

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Altuğ UŞUN tarafından hazırlanan**

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ MİKRO KAFES YAPILARIN  
SONLU ELEMANLAR İLE MODELLENMESİ**

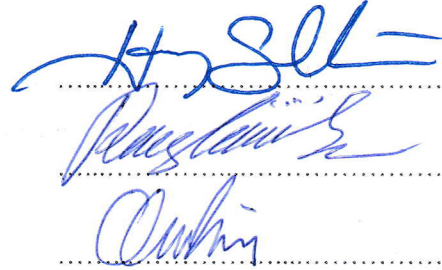
**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21 / 05 / 2019 gün ve 1805 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ**

**Üye : Doç. Dr. Recep GÜMRÜK**

**Üye : Doç. Dr. Osman BİCAN**

  
.....  
.....  
.....

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU  
Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Tez çalışması kapsamında, seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş mikro kafes yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi ve modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin incelenmesinde temel bazı deneysel çalışmaların yanında sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

Yüksek lisans çalışmalarımın her aşamasında beni yönlendiren, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, hücresel yapılar ve sonlu elemanlar yöntemlerinde bana çalışma imkanı sağlayan Sayın Doç. Dr. Recep GÜMRÜK'e teşekkürü bir borç bilirim. Mikro kafes ve tellerin tedarikinde yardımcı olan Liverpool Üniversitesi emekli hocalarından Robert MINES'a ve ayrıca tez çalışmam süresince katkıları olan Sayın Doç. Dr. Ömer Necati CORA'ya, Doç. Dr. Hasan GEDİKLİ'ye, Arş. Gör. Hamdi KULEYİN'e, Arş. Gör. Harun YANAR'a, Arş. Gör. Hasan Onur TAN'a, Arş. Gör. Sadun KARABIYIK'a ve kardeşim Nusret İrfan UŞUN'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarım boyunca desteklerini benden esirgemeyen aileme de teşekkürlerimi sunarım.

Altuğ Uşun  
Trabzon 2019

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Üretilmiş Mikro Kafes Yapıların Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Recep GÜMRÜK’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 21/06/2019

Altuğ UŞUN

## İÇİNDEKİLER

|   | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|---|------------------------|
| ÖNSÖZ .....   | III                    |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....   | IV                     |
| İÇİNDEKİLER.....  | V                      |
| ÖZET .....  | VIII                   |
| SUMMARY .....   | IX                     |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....   | X                      |
| TABLolar DİZİNİ.....  | XIV                    |
| SEMBOLLER DİZİNİ .....  | XV                     |
| 1. GENEL BİLGİLER.....  | 1                      |
| 1.1. Giriş.....   | 1                      |
| 1.2. Hüresel Malzemelerin Eklemeli İmalat ile Üretimi .....   | 3                      |
| 1.3. SLM ile Üretilen Parçaların Mekanik Özellikleri .....  | 5                      |
| 1.4. Nano İndentasyon ile Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi .....   | 9                      |
| 1.4.1. Nano İndentasyonun Yöntemi.....  | 9                      |
| 1.4.2. Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi .....                              | 11                     |
| 1.4.3. Tersine Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....   | 13                     |
| 1.5. Literatür Araştırması .....  | 16                     |
| 1.5.1. SLM ile Hüresel Malzeme Üretimi .....  | 16                     |
| 1.5.2. Kafes Yapıların Modellenmesi.....  | 17                     |
| 1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı .....   | 20                     |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....   | 22                     |
| 2.1. Numunelerin Üretimi .....  | 22                     |
| 2.1.1. Mikro Kafes Yapıların SLM ile Üretimi.....   | 22                     |
| 2.1.2. Mikro Kafes Yapıların Nikel ile Kaplanması.....  | 22                     |
| 2.2. Mekanik Testler.....   | 25                     |
| 2.2.1. Mikro Sertliklerin Ölçülmesi.....  | 25                     |
| 2.2.2. Nano-indentasyon Testleri .....  | 26                     |
| 2.2.3. Mikro Kafeslerin Basma Testlerinin Gerçekleştirilmesi.....   | 27                     |
| 2.3. Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mikro Tellerin ve Kaplamanın Mekanik Özelliklerinin Araştırılması..... | 28                     |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 2.3.1.   | Nano-indentasyon Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması .....  | 28 |
| 2.3.2.   | Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi Yaklaşımların Uygulanması .....                                       | 30 |
| 2.4.     | Nikel Kaplamalı Mikro Kafes Yapıların Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi .....                          | 32 |
| 2.5.     | Mikro Kafeslerde Geometrik Kusurların Sonlu Elemanları ile Gerçeğe Yakın Modelleme Yaklaşımları ..... | 36 |
| 2.5.1.   | Mikro Kafes Yapıların Geometrik Kusurlarının Belirlenmesi.....  | 36 |
| 2.5.1.1. | Mikro Tel Çap Değişimlerinin Belirlenmesi.....  | 36 |
| 2.5.1.2. | Mikro Tellerdeki Yarı Ergimiş veya Ergimemiş Toz Dağılımının Belirlenmesi.....                        | 38 |
| 2.5.2.   | Mikro Kafes Yapıdaki Geometrik Kusurların Katı Modellenmesi.....                                      | 40 |
| 2.5.3.   | Kusurlu Mikro Kafes Yapıların Sonlu Elemanlar Modellenmesi.....                                       | 45 |
| 3.       | BULGULAR VE İRDELEME.....   | 50 |
| 3.1.     | Deneysel Sonuçlar .....   | 50 |
| 3.1.1.   | Mikro Kafes Yapıların Basma Testi Sonuçları .....   | 50 |
| 3.1.2.   | Nikel Kaplamalı Mikro Kafes Yapıların Basma Testi Sonuçları.....                                      | 51 |
| 3.1.3.   | Nano-indentasyon Test Sonuçları .....   | 53 |
| 3.2.     | Sayısal Sonuçlar .....  | 55 |
| 3.2.1.   | Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi Sonuçları .....   | 55 |
| 3.2.1.1. | Nano-indentasyon Uç Yuvarlatmasının Etkisi .....  | 55 |
| 3.2.1.2. | Tersine Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması .....  | 57 |
| 3.2.2.   | Nikel Kaplamanın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....   | 60 |
| 3.2.3.   | Mikro Tellerin Mekanik Özelliklerinin Elde Edilmesi .....   | 61 |
| 3.2.4.   | Malzeme Parametrelerinin Kusurlu Mikro Teller için Geçerliliğinin Tartışılması.....                   | 64 |
| 3.3.     | Nikel Kaplamalı Mikro Kafes Yapılar için Gerçekleştirilen Parametrik Çalışmaların Sonuçları .....     | 66 |
| 3.3.1.1. | Kaplama-Mikro Tel Arayüz Etkileri .....   | 67 |
| 3.3.1.2. | Kaplama Kalınlığının Etkisi.....  | 69 |
| 3.3.1.3. | Kaplama ve Hücre Boyutu İlişkisi .....  | 71 |
| 3.4.     | Mikro Kafes Yapıların Gerçekçi Modelleme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar.....                    | 74 |
| 3.4.1.   | Kusurlu Modellerin Tekrarlanabilirliği .....  | 74 |
| 3.4.2.   | Hücre Sayısının Mekanik Davranışa Etkisi.....   | 75 |
| 3.4.3.   | Yarı Ergimiş Tozların Mekanik Davranışa Etkisi.....   | 80 |

|    |                |    |
|----|----------------|----|
| 4. | SONUÇLAR ..... | 83 |
| 5. | ÖNERİLER ..... | 86 |
| 6. | KAYNAKLAR..... | 88 |
|    | ÖZGEÇMİŞ.....  | 96 |





## Yüksek Lisans Tezi

### ÖZET

#### SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ MİKRO KAFES YAPILARIN SONLU ELEMANLAR İLE MODELLENMESİ

Altuğ UŞUN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Recep GÜMRÜK  
2019, 95 Sayfa

Hücre malzemeler yüksek mukavemet/ağırlık oranı, özgün termal özellikler, darbe ve titreşim sönümleyebilme gibi birçok özelliğe sahiptirler. Bu sebeple havacılık, uzay, otomotiv, taşımacılık ve sağlık gibi birçok sektörde giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu tez çalışması ile kaplanmış mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının araştırılması ve mikro kafes yapıların geometrik kusurlarını içeren sonlu elemanlar modellerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Kaplamalı mikro kafes yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesinde basma testleri ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kaplama kalınlığı, kaplama-tel yapışma arayüzü ve hücre boyutu etkileri sayısal olarak parametrik bir şekilde incelenmiştir. Kaplama kalınlığının ve hücre boyutunun mikro kafes yapıların mukavemet ve elastisite modülü değerlerine ciddi oranda etki ettiği görülmüştür. Bunun yanında kaplamalı mikro kafes yapıların mekanik özelliklerini kontrol eden önemli bir parametrenin de kaplamanın hasar davranışı olduğu görülmüştür. Ayrıca mikro teller taramalı elektron mikroskobu ile ölçülerek mikro teldeki geometrik kusurlar ve yüzeye yapışmış ergimemiş veya yarı ergimiş tozların modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, tel üzerinde bulunan tozların maksimum birim şekil değişimine, geometrik kusurların ise mukavemet değerine etki ettiği görülmüştür. Sonlu elemanlar yönteminin uygulanması için gerekli olan mekanik özellikler, tersine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, nano-indentasyon testlerinden elde edilmiştir. Tersine sonlu elemanlar yöntemi için tez kapsamında özgün olarak geliştirilen optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro Kafes Yapılar, Seçici Lazer Ergitme, Hücre Malzemeler, Eklemeli İmalat, Tersine Sonlu Elemanlar, Nano-indentasyon

Master Thesis

SUMMARY

FINITE ELEMENT MODELING OF MICRO-LATTICE STRUCTURES PRODUCED  
WITH SELECTIVE LASER MELTING

Altuğ UŞUN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Nature and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Recep GÜMRÜK  
2019, 95 Pages

Cellular materials have many properties such as high strength/weight ratio, specific thermal properties, shock and vibration damping. For this reason, they are increasingly used in many industries such as aerospace, automotive, transportation and medicine. The aim of this thesis is to investigate the mechanical behavior of coated micro lattice structures and to develop finite element models including geometric defects of micro lattice structures. Mechanical properties of coated micro lattice structures were examined by compression tests and finite element method. Coating thickness, coating-strut adhesion interface and cell size effects were investigated numerically in a parametric manner. It was found that coating thickness and cell size had a significant effect on the strength and elasticity modulus values of the micro lattice structures. In addition, an important parameter that controls the mechanical properties of coated micro-lattice structures was found to be the damage behavior of the coating. Furthermore, micro struts were measured by scanning electron microscope to model geometric defects and unmelted or semi-molten powders adhered to the surface. As a result of the studies, it was seen that the unmelted powders on the struts affect maximum strain and geometric defects affect the strength value. The mechanical properties required for the application of the finite element method were obtained from nano-indentation tests using the inverse finite element method. In the context of the thesis, optimization methods, which were originally developed, were used for the inverse finite element method.

**Keywords:** Micro-lattice Structures, Selective Laser Melting, Cellular Materials, Additive Manufacturing, Inverse Finite Element, Nano-Indentation

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 1.1.  | Hücre malzemelere örnekler, a) kuş kemiği [1], b) Michelin hava gerektirmeyen tekerlek tasarımı [2], c) kafes yapıya sahip kalça implantı [3].....   | 2  |
| Şekil 1.2.  | Mimaride kullanılan cam duvar desteğinin topoloji optimizasyonu [5].....   | 2  |
| Şekil 1.3.  | Stokastik hücre malzemelerin gösterimi; a) açık hücreli alüminyum [27], b) kapalı hücreli alüminyum [28] ve c) açık hücreli stokastik bakır [29].....  | 4  |
| Şekil 1.4.  | Stokastik olmayan hücre yapıları; a) SLM ile üretilebilen temel hücre tipleri [30], b) SLM ile üretilmiş hücre malzemenin görüntüsü [31].....  | 5  |
| Şekil 1.5.  | SLM yönteminin şematik gösterimi [35].....   | 6  |
| Şekil 1.6.  | SLM ile üretilen yapıların SEM görüntüleri; a) mikro kafes yapının görüntüsü ve b) üretim sırasında iç yapıda meydana gelen boşlukların görüntüsü [36].....  | 6  |
| Şekil 1.7.  | Çeşitli üretim parametreleri ile 316L paslanmaz çeliğinden üretilen numunelere ait gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması.....   | 8  |
| Şekil 1.8.  | Berkovich ucunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü [54].....  | 9  |
| Şekil 1.9.  | Nano indentasyon testinden elde edilen sonuçlar; a) tipik bir nano-indentasyon yükleme-boşaltma eğrisi, b) nano-indentasyon yüzey deformasyon yapısı [55]. ....  | 10 |
| Şekil 1.10. | Modifiye Holloman eşitliği için $n$ ve $\sigma_y$ tahmin değerleri aralığının PxR sayıya bölünmesi .....   | 13 |
| Şekil 1.11. | Berkovich ucun a) gerçek ve b) eşdeğer konik geometrisi.....   | 14 |
| Şekil 1.12. | Nano-indentasyon sonlu elemanlar modelinin boyutlandırılması; a) model geometrisi, b) $r_s/h_s$ oranı için kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve c) $h_s/h_{max}$ oranı için kuvvet-yer değiştirme eğrileri..... | 15 |
| Şekil 1.13. | Mikro tellerin iç yapısında oluşan boşlukların modellenmesi; a) modelin görüntüsü ve b) boşluk oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri [88].....  | 20 |
| Şekil 2.1.  | Nikel kaplanmış (Sağ) ve kaplamasız (Sol) mikro kafes bloklar .....  | 23 |
| Şekil 2.2.  | Mikro teller ait elektron mikroskobu görüntüleri; a) tel kesiti, b) boyuna tel kesiti c) kaplanmış mikro tel dış yüzeyi ve d) kaplanmamış mikro tel dış yüzeyi .....   | 25 |
| Şekil 2.3.  | Mikro sertlik ölçümüne ait ölçüm noktalarının yerleri.....   | 26 |
| Şekil 2.4.  | Nikel kaplama ve mikro tellerin üzerinde nano-indentasyon izlerinin görüntüsü .....  | 27 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 2.5.  | Nano-indentasyon analizleri için eksenel simetrik model.....   | 29 |
| Şekil 2.6.  | Berkovich eşdeğer konik uca uygulanan yuvarlatmanın şematik resmi.....   | 29 |
| Şekil 2.7.  | Python kodu ile kontrol edilen tersine sonlu elemanlar analizinin akış şeması .....  | 32 |
| Şekil 2.8.  | Kaplamalı mikro tellerin sonlu elemanlar ağ yapısı .....   | 33 |
| Şekil 2.9.  | Mikro kafes yapıların sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan sınır şartlarının gösterimi; a) Tek tel, b) çeyrek kafes yapı, c) yarım kafes yapı ve d) çoklu kafes yapılar.....   | 34 |
| Şekil 2.10. | Mikro tellerin SEM görüntüsü üzerinde SolidWorks programı ile daire uydurulması; a) 35° ve b) 90° üretim açısına sahip mikro tel .....   | 37 |
| Şekil 2.11. | Geometrik kusurların tanımlanmasını sağlayan boyutların gösterimi.....   | 38 |
| Şekil 2.12. | Mikro teller üzerinde tozların dağılımın ve boyutlarının SEM görüntüsü üzerinden belirlenmesi.....   | 39 |
| Şekil 2.13. | Mikro teller üzerindeki erimemiş veya yarı erimiş tozların dağılımı .....  | 40 |
| Şekil 2.14. | Üretim açısı 35° olan mikro tel modellenmesinde kullanılan boyutların dağılımı; a) daire çapı, b) $\Delta x$ ve c) $\Delta y$ .....  | 41 |
| Şekil 2.15. | SolidWorks makrosu ile oluşturulan geometrilerin, gerçek geometriler ile karşılaştırılması; a) 35° üretim açısına sahip mikro telin SEM görüntüsü, b) 35° üretim açısına sahip mikro telin katı modeli, c) 90° üretim açısına sahip mikro telin SEM görüntüsü ve d) 90° üretim açısına sahip mikro telin katı modeli ..... | 41 |
| Şekil 2.16. | Kafes yapıların kusurlu olarak modellenmesi; a) 2x2x2 hücrenin katı modeli, b) katı modelin kesişim noktasındaki kesiti ve c) gerçek kafes yapının kesişim noktasının kesiti.....  | 42 |
| Şekil 2.17. | Kusursuz telin üzerinde tozların yer alacağı noktaların koordinatlarının gösterilmesi.....   | 43 |
| Şekil 2.18. | Mikro tel üzerine eklenen tozların katı model görüntüsü.....   | 44 |
| Şekil 2.19. | Mikro kafes yapılar için oluşturulan ağ yapıları; a) çeyrek, b) yarım ve c) tam hücre .....  | 46 |
| Şekil 2.20. | Mikro tellerin kesişim noktalarındaki ağ yapıları; a) Tozsuz, b) Tek parça olarak ağ yapısı oluşturulan ve c) Toz-tel arasında yapışma sınır şartının uygulanması durumu .....   | 47 |
| Şekil 2.21. | Mikro tel üzerinde bulunan seyrek (a) ve yoğun [31] (c) tozlara göre oluşturulan az tozlu (b) ve çok tozlu (d) modellerin gösterimi .....  | 48 |
| Şekil 3.1.  | BCC mikro kafes yapıların basma testinden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri .....  | 51 |
| Şekil 3.2.  | Nikel kaplanmış BCC mikro kafes yapıların basma testinden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri .....  | 52 |
| Şekil 3.3.  | Kaplanmış BCC mikro kafes yapıların basma etkisi altındaki deformasyon ilerlemesi.....   | 52 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 3.4.  | Nano-indentasyon test sonuçları; a) SLM ile üretilmiş mikro teller ve b) nikel kaplama.....   | 54 |
| Şekil 3.5.  | Batıcı uç yuvarlatılmasının von-Mises gerilme dağılımı üzerine etkisi; a) 100 nm, b) 200 nm, c) 500 nm ve d) 1250 nm yuvarlatma değerlerinde .....  | 56 |
| Şekil 3.6.  | Çeşitli uç yuvarlatmalarına sahip batıcı uçlar için elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....   | 57 |
| Şekil 3.7.  | Tersine sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması; a-b) S355 çeliği için sırasıyla kuvvet-yer değiştirme ve gerçek gerilme-plastik birim şekil değişimi eğrileri ve c-d) DP800 çeliği için sırasıyla kuvvet-yer değiştirme ve gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrileri ..... | 58 |
| Şekil 3.8.  | Mekanik özellikleri optimize edilmiş numuneler için nano-indentasyon analizi von-Mises gerilme dağılımları; a) S355, b) DP800 ve c) Nikel kaplama.....  | 59 |
| Şekil 3.9.  | Nikel kaplama için tersine sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar; a) nano-indentasyon yüklemesi için kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması ve b) elde edilen gerçek gerilme-plastik birim şekil değişimi eğrisi .....   | 60 |
| Şekil 3.10. | SLM ile üretilen 316L mikro kafes yapılar için python optimizasyon sonuçları; a) deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması, b) elde edilen gerilme-birim şekil değişim eğrisi.....  | 62 |
| Şekil 3.11. | AISI 304L çeliğinin bilinear optimizasyon sonuçları; a) nano-indentasyon, b) gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....   | 63 |
| Şekil 3.12. | 316L malzemesi için bilinear optimizasyon sonuçlarının literatürdeki eğriler ile karşılaştırılması .....  | 63 |
| Şekil 3.13. | Farklı geometrik kusurlara sahip mikro tellerin $\epsilon=0,3$ değerindeki von-Mises gerilme dağılımları; a-b) $35^\circ$ ve c-d) $90^\circ$ .....  | 64 |
| Şekil 3.14. | Kusurlu olarak $35^\circ$ ve $90^\circ$ açı ile modellenmiş mikro teller üzerine uygulanan optimizasyon sonuçları .....   | 65 |
| Şekil 3.15. | Mikro kafes teller için gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması; a) kaplamalı ve b) kaplamasız.....  | 66 |
| Şekil 3.16. | Kaplama ve mikro tellerin arayüzlerinde mükemmel yapışma ve yapışma olmaması durumlarında kaplamalı kafes yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması .....  | 68 |
| Şekil 3.17. | Nikel kaplamalı mikro tellerin deformasyon davranışları; a) kaplama ile mikro tel yüzeyinde yapışma olmaması durumunda, b) kaplama ile mikro tel arasında mükemmel yapışma olması durumunda .....   | 69 |
| Şekil 3.18. | Kaplama kalınlığının gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri üzerine etkisi.....  | 70 |
| Şekil 3.19. | Kaplama kalınlığı a) 10, b) 17 ve c) 30 $\mu\text{m}$ için mikro tellerin deformasyon davranışı ve von-Mises gerilme dağılımı .....   | 71 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Şekil 3.20. | Farklı hücre boyutlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması .....  | 72 |
| Şekil 3.21. | Farklı hücre boyutlarına sahip kaplamalı mikro tellerin deformasyon ve von-Mises gerilme dağılımları; a) 1,6 mm, b) 2 mm ve c) 2,5 mm.....  | 73 |
| Şekil 3.22. | Farklı geometrik kusurlara sahip üç farklı kafes yapının katı modeli; a) Model #1, b) Model #2 ve c) Model #3.....  | 75 |
| Şekil 3.23. | Farklı geometrik kusurlara sahip kafeslerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....  | 75 |
| Şekil 3.24. | Çeyrek hücrelerin gerilme-birim şekil değişimi davranışları.....  | 76 |
| Şekil 3.25. | Çeyrek hücre analizlerinde $\varepsilon=0,3$ değeri için von-Mises gerilme dağılımları; a) tek tel, b) 1 çeyrek hücre (2 tel), c) 2 çeyrek hücre (4 tel) ve d) 3 çeyrek hücre (6 tel) ..... | 77 |
| Şekil 3.26. | Yarım hücreler için basma gerilmesi-birim şekil değişimi eğrilerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması .....  | 78 |
| Şekil 3.27. | Yarım hücre analizlerinde $\varepsilon=0,3$ değeri için von-Mises gerilme dağılımları; a) bir yarım hücre (4 tel), b) iki yarım hücre (8 tel) ve c) üç yarım hücre (12 tel) .....           | 79 |
| Şekil 3.28. | Toz oranına göre von-Mises gerilme dağılımları a) tozsuz, b) az tozlu ve c) çok tozlu .....   | 80 |
| Şekil 3.29  | Toz yoğunluğuna bağlı olarak gerilme-birim şekil değişimi eğrileri .....  | 81 |
| Şekil 3.30. | Tozlu modelin çökme durumunda meydana gelen temas bölgelerinin gösterimi .....  | 82 |

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tablo 1.1. | Çeşitli SLM üretim parametrelerine sahip 316L paslanmaz çeliğinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması .....   | 7  |
| Tablo 1.2. | Hüresel yapılardaki kusurların oluşturulma yöntemlerinin karşılaştırılması [89].....                               | 19 |
| Tablo 2.1. | 316L Paslanmaz çelik mikro kafes yapıların nikel kaplama aşamaları.....  | 24 |
| Tablo 2.2. | Kütlesi ve uzunluğu ölçülen mikro teller ile ortalama tel çapının belirlenmesi .....                               | 35 |
| Tablo 2.3. | Üretim açısı 90° ve 35° olan mikro tellerin, SEM resimleri üzerinden alınan geometrik boyutlarının bir özeti ..... | 38 |
| Tablo 3.1. | Nikel kaplamalı ve kaplamasız BCC numunelerinin özellikleri ve test sonuçlarının bir özeti .....                   | 53 |
| Tablo 3.2. | Nano-indentasyon testlerinden elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerleri.....                              | 55 |
| Tablo 3.3. | Farklı hücre boyutuna sahip mikro tellerin analiz sonuçlarının bir özeti.....                                      | 74 |

## SEMBOLLER DİZİNİ

|                        |  |
|------------------------|--|
| H                      | : Sertlik değeri   |
| $P_{maks}$             | : Nano-indentasyonda uygulanan maksimum yük  |
| A                      | : İz düşüm alanı   |
| $E_r$                  | : İndirgenmiş elastisite modülü  |
| E                      | : Elastisite modülü  |
| $\nu$                  | : Poisson oranı  |
| $\sigma$               | : Gerilme  |
| $\sigma_y$             | : Akma gerilmesi   |
| $\epsilon$             | : Birim şekil değişimi   |
| k                      | : Dayanım sabiti   |
| n                      | : Pekleşme üsteli  |
| $\sigma_0, \epsilon_0$ | : Düzeltme katsayıları   |
| S                      | : Nano-indentasyon yük boşalma eğrisinin eğimi                                       |
| $h_{maks}$             | : Nano-indentasyon maksimum batma derinliği  |
| $h_c$                  | : Nano-indentasyon testinde batıcı uç ile numune arasındaki temas bölgesi derinliği  |
| $h_a$                  | : Nano-indentasyon testinde batıcı uç ile numune arasındaki temassız bölge derinliği |
| $h_r$                  | : Nano-indentasyonda meydana gelen plastik yer değiştirme                            |
| $\nu_i$                | : Batıcı uç Poisson oranı  |
| $\nu_s$                | : Numunenin Poisson oranı  |
| $E_i$                  | : Batıcı uç elastisite modülü  |
| $E_s$                  | : Numunenin elastisite modülü  |
| $A_b,$                 | : Berkovich batıcı ucun iz düşüm alanı   |
| $A_c,$                 | : Eşdeğer konik batıcı ucun iz düşüm alanı   |
| $\theta_b$             | : Berkovich ucun yarım açısı   |
| $\theta_c$             | : Eşdeğer konik batıcı uçun yarım açısı  |
| $r_s$                  | : Nano-indentasyon numunesinin genişliği   |
| $h_s$                  | : Nano-indentasyon numunesinin yüksekliği  |



|                     |   |
|---------------------|---|
| $r_y$               | : Berkovich ucun yuvarlatma yarıçapı  |
| $e$                 | : LS-OPT parametresi olarak elastisite modülü   |
| $s$                 | : LS-OPT parametresi olarak akma gerilmesi  |
| $e_i$               | : LS-OPT yönteminde plastik birim şekil değişimi değerleri                                |
| $s_i$               | : LS-OPT yönteminde gerçek gerilme değerleri  |
| $r$                 | : Mikro tel yarıçapı  |
| VH                  | : Vickers sertlik değeri  |
| iter                | : Anlık iterasyon numarası  |
| End                 | : Python kodunun sonuçlandırılması için ulaşılması gereken maksimum iterasyon             |
| $\Delta\sigma$      | : Gerilme tahmin aralığı  |
| $\Delta\varepsilon$ | : Birim şekil değişimi tahmin aralığı   |
| P, R                | : Tersine sonlu elemanlar yönteminde bilinmeyen sabitlerin tahmin aralığını bölen sayılar |
| $\sigma_i$          | : Geçerli olan iterasyona kadar en az hata farkını veren gerilme değeri                   |
| $e_j$               | : Geçerli olan iterasyona kadar en az hata farkını veren birim şekil değişimi değeri      |
| $x_{iler}$          | : Makro içerisinde her toz ekleme sonrasında x koordinatındaki ilerleme                   |
| $x', y', z'$        | : Eklenecek olan tozun merkez koordinatları   |
| $n_{toz}$           | : Eklenecek olan tozun sıra numarası  |
| V                   | : Telin hacmi   |
| h                   | : Tel uzunluğu  |
| $\rho$              | : Çeliğin yoğunluğu   |
| $m_{tel}$           | : Mikro telin kütlesi   |

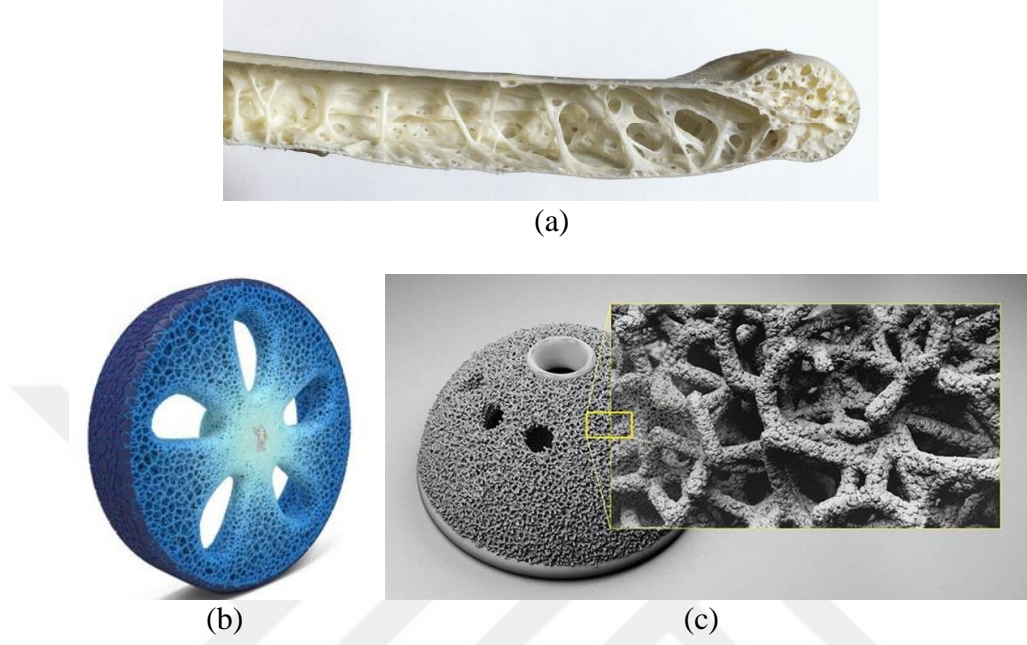
## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Günümüzde hızla gelişen teknoloji ile birlikte enerji tüketimi de giderek artmaktadır. Evlerde, iş yerlerinde, taşıtlarda ve daha birçok alanda enerji için fosil yakıtlara ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Giderek artan enerji kullanımı sebebiyle, enerji verimliliği büyük önem kazanmıştır. Enerji verimliliğini artırmak için en büyük adımlardan biri de hücrel malzemelerin kullanımı olmuştur. Bu sebeple gerek termal yalıtım özellikleri gerekse de düşük yoğunluk ve yüksek mukavemete sahip olmaları hücrel malzemeleri önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir. Hücrel malzemeler; bir malzeme içerisindeki boşlukların hacminin toplamı, o malzemeyi oluşturan katı malzemenin hacminden izafi olarak daha büyük olan malzemelere verilen isimdir. Sahip oldukları tüm bu özellikler sebebiyle hücrel malzemeler akustik alanında, implantlarda, taşımacılıkta, paketlemede, havacılık ve uzay sektörlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 1.1'de bazı hücrel malzemelere örnekler gösterilmiştir. Şekil 1.1a'da bir kuş kanadının kesiti gösterilmiştir. Kuş kanadı kemiğinde görülen boşluklu yapı, kuşa uçuşu için gerekli olan hafifliği, dayanıklılığı ve esnekliği kazandırmaktadır. Şekil 1.1b'de ise yakın zamanda geliştirilen bir araba lastiğini gösterilmektedir. Bu tasarımdaki amaç, hava gerektirmeden kullanılabilen, dayanıklı olan ve yoldan gelen darbeleri sönmüleyebilen esnek bir lastik üretmektir. Şekil 1.1c'de ise kalça ile femur kemikleri arasındaki eklem; yaşlılık, kireçlenme veya kaza gibi sebepler sonucunda yıpranması durumunda uygulanan implantın resmi gösterilmiştir. Burada hücrel malzeme kullanılmasının sebebi, kemiğin zaman içerisinde hücrel malzemenin içerisine doğru büyüyerek implant ile birleşmesini sağlamaktır. Böylece implant uzun ömürlü ve dayanıklı bir yapı meydana getirmektedir.

Hücrel malzemelerin farklı kullanım alanları da mevcuttur. Polimer ve cam köpük yapıya sahip hücrel malzemelerin en sık kullanım alanı termal yalıtımdır. Basit kullan at kahve bardaklarından uzay mekiği roketlerine kadar geniş bir yelpazede, düşük termal iletkenliğe sahip köpüklerin kullanımı yaygındır [4]. Hücrel malzemelerin başka bir kullanım alanı ise topoloji optimizasyonudur. Topoloji optimizasyonu kuvvet uygulanan bir parçada, gerilme göstermeyen bölgelerin parçadan çıkarılması ile elde edilir. Bu sayede uygulanan yük altında malzemenin dayanımı düşmezken, ağırlığı azalmaktadır. Şekil 1.2'de

büyük boyuta sahip camların kullanıldığı (müzeler, hava limanları vb.) yapılarda, cam ile duvar arasında bulunan destek elemanının topoloji optimizasyonu sonucu verilmiştir.



Şekil 1.1. Hücresel malzemelere örnekler, a) kuş kemiği [1], b) Michelin hava gerektirmeyen tekerlek tasarımı [2], c) kafes yapıya sahip kalça implantı [3].



Şekil 1.2. Mimaride kullanılan cam duvar desteğinin topoloji optimizasyonu [5].

Topoloji optimizasyonunda parça tamamen dolu yapıdan, Şekil 1.1a'da gösterilen kuş kanadına benzer bir yapı halini almıştır. Ayrıca yapının tamamı küçük hücrelerden meydana gelecek şekilde optimizasyon yapılmıştır. Uygulanan modifikasyonlar sonrasında parça üzerinde ciddi bir ağırlık azalması söz konusu olmaktadır. Üzerine gelecek olan yüklere göre kütle azaltılması yapıldığından, parçanın mukavemetinde azalma minimum düzeyden tutulabilmektedir.

Hücre malzemelerin üstün mekanik özelliklere sahip olmaları topolojik yapılarına bağlıdır. Bu sebeple topolojik optimizasyon hücre malzemelerin mekanik özelliklerini kontrol etmek ve iyileştirmek için büyük önem arz etmektedir. Karmaşık topolojik yapı hücre malzemelerin imalatları ise ancak gelişen teknoloji ile mümkün olmaktadır.

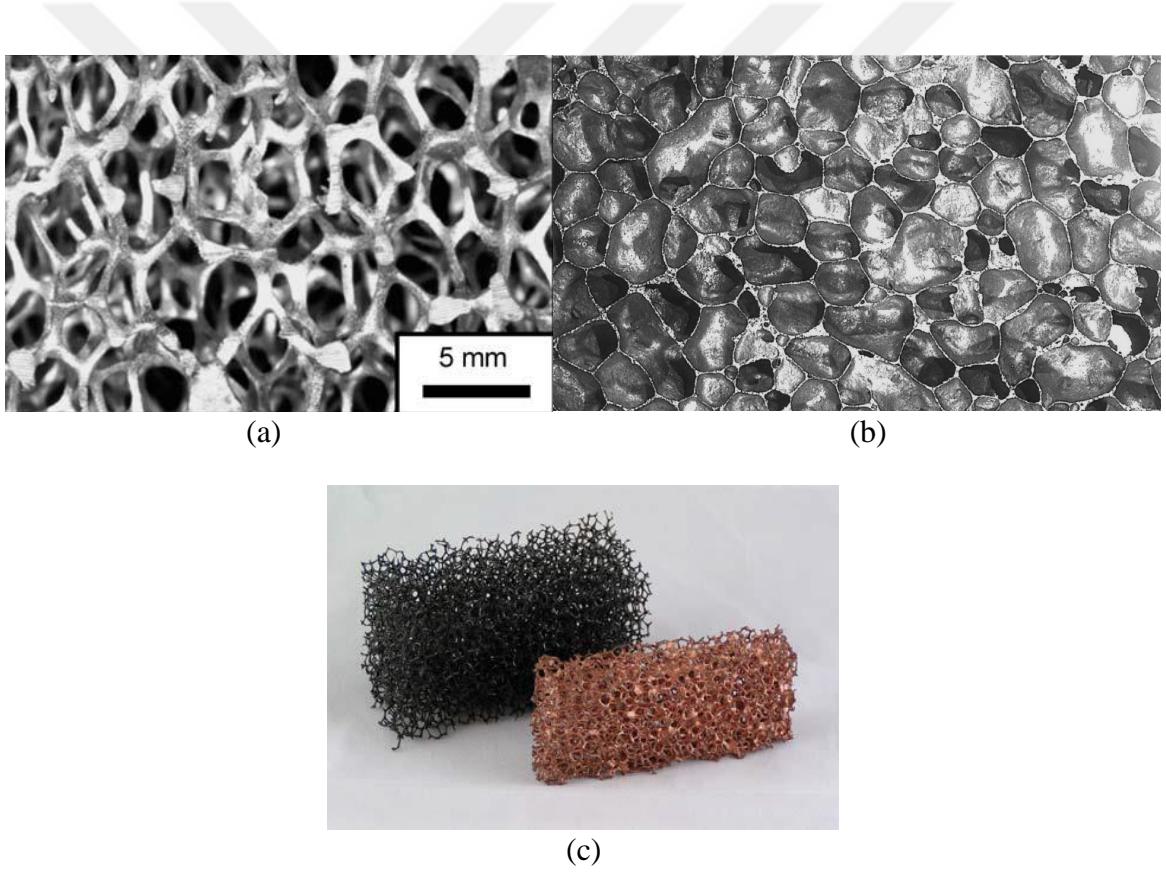
## **1.2. Hücre Malzemelerin Eklemeli İmalat ile Üretimi**

Eklemeli imalat yöntemi karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesine imkan sağladığından, hücre malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntem, üretilmek istenilen parçanın bilgisayar destekli tasarım (Computer Aided Design, CAD) kullanılarak çizilmesi ile başlamaktadır. CAD dosyası oluşturulduktan sonra, çizim verileri genellikle eklemeli imalata uygun olan .stl, .obj, .x3d vb. bir formata dönüştürülmektedir. Kullanılacak cihaza göre dilimleme programına uygun parametreler girilerek, parçanın geometrik verileri g-kodu'na dönüştürülür. G-kodu üç boyutlu objeyi iki boyutlu katmanlara bölmeye sebebiyle bu işleme dilimleme adı verilmektedir. Dilimleme işleminden sonra eklemeli imalatın gerçekleştirildiği cihaz, g-kodu verilerini kullanarak üretime başlar. Konvansiyonel yöntemlerdeki gibi keserek şekil vermektense, parça baskı tablası üzerine katman katman üretilmektedir.

Karmaşık topolojik yapıya sahip hücre malzemelerin konvansiyonel üretim yöntemleri ile imal edilmeleri neredeyse imkansız veya çok zordur. Bu zorluğun aşılmasında eklemeli üretim yöntemlerinin gelişmesi büyük rol oynamıştır. Örneğin seçici lazer eritme (Selective Laser Melting, SLM) [6, 7], lazer sinterleme [8-10], ultrasonik eklemeli imalat [11-13], eriyik yığıma modelleme (Fused Deposition Modeling, FDM) [14, 15] vb. birçok eklemeli imalat yönteminin gelişmesine paralel günümüzde mikro ve makro ölçekte çok karmaşık yapı (topolojili) hücre malzemelerin üretimi mümkün olmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinin çeşitlenmesi ile birlikte hücre malzemelerin imalatında kullanılacak malzemeler de çeşitlenmiştir. Yakın zamanda polimerik [16, 17], seramik

[18, 19] ve metalik [6, 7, 20] malzemeler ile hücresel kafes yapıların üretimine literatürde sıkça rastlanmaktadır.

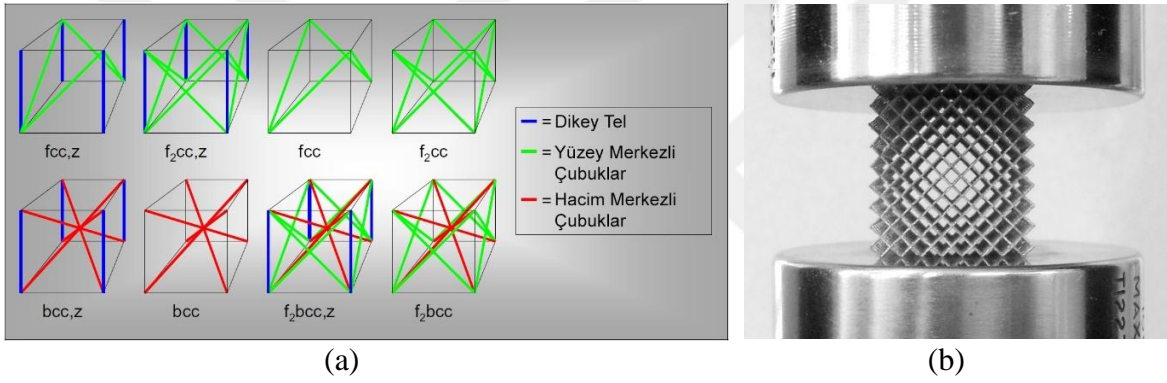
Hücresel malzemeler topolojik açıdan iki şekilde üretilmektedir. Bunlar düzenli ve düzensiz (stokastik) hücreli yapılardır. Şekil 1.3’de çeşitli stokastik metalik yapıların resimleri verilmiştir. Kullanılan yöntemlere, parametrelere ve malzeme çeşitlerine göre stokastik yapıya sahip hücresel elemanlar genellikle açık hücreli veya kapalı hücreli yapıya sahip olmaktadır. Polimerik hücresel malzemeler titreşim [21], ses [22, 23] ve enerji sönümlemede [24, 25] uzun süredir kullanılmaktadır. Polimerik malzemelerin düşük mukavemet değerlerine sahip olmaları sebebi ile metalik hücresel malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır [26].



Şekil 1.3. Stokastik hücresel malzemelerin gösterimi; a) açık hücreli alüminyum [27], b) kapalı hücreli alüminyum [28] ve c) açık hücreli stokastik bakır [29].

