



## Investigation of mechanical properties of electroless nickel plated micro-lattice structures

Recep Gümrük\*<sup>ID</sup>, Altuğ Uşun<sup>ID</sup>

Department of Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, 61080, Turkey

### Highlights:

- The effects of nickel coatings on SLM produced lattice structures
- Reverse finite element analysis approach to Nano-indentation
- Investigation of SLM produced lattice structures with finite element method

### Keywords:

- Electroless nickel coating
- Selective laser melting
- Micro lattice structures
- Reverse finite element analysis
- Nano-indentation

### Article Info:

Research Article  
Received: 03.07.2019  
Accepted: 29.04.2020

### DOI:

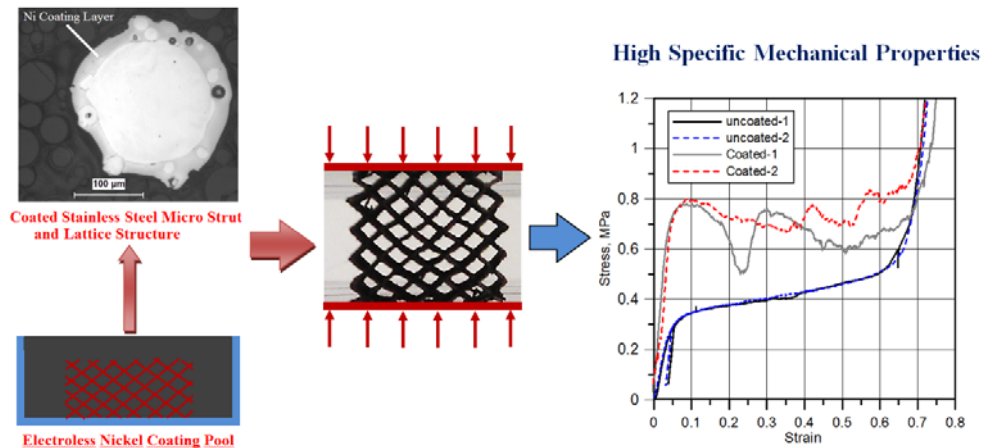
10.17341/gazimmfd.586438

### Correspondence:

Author: Recep Gümrük  
e-mail: rgumruk@ktu.edu.tr  
phone: +90 462 377 2946

### Graphical/Tabular Abstract

With the rapid progress of additive manufacturing technologies, metallic micro lattice structures have been used effectively in many areas such as sandwich structures, filling material, impact absorption elements, sound and thermal insulation. Selective Laser Melting has the potential to be one of the most important production methods for the metallic micro-lattice structures. In this study, mechanical properties of electroless nickel coated micro lattice structures were parametrically studied with both experimental and finite element methods.



**Figure A.** Representation of manufacturing, coating and compression testing of BCC micro-lattice structures

**Purpose:** The aim of this study is to investigate mechanical properties of electroless nickel coatings applied to improve specific elasticity and strength values of micro-lattice structures.

### Theory and Methods:

The micro lattice structures are produced of micro struts with a diameter of approximately 200 µm by selective laser melting (90 W laser power, 1000 µs laser exposure time, 50 µm layers thickness) and are made of 316L stainless steel in the form of body centered cubic structure. Subsequently, the micro lattice structures were coated with electroless nickel method. The effects of coating thickness and cell size on the mechanical performance of micro lattice structures were investigated by finite element method. Material parameters required for finite element method were obtained by using nano-indentation tests on the coating and reverse finite element algorithms

### Results:

It has been observed that 316L micro lattice structures can be coated with electroless nickel in a very uniform manner and a coating thickness of 17 µm can be achieved. As a result of compression tests, it was observed that the specific compression elasticity and strength values of nickel coated micro lattices increased by 50% and 75% respectively. Yield stress (750 MPa) and elastic modulus (101 GPa) of nickel coatings was achieved from reverse finite element method using nano-indentation curves.

### Conclusion:

Parametric studies with finite element method have shown that coating thickness, cell size and coating interface significantly effects the mechanical properties of coated micro lattice structures. Analyses also showed that these effects are highly influenced by the damage characteristics of the coating material.



## Akımsız nikel kaplanmış mikro kafes yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi

Recep Gümrük\*<sup>ID</sup>, Altuğ Uşun<sup>ID</sup>

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Nikel kaplamanın SLM ile üretilmiş kafes yapıların mekanik özelliklerine etkisi
- Kaplamanın mekanik özelliklerinin nano-indentasyon testleri yardımıyla belirlenmesi
- Nikel kaplanmış mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 03.07.2019

Kabul: 29.04.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.586438

### Anahtar Kelimeler:

Akımsız nikel kaplama,  
seçici lazer ergitme,  
mikro kafes yapılar,  
tersine sonlu elemanlar  
analizi,  
nano-indentasyon

### ÖZET

Bu çalışmada, akımsız nikel ile kaplanan mikro kafes yapıların mekanik özellikleri hem deneysel hem de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak parametrik olarak incelenmiştir. Kullanılan mikro kafes yapılar, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile yaklaşık 200 µm çapında mikro tellerden oluşan, 316L paslanmaz çelik malzemeden hacim merkezli kübik (BCC) yapı şeklinde üretilmiştir. Uygulanan akımsız nikel kaplama yöntemi ile yaklaşık olarak 17 µm kaplama kalınlığı elde edilmiş ve gerçekleştirilen basma testleri sonucunda mikro kafes yapıların spesifik elastisite modüllerinde yaklaşık %50 ve spesifik mukavemetlerinde ise %75 artış elde edilmiştir. Kaplama kalınlığının ve hücre boyutunun mikro kafes yapıların mekanik performansları üzerine etkileri sonlu elemanlar analizleri ile parametrik olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde kaplama için gerekli malzeme parametreleri nano-indentasyon testleri kullanılarak özgün olarak geliştirilen tersine sonlu elemanlar algoritması ile elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar gösterdi ki; kaplanmış mikro kafeslerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde kaplama malzemesinin mekanik ve hasar özellikleri çok ciddi bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak kaplama malzemesinin spesifik mukavemeti ve sünekliği ne kadar yüksek ise paslanmaz çelik mikro kafes yapıların spesifik mekanik özelliklerinin o derecede iyileşme göstereceği belirlenmiştir.

## Investigation of mechanical properties of electroless nickel plated micro-lattice structures

### H I G H L I G H T S

- The effects of nickel coatings on SLM produced lattice structures
- Reverse finite element analysis approach to nano-indentation
- Investigation of SLM produced lattice structures with finite element method

### Article Info

Research Article

Received: 03.07.2019

Accepted: 29.04.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.586438

### Keywords:

Electroless nickel coating,  
selective laser melting,  
micro lattice structures,  
reverse finite element  
analysis,  
nano-indentation

### ABSTRACT

In this study, mechanical properties of electroless nickel coated micro lattice structures were parametrically studied with both experimental and finite element methods. The micro lattice structures are produced of micro struts with a diameter of approximately 200 µm by selective laser melting (SLM) and are made of 316L stainless steel in the form of body centered cubic (BCC) structure. With electroless nickel coating method, a coating thickness of 17 µm was obtained and as a result, compression tests showed a 50% increase in specific elasticity modules and a 75% increase in specific strength for micro lattice structures. The effects of coating thickness and cell size on the mechanical performance of micro lattice structures were investigated by finite element method. Material parameters required for finite element method were obtained by using nano-indentation tests on the coating and reverse finite element algorithms. Studies showed that; The mechanical and failure properties of the coating material have a significant effect on improving the mechanical properties of the coated micro lattices. As a result, it was determined that, with higher the specific strength and ductility of the coating material, higher mechanical properties of the stainless-steel micro lattice structures can be achieved.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: \*rgumruk@ktu.edu.tr, altug@ktu.edu.tr / Tel: +90 462 377 2946

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Katmanlı üretim teknolojilerinin hızla gelişmesi ile beraber, metalik mikro kafes yapılar; sandviç yapılar, dolgu malzemesi, darbe sönmüleme elemanları, ses izolasyonu, ısı yalıtım gibi pek çok alanda etkin şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting, SLM) yöntemi, metalik mikro yapıların üretiminde kullanılan en önemli üretim yöntemlerinden biri olma potansiyeline sahiptir [1, 2]. Bu teknolojiyi kullanarak Ushijima vd. [3] ve Gümrük vd. [4, 5], hacim merkezli kübik (Body Centered Cubic, BCC) yapıya sahip, paslanmaz çelik mikro kafes bloklar üretmiştir. Bu çalışmalarda, üretilen mikro kafes yapıların basma ve diğer yükleme koşulları altındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. Spesifik elastisite modülü ve başlangıç çökme mukavemeti gibi değerlerin yanında, hücrelerin çökmesi sırasında mikro tellerde meydana gelen deformasyon mekanizmaları araştırılmıştır. Yapılan gözlemler, BCC mikro kafeslerin çökme davranışının, mikro tellerin keşişim bölgesi etrafında eğilme deformasyonu şeklinde meydana gelen plastik şekil değişiminden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Mikro kafes yapıların üretiminde çeşitli imalat teknikleri kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak elektron ışını ile ergitme (electron beam melting) [6] ve foto-polimer teknik (photo polymer wave guides) [7] verilebilir. Ayrıca polimer kafes yapıların metal ile kaplanması ve sonrasında polimerin eritilmesiyle içi boş, ultra hafif, metalik mikro kafes yapılar oluşturulabilmektedir [7]. Bunun haricinde polimerik kalıplar, metalik mikro kafes yapıların dökümünün yapılmasında da kullanılmaktadır [8]. Son zamanlarda Bouwhuis vd. [9] tarafından yapılan bir çalışmada, hücre malzemelerin mekanik özelliklerinin kaplama yöntemi ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, sac şekil verme yöntemi (stretch band sheet forming) kullanılarak hücresel çelik yapı (tel enine kesiti 0,7x0,9 mm ve hücre boyutu 6,35 mm) üretilmiştir. Üretilen hücresel yapı, akım darbesi yöntemi (pulse current method) kullanılarak nano kristalli nikel ile yaklaşık 23-60 µm kalınlıklarda kaplanmıştır. Yapılan çalışma ile 50 µm'lik bir kaplama kalınlığının, çökme davranışından ödün vermeden, hücre malzemenin basma mukavemetini ikiye katladığını göstermişlerdir. Ayrıca metallerin mekanik özelliklerini Akımsız kaplama tekniğinin geliştirilmesi üzerine yapılan bilimsel çalışmaların bir derlemesi (review) Sudager vd. [10] tarafından yapılmıştır. Akımsız kaplama yönteminde gerekli solüsyonlar bir akışkan içerisine karıştırılmaktadır ve oluşan çözeltinin kendisi bir dahili akım sağlamaktadır. Nikel kaplama, akışkan içerisinde bekleme süresine bağlı olarak, numune üzerinde birikmektedir [11]. Bu şekilde yapılan kaplama yöntemi basitlik ve kolay imalat avantajlarına sahiptir. Sudager vd. [10] çeşitli akımsız kaplama süreçlerini ve malzemelerini gözden geçirmişlerdir ve kaplama malzemesinin mekanik özelliklerini tartışmışlardır. Bu çalışmada ise, SLM ile üretilen BCC mikro kafes yapıların spesifik elastisite ve mukavemet değerlerinin iyileştirilmesi amacıyla akımsız nikel kaplama uygulanmıştır. Yüksek

kaplama kalınlığına ulaşılabilmesi ve dengeli üretim yöntemine sahip olması sebebiyle, asit banyosu Ni-P yaklaşımı kullanılmıştır [10]. Genel olarak iyi mekanik özellikler vermesinden dolayı, çözeltideki fosfor içeriği %6-9 arasında seçilmiştir. Üretilen numunelerin mekanik davranışlarını belirlemek için basma testleri uygulanmıştır. Ayrıca kaplamanın kalınlığı ve hücre boyutu arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılması amacıyla sonlu elemanlar modelleri geliştirilmiştir. Bu kapsamda kaplama malzemesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde nano-indentasyon testlerinden yararlanılmıştır. Nano-indentasyon testlerinden gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin elde edilebilmesi amacıyla, özgün tersine sonlu elemanlar algoritması (reverse finite element method) geliştirilmiştir. Kaplamanın mekanik özellikleri elde edildikten sonra bu değerler sonlu elemanlar yönteminde kullanılarak deneysel eğriler ile karşılaştırılıp modellerin doğruluğu kontrol edilmiştir. Böylece elde edilen model ile kaplama parametrelerinin (kaplama ara yüz etkileri, kaplama kalınlıkları ve hücre boyutu ile ilişkisi vb.) basma performansına etkileri sayısal olarak incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

### 2.1. Mikro Kafes Blokların Üretimi (Manufacturing of Micro Lattice Blocks)

SLM ile üretilmiş 316L paslanmaz çelik mikro kafes yapıların üretimi Tsopanos vd. [12] tarafından kapsamlı olarak tartışılmıştır. Bu çalışmada mikro kafes yapıların SLM ile üretilmesindeki kullanılan parametreler; optimum lazer gücü (90 W), 50 µm katman kalınlığı ve 1000 µs lazer nüfus süresi ile tek nokta lazer (single spot laser approach) yaklaşımıdır. Mikro kafes yapılar SLM MCP 250 Realizer II makinası tarafından üretilmiştir. Mikro kafes bloklar 2,5 mm hücre boyutuna sahip 5 hücreden meydana gelmektedir ve toplam kenar uzunluğu 12,5 mm olan kübik şekilde imal edilmişlerdir. Mikro tellerin nominal çapları yaklaşık 200 µm'dir. Bloklar daha sonra Tablo 1'de gösterilen metodoloji kullanılarak nikel alaşımı ile kaplanmıştır. Bu metodolojide üretilen SLM blokları ilk olarak 2 dakika boyunca bir elektrolitik yöntem kullanılarak yüzeyi temizlenmiştir. Su ile yıkandıktan sonra, mikro kafesin yüzeyleri bir klorürlü nikel ve hidroklorik asit banyosu (chloride nickel and hydrochloric acid bath) (5 dakika) kullanılarak hazırlanmıştır. Kaplama işleminin kendisinde nikel sülfat (33 g/l) ve sodyum hipofosfit (28 g/litre) (nickel sulfate and sodium hypophosphite) banyosu kullanılmıştır [9]. Daldırma süresi kaplama kalınlığı göz önünde bulundurularak 80 dakika olarak seçilmiştir. İşlem sonrasında kaplanmış hücreler, artık gerilmeleri gidermek amacı ile sıcak su (100°C) içerisinde 30 dakika tutulduktan sonra oda sıcaklığındaki (25°C) su içerisinde termal şoka maruz bırakılmıştır ve son işlem olarak kurutulmuştur. Mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla ilave ısı işlemleri de uygulanabilir fakat bu işlemler burada kullanılmamıştır. Şekil 1a, Şekil 1b'de tellerin enine ve boyuna kesit görüntüleri verilmiştir. Şekil 1c, Şekil 1d'de sırasıyla kaplamalı ve kaplamasız tellerin dış görünüşleri

gösterilmektedir. Bu resimlerden, kaplama kalitesinin iyi olduğu görülmektedir. Kesit resimlerinden de kaplama kalınlığının yaklaşık olarak 17  $\mu\text{m}$  olduğu belirlenmiştir. Ayrıca mikro tel ve kaplama ara yüzündeki yapışmanın da düzgün ve kaliteli olduğu görülmektedir. Mikro teller ve kaplama ara yüzünün iyi kalitede olduğu da kolayca Şekil 1a'dan anlaşılmaktadır. Bu şekillerde aynı zamanda SLM ile üretilmiş mikro yapıların çok ciddi miktarda geometrik kusur içerdiği görülmektedir. Şekil 1c, Şekil 1d'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 gerekmektedir. Daha önceki yapılan çalışmalarda, bu değişkenlere rağmen, mikro kafes yapıların mekanik davranışlarının tekrarlanabilir ve öngörülebilir olduğu gösterilmiştir [1-5]. Şekil 1'den görüldüğü gibi, kaplama etkisi ile küçük boyuttaki erimemiş veya yarı erimiş mikro tozlar kaplamanın içerisine gömülmektedir. Bunun sonucunda kaplamalı mikro telin (Şekil 1c) yüzeyinde kaplanmamış olana göre (Şekil 1d) çok daha az mikro tozlar bulunmaktadır. Sonuç olarak kaplanmış yüzeyler kaplanmamışa göre daha düzgün görülmektedir. Ayrıca Şekil 1'de hem kaplamada hem de çelik çekirdeğinde bir dizi boşluğu (porozite) göstermektedir. Bunların deformasyon sırasında malzemenin mekanik davranışını ve kopmayı etkileyeceği kolayca anlaşılabilir.

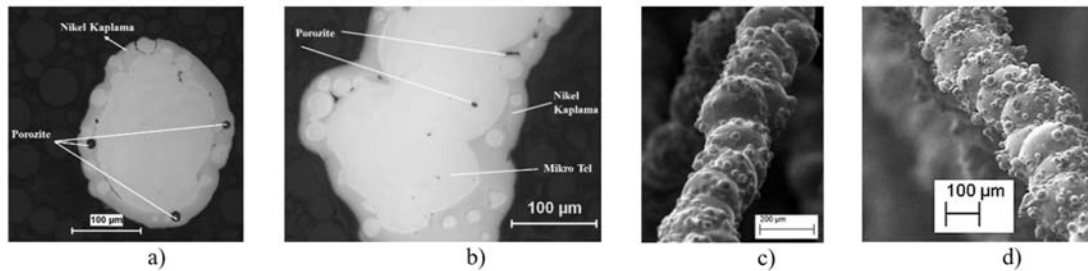
## 2.2. Kafeslerin Deneysel Basma Testleri (Block Compression Tests)

12,5 mm<sup>3</sup> hacmindeki kafes yapılar Instron servo hidrolik test cihazında basma testine tabi tutulmuştur. Yükleme hızı 0,5 mm/dakika alınmıştır. Bu değer 6,66x10<sup>-4</sup> (s<sup>-1</sup>) birim şekil değişimi hızına 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 miktarının, bloğun ilk yüksekliğine (12,5 mm) bölünmesi ile elde edilmiştir. Paslanmaz çeliğin yoğunluğu 8000 kgm<sup>-3</sup> ve kaplamanın yoğunluğu ise 8100 kgm<sup>-3</sup>'tür [9]. Her kafesin kütlesi, spesifik özelliklerin ve kaplamanın etkisinin ölçülebilmesi için, kaplama öncesinde, sonrasında ve test öncesinde ölçülmüştür. Kafeslerin yoğunluğu, kafes blokların imal edildiği 316L paslanmaz çelik malzemenin yoğunluğuna (8000 kgm<sup>-3</sup>) bölünerek spesifik yoğunluğu elde edilmiştir. Kaplanmamış veya kaplanmış mikro kafes yapıların spesifik mekanik değerleri eşdeğer spesifik yoğunluk değerlerine bölünerek elde edilmiştir.

Şekil 2'de kaplanmış mikro kafes yapının belirli çökme mesafelerindeki deformasyon gelişimi verilmektedir. Şekil incelendiğinde kaplanmış ve kaplanmamış kafes [4] blokların çökme mekanizmalarının benzer olduğu

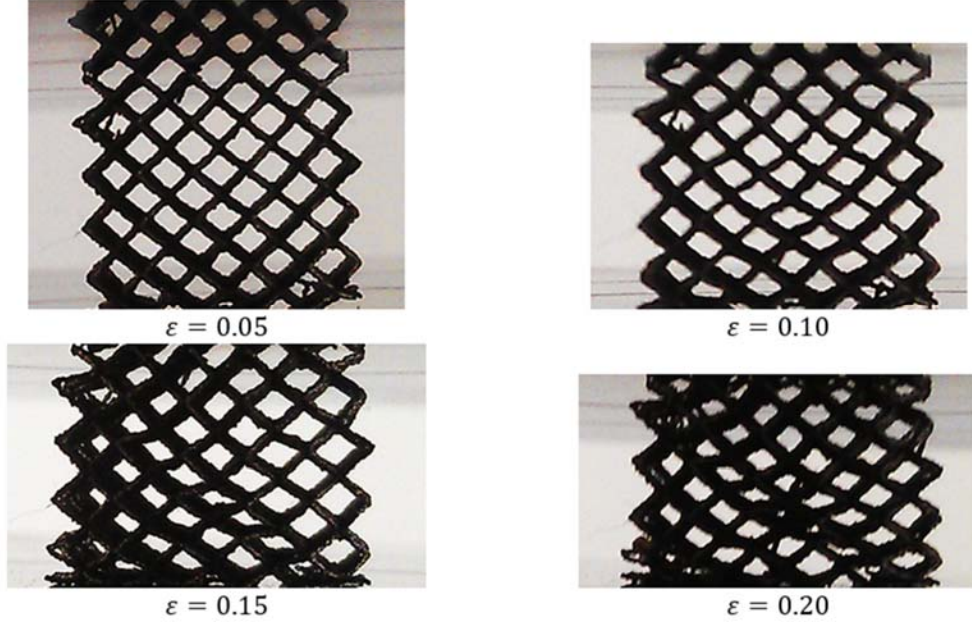
**Tablo 1.** Paslanmaz çelik hücresel yapıların nikel kaplama aşamaları.  
(The stages of nickel coating of stainless-steel lattice blocks)

Aşama	Uygulanan yüzey işlemi	Sıcaklık (°C)	Süre (min)	Volt	pH
1	Elektrolitik arındırma	25	2	4	
2	Su ile yıkama		1		
3	Kaplama öncesinde klorürlü nikel ve hidroklorik asit banyosu ile yüzey aktivasyonu	25	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	25	1		
10	Sıcak su ile yıkama	100	1		
11	Havada kurutma				



**Şekil 1.** Mikro tellerin elektron mikroskobu resimleri a) tel enine kesiti b) tel boyuna kesiti c) kaplanmış mikro tel d) kaplanmamış mikro tel

(Images of electron microscope of micro struts a) cross-section b) longitudinal cross-section c) coated micro strut d) uncoated micro strut)



**Şekil 2.** Kaplanmış BCC mikro kafes yapıların basma etkisi altındaki deformasyon ilerlemesi  
(The development of deformation mode at the coated BCC micro lattice block during compression)

görülmektedir. Çökme genel olarak mikro kafeslerin düğüm noktaları etrafında meydana gelmektedir. Bu hasar modu detaylı olarak [3-5]'de tartışılmıştır. Buradan 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.

### 2.3. Sonlu Elemanlar Modellemeleri (Finite Element Modeling)

Bu bölümde basma testlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve bu model üzerinde kaplama parametrelerinin etkisini araştırmak amaçlanmıştır. Kaplamanın mekanik (gerilme-birim şekil değiştirme davranışı) özelliklerinin standart çekme veya benzeri bir yöntemle belirlenmesinin çok zor olması sebebiyle tersine sonlu elemanlar analizi yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemde kaplamaya nano-indentasyon uygulanmıştır ve elde edilen eğriler kullanılarak tersine sonlu elemanlar yöntemi ile kaplamanın mekanik özellikleri belirlenmiştir. Belirlenen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri kullanılarak, kafes yapılar için basma testlerinin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar modeli deneysel değerlerle doğrulanıp, sonlu elemanlar analizi ile parametrik çalışmalar yapılmıştır. Bu parametrik çalışmalarda, kaplama kalınlığının, mikro tel ile kaplama arasındaki ara yüz etkileri ve hücre boyutunun basma testlerindeki mekanik davranış üzerine etkileri incelenmiştir. Bu bölümde ilk önce tersine sonlu elemanlar yönteminin uygulanış biçimi ile ilgili detaylı bilgiler verildikten sonra geliştirilen tersine sonlu elemanlar yöntemi ve sonuçları tartışılacaktır. En son olarak kafes yapıların basma testinin sonlu elemanlar modelinin detayları verilecektir.

#### 2.3.1. Tersine Sonlu Elemanlar Metodu (Reverse Analysis Method)

Tersine sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak, sertlik ve elastisite modülünün elde edilmesi için, 1992 yılında Oliver vd. [13] tarafından ileri sürülmüştür. Sonrasında bu yöntem mekanik davranışları karakterize etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Literatürde genelde ince film kaplamaların [14-16], kaynakta ısı tesiri altındaki bölgelerin [17] ve standart yöntemlerle belirlenemeyen durumlarda mekanik özelliklerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bouzakis vd. [18] gerilme-birim şekil değişimi eğrilerini çeşitli batma derinlikleri ile yapılan nano-indentasyon testlerinden elde etmişlerdir. Li vd. [19] benzer çalışmaları Berkovich batıcı uç yerine dairesel uçlar ile gerçekleştirmiştir. Bono [20] ise literatürde sıkça kullanılan, plastik bölge formüllerindeki bilinmeyen katsayıların tahmini yöntemini, birden fazla optimizasyonun ağırlıklı ortalamalarını alan bir algoritma kullanmıştır. Genel olarak tersine sonlu elemanlar yöntemi; sonlu elemanlar modelinde, malzemenin mekanik özelliklerinin sistematik olarak deneme yanılma yöntemi ile değiştirilerek, gerçek nano-indentasyon eğrileri arasındaki farkı minimuma indirmektir. Bir başka ifade ile, gerçeğe daha yakın mekanik özellikler ile analizin gerçekleştirilmesi durumunda, gerçek ve analiz nano-indentasyon eğrileri arasındaki farkın azalacağı prensibine dayanmaktadır. Böylece deneme yanılma yapılarak malzemenin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri elde edilebilmektedir. Bu yöntem için 2 boyutlu (2B) veya 3 boyutlu (3B) modeller kullanılabilir. Nano-indentasyon deneylerinde genel olarak Berkovich batıcı ucun kullanılması sebebiyle 3B modelde, batıcı ucun gerçek geometrisi modellenebilir. Fakat deneme yanılma yöntemi kullanılması sebebiyle çok fazla analiz yapılması gerekeceğinden, işlem süresinin azaltılması adına eksel

simetrik model oluşturulması yaygın olarak kullanılmaktadır [18, 20]. Eksenel simetrik yöntemde gerçek Berkovich ucun modellenmesi mümkün olmadığından bu modelde konik batıcı uç kullanılmaktadır. Berkovich uç ile aynı batma oranı için aynı yüzey alanına sahip olması gerektiğinden batıcı ucun koniklik açısı 70,3 olarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir [20].

Bu çalışmada tersine sonlu elemanlar analizinin yapılabilmesi için nikel kaplanmış mikro kafes yapılar üzerinde nano-indentasyon testleri uygulanmıştır. Nano-indentasyon testinde batıcı uç numune yüzeyine belirli bir kuvvet uygulamaktadır. Uygulanan kuvvet ve batma derinliği değerleri bilgisayar tarafından sürekli kaydedilerek bir kuvvet-yer değiştirme eğrisine dönüştürülmektedir. Bu çalışmada batıcı uç olarak Berkovich batıcı ucu kullanılmıştır. Numuneler bakalit içerisine alındıktan sonra yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 3b'de gerçekleştirilen nano-indentasyon testleri sonucunda hem kaplama hem de mikro teldeki batıcı uç izleri görülmektedir. Görüldüğü gibi nano-indentasyon testleri kesite dik olarak uygulanmıştır. Mikro teller için nano-indentasyon testleri telin ortasında 4x4 matris şeklinde gerçekleştirilirken, kaplama için kaplama kalınlığının mümkün olduğunca ortası seçilmiştir. Görüldüğü üzere kaplamadaki batıcı uç izi, mikro teldeki batıcı uç izinden çok daha küçüktür. Bu durum kaplamanın sertliğinin çok daha yüksek olduğunu göstermektedir. Nano-indentasyon deneylerinde batma derinliğinin düşük tutulması, malzeme içerisindeki fazların mekanik özelliklerinin etkisinin ortaya çıkmasına ve batıcı uç geometrisinde meydana gelmiş olabilecek aşınmanın etkisinden dolayı sonuçların geniş bir aralıkta elde edilmesine sebep olabilir. Bu sebeple nano-indentasyon testleri için uygulanan yük değeri 300 mN olarak seçilmiştir. Standart bir yöntem olarak maksimum yüke ulaşma değeri 30 saniye olarak alınmıştır.

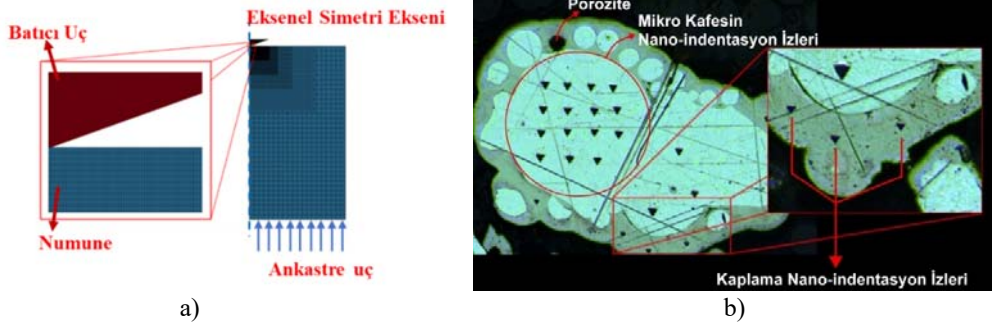
Şekil 3a'da hazırlanan eksenel simetrik nano-indentasyon modeli görülmektedir. Bu model 2D eksenel simetrik olarak, Berkovich eşdeğeri konik bir uç (70,3° yarım açısı) ile LS-DYNA sonlu elemanlar paket programı ile modellenmiştir. Modelin sol tarafındaki düğüm notalarına eksenel simetrik sınır şartları uygulandı ve alt düğüm noktaları ise serbestlik derecesi bazında sabitlendi. Hem batıcı ucun hem de

numunenin modellenmesinde dört düğüm noktalı eksenel simetrik elemanlar kullanılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi ağ yapısı indentasyon bölgesine doğru kademeli şekilde küçültülmüştür. Yapılan çalışmalarda, batıcı ucun temas noktasındaki eleman boyutunun, maksimum batma derinliğine oranının 1/10 ile 1/20 arasında olmasının yeterli olduğu bildirilmiştir [20, 21]. Literatürde kabul edilen bu değerler alınarak ağ yapısı oluşturulduğundan, nano-indentasyon modeli için ağ yapısı optimizasyonu yapılmamıştır. Fakat modelin doğruluğundan emin olmak için eleman sayısı iki katına çıkarılarak sonuçlar karşılaştırılmış ve farkın ihmal edilebilir bir değerde olduğu görülmüştür. Batıcı uç, sahip olduğu yüksek elastisite modülü ve sertlik sebebiyle rijit olarak kabul edilebilir. Literatürde, batıcı ucun rijit olarak modellenmesi durumunda, sonuçların ihmal edilebilir değerlerde etkilendiği ve analiz süresinin kısaltılmasının mümkün olduğu görülmüştür [20]. Numune için parçalı lineer elastik-plastik malzeme modeli olan MAT24\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY kullanılmıştır. 2D modelin oluşturulmasında, batıcı ucun modellenmesinin yanı sıra, sınır şartlarının indentasyonu etkilememesi için modelin belirli yüksekliğe ve yarıçapa sahip olması gerekmektedir. Bu değerler Poon vd. [22]'den referans alınarak modellenme yapılmıştır (numune yarı çapı/numune yüksekliği oranı 0,6 ve numune yüksekliği/maksimum batma derinliği oranı ise 36 alınmıştır). Ayrıca batıcı ucun geometrisinin teorikte olduğu gibi tamamen sivri olması mümkün değildir [22]. Bu sebeple batıcı uca yuvarlatma yapılması gerekebilir. Fakat bu etki, batma derinliğinin artması ile önemini yitirmektedir.

Tersine sonlu elemanlar metodunda, nano veya mikro indentasyon deneylerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerini kullanılmaktadır. Standart olarak nano-indentasyon deneylerinden malzemenin sertlik ve elastisite modülü kolayca hesaplanmaktadır. Elastisite modülü nano-indentasyon boşaltma eğrisinin eğiminden ( $E_r$ ) yararlanılarak Eş. 1'den hesaplanmaktadır [13].

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \quad (1)$$

Eş. 3'teki  $\nu_i$  ve  $E_i$ , batıcı uç için Poisson oranı ve elastisite modülü verirken (standart Berkovich elmas uç için  $\nu_i = 0,07$ ;



Şekil 3. Nano-indentasyon testleri a) analizleri için kullanılan eksenel simetrik model ve b) deneysel nano-indentasyon testinin kaplama ve mikro tel üzerindeki izleri.

(a) Axisymmetric model for Nano-indentation analysis and b) Marks of the experimental Nano-indentation test on both coating and micro-strut)

$E_T=1140$  GPa),  $\nu_s$  ve  $E_s$  numunenin Poisson oranı ve elastisite modülünü vermektedir. Bu değerler ile elastik bölgenin modellenmesi yeterli olmaktadır.

Literatürde, Hollomon malzeme modelleri için bilinmeyen parametreler olan akma dayanımı  $\sigma_y$  ve sertleşme üssü  $m$  için bir aralık tahmini yapıp, bu tahmin aralığı belirli sayıda bölünmektedir [20, 23]. Bu bölüm sonrasında elde edilen  $\sigma_y$  ve  $m$  değerlerinin kombinasyonları için tek tek sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçları gerçek nano-indentasyonun kuvvet-yer değişimi eğrileri ile karşılaştırılır. Deneysel ve analiz eğrileri arasındaki minimum hatayı veren  $\sigma_y$  ve  $m$  değerleri, malzemenin mekanik davranışını vermektedir. Bu yöntem basit ve etkilidir. Fakat aralık tahmininin boyutu ve bölme sayısına göre sonuçlar ciddi farklılıklar gösterebilmektedir. Bölme sayısının artması daha yakın sonuç verse de analiz süresini ciddi miktarda arttırmaktadır. Ayrıca tahmin aralığını küçük tutmak, istenilen sonuçların elde edilmesine mâni olabilir. Bu çalışma kapsamında denklemlere bağlı kalınmadan gerilme-birim şekil değişimi denklemlerinin elde edilmesini sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem Şekil 4'te görülen algoritmayı izleyerek çalışan bir python kodu ile gerçekleştirilmektedir.

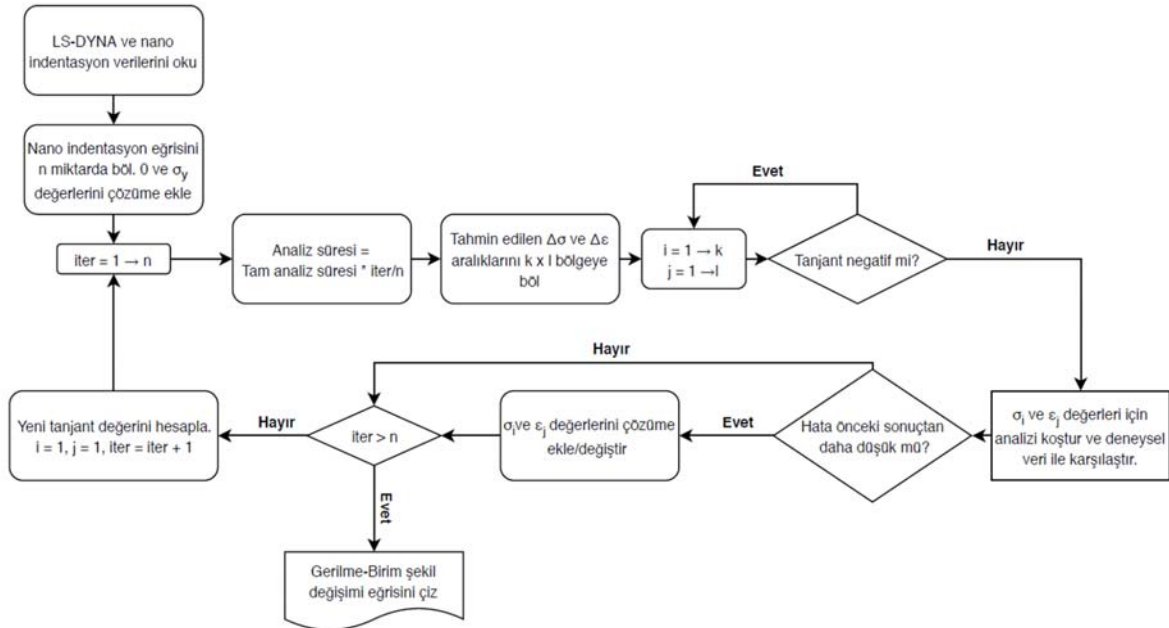
MAT24\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY kartı içerisine gerçek gerilme-gerçek plastik birim şekil değişimi bir eğri olarak girilebilmektedir. Eğri üzerindeki bir sonraki noktanın bulunabilmesi için, tahmini olarak verilen  $\Delta\sigma$  ve  $\Delta\varepsilon$  aralığı belirli sayıya bölünerek,  $\sigma$  ve  $\varepsilon$  değerlerinin kombinasyonları için analizler gerçekleştirilmektedir. Sonlu elemanlar analizinin sonucu nano-indentasyon eğrileri ile karşılaştırılmakta ve değerlerin yakalanması durumunda, en yakın sonucu veren  $\sigma$  ve  $\varepsilon$  değerleri kart içerisine

eklenmektedir. Önceden bulunan değerleri kullanarak yeni aralık tahmini ve analiz koşturma işlemleri yapılmaktadır. Böylelikle malzemenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi adım adım çizilmektedir. Buna ek olarak yapılan tahmindeki  $\Delta\sigma$  ve  $\Delta\varepsilon$  aralığında, son iki noktadan hesaplanan tanjant değerinin üstünden kalan noktaların atlanması da toplam analiz süresini kısaltmaktadır. Bu yöntemin en büyük eksiği akma gerilmesinin yani başlangıç gerilmesinin tahmin edilememesidir. Bu çalışmada akma gerilmesini tahmin etmek için LS-OPT optimizasyon programı kullanılmıştır.

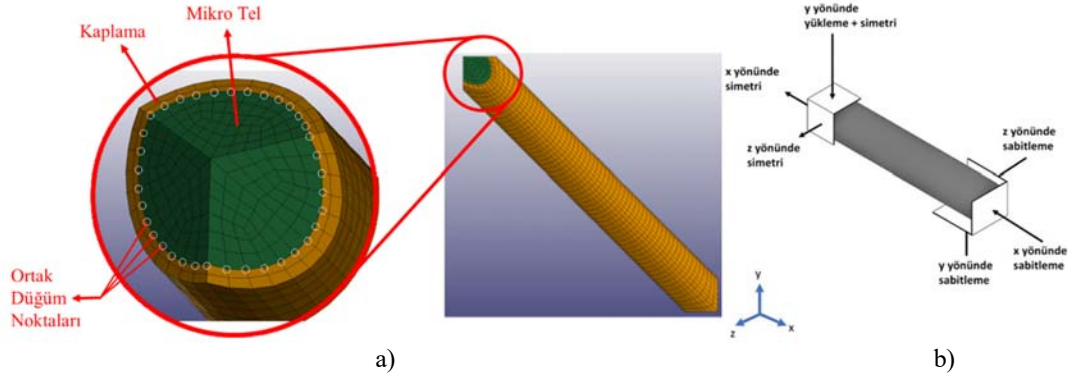
#### 2.4. Sonlu Elemanlar Basma Modelleri (Finite Element Compression Models)

Nikel kaplanmış mikro kafeslerde kaplamanın mekanik özelliklerini daha iyi anlamak amacıyla sonlu elemanlar modelleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada üç boyutlu model oluşturulmuştur. Hesaplama süresini kısaltmak amacıyla tek bir mikro tel modellenmiştir ve her telin benzer şekillerde deforme olduğu var sayılmıştır [24]. SLM üretim prosesi sırasında ortaya çıkan yüzeydeki deliklerin ve yapışan tozların etkileri (Şekil 1) ihmal edildi ve kusursuz mikro tel yaklaşımı uygulandı. Mikro tellerin ve kaplamanın ağ yapısında heksahedral (hexahedral) elemanlar kullanıldı. Düzgün bir ağ oluşturmak amacıyla HyperMesh programında "mesh morphing" seçeneği kullanılmıştır. Elde edilen model ve ağ yapısı Şekil 5'te görülmektedir.

Nikel kaplama kalınlığı  $17 \mu\text{m}$  olarak alınmış ve aynı yöntem kullanılarak modellenmiştir. Mikro telin üzerinde 9396 adet heksahedral katı eleman bulunmaktadır ve kaplamanın elemanlarıyla toplam eleman sayısı 13572 değerine ulaşmıştır. Elemanların karakteristik uzunluğu  $8 \mu\text{m}$  civarındadır. Ağ optimizasyonu yapılarak bu eleman



Şekil 4. Python kodu ile kontrol edilen tersine sonlu elemanlar analizinin akış şeması  
(Flow chart for python code controlled reverse Nano-indentation analysis)



**Şekil 5.** Kaplamalı mikro tellerin sonlu elemanlar modeli a) model ve ağ yapısı ve b) sınır şartlarının şematik görüntüsü (Finite element model for the coated struts a) model and mesh structure and b) schematic display of boundary conditions)

sayısının ve boyutunun ideal olduğu görülmüştür. Kaplama ve mikro tel ara yüzlerindeki düğüm noktaları ortak olarak modelleme yapılmıştır. Her bir tel simetri yüzeylerine sahip olduğundan simetri sınır şartları uygulandı. Uygulanan sınır şartları Şekil 5b’de şematik olarak gösterilmiştir. 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 normalinde birbirlerine bağlandı (constrained). Mikro telin mekanik özellikleri, Gümrük ve Mines [5] tarafından elde edilen çekme testleri değerleri kullanılmıştır. Buna göre mikro tel için akma gerilmesi 285 MPa ve elastisite modülü 97 GPa olarak tanımlanmıştır. Kaplamanın mekanik özellikleri ise tersine sonlu elemanlar analizi yardımıyla belirlenen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi vasıtasıyla 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.

### 3. SONUÇLAR VE TARIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Tersine Sonlu Elemanlar Optimizasyon Sonuçları (Results of Reverse Finite Element Optimizations)

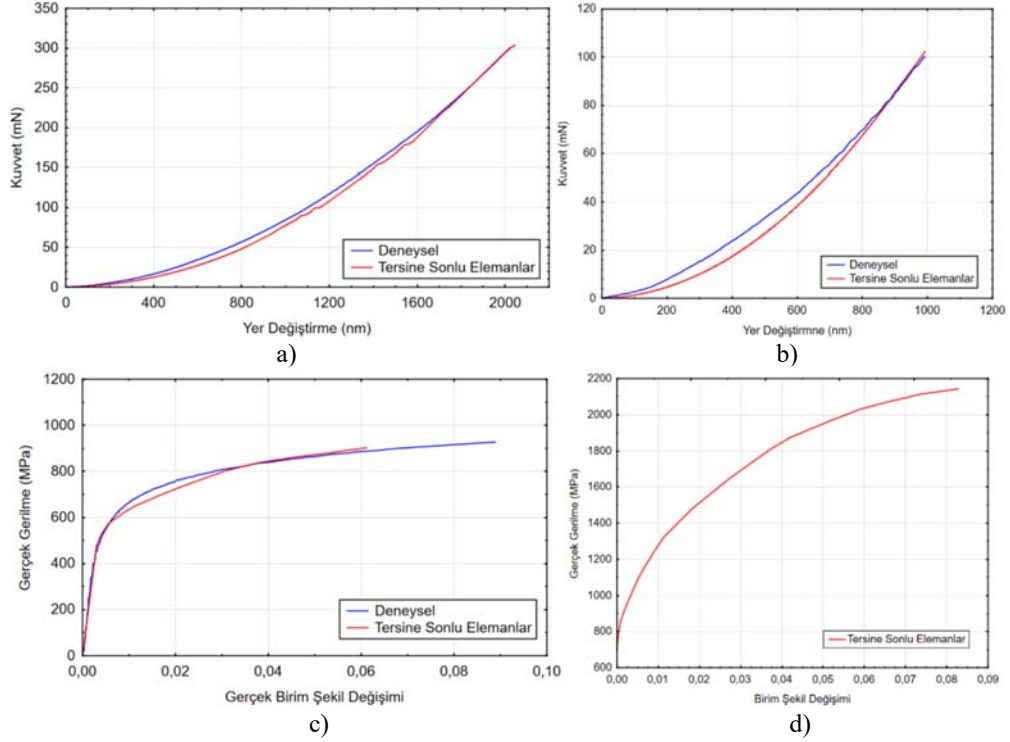
Oluşturulan modelin doğruluğunu göstermek için, hazırlanmış kod öncelikle mekanik özellikleri bilinen DP800 çift fazlı çelik için koşturulmuştur. DP800’ün gerilme birim şekil değişimi değerleri standart tek eksenli çekme cihazlarından elde edilmiştir. Şekil 6a ve Şekil 6c DP800 çeliğinin nano-indentasyon testlerinin ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin deneysel ve sayısal karşılaştırmalarını vermektedir. Şekilden görülebileceği üzere DP800 çeliği için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi gerçeğe oldukça yakın elde edilmiştir. Bu sonuçlar geliştirilen modelin doğru çalıştığını göstermektedir. Bunun sonucunda aynı model nikel kaplamaya uygulandı. Nano-indentasyon ve gerçek gerilme-plastik birim şekil değiştirme eğrilerinin deneysel ve sayısal sonuçlarının karşılaştırmaları Şekil 6b ve Şekil 6d’de verilmektedir. Nikel kaplama için sayısal ve deneysel nano-indentasyon eğrileri nispeten birbirine yakın elde edilmiştir

(Şekil 6b). Bunun sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine bakılacak olursa kaplama için akmanın 750 MPa değerlerinde başladığı sonucu elde edilmiştir. Kaplama için Şekil 6d’den görüldüğü gibi oldukça yüksek malzeme pekleşmesi özelliği bulunduğu belirlenmiştir. Yani %8 birim şekil değiştirme değerinde yaklaşık 2100 MPa gerilme değeri ortaya çıkmaktadır. Eş. 3 yardımıyla kaplama için elastisite modülü 101 GPa olarak elde edilmiştir. Böylece kