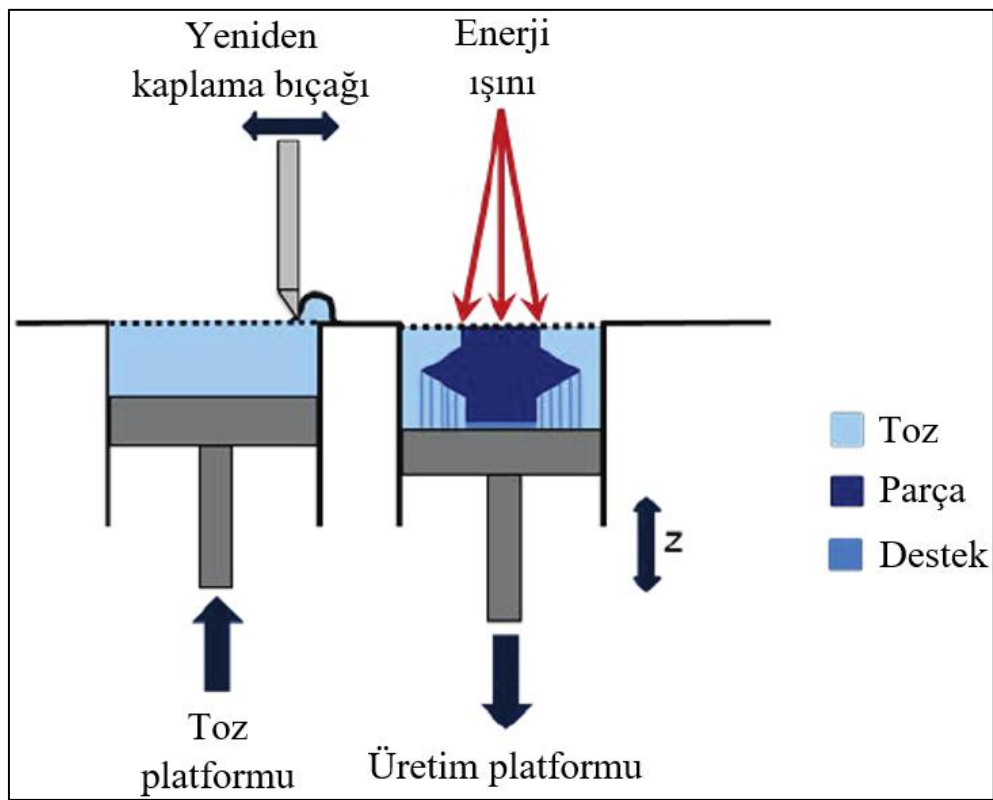


Şekil 2.11. Malzeme püskürtme yöntemi [46]

2.1.8. Toz yataklı birleştirme

Termal enerjinin bir toz yatağının bölgelerini seçici olarak ergittiği bir yöntemdir. Enerji kaynağı olarak lazer veya elektron ışını kullanılmaktadır. Bu sistemde tozlar bir serici yardımıyla üretim tablasına bir katman kalınlığında serilir. Enerji kaynağı parçayı oluşturmak için seçici olarak tozları ertirir. Sonra üretim tablası bir katman kalınlığı kadar aşağı hareket eder. Toz besleme haznesi ise aynı oranda yukarı hareket eder ve serici yeni

toz katmanını bir önceki katmanın üstüne serer. Enerji kaynağı bu katmandaki tozu ergitirken bir önceki katmanla da bağın oluşmasını sağlar. Bu işlemler tekrar ederek parça üretilmiş olur. Tabla ile parça arasında destek yapısı bulunmaktadır. Destek yapısı, üç açıdan kritik bir rol oynar; birincisi, parçanın sarkan bölümlerinin ağırlığını destekler, ikincisi, aşırı ısınmayı önlemek için ısıyı dağıtır ve üçüncüsü, artık gerilmelerden kaynaklanan beklenmedik sapmaları önlemek için parçayı alt tabakaya sabitler [47, 48]. Polimer ve metal malzemeler kullanılabilir [49]. Şekil 2.12’de toz yataklı birleştirme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Toz yataklı birleştirme yöntemi [50]

Seçici lazer ergitme

Seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi metal toz yataklı birleştirme yöntemlerinden biridir. Yöntem 1990’lı yıllarda Almanya’da geliştirilmiştir. Bu yöntem ile neredeyse tam yoğunluklu ve yüksek boyut hassasiyetli karmaşık yapılar elde edilebilmektedir. Döküm gibi geleneksel yöntemlere göre üstün özellikler gösterebilmektedir. Ancak lazer ışın nokta büyüklüğü, üretim aşamasında oluşan önceden tahmin edilemeyen ve rasgele oluşan mikroyapısal ve metalürjik kusurlar, hızlı soğuma nedeniyle oluşabilecek kalıcı gerilmeler

gibi olumsuz yanları da bulunmaktadır [51]. Üretim argon, nitrojen ve helyum gibi koruyucu inert gaz atmosferi altında yapılmaktadır [52, 53]. Koruyucu atmosfer hem oksidasyonu hem de kıvılcım oluşumunu engellemektedir [54].

SLE yönteminde lazere bağlı (lazer gücü, ışın boyutu, lazer atım süresi, lazer atım frekansı vb.), taramaya bağlı (tarama hızı, tarama aralığı ve tarama deseni), toza bağlı (şekli, boyutu ve dağılımı, toz yatağı yoğunluğu, tabaka kalınlığı, malzeme özellikleri vs.) ve sıcaklığa bağlı (toz yatağı sıcaklığı, toz besleyici sıcaklığı, sıcaklık tekdüzeliği vs.) pek çok üretim değişkeni bulunmaktadır [49]. Bunların yanı sıra üretim yönü, numunenin tabla üzerindeki konumu ve koruyucu atmosfer ortamı ile atmosferin yoğunluğunun da üretime etkisi olabileceği söylenebilir [55, 56]. SLE sürecini etkileyebilecek 130'dan fazla değişken olduğu tahmin edilmektedir ve bu değişkenlerin yaklaşık 13'ünün, üretilen parçaların kalite özellikleri için çok önemli olduğu bildirilmiştir [56]. Her bir değişken üretilen parçayı hem fiziksel hem de mekanik özellikleri açısından etkileyebilmektedir. Üretim değişkenlerini en iyileştirme üretim çıktılarının geliştirilmesi için önem arz etmektedir [57]. Üretim esnasında parçanın herhangi bir yerinin veya kolonların yatayla olan eğim açısının en az 45° olması gerekmektedir [58]. Bu eğim açısının 30° ve altı olması durumunda parçanın o bölgesinde ciddi bozukluklar oluşabilmektedir [59]. Gözenekli yapıların üretiminde kolon kalınlıkları da önem arz etmektedir. Üretilebilirlik açısından özel bir önlem veya en iyileştirme yapılmazsa kolon kalınlıkları en az 200-300 μm olmalıdır [60, 61].

Bu yöntemde tasarım ile üretim arasında boyutsal olarak bazı farklılıklar oluşabilmektedir. Ergime sonrası büzülme, ergimemiş tozların yüzeye yapışması ve yatayla düşük açılar yapan kolonlardaki sarkmalar bu farklılıklara örnek olarak gösterilebilir [62]. Dik kolonlar ile yatay kolonların tasarımla üretim arasındaki boyutsal farklılıkları aynı değildir. Yatay kolonlar üretim esnasında ısının etkisiyle alt katmandaki tozlara daha çok yapışma eğilimi göstermektedir. Dolayısıyla yatay kolonlarda boyutsal sapmalar ve yüzey pürüzlülüğü daha yüksek olmaktadır [63, 64]. Eklemeli imalatla eğimli yüzeylerde katmanlar arasında merdivene benzer yapı oluşmakta ve bu oluşum boyutsal sapmaları arttırabilmektedir [65]. Üretim sonrası süreçlerle yüzey kalitesi iyileştirilebilmektedir [51, 66]. Yüzey pürüzlülüğü ise her zaman olumsuz bir özellik olmayabilir. Biyomedikal uygulamalarda hücre büyümesi yüzey pürüzlülüğü arttıkça artmaktadır [67]. Titanyum alaşımları, paslanmaz çelik ve kobalt krom alaşımları biyomedikal uygulamalarda sıklıkla kullanılan biyouyumlu malzemelerdir

[68–73]. Bunların yanında SLE ile üretimde demir [74–76], tantalum [77], çinko [78, 79] ve magnezyum [80, 81] gibi çeşitli tozlar da kullanılmaktadır.

Ti6Al4V tozunun yüksek biyouyumluluğu nedeniyle implantlarda kullanımı öne çıkmaktadır [82, 83]. Ti6Al4V tozunun elastisite modülünün yüksek olması kemikle uyumunu olumsuz etkilemektedir [84]. Elastisite modülü farklılığı implant ve kemik arasında gerilme kalkanının oluşmasında sebep olabilmektedir [85, 86]. Ancak bu durum gözenekli yapıların oluşturulmasıyla implantın elastisite modülünü kemiğinkine yaklaştırıp gerilme kalkanı etkisi azaltılarak kemiğe uyumunu arttırılabilmektedir [85–87].

2.2. Eklemeli İmalatın Kullanım Alanları

Eklemeli imalatın kullanım alanları her geçen gün genişlemektedir. İlk başlarda daha çok hızlı prototipleme için kullanılmaya başlansa da günümüzde üretilen parçaların yarıdan fazlası gerçek parçalardan oluşmaktadır. Eklemeli imalat kişisel ve endüstriyel olmak üzere iki ana kol üzerinde büyümeye devam etmektedir. Kişisel kullanıma uygun masaüstü üç boyutlu yazıcıların gerek kendileri gerekse sarf malzemeleri görece uygun fiyatlardadır [88]. Bu sayede bireysel kullanıcılar istedikleri tasarımları yaparak onları üretebilmektedir. İnternet ortamında oluşan topluluklar sayesinde işlevsel aletlerden süs eşyalarına kadar çok büyük bir yelpazede tasarım arşivleri oluşturulmuştur [89–91]. Bu tasarımların doğrudan üretilebileceği gibi üzerinde değişiklikler yaparak türevlerini de üretmek mümkün olmaktadır. Endüstriyel kullanımda genel olarak daha pahalı cihazlar ve hammaddeler kullanılmaktadır. Cihazlar ise hızla gelişmekte ve malzeme çeşitliliği gitgide artmaktadır. Ancak yine de eklemeli imalat geleneksel imalatın yerini tamamen alamayacağı düşünülmektedir [92]. Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te sırasıyla eklemeli imalatın uygulama alanları ve bu yöntemi kullanan endüstri alanları verilmiştir.

Bu parçalar vücuda en iyi uyumu sağlayacak şekilde tasarlanabilmekte ve mükemmel kemik içi gelişim ile implant-kemik bağı sağlamaktadır [95].

Katı hacimlerin, yakın mukavemete sahip gözenekli yapılarla değiştirilmesi gibi eklemeli imalatın parçaları hafifletme potansiyeli, havacılık ve uzay endüstrisinin de ilgisini çekmektedir [96, 97]. Boşluklu yapılar ile soğutma kanalları oluşturulabilmesi de çeşitli endüstrilerdeki uygulamalar için bir seçenek olabilmektedir [98, 99]. Uzay mekiklerindeki termal kontrolcüler elektronik aksamın ısını kontrol etme noktasında hayati öneme sahiptir. Geleneksel yöntemlerle üretilen kontrolcüye göre SLE yöntemi ile üretilen gözenekli yapının aynı ağırlıkta ısı kapasitesi %50 artmıştır [51].

2.3. Eklemeli İmalatın Güçlü ve Zayıf Yönleri

Eklemeli imalat yöntemleriyle geleneksel imalatla üretilmesi mümkün olmayan ve hayal gücünü zorlayabilecek tasarımdaki parçaların üretilmesi mümkündür. Ancak eklemeli imalat bütün üretim kısıtlamalarını ortadan kaldırmamaktadır. Her üretim yönteminde olduğu gibi eklemeli imalatın da güçlü ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Bu yöntemi en verimli şekilde kullanmak için onun güçlü ve zayıf yönlerini bilerek uygun tasarımların yapılması gerekmektedir. Bu yöntem özellikle karmaşık şekilli parçaların üretilmesi konusunda diğer yöntemlere üstünlük sağlamaktadır. Parçaların karmaşıklığı arttıkça geleneksel yöntemlerle üretimin maliyeti artmakta ve bir noktadan sonra ise üretimi mümkün olamamaktadır. Eklemeli imalatla ise birim maliyet parçanın karmaşıklığıyla değişmemektedir (Şekil 2.2). Ancak diğer yöntemlerle üretilebilecek basit şekilli parçaların eklemeli imalat ile üretilmesi daha pahalıya gelebilmektedir. Bununla birlikte basit şekilli parçaların tasarımının en iyileştirilmesi yapılırsa daha ucuz ve daha hafif olarak üretilmesi mümkündür. Tasarım en iyileştirmesi yeteri kadar mekanik özellikleri sağlayacak şekilde parçadan mümkün olan en fazla malzemenin çıkarılmasıdır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılabilmektedir. Tasarım en iyileştirmesi geleneksel imalat yöntemleri için de kullanılan bir yöntemdir. Ancak ileri derecede karmaşık parçaların üretimi mümkün olmadığı için en iyileştirme belli ölçülerde yapılabilmektedir. Eklemeli imalat sayesinde en iyileştirme süreci de gelişim göstermektedir. Bu sayede örneğin otomotiv, havacılık ve uzay sanayi gibi hafifliğin çok önemli olduğu sektörlerde istenilen mekanik özellikleri veren daha hafif parçalar üretilmektedir [100]. Bu gelişimlerin üretim süreçlerine doğrudan katkılarının yanında sürdürülebilirlik ve çevresel faktörlere

dolaylı katkıları ve üstünlükleri de bulunmaktadır [101, 102]. Çizelge 2.3'te eklemeli imalatın üstünlükleri ve kısıtlamaları özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Eklemeli imalatın üstünlükleri ve kısıtlamaları [103]

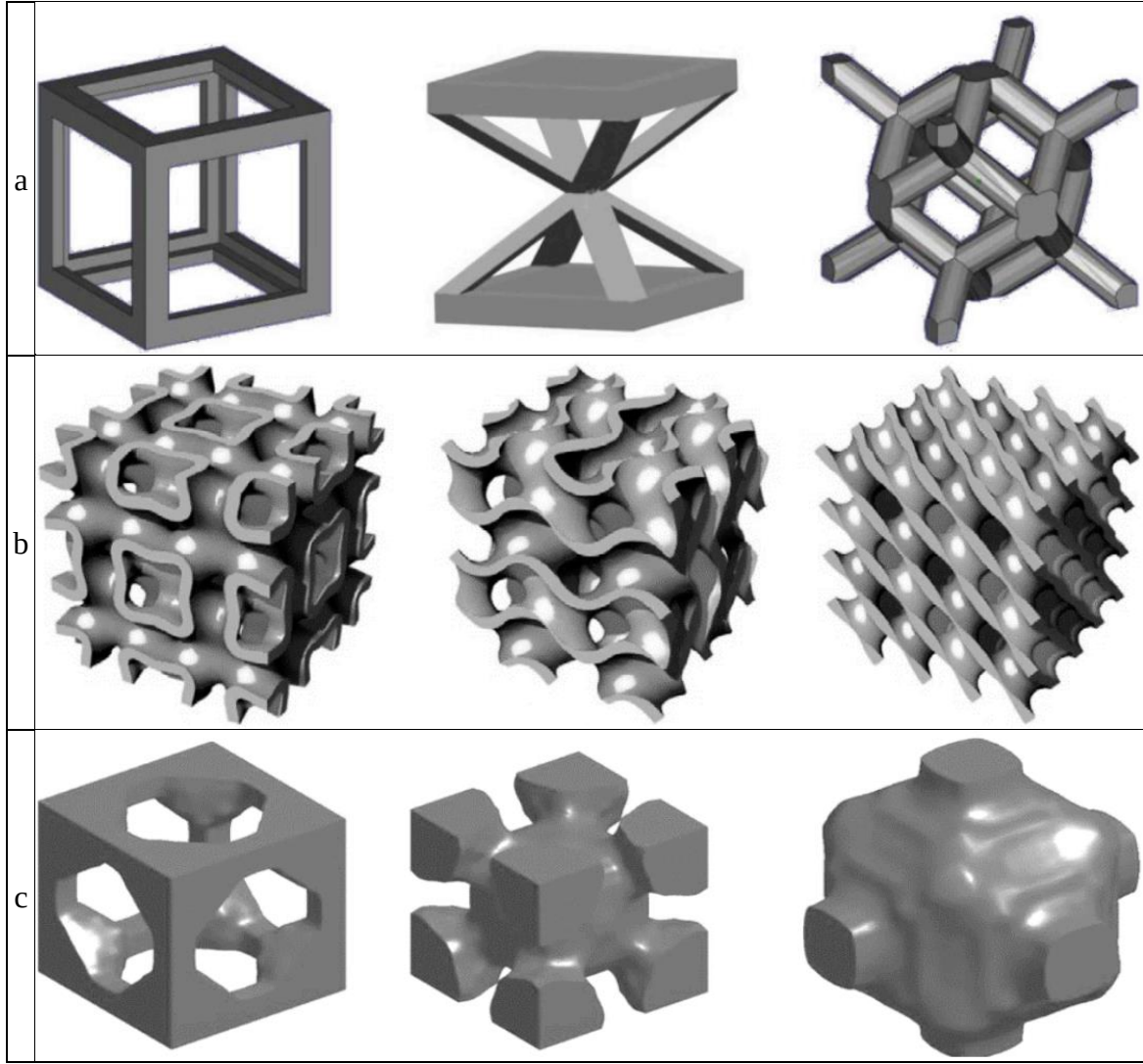
Üstünlükler	Kısıtlamalar
Tasarım özgürlüğü - Eklemeli imalat ile neredeyse her şekle sahip nesneler üretilebilmektedir	Düşük üretim hızı – Üretim süreçlerindeki çeşitli verimsizlikler üretim hızını etkilemektedir
Maliyetsiz karmaşıklık - Artan nesne karmaşıklığı, üretim maliyetlerini yalnızca marjinal olarak artırabilmektedir	Yüksek üretim maliyeti - Yavaş üretim hızı ve yüksek metal tozu maliyeti, toplam maliyeti arttırmaktadır
Takım işleminin ortadan kaldırılma potansiyeli - Maliyetli ve zaman alıcı aletler olmadan doğrudan üretim mümkündür	Üretim değişkenlerinin ayarlanması için önemli ölçüde çaba gereksinimi - Malzeme, süreç ve diğer değişkenlerden oluşan yaklaşık 180 karmaşık değişken bulunmaktadır
Hafif tasarım - Eklemeli imalat, topolojik en iyileştirme yoluyla ağırlık azaltımı sağlayabilmektedir	Üretim süreci - Parça izotropisi, yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk düşük olabilmektedir ve bu da ek işlemler gerektirebilmektedir
Parça birleştirme - Parçaları tek bir bileşende birleştirilerek montaj gereksinimlerini azaltmaktadır, hareketli parçalar sayesinde tamamlanmış montajlar bile mümkün olabilmektedir	Kesintili üretim süreci - Entegre olmayan sistemlerin kullanılması ölçek ekonomisini önleyebilmektedir
Üretim adımlarının ortadan kaldırılması - Karmaşık nesneler bile tek bir işlem adımıyla üretilebilmektedir	Sınırlı bileşen boyutu - Üretilebilir nesnenin boyutu hazne boyutuyla sınırlıdır

2.4. Gözenekli Yapılar

Gözenekli yapılar, kafes yapılar ve hücresel yapılar literatürde sıklıkla birbiri yerine kullanılan terimlerdir. Bu yapılar genellikle gözenek yapısına (açık, kapalı) ve yapıyı oluşturan birim hücre yapısına (rasgele-tekrarlı) göre sınıflandırılırlar [104, 105]. Gözenekli yapıların ısı eşanjörleri, filtreler, susturucular ve ses emiciler, yük taşıyan bileşenler, havacılık, otomotiv, darbe ve patlamaya dayanıklı yapılar ile biyomedikal implantlar da dahil olmak üzere çok çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır [104–106].

Geleneksel yöntemlerle de çeşitli gözenekli yapılar oluşturulabilmektedir [107–112]. Ancak eklemeli imalat yöntemleri ile geleneksel yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan gözenekli yapılar elde edilebilir. Gözenekli yapılar üçe ayrılmıştır: kör, yarı açık ve boydan boya gözenek. Kör gözenek kapalı gözenek olarak adlandırılırken, boydan boya veya yarı açık gözenek ise açık gözenek olarak adlandırılır [113]. Geleneksel yöntemler ile oluşturulan gözenekli yapılardaki gözenekler rasgele dağılım göstermektedir [114, 115]. Rasgele dağılım ise mekanik özelliklerde tekrarlanabilirlik ve izotropiklik konusunda olumsuzluklara yol açabilmektedir [116]. Ayrıca oluşan yapılarda kontrol dışı kapalı ya da açık gözenekler oluşabilmektedir. Ancak eklemeli imalat ile gözenekli yapılar üzerinde tam kontrol sağlanarak birbirini tekrar eden birim hücre yapıları oluşturmak mümkün olmuştur.

Doku mühendisliği ve kemik yapılarında kullanılan gözenekli yapılar genellikle birim hücre tasarımına göre sınıflandırılırlar [104]. Bu tasarımlar CAD tabanlı [117–119], yüzey tabanlı [118–120] ve topoloji tabanlı [119, 121–123] birim hücreler olarak üç gruba ayrılabilir (Şekil 2.15). Birim hücre yapısı, birim hücre boyutu ve kolon kalınlığı gözenekli yapıların değişkenleri olarak söylenebilir. Her birinin üzerinde yapılacak herhangi bir değişiklik gözenek boyutunu, hacimsel boşluk oranını, ağırlığını, akustik, elektrik ve mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir [51]. Birim hücre yapısı olarak kübik, elmas, sekizyüzlü, hacim merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik gibi pek çok yapı bulunmaktadır [105, 124]. Tek bir yapının farklı eksenlerde döndürülmesi ile farklı yapılar oluşturabilmek mümkündür [125]. Gerektiğinde bu yapılara kolon ekleme-çıkarma yapılarak türevleri oluşturulabilmektedir [126]. Var olan tasarımlar ve bu tasarımlardan türetilen yapıların yanında sıfırdan tasarlanabilecek yeni birim hücre yapıları da hesaba katıldığında sınırsız birim hücre yapısı olasılığından söz edilebilir. Birim hücre boyutu bütün gözenekli yapıyı oluşturacak tekrar eden yapının boyutudur. Kolon kalınlığı ise birim hücre boyutundaki kolonların kalınlığı ifade eder. Birim hücre boyutu aynı tutularak kolon kalınlığı arttırılırsa hacimsel boşluk oranı düşecektir. Kolon kalınlığını aynı tutarak birim hücre boyutu büyütülürse hacimsel boşluk oranı artacaktır.

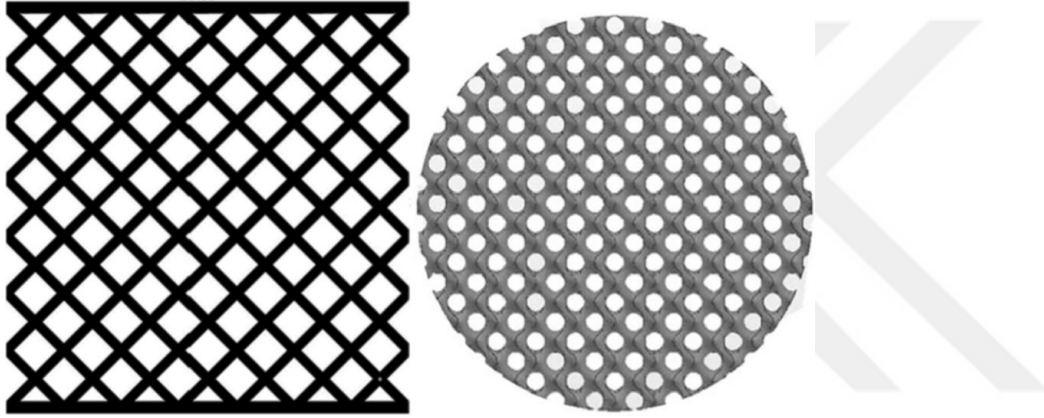


Şekil 2.15. Biyomedikal implantlarda kullanılan gözenekli yapıların farklı birim hücre tasarımları a) CAD tabanlı, b) yüzey tabanlı ve c) topoloji tabanlı birim hücreler [104]

Gözenekli yapılar hafiflikleri ve yüksek özgül mukavemetleri sayesinde oldukça dikkat çekmektedir [51, 82]. Bu yapıların gösterdiği deformasyon davranışları onların enerji sönümleme uygulamalarında da kullanımlarının önünü açmaktadır [127]. Gözenekli yapılar genelde eğilme baskın ve gerilme baskın olmak üzere iki farklı mekanik davranış göstermektedirler [104]. Gerilme baskın yapıya sahip birim hücrelerden oluşan yapılar eğilme baskın olanlara göre daha dayanıklı olduğu söylenebilir [128]. Yapının hangi davranışı göstereceği birim hücreyi oluşturan kolonlara bağlı olarak değişebilmektedir [129]. Gözenekli yapıları, birim hücrenin yapı içerisindeki tekrar durumuna göre tekdüze ve değişken gözenekli yapılar olarak iki başlıkta incelemek mümkündür.

2.4.1. Tekdüze gözenekli yapılar

Tekdüze gözenekli yapılar, birbirini tekrar eden birim hücrelerden oluşan yapılardır (Şekil 2.16). Bu yapılarda birim hücre yapısı, birim hücre boyutu ve kolon kalınlığı yapının her yerinde aynıdır. Tekdüze gözenekli yapılar literatürde sıkça kullanılmaktadır [130–132]. Yapıyı oluşturan birim hücrenin boyutu ve kolon kalınlığı gibi değişkenlerinin aynı olması bütün yapının homojen olmasını sağlamaktadır. Ancak bu homojen yapı özellikle kemik gibi değişken gözenekli yapılar için üretilecek implantlar söz konusu olduğunda uygun olmayabilmektedir [75].

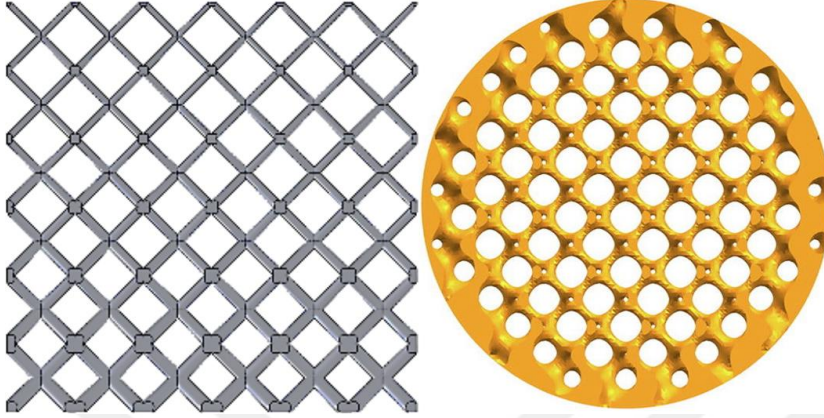


Şekil 2.16. Tekdüze gözenekli yapı örnekleri [133, 134]

2.4.2. Değişken gözenekli yapılar

Değişken gözenekli yapılar, birbirini tekrar eden birim hücre yapılarının değişkenlerinden bir ya da birden fazlasının, yapının belirli bölgelerinde farklı olduğu yapılardır (Şekil 2.17). Genellikle aksel ve radyal olmak üzere iki yönde bu değişkenlik oluşturulmakla birlikte değişken yapıyı oluşturmada bir sınır bulunmamaktadır. Değişken yapılar aşamalı geçişli [135, 136], sürekli geçişli [137, 138] veya hibrit [139, 140] olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Birim hücre yapısı, birim hücre boyutu ve kolon kalınlığından birini veya birkaçını değiştirerek değişken gözenekli yapı oluşturulabilmektedir [139–145]. Ayrıca birim hücre yapısı içerisindeki kolonlar arasındaki açılar değiştirilerek de böyle bir yapı tasarlanabilmektedir [138]. Kolonlar arasındaki açı değiştirildiğinde birim hücre boyutlarından biri değiştirilmiş olacaktır ki bu da temel de birim hücre boyutu değişikliği sayılabilir. Değişken gözenekli yapı oluşturmada açı değişikliği ve birim hücre yapısı değişikliği sık kullanılan yöntemler değillerdir. Birim hücre boyutunu ve/veya kolon

kalınlığını değiştirmek daha fazla tercih edilen yöntemler olarak öne çıkmaktadır. [82, 144, 145].



Şekil 2.17. Değişken gözenekli yapı örnekleri [136, 146]

Değişken gözenekli yapılar işlevsel değişken gözenekli yapılar olarak da adlandırılmaktadır. Bu yapıların tasarımı sadece biçimsel olarak kemik benzeri bir yapı oluşturma amacı taşımamaktadır. Aynı zamanda değişken gözenekli yapılar şeklinde tasarlanan implantlar, parçalı kemik hasarı iyileşmesine ve kemik yenilenmesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır [52, 75, 82]. İmplantların besin geçirimini ve hücre canlılığını kolaylaştırmak için yüksek seviyede gözenekliliğe ve geçirgenliğe sahip olması gerekmektedir [138, 147]. Ancak yüksek gözeneklilik nedeniyle implantlar yetersiz dayanım sergileyebilmektedir [147, 148]. Birbirine zıt olan bu özellikleri tekdüze gözenekli yapılar ile sağlamak oldukça zordur. Biçimsel benzerliğin yanında mekanik özelliklerinin de kemik yapısına benzerliği değişken gözenekli yapıların önemli bir özelliğidir. Kemik benzeri biyomalzeme için tasarlanan yapının uyumluluk açısından en önemli mekanik özelliğinin elastisite modülü olduğu söylenebilir [147]. İmplantlarda kullanılan Ti6Al4V, CoCr vb. metal malzemelerin elastisite modülü ise kemik dokusuna (0,1-27 GPa) [149–154] oranla oldukça yüksektir [155]. Bu fark gelen yükün çoğunun implant tarafından taşınmasına sebep olur ki bu da çevresindeki kemik dokunun bozulmasına neden olabilmektedir. Bu durum gerilme kalkanı etkisi olarak bilinir [52, 83, 147]. Dolayısıyla parçalı kemik hasarlarında kemikle temas edecek implantın temas ettiği bölgeyle benzer boşluklu yapı ve mekanik özellikler gösterebilmesi, tekdüze gözenekli yapıların kullanılmasıyla sınırlı ölçüde başarılabilirken değişken gözenekli yapı ile ileri derecede gerçekleştirilebilmektedir [52, 82, 156]. Değişken gözenekli yapılar, tekdüze yapılara göre daha yüksek mukavemet, yorulma dayanımı, süneklik ve enerji soğurumu sığasına sahiptir [148, 156, 157]. Değişken gözenekli yapı

aşamalı geçişli olsa bile basma yükü altında düzgün ve sürekli deformasyon davranışı göstermektedir [75, 82, 144]. Mekanik özelliklerinin yanında belirli zaman aralığındaki hücre büyümesi gibi özellikler açısından da tekdüze yapılara göre daha başarılıdır [83].

2.5. Literatür Taraması

2.5.1. Basma deneyi

Yan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 2 mm ile 8 mm arasında değişen birim hücre boyutlarından oluşan gözenekli yapıları SLE yöntemiyle üretmiş, mikro-BT ve basma testi ile numunelerin yapısını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Tasarlanan numunelerin hacim oranı %15 olarak belirlenmiş ve bunu farklı birim hücre boyutlarında sağlayabilmek için kolon kalınlıklarını değiştirmişlerdir. SEM görüntülerine göre kolonlar üzerinde 1 μm 'den daha az genişlikte ve 20 μm 'den daha az uzunlukta çatlakların oluşabildiğini ve bunun da SLE ile üretimde meydana gelen artık gerilmelerden dolayı olabileceğini bildirmişlerdir. Yoğunluk ölçüm sonuçlarına göre kolon kalınlığı yüksek olan numunenin kolon içi bağıl yoğunluğu %90,6 olarak bulunurken daha düşük kolon kalınlığında ise bu oran %99,5 olarak bulunmuştur. Bunun nedenini küçük kolon kalınlıklarında üretim esnasında daha kısa oluşan lazer tarama vektör uzunluklarına bağlamışlardır. Tarama alanı küçüldükçe daha kısa tarama vektör uzunluklarının oluşacağını, bunun da bitişik taramalarda daha hızlı tarama ile taranan alanda daha yüksek sıcaklıkların oluşmasına neden olarak daha iyi bir ergitme elde edilebildiğini belirtmişlerdir. Basma deneyi sonucunda elde edilen gerilme gerinim eğrisinin en başında, doğrusal olmayan ve yukarı doğru içbükey olan bir başlangıç bölümü olduğunu, bunun da desteklerin taban plakasından kesildiklerinde az miktarda da olsa bozulmasından veya gözenekli yapının üst yüzeyinin düzensizliğinden kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir. Gerilme gerinim eğrisinin test boyunca sabit ve düzgün bir deformasyonda ilerlediğini ve gevrek bir kırılmanın belirtilerinin olmadığını belirtmişlerdir [158].

Ahmadi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada altı farklı birim hücre yapısı kullanarak oluşturdukları tekdüze gözenekli yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikro-BT sonuçlarına göre tasarımla üretim arasında 300 μm 'ye kadar artışlar rapor edilmiştir. Basma deneyi sonucuna göre dikey kolonlara sahip numunelerde bir kolonun yıkılmasının bütün birim hücrenin yıkılmasına yol açtığı belirlenmiştir. Bu yıkım esnasında gerilme-gerinim

eğrisindeki ani düşüşlerin meydana geldiği vurgulanmıştır. Yüksek hacimsel boşluk oranlarında altı farklı birim hücre yapılarından kübik ve sekizyüzlüye benzer yapı (kesik kübik) yüksek elastisite modülü gösterirken elmas yapı düşük elastisite modülü vermiştir. Daha düşük hacimsel boşluk oranlarında ise sekizyüzlüye benzer yapının en yüksek elastisite modülü verdiği dolayısıyla yüksek elastisite modülü istenilen durumlarda bu yapının kullanılabileceği ifade edilmiştir [147].

Hedayati ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sekizyüzlü birim hücre yapısının bir çeşidini kullanarak mekanik özelliklerle analitik ilişki kurmayı amaçlamışlardır. Analitik yaklaşım olarak Euler-Bernoulli ve Timoshenko kiriş teoremini kullanmışlardır. Tek birim hücre ve bu birim hücre yapısından oluşan tekdüze gözenekli numuneler ayrı ayrı polilaktikasit (PLA) ile 3B yazıcı kullanılarak üretilmiş ve numunelere basma deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları ile analitik sonuçlar arasında oluşan sapmalar bağıl yoğunluk arttıkça artmıştır. Oluşan sapmaların nedeninin analitik eşitlikler oluşturulurken yapılan kabuller olduğunu belirtmişlerdir [159].

Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada hacim merkezli kübik birim hücre yapısını kullanarak küp şeklinde tekdüze gözenekli yapı oluşturmuş ve bu yapının teorik ve deneysel olarak mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapı üç farklı kolon kalınlığı (0,4 mm, 0,6 mm ve 0,9 mm) kullanılarak oluşturulmuştur. Kolon kalınlığı arttıkça teorik ile üretim sonrası gözeneklilik oranlarında sapmaların arttığını bildirmişlerdir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen elastisite modülleri ile basma deneyi sonuçları arasında 0,4 mm, 0,6 mm ve 0,9 mm kolon kalınlıklı numuneler için sırasıyla %149, %215 ve %304 oranında sapmalar meydana gelmiştir. Bu sapmalara modellemelerdeki ve üretimdeki kısıtların neden olduğunu bildirmişlerdir. Sapmaları daha makul bir seviyeye indirebilmek için analizde bir düzeltme faktörü kullanmışlardır [160].

Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada dört farklı birim hücre yapısı kullanarak tekdüze gözenekli yapılar tasarlamış, Ti6Al4V kullanarak SLE yöntemi ile numuneleri üretmiş ve basma deneyi uygulamışlardır. Oluşturulan tekdüze yapıların teorik ve deneysel olarak gözeneklilikleri ve mekanik özellikleri incelenmiş ve aralarındaki ilişki araştırılmıştır. Kuru tartım ölçümü sonucunda numunelerin tasarımdan daha düşük gözenekliliğe sahip olduğu bunun nedeni olarak da kolonlardaki kalınlaşmaların olduğunu belirtmişlerdir. Bu kalınlaşmalarında yatay ve dikey kolonlarda farklı bölgelerde farklı boyutlarda olabildiğini

dolayısıyla SLE ile üretimde oluşabilecek farklılıkların belirsiz olabileceğini bildirmişlerdir. Basma deneyi sonucunda elde edilen gerilme gerinim eğrisinin başlangıcında doğrusal olmayan bir bölgenin oluştuğunu ve bu bölgenin destek kolonları numuneden sökülürken veya deney esnasında kolonlarda küçük bölgesel akmalardan kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Elastisite modülünü doğru bir şekilde belirleyebilmek için bu doğrusal olmayan bölgeyi hesaba katmamışlardır. Buldukları sonuçları sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırmış ve analizde elastisite modülü için düzeltme faktörü kullanmışlardır. Üretim esnasında kolon içinde oluşan hataların mekanik özelliklerini düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Aynı elastisite modülüne sahip numuneler için gözenekliliği düşük olanın süngerimsi kemik yapılar için uygun olabileceğini belirtmişlerdir. Elastisite modülü 1 GPa olacak şekilde ikisi tekdüze biri de bu iki yapıdan oluşan geçişli yapı oluşturarak hücre büyümesi açısından bu yapıları karşılaştırmışlardır. İlk günlerde büyük gözeneklerin bol akış sağladığını dolayısıyla hücre çoğalmasının hızlı olduğunu görmüşlerdir. Ancak sonraki günlerde büyük gözeneklerin yüksek geçirgenliğe neden olarak kolonlara hücre yapışmasını kolaylaştırmamış oldukları sonucuna varmışlardır. Geçişli yapıda ise dış bölgede bulunan büyük gözeneklerin iç bölgeye geçişi kolaylaştırırken iç bölgedeki küçük gözeneklerin ise akışı yavaşlatarak hücre büyümesini hızlandırdığını bildirmişlerdir. Hücre oluşumunun geç evresinde, geçişli yapıdaki hücrelerin büyüme hızının diğer iki yapıdakilerden çok daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır [83].

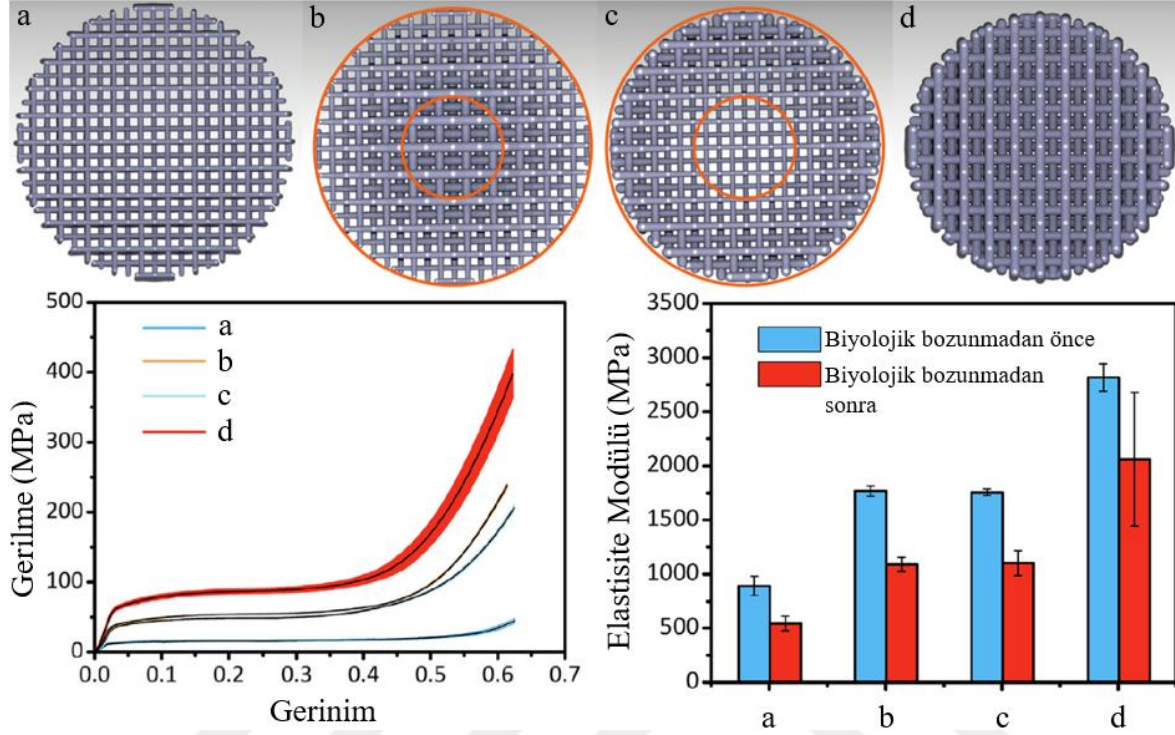
Zhang ve arkadaşları birim hücre boyutu ve kolon kalınlıklarını değiştirerek farklı şekillerde oluşturulan değişken gözenekli yapılar üzerine bir çalışma yapmışlardır. Seçici lazer ergitme yöntemi ile ürettikleri numunelere basma ve geçirgenlik deneyleri uygulamışlardır. Üretim ile tasarım arasındaki farkları görebilmek için mikro-BT analizi yapmışlardır. Mikro-BT sonuçlarına göre kolon kalınlıklarında 138 μm 'ye varan artışlar görülmüştür. Basma deneyi sonucunda elde edilen gerilme gerinim eğrisinde kimi numunelerde yoğunlaştırma aşamasının görüldüğü kimi numunelerde ise görülmeyeceği belirtilmiştir. Bunun sebebinin boşluk oranlarındaki farktan dolayı olabileceğini ileri sürmüşlerdir. Farklı değişken hücre yapılarına ancak birbirine yakın boşluk oranlarına sahip numuneler benzer mekanik özellikler vermiştir. Bu sonuçlara göre mekanik özelliklerin öncelikle gözenekli yapının boşluk oranlarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Isıl işlemlerli numuneler üzerindeki gerinim dağılımının ısılsız işlemlerli numunelere göre daha düzenli olduğu görülmüştür. Geçirgenlik sonuçları ise akışın yönünün değişken gözenekli yapıya dik olduğunda bu yapının daha iyi geçirgenlik özelliği sağladığını göstermiştir. Akışa göre değişken gözenekli yapısının

tasarlanması implantın kemik dokusu büyümesine ve besin taşınmasına daha elverişli olmasını sağlayacağını bildirmişlerdir [52].

Zhang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada tekdüze ve içten dışa artan yoğunluklu değişken gözenekli yapının mekanik özelliklerini çalışmışlardır. Değişken gözenekli yapıyı birim hücre boyutunu aynı tutup kolon kalınlığını değiştirerek elde etmişlerdir. %21 ile %91,3 arasında hacimsel boşluk oranlarında modeller oluşturmuşlardır. Numuneleri ortalama toz boyutu 31,6 μm olan Ti6Al4V tozuyla katman kalınlığı 50 μm olacak şekilde seçici lazer eritme yöntemi kullanarak üretmişlerdir. Ultrasonik banyo ile fazla tozlar temizlendikten sonra kuru tartım ile numunelerin yoğunlukları ölçülmüştür. Mikro-BT yöntemi ile kolon kalınlıklarında oluşan çaptaki değişimler ve hacimsel boşluk oranı gibi tasarım ile üretim arasındaki farklılıklar incelenmiştir. Üretim esnasında tozların kolonlara yapışmasından dolayı numunelerin kolon kalınlıklarında tasarıma göre 150 μm 'ye varan artışlar meydana gelmiştir. Yoğunluk arttıkça akma dayanımı ile en yüksek dayanımı arasındaki fark artmaktadır. Yoğunluğun yüksek olduğu yüksek kolon kalınlıklı numunelerde kolon içindeki gözeneklerin boşluk kusurları gibi davranmalarının muhtemel olduğunu bildirilmiştir. Basma kuvveti altında bu iç gözeneklerin kapandığı ve plastik deformasyonu arttırdığı belirtilmiştir. Değişken gözenekli yapının görünür yoğunluğunun %43,6 tekdüze gözenekli numunelerinden yakın olanlarından birinin ise %48,7 olduğu göz önüne alındığında, daha düşük yoğunluktaki değişken gözenekli yapının tekdüze yapıya göre daha yüksek elastisite modülü, akma dayanımı ve plato (yatay) dayanımı verdiği görülmüştür. Yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda mekanik özelliklerin üretim hatalarından dolayı deney sonuçlarından yüksek çıktığı belirtilmiştir [82].

Li ve arkadaşları 0,2 mm ve 0,4 mm kolon kalınlıklı tekdüze ve değişken gözenekli yapıları seçici lazer eritme yöntemi kullanarak demir tozundan üretmişlerdir. Numuneler içinde kalan tozları temizlemek için ultrasonik banyo kullanılmıştır. Kuru tartım ve mikro-BT sonuçlarına göre üretilen numunelerde tasarıma göre hacimsel boşlukta %6 ile %9 arasında azalma meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak üretim esnasında kolon kalınlıklarındaki artışı göstermişlerdir. 0,2 mm ve 0,4 mm kolon kalınlıklı tasarımların hacimsel boşluk oranları %90,9 ve %67 iken içten dışa ve dıştan içe yoğunluğu artan değişken gözenekli yapıların her ikisinin de hacimsel boşluk oranları %79,5 olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan basma deneyi sonucunda yoğunluğun içten dışa veya dıştan içe artmasının gerilme-gerinim davranışını ve elastisite modülünü %1 bile etkilemediği sonucuna varmışlardır

(Şekil 2.18). Değişken gözenekli yapılarda daha kalın kolonlarda daha fazla gerilme yığılması oluştuğunu belirtmişlerdir [75].

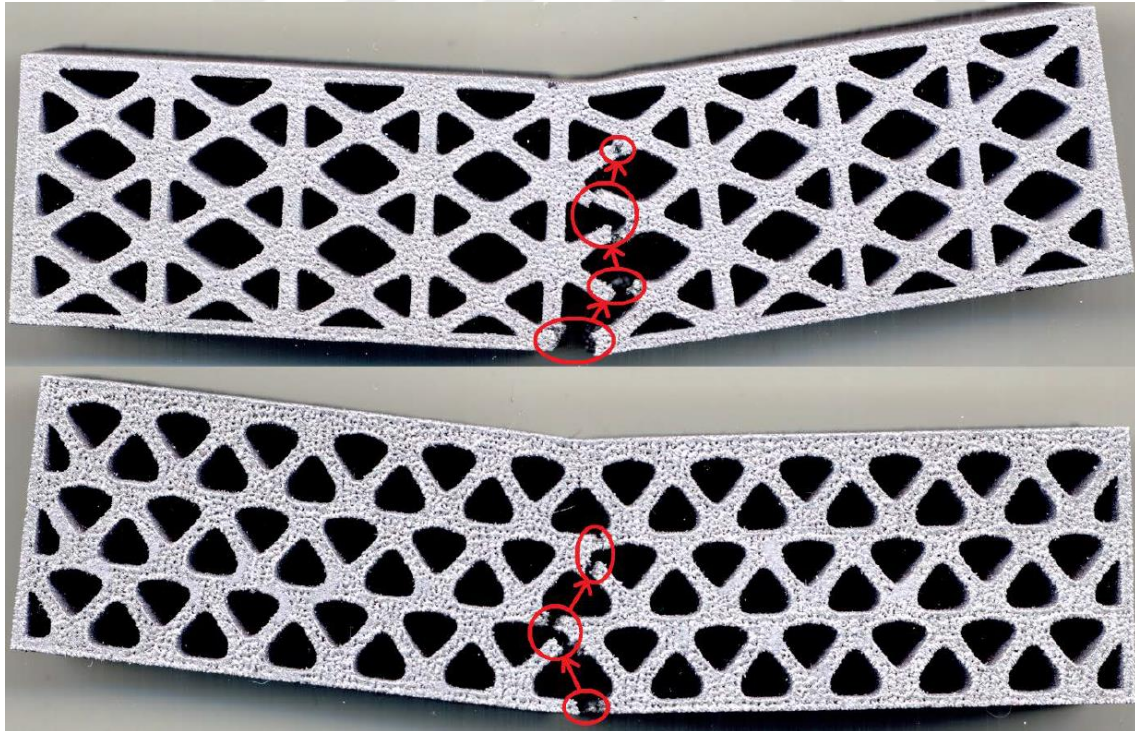


Şekil 2.18. Tekdüze ve değişken gözenekli yapıların tasarımı, gerilme-gerinim eğrisi ve elastisite modülü [75]

2.5.2. Eğme deneyi

Rahman Rashid ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yuvarlak, üçgen ve altıgen yapı kullanarak %50 hacimsel boşluk oranına sahip tekdüze gözenekli yapılar tasarlamışlardır. SLE yöntemi ile AlSi12 alaşım tozu kullanarak ürettikleri gözenekli yapılara üç nokta eğme deneyi uygulamış ve farklı yapıların mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Üçgen hücre yapısına sahip numunelerin en yüksek elastisite modülüne sahip olduğu, yuvarlak ve altıgen yapıların ise neredeyse eşit eğme elastisite modülüne sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Deney esnasında numunelerin gevrek bir kırılma davranışı göstererek gerilme-gerinim eğrisinde ani bir düşüşün yaşandığını bildirmişlerdir. Üretim esnasında yetersiz veya tamamlanmamış toz ergimelerinin gözenekliliği değiştirebileceğini ve bu durumun lazer gücü, tarama hızı, tabaka kalınlığı ve tarama aralığı gibi üretim değişkenlerinden oldukça etkilendiğini vurgulamışlardır. Bu ve benzeri üretim hatalarının mekanik özelliklere etkisi olabileceğini belirtmişlerdir [57].

Rashid ve arkadaşları yaptıkları çalışmada iki farklı yapıda %50 hacimsel boşluk oranına sahip tekdüze gözenekli numunelerin eğme yükü altındaki davranışlarını incelemiş ve tam dolu numuneye göre farklarını araştırmışlardır. Üç nokta eğme deneyi sonucunda tam dolu numunenin dayanabildiği en yüksek yükten sonra tek seferde kırıldığını, gözenekli yapıların ise Şekil 2.19’de gösterildiği gibi alttan yukarıya doğru aşama aşama kırıldığını bildirmişlerdir. Gözenekli numunelerde ilk kırılmanın dolu numuneye göre daha düşük kuvvetlerde ve daha küçük deplasmanlarda meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ancak gözenekli numunelerde tam kırılmanın dolu numuneye göre daha yüksek deplasmanlarda oluştuğunu vurgulamışlardır. Gözenekli yapıların, eğme yükü altında birim hacimdeki toplam enerji soğurumunun tam dolu numuneye göre daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. En yüksek yüke ulaşmaya kadar birim hacimdeki enerji soğurumunda ise tasarladıkları gözenekli numunelerden bir tanesinin yine daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Gözenekli yapıda ilk kırılmanın düşük deplasmanda oluşması ve ilk kırılmaya kadar birim hacimdeki enerji soğurumunun daha yüksek olması, bu yapıların düşük deplasman sınırlaması gerektiren uygulamalarda kullanımının uygun olabileceği sonucuna varmışlardır [161].



Şekil 2.19. Gözenekli yapıda üç nokta eğme deneyi sırasında oluşan çatlak ilerlemesi [161]

Seyedkanani ve arkadaşları yaptıkları çalışmada numunenin genişliği ve/veya uzunluğu boyunca yoğunluk dağılımını en iyileştirerek üç nokta eğme deneyi sonucunda, numunelerin

elastisite modülünü geliştirmeye çalışmışlardır. Değişken gözenekli yapı tasarlanarak SLA yöntemiyle gevrek bir polimer olan metakrilat fotopolimer kullanılarak üretilmiştir. En iyileştirme sonuçlarına göre değişken yapı boyuna olduğunda elastisite modülünde %43, enine olduğunda %155 her iki yönde hibrit olduğunda ise %182 artış meydana gelmiştir. Gözenekli yapının yoğunluğunun genişlik boyunca değiştirmenin uzunluk boyunca değiştirmekten daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte tasarlanan numunelerde boyuna değişken yapıda uçlardansa orta kısımda yoğun yapı oluşturmanın, enine değişken yapıda ise ortadansa uçlarda yoğun yapı oluşturmanın tekdüze yapıya göre daha yüksek elastisite modülü vereceğini yaptıkları üç nokta eğme deneyleri sonucunda bulmuşlardır. Değişken yapıların, birden fazla bükülme sertliği/yoğunluk oranlarına ulaşarak ideal birim hücrelerden oluşan tekdüze yapılardan daha iyi performans gösterme potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir [162].

Daynes ve arkadaşları yaptıkları çalışmada tasarladıkları tekdüze gözenekli yapıya sahip numunelerin tasarım en iyileştirme yöntemiyle değişken yapı elde ederek eğme yüküne karşı dayanımını geliştirmeyi amaçlamışlardır. Tasarladıkları numuneleri ABS benzeri bir malzeme kullanarak üç boyutlu yazıcıda üretmişlerdir. Numunelere üç nokta eğme deneyi uygulayarak mekanik özelliklerini araştırmışlardır. İki farklı tasarım iyileştirme yaklaşımıyla değişken yapıli numunelerin eğme elastisite modüllerini tekdüze yapılara göre %30,1 ve %100,7 oranında arttırmışlardır. Tasarım en iyileştirme sonrasında numunelerin hasar davranışlarının değiştiğini gözlemlemişlerdir. Tekdüze yapıda kuvvetin geldiği bölgede birim hücre yapılarının çöktüğünü, o bölgedeki kolonların kalınlaştırıldığı numunede gevrek kırılma oluştuğunu ve kolon yönelimlerinin değiştirildiği numunede ise yükleme noktasına yakın bölgelerde kolonların burkulduğu bildirmişlerdir [163].

2.6. Literatüre Katkı

Literatürde tekdüze gözenekli yapılarla ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Geçişli gözenekli yapılarla ilgili çalışmalar daha az olmakla birlikte gitgide artmaktadır. Yapılan çalışmalarda gözenekli yapıların mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik teorik yaklaşımlar, sonlu elemanlar analizleri ve mekanik testler yapılmıştır. Ancak teorik olarak hesaplanan özellikler ile mekanik testlerle elde edilenler arasında sapmalar bulunmaktadır ki bunlar modelleme doğruluğu, test koşulları veya üretim yöntemleri gibi birçok faktörden etkilenebilmektedir [160]. Bununla birlikte implantların kemikle uyumu için en önemli iki özelliği olan hacimsel

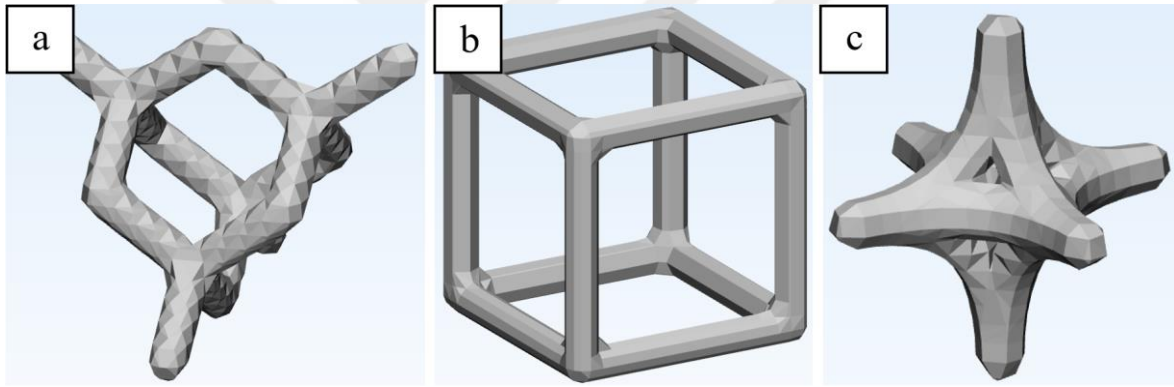
boşluk oranı ile elastisite modülü arasında bağıntı kurulan çalışma oldukça sınırlıdır. Hacimsel boşluk oranı implantın içinde ve implant ile kemik arasında sıvı akışı, hücre büyümesi ve hafiflik için önemliyken, elastisite modülü ise gerilme kalkını etkisinin oluşmaması açısından önemlidir. Bu iki özellik arasında bağıntı kuran sınırlı sayıdaki çalışmada ise bu bağıntılar deneysel sonuçlar arasında kurulmuş ve tasarım değişkenlerinin etkisi incelenmemiştir [147, 159]. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda iki araştırmada tasarım değişkenleri ile elastisite modülü arasında bağıntı kurulduğu görülmüş ancak bu araştırmalar yalnızca tekdüze gözenekli yapılar için yapılmıştır [83, 160].

Kişiyeye özel implantların tasarımında oldukça önemli olan hacimsel boşluk ve elastisite modülü gibi özellikler cinsiyet, yaş, fiziksel aktivite, beslenme ve ilgili hastalıklar gibi kişiden kişiye değişmekle birlikte kişinin hangi kemiği olduğuna bağlı olarak da değişebilmektedir [83, 164]. Ayrıca bu özellikler aynı kişi için kemikten kemiğe de farklılık gösterebilmektedir. Bununla birlikte kemik yapısının geçişli olduğu düşünüldüğünde kişiyeye özel tasarım için bu bağıntıların geçişli yapıda oluşturulması önemlidir. Ancak geçişli yapıda tasarım değişkenleri ile hem hacimsel boşluk oranı hem de elastisite modülü arasında bağıntı kurulan bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu tez çalışmasında üç farklı birim hücre yapısı ve üç farklı kolon kalınlığına sahip toplam dokuz işlevsel geçişli gözenekli yapının, tasarımla eklemeli imalat arasındaki farklarının çeşitli ölçüm ve görüntüleme yöntemleriyle araştırılması ile basma ve üç nokta eğme yükü altında davranışlarının literatürle karşılaştırmalı olarak tartışılmasının yanında literatürde görülen en önemli eksiklik olan geçişli yapıların tasarım değişkenlerinden yola çıkarak hacimsel boşluk oranı ve elastisite modülü arasında matematiksel modeller oluşturulmuştur. Böylece gelecekte yapılabilecek implantların uyumluluğu açısından en önemli ölçütlerden ikisi olan hacimsel boşluk oranı ile elastisite modülü, kişinin kemik yapısına uygun olacak şekilde tasarlanabilecek ve tasarım sonucunda üretilen implantların fiziksel ve mekanik özellikleri önceden tahmin edilebilecektir. Bu sayede kişiyeye özel tasarımların oluşturulabilmesine ve implantların yüksek uyumlulukla üretilbilmesine önemli bir katkı sağlanmış olunacaktır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Tasarım

Gözenekli yapıların tasarımında elmas (Şekil 3.1a), kübik (Şekil 3.1b) ve sekizyüzlü (Şekil 3.1c) olmak üzere üç farklı birim hücre yapısı kullanılmıştır. Birim hücre yapılarının kolon kalınlığı ve birim hücre boyutu olmak üzere iki değişkeni vardır. Kolon kalınlığı “d” harfiyle birim hücre boyutu ise “a” harfi ile simgelenmiştir. Kolon kalınlığı birim hücreyi oluşturan ayrıtların çapını belirtmektedir. Bu kalınlık birim hücredeki her bir ayrıt için aynıdır. Birim hücre boyutu ise birim hücreyi içine alan birim küpün bir ayrıtının uzunluğudur. Birim hücrelerden oluşan gözenekli yapıların tasarımları 3-Matic yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.

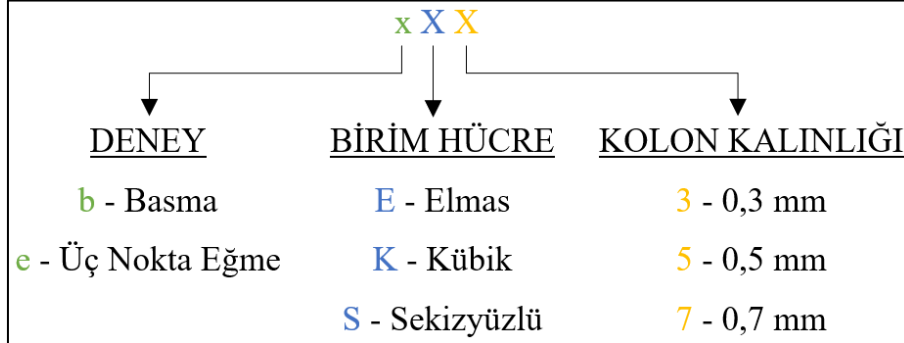


Şekil 3.1. Birim hücre yapıları a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü

Tasarımlar oluşturulurken kemik yapısına benzer bir yapının oluşturulması amaçlanmıştır. Kemik iskelet yapısını oluşturan gözenekli yapıdaki ayrıt büyüklükleri genellikle birkaç yüz mikrometreden oluşmaktadır [7]. Tasarımlar, eklemeli imalat kısıtlamaları çerçevesinde [61, 83], kemik yapısı ile hacimsel boşluk oranı [165–172] göz önünde bulundurularak ISO 13314 standardı [173] kaynak alınarak oluşturulmuştur.

Numuneler alfa sayısal olarak kodlanmıştır. Kodlardaki “b” harfi basma deneyi numunesi olduğunu ve “e” harfi ise eğme deneyi numunesi olduğunu belirtmektedir. “E”, “K” ve “S” harfleri sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısını, 3, 5 ve 7 sayıları ise sırasıyla 0,3 mm, 0,5 mm ve 0,7 mm kolon kalınlığını ifade etmektedir (Şekil 3.2). Tasarlanan numunenin kodlamaları basma deneyi numuneleri için bE3, bE5, bE7, bK3, bK5,

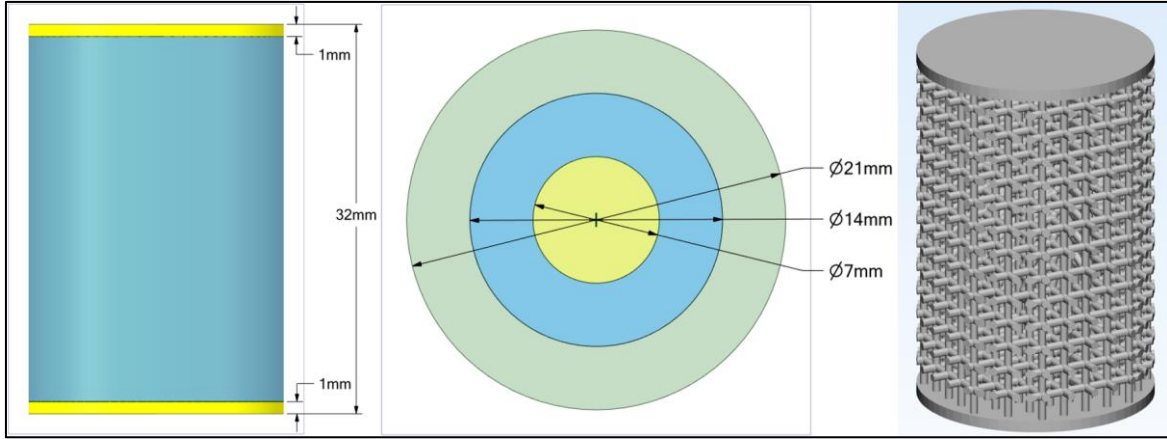
bK7, bS3, bS5, bS7 ve üç nokta eğme deneyi numuneleri için eE3, eE5, eE7, eK3, eK5, eK7, eS3, eS5, eS7 şeklinde oluşturulmuştur.



Şekil 3.2. Numuneleri kodlama sistemi

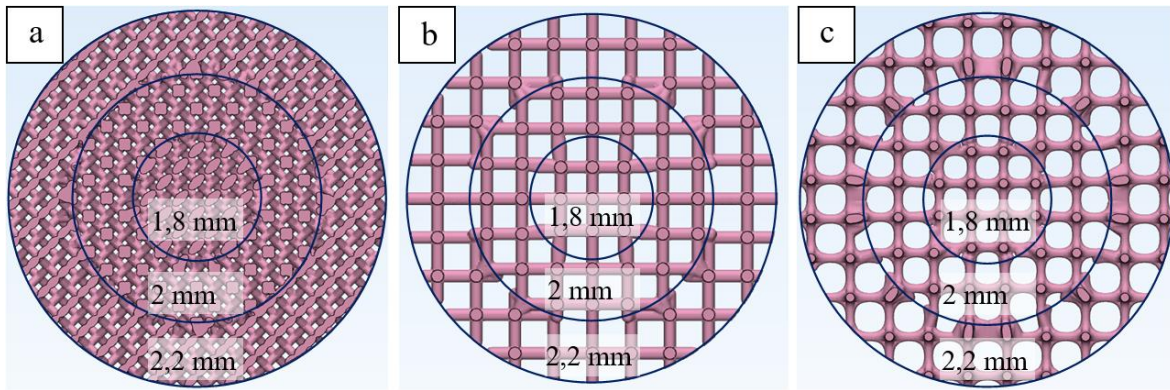
3.1.1. Basma deneyi numunelerinin tasarımı

Basma deneyi numunelerinin tasarımında elmas, kübik ve sekizyüzlü olmak üzere üç farklı birim hücre yapısı ve 0,3 mm, 0,5 mm ve 0,7 mm olmak üzere üç farklı kolon kalınlığı kullanılarak toplamda dokuz farklı numune tasarlanmıştır. Silindirik şekilde tasarlanan numunenin boyu altta ve üstte bulunan birer mm altlıklar dahil 32 mm çapı ise 21 mm'dir (Şekil 3.3a). Numunelerin alt ve üst olmak üzere her iki taraftan da altlıklı olmasının iki nedeni vardır. Birincisi katmanlı üretim yönteminin kısıtlamalarıdır. Bu üretim yönteminde ilk başta bir destek yapısının oluşturulması gerekmektedir. Bu destek yapısının gözenekli yapıyla doğrudan bağlantısı üretim sürecinde numunelerin hatalı üretilmesine neden olabileceğinden numunelerin alt tarafında altlık oluşturulmuştur. İkinci neden ise basma testi ile ilgilidir. Basma testi esnasında numunedeki gözenekli yapıya eksenel yönde gelen basma kuvvetinin bu yapıya eşit dağıtılabilmesi için üst tarafında da tıpkı alttaki gibi altlıklı tasarlanmıştır. Altlıksız numunelerde gelecek yükün eksenden kayması ve eşit dağılamaması durumunda mekanik özellikler etkilenebilmektedir [174]. Dolayısıyla basma deneyi için üretilen numunelerin altında ve üstünde altlıklar oluşturulmuştur. Literatürde de benzer tasarım yaklaşımlarının yapıldığı görülmektedir [175, 176].



Şekil 3.3. Basma deneyi numune boyutları ve tasarımı

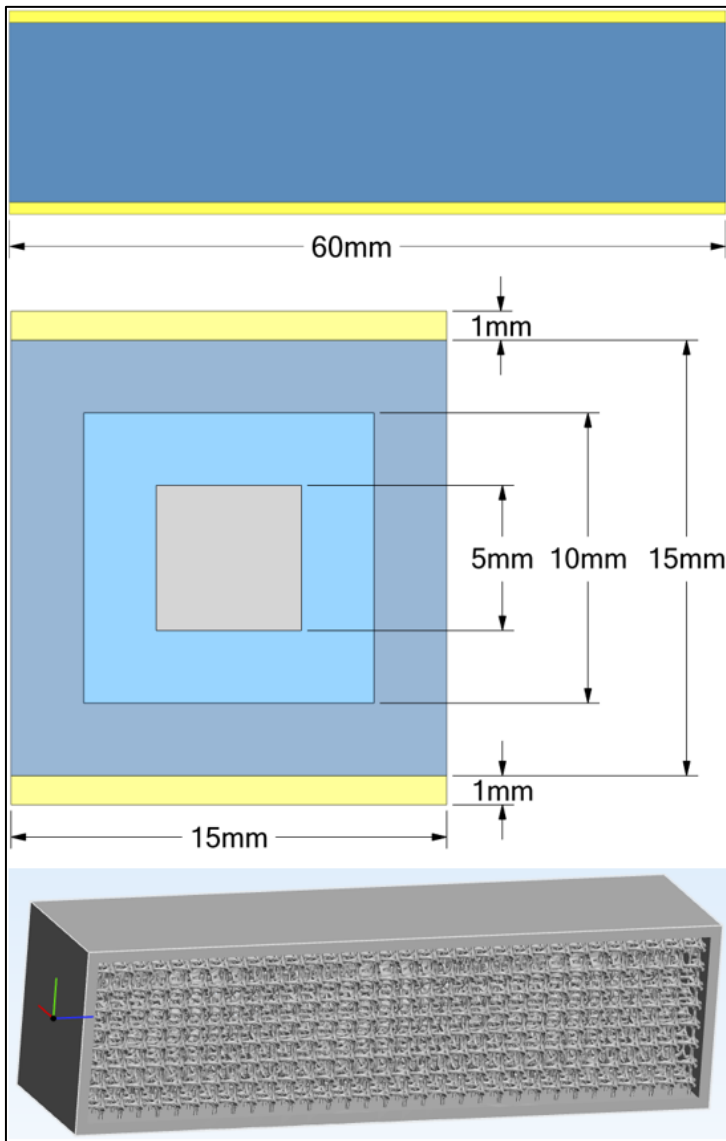
Bütün numuneler işlevsel geçişli gözenekli yapıya sahiptir. Bu yapı iç içe geçmiş üç geçişli yapı tasarlanarak oluşturulmuştur. Geçişli yapının içten dışa çapları sırasıyla 7 mm, 14 mm ve 21 mm'dir (Şekil 3.3). En içteki halkanın içinde kalan birim hücrelerin boyutları 1.8 mm, ortadaki ise 2 mm ve en dıştakinde ise 2.2 mm'dir (Şekil 3.4). Aynı numune içerisindeki farklı birim hücre boyutları sayesinde geçişli yapı elde edilmiştir. Ancak birim hücre boyutlarının değişken olması, iç içe geçmiş yapıları oluştururken kolonların kimi noktalarda birbirine denk gelememe sorununa yol açabilmektedir. Bu sorun yazılım yardımıyla tasarım üzerinden bağlantısız kolonların birbirlerine bağlanmasıyla çözülmüştür. Oluşturulan ek kolonların yoğunluğu, geçiş bölgelerindeki karşılıklı kolonlar arasında kopukluk olmayacak şekilde yazılım üzerinden ayarlanmıştır.



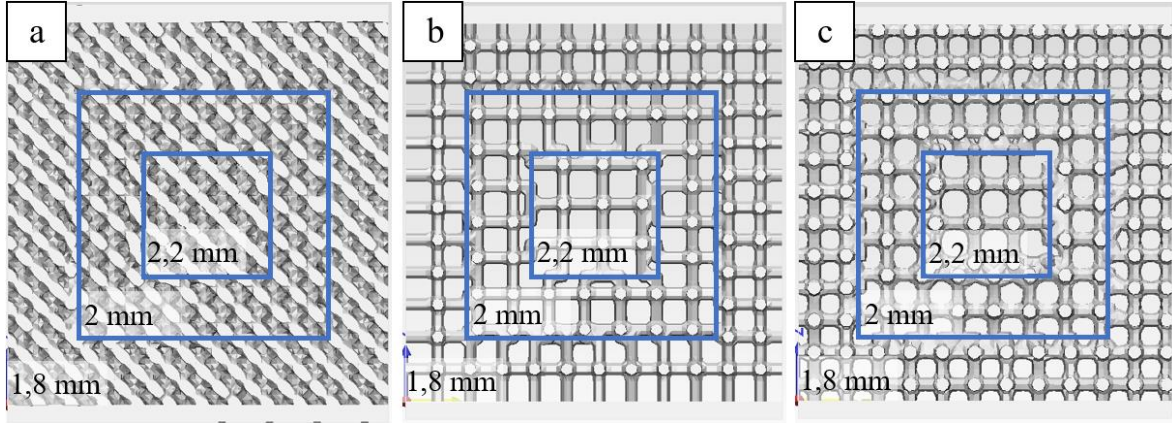
Şekil 3.4. Basma deney numuneleri tasarımlarının kesit görüntüleri ve her bir geçişteki birim hücre boyutları a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü

3.1.2. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin tasarımı

Üç nokta eğme deneyi için elmas, kübik ve sekizyüzlü olmak üzere üç farklı birim hücre yapısı ve 0,3 mm, 0,5 mm ve 0,7 mm olmak üzere üç farklı kolon kalınlığı kullanılarak dokuz farklı numune tasarlanmıştır. Tasarlanan numunelerin boyutları Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bütün numuneler işlevsel geçişli gözenekli yapıya sahiptir. Geçişli yapıdaki birim hücre boyutları sırasıyla 1,8 mm, 2 mm ve 2,2 mm olmak üzere dıştan içe doğru büyümektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.5. Üç nokta eğme deneyi numune boyutları ve tasarımı



Şekil 3.6. Üç nokta eğme deney numuneleri tasarımlarının kesit görüntüleri ve her bir geçişteki birim hücre boyutları a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü

Yapılar oluşturulurken farklı birim hücre boyutlarından dolayı kolonlar arasında oluşan boşluklar tıpkı basma numunelerinde olduğu gibi ek kolon bağlantıları ile giderilmiştir. Aynı numune içerisindeki farklı birim hücre boyutları sayesinde geçişli yapı elde edilmiştir. Numuneler tasarlanırken basma deneyi numuneleriyle aynı nedenlerden iki taraftan altlıklı olarak tasarlanmıştır. Böylece eğme deneyinde gözenekli yapıların bölgesel hasar almasının önüne geçilebilmesi sağlanmıştır. Üretim esnasında karşılaşılan hatalar nedeniyle numunenin sağ ve sol yanlarına da benzer şekilde birer mm kalınlığında altlık bulunmaktadır. Literatürde de benzer tasarım yaklaşımlarının yapıldığı görülmektedir [161, 163, 177].

3.2. Üretim

Üretim için Alman Concept Laser firmasından ithal edilen Ti6Al4V (ELI Grade 23) alaşım tozu kullanılmıştır. Kullanılan Ti6Al4V alaşım tozu 10-45 μm çapında küresel tozlardan oluşmaktadır. Bu tozun standartlara göre kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V (ELI grade 23) tozunun kimyasal bileşimi

Element	Ti	Al	V	Fe	C	O	N	H
% bileşim	Geri kalan	5,5-6,5	3,5-4,5	0-0,25	0-0,08	0-0,13	0-0,05	0-0,012

Basma ve üç nokta eğme deneyi numunelerinin üretiminde Gülhane Medikal Tasarım ve Üretim Uygulama ve Araştırma Merkezi (METÜM) bünyesinde yer alan Concept Laser M2

Cusing SLE cihazı kullanılmıştır (Resim 3.1). Tasarlanan gözenekli yapılar Concept Laser M2'nin arayüz programında 30 μm kalınlığında katmanlar olarak dilimlenmiştir. Numunelerin alt tarafına üretimin sağlıklı yapılabilmesi adına yazılım üzerinden destek yapısı eklenmiştir. Numuneler argon gazı atmosferinde üretilmiştir. Üretim değişkenleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Katman kalınlığı 30 μm 'dir.

Çizelge 3.2. Numunelerin üretim değişkenleri

Üretim değişkeni/bölge	Yüzey	Çevre çizgisi	Destek yapıları
Güç (W)	200	200	100
Hız (mm/s)	1800	1250	650
Odak çapı (μm)	150	150	150



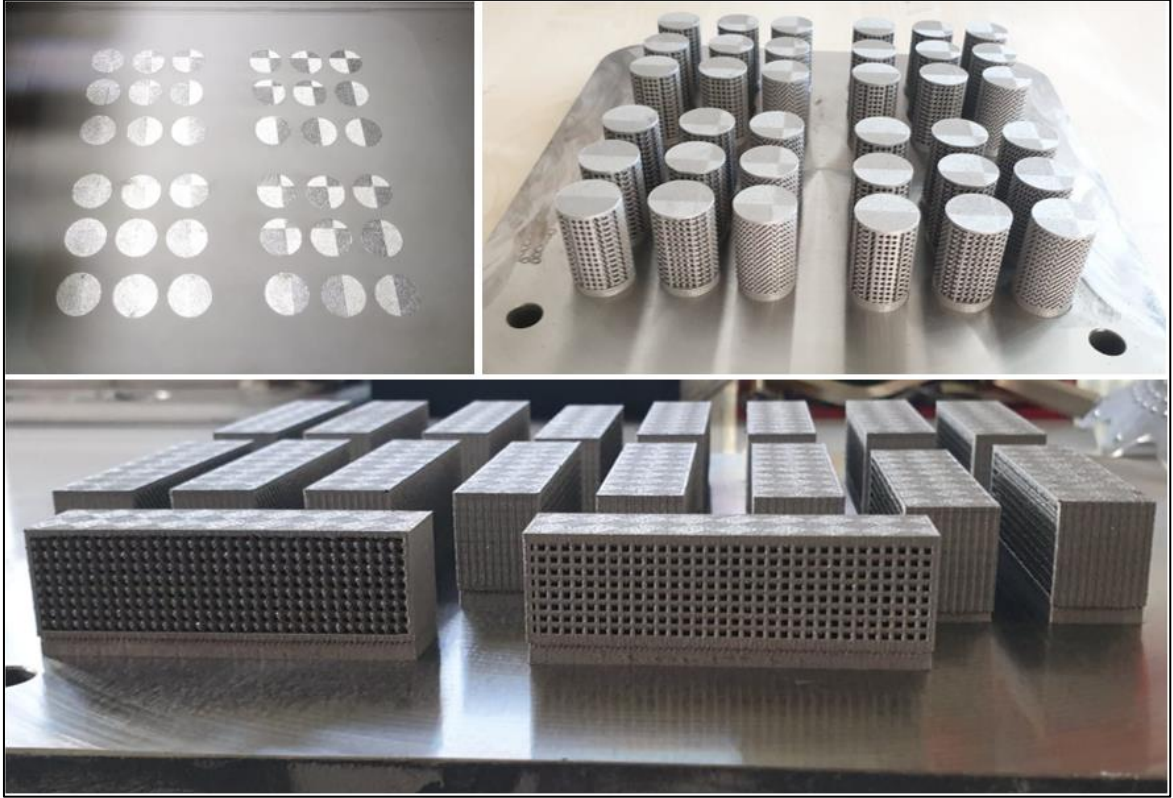
Resim 3.1. Üretimde kullanılan Concept Laser M2 Cusing SLE cihazı

Basma deneyi için üretilen numunelerde hem ısıtılmış hem de ısıtılmamış numuneler üretilmiştir. Eğme numuneleri ise sadece ısıtılmış olarak üretilmiştir. Hem üretim hatalarını hem de deney esnasında oluşabilecek hataların etkisini en aza indirebilmek için ısıtılmış numuneler beş tekrarlı olacak şekilde üretilmiştir. Isıtılmamış numuneler ise üç tekrarlı olacak şekilde üretilmiştir. Isıtılmış işlem METÜM bünyesinde yer alan Proterm Furnaces marka fırında uygulanmıştır (Resim 3.2). Numuneler fırın içerisinde 800°C'ye kadar beş

saatte çıkarılmış ve aynı sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Sonrasında sıcaklık 500°C'ye inene kadar fırında bekletilmiştir. Bu işlemler fırında argon atmosferi altında yapılmıştır. Daha sonra fırından çıkarılarak oda sıcaklığına soğutulmuştur. Numunelerin üretim anı ve sonrasına ait fotoğraflar Resim 3.3'te sunulmuştur.



Resim 3.2. Isıl işlemlerde kullanılan Proterm Furnaces marka fırın



Resim 3.3. Numunelerin üretim anı ve sonrasına ait fotoğraflar

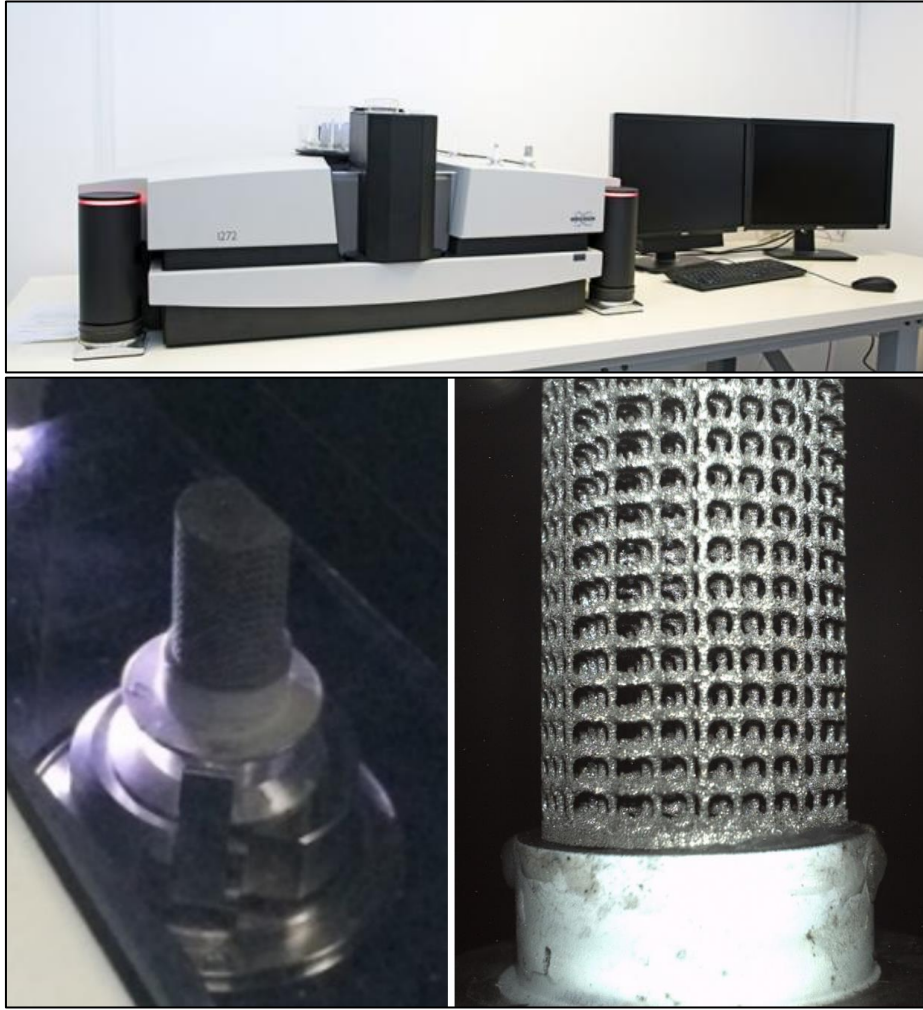
Üretilen gözenekli numunelerin içinde kalan tozların temizlenmesi için önce basınçlı hava püskürtülmüş ve ardından içinde saf su bulunan ses ötesi (ultrasonik) temizleyicide 70°C’de 30 dk. boyunca tutulmuştur (Resim 3.4).



Resim 3.4. Numunelerin ses ötesi temizleyicide olası artık tozlardan arındırılması

3.3. Görüntüleme Yöntemleri

Üretilen basma numuneleri deneylerden önce Hacettepe Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (HÜNİTEK) bünyesindeki Bruker Skyscan 1272 mikro-BT aygıtında taranmıştır (Resim 3.5). Tarama için akım değeri 100 μ A, voltaj değeri ise 100 kV olarak ayarlanmıştır. Numuneler 360° taranmış, tarama adımları ise 0,6° olarak belirlenmiştir. Tasarlanan numuneler düşeyde birbirini tekrar eden gözenekli yapılardan oluştuğu için bu yönde yaklaşık 10 mm'lik bir bölümü taranmıştır. Taramalar 15 μ m ile 21 μ m arasında kalınlığa sahiptir. Taramalar sonucunda elde edilen iki boyutlu görüntülerle tasarım ile üretim arasındaki boyutsal farklılıklar ve iç yapıdaki olası hataları incelenmiştir. İki boyutlu taramalar ileri değerlendirme ve analizler için üç boyutlu hale de getirilmiştir.



Resim 3.5. Mikro-BT cihazı ve numunelerin taranması

Basma ve üç nokta eğme deneyleri sonrası numuneler taramalı elektron mikroskobu (ing. scanning electron microscope – SEM) ve optik mikroskoplarla da incelenmiştir. SEM ve optik mikroskopta kolon kalınlıkları ve sarkmalar gibi üretim sonrası oluşan hatalar ve tasarım ile üretim arasındaki farklılıklar araştırılmıştır. SEM görüntüleme Almanya Leibniz Katı Hal ve Malzeme Araştırma Enstitüsünde GEMINI Leo 1530 cihazında gerçekleştirilmiştir (Resim 3.6). Mikroskop görüntüleri ise Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Toz Metalürjisi Laboratuvarında yer alan Olympus marka GX71 model mikroskop ile çekilmiştir (Resim 3.7). Mikro-BT'den oluşturulan üç boyutlu görüntüler ile üretim sonrası numunelerdeki değişiklikler incelenmiş ve SEM görüntüleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca üç boyutlu görüntüler yeniden yapılandırılarak oluşturulan tasarımlara sonlu elemanlar analiz uygulanmış ve tasarımdan yapılan analizlerle taramadan elde edilen modeller üzerinden yapılan analizler karşılaştırılmıştır.

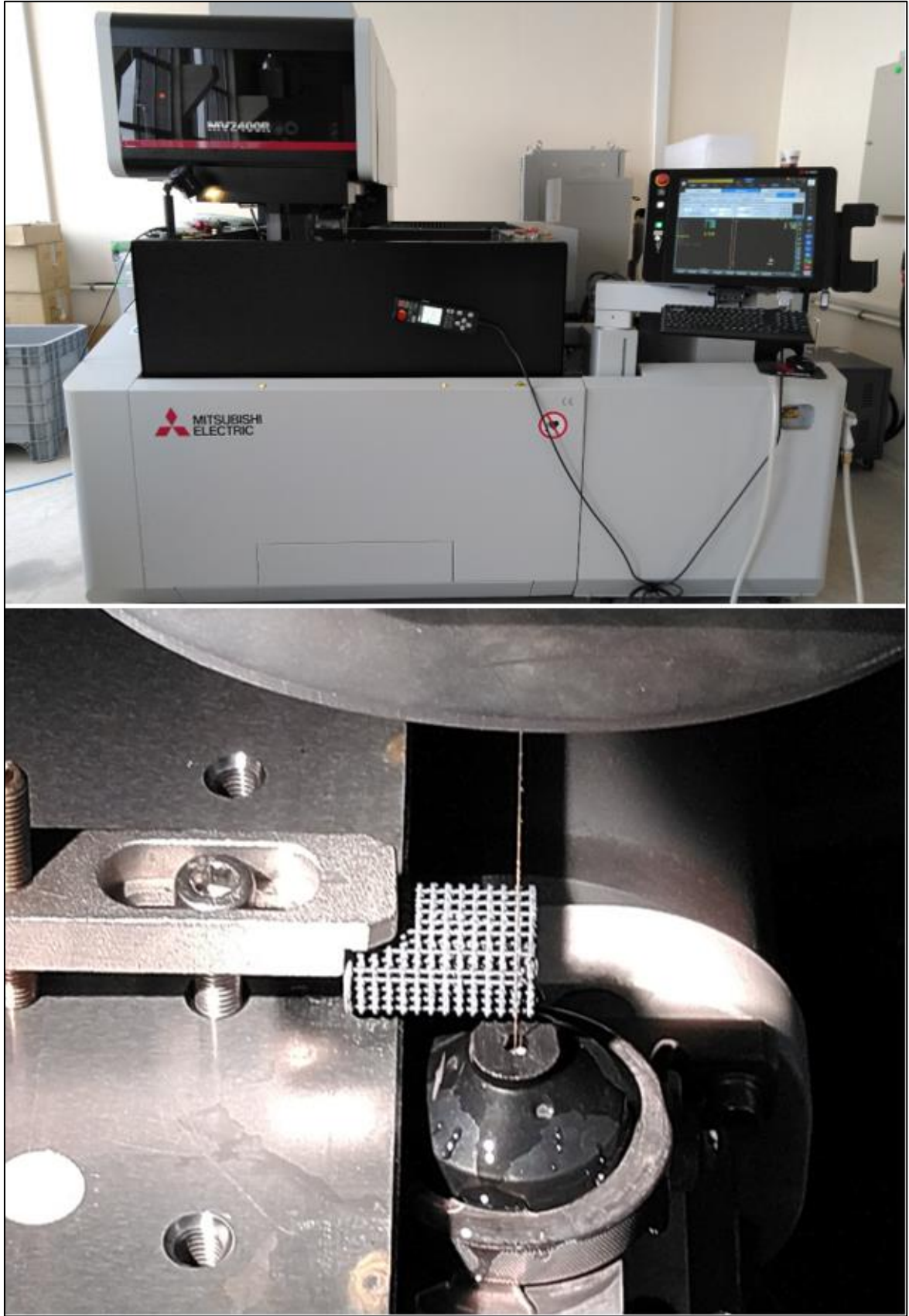


Resim 3.6. Numunelerin görüntülerinin alındığı SEM cihazı



Resim 3.7. Numunelerin optik görüntülerinin alındığı Olympus GX71 cihazı

Numunelerin kolonlarının optik mikroskopla iç yapısına bakılabilmesi için numuneler Gazi Üniversitesi Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ) Kazan Meslek Yüksekokulu bünyesinde yer alan Mitsubishi Elektrik marka MV2400R model tel erozyon cihazında kesilmiştir (Resim 3.8). Kesme işlemi galvaniz kaplı pirinç tel ile 4 mm/dk. hızla saf su kaplı havuz içerisinde gerçekleştirilmiştir. Mikro-BT'den alınan iki boyutlu görüntüler optik görüntülerle kıyaslanarak üretim hataları araştırılmıştır.



Resim 3.8. Tel erozyon cihazı ve numunenin kesilme işlemi

3.4. Hacimsel Boşluk Oranlarının Belirlenmesi

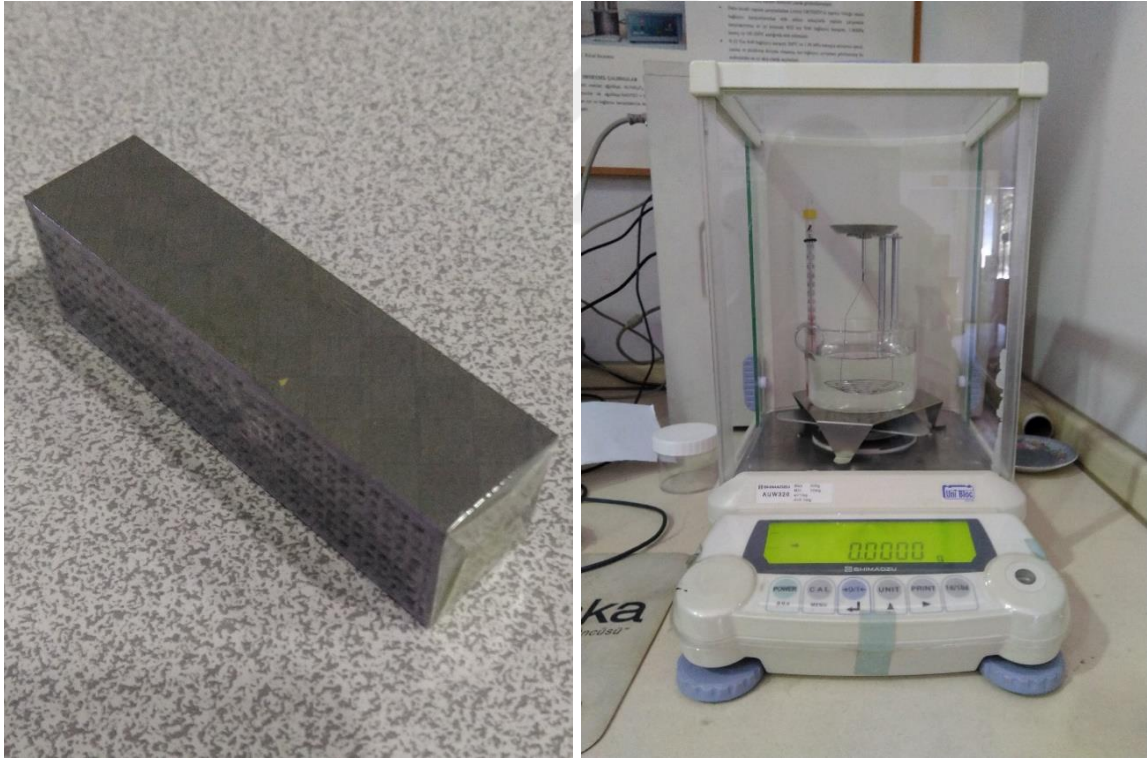
Hacimsel boşluk oranı tasarlanan gözenekli yapıların dolu yapıya göre hacimsel olarak boşluk yüzdesini veren bir orandır. Numunelerin hacimsel boşluk oranları dört değişik şekilde belirlenmiştir. İlk olarak yapılan tasarımda program üzerinden numunelerin hacimsel boşluk oranları belirlenmiştir. Numuneler üretildikten sonra Arşimet ve kuru tartım yöntemleri kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Bu yöntemler gözenekli yapıların hacimsel boşluk oranlarını ölçmek için literatürde sıklıkla kullanılmaktadır [147, 178]. Son olarak da gözenekli yapıyı oluşturan birim hücre yapısından yola çıkılarak yapının hacimsel boşluk oranını veren matematiksel modeller oluşturulmuş ve bu modeller üzerinden yapılan hesaplamalar ile hacimsel boşluk oranları belirlenmiştir. Her numune için elde edilen dört değişik değer birbirleriyle karşılaştırılarak tasarım ile üretim arasındaki sapmalar belirlenmiştir.

Hacimsel boşluk oranları altlıklı ve altlıksız olarak iki ayrı küme olarak hesaplanmıştır. Üretilen numunelerin altlıklı olmasından dolayı Arşimet ve kuru tartım yöntemlerinde numunelerin altlıklı ağırlıkları ölçülmüştür. Bu ölçülen ağırlıklar üzerinden hacimsel boşluk oranları hesaplanmıştır. Karşılaştırma açısından tasarımın da altlıklı halinin hacimsel boşluk oranı program üzerinden hesaplanmıştır. Sonuç olarak altlıklı numunelerin tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları hesaplanmıştır. Numunelerin altlıksız, yalnızca gözenekli yapısının hacimsel boşluk oranını Arşimet yöntemi ile ölçmek mümkün değildir. Ancak kuru tartım yapıldıktan sonra altlıkların hacminden yola çıkarak ağırlıkları hesaplanıp ölçümden çıkarılırsa altlıksız olarak kuru tartım sonuçlarına da yaklaşık olarak ulaşılabilir. Yaklaşık olmasının nedeni altlıkların ağırlıkları belirlenirken iç yapıda üretim hatalarından kaynaklı oluşabilecek boşlukların çıkarma işleminde hesaba katılamamasıdır. Teorik olarak, altlıksız tasarımın program üzerinden hesaplanan ve bu tasarımdan yola çıkarak türetilen matematiksel modelden hesaplanan hacimsel boşluk oranları da hesaplanmıştır. Böylece altlıksız numunelerin tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları belirlenmiştir.

3.4.1. Arşimet ve kuru tartım

Arşimet ve kuru tartım ölçümleri Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Toz Metalürjisi Laboratuvarında Shimadzu SMK 401 cihazı ile

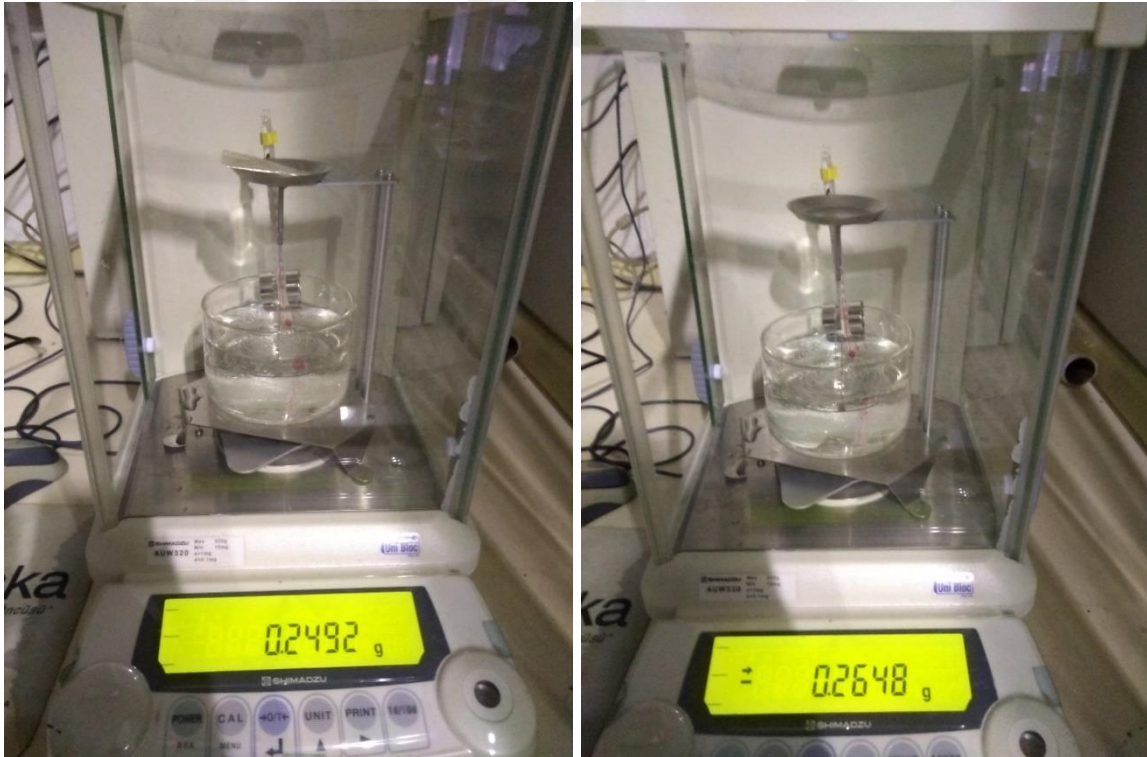
yapılmıştır. Tartımdan önce gözenekli yapı içerisinde toz kalmaması için numunelere önce basınçlı hava sıkılmış daha sonra numuneler ses ötesi banyoda 70 °C'de 30 dk. tutulmuş ve diğer aşamaya geçmeden önce numunelerin tamamen kuruması beklenmiştir. Bu yöntemde numuneler önce havada sonra sıvıda tartılmışlardır. Sıvı olarak saf su kullanılmıştır. Tartım esnasında suyun yoğunluğunu bulabilmek için suyun sıcaklığı ölçülmüş ve not edilmiştir. Suda tartım esnasında gözenekli yapıya su girmemesi amacıyla numuneler bantla sarılmışlardır. Daha kesin sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla tartımdan sonra bantlar numuneden çıkarılarak numunelerle aynı şekilde önce havada sonra suda tartılarak hesaba katılmıştır. Böylece bantlardan dolayı oluşabilecek sapmaların önüne geçilebilmesi amaçlanmıştır. Resim 3.9'da Arşimet yöntemi ile tartılmak üzere bantla sarılmış numune ve Arşimet deney düzeneği, Resim 3.10'da numunenin havada ve suda tartılması ve Resim 3.11'de ise numuneden çıkarılan bantların havada ve suda tartılması gösterilmektedir.



Resim 3.9. Bantla sarılmış numune ve Arşimet deney düzeneği



Resim 3.10. Numunenin havada ve suda tartılması



Resim 3.11. Numuneden sökülen bantların havada ve suda tartılması

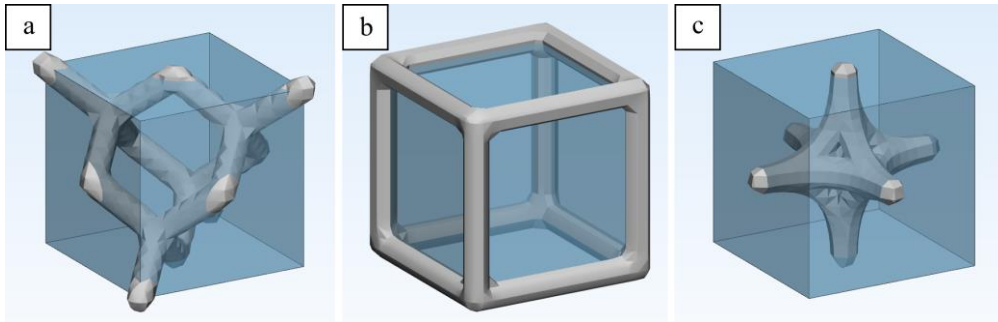
Numunenin yoğunluğunu hesaplayabilmek için Eş. 3.1’de verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$\rho = \frac{W_a}{W_a - W_l} \rho_l \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte ρ ve ρ_l sırasıyla numunenin ve sıvının yoğunluğunu, W_a ve W_l ise sırasıyla numunenin havadaki ve sudaki ağırlığını vermektedir. Tartım esnasında suyun sıcaklığı 21°C olarak ölçülmüştür. Bu sıcaklıkta suyun yoğunluğu 0,0998 g/cm³’tür. Eş. 3.1 yardımıyla numunelerin yoğunluğu bulunduktan sonra kullanılan Ti6Al4V tozun yoğunluğundan yola çıkarak hacimsel boşluk oranları bulunmuştur. Ölçümler beş tekrarlı olacak şekilde yapılmış ve ortalamaları alınmıştır.

3.4.2. Matematiksel model

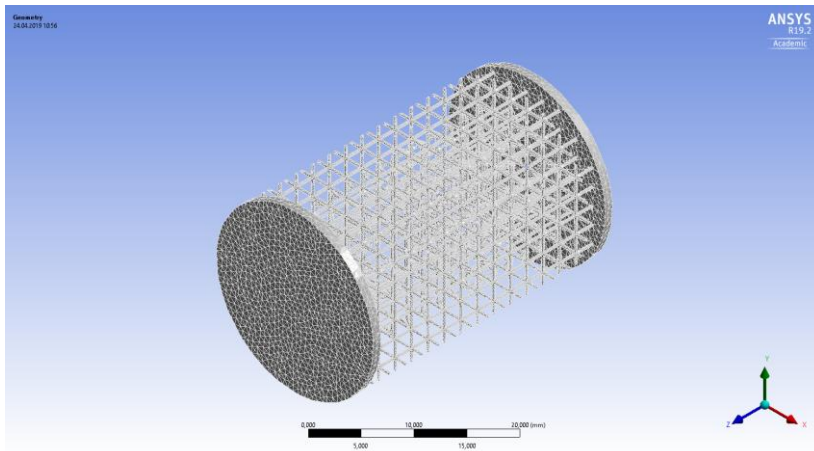
Numunelerin hacimsel boşluk oranlarını belirlemek için kullanılan diğer yöntem ise birim hücre yapısından yola çıkarak bütün yapının hacimsel boşluk oranının hesaplandığı matematiksel modeldir. Birim küp Şekil 3.7’de mavi ile gölgelendirilmiş alandır. Bu yaklaşımda birim küp içerisinde kalan birim hücrenin hacmi hesaplanarak birim küpteki hacimsel boşluk oranı belirlenmiştir. Daha sonra birim küpteki hacimsel boşluktan yola çıkılarak geçişli numunenin tamamının hacimsel boşluk oranı hesaplanmıştır. Tasarımda kullanılan elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapılarının her biri için bu hesaplamalar yapılmış ve birim hücre boyutu ile kolon kalınlığına bağlı hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modeller çıkarılmıştır.



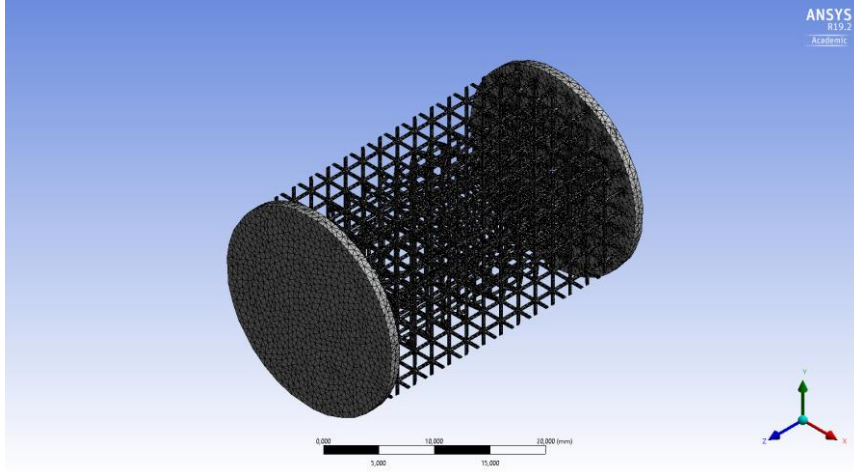
Şekil 3.7. Birim küp içerisindeki a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü birim hücre yapısı

3.5. Sonlu Elemanlar Analizi

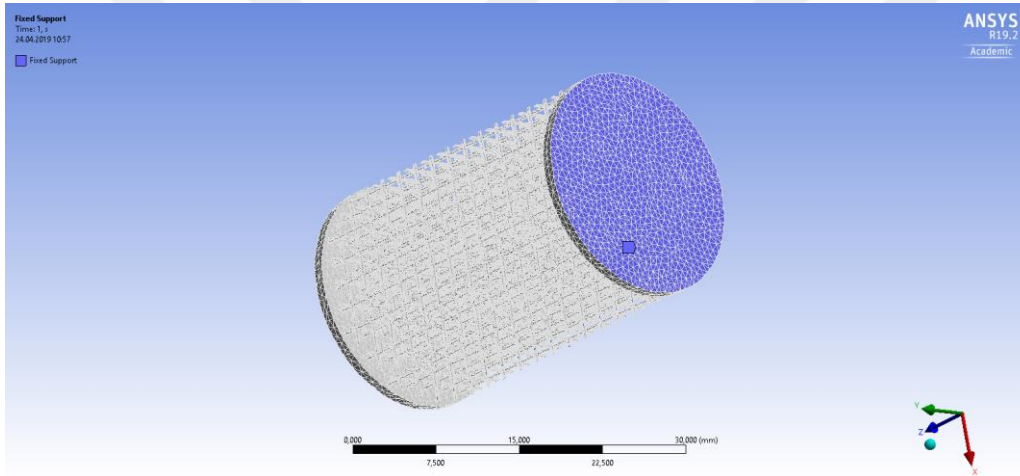
Sonlu elemanlar analizi için ANSYS programı kullanılmıştır. Analiz için ilk önce gözenekli yapıdaki modelin ölçülerinde katı model oluşturulmuştur. Oluşturulan katı model Ansys kütüphanesinde yer alan Ti6Al4V malzemesi kullanılarak analiz edilmiştir. Ağ yapı çalışmaları ve analizler yapılp katı model için elastisite modülü sonucu doğrulanmıştır. Yapılan ön çalışmalardan sonra gözenekli yapıların analizine geçilmiştir (Şekil 3.8). Tasarlanan yapılar STL formatından SpaceClaim programı ile Ansys'in okuyabileceği uygun formata (scdoc) dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm sırasında örneğin bE3 numunesinde .stl dosyasının boyutu 200 MB iken .scdoc dosyasının boyutu 1,9 GB olmuştur. Yalnızca dönüşüm sırasında dosya boyutu yaklaşık on kat artmıştır. Analiz dosyalarının boyutları ise numuneden numuneye değişmekle birlikte toplamda 154 GB tutmuştur. Analizlerde çözümün iş istasyonunun kapasitesini aştığı durumlarda modellerin ağ yapılarında sadeleştirilme uygulanmıştır. On düğüm noktalı dörtyüzlü yapı taşı kullanılarak ağ yapı oluşturulmuştur (Şekil 3.9). Bu yapı taşı karmaşık geometrilerin analizinde [83] ve keskin köşelerden kaçınmak için kullanılmaktadır [160]. Sonlu elemanlar yöntemi uygulanırken basma deneyine benzeştirecek şekilde modele bir uçtan kuvvet uygulanmış diğer uçtan ise mesnetleme yapılmıştır (Şekil 3.10). Bir diğer yaklaşım olarak, kuvvet yerine deplasman uygulanmış diğer uçtaki mesnetleme aynı bırakılmıştır (Şekil 3.11). Böylece iki yaklaşımın farkları da araştırılmıştır. Analiz sonucunda kuvvetin ve deplasmanın yakınsayıp yakınsamadığı kontrolü yapılmış ve analizlerin yakınsadığı görülmüştür.



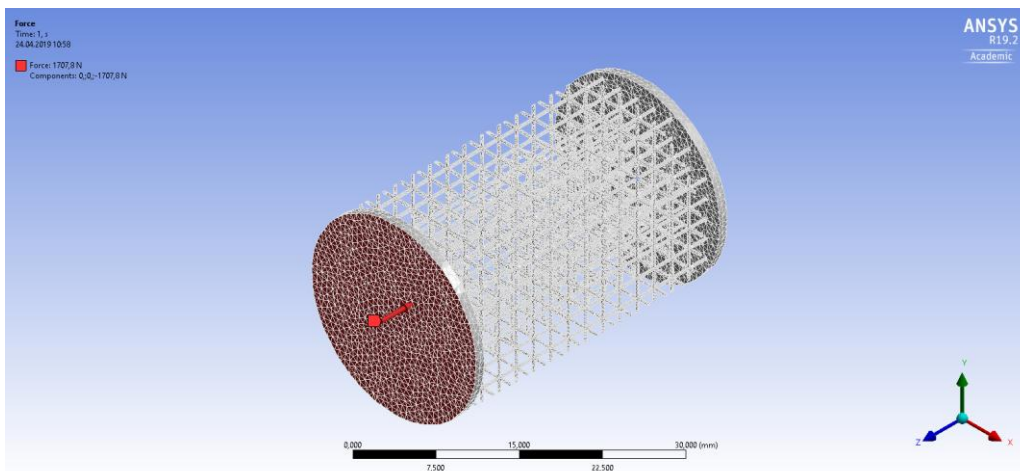
Şekil 3.8. Analizi yapılmak üzere Ansys programına aktarılmış gözenekli yapı



Şekil 3.9. Ağ yapı oluşturulmuş model



Şekil 3.10. Model üzerinde oluşturulan mesnetleme



Şekil 3.11. Model üzerinde uygulanan kuvvet ve deplasman

3.6. Basma Deneyi

Basma deneyinde numunelere gelecek yükün eksenel olması deney sonuçlarının doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Eklemeli imalatıta numunelerin gerek üretim tablası tarafında bulunan destek yapılarının sökülmesi sonucunda yüzeyin bozulması gerekse en üst katmanda oluşan pürüzlülükler numunenin çeneler arasında paralel durmasına engel olabilmektedir. Bu durum numunelerin mekanik özelliklerinin etkilenmesine yol açabilmektedir [174]. Bu nedenle basma deneylerine geçmeden önce numunelerin çeneler arasında paralel olarak durmasını sağlamak amacıyla, numunelerin alt ve üst kısmında bulunan altlıklar zımparalama ile düzeltilmiştir. Bu işlem Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Toz Metalürji laboratuvarında yer alan Struers marka LaboPol-1 model zımparalama cihazında yapılmıştır (Resim 3.12). Böylece basma deneyi esnasında yükün numunelere eksenel olarak gelmesi sağlanmıştır.



Resim 3.12. Paralelliğin sağlanması amacıyla numunelerin zımparalanması

Basma deneyleri gözenekli yapılar için literatürde de kullanılan ISO 13314:2011 standartına göre yapılmıştır [173]. Deneyler Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği (TOBB), Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi (ETÜ), Teknoloji Merkezinde yer alan Instron çekme cihazında

yapılmıştır (Resim 3.13). Cihaz çenesinin ilerleme hızı standart kapsamında 2 mm/dk olarak belirlenmiştir. Basma deneyi ile numunelerin basma yükü altında davranışları incelenmiş ve Hooke yasasına göre elastisite modülleri elde edilmiştir. Isıl işlemin elastisite modülüne etkisi de basma deneyleriyle ortaya konmuştur. Uygulanan basma deneyi sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiş ve deneyler esnasında belirli aralıklarla çekilen fotoğraflar ile raporlanmıştır. Isıl işlemlili numuneler beş, ısıls işlemsiz numuneler üç tekrarlı olacak şekilde üretilip test edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen verilerin ortalaması kullanılmıştır. Üretim hatalarından dolayı sonuçları ortalamadan belli bir oranın üzerinde sapan numuneler ortalamaya dahil edilmemiştir. Ayrıca bu deneylerden elde edilen sonuçlar Ansys'te yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır.





Resim 3.13. Basma deney düzeneği

3.7. Üç Nokta Eğme Deneyi

Üç nokta eğme deneyi için ASTM F3122-14 ve C1674-16 standartlarından yararlanılmıştır [179, 180]. Cihaz çenesinin ilerleme hızı standart doğrultusunda 5 mm/dk olarak belirlenmiştir. Üç nokta eğme deneyi TOBB ETÜ Teknoloji Merkezinde yer alan Instron 3369 cihazında uygulanmıştır (Resim 3.14). Numuneler beş tekrarlı olarak üretilip ısıtıl işlem uygulandıktan sonra test edilmiştir. Uygulanan üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiş ve deneyler esnasında belirli aralıklarla çekilen fotoğraflar ile raporlanmıştır. Sunulan sonuçlarda deneysel verilerin ortalaması kullanılmıştır. Üretim hatalarından dolayı sonuçları ortalamadan belli bir oranın üzerinde sapan numuneler ortalamaya dahil edilmemiştir.



Resim 3.14. Üç nokta eğme deney düzeneği



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Hacimsel Boşluk Oranları

Hacimsel boşluk oranları tasarım, Arşimet, kuru tartım ve matematiksel model ile belirlenmiştir. Numuneler gerek üretim gerekse deney şartlarından dolayı altlıklı olarak üretildiğinden Arşimet ve kuru tartım ölçümleri de altlıklı numunelerin sonuçlarını vermektedir. Bu da gözenekli yapının olduğundan daha az hacimsel boşluk oranında hesaplanmasına neden olmaktadır. Ancak önemli olan kısım altlıkların hesaba katılmadığı sadece gözenekli yapının hacimsel boşluk oranıdır. Arşimet yöntemi ile altlıklı üretilen numuneler üzerinden bunu ölçmek olası değildir. Ancak kuru tartımda ölçülen ağırlıktan altlıkların ağırlıklarını çıkarma işlemi yapılırsa altlıksız kuru tartım hacimsel boşluk oranı belirlenebilir. Hacimsel boşluk oranları deneysel yöntemlerin yanı sıra, altlıksız tasarlanan numunenin program üzerinden ve tasarımdan yola çıkarak türetilen matematiksel modelden hesaplanmıştır. Böylece altlıklı numunelerin tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları belirlenirken, altlıksız numunelerin ise tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları belirlenmiştir.

4.1.1. Matematiksel model

Matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranları tekdüze gözenekli yapı ve geçişli gözenekli yapı olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir.

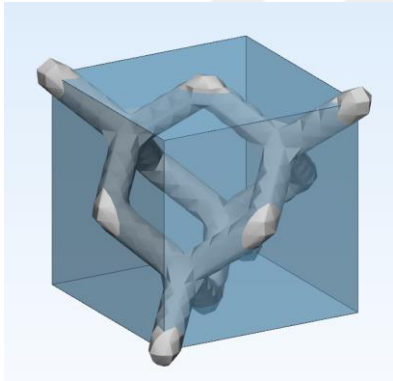
Tekdüze gözenekli yapıda hacimsel boşluk

Tekdüze gözenekli yapıda gözenekli yapıyı oluşturan birim hücrenin değişkenleri sabit tutulmaktadır. Böylece numunenin her yerinde hacimsel boşluk oranı aynı olmaktadır. Dolayısıyla birim hücrenin içinde bulunduğu birim küpün hacimsel boşluk oranı hesaplanarak tüm yapının hacimsel boşluk oranı belirlenebilmektedir. Tasarımda kullanılan elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapılarının her biri için bu hesaplamalar yapılmış ve birim hücre boyutu (a) ile kolon kalınlığına (d) bağlı hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modeller çıkarılmıştır. Birim hücredeki ayrıtların merkez noktaları birim küp sınırları içinde kalmakla beraber kolon kalınlığı arttıkça ayrıtlarda dışarı taşmalar

oluşmaktadır. Bu hesaplamalar yapılırken söz konusu dışarı taşmalar ve kolonların kesişim noktalarında birleşim hacimleri hesaplanarak daha doğru bir model çıkarılması sağlanmıştır.

Elmas Birim Hücre Yapısı

Matematiksel modelin çıkarılabilmesi için öncelikle birim hücre yapısı ve birim küp içerisinde kapladığı hacmi anlamak gerekmektedir. Şekil 4.1’de elmas birim hücre yapısı ve birim küp içinde kalan kolonları gösterilmektedir. Mavi küp, bir ayrıtının uzunluğu a olan birim küptür. Birim hücrenin kolon kalınlığı ise d ile simgelenmiştir. Hesaplamanın doğru olabilmesi için sadece birim küp içerisinde kalan kolonların hacimleri hesaplanmalıdır. Bunun için birim hücrenin toplam kolon hacmi hesaplandıktan sonra birim küp dışında kalan kolon hacimleri bu toplamdan çıkarılmıştır. Şekil 4.1 incelendiğinde birim hücreyi oluşturan kolonlardan kimi yerlerde ikisinin kimi yerlerde ise dördünün birleştiği görülmektedir. Dolayısıyla bu kolonların hacmi hesaplanırken kesişim yerlerindeki birleşim hacimleri dikkate alınarak toplam kolon hacminin daha kesin sonuç vermesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.1. Elmas birim hücre yapısı

$d < \frac{a}{2}$ olmak üzere, birim küpün hacmi;

$$V_{küp} = a^3 \quad (4.1)$$

Birim küp içinde kalan kolonların toplam hacmi;

$$V_{kolon} = \pi d^2 (a\sqrt{3} - 0,72d) \quad (4.2)$$

Birim küp içindeki boşluk hacmi;

$$V_{boşluk} = V_{küp} - V_{kolon} \quad (4.3)$$

Elmas yapının tekdüze gözenekte hacimsel boşluk oranı;

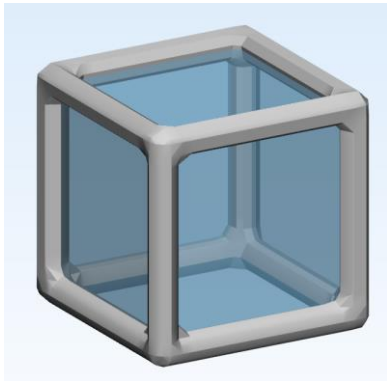
$$\%HB_E = \left[\frac{V_{boşluk}}{V_{küp}} \right] 100 = \left[\frac{V_{küp} - V_{kolon}}{V_{küp}} \right] 100 = \left[1 - \frac{V_{kolon}}{V_{küp}} \right] 100 \quad (4.4)$$

$$\%HB_E = \left[1 - \frac{\pi d^2}{a^3} (a\sqrt{3} - 0,72d) \right] 100 \quad (4.5)$$

olarak modellenmiştir. Burada %HB, hacimsel boşluk oranını ifade etmektedir.

Kübik Birim Hücre Yapısı

Şekil 4.2’de kübik birim hücre yapısı ve birim küp içinde kalan kolonları gösterilmektedir. Benzer şekilde, hesaplamanın doğru olabilmesi amacıyla sadece birim küp içerisinde kalan kolonların hacimleri hesaplanmalıdır. Şekil 4.2 incelendiğinde birim küpün sınırları birim hücreyi oluşturan kolonların tam ortasından geçmektedir. Bir diğer değişle kolonların yalnızca dörtte biri birim hücre yapısı içinde kalmaktadır. Dolayısıyla kolonların hacmi hesaplanırken yalnızca birim küp içerisinde kalan dörtte bir kolonlar hesaplanmıştır. Ayrıca kolonların kesişim yerlerindeki birleşim hacimleri hesaba katılarak toplam kolon hacmi hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. Kübik birim hücre yapısı

$d < \frac{a}{2}$ olmak üzere, birim küpün hacmi;

$$V_{küp} = a^3 \quad (4.6)$$

Birim küp içinde kalan kolonların toplam hacmi;

$$V_{kolon} = \frac{\pi d^2}{4} (3a - d) \quad (4.7)$$

Birim küp içindeki boşluk hacmi;

$$V_{boşluk} = V_{küp} - V_{kolon} \quad (4.8)$$

Kübik yapının tekdüze gözenekte hacimsel boşluk oranı;

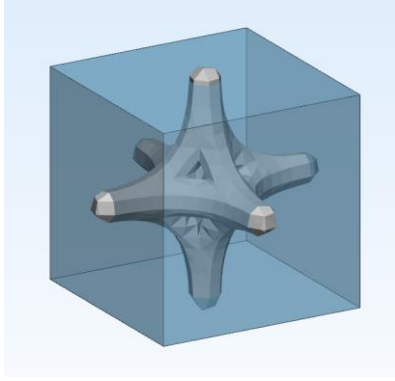
$$\%HB_K = \left[\frac{V_{boşluk}}{V_{küp}} \right] 100 = \left[\frac{V_{küp} - V_{kolon}}{V_{küp}} \right] 100 = \left[1 - \frac{V_{kolon}}{V_{küp}} \right] 100 \quad (4.9)$$

$$\%HB_K = \left[1 - \frac{\pi d^2}{4a^3} (3a - d) \right] 100 \quad (4.10)$$

olarak bulunur.

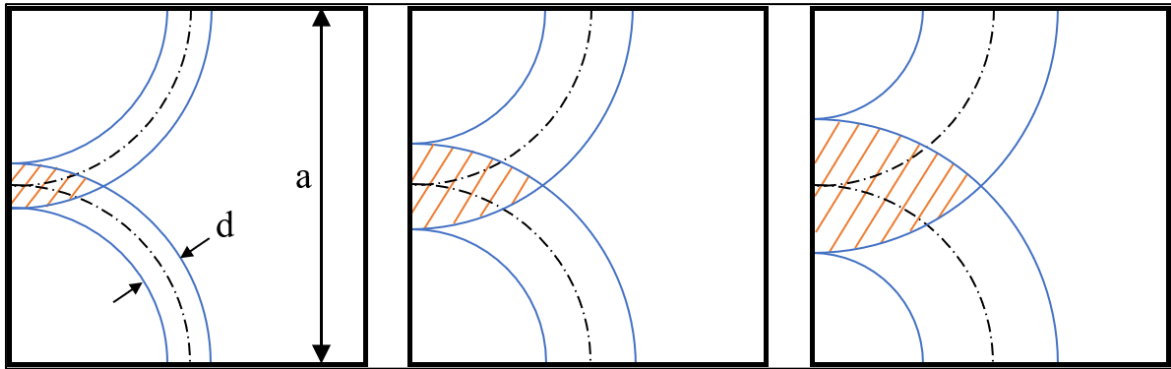
Sekizyüzlü Birim Hücre Yapısı

Sekizyüzlü birim hücre yapısı ve birim küp içinde kalan kolonları Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Diğer birim hücrelerde olduğu gibi burada da hesaplamanın doğru olabilmesi amacıyla birim küp içerisinde kalan kolonların hacimleri hesaplanmıştır. Bunun için birim hücrenin toplam kolon hacmi hesaplandıktan sonra birim küp dışında kalan kolon hacimleri bu toplamdan çıkarılmıştır.



Şekil 4.3. Sekizyüzlü birim hücre yapısı

Sekizyüzlü birim hücre yapısında kolon kesişim bölgelerinde, elmas ve kübik yapıya göre daha karmaşık bir durum vardır. Bu kesişim noktalarında dört kolon birleşmekte ve kesişim hacmi birim hücre boyutu ile kolon kalınlığına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu bölgelerdeki bağıl hacmi hesaplayabilmek için bir eşitlik türetmek gerekmektedir. Sekizyüzlü birim hücre yapısındaki kolonların birleşme yerlerinin kolon kalınlığına göre değiştiğini gösteren sadeleştirilmiş iki boyutlu görünümü Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere kolon kalınlığı değiştikçe kesişim bölgesindeki taralı olarak gösterilen hacim de değişmektedir. Benzer şekilde eğer birim hücre boyutu (a) değişseydi de kesişim hacmi değişecekti. Dolayısıyla türetilecek eşitliğin birim hücre boyutu ile kolon kalınlığına bağlı olması gerekmektedir.



Şekil 4.4. Sekizyüzlü yapıda iki boyutta farklı kalınlıktaki kolonların kesişim alanları

Şekil 4.5'te kolonların kesişim bölgesinin geometrisi gösterilmiştir. Alttan ve üstten gelen kolonlar, merkezleri D noktasında birleşecek şekilde birim hücrenin AC kenarında üst üste gelmektedir. C noktasından B noktasına (üstteki kolonun orta noktası) bir doğru çizelir. B noktası üstteki kolonun orta noktası ile alttaki kolonun üst noktasının kesiştiği noktadır. x

olarak bulunur. ABC üçgeninde x açısına kosinüs teoremi uygulanıp x açısı çekilirse;

$$r_2^2 = r_1^2 + (2r_1)^2 - 2r_1(2r_1) \cos x \quad (4.12)$$

$$x = \text{Arccos} \left[\frac{5r_1^2 - r_2^2}{4r_1^2} \right] \quad (4.13)$$

olarak bulunur. Eş 4.11, Eş 4.13'te yerine yazılırsa;

$$x = \text{Arccos} \left[1 - \frac{d(2a + d)}{4a^2} \right] \quad (4.14)$$

x açısı birim hücre boyutu ve kolon kalınlığına bağlı olarak bulunmuş olur.

$d < \frac{a}{2}$ olmak üzere, birim küpün hacmi;

$$V_{\text{küp}} = a^3 \quad (4.15)$$

Birim küp içinde kalan kolonların toplam hacmi;

$$V_{\text{kolon}} = \frac{3a(\pi d)^2}{4} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d}{4a^2} (2a + d) \right]}{60} \right] \quad (4.16)$$

Birim küp içindeki boşluk hacmi;

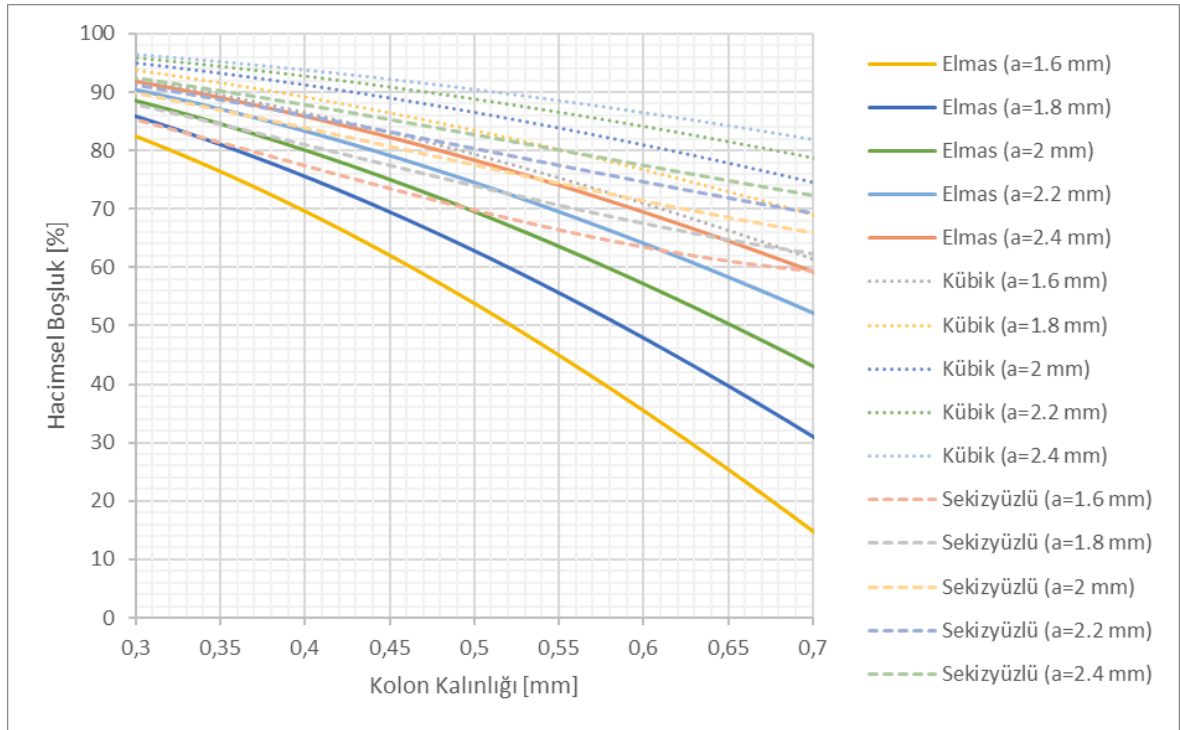
$$V_{\text{boşluk}} = V_{\text{küp}} - V_{\text{kolon}} \quad (4.17)$$

Sekizyüzlü yapının tekdüze gözenekte hacimsel boşluk oranı;

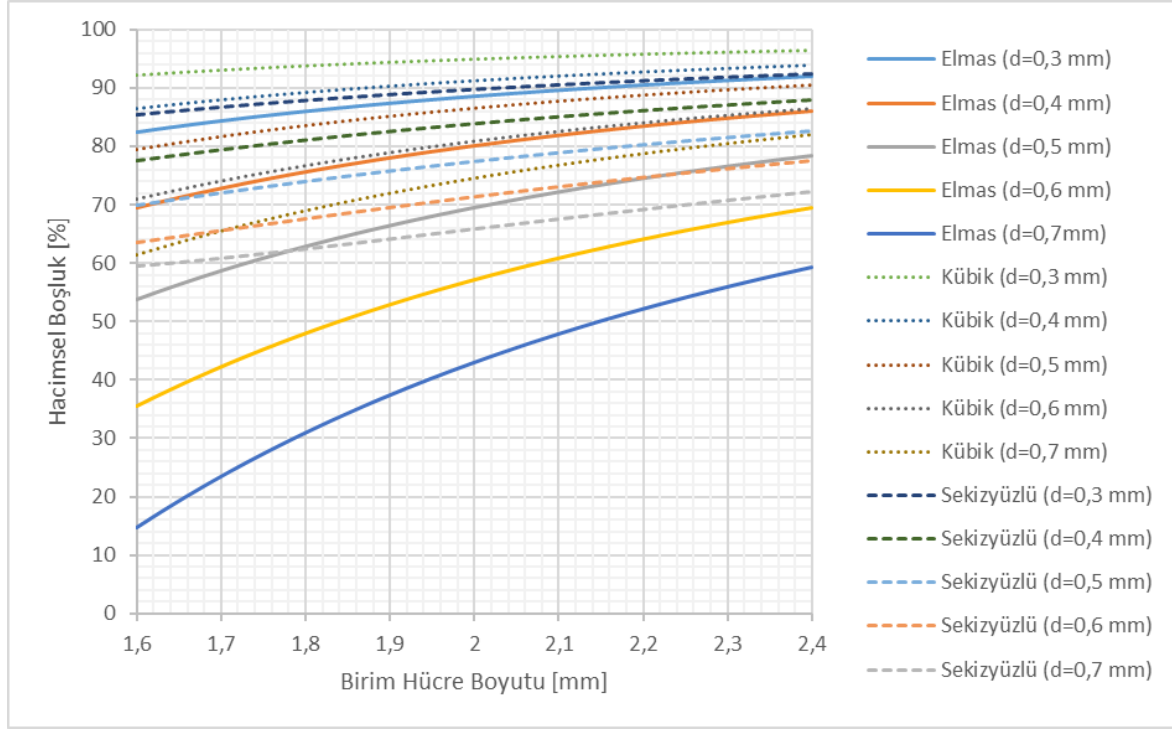
$$\%HB_S = \left[\frac{V_{\text{boşluk}}}{V_{\text{küp}}} \right] 100 = \left[\frac{V_{\text{küp}} - V_{\text{kolon}}}{V_{\text{küp}}} \right] 100 = \left[1 - \frac{V_{\text{kolon}}}{V_{\text{küp}}} \right] 100 \quad (4.18)$$

$$\%HB_S = \left\{ 1 - \frac{3(\pi d)^2}{4a^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d}{4a^2} (2a + d) \right]}{60} \right] \right\} 100 \quad (4.19)$$

olarak bulunur. Böylece tekdüze gözenekli yapılarda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapıları için, birim hücre boyutu (a) ve kolon kalınlığına (d) bağlı hacimsel oranlarını veren matematiksel modelleri çıkarılmıştır. Bu modellere göre, her üç birim hücre yapısı için farklı birim hücre boyutlarına ve kolon kalınlıklarına bağlı hacimsel boşluk oranlarını veren grafikler Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.6. Belirli birim hücre boyutları için kolon kalınlığına bağlı hacimsel boşluk oranları



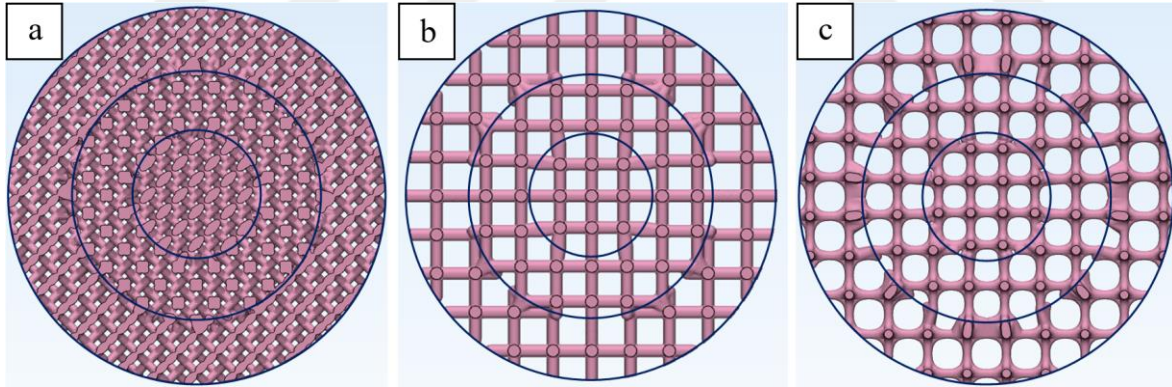
Şekil 4.7. Belirli kolon kalınlıkları için birim hücre boyutuna bağlı hacimsel boşluk oranları

Beklenildiği üzere kolon kalınlığı arttıkça hacimsel boşluk oranı azalırken, birim hücre boyutu arttıkça hacimsel boşluk oranı artmaktadır. Üç birim hücre yapısı arasında elmas birim hücre yapısının aynı birim hücre boyutu ve kolon kalınlığında en düşük hacimsel boşluk oranına sahip olduğu görülürken kübik yapının ise en yüksek hacimsel boşluk oranına sahip olduğu görülmektedir. Buna neden olarak birim hücre yapılarının birim küp içerisinde kalan kolon hacimleri olduğu söylenebilir. Şekil 4.1 incelendiğinde kübik yapının kolonlarının birim küp içerisinde kalan kısımları kolonların yalnızca dörtte bir oranındadır. Dışarda kalan kolonlar komşu birim hücrelerle paylaşılmaktadır. Sekizyüzlü yapıda ise kolon birleşim noktalarında dört kolonun birleşerek bir kolon haline geldiği görülmektedir (Şekil 4.3). Bu da benzer şekilde bu yapının birim küp içerisindeki kolon hacmini düşürmekte ve hacimsel boşluk oranının yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Elmas yapıda ise kolon kesişimleri ve birim küp dışına taşan kolonlar en düşük düzeyde kalmaktadır (Şekil 4.1). Böylece kolonlar birim küp içinde daha fazla hacim kaplamakta ve hacimsel boşluk oranını düşürmektedir.

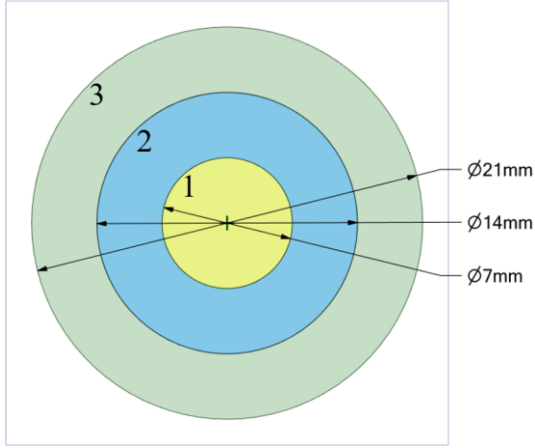
Geçişli gözenekli yapıda hacimsel boşluk

Basma deneyi numuneleri

Daha önce verilen Eş. 4.5, Eş. 4.10 ve Eş. 4.19 sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücrelerinden oluşan tekdüze gözenekli yapıya sahip numuneler için geçerli olan matematiksel modellerdir. Basma deneyi için tasarlanan numuneler ise Şekil 4.8’de kesitleri gösterildiği gibi üç farklı geçişli gözenek yapısına sahiptir. Dolayısıyla bu eşitlikler kullanılarak geçişli gözenek yapısına uygun matematiksel modeller türetilmiştir. Bunun için öncelikle toplam kesit alan ve her bir geçişli gözenek yapısının kesit alanları hesaplanmıştır. Bu kesitlerin alanları toplam kesit alanına bölünerek geçişli gözenekli yapıların ağırlıklı kesit alanları bulunmuştur. Bu sayede her bir kesit için farklı birim hücre boyutu ve farklı kolon kalınlığı verilerek geçişli yapının hacimsel boşluk oranı hesaplanabilmektedir. Geçişler arasında kalan kolonların hacimleri toplam hacme göre oldukça küçük olduğundan etkisi olmadığı kabul edilmiştir. Şekil 4.9’da basma deneyi için tasarlanan geçişli yapıların boyutları verilmiştir.



Şekil 4.8. Basma numunelerinin geçişli a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü birim hücre yapıları



Şekil 4.9. Basma deneyi numunelerinin geçişli yapılarının boyutları

Geçişli yapının sınırının belirleyen çemberlerin çapları;

$$D_1 = 7 \text{ mm}$$

$$D_2 = 14 \text{ mm}$$

$$D_3 = 21 \text{ mm}$$

(4.20)

Burada alt indisteki sayılar Şekil 4.9'daki ilgili bölgeyi göstermektedir. Bu çemberler içerisinde kalan alanlar;

$$A_1 = 38,48 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 115,45 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = 192,42 \text{ mm}^2$$

(4.21)

Toplam kesit alanı;

$$A = 346,36 \text{ mm}^2$$

(4.22)

Kesit alan ağırlıkları;

$$A'_1 = \frac{A_1}{A} \rightarrow A'_1 = 0,11$$

$$A'_2 = \frac{A_2}{A} \rightarrow A'_2 = 0,33$$

(4.23)

$$A'_3 = \frac{A_3}{A} \rightarrow A'_3 = 0,56$$

Kesit alan ağırlıklarına bağlı hacimsel boşluk oranları;

$$\begin{aligned} \%HB_1 &= A'_1 \%HB \\ \%HB_2 &= A'_2 \%HB \\ \%HB_3 &= A'_3 \%HB \end{aligned} \quad (4.24)$$

Geçişli gözenek yapısına sahip numunenin hacimsel boşluk oranı;

$$\%HB' = \%HB_1 + \%HB_2 + \%HB_3 \quad (4.25)$$

Buna göre elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli basma deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranları sırasıyla;

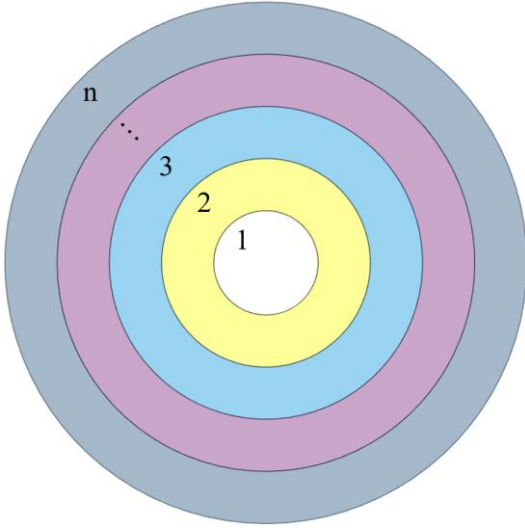
$$\begin{aligned} \%HB'_{bE} &= \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{a_1^3} (a_1 \sqrt{3} - 0,72 d_1) \right] \right. \\ &\quad + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{a_2^3} (a_2 \sqrt{3} - 0,72 d_2) \right] \\ &\quad \left. + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{a_3^3} (a_3 \sqrt{3} - 0,72 d_3) \right] \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} \%HB'_{bK} &= \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{4a_1^3} (3a_1 - d_1) \right] + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{4a_2^3} (3a_2 - d_2) \right] \right. \\ &\quad \left. + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{4a_3^3} (3a_3 - d_3) \right] \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned}
\%HB'_{bs} = & \left\{ 0,11 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_1)^2}{4a_1^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_1}{4a_1^2} (2a_1 + d_1) \right]}{60} \right] \right\} \right. \\
& + 0,33 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_2)^2}{4a_2^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_2}{4a_2^2} (2a_2 + d_2) \right]}{60} \right] \right\} \\
& \left. + 0,56 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_3)^2}{4a_3^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_3}{4a_3^2} (2a_3 + d_3) \right]}{60} \right] \right\} \right\} 100
\end{aligned} \tag{4.28}$$

olarak bulunur. Burada ' işareti yapının geçişli gözenekli yapı olduğunu belirtmektedir. Alt indisteki b basma numunesi olduğunu, E , K ve S ise sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısını belirtmektedir. Böylece tasarlanan işlevsel geçişli gözenekli yapılardan oluşan basma deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modeller oluşturulmuştur.

Bu çalışmada amaç yalnızca çalışılan tasarımlar çerçevesinde kalınmayıp oluşturulan matematiksel modellerin genişletilerek uygulanabilirliğinin arttırılmasıdır. Bu sayede ileride yapılabilecek yeni tasarımların üç boyutlu modellerinin tasarım aşamasına geçilmeden iki boyutlu kesit görüntüsü üzerinden matematiksel modeller sayesinde hacimsel boşluklarının tahmin edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda Şekil 4.10'da geçişli yapının $i=1$ 'den n 'ye kadar geliştirilmiş kesit görüntüsü verilmiştir. Bu geçişte çaplar belli bir oranda veya kurala bağlı olmak durumunda değildir.



Şekil 4.10. Basma deneyi numunesi tasarımı için İşlevsel geçişli gözenekli yapının geliştirilmiş hali

Burada i içten dışa geçiş sırası, n toplam geçiş sayısı ve A' ise ilgili kesit alanının toplam kesit alanına oranı olmak üzere, formüller geliştirilirse hacimsel boşluk oranları;

$$\%HB'_{bE} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bE})_i \quad (4.29)$$

$$\%HB'_{bK} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bK})_i \quad (4.30)$$

$$\%HB'_{bS} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bS})_i \quad (4.31)$$

olarak bulunur. A toplam kesit alanı, A_i ilgili bölgenin kesit alanı, r kesitin yarıçapı ve r_i ilgili bölgenin yarıçapı olmak üzere;

$$A'_i = \frac{A_i}{A} \quad (4.32)$$

$$A_i = \pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \quad (4.33)$$

$$(\%HB_{bE})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72 d_i) \quad (4.34)$$

$$(\%HB_{bK})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \quad (4.35)$$

$$(\%HB_{bS})_i = 1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \quad (4.36)$$

Eş. 4.34-4.36, sırasıyla Eş. 4.29-4.31’de yerine yazılırsa;

$$\%HB'_{bE} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72 d_i) \right) \quad (4.37)$$

$$\%HB'_{bK} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \right) \quad (4.38)$$

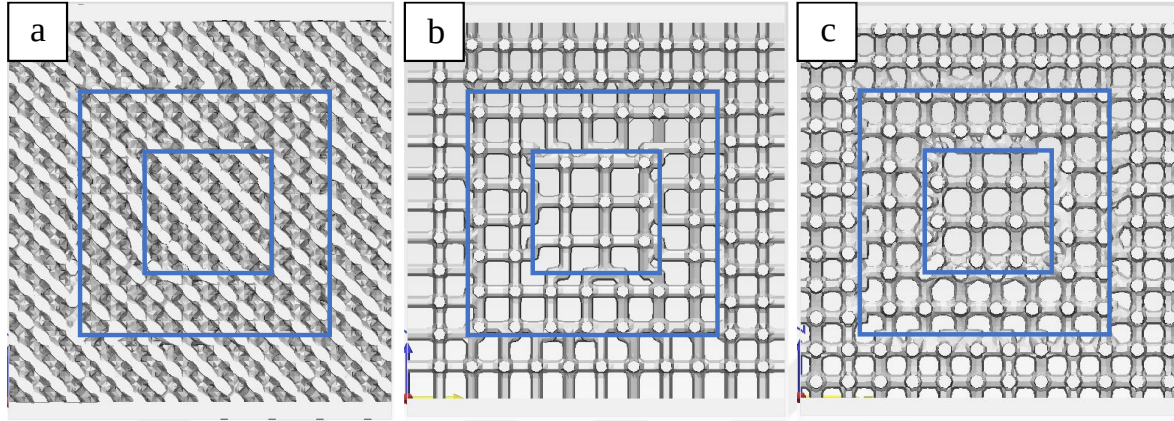
$$\%HB'_{bS} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \right) \quad (4.39)$$

geçişli gözenekli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a_i) ve değişken kolon kalınlıklarına (d_i) bağlı genelleştirilmiş hacimsel boşluk oranlarını veren kapalı formlu matematiksel modeller çıkarılmış olur.

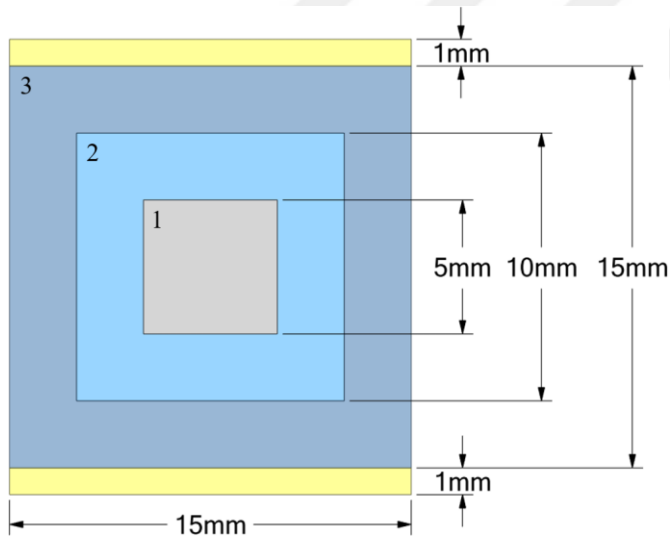
Üç nokta eğme deneyi numuneleri

Basma deneyi numunelerine benzer şekilde tekdüze gözenekli yapılar için elde edilen matematiksel modellerden yola çıkılarak geçişli gözenekli yapının hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modeller türetilmiştir. Şekil 4.11’de üç nokta eğme deneyi için tasarlanan yapıların kesit görüntüleri ve geçişleri gösterilmiştir. Her üç birim hücre yapılarıyla oluşturulan modellerin, içten dışa azalan birim hücre boyutu olacak şekilde

geçişli birim hücre boyutlarını gösteren kesit görüntüleri verilmiştir. Geçişler arasında kalan kolonların hacimleri toplam hacme göre oldukça küçük olduğundan etkisi olmadığı kabul edilmiştir. Şekil 4.12’de ise tasarlanan geçişli yapıların boyutları verilmiştir.



Şekil 4.11. Üç nokta eğme numunelerinin geçişli a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü birim hücre yapıları



Şekil 4.12. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin geçişli yapılarının boyutları

Geçişli yapının sınırının belirleyen karelerin bir kenarının uzunlukları;

$$L_1 = 5 \text{ mm}$$

$$L_2 = 10 \text{ mm}$$

$$L_3 = 15 \text{ mm}$$

(4.40)

Burada alt indisteki sayılar Şekil 4.12'deki ilgili bölgeyi göstermektedir. Bu bölgeler içerisinde kalan alanlar;

$$\begin{aligned} A_1 &= 25 \text{ mm}^2 \\ A_2 &= 75 \text{ mm}^2 \\ A_3 &= 125 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (4.41)$$

Toplam kesit alanı;

$$A = 225 \text{ mm}^2 \quad (4.42)$$

Kesit alan ağırlıkları;

$$\begin{aligned} A'_1 &= \frac{A_1}{A} \rightarrow A'_1 = 0,11 \\ A'_2 &= \frac{A_2}{A} \rightarrow A'_2 = 0,33 \\ A'_3 &= \frac{A_3}{A} \rightarrow A'_3 = 0,56 \end{aligned} \quad (4.43)$$

Kesit alan ağırlıklarına bağlı hacimsel boşluk oranları;

$$\begin{aligned} \%HB_1 &= A'_1 \%HB \\ \%HB_2 &= A'_2 \%HB \\ \%HB_3 &= A'_3 \%HB \end{aligned} \quad (4.44)$$

Geçişli gözenek yapısına sahip numunenin hacimsel boşluk oranı;

$$\%HB' = \%HB_1 + \%HB_2 + \%HB_3 \quad (4.45)$$

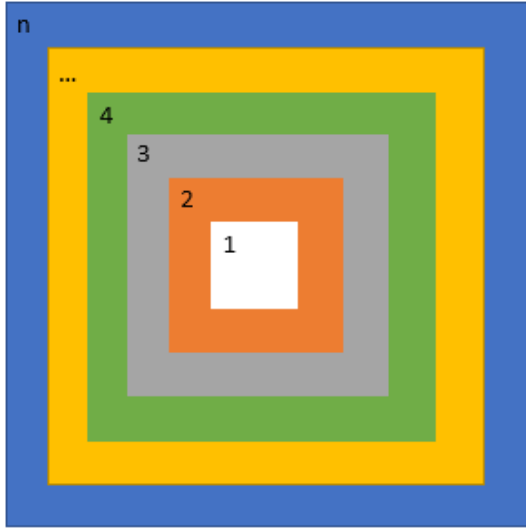
Buna göre elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli üç nokta eğme deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranları sırasıyla;

$$\begin{aligned} \%HB'_{eE} = & \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{a_1^3} (a_1 \sqrt{3} - 0,72 d_1) \right] \right. \\ & + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{a_2^3} (a_2 \sqrt{3} - 0,72 d_2) \right] \\ & \left. + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{a_3^3} (a_3 \sqrt{3} - 0,72 d_3) \right] \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned} \%HB'_{eK} = & \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{4a_1^3} (3a_1 - d_1) \right] + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{4a_2^3} (3a_2 - d_2) \right] \right. \\ & \left. + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{4a_3^3} (3a_3 - d_3) \right] \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} \%HB'_{eS} = & \left\{ 0,11 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_1)^2}{4a_1^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_1}{4a_1^2} (2a_1 + d_1) \right]}{60} \right] \right\} \right. \\ & + 0,33 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_2)^2}{4a_2^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_2}{4a_2^2} (2a_2 + d_2) \right]}{60} \right] \right\} \\ & \left. + 0,56 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_3)^2}{4a_3^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_3}{4a_3^2} (2a_3 + d_3) \right]}{60} \right] \right\} \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.48)$$

olarak bulunur. Burada ' işareti yapının geçişli gözenekli yapı olduğunu belirtmektedir. Alt indisteki e üç nokta eğme numunesi olduğunu, E , K ve S ise sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısını belirtmektedir. Böylece tasarlanan işlevsel geçişli gözenekli yapılardan oluşan üç nokta eğme deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modeller oluşturulmuştur. Basma deneyi tasarımlarında olduğu gibi üç nokta eğme numunelerinin tasarımlarının da geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda geliştirilmiş geçişli yapıda oluşturulan modelin kesit görüntüsü Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Üç nokta eğme deneyi numunesi tasarımı için işlevsel geçişli gözenekli yapının genelleştirilmiş hali

Burada i içten dışa geçiş sırası, n toplam geçiş sayısı ve A' ise ilgili kesit alanının toplam kesit alanına oranı olmak üzere, formüller genelleştirilirse hacimsel boşluk oranları;

$$\%HB'_{eE} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{eE})_i \quad (4.49)$$

$$\%HB'_{eK} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{eK})_i \quad (4.50)$$

$$\%HB'_{eS} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{eS})_i \quad (4.51)$$

olarak bulunur. A toplam kesit alanı, A_i ilgili bölgenin kesit alanı, L kesitin bir kenarının uzunluğu ve L_i ilgili bölgenin bir kenar uzunluğu olmak üzere;

$$A'_i = \frac{A_i}{A} \quad (4.52)$$

$$A_i = L_i^2 - L_{i-1}^2 \quad (4.53)$$

$$(\%HB_{eE})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72 d_i) \quad (4.54)$$

$$(\%HB_{eK})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \quad (4.55)$$

$$(\%HB_{eS})_i = 1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \quad (4.56)$$

Eş. 4.54-4.56, sırasıyla Eş. 4.49-4.51’de yerine yazılırsa;

$$\%HB'_{eE} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72 d_i) \right) \quad (4.57)$$

$$\%HB'_{eK} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \right) \quad (4.58)$$

$$\%HB'_{eS} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \right) \quad (4.59)$$

geçişli gözenekli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a_i) ve değişken kolon kalınlıklarına (d_i) bağlı genelleştirilmiş hacimsel boşluk oranlarını veren kapalı formülü matematiksel modeller çıkarılmış olur.

4.1.2. Altlıklı numunelerin hacimsel boşluk oranları

Arşimet ve kuru tartım ölçümleri deneyler için üretilen numunelere uygulandığı için altlıklı olarak ölçümler yapılmış ve hacimsel boşluk oranları hesaplanmıştır. Dolayısıyla Arşimet yöntemi ile ölçülen hacimsel boşluk değerleri ve kuru tartım hacimsel boşluk değerleri altlıklarında hesaba katıldığı değerlerdir. Bunun yanında karşılaştırma açısından programdaki model üzerinden tasarımın altlıklı hacimsel boşluk oranları da alınmıştır.

Basma deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranları

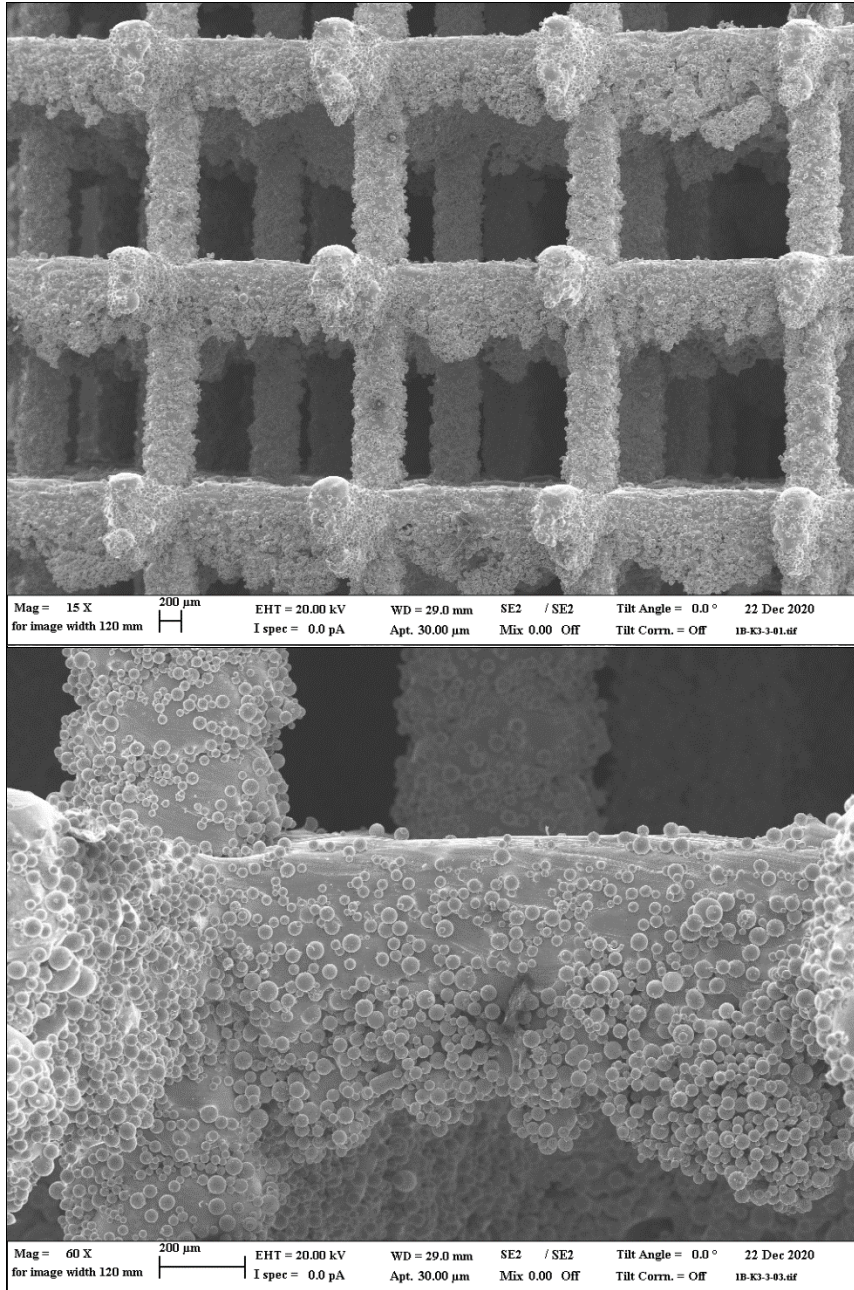
Basma deneyi için tasarlanan ve üretilen numunelerin birim hücre yapısı ve kolon kalınlıklarına bağlı tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve aralarındaki sapma oranları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Altlıklı basma deneyi numunelerinin tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve farkları

Numune	Hacimsel Boşluk [%]			Sapma [%]		
	Tasarım	Arşimet	Kuru Tartım	Tasarım - Arşimet	Tasarım - Kuru Tartım	Arşimet - Kuru Tartım
bE3	84,26	73,30	73,73	-13,01	-12,50	0,59
bE5	69,48	59,09	59,48	-14,95	-14,39	0,66
bE7	51,72	43,19	43,30	-16,49	-16,28	0,25
bK3	89,54	84,42	84,31	-5,72	-5,84	-0,13
bK5	82,62	74,09	76,32	-10,32	-7,63	3,01
bK7	73,60	65,84	67,21	-10,54	-8,68	2,08
bS3	84,84	77,55	77,91	-8,59	-8,17	0,46
bS5	75,58	66,21	68,89	-12,40	-8,85	4,05
bS7	65,91	58,46	59,30	-11,30	-10,03	1,44

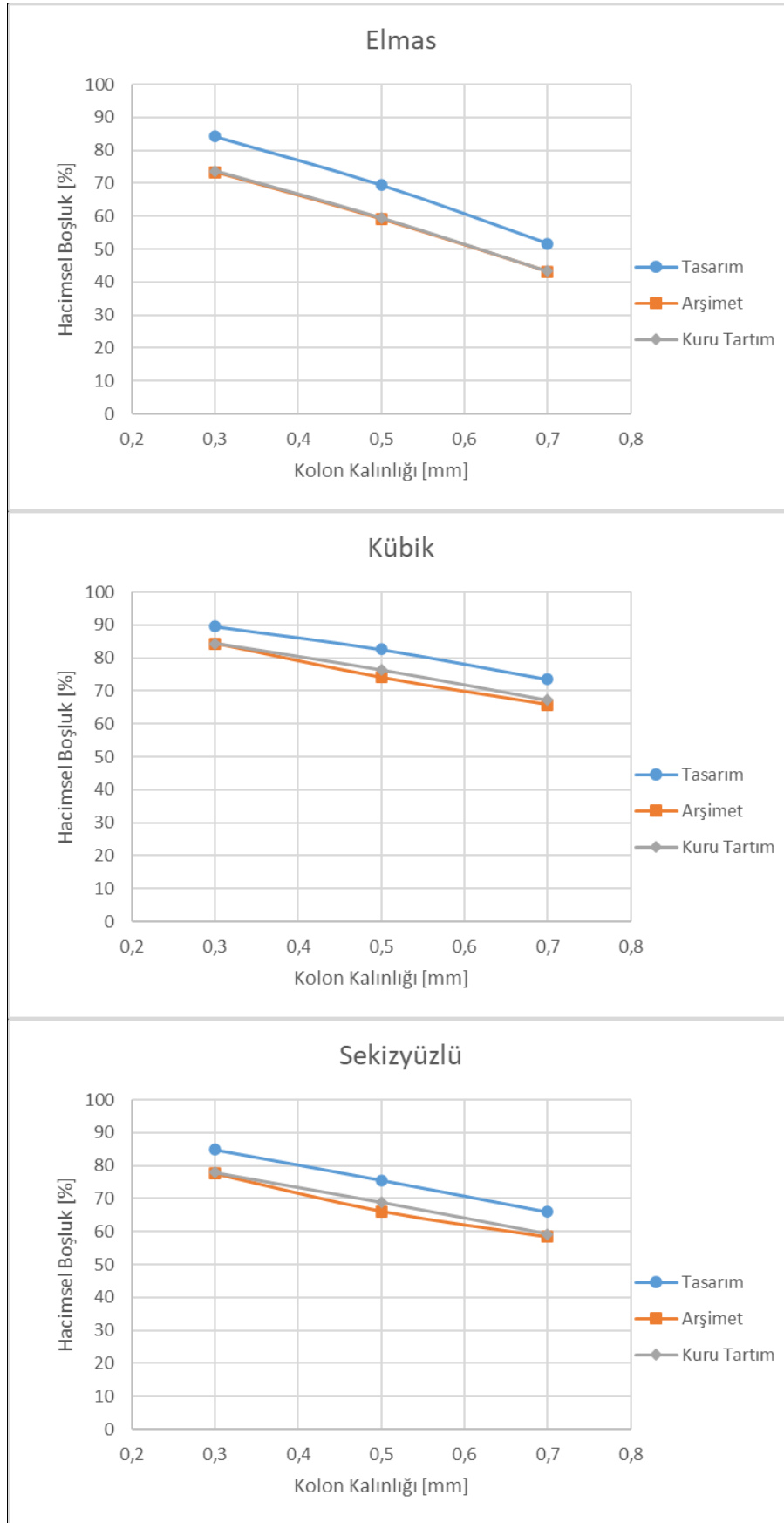
Çizelge 4.1 incelendiğinde her üç kolon kalınlığı ve ölçüm yöntemi içinde en yüksek hacimsel boşluk oranına sahip birim hücre yapısı kübiktir. Kübik yapıyı sekizyüzlü takip etmektedir ve en düşük hacimsel boşluk oranına sahip birim hücre yapısı ise elmas olarak bulunmuştur. Her üç birim hücre yapısı için de beklenildiği üzere kolon kalınlıkları arttıkça hacimsel boşluk oranları azalmıştır. Ölçüm yöntemleri olan Arşimet ve kuru tartım sonuçlarına bakıldığında sapmaların oldukça az olduğu görülmüş ve bütün birim hücre yapıları için en büyük sapma %4,05 ile 0,5 mm kolon kalınlığına sahip sekizyüzlü numunede oluşmuştur. Asıl sapmalar tasarım ile ölçümler arasında gerçekleşmiş olup %5,72 ile %16,49 arasında bulunmuştur. Bütün numunelerde tasarımdan elde edilen hacimsel boşluk oranları Arşimet ve kuru tartım ölçümlerinden yüksek çıkmıştır. Bu sonuç eklemeli imalatın kısıtlamalarından kaynaklanmaktadır. Eklemeli imalatla özellikle yere paralel olan kolonlarda tozların katılaşması esnasında kolon kalınlığını arttıran aşağı yönlü sarkmalar meydana gelmektedir [129, 181, 182]. Bunlar da tasarlanandan daha kalın kolonların üretilmesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda üretilen numuneler üzerinden ölçülen

hacimsel boşluk oranları programdaki tasarım üzerinden okunan oranlardan düşük çıkmaktadır. Ayrıca üretim sonrasında kolonların üstünde yarı ergimiş tozların bulunması da tartım sonuçlarının tasarımdan düşük çıkmasına neden olmaktadır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Kolonlardaki sarkmalar ve yarı ergimiş tozların SEM görüntüleri

Şekil 4.15'te elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapılarına sahip altlıklı basma deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları verilmiştir.



Şekil 4.15. Altıklı basma deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı hacimsel boşluk oranları

Üç nokta eğme deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranları

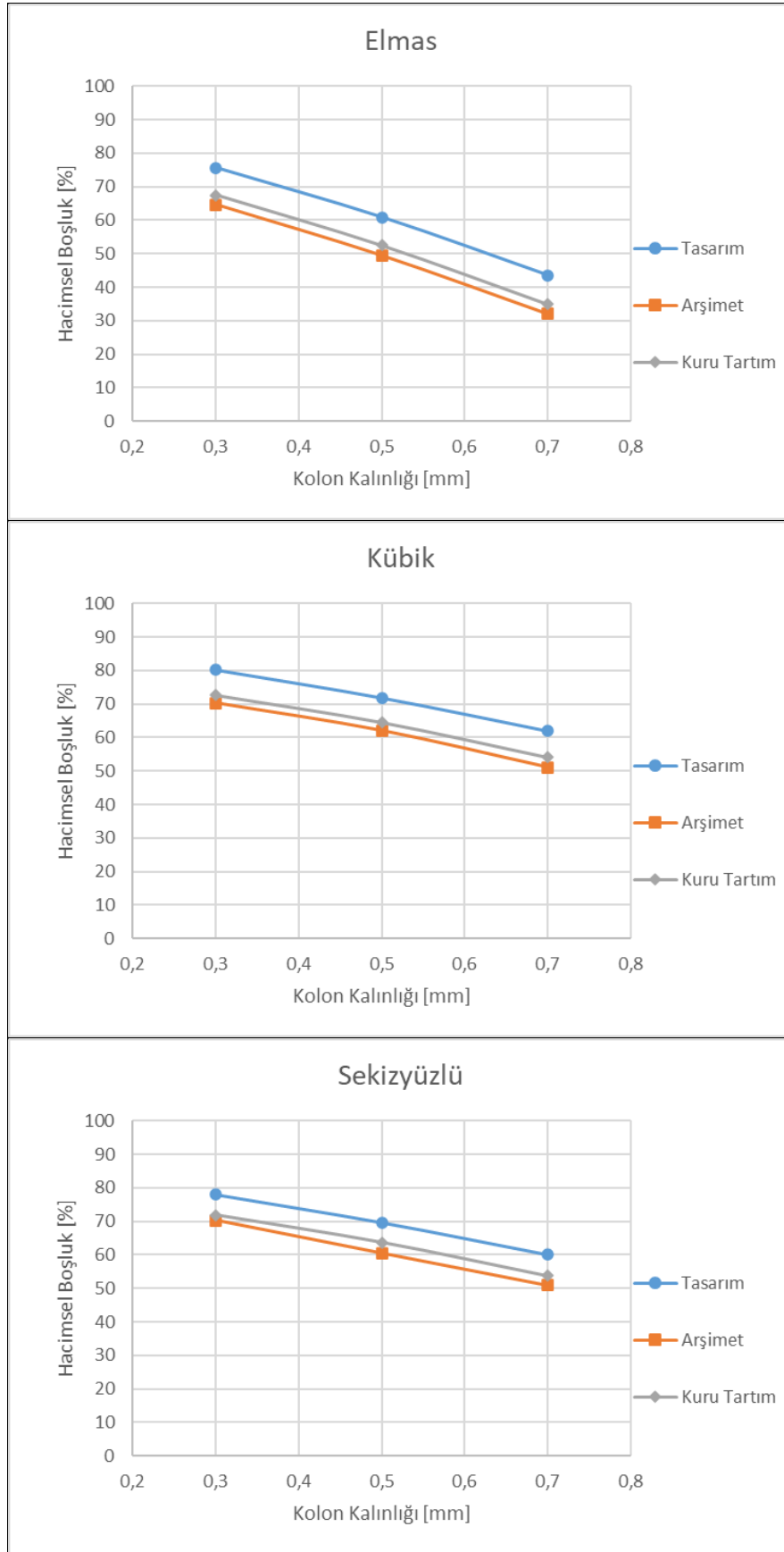
Üç nokta eğme deneyi için tasarlanan ve üretilen numunelerin birim hücre yapısı ve kolon kalınlıklarına bağlı tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve aralarındaki sapma oranları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Altlıklı üç nokta eğme deneyi numunelerinin tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve farkları

Numune	Hacimsel Boşluk [%]			Sapma [%]		
	Tasarım	Arşimet	Kuru Tartım	Tasarım - Arşimet	Tasarım - Kuru Tartım	Arşimet - Kuru Tartım
eE3	75,59	64,63	67,50	-14,50	-10,70	4,44
eE5	60,87	49,47	52,46	-18,73	-13,82	6,04
eE7	43,62	32,07	34,92	-26,48	-19,94	8,89
eK3	80,15	70,29	72,61	-12,30	-9,41	3,30
eK5	71,82	62,04	64,48	-13,62	-10,22	3,93
eK7	61,92	51,07	54,03	-17,52	-12,74	5,80
eS3	77,91	70,24	71,84	-9,84	-7,79	2,28
eS5	69,61	60,52	63,72	-13,06	-8,46	5,29
eS7	60,09	50,98	53,73	-15,16	-10,58	5,39

Çizelge 4.2 incelendiğinde her üç kolon kalınlığı ve ölçüm yöntemi içinde en yüksek hacimsel boşluk oranına sahip birim hücre yapısı kübiktir. Basma deneyi numunelerindekilere benzer şekilde kübik birim hücre yapısını sekizyüzlü takip etmektedir ve en düşük hacimsel boşluk oranına sahip yapı ise elmas olarak bulunmuştur. Her üç birim hücre yapısı için de kolon kalınlıkları arttıkça hacimsel boşluk oranları azalmıştır. Ölçüm yöntemleri olan Arşimet ve kuru tartım sonuçlarına bakıldığında sapmaların oldukça az olduğu görülmüş ve bütün birim hücre yapıları için en büyük fark %8,89 ile 0,7 mm kolon kalınlığına sahip elmas numunede oluşmuştur. Tasarım ile ölçümler arasında daha büyük sapmalar gerçekleşmiş olup, bu sapmalar %7,79 ile %26,48 arasında bulunmuştur. Bütün numunelerde tasarımdan elde edilen hacimsel boşluk oranları daha önce değinilen üretim hatalarından dolayı Arşimet ve kuru tartım ölçümlerinden yüksek çıkmıştır.

Şekil 4.16’da elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapılarına sahip altlıklı üç nokta eğme deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları verilmiştir.



Şekil 4.16. Altıtlıklı üç nokta eğme deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı hacimsel boşluk oranları

4.1.3. Altıksız numunelerin hacimsel boşluk oranları

Numuneler her ne kadar deney gereklilikleri ve üretim kısıtlamaları dolayısıyla altlıklı olarak üretilmiş olsa da asıl ilgi alanı altıksız gözenekli yapı olduğundan dolayı, aynı yapıların üç farklı yöntem kullanılarak altıksız hacimsel boşluk oranları da hesaplanmıştır. İlk olarak, yalnızca gözenekli yapının hacimsel boşluk oranını bulabilmek için kuru tartım ölçümünden sonra altlıkların hacimlerinden yola çıkılarak ağırlıkları bulunmuş ve ölçümlerden çıkarılarak altıksız kuru tartım değerleri elde edilmiştir. İkinci olarak, program yardımıyla tasarım üzerinden altıksız olarak hacimsel boşluk oranları alınmıştır. Son olarak, tekdüze gözenekli yapıya bağlı formüllerden türetilen, birim hücre boyutuna ve kolon kalınlığına bağlı olarak geçişli gözenekli yapıya sahip numunelerin hacimsel boşluk oranları veren matematiksel modeller kullanılarak hacimsel boşluk oranları hesaplanmıştır.

Basma deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranları

Basma deneyi numuneleri için tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranlarının sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Altıksız basma deneyi numunelerinin tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve farkları

Numune	Hacimsel Boşluk [%]			Sapma [%]		
	Tasarım	Matematiksel Model	Kuru Tartım	Tasarım - Matematiksel Model	Tasarım - Kuru Tartım	Matematiksel Model - Kuru Tartım
bE3	89,89	89,31	78,65	-0,65	-12,51	-11,94
bE5	74,12	71,58	63,45	-3,43	-14,40	-11,36
bE7	55,17	46,79	46,19	-15,19	-16,28	-1,29
bK3	95,51	95,31	89,93	-0,21	-5,84	-5,64
bK5	88,13	87,42	81,41	-0,81	-7,63	-6,88
bK7	78,51	76,21	71,69	-2,93	-8,69	-5,93
bS3	90,50	90,40	83,10	-0,11	-8,17	-8,07
bS5	80,69	78,67	73,48	-2,51	-8,93	-6,59
bS7	70,31	67,34	63,25	-4,23	-10,04	-6,06

Çizelge 4.3 incelendiğinde beklenildiği üzere kolon kalınlıkları arttıkça hacimsel boşluk oranları düşmektedir. Her üç kolon kalınlığı ve ölçüm yöntemi içinde en yüksek hacimsel

boşluk oranına sahip birim hücre yapısı kübiktir. Kübik yapıyı sekizyüzlü takip etmektedir ve en düşük hacimsel boşluk oranına sahip birim hücre yapısı ise elmas olarak bulunmuştur. Birim hücre boyutu ve kolon kalınlığı girilerek hacimsel boşluk oranının elde edildiği matematiksel model ile üretilen numunenin ölçülmesiyle elde edilen kuru tartım sonuçları karşılaştırıldığında sapmaların %1,29 ile %11,94 arasında olduğu görülmektedir. Bu her iki uç değer de elmas birim hücre yapısına ait numunelerde oluşmuştur. Kübik yapıda sapma %5,64 ile %6,88 arasındadır. Sekizyüzlü yapı da ise sapma %6,06 ile %8,07 arasındadır.

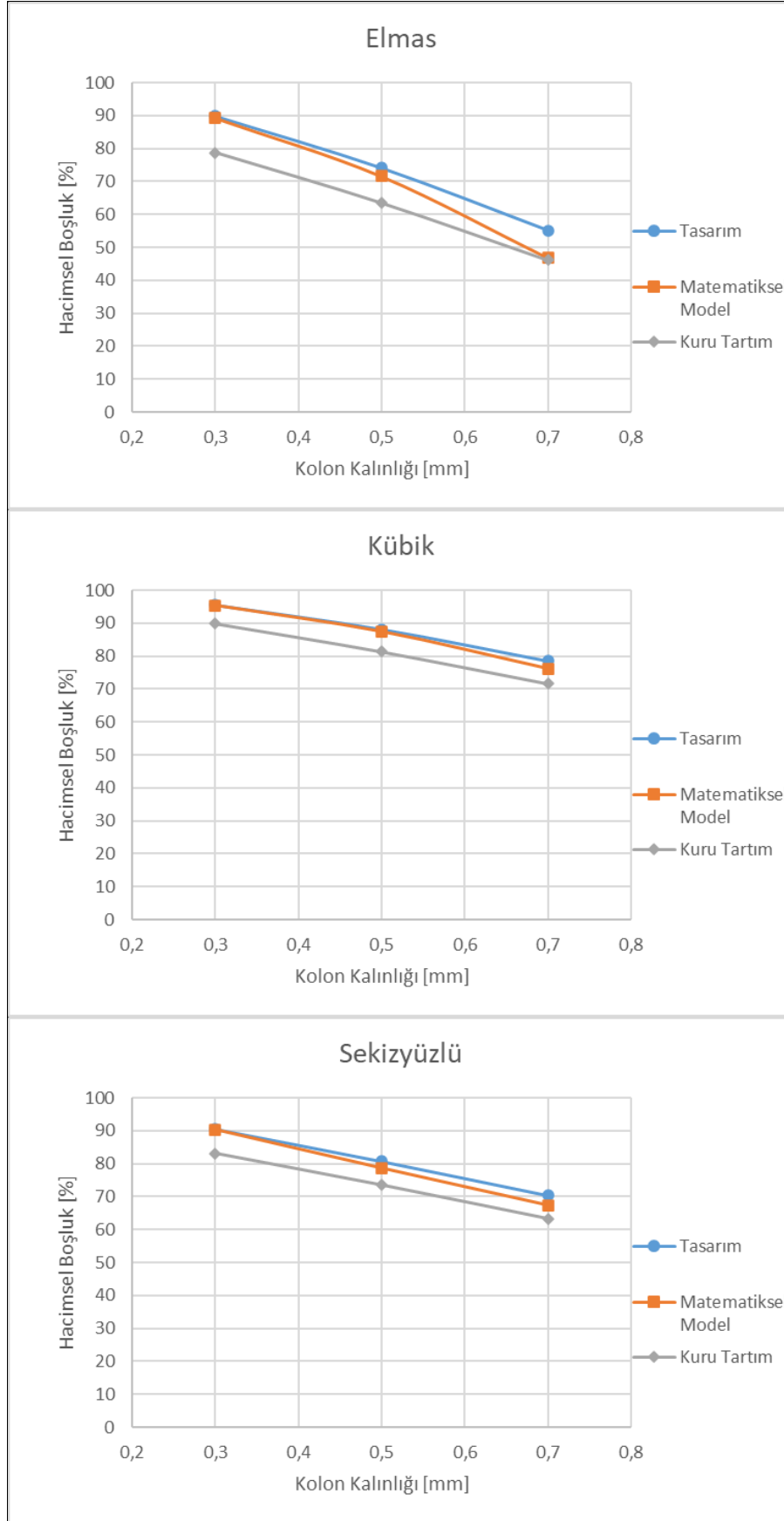
Birim hücre içinde elmas numunede daha fazla kolon olduğu için hacimsel boşluk oranı kolon kalınlığı değişikliklerine daha hassas olmaktadır. Örneğin kuru tartımda kolon kalınlığı arttıkça elmasta hacimsel boşluk %78,65'ten %46,19'a düşerken (%41 düşüş), kübikte %89,93'ten %71,69'a (%20 düşüş), sekizyüzlüde ise %83,10'dan %63,25'e (%24 düşüş) düşmektedir. Sonuç olarak birim hücre yapıları arasında hacimsel olarak daha fazla kolona sahip olan birim hücre yapısı kolon kalınlığı değişiminden de daha fazla etkilenebilir [83]. Bir diğer ifadeyle aynı kolon kalınlığında daha düşük hacimsel boşluk oranına sahip birim hücre yapısında kolon kalınlığı arttıkça hacimsel boşluk oranı oransal olarak daha hızlı düşmektedir.

Yüksek hacimsel boşluk oranlarındaki matematiksel model hacimsel boşluk oranları, tasarımdaki hacimsel boşluk oranlarına yakın değerler vermiştir. Bu değerler arasındaki sapmalar matematiksel model hacimsel boşluk hesabı yapılırken birim küp dışında kalan hacimler, kesişen hacimler ve geçişler arası bağlantı hacimlerinde yapılan kabullerden dolayı oluşmaktadır. 0,7 mm kolon kalınlığına sahip elmas birim hücre yapılı numune haricinde, hacimsel boşluk açısından tasarım ile matematiksel model arasındaki sapma %0,11 ile %4,23 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar da matematiksel modelin tasarım verileriyle oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir. bE7 numunesindeki değişimin büyüklüğü bu yapıdaki hacimsel boşluk oranının %50'nin altında olmasından dolayıdır. Bunun nedeni ise kolon kalınlıkları arttıkça birim hücre yapısı içinde kolonların üst üste gelmesi ile çakışmaların artmasıdır. Her ne kadar matematiksel modeller türetilirken çakışmalar göz önünde bulundurulmuş olsa da kolon kalınlıklarındaki aşırı artış ince kolonlarda oluşmayan yeni çakışmaların meydana gelmesine neden olarak hata oranını arttırmaktadır. Benzer şekilde literatürde de kolon kalınlığı arttıkça tasarım ile teorik sonuç arasındaki sapmaların arttığı ve tartım sonuçlarının tasarıma göre daha düşük çıktığı bildirilmiştir [83, 160]. Burada amaç implanta yönelik kullanım için kemik benzeri yapı oluşturmak olduğundan ve kemik

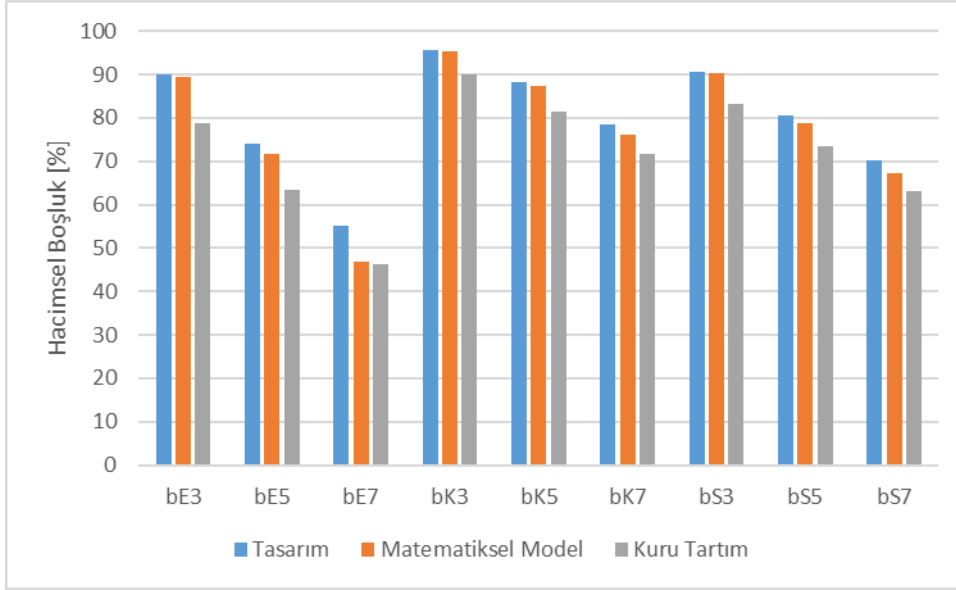
dokusunun da %90'lara varan gözenekli yapıya sahip olmasından dolayı [183–187] matematiksel modelin amaca uygun olduğu ve tasarıma oldukça yakın değerler verdiği görülmektedir. Gözenekliliğin yüksek olması besin akışı [187, 188], hücrelerin implant içine işlemesi ve iç içe geçmiş dokuda uygun damarlanma oluşumu için oldukça önemlidir [189].

Şekil 4.17'de elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapılarına sahip basma deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı tasarım, matematiksel model ve kuru tartım altlıksız hacimsel boşluk oranları verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.18'deki grafikte sonuçlar toplu olarak gösterilmiştir.





Şekil 4.17. Basma deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı altlıksız hacimsel boşluk oranları

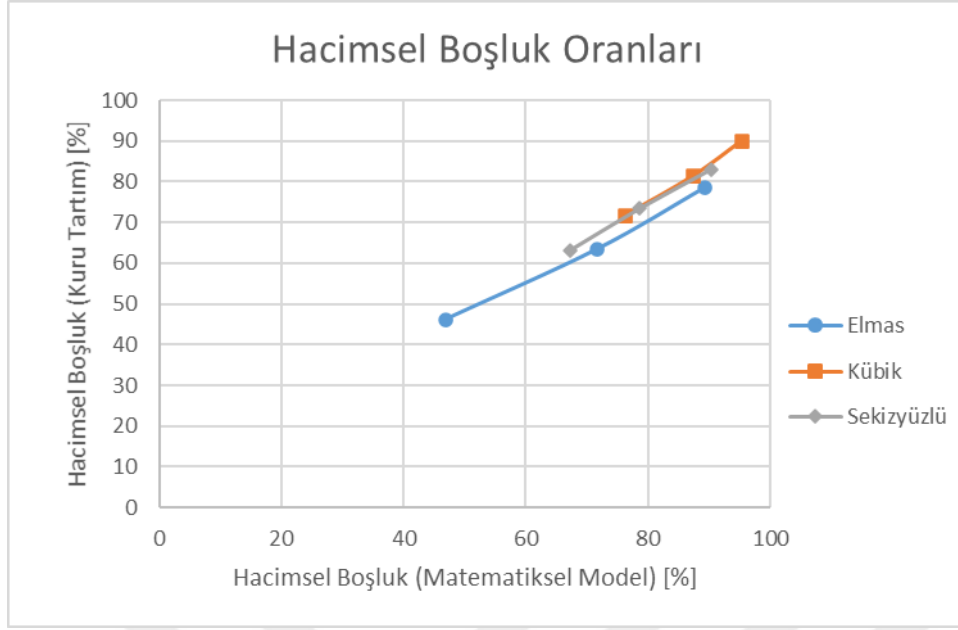


Şekil 4.18. Basma deneyi numunelerinin altlıksız hacimsel boşluk oranları

Çizelge 4.4'te elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin kuru tartım hacimsel boşluk oranları ile matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranları verilmiştir. Şekil 4.19'da ise bu sonuçlar grafik olarak gösterilmiştir.

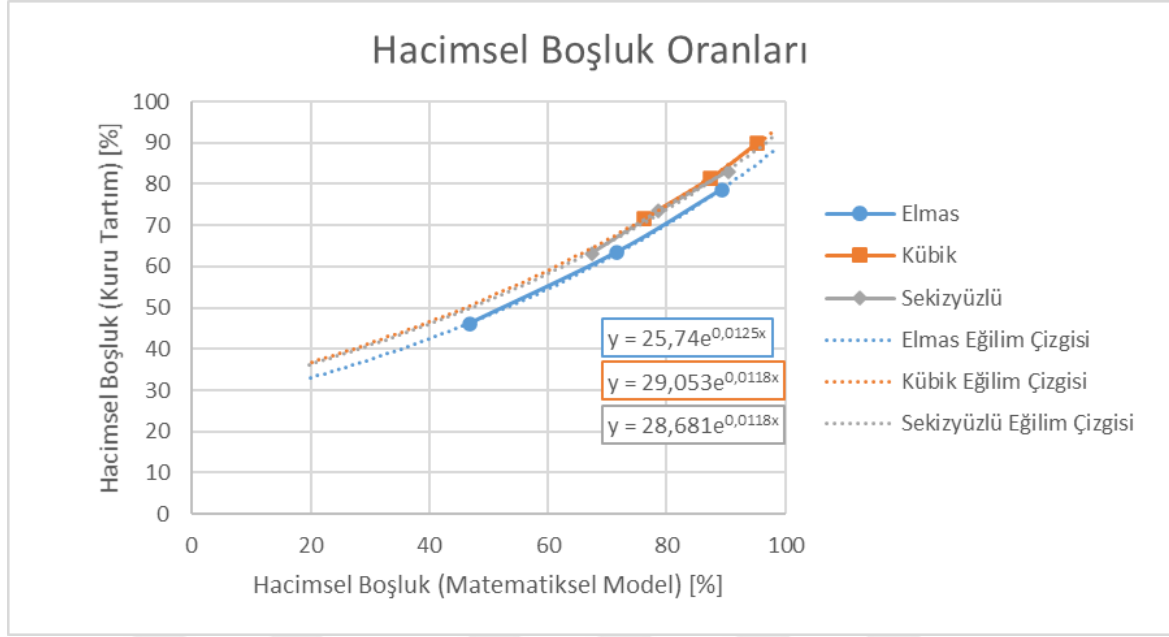
Çizelge 4.4. Basma deneyi numunelerinin kuru tartım (altlıksız) ve matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranları

Numune	Hacimsel Boşluk [%]		
	Matematiksel Model	Kuru Tartım	Sapma [%]
bE3	89,31	78,65	-11,94
bE5	71,58	63,45	-11,36
bE7	46,79	46,19	-1,29
bK3	95,31	89,93	-5,64
bK5	87,42	81,41	-6,88
bK7	76,21	71,69	-5,93
bS3	90,40	83,10	-8,07
bS5	78,67	73,48	-6,59
bS7	67,34	63,25	-6,06



Şekil 4.19. Basma deneyi numunelerinin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları

Matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranları, gerçek değerler olan kuru tartım hacimsel boşluk oranlarından %1,29 ile %11,94 arasında yüksek çıkmaktadır (Çizelge 4.4). Bu sapmanın sonuca etkisini ortadan kaldırabilmek için bu iki yöntem ile hesaplanan hacimsel boşluk oranları arasında bir bağıntı kurulmuştur. Şekil 4.20’de elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları veren eğilim çizgileri ve bu çizgilerin denklemleri verilmiştir.



Şekil 4.20. Basma deneyi numunelerinin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları veren eğilim çizgileri ve denklemleri

Eğilim çizgilerinden elde edilen denklemlere göre, sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli basma deneyi numunelerinin matematiksel modelden hesaplanan hacimsel boşluk oranına bağlı kuru tartım hacimsel boşluk oranları;

$$\%HB''_{bE} = 25,74e^{0,0125(\%HB'_{bE})} \quad (4.60)$$

$$\%HB''_{bK} = 29,053e^{0,0118(\%HB'_{bK})} \quad (4.61)$$

$$\%HB''_{bS} = 28,681e^{0,0118(\%HB'_{bS})} \quad (4.62)$$

olarak bulunur. Sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli basma deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranlarını veren Eş. 4.26, Eş. 4.27 ve Eş. 4.28 eşitliklerini, Eş. 4.60, Eş. 4.61 ve Eş. 4.62 eşitliklerinde yerine yazarsak hacimsel boşluk oranları;

$$\%HB''_{bE} = 25,74e^{1,25\left\{0,11\left[1-\frac{\pi d_1^2}{a_1^3}(a_1\sqrt{3}-0,72d_1)\right]+0,33\left[1-\frac{\pi d_2^2}{a_2^3}(a_2\sqrt{3}-0,72d_2)\right]+0,56\left[1-\frac{\pi d_3^2}{a_3^3}(a_3\sqrt{3}-0,72d_3)\right]\right\}} \quad (4.63)$$

$$\%HB''_{bK} = 29,053e^{1,18 \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{4a_1^3} (3a_1 - d_1) \right] + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{4a_2^3} (3a_2 - d_2) \right] + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{4a_3^3} (3a_3 - d_3) \right] \right\}} \quad (4.64)$$

$$\%HB''_{bS} = 28,681e^{1,18 \left\{ 0,11 \left(1 - \frac{3(\pi d_1)^2}{4a_1^3} \left[1 - \frac{\arccos \left[1 - \frac{d_1}{4a_1} \pi (2a_1 + d_1) \right]}{60} \right] \right) + 0,33 \left(1 - \frac{3(\pi d_2)^2}{4a_2^3} \left[1 - \frac{\arccos \left[1 - \frac{d_2}{4a_2} \pi (2a_2 + d_2) \right]}{60} \right] \right) + 0,56 \left(1 - \frac{3(\pi d_3)^2}{4a_3^3} \left[1 - \frac{\arccos \left[1 - \frac{d_3}{4a_3} \pi (2a_3 + d_3) \right]}{60} \right] \right) \right\}} \quad (4.65)$$

olarak bulunur. Böylece geçişli gözenekli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a) ve kolon kalınlıklarına (d) bağlı kuru tartım (altılıksız) hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modeller çıkarılmıştır. Eş. 4.29, Eş. 4.30 ve Eş. 4.31 eşitliklerini, Eş. 4.60, Eş. 4.61 ve Eş. 4.62 eşitliklerinde yerine koyarak genelleştirilmiş hali yazılırsa hacimsel boşluk oranları;

$$\%HB''_{bE} = 25,74e^{1,25 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bE})_i} \quad (4.66)$$

$$\%HB''_{bK} = 29,053e^{1,18 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bK})_i} \quad (4.67)$$

$$\%HB''_{bS} = 28,681e^{1,18 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bS})_i} \quad (4.68)$$

olarak bulunur. A toplam kesit alanı, A_i ilgili bölgenin kesit alanı, r numune yarıçapı ve r_i ilgili bölgenin yarıçapı olmak üzere;

$$A'_i = \frac{A_i}{A} \quad (4.69)$$

$$A_i = \pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \quad (4.70)$$

$$(\%HB_{bE})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72d_i) \quad (4.71)$$

$$(\%HB_{bK})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \quad (4.72)$$

$$(\%HB_{bS})_i = 1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \quad (4.73)$$

Eş. 4.71-4.73, sırasıyla Eş. 4.66-4.68'de yerine yazılırsa;

$$\%HB''_{bE} = 25,74e^{1,25 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72d_i) \right)} \quad (4.74)$$

$$\%HB''_{bK} = 29,053e^{1,18 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \right)} \quad (4.75)$$

$$\%HB''_{bS} = 28,681e^{1,18 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \right)} \quad (4.76)$$

geçişli gözenekli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a_i) ve değişken kolon kalınlıklarına (d_i) bağlı genelleştirilmiş kuru tartım (althıksız) hacimsel boşluk oranlarını veren kapalı formulu matematiksel modeller oluşturulmuş olur. Bu modeller sayesinde tasarımlarda geçiş sayısı (n), geçiş yarıçapı (r), kolon kalınlığı (d) ve birim hücre boyutu (a) istenildiği gibi değiştirilebilecek ve sınırsız tasarım için üretim sonrasında oluşacak hacimsel boşluk oranlarının ($\%HB$) önceden belirlenebilmesi sağlanacaktır. Böylece implant tasarımında istenilen hacimsel boşluk oranı istenilen bölgede elde edilebilecektir. Bu da kişiselleştirilmiş implant tasarımı için oldukça büyük bir kolaylık sağlayacaktır.

Üç nokta eğme deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranları

Üç nokta eğme deneyi numuneleri için her üç yöntemin sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Altılıksız üç nokta eğme deneyi numunelerinin tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları ve farkları

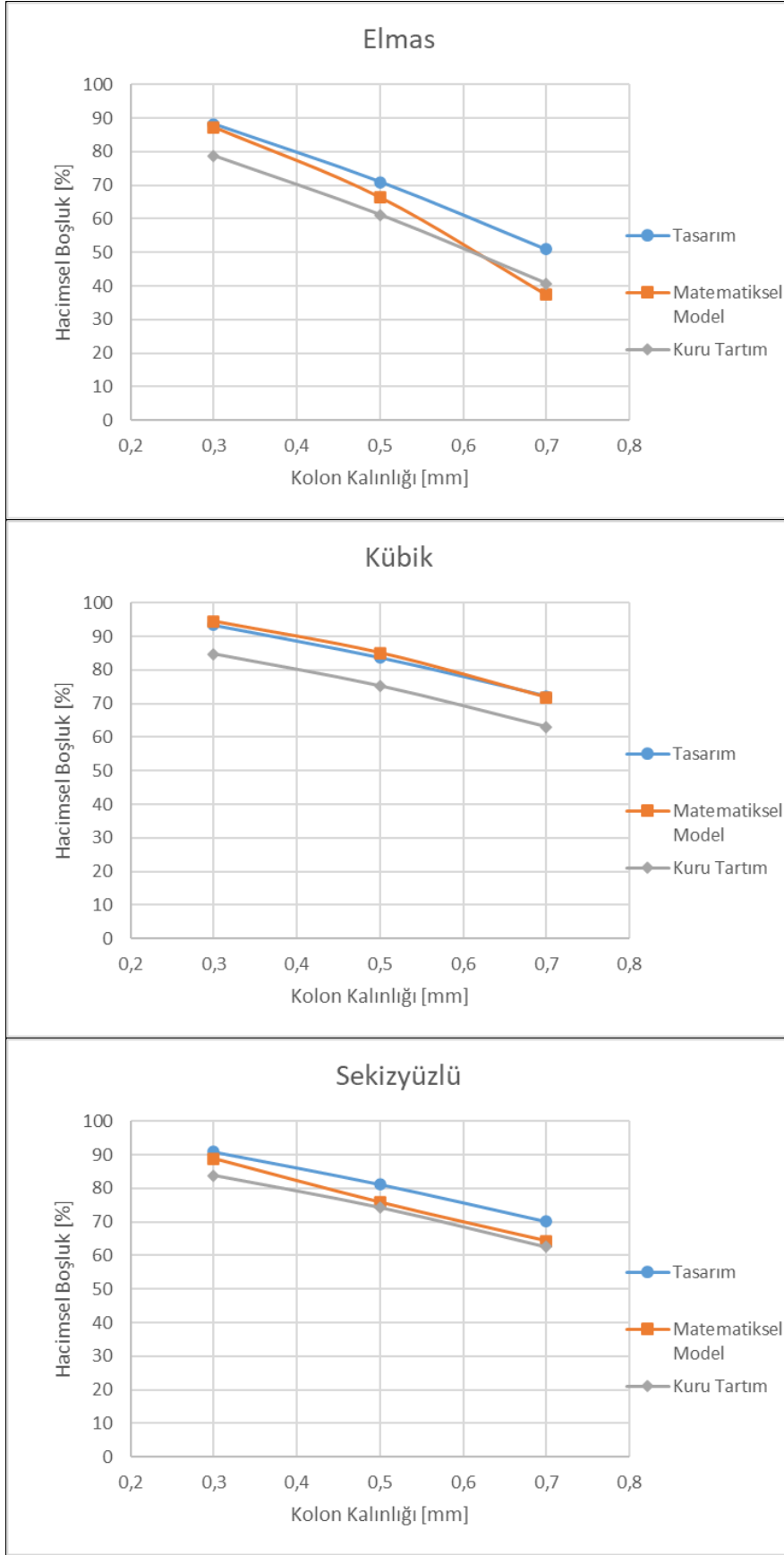
Numune	Hacimsel Boşluk [%]			Sapma [%]		
	Tasarım	Matematiksel Model	Kuru Tartım	Tasarım - Matematiksel Model	Tasarım - Kuru Tartım	Matematiksel Model - Kuru Tartım
eE3	88,13	87,30	78,70	-0,94	-10,70	-9,85
eE5	70,97	66,38	61,16	-6,47	-13,82	-7,87
eE7	50,86	37,37	40,71	-26,51	-19,96	8,92
eK3	93,45	94,42	84,66	1,04	-9,41	-10,34
eK5	83,73	85,09	75,18	1,62	-10,21	-11,64
eK7	72,20	71,90	63,00	-0,41	-12,74	-12,38
eS3	90,84	88,87	83,76	-2,17	-7,79	-5,75
eS5	81,16	75,84	74,30	-6,55	-8,45	-2,03
eS7	70,07	64,31	62,64	-8,22	-10,60	-2,59

Çizelge 4.5 incelendiğinde basma deneyi numunelerinde olduğu gibi kolon kalınlıkları arttıkça hacimsel boşluk oranları düşmektedir. Her üç kolon kalınlığı ve ölçüm yöntemi içinde en yüksek hacimsel boşluk oranına sahip birim hücre yapısı kübiktir. Kübik yapıyı sekizyüzlü takip etmektedir ve en düşük hacimsel boşluk oranına sahip birim hücre yapısı ise elmas olarak bulunmuştur. Birim hücre boyutu ve kolon kalınlığı girilerek hacimsel boşluk oranının elde edildiği matematiksel model ile üretilen numunenin ölçülmesiyle elde edilen kuru tartım sonuçları karşılaştırıldığında farkın %2,03 ile %12,38 arasında olduğu görülmektedir. Elmas yapıda fark %7,87 ile %9,85 arasındadır. Kübik yapıda sapma %10,34 ile %12,38 arasındadır. Sekizyüzlü yapı da ise sapma %2,03 ile %5,75 arasındadır. 0,7 mm kolon kalınlığına sahip elmas birim hücre yapılı numune hariç bütün numunelerde matematiksel modelden hesaplanan hacimsel boşluk oranları ve kuru tartım ölçümlerinden yüksek çıkmıştır. Yüksek hacimsel boşluk oranlarındaki matematiksel model hacimsel boşluk oranları, tasarımdaki hacimsel boşluk oranlarına yakın değerler vermiştir. Bu değerler arasındaki sapmalar matematiksel model hacimsel boşluk hesabı yapılırken birim küp dışında kalan hacimler, kesişen hacimler ve geçişler arası bağlantı hacimlerinde yapılan kabullerden dolayı oluşmaktadır. 0,7 mm kolon kalınlığına sahip elmas birim hücre yapılı

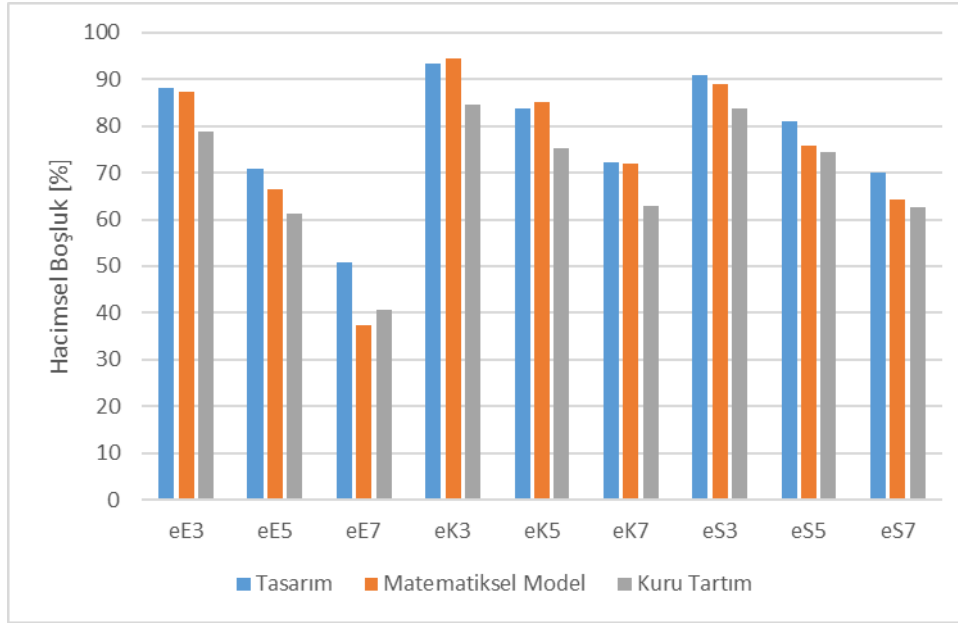
numune haricinde, hacimsel boşluk açısından tasarım ile matematiksel model arasındaki sapma %0,41 ile %8,22 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar da matematiksel modelin tasarım verileriyle oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir. eE7 numunesindeki sapma, basma deneyi numuneleri üzerinden anlatılan aynı nedenlerden dolayı yüksek çıkmıştır.

Şekil 4.21’de elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapılarına sahip üç nokta eğme deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı tasarım, matematiksel model ve kuru tartım altlıksız hacimsel boşluk oranları verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.22’deki grafikte sonuçlar toplu olarak gösterilmiştir.





Şekil 4.21. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin kolon kalınlıklarına bağlı altlıksız hacimsel boşluk oranları

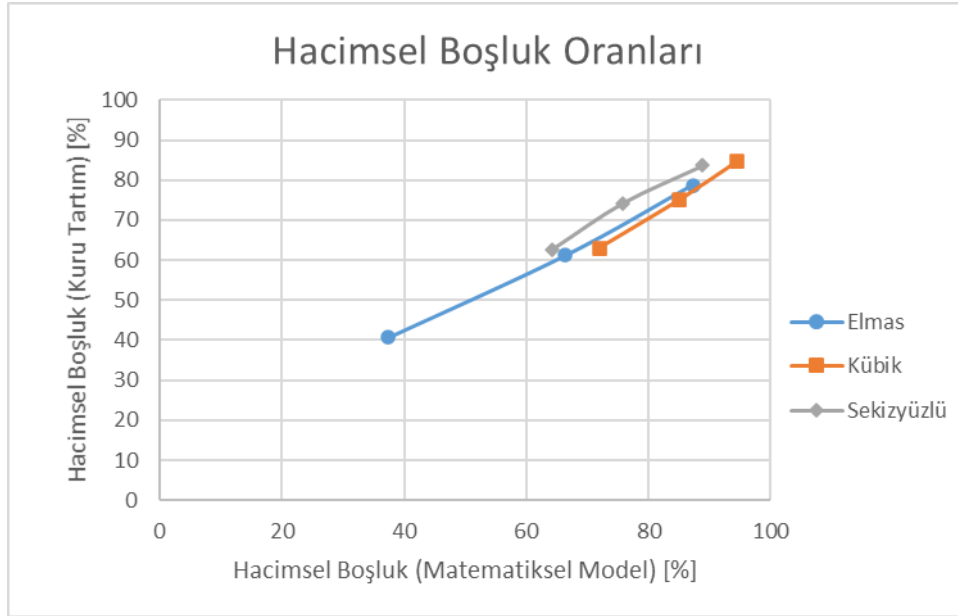


Şekil 4.22. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin altlıksız hacimsel boşluk oranları

Çizelge 4.6’da elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip üç nokta eğme deneyi numunelerinin kuru tartım hacimsel boşluk oranları ile matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranları verilmiştir. Şekil 4.23’te ise bu sonuçlar grafik olarak gösterilmiştir.

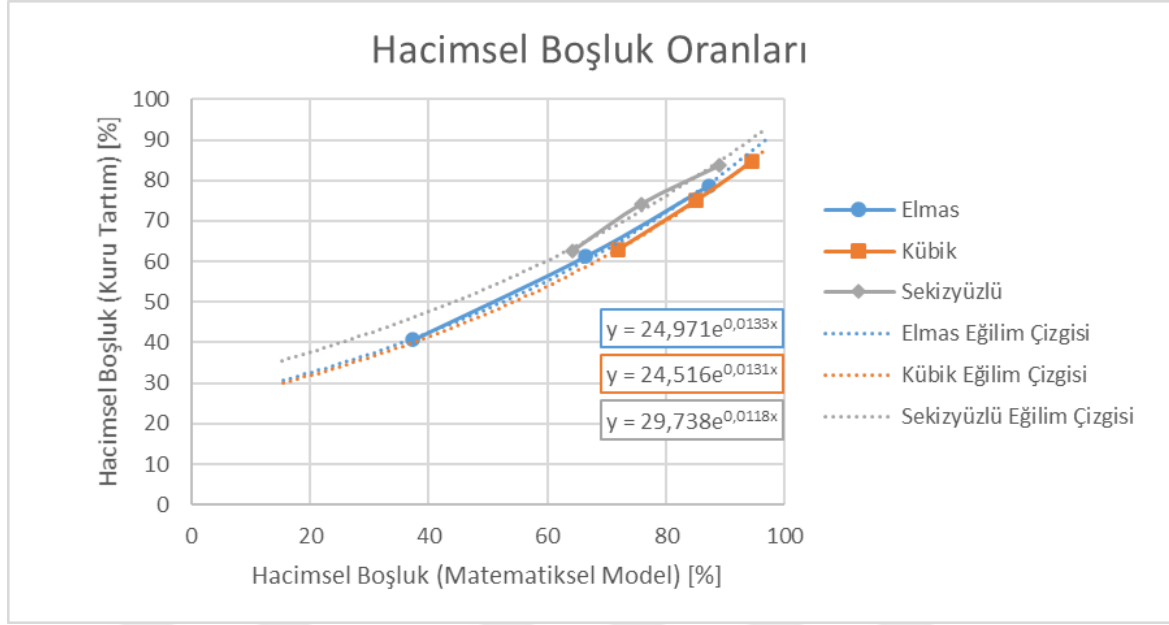
Çizelge 4.6. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin kuru tartım (altlıksız) ve matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranları

Numune	Hacimsel Boşluk [%]		
	Matematiksel Model	Kuru Tartım	Sapma [%]
eE3	87,30	78,70	-9,85
eE5	66,38	61,16	-7,87
eE7	37,37	40,71	8,92
eK3	94,42	84,66	-10,34
eK5	85,09	75,18	-11,64
eK7	71,90	63,00	-12,38
eS3	88,87	83,76	-5,75
eS5	75,84	74,30	-2,03
eS7	64,31	62,64	-2,59



Şekil 4.23. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları

Matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranları ile gerçek değerler olan kuru tartım hacimsel boşluk oranları arasında %2,03 ile %12,38 arasında değişen sapmalar ortaya çıkmaktadır (Çizelge 4.6). Bu sapmanın sonuca etkisini ortadan kaldırabilmek için bu iki yöntem ile hesaplanan hacimsel boşluk oranları arasında bir bağıntı kurulmuştur. Şekil 4.24'te elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları veren eğilim çizgileri ve bu çizgilerin denklemleri verilmiştir.



Şekil 4.24. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin matematiksel model (altlıksız) üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranları veren eğilim çizgileri ve denklemleri

Eğilim çizgilerinden elde edilen denklemlere göre, sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli üç nokta eğme deneyi numunelerinin matematiksel modelden hesaplanan hacimsel boşluğa bağlı kuru tartım hacimsel boşluk oranları;

$$\%HB''_{eE} = 24,971e^{0,0133(\%HB'_{eE})} \quad (4.77)$$

$$\%HB''_{eK} = 24,516e^{0,0131(\%HB'_{eK})} \quad (4.78)$$

$$\%HB''_{eS} = 29,738e^{0,0118(\%HB'_{eS})} \quad (4.79)$$

olarak bulunur. Sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli üç nokta eğme deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranlarını veren Eş. 4.46, Eş. 4.47 ve Eş. 4.48 eşitliklerini, Eş. 4.77, Eş. 4.78 ve Eş. 4.79 eşitliklerinde yerine koyarsak hacimsel boşluk oranları;

$$\%HB''_{eE} = 24,971e^{1,33\left\{0,11\left[1-\frac{\pi d_1^2}{a_1^3}(a_1\sqrt{3}-0,72d_1)\right]+0,33\left[1-\frac{\pi d_2^2}{a_2^3}(a_2\sqrt{3}-0,72d_2)\right]+0,56\left[1-\frac{\pi d_3^2}{a_3^3}(a_3\sqrt{3}-0,72d_3)\right]\right\}} \quad (4.80)$$

$$\%HB''_{eK} = 24,516e^{1,31\left\{0,11\left[1-\frac{\pi d_1^2}{4a_1^3}(3a_1-d_1)\right]+0,33\left[1-\frac{\pi d_2^2}{4a_2^3}(3a_2-d_2)\right]+0,56\left[1-\frac{\pi d_3^2}{4a_3^3}(3a_3-d_3)\right]\right\}} \quad (4.81)$$

$$\%HB''_{eS} = 29,738e^{1,18\left\{0,11\left[1-\frac{3(\pi d_1)^2}{4a_1^2}\left[1-\frac{\text{Arccos}\left[1-\frac{d_1}{4a_1^2}(2a_1+d_1)\right]}{60}\right]\right]+0,33\left[1-\frac{3(\pi d_2)^2}{4a_2^2}\left[1-\frac{\text{Arccos}\left[1-\frac{d_2}{4a_2^2}(2a_2+d_2)\right]}{60}\right]\right]+0,56\left[1-\frac{3(\pi d_3)^2}{4a_3^2}\left[1-\frac{\text{Arccos}\left[1-\frac{d_3}{4a_3^2}(2a_3+d_3)\right]}{60}\right]\right]\right\}} \quad (4.82)$$

olarak bulunur. Böylece değişken geçişli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a) ve kolon kalınlıklarına (d) bağlı kuru tartım (altlıksız) hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modeller çıkarılmıştır. Eş. 4.49, Eş. 4.50 ve Eş. 4.51 eşitliklerini, Eş. 4.77, Eş. 4.78 ve Eş. 4.79 eşitliklerinde yerine koyarak genelleştirilmiş hali yazılırsa hacimsel boşluk oranları;

$$\%HB''_{eE} = 24,971e^{1,33 \sum_{i=1}^n A'_i(\%HB_{eE})_i} \quad (4.83)$$

$$\%HB''_{eK} = 24,516e^{1,31 \sum_{i=1}^n A'_i(\%HB_{eK})_i} \quad (4.84)$$

$$\%HB''_{eS} = 29,738e^{1,18 \sum_{i=1}^n A'_i(\%HB_{eS})_i} \quad (4.85)$$

olarak bulunur. A toplam kesit alanı, A_i ilgili bölgenin kesit alanı, L kesitin bir kenarının uzunluğu ve L_i ilgili bölgenin bir kenar uzunluğu olmak üzere;

$$A'_i = \frac{A_i}{A} \quad (4.86)$$

$$A_i = L_i^2 - L_{i-1}^2 \quad (4.87)$$

$$(\%HB_{eE})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3}(a_i\sqrt{3} - 0,72d_i) \quad (4.88)$$

$$(\%HB_{eK})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3}(3a_i - d_i) \quad (4.89)$$

$$(\%HB_{eS})_i = 1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \quad (4.90)$$

Eş. 4.88-4.90, sırasıyla Eş. 4.83-4.85'te yerine yazılırsa;

$$\%HB''_{eE} = 24,971e^{1,33 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72 d_i) \right)} \quad (4.91)$$

$$\%HB''_{eK} = 24,516e^{1,31 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \right)} \quad (4.92)$$

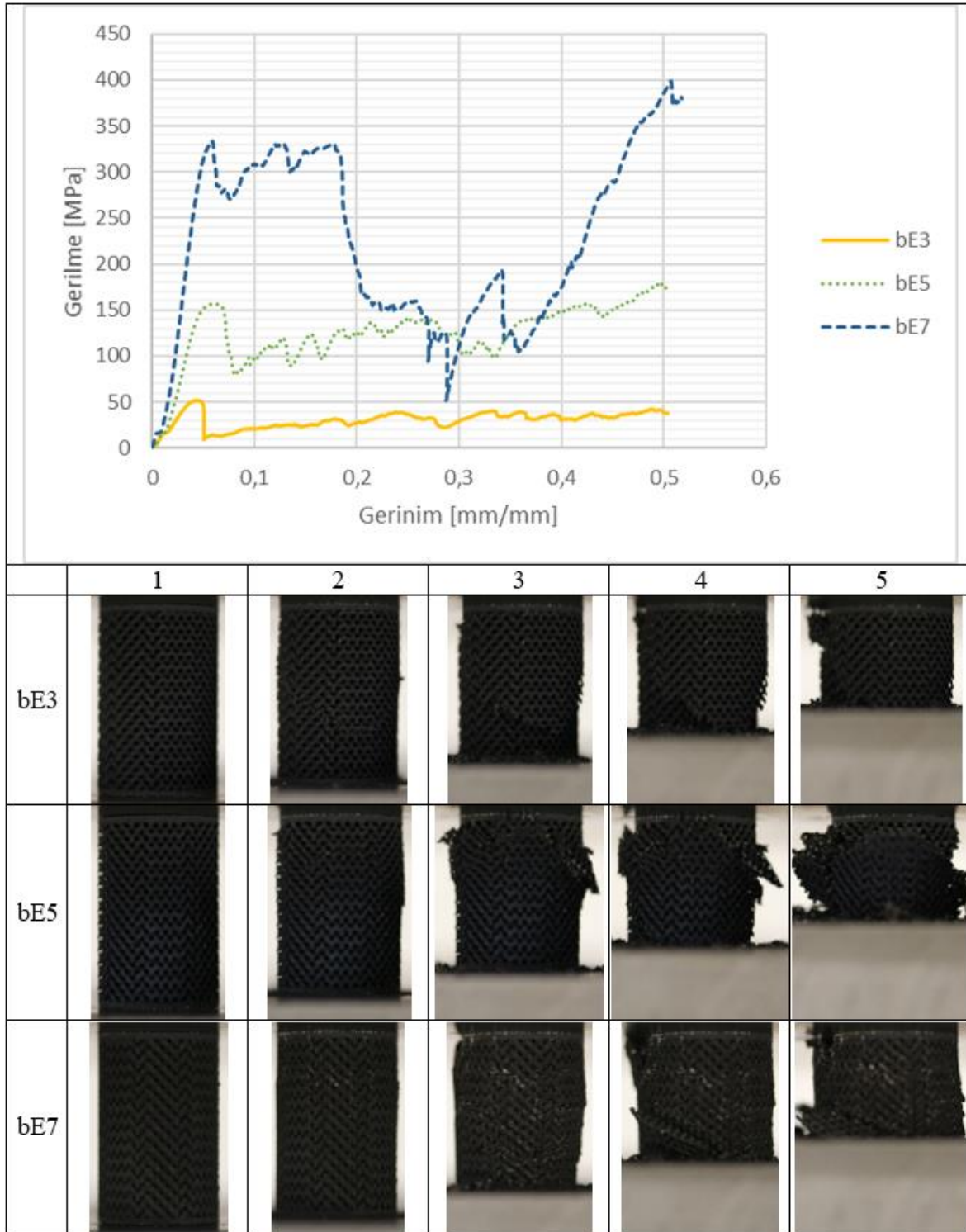
$$\%HB''_{eS} = 29,738e^{1,18 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \right)} \quad (4.93)$$

geçişli gözenekli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a_i) ve değişken kolon kalınlıklarına (d_i) bağlı genelleştirilmiş kuru tartım (altıksız) hacimsel boşluk oranlarını veren kapalı formlu matematiksel modeller çıkarılmış olur. Bu modeller sayesinde tasarımlarda geçiş sayısı (n), geçişin bir kenar uzunluğu (L), kolon kalınlığı (d) ve birim hücre boyutu (a) istenildiği gibi değiştirilebilecek ve sınırsız tasarım için üretim sonrasında oluşacak hacimsel boşluk oranlarının ($\%HB$) önceden belirlenebilmesi sağlanacaktır. Böylece implant tasarımında istenilen hacimsel boşluk oranı istenilen bölgede elde edilebilecektir. Bu da kişiselleştirilmiş implant tasarımı için oldukça büyük bir kolaylık sağlayacaktır.

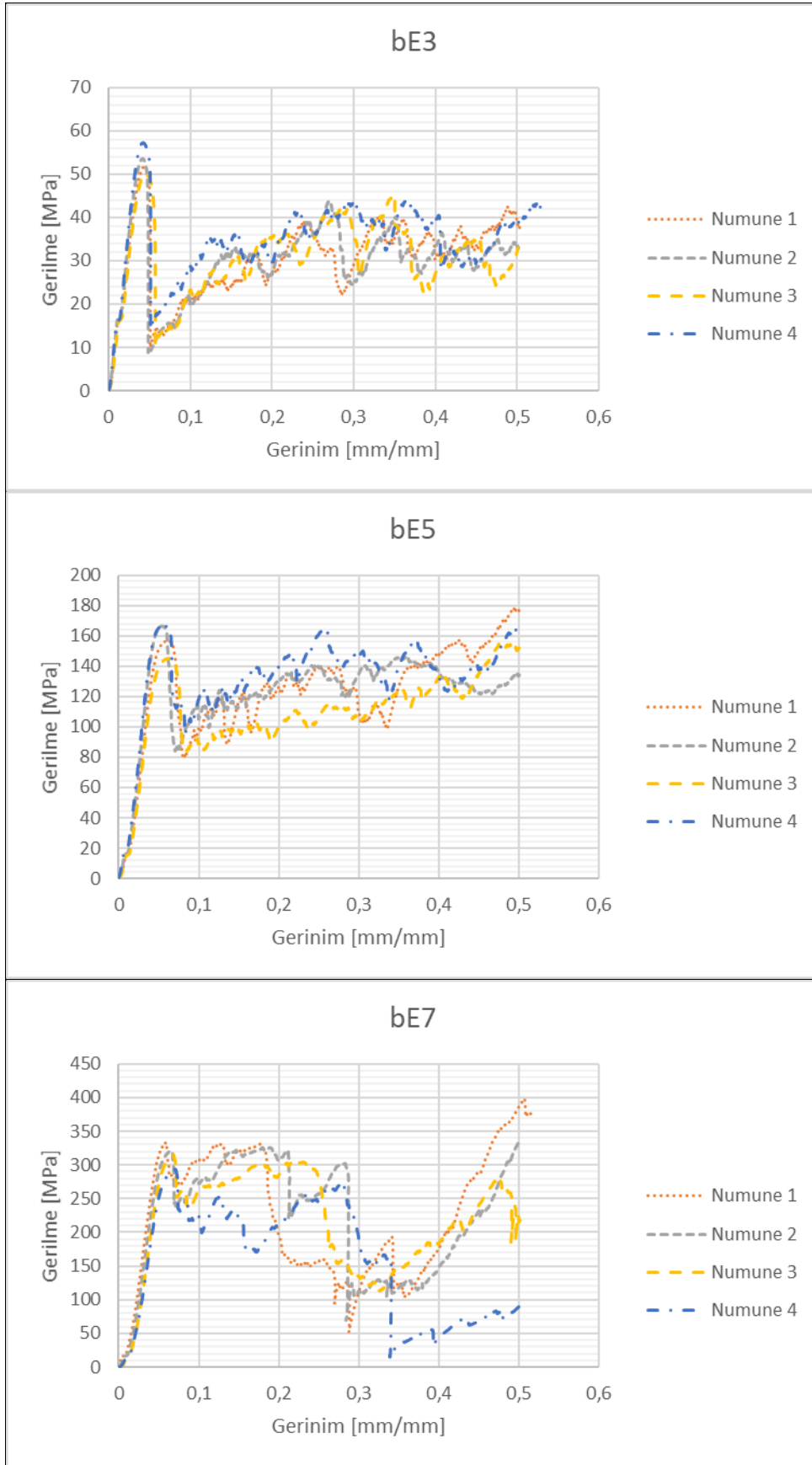
4.2. Basma Deneyi

Elmas birim hücre yapısına sahip numunelerin basma deneyi sonucunda elde edilen gerilme gerinim grafikleri ile deney esnasında çekilen görüntüleri Şekil 4.25'te verilmiştir. Numunelerin tekrarlı basma deney sonuçlarına ait gerilme gerinim grafikleri ise Şekil 4.26'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde her üç numunede de ilk hasardan sonra gerilmede büyük bir düşüş yaşanmıştır. Kolon kalınlığı arttıkça ilk hasar sonrası gerilme

düşüşü azalmıştır. İlk hasardan sonra grafik plato evresine geçmiş ve bu evrede dalgalı bir grafik oluşmuştur. Bunun nedeni katmanlar arasında oluşan kırılmalar sonrası gözenekli yapının birbiri üzerine binmesi sonucunda yeniden taşıdığı yükün artması ile gerilme yükselirken sonrasında yine hasar alarak gerilmenin düşmesidir. Bu davranış plato bölgesi boyunca devam etmiştir. Plato bölgesi sonunda ise özellikle kolon kalınlığı yüksek olan numunelerde yoğunlaşma denilen olgu meydana gelerek gerilme hızla artmıştır. Yoğunlaşma gözenekli yapının basma deneyi sonucunda sıkılaşıp boşluksuz yapı gibi davranması olarak açıklanabilir. Grafikler incelendiğinde bE7 numunesinde yoğunlaşmanın etkisi belirgin bir şekilde görülürken bE5 numunesinde grafiğin sonlarına doğru görünmeye başlanmıştır. bE3 numunesinde ise deney boyunca bu etki görülmemiştir. Bu etkinin görülmesinde yapıların hacimsel boşluk oranlarının ve basma deneyinin ne kadar sürdürüldüğünün doğrudan etkisi bulunmaktadır. bE3, bE5 ve bE7 numunelerinin altlıksız kuru tartım hacimsel boşluk oranları sırasıyla %78,65, %63,45 ve %46,19 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.3). Deney ise %50 deplasmana ulaşıldığında durdurulmuştur. Bu durumda hacimsel boşluk oranı azaldıkça bu etkinin görünür olması daha olası olmaktadır. Yüksek hacimsel boşlukta ise çok daha yüksek deplasman oranlarında bu etki görülebilir. Ancak bu iki etmenin dışında da grafikte yoğunlaşmanın görülmesini engelleyebilecek durumlar oluşabilmektedir. Bunlardan birincisi deney esnasında numunelerden kopan parçalardır. Numunelerden kopan parçalar numunede yeni boşluklar oluşmasına neden olarak yoğunlaşma olgusunun oluşmasını geciktirebilmektedir. Bir diğer neden ise basma deneylerinde görülebilen fıçılama denilen etkidir. Fıçılama, numunenin orta bölgesinin dışarıya doğru genişlediğini göstermektedir [113, 190]. Bu etki de numune çapını dolayısıyla hacmini arttırarak yoğunlaşmanın oluşmasını geciktirebilmektedir. Her iki etki de Şekil 4.25'te görülebilmektedir.

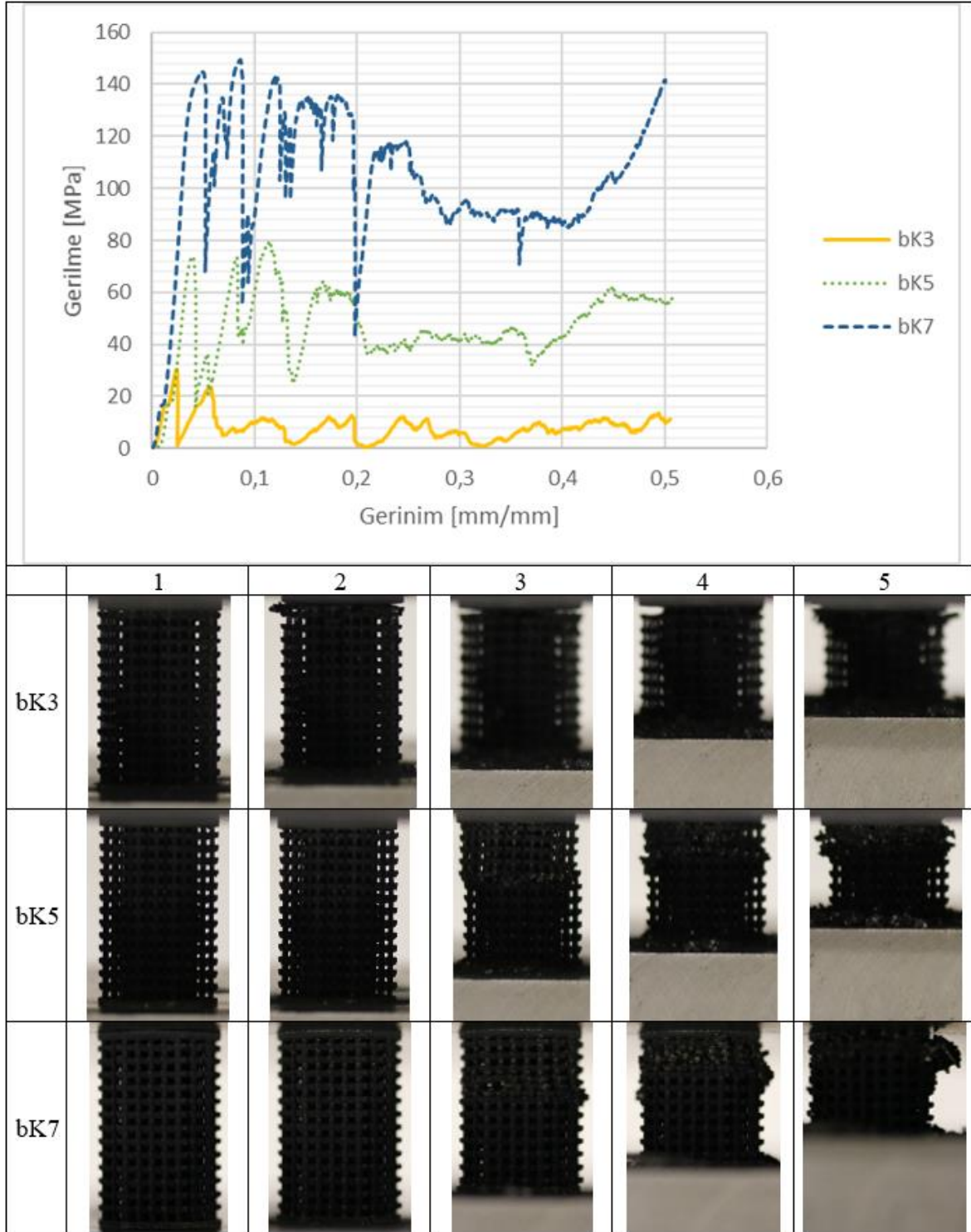


Şekil 4.25. Farklı kolon kalınlıklarındaki elmas birim hücre yapısına sahip numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri

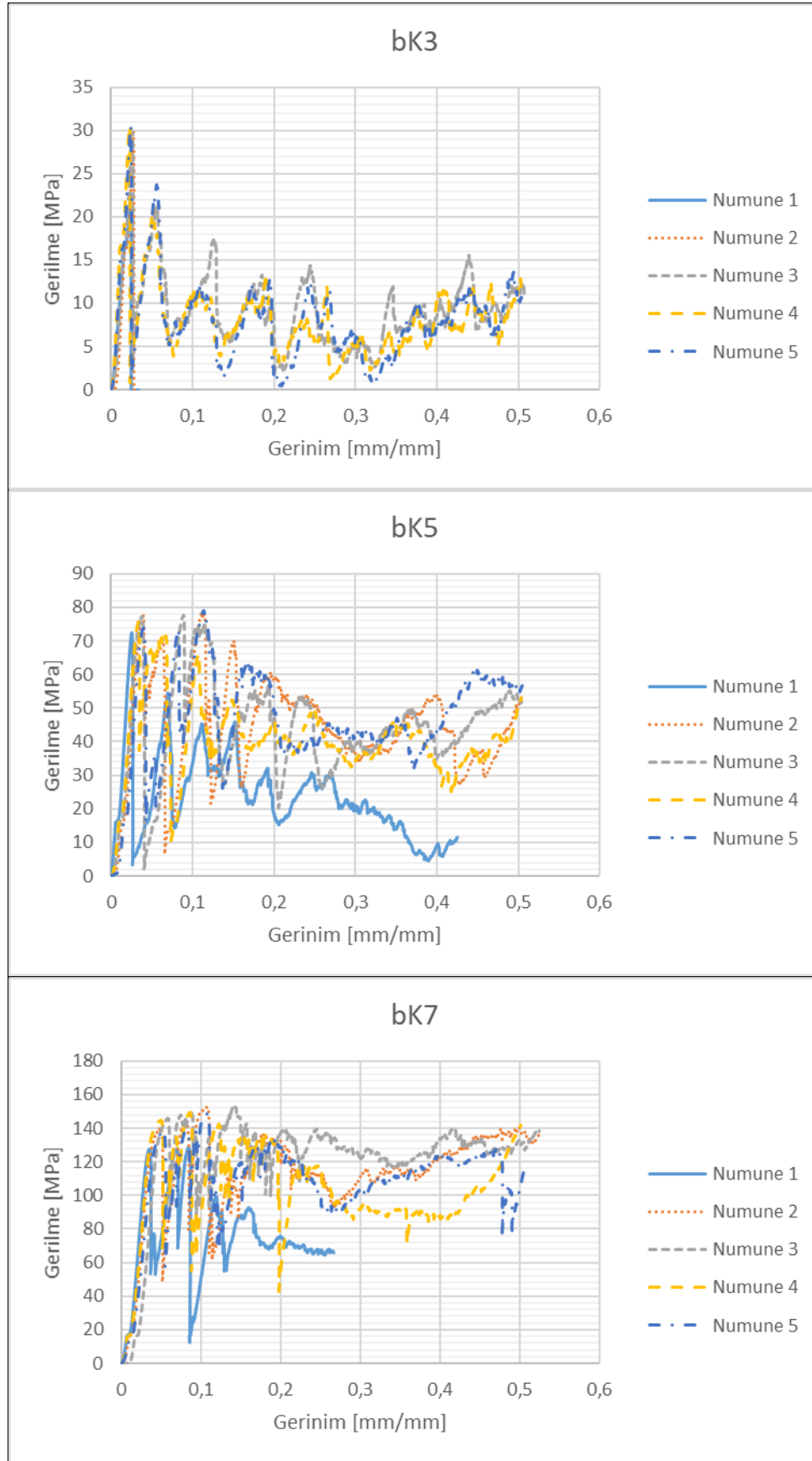


Şekil 4.26. Elmas numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafikleri

Kübik birim hücre yapısına sahip numunelerin basma deneyi sonucunda elde edilen gerilme gerinim grafikleri ile deney esnasında çekilen görüntüleri Şekil 4.27’de verilmiştir. Numunelerin tekrarlı basma deney sonuçlarına ait gerilme gerinim grafikleri ise Şekil 4.28’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde her üç numunede de ilk hasardan sonra gerilmeye büyük bir düşüş yaşanmıştır. İlk hasardan sonra grafik plato evresine geçmiş ve bu evrede tıpkı elmas numunelerde olduğu gibi dalgalı bir grafik oluşmuştur. Plato bölgesi sonunda ise özellikle kolon kalınlığı yüksek olan numunelerde yoğunlaşma denilen olgu meydana gelerek gerilme hızla artmaktadır. Grafikler incelendiğinde bK7 numunesinde yoğunlaşmanın etkisi belirgin bir şekilde görülürken bK5 numunesinde grafiğin sonlarına doğru görünmeye başlanmıştır. bE3 numunesinde ise deney boyunca bu etki görülmemiştir. Bu etkinin görülmesinde daha önce bahsedildiği gibi yapıların hacimsel boşluk oranlarının ve basma deneyinin ne kadar sürdürüldüğünün doğrudan etkisi bulunmaktadır. bK3, bK5 ve bK7 numunelerinin altlıksız kuru tartım hacimsel boşluk oranları sırasıyla %89,93, %81,41 ve %71,69 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.3). Kübik numunelerde de elmaslarda olduğu gibi hacimsel boşluk oranı azaldıkça bu etkinin görünür olması daha olası olmaktadır. Benzer şekilde numunelerden kopan parçalar ve fiçilaşma etkisi de yoğunlaşmanın oluşumunu etkileyebilmektedir.

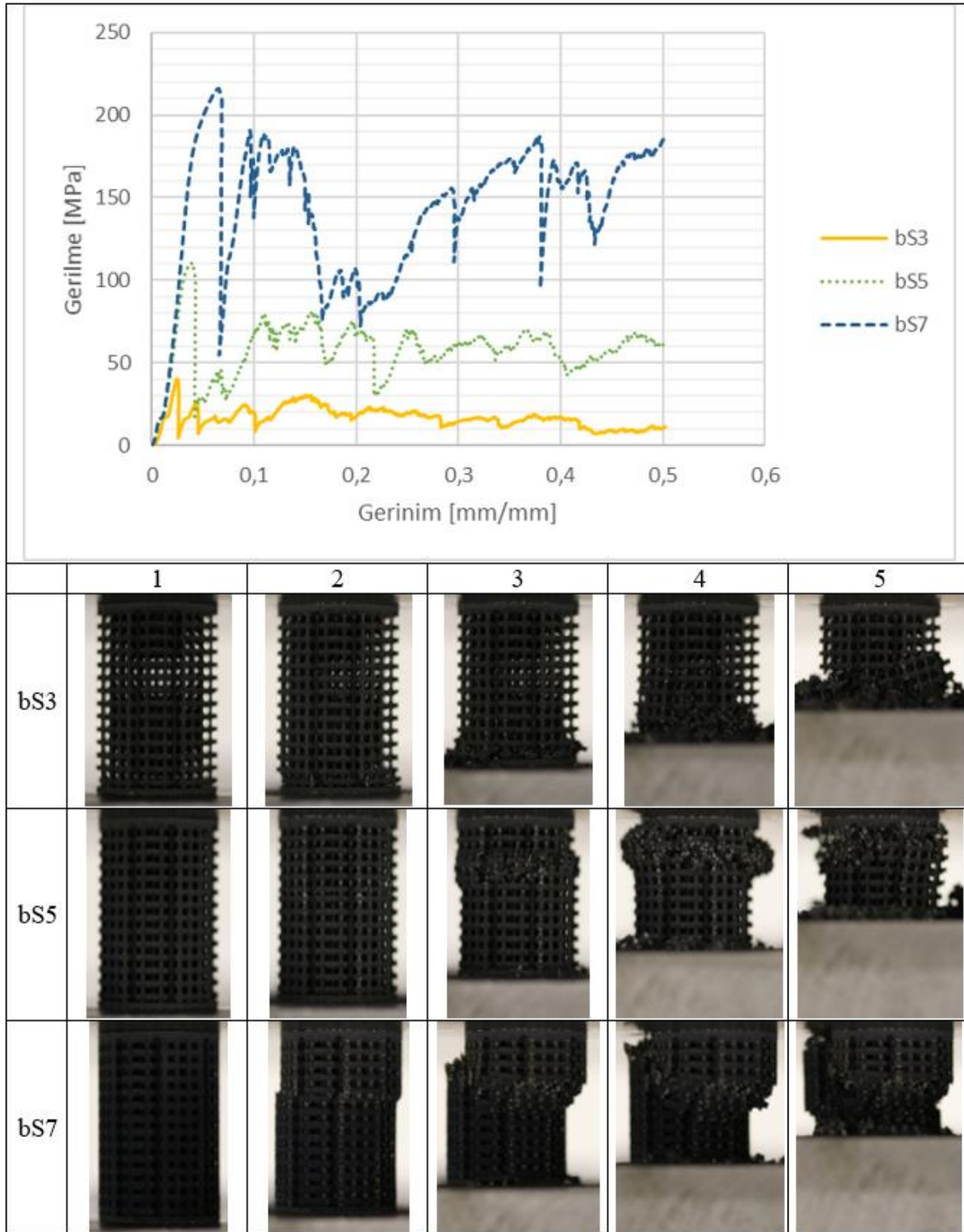


Şekil 4.27. Farklı kolon kalınlıklarındaki kübik birim hücre yapısına sahip numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri

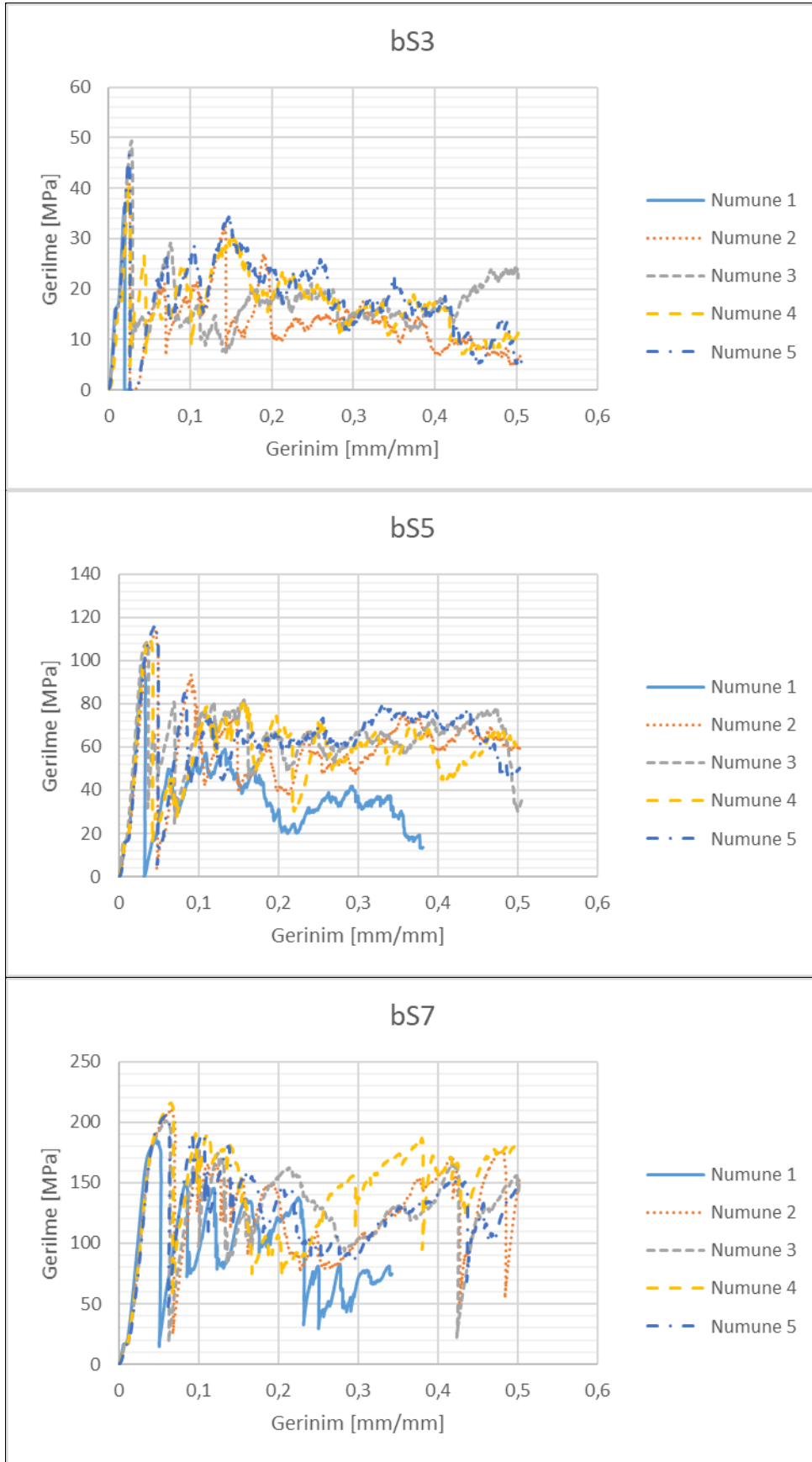


Şekil 4.28. Kübik numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafikleri

Sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin basma deneyi sonucunda elde edilen gerilme gerinim grafikleri ile deney esnasında çekilen görüntüleri Şekil 4.29’da verilmiştir. Numunelerin tekrarlı basma deney sonuçlarına ait gerilme gerinim grafikleri ise Şekil 4.30’da verilmiştir. Diğer birim hücre yapılarına benzer şekilde her üç numunede de ilk hasardan sonra gerilmede büyük bir düşüş yaşanmıştır. İlk hasardan sonra grafik plato evresine geçmiş ve bu evrede dalgalı bir grafik oluşmuştur. Plato bölgesi sonunda ise özellikle kolon kalınlığı yüksek olan numunelerde yoğunlaşma denilen olgu meydana gelerek gerilme artmaya başlamıştır. Grafikler incelendiğinde bS7 numunesinde yoğunlaşmanın etkisi belirgin bir şekilde görülürken bS5 ve bS3 numunelerinde bu etki görülmemiştir. Bu etkinin görülmesinde daha önce bahsedildiği gibi yapıların hacimsel boşluk oranlarının ve basma deneyinin ne kadar sürdürüldüğünün doğrudan etkisi bulunmaktadır. bS3, bS5 ve bS7 numunelerinin altlıksız kuru tartım hacimsel boşluk oranları sırasıyla %83,10, %73,48 ve %63,25 olarak bulunmuştur (Çizelge 4.3). Diğer yapılara benzer şekilde hacimsel boşluk oranı azaldıkça bu etkinin görünür olması daha olası olmaktadır. Sekizyüzlü numunelerde de kopan parçalar ve fiçilaşma etkisi yoğunlaşmanın oluşumunu etkileyebilmektedir.



Şekil 4.29. Farklı kolon kalınlıklarındaki sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri



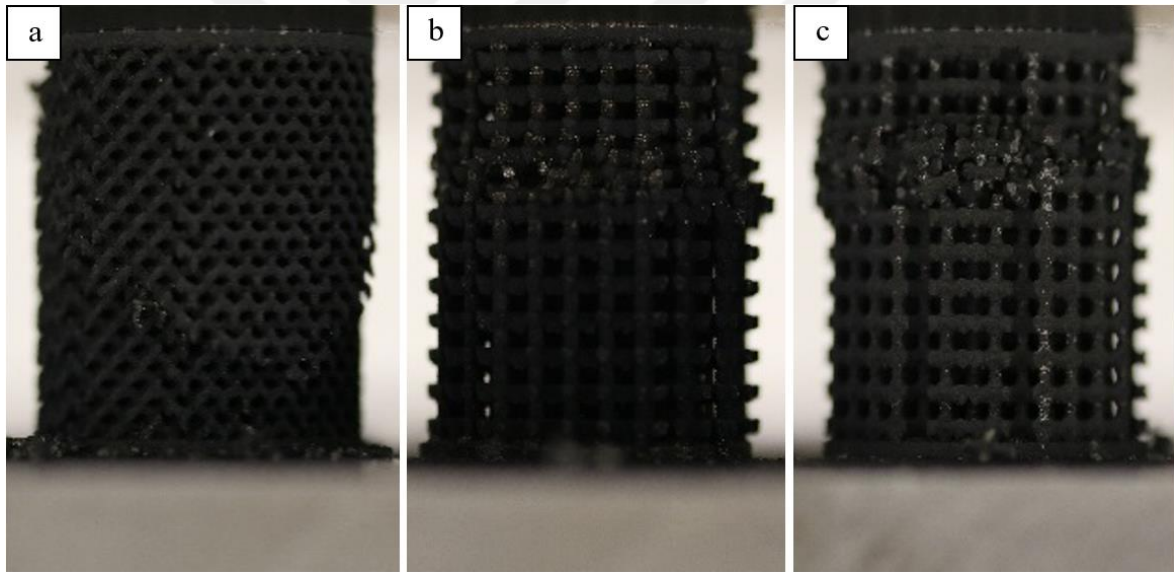
Şekil 4.30. Sekizyüzlü numunelerin basma deneyi gerilme-gerinim grafikleri

Her üç birim hücre yapısında da grafikler genel olarak üç bölgeden oluşmaktadır. Elastik bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi. Gerilme-gerinim eğrisinin elastik bölgesindeki doğrusal olmayan bölgenin, özellikle altlıklarla temasta olan kolonlardaki küçük düzensiz yerel akmalardan bir sonucu olarak oluştuğu söylenebilir [83]. Elastisite modülünü doğru bir şekilde hesaplamak için bu doğrusal olmayan anlık durum, sonraki veri analizinde göz ardı edilmiştir [83]. Gerilme-gerinim eğrileri incelendiğinde ilk hasar gerinimlerinin düşük oluşundan yola çıkarak oluşturulan yapıların genel olarak gevrek davranış gösterdiği söylenebilir [191–193]. Deney esnasında numuneden parçaların kopması da numunelerin gevrek yapıda olduğunu göstermektedir [194]. Ayrıca gerilme-gerinim eğrilerinin plato kısmında oluşan dalgalanmalar da yapının gevrek davranışını göstermektedir [158, 194, 195]. Malzemenin kendisi sünek bir davranışa sahip olmasına rağmen, bu malzemeden yapılan gözenekli yapı, kolonların gevrek kırılmasından dolayı belirgin bir şekilde farklı kırılma davranışı göstermiştir [194]. Ti6Al4V tozunun lazerle işlenmesi metalin özelliklerini değiştirebilmekte ve yapıyı daha gevrek hale getirebilmektedir [141, 196–198].

Elmas birim hücre yapısında gerilme gerinim grafiğinde plato bölgesinde daha küçük dalgalanmalar oluşurken kübik ve sekizyüzlüde daha büyük dalgalanmalar oluşmuştur. Bunun nedeni kuvvet altındaki kırılma davranışlarıdır. Birim hücre yapısını oluşturan kolonların basma kuvveti doğrultusuyla yapığı açıya göre yapının kırılma açısı değişebilmektedir [125, 199]. Kübik ve sekizyüzlü yapılar kuvvete 0° ve 90° açı yapan kolonlara sahiptir ve bu yapılarda kırılmalar kat kat olmaktadır (Şekil 4.31b-c). Elmas yapıdaki numunelerde ise kolonlar kuvvet doğrultusuna 45° açı yaptığından dolayı kırılmalar açılı gerçekleşmekte ve kırılma anında bütün bir katta veya farklı katlarda kırılmalar meydana gelebilmektedir (Şekil 4.31a). Benzer kolon yönelimlerine sahip yapılarda aynı kırılma davranışı gözlemlenmiştir [141, 147, 200]. Ayrıca düşük hacimsel boşluk oranına sahip numuneler daha katı bir destek sunmakta ve kırılma durumunda çökmeyi azaltmaktadır [201]. Bu durum elmas numunelerde dalgalanmaların daha az olmasına neden olabilir. Oluşan dalgalanmalar plato bölgesinin başlangıcında daha yüksek oluşmuştur. Bunun nedeni enerji emilimine katkıda bulunan malzeme miktarının daha fazla olması dolayısıyla ilk katmanlar ezildiğinde en yüksek enerjinin açığa çıkmasından kaynaklanmaktadır [194]. Yapıların kırılma davranışına, kolonların geometrisinin yanında yatay ile dikey kolonlar arasında kalınlık farkları, kolonlardaki dalgalanmalar ve kalınlık değişimleri de etki edebilmektedir [51, 182]. Bunların yanı sıra birim hücrelerin düğüm noktalarındaki boyutsal değişiklikler oluşturabilecek hatalar da kırılma davranışını

değiştirebilmektedir [190]. Kübik ile elmas numunelerin plato bölgelerindeki dalgalanmaların görece genlik farkları literatürle de uyum göstermektedir [202].

Yoğunlaşma bölgesi daha önce de bahsedildiği üzere numunenin gözenekliliği, kırılma davranışı ve deneyin hangi noktada sonlandırıldığıyla doğrudan bağlantılıdır. Deneyler her üç birim hücre yapısı içinde %50 deplasmana ulaştığında durdurulmuştur. Deneyin devam ettirilmiş olması durumunda bütün numunelerde yoğunlaşma etkisinin görülebileceği açıktır [195]. Bu deplasman değerinde elmas yapıların daha az gözenekli olması nedeniyle yoğunlaşma etkisi daha net görülebilmektedir. Birim hücre yapısı ve kolon kalınlığı ayırt etmeksizin bütün numunelerde parçalı kırılma gözlemlenmiştir. Numunelerden kopan parçalar boşluklar oluşturmuştur. Bu durum yoğunlaşmanın etkisinin görülebilmesini olumsuz olarak etkilemiştir [194].



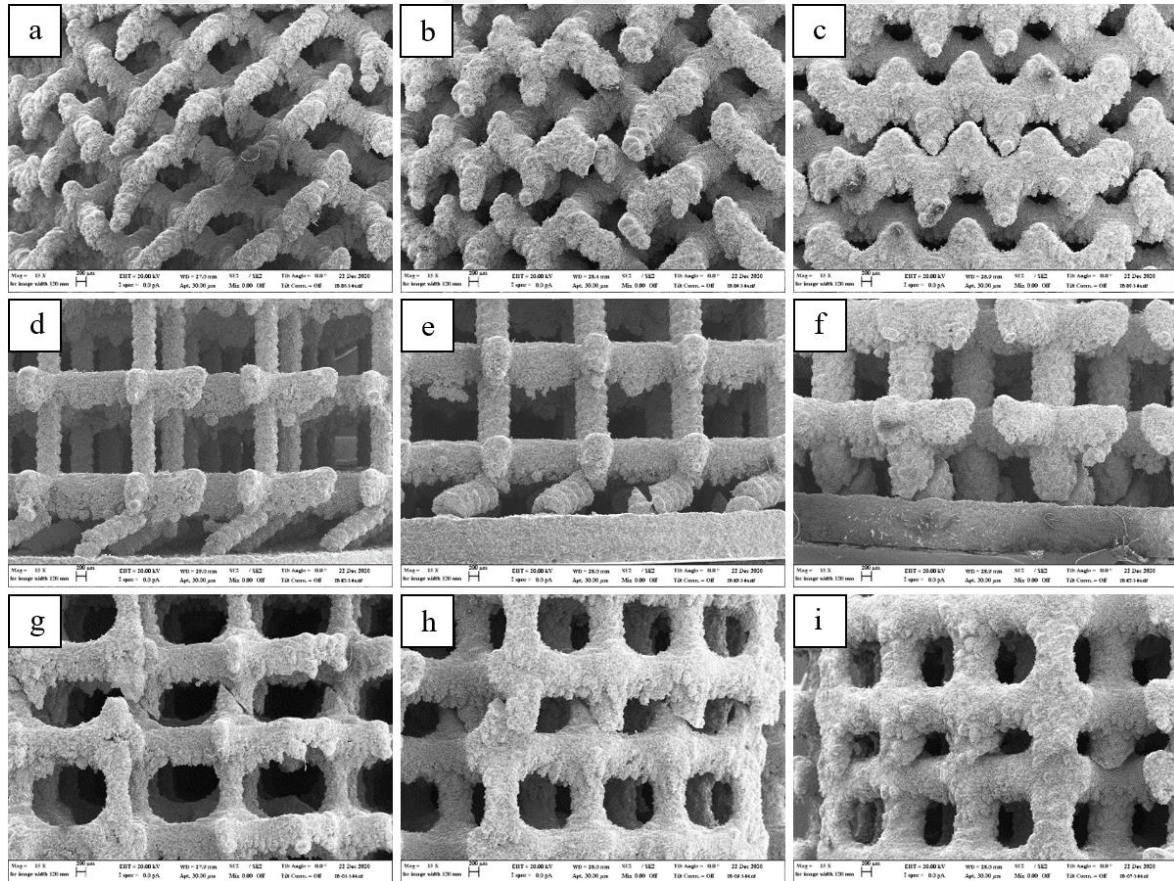
Şekil 4.31. a) elmas, b) kübik ve c) sekizyüzlü birim hücre yapılarının basma yükü altında kırılma davranışları

Maxwell ölçütüne göre ($M=b-3j+6$; $M \geq 0$ ise gerilme baskın, $M < 0$ ise eğilme baskın, j : düğüm sayısı, b : kolon sayısı) elmas ve kübik yapılar eğilme baskın, sekizyüzlü yapı ise gerilme baskın bir yapıya sahip olması gerekmektedir [129, 201]. Ancak literatürde gözenekli yapıların düğüm noktalarındaki [203] veya kolon kalınlıklarındaki değişimle [182] hasar davranışının gerilme veya eğilme baskın olacak şekilde değişebildiği bildirilmiştir. Bununla beraber üretimdeki hatalara [191] veya kolonların doğrultusuna [204] bağlı olarak da değişebilmektedir. Bütün bu nedenlerden dolayı Maxwell ölçütüne göre

teorik olarak eğilme baskın olan yapılar uygulamada gerilme baskın davranış gösterebilmektedir [51]. Ayrıca Maxwell ölçütü belirli bir mimarinin deformasyonunda hangi davranışın baskın olduğunu göstermek için geliştirilmiş olup deformasyon yapısı ile ilgili daha fazla araştırmanın nicel olarak yapılması gerekmektedir [202]. Kadkhodapour ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kübik ve elmas birim hücre yapılarının basma deneyinde kübik yapılarda katların birbiri üstüne, elmas yapılarda ise 45° açıyla çökmesini kübik yapıların gerilme baskın elmas yapıların ise eğilme baskın yapılar olmasına bağlamışlardır [202]. Gözenekli yapılarda katların birbiri üzerine çökmesi yapının gerilme baskın, 45° açıyla çökmesi ise yapının eğilme baskın olduğunu göstermektedir [203]. Choy ve arkadaşları yaptıkları çalışmada basma kuvveti doğrultusuna paralel kolonlara sahip kübik ve bal peteği birim hücre yapılarından oluşturulan gözenekli yapıları x ekseninde 90° çevirerek basma kuvveti doğrultusuyla açı yapan kolonlara sahip numuneler tasarlamışlardır [195]. Yaptıkları basma deneyi sonucunda ilk durumdaki numunelerde kolonlar birbiri üzerine kırılmış, 90° çevrilmiş numunelerde ise açılı kırılmıştır. Bu durumda ilk numunelerin gerilme baskın, çevrilmiş numunelerin ise eğilme baskın olduğu söylenebilir. Oysa Maxwell ölçütüne göre, aynı birim hücreler kullanıldığından dolayı birim hücredeki düğüm sayısı ve kolon sayısı değişmediği için kırılma davranışında baskın durumun da değişmemesi gerekmektedir. Dolayısıyla Maxwell ölçütünün her durumda geçerli olmadığı açıktır. Gerilme baskın yapılar eğilme baskın yapılara göre daha yüksek özgül dayanım göstermektedir [204, 205]. Bu çalışmada belirli gözeneklilik oranları çalışılmadığından bütün numuneler üzerinden söz konusu edilen bir karşılaştırma yapılamasa da örnek olarak yaklaşık aynı kuru tartım hacimsel boşluk oranına sahip bE5 (%63,45) ve bS7 (%63,23) numuneler için bir karşılaştırma yapılabilir. Elmas yapı bE5 ve sekizyüzlü yapı bS7 numunelerinin gerilme gerinim eğrileri incelendiğinde bS7 numunesinin daha yüksek basma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Gerek eğilme baskın numuneye kıyasla yüksek dayanımı gerekse katların birbiri üstüne çökmesi şeklinde oluşan kırılma davranışı, sekizyüzlü yapıların da kübik yapılar gibi gerilme baskın olduğunu göstermektedir. Eğilme baskın yapılar genellikle yüksek elastisite modülü ve dayanım beklenmeyen enerji soğurumu ve tamponlama gibi alanlarda, gerilme baskın yapılar ise düşük ağırlıkta yüksek elastisite modülü ve dayanım gerektiren alanlarda kullanımı daha uygun olabilmektedir [206, 207].

Basma deneyinde ilk hasar sonrası kolonların SEM görüntüleri Şekil 4.32’de verilmiştir. Elmas birim hücreye sahip numunelerde birim hücre yapısından dolayı kolondaki kırılmalar güçlükle görüntülenebilmiştir (Şekil 4.32a-c). Bu yapıda kırılmalar kolonları neredeyse dik

kesecek şekilde oluşmuştur. Kübik birim hücreli yapıda ise düşük kolon kalınlıklarında kolonlar eğilerek hasar almış ve düğüm noktalarına yakın yerlerden kopmuşlardır (Şekil 4.32d-e). Yüksek kolon kalınlığında ise yine eğilme gözlemlenmiş ancak asıl hasar kolonların yaklaşık 45° açıyla kırılmasıyla oluşmuştur (Şekil 4.32f). Literatürde, yapının yoğunluğu arttıkça kolonların eğilmedense kırıldığını ve katı gibi davrandığı belirtilmiş ve bu artışın kolonların sünekliğini ve hasar davranışını değiştirebileceği bildirilmiştir [195]. Sekizyüzlü yapıda da hasar kolonların benzer şekilde yaklaşık 45° açıyla kırılmasıyla oluşmuştur (Şekil 4.32g-f). Kübik ile sekizyüzlü yapılar birbirine benzemesine karşın sekizyüzlü birim hücre yapısında kolonların düğüm noktalarıyla birleşme noktasında radyus benzeri bir bağlantının olması nedeniyle kolonların kübik yapılardan farklı olarak eğilmeden kırıldığı söylenebilir.



Şekil 4.32. Basma deneyi ilk hasar sonrası kolonların SEM görüntüleri a) bE3, b) bE5, c) bE7, d) bK3, e) bK5, f) bK7, g) bS3, h) bS5 ve i) bS7

Numunelerde gözlenen yaklaşık 45° açıyla oluşan kırılmaları açıklayabilmek için Şekil 4.33'te verilen A_0 kesit alanına sahip bir silindirik parçaya F basma yükü etkidiğini varsayalım. Şekilde A kesit alanına sahip kayma düzlemine α açısıyla etki eden F_0 kuvveti

görülmektedir. Bu kuvvetin düzleme paralel bileşeni olan kayma kuvveti F_1 ve dik bileşeni olan normal kuvvet F_2 sırasıyla;

$$F_1 = F_0 \cos \alpha \quad (4.94)$$

$$F_2 = F_0 \sin \alpha \quad (4.95)$$

olarak ifade edilir. Kayma gerilmesi ve kayma düzleminin kesit alanı ise sırasıyla;

$$\tau = \frac{F_1}{A} \quad (4.96)$$

$$A = \frac{A_0}{\sin \alpha} \quad (4.97)$$

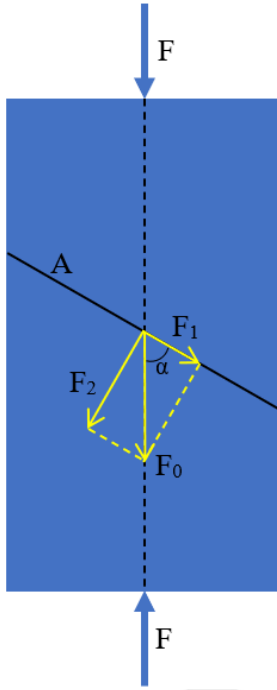
olarak bulunur. Eş. 4.94 ve Eş. 4.97, Eş.4.96'da yerine yazılırsa kayma gerilmesi;

$$\tau = \frac{F_0}{A_0} \cos \alpha \sin \alpha \quad (4.98)$$

olarak bulunur. Denklem düzenlenirse kayma düzleminde oluşan gerilme;

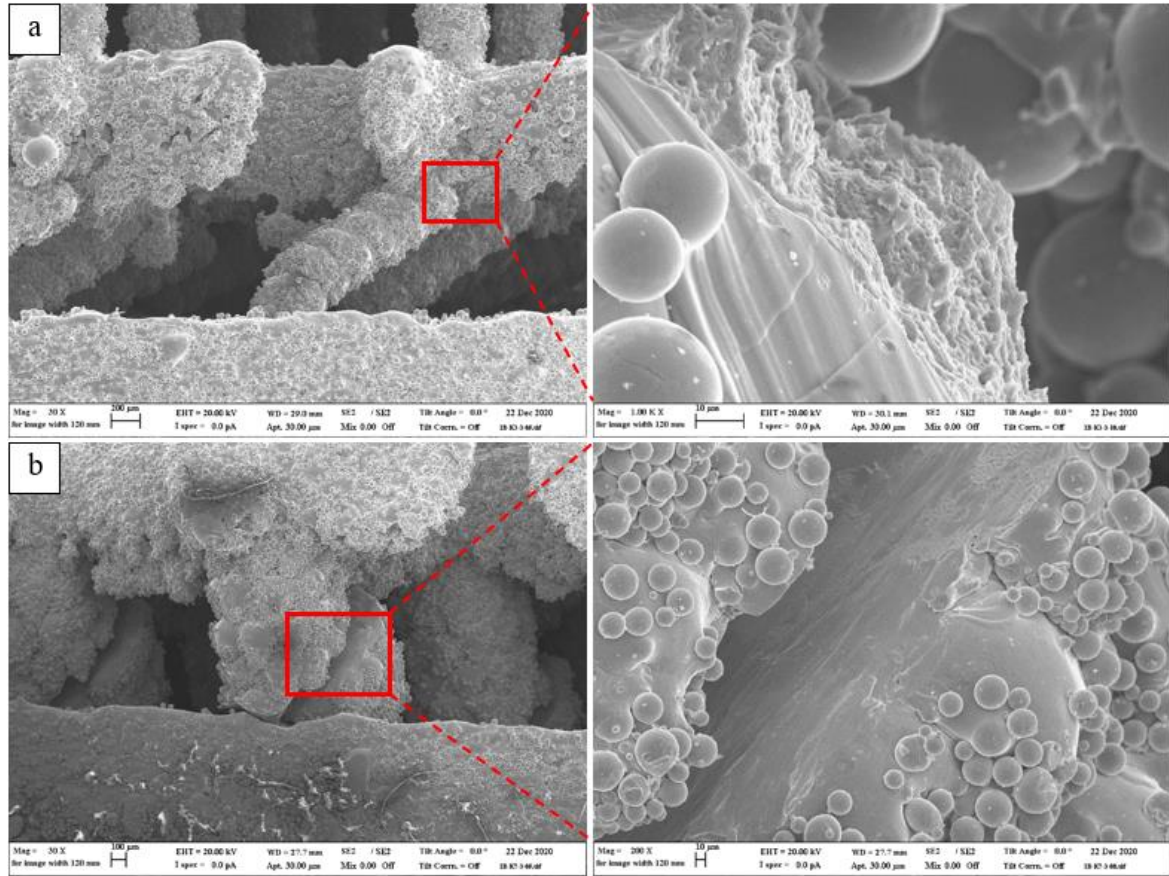
$$\tau_\alpha = \frac{\sin 2\alpha}{2} \sigma_0 \quad (4.99)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitlikte en büyük kayma gerilmesini bulmak için $\sin 2\alpha$ değerinin en büyük olması gerekmektedir. Bu değer α açısı 45° olduğunda en büyük olmaktadır. Dolayısıyla oluşabilecek en büyük kayma gerilmesi 45° düzlemde meydana gelmektedir. Bu nedenle kırılmalar yaklaşık 45° açılı olarak meydana gelmiştir [6, 191].

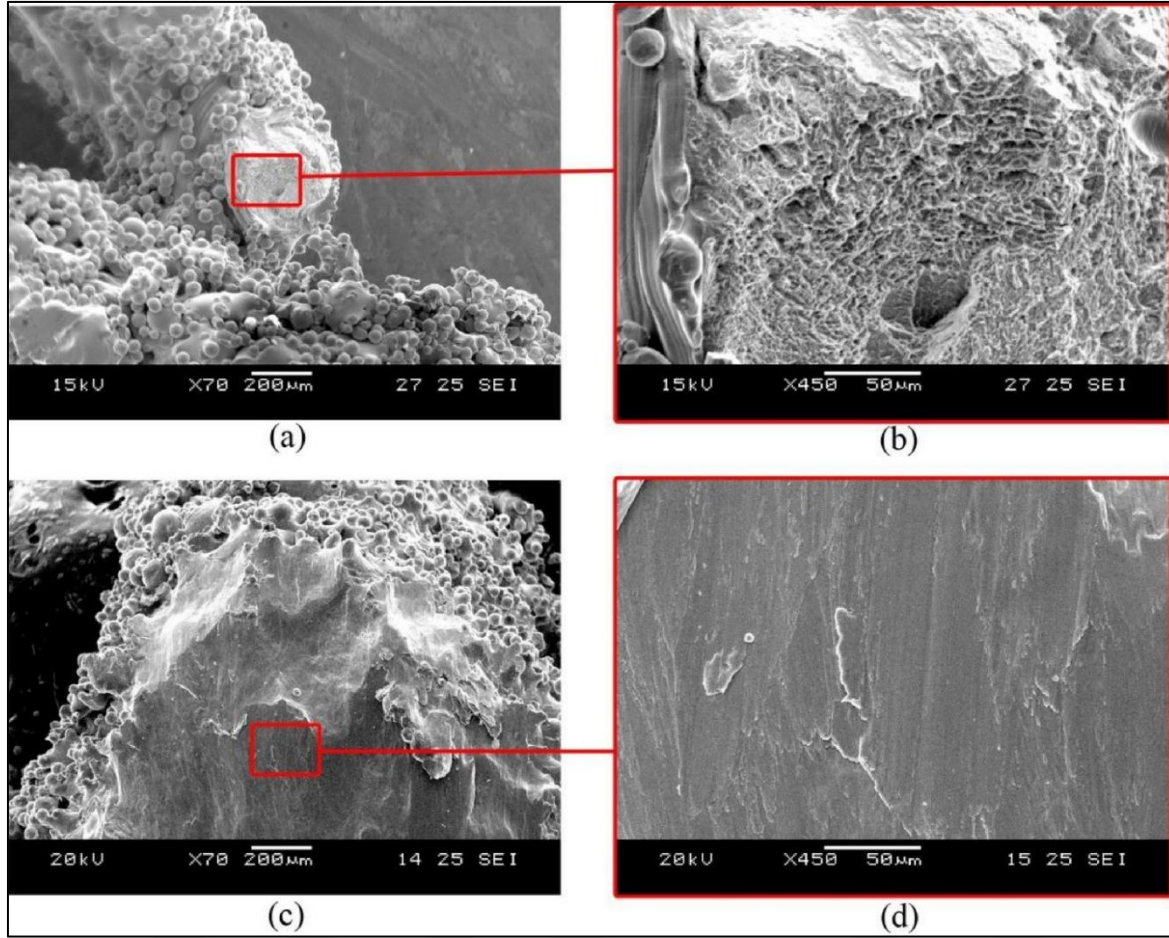


Şekil 4.33. Kayma gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan basma eksen, kayma düzlemi ve kayma yönü arasındaki geometrik ilişkiler

Kolonların kırılma yüzeyleri incelendiğinde ise daha önce bahsedildiği gibi kolon kalınlığı değiştikçe veya bir diğer ifadeyle yapının gözenekliliği değiştikçe bu yüzeylerin de değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.34). 0,3 mm kolon kalınlığına sahip bK3 numunesinin kırılma yüzeyi incelendiğinde çukurcuklu yüzey görünümü olduğu gözlemlenmiştir ve sünek kırılma davranışı gösterdiği söylenebilir [208]. 0,7 mm kolon kalınlıklı bK7 numunesinin kırılma yüzeyi incelendiğinde ise düz bir yüzey görülmüştür ve gevrek kırılma davranışı gösterdiği söylenebilir. Literatürde de 0,4 mm ve 1,2 mm kolon kalınlığına sahip kübik numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde benzer görüntülerin (Şekil 4.35) olduğu görülmüş ve kalınlık arttıkça gevrekliğin arttığı bildirilmiştir [195].



Şekil 4.34. Farklı kolon kalınlıklarındaki kübik numunelerin kolonlarının kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) bK3 ve b) bK7



Şekil 4.35. a-b) 0,4 mm kolon kalınlığına c-d) 1,2 mm kolon kalınlığına sahip kübik numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri [195]

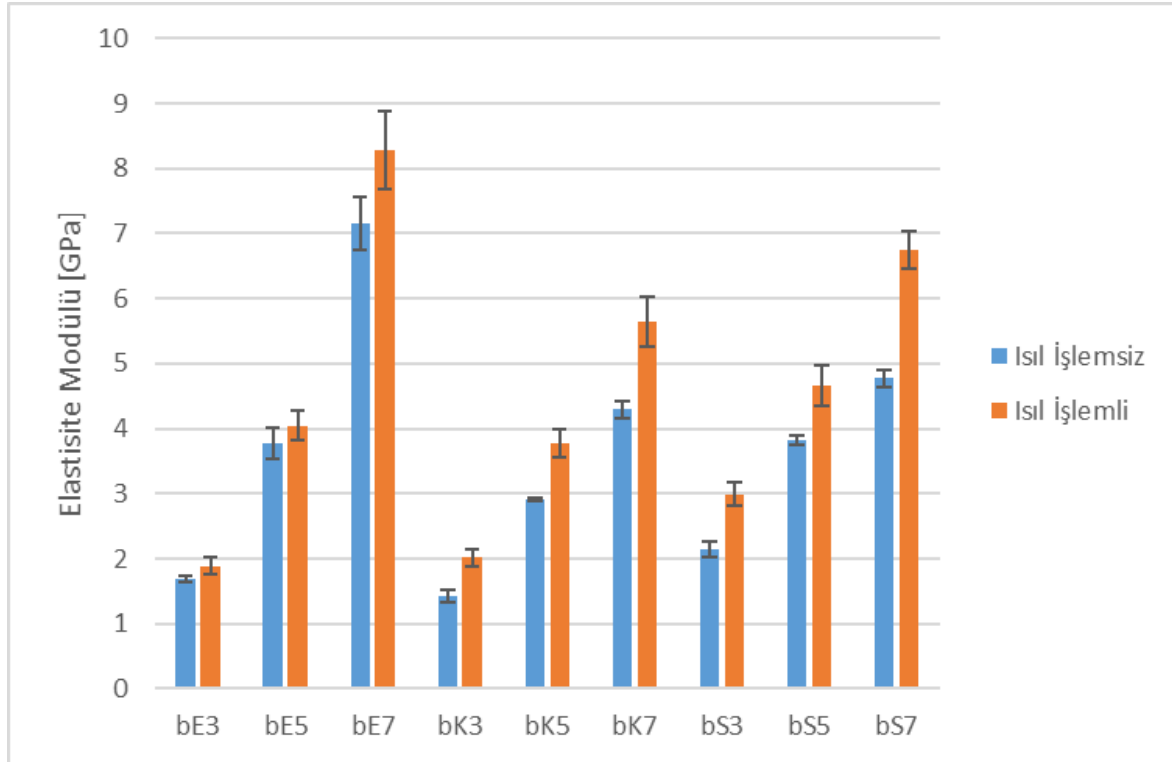
4.2.1. Isıl işlemin elastisite modülü üzerine etkisi

Isıl işlemin basma yükü altındaki davranışlarına etkisini incelemek amacıyla numunelerin bir kısmına ısıtıl işlem uygulanmış bir kısmına ise uygulanmamıştır ve numunelerin basma testleri yapılarak karşılaştırma yapılmıştır. Isıl işlem uygulanmış numuneler ile ısıtıl işlem uygulanmamış numunelerin elastisite modülleri ve ısıtıl işlemin elastisite modülüne etkisi Çizelge 4.7’de gösterilmiştir. Ayrıca numunelerin elastisite modülleri Şekil 4.36’da grafik olarak da verilmiştir. Elmas numuneler incelendiğinde, ısıtıl işlem sonrası 0,3 mm kolon kalınlığına sahip numunede elastisite modülü 1,70 GPa’dan 0,18 GPa artışla 1,88 GPa’ya, 0,5 mm kolon kalınlığına sahip numunede elastisite modülü 3,78 GPa’dan 0,27 GPa artışla 4,05 GPa’ya, 0,7 mm kolon kalınlığına sahip numunede elastisite modülü 7,16 GPa’dan 1,12 GPa artışla 8,28 GPa’ya çıkmıştır. Elastisite modülünde oransal olarak en yüksek artış %14 ile 0,7 mm kolon kalınlığına sahip numunede en düşük artış ise %7 ile 0,5 mm kolon kalınlığına sahip numunede olmuştur. 0,3 mm kolon kalınlığına sahip numune de ise

elastisite modülündeki artış %10 olarak bulunmuştur. Kübik numuneler incelendiğinde, ısıtım işlem sonrası 0,3 mm kolon kalınlığına sahip numunede elastisite modülü 1,42 GPa'dan 0,60 GPa artışla 2,02 GPa'ya, 0,5 mm kolon kalınlığına sahip numunede elastisite modülü 2,91 GPa'dan 0,86 GPa artışla 3,77 GPa'ya, 0,7 mm kolon kalınlığına sahip numunede elastisite modülü 4,29 GPa'dan 1,36 GPa artışla 5,65 GPa'ya çıkmıştır. Elastisite modülünde oransal olarak en yüksek artış %30 ile 0,3 mm kolon kalınlığına sahip numunede en düşük artış ise %23 ile 0,5 mm kolon kalınlığına sahip numunede olmuştur. 0,7 mm kolon kalınlığına sahip numune de ise elastisite modülündeki artış %24 olarak bulunmuştur. Sekizyüzlü numuneler incelendiğinde, ısıtım işlem sonrası 0,3 mm kolon kalınlığına sahip numunede elastisite modülü 2,15 GPa'dan 0,84 GPa artışla 2,99 GPa'ya, 0,5 mm kolon kalınlığına sahip numunede elastisite modülü 3,82 GPa'dan 0,84 GPa artışla 4,66 GPa'ya, 0,7 mm kolon kalınlığına sahip numunede elastisite modülü 4,77 GPa'dan 1,97 GPa artışla 6,75 GPa'ya çıkmıştır. Elastisite modülünde oransal olarak en yüksek artış %29 ile 0,7 mm kolon kalınlığına sahip numunede en düşük artış ise %19 ile 0,5 mm kolon kalınlığına sahip numunede olmuştur. 0,3 mm kolon kalınlığına sahip numune de ise elastisite modülündeki artış %28 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.7. Isıtım işlem uygulanmış numuneler ile ısıtım işlem uygulanmamış numunelerin elastisite modülleri ve ısıtım işlemin etkisi

Numune	Elastisite Modülü [GPa]		Değişim [%]
	Isıtım İşlemsiz	Isıtım İşlemli	
bE3	1,70±0,05	1,88±0,13	10
bE5	3,78±0,24	4,05±0,23	7
bE7	7,16±0,41	8,28±0,60	14
bK3	1,42±0,09	2,02±0,13	30
bK5	2,91±0,02	3,77±0,22	23
bK7	4,29±0,14	5,65±0,38	24
bS3	2,15±0,12	2,99±0,18	28
bS5	3,82±0,07	4,66±0,31	18
bS7	4,77±0,13	6,75±0,28	29

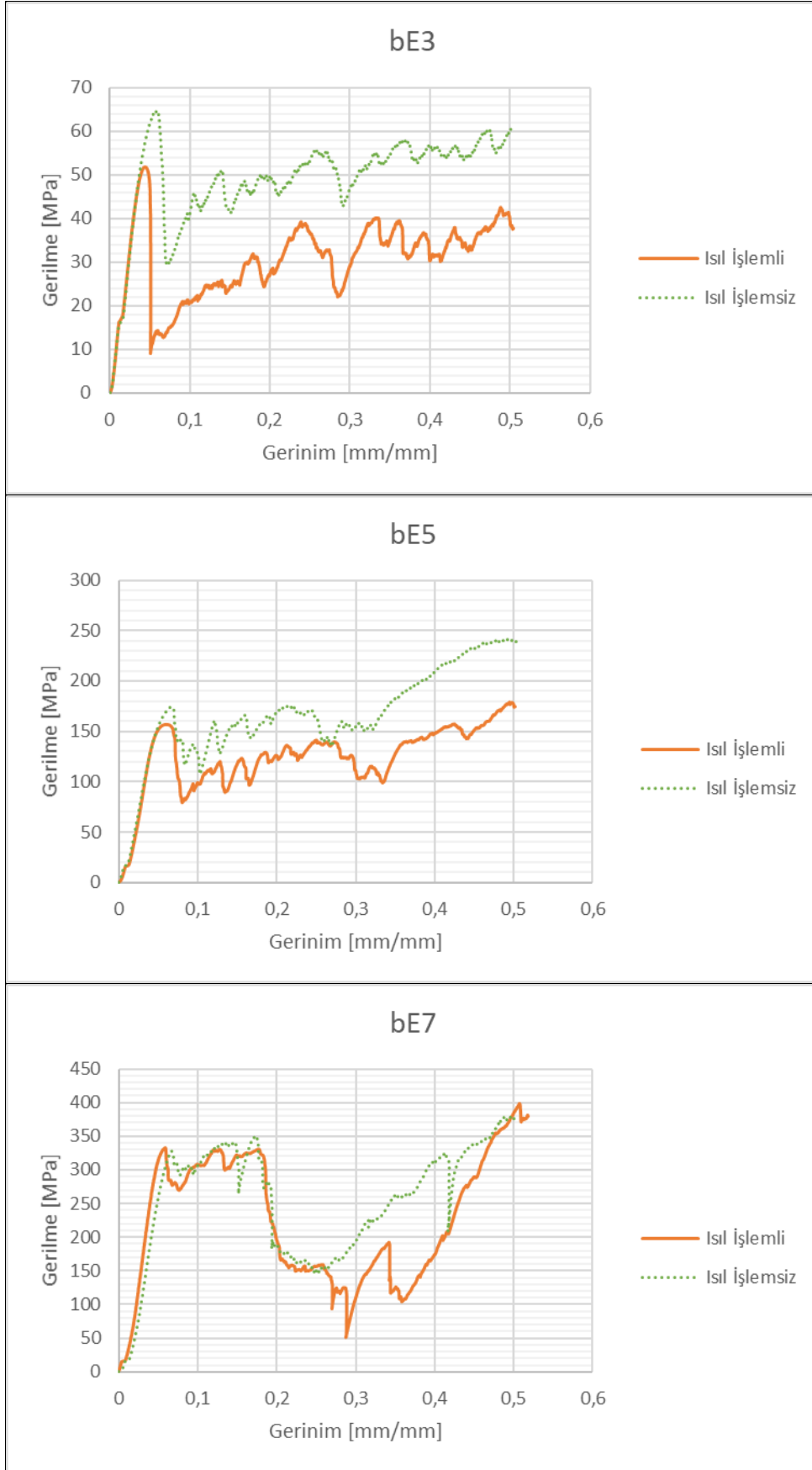


Şekil 4.36. Isıl işlemsiz ve ısıtılmış numunelerin elastisite modülleri

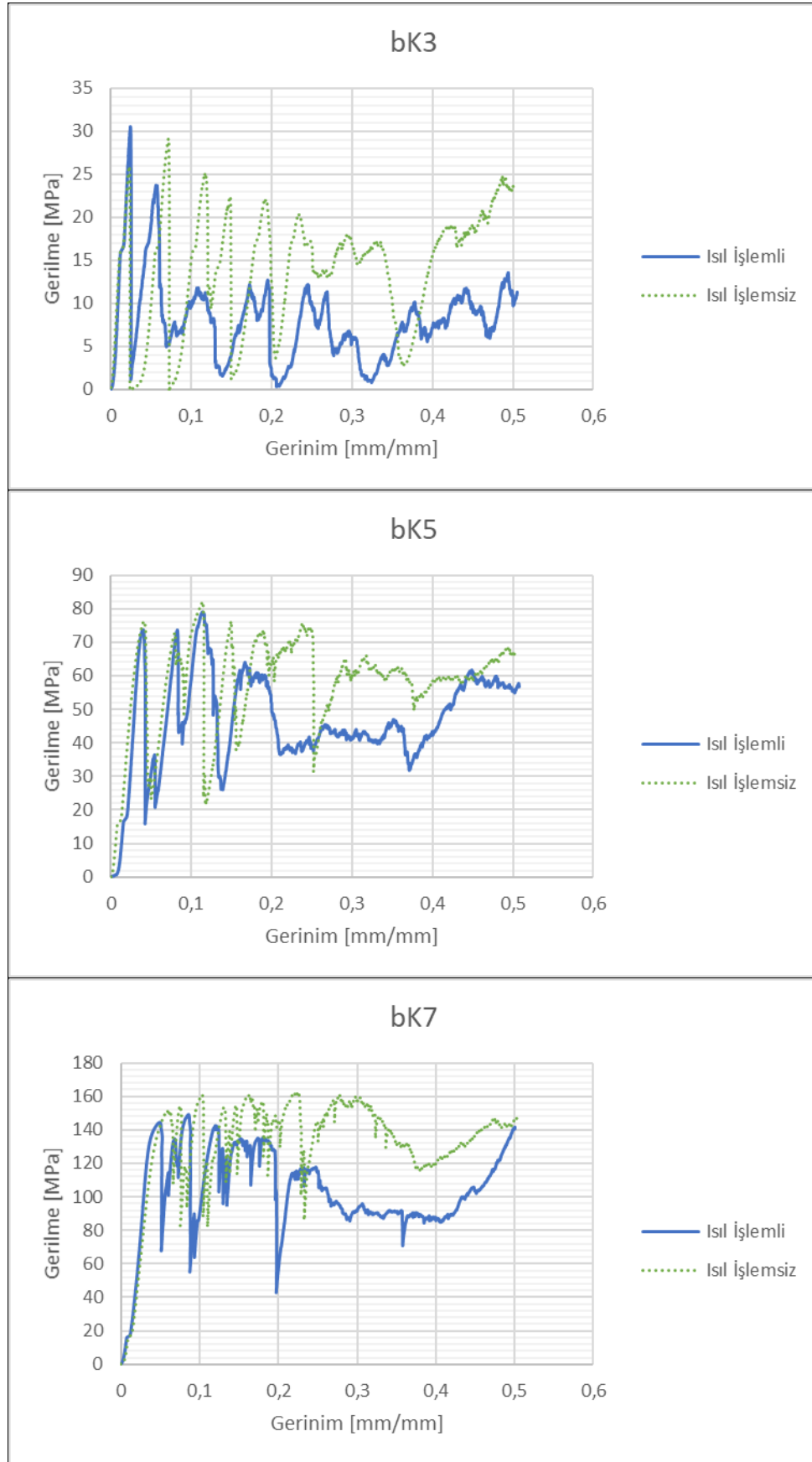
Şekil 4.37, Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip (0,3 mm, 0,5 mm ve 0,7 mm kolon kalınlıkları için ayrı ayrı) numunelerin basma deneylerinden elde edilen gerilme-gerinim grafikleri gösterilmiştir. Burada tekrarlanan deney numunelerinden ısıtılmış uygulanan ve uygulanmayan olmak üzere sade bir görünüm için birer numunenin grafiği örnek olarak verilmiştir. Genel olarak bakıldığında elastik deformasyon bölgesinde ısıtılmış ve ısıtılmamış numunelerin yakın bir çizgide gittiği söylenebilir. Elastisite modülüne bakıldığında ise birim hücre yapısı veya kolon kalınlığı fark etmeksizin, bütün numunelerin elastisite modüllerinin ısıtılmış işlem ile arttığı görülmektedir. Literatürde de benzer şekilde ısıtılmış işlemin elastisite modülünü arttırdığı görülmüştür [201, 209, 210]. Isıtılmış işlemin elastisite modülünü en çok arttırdığı numunenin %30 ile 0,3 mm kolon kalınlığına ve kübik birim hücre yapısına sahip numune olduğu görülmekteyken, elastisite modülünü en az arttırdığı numune ise %7 ile 0,5 mm kolon kalınlığına sahip elmas numunesi olduğu görülmektedir. Çizelge 4.7 incelendiğinde ısıtılmış işlemin elastisite modülüne etkisi en yüksek oranda kübik birim hücre yapısındaki numuneler olduğu görülürken en düşük oranda etki ise elmas birim hücre yapısındaki numune de olduğu belirlenmiştir. Sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerde ise ısıtılmış işlemin etkisi kübik numunelerdekine yakın oranlarda gerçekleşmiştir. Basma

dayanımları incelendiğinde ısıt işlemsiz numunelerin daha yüksek basma dayanımına ve plato dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Literatürde de gerek basma dayanımının gerekse plato dayanımının ısıt işlem ile düştüğünü gösteren çalışmalar bulunmaktadır [52, 201]. Grafiğin plato bölgesindeki dalgalı görünümü ısıt işleminden etkilenmemiştir. Ayrıca deformasyon davranışında da bir değişiklik gözlemlenmemiştir [52].

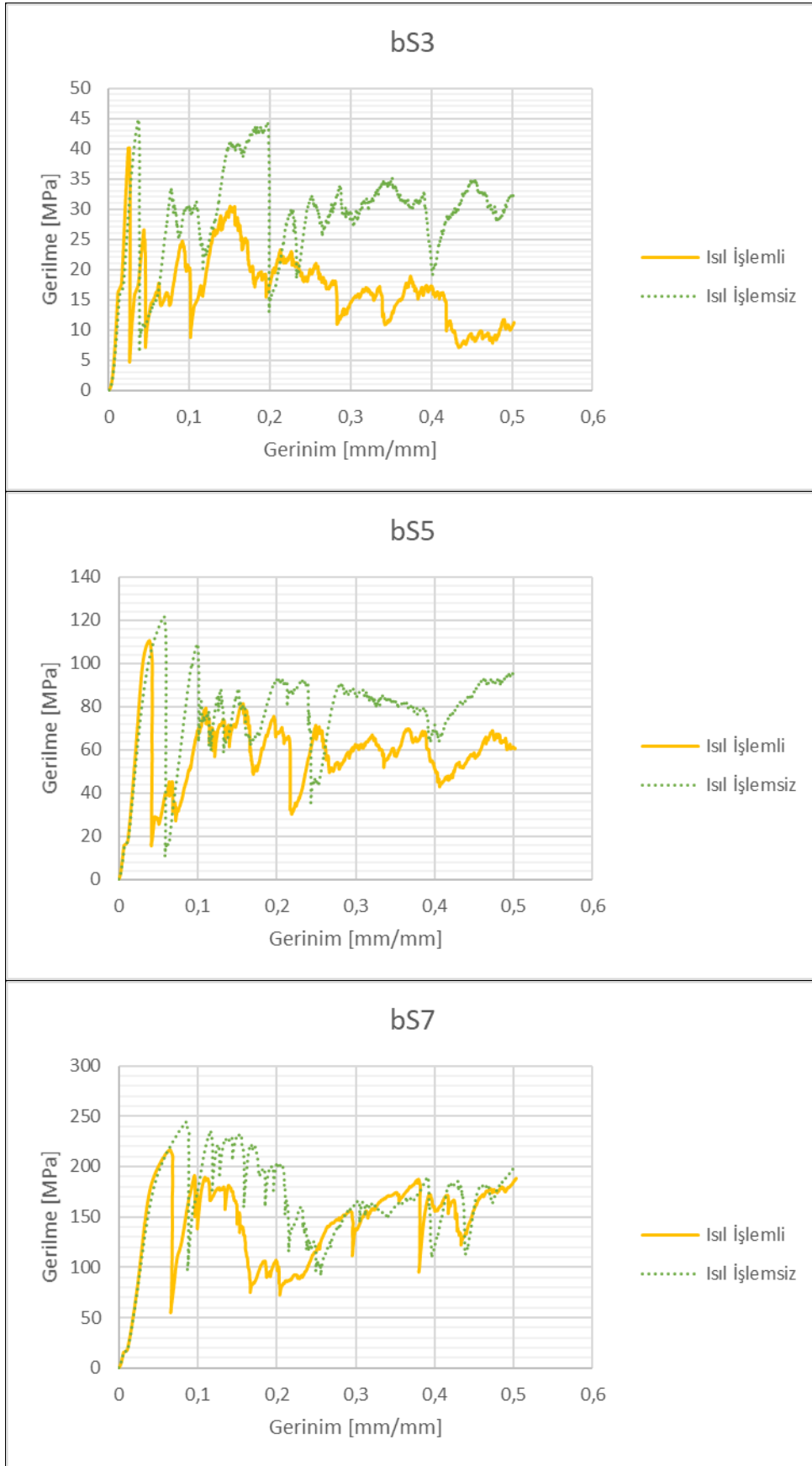




Şekil 4.37. Elmas numunelerin ısıt işleml farkını gösteren basma deneyi gerilme-gerinim grafiğı



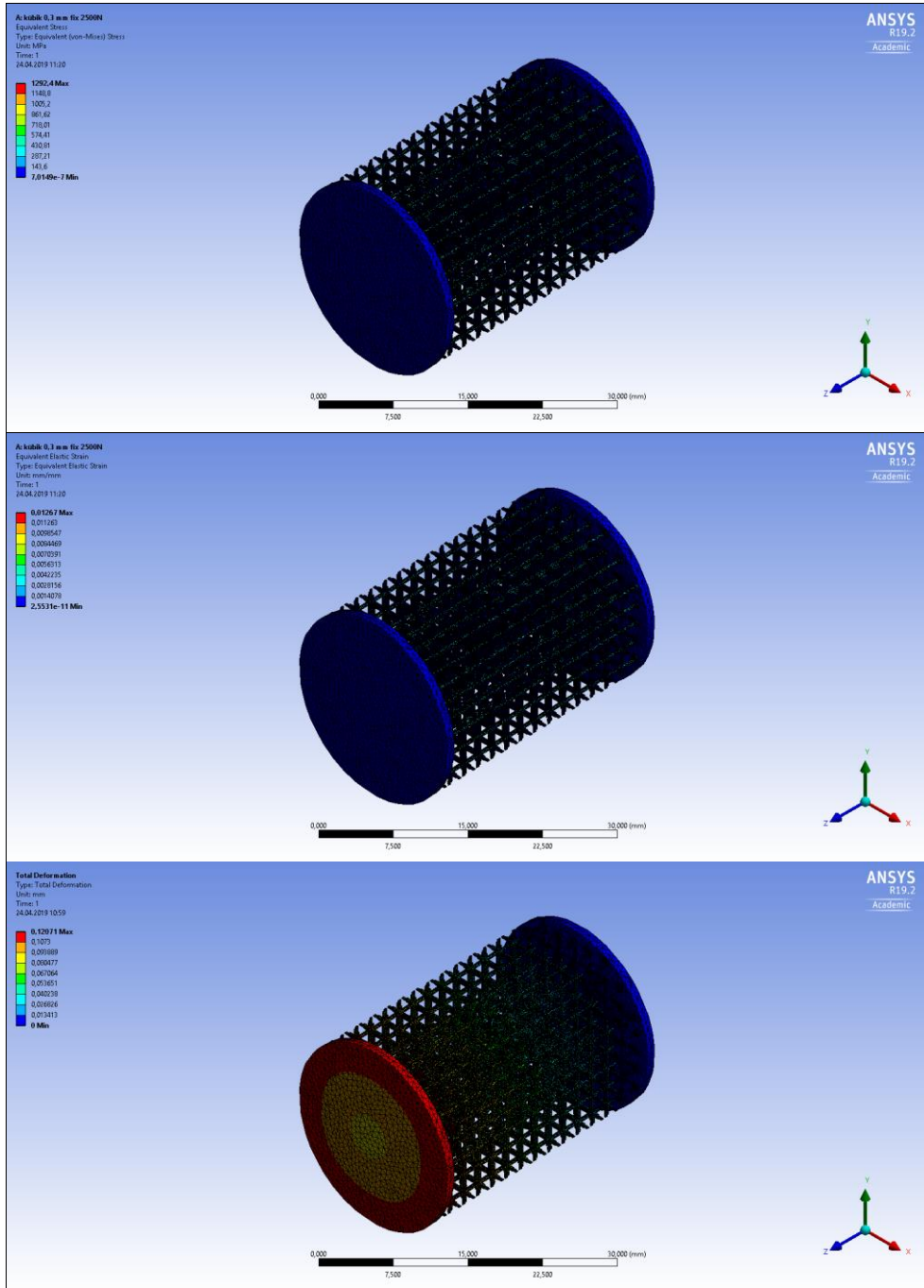
Şekil 4.38. Kübik numunelerin ısıtıl işlem farkını gösteren basma deneyi gerilme-gerinim grafiği



Şekil 4.39. Sekizyüzlü numunelerin ısıtıl işlem farkını gösteren basma deneyi gerilme-gerinim grafiği

4.2.2. Sonlu elemanlar analizi

Sonlu elemanlar analizi oluşturulan her bir numuneye uygulanmış ve model üzerinde oluşan gerilme, gerinim ve deformasyon sonuçları incelenmiştir (Şekil 4.40). Bu sonuçlara göre Hooke yasasından yararlanılarak analiz sonucunda elde edilen elastisite modülleri bulunmuştur.



Şekil 4.40. Model üzerinde yapılan analizler sonucunda alınan gerilim, gerinim ve deformasyon sonuçları

Sonlu elemanlar analizi yapılırken literatürde farklı yaklaşımların uygulandığı görülmüştür. Basma deneyinin benzetimini analizde yapmak için bir kısım araştırmalarda modele kuvvet [171, 211, 212] uygulanırken diğer araştırmalarda ise deplasman [182, 202, 213] uygulandığı görülmüştür. Her iki uygulamada da modelin kuvvet ya da deplasman uygulanmayan diğer tarafından sabit mesnetleme yapılmıştır. Literatürde yer alan bu iki yaklaşımın farkını görebilmek için üretimi yapılan aynı modeller üzerinde her ikisi de denenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.8). Çizelge incelendiğinde kuvvet ile deplasman uygulaması arasında elastisite modülü sonuçlarında farkın %2 ile %21 arasında olduğu görülmüştür. İki farklı girdi sonucunda analizler oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Dolayısıyla her iki yöntemin de uygulanabilir olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.8. Modeller üzerinde yapılan farklı analiz girdilerinin elastisite modülüne etkisi

Numune	Elastisite Modülü [GPa]		Sapma [%]
	Kuvvet	Deplasman	
bE3	0,50	0,53	5
bE5	3,95	4,02	2
bE7	15,13	15,76	4
bK3	1,23	1,49	21
bK5	3,86	4,62	20
bK7	8,13	9,65	19
bS3	2,59	2,83	9
bS5	7,37	7,97	8
bS7	13,59	14,68	8

Isıl işlem uygulanmış numunelerin basma deneyi elastisite modülü ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen elastisite modüllerinin karşılaştırılması Çizelge 4.9’da verilmiştir. Elmas birim hücre yapısına sahip numuneler incelendiğinde 0,3 mm kolon kalınlığına sahip numunenin analiz sonucu elastisite modülü, deney sonucundan %73 daha düşük çıkarken, 0,7 mm kolon kalınlığına sahip numunenin ise analiz sonucu deney sonucundan %83 daha yüksek çıkmıştır. 0,5 mm kolon kalınlığına sahip numuneye bakıldığında ise analiz sonucu elastisite modülü sadece %3 daha düşüktür. Kübik birim hücre yapısına sahip numuneler incelendiğinde, 0,3 mm kolon kalınlığına sahip numunenin analiz sonucu elastisite modülü, deney sonucundan %39 daha düşük çıkarken, 0,7 mm kolon kalınlığına sahip numunenin ise analiz sonucu deney sonucundan %44 daha yüksek çıkmıştır. 0,5 mm kolon kalınlığına sahip numuneye bakıldığında ise analiz sonucu sadece %3 daha yüksek bulunmuştur. Sekizyüzlü

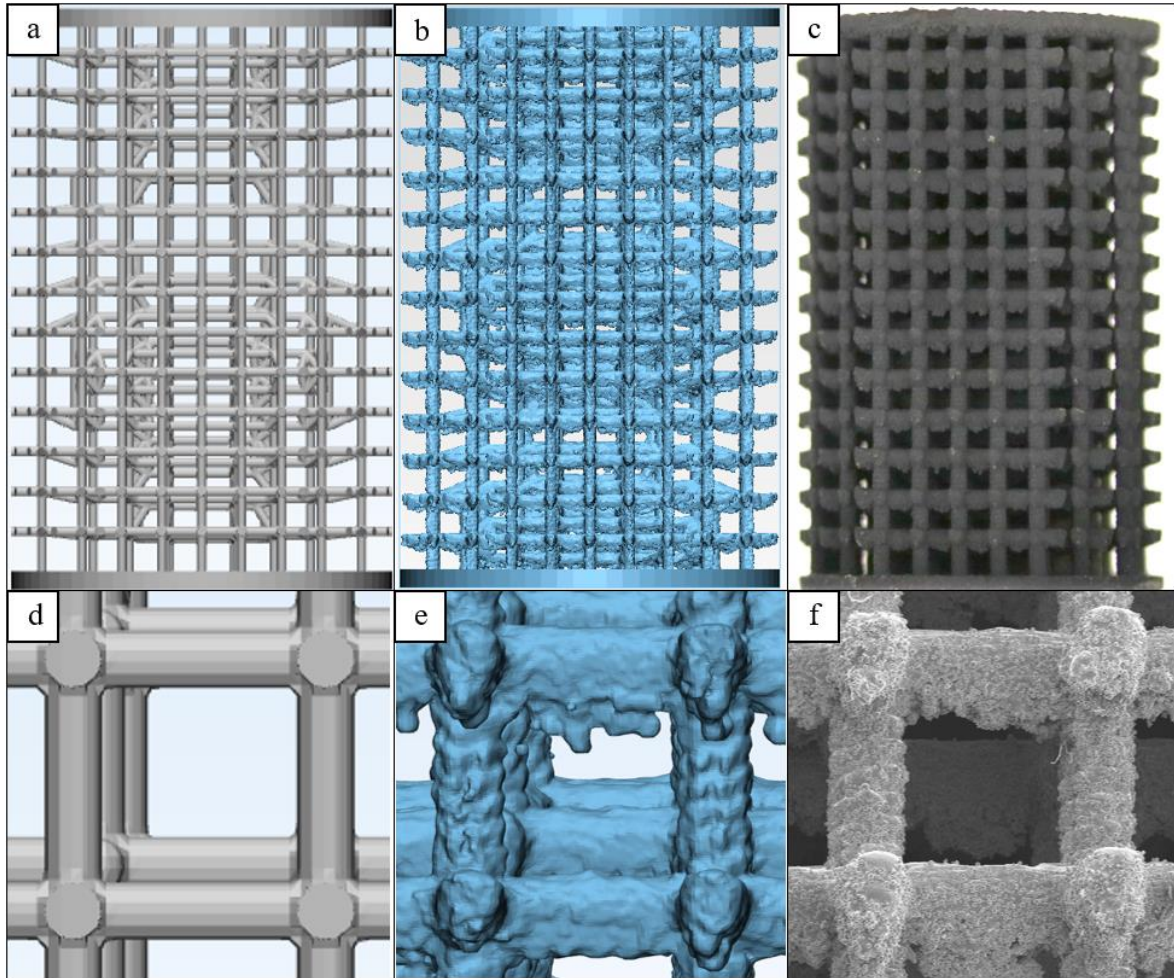
birim hücre yapısına sahip numuneler incelendiğinde ise 0,3 mm kolon kalınlığına sahip numunenin analiz sonucu elastisite modülü, deney sonucundan %13 daha düşük çıkarken, 0,7 mm kolon kalınlığına sahip numunenin ise analiz sonucu deney sonucundan %101 daha yüksek çıkmıştır. 0,5 mm kolon kalınlığına sahip numuneye bakıldığında ise analiz sonucu %58 daha yüksek bulunmuştur.

Çizelge 4.9. Basma deneyi ile sonlu elemanlar analizi yapılmış modellerin elastisite modülleri ve arasındaki sapma

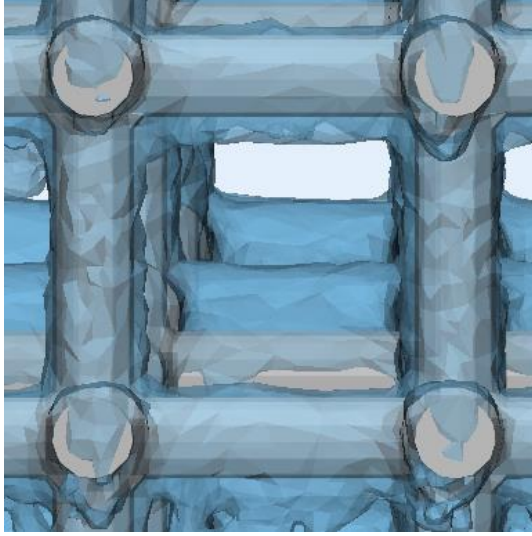
Numune	Elastisite Modülü [GPa]		Sapma [%]
	Deney	Analiz	
bE3	1,88±0,13	0,50	-73
bE5	4,05±0,23	3,95	-3
bE7	8,28±0,60	15,13	83
bK3	2,02±0,13	1,23	-39
bK5	3,77±0,22	3,86	3
bK7	5,65±0,38	8,13	44
bS3	2,99±0,18	2,59	-13
bS5	4,66±0,31	7,37	58
bS7	6,75±0,28	13,59	101

Tasarlanan model ile üretilen numune arasında üretim hatalarından kaynaklanan nedenlerle farklar oluşabilmektedir [160, 214–216]. Üretim esnasında lazerin ergittiği bölgenin dış kısmında kalan alanlar sıcaklıktan etkilenip ergimesi sonucunda kolon kalınlıkları artmaktadır [217]. Şekil 4.41’de tasarım, mikro-BT tarama ve üretilen numunenin görüntüleri ile tasarım ve taramanın birim hücreyi gösterecek şekilde bilgisayardan alınmış görüntüsü ve numuneden çekilen SEM görüntüsü verilmiştir. Gerek mikro-BT taramasından oluşturulan üç boyutlu modelde gerekse de SEM görüntüsünde numunenin tasarımdan farklılıkları açık bir şekilde görülebilmektedir. Dikey kolonlarda kalınlaşmalar oluşurken yatay kolonlarda kalınlaşmaların yanında sarkmalar da meydana gelmiştir. Şekil 4.42’de verildiği gibi tasarım ile mikro-BT görüntüsü üst üste getirilince kalınlaşmalar ve sarkmalar daha net bir şekilde görülebilmektedir. Üretim esnasında kolon kalınlıklarından bağımsız olarak kolon kalınlıklarının yaklaşık eşit şekilde artması özellikle düşük kolon kalınlıklı numuneler için oldukça büyük bir fark oluşturabilmektedir [218]. Analizlerde ise tasarım üzerinden analizler yapıldığı için kolon kalınlıklarında herhangi bir değişiklik olması söz konusu değildir. Üretim sonrasında kalınlaşan kolonlar da deneylerin sonuçlarını

yükseltmektedir. Bu kalınlaşma üretim ile ilgili olduğundan dolayı tasarımdaki kolon kalınlıklarından bağımsızdır. Üretilen yapıların mikro-BT ile detaylı incelendiği araştırmada kolon kalınlıkları fark etmeksizin yük taşıyan dikey kolonlarda ortalama 200 μm artış görülmüştür [219]. Bu kalınlaşma 0,3 mm kalınlığındaki kolonlarda yaklaşık %66,7 artışa neden olurken, 0,5 mm'de yaklaşık %40, 0,7 mm'de ise yaklaşık %28,6 artışa neden olmaktadır. Bu durum da düşük kolon kalınlıklarında deneysel sonuçların oldukça yükselmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.41. Kübik birim hücre yapısına sahip basma deneyi numunesinin tasarım (a ve d), mikro-BT (b ve e), makro (c) ve SEM (f) görüntüleri

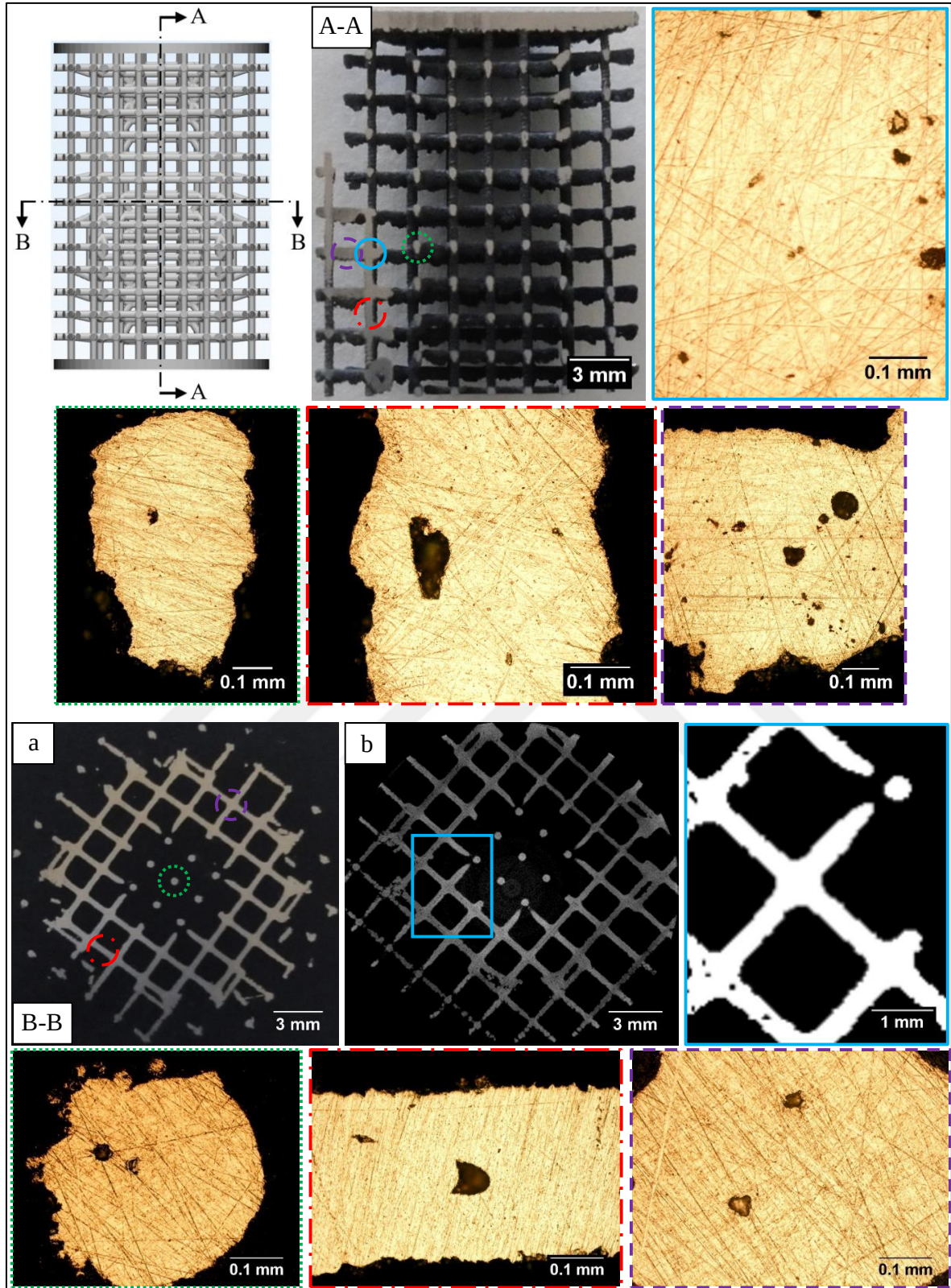


Şekil 4.42. bK5 numunesinin tasarım ve mikro-BT taramadan elde edilen üç boyutlu modelinin üst üste getirilmiş görüntüsü

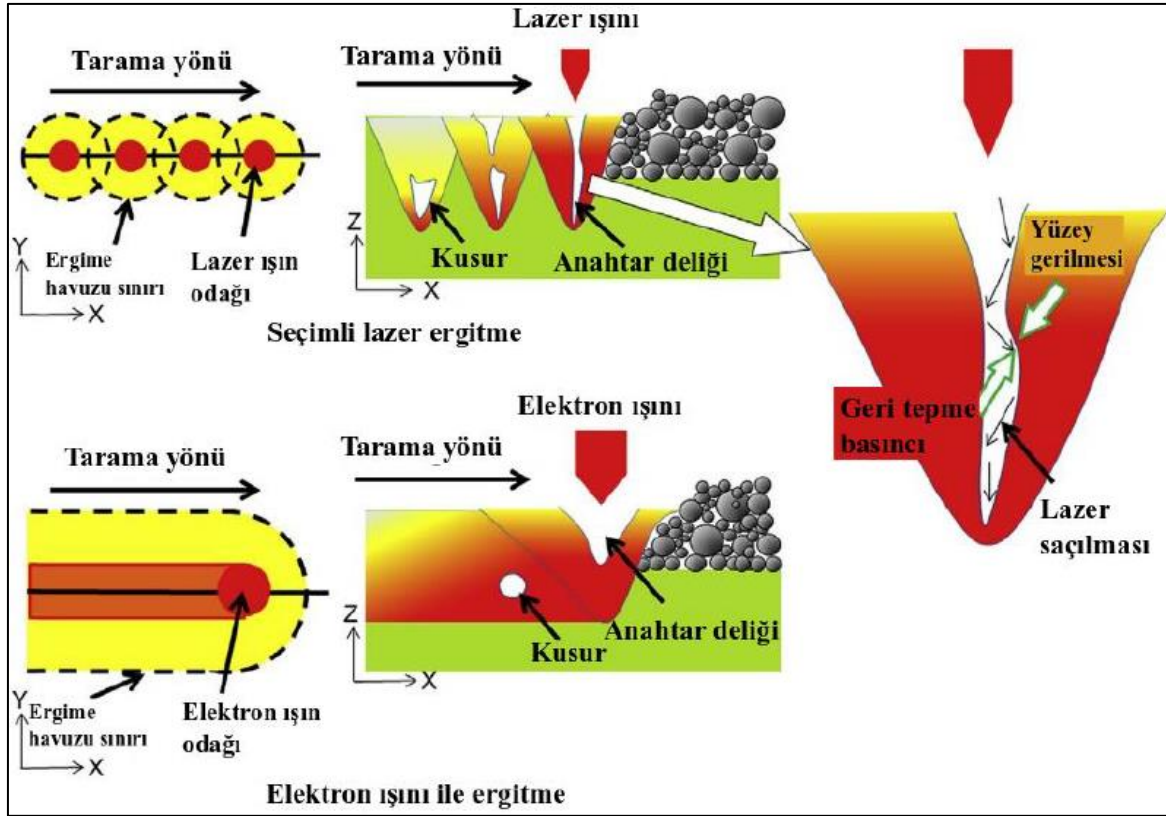
Farklılıkların oluşmasının bir diğer nedeni ise üretilen numunelerin kolonlarının içindeki kapalı gözeneklerin varlığıdır. Kolon içlerinde oluşan bu üretim hataları yapının mekanik özelliklerinin zayıflamasına neden olmaktadır. Kolon içlerinde oluşan üretim hataları deney sonuçlarının düşük çıkmasına neden olmakla birlikte bu etki kolon kalınlığına bağlı olarak da değişmektedir. Leary ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yatayla yaptığı açı sıfırdan doksana kadar onar derece açıyla değişen ve kolon kalınlıkları 0,1 ile 1 mm arasında 0,1 mm artışla değişen kolonların kolon içi gözenek oranlarını incelemişlerdir [129]. Mikro-BT sonuçlarına göre kolon kalınlığı arttıkça gözenek sayısının da arttığını bildirmişlerdir. Yapılan çalışmada 0,3 mm, 0,5 mm ve 0,7 mm kalınlıktaki kolonlarda sırasıyla %0,96, %1,14 ve %1,30 oranında gözeneklilik olduğu sonucuna varmışlardır. Bir başka çalışmada ise, kolon kalınlığı yüksek olan numunenin kolon için bağıl yoğunluğu %90,6 olarak bulunurken daha düşük kolon kalınlığında ise bu oran %99,5 olarak bulunmuştur [158]. Bunun nedenini küçük kolon kalınlıklarında üretim esnasında daha kısa oluşan lazer tarama vektör uzunluklarına bağlamışlardır. Tarama alanı küçüldükçe daha kısa tarama vektör uzunlukları oluşmaktadır. Bu nedenle, bitişik izler birbiri ardına daha hızlı taranır, aralarında çok az soğuma süresi kalır ve böylece taranan alanda daha yüksek sıcaklıklara neden olur. Sonuç olarak, daha küçük kolon kalınlığına sahip gözenekli yapılarda daha yoğun kolonlar oluşturmak için daha iyi ısılatma koşullarının mevcut olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuçlar SLE ile üretimde kolon kalınlığı arttıkça kolon içi gözenekliliğin yüzdesel olarak arttığını göstermektedir. Gözenekliliğin artışı ise yüksek kolon kalınlıklarında deney sonuçlarının daha çok etkileneceği ve analiz sonuçlarından daha düşük sonuçlar vereceği anlamına

gelmektedir. Bu durum Çizelge 4.9’da kolon kalınlığı yükseldikçe sapmanın artmasını açıklamaktadır.

Numuneler, söz konusu üretim hatalarının net bir şekilde görülebilmesi için tel erozyon yöntemi ile Şekil 4.43’te gösterilen kesitlerden kesilmiş ve mikroskop altında incelenmiştir. Farklı kesitlerden bakılması sayesinde hem yataydaki hem de düşeydeki kolonların iç yapısına bakılabilmektedir. Kolonların gerek düğüm noktalarından gerekse tek kolonlardan görüntüler alınmıştır. Bu görüntülere göre hem yatay kolonlarda hem dikey kolonlarda hem de kolonların birleşim yerlerinde gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.43’te A-A kesitinde kırmızı ile işaretlenen kolonda V şeklinde oluşan kusurlar lazer saçılması ve geri tepme basıncı nedeniyle oluşmaktadır (Şekil 4.44) [191, 220]. Ayrıca üretim esnasında tozların eşit serilememesi, yetersiz birleşme, tamamlanmamış toz ergimesi, lazer taraması esnasında sıkışan gaz baloncukları veya ergiyik havuzunda metalin türbülanslı akışı nedeniyle de hatalar oluşabilmektedir [57, 83, 221]. A-A kesitinde bakıldığında dikey kolonlarda SEM görüntülerinde de görülen sarkmalar görülebilmektedir. Bu kesitten alınan yeşil kesik çizgi ile işaretlenmiş tek bir kolonun kesit görüntüsünde, kolonun silindirik olarak tasarlanmış olmasına rağmen kolondaki sarkmadan dolayı silindirik şeklini kaybettiği görülmektedir. Bu kesitte görülen kolonların içlerinde en büyüğü 135 μm , en küçüğü ise 5 μm boyutunda gözenekler bulunmaktadır. B-B kesitinde (a) ile gösterilen numunenin mikroskop görüntüsü, (b) ile gösterilen ise mikro-BT’den alınan bir görüntüdür. Mikro-BT görüntüsünde işaretli bölge yakından incelendiğinde mikroskop görüntülerine benzer şekilde kolon içlerindeki gözenekler görülebilmektedir. Bu kesitinde oluşan gözeneklerin büyüklüğü 33 μm ile 68 μm arasında değişmektedir. Tüm bu kusurlar tamamen önlenemez değildir ve pek çok araştırma bu tür kusurlardan kaçınmak için işlem değişkenlerini en iyileştirmeye yönelik devam etmektedir [57]. Üretim esnasında oluşan bu kusurlar deney sonuçları ile analiz sonuçları arasındaki sapmaların oluşmasındaki nedenlerden biri olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.43. Tel erozyon ile kesilmiş numunenin farklı kesitlerindeki kolonlarının mikroskop görüntüleri ile mikro-BT görüntüsü (b)

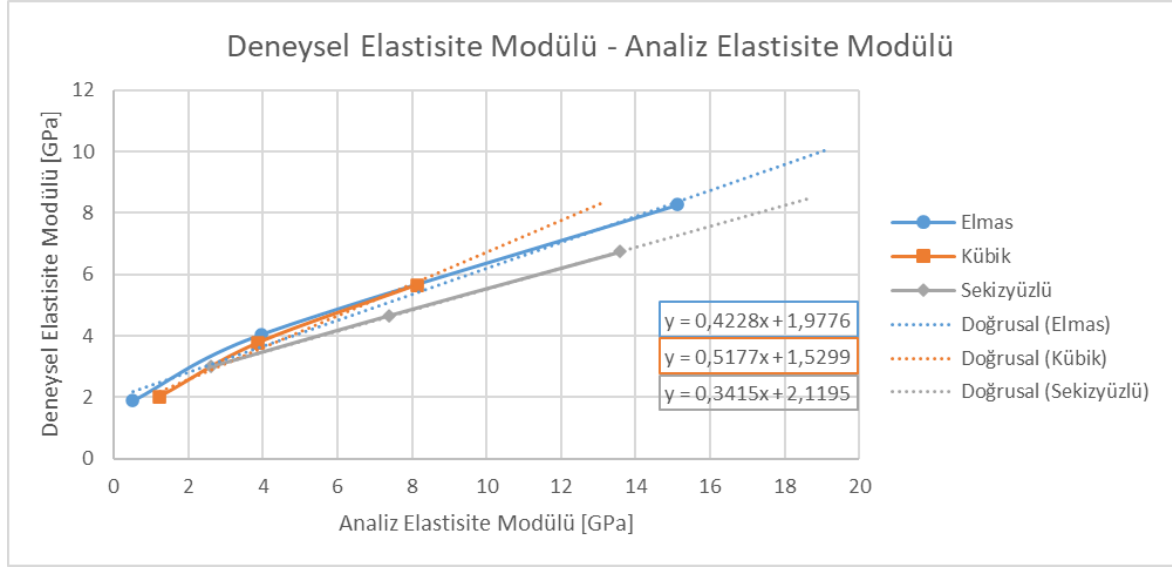


Şekil 4.44. Üretim sürecinde oluşan kolon içi kusurlar [191]

Gerek iç yapıdaki hatalar gerekse kolonların kalınlaşması göz önüne alındığında deney sonuçlarının analiz sonuçlarıyla uyuşmaması olağandır. Üretim hataları analiz ile deney sonucunda elde edilen elastisite modülleri arasında sapmaların oluşmasına neden olmaktadır [222]. Sonuçlarda sapmalara neden olan bu hatalardan biri olan sarkmalar ve kolon kalınlaşmalarının etkisini analizlerde giderebilmek için kübik yapıya sahip numunelerin (bK5-bK7) mikro-BT görüntülerinden oluşturulan üç boyutlu modeller (Şekil 4.41b) üzerinden deneme amaçlı analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda elastisite modülleri deneydekenden ortalama %93 (%87-%99) oranında yüksek çıktığı görülmüştür. Mikro-BT'den oluşturulan modellerin avantajı üretimde oluşan sarkmaların ve kolon kalınlaşmalarının bu modellerde de olduğu gibi yansıtılmış olmasıdır. Analiz ile deneysel sonuçlarda sapmaya neden olabilecek ikinci üretim hatası ise kolon içi gözeneklerdir. Ancak bu modellerde kolon içi gözenekler bulunmamaktadır. Analiz sonuçlarının yüksek çıkması mikroskop görüntülerinde görünen gözeneklerin mekanik özellikleri etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle mikro-BT'den oluşturulan modellerin analiz sonuçlarının deney sonuçlarından yüksek çıktığı söylenebilir. Mekanik özelliklere etkisi kolon kalınlığına bağlı olarak değişen kolon kalınlaşmaları bu analizlerde hesaba katıldığı için analiz ile deney arasında tek fark kolon içi gözenekler olmuştur. Bu durum analizlerin bütün kolon

kalınlıkları için deneysel sonuçlardan yüksek çıkacağı anlamına gelmektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde deney sonuçlarından birbirine yakın oranlarda yüksek sonuç verdiği görülmüştür (%87-%99 artış). Kolon içi kapalı gözenekler dışında diğer üretim hatalarından arındırılmış modellerin analizlerin birbirine yakın sonuçlar vermesi modellemenin doğruluğu açısından da önemli bir göstergedir.

Sonlu elemanlar analizinde, numunelerin üretim mikro-BT ile taradıktan sonra elde edilen iki boyutlu görüntüleri işleyerek üç boyutlu modeller oluşturulup o modelleri analiz etmek gibi zaman alan ve maliyetli bir yol, bir makine elemanı veya bir parça geliştirilirken sıklıkla başvurulmuş bir yöntem olmamaktadır. Zaman ve maliyetten tasarruf edilen yol tasarım üzerinden analiz yapılarak üretim yapılmadan önce üretilecek parça hakkında fikir sahibi olunabilecek sonuçlara ulaşabilmektir. Tasarımlar üzerinden yapılan analiz sonuçlarıyla ise deneysel elastisite modülü arasında %3 ile %101 arasında değişen sapmalar oluşmuştur. Literatürde analiz ile deneysel elastisite modülü arasında kimi çalışmada %52 dolayında [182], kimi çalışmada %117 [202], kimi çalışmada %200'leri aşan [174], kimi çalışmada %141 ile %296 arasında [223], kimi çalışmada ise %304'e varan [160] sapmalar oluşmaktadır. Analiz ve deneysel elastisite modülü arasındaki sapmalar kolon kalınlığına bağlı olarak değişebilmekte ve sapmalar %600'e kadar çıkabilmektedir [224]. Yakın zamanda trabeküler yapının aynı malzeme ile aynı SLE cihazında üretildiği bir çalışmada da benzer şekilde yüksek oranlarda sapmaların olduğu görülmüştür [191]. Araştırmacılar her değişik yapı için ayrı olan düzeltme faktörü ile bu farkı belirli seviyelere getirmektedirler [83, 160, 191, 225]. Böylece analiz sonuçlarından deney sonuçları daha doğru kestirilebilmektedir. Şekil 4.45 incelendiğinde deneysel elastisite modülü ile analiz elastisite modülü arasında doğrusallık olduğu görülmektedir. Bu doğrusallıktan yola çıkarak analiz ile deneysel elastisite modülü arasında bir bağlantı kurulabilmektedir. Böylece numunenin deney sonucunda elde edilecek elastisite modülü analiz sonucundan kestirilebilir hale gelmiş olacaktır.



Şekil 4.45. Analiz ile deneysel elastisite modülü arasındaki ilişki

Denklemler elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapıları için sırasıyla Eş.4.100, Eş.4.101 ve Eş.4.102’de verilmiştir. Burada E' analiz sonucunda elde edilen elastisite modülü E ise deneysel elastisite modülünü vermektedir.

$$E_{bE} = 0,4228E'_{bE} + 1,9776 \quad (4.100)$$

$$E_{bK} = 0,5177E'_{bK} + 1,5299 \quad (4.101)$$

$$E_{bS} = 0,3415E'_{bS} + 2,1195 \quad (4.102)$$

Bu eşitlikler yardımıyla, yapılan analizler sonucunda bulunan elastisite modülü denklemlerde E' yerine yazılarak gerçekte deney numunesinin elastisite modülünün kaç çıkacağı çok daha yakın bir tahminle bulunabilmektedir. Eşitlikler kullanılarak bulunan analiz sonuçları ile deneysel elastisite modülü arasında sapmalar oldukça düşük çıkmıştır (Çizelge 4.10). Daha önceki farkların %101’e kadar çıktığı düşünüldüğünde denklemler sayesinde sonuçların oldukça başarılı olarak kestirilebileceği söylenebilir. Literatürde de %20’nin altında çıkan sapmalarda oluşturulan model çözümlerinin tutarlı olduğu kabul edilmiştir [191, 222].

Çizelge 4.10. Basma deneyi ile denklemlerden elde edilen sonlu elemanlar analizi elastisite modülleri ve arasındaki sapma.

Numune	Elastisite Modülü [GPa]		Sapma [%]
	Deney	Analiz	
bE3	1,88±0,13	2,19	16
bE5	4,05±0,23	3,65	-10
bE7	8,28±0,60	8,37	1
bK3	2,02±0,13	2,16	7
bK5	3,77±0,22	3,53	-6
bK7	5,65±0,38	5,74	2
bS3	2,99±0,18	3,00	0
bS5	4,66±0,31	4,64	-1
bS7	6,75±0,28	6,76	0

4.2.3. Tasarım girdilerinden elastisite modülünün kestirimi

Eklemeli imalat ile üretilen gözenekli yapıların hacimsel boşluk oranları ile elastisite modülleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak üzere tasarımlardan ve deneylerden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir. Üretilen numunelerin tasarım, Arşimet, kuru tartım ve matematiksel model yöntemleriyle hesaplanan hacimsel boşluk oranları ile numunelerin basma deneyi sonucunda elde edilen elastisite modülleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur. Bu ilişkiler altlıklı ve altlıksız tasarımlar olmak üzere iki başlık altında sunulmuştur. İlgi alanı yalnızca gözenekli yapıdan oluşan altlıksız tasarımlar olduğundan altlıklı tasarımlar başlığı altında sonuçlar özet olarak verilmiş tartışma ise altlıksız tasarım başlığı altında yapılmıştır.

Altlıklı tasarımlar

Eklemeli imalat kısıtlamaları nedeniyle ve basma testinin daha doğru sonuçlar verebilmesi adına numuneler altlıklı olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Çizelge 4.11’de elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin basma testi sonucu elde edilen elastisite modülleri ile altlıklı tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları vermiştir.

Çizelge 4.11. Numunelerin basma elastisite modülleri ile altlıklı tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları

Numune	Elastisite Modülü [GPa]	Hacimsel Boşluk [%]		
		Tasarım	Arşimet	Kuru Tartım
bE3	1,88±0,13	84,26	73,30	73,73
bE5	4,05±0,23	69,48	59,09	59,48
bE7	8,28±0,60	51,72	43,19	43,30
bK3	2,02±0,13	89,54	84,42	84,31
bK5	3,77±0,22	82,62	74,09	76,32
bK7	5,65±0,38	73,60	65,84	67,21
bS3	2,99±0,18	84,84	77,55	77,91
bS5	4,66±0,31	75,58	66,21	68,89
bS7	6,75±0,28	65,91	58,46	59,30

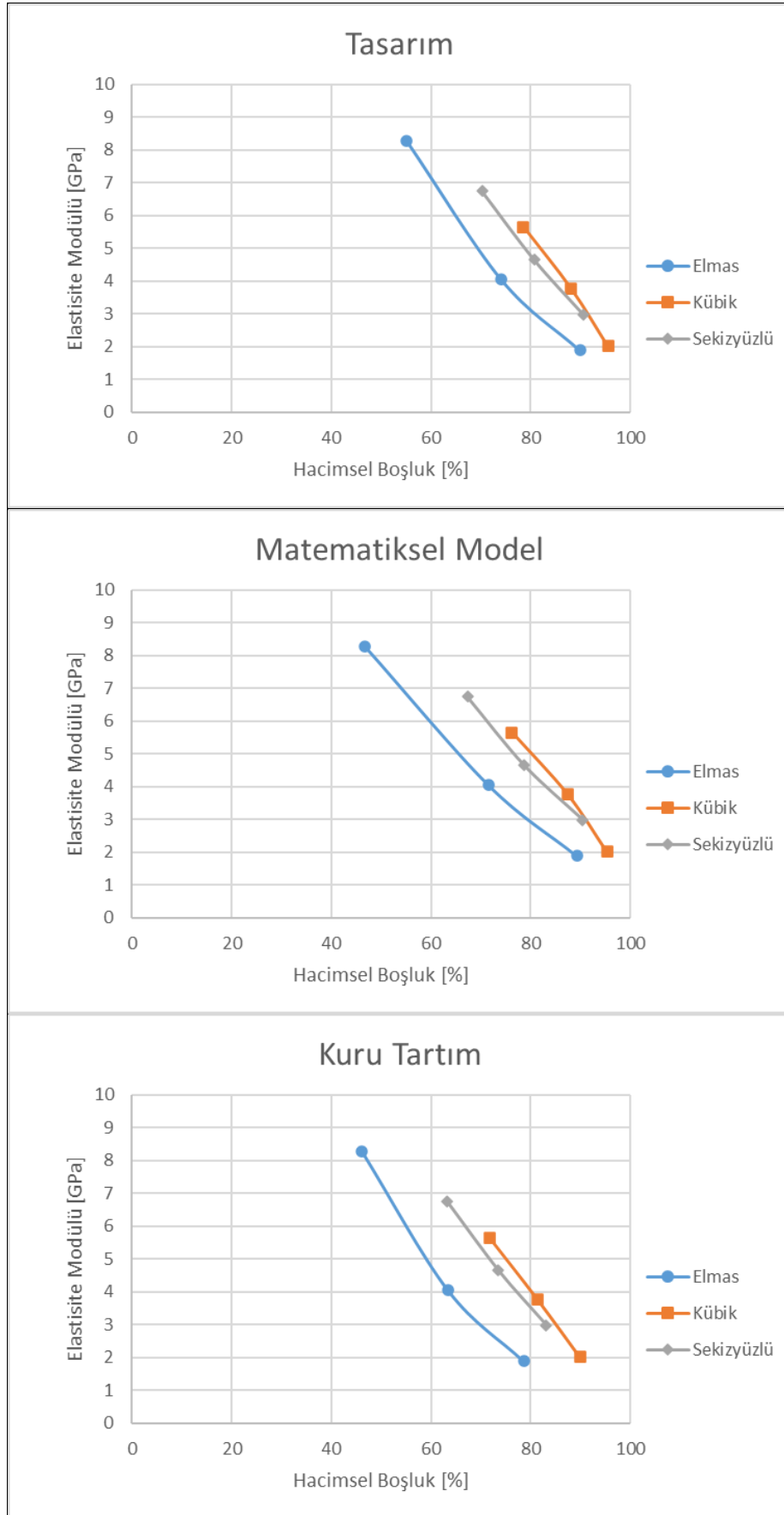
Altlıksız tasarımlar

Numuneler daha önce bahsedilen nedenlerden ötürü altlıklı olarak üretilmişlerdir. Ancak önemli olan altlıksız olarak yalnızca gözenekli yapının hacimsel boşluk oranlarıdır. Altlıksız hacimsel boşluk oranları üç farklı yöntemle bulunmuştur. Birincisi, altlıksız tasarım yapılarak program üzerinden hesaplanan teorik hacimsel boşluk oranıdır. İkincisi, birim hücredeki hacimsel boşluktan yola çıkarak tasarımın hacimsel boşluk değerinin hesaplanabilmesini sağlayan matematiksel modellerden elde edilen hacimsel boşluk oranıdır. Üçüncüsü ise, altlıklı numunelerin kuru tartım ağırlıklarından altlıkların ağırlıklarını çıkararak hesaplanan hacimsel boşluk oranıdır. İlk iki yöntem teorik olarak hacimsel boşluk oranlarını verirken, son yöntem ise deneysel olup üretilen numunenin hacimsel boşluk oranını vermektedir.

Çizelge 4.12’de elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin basma testi sonucu elde edilen elastisite modülleri ile tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları vermiştir. Şekil 4.46’da ise bu sonuçlar grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Numunelerin basma elastisite modülleri ile altlıksız tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları

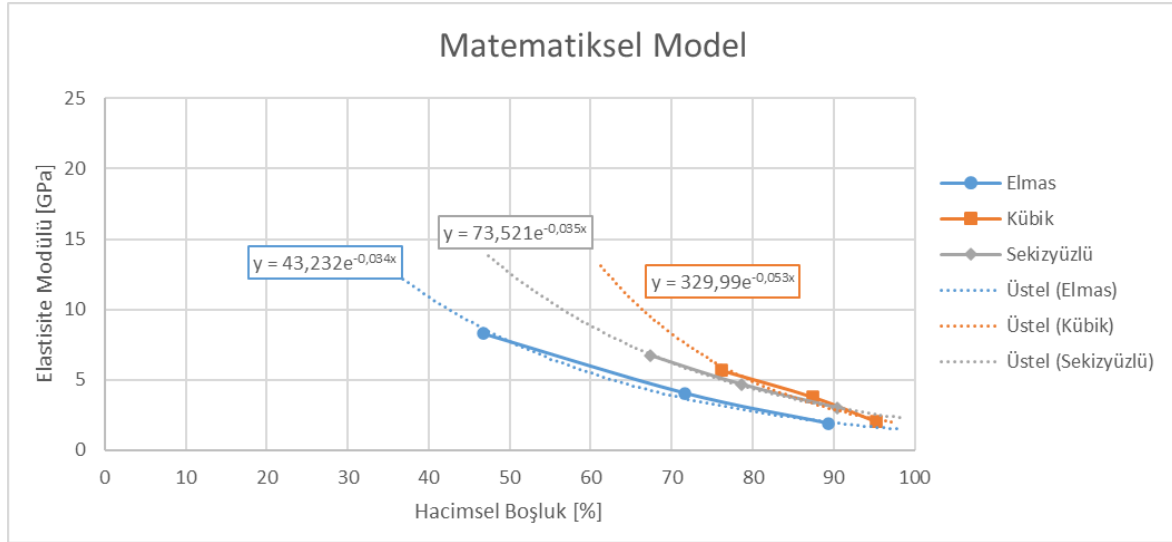
Numune	Elastisite Modülü [GPa]	Hacimsel Boşluk [%]		
		Tasarım	Matematiksel Model	Kuru Tartım
bE3	1,88±0,13	89,89	89,31	78,65
bE5	4,05±0,23	74,12	71,58	63,45
bE7	8,28±0,60	55,17	46,79	46,19
bK3	2,02±0,13	95,51	95,31	89,93
bK5	3,77±0,22	88,13	87,42	81,41
bK7	5,65±0,38	78,51	76,21	71,69
bS3	2,99±0,18	90,50	90,40	83,10
bS5	4,66±0,31	80,69	78,67	73,48
bS7	6,75±0,28	70,31	67,34	63,25



Şekil 4.46. Numunelerin altlıksız hacimsel boşluk oranlarına bağlı basma elastisite modülleri

Şekil 4.46 incelendiğinde aynı hacimsel boşluk oranı için elmas numunenin en düşük elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. Aynı hacimsel boşluk oranında kübik yapı sekizyüzlü yapıdan daha yüksek olmakla birlikte birbirlerine çok yakın sonuç vermişlerdir. Diğer açıdan bakıldığında ise aynı elastisite modülüne sahip yapılar arasında en yüksek hacimsel boşluk oranına sahip yapı kübik, en düşük yapı ise elmas olmuştur. Daha önce değinildiği üzere gerek elastisite modülü gerekse hacimsel boşluk oranı implantların uyumu açısından oldukça önemlidir. Her iki değişken de kişiden kişiye değişebilmektedir. Dolayısıyla ayrı durumlarda ayrı yapılar kullanılması gerekebilmektedir. Yüksek hacimsel boşluk oranında yüksek elastisite modülü istendiğinde kübik ya da sekizyüzlü yapı kullanılabilir. Yüksek hacimsel boşlukta daha düşük elastisite veya yüksek elastisite modülünde daha düşük hacimsel boşluk istenildiği durumlarda ise elmas birim hücre yapısı tercih edilebilir. Eğilme baskın elmas yapının gerilme baskın kübik ve sekizyüzlü yapılardan ayrışmasının nedeni kırılma davranışlarıyla ilgilidir. Gerilme baskın yapılar eğilme baskın yapılara göre ağırlık açısından verimli [226] ve aynı hacimsel boşluk oranlarında daha yüksek dayanıma sahiptir [206, 227–229]. Kübik ve sekizyüzlü numunelerin gerek yapısal olarak birbirlerine benzemesi gerekse hasar davranışlarının benzer olması birbirlerine yakın sonuç vermelerine neden olmuştur.

Basma numunelerinin hacimsel boşluk oranları içten dışa doğru gidildikçe artmaktadır. Ancak yapının içten dışa veya dıştan içe artan hacimsel boşlukta olması gerilme-gerinim davranışını değiştirmemekte ve elastisite modülünü %1'den daha az etkilemektedir [75]. Bulunan sonuçların bu çalışma kapsamında yapılan tasarım ile sınırlı kalmaması adına sonuçların genelleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Şekil 4.47'de elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı elastisite modüllerini veren eğilim çizgileri ve bu çizgilerin denklemleri verilmiştir.



Şekil 4.47. Numunelerin matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı basma elastisite modüllerini veren eğilim çizgileri ve denklemleri

Eğilim çizgilerinden elde edilen denklemlere göre, sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip değişken gözenekli numunelerin matematiksel modelden hesaplanan hacimsel boşluğa bağlı elastisite modülleri;

$$E_{bE} = 43,232e^{-0,034(\%HB'_{bE})} \quad (4.103)$$

$$E_{bK} = 329,99e^{-0,053(\%HB'_{bK})} \quad (4.104)$$

$$E_{bS} = 73,521e^{-0,035(\%HB'_{bS})} \quad (4.105)$$

olarak bulunur. Burada E ilgili birim hücre yapısı için basma elastisite modülünü, $\%HB$ o birim hücre yapısından oluşturulan gözenekli yapının hacimsel boşluk oranını, ' ise geçişli yapı olduğunu ifade etmektedir. Sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli basma deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modelleri hatırlamak gerekirse;

$$\begin{aligned} \%HB'_{bE} = & \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{a_1^3} (a_1 \sqrt{3} - 0,72 d_1) \right] \right. \\ & + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{a_2^3} (a_2 \sqrt{3} - 0,72 d_2) \right] \\ & \left. + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{a_3^3} (a_3 \sqrt{3} - 0,72 d_3) \right] \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} \%HB'_{bK} = & \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{4a_1^3} (3a_1 - d_1) \right] + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{4a_2^3} (3a_2 - d_2) \right] \right. \\ & \left. + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{4a_3^3} (3a_3 - d_3) \right] \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} \%HB'_{bS} = & \left\{ 0,11 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_1)^2}{4a_1^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_1}{4a_1^2} (2a_1 + d_1) \right]}{60} \right] \right\} \right. \\ & + 0,33 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_2)^2}{4a_2^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_2}{4a_2^2} (2a_2 + d_2) \right]}{60} \right] \right\} \\ & \left. + 0,56 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_3)^2}{4a_3^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_3}{4a_3^2} (2a_3 + d_3) \right]}{60} \right] \right\} \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli numunelerin hacimsel boşluk oranlarını veren Eş. 4.26, Eş. 4.27 ve Eş. 4.28 eşitlikleri, Eş. 4.103, Eş. 4.104 ve Eş. 4.105 eşitliklerinde yerine koyulursa;

$$E_{bE} = 43,232e^{-3,4 \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{a_1^3} (a_1 \sqrt{3} - 0,72 d_1) \right] + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{a_2^3} (a_2 \sqrt{3} - 0,72 d_2) \right] + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{a_3^3} (a_3 \sqrt{3} - 0,72 d_3) \right] \right\}} \quad (4.106)$$

$$E_{bK} = 329,99e^{-5,3 \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{4a_1^3} (3a_1 - d_1) \right] + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{4a_2^3} (3a_2 - d_2) \right] + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{4a_3^3} (3a_3 - d_3) \right] \right\}} \quad (4.107)$$

$$E_{bS} = 73,521e^{-3,5 \left\{ 0,11 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_1)^2}{4a_1^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_1}{4a_1^2} (2a_1 + d_1) \right]}{60} \right] \right\} + 0,33 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_2)^2}{4a_2^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_2}{4a_2^2} (2a_2 + d_2) \right]}{60} \right] \right\} + 0,56 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_3)^2}{4a_3^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_3}{4a_3^2} (2a_3 + d_3) \right]}{60} \right] \right\} \right\}} \quad (4.108)$$

geçişli gözenekli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a) ve kolon kalınlıklarına (d) bağlı basma elastisite modüllerini veren matematiksel modeller çıkarılmış olur. Çıkarılan eşitlikler bu çalışmada üretilen numunelerin elastisite modüllerini veren formüllerdir. Ancak tıpkı hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modellerdeki gibi çeşitli tasarımlar için de uygun olabilecek genelleştirilmiş bir model oluşturmak oldukça önemlidir. Bu doğrultuda oluşturulan modelleri genelleştirmek için, i içten dışa geçiş sırası, n toplam geçiş sayısı ve A' ise ilgili kesit alanının toplam kesit alanına oranı olmak üzere, sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli numunelerin hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modelleri hatırlamak gerekirse;

$$\%HB'_{bE} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bE})_i \quad (4.29)$$

$$\%HB'_{bK} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bK})_i \quad (4.30)$$

$$\%HB'_{bS} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bS})_i \quad (4.31)$$

Eş. 4.29-4.31, sırasıyla Eş. 4.103-4.105'te yerine yazılırsa;

$$E_{bE} = 43,232e^{-3,4 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bE})_i} \quad (4.109)$$

$$E_{bK} = 329,99e^{-5,3 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bK})_i} \quad (4.110)$$

$$E_{bS} = 73,521e^{-3,5 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{bS})_i} \quad (4.111)$$

olarak bulunur. A toplam kesit alanı, A_i ilgili bölgenin kesit alanı, r numune yarıçapı ve r_i ilgili bölgenin yarıçapı olmak üzere Eş. 4.32-4.36 eşitliklerini hatırlamak gerekirse;

$$A'_i = \frac{A_i}{A} \quad (4.32)$$

$$A_i = \pi(r_i^2 - r_{i-1}^2) \quad (4.33)$$

$$(\%HB_{bE})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72 d_i) \quad (4.34)$$

$$(\%HB_{bK})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \quad (4.35)$$

$$(\%HB_{bS})_i = 1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \quad (4.36)$$

Eş. 4.34-4.36, sırasıyla Eş. 4.109-4.111'de yerine yazılırsa;

$$E_{bE} = 43,232e^{-3,4 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72 d_i) \right)} \quad (4.112)$$

$$E_{bK} = 329,99e^{-5,3 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \right)} \quad (4.113)$$

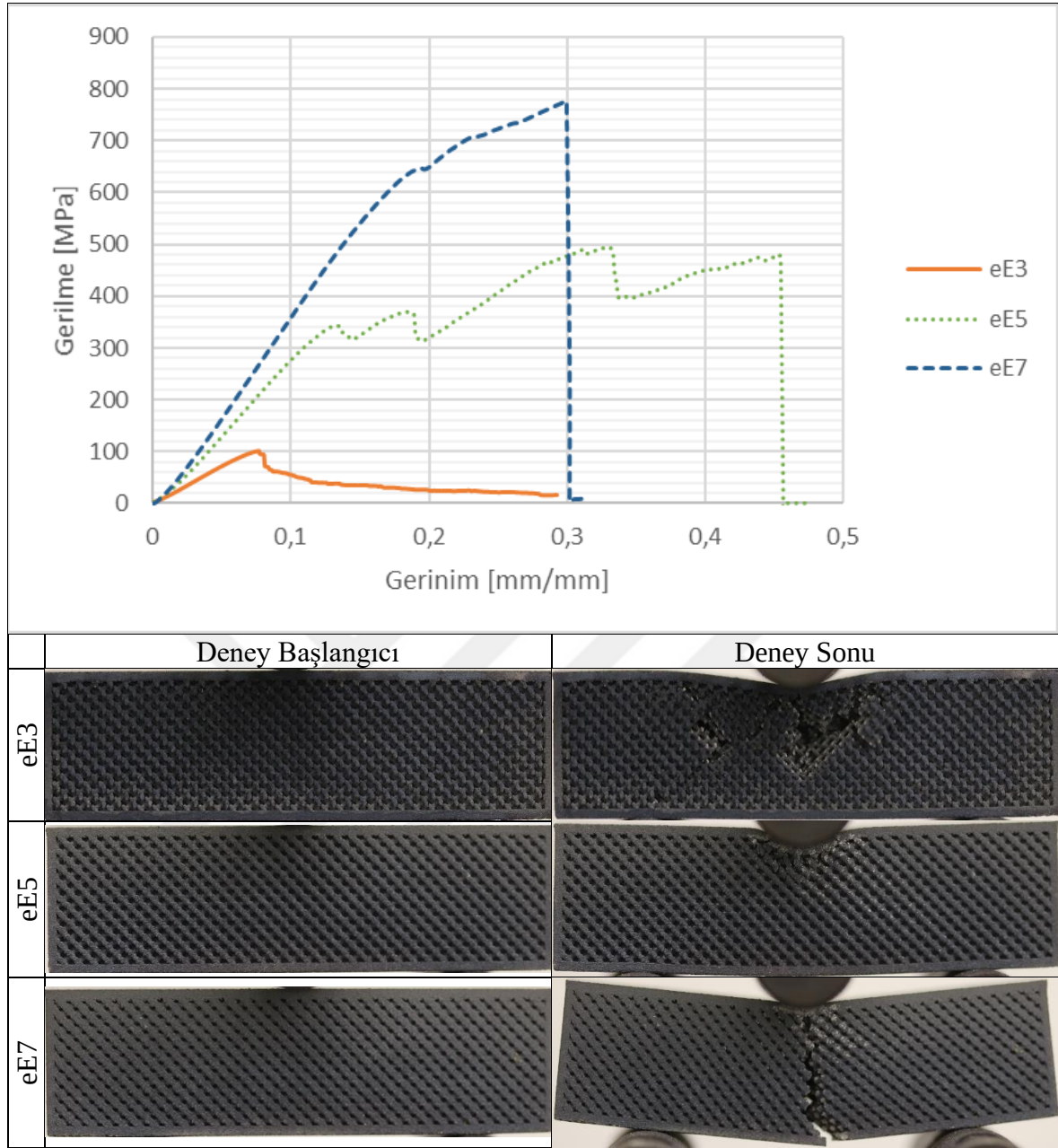
$$E_{bS} = 73,521e^{-3,5 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \right)} \quad (4.114)$$

geçişli gözenekli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a_i) ve değişken kolon kalınlıklarına (d_i) bağlı genelleştirilmiş elastisite modüllerini veren kapalı formulu matematiksel modeller çıkarılmıştır. Bu modeller sayesinde tasarımlarda geçiş sayısı (n), geçiş yarıçapı (r), kolon kalınlığı (d) ve birim hücre boyutu (a) istenildiği gibi değiştirilebilecek ve sınırsız tasarım için üretilecek numunenin elastisite

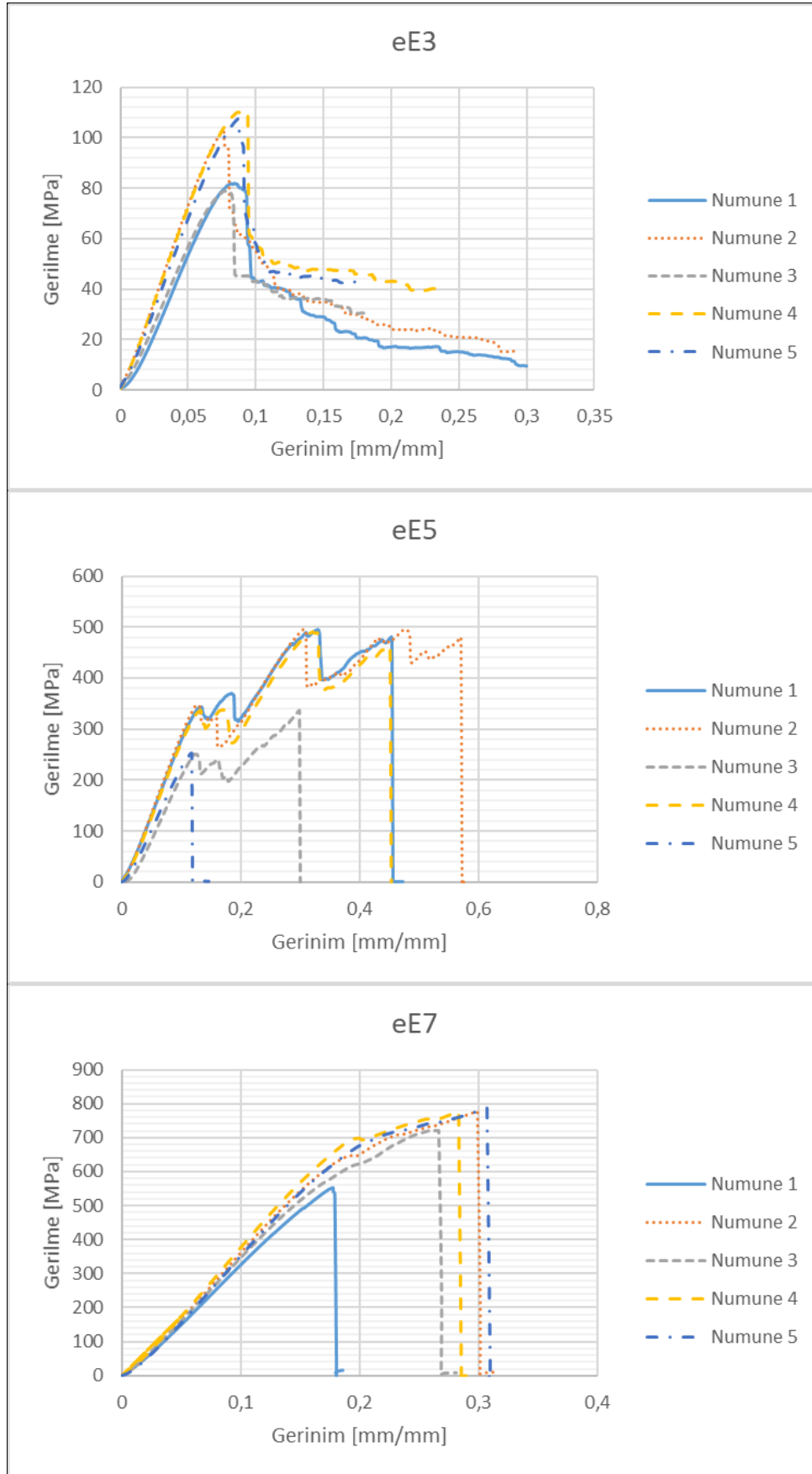
modülünün önceden belirlenebilmesi sağlanacaktır. Bu da kişiselleştirilmiş implant tasarımı için oldukça büyük bir kolaylık sağlayacaktır.

4.3. Üç Nokta Eğme Deneyi

Elmas birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen gerilme gerinim grafikleri ile deney esnasında çekilen görüntüleri Şekil 4.48’de verilmiştir. Numunelerin tekrarlı üç nokta eğme deneyi sonuçlarına ait gerilme gerinim grafikleri ise Şekil 4.49’te verilmiştir. Grafikler ve deney resimleri incelendiğinde her üç kolon kalınlıklı numune de farklı bir kırılma davranışı sergilemiştir. 0,3 mm kolon kalınlığına sahip eE3 numunelerinde elastik bölgenin sonunda ilk hasarla birlikte grafikte büyük bir düşüş yaşanmış ancak numune tamamen kırılmamıştır. İlk hasar kuvvetin geldiği üst noktadaki kolonlarda oluşmuştur. Oluşan hasar sonrasında bazı parçaların koptuğu gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda yapının dayanımı gitgide azalmıştır. Ancak numunede ilk hasardan sonra herhangi bir ani hasar oluşumu gözlemlenmemiştir. 0,7 mm kolon kalınlığına sahip eE7 numunelerinde ise elastik bölgenin sonunda kuvvetin geldiği üst noktadaki kolonlarda çok sınırlı bir hasar meydana gelmiştir. Bu numunede eE3’teki gibi kolonların kopma durumu gözlemlenmemiştir. Daha sonra numuneler katı bir numune gibi alttaki iki desteğin arasından yukarıya doğru kırılmıştır. Bu iki kolon kalınlığının ortası olan 0,5 mm kolon kalınlıklı numune de ise diğer iki numuneyle ortak olduğu noktalar bulunmaktadır. Numunelerin çoğunluğu eE3 numunelerindeki gibi ilk hasardan sonra tamamen kırılmamıştır ve eE7 numunelerinde olduğu gibi ilk hasardan sonra gerilim artmaya devam etmiştir. İlk hasar yine kuvvetin geldiği üst noktadaki kolonlarda oluşmuştur. Ancak kolonlarda kopmalar görülmediği eE3 numunelerindeki gibi grafikte düşüş yaşanmamış ve kuvvetin geldiği üst taraftaki altlık yapısı hasar görene kadar grafik yükselmeye devam etmiştir. İlerleyen aşamalarda kuvvetin geldiği desteğin çevresindeki kolonlarda kırılmalar devam etmiş ve sonunda tıpkı eE7 numunelerindeki gibi aşağıdan yukarıya doğru ani bir kırılmaya uğramıştır.

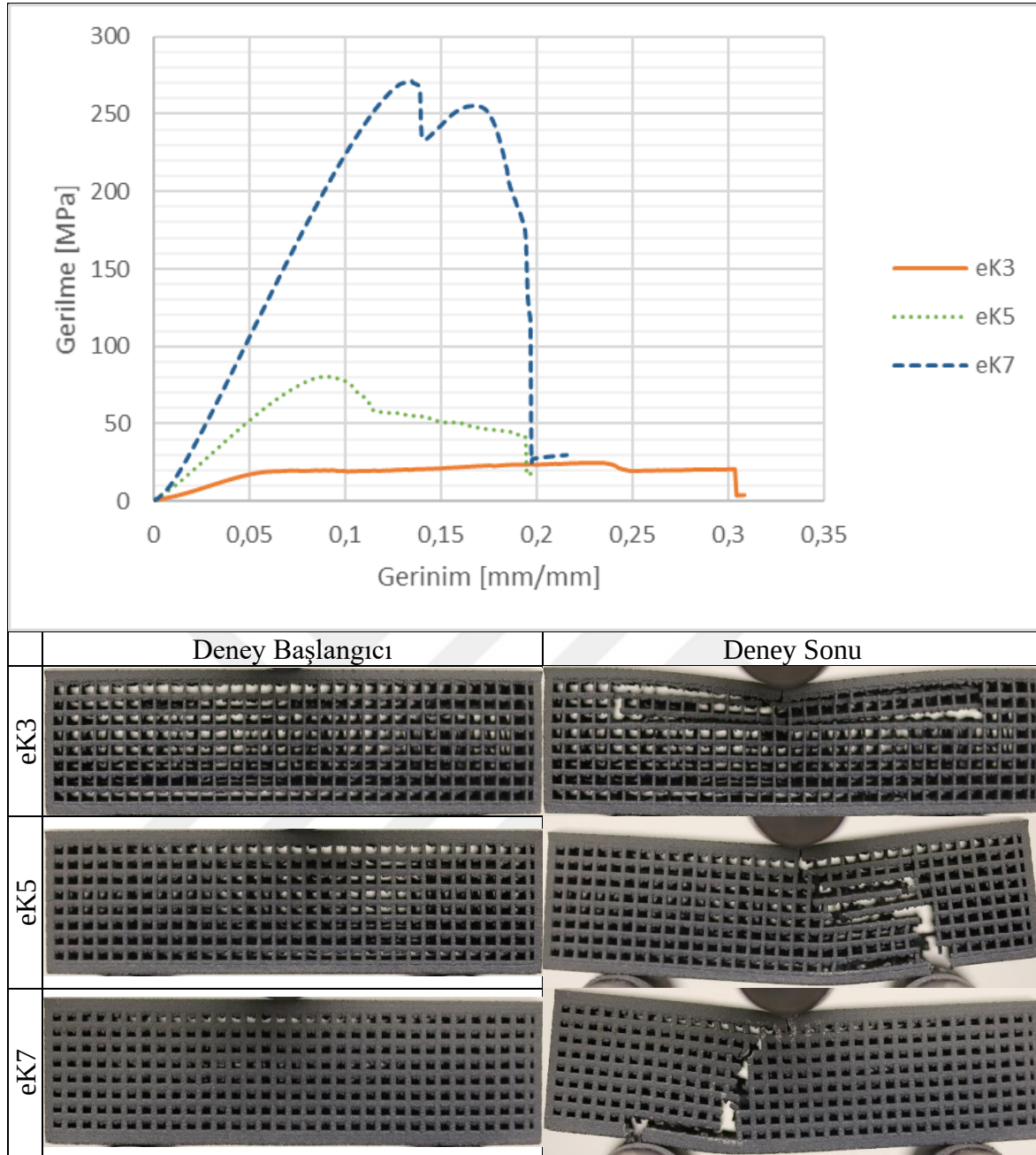


Şekil 4.48. Farklı kolon kalınlıklarındaki elmas birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri

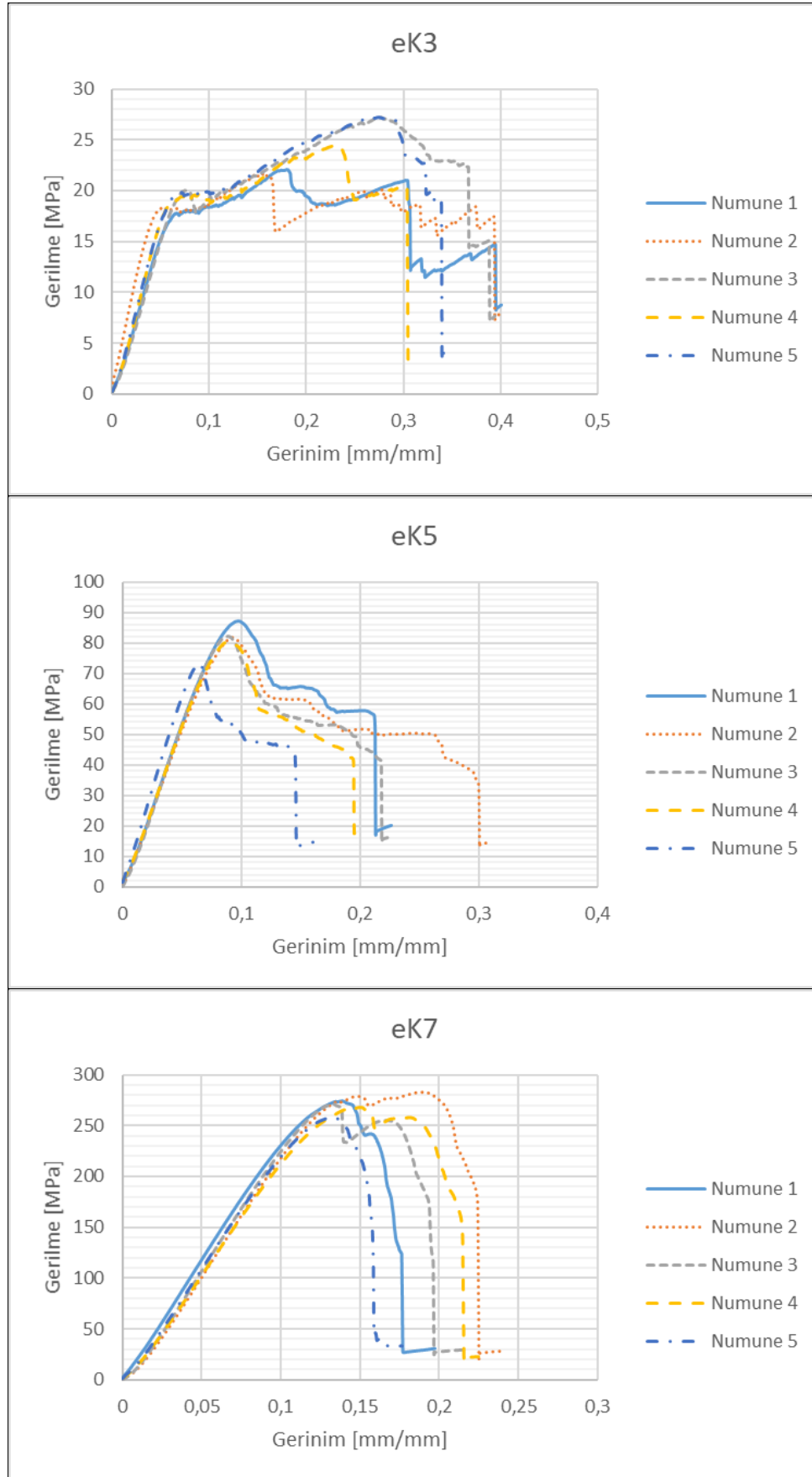


Şekil 4.49. Elmas numunelerin üç nokta eğme deneyi gerilme-gerinim grafikleri

Kübik birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen gerilme gerinim grafikleri ile deney esnasında çekilen görüntüleri Şekil 4.50’de verilmiştir. Numunelerin tekrarlı üç nokta eğme deneyi sonuçlarına ait gerilme gerinim grafikleri ise Şekil 4.51’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde her üç kolon kalınlıklı numunenin de farklı bir kırılma davranışı sergilediği söylenebilir. 0,3 mm kolon kalınlığına sahip eK3 numunelerinde doğrusal bölgenin sonunda üst bölgedeki az sayıdaki kolonlarda hasarlar meydana gelmiş ve yapı oldukça esnek bir davranış göstermiştir. Deneyin devamında parçalı kopmalar gözlemlenmese de özellikle en üst katmanlardaki kolonlarda birden fazla birim hücrenin aynı katta aynı anda kırılması şeklinde oluşan büyük çaplı hasarlar ve üstteki altlığın hasara uğraması sonucunda grafikte dalgalanmalar ve sert düşüşler meydana gelmiştir. Ancak yine de orta-alt katmanlardaki kolonlar çoğunlukla kırılmamış ve numune bütünlüğünü korumuştur. En alt katmanlardaki kolonlarda ise eğilme esnasında o bölgede oluşan çekme gerilmeleri nedeniyle kırılmalar gözlemlenmiştir. 0,5 mm kolon kalınlıklı eK5 numunelerde de ilk hasarlar üst noktaya yakın yerlerdeki kolonlarda meydana gelmiştir. İlk hasardan sonra grafik bir süre daha neredeyse yatay seyretse de bir noktadan sonra alt destek uçlarından kuvvetin geldiği uca doğru oluşan ani bir kırılma meydana gelmiştir. Bu kırılmalar yatay ve dikey kolonlardan oluşan kübik yapının kolonlarını bu doğrultularda kesecek şekilde oluşmuştur. 0,7 mm kolon kalınlığına sahip eK7 numunelerinde de ilk hasar kuvvetin geldiği üst noktalarda oluşmuştur. O bölgelerde oluşan birkaç kolon hasarından sonra eK5 numunelerine benzer şekilde alt destek noktalarından kuvvetin geldiği noktaya doğru oluşan ani bir kırılma meydana gelmiştir. Bu numunelerde de kırılmalar yatay ve dikey kolonları kesecek şekilde oluşmuştur.

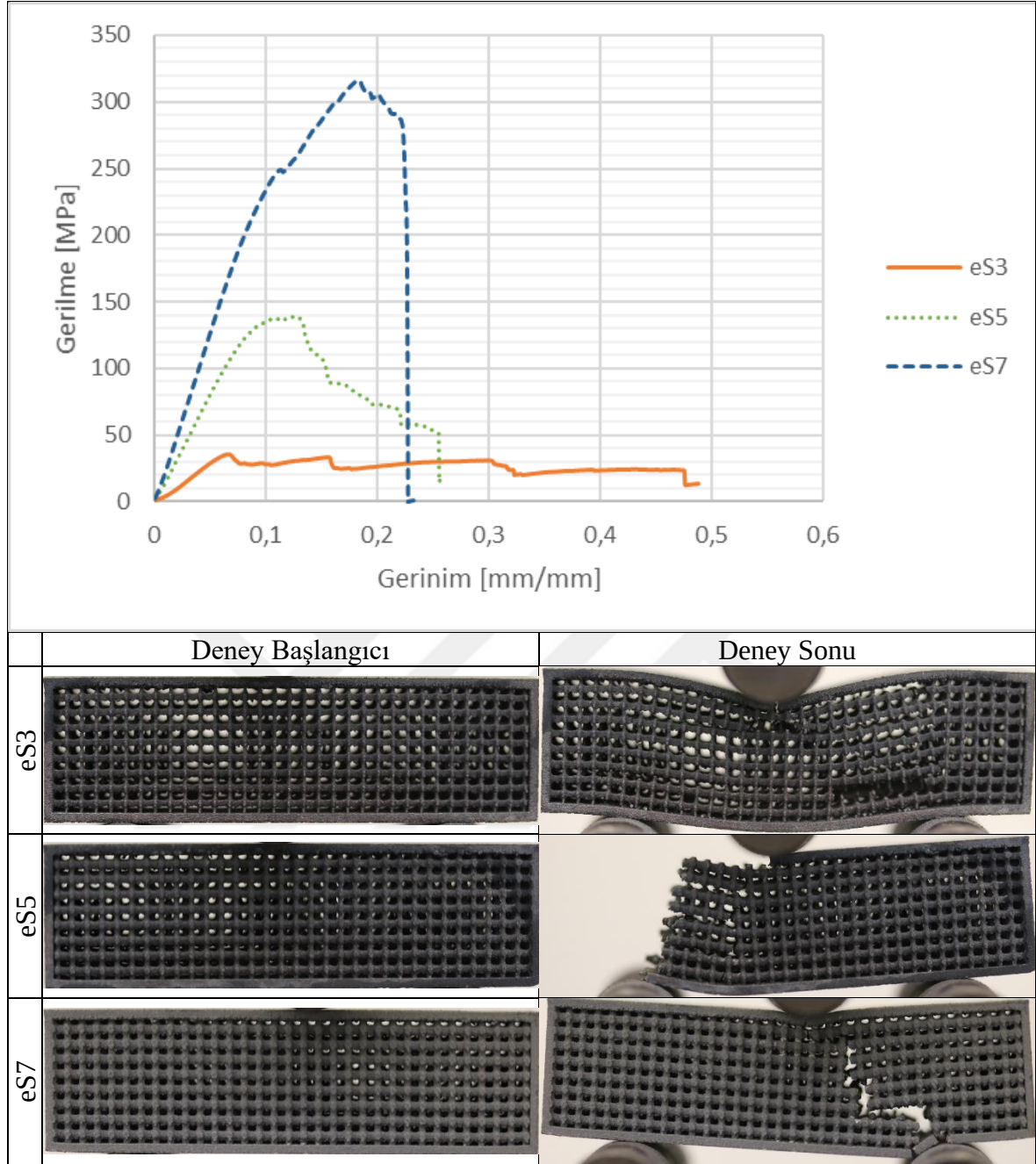


Şekil 4.50. Farklı kolon kalınlıklarındaki kübik birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri

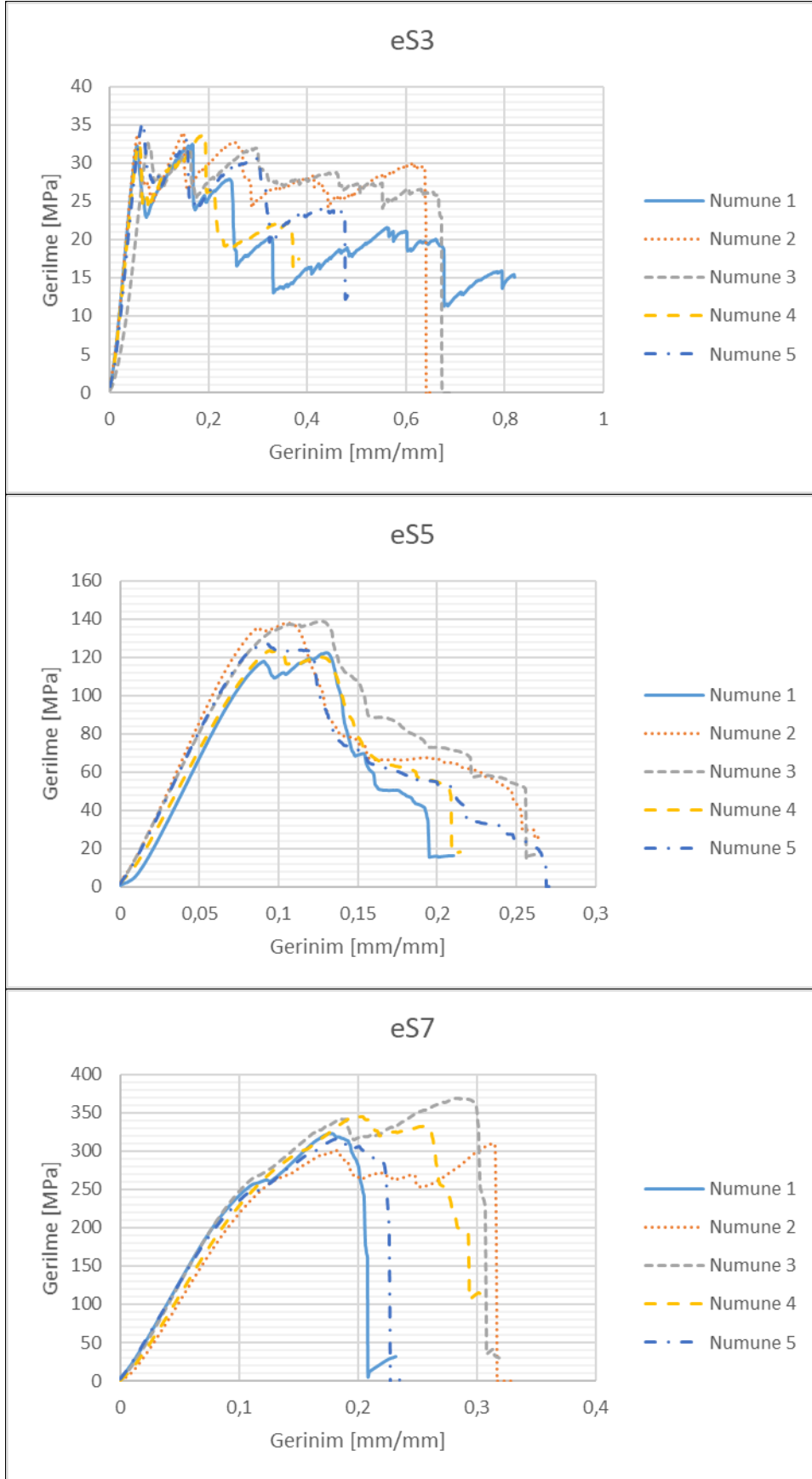


Şekil 4.51. Kübik numunelerin üç nokta eğme deneyi gerilme-gerinim grafikleri

Sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen gerilme gerinim grafikleri ile deney esnasında çekilen görüntüleri Şekil 4.52’de verilmiştir. Numunelerin tekrarlı üç nokta eğme deneyi sonuçlarına ait gerilme gerinim grafikleri ise Şekil 4.53’te verilmiştir. 0,3 mm kolon kalınlıklı eS3 numunelerinde ilk hasarlar alt ve üst noktalara yakın yerlerdeki kolonlarda meydana gelmiştir. Deneyin devamında parçalı kopmalar gözlemlenmese de özellikle en üst katmanlardaki kolonlarda birden fazla birim hücrenin aynı katta aynı anda kırılması şeklinde oluşan büyük çaplı hasarlar ve üstteki altlığın hasara uğraması sonucunda grafikte dalgalanmalar ve sert düşüşler meydana gelmiştir. En alt katmanlardaki kolonlarda ise eğilme esnasında o bölgede oluşan çekme gerilmeleri nedeniyle kırılmalar gözlemlenmiştir. Kimi numuneler ani hasar sonucu bütünlüğünü yitirirken diğer numuneler ise bütünlüğünü korumuştur. 0,5 mm kolon kalınlığına sahip eS5 numunelerinde de ilk hasarlar alt ve üst destek noktalarına yakın yerlerdeki kolonlarda meydana gelmiştir. Daha sonra bu destek noktaları arasındaki kolonlarda kırılmalar devam etmiş ve numuneler kopmuştur. Bu kırılmalar yatay ve dikey kolonlardan oluşan sekizyüzlü yapının kolonlarını bu doğrultularda kesecek şekilde oluşmuştur. 0,7 mm kolon kalınlıklı eS7 numunelerinde de tıpkı eK7 numunelerinde olduğu gibi de ilk hasar kuvvetin geldiği üst noktalarda oluşmuştur. O bölgede oluşan birkaç kolon hasarından sonra eS5 numunelerine benzer şekilde alt destek noktalarından kuvvetin geldiği noktaya doğru oluşan ani bir kırılma meydana gelmiştir. Kırılmalar eS5 numunelerine benzer şekilde yatay ve dikey kolonları kesecek şekilde oluşmuştur.



Şekil 4.52. Farklı kolon kalınlıklarındaki sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta deneyi gerilme-gerinim grafiği ve deney esnasında çekilen görüntüleri

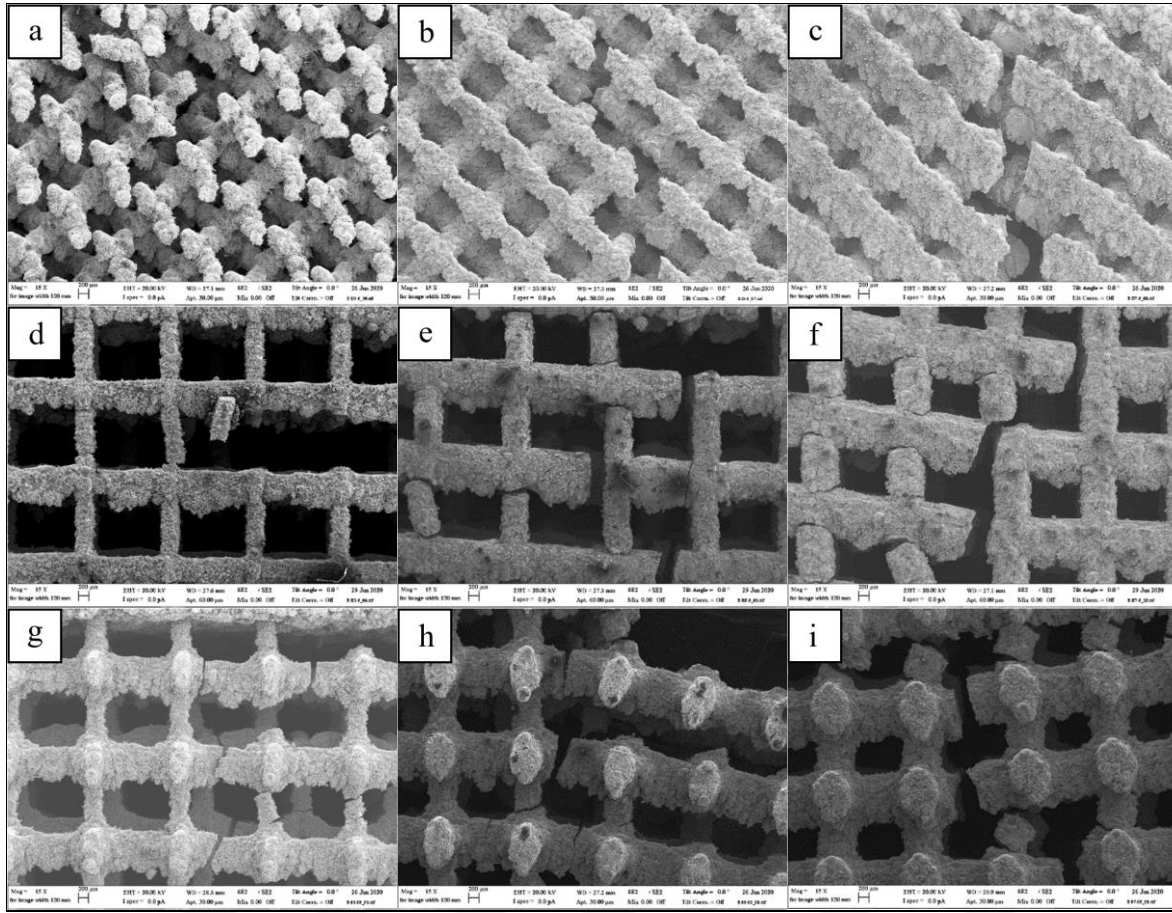


Şekil 4.53. Sekizyüzlü numunelerin üç nokta eğme deneyi gerilme-gerinim grafikleri

Kolonların yatay ve dikey olarak yöneldiği kübik ve sekizyüzlü yapıların eğme yükü altında davranışı incelendiğinde benzer davranışlar sergilediği gözlemlenmiştir. Her iki birim hücre yapısındaki numunelerde de kolonlar yatay ve dikey doğrultularda kesecek şekilde hasar almıştır. Elmas birim hücre yapısına sahip numunelerde ise kolonların açılı olması nedeniyle kırılma ilerleyişi bu kolonları kesecek şekilde açılı olarak gerçekleşmiştir. Düşük kolon kalınlık yani daha fazla hacimsel boşluğa sahip numunelerde kırılmalar genellikle yükün geldiği üst noktalarda veya alttaki destek noktaları yakın bölgelerde oluşmuş ve numunelerin çoğunluğu bütünlüğünü korumuştur. Yüksek kolon kalınlığına sahip numunelerde ise ilk hasar yine yükün geldiği üst noktada başlarken deney sonunda alttan yukarıya doğru ani kırılmalar oluşmuştur. Literatürde farklı birim hücre yapıları ve kolon kalınlıklarıyla yapılan bir çalışmada da benzer hasar davranışları görülmüştür [161, 177]. Bu davranışların kolon kalınlıkları ve birim hücre yapısının değişimiyle değişebildiği bildirilmiştir (Şekil 4.54). Düşük kolon kalınlıklarındaki numuneler daha esnek yapıya sahipken kolon kalınlığı arttıkça daha rijit davranış göstermişlerdir. Numunelerdeki ilk hasarlar genellikle üst noktalarda oluşurken özellikle daha yoğun yapılarda alt ortadan veya destek noktalarından yukarıdaki kuvvetin geldiği noktaya doğru kırılma ilerleyişi gerçekleşmiştir. Şekil 4.55'te numunelerin kırılma bölgelerinin genel SEM görüntüleri verilmiştir.

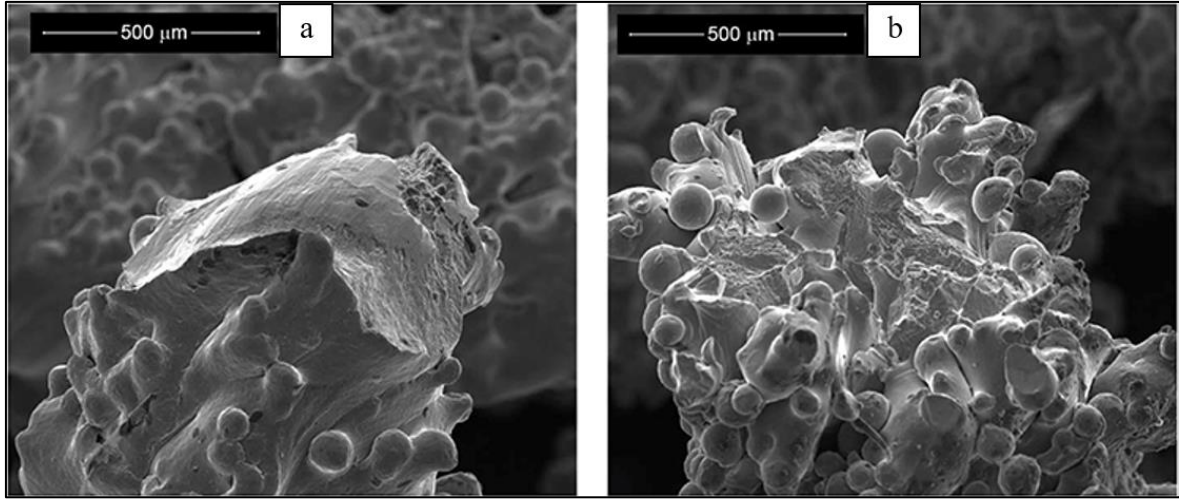


Şekil 4.54. Üç nokta eğme deneyinde numunelerin kırılma davranışları [177]

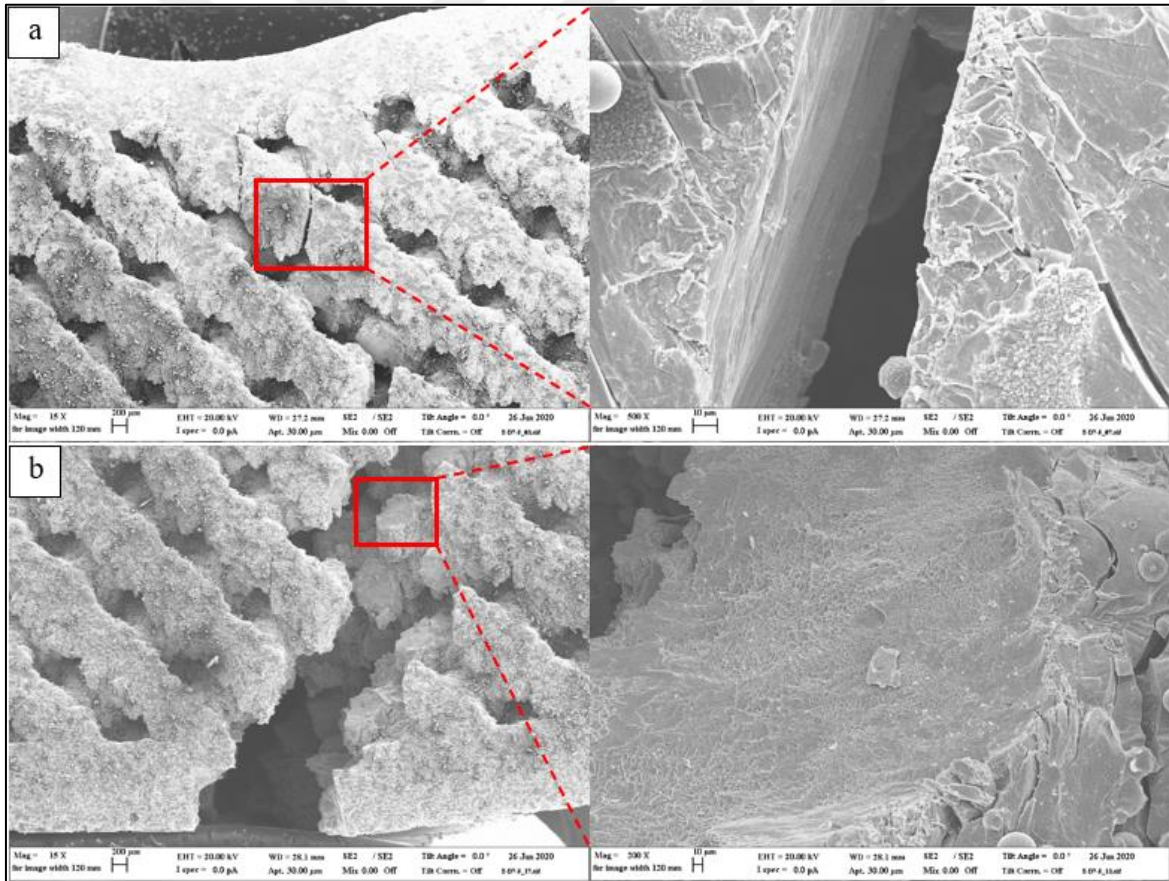


Şekil 4.55. Üç nokta eğme deneyi numunelerinin hasar bölgelerinden SEM görüntüleri a) eE3, b) eE5, c) eE7, d) eK3, e) eK5, f) eK7, g) eS3, h) eS5 ve i) eS7

Goodall ve arkadaşları gözenekli yapılar üzerine yaptıkları çalışmada üç nokta eğme deneyi sonucunda hasar noktasının tipik olarak kolonlarla düğüm noktalarının birleştiği yerlerde oluştuğunu belirtmişlerdir [175]. Hasarlı kolonları incelediklerinde ise Şekil 4.56'da gösterildiği üzere deney esnasında basma kuvvetine maruz kalan kolonların kırılma yüzeyleri ile çekme kuvvetine maruz kalan kolonların kırılma yüzeylerinin farklı olduğunu bildirmişlerdir. Bu tez kapsamında yapılan üç nokta eğme deneylerinde de her iki durum gözlemlenmiştir. Şekil 4.55'te verilen görüntülerde de görüldüğü üzere hasar genel olarak kolonlarla düğüm noktalarının birleştiği yerlerde oluşmuştur. Sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerde ise (Şekil 4.55g-i) birleşim noktalarındaki radyus benzeri yapıdan dolayı hasar bölgesi tam olarak birleşim yerinde oluşmamış ve radyusun bittiği yerlere yakın noktalarda oluşmuştur. Tarafsız eksenin üstünde basma yüküne ve altında çekme yüküne maruz kalan kolonların kırılma yüzeylerinden alınan ve Şekil 4.57'de gösterilen SEM görüntüleri de Şekil 4.56'da gösterilen literatürdeki kırılma yüzeyi görüntüleriyle uyushmaktadır.



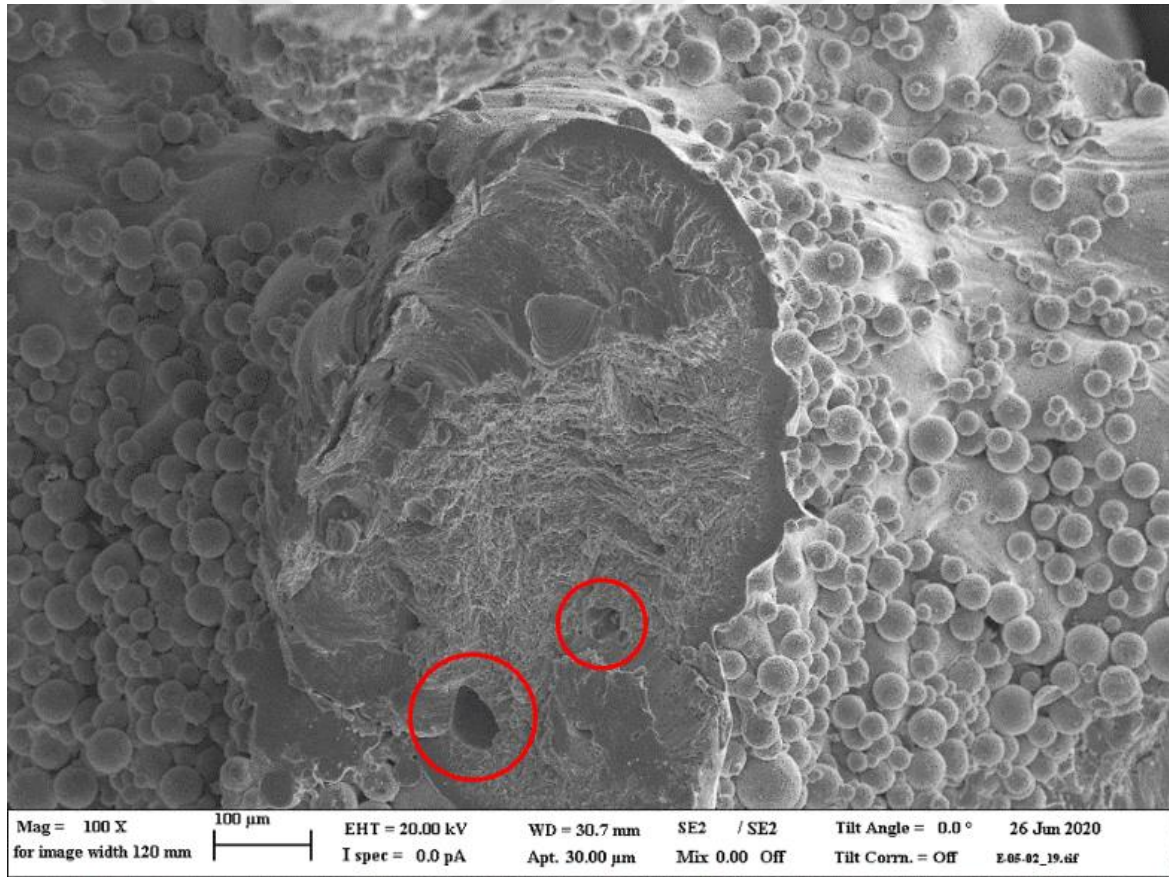
Şekil 4.56. Kolonların a) basmaya ve b) çekmeye maruz kalan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri [175]



Şekil 4.57. eE7 numunesinden alınan kolonların a) basmaya, b) çekmeye maruz kalan kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri

Üretim esnasında alttaki katı katmanın üstüne tozların eksik ergimesi olasılığı, tamamen aralıksız katı kolonların oluşmasında zorluk oluşturabilmektedir [230]. Bu durum kolonlarda çatlak benzeri hasarların oluşmasına neden olabilmektedir. Şekil 4.58’de gösterilen kolon

içindeki üretim hatalarından kaynaklanan kapalı gözenekler de aynı etkiyi doğurabilmektedir. Bunların yanında, çevre çizgisinin ve yüzeyin üretim değişkenlerinin ve tarama stratejilerinin birbirinden farklı olması nedeniyle farklı ısı girişi ve farklı eriyik havuzu şekli oluşmasından kaynaklanan kabuk etkisi denilen bir etki oluşmaktadır [175]. Bu etki 2 mm'den daha ince kolonlarda oluşabilmektedir [231]. Kabuk denilen katman yüzey sertleşmesine benzer bir etkiyle çatlakların yayılmasına daha yatkın olabilmektedir. Bütün bu etkiler kolonların sünekliğinin düşmesine neden olabilmektedir [175]. Yapı içerisindeki kolonların ayrı ayrı kırılmaları gerinmenin büyümesine neden olsa da özellikle kalın kolon kalınlığına sahip numunelerde ani hasar sonucu grafiklerde oluşan ani düşüşler de yapıların gevrek davrandığını göstermektedir [57, 163].



Şekil 4.58. Kolon içinde oluşan kapalı gözenekler

4.3.1. Tasarım girdilerinden eğme elastisite modülünün kestirimi

Eklemeli imalat ile üretilen gözenekli yapıların hacimsel boşluk oranları ile elastisite modülleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymak üzere hesaplamalardan ve deneylerden elde

edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir. Üretilen numunelerin tasarım, Arşimet, kuru tartım ve matematiksel model yöntemleriyle hesaplanan hacimsel boşluk oranları ile üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen elastisite modülleri arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur. Bu ilişkiler altlıklı ve altlıksız tasarımlar olmak üzere iki başlık altında sunulmuştur. İlgili alanı yalnızca gözenekli yapıdan oluşan altlıksız tasarımlar olduğundan altlıklı tasarımlar başlığı altında sonuçlar özet olarak verilmiş tartışma ise altlıksız tasarım başlığı altında yapılmıştır.

Altlıklı tasarımlar

Eklemeli imalat kısıtlamaları nedeniyle ve üç nokta eğme deneyinin daha doğru sonuçlar verebilmesi açısından numuneler altlıklı olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Çizelge 4.13'te elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucu elde edilen elastisite modülleri ile tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları vermiştir.

Çizelge 4.13. Numunelerin eğme elastisite modülleri ile altlıklı tasarım, Arşimet ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları

Numune	Elastisite Modülü [GPa]	Hacimsel Boşluk [%]		
		Tasarım	Arşimet	Kuru Tartım
eE3	1,41	75,59	64,63	67,50
eE5	2,80	60,87	49,47	52,46
eE7	3,82	43,62	32,07	34,92
eK3	0,38	80,15	70,29	72,61
eK5	1,15	71,82	62,04	64,48
eK7	2,42	61,92	51,07	54,03
eS3	0,66	77,91	70,24	71,84
eS5	1,68	69,61	60,52	63,72
eS7	2,66	60,09	50,98	53,73

Altlıksız tasarımlar

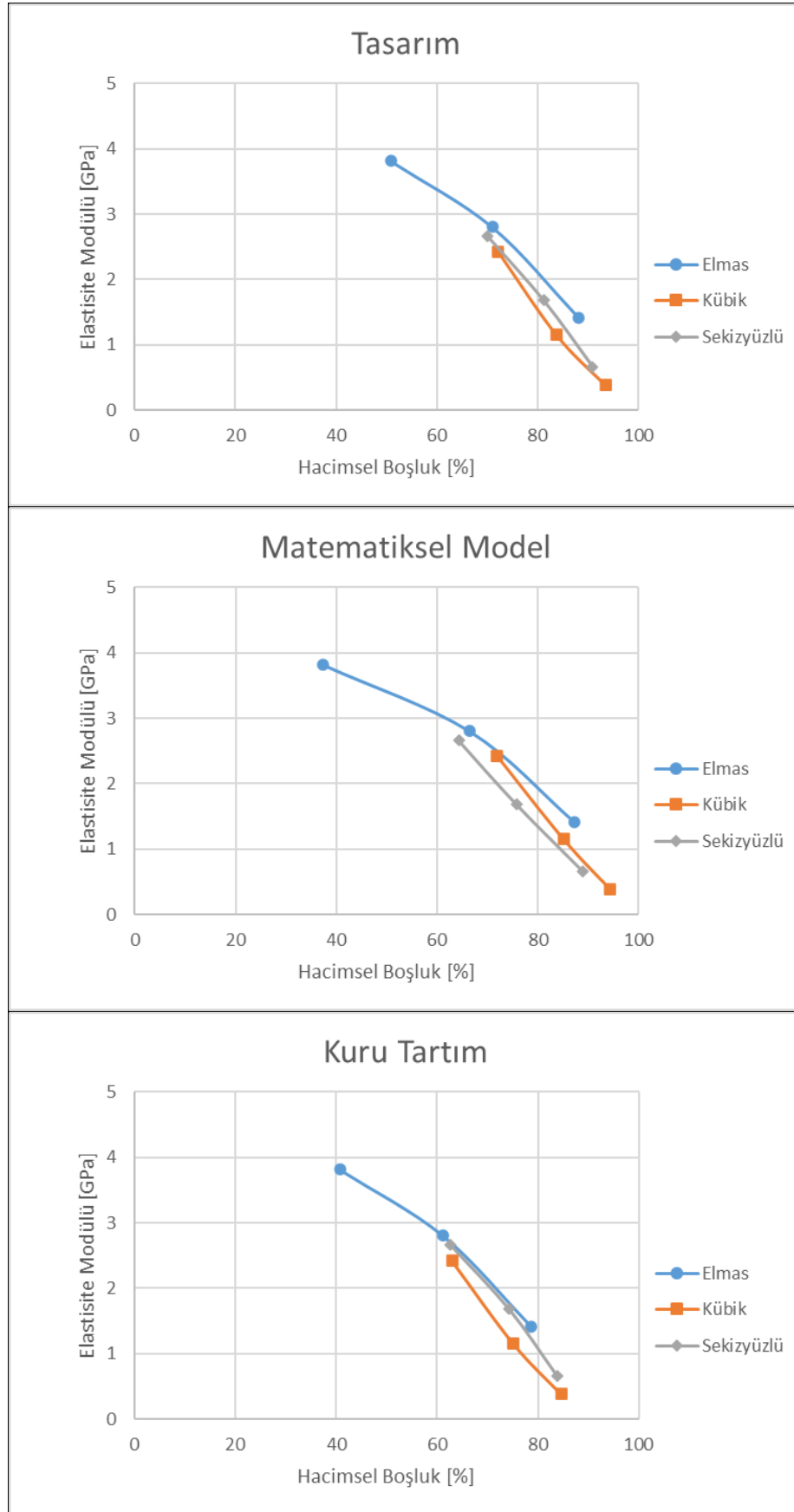
Numuneler daha önce değinildiği üzere altlıklı olarak üretilmişlerdir. Ancak önemli olan altlıksız olarak sadece gözenekli yapının hacimsel boşluk oranlarıdır. Altlıksız hacimsel

boşluk oranları üç farklı yöntemle bulunmuştur. Birincisi, altlıksız tasarım yapılarak program üzerinden hesaplanan teorik hacimsel boşluk oranıdır. İkincisi, birim hücredeki hacimsel boşluktan yola çıkarak tasarımın hacimsel boşluk değerinin hesaplanabilmesini sağlayan matematiksel modellerden elde edilen hacimsel boşluk oranıdır. Üçüncüsü ise, altlıklı numunelerin kuru tartım ağırlıklarından altlıkların ağırlıklarını çıkararak hesaplanan hacimsel boşluk oranıdır. İlk iki yöntem teorik olarak hacimsel boşluk oranlarını verirken, son yöntem ise deneysel olup üretilen numunenin hacimsel boşluk oranını vermektedir.

Çizelge 4.14'te elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucu elde edilen elastisite modülleri ile tasarımdan hesaplanan hacimsel boşluk oranları verilmiştir. Şekil 4.59'da ise bu sonuçlar grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Numunelerin eğme elastisite modülleri ile altlıksız tasarım, matematiksel model ve kuru tartım hacimsel boşluk oranları

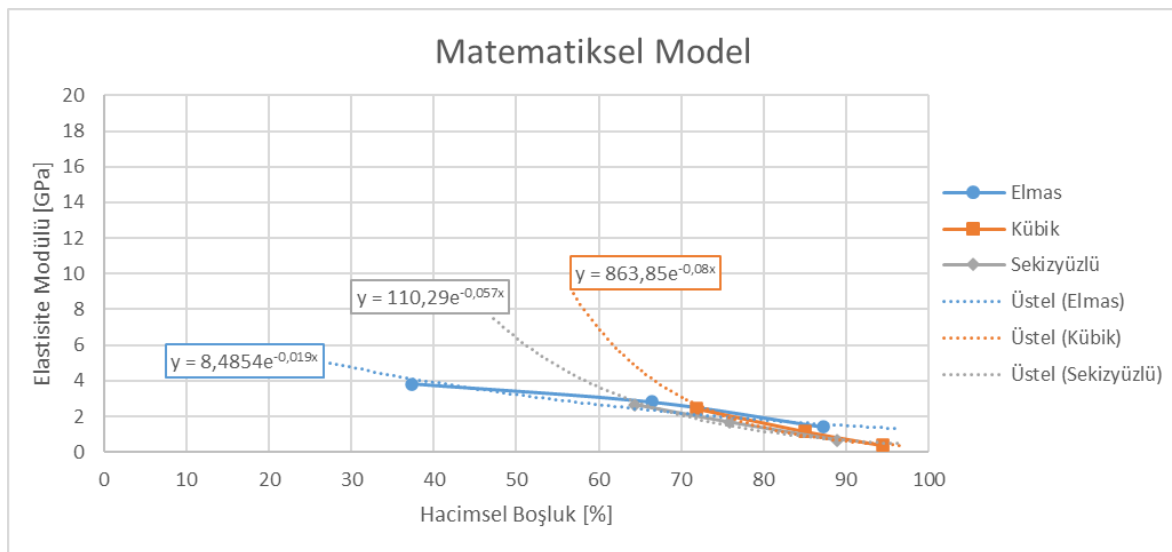
Numune	Elastisite Modülü [GPa]	Hacimsel Boşluk [%]		
		Tasarım	Matematiksel Model	Kuru Tartım
eE3	1,41	88,13	87,30	78,70
eE5	2,80	70,97	66,38	61,16
eE7	3,82	50,86	37,37	40,71
eK3	0,38	93,45	94,42	84,66
eK5	1,15	83,73	85,09	75,18
eK7	2,42	72,20	71,90	63,00
eS3	0,66	90,84	88,87	83,76
eS5	1,68	81,16	75,84	74,30
eS7	2,66	70,07	64,31	62,64



Şekil 4.59. Numunelerin altlıksız hacimsel boşluk oranlarına bağlı eğme elastisite modülleri

Şekil 4.59 incelendiğinde aynı kuru tartım hacimsel boşluk oranı için kübik numunenin en düşük eğme elastisite modülüne sahip olduğu görülmektedir. Aynı hacimsel boşluk oranında elmas yapı sekizyüzlü yapıdan daha yüksek olmakla birlikte birbirlerine çok yakın sonuç vermişlerdir. Diğer açıdan bakıldığında ise aynı elastisite modülüne sahip yapılar arasında en yüksek hacimsel boşluk oranına sahip yapı elmas en düşük yapı ise kübik olmuştur. Üç nokta eğme deneyinde numuneler üzerine gelen yüklere, elmas yapıdaki açılı kolonlar ve sekizyüzlü yapıdaki radyus benzeri birleşim noktaları kübik yapılara göre daha yüksek dayanım göstermişlerdir. Literatürde de benzer şekilde en iyileştirme sonucu oluşturulan açılı kolonlara sahip gözenekli yapıların hacim merkezli kübik yapılara göre eğme yükü altında dayanımlarının daha yüksek olduğu bildirilmiştir [163]. Dolayısıyla eğme yükü etkisi altında kalacak olan implantlarda yüksek hacimsel boşluk oranında yüksek eğme elastisite modülü istendiğinde elmas ya da sekizyüzlü yapı kullanılabilir. Aynı elastisite modülünde daha düşük hacimsel boşluk istenildiği durumlarda ise kübik birim hücre yapısı tercih edilebilir.

Tıpkı basma numunelerinde olduğu gibi verilen sonuçların bu çalışma kapsamında yapılan tasarım ile sınırlı kalmaması adına sonuçların genelleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Şekil 4.60'da elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip numunelerin matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı elastisite modüllerini veren eğilim çizgileri ve bu çizgilerin denklemleri verilmiştir.



Şekil 4.60. Numunelerin matematiksel model üzerinden hesaplanan hacimsel boşluk oranlarına bağlı eğme elastisite modüllerini veren eğilim çizgileri ve denklemleri

Eğilim çizgilerinden elde edilen denklemlere göre, sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip değişken gözenekli numunelerin matematiksel modelden hesaplanan hacimsel boşluğa bağlı elastisite modülleri;

$$E_{eE} = 8,4854e^{-0,019(\%HB'_{eE})} \quad (4.115)$$

$$E_{eK} = 863,85e^{-0,08(\%HB'_{eK})} \quad (4.116)$$

$$E_{eS} = 110,29e^{-0,057(\%HB'_{eS})} \quad (4.117)$$

olarak bulunur. Burada E ilgili birim hücre yapısı için eğme elastisite modülünü, $\%HB$ o birim hücre yapısından oluşturulan gözenekli yapının hacimsel boşluk oranını, ' ise geçişli yapı olduğunu ifade etmektedir. Sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli üç nokta eğme deneyi numunelerinin hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modelleri hatırlamak gerekirse;

$$\begin{aligned} \%HB'_{eE} = & \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{a_1^3} (a_1 \sqrt{3} - 0,72d_1) \right] \right. \\ & + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{a_2^3} (a_2 \sqrt{3} - 0,72d_2) \right] \\ & \left. + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{a_3^3} (a_3 \sqrt{3} - 0,72d_3) \right] \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned} \%HB'_{eK} = & \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{4a_1^3} (3a_1 - d_1) \right] + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{4a_2^3} (3a_2 - d_2) \right] \right. \\ & \left. + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{4a_3^3} (3a_3 - d_3) \right] \right\} 100 \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned}
\%HB'_{eS} = & \left\{ 0,11 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_1)^2}{4a_1^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_1}{4a_1^2} (2a_1 + d_1) \right]}{60} \right] \right\} \right. \\
& + 0,33 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_2)^2}{4a_2^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_2}{4a_2^2} (2a_2 + d_2) \right]}{60} \right] \right\} \\
& \left. + 0,56 \left\{ 1 - \frac{3(\pi d_3)^2}{4a_3^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_3}{4a_3^2} (2a_3 + d_3) \right]}{60} \right] \right\} \right\} 100
\end{aligned} \quad (4.48)$$

Sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli numunelerin hacimsel boşluk oranlarını veren Eş. 4.46, Eş. 4.47 ve Eş. 4.48 eşitlikleri, Eş. 4.115, Eş. 4.116 ve Eş. 4.117 eşitliklerinde yerine koyulursa;

$$E_{eE} = 8,4854e^{-1,9 \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{a_1^3} (a_1 \sqrt{3} - 0,72 d_1) \right] + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{a_2^3} (a_2 \sqrt{3} - 0,72 d_2) \right] + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{a_3^3} (a_3 \sqrt{3} - 0,72 d_3) \right] \right\}} \quad (4.118)$$

$$E_{eK} = 863,85e^{-8 \left\{ 0,11 \left[1 - \frac{\pi d_1^2}{4a_1^3} (3a_1 - d_1) \right] + 0,33 \left[1 - \frac{\pi d_2^2}{4a_2^3} (3a_2 - d_2) \right] + 0,56 \left[1 - \frac{\pi d_3^2}{4a_3^3} (3a_3 - d_3) \right] \right\}} \quad (4.119)$$

$$E_{eS} = 110,29e^{-5,7 \left\{ 0,11 \left(1 - \frac{3(\pi d_1)^2}{4a_1^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_1}{4a_1^2} (2a_1 + d_1) \right]}{60} \right] \right) + 0,33 \left(1 - \frac{3(\pi d_2)^2}{4a_2^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_2}{4a_2^2} (2a_2 + d_2) \right]}{60} \right] \right) + 0,56 \left(1 - \frac{3(\pi d_3)^2}{4a_3^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_3}{4a_3^2} (2a_3 + d_3) \right]}{60} \right] \right) \right\}} \quad (4.120)$$

geçişli gözenekli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a) ve kolon kalınlıklarına (d) bağlı eğme elastisite modüllerini veren matematiksel modeller çıkarılmış olur. Çıkarılan eşitlikler bu çalışmada üretilen numunelerin elastisite modüllerini veren formüllerdir. Ancak tıpkı hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modellerdeki gibi çeşitli tasarımlar için de uygun olabilecek genelleştirilmiş bir model oluşturmak oldukça önemlidir. Bu doğrultuda oluşturulan modelleri genelleştirmek için, i içten dışa geçiş sırası, n toplam geçiş sayısı ve A' ise ilgili kesit alanının toplam kesit alanına oranı olmak üzere, sırasıyla elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısına sahip geçişli gözenekli numunelerin hacimsel boşluk oranlarını veren matematiksel modelleri hatırlamak gerekirse;

$$\%HB'_{eE} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{eE})_i \quad (4.49)$$

$$\%HB'_{eK} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{eK})_i \quad (4.50)$$

$$\%HB'_{eS} = 100 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{eS})_i \quad (4.51)$$

Eş. 4.49-4.51, sırasıyla Eş. 4.115-4.117'de yerine yazılırsa;

$$E_{eE} = 8,4854e^{-1,9 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{eE})_i} \quad (4.121)$$

$$E_{eK} = 863,85e^{-8 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{eK})_i} \quad (4.122)$$

$$E_{eS} = 110,29e^{-5,7 \sum_{i=1}^n A'_i (\%HB_{eS})_i} \quad (4.123)$$

olarak bulunur. A toplam kesit alanı, A_i ilgili bölgenin kesit alanı, L kesitin bir kenarının uzunluğu ve L_i ilgili bölgenin bir kenar uzunluğu olmak üzere Eş. 4.52-4.56 eşitliklerini hatırlamak gerekirse;

$$A'_i = \frac{A_i}{A} \quad (4.52)$$

$$A_i = L_i^2 - L_{i-1}^2 \quad (4.53)$$

$$(\%HB_{eE})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72 d_i) \quad (4.54)$$

$$(\%HB_{eK})_i = 1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \quad (4.55)$$

$$(\%HB_{eS})_i = 1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \quad (4.56)$$

Eş. 4.54-4.56, sırasıyla Eş. 4.121-4.123'te yerine yazılırsa;

$$E_{eE} = 8,4854e^{-1,9 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{a_i^3} (a_i \sqrt{3} - 0,72 d_i) \right)} \quad (4.124)$$

$$E_{eK} = 863,85e^{-8 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{\pi d_i^2}{4a_i^3} (3a_i - d_i) \right)} \quad (4.125)$$

$$E_{eS} = 110,29e^{-5,7 \sum_{i=1}^n A'_i \left(1 - \frac{3(\pi d_i)^2}{4a_i^2} \left[1 - \frac{\text{Arccos} \left[1 - \frac{d_i}{4a_i^2} (2a_i + d_i) \right]}{60} \right] \right)} \quad (4.126)$$

geçişli gözenekli yapıda elmas, kübik ve sekizyüzlü birim hücre yapısı için değişken birim hücre boyutları (a_i) ve değişken kolon kalınlıklarına (d_i) bağlı genelleştirilmiş elastisite modüllerini veren kapalı formlu matematiksel modeller çıkarılmıştır. Bu modeller sayesinde tasarımlarda geçiş sayısı (n), geçişin bir kenar uzunluğu (L), kolon kalınlığı (d) ve birim hücre boyutu (a) istenildiği gibi değiştirilebilecek ve sınırsız tasarım için üretilecek numunenin eğme elastisite modülünün önceden belirlenebilmesi sağlanacaktır. Bu da kişiselleştirilmiş implant tasarımı için oldukça büyük bir kolaylık sağlayacaktır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üç farklı birim hücre yapısı ve üç farklı kolon kalınlığına sahip toplam dokuz işlevsel geçişli gözenekli yapının tasarımıyla eklemeli imalat arasındaki sapmaları ölçüm ve görüntüleme yöntemleriyle araştırılmış, basma ve üç nokta eğme yükü altında davranışları incelenmiş ve geçişli yapının tasarım değişkenlerinden yola çıkarak hacimsel boşluk oranı ve elastisite modülü arasında matematiksel modeller oluşturulmuştur.

Tasarım ile SLE yöntemi ile üretilen numunelerin hacimsel boşluk oranları arasında saplamalar meydana gelmiştir. Bu sapmaların oranları Arşimet ve kuru tartım yöntemleri ile belirlenmiştir. Oluşan sapmaların kolonlardaki kalınlaşmalar ve sarkmalardan dolayı olduğu mikro-BT, optik mikroskop ve SEM incelemeleri ile belirlenmiştir. İlgili ölçüm ve görüntülemeler sonucunda kolonlardaki kalınlaşmaların birim hücre yapısı, birim hücre boyutu ve kolon kalınlığından bağımsız olarak gerçekleştiği görülmüştür. Sarkmalar ise kolonların yatayla yaptığı açı arttıkça azalmıştır. Dolayısıyla sarkmaların birim hücre yapısına bağlı ancak birim hücre boyutu ve kolon kalınlığından bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır.

Numunelere uygulanan basma deneyi ile basma yükü altında hasar davranışları ve elastisite modülleri incelenmiştir. Numunelerde ilk hasar sonrasında plato evresinde dalgalı bir gerilme gerinim grafiği elde edilmiştir. Yoğunlaşma bölgesi hacimsel boşluk oranı düşük olan yüksek kolon kalınlıklı numunelerde gözlemlenmiştir. Oluşturulan gözenekli yapılar gevrek davranış göstermiştir. Yapıların kırılma davranışları birim hücre yapısına göre değişmiştir. Yapının hasar davranışında kolonların kuvvetin geldiği doğrultuyla yaptığı açılar etkili olmuştur. Açılı kolonlara sahip elmas numunelerde hasar 45° düzlemde meydana gelmiştir. Kolonları kuvvet doğrultusuyla 0° ve 90° açı yapan kübik ve sekizyüzlü yapılarda ise hasar birim hücre yapılarının katman katman çökmesi şeklinde oluşmuştur. Elmas yapı eğilme baskın, kübik ve sekizyüzlü yapı ise gerilme baskın davranış göstermiştir. Elmas numunelerin elastisite modülleri 1,88 GPa ile 8,28 GPa arasında, kübik numunelerin 2,02 GPa ile 5,65 GPa arasında ve sekizyüzlü numunelerin ise 2,99 GPa ile 6,75 GPa arasında bulunmuştur. Elastisite modülleri kolon kalınlığı arttıkça artmış hacimsel boşluk oranı arttıkça azalmıştır. Aynı hacimsel boşlukta birim hücre yapıların elastisite modülleri büyükten küçüğe doğru sırasıyla kübik, sekizyüzlü ve elmas olarak bulunmuştur. Aynı

elastisite modülünde yapıların hacimsel boşluk oranları büyükten küçüğe sırasıyla kübik, sekizyüzlü ve elmas şeklinde olmuştur. Isıl işlem elmas, kübik ve sekizyüzlü numunelerin elastisite modüllerini sırasıyla yaklaşık olarak ortalama %10, %26 ve %25 arttırmıştır.

Üç nokta eğme deneyi ile numunelerin eğme yükü altında hasar davranışları ve eğme elastisite modülleri incelenmiştir. Numunelerde kolon kalınlığına bağlı olarak hasar davranışı değişmiştir. Düşük kolon kalınlıklarında bölgesel kırılmalar oluşmuş ve yapının genelinde ani kırılmalar gözlemlenmemiştir. Yüksek kolon kalınlıklarında ise ani kırılma ile hasar oluşmuş numuneler bütünlüğünü kaybetmiştir. Bu davranış birim hücre yapısından bağımsız oluşmakla birlikte kırılmanın ilerleme yönü kolon yönelimlerine yani birim hücre yapısına bağlı olarak değişmiştir. Elmas birim hücre yapıları numunelerin eğme elastisite modülleri 1,41 GPa ile 3,82 GPa arasında, kübik yapılarda 0,38 GPa ile 2,42 GPa arasında ve sekizyüzlü numunelerde ise 0,66 GPa ile 2,66 GPa arasında bulunmuştur. Eğme elastisite modülleri kolon kalınlığı arttıkça artmış hacimsel boşluk oranı arttıkça azalmıştır. Aynı hacimsel boşlukta birim hücre yapıların eğme elastisite modülleri büyükten küçüğe doğru sırasıyla elmas, sekizyüzlü ve kübik olarak bulunmuştur. Aynı eğme elastisite modülünde yapıların hacimsel boşluk oranları büyükten küçüğe sırasıyla elmas, sekizyüzlü ve kübik şeklinde olmuştur.

Her iki deney yöntemi ve her üç birim hücre yapısı için tasarım değişkenleri olan birim hücre boyutu (a) ve kolon kalınlığına (d) bağlı hacimsel boşluk oranı ve elastisite modülü değerlerini veren matematiksel modeller oluşturulmuştur ve ileride yapılabilecek tasarımlar için genelleştirilmiş kapalı formülü modeller geliştirilmiştir. Bu genelleştirilmiş matematiksel modeller sayesinde işlevsel geçişli gözenekli yapıların tasarımında geçiş sayısı (n), geçiş yarıçapı (r), kolon kalınlığı (d) ve birim hücre boyutu (a) istenildiği gibi değiştirilebilecek ve sınırsız tasarım için üretilecek numunelerin hacimsel boşluk oranının ve elastisite modülünün önceden belirlenebilmesi sağlanmıştır. Bu da kişiselleştirilmiş implant tasarımı için oldukça büyük bir kolaylık sağlayacak ve kişiye fiziksel ve mekanik özellikler bakımından en yüksek uyumda implantların üretilmesinin önünü açacaktır. Böylece uyumsuz implantların yol açabileceği ağrılar, aseptik gevşeme gibi komplikasyonlar sonucu implantta kararsızlık ile erken revizyon, tekrarlayan ameliyatlar, ameliyat riskleri, enfeksiyon riskleri gibi olumsuzluklar en aza indirilerek daha kısa iyileşme ve rehabilitasyon süresi ile hastanın yaşam kalitesi artırılabilir.

İleride bu alanda yapılabilecek çalışmalar için öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Birim hücre yapısı içerisindeki kolonların ayrı ayrı kalınlıklarının ayarlanabilmesi ve bunların mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.
- Kolonların kalınlaşması ve yatay kolonlarda oluşan sarkmalar gibi üretim hataları lazer odak çapı, lazer gücü ve tarama stratejisi gibi üretim değişkenleri üzerinden araştırma yapılarak bu hatalar azaltılabilir.
- Birim hücre yapıları üzerinde geçirgenlik ve yüzey alanı gibi biyouyumluluğu etkileyen diğer faktörleri de kapsayacak çalışmalar yaparak, implantlarda fiziksel ve mekanik uyumun yanında biyolojik olarak da en yüksek seviyede uyumluluk sağlanabilir.
- Yüzey pürüzlülüğünü düşürmek ve yüzey kalitesini arttırmak açısından yüzeylere yapılan tozlar için asit banyosu, kolonlara zarar vermeyecek şekilde kumlama, farklı ısı işlemleri gibi ardıl işlemler yapılabilir.
- İmplantların uzun süreli kullanımları için yorulma davranışları çalışılabilir.
- Oluşturulan matematiksel modeller farklı birim hücre yapıları ve farklı yükleme şartları için de türetilerek uygulama alanı genişletilebilir.
- Farklı biyouyumlu tozlar kullanılarak üretilen numuneler üzerine benzer çalışmalar yapılarak Ti6Al4V tozundan üretilen numunelerden farkları araştırılabilir.
- Çeşitli ısı işlemleri uygulanarak yapının davranışındaki değişimler araştırılabilir.



KAYNAKLAR

1. Diegel, O., Nordin, A., and Motte, D. (2019). *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Singapore (Springer), 1-226.
2. ASTM International (2013). F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. *Rapid Manufacturing Association*, 10–12.
3. Sahasrabudhe, H., Bose, S., and Bandyopadhyay, A. (2018). Laser-Based Additive Manufacturing Processes. *Advances in Laser Materials Processing*, 507–539.
4. Pinkerton, A. J. (2016). Lasers in additive manufacturing. *Optics and Laser Technology*, 78, 25-32.
5. Hussein, A., Hao, L., Yan, C., Everson, R., and Young, P. (2013). Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(7), 1019-1026.
6. Zhang, S., Wei, Q., Cheng, L., Li, S., and Shi, Y. (2014). Effects of scan line spacing on pore characteristics and mechanical properties of porous Ti6Al4V implants fabricated by selective laser melting. *Materials and Design*, 63, 185-193.
7. Pereira, S., Vaz, A. I. F., and Vicente, L. N. (2018). On the optimal object orientation in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(5–8), 1685-1694.
8. Das, P., Chandran, R., Samant, R., and Anand, S. (2015). Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures. *Procedia Manufacturing*, 1, 343-354.
9. Sert, E., Öchsner, A., Hitzler, L., Werner, E., and Merkel, M. (2019). Additive manufacturing: A review of the influence of building orientation and post heat treatment on the mechanical properties of aluminium alloys. *Advanced Structured Materials*, 349-366.
10. Malekipour, E., Tovar, A., and El-Mounayri, H. (2018). Heat conduction and geometry topology optimization of support structure in laser-based additive manufacturing. *Mechanics of Additive and Advanced Manufacturing*, 9, 17-27.
11. Jiang, J., Xu, X., and Stringer, J. (2018). Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), 64.
12. Järvinen, J. P., Matilainen, V., Li, X., Piili, H., Salminen, A., Mäkelä, I., and Nyrhilä, O. (2014). Characterization of effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel. *Physics Procedia*, 56, 72-81.
13. Jiang, J., Xu, X., and Stringer, J. (2019). Optimisation of multi-part production in additive manufacturing for reducing support waste. *Virtual and Physical Prototyping*,

- 14(3), 219–228.
14. Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., and Wiener, S. (2017). *Design for Additive Manufacturing in Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Cham: Springer, 81-160.
 15. Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., and Wiener, S. (2017). *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Cham: Springer, 1-166.
 16. Moussaoui, K., Rubio, W., Mousseigne, M., Sultan, T., and Rezai, F. (2018). Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 735, 182-190.
 17. Liu, C., Zhang, M., and Chen, C. (2017). Effect of laser processing parameters on porosity, microstructure and mechanical properties of porous Mg-Ca alloys produced by laser additive manufacturing. *Materials Science and Engineering A*, 703, 359-371.
 18. Großmann, A., Gosmann, J., and Mittelstedt, C. (2019). Lightweight lattice structures in selective laser melting: Design, fabrication and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 766, 138356.
 19. Fayazfar, H., Salarian, M., Rogalsky, A., Sarker, D., Russo, P., Paserin, V., and Toyserkani, E. (2018). A critical review of powder-based additive manufacturing of ferrous alloys: Process parameters, microstructure and mechanical properties. *Materials and Design*, 144, 98-128.
 20. Del Re, F., Contaldi, V., Astarita, A., Palumbo, B., Squillace, A., Corrado, P., and Di Petta, P. (2018). Statistical approach for assessing the effect of powder reuse on the final quality of AlSi10Mg parts produced by laser powder bed fusion additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5–8), 2231-2240.
 21. Yakout, M., Elbestawi, M. A., and Veldhuis, S. C. (2018). A review of metal additive manufacturing technologies. *Solid State Phenomena*, 287, 1-14.
 22. Ghouse, S., Babu, S., Van Arkel, R. J., Nai, K., Hooper, P. A., and Jeffers, J. R. T. (2017). The influence of laser parameters and scanning strategies on the mechanical properties of a stochastic porous material. *Materials and Design*, 131, 498-508.
 23. Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., and Wiener, S. (2017). *Additive Manufacturing Process Chain in Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Cham: Springer, 33-43.
 24. Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y. G., Lee, J. H., and Zhang, J. (2018). Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1), 1-13.
 25. Dass, A. and Moridi, A. (2019). State of the art in directed energy deposition: From

- additive manufacturing to materials design. *Coatings*, 9(7), 418.
26. Saboori, A., Gallo, D., Biamino, S., Fino, P., and Lombardi, M. (2017). An overview of additive manufacturing of titanium components by directed energy deposition: Microstructure and mechanical properties. *Applied Sciences*, 7(9), 883.
 27. Yang, Q., Zhang, P., Cheng, L., Min, Z., Chyu, M., and To, A. C. (2016). Finite element modeling and validation of thermomechanical behavior of Ti-6Al-4V in directed energy deposition additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 12, 169-177.
 28. Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2015). *Directed Energy Deposition Processes in Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 245-268.
 29. Obikawa, T., Yoshino, M., and Shinozuka, J. (1999). Sheet steel lamination for rapid manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, 171-176.
 30. Gibson, I., Rosen, D. W., and Stucker, B. (2010). *Sheet Lamination Processes in Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 223-252.
 31. Diegel, O., Nordin, A., and Motte, D. (2019). *Additive Manufacturing Technologies in A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Singapore: Springer, 19-39.
 32. Chartrain, N. A., Williams, C. B., and Whittington, A. R. (2018). A review on fabricating tissue scaffolds using vat photopolymerization. *Acta Biomaterialia*, 74, 90-111.
 33. Lovo, J. F. P., de Camargo, I. L., Erbereli, R., Morais, M. M., and Fortulan, C. A. (2020). Vat photopolymerization additive manufacturing resins: Analysis and case study. *Materials Research*, 23(4), 20200010.
 34. Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2015). *Vat Photopolymerization Processes in Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 63-106.
 35. Ziaee, M. and Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28, 781-801.
 36. Bai, Y. and Williams, C. B. (2015). An exploration of binder jetting of copper. *Rapid Prototyping Journal*, 21(2), 177-185.
 37. Shrestha, S. and Manogharan, G. (2017). Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method. *Jom*, 69(3), 491-497.
 38. Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2015). *Binder Jetting in Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 205-218.
 39. Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., and Wiener, S. (2017). *Introduction to Additive Manufacturing in Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Cham: Springer, 1-31.

40. Gonzalez-Gutierrez, J., Cano, S., Schuschnigg, S., Kukla, C., Sapkota, J., and Holzer, C. (2018). Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives. *Materials*, 11(5), 840.
41. Goh, G. D., Yap, Y. L., Tan, H. K. J., Sing, S. L., Goh, G. L., and Yeong, W. Y. (2020). Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2), 113-133.
42. Turner, B. N. and Gold, S. A. (2015). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, 21(3), 250-261.
43. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., and Khorasani, M. (2021). *Material Extrusion in Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer, 171-201.
44. Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y., and Wei, J. (2017). Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision Engineering*, 50, 275-285.
45. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., and Khorasani, M. (2021). *Material Jetting in Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer, 203-235.
46. Groth, C., Kravitz, N. D., Jones, P. E., Graham, J. W., and Redmond, W. R. (2014). Three-dimensional printing technology. *Journal of Clinical Orthodontics*, 48(8), 475-485.
47. Zhang, Z. D., Ibadode, O., Ali, U., Dibia, C. F., Rahnama, P., Bonakdar, A., and Toyserkani, E. (2020). Topology optimization parallel-computing framework based on the inherent strain method for support structure design in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 16(4), 897-923.
48. Zeng, K., Pal, D., Teng, C., and Stucker, B. E. (2015). Evaluations of effective thermal conductivity of support structures in selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 6, 67-73.
49. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., and Khorasani, M. (2021). *Powder Bed Fusion in Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer, 125-170.
50. Moylan, S., Whintont, E., Lane, B., and Slotwinski, J. (2014). Infrared thermography for laser-based powder bed fusion additive manufacturing processes. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 1581(1), 1191-1196.
51. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., and Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials and Design*, 183, 108137.

52. Zhang, X. Y., Yan, X. C., Fang, G., and Liu, M. (2020). Biomechanical influence of structural variation strategies on functionally graded scaffolds constructed with triply periodic minimal surface. *Additive Manufacturing*, 32, 101015.
53. Kurzynowski, T., Chlebus, E., Kuźnicka, B., and Reiner, J. (2012). Parameters in selective laser melting for processing metallic powders. *High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications*, 8239, 823914.
54. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., and Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer, 1-661.
55. Deng, D., Peng, R. L., Brodin, H., and Moverare, J. (2018). Microstructure and mechanical properties of Inconel 718 produced by selective laser melting: Sample orientation dependence and effects of post heat treatments. *Materials Science and Engineering A*, 713, 294-306.
56. Ferrar, B., Mullen, L., Jones, E., Stamp, R., and Sutcliffe, C. J. (2012). Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(2), 355-364.
57. Rahman Rashid, R. A., Mallavarapu, J., Palanisamy, S., and Masood, S. H. (2017). A comparative study of flexural properties of additively manufactured aluminium lattice structures. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8597-8604.
58. Sarker, A., Tran, N., Rifai, A., Elambasseril, J., Brandt, M., Williams, R., et al. (2018). Angle defines attachment: Switching the biological response to titanium interfaces by modifying the inclination angle during selective laser melting. *Materials and Design*, 154, 326-339.
59. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., and Raymont, D. (2014). Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials and Design*, 55, 533-541.
60. Pattanayak, D. K., Fukuda, A., Matsushita, T., Takemoto, M., Fujibayashi, S., Sasaki, K., et al. (2011). Bioactive Ti metal analogous to human cancellous bone: Fabrication by selective laser melting and chemical treatments. *Acta Biomaterialia*, 7(3), 1398-1406.
61. du Plessis, A., Broeckhoven, C., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., Hands, C. H., Kunju, R., and Bhate, D. (2019). Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 408-427.
62. Van Bael, S., Kerckhofs, G., Moesen, M., Pyka, G., Schrooten, J., and 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.
63. McMillan, M., Leary, M., and Brandt, M. (2017). Computationally efficient finite difference method for metal additive manufacturing: A reduced-order DFAM tool applied to SLM. *Materials and Design*, 132, 226-243.

64. Mazur, M., Leary, M., McMillan, M., Sun, S., Shidid, D., and Brandt, M. (2017). Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM). *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*, 119-161.
65. Emmelmann, C., Herzog, D., and Kranz, J. (2017). Design for laser additive manufacturing. *Laser Additive Manufacturing, Materials, Design, Technologies, and Applications*, 259-279.
66. Fukuda, A., Takemoto, M., Saito, T., Fujibayashi, S., Neo, M., Pattanayak, D. K., Matsushita, T., Sasaki, K., Nishida, N., Kokubo, T., and Nakamura, T. (2011). Osteoinduction of porous Ti implants with a channel structure fabricated by selective laser melting. *Acta Biomaterialia*, 7(5), 2327-2336.
67. Pyka, G., Kerckhofs, G., Papantoniou, I., Speirs, M., Schrooten, J., and Wevers, M. (2013). Surface roughness and morphology customization of additive manufactured open porous Ti6Al4V structures. *Materials*, 6(10), 4737-4757.
68. Vandenbroucke, B. and Kruth, J. P. (2007). Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), 196-203.
69. Hao, L., Dadbakhsh, S., Seaman, O., and Felstead, M. (2009). Selective laser melting of a stainless steel and hydroxyapatite composite for load-bearing implant development. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(17), 5793-5801.
70. Nematollahi, M., Jahadakbar, A., Mahtabi, M. J., and Elahinia, M. (2019). Additive manufacturing (AM). *Metals for Biomedical Devices*, 331-353.
71. Harun, W. S. W., Kamariah, M. S. I. N., Muhamad, N., Ghani, S. A. C., Ahmad, F., and Mohamed, Z. (2018). A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials. *Powder Technology*, 327, 128-151.
72. Asri, R. I. M., Harun, W. S. W., Samykano, M., Lah, N. A. C., Ghani, S. A. C., Tarlochan, F., and Raza, M. R. (2017). Corrosion and surface modification on biocompatible metals: A review. *Materials Science and Engineering C*, 77, 1261-1274.
73. Taheri Andani, M., Haberland, C., Walker, J. M., Karamooz, M., Sadi Turabi, A., Saedi, S., Rahmanian, R., Karaca, H., Dean, D., Kadkhodaei, M., and Elahinia, M. (2016). Achieving biocompatible stiffness in NiTi through additive manufacturing. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(19), 2661-2671.
74. Li, Y., Lietaert, K., Li, W., Zhang, X. Y., Leeftang, M. A., Zhou, J., and Zadpoor, A. A. (2019). Corrosion fatigue behavior of additively manufactured biodegradable porous iron. *Corrosion Science*, 156, 106-116.
75. Li, Y., Jahr, H., Pavanram, P., Bobbert, F. S. L., Puggi, U., Zhang, X. Y., Pouran, B., Leeftang, M. A., Weinans, H., Zhou, J., and Zadpoor, A. A. (2019). Additively manufactured functionally graded biodegradable porous iron. *Acta Biomaterialia*, 96,

- 646-661.
76. Carluccio, D., Demir, A. G., Caprio, L., Previtali, B., Bermingham, M. J., and Dargusch, M. S. (2019). The influence of laser processing parameters on the densification and surface morphology of pure Fe and Fe-35Mn scaffolds produced by selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 40, 113-121.
 77. Wauthle, R., Van Der Stok, J., Yavari, S. A., Van Humbeeck, J., Kruth, J. P., Zadpoor, A. A., Weinans, H., Mulier, M., and Schrooten, J (2015). Additively manufactured porous tantalum implants. *Acta Biomaterialia*, 14, 217-225.
 78. Li, Y., Pavanram, P., Zhou, J., Lietaert, K., Bobbert, F. S. L., Kubo, Y., Leeftang, M. A., Jahr, H., and Zadpoor, A. A. (2020). Additively manufactured functionally graded biodegradable porous zinc. *Biomaterials Science*.
 79. Wen, P., Qin, Y., Chen, Y., Voshage, M., Jauer, L., Poprawe, R., and Schleifenbaum, J. H. (2019). Laser additive manufacturing of Zn porous scaffolds: Shielding gas flow, surface quality and densification. *Journal of Materials Science and Technology*, 35(2), 368-376.
 80. Li, Y., Zhou, J., Pavanram, P., Leeftang, M. A., Fockaert, L. I., Pouran, B., Tümer, N., Schröder, K. U., Mol, J. M. C., Weinans, H., Jahr, H., and Zadpoor, A. A. (2018). Additively manufactured biodegradable porous magnesium. *Acta Biomaterialia*, 67, 378-392.
 81. Li, Y., Jahr, H., Zhang, X. Y., Leeftang, M. A., Li, W., Pouran, B., Tichelaar, F. D., Weinans, H., Zhou, J., and Zadpoor, A. A. (2019). Biodegradation-affected fatigue behavior of additively manufactured porous magnesium. *Additive Manufacturing*, 28, 299-311.
 82. Zhang, X. Y., Fang, G., Leeftang, S., Zadpoor, A. A., and Zhou, J. (2019). Topological design, permeability and mechanical behavior of additively manufactured functionally graded porous metallic biomaterials. *Acta Biomaterialia*, 84, 437-452.
 83. Wang, S., Liu, L., Li, K., Zhu, L., Chen, J., and Hao, Y. (2019). Pore functionally graded Ti6Al4V scaffolds for bone tissue engineering application. *Materials and Design*, 168, 107643.
 84. Ataee, A., Li, Y., Fraser, D., Song, G., and Wen, C. (2018). Anisotropic Ti-6Al-4V gyroid scaffolds manufactured by electron beam melting (EBM) for bone implant applications. *Materials and Design*, 137, 345-354.
 85. Heinl, P., Müller, L., Körner, C., Singer, R. F., and Müller, F. A. (2008). Cellular Ti-6Al-4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting. *Acta Biomaterialia*, 4(5), 1536-1544.
 86. Vilardell, A. M., Takezawa, A., du Plessis, A., Takata, N., Krakhmalev, P., Kobashi, M., Yadroitsava, I., and Yadroitsev, I. (2019). Topology optimization and characterization of Ti6Al4V ELI cellular lattice structures by laser powder bed fusion

- for biomedical applications. *Materials Science and Engineering A*, 766, 138330.
87. Liang, H., Yang, Y., Xie, D., Li, L., Mao, N., Wang, C., Tian, Z., Jiang, Q., and Shen, L. (2019). Trabecular-like Ti-6Al-4V scaffolds for orthopedic: fabrication by selective laser melting and in vitro biocompatibility. *Journal of Materials Science and Technology*, 35(7), 1284-1297.
 88. Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155-162.
 89. West, J. and Kuk, G. (2016). The complementarity of openness: How MakerBot leveraged Thingiverse in 3D printing. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 169-181.
 90. Buehler, E., Branham, S., Ali, A., Chang, J. J., Hofmann, M. K., Hurst, A., and Kane, S. K. (2015). Sharing is caring: Assistive technology designs on thingiverse. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 525-534.
 91. Moilanen, J., Daly, A., Lobato, R., and Allen, D. (2015). Cultures of sharing in 3D printing: What can we learn from the licence choices of Thingiverse users? *Journal of Peer Production*, (6), 1-11.
 92. Diegel, O., Nordin, A., and Motte, D. (2019). *Introduction to Additive Manufacturing. in: A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Singapore: Springer, 1-17.
 93. Yuan, L., Ding, S., and Wen, C. (2019). Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review. *Bioactive Materials*, 4(1), 56-70.
 94. Alabort, E., Barba, D., and Reed, R. C. (2019). Design of metallic bone by additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 164, 110-114.
 95. Mullen, L., Stamp, R. C., Brooks, W. K., Jones, E., and Sutcliffe, C. J. (2009). Selective laser melting: A regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in-growth constructs, suitable for orthopedic applications. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 89(2), 325-334.
 96. Duoss, E. B., Weisgraber, T. H., Hearon, K., Zhu, C., Small IV, W., Metz, T. R., Vericella, J. J., Barth, H. D., Kuntz, J. D., Maxwell, R. S., Spadaccini, C. M., and Wilson, T. S. (2014). Three-dimensional printing of elastomeric, cellular architectures with negative stiffness. *Advanced Functional Materials*, 24(31), 4905-4913.
 97. Bici, M., Brischetto, S., Campana, F., Ferro, C. G., Secli, C., Varette, S., Maggiore, P., and Mazza, A. (2018). Development of a multifunctional panel for aerospace use through SLM additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 67, 215-220.
 98. Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., and Newkirk, J. (2017). Aerospace applications of laser additive manufacturing. *Laser Additive Manufacturing*:

- Materials, Design, Technologies, and Applications*, 351-371.
99. Najmon, J. C., Raeisi, S., and Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. *Additive manufacturing for the aerospace industry*, 7-31.
 100. Plocher, J. and Panesar, A. (2019). Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials and Design*, 183, 108164.
 101. Joshi, S. C. and Sheikh, A. A. (2015). 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4), 175-185.
 102. Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., and Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74(C), 158-167.
 103. Duda, T. and Raghavan, L. V. (2016). 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), 103-110.
 104. Mahmoud, D. and Elbestawi, M. (2017). Lattice Structures and Functionally Graded Materials Applications in Additive Manufacturing of Orthopedic Implants: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1(2), 13.
 105. Nazir, A., Abate, K. M., Kumar, A., and Jeng, J. Y. (2019). A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9-12), 3489-3510.
 106. Rashed, M. G., Ashraf, M., Mines, R. A. W., and Hazell, P. J. (2016). Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications. *Materials and Design*, 95, 518-533.
 107. Torres, Y., Pavón, J. J., and Rodríguez, J. A. (2012). Processing and characterization of porous titanium for implants by using NaCl as space holder. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(5), 1061-1069.
 108. Arifvianto, B., Leeftang, M. A., and Zhou, J. (2016). Characterization of the porous structures of the green body and sintered biomedical titanium scaffolds with micro-computed tomography. *Materials Characterization*, 121, 48-60.
 109. Łazińska, M., Durejko, T., Lipiński, S., Polkowski, W., Czujko, T., and Varin, R. A. (2015). Porous graded FeAl intermetallic foams fabricated by sintering process using NaCl space holders. *Materials Science and Engineering A*, 636, 407-414.
 110. Xiao, J., Yang, Y., Qiu, G. B., Liao, Y. L., Cui, H., and Lü, X. W. (2015). Volume change of macropores of titanium foams during sintering. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 25(11), 3834-3839.
 111. Muñoz, S., Pavón, J., Rodríguez-Ortiz, J. A., Civantos, A., Allain, J. P., and Torres, Y. (2015). On the influence of space holder in the development of porous titanium

- implants: Mechanical, computational and biological evaluation. *Materials Characterization*, 108, 68-78.
112. Kobashi, M., Miyake, S., and Kanetake, N. (2013). Hierarchical open cellular porous TiAl manufactured by space holder process. *Intermetallics*, 42, 32-34.
 113. Tian, C., Li, X., Li, H., Guo, G., Wang, L., and Rong, Y. (2019). The effect of porosity on the mechanical property of metal-bonded diamond grinding wheel fabricated by selective laser melting (SLM). *Materials Science and Engineering A*, 743, 697-706.
 114. Shen, H., Oppenheimer, S. M., Dunand, D. C., and Brinson, L. C. (2006). Numerical modeling of pore size and distribution in foamed titanium. *Mechanics of Materials*, 38(8-10), 933-944.
 115. Dunand, D. C. (2004). Processing of titanium foams. *Advanced Engineering Materials*, 6(6), 369-376.
 116. Smith, M., Guan, Z., and Cantwell, W. J. (2013). Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *International Journal of Mechanical Sciences*, 67, 28-41.
 117. Cansizoglu, O., Cormier, D., Harrysson, O., West, H., and Mahale, T. (2006). An evaluation of non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 209-219.
 118. Giannitelli, S. M., Accoto, D., Trombetta, M., and Rainer, A. (2014). Current trends in the design of scaffolds for computer-aided tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, 10(2), 580-594.
 119. Zhang, X. Y., Fang, G., and Zhou, J. (2017). Additively manufactured scaffolds for bone tissue engineering and the prediction of their mechanical behavior: A review. *Materials*, 10(1), 50.
 120. Afshar, M., Anaraki, A. P., Montazerian, H., and Kadkhodapour, J. (2016). Additive manufacturing and mechanical characterization of graded porosity scaffolds designed based on triply periodic minimal surface architectures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 62, 481-494.
 121. Huang, X., Radman, A., and Xie, Y. M. (2011). Topological design of microstructures of cellular materials for maximum bulk or shear modulus. *Computational Materials Science*, 50(6), 1861-1870.
 122. Robbins, J., Owen, S. J., Clark, B. W., and Voth, T. E. (2016). An efficient and scalable approach for generating topologically optimized cellular structures for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 12, 296-304.
 123. Radman, A., Huang, X., and Xie, Y. M. (2013). Topology optimization of functionally graded cellular materials. *Journal of Materials Science*, 48(4), 1503-1510.

124. Nguyen, D. S. and Vignat, F. (2016). *A method to generate lattice structure for Additive Manufacturing*, IEEE international conference on industrial engineering and engineering management (IEEM 2016), Bali, Indonesia.
125. Weißmann, V., Bader, R., Hansmann, H., and Laufer, N. (2016). Influence of the structural orientation on the mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V open-porous scaffolds. *Materials and Design*, 95, 188-197.
126. Zok, F. W., Latture, R. M., and Begley, M. R. (2016). Periodic truss structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 96, 184-203.
127. Zhu, F., Lu, G., Ruan, D., and Wang, Z. (2010). Plastic deformation, failure and energy absorption of sandwich structures with metallic cellular cores. *International Journal of Protective Structures*, 1(4), 507-541.
128. Zargarian, A., Esfahanian, M., Kadkhodapour, J., Ziaei-Rad, S., and Zamani, D. (2019). On the fatigue behavior of additive manufactured lattice structures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100, 225-232.
129. Leary, M., Mazur, M., Williams, H., Yang, E., Alghamdi, A., Lozanovski, B., Zhang, X., Shidid, D., Farahbod-Sternahl, Lena., Witt, G., Kelbassa, I., Choong, P., Qian, M., and Brandt, M. (2018). Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): Mechanical properties, deformation and failure modes. *Materials and Design*, 157, 179-199.
130. Ataee, A., Li, Y., Brandt, M., and Wen, C. (2018). Ultrahigh-strength titanium gyroid scaffolds manufactured by selective laser melting (SLM) for bone implant applications. *Acta Materialia*, 158, 354-368.
131. Derby, B. (2012). Printing and prototyping of tissues and scaffolds. *Science*, 338(6109), 921-926.
132. Sienkiewicz, J., Płatek, P., Jiang, F., Sun, X., and Rusinek, A. (2020). Investigations on the mechanical response of gradient lattice structures manufactured via slm. *Metals*, 10(2), 213.
133. Alomar, Z. and Concli, F. (2021). Compressive Behavior Assessment of a Newly Developed Circular Cell-based Lattice Structure. *Materials & Design*, 205, 109716.
134. Mahmoud, D., Al-Rubaie, K. S., and Elbestawi, M. A. (2021). The influence of selective laser melting defects on the fatigue properties of Ti6Al4V porosity graded gyroids for bone implants. *International Journal of Mechanical Sciences*, 193, 106180.
135. Pagani, S., Liverani, E., Giavaresi, G., De Luca, A., Belvedere, C., Fortunato, A., Leardini, A., Fini, M., Tomesani, L., and Caravaggi, P. (2021). Mechanical and in vitro biological properties of uniform and graded cobalt-chrome lattice structures in orthopedic implants. *Journal of Biomedical Materials Research: Part B - Applied Biomaterials*, 34857.

136. Li, X., Xiong, Y. Z., Zhang, H., and Gao, R. N. (2021). Development of functionally graded porous titanium/silk fibroin composite scaffold for bone repair. *Materials Letters*, 282, 128670.
137. Yang, L., Han, C., Wu, H., Hao, L., Wei, Q., Yan, C., and Shi, Y. (2020). Insights into unit cell size effect on mechanical responses and energy absorption capability of titanium graded porous structures manufactured by laser powder bed fusion. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 109, 103843.
138. Nune, K. C., Kumar, A., Misra, R. D. K., Li, S. J., Hao, Y. L., and Yang, R. (2017). Functional response of osteoblasts in functionally gradient titanium alloy mesh arrays processed by 3D additive manufacturing. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 150, 78-88.
139. Yang, N., Quan, Z., Zhang, D., and Tian, Y. (2014). Multi-morphology transition hybridization CAD design of minimal surface porous structures for use in tissue engineering. *CAD Computer Aided Design*, 56, 11-21.
140. Yang, N., Du, C., Wang, S., Yang, Y., and Zhang, C. (2016). Mathematically defined gradient porous materials. *Materials Letters*, 173, 136-140.
141. Surmeneva, M. A., Surmenev, R. A., Chudinova, E. A., Koptioug, A., Tkachev, M. S., Gorodzha, S. N., and Rännar, L. E. (2017). Fabrication of multiple-layered gradient cellular metal scaffold via electron beam melting for segmental bone reconstruction. *Materials and Design*, 133, 195-204.
142. Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D., and Hague, R. J. (2016). A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A*, 670, 264-274.
143. Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., and Wei, J. (2017). Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials and Design*, 131, 112-120.
144. Onal, E., Frith, J. E., Jurg, M., Wu, X., and Molotnikov, A. (2018). Mechanical properties and in vitro behavior of additively manufactured and functionally graded Ti6Al4V porous scaffolds. *Metals*, 8(4), 200.
145. Limmahakhun, S., Oloyede, A., Sitthiseripratip, K., Xiao, Y., and Yan, C. (2017). Stiffness and strength tailoring of cobalt chromium graded cellular structures for stress-shielding reduction. *Materials and Design*, 114, 633-641.
146. Rodrigo, C., Xu, S., Durandet, Y., and Ruan, D. (2021). Uniaxial compression of bi-directionally graded lattice structures: Finite element modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1067(1), 012107.
147. Ahmadi, S. M., Yavari, S. A., Wauthle, R., Pouran, B., Schrooten, J., Weinans, H., and Zadpoor, A. A. (2015). Additively manufactured open-cell porous biomaterials made from six different space-filling unit cells: The mechanical and morphological

- properties. *Materials*, 8(4), 1871-1896.
148. Han, C., Li, Y., Wang, Q., Wen, S., Wei, Q., Yan, C., Hao, L., Liu, J., and Shi, Y. (2018). Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 80, 119-127.
 149. Herrera, A., Yáñez, A., Martel, O., Afonso, H., and Monopoli, D. (2014). Computational study and experimental validation of porous structures fabricated by electron beam melting: A challenge to avoid stress shielding. *Materials Science and Engineering C*, 45, 89-93.
 150. Öhman, C., Baleani, M., Pani, C., Taddei, F., Alberghini, M., Viceconti, M., and Manfrini, M. (2011). Compressive behaviour of child and adult cortical bone. *Bone*, 49(4), 769-776.
 151. Pawlikowski, M., Skalski, K., Bańcerowski, J., Makuch, A., and Jankowski, K. (2017). Stress-strain characteristic of human trabecular bone based on depth sensing indentation measurements. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 37(2), 272-280.
 152. Helgason, B., Perilli, E., Schileo, E., Taddei, F., Brynjólfsson, S., and Viceconti, M. (2008). Mathematical relationships between bone density and mechanical properties: A literature review. *Clinical Biomechanics*, 23(2), 135-146.
 153. Fyhrie, D. P. and Vashishth, D. (2000). Bone stiffness predicts strength similarly for human vertebral cancellous bone in compression and for cortical bone in tension. *Bone*, 26(2), 169-173.
 154. Rho, J. Y., Tsui, T. Y., and Pharr, G. M. (1997). Elastic properties of human cortical and trabecular lamellar bone measured by nanoindentation. *Biomaterials*, 18(20), 1325-1330.
 155. Morrison, C., Macnair, R., MacDonald, C., Wykman, A., Goldie, I., and Grant, M. H. (1995). In vitro biocompatibility testing of polymers for orthopaedic implants using cultured fibroblasts and osteoblasts. *Biomaterials*, 16(13), 987-992.
 156. Zhao, S., Li, S. J., Wang, S. G., Hou, W. T., Li, Y., Zhang, L. C., Hao, Y. L., Yang, R., Misra, R. D. K., and Murr, L.E. (2018). Compressive and fatigue behavior of functionally graded Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting. *Acta Materialia*, 150, 1-15.
 157. Li, S., Zhao, S., Hou, W., Teng, C., Hao, Y., Li, Y., Yang, R., and Misra, R. D. K.. (2016). Functionally Graded Ti-6Al-4V Meshes with High Strength and Energy Absorption. *Advanced Engineering Materials*, 18(1), 34-38.
 158. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., and Raymont, D. (2012). Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 62, 32-38.

159. Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M., and Zadpoor, A. A. (2017). Analytical relationships for the mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials based on octahedral unit cells. *Applied Mathematical Modelling*, 46, 408-422.
160. Wang, L., Kang, J., Sun, C., Li, D., Cao, Y., and Jin, Z. (2017). Mapping porous microstructures to yield desired mechanical properties for application in 3D printed bone scaffolds and orthopaedic implants. *Materials and Design*, 133, 62-68.
161. Rashid, R., Masood, S. H., Ruan, D., Palanisamy, S., Huang, X., and Rahman Rashid, R. A. (2018). Topology optimisation of additively manufactured lattice beams for three-point bending test. *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication*, 635-645.
162. Seyedkanani, A., Niknam, H., and Akbarzadeh, A. H. (2020). Bending behavior of optimally graded 3D printed cellular beams. *Additive Manufacturing*, 35, 101327.
163. Daynes, S., Feih, S., Lu, W. F., and Wei, J. (2017). Optimisation of functionally graded lattice structures using isostatic lines. *Materials and Design*, 127, 215-223.
164. Li, G., Wang, L., Pan, W., Yang, F., Jiang, W., Wu, X., Kong, X., Dai, K., and Hao, Y. (2016). In vitro and in vivo study of additive manufactured porous Ti6Al4V scaffolds for repairing bone defects. *Scientific Reports*, 6(1), 1-11.
165. Zhao, D., Huang, Y., Ao, Y., Han, C., Wang, Q., Li, Y., Liu, J., Wei, Q., and Zhang, Z. (2018). Effect of pore geometry on the fatigue properties and cell affinity of porous titanium scaffolds fabricated by selective laser melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 88, 478-487.
166. Arabnejad, S., Burnett Johnston, R., Pura, J. A., Singh, B., Tanzer, M., and Pasini, D. (2016). High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints. *Acta Biomaterialia*, 30, 345-356.
167. Tsai, P. I., Hsu, C. C., Chen, S. Y., Wu, T. H., and Huang, C. C. (2016). Biomechanical investigation into the structural design of porous additive manufactured cages using numerical and experimental approaches. *Computers in Biology and Medicine*, 76, 14-23.
168. Emmelmann, C., Scheinemann, P., Munsch, M., and Seyda, V. (2011). Laser additive manufacturing of modified implant surfaces with osseointegrative characteristics. *Physics Procedia*, 12(1), 375-384.
169. Weißmann, V., Wieding, J., Hansmann, H., Laufer, N., Wolf, A., and Bader, R. (2016). Specific yielding of selective laser-melted Ti6Al4V open-porous scaffolds as a function of unit cell design and dimensions. *Metals*, 6(7), 166.
170. Nune, K. C., Kumar, A., Misra, R. D. K., Li, S. J., Hao, Y. L., and Yang, R. (2016). Osteoblast functions in functionally graded Ti-6Al-4V mesh structures. *Journal of Biomaterials Applications*, 30(8), 1182-1204.

171. Shi, J., Yang, J., Li, Z., Zhu, L., Li, L., and Wang, X. (2017). Design and fabrication of graduated porous Ti-based alloy implants for biomedical applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 1043-1048.
172. Kadirgama, K., Harun, W. S. W., Tarlochan, F., Samykano, M., Ramasamy, D., Azir, M. Z., and Mehboob, H. (2018). Statistical and optimize of lattice structures with selective laser melting (SLM) of Ti6AL4V material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1-4), 495-510.
173. ISO (2011). Mechanical testing of metals - Ductility testing - Compression test for porous and cellular metals. *International Standard*, ISO 13314(1).
174. Lozanovski, B., Leary, M., Tran, P., Shidid, D., Qian, M., Choong, P., and Brandt, M. (2019). Computational modelling of strut defects in SLM manufactured lattice structures. *Materials and Design*, 171, 107671.
175. Goodall, R., Hernandez-Nava, E., Jenkins, S. N. M., Sinclair, L., Tyrwhitt-Jones, E., Khodadadi, M. A., Ip, D. H., and Ghadbeigi, H. (2019). The effects of defects and damage in the mechanical behavior of ti6al4v lattices. *Frontiers in Materials*, 6, 117.
176. Gross, A., Pantidis, P., Bertoldi, K., and Gerasimidis, S. (2019). Correlation between topology and elastic properties of imperfect truss-lattice materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 124, 577-598.
177. Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A. H., Mirbolghasemi, A., and Hermenean, K. (2018). 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Materials and Design*, 160, 179-193.
178. Obaton, A. F., Lê, M., Prezsa, V., Marlot, D., Delvart, P., Huskic, A., Senck, S., Mahé, E., and Cayron, C. (2018). Investigation of new volumetric non-destructive techniques to characterise additive manufacturing parts. *Welding in the World*, 62(5), 1049-1057.
179. International, A. (1996). Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient. *Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications*, 94(), 1-15.
180. ASTM (2014). ASTM F3122 - 14 Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes. *ASTM Standards*, 1-6.
181. Dallago, M., Zanini, F., Carmignato, S., Pasini, D., and Benedetti, M. (2018). Effect of the geometrical defectiveness on the mechanical properties of SLM biomedical Ti6Al4V lattices. *Procedia Structural Integrity*, 13, 161-167.
182. Liu, L., Kamm, P., García-Moreno, F., Banhart, J., and 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.

183. Wu, S., Liu, X., Yeung, K. W. K., Liu, C., and Yang, X. (2014). Biomimetic porous scaffolds for bone tissue engineering. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 80(1), 1-36.
184. Bose, S., Roy, M., and Bandyopadhyay, A. (2012). Recent advances in bone tissue engineering scaffolds. *Trends in Biotechnology*, 30(10), 546-554.
185. Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., Qian, M., Brandt, M., and Xie, Y. M. (2016). Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials*, 83, 127-141.
186. Baptista, R. and Guedes, M. (2021). Morphological and mechanical characterization of 3D printed PLA scaffolds with controlled porosity for trabecular bone tissue replacement. *Materials Science and Engineering C*, 118, 111528.
187. Wu, R., Li, Y., Shen, M., Yang, X., Zhang, L., Ke, X., Yang, G., Gao, C., Gou, Z., and Xu, S. (2021). Bone tissue regeneration: The role of finely tuned pore architecture of bioactive scaffolds before clinical translation. *Bioactive Materials*, 6(5), 1242-1254.
188. El-Sayed, M. A., Essa, K., Ghazy, M., and Hassanin, H. (2020). Design optimization of additively manufactured titanium lattice structures for biomedical implants. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(9-10), 2257-2268.
189. Rezwan, K., Chen, Q. Z., Blaker, J. J., and Boccaccini, A. R. (2006). Biodegradable and bioactive porous polymer/inorganic composite scaffolds for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 27(18), 3413-3431.
190. Bai, L., Yi, C., Chen, X., Sun, Y., and Zhang, J. (2019). Effective design of the graded strut of BCC lattice structure for improving mechanical properties. *Materials*, 12(13), 2192.
191. Balcı, A. (2020). *Trabeküler kemik geometrisine sahip gözenekli metal yapıların seçimli lazer ergitme yöntemi ile üretilebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 43-100.
192. Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2011). *Materials science and engineering* (tenth edition). New York: John Wiley and Sons, 154-192.
193. Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budnyas, R. G., and Nisbett, K. J. (2008). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (eighth edition). New York: McGraw-Hill, 31-265.
194. Kadkhodapour, J., Montazerian, H., Darabi, A. C., Zargarian, A., and Schmauder, S. (2017). The relationships between deformation mechanisms and mechanical properties of additively manufactured porous biomaterials. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 70, 28-42.

195. Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., and Wei, J. (2017). Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: Design, orientation and density. *Additive Manufacturing*, 16, 213-224.
196. Gualtieri, T. and Bandyopadhyay, A. (2016). Laser Engineering Net Shaping of Microporous Ti6Al4V Filters. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2, 28.
197. Gorny, B., Niendorf, T., Lackmann, J., Thoene, M., Troester, T., and Maier, H. J. (2011). In situ characterization of the deformation and failure behavior of non-stochastic porous structures processed by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A*, 528(27), 7962-7967.
198. Merkt, S., Hinke, C., Bültmann, J., Brandt, M., and Xie, Y. M. (2015). Mechanical response of TiAl6V4 lattice structures manufactured by selective laser melting in quasistatic and dynamic compression tests. *Journal of Laser Applications*, 27(S1), S17006.
199. Liu, C., Lertthanasarn, J., and Pham, M. S. (2020). Revealing the origins of shear band activity and boundary strengthening in polygrain-like architected materials, 02424.
200. Li, S. J., Xu, Q. S., Wang, Z., Hou, W. T., Hao, Y. L., Yang, R., and Murr, L. E. (2014). Influence of cell shape on mechanical properties of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting method. *Acta Biomaterialia*, 10(10), 4537-4547.
201. Zhang, X. Y., Fang, G., Xing, L. L., Liu, W., and Zhou, J. (2018). Effect of porosity variation strategy on the performance of functionally graded Ti-6Al-4V scaffolds for bone tissue engineering. *Materials and Design*, 157, 523-538.
202. Kadkhodapour, J., Montazerian, H., Darabi, A. C., Anaraki, A. P., Ahmadi, S. M., Zadpoor, A. A., and Schmauder, S. (2015). Failure mechanisms of additively manufactured porous biomaterials: Effects of porosity and type of unit cell. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 50, 180-191.
203. Liu, F., Zhang, D. Z., Zhang, P., Zhao, M., and Jafar, S. (2018). Mechanical properties of optimized diamond lattice structure for bone scaffolds fabricated via selective laser melting. *Materials*, 11(3), 374.
204. Leary, M., Mazur, M., Elambasseril, J., McMillan, M., Chirent, T., Sun, Y., Qian, M., Easton, M., and Brandt, M. (2016). Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials and Design*, 98, 344-357.
205. Köhnen, P., Haase, C., Bültmann, J., Ziegler, S., Schleifenbaum, J. H., and Bleck, W. (2018). Mechanical properties and deformation behavior of additively manufactured lattice structures of stainless steel. *Materials and Design*, 145, 205-217.
206. Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15-30.
207. Xiao, L., Song, W., Wang, C., Liu, H., Tang, H., and Wang, J. (2015). Mechanical

- behavior of open-cell rhombic dodecahedron Ti-6Al-4V lattice structure. *Materials Science and Engineering A*, 640, 375-384.
208. Köse, C. ve Karaca, E. (2017). Ti6Al4V Alaşımının Fiber Lazer Kaynak Kabiliyeti. *Technological Applied Sciences*, 12(3), 140-152.
 209. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J. P., and Van Humbeeck, J. (2015). Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures. *Additive Manufacturing*, 5, 77-84.
 210. Zhang, M., Yang, Y., Wang, D., Xiao, Z., Song, C., and Weng, C. (2018). Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V gradient structures manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering A*, 736, 288-297.
 211. du Plessis, A., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., le Roux, S. G., and Blaine, D. C. (2018). Numerical comparison of lattice unit cell designs for medical implants by additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(4), 266-281.
 212. Boccaccio, A., Uva, A. E., Fiorentino, M., Mori, G., and Monno, G. (2016). Geometry design optimization of functionally graded scaffolds for bone tissue engineering: A mechanobiological approach. *Plos One*, 11(1), e0146935.
 213. Amani, Y., Dancette, S., Delroisse, P., Simar, A., and Maire, E. (2018). Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches. *Acta Materialia*, 159, 395-407.
 214. Cao, X., Jiang, Y., Zhao, T., Wang, P., Wang, Y., Chen, Z., Li, Y., Xiao, D., and Fang, D. (2020). Compression experiment and numerical evaluation on mechanical responses of the lattice structures with stochastic geometric defects originated from additive-manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 194, 108030.
 215. Bacchewar, P. B., Singhal, S. K., and Pandey, P. M. (2007). Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(1), 35-52.
 216. Read, N., Wang, W., Essa, K., and Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials and Design*, 65, 417-424.
 217. Geng, L., Wu, W., Sun, L., and Fang, D. (2019). Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D re-entrant lattices based on in-situ CT testing and geometric reconstruction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 157–158, 231-242.
 218. van Grunsven, W., Hernandez-Nava, E., Reilly, G., and Goodall, R. (2014). Fabrication and Mechanical Characterisation of Titanium Lattices with Graded Porosity. *Metals*, 4(3), 401-409.

219. Dursun, A. M., Tüzemen, M. Ç., Salamcı, E., Yılmaz, O., and Ünal, R. (Baskıda). Investigation of Compatibility Between Design and Additively Manufactured Parts of Functionally Graded Porous Structures. *Journal of Polytechnic*, 1-1.
220. Liu, Y. J., Li, S. J., Wang, H. L., Hou, W. T., Hao, Y. L., Yang, R., et al. (2016). Microstructure, defects and mechanical behavior of beta-type titanium porous structures manufactured by electron beam melting and selective laser melting. *Acta Materialia*, 113, 56-67.
221. Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., and Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74, 401-477.
222. Zaharin, H. A., Rani, A. M. A., Azam, F. I., Ginta, T. L., Sallih, N., Ahmad, A., Yunus, N. A., and Zulkifli, T. Z. A. (2018). Effect of unit cell type and pore size on porosity and mechanical behavior of additively manufactured Ti6Al4V scaffolds. *Materials*, 11(12), 2402.
223. Afshar, M., Pourkamali Anaraki, A., and Montazerian, H. (2018). Compressive characteristics of radially graded porosity scaffolds architected with minimal surfaces. *Materials Science and Engineering C*, 92, 254-267.
224. Neff, C. (2015). *Mechanical Properties of Laser-Sintered-Nylon Diamond Lattices*, Master's Thesis, University of South Florida Department of Mechanical Engineering, Florida, 1-57.
225. Balcı, A., Aycan, M. F., Usta, Y., ve Demir, T. (2020). Seçimli Lazer Ergitme İle Ti6Al4V ELI Alaşımından Üretilen Trabeküler Metal Yapıların Basma Ve Basma-Kayma Dayanımlarının İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 1-1.
226. Deshpande, V. S., Ashby, M. F., and Fleck, N. A. (2001). Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*, 49(6), 1035-1040.
227. Amirkhani, S., Bagheri, R., and Zehtab Yazdi, A. (2012). Manipulating failure mechanism of rapid prototyped scaffolds by changing nodal connectivity and geometry of the pores. *Journal of Biomechanics*, 45(16), 2866-2875.
228. Alkhader, M. and Vural, M. (2008). Mechanical response of cellular solids: Role of cellular topology and microstructural irregularity. *International Journal of Engineering Science*, 46(10), 1035-1051.
229. Kadkhodapour, J., Montazerian, H., and Raeisi, S. (2014). Investigating internal architecture effect in plastic deformation and failure for TPMS-based scaffolds using simulation methods and experimental procedure. *Materials Science and Engineering C*, 43, 587-597.
230. Hernández-Nava, E., Smith, C. J., Derguti, F., Tammam-Williams, S., Leonard, F., Withers, P. J., Todd, I., and Goodall, R. (2016). The effect of defects on the mechanical response of Ti-6Al-4V cubic lattice structures fabricated by electron beam

melting. *Acta Materialia*, 108, 279-292.

231. Antonysamy, A. A., Meyer, J., and Prangnell, P. B. (2013). Effect of build geometry on the β -grain structure and texture in additive manufacture of Ti6Al4V by selective electron beam melting. *Materials Characterization*, 84, 153-168.





GAZİ GELECEKTİR..