Stokastik olmayan (düzenli) hücresel malzemeler genellikle kafes yapılar olarak adlandırılmaktadırlar. Kafes yapılar belirli bir hücre tipinin tekrarlı üretilmesi ile elde edilmektedir. Stokastik hücresel malzemeler gibi bir rastgelelik söz konusu değildir. Boşluk oranı ve konumları istenildiği gibi modifiye edilebildiğinden malzemenin mekanik

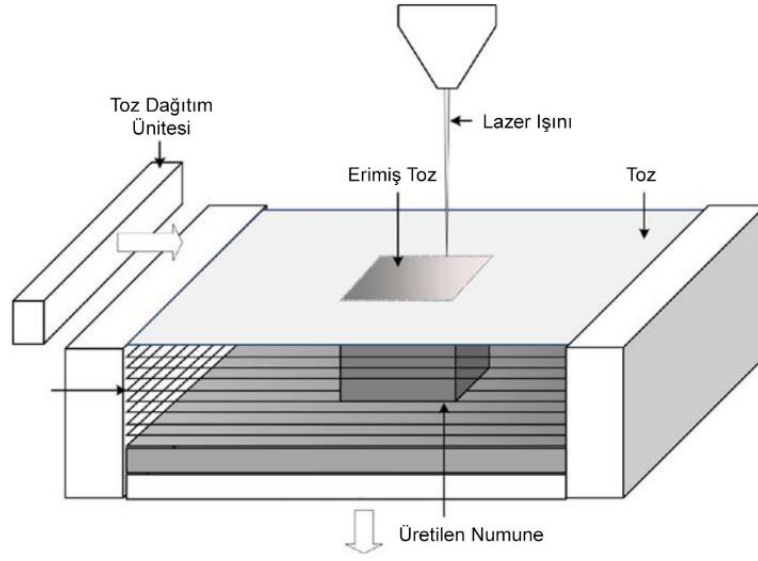
özellikleri çeşitlendirilebilmektedir [29]. Bu çalışma kapsamında SLM üretim yöntemi kullanıldığından, Şekil 1.4'de SLM ile üretilebilen bazı temel kübik hücre tipleri ve üretilmiş bir hücre malzeme örneği gösterilmiştir. Şekil 1.4a'dan görüldüğü gibi, mikro teller hücrenin yan yüzeyi boyunca  $45^\circ$  açı ile üretildiğinde, yapı yüzey merkezli kübik (Face-Centered Cubic, FCC) olarak adlandırılmaktadır. Hücrenin, kütle merkezinden geçen  $35^\circ$  açığa sahip tellerden üretilmesi durumunda ise, hacim merkezli kübik (Body-Centered Cubic, BCC) olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca yapı dikey teller (z olarak adlandırılan) ile desteklenebilmektedir. SLM yöntemi ile FCC, BCC ve Z yapılar ve bu yapıların çeşitli kombinasyonları üretilebilmektedir. Şekil 1.4b'de BCC yapıya sahip bir kafes yapının resmi verilmiştir.



Şekil 1.4. Stokastik olmayan hücresel yapılar; a) SLM ile üretilebilen temel hücre tipleri [30], b) SLM ile üretilmiş hücresel malzemenin görüntüsü [31].

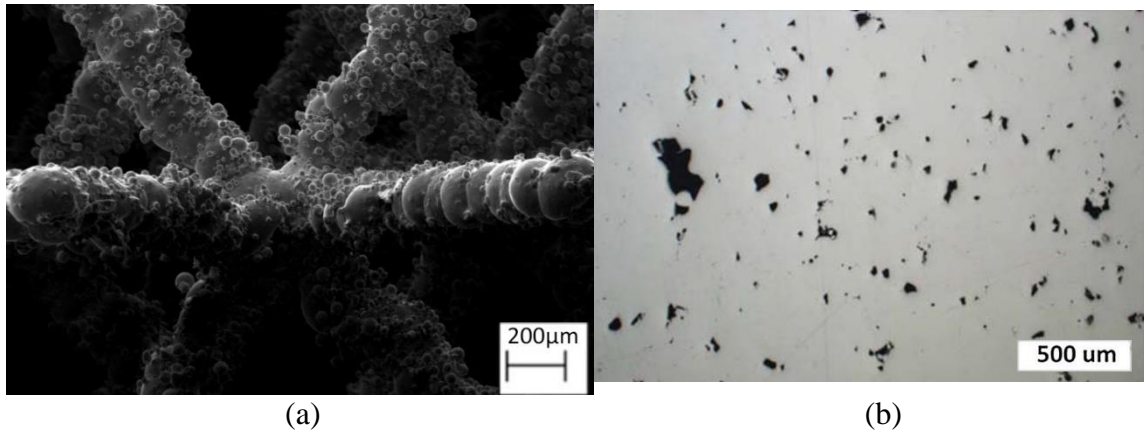
### 1.3. SLM ile Üretilen Parçaların Mekanik Özellikleri

Seçici lazer ergitme yönteminin çalışma prensibi, diğer eklemeli imalat yöntemlerine benzer şekilde, bilgisayar ortamında oluşturulan bir katı modelin katman katman üretilmesine dayanmaktadır. SLM yönteminin şematik resmi Şekil 1.5'de verilmiştir. SLM yöntemi ile imalat işlemi, toz dağıtım ünitesi yardımıyla tozların baskı tablası üzerine serilmesi ile başlamaktadır. Üst taraftan yönlendirilen lazer ışını, bilgisayar ortamında dilimlenen parçanın konumuna uygun yerlerdeki tozları eritmektedir. Sonrasında ise toz dağıtım ünitesi, yeni bir katmanı yüzeye sererek aynı işlemler tekrar gerçekleştirilir. Böylece parçanın imalatı tamamlanır. Bu yöntem sonrasında parça tozun içerisinden çıkarılarak temizlenir. Bazı çalışmalarda ise üretim sonrasında parçalar ısıl işleme tabi tutularak mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir [32-34].



Şekil 1.5. SLM yönteminin şematik gösterimi [35].

Şekil 1.6'da seçici lazer ergitme ile üretilmiş mikro kafes yapının taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) görüntüleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen mikro kafes yapılarda boşluklar, erimemiş tozlar ve geometrik kusurlar gibi, parçaların mekanik özelliklerini etkileyebilecek birçok etken bulunmaktadır. Kusurların haricinde; üretim açısı, lazer gücü, lazer tatbik süresi ve tarama hızı gibi çeşitli üretim parametreleri de mikro kafes yapıların mekanik özelliklerini ciddi ölçüde etkilemektedir.



Şekil 1.6. SLM ile üretilen yapıların SEM görüntüleri; a) mikro kafes yapının görüntüsü ve b) üretim sırasında iç yapıda meydana gelen boşlukların görüntüsü [36].

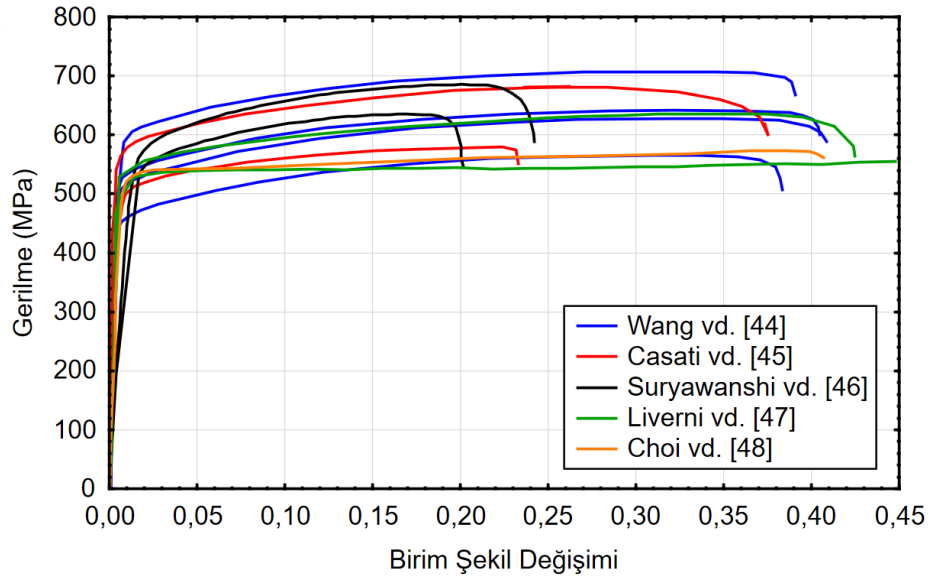
SLM eklemeli imalat yönteminde; demir bazlı tozlar [37], Inconel alaşımları (In718, In625) [38], paslanmaz çelikler (316L [6], 304 [39]), alüminyum alaşımları [40], saf titanyum [41] ve titanyum alaşımları (TiAl6V4 [42], Ti24Nb4Zr8Sn [40]) gibi birçok toz malzemesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada 316L paslanmaz çelik tozların kullanımı ile üretilen mikro kafes yapılar incelenmiştir. Bu sebeple literatürde, SLM ile üretilmiş 316L çeliklerine ait gerilme-birim şekil değişimini inceleyen çalışmalara odaklanılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda çeşitli üretim parametreleri ile imal edilmiş 316L paslanmaz çelik numunelerin mekanik özellikleri Tablo 1.1’de özetlenmiştir.

Tablo 1.1. Çeşitli SLM üretim parametrelerine sahip 316L paslanmaz çeliğinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

| İlgili Çalışmalar    | Lazer Gücü (W) | Lazer Tatbik Süresi ( $\mu$ s) | Üretim Yönü (Y: yatay, D: Dikey) | Baskı Hızı (mm/s) | Katman Kalınlığı ( $\mu$ m) | Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) |
|----------------------|----------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Zhang vd. [43]       |                |                                |                                  |                   |                             |                                |                         |
| 1                    | 100            | -                              | Y (150 °C ön ısıtmalı)           | 300               | 50                          | 594,9 $\pm$ 35,2               | 194,8 $\pm$ 14,5        |
| 2                    | 100            | -                              | D                                | 300               | 50                          | 501,1 $\pm$ 8,3                | 151,5 $\pm$ 13,1        |
| 3                    | 100            | -                              | Y                                | 300               | 50                          | 547,6 $\pm$ 4,9                | 193,1 $\pm$ 4,1         |
| Wang vd. [44]        |                |                                |                                  |                   |                             |                                |                         |
| 1                    | 380            | 80                             | -                                | -                 | 150                         | 707                            | 95                      |
| 2                    | 380            | 120                            | -                                | -                 | 150                         | 641                            | 95                      |
| 3                    | 380            | 160                            | -                                | -                 | 150                         | 628                            | 95                      |
| 4                    | 380            | 200                            | -                                | -                 | 150                         | 565                            | 95                      |
| Casati vd. [45]      |                |                                |                                  |                   |                             |                                |                         |
| 1                    | 200            | -                              | Y                                | -                 | 50                          | 684,7 $\pm$ 4,7                | 155                     |
| 2                    | 200            | -                              | D                                | -                 | 50                          | 580,7 $\pm$ 14,5               | 102                     |
| Suryawanshi vd. [46] |                |                                |                                  |                   |                             |                                |                         |
| 1                    | 90             | -                              | Y                                | 1000              | 30                          | 621,7 $\pm$ 12                 | 73,2                    |
| 2                    | 90             | -                              | D                                | 1000              | 30                          | 509,0 $\pm$ 3                  | 34,4                    |
| 3                    | 90             | -                              | Y                                | 1000              | 30                          | 668,4 $\pm$ 5                  | 49,5                    |
| 4                    | 90             | -                              | D                                | 1000              | 30                          | 527,9 $\pm$ 7                  | 25,6                    |
| Liverani vd. [47]    |                |                                |                                  |                   |                             |                                |                         |
| 1                    | 150            | -                              | 45°                              | 700               | -                           | 637                            | 96,35                   |
| 2                    | 150            | -                              | D                                | 700               | -                           | 559                            | 93,99                   |
| Choi vd.[48]         |                |                                |                                  |                   |                             |                                |                         |
| 1                    | 90             | -                              | D                                | -                 | 25                          | 573.3 $\pm$ 5,8                | 72                      |



Tablo 1.1’de bahsedilen çalışmaların tümünde porozite oranı çok düşük çekme numunesi üretilmiş ve standart tek eksenli çekme testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çekme gerilmesi değerleri 492-707 MPa arasında elde edilirken, elastisite modülü değeri 25-209 arasında değişmektedir. Yatay olarak üretilen numunelerde çekme gerilmelerinin, dikey olarak üretilen numunelere göre 100-160 MPa daha fazla olduğu görülmektedir. Tablo 1.1’de değerleri özetlenen 316L paslanmaz çeliğinin gerilme-birim şekil değişimleri ise Şekil 1.7’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, tüm numuneler hemen hemen elastik-rijit plastik davranış sergilemektedir ve önemli bir pekleşme davranışı göstermemektedir. Numunelerin birçoğu 0,35-0,4 birim şekil değişimi değerlerinde kopmaktadır. Gerilme-birim şekil değişimi eğrilerindeki karakteristik benzerliğe rağmen, 316L paslanmaz çeliğinin farklı parametrelerde üretilmesi, parçaların gerilme ve elastisite modülü değerlerini ciddi oranlarda etkileyebilmektedir. Üretim parametreleri, ortam koşulları ve kullanılan cihaza bağlı olarak mekanik özelliklerin değişmesi nedeniyle, SLM ile üretilmiş 316L çeliğinin mekanik özelliklerini tanımlamak için tek bir gerilme-birim şekil değişimi yerine, bir aralık verilmesi daha doğru olmaktadır.



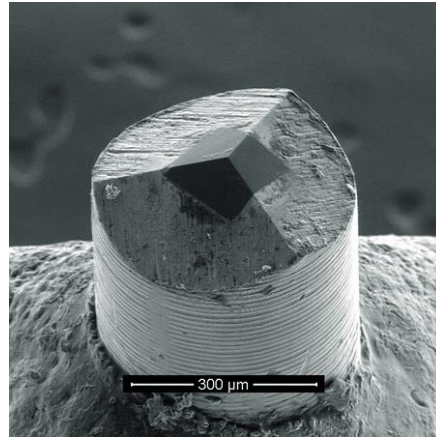
Şekil 1.7. Çeşitli üretim parametreleri ile 316L paslanmaz çeliğinden üretilen numunelere ait gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması

## 1.4. Nano İndentasyon ile Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Bu bölümde hem nano-indentasyon hem de nano-indentasyon eğrileri kullanılarak malzemelerin mekanik özelliklerinin nasıl tahmin edilebileceği hakkında genel bilgiler sunulmaktadır.

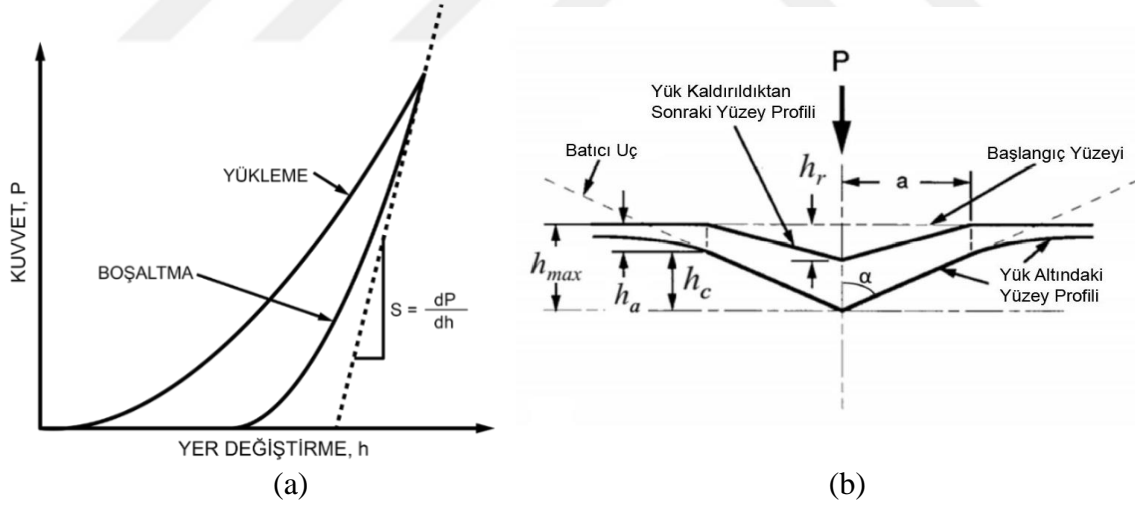
### 1.4.1. Nano İndentasyonun Yöntemi

Sertlik malzemenin aşınma ve delinmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Malzeme sertliğinin belirlenmesinde malzeme çeşitleri ve yük miktarına göre Knoop, Vickers, Brinell ve Vickers gibi çeşitli sertlik testleri kullanılmaktadır. Sertlik testlerinde, sertliği ve elastisite modülü bilinen bir batıcı uç ile, sertlik ve elastisite modülü bilinmeyen bir parçanın yüzeyine kuvvet uygulanmaktadır. Nano-indentasyonun sertlik testinin farklı yönü ise, uygulanan kuvvet sonucunda meydana gelen yer değiştirmenin mikron ( $10^{-6}$  m) veya milimetre ( $10^{-3}$  m)'den ziyade nanometre ( $10^{-9}$  m) cinsinden ifade edilebilmesidir [49]. Bu sayede  $5 \times 5$  mm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip bir numune, yüzlerce nano-indentasyon testi yapmaya yeterlidir [50]. Bu sebeple kaplamalar gibi çok ince yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde nano-indentasyon yöntemi sıkça kullanılmaktadır [51-53]. Nano-indentasyon testlerinde genellikle elmas malzemeden yapılmış Berkovich batıcı uç kullanılmaktadır. Berkovich ucun taramalı elektron mikroskop altındaki bir görüntüsü Şekil 1.8'de görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere Berkovich, sivri bir batıcı uçtur ve üçgen piramit geometriye sahiptir.



Şekil 1.8. Berkovich ucunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü [54].

Nano-indentasyon testleri sertlik ve elastisite modülünün belirlenmesini sağlarken aynı zamanda tahribatsız bir yöntem olarak kabul edilmektedir [49]. Nano-indentasyonda meydana gelen kuvvet-yer değiştirme değerleri ile deformasyon yapısı şematik olarak şekil 1.9'da verilmiştir. şekil 1.9a'da kuvvetin yüklenmesi ve boşaltılması ile elde edilen tipik bir yer değişimi eğrisi gösterilmiştir. Burada boşaltma eğrisinin eğimi (S) numunenin elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılmaktadır. Boşaltma eğrisinde kuvvetin sıfıra geldiği nokta, numune yüzeyinde meydana gelen izin batma derinliğini vermektedir. Yükleme eğrisinin sona erdiği nokta ise maksimum kuvvet ( $P_{maks}$ ) ve maksimum batma derinliğine ( $h_{maks}$ ) ulaşıldığı durumdur. şekil 1.9b'de ise uygulanan kuvvet ile yüzeyde oluşan deformasyonun şematik resmi verilmiştir. Uygulanan  $P_{maks}$  kuvveti için  $h_{maks}$  batma derinliğine ulaşılmaktadır. Batıcı uç ile numune arasındaki temaslı bölgenin batma derinliği  $h_c$ , batıcı uç ile numune arasındaki temassız bölgenin derinliği ise  $h_a$  olarak tanımlanmıştır. Yükün kaldırılmasından sonra numune yüzeyinde elastik toparlanma meydana gelmektedir. Yük kaldırılması sonrasında sadece plastik şekil değişiminin okunduğu yüzey resminin derinliği ise  $h_r$  olarak verilmiştir.



şekil 1.9. Nano indentasyon testinden elde edilen sonuçlar; a) tipik bir nano-indentasyon yükleme-boşaltma eğrisi, b) nano-indentasyon yüzey deformasyon yapısı [55].

Sertlik değeri (H) Eşitlik 1.1 ve 1.2'nin yardımı ile hesaplanabilir [55].

$$H = \frac{P_{maks}}{A} \quad (1.1)$$

$$A = 3\sqrt{3}h_c^2 \tan^2 \theta_b \quad (1.2)$$

Buradaki  $\theta_b$  değeri ise Berkovich ucun yarım açısıdır ( $65,27^\circ$ ). Elastisite modülünün hesaplanmasında nano-indentasyon eğrisindeki yükün boşaltma eğrisinin eğimi Eşitlik 1.3'de yerine konularak indirgenmiş elastisite modülü elde edilmektedir [55].

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} S}{2 \sqrt{A}} \quad (1.3)$$

Burada;  $E_r$  indirgenmiş elastisite modülü,  $S$  boşaltma eğrisinin başlangıç eğimi ve  $A$  batıcı ucun iz düşüm alanını vermektedir. İndirgenmiş elastisite modülü, batıcı ucun ve numunenin elastisite modüllerini içermektedir. İndirgenmiş elastisite modülü Eşitlik 1.4'de yerine konularak, numunenin elastisite modülü ( $E_s$ ) belirlenebilmektedir [55].

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-v_i^2}{E_i} + \frac{1-v_s^2}{E_s} \quad (1.4)$$

Eşitlik 1.4'deki  $v_i$  ve  $E_i$ , sırasıyla batıcı ucun Poisson oranı ve elastisite modülünü ifade ederken (standart Berkovich elmas uç için  $v_i = 0,07$ ;  $E_i=1140$  GPa),  $v_s$  ve  $E_s$  numunenin Poisson oranı ve elastisite modülünü göstermektedir.

#### 1.4.2. Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Tersine sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak, sertlik ve elastisite modülünün elde edilmesi için, 1992 yılında Oliver vd. [55] tarafından ileri sürülmüştür. Sonrasında bu yöntem, mekanik davranışları karakterize etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Tahribatsız olması ve küçük alanda uygulanabilmesi sebebiyle standart mekanik testlerin gerçekleştirilemediği durumlarda kullanılabilmesi, bu yöntemin en büyük avantajlarından. Literatürde genelde ince film kaplamaların [51-53], kaynakta ısı tesiri altında kalan bölgelerin [50, 56], malzeme içerisindeki çeşitli fazların [57] ve standart yöntemlerle belirlenemeyen durumlarda mekanik özelliklerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır.

Tersine sonlu elemanlar ile gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin elde edilmesi yöntemine literatürde yaygın olarak görülmektedir. Örneğin; Bouzakis vd. [58] gerilme-birim şekil değişimi eğrilerini çeşitli batma derinlikleri ile yapılan nano-indentasyon testlerinden elde etmişlerdir. Li vd. [59] benzer çalışmaları Berkovich batıcı uç yerine dairesel uçlar ile gerçekleştirmiştir. Bono [50] ise literatürde sıkça kullanılan, plastik bölge

formüllerindeki bilinmeyen katsayıların tahmini yöntemini, birden fazla deneyin ağırlıklı ortalamalarını alan bir algoritma kullanmıştır.

Tersine nano indentasyon testlerinde dikkat edilmesi gereken bir konu da sonucun tekilliği olmuştur. Bazı malzemelerin aynı kuvvet-yer değiştirme eğrilerini farklı malzeme parametreleri ile vermesi söz konusu olabilir [60]. Bu sorunu aşmak için Tho vd. [60] farklı açığa sahip batıcı uçların kullanılması gerektiğini öne sürmüştür. Chen vd. [61] yaptıkları çalışmada, farklı açığa sahip batıcı uçlarda bile farklı malzeme özellikleri ile aynı sonuçları veren “mistik malzemelerin” üzerine çalışmıştır. Bu sebeple çalışılan malzeme için sonucun tekilliğinden emin olunmalıdır. Pham vd. [62] indirgenmiş elastisite modülünün akma gerilmesine oranı 225’den büyük ise sonucun tekil olacağını öne sürmüştür ( $E_T/\sigma_Y > 225$ ).

Genel olarak tersine sonlu elemanlar yöntemi, sonlu elemanlar modelinde malzemenin mekanik özelliklerinin sistematik olarak deneme yanılma yöntemi ile değiştirilerek, gerçek nano-indentasyon veya mikro-indentasyon eğrilerine yaklaşım yapılması prensibine dayanmaktadır [55, 63]. Bir başka ifade ile bu yöntem, gerçeğe daha yakın mekanik özelliklerin analizde kullanılmasıyla, gerçek ve sayısal nano-indentasyon eğrileri arasındaki farkın azalacağı prensibine dayanmaktadır.

Tersine sonlu elemanlar yöntemi, genellikle gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini tanımlayabilecek bir formül seçimi ile başlamaktadır. Malzemelerin plastik davranışlarını karakterize etmekte yaygın olarak kullanılan formüllerden bazıları (Eşitlik 1.5-1.8) aşağıda verilmiştir.

$$\text{Holloman: } \sigma = k\varepsilon^n \quad (1.5)$$

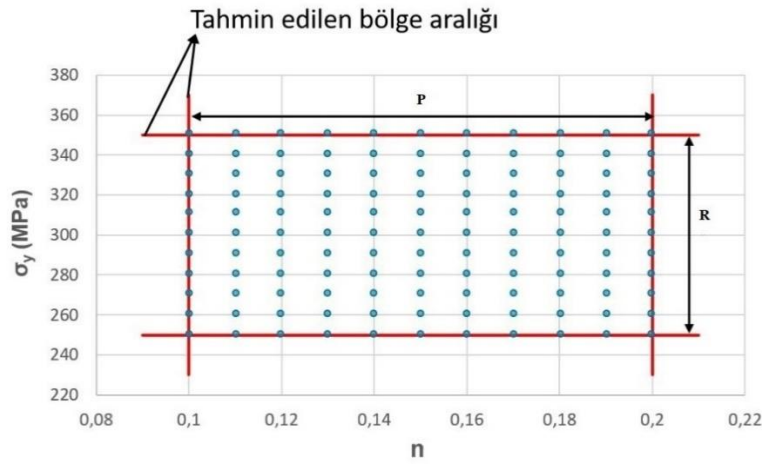
$$\text{Ludwig: } \sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n \quad (1.6)$$

$$\text{Swift: } \sigma = k(\varepsilon_0 + \varepsilon^n) \quad (1.7)$$

$$\text{Modifiye Holloman: } \sigma = E^n \sigma_Y^{(1-n)} \varepsilon^n \quad [50, 64, 65] \quad (1.8)$$

Formüllerdeki  $\sigma$  gerilme,  $\varepsilon$  birim şekil değiştirmesini,  $\sigma_Y$  akma gerilmesini,  $n$  pekleşme üstelini,  $k$  dayanım sabitini,  $\sigma_0$  ve  $\varepsilon_0$  düzeltme katsayılarıdır. Eşitliklerdeki  $k$ ,  $n$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_0$  ve  $\varepsilon_0$  bilinmeyen katsayılar için bir aralık tahmini yapılır. Literatürde genel olarak bilinmeyen parametreler (örneğin modifiye Holloman eşitliğinde  $n$  ve  $\sigma_Y$  değerleri) için bir aralık tahmini yapılmaktadır. Bu aralık  $P \times R$  sayıda bölünmektedir ve  $\sigma_y$  ve  $n$  değerleri için kombinasyon değerler bulunmaktadır. Şekil 1.10’da mavi noktalarla gösterilmiş noktalara karşılık gelen,  $\sigma_y$  ve  $n$  değerlerinin kombinasyonları için tek tek sonlu elemanlar analizi

gerçekleştirilir. Sonlu elemanlar sonuçları gerçek nano-indentasyonun kuvvet-yer değişimi eğrileri ile karşılaştırılır. Deneysel ve sayısal eğriler arasındaki minimum farkı veren  $\sigma_y$  ve  $n$  değerleri, malzemenin mekanik davranışı olarak kabul edilmektedir. Bu yöntem basit ve etkilidir. Fakat aralık tahmininin boyutu ve bölme sayısına göre sonuçlar hassasiyet göstermektedir. Bölme sayısının artması gerçeğe daha yakın sonuç verse de analiz süresini ciddi miktarda arttırmaktadır. Ayrıca tahmin aralığını küçük tutmak, istenilen sonuçların elde edilmesine mâni olabilir.

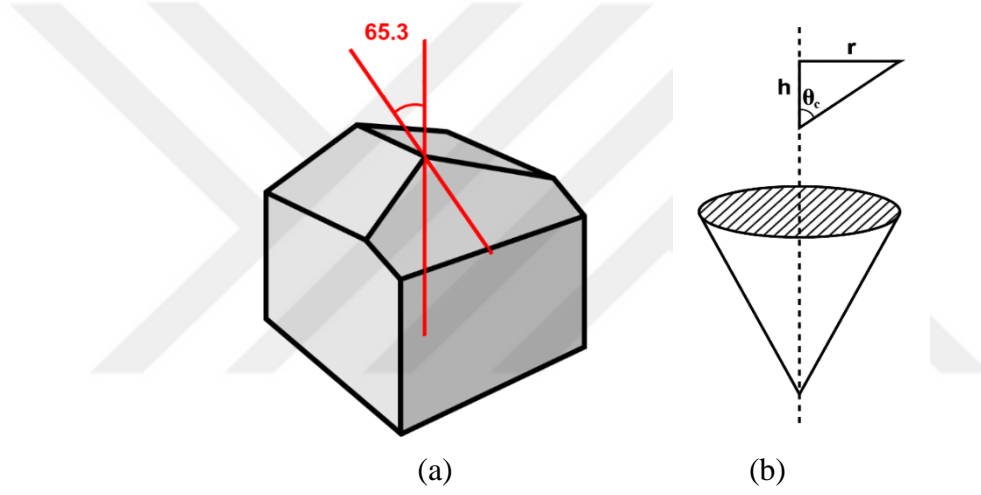


Şekil 1.10. Modifiye Holloman eşitliği için  $n$  ve  $\sigma_Y$  tahmin değerleri aralığının  $P \times R$  sayıda bölünmesi

### 1.4.3. Tersine Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Tersine sonlu elemanlar yöntemi için aksenal simetrik veya 3 boyutlu (3B) modeller kullanılabilir. Nano-indentasyon testlerinde genel olarak Berkovich batıcı ucun kullanılması sebebiyle 3B modelde, batıcı ucun gerçek geometrisi modellenenmektedir. Fakat analizlerde deneme yanılma yöntemi kullanılması sebebiyle çok fazla analiz yapılması gerekmektedir. Bu sebeple analiz süresinin azaltılması adına aksenal simetrik model yaygın olarak kullanılmaktadır [64, 66-68]. 3B modelin kullanılması durumundaki analiz sonucunda, aksenal simetrik modele çok küçük ufak miktarda bir değişiklik olurken, aksenal simetrik model kullanmak analiz süresini ciddi miktarda azalmaktadır [20]. Gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin tersine sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmesi için yüzlerce analizin koşturulması gerektiğinden az miktarda hata ile aksenal simetrik modelin kullanımı daha mantıklıdır.

Eksenel simetrik modelin uygulanmasında Berkovich batıcı uç (Şekil 1.8) piramit olarak modellenemeyeceğinden eşdeğer konik uca dönüştürülmesi gerekmektedir. Modelleneyecek olan konik ucun aynı batma derinliğinde aynı iz düşüm alanını vermesi gerekmektedir. Şekil 1.11’de Berkovich uç ve eşdeğer konik ucun geometrileri verilmiştir. Şekil 1.11a’da 65,3 yarım açısına sahip Berkovich ucunun gerçek geometrisi gösterilmiştir. Konik bir şeklin yüksekliğe bağlı iz düşüm alanı ile Berkovich ucun yüksekliğe bağlı iz düşüm alan formülü birbirine eşitlendiğinde, konik ucun yarım açısının 70,3 olması gerektiği Eşitlik 1.9 ve Eşitlik 1.10’den görülmektedir [69]. 70,3 koniklik açısına sahip geometri ise Şekil 1.11b’de görülmektedir.



Şekil 1.11. Berkovich ucun a) gerçek ve b) eşdeğer konik geometrisi

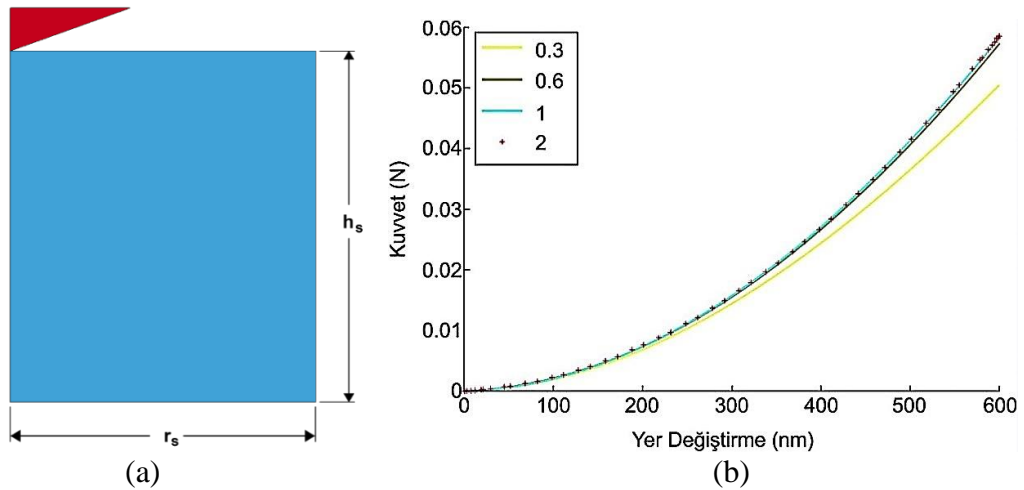
$$\frac{A_b}{h_c} = \frac{A_c}{h_c} \Rightarrow \frac{3\sqrt{3}h_c^2 \tan^2(\theta_b)}{h_c} = \frac{\pi h_c^2 \tan^2(\theta_c)}{h_c} \quad (1.9)$$

$$\tan \theta_c = \left( \frac{3\sqrt{3} \tan^2(65,27)}{\pi} \right)^{1/2} = 70,3 \quad (1.10)$$

$A_b$ ,  $A_c$ ,  $\theta_b$  ve  $\theta_c$  sırasıyla Berkovich ve konik batıcı uç için iz düşüm alanlarını ve yarım açılarını vermektedir.  $h_c$  değeri ise batma derinliğidir.

Batma derinliğinin çok düşük olduğu testlerde boyut etkisi meydana gelmeye başlayacağı için sonuçlarda tutarsızlıklar oluşabilir [70]. Bunun yanında batma derinliğinin düşük olması durumunda, batıcı uca yuvarlatma yapılması gereksinimi doğurmaktadır. Berkovich uç için yuvarlatma yarıçapı 100-400 nm arasında kabul edilmektedir [71-73].

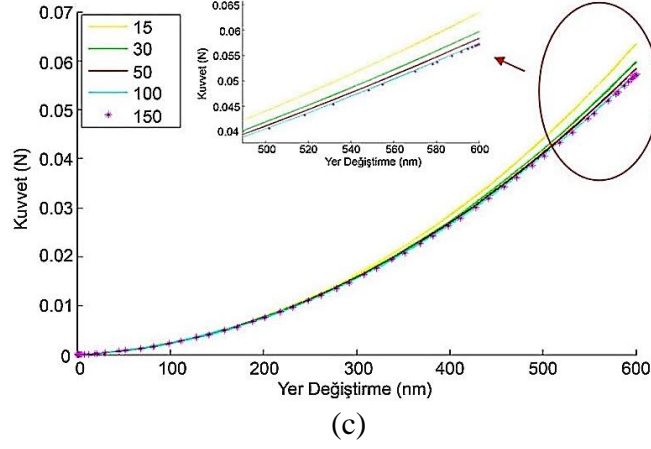
Eksenel simetrik modelin oluşturulmasında, sınır şartlarının indentasyonu etkilememesi için modelin belirli yüksekliğe ve yarıçapa sahip olması gerekmektedir. Bu değerler üzerine detaylı bir çalışma Poon vd. [74] tarafından yapılmıştır ve bu çalışmada elde edilen boyutlandırma oranları Şekil 1.12'de görülmektedir. Şekil 1.12a'da nano-indentasyon uygulanacak numunenin şematik resmi verilmiştir. Numunenin boyu  $h_s$  ve genişliği ise  $r_s$  olarak verilmiştir. Sınır şartlarının batıcı uca yakın olması kuvvet değerlerini, uzak olması ise analiz süresini etkileyecektir. Farklı numune çapı ile numune derinliği oranları ( $r_s/h_s$ ) Şekil 1.12b'de verilmiştir. Şekil 1.12b'den görüldüğü üzere  $r_s/h_s$  oranının artması ile kuvvet değerleri yakınsama göstermektedir.  $r_s/h_s$  oranının 1'den büyük olması, kuvvet değerine hiçbir etki yapmamaktadır. Kuvvet değerinde çok az bir fark meydana getirdiğinden, analiz süresini kısaltmak için  $r_s/h_s$  oranda 0,6 civarında kabul edilebilir. Ayrıca boyutlandırmada numune derinliği ile batıcı ucun maksimum batma derinliği oranı ( $h_s/h_{max}$ ) da önemlidir. Burada numunenin alt yüzeyindeki ankastre sınır şartının kuvvet değerini arttırmayacak kadar uzakta olması gerekmektedir. Farklı  $h_s/h_{max}$  oranları için kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 1.12c'de verilmiştir. Şekil 1.12c'den görüldüğü gibi  $h_s/h_{max}$  değerlerinin artması ile kuvvet değerleri düşmekte ve yakınsamaktadır.  $h_s/h_{max}$  oranında 100 değerinden yüksek değerlerdeki analiz sonuçlarında kuvvet değerlerinde bir farklılık olmadığı gözlemlenmiştir. Analiz süresini minimuma indirmek için  $h_s/h_{max}$  oranının 30-50 arasında tutulması, sonuçların doğruluğu açısından yeterli olacaktır.



Şekil 1.12. Nano-indentasyon sonlu elemanlar modelinin boyutlandırılması; a) model geometrisi, b)  $r_s/h_s$  oranı için kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve c)  $h_s/h_{max}$  oranı için kuvvet-yer değiştirme eğrileri



Şekil 1.12'nin devamı



## 1.5. Literatür Araştırması

Bu bölümde tezin amacına uygun olarak, mikro kafes yapıların SLM yöntemiyle üretilmesi üzerine uygulanan çalışmalara ve mikro kafes yapıların sayısal modelleme çalışmalarına yer verilecektir.

### 1.5.1. SLM ile Hücresel Malzeme Üretimi

Sandviç yapıların dolgu malzemesi olarak, darbe sönümlenme elemanları, ses izolasyonu, ısı yalıtım gibi pek çok uygulama alanlarında etkin şekilde kullanılacak metalik mikro kafes yapılar, lazer ve katmanlı üretim teknolojilerindeki hızlı ilerlemenin etkisiyle günümüzde efektif şekilde üretilebilmektedir. Seçici lazer ergitme yöntemi, metalik mikro yapıların üretiminde kullanılan en önemli üretim yöntemlerinden biri olma potansiyeline sahip teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır [75, 76]. Bu teknolojiyi kullanarak Ushijima vd. [20] ve Gümrük vd. [6, 77], hacim merkezli kübik (Body Centered Cubic, BCC) yapıya sahip, paslanmaz çelik mikro kafes blokları üretmiştir. Üretilen yapıların basma ve diğer yükleme koşulları altındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmalarda spesifik elastisite modülü ve başlangıç çökme mukavemeti (gerilmesi) gibi değerlerin yanında, hücrelerin çökmesi sırasında mikro tellerde meydana gelen deformasyon mekanizmalarını araştırılmıştır. Yapılan gözlemler sonucunda; BCC mikro kafeslerin çökme davranışının mikro tellerin kesişim noktalarına yakın ve bunun sonucunda kesişim

noktaları etrafında eğilme deformasyonu şeklinde meydana gelen plastik şekil değişiminden kaynaklandığı belirlenmiştir. Mikro kafeslerin elastisite modülünün ve mukavemet değerlerinin iyileştirilmesi adına farklı malzemelerden imalat ve farklı kafes yapı topolojilerinin kullanılması gibi çalışmalar son zamanlarda öne çıkmaktadır. Hafif malzemelerin kullanılmasına örnek olarak Ti64 [78] ya da AlSi10Mg [79] üzerine yapılan çalışmalar gösterilebilirken farklı mikro kafes topolojilerin kullanılmasına örnek olarak sekiz yüzlü kafes (octet truss) yapı [80] üzerine yapılan çalışmalar sunulabilir. Paslanmaz çeliğe alternatif kullanılan hafif malzemeler daha gevrek olma eğilimindedir ve daha karmaşık kafes topolojileri daha karmaşık hasar modlarına sahip olmaktadır.

Mikro kafes yapıların üretiminde farklı imalat teknikleri de kullanılabilir. Bunlara örnek olarak elektron ışını ile ergitme (electron beam melting) [81] ve foto-polimer teknik (photo polymer wave guides) [82] verilebilir. Başka bir yöntemde polimer kafes yapıları oluşturulduktan sonra, kafes yapıların yüzeyine kaplama uygulanmıştır. Sonrasında polimerin eritilerek alınması ile içi boş, ultra hafif mikro kafes yapıları oluşturulabilmektedir [82]. Ayrıca, foto polimer dalga izleri ile, polimerik kafes yapıların üretimi gerçekleştirilebilir ve daha sonra bu polimer metalik mikro kafes yapıların dökümünün yapılmasında kullanılabilir [83]. Son zamanlarda Brouwhuis vd. [84] tarafından yapılan bir çalışmada hücresel malzemelerin mekanik özelliklerinin kaplama yöntemi ile iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada yazarlar, sac şekil verme yöntemini (stretch band sheet forming) kullanarak hücresel çelik yapı (tel enine kesiti 0,7x0,9 mm ve hücre boyutu 6,35 mm) üretmişler. Üretilen hücresel yapı akım darbesi yöntemi (pulse current method) kullanılarak nano kristalli nikel ile yaklaşık 23-60µm kalınlıklarda kaplamışlardır. Yapılan çalışma ile 50µm'lik bir kaplama kalınlığının, çökme davranışından ödün vermeden, hücresel malzemenin basma mukavemetini ikiye katladığını göstermişlerdir.

### **1.5.2. Kafes Yapıların Modellenmesi**

SLM ile üretilen kafes yapılar, oldukça karmaşık bir geometriye sahiptirler (Şekil 1.6). Mikro tellerin yüzeyine yapışmış ergimemiş veya yarı ergimiş tozlar, mikro tellerin geometrik kusurları, iç yapıdaki mikro çatlaklar ve boşluklar, gerçek geometrinin modellenmesini zorlaştırmaktadır. Bu sebeple kafes yapıların modellenmesi için, literatürdeki çalışmalarda, çeşitli geometrik kabuller yapılmıştır. Mikro tellerin modellenmesinde yaygın olarak uygulanan yöntemler Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

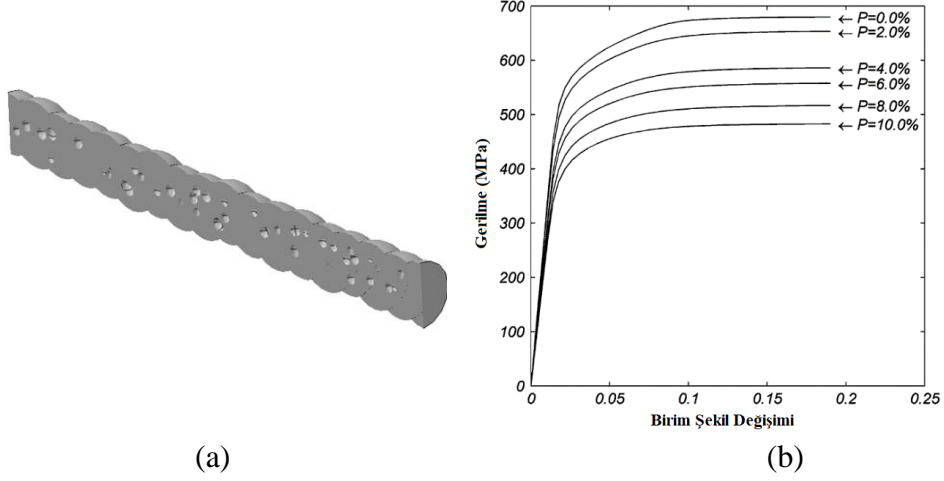
Literatürdeki bazı çalışmalarda, mikro tel üzerindeki tüm kusurların ihmal edildiği modelleme yaklaşımı uygulanmaktadır [85, 86]. Bu çalışmalarda, mikro tellerin tamamen silindirik bir yapıya sahip olduğu ve mikro telin yüzeyinde hiçbir kusurun bulunmadığı varsayılmıştır. Silindirin ortalama çapı, SEM ile yapılan ölçümlerden veya telin ağırlık ve boyunun ölçülmesi ile hacim hesabından çıkarılmaktadır. Silindirik yapıya sahip mikro telin modellenmesi oldukça kolaydır ve gerçekleştirilecek sonlu elemanlar analizleri için gerekli işlem gücü gereksinimi düşüktür. Fakat mikro kafes yapıların mekanik davranışlarını gerçeğe yakın şekilde incelenebilmesi için mikro tellerde bulunan kusurların modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Campoli vd. [87] yaptıkları çalışmada, mikro telleri kusursuz bir silindir olarak modellemek yerine, kiriş elemanların yan yana dizilmesi şeklinde modellemişlerdir. Kiriş elemanların boyutları değiştirilerek, mikro tellerdeki değişken kesit alanının elde edilmesi amaçlanmıştır. Fakat modelleme yönteminde, telin merkez ekseninden kaçıklıkların modellenmesinde yetersiz kalmaktadır. Benzer bir yaklaşım Ravari vd. [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise yan yana dizilen kirişler yerine, geometrik kusurların üzerinden çizilen bir eğrinin, mikro telin merkez eksenini etrafında döndürülmesi ile elde edilmiştir. Bu yaklaşım ile oluşturulan model, değişken kesit alanını daha iyi temsil etmektedir. Fakat bu yaklaşım da telin merkez ekseninden kaçık kusurların modellenmesinde yetersiz kalmaktadır. Ravari ve Kadkhodaei [88], mikro tellerin, çeşitli çaplara sahip kürelerin yan yana dizilmesi ile oluşturulabileceği kabulünü öne sürmüşlerdir. Bu yaklaşımda kürelerin merkez noktaları, telin merkez çizgisi üzerinde bulunmamaktadır. Bu sebeple, diğer yaklaşımlardakinin aksine, merkez ekseninden kaçık kusurların modellenmesine imkan sağlamaktadır.

Tablo 1.2’de bahsedilen yaklaşım yöntemlerinden hiçbiri gerçek geometriyi tamamen vermeyeceği kolayca anlaşılabilir. Gerçek geometride, telin kesitleri mükemmel dairesellik göstermek yerine değişken, eliptik bir kesite sahip olmaktadır. Gerçek geometrinin modellenebilmesi için  $\mu$ -CT (micro-computed tomography, mikro-bilgisayarlı tomografi) tarama yöntemi son zamanlarda kullanılmaya başlanmıştır [89, 90]. Bu yöntemde tellerin üç boyutlu görüntüsü hassas bir şekilde taranarak bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Fakat tellerin üzerindeki bulunan yoğun miktarda yarı erimemiş veya erimemiş tozlar sebebiyle, aktarılan model üzerinde düzeltme filtresi uygulanmaktadır. Bunun sonucunda tozlar model üzerinden silinmektedir.

Tablo 1.2. Hücresel yapılardaki kusurların oluşturulma yöntemlerinin karşılaştırılması [89]

| Şematik Gösterim | Açıklama  | Nitelikler  |                      |   |                               |
|------------------|---|---|----------------------|---|-------------------------------|
|                  |   | DeneySEL olarak elde edilen ortalama tel çapının modellenmesi | Değişken kesit alanı | Tel uzunluğu boyunca gerilme konsantrasyonlarını yakalama | Merkez eksenenden kaçıklıklar |
|                  | Ortalama tel çapı bulunarak, bu çap değerine göre kusursuz model çizilmesi ile elde edilir [85, 86] | ✓   | ×                    | ×   | ×                             |
|                  | Çeşitli kesit alanına sahip kirişlerin yan yana dizilmesi ile elde edilir [87]                      | ✓   | ✓                    | ✓   | ×                             |
|                  | N adet düğüm noktasına sahip eğrinin, bir eksen etrafında döndürülmesi ile elde edilir [14]         | ✓   | ✓                    | ✓   | ×                             |
|                  | N adet kürenin bir araya gelmesi ile elde edilir [88]   | ✓   | ✓                    | ✓   | ✓                             |

Mikro kafes yapıların modellenmesinde iç yapıdaki boşluklar da (Şekil 1.6) önemli bir rol oynamaktadır. Bu boşluklar Tablo 1.2’de gösterilen yaklaşımlarda hesaba katılmamaktadır. Mikro kafes içerisinde bulunan bu boşluklar, malzemenin mukavemetini düşürücü etkiye sebep olmaktadır. Boşlukların modellenmesi üzerine bir çalışma Ravari vd. [88] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada, mikro tellerin içerisinde rastgele olarak küresel parçalar çıkarılmıştır. Boşluklu mikro telle ait bir model ve yüzdesel boşluk oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 1.13’de verilmiştir. Şekilden, boşlukların yüzdesel olarak artması ile malzemenin gerilme değerlerinin düştüğü gözükmemektedir.



Şekil 1.13. Mikro tellerin iç yapısında oluşan boşlukların modellenmesi; a) modelin görüntüsü ve b) boşluk oranına göre gerilme-birim şekil değişimi eğrileri [88].

## 1.6. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında kaplanmış mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının araştırılması ve mikro kafes yapıların geometrik kusurlarını içeren sonlu elemanlar modellerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Araştırma konusu olan mikro kafes yapılar, 316L paslanmaz çelik tozları ile seçici lazer ergitme yöntemi kullanılarak, BCC kafes topolojisine sahip olacak şekilde üretilmiştir. Kaplama yöntemi olarak akımsız nikel kaplama teknolojisinden yararlanılmıştır. Kaplanmış mikro kafeslerin mekanik davranışlarını araştırmaya yönelik gerçekleştirilen çalışmalar, bu alanda ilk olma özelliğini taşımaktadır. Bunun yanında ilgili literatür incelendiğinde mikro kafeslerin modellenmesi üzerine pek çok çalışma gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, SLM ile üretilen mikro kafeslerin mekanik davranışı tam anlamıyla yansıtan modeller henüz gerçekleştirilememiş olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında mikro kafeslerin geometrik kusurlarını dikkate alan modeller geliştirilmesi ve kusurların etkilerinin detaylı incelenmesi çalışmanın diğer bir amacını oluşturmaktadır. Tez kapsamında belirtilen amaçları gerçekleştirmeye yönelik çalışmalar için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

- SLM ile üretilmiş mikro kafes yapıların akımsız nikel ile kaplanması
- Kaplanmış ve kaplanmamış mikro tellerin deneysel mekanik davranışlarının incelenmesi

- Kaplama ve mikro tellerin mekanik özelliklerinin tersine sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmesi için optimizasyon analizlerinin yapılması
- Kusursuz sonlu elemanlar modelleri ile kaplanmış mikro kafeslerin mekanik davranışlarının sonlu elemanlar ile incelenmesi
- Taramalı elektron mikroskobu ile kafes yapıların geometrilerinin görüntüleri alınması
- Mikroskop görüntüleri üzerinden geometrik kusurların dağılımının çıkarılması ve SEM resimlerine uygun olacak şekilde kusurlu tellerin sonlu elemanlar modellerinin oluşturulması
- Kusurlu sonlu elemanlar modellerinin oluşturulması ve analizlerinin gerçekleştirilmesi



## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

Tez kapsamında seçici lazer ergitme ile üretilen BCC yapıya sahip mikro kafes yapıların mekanik davranışları incelenmiştir. Bu amaçla deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar; mikro kafes yapıların basma testleri ve nano-indentasyon testlerini içermektedir. Sayısal çalışmalarda ise mikro teller için kusursuz ve gerçeğe yakın olmak üzere iki farklı yaklaşım ile modelleme yapılmıştır. Kusursuz modelde malzeme parametrelerinin etkileri ve gerçeğe yakın modelde kusurların mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarla ilgili detaylar aşağıda başlıklar halinde sunulmuştur.

### **2.1. Numunelerin Üretimi**

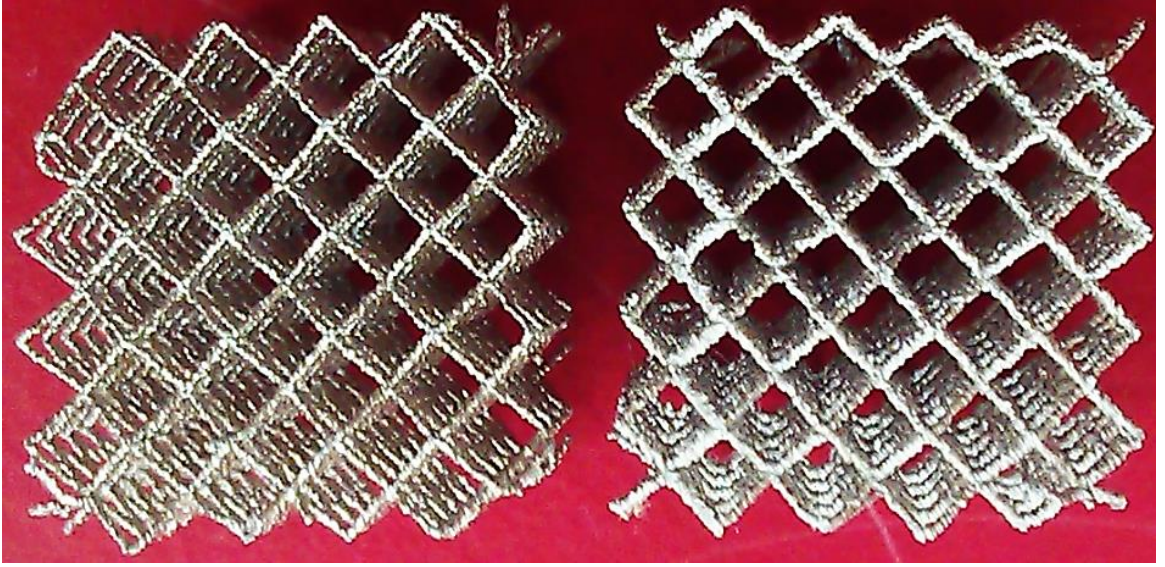
#### **2.1.1. Mikro Kafes Yapıların SLM ile Üretimi**

Testlerde kullanılan mikro kafes yapılar Liverpool Üniversitesinde, SLM MCP 250 Realizer II makinası tarafından üretilmiştir. SLM ile 316L paslanmaz çelik mikro kafes yapıların üretiminde Tsopanos vd. [7] tarafından uygulanan yöntem takip edilmiştir. Bu yöntemde mikro kafes yapıların SLM ile üretilmesindeki kullanılan parametreler; optimum lazer gücü 90W, katman kalınlığı 50  $\mu\text{m}$  ve lazer tatbik süresi (laser exposure time) 1000  $\mu\text{s}$ 'dir. Üretim yöntemi ise tek nokta lazer (single spot laser) yaklaşımıdır. Mikro kafes bloklar 2,5 mm'lik hücre boyutuna sahip 5 hücreden meydana gelmekte ve toplam kenar uzunluğu 12,5 mm olan kübik şekilde imal edilmişlerdir. Mikro tellerin nominal çapları yaklaşık 180-200  $\mu\text{m}$ 'dir.

#### **2.1.2. Mikro Kafes Yapıların Nikel ile Kaplanması**

Akımsız nikel kaplama tekniğinin geliştirilmesi üzerine yapılan bilimsel çalışmaların bir derlemesi (review) Sudager vd. [66] tarafından gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi için gerekli solüsyonlar bir akışkan içerisine karıştırılmaktadır ve oluşan çözeltinin kendisi bir dahili akım sağlamaktadır. Akışkan içinde bekleme süresine bağlı olarak, malzeme yüzeyinde belirli bir kalınlıkta kaplama oluşmaktadır.

Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için mikro kafes yapılar akımsız nikel ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi Yenatech Kimya tarafından, Tablo 2.1’de i verilen metodoloji kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu metodolojide, üretilen SLM blokların ilk olarak 2 dakika boyunca bir elektrolitik yöntem kullanılarak yüzeyi temizlenmiştir. Su ile yıkandıktan sonra, mikro kafesin yüzeyleri klorürlü nikel (chloride nickel) ve hidroklorik asit banyosu (hydrochloric acid bath) (5 dakika) kullanılarak hazırlanmıştır. Kaplama işleminde nikel sülfat (nickel sulfate) (33 g/l) ve sodyum hipofosfit (28 g/litre) (sodium hypophosphite) banyosu kullanılmıştır. Kaplama kalınlığı göz önünde bulundurularak daldırma süresi 80 dakika olarak seçilmiştir. İşlem sonrasında kaplanmış hücreler, artık gerilmeleri gidermek amacı ile sıcak su içerisinde 30 dakika tutulduktan sonra oda sıcaklığındaki su içerisinde termal şoka maruz bırakılmış ve son işlem olarak kurutulmuştur. Mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla ilave ısıl işlemler de uygulanabilir. Fakat bu çalışmada ilave işlem kullanılmamıştır. Şekil 2.1’de kaplanmış ve kaplanmamış mikro kafes blokların resimleri verilmektedir. Görüldüğü üzere kaplanmış kafes yapı daha parlak ve mikro tellerin çapları da daha büyük olmaktadır.



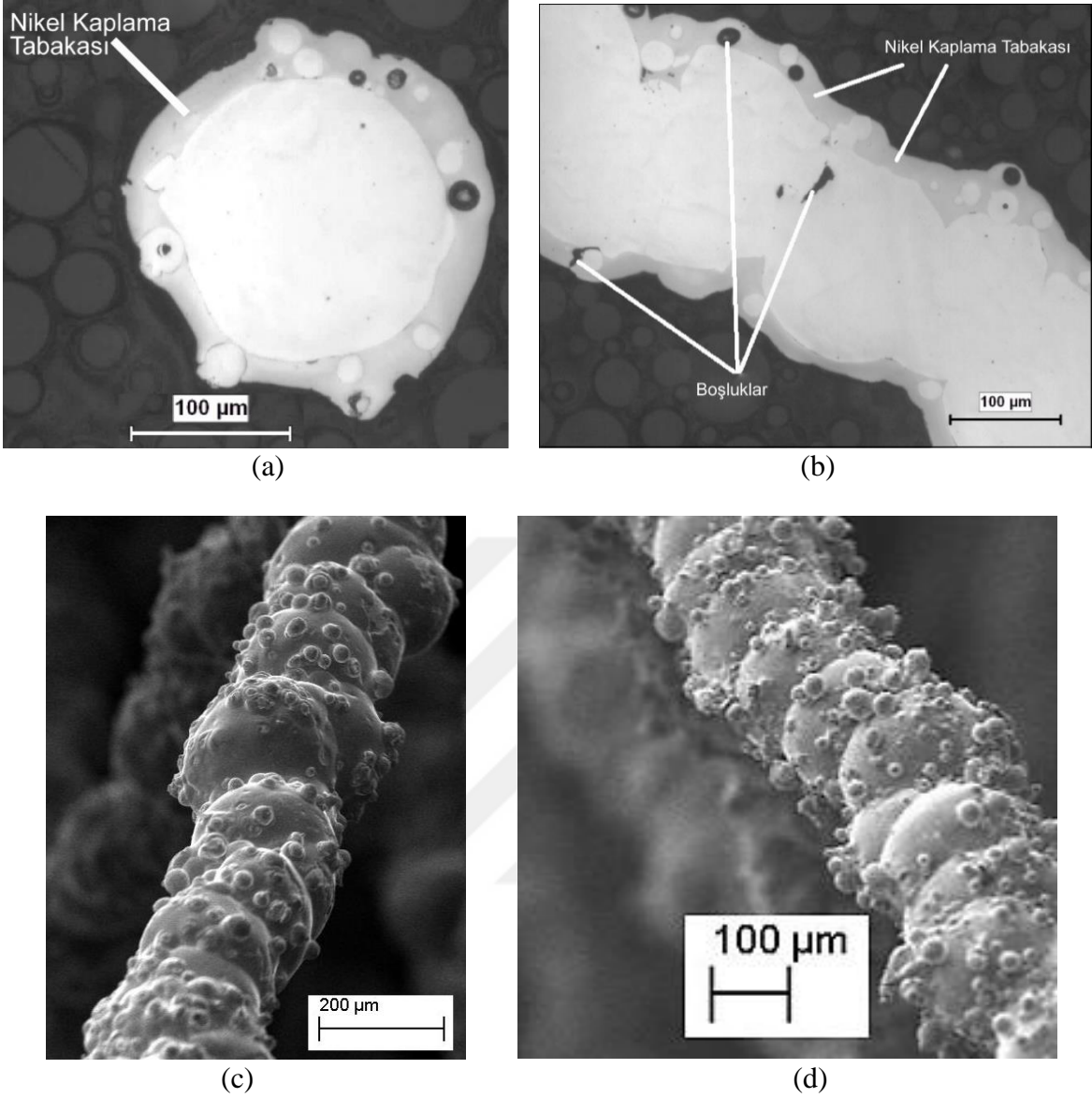
Şekil 2.1. Nikel kaplanmış (Sağ) ve kaplamasız (Sol) mikro kafes bloklar



Tablo 2.1. 316L Paslanmaz çelik mikro kafes yapıların nikel kaplama aşamaları

| Aşama | Uygulanan yüzey işlemi   | Sıcaklık<br>(°C) | Süre<br>(min) | Volt | pH   |
|-------|--|------------------|---------------|------|------|
| 1     | Elektrolitik arındırma   | Oda sıcaklığı    | 2             | 4    |      |
| 2     | Su ile yıkama  |                  | 1             |      |      |
| 3     | Kaplama öncesinde klorürlü nikel ve hidroklorik asit banyosu ile yüzey aktivasyonu | Oda sıcaklığı    | 5             | 6    |      |
| 4     | Su ile yıkama  |                  | 1             |      |      |
| 5     | Nikel sülfat ve sodyum hipofosfit banyosunda fosforlu nikel kaplama                | 88               | 80            | -    | 5.30 |
| 6     | Su ile yıkamak   |                  |               |      |      |
| 7     | Sıcak su ile yıkama  | 100              | 1             |      |      |
| 8     | Gerilim giderme  | 200              | 30            |      |      |
| 9     | Saf suda termal şok  | Oda sıcaklığı    | 1             |      |      |
| 10    | Sıcak su ile yıkama  | 100              | 1             |      |      |
| 11    | Havada kurutma   |                  |               |      |      |

Şekil 2.2a, b’de sırasıyla tellerin uzunlamasına ve yanlamasına kesitleri ve bu kesitler yardımıyla kaplama kalınlığı görülmektedir. Şekil 2.2c, d’de sırasıyla kaplamalı ve kaplamasız tellerin dış görünüşleri gösterilmektedir. Bu resimlerden, kaplama kalitesinin iyi olduğu görülmektedir ve kaplama kalınlığının yaklaşık olarak 17  $\mu\text{m}$  olduğu saptanmıştır. Ayrıca mikro tel ve kaplama arayüzündeki yapışmanın da düzgün ve kaliteli olduğu görülmektedir. Mikro teller ve kaplama arayüzünün iyi kalitede olduğu da kolayca şekil 2a’dan anlaşılmaktadır. Ayrıca bu şekillerde belirtilmek gerekirse SLM ile üretilmiş mikro yapıların çok ciddi miktarda geometrik kusur içerdiği görülmektedir. Şekil 2.2c, d’de 40  $\mu\text{m}$ ’lik çaplarda pek çok erimemiş veya yarı-ergimiş küresel tozların mikro tellerin yüzeylerine yapışmış olduğu görülmektedir. Yapısal uygulamalarda kullanılması durumunda bu kusurların hesaba katılması gerektiği düşünülmektedir. Daha önceki yapılan çalışmalarda, bu değişkenlere rağmen, mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının tekrarlanabilir ve öngörülebilir olduğu gösterilmiştir [6, 20, 75-78]. İlave olarak Şekil 2.2 hem kaplamada hem de mikro tellerde boşlukların (porozite) olduğu gözükmektedir. Bunların deformasyon sırasında malzememin mekanik davranışını ve kopmayı etkileyeceği kolayca anlaşılabilir.



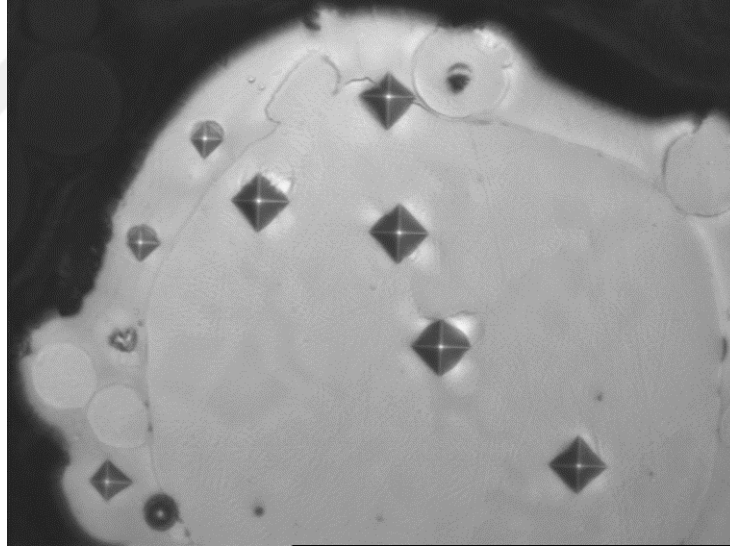
Şekil 2.2. Mikro teller ait elektron mikroskobu görüntüleri; a) tel kesiti, b) boyuna tel kesiti c) kaplanmış mikro tel dış yüzeyi ve d) kaplanmamış mikro tel dış yüzeyi

## 2.2. Mekanik Testler

### 2.2.1. Mikro Sertliklerin Ölçülmesi

Bu çalışmada, kaplama kalınlığının ve kaplama malzemesinin hücresel yapının mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması hedeflenmiştir ve bu sebeple öncelikle ana malzemelerin mekanik özelliklerinin hesaplanması gerekmektedir.

Şekil 2.3, çeşitli noktalara uygulanan mikro Vickers sertlik testlerinin izleri göstermektedir. Sertlik testleri Struers Duramin mikro-indenter cihazında, 98 ve 245 mN gibi çeşitli kuvvetler uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda kaplama için 777-800 HV, paslanmaz çelik için 260-280 HV değerleri elde edilmiştir. Şekil 2.3’de kaplama üzerinde meydana gelen izlerin büyüklüğü, mikro teldeki izlerden çok daha küçük görülmektedir. Bu deformasyon oranındaki fark, kaplamanın sertliğinin mikro telin sertliğinden 2,75-3 kat daha yüksek olmasını doğrulamaktadır. Kolayca anlaşılacağı gibi mikro sertlik değerleri malzemenin karakteristiğini ortaya koymaktadır. Fakat sertlik değerleri tek başına sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında yeterli değildir. Sonlu elemanlarda kullanılacak malzeme özelliklerinin elde edilebilmesi için, farklı metodolojilerin geliştirilmesi gerektiği görülmektedir. Bu sebeple üretilmiş bloklar üzerinde yapılan nano-indentasyon testleri kullanılarak tersine sonlu elemanlar algoritması geliştirilmiştir ve bu yöntemle malzemelerin mekanik özellikleri elde edilmesi planlanmıştır.

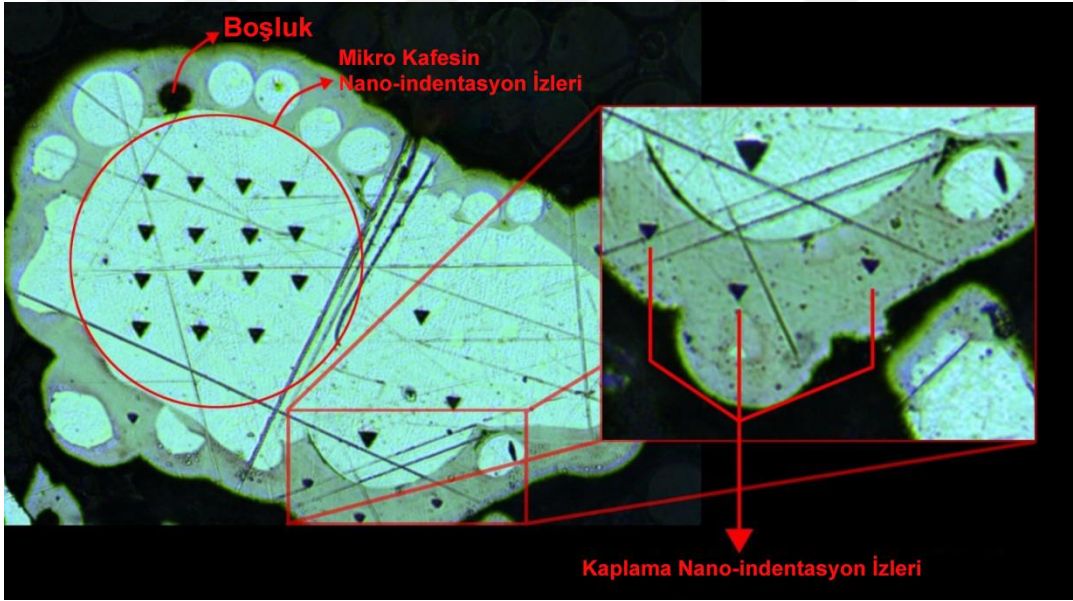


Şekil 2.3. Mikro sertlik ölçümüne ait ölçüm noktalarının yerleri

### 2.2.2. Nano-indentasyon Testleri

Tersine sonlu elemanlar analizi için gerekli olan nano-indentasyon testleri Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Nano-indentasyon testleri nikel kaplama, 304L paslanmaz çelik plaka ve 316L mikro kafes yapılar üzerinde uygulanmıştır. Nano-indentasyon testlerinde yüzeyde bulunan pürüzlerin sonuca

ciddi bir etkisi bulunduğundan, numuneler bakalit içerisine alındıktan sonra yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Yüzey parlatma sonrasında numune alkol ile temizlenip kurutulmuştur. Nano-indentasyon testleri, porozite olmayan ve indentasyon yeri numune kenarlarından uzakta olacak şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.4). Nano-indentasyon testlerinde batma derinliğinin düşük tutulması, malzeme içerisindeki fazların mekanik özelliklerinin etkisinin ortaya çıkmasına sebep olacağından, nispeten yüksek bir değer olan 100 mN kuvvet ile ölçüm gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı, maksimum kuvvete 30 saniyede (3,33 mN/s) gelecek şekilde seçilmiştir. Test süresi boyunca kuvvet-yer değiştirme değerleri cihaz tarafından kaydedilmiştir. Test cihazında ~1146 GPa elastisite modülüne ve 0,07 Poisson oranına sahip, standart Berkovich batıcı ucu kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Nikel kaplama ve mikro tellerin üzerinde nano-indentasyon izlerinin görüntüsü

### 2.2.3. Mikro Kafeslerin Basma Testlerinin Gerçekleştirilmesi

12,5 mm<sup>3</sup> boyutlarındaki kafes yapılar Instron servo-hidrolik test cihazında basma testine tabi tutulmuştur. Yükleme hızı 0,5 mm/dakika alınmıştır ve bunun sonucunda birim şekil değişimi hızı  $6,66 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  değerine tekabül etmektedir. Basma gerilmesi; uygulanan kuvvetin, kafesin şekil değişiminden önceki yüzey alanına (12,5x12,5 mm<sup>2</sup>) bölünmesi ile hesaplanmıştır. Kafes birim şekil değişimi ise baskı kafasının yer değiştirme eğrisinin, bloğun ilk yüksekliğine (12,5 mm) bölünmesi ile elde edilmiştir. Paslanmaz çeliğin

yoğunluğu  $8000 \text{ kgm}^{-3}$  ve kaplamanın yoğunluğu ise  $8100 \text{ kgm}^{-3}$ 'tür [91]. Spesifik özelliklerin ve kaplamanın etkisinin ölçülebilmesi için, kaplama öncesinde, sonrasında ve test öncesinde her kafesin kütlesi ölçülmüştür. Kafeslerin yoğunluğu, kafes blokların imal edildiği 316L paslanmaz çelik malzemenin yoğunluğuna ( $8000 \text{ kgm}^{-3}$ ) bölünerek spesifik yoğunluğu elde edilmiştir. Kaplanmamış veya kaplanmış mikro kafes yapıların spesifik mekanik değerleri spesifik yoğunluk değerlerine bölünerek elde edilmiştir.

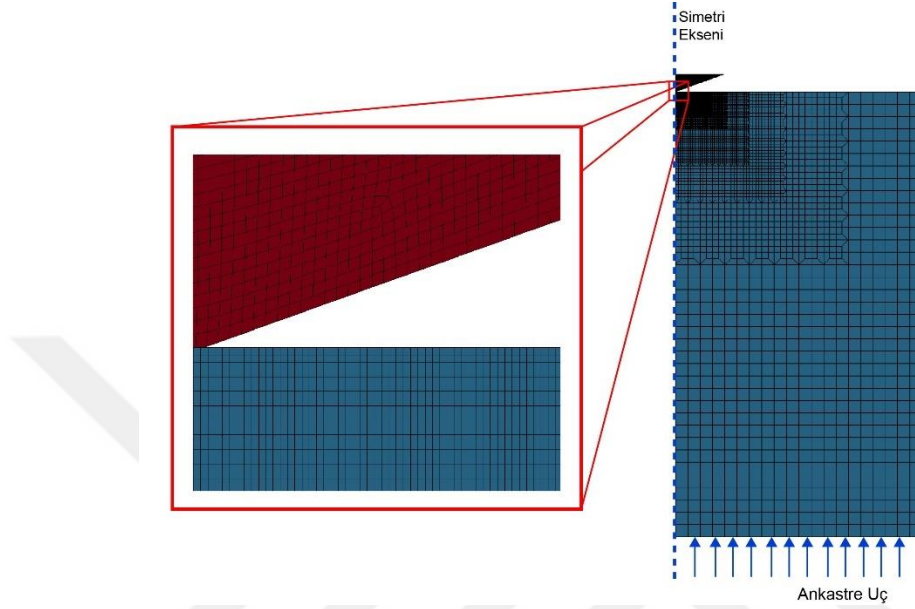
### **2.3. Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Mikro Tellerin ve Kaplamanın Mekanik Özelliklerinin Araştırılması**

Çalışma kapsamında nikel kaplamanın etkisi ve mikro kafes yapıların mekanik özellikleri sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple sonlu elemanlar analizinin gerçekleştirilebilmesi için kaplama ve mikro tellerin mekanik özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Normal şartlarda bu değerler standart mekanik testler (çekme testi, eğme testi vb.) ile elde edilmektedir. Fakat uygulanan kaplamaların, boyutları sebebiyle, standart yöntemlerle mekanik özelliklerinin belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Bunun üstesinden gelebilmek için nano-indentasyon eğrilerini kullanan tersine sonlu elemanlar yöntemi uygulanmıştır. Tersine sonlu elemanlar optimizasyonunu gerçekleştirebilmek için, öncelikle nano-indentasyon modelinin oluşturulması gereklidir. Nano-indentasyon modeli oluşturulduktan sonra nikel kaplama ve mikro tellerin mekanik özelliklerinin hesaplanmasında tersine sonlu elemanlar yöntemi uygulanmıştır.

#### **2.3.1. Nano-indentasyon Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması**

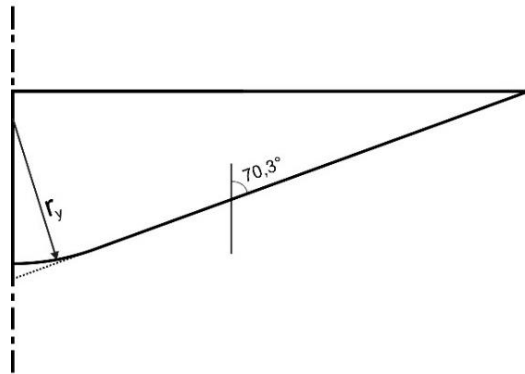
Nano-indentasyon sonlu elemanlar analizlerinin süresini kısa tutmak için aksinel simetrik model kullanılmıştır. Şekil 2.5'de LS-DYNA sonlu elemanlar paket programı ile hazırlanan aksinel simetrik nano-indentasyon modeli görülmektedir. Berkovich uç, eşdeğeri konik bir uç ( $70,3^\circ$  yarım açısı) olarak modellenmiştir. Modelin sol tarafındaki düğüm noktalarına aksinel simetrik sınır şartları uygulanmış ve alt yüzeydeki düğüm noktaları ise sabitlenmiştir. Numune, Poon vd. [74] yaptıkları çalışmadaki oranlara uygun olacak şekilde, sınır şartlarından etkilenmeyecek kadar derin ve geniş ( $r_s/h_s = 0,6$  ve  $h_s/h_{max} = 36$ ) modellenmiştir. Batıcı uç rijit olarak modellenmiştir ve numune için MAT24\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY (parçalı lineer elastik-plastik malzeme modeli) kullanılmıştır. Nano-indentasyon testi düşük batma derinliğinde uygulandığı zaman testin

sonuçları; malzeme içerisinde bulunan çeşitli fazlardan, boyut etkilerinden ve ucun aşınmasından etkilenmektedir. Bu sebeple nano-indentasyon testleri nispeten daha büyük kuvvetler altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.5. Nano-indentasyon analizleri için aksel simetrik model

Batıcı uç aşınmasının kuvvet-yer değiştirme eğrileri üzerine etkisini incelemek için nano-indentasyon testleri de gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla çeşitli yuvarlatma değerlerine ( $r_y$ ) sahip batıcı uçlar için sonlu elemanlar analizleri hazırlanmıştır. Yuvarlatma değerinin batıcı uç geometrisi üzerindeki çizimi Şekil 2.6'de gösterilmiştir. Yuvarlatma sonrasında Berkovich eşdeğer konik batıcı uç yarım açısı ( $70,3$ ) korunmaktadır.



Şekil 2.6. Berkovich eşdeğer konik uca uygulanan yuvarlatmanın şematik resmi

### 2.3.2. Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi Yaklaşımların Uygulanması

Uygun geometriye sahip nano-indentasyon modeli hazırlandıktan sonra tersine sonlu elemanlar yaklaşımı gerçekleştirilmiştir. Literatürde genel olarak plastik bölgeyi ifade edebilecek (Holloman, Swift, Ludwig vb.) bir eşitlik seçilerek, bu eşitlik üzerindeki bilinmeyen katsayılar alt ve üst değer tahmini yapılmaktadır. Tahmin aralığı eşit parçalara bölünür-ekte ve bu bölünmelere karşılık gelen değerler için analizler koşturulmaktadır. Bölüm 1.4.2'de bahsedildiği gibi bölme aralığının küçük tutulması, istenilen sonucun elde edilmesine mâni olabilir. Aralığın geniş tutulması durumunda ise istenilen sonuca yeteri kadar yakınsamama olasılığı mevcuttur. Aralığın geniş tutulup bölme sayısının artırılması da optimizasyon süresini ciddi oranda uzatmaktadır. Bahsi geçen sorunlara çözüm bulmak için bu çalışma kapsamında LS-OPT ile genetik algoritma yöntemi ve bu çalışma kapsamında geliştirilen python kodu ile optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

LS-OPT yönteminde, literatürdekine benzer şekilde, plastik bölgenin davranışını verebilecek bir eğri kabulü yapılmıştır. Optimizasyonda, bilinmeyen parametre sayısının diğer eşitliklere göre daha az olmasına rağmen, sonuca yakınması iyi derecede olan modifiye edilmiş Holloman yasası (Eşitlik 1.8) kullanılmıştır. Modifiye edilmiş Holloman yasasında bilinmeyen malzeme sabitleri  $n$  ve  $\sigma_y$  değerleridir. LS-OPT programı, literatürdekine benzer olarak bu bilinmeyenlere verilen aralıkta tahmin yapmaktadır. LS-OPT yönteminin literatürdeki yöntemlerden farkı ise genetik algoritması kullanmasıdır. Kullandığı algoritma ile parametrelerin sonuca etki ağırlıklarını hesaplanmaktadır. Bu ağırlık değerine göre her iterasyon ile başlangıçta verilen tahmin aralığı daraltılmaktadır. Tahmin aralığının daraltılması sayesinde başlangıç tahmin aralığı (sonuç tekilliğine dikkat edilerek) geniş tutulabilmektedir. Böylece doğru sonucu verecek değer tahmin aralığı dışında kalma olasılığı azalmaktadır. Literatürde genel olarak kullanılan sabit tahmin aralığı yöntemiyle kıyaslandığında daha yakın sonuçlar vermesi mümkün olmaktadır. Özet olarak, LS-OPT her iterasyonda sonucun olmadığı aralığı silerek daha küçük bir aralıkta tekrar tahmin yapmaktadır. LS-OPT ile optimizasyon işlemi, iterasyon başına 10 adet analiz ve toplamda 15 adet iterasyon seçilerek gerçekleştirilmiştir. Gerekli görülmesi durumunda iterasyon sayısı arttırılabilmektedir.

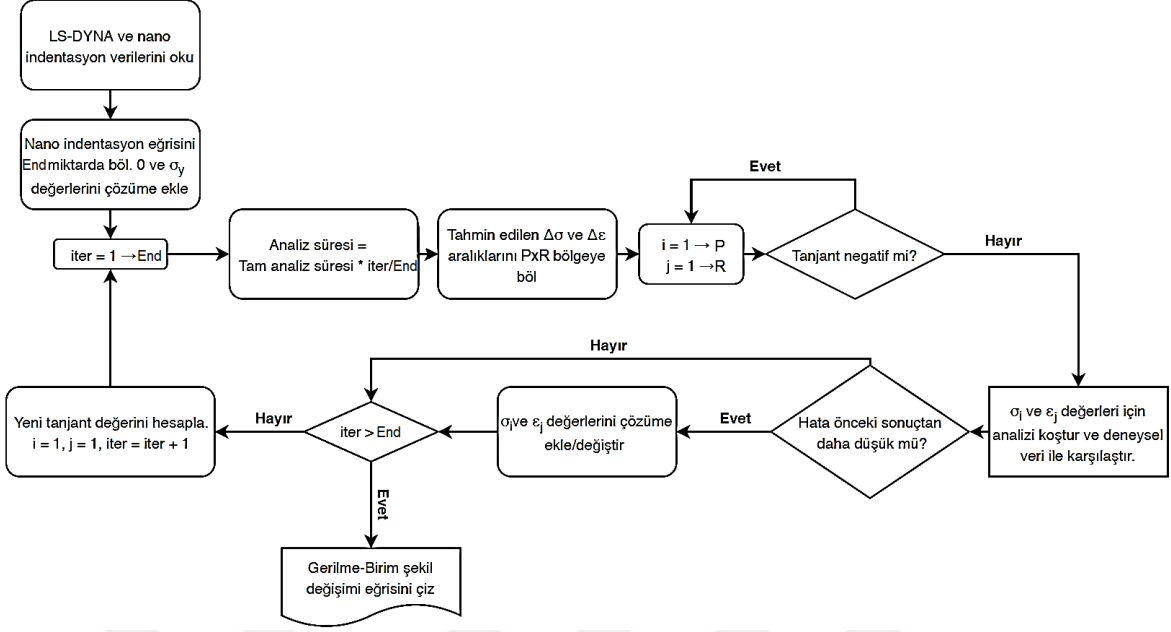
LS-OPT yönteminin sonlu elemanlar yöntemine bağdaştırılması için MAT24\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY malzeme kartı seçilmiştir. Bu malzeme kartının seçilmesinin sebebi, malzemenin gerilme-birim şekil değişimi davranışının nokta nokta

tanımlanarak bir eğri şeklinde girilebilmesidir. Noktaların tanımlanmasında LS-DYNA içerisinde bulunan PARAMETER ve EXPRESSION kartlarından yararlanılmıştır. Akma gerilmesi ( $s$ ), elastisite modülü ( $e$ ), pekleşme üssü ( $n$ ) ve plastik birim şekil değişimi değerleri ( $e_i$ ) ve gerçek gerilme ( $s_i$ ) değerleri parametre olarak girilmiştir. Plastik birim şekil değişimi değerlerine sabit sayılar tanımlanmıştır ve elastisite modülünün değerleri nano-indentasyon testlerinden alınmıştır. Böylece LS-OPT  $n$  ve  $s$  parametrelerini tahmin ederek, bu değerleri “ $s_i=(e^{**n})*(s^{**}(1-n))*(e_i^{**n})$ ” denkleminde yerleştirmektedir. Bu denklemden gelen sonuçlar ile malzemenin gerilme birim şekil değişimi eğrisi  $e_i$  ve  $s_i$  değerlerinden oluşturulmaktadır. Oluşturulan eğride  $e_1 = 0$ , ve  $s_1 = s$  değerlerini sağladığı kontrol edilmelidir.

Tersine sonlu elemanlar yönteminde genel olarak plastik bölge davranışının tahmini için bir eşitliğine bağlı kalınmaktadır. Bu durum seçilen malzemenin, kabul edilen eşitlik ile uyumlu olup olmadığı sorusunu doğurmaktadır. Bu sorunun önüne geçebilmek amacıyla belirli bir formül seçimine dayanmayan bir optimizasyon yöntemi python ile kodlanmıştır. Geliştirilen python kodunun akış şeması Şekil 2.7’de verilmiştir.

Python kodu ile optimizasyonda tekrar MAT24\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY kartı kullanılmıştır. Gerçek gerilme-gerçek plastik birim şekil değişimi eğrisinin belirlenmesinde, LS-OPT’den farklı olarak, tahmin edilen değerler ile bütün eğrinin çizilmesinden önce her yeni nokta için tahmin yapılmaktadır. Eğrinin sonraki noktasının bulunabilmesi için, tahmini olarak verilen  $\Delta\sigma$  ve  $\Delta\varepsilon$  aralığı literatürdekine benzer olarak, belirli sayıda bölünüp,  $\sigma$  ve  $\varepsilon$  değerlerinin kombinasyonları için analizler koşturulmaktadır. Sonlu elemanlar analizinin sonucu nano indentasyon eğrileri ile karşılaştırılmakta ve değerlerin yakalanması durumunda, en yakın sonucu veren  $\sigma$  ve  $\varepsilon$  değerleri kart içerisine eklenmektedir. Buna ek olarak eğrideki son iki noktadan tanjant değeri hesaplanmaktadır. Bu değer üzerinde kalan ve tanjantı negatif yapabilecek değerler atılarak, tahmin bölgesi içerisinde koşturulması gereken analiz sayısı azaltılmaktadır. Bu yöntemin en büyük eksiği akma gerilmesinin tahmin edilememesidir. Bu çalışmada akma gerilmesi LS-OPT üzerindeki tahminlerden alınmıştır.





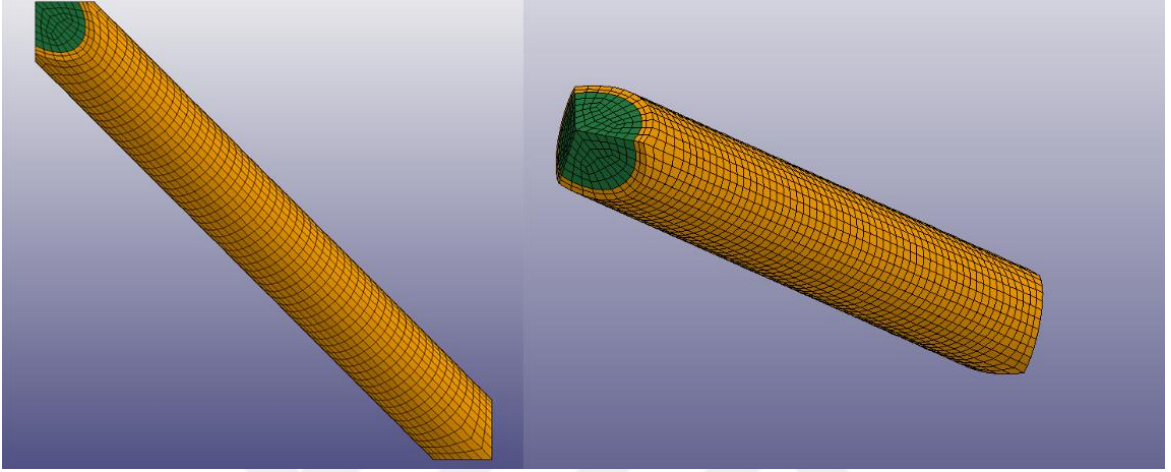
Şekil 2.7. Python kodu ile kontrol edilen tersine sonlu elemanlar analizinin akış şeması

#### 2.4. Nikel Kaplamalı Mikro Kafes Yapıların Sonlu Elemanlar ile Modellenmesi

Bu bölümde kaplamalı mikro kafes yapıların basma testlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve bu model üzerinde kaplama parametrelerinin etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Kaplamanın mekanik (gerilme-birim şekil değiştirme davranışı) özelliklerinin çekme ve benzeri yöntemlerle belirlenmesinin çok zor olması sebebiyle tersine sonlu elemanlar analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemde kaplamaya nano-indentasyon uygulandı ve elde edilen eğriler kullanılarak tersine sonlu elemanlar yöntemi ile kaplamanın mekanik özellikleri belirlendi. Belirlenen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri kullanılarak, kafes yapılar için basma testlerinin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli deneysel değerlerle doğrulandıktan sonra bu model kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmalarda, kaplama kalınlığının, mikro tel ile kaplama arasındaki arayüz etkileri ve hücre boyutunun basma testlerindeki mekanik davranış üzerine etkileri incelenmiştir.

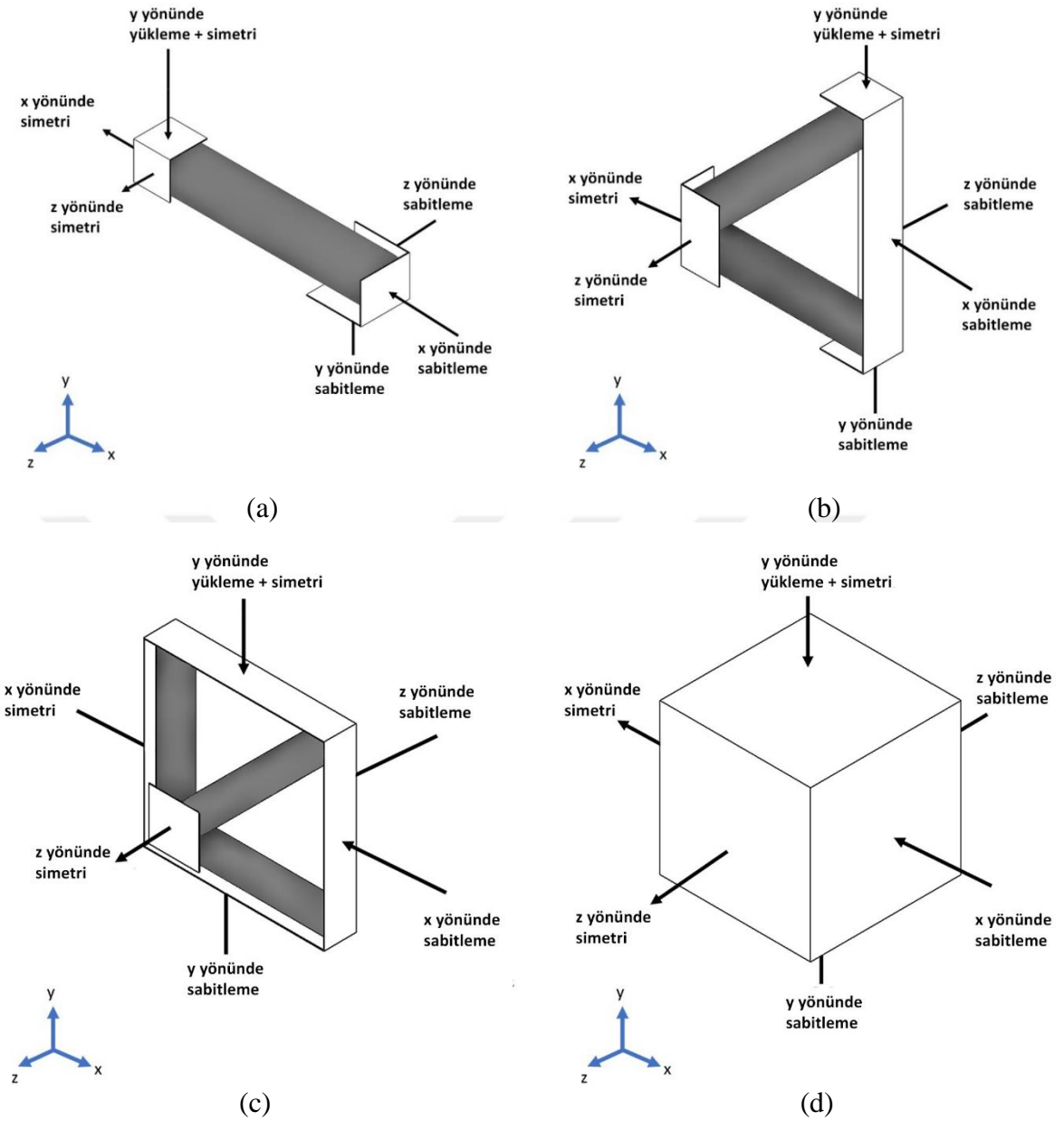
Bu çalışmada sonlu elemanlar modeli üç boyutlu olarak gerçekleştirildi. Hesaplama süresini kısaltmak amacıyla tek bir mikro tel modellenmiştir ve her telin benzer şekillerde deforme olduğu var sayılmıştır [92]. SLM üretim sürecinde meydana gelen iç yapıdaki boşluklar ve yüzeye yapışan tozların etkileri (Şekil 2.2) ihmal edildi ve böylece kusursuz

mikro tel yaklaşımı uygulandı. Mikro tellerin ağ yapısında heksahedral (hexahedral) elemanlar kullanıldı. Düzgün bir ağ oluşturmak amacıyla HyperMesh programında “mesh morphing” seçeneği kullanılmıştır. Elde edilen model ve ağ yapısı Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8. Kaplamalı mikro tellerin sonlu elemanlar ağ yapısı

Nikel kaplama kalınlığı  $17 \mu\text{m}$  olarak alınmıştır ve aynı yöntem kullanılarak modellenmiştir. Mikro telin üzerinde 9396 adet heksahedral katı eleman bulunmaktadır ve kaplamanın elemanlarıyla toplam eleman sayısı 13572 değerine ulaşmıştır. Kaplama ve mikro tel arayüzlerindeki düğüm noktaları ortak olarak modellenmiştir. Şekil 2.9’dan görüldüğü üzere tüm tel yapıları için üç adet simetri ve üç adet sabitleme kullanılmıştır. Her bir tel simetri yüzeylerine sahip olduğundan model üzerinde simetri sınır şartları uygulanmıştır. Bu amaçla, telin bir ucundaki düzgün yüzeyler, normaleri yönündeki yer değişimleri açısından serbestlik dereceleri sınırlandırıldı. Buna karşın telin diğer ucundaki düzgün yüzeylerin üzerinde bulunan düğüm noktalarının serbestlik dereceleri ise bulunduğu yüzey normalerinde birbirlerine bağlandı (constrained).



Şekil 2.9. Mikro kafes yapıların sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan sınır şartlarının gösterimi; a) Tek tel, b) çeyrek kafes yapısı, c) yarım kafes yapısı ve d) çoklu kafes yapıları

Mikro telin mekanik özellikleri Gümrük ve Mines [6] tarafından gerçekleştirilen çekme testlerinden alınmıştır. Buna göre mikro tel için Akma gerilmesi 285 MPa, elastisite modülü 97 GPa ve Tanjant modülü 1,288 GPa olarak tanımlanmıştır. Kaplamanın mekanik özellikleri ise tersine sonlu elemanlar analizi yardımıyla tanımlanmıştır. Mikro kafesler için gerilmeler, hesaplanan düşey basma yükünün çeyrek mikro kafesin yüzey alanına bölünmesi ile hesaplanırken, birim şekil değiştirmeler ise basma derinliğinin çeyrek mikro kafesin başlangıç yüksekliğine bölünmesi ile elde edilmiştir.

Modeldeki tel çapının belirlenmesi için gerçek tellerin uzunlukları ölçülmüştür. Daha sonra hassas tartı ile tellerin kütleleri belirlenmiştir. Ana malzemenin yoğunluğu ( $8000 \text{ kgm}^3$ ) bilindiği için silindirin hacim hesabından (Eşitlik 2.2-2.3) ortalama çap değerleri kolaylıkla hesaplanmıştır. 23 adet tel için tekrarlanan ölçümlerden ortalama tel çapının 180-200  $\mu\text{m}$  arasında olduğu ve aritmetik ortalama tel çapının 196  $\mu\text{m}$  olduğu görülmüştür.

$$V = \pi r^2 h, \quad \rho = m_{tel}/V \quad (2.2)$$

$$r = \sqrt{\frac{m_{tel}}{\rho \pi h}} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.2 ve 2.3'de V hacmi, r tel yarıçapını, h ölçülen telin uzunluğunu,  $\rho$  çeliğin yoğunluğunu ( $8000 \text{ kgm}^{-3}$ ) ve  $m_{tel}$  ölçülen telin kütlesini ifade etmektedir. Tablo 2.2'de çeşitli mikro tellerin kütleleri ve ortalama teorik tel çapları verilmiştir. Tel ağırlığının belirlenmesinde beş ondalık basamağa kadar ölçüm verebilen, Sartorius markalı yarı mikro terazi kullanılmıştır. Bu ölçümlerde yüzeye yapışmış olan erimemiş veya yarı erimiş tozların ağırlıkları ihmal edilmiştir. Tellerin uzunluğu kumpas yardımı ile ölçülmüştür. Uzunluk ve ağırlığı belirlenen tellerin ortalama tel çapı değerleri ise Eşitlik 2.2 ve 2.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Ortalama tel çapı değerinin farklı teller için 192-205  $\mu\text{m}$  arasında olduğu gözlemlenmiştir. Ölçüm yapılan tüm tellerin çaplarının göz önüne alındığına aritmetik ortalama tel çapının 196,56  $\mu\text{m}$  olduğu görülmüştür.

Tablo 2.2. Kütleleri ve uzunluğu ölçülen mikro teller ile ortalama tel çapının belirlenmesi

| Tel Uzunluğu (mm) | Tel Ağırlığı (g) | Ortalama Tel Çapı ( $\mu\text{m}$ ) | Tel Uzunluğu (mm) | Tel Ağırlığı (g) | Ortalama Tel Çapı ( $\mu\text{m}$ ) | Tel Uzunluğu (mm) | Tel Ağırlığı (g) | Ortalama Tel Çapı ( $\mu\text{m}$ ) |
|-------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------------------------|
| 39,51             | 0,00923          | 192,82                              | 22,61             | 0,00559          | 198,37                              | 38,27             | 0,00904          | 193,89                              |
| 38,76             | 0,00917          | 194,05                              | 38,28             | 0,01004          | 204,31                              | 37,94             | 0,00906          | 194,95                              |
| 38,87             | 0,0095           | 197,23                              | 37,96             | 0,01008          | 205,58                              | 25,08             | 0,00573          | 190,69                              |
| 39,38             | 0,00937          | 194,60                              | 38,3              | 0,0092           | 195,53                              | 37,66             | 0,00925          | 197,72                              |
| 39,38             | 0,00938          | 194,70                              | 38,27             | 0,01006          | 204,54                              | 37,2              | 0,00884          | 194,48                              |
| 38,64             | 0,00921          | 194,77                              | 38,35             | 0,0095           | 198,56                              | 37,54             | 0,00898          | 195,12                              |
| 21,8              | 0,00531          | 196,89                              | 38,13             | 0,00977          | 201,94                              | 22,02             | 0,00535          | 196,64                              |
| 22,7              | 0,00454          | 178,41                              | 38,27             | 0,0102           | 205,96                              |                   |                  |                                     |

Aritmetik Ortalama Tel Çapı = 196,56  $\mu\text{m}$

## 2.5. Mikro Kafeslerde Geometrik Kusurların Sonlu Elemanları ile Gerçeğe Yakın Modelleme Yaklaşımları

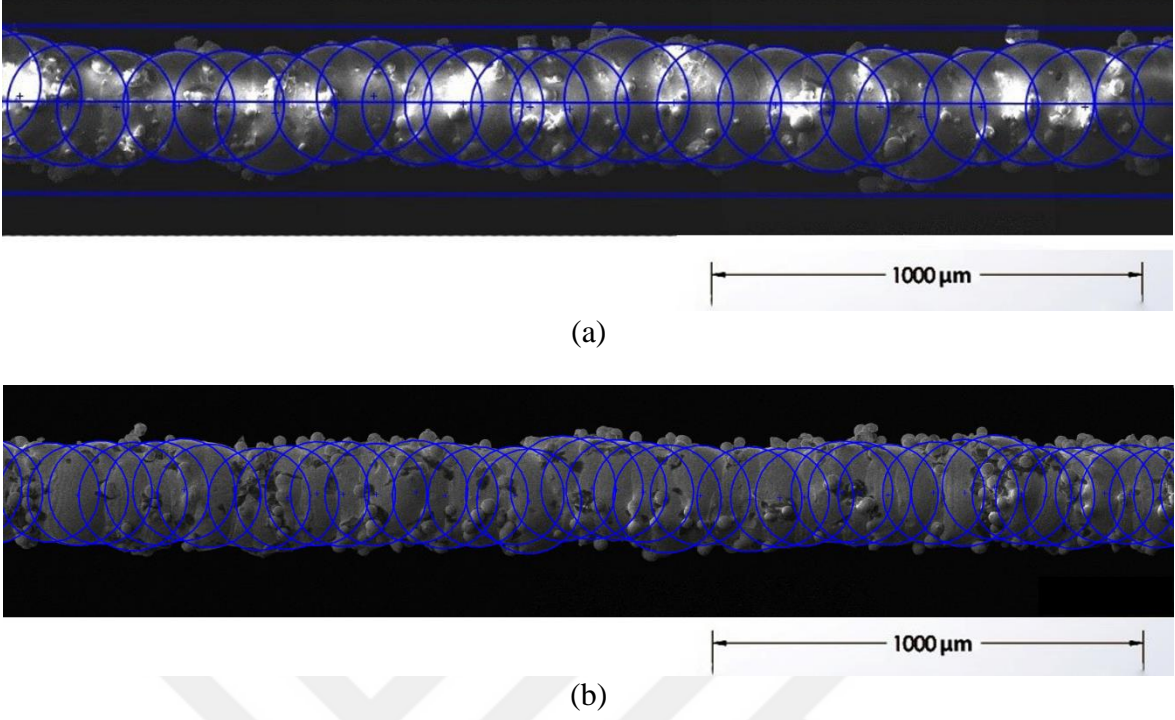
Şekil 2.2’den görüldüğü üzere kusursuz bir geometride oluşturulan modelin gerçek telden en büyük farkı tellerdeki çarpıklıklardır. Bu sebeple gerçeğe yakın modelleme çalışmalarında ilk olarak bu kusurlar ele alınmıştır. Geometrik kusurlar haricinde, mikro tellerin mekanik davranışını etkileyen tozlar ve iç yapıda boşluklar bulunmaktadır. İç yapıda bulunan boşluklar, tel içerisindeki yüzdesine göre mekanik özelliklerin düşmesine sebep olmaktadır [88]. Bu bölümde mikro kafes yapıların yalnızca geometrik kusurlarını dikkate alan sayısal modellerin oluşturulması üzerine çalışılmıştır.

### 2.5.1. Mikro Kafes Yapıların Geometrik Kusurlarının Belirlenmesi

Önceki bölümlerde analiz süresini kısaltmak için kusursuz mikro tel üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Fakat SLM ile üretilen mikro kafes yapılarda mikro boşluklar, ergimemiş tozlar, yarı ergimiş tozlar, geometrik çarpıklıklar ve tekdüze olmayan çap değişimleri gibi birçok kusur bulunmaktadır. Bu kusurlar mikro kafes yapıların mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu amaçla geometrik kusurların, gerçeğe yakın modellenebilmesi için, gerçek tellerin SEM görüntüleri üzerinden kusur dağılımlarının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

#### 2.5.1.1. Mikro Tel Çap Değişimlerinin Belirlenmesi

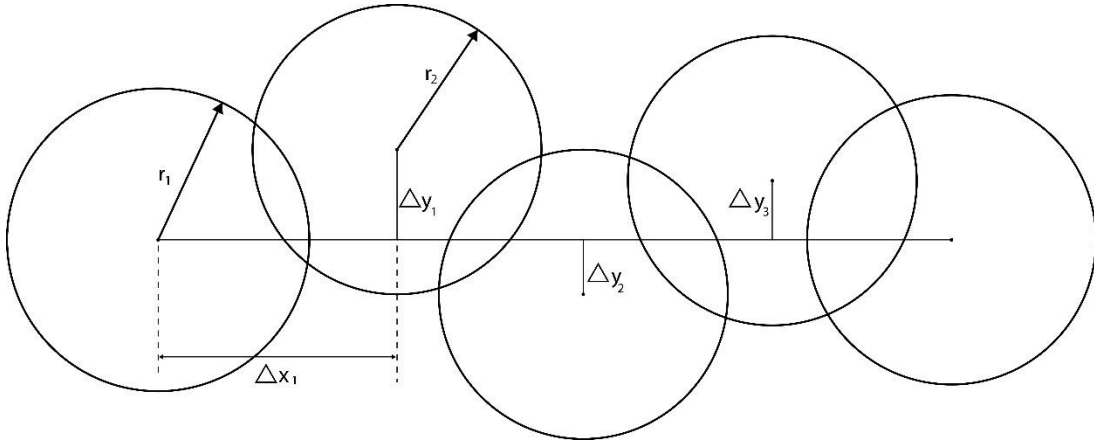
Şekil 2.10’da  $90^\circ$  ve  $35^\circ$  açı ile üretilen iki mikro telin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde  $35^\circ$ ’deki mikro tel  $90^\circ$ ’ye göre daha kompleks yapıdadır. Şekilden görüldüğü üzere her iki mikro tel kürelerin yan yana dizilmesi ile temsil edilebilmektedir. Gerçek geometride teller üniform daire şeklinde olmamaktadır (Şekil 2.2). Bu çalışmada, katı modelin oluşturulmasında, tel çapının tam daire olduğu ve kürelerin kusursuz oldukları kabulü şeklinde bir yaklaşım izlenmiştir. Bu yaklaşım ilk defa Ravari ve Kadkhodaei [88] tarafından uygulanmıştır. Her bir kürenin çapı ve kürelerin merkez koordinatlarının belirlenmesinde SolidWorks programından yararlanılmıştır. SolidWorks programına SEM resimleri aktarılmış ve Şekil 2.10’da gösterildiği gibi her küreye bir daire uydurulmuştur. Sonra her bir dairenin çapı ve merkez koordinatları ölçülmüştür. Burada yarı ergimiş veya ergimemiş tozlar dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.10. Mikro tellerin SEM görüntüsü üzerinde SolidWorks programı ile daire uydurulması; a) 35° ve b) 90° üretim açısına sahip mikro tel

Mikro tel benzetilmesi yapıldıktan sonra oluşturulan dairelerin çapları ( $r_1, r_2, \dots$ ) şekil üzerinden hesaplanmıştır.  $\Delta x$  değeri, kürelerin merkezleri arasındaki mesafe olarak hesaplanmıştır.  $\Delta y$  mesafesi ise küre merkezlerinin, telin merkezinden uzaklığı olarak alınmıştır (Şekil 2.11). Telin üç boyutlu yapısında, z ekseninde meydana gelen kusurlar y ekseninde meydana gelen kusurlara benzer olduğu görülmüştür. Bu sebeple z ekseninde yeni bir ölçüm yapılmamıştır. Z eksenindeki kusurların modellenmesinde  $\Delta y$  değerlerinden yararlanılmıştır. Aynı işlemler 35° ve 90°'de üretilmiş teller için ayrı ayrı tekrarlanmıştır.

SEM görüntüleri üzerinden ölçülen boyutların özeti, 90° ve 35° üretim açısına sahip mikro teller için Tablo 2.3'de verilmiştir. Üretim parametrelerinde katman kalınlığı 50  $\mu\text{m}$  olarak seçilmiştir. 90° üretim açısına sahip olan tellerin ölçümlerinde  $\Delta x$  mesafesinin yaklaşık olarak 50  $\mu\text{m}$  bulunması, elde edilen ölçüm değerlerini doğrulamaktadır. 35° üretim açısına sahip mikro tellerde ise, açılı üretim sebebi ile  $\Delta x$  mesafesinin  $50/\sin 35 = 87,2 \mu\text{m}$  civarında olması gerekmektedir.  $\Delta x$  mesafesinde maksimum 9  $\mu\text{m}$  (35° için  $9/\sin 35$ ) civarında sapmalar gözlemlenmiştir.  $\Delta y$  mesafesi, telin merkezine olan uzaklık olduğundan 90° ve 35° üretim açısına sahip mikro teller için benzer ölçümler elde edilmiştir.  $\Delta y$  mesafesinde  $\pm 25 \mu\text{m}$  civarında sapmalar ölçülmüştür.



Şekil 2.11. Geometrik kusurların tanımlanmasını sağlayan boyutların gösterimi

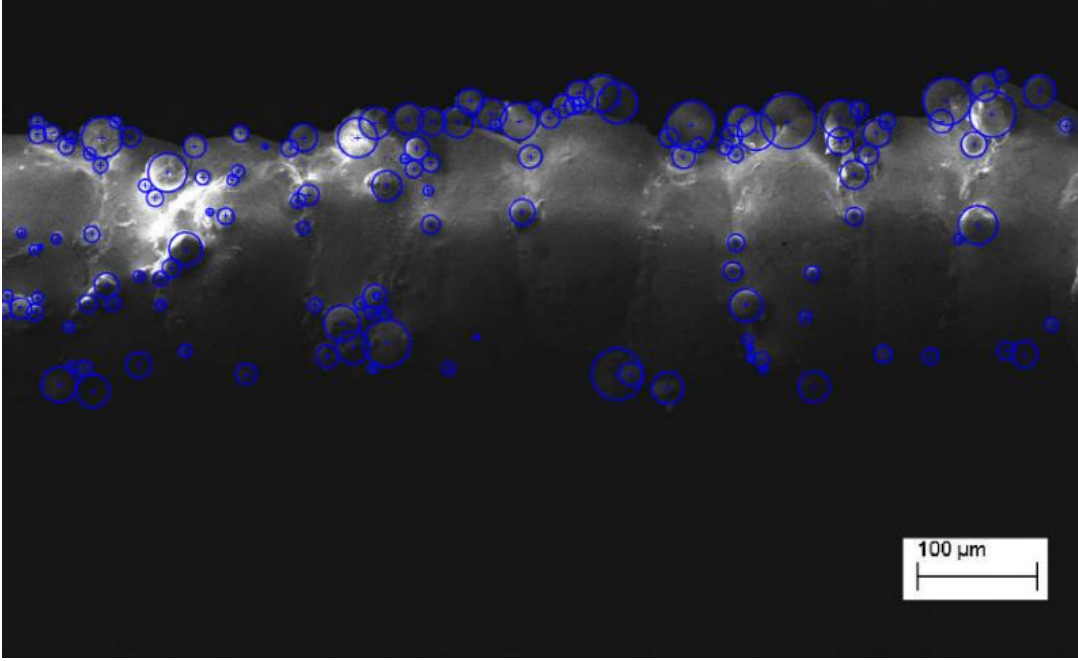
Tablo 2.3. Üretim açısı 90° ve 35° olan mikro tellerin, SEM resimleri üzerinden alınan geometrik boyutlarının bir özeti

| 35° mikro tel  |         |         | 90° mikro tel  |         |         |
|----------------|---------|---------|----------------|---------|---------|
| Küre Çapı (μm) | Δx (μm) | Δy (μm) | Küre Çapı (μm) | Δx (μm) | Δy (μm) |
| 193,54         | 0,00    | 5,94    | 179,06         | 48,20   | 18,60   |
| 199,02         | 102,41  | 9,86    | 175,34         | 53,34   | 14,13   |
| 189,54         | 73,65   | -8,86   | 183,58         | 54,22   | -2,00   |
| 184,74         | 71,98   | -19,48  | 193,58         | 53,38   | -5,14   |
| 186,85         | 78,61   | -7,82   | 187,60         | 52,89   | 1,94    |
| 193,54         | 87,90   | 1,44    | 180,47         | 50,82   | 2,84    |
| 184,08         | 86,89   | 13,04   | 179,05         | 45,90   | -2,69   |
| 191,36         | 81,28   | 14,11   | 172,96         | 43,84   | -5,17   |
| 185,49         | 90,67   | 13,63   | 173,43         | 45,72   | 0,40    |
| 197,85         | 87,38   | 9,39    | 173,42         | 58,82   | 11,26   |
| 198,63         | 99,81   | 22,33   | 174,28         | 46,14   | 19,23   |
| 186,24         | 68,37   | 10,81   | 183,54         | 48,70   | 21,39   |
| 185,49         | 92,07   | 2,81    | 170,11         | 51,53   | -8,63   |
| 185,70         | 93,04   | 9,90    | 179,08         | 44,85   | -18,88  |
| 189,34         | 64,67   | 1,13    | 184,45         | 45,27   | -8,28   |

### 2.5.1.2. Mikro Tellerdeki Yarı Ergimiş veya Ergimemiş Toz Dağılımının Belirlenmesi

Şekil 2.2 ve Şekil 2.10'da görüldüğü üzere mikro kafes yapı ve mikro tellerin üzerinde çok sayıda erimemiş tozlar bulunmaktadır. Bu erimemiş tozların, kafes yapı deformasyonuna ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi bu bölümde amaçlanmıştır. Fakat tozların modellenmesi oldukça zordur. Literatürde  $\mu$ -CT tarama yöntemi ile gerçek geometrinin alındığı çalışmalar bulunmaktadır [89, 90]. Fakat bu çalışmalarda mikro yüzeyleri düzeltmek amacıyla uygulanan filtreleme yöntemleri tozların

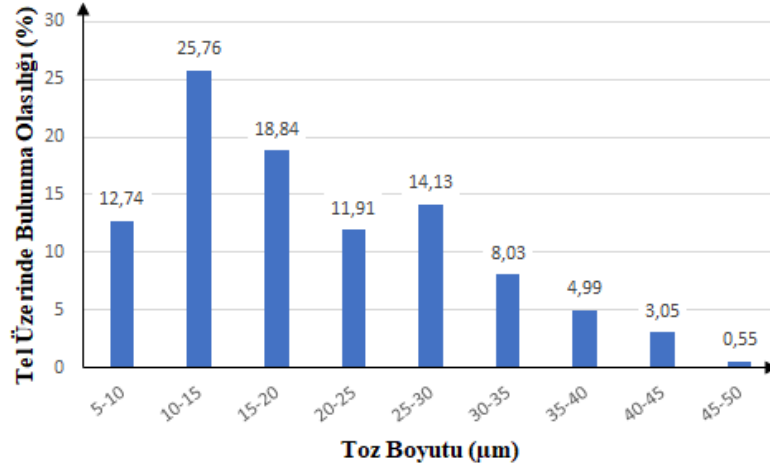
modelden çıkarılmasına veya tam modellenememesine sebep olmaktadır. Tozların modellenebilmesi için bu çalışma kapsamında SolidWorks programında bir makro yazımı gerçekleştirilmiştir. Bu makronun uygulanabilmesi için tel üzerindeki tozlar sayılmış ve boyutları not edilmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Mikro teller üzerinde tozların dağılımının ve boyutlarının SEM görüntüsü üzerinden belirlenmesi

Toplamda 4500  $\mu\text{m}$  uzunluğundaki tel üzerinden tozların sayımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayım sonucunda 100  $\mu\text{m}$  uzunluğundaki bir mikro tel üzerinde ortalama 19,86 adet ergimemiş veya yarı ergimiş toz bulunduğu görülmüştür. Ortalama toz boyutu 20-25  $\mu\text{m}$  arasındadır ve tozların boyutlarına göre dağılımları Şekil 2.13’de verilmiştir. Şekilden 5-10  $\mu\text{m}$  tozların tel içerisinde bulunma olasılığının %25,76 olduğu görülmektedir. 25-30  $\mu\text{m}$ ’den sonra toz çapının artması ile tel üzerinde bulunma olasılığının ters orantılı olduğu gözükmemektedir. Az miktarda da olsa 45-50  $\mu\text{m}$  boyutlarındaki tozlara rastlanmıştır.

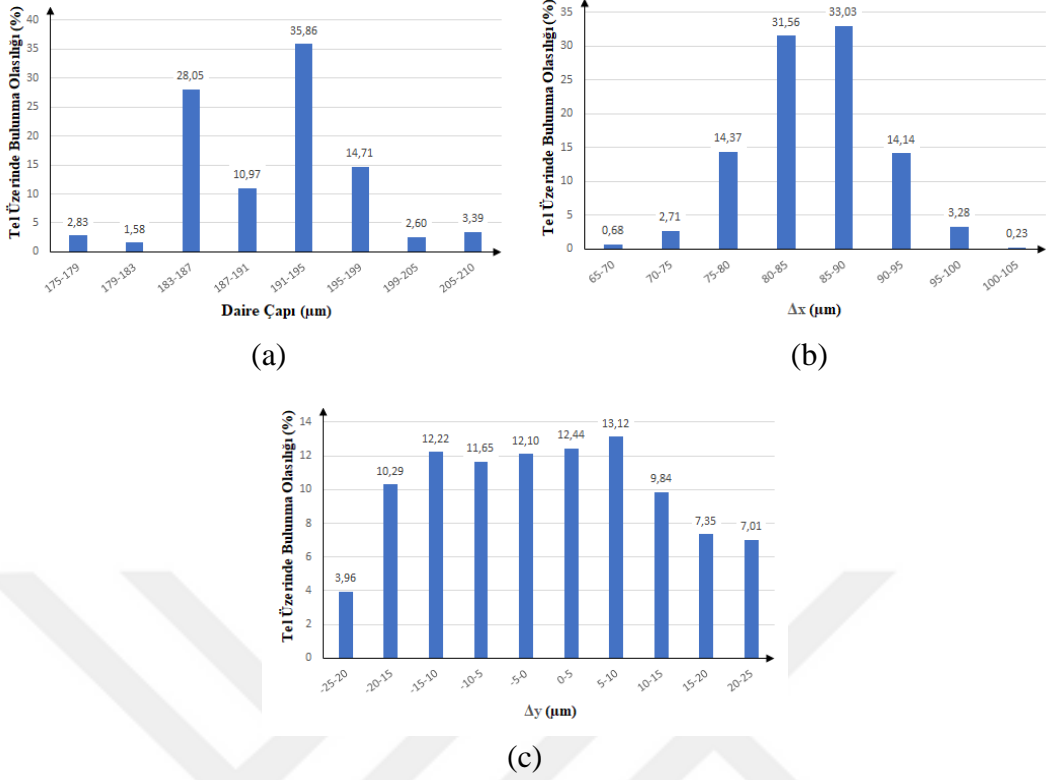




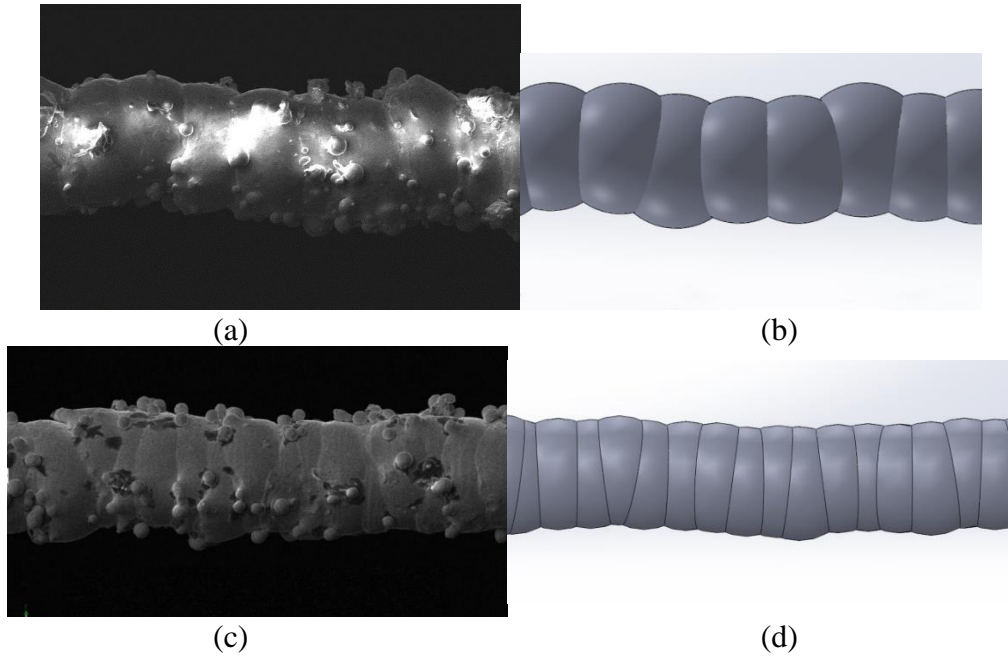
Şekil 2.13. Mikro teller üzerindeki erimemiş veya yarı erimiş tozların dağılımı

### 2.5.2. Mikro Kafes Yapıdaki Geometrik Kusurların Katı Modellenmesi

Mikro tellerdeki geometrik kusurların modellenmesini gerçekleştirmek amacıyla SolidWorks içerisinde bir makro kodu geliştirilmiştir. Makro'nun yazılmasında Tablo 2.3'de elde edilen geometrik boyutlar kullanılmıştır.  $35^\circ$  açı ile üretilmiş mikro teldeki geometrik kusurların dağılım oranları Şekil 2.14'de verilmiştir. Şekil 2.14a'dan görüldüğü üzere, daire çapının 191-195  $\mu\text{m}$  arasında olma olasılığının yüksek olduğu kolaylıkla söylenebilir. Bu değer Tablo 2.2'den elde edilen aritmetik ortalama tel çapına (196,56  $\mu\text{m}$ ) oldukça yakındır. Şekil 2.14b'de ise küreler arası mesafeyi temsil eden  $\Delta x$  değerinin dağılımları gösterilmiştir. Bölüm 2.5.1.1'de, mikro kafes yapıların 50  $\mu\text{m}$  katman kalınlığı ile üretildiğinden ve bu değer  $35^\circ$  açı ile üretilen tellerde  $87,2 (50/\sin 35)$   $\mu\text{m}$  civarında olması gerektiğinden bahsedilmiştir. Şekil 2.14b'de elde edilen dağılımlarda en yüksek olasılığa sahip  $\Delta x$  mesafesinin 85-90  $\mu\text{m}$  arasında olması, yapılan hesaplamaların ölçümlere uygun olduğunu göstermektedir. Elde edilen dağılımlar SolidWorks programında makroya dönüştürüldü. Rastgele olarak oluşturulan mikro tellerin, gerçek mikro tel görüntüleri ile karşılaştırılmaları Şekil 2.15'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere makro ile oluşturulan mikro teller, gerçek geometriye oldukça benzemektedir.  $90^\circ$  açı ile üretilen mikro tel yüzeyinin,  $35^\circ$  açı ile üretilmiş mikro tele kıyasla daha düzgün olduğu görülmektedir.



Şekil 2.14. Üretim açısı  $35^\circ$  olan mikro tel modellenmesinde kullanılan boyutların dağılımı; a) daire çapı, b)  $\Delta x$  ve c)  $\Delta y$

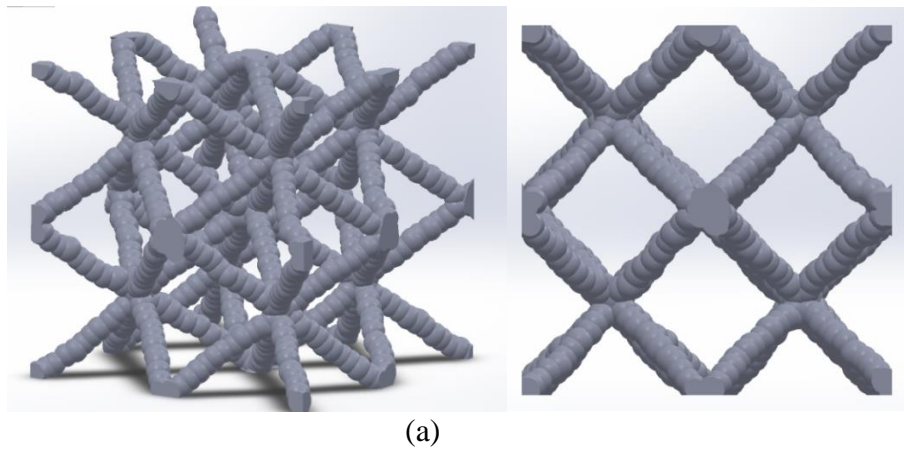


Şekil 2.15. SolidWorks makrosu ile oluşturulan geometrilerin, gerçek geometriler ile karşılaştırılması; a)  $35^\circ$  üretim açısına sahip mikro telin SEM görüntüsü, b)  $35^\circ$  üretim açısına sahip mikro telin katı modeli, c)  $90^\circ$  üretim açısına sahip mikro telin SEM görüntüsü ve d)  $90^\circ$  üretim açısına sahip mikro telin katı modeli

Bölüm 2.5.1.1’den elde edilen veriler kullanılarak SolidWorks programında 35° mikro tel, 90° mikro tel ve BCC mikro kafes yapıların modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.15’de SolidWorks programı ile oluşturulan katı modeller ile gerçek mikro tellerin SEM görüntüleri karşılaştırılmıştır. Şekilden 35° ve 90° üretim açısına sahip mikro tellerin her ikisinde de gerçek geometriye oldukça yakın modeller elde edildiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.15’den 90° üretim açısına sahip mikro tellerin  $\Delta x$  mesafeleri çok daha düşük olduğundan (90° için  $\sim 50 \mu\text{m}$ , 35° için  $\sim 87,2 \mu\text{m}$ ), 90° üretim açısına sahip tellerin yüzeylerinin çok daha düzgün olduğu gözükmemektedir.

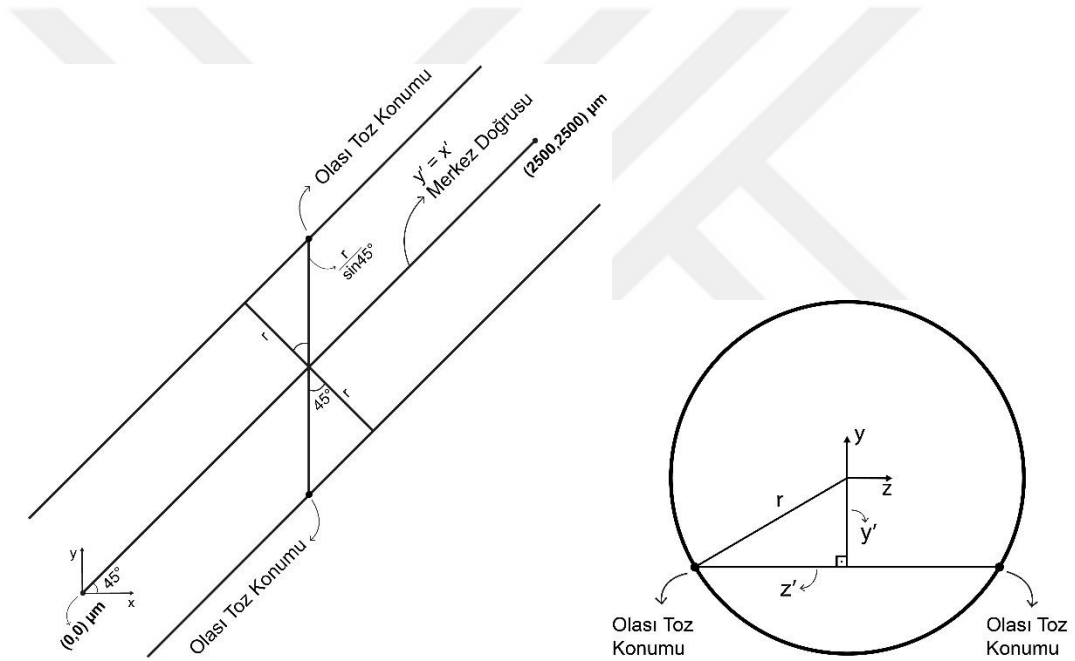
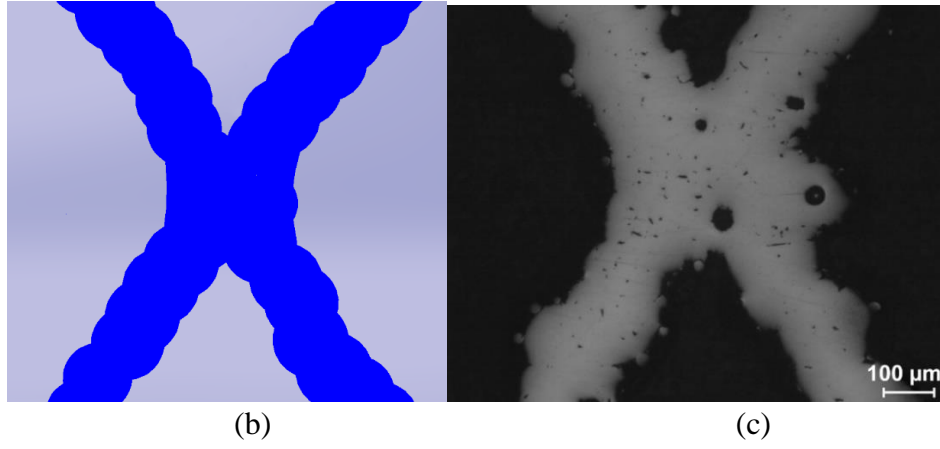
Mikro tellerin geometrik kusurlarının gerçeğe yakın olarak modellenmesinden sonra, birçok telden meydana gelen kafes yapıların modellenmesi yapılmıştır (Şekil 2.16). Şekil 2.16c’de mikro kafes yapının kesişim noktasındaki SEM görüntüsü verilmiştir. Şekilden kesişim noktalarının, lazer tarafından birçok kez eritmeye maruz kalması sebebiyle, daha dolgun bir yapıda olduğu gözükmemektedir. Katı model üzerinde bu yapının elde edilmesi için tellerin kesişim noktalarında yuvarlatmalar yapılmıştır. Bu yuvarlatmaların yapılmasından sonraki kesişim noktasının kesit görüntüsü Şekil 2.16b’de verilmiştir. Bu kesit, gerçek mikro kafesin üzerinde meydana gelen Şekil 2.16c’ye oldukça benzemektedir.

Toz boyutları ve yoğunluğu belirlendikten sonra, tozları tel yüzeyine eklemek için SolidWorks programı içerisinde yazılan makro, Şekil 2.12’deki dağılıma uyacak şekilde rastgele tozların eklenmesini sağlamaktadır. Tozların eklenecekleri koordinatların ( $x'$ ,  $y'$  ve  $z'$  noktaları) rastgele olarak belirlenmesini sağlayan algoritma ile makro kontrol edilmektedir. Olası toz konumlarının şematik olarak gösterimi Şekil 2.17’de görülmektedir.



Şekil 2.16. Kafes yapıların kusurlu olarak modellenmesi; a) 2x2x2 hücrenin katı modeli, b) katı modelin kesişim noktasındaki kesiti ve c) gerçek kafes yapının kesişim noktasının kesiti

Şekil 2.16'nın devamı



Şekil 2.17. Kusursuz telin üzerinde tozların yer alacağı noktaların koordinatlarının gösterilmesi

Toz konumunun belirlenmesini sağlayan algoritmanın çalışması şu şekilde işlemektedir; öncelikle yapı kusursuz olarak kabul edilir. Ardından  $x$  koordinatındaki ilerleme ( $x_{iler}$ ), eklenmek istenilen toz sayısına göre sabit olarak alınır (Eşitlik 2.4).  $x'$  koordinatı, Eşitlik 2.5'den yola çıkılarak, eklenen tozun sıra numarası ( $n_{toz}$ ) ile  $x_{iler}$ 'in çarpılmasından elde edilir. Merkez doğrusu üzerinde  $y' = x'$  bağlantısı geçerlidir. Fakat tozların konumları telin yüzeyinde olacağından yarıçapa göre bir düzeltme sayısı eklenir (Eşitlik 2.6). Tozların konumu alt yüzey veya üst yüzeyde olabileceğinden düzeltme sayısı

rastgele olarak + veya - değer alabilmektedir. Dairesel yapısından yola çıkarak, yarıçap ve bilinen  $y'$  yardımı ile  $z'$  değeri de kolaylıkla hesaplanabilir. Eklenecek olan tozun sıra numarası  $n_{toz}$  ve tel yarıçapı  $r$  olarak,  $x'$ ,  $y'$  ve  $z'$  koordinatları aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir;

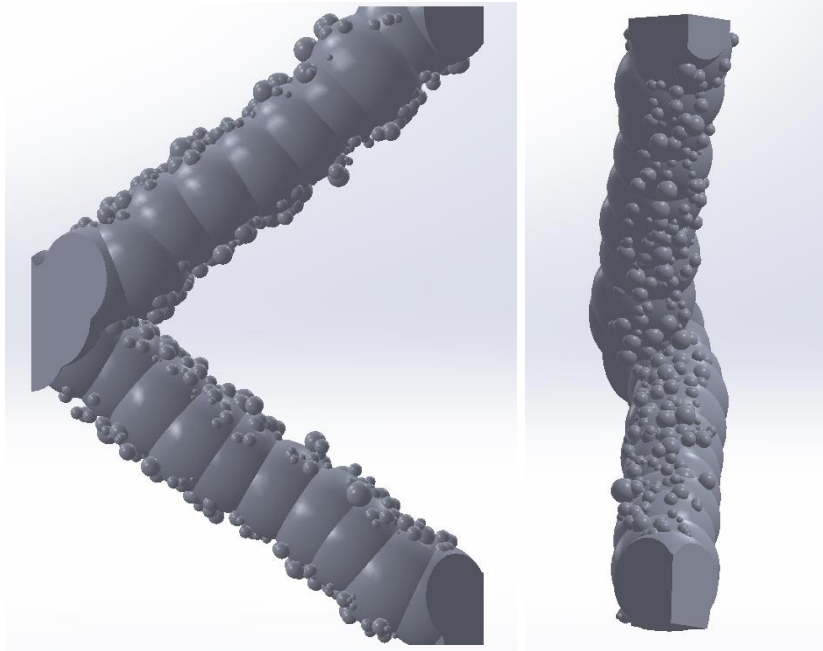
$$x_{iler} = (toz\ sayısı)/(telin\ x\ uzunluğu) \quad (2.4)$$

$$x' = x_{iler} \times (n_{toz}) \quad (2.5)$$

$$y' = x' \pm \frac{r}{\sin(45)} \quad (2.6)$$

$$z' = \pm \sqrt{(y')^2 + r^2} \quad (2.7)$$

Koordinatları bu şekilde belirlenen tozlar istenilen miktarda, rastgele olarak tel yüzeyine yerleştirilebilir. Fakat yukarıdaki eşitlikler ile konumu belirlenen tozun yarısı tele batmış şekilde olacaktır. Bunu düzeltmek için  $y$  ve  $z$  eksenlerinde  $\pm$  toz yarıçapı rastgeleliği verilmiştir. Eklenen tozlar yüzeyde oluşturulacak ağ yapısını ciddi oranda etkilemektedir. Bu sebeple ağ yapısının oluşturulmasını kolaylaştırmak ve analiz süresinden tasarruf edebilmek amacıyla tellerin yan yüzeylerindeki tozlar modele dahil edilmemiştir. Böylece sadece birbirine veya tele temas ederek mekanik özellikleri etkileyebilecek tozların modellenmesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Mikro tel üzerine eklenen tozların katı model görüntüsü

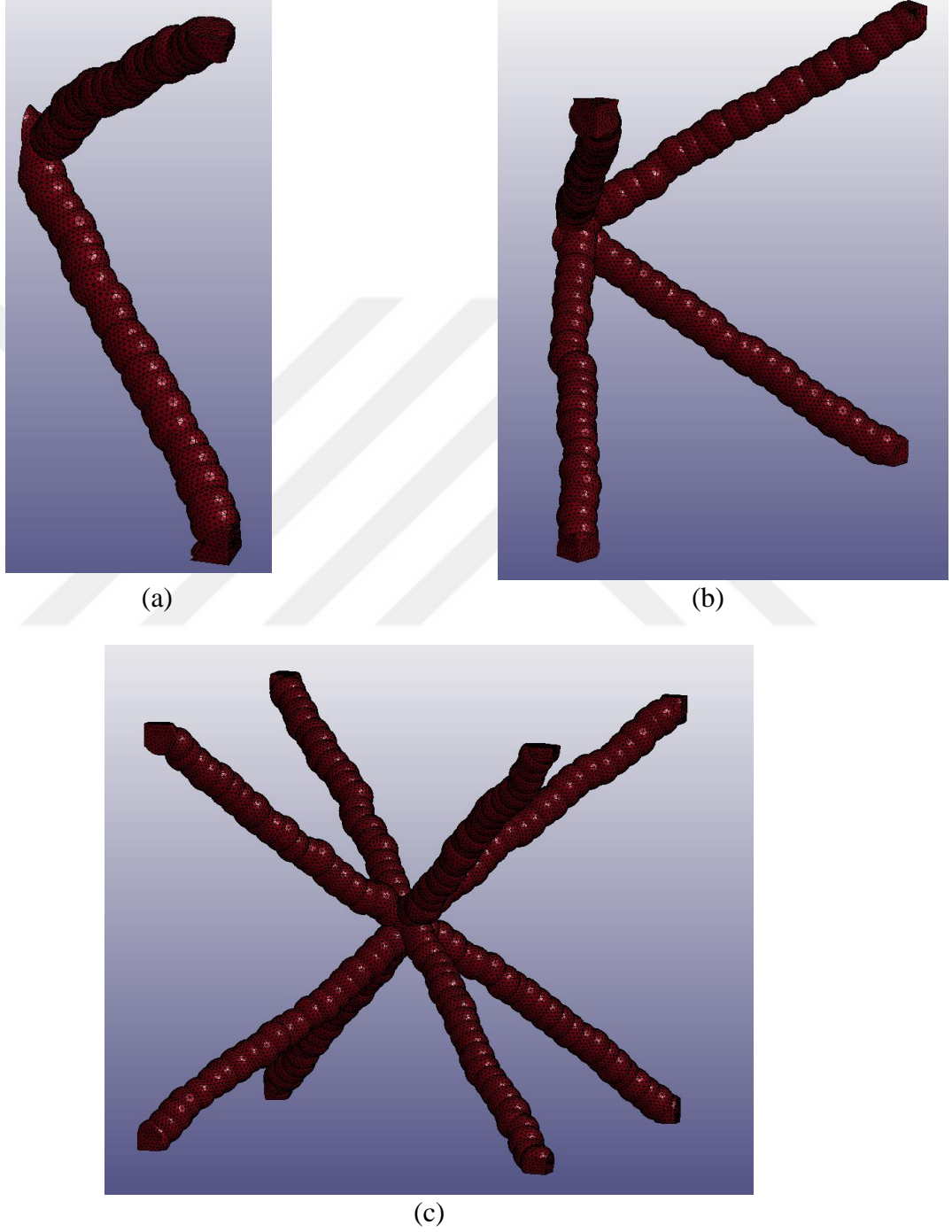
### 2.5.3. Kusurlu Mikro Kafes Yapıların Sonlu Elemanlar Modellenmesi

Kusurlu yapıda üretilen modelin ağ yapısının oluşturulmasında 8 düğüm noktalı hexahedral eleman kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu sebeple modelde rastgele oluşturulan düzgün dört yüzlü (tetrahedral) elemanlar kullanılmıştır. Düzgün dört yüzlü elemanların belirli bölgelerde yığılmasını engellemek amacıyla model hassas şekilde temizlenmiş ve gereksiz köşe çizgilerinden arındırılmıştır. Ağ yapısının oluşturulmasından sonra, ağ yapısı üzerinde optimizasyon ve düzeltmeler yapılarak minimum hataya sahip ağ yapısı oluşturulmuştur. Kusurlu model üzerinde oluşturulan ağ yapılarında eleman boyutunun küçük seçilmesi, hatalı eleman olasılığını ve analiz süresini arttırırken, büyük eleman seçimi ise yüzeydeki kusurların yetersiz modellenmesine sebep olacaktır.

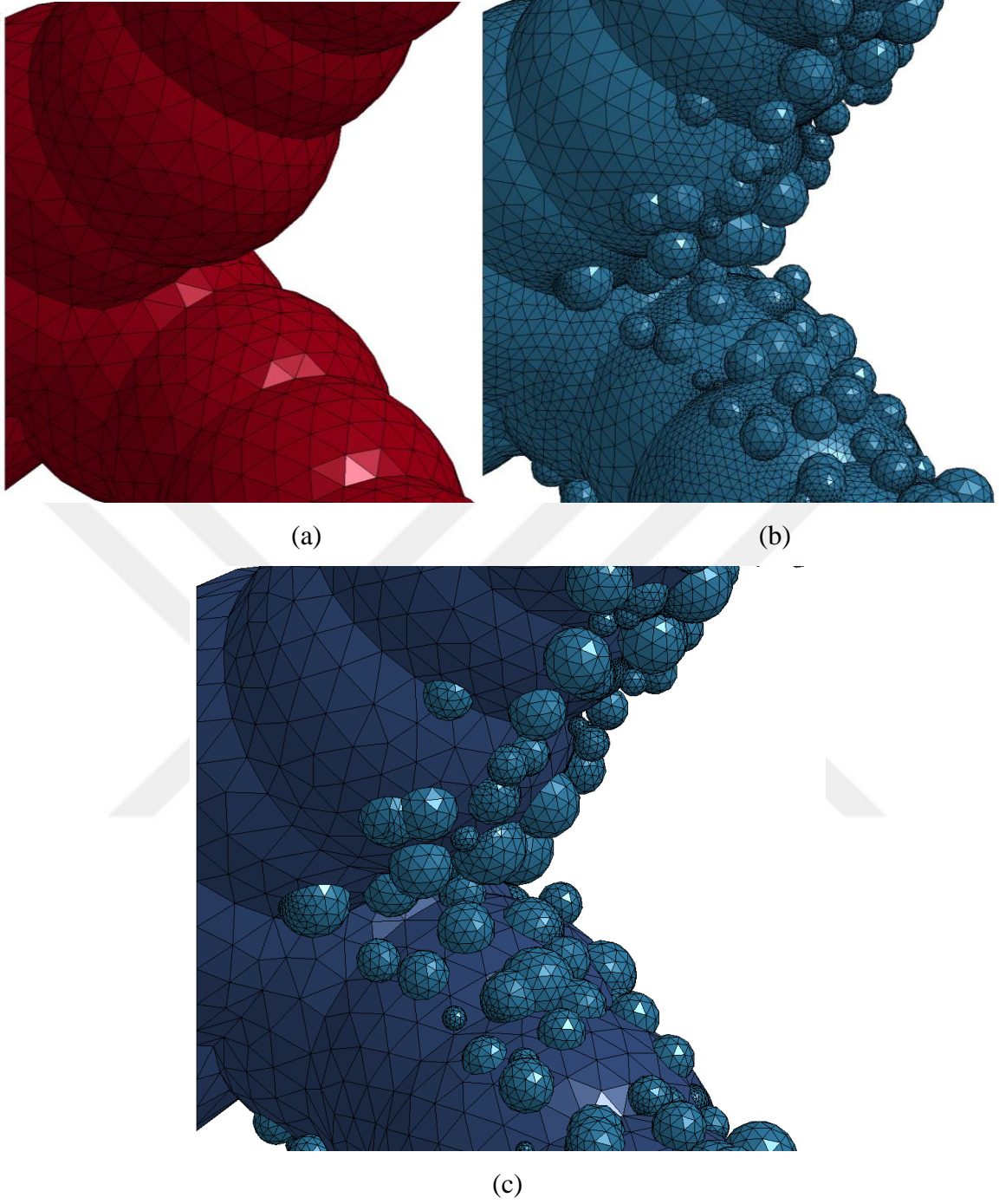
Kafes yapısındaki her telde meydana gelen kusurlar birbirinden farklı olmaktadır. Bu sebeple oluşturulan farklı hücrelerin aynı mekanik özelliği sergilemesi beklenemez. Bu sebeple gerçeğe yakın bir davranışın, tek bir telin analizi ile elde edilmesi mümkün olmamaktadır. Kusursuz modelde yapılanın aksine gerçeğe yakın geometrinin analizinde birden fazla telin modellenmesi gerekmektedir. Gerçeğe yakın sonuçların elde edilmesinde gerekli olan en az tel sayısının belirlenmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla çeyrek ve yarım kafesten oluşan (Şekil 2.19) modeller oluşturulmuştur. Bu modeller 1, 2 ve 3'er tane hücrenin üst üste gelmesi ile çeşitlendirilmiştir. Yapılan modellerde farklı geometrik kusurlara sahip tellerin kullanılmasına dikkat edilmiştir. 2,5 mm hücre boyutu için oluşturulan ağ yapıları Şekil 2.19'da gösterilmiştir.

Tozların eklenmesi ile yüzey geometrisinde çok fazla geçiş bölgesi ve ağ yapısında hataya sebep olabilecek yüzey çizgileri oluşmaktadır. Bu durumda 2,5 mm hücre boyutuna sahip tozsuz çeyrek kafes yapı modelinde eleman sayısı 16.000-17.000 civarında olurken, tozlu modelde 300.000-400.000 sayılarına ulaşmaktadır. Bu ciddi artışa tozların tel ile birleşim yerlerinde, eleman boyutlarının aşamalı olarak küçültülmesi sebep olmaktadır (Şekil 2.20). Geçiş bölgesi elemanları, sayısal çözüm süresini uzatmakla beraber boyutları sebebiyle yüksek deformasyon durumlarında sayısal hatalara sebep olma olasılığı yüksektir. Eleman sayısını, analiz süresini ve hatalı olabilecek elemanları azaltmak amacıyla farklı tekniklerle ağ yapısı oluşturma ihtiyacı doğmuştur. Tel ve tozların ağ yapısının ayrı ayrı oluşturulması hataların azaltılmasında etkili bir yöntem olmuştur. Ayrı ayrı ağ yapısı oluşturulan toz ve mikro tel, sonrasında LS-DYNA içerisinde birbirlerine AUTOMATIC\_TIED\_CONTACT kartı ile yapıştırılarak eleman sayısı ~200.000 değerlerine

düşürülmüştür. Şekil 2.18b, c’de değişik toz ekleme metotları için ağ yapısının görüntüsü verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi yapışma sınır şartı verilen model için ağ yapısı, normal tozlu modelin ağ yapısına göre çok daha homojen olmaktadır.



Şekil 2.19. Mikro kafes yapılar için oluşturulan ağ yapıları; a) eyrek, b) yarım ve c) tam hücre

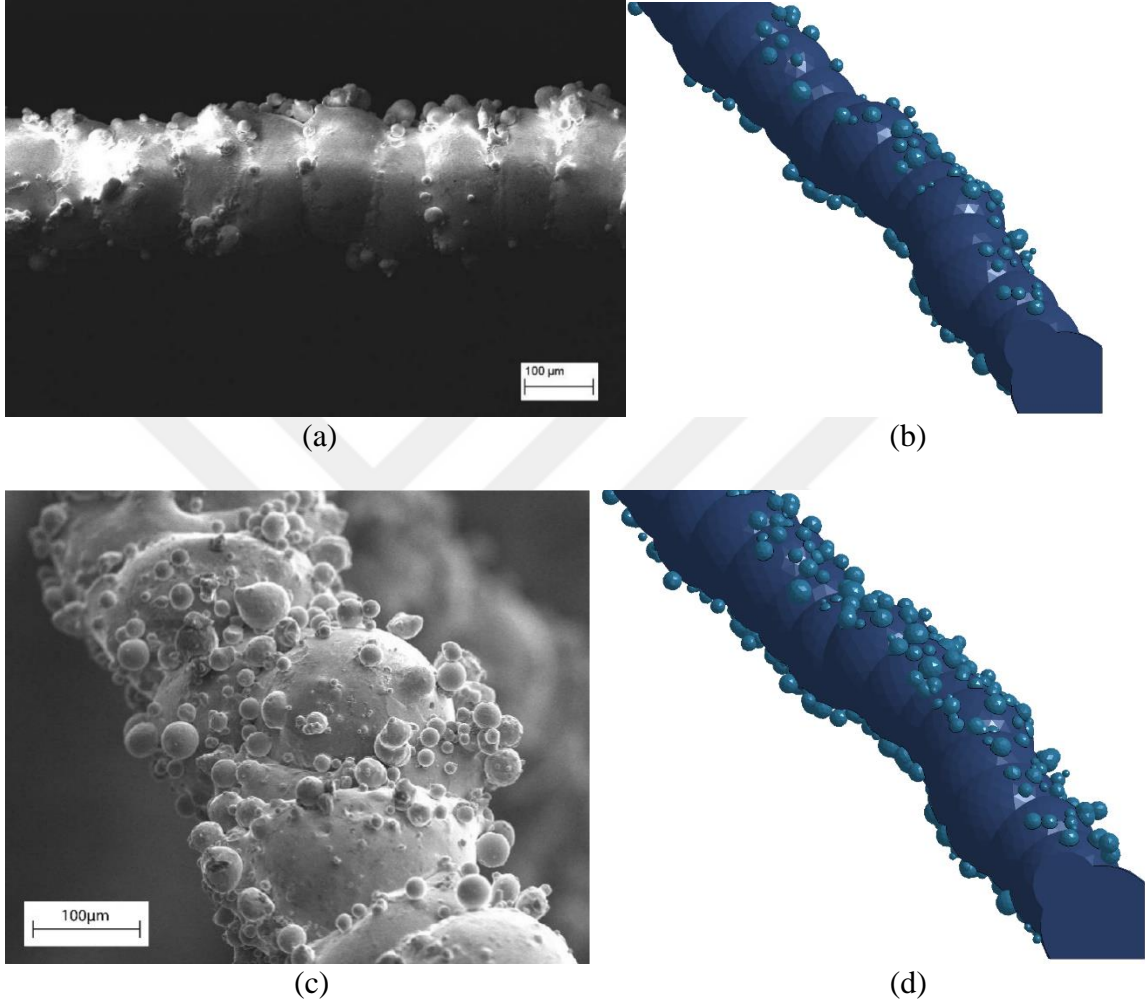


Şekil 2.20. Mikro tellerin kesişim noktalarındaki ağ yapıları; a) Tozsuz, b) Tek parça olarak ağ yapısı oluşturulan ve c) Toz-tel arasında yapışma sınır şartının uygulanması durumu

Farklı üretim parametrelerine, kullanılan cihaza, toz boyutuna, üretim koşullarına ve kafes yapılarına göre yüzeye yapışan tozların sayısında değişiklikler olmaktadır (Şekil 2.21a, c). Toz yoğunluğundaki bu değişikliğin mekanik özelliklere etkisini görebilmek amacıyla, az tozlu (Şekil 2.21b) ve çok tozlu (Şekil 2.21d) olmak üzere iki farklı model



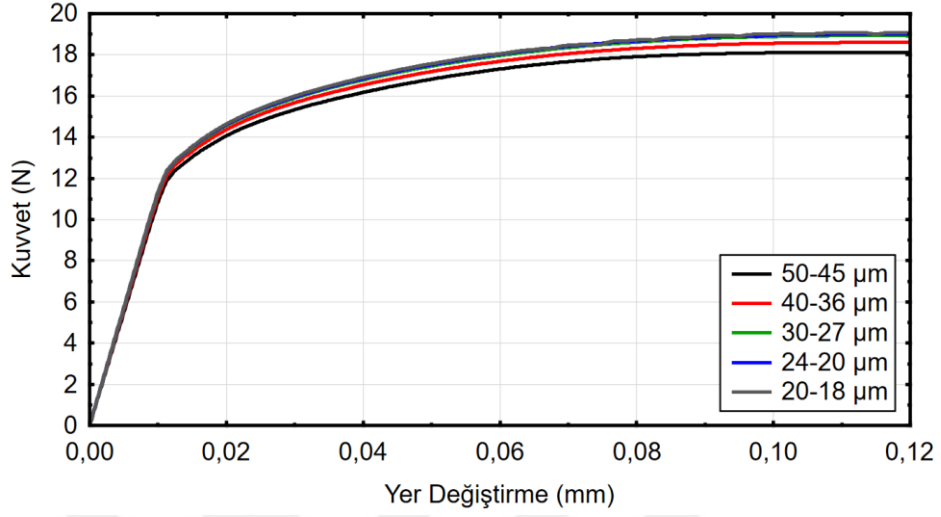
oluşturulmuştur. Modellerin oluşturulmasında mikro tellerin farklı bölgelerinden tozların sayımı gerçekleştirilmiştir. Yapılam sayımlardan, her 100  $\mu\text{m}$  tel uzunluğu için az tozlu ve çok tozlu modellerde sırasıyla ortalama 19,86 ve 52,44 adet toz bulunduğu hesaplanmıştır.



Şekil 2.21. Mikro tel üzerinde bulunan seyrek (a) ve yoğun [31] (c) tozlara göre oluşturulan az tozlu (b) ve çok tozlu (d) modellerin gösterimi

Ayrıca kusurlu modellerde optimum eleman boyutunun belirlenmesi için yakınsama analizi yapılmıştır. Analiz, tersine sonlu elemanlar yönteminden elde edilen mikro tellerin mekanik özellikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretim açısı  $90^\circ$  olan teller üzerine HyperMesh programından farklı eleman boyutlarında tetrahedral ağ yapısı oluşturulmuştur. Modellenen mikro teller için çekme testi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.22’de verilmiştir. Şekilden, ideal tetrahedral eleman boyutunun 20-24  $\mu\text{m}$

arasında olduğu görülmektedir. Bu boyuttan daha küçük elemanların neredeyse aynı gerilme-birim şekil değişimi eğrilerini verdiği Şekil 2.22'den görülmektedir.



Şekil 2.22. Kusurlu model için oluşturulan ağ yapısında eleman boyutunun yakınsaması

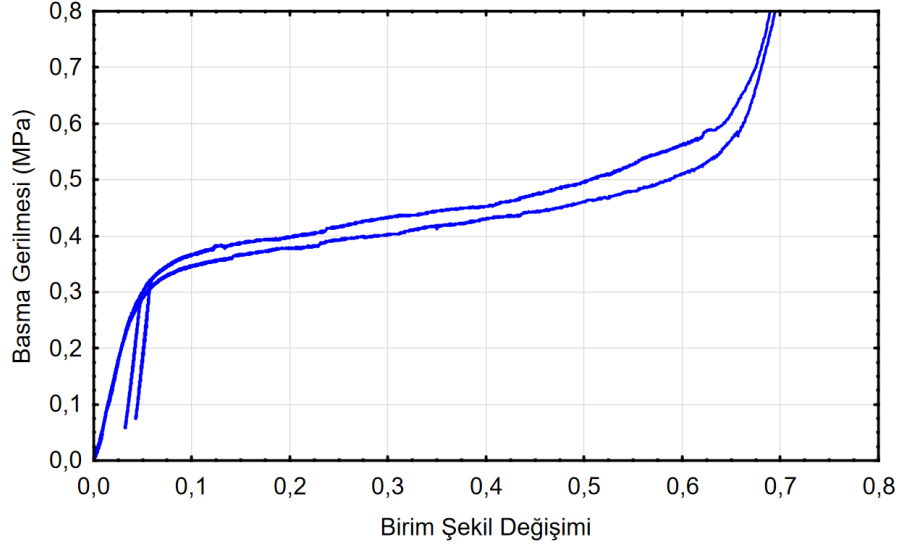
### **3. BULGULAR VE İRDELEME**

Bu bölümde mikro kafes yapıların mekanik davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalara ait bulgular verilmiştir. Elde edilen bulgular deneysel ve sayısal sonuçlar olmak üzere iki ana başlık altında sunulmaktadır. Deneysel sonuçlar mikro kafes yapıların basma testleri ve nano-indentasyon test sonuçlarını içermektedir. Buna karşılık sayısal sonuçlar; tersine sonlu elemanlar yöntemi sonuçları, nikel kaplamalı kafeslerin sayısal parametrik çalışmalarına ait sonuçlar ve mikro kafes yapıların gerçekçi modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçları kapsamaktadır.

#### **3.1. Deneysel Sonuçlar**

##### **3.1.1. Mikro Kafes Yapıların Basma Testi Sonuçları**

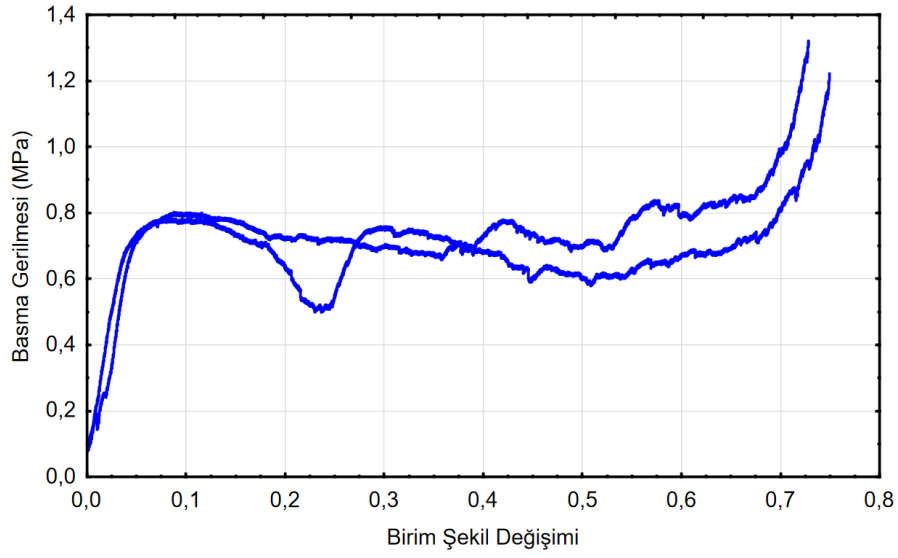
Mikro kafes yapılara uygulanan basma testine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri, 2,5 mm hücre boyutuna sahip BCC kafes yapılar için Şekil 3.1'de verilmiştir. Testlerin tekrarlanabilirliğini göstermek için iki adet numuneye ait sonuçlar verilmiştir. Kafes yapılar belli bir yüke kadar elastik yüklendikten sonra yaklaşık 0,36 MPa başlangıç çökme gerilmesi değerinde plastik deformasyona uğramaya başlamıştır. Deformasyon devam ettikçe gerilme değerlerinde lineer bir artış göstermektedirler ve en son aşamada gerilmelerde ciddi bir artış meydana gelmektedir. Bu artış kafesin maksimum sıkışma (compaction) miktarına yaklaştığını göstermektedir ve kafesin artık enerji sönümleyemeyeceğini göstermektedir. Genel olarak bakıldığında mikro kafes yapıların gerilme-birim şekil değiştirme davranışı dört bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler elastik yükleme bölgesi, elastoplastik yükleme (başlangıç çökme gerilmesinin başladığı bölge), lineer yükleme bölgesi ve sıkışma bölgelerinden oluşmaktadır [6]. Lineer yükleme bölgesinde gerilmelerdeki artışın, mikro tellerin plastik deformasyonunun sonucunda meydana gelen pekleşme davranışından (hardening) kaynaklandığı kolayca anlaşılabilir.



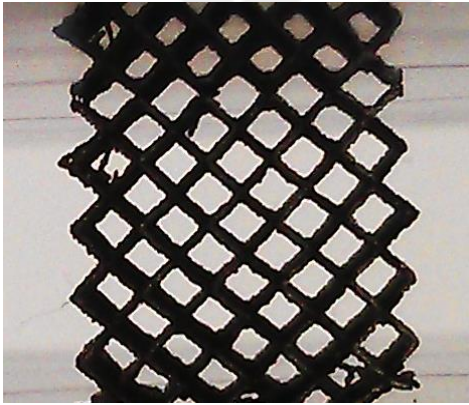
Şekil 3.1. BCC mikro kafes yapıların basma testinden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

### 3.1.2. Nikel Kaplamalı Mikro Kafes Yapıların Basma Testi Sonuçları

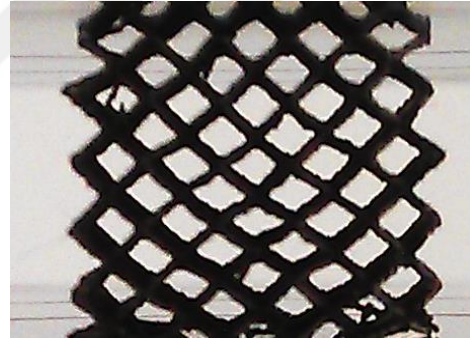
2,5 mm hücre boyutuna sahip kaplamalı kafes yapıların basma gerilmesi-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.1’den görüldüğü gibi kaplanmış ve kaplanmamış kafes blokların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karakteristiğinde ciddi farklar meydana gelmektedir. Kaplanmış kafes yapılarda mukavemet değeri başlangıçla yaklaşık 0,80 MPa gerilme değerine kadar hızla artmaktadır ve ardından kısmen ani düşüşler ve tekrar artışlar göstermektedir. Lineer yükleme bölgesinde gerilme değerlerinin sabit olmaması dikkat çeken bir noktadır. Bu durum Nikel kaplamanın gevrek yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kolayca anlaşılabilir ki; eğilme deformasyonu esnasında nikel kaplamada mikro kafes çekirdeğe göre daha fazla eğilme gerilmeleri meydana gelmektedir. Eğilme gerilmeleri sebebiyle deformasyon arttıkça nikel kaplamada hasar oluşmakta ve hasarın etkisiyle kaplanmış kafeslerin mukavemetinde salınımlı bir davranış ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.3’de kaplanmış mikro kafes yapının belirli çökme mesafelerindeki deformasyon gelişimi verilmektedir. Şekil incelendiğinde kaplanmış ve kaplanmamış kafes [6] blokların çökme mekanizmalarının benzer olduğu görülmektedir. Çökme genel olarak mikro kafeslerin kesişim noktaları etrafında meydana gelmektedir. Bu hasar modu detaylı olarak [6, 20, 77]’de tartışılmıştır. Ayrıca Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’den görüldüğü üzere kaplanmış malzemelerin elastisite modülleri kaplanmamış malzemelere göre ciddi oranda artmaktadır.



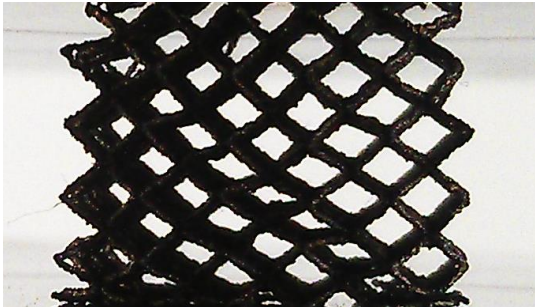
Şekil 3.2. Nikel kaplanmış BCC mikro kafes yapıların basma testinden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri



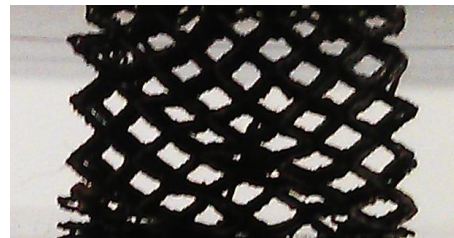
$\varepsilon = 0.05$



$\varepsilon = 0.10$



$\varepsilon = 0.15$



$\varepsilon = 0.20$

Şekil 3.3. Kaplanmış BCC mikro kafes yapıların basma etkisi altındaki deformasyon ilerlemesi

Tablo 3.1 yapılan testler sonucunda ölçülen ve hesaplanan değerlerin bir özeti vermektedir. Kaplama durumunda kafesin spesifik elastisite modülünde yaklaşık %50 ve spesifik mukavemetinde yaklaşık %75 değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Buna karşın kaplanmış blokların kütledeki artış miktarı, eşdeğer kaplanmamış numuneye göre %25'dir. Sonuçlar göstermektedir ki; nikel kaplama uygulaması ile seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş mikro kafeslerin spesifik mukavemetlerini ciddi şekilde iyileştirmesi mümkündür. Bu çalışmada fosfor oranı tek bir değerde numune üretilmiş olup farklı bileşen oranlarında kaplama çalışmalarıyla optimum bileşen oranı belirlenmesine yönelik kapsamlı bir deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca kaplama sonrası yapılabilecek ısıl işlem benzeri işlemlerle de kaplanmış mikro kafes yapıların mekanik özelliklerinin daha da iyileştirilmesi mümkün olabileceği öngörülmektedir.

Tablo 3.1. Nikel kaplamalı ve kaplamasız BCC numunelerinin özellikleri ve test sonuçlarının bir özeti

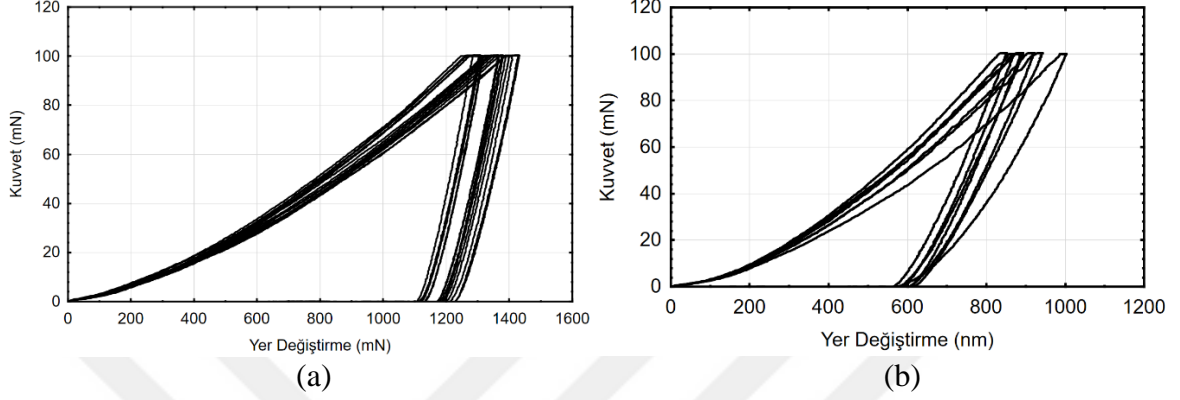
| Numune       | Ağırlık (g)   | Hücre Boyutu (mm) | Başlangıç plastik çökme gerilmesi (MPa) | Elastisite modülü (MPa) | Spesifik yoğunluk | Spesifik başlangıç çökme gerilmesi (MPa) | Spesifik elastisite modülü (MPa) |
|--------------|---------------|-------------------|---|-------------------------|-------------------|--|----------------------------------|
| Kaplamasız-1 | 0,55          | 12,5              | 0,36                                    | 7.94                    | 0,0352            | 10,22                                    | 225,57                           |
| Kaplamasız-2 | 0,56          | 12,5              | 0,36                                    | 7.37                    | 0,0358            | 10,05                                    | 205,86                           |
| Kaplamalı-1  | 0,81 (0,577)* | 12,5              | 0,78                                    | 18.44                   | 0,0518            | 15,06                                    | 355,98                           |
| Kaplamalı-2  | 0,83 (0,59)*  | 12,5              | 0,80                                    | 20.98                   | 0,0531            | 15,07                                    | 395,10                           |

\* Parantez içerisindeki değerler, ilgili numunenin kaplamasız ağırlığını vermektedir.

### 3.1.3. Nano-indentasyon Test Sonuçları

Bölüm 2.2.2'de bahsedilen parametreler kullanılarak nikel kaplama ve SLM ile üretilmiş mikro tellere nano-indentasyon testleri uygulanmıştır. Nikel kaplamanın 17 µm kalınlığından olmasından dolayı 100 mN kuvvet değeri aşılmamıştır. Bu değerin aşılması durumunda, Şekil 2.4'den de görüldüğü üzere, yüzeyde oluşacak izin kenarlara çok yakın olacağı görülmektedir. Bu durum kaplamanın mekanik özelliklerinin doğru belirlenememesine sebep olacaktır. Şekil 3.4'de kaplamanın ve mikro telin nano-indentasyon test sonuçları verilmiştir. Her iki malzeme için de uygulanan nano-indentasyon testlerinde, eğrilerin birbirinden çok fazla sapmadığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak her iki malzeme için yük ve konum değerlerinin iyi seçildiği söylenebilir. Şekil 3.4'deki eğriler incelendiğinde, ortalama eğride, 100 mN kuvvet altında nikel kaplamada 920 nm

batma gözlemlenmiştir. Mikro tel için, aynı yük altında, ortalama eğri için batma derinliği 1366 nm olmaktadır. Bu değerlerden yola çıkılarak nikel kaplamanın çok daha sert bir davranış sergilediği görülmektedir.



Şekil 3.4. Nano-indentasyon test sonuçları; a) SLM ile üretilmiş mikro teller ve b) nikel kaplama

Nano-indentasyon testlerinin sonuçları kullanılarak Eşitlik 1.1, 1.3 ve 1.4 ile malzemelerin elastisite modülleri ve sertlikleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.2’de özetlenmektedir. Tablo 3.2’den de görüldüğü üzere nikel kaplamanın sertlik değeri 7844,82 MPa olarak bulunmuştur. Mikro telin sertlik değeri ise 2686,10 MPa’dır. Nano-indentasyon test sonuçlarında nikel kaplamanın, mikro tele göre daha batma gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkılarak batma derinliği ve sertlik değerlerinin tutarlı olduğu kolayca anlaşılmaktadır. Elastisite modülü değerlerinde mikro tel için 95,73 GPa elde edilmiştir. Bu değer Gümrük ve Mines [6] tarafından yapılan çalışmada elde edilen 97 GPa değerine oldukça yakındır. Nikel kaplama için elastisite modülü ise 101 GPa olarak bulunmuştur.

Mikro tel ve nikel kaplamaya yapılan nano-indentasyon testlerine ilave olarak tersine sonlu elemanlar yönteminin doğrulanması amacıyla, mekanik özellikleri standart çekme testlerinden belirlenebilen, DP800 ve AISI 304L çelikleri üzerinde nano-indentasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Üstelik Farklı optimizasyon metotlarının karşılaştırılabilmesi için S355 çeliğinin nano-indentasyon ve gerilme-birim şekil değişimi eğrileri literatürden alınmıştır [50]. Bu malzemelere ait elastisite modülleri de Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Nano-indentasyon testlerinden elde edilen sertlik ve elastisite modülü değerleri

| Test No  | SLM ile üretilmiş mikro tel |               | Nikel Kaplama           |               | DP800                   | AISI 304L               | S355 [50]               |
|----------|-----------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|          | Elastisite Modülü (GPa)     | Sertlik (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) | Sertlik (MPa) | Elastisite Modülü (GPa) | Elastisite Modülü (GPa) | Elastisite Modülü (GPa) |
| 1        | 86,75                       | 2534,60       | 78,51                   | 6225,78       | -                       | -                       | -                       |
| 2        | 90,51                       | 2606,22       | 100,44                  | 7396,37       | -                       | -                       | -                       |
| 3        | 91,88                       | 2681,83       | 101,11                  | 8178,71       | -                       | -                       | -                       |
| 4        | 102,15                      | 2892,53       | 113,78                  | 8475,56       | -                       | -                       | -                       |
| 5        | 88,66                       | 2400,71       | 110,05                  | 8044,89       | -                       | -                       | -                       |
| 6        | 92,06                       | 2646,63       | 87,30                   | 7592,69       | -                       | -                       | -                       |
| 7        | 90,66                       | 2466,16       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| 8        | 102,47                      | 2861,62       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| 9        | 90,78                       | 2628,04       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| 10       | 106,82                      | 2889,27       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| 11       | 102,37                      | 2926,48       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| 12       | 99,01                       | 2625,88       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| 13       | 87,01                       | 2396,66       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| 14       | 86,42                       | 2590,59       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| 15       | 103,47                      | 2838,29       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| 16       | 110,69                      | 2992,16       | -                       | -             | -                       | -                       | -                       |
| Ortalama | 95,73                       | 2686,10       | 101,18                  | 7844,82       | 230                     | 236,62                  | 238,72                  |

### 3.2. Sayısal Sonuçlar

#### 3.2.1. Tersine Sonlu Elemanlar Yöntemi Sonuçları

Hücresele kafes yapıların mekanik özelliklerinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi ve modellenmesinden önce, sonlu elemanlarda kullanılacak olan malzeme parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Bu sebeple ilk aşamada nikel kaplamanın ve mikro tellerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde tersine sonlu elemanlar yöntemi uygulanmıştır. Tersine sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu kanıtlamak için DP800, AISI 304L ve literatürden alınan S355 [50] malzemeleri ile optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

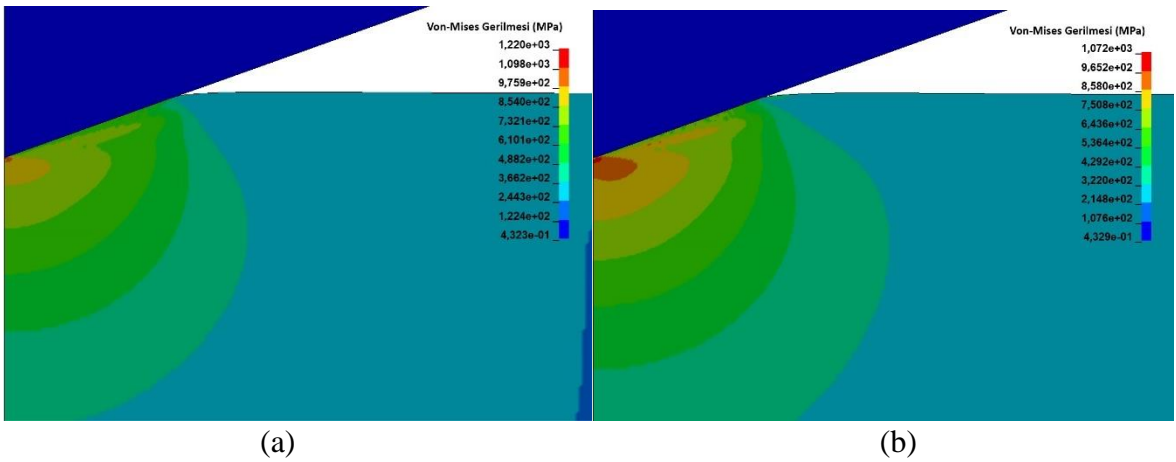
##### 3.2.1.1. Nano-indentasyon Uç Yuvarlatmasının Etkisi

Nano-indentasyon testlerinden elde edilen veriler ile kaplamanın mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla bölüm 2.3.2'deki parametrelere uygun



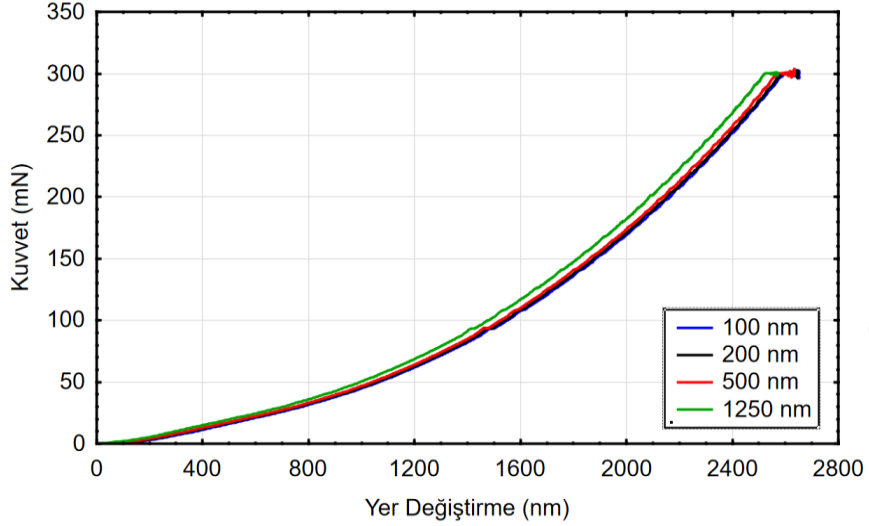
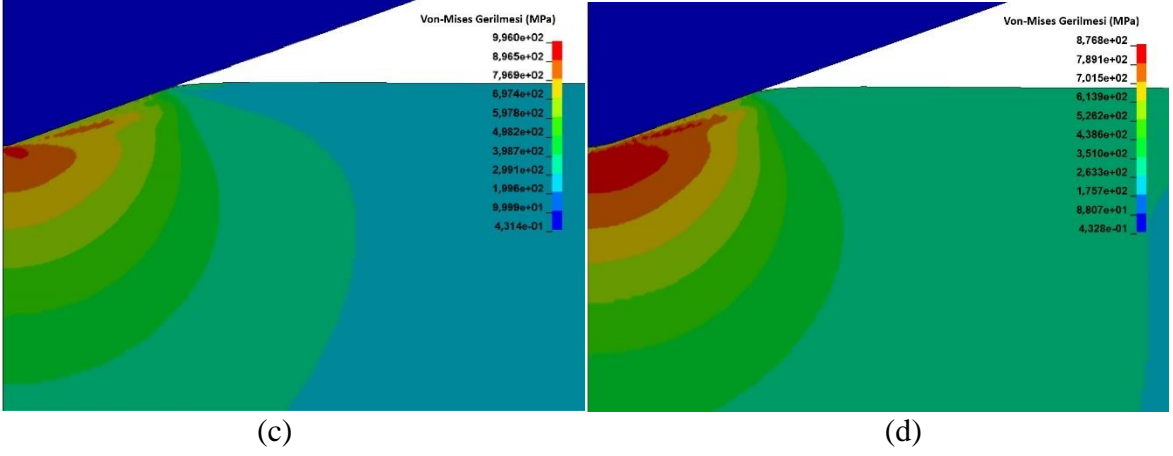
bir model hazırlanmıştır. Literatürde, batıcı uçta aşınmadan kaynaklı 100 ile 400 nm arasında bir yuvarlatma uygulanması gerektiği belirtilmiştir [71-73]. Değer aralığının çok geniş olmasından dolayı uçtaki yuvarlatmaların deneyler üzerindeki etkisi incelenmek istenmiştir. Yuvarlatma etkisinin incelenmesi için Şekil 2.6’da gösterilen yuvarlatma yarıçapı ( $r_y$ ) için 100, 200, 500 ve 1250 nm olan numunelerde analiz koşturulmuştur. Koşturulan analizlerin deformasyon davranışları ve von-Mises gerilmeleri Şekil 3.5’de görülmektedir. Şekil 3.5’den yola çıkılarak batıcı uçta yapılan yuvarlatma değerinin artırılması ile batıcı ucun meydana getirdiği von-Mises gerilmesi de düşmektedir. Bu durum, yükün tek bir nokta üzerine uygulanmasındansa daha geniş bir yüzey alanına dağılmasından meydana gelmektedir. Numune içerisinde meydana gelen gerilmeler yuvarlatma yarı çapının artması ile daha geniş bir alana tesir etmektedir.

Yuvarlatma yarıçapı için 100, 200, 500 ve 1250 nm’de yapılan analizlerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.6’da verilmiştir. Şekil 3.5’de görülen von-Mises gerilmelerindeki farklılıkların, kuvvet-yer değiştirme grafikleri üzerine çok fazla etkisinin olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi batıcı uç ile numune temasından çok kısa bir süre sonra, eşdeğer konik ucun  $70,3^\circ$ ’lik eğime sahip yüzeyi ile numunenin temasının başlamasıdır. Buna karşılık; 1250 nm yuvarlatma yarıçapı için kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde artma gözlemlenmiştir. Meydana gelen artışın batıcı ucun  $70,3^\circ$  eğimli yüzey ile temasının geciktirilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan analizlerde 1250 nm gibi nispeten büyük bir yuvarlatma olmadığı sürece, uç yuvarlatmasının ciddi bir etkisi olmayacağı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.5. Batıcı uç yuvarlatılmasının von-Mises gerilme dağılımı üzerine etkisi; a) 100 nm, b) 200 nm, c) 500 nm ve d) 1250 nm yuvarlatma değerlerinde

Şekil 3.5'in devamı

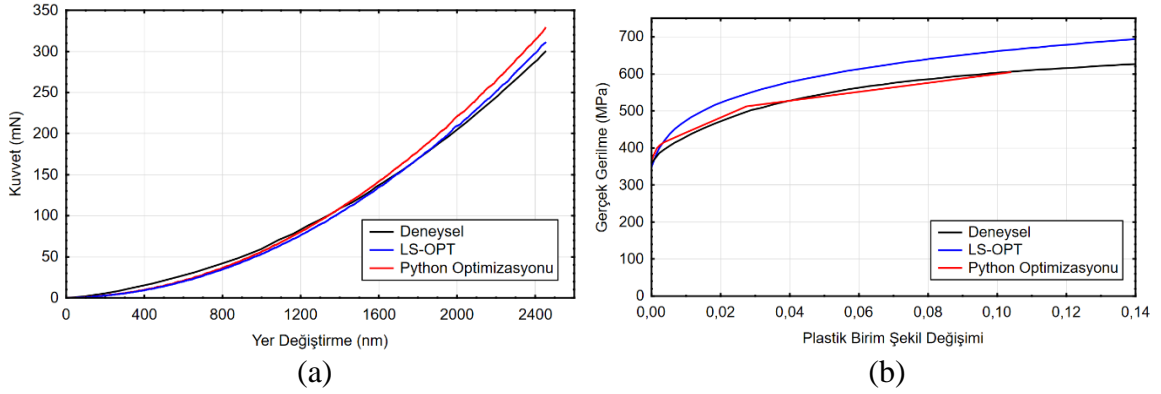


Şekil 3.6. Çeşitli uç yuvarlatmalarına sahip batıcı uçlar için elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri

### 3.2.1.2. Tersine Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması

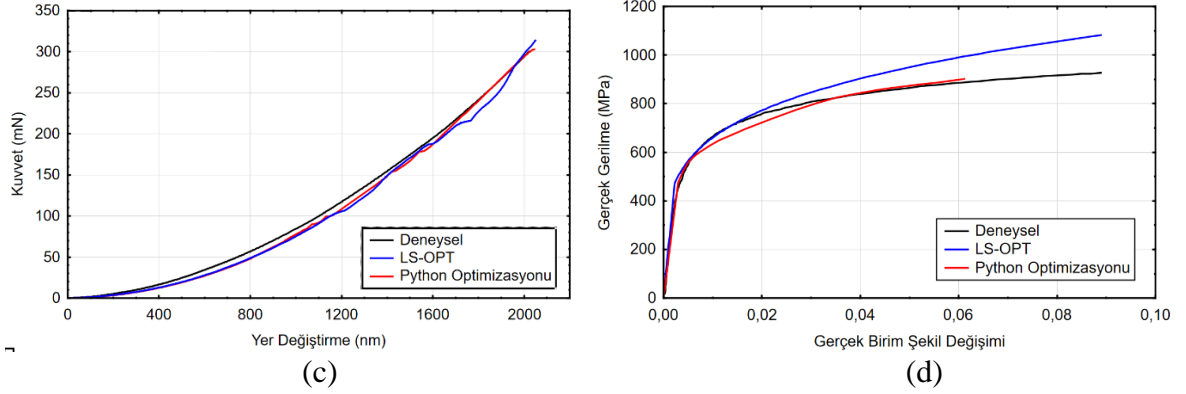
Oluşturulan modelin doğruluğunu göstermek için, tersine sonlu elemanlar kodu öncelikle mekanik özellikleri bilinen DP800 çift fazlı çelik ve S355 malzemeleri için koşturulmuştur. DP800'ün gerilme-birim şekil değişimi değerleri standart tek eksenli çekme cihazlarından elde edilmiştir. S355 gerilme-birim şekil değişimi davranışları ise [50]'den alınmıştır. Şekil 3.7a, b'de S355 çeliğinin nano-indentasyon testlerinin ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin deneysel ve sayısal karşılaştırmalarını vermektedir. Şekil 3.7c, d'de DP800 çeliğinin nano-indentasyon testlerinin ve gerilme-birim şekil değiştirme

eğrilerinin deneysel ve sayısal karşılaştırmalarını vermektedir. Şekil 3.7a'dan görüldüğü üzere LS-OPT yaklaşımı, python optimizasyonuna göre gerçeğe daha yakın sonuç vermektedir. Eğrilerin başlangıç kısımları birbirlerine oldukça yakın olmasına rağmen batma derinliğinin artması ile eğriler arasındaki farklar daha belirgin gözükmemektedir. Fakat iki yöntem arasındaki kuvvet farkı oldukça düşüktür. Şekil 3.7c'de ise LS-OPT ve python optimizasyon yaklaşımları neredeyse aynı sonucu vermiştir. Sonuçlar birbirine oldukça yakın olmasına rağmen Şekil 3.7b, d'de görüldüğü üzere, gerilme-birim şekil değişimi davranışlarında ciddi farklar meydana gelmektedir. LS-OPT yaklaşımı için gerilme değerleri, deneysel verilerin üstünde kalmaktadır. Şekil 3.7d'de LS-OPT yaklaşımı, elastoplastik bölgede deneysel verilere yakın sonuçlar vermektedir. Fakat plastik bölge tahmininde LS-OPT yönteminin her iki numune için de deneysel verilerden ıraksadığı görülmektedir. Bunun sebebinin plastik bölge tahmini için kullanılan eşitliklerin getirdiği kısıtlamalar olduğu düşünülmektedir. Plastik bölge tahmininde herhangi bir eşitliğin kullanılmadığı python optimizasyonunda, deneysel verilere oldukça yakın sonuçların elde edildiği Şekil 3.7 b, d'den görülmektedir. Python optimizasyonu elastoplastik bölgede bir miktar salınım yapsa da genel olarak deneysel veriler oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar geliştirilen modelin doğru çalıştığını göstermektedir.

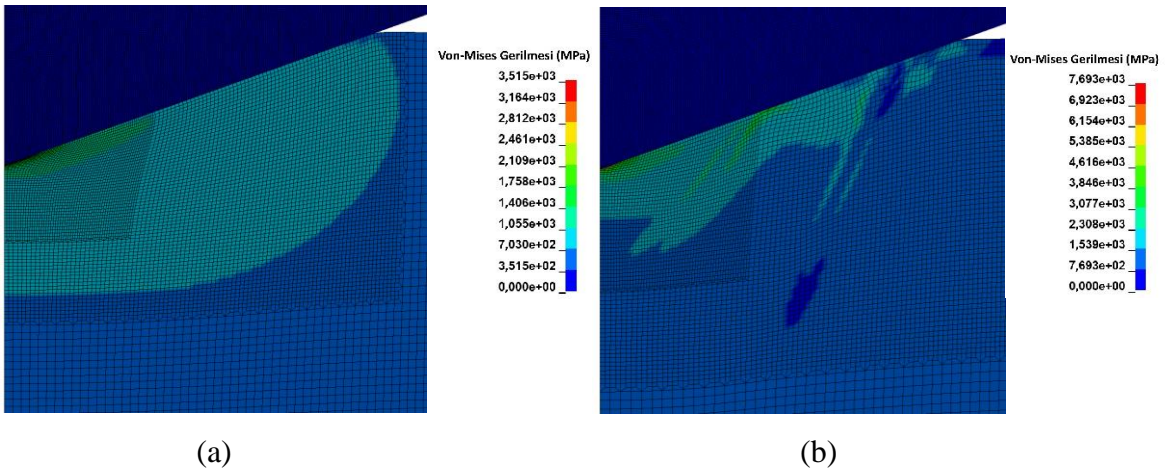


Şekil 3.7. Tersine sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması; a-b) S355 çeliği için sırasıyla kuvvet-yer değiştirme ve gerçek gerilme-plastik birim şekil değişimi eğrileri ve c-d) DP800 çeliği için sırasıyla kuvvet-yer değiştirme ve gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrileri

Şekil 3.7'nin devamı

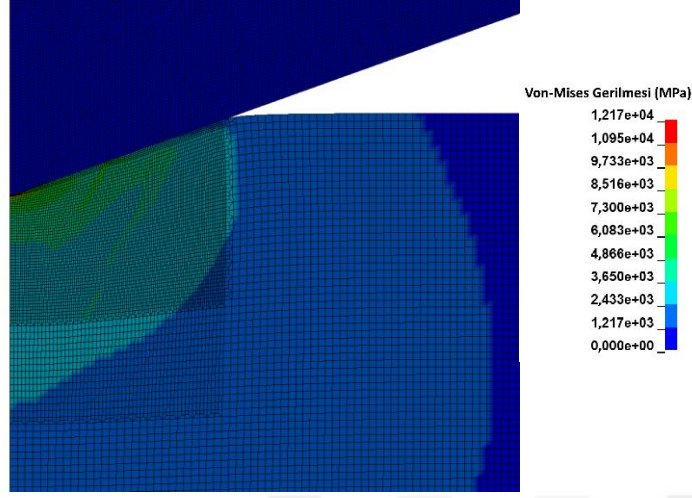


Tersine sonlu elemanlar yönteminde elde edilen mekanik özellikler nano-indentasyon analizlerinde kullanılmıştır. Analizlerde meydana gelen kuvvet-yer değiştirme değerleri Şekil 3.7a, c'de görülmektedir. Bu analizlerden elde edilen von-Mises gerilme dağılımları ve deformasyon şekilleri ise Şekil 3.8'de verilmiştir. Akma gerilmesinin artmasıyla, beklendiği gibi, von-Mises gerilmelerinde artış ve batma derinliğindeki düşüş görülmektedir. Numunenin batıcı uç ile temasa geçtiği noktalarda maksimum von-Mises gerilmesi elde edilmektedir. Şekil 3.8c'de nikel kaplama için gerilme değeri, S355 için elde edilen maksimum gerilme değerinden 3,5 kat daha fazladır. Gerilme değeri çok daha yüksek olmasına rağmen, batma derinliği düşük olduğundan, nikel kaplamadaki gerilmelerin etki bölgesi nispeten daha küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca S355 ve nikel kaplama nano-indentasyon testlerinde gerilmeler daha homojen bir dağılım göstermektedir.



Şekil 3.8. Mekanik özellikleri optimize edilmiş numuneler için nano-indentasyon analizi von-Mises gerilme dağılımları; a) S355, b) DP800 ve c) Nikel kaplama

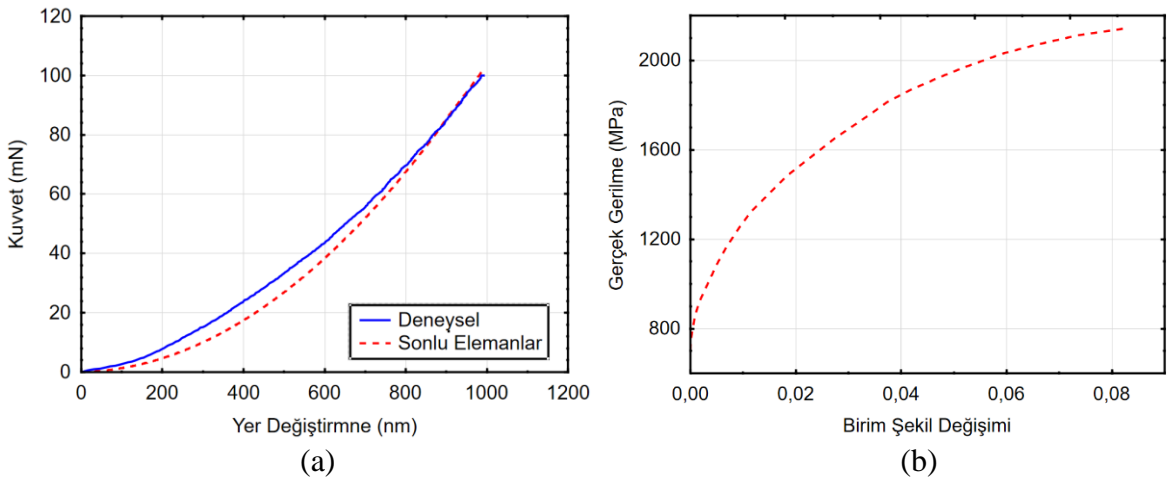
Şekil 3.8'in devamı



(c)

### 3.2.2. Nikel Kaplamanın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Nikel kaplamanın mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için, Bölüm 3.2.1.2' de doğrulanan tersine sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Nikel kaplama için deneysel ve tersine sonlu elemanlardan elde edilen nano-indentasyon kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.9a'da verilmiştir. Optimizasyondan elde edilen gerçek gerilme-plastik birim şekil değiştirme eğrisi ise Şekil 3.9b'de verilmiştir.

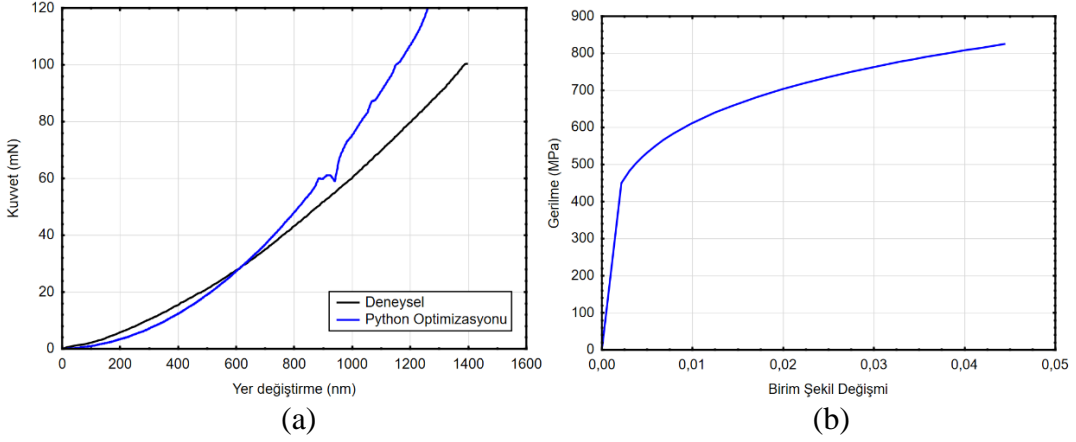


Şekil 3.9. Nikel kaplama için tersine sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar; a) nano-indentasyon yüklemesi için kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması ve b) elde edilen gerçek gerilme-plastik birim şekil değişimi eğrisi

Şekil 3.9'dan görüldüğü üzere nikel kaplama için sayısal ve deneysel nano-indentasyon eğrileri nispeten birbirine yakın elde edilmiştir. Elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine bakılacak olursa, kaplama için akmanın 700 MPa değerlerinde başladığı sonucu elde edilmiştir. Ayrıca kaplama için Şekil 3.9'dan görüldüğü gibi oldukça yüksek malzeme pekleşmesi özelliği bulunduğu belirlenmiştir. Yani %8 plastik birim şekil değiştirme değerinde yaklaşık 2100 MPa gerçek gerilme değeri ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında Eşitlik 1.4 yardımıyla kaplama için elastisite modülü 101,18 GPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca belirtmek gerekir ki; hesaplanan elastisite modülü, uygulanan tersine sonlu elemanlar modelinde malzemenin elastisite modülü olarak alınmıştır. Böylece kaplama malzemesinin mekanik özellikleri elde edilmiştir.

### 3.2.3. Mikro Tellerin Mekanik Özelliklerinin Elde Edilmesi

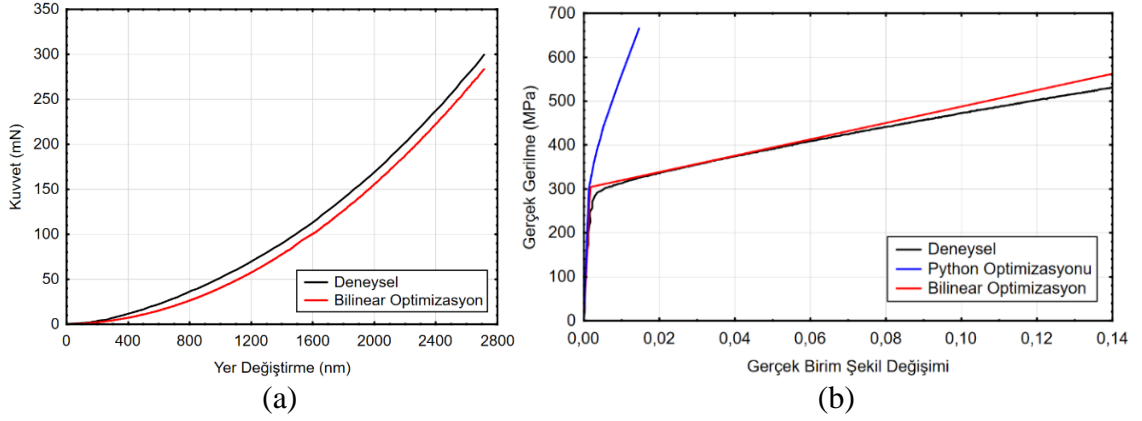
Bölüm 3.2.1.2'de python optimizasyonun, gerçeğe en yakın sonucu verdiği görülmüştür. Buradan yola çıkarak python optimizasyonu SLM ile üretilmiş mikro kafes yapılara uygulanmıştır. Uygulanan optimizasyonların sonuçları Şekil 3.10'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere optimizasyon sonucundan elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi, deneysel eğriye yakınsamamıştır. Ayrıca gerilme-birim şekil değişimi eğrisi literatürde elde edilen eğrilerin (Şekil 1.7) ciddi oranda üzerinde kalmaktadır. Buradan, Şekil 3.10'da verilen sonuçların 316L malzemesinden üretilen mikro kafes yapıların mekanik özelliklerini doğru olarak yansıtmadığı görülmüştür. Elde edilen farkın, malzemenin dar bir elastoplastik geçiş bölgesine sahip olmasından meydana geldiği düşünülmektedir. Bilinear davranış gösteren malzemelerdeki dar elastoplastik geçiş bölgesi akma bölgesinin doğru olarak belirlenmesini engellemektedir. Buradan yola çıkılarak, dar elastoplastik davranışı daha iyi temsil eden bilinear malzeme modelinin daha iyi sonuç vereceği tahmin edilmiştir. Bu amaçla LS-OPT programı kullanılarak bilinear malzeme modeli optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Bilinear LS-OPT optimizasyonunda, önceki optimizasyona benzer şekilde MAT24\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY malzeme kartı kullanılmıştır. Bilinear LS-OPT yönteminin, Hollomon LS-OPT yönteminden farkı; malzemenin tanjant modülünün ve akma gerilmesinin optimize edilecek parametreler olarak kabul edilmesidir.



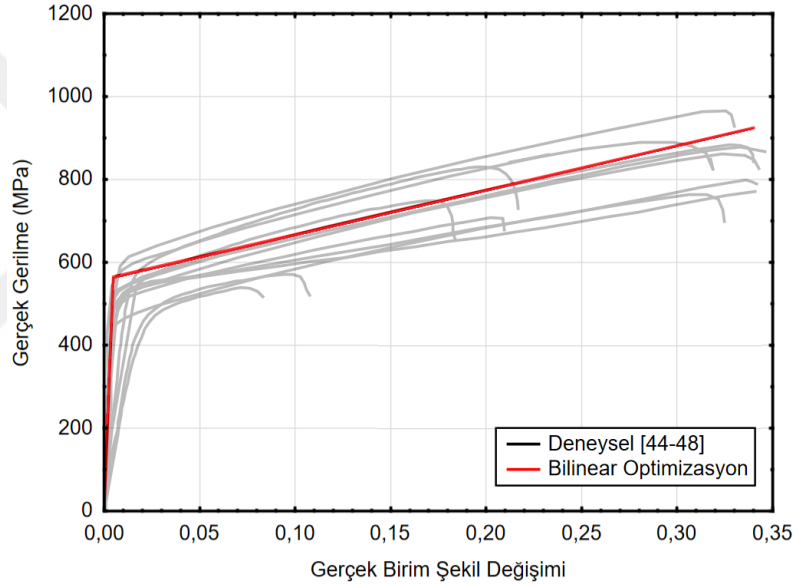
Şekil 3.10. SLM ile üretilen 316L mikro kafes yapılar için python optimizasyon sonuçları; a) deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması, b) elde edilen gerilme-birim şekil değişim eğrisi

Bilinear optimizasyonu doğrulamak amacıyla, bilinear davranış gösteren, AISI 304L çeliği üzerinde optimizasyonlar yapılmıştır. Elde edilen optimizasyon sonuçları Şekil 3.11’de verilmiştir. Şekilden, gerilme-birim şekil değişimi ve nano-indentasyon eğrilerinin bilinear optimizasyonda deneysel verilere oldukça yakın sonuçlar verdiği gözükmektedir. Şekil 3.11b’de python optimizasyonundan elde edilen sonuçların ise deneysel değerlerden çok farklı olduğu görülmektedir. Deneysel veriler ile karşılaştırıldığında, bilinear optimizasyon yönteminde, elastoplastik geçiş bölgesinde çok az miktarda farklar meydana gelmektedir. Artan birim şekil değişimiyle beraber, optimizasyon sonucu ve deneysel veriler arasında farklar oluşmaktadır. Meydana gelen bu farklar, tersine sonlu elemanlar optimizasyonları için kabul edilebilir düzeydedir. Şekil 3.11a’da bilinear optimizasyondan elde edilen eğri karakteristiğinin deneysel verilere çok benzediği fakat bir miktar altında kaldığı görülmektedir.

Bilinear optimizasyon yöntemi doğrulandıktan sonra SLM ile üretilmiş mikro kafes tellerin mekanik özelliklerini belirlemek için uygulanmıştır. Bilinear optimizasyon sonucunda 316L malzemesi için akma gerilmesi 650 MPa ve tanjant modülü 1070 GPa olarak belirlenmiştir. Şekil 1.7’de gösterilen eğriler ile elde edilen optimizasyon sonuçların karşılaştırılması Şekil 3.12’de gözükmektedir. Şekil 3.12’den de görüldüğü gibi bilinear optimizasyon yöntemi ile elde edilen eğrilerin karakteristiği, literatürde deneysel testlerden elde edilen eğrilere oldukça benzemektedir.



Şekil 3.11. AISI 304L çeliğinin bilinear optimizasyon sonuçları; a) nano-indentasyon, b) gerilme-birim şekil değişimi eğrileri



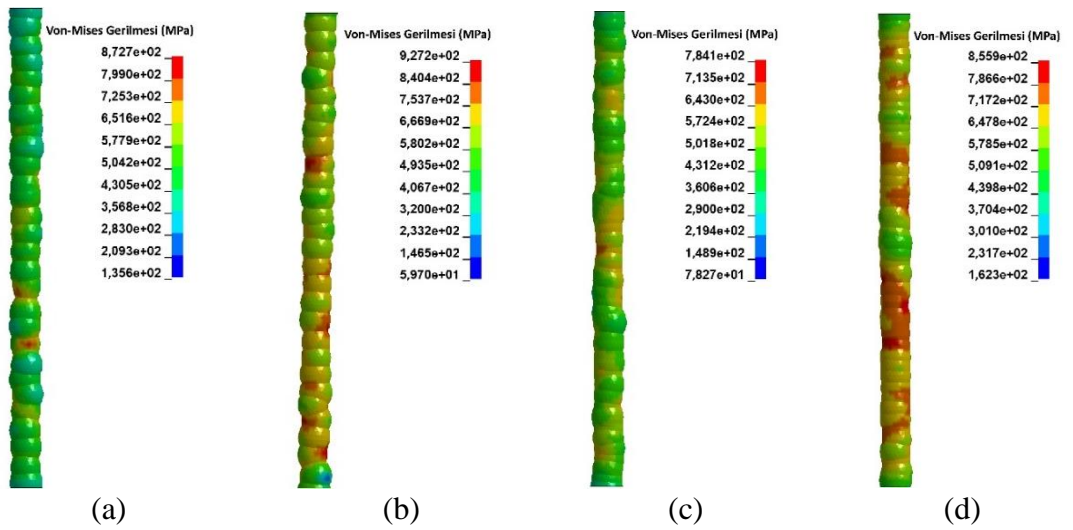
Şekil 3.12. 316L malzemesi için bilinear optimizasyon sonuçlarının literatürdeki eğriler ile karşılaştırılması

Şekil 3.11'den elastoplastik geçiş bölgesinin dar olduğu malzemelerde (AISI 304L ve mikro teller), LS-OPT ile gerçekleştirilen bilinear malzeme modeli optimizasyonun daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer yandan elastoplastik bölgenin geniş olduğu malzemelerde (S355, DP800 ve nikel kaplama), modifiye Hollomon malzeme modeli ile python kodu optimizasyonun daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkarak kullanılacak malzeme modelinin, malzemeye uygun seçilmesi gerektiği açıkça görülmüştür. Malzemeye uygun modelin saptanması, detaylı ve parametrik bir çalışma gerektirdiğinden bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmemiştir.



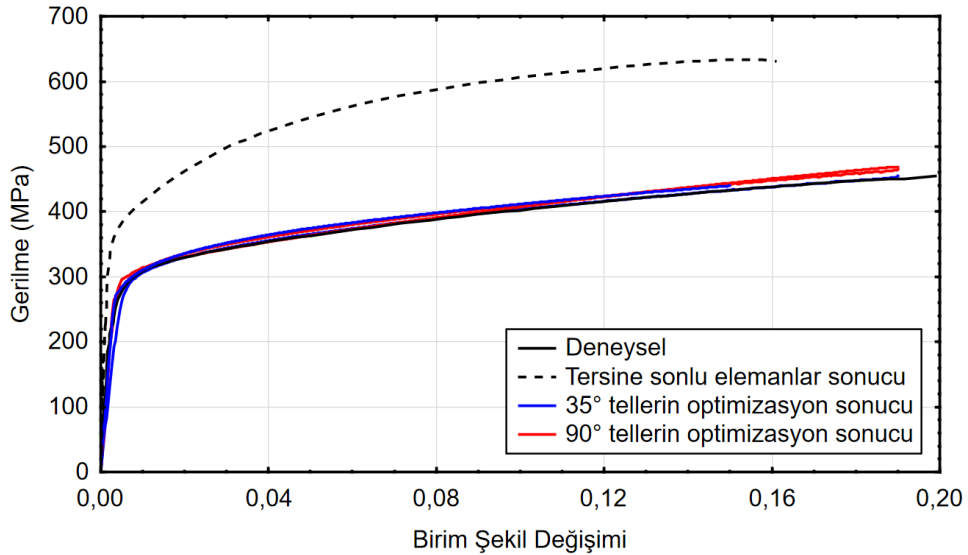
### 3.2.4. Malzeme Parametrelerinin Kusurlu Mikro Teller için Geçerliliğinin Tartışılması

Yapılan optimizasyonların sonucunda nikel kaplama ve SLM ile üretilen 316L mikro tellerin mekanik özellikleri elde edilmiştir. Fakat mikro tellerin içerisinde bulunan boşluklardan Bölüm 1.5.2’de bahsedilmiştir. Mikro teller içerisinde bulunan boşluklar, kafes yapıda mukavemet düşüşüne sebep olduğu bilinmektedir [93]. Tersine sonlu elemanlar yöntemi, mikro tel içerisinde bulunan boşluklardan etkilenmediği için, deneysel verilerden daha yüksek gerilme değerlerinin elde edilmesine sebep olmuştur. Ravari ve Kadkhodaei [88] tarafından yapılan çalışmada, boşluklar modellenmiş ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Mikro telde meydana gelen mukavemet düşüşü tel içerisindeki boşlukların oranına bağlıdır. Buradan yola çıkarak ana malzemenin mekanik özellikleri, deneysel verileri sağlayacak şekilde optimize edilebilir. Bu optimizasyonun gerçekleştirilmesi için Bölüm 3.1.2’dekine benzer şekilde bilinear optimizasyon işlemi LS-OPT ile gerçekleştirilmiştir. Kusur yapısının optimizasyon sonucuna etkisini engellemek için optimizasyon işlemi farklı geometrik kusurlara sahip teller üzerinde tekrar edilmiştir. Elde edilen optimum değerler için von-Mises gerilme dağılımları Şekil 3.13’de verilmiştir. Şekilde, geometrik kusurların yapısına göre belirli bölgelerdeki gerilme değerlerinde artış gözükmektedir. Bölgesel olarak meydana gelen bu mukavemet artışları, optimizasyon sonucunda elde edilecek olan mekanik özellikleri etkileyeceği kolaylıkla söylenebilir.



Şekil 3.13. Farklı geometrik kusurlara sahip mikro tellerin  $\epsilon=0,3$  değerindeki von-Mises gerilme dağılımları; a-b)  $35^\circ$  ve c-d)  $90^\circ$

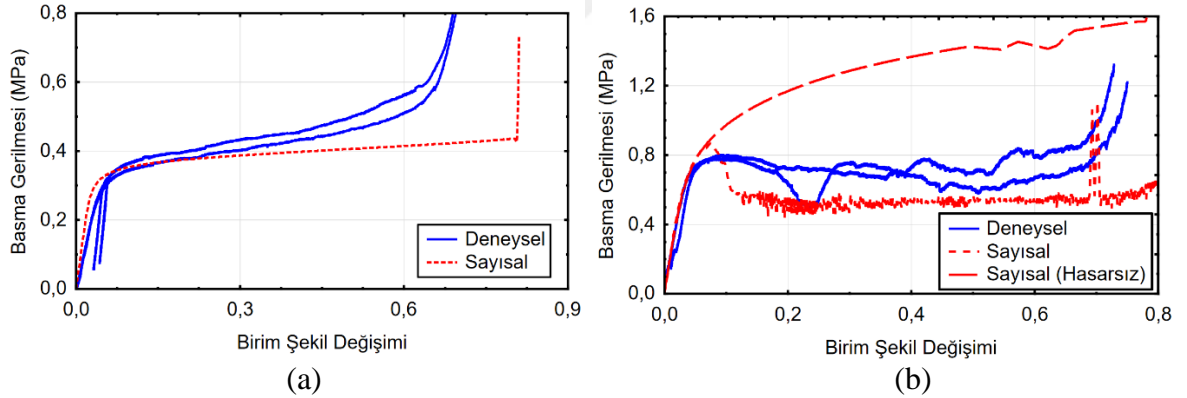
Yapılan optimizasyonlardan elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 3.14’de gösterilmiştir. Optimizasyon öncesi gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin, gerçek mikro telin çekme testinden elde edilen deneysel gerilme-birim şekil değişimi eğrisinden çok daha yukarıda olduğu gözükmemektedir. Bunun sebebinin nano-indentasyon yönteminin mikro tel içerisindeki poroziteyi hesaba katmaması olduğu daha önce tartışılmıştır. Gerilme değerlerinin düşürülmesi için yapılan optimizasyonlarda,  $35^\circ$  ve  $90^\circ$  açıda üretilmiş mikro tellerin her ikisi de deneysel verilere oldukça yakınsamıştır. Gerilme-birim şekil değişimi birbirine oldukça yakın olsa da sahip oldukları geometrik yapı ve üretim açılarına göre optimizasyon sonucunda elde edilen mekanik özelliklerin değerleri değişiklik göstermektedir. Yapılan çekme testi optimizasyonlarında üretim yönü  $90^\circ$  olan tel için akma gerilmesi 307-348 MPa, tanjant modülü 1240-1430 GPa değerleri arasında bulunmuştur. Üretim yönü  $35^\circ$  olan tellerde ise akma gerilmesi 323-347 MPa, tanjant modülü 1200-1296 GPa olarak bulunmuştur. Ortalama değerler üzerinden hesap yapıldığında  $35^\circ$ ’de üretilmiş telin akma gerilmesi  $90^\circ$ ’de üretilmiş telden %2,2 daha fazladır. Buna karşın  $35^\circ$ ’lik telin tanjant modülü yaklaşık %7 daha düşüktür. Fakat aynı üretim açısına sahip modellerde akma gerilmelerinde %7-12 ve tanjant modüllerinde %7-15 oranında fark meydana gelebilmektedir. Buradan yola çıkılarak, geometrik kusur dağılımının mekanik özellikler üzerine etkisinin daha çok olduğu söylenebilir.



Şekil 3.14. Kusurlu olarak  $35^\circ$  ve  $90^\circ$  açı ile modellenmiş mikro teller üzerine uygulanan optimizasyon sonuçları

### 3.3. Nikel Kaplı Mikro Kafes Yapılar için Gerçekleştirilen Parametrik Çalışmaların Sonuçları

Kaplı ve kaplısuz mikro kafes yapılara uygulanan basma testlerinin deneysel sonuçları Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Şekil 3.15’de sayısal olarak gerçekleştirilen basma testlerinin, deneysel basma testi sonuçları ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 3.15a’dan görüldüğü üzere; kaplı mikro tel için analiz sonuçlarının elastik ve elastoplastik bölgelerde deneysel eğrilere oldukça benzer olduğu görülmektedir. Şekil 3.15b’de ise kaplı kafes yapıların sayısal ve deneysel gerilme-birim şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Nikel kaplamanın uygulanan sayısal modelde, gerilme-şekil değişiminin, deneysel sonuçlardan çok daha yüksek olduğu gözükmektedir. Bunun sebebi yüksek mukavemete sahip olan nikel kaplamanın gevrek bir davranış sergilemesidir. Ayrıca mikro tellerin deformasyonu sırasında en büyük gerilmelerin, telin dış yüzeyinde meydana gelmesi sebebi ile nikel kaplamalar kolayca hasara uğramaktadır. Deneysel gerilme-birim şekil değişiminin sayısal olarak elde edilebilmesi için modele birim şekil değişimine bağlı sabit hasar parametresi verilmiştir.



Şekil 3.15. Mikro kafes teller için gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması; a) kaplı ve b) kaplısuz

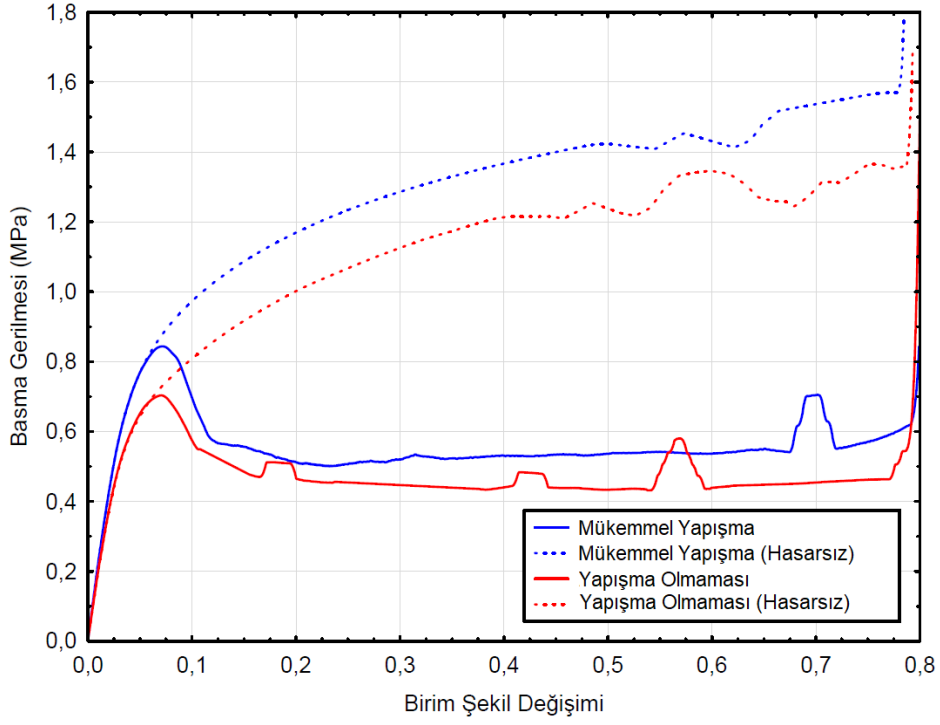
Deneysel veriler göz önüne alınarak, hasarın elastoplastik bölgeden sonra gerçekleşeceği şekilde, %1 değerinde sabit hasar değeri seçilmiştir. Hasar verilen modelde şekilde görüldüğü gibi başlangıç çökme gerilmesi deneysel gerilmelere oldukça yaklaşmıştır. Sonrasında gerilme bir miktar düşüş yapmaktadır ve deformasyon ile birlikte neredeyse sabit bir gerilme değeri etrafında salınım yaparak çökmeye devam etmektedir. Deneysel ve sayısal analizler arasında belli bir kısımda hata oluşmaktadır. Bu durumun

mikro tel yüzeylerinin oldukça kompleks (Şekil 2.2) olmasından, hasar mekanizmasının tam olarak modellenememesinden, arayüz yapışma etkilerinin modellenememesinden, yüzeye yapışan tozların ve iç yapıdaki kusurların etkilerinin ihmal edilmesinden kaynaklandığı kolayca anlaşılabilir. Kaplamanın karmaşık hasar davranışı ve mikro kafes yapıların içerdiği mikro kusurlar (düzgün olmayan tel çapı, mikro çatlaklar vb.) düşünüldüğünde, bu hata oranı kabul edilebilir düzeydedir.

### 3.3.1.1. Kaplama-Mikro Tel Arayüz Etkileri

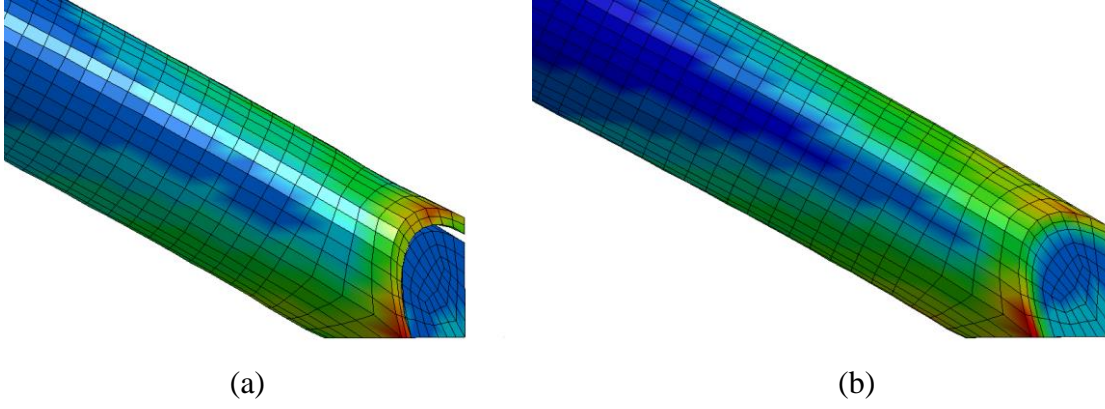
Nikel kaplama ile mikro tellerin arasındaki arayüz yapışma etkisini incelemek için iki sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. İlk analizde kaplama ve mikro teller arasında herhangi bir yapışma olmaması durumu için simülasyon yapılmıştır. Bunun için sonlu elemanlar modelinde kaplama ve mikro teller arasına sadece sürtünmesiz temas algoritması (sliding contact algorithm) tanımlanmıştır. İkinci durumda ise mükemmel yapışma durumu Bölüm 2.4’de bahsedildiği şekilde analiz edilmiştir. Bunun için ağ yapısı oluşturulurken kaplama ve mikro tellerin yüzeylerindeki düğüm noktalarının aynı noktada ortak olacak şekilde modellenmesi gerçekleştirildi. Böylece arayüzde aynı düğüm noktalarını kullandıkları için doğal olarak herhangi bir ayrışma veya birbirine göre izafi hareket söz konusu olamamaktadır.

Şekil 3.16’da kaplama-mikro tel arayüzü için mükemmel yapışma ve yapışma olmaması durumlarında gerilme değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca şekil hasarsız modellerin sonuçlarını da içermektedir. Görülebileceği üzere, kafesin gerilme-birim şekil değiştirme davranışı arayüz yapışmasından ciddi şekilde etkilenmektedir. Arayüzde mükemmel yapışma olması durumunda başlangıç çökme gerilmesi, arayüzde yapışma olmaması durumuna göre %9 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu artış miktarı yaklaşık olarak tüm gerilme eğrisi boyunca devam etmektedir. Ayrıca başka bir sonuç ise hasarsız olarak modellenmesi durumunda arayüz yapışmasının, arayüzde herhangi bir yapışma olmaması durumuna göre mukavemet değerlerinde ciddi farklar ortaya koyduğu görülmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki; kaplama ile mikro teller arasında iyi bir yapışma kalitesinin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ve bunun paralelinde kaplamalı mikro kafes yapıların enerji sönmüleme karakteristiği üzerinde ciddi bir öneme sahip olmaktadır.



Şekil 3.16. Kaplama ve mikro tellerin arayüzlerinde mükemmel yapışma ve yapışma olmaması durumlarında kaplamalı kafes yapıların gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Nikel kaplamalı kafeslerde arayüzde mükemmel yapışma olmaması durumunda gerilme davranışlarında ciddi düşüşler elde edilmiştir. Bu düşüşün sebebini anlamak için Şekil 3.17'de, nikel kaplamalı mikro tellere ait her iki durum için deformasyon görüntüleri verilmiştir. Görüldüğü gibi mikro teller ve kaplama arasında farklı yapışma durumları için mikro telin bağlantı noktasında farklı deformasyon davranışı ortaya çıkmaktadır. Yapışma olmayan durumda kaplama ile mikro tel bağlantı noktası civarında ayrışma göstermektedir (Şekil 3.17a). Mükemmel yapışma durumunda ise kaplama ve mikro tel arasında gerilme geçişleri düzgün olmakta ve yükü paylaşmaktadırlar (Şekil 3.17b). Meydana gelen ayrışmanın Nikel kaplamalı tellerin yük taşıma kapasitesini düşürdüğü kolayca anlaşılmaktadır.

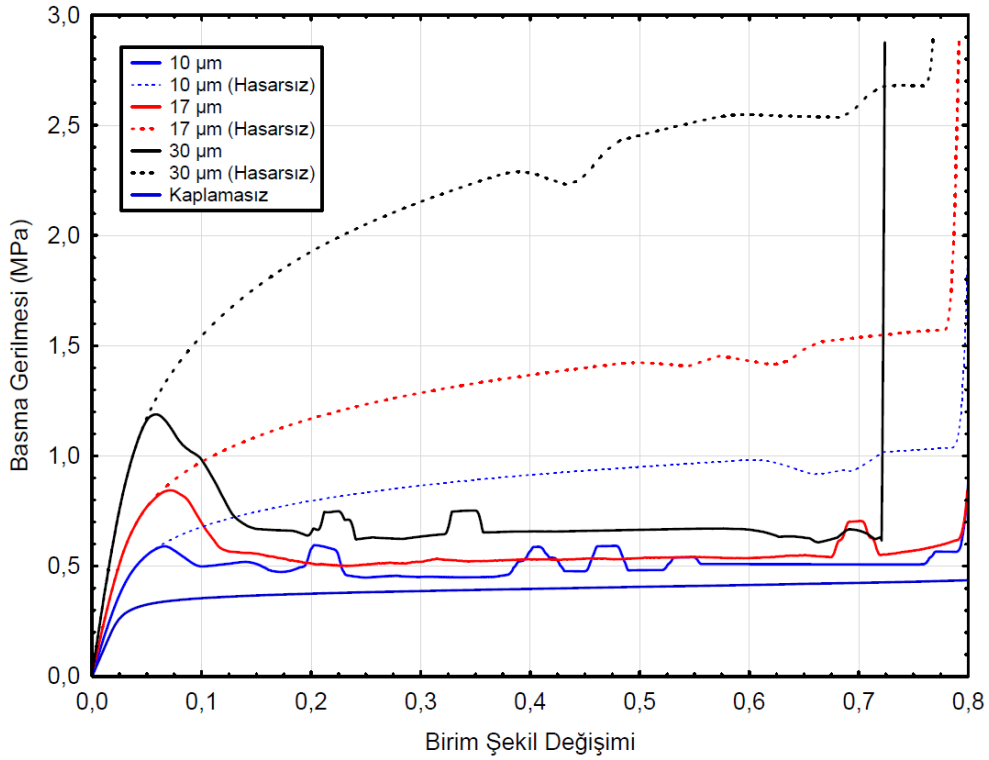


Şekil 3.17. Nikel kaplamalı mikro tellerin deformasyon davranışları; a) kaplama ile mikro tel yüzeyinde yapışma olmaması durumunda, b) kaplama ile mikro tel arasında mükemmel yapışma olması durumunda

### 3.3.1.2. Kaplama Kalınlığının Etkisi

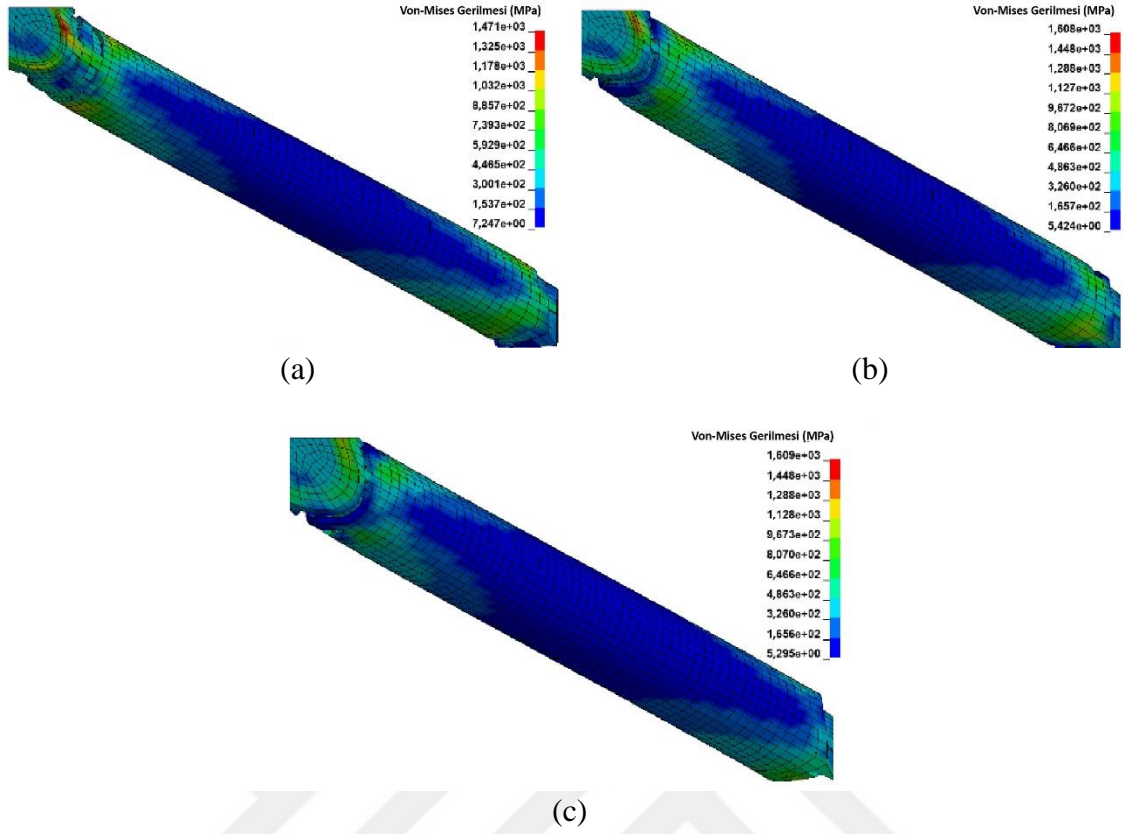
Kaplama kalınlığının nikel kaplamalı mikro kafes yapısının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için kaplama kalınlığı 10, 17 ve 30  $\mu\text{m}$  alınarak üç farklı analiz gerçekleştirildi. Üç kaplama kalınlığından her biri için elde edilen basma gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Şekil 3.18’de karşılaştırma amaçlı kaplamasız mikro telin sayısal eğrisi yanında hasar olmaması durumlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini de içermektedir. Görüldüğü gibi hasar içeren modellerde kaplama kalınlığının artması ile kaplamasız duruma göre gerilme değerlerinde belirli miktarda artışlar meydana gelmektedir. Özellikle başlangıç çökme gerilmelerinde ciddi artış olduğu belirlenmiştir. Örneğin 30  $\mu\text{m}$  kaplama kalınlığında elde edilen başlangıç çökme gerilmesi kaplamasız duruma göre yaklaşık %300 artarken, 10  $\mu\text{m}$  kaplama kalınlığı durumuna göre %100 artış göstermektedir. Fakat bu artış mikro tellerin çökmesinden sonra nispeten düşük seviyelerde kalmaktadır. Örneğin 0,5 birim şekil değiştirme değerinde 30  $\mu\text{m}$  kaplama kalınlığındaki gerilme değeri kaplamasız duruma göre yaklaşık %60 civarında daha fazla artış göstermektedir. Bu durumun kaplamanın hasarından kaynaklandığı açıktır. Deformasyon başlangıcı ile kaplamada yoğun bir çatlama ve hasar meydana gelmektedir ve bunun sonucunda arzu edilen gerilme değerleri korunamadığı ortaya çıkmaktadır. Bu durumun ispatı, hasar tanımlanmamış modellerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden açıkça ortaya çıkmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi hasarsız modellerin gerilme değerleri deformasyon ile birlikte sürekli artış göstermektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça gerilme değerleri çok ciddi değerlere ulaşmaktadır. Örneğin 30  $\mu\text{m}$  kaplama kalınlığı için

gerilme değeri kaplamasız duruma ve eşdeğer kaplama durumuna göre sırasıyla 10 ve 7 kat artış göstermektedir. Bu durum kaplama kalınlığının kaplanmış mikro telin basma davranışına etkisinin yanında, kaplama malzemesinin hasar özelliğinin de çok önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Kolayca anlaşılacağı üzere kaplama mukavemetinin ve sünekliliğinin oldukça yüksek olması kaplamalı mikro kafes yapılar için yüksek performans anlamına gelmektedir.



Şekil 3.18. Kaplama kalınlığının gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri üzerine etkisi

Şekilden görülebileceği üzere, kaplama kalınlığındaki artışla, gerilme-birim şekil değişimi davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. Kafes yapısının hem elastik modülü hem de başlangıç çökme gerilimi, kaplama kalınlığı arttıkça artmaktadır. Diğer taraftan, kafesin yoğunlaşma (sıkışma) birim şekil değişim değeri, kaplamanın kalınlığına göre hafif bir azalma sergilemektedir. Farklı kaplama kalınlıklarına sahip mikro yapıların  $\epsilon=0,3$  deformasyonu durumunda, von-Mises gerilme dağılımı şaşırtıcı derecede benzer olduğu da gözlemlenmiştir (Şekil 3.19). Sonuç olarak, mikro tellerin üzerindeki kaplamanın kalınlığının, gerilim dağılımı üzerine hiçbir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.



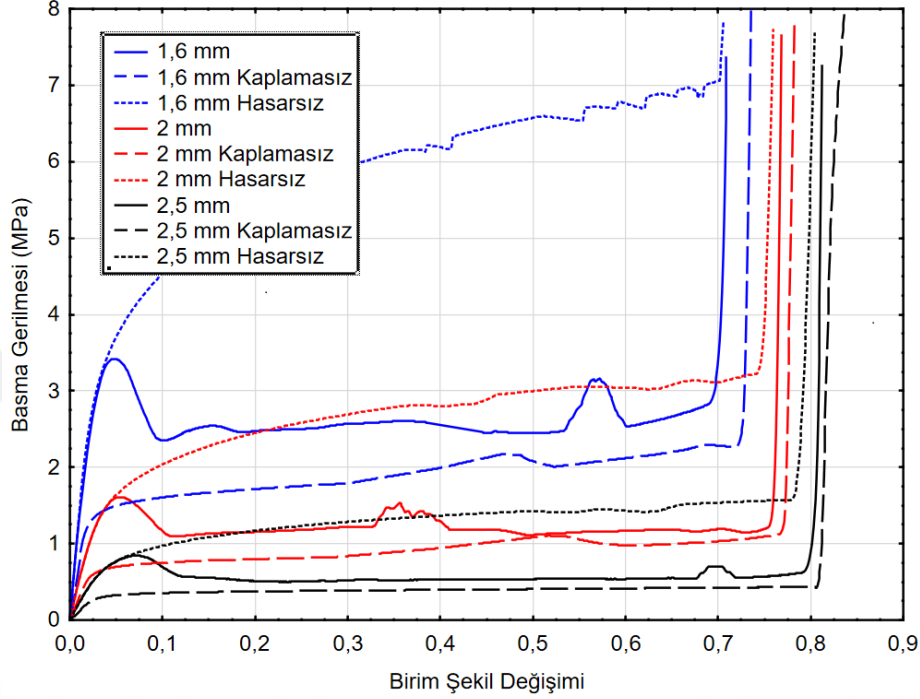
Şekil 3.19. Kaplama kalınlığı a) 10, b) 17 ve c) 30  $\mu\text{m}$  için mikro tellerin deformasyon davranışı ve von-Mises gerilme dağılımı

### 3.3.1.3. Kaplama ve Hücre Boyutu İlişkisi

Önceki parametrik çalışmalar deneysel numunelere uygun olarak  $L=2,5$  mm hücre boyutu için gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde hücre boyutu ile kaplama kalınlığı arasındaki ilişki incelenmiştir. Ayrıca farklı boyutlardaki hücresel yapıların mekanik özelliklerini karşılaştırmak için önemli bir parametre olan izafi mekanik özellik kavramı kullanılacaktır. Bir izafi mekanik büyüklük, bir hücresel yapı için elde edilen mekanik değerlerin (başlangıç çökme gerilmesi, elastisite modülü vb.) hücresel yapının yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilmektedir. Bu çalışmada mikro tellerin çapları (200  $\mu\text{m}$ ) ve kaplamanın kalınlığı (17  $\mu\text{m}$ ) sabit tutulmuştur ve hücre boyutu değeri için üç farklı hücre boyutu için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu değerler sırasıyla 1,6, 2 ve 2,5 değerleri seçilmiştir. Şekil 3.20 farklı hücre boyutları için elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrilerini göstermektedir. Şekilde 3.20’de karşılaştırma amaçlı her hücre boyutu için kaplamasız mikro tellerin ve hasarsız kaplamalı mikro tellerin basma sonuçları da ilave edilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi hücre boyutunun küçülmesi ile gerilme değerlerinde ciddi artışlar gözlemlenmektedir.



Örneğin 1,6 mm hücre boyutuna sahip mikro telde elde edilen başlangıç çökme gerilmesi değeri 2,5 mm hücre boyutu durumuna göre 3 kat artış göstermektedir. Bu durum Gümrük ve Mines [6] tarafından elde edilen sonuçlarla uyumludur.

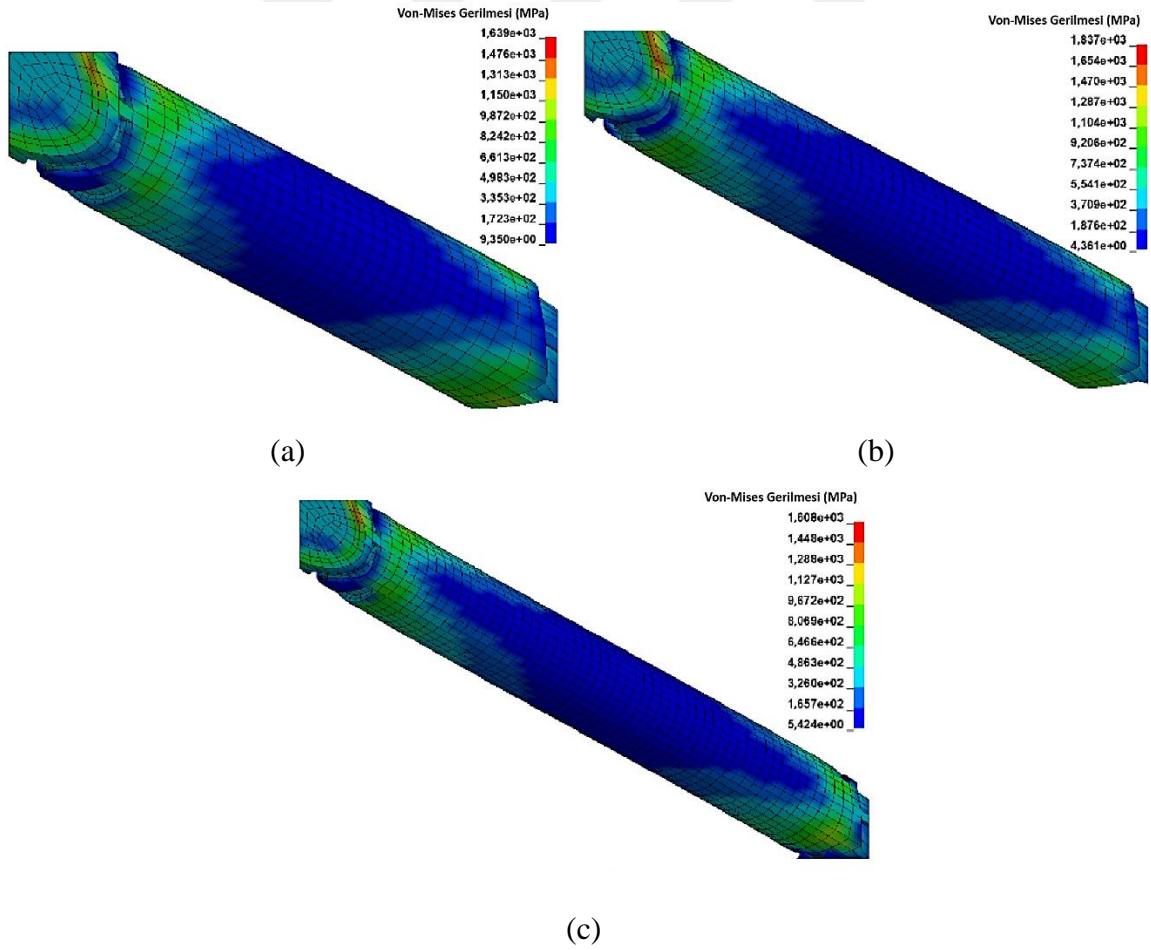


Şekil 3.20. Farklı hücre boyutlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Kafes hücre boyutu düştükçe gerilmelerde ciddi artışlar söz konusudur. Bahsedilen artışta kaplamanın etkisini anlamak için izafi değerler kullanılmaktadır. Yapılan sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların bir özeti, hasar içermeyen modeller dikkate alınmaksızın Tablo 3.3'de verilmektedir. Tablo 3.3'e bakıldığında kaplamalı durumun kaplamasız duruma göre izafi elastisite modülü değerlerinde 1,6, 2 ve 2,5 mm hücre boyutları için sırasıyla %47,58, %15,85 ve %26,85 olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi en yüksek artış 1,6 mm hücre boyutunda elde edilmektedir. Buna karşılık izafi kaplamalı durumda kaplamasız duruma göre izafi başlangıç çökme gerilmesi değerlerindeki yüzde artışlar ise sırasıyla %55,64, %96,68 ve %78,60 olarak elde edilmiştir. Burada ise en yüksek değer 2 mm boyutundaki hücre için elde edilmektedir. Bunun sebebi ise hücre boyutu küçüldükçe kaplama malzemesi daha yüksek eğilme gerilmelerine maruz kalmasıyla hasar artmaktadır. Hasar sebebiyle kaplamalı hücrede beklenenden daha düşük değerlerde

çökmeler başladığından, artan kafes yoğunluğuna bağlı olarak izafi başlangıç çökme gerilmesindeki yüzde artış miktarı düşüş göstermektedir.

Hücre boyutuna bağlı olarak elde edilen sonuçlar genel olarak incelendiğinde; hücre boyutu küçüldükçe hem elastisite hem de gerilme değerleri ciddi artışlar göstermektedir. İzafi değerler açısından değerlendirildiğinde artışların devam ettiği görülmektedir. Fakat izafi değerleri, aynı hücre boyutunda kaplamasız ve kaplamalı mikro teller için yüzde artış miktarları hasara ve hücre yoğunluğundaki artış etkilerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Şekil 3.21’de farklı hücre boyutlarındaki mikro tellerin hasarsız durumlar altındaki von-Mises gerilme dağılımlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere 1,6 mm hücre boyutundaki mikro tel diğerlerinden çok daha fazla hasara uğrayan elemana sahiptir. Bu durum izafi değerlerin yüzde artışındaki azalmayı açıkladığı düşünülmektedir. Bu durum yine kaplama malzemesinin hasar özelliklerinin çok önemli olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.21. Farklı hücre boyutlarına sahip kaplamalı mikro tellerin deformasyon ve von-Mises gerilme dağılımları; a) 1,6 mm, b) 2 mm ve c) 2,5 mm

Tablo 3.3. Farklı hücre boyutuna sahip mikro tellerin analiz sonuçlarının bir özeti

|  | Hücre Boyutu (mm) |           |            |           |            |           |
|--|-------------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
|  | 1,6               |           | 2          |           | 2,5        |           |
|  | Kaplamasız        | Kaplamalı | Kaplamasız | Kaplamalı | Kaplamasız | Kaplamalı |
| Elastisite Modülü (MPa)                                      | 72,40             | 149,34    | 29,24      | 47,59     | 10,83      | 19,37     |
| Başlangıç Çökme Gerilmesi (MPa)                              | 1,52              | 4,89      | 0,71       | 2,26      | 0,35       | 1,13      |
| Yoğunluk (kg.m <sup>-3</sup> )                               | 560,78            | 783,80    | 367,72     | 516,67    | 239,90     | 338,28    |
| Spesifik Elastisite Modülü (MPa/kg.m <sup>-3</sup> )         | 0,129             | 0,191     | 0,080      | 0,092     | 0,045      | 0,057     |
| Spesifik Elastisite modülündeki Artış (%)                    | 47,58             |           | 15,85      |           | 26,85      |           |
| Spesifik Başlangıç Çökme Gerilmesi (MPa/kg.m <sup>-3</sup> ) | 0,0210            | 0,0327    | 0,0241     | 0,0474    | 0,0326     | 0,0582    |
| Spesifik Başlangıç Çökme Gerilmesindeki Artış (%)            | 55,64             |           | 96,68      |           | 78,60      |           |

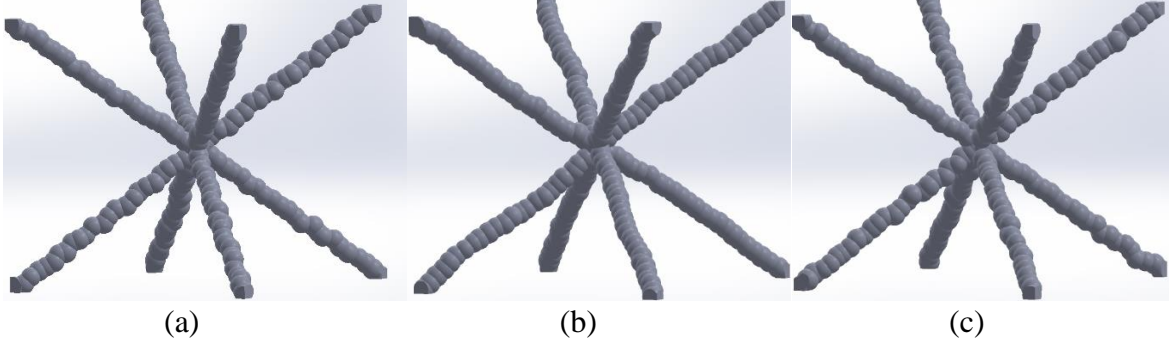
### 3.4. Mikro Kafes Yapıların Gerçekçi Modelleme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde kusurlu olarak (Bölüm 2.5’de bahsedilen yönteme uygun) modellenen kafes yapıların mekanik basma davranışları incelenmiştir. Geliştirilen modeller ile mikro kafeslerin deneysel basma davranışları karşılaştırılmıştır ve böylece yapısal kusurların etkilerinin daha iyi anlaşılması amaçlanmaktadır.

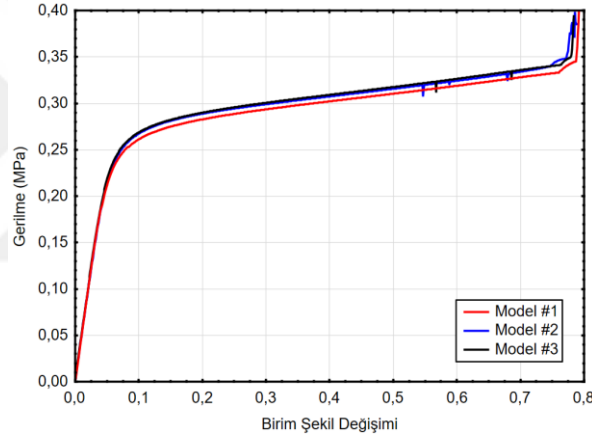
#### 3.4.1. Kusurlu Modellerin Tekrarlanabilirliği

Kafes yapıların gerçeğe yakın geometrilerinin oluşturulmasında izlenen yol Bölüm 2.5.1’de verilmiştir. Sayısal modelin oluşturulmasında SEM görüntüsü üzerinden alınan boyutların dağılım oranları çıkarılmıştır ve mikro teller bu oranlara göre bir makro yardımcı ile üretilmiştir. Bu durumda rastgele oluşturulan modeller için sayısal sonuçların tekrarlanabilirliği kontrol edilmelidir. Bu amaçla farklı geometrik kusurlara sahip üç adet farklı hücre makro yardımcı ile modellenmiştir (Şekil 3.22). Oluşturulan modellerde hücre boyutu 2,5 mm olarak seçilmiştir. Modellenen farklı kafes yapıları LS-DYNA programında basma testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 3.23’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü model #1 ve diğer modeller arasında bir miktar fark

olmasına rağmen üzere farklı geometrik kusurlara sahip hücrelerden, neredeyse aynı gerilme-birim şekil değişimi değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.22. Farklı geometrik kusurlara sahip üç farklı kafes yapının katı modeli; a) Model #1, b) Model #2 ve c) Model #3

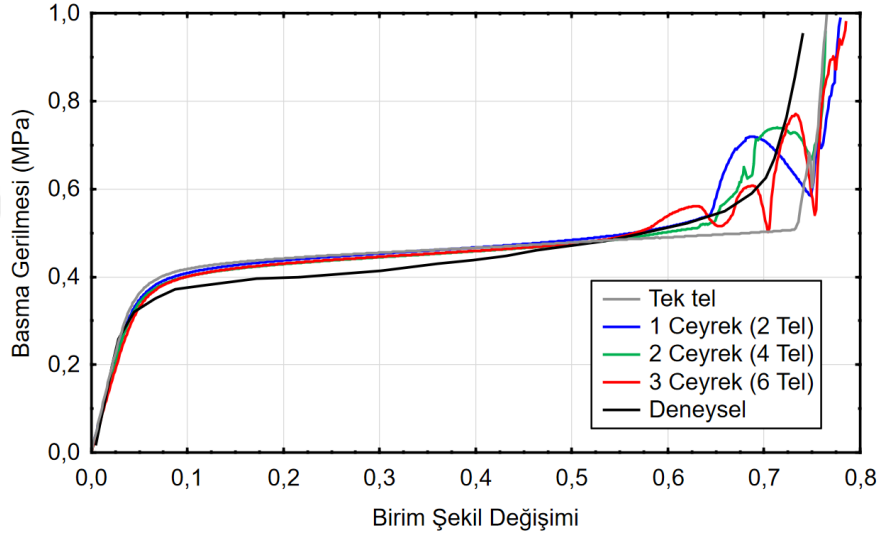


Şekil 3.23. Farklı geometrik kusurlara sahip kafeslerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

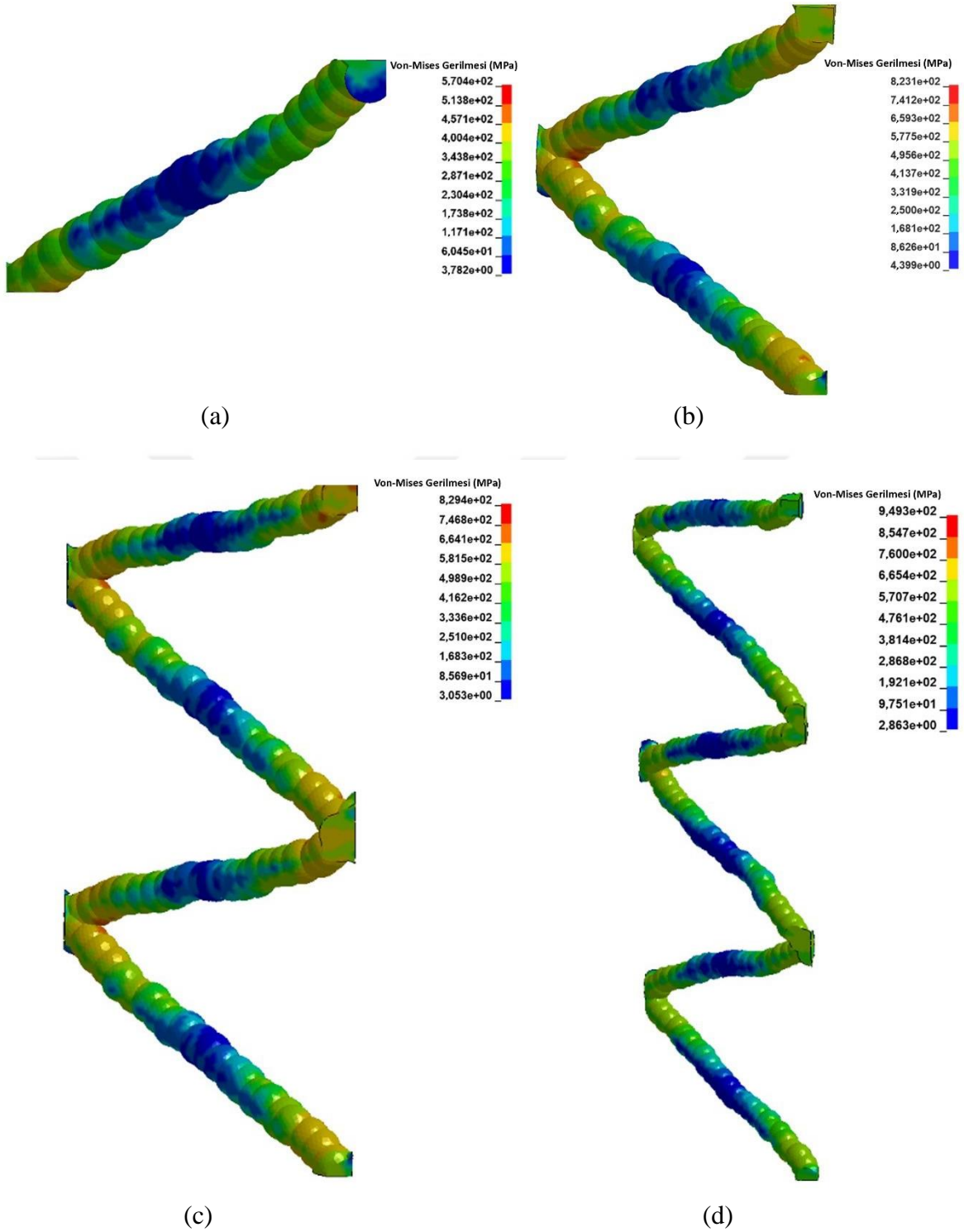
### 3.4.2. Hücre Sayısının Mekanik Davranışa Etkisi

Mikro kafes yapılarında telin geometrik yapısındaki kusurların (Şekil 2.2) malzemenin mekanik özelliklerini etkilediğinden bahsedildi. Şekil 3.14'den görüldüğü üzere bu kusurlar sayısal değerlerin, deneysel verilerden iraksamasına sebep olmaktadır. Bu farkın sebebi tel geometrisinin düzgün silindirik bir geometriden çok uzak olmasıdır. Deneysel ve sayısal eğriler arasındaki farkları azaltabilmek için Şekil 2.17a, b'de görülen çeyrek ve yarım hücreler modellendi. Tek bir mikro tel modelinin yetersiz kalacağı düşünüldüğünden, gerçeğe yakın sonuç için kullanılması gereken minimum mikro tel sayısını belirlemek için, hücreler üst üste konarak modeldeki kusurlar artırıldı.

Çeyrek hücelere ait gerilme-birim şekil değiştirme davranışı Şekil 3.24’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere tüm tel sayıları için akma gerilmesi değeri deneysel sonuçların üzerinde çıkmıştır. Hücrelerin sıkışması 0,6 birim şekil değişiminden sonra başlamaktadır. Bu sebeple, hücrelerin birbirine temas etmesi sonucunda salınımlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu salınımlı artış, Şekil 3.24’de verilen kusursuz model ile karşılaştırıldığında, gerçeğe bir miktar daha yakın sonuç verdiği görülmektedir. Fakat artan tel sayısı ile birlikte sıkışma bölgesinde daha fazla bir yakınsama gözükmemektedir. Bu sebeple çeyrek modelin, gerçeğe yakın bir mekanik göstermede yetersiz kaldığı söylenebilir. Şekil 3.25’de ise çeyrek hücreler için von-Mises gerilme dağılımları verilmiştir. Buradaki dağılımlarda kusur sayısının artması ile bazı lokal bölgelerde ufak farklar görülmektedir. Fakat bunun haricinde farklı hücre sayısına sahip modellerde gerilme dağılımları birbirlerine oldukça benzemektedir.



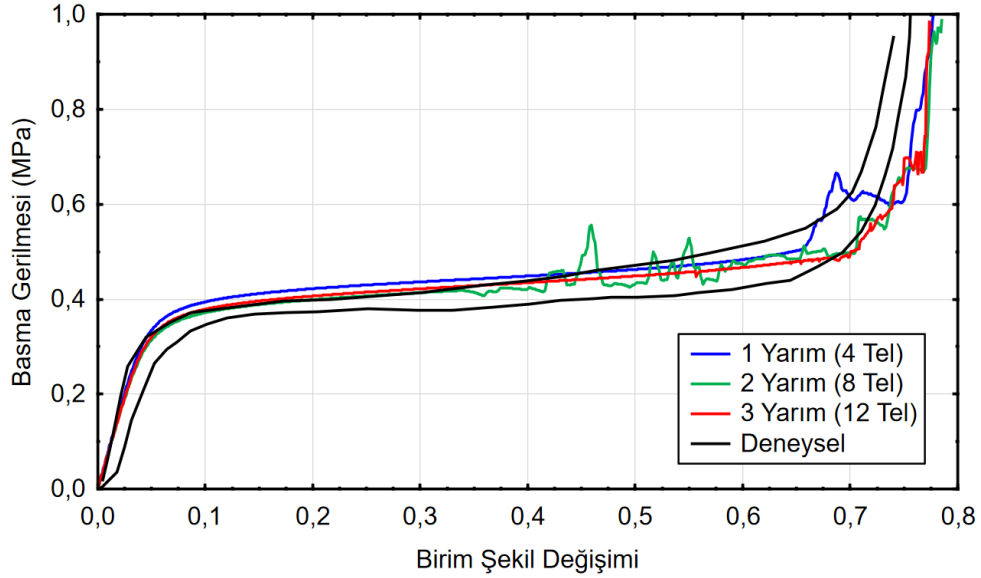
Şekil 3.24. Çeyrek hücrelerin gerilme-birim şekil değişimi davranışları



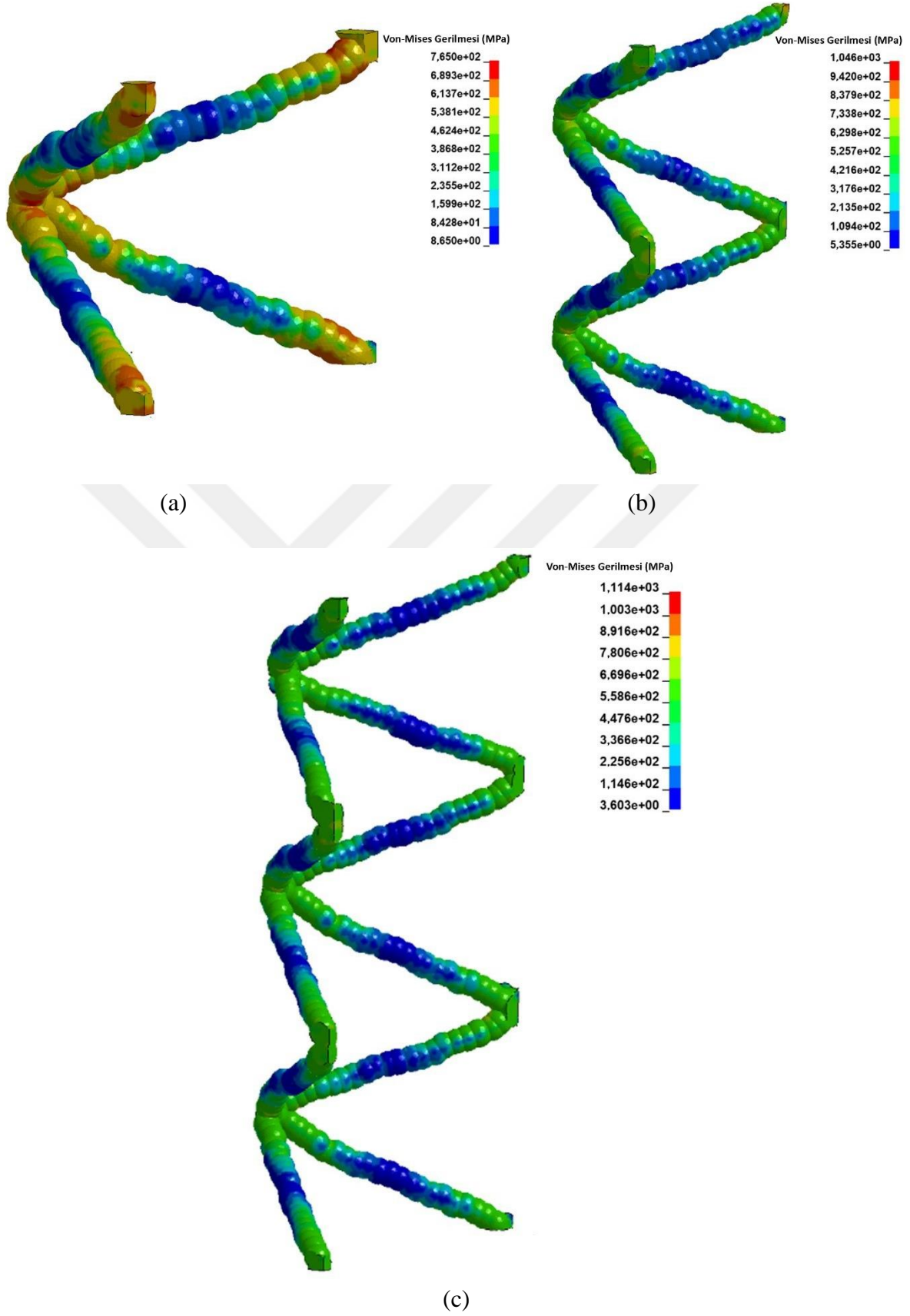
Şekil 3.25. Çeyrek hücre analizlerinde  $\varepsilon=0,3$  değeri için von-Mises gerilme dağılımları; a) tek tel, b) 1 çeyrek hücre (2 tel), c) 2 çeyrek hücre (4 tel) ve d) 3 çeyrek hücre (6 tel)

Çeyrek hücrelerin deneysel verilerin elde edilmesinde yetersiz kalması sebebiyle yarım hücrelerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Yarım hücre, iki çeyrek hücrenin yan yana

dizilmesi ile elde edilmiştir. Yarım hücre dört adet mikro telden meydana gelmektedir. Yarım modeller üst üste dizilerek mikro tel sayısı artırılmış ve deneysel verilere yakınsaması incelenmiştir. Yarım hücrelere ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 3.26'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, yarım hücreli modeller akma gerilmesinde deneysel testlere çok yakın sonuçlar vermiştir. Sıkışmanın başladığı 0,5 birim şekil değişimine kadar elde edilen gerilme-birim şekil değerleri, deneysel testler ile neredeyse aynıdır. Sıkışma bölgesindeki davranışta da iyileşmeler görülmektedir. Maksimum birim şekil değişiminin, deneysel verilerden daha yüksek olmasının, yüzeye yapışmış tozlardan meydana geldiği tahmin edilmektedir. Sıkışma bölgesinin eğri karakteristiği 3 yarım hücrede sayısal değer karakteristiğine oldukça yakındır. Benzer bir davranış 2 yarım hücre ile yakalanmış olsa da kusurların rastgeleliğini de göze alarak doğru sıkışma davranışının yakalanmasında en az üç adet yarım hücrenin modellenmesi gerektiği söylenebilir. Şekil 3.26-7'de yarım hücrelerin gerilme dağılımları verilmiştir. Çeyrek hücreli analizlerde olduğu gibi gerilmeler yerel kusurların haricinde eşit olarak dağılmaktadır ve momentin maksimum olmasından dolayı tellerin kesişim bölgesi yakınlarında artmaktadır.



Şekil 3.26. Yarım hücreler için basma gerilmesi-birim şekil değişimi eğrilerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

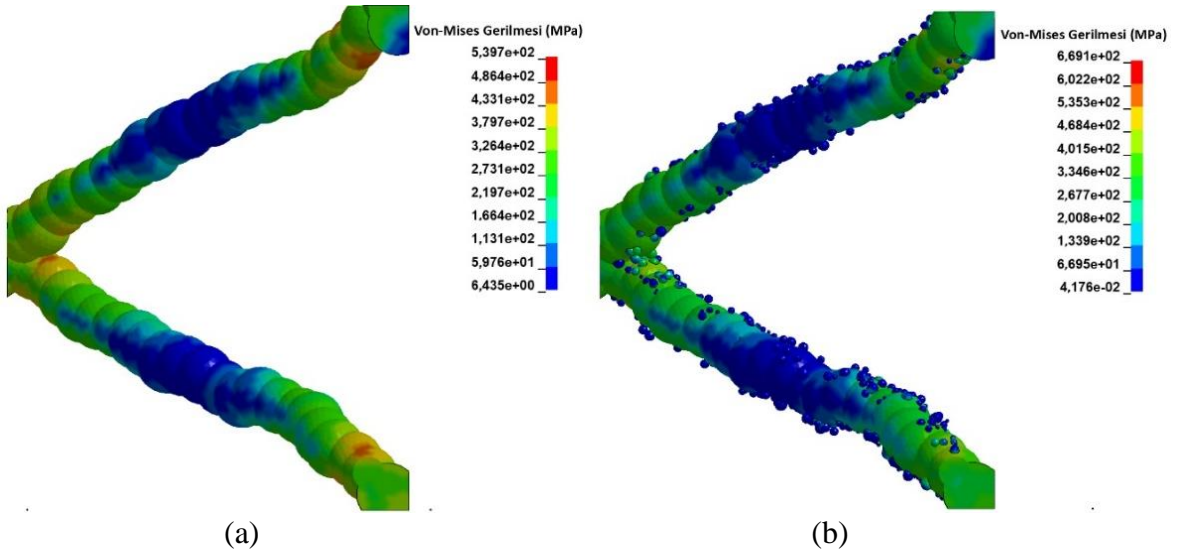


Şekil 3.27. Yarım hücre analizlerinde  $\epsilon=0,3$  değeri için von-Mises gerilme dağılımları; a) bir yarım hücre (4 tel), b) iki yarım hücre (8 tel) ve c) üç yarım hücre (12 tel)



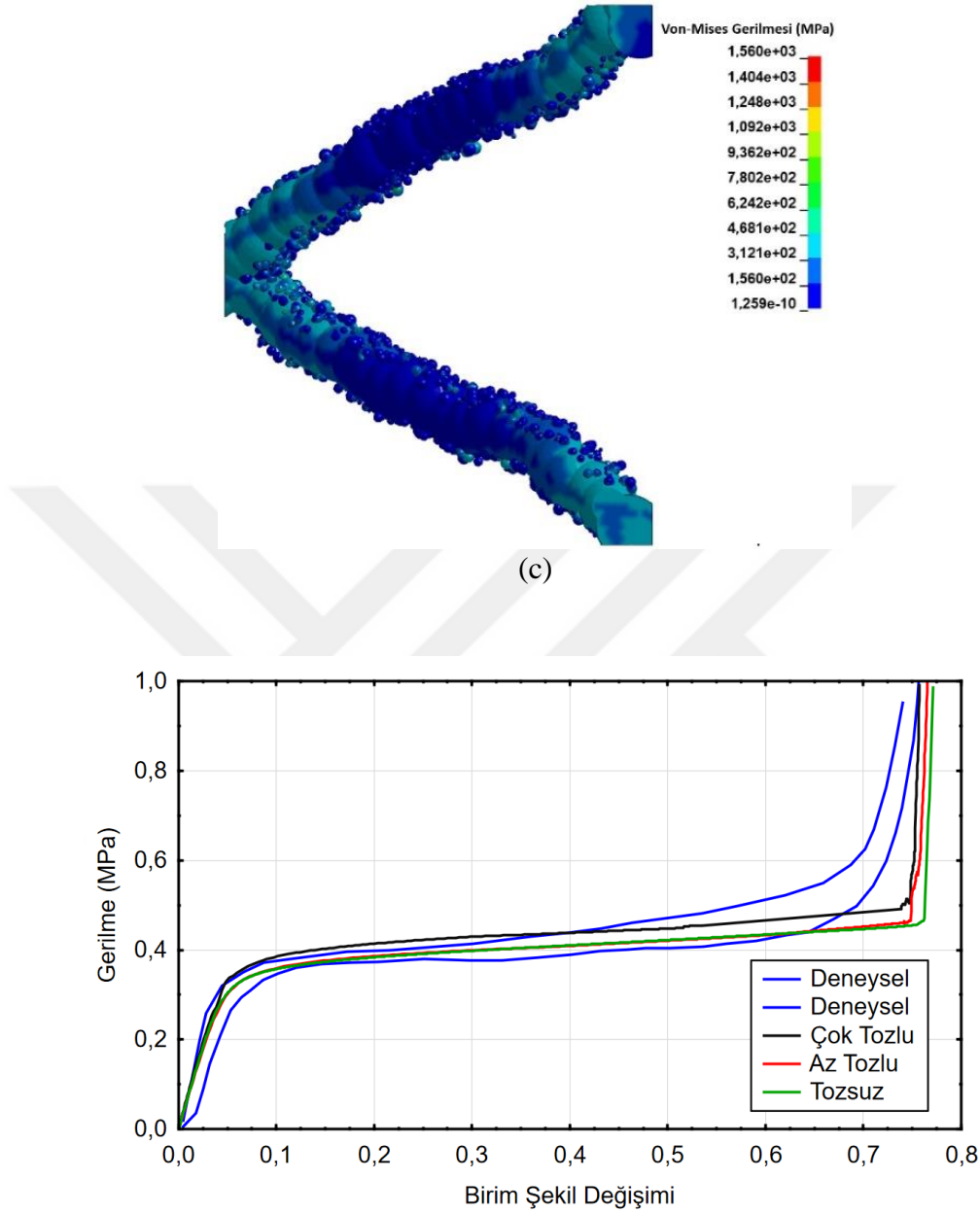
### 3.4.3. Yarı Ergimiş Tozların Mekanik Davranışa Etkisi

Bu bölümde yarı ergimiş veya ergimemiş tozların, mikro kafes yapılarında meydana getirdiği mekanik etkiler araştırılmıştır. Tozlar iki adet mikro tele sahip çeyrek hücrelerin yüzeyinde modellenmiştir. Yarım hücre kullanılmamasının sebebi, mikro tel yüzeyine eklenen tozların, sonlu elemanlar düğüm noktası sayısında ciddi bir artışa sebep olmasıdır. Bu durum bilgisayar gücünün yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Tozların eklenmesinde Bölüm 2.5.2’de bahsedilen yöntem kullanılmıştır. Mikro tellerin yan yüzeylerindeki tozların mekanik davranışa etkisi olmayacağından, sadece birbirine temas eden yüzeylerdeki tozların modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Tozlu modellerin von-Mises gerilme dağılımları Şekil 3.28’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, tüm toz oranları için mikro tellerdeki von-Mises gerilmeleri benzerlik göstermektedir ( $\sim 350$  MPa). Fakat artan toz oranı ile birlikte maksimum von-Mises gerilmelerinde de artışlar gözlemlenmiştir. Bu fark, iki tel arasında ezilen tozlardan kaynaklanmaktadır. Toz yoğunluğuna bağlı olarak gerilme-birim şekil değişimi Şekil 3.29’da verilmiştir. Şekilden az tozlu ile tozsuz modelin gerilme değerlerinde neredeyse hiçbir farkın olmadığı gözlemlenmiştir. Fakat az tozlu modelin maksimum birim şekil değişimi deneysel sonuçlara daha yakındır. Çok tozlu modelde ise maksimum birim şekil değişiminin deneysel verileri yakaladığı görülmektedir.



Şekil 3.28. Toz oranına göre von-Mises gerilme dağılımları a) tozsuz, b) az tozlu ve c) çok tozlu

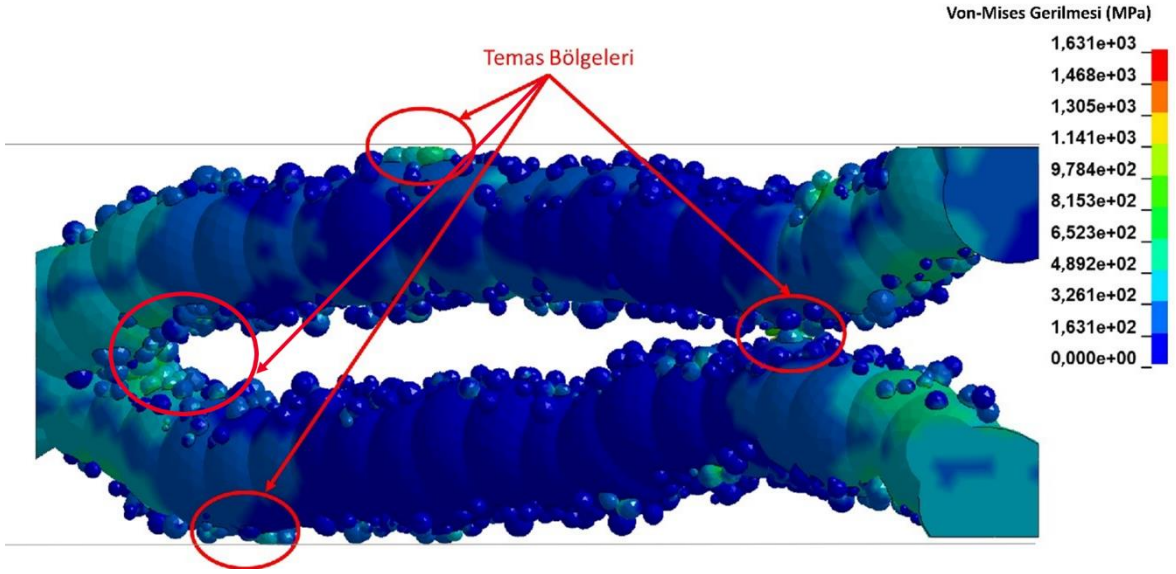
Şekil 3.28'in devamı



Şekil 3.29 Toz yoğunluğuna bağlı olarak gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

Literatürde  $\mu$ -CT tarama yardımı ile gerçek geometrinin modellenmesi üzerine bazı çalışmalar mevcuttur [89, 90]. Bu çalışmalarda  $\mu$ -CT tarama ile oluşturulan modeller üzerinde herhangi bir geometrik kabul (Tablo 1.1) yapılmamaktadır. Fakat yüzey pürüzlerini azaltmak ve ağ yapısının oluşturulması kolaylaştırmak amacıyla katı model üzerine filtreler uygulanmıştır. Uygulanan filtreleme işlemi, tozların etkilerini de ortadan kaldırdığı için, bu çalışmalarda maksimum birim şekil değişimi değeri deneysel eğrilerin üstünde kalmıştır.

Maksimum birim şekil değıştirme değeri için tozların modellenmesi gerektiği Şekil 3.29'dan görölmektedir. Tozların maksimum birim şekil değışimini etkileyen temas noktaları Şekil 3.30'da verilmiştir. Çeyrek hücre yerine çoklu kafes yapısının modellenmesi durumunda, temas noktaları çok daha fazla olacaktır. Bu sebeple gerçeğe yakın bir modelde tozların maksimum birim şekil değışimini azaltacağı kolaylıkla söylenebilir. Buradan yola çıkarak deneysel kafes yapıların çok daha düşük birim şekil değışimi değeriinde sıkışma göstermesinin nedeninin tozlar olduğu söylenebilir.



Şekil 3.30. Tozlu modelin çökme durumunda meydana gelen temas bölgelerinin gösterimi

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kaplamalı mikro kafeslerin mekanik özelliklerinin araştırılması ve geometrik kusurların modellenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar SLM ile üretilmiş 316L paslanmaz çelik mikro kafesler için gerçekleştirilmiştir. Kaplama için akımsız nikel kaplama tekniği uygulanmıştır. Geometrik kusurların, tozların ve hücre sayısının etkisinin incelenmesi kusurlu model olan, gerçeğe yakın model kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikro tellerin ve kaplamanın mekanik özelliklerini belirlemek için tersine sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

- SLM ile üretilmiş paslanmaz çelik kafes (316L) yapıların akımsız Nikel kaplama yöntemi ile kaplanmasının mekanik basma davranışı performansı deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar ile 316L mikro kafes yapıların akımsız nikel ile oldukça üniform bir şekilde kaplanabildiği ve 17 µm kaplama kalınlığına ulaşılabildiği görülmüştür. Basma testleri sonucunda ise Nikel kaplamalı mikro kafeslerin spesifik basma elastisite ve mukavemet değerlerinin kaplamasız kafes yapılara göre sırasıyla %50 ve %75 oranları gibi ciddi oranlarda arttırdığı görülmüştür.
- Kaplama malzemesinin mekanik özellikleri, kaplamanın kalınlığı ve hücre boyutu ile arasındaki ilişkileri incelemek için geliştirilen sonlu elemanlar modeli kullanılarak bazı parametrik çalışmalar da bu çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan parametrik çalışmalar gösterdi ki; kaplama kalınlığı, hücre boyutu ve kaplama arayüz etkileri kaplamalı mikro kafes yapıların mekanik özelliklerini ciddi şekilde etkilemektedir. Yine analizler gösterdi ki; bu etkilerin şiddetleri kaplama malzemesinin hasar karakteristiğinden oldukça etkilenmektedir. Bu sebeple yüksek performans alabilmek için kaplamanın mekanik özellikleri yanında hasar davranışının da oldukça yüksek olması gerekmektedir.
- SLM ile üretilen mikro teller ve kaplama malzemesinin mekanik özelliklerini elde etmek için nano-indentasyon testleri kullanılarak özgün bir tersine sonlu elemanlar yöntemi geliştirildi. Bu yöntemin plastik şekil değişiminin bir eğri ile tahmini yönteminden daha iyi sonuç verdiği görüldü. Tersine sonlu elemanlar

metodu ile nikel kaplamanın akma gerilmesi 700 MPa ve elastisite modülü 100 GPa olarak belirlendi.

- AISI 304L ve AISI 316L gibi dar bir elastoplastik geçiş bölgesine sahip davranış sergileyen malzemelerin optimizasyonlarında Holloman formülasyonunun kullanılmasının yanlış sonuç verdiği görülmüştür. Dengesiz bir başlangıç sergilemesi ve bu başlangıç kısmında akma noktasını kaçırmaması sebebi ile python kodu optimizasyonu da yanlış sonuç vermiştir. Bunun için bilinear malzeme davranış modeli kullanarak, akma gerilmesi ve tanjant modülü optimizasyonu yapıldı. Bunun sonucunda SLM ile üretilmiş 316L mikro tellerin 565 MPa akma gerilmesi ve 1070 GPa tanjant modülüne sahip olduğu belirlenmiştir. Bu değer, literatürdeki SLM ile üretilen 316L paslanmaz çelik malzemesine uygulanan çekme testlerine uygun olduğu gözlemlenmiştir.
- Üretim açısı  $35^\circ$  ve  $90^\circ$  olan mikro tellerin uygulanan çekme testi optimizasyonlarından elde edilen eğrilerin ve malzeme sabitlerinin birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı açı ile üretilmiş, geometrik kusurları farklı olan teller için malzeme sabitlerindeki farkların daha fazla olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkılarak malzemenin mekanik özelliklerine, üretim açısından çok teldeki kusur dağılımlarının etki ettiği görülmektedir.
- Sıkışma bölgesinin gerçeğe yakın modellenmesi için iki yarım hücre yeterli olmaktadır. Fakat mikro kafes yapıların gerçek davranışı tam yakalayabilmek için en az üç yarım hücrenin gerekli olduğu belirlenmiştir. Çeyrek hücrelerin analizlerinde ise yakınsama gözlemlenmemiştir. Yani yarım kafes olarak modellenen analizin çeyrek kafese göre çok daha gerçeğe yakın sıkışma davranışı sergilediği görülmüştür.
- Eklenen tozlar ile mikro telin aynı anda sonlu elemanlar ile modellenmesinde, karmaşık geometriden dolayı, çok küçük elemanların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu durum eleman sayısını ciddi miktarda arttırmakta ve bunun sonucunda gereksiz uzunlukta analiz sürelerinin ortaya çıkmasına sebep olduğu belirlenmiştir.
- Tellerin üzerine yapışan tozların gerilme değeri üzerine çok etkisi olmadığı saptanmıştır. Erken temas bölgeleri oluşturmaları sebebi ile tozların gerçeğe daha yakın sıkışma birim şekil değişimi verdiği tespit edilmiştir. Toz oranının ve tel sayısının artması ile bu değer gerçeğe daha da yaklaşacağı ön görülmüştür.

- Nano-indentasyon analizlerinde 2500 nm gibi büyük yer değiştirmeler için, Berkovich batıcı ucun yuvarlatılmasının kuvvet-yer değiştirme değerlerine etkisi olmadığı görülmüştür.



## 5. ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında kaplamalı mikro kafeslerin mekanik davranışlarının incelenmiştir. Yapılan çalışmaların, mikro kafes yapıların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlayan araştırmacılara yeni fikirler getireceği düşünülmektedir. Gerçeğe yakın kusurlu model ve kusursuz modeldeki yaklaşımlar, üç boyutlu metal üretim teknolojilerinde mekanik özelliklerin belirlenmesi ve optimize edilmesi adına yeni bir araştırma konusu açmaktadır. Kusursuz model yaklaşımıyla, tel ile kaplama arayüzünün iyileştirilmesi ve mikro kafes yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için uygulanan kaplama yönteminin etkilerine ışık tutulmuştur. Gerçeğe yakın modelleme çalışmalarının; geometrik kusurların ve yüzeye yapışan ergimemiş tozların hücre malzemelerin mekanik özelliklere etkisinin açıklanmasında önemli katkılar oluşturacağı düşünülmektedir. Ancak mevcut sonuçların iyileştirilmesi ve geliştirilmesi için aşağıda özetlenen önerilerin dikkate alınması gerektiği düşünülmektedir.

- Yapılan çalışmalarda, tersine sonlu elemanlar yönteminde, farklı davranış sergileyen numuneler için farklı yaklaşımların daha sonuçlar verdiği görülmüştür. Fakat mekanik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunmayan numunelerde hangi plastik bölge tahmin yönteminin daha iyi sonuç vereceğini tahmin edebilecek bir yöntem geliştirilmelidir. Geliştirilecek olan yöntemde farklı malzemeler için nano-indentasyon eğrilerindeki değişiklikler incelenmelidir. Bu sebeple farklı mekanik davranışlara sahip malzemelerin nano-indentasyon kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve izleri sistematik olarak incelenmesi gerektiği düşünülmektedir.
- Kaplama kalitesinin iyileştirilmesi, farklı kaplama malzemelerinin denenmesi ve bunların optimizasyonları üzerine çalışmalar yapılabilir. Bunun yanında kaplamanın mikro hücre kafes bloklara, korozyon ve aşınma dayanımı veya iyileştirilmiş yapısal dayanım gibi çok amaçlı kullanım özelliklerinin de kazandırılacağı belirtmek gerekmektedir [75].
- Farklı ana gövde malzemesinden (titanyum, alüminyum vb.) üretilen mikro kafes yapıların mekanik davranışları incelenebilir.

- BCC yapı haricinde değişik kafes yapısı topolojilerinin analizleri için geometrik kusurların ve toz etkileri incelenebilir. Aynı şekilde farklı spesifik yoğunluğa sahip teller ve kafes yapıları için tozların, boşlukların ve geometrik kusurların etkileri incelenebilir.
- Bu çalışma kapsamında kullanılan yöntemde, tel üzerindeki kusurlar düzgün küresel yapılar olarak temsil edilmektedir. Fakat normalde bu yapı daha çok eliptiktir. Bu sebeple  $\mu$ -CT tarama yöntemi kullanımında gerçeğe daha yakın tel geometri elde edilmektedir.  $\mu$ -CT taraması yapıldıktan sonra filtreleme yöntemi ile yüzeyler düzeltilmektedir. Bu modelin üzerine makro ile tekrardan toz atılarak etkileri incelenebilir.
- Kafes yapıların mekanik özelliklerinin gerçeğe daha yakın olması açısından çoklu hücre analizleri gerçekleştirilebilir. Mikro kafes yapıların üzerine uygulanan basma testlerinde, bazı hücrelerin daha önce deformasyona uğrayarak lokalleşmelere sebep olduğu görülmüştür. Bu davranışın mekanik özelliklere etkilerinin incelenebilmesi için, üretilen mikro kafes bloğunun yüksekliği ve genişliğine sahip modellerin oluşturulması gerektiği tahmin edilmektedir.
- Geometrik kusurlar, tozlar ve boşlukların etkileri dinamik yüklemeler için incelenebilir.



## 6. KAYNAKLAR

1. Schaedler, T.,A. ve Carter, W.,B., Architected Cellular Materials, Annual Review of Materials Research 46 (2016): 187-210.
2. Clare Scott, Michelin Uses 3D Printing to Realize Ambitious Sustainability Goals. <https://3dprint.com/215503/michelin-3d-printing-goals/> 06 Mayıs 2019
3. Austin-Morgan, T., Transforming what's possible for 3D-printed orthopaedic implants. <http://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-news/transforming-whats-possible-for-3d-printed-orthopaedic-implants/88999/>, (2015). 16 Mayıs 2019
4. Gibson, L., J. ve Ashby, M., F., Cellular Solids, Second Edition, Cambridge University Press, 1997.
5. <https://www.materialise.com/cs/node/2158>, The Spider Bracket: A Topology Optimization Project by Altair, Materialise and Renishaw 15 Mayıs 2019
6. Gümrük, R., ve Mines, R.,A.,W., Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures, International Journal of Mechanical Sciences, 68 (2013) 125-139.
7. Tsopanos, S., Mines, R.,A.,W., McKown, S., Shen, Y., Cantwell, W.,J., Brooks, W., ve Sutcliffe, C.,J., The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 132, 4 (2010) 041011.
8. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Bubb, S.,L., Young, P., ve Raymont, D., Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering, Journal of Materials Processing Technology, 214, 4 (2014) 856-864.
9. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., ve Huang, J., Materials Science & Engineering A Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering, Materials Science & Engineering A, 628 (2015) 238-246.
10. Cerardi, A., Caneri, M., Meneghello, R., Concheri, G., ve Ricotta, M., Mechanical Characterization of Polyamide Cellular Structures Fabricated Using Selective Laser Sintering Technologies, JOURNAL OF MATERIALS&DESIGN, (2012).
11. Hahnlen, R., ve Dapino, M.,J., Composites : Part B NiTi - Al interface strength in ultrasonic additive manufacturing composites, COMPOSITES PART B, 59 (2014) 101-108.
12. Dehoff, R.,R., ve Babu, S.,S., Characterization of interfacial microstructures in 3003 aluminum alloy blocks fabricated by ultrasonic additive manufacturing, Acta Materialia, 58, 13 (2010) 4305-4315.

13. Friel, R.,J., ve Harris, R.,A., Ultrasonic additive manufacturing A hybrid production process for novel functional products, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 6, 1 (2013) 35-40.
14. Karamooz Ravari, M.,R., Kadkhodaei, M., Badrossamay, M., ve Rezaei, R., Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling, International Journal of Mechanical Sciences, 88 (2014) 154-161.
15. Rezaie, R., Badrossamay, M., Ghaie, A., ve Moosavi, H., Topology optimization for fused deposition modeling process, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 6 (2013) 522-527.
16. Doty, R.,E., Kolodziejska, J.,A., ve Jacobsen, A.,J., Hierarchical polymer microlattice structures, Advanced Engineering Materials, 14, 7 (2012) 503-507.
17. Zhou, Y.,F., Yao, C.,Z., Yang, Q.,L., Guo, L., ve Jiang, L., Mechanical Properties of Diamond-Structured Polymer Microlattices Coated with the Silicon Nitride Film, Advanced Engineering Materials, 18, 2 (2016) 236-240.
18. Bauer, J., Hengsbach, S., Tesari, I., Schwaiger, R., ve Kraft, O., High-strength cellular ceramic composites with 3D microarchitecture, Proceedings of the National Academy of Sciences, 111, 7 (2014) 2453-2458.
19. Eckel, Z.,C., Zhou, C., Martin, J.,H., Jacobsen, A.,J., Carter, W.,B., ve Schaedler, T.,A., Additive manufacturing of polymer-derived ceramics, Science, 351, 6268 (2016) 58-62.
20. Ushijima, K., Cantwell, W.,J., Mines, R.,A.,W., Tsopanos, S., ve Smith, M., An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures, Journal of Sandwich Structures and Materials, 13, 3 (2011) 303-329.
21. MALCOLM, Collin C. Expandable vibration damping materials. U.S. Patent No 5,635,562, 1997.
22. Yang, Z., Peng, H., Wang, W., ve Liu, T., Crystallization behavior of poly( $\epsilon$ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites, Journal of Applied Polymer Science, 116, 5 (2010) 2658-2667.
23. Zhou, H., Li, B., ve Huang, G., Sound absorption characteristics of polymer microparticles, Journal of Applied Polymer Science, 101, 4 (2006) 2675-2679.
24. HILES, Maurice. Energy absorbing polyurethane composite article. U.S. Patent No 4,808,469, 1989.
25. Meinecke, E.,A., ve Schwaber, D.,M., Energy absorption in polymeric foams. I. Prediction of impact behavior from instron data for foams with rate-independent modulus, Journal of Applied Polymer Science, 14, 9 (1970) 2239-2248.

26. Kwon, Y.,W., Cooke, R.,E., ve Park, C., Representative unit-cell models for open-cell metal foams with or without elastic filler, Materials Science and Engineering A, 343, 1-2 (2003) 63-70.
27. Sypeck, D.,J., Cellular truss core sandwich structures, Applied Composite Materials, 12, 3-4 (2005) 229-246.
28. Bastawros, A.,F., Bart-Smith, H., ve Evans, A.,G., Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 48, 2 (2000) 301-322.
29. Cansizoglu, O., Harrysson, O., Cormier, D., West, H., ve Mahale, T., An evaluation of non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting., Materials Science and Engineering A, 492, 1-2 (2008) 468-474.
30. Rehme, O., ve Emmelmann, C., Rapid manufacturing of lattice structures with selective laser melting, Laser-based Micropackaging, 6107 (2006) 61070K.
31. Gümrük, R., Seçici Lazer Ergitme Yöntemi İle Üretilen Mikro Kafes Yapıların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
32. Prashanth, K.,G., Scudino, S., Klauss, H.,J., Surreddi, K.,B., Löber, L., Wang, Z., Chaubey, A.,K., Kühn, U., ve Eckert, J., Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment, Materials Science and Engineering A, 590 (2014) 153-160.
33. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J.,P., ve Van Humbeeck, J., Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties, Journal of Alloys and Compounds, 541 (2012) 177-185.
34. Vilaro, T., Colin, C., ve Bartout, J.,D., As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting, Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 42, 10 (2011) 3190-3199.
35. Mumtaz, K., ve Hopkinson, N., Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, 15, 2 (2009) 96-103.
36. Cherry, J.,A., Davies, H.,M., Mehmood, S., Lavery, N.,P., Brown, S.,G.,R., ve Sienz, J., Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76, 5-8 (2014) 869-879.
37. Kruth, J.,P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M., ve Lauwers, B., Selective laser melting of iron-based powder, Journal of Materials Processing Technology, 149, 1-3 (2004) 616-622.
38. Mines, R., Metallic Microlattice Structures Manufacture , Materials and Application, Springer Nature, Cham, 2019.

39. Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., ve Zeng, X., Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel, Materials and Design, 50 (2013) 581-586.
40. Louvis, E., Fox, P., ve Sutcliffe, C.,J., Selective laser melting of aluminium components, Journal of Materials Processing Technology, 211, 2 (2011) 275-284.
41. Santos, E.,C., Osakada, K., Shiomi, M., Kitamura, Y., ve Abe, F., Microstructure and mechanical properties of pure titanium models fabricated by selective laser melting, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 218, 7 (2004) 711-719.
42. Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H.,A., ve Maier, H.,J., On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance, International Journal of Fatigue, 48 (2013) 300-307.
43. Zhang, B., Dembinski, L., ve Coddet, C., The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder, Materials Science and Engineering A, 584 (2013) 21-31.
44. Wang, S., Liu, Y., Shi, W., Yang, J., Zhang, F., Han, D., ve Ma, Y., Research on High Layer Thickness Fabricated of 316L by Selective Laser Melting, Materials, 10, 9 (2017) 1055.
45. Casati, R., Lemke, J., ve Vedani, M., Microstructure and Fracture Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting, Journal of Materials Science and Technology, 32, 8 (2016) 738-744.
46. Suryawanashi, J., Prashanth, K.,G. ve Ramamurty, U., Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel. Materials Science and Engineering: A, 696, (2017) 113-121.
47. Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., ve Fortunato, A., Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, 249, June (2017) 255-263.
48. Choi, J.,P., Shin, G.,H., Brochu, M., Kim, Y.,J., Yang, S.,S., Kim, K.,T., Yang, D.,Y., Lee, C.,W., ve Yu, J.,H., Densification Behavior of 316L Stainless Steel Parts Fabricated by Selective Laser Melting by Variation in Laser Energy Density, Materials Transactions, 57, 11 (2016) 1952-1959.
49. Fischer-Cripps, A.,C., Nanoindentation, Springer, New York, 2002.
50. De Bono, D.,M., Inverse Analysis and Microstructure Effects in Nanoindentation Testing, Doktora Tezi, Department of Mechanical Engineering Sciences Faculty of Engineering and Physical Science University of Surrey, 2017.

51. Read, D.,T., ve Dally, J.,W., A new method for measuring the strength and ductility of thin films, Journal of Materials Research, 8, 7 (1993) 1542-1549.
52. Liu, R., Li, X., Wang, H., Ding, G., Yang, C., ve Yang, Z., A new method for the micro-tensile testing of thin film, 3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, NEMS, (2008) 112-115.
53. Dehm, G., Wörgötter, H.,P., Cazottes, S., Purswani, J.,M., Gall, D., Mitterer, C., ve Kiener, D., Can micro-compression testing provide stress-strain data for thin films?. A comparative study using Cu, VN, TiN and W coatings, Thin Solid Films, 518, 5 (2009) 1517-1521.
54. Bufford, D., Origins of material degradation and failure: real time nanoscale observations of deformation , fatigue , and radiation damage, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1404819> 16 Mayıs 2019
55. Oliver, W.,C., ve Pharr, G.,M., An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, Journal of materials research, 7, 6 (1992) 1564-1583.
56. Kim, J.,J., Pham, T.,H., ve Kim, S.,E., Instrumented indentation testing and FE analysis for investigation of mechanical properties in structural steel weld zone, International Journal of Mechanical Sciences, 103 (2015) 265-274.
57. Jeong, H.,J., Lim, N.,S., Lee, B.,H., Park, C.,G., Lee, S., Kang, S.,H., Lee, H.,W., ve Kim, H.,S., Local and Global Stress-Strain Behaviors of Transformation-Induced Plasticity Steel Using the Combined Nanoindentation and Finite Element Analysis Method, Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 45, 13 (2014) 6008-6015.
58. Bouzakis, K.,D., ve Michailidis, N., An accurate and fast approach for determining materials stress-strain curves by nanoindentation and its FEM-based simulation, Materials Characterization, 56, 2 (2006) 147-157.
59. Li, Y., Stevens, P., Sun, M., Zhang, C., ve Wang, W., Improvement of predicting mechanical properties from spherical indentation test, International Journal of Mechanical Sciences, 117 (2016) 182-196.
60. Tho, K.,K., Swaddiwudhipong, S., Liu, Z.,S., Zeng, K., ve Hua, J., Uniqueness of reverse analysis from conical indentation tests, Journal of Materials Research, 19, 8 (2004) 2498-2502.
61. Chen, X., Ogasawara, N., Zhao, M., ve Chiba, N., On the uniqueness of measuring elastoplastic properties from indentation: The indistinguishable mystical materials, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 55, 8 (2007) 1618-1660.
62. Pham, T.,H., Kim, J.,J., ve Kim, S.,E., Estimating constitutive equation of structural steel using indentation, International Journal of Mechanical Sciences, 90 (2015) 151-161.

63. Oliver, W.,C., ve Pharr, G.,M., Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology, Journal of Materials Research, 19, 1 (2004) 3-20.
64. De Bono, D.,M., London, T., Baker, M., ve Whiting, M.,J., A robust inverse analysis method to estimate the local tensile properties of heterogeneous materials from nano-indentation data, International Journal of Mechanical Sciences, 123, October 2016 (2017) 162-176.
65. Moussa, C., Bartier, O., Mauvoisin, G., Pilvin, P., ve Delattre, G., Characterization of homogenous and plastically graded materials with spherical indentation and inverse analysis, Journal of Materials Research, 27, 1 (2012) 20-27.
66. Kopernik, M., Milenin, A., Major, R., ve Lackner, J.,M., Identification of material model of TiN using numerical simulation of nanoindentation test, Materials Science and Technology, 27, 3 (2010) 604-616.
67. Liu, D.,S., ve Tsai, C.,Y., Estimation of thermo-elasto-plastic properties of thin-film mechanical properties using MD nanoindentation simulations and an inverse FEM/ANN computational scheme, CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences, 39, 1 (2009) 29-47.
68. Ruan, H.,H., Chen, A.,Y., ve Lu, J., Characterization of plastically graded nanostructured material: Part I. The theories and the inverse algorithm of nanoindentation, Mechanics of Materials, 42, 5 (2010) 559-569.
69. Swaddiwudhipong, S., Hua, J., Tho, K.,K., ve Liu, Z.,S., Equivalency of Berkovich and conical load-indentation curves, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 14, 1 (2006) 71-82.
70. Bolshakov, A., ve Pharr, G.,M., Inaccuracies in Sneddon's Solution for Elastic Indentation by a Rigid Cone and Their Implications for Nanoindentation Data Analysis, MRS Online Proceedings Library Archive, 436 (1996) 189-194.
71. Yu, N., Polycarpou, A.,A., ve Conry, T.,F., Tip-radius effect in finite element modeling of sub-50 nm shallow nanoindentation, Thin Solid Films, 450, 2 (2004) 295-303.
72. Pelletier, H., Predictive model to estimate the stress-strain curves of bulk metals using nanoindentation, Tribology International, 39, 7 (2006) 593-606.
73. Pelletier, H., Krier, J., Cornet, A., ve Mille, P., Limits of using bilinear stress-strain curve for finite element modeling of nanoindentation response on bulk materials, Thin Solid Films, 379, 1-2 (2000) 147-155.
74. Poon, B., Rittel, D., ve Ravichandran, G., An analysis of nanoindentation in linearly elastic solids, International Journal of Solids and Structures, 45, 24 (2008) 6018-6033.
75. Xiong, J., Mines, R., Ghosh, R., Vaziri, A., Ma, L., Ohrndorf, A., Christ, H.,J., ve Wu, L., Advanced Micro-Lattice Materials, Advanced Engineering Materials, 17, 9 (2015) 1253-1264.

76. Rashed, M.,G., Ashraf, M., Mines, R.,A.,W., ve Hazell, P.,J., Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications, Materials and Design, 95 (2016) 518-533.
77. Gümruk, R., Mines, R.,A.,W., ve Karadeniz, S., Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions, Materials Science and Engineering A, 586 (2013) 392-406.
78. Mines, R.,A.,W., Tsopanos, S., Shen, Y., Hasan, R., ve McKown, S.,T., Drop weight impact behaviour of sandwich panels with metallic micro lattice cores, International Journal of Impact Engineering, 60 (2013) 120-132.
79. Maskery, I., Aboulkhair, N.,T., Aremu, A.,O., Tuck, C.,J., Ashcroft, I.,A., Wildman, R.,D., ve Hague, R.,J.,M., A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting, Materials Science and Engineering A, 670 (2016) 264-274.
80. Tancogne-Dejean, T., Spierings, A.,B., ve Mohr, D., Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading, Acta Materialia, 116 (2016) 14-28.
81. Ozdemir, Z., Goodall, R., Fay, S.,D., Todd, I., Hernandez-Nava, E., Askes, H., Warren, J.,A., ve Tyas, A., Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments, International Journal of Impact Engineering, 89 (2015) 49-61.
82. Schaedler, T.,A., Jacobsen, A.,J., Torrents, A., Sorensen, A.,E., Lian, J., Greer, J.,R., Valdevit, L., ve Carter, W.,B., Ultralight metallic microlattices, Science, 334, 6058 (2011) 962-965.
83. Schaedler, T.,A., Ro, C.,J., Sorensen, A.,E., Eckel, Z., Yang, S.,S., Carter, W.,B., ve Jacobsen, A.,J., Designing metallic microlattices for energy absorber applications, Advanced Engineering Materials, 16, 3 (2014) 276-283.
84. Bouwhuis, B.,A., Ronis, T., McCrea, J.,L., Palumbo, G., ve Hibbard, G.,D., Structural nanocrystalline Ni coatings on periodic cellular steel, Composites Science and Technology, 69, 3-4 (2009) 385-390.
85. Ptochos, E., ve Labeas, G., Elastic modulus and Poisson's ratio determination of micro-lattice cellular structures by analytical, numerical and homogenisation methods, Journal of Sandwich Structures and Materials, 14, 5 (2012) 597-626.
86. Gorny, B., Niendorf, T., Lackmann, J., Thoene, M., Troester, T., ve Maier, H.,J., 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 (2011) 7962-7967.
87. Campoli, G., Borleffs, M.,S., Amin Yavari, S., Wauthle, R., Weinans, H., ve Zadpoor, A.,A., Mechanical properties of open-cell metallic biomaterials manufactured using additive manufacturing, Materials and Design, 49 (2013) 957-965.

88. Karamooz Ravari, M.,R., ve Kadkhodaei, M., A Computationally Efficient Modeling Approach for Predicting Mechanical Behavior of Cellular Lattice Structures, Journal of Materials Engineering and Performance, 24, 1 (2015) 245-252.
89. Lozanovski, B., Leary, M., Tran, P., Shidid, D., Qian, M., Choong, P., ve Brandt, M., Computational modelling of strut defects in SLM manufactured lattice structures, Materials & Design, 171 (2019) 107671.
90. Lei, H., Li, C., Meng, J., Zhou, H., Liu, Y., ve Zhang, X., Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and  $\mu$ -CT-based finite element analysis, Materials & Design, 169 (2019) 107685.
91. Sudagar, J., Lian, J., ve Sha, W., Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings - A critical review, Journal of Alloys and Compounds, 571 (2013) 183-204.
92. Gümrük, R., Uşun, A., ve Mines, R.,A.,W., Enhancement of the Mechanical Performance of Stainless Steel Micro Lattice Structures Using Electroless Plated Nickel Coatings, Proceedings, 2, 8 (2018) 494.
93. Karaca, H., Kadkhodaei, M., Esfahani, S.,N., Elahinia, M., Ghaei, A., Ravari, M.,R.,K., ve Andani, M.,T., On the effects of geometry, defects, and material asymmetry on the mechanical response of shape memory alloy cellular lattice structures, Smart Materials and Structures, 25, 2 (2016) 025008.



## ÖZGEÇMİŞ

Altuğ Uşun 1992 yılında İzmir’de doğdu. Lise eğitiminin bir bölümünü Almanya’da Derksen Gymnasium’da kalan kısmını ise Gelibolu Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü’nü tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2017 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi seviyede İngilizce, temel seviyede Almanca bilmektedir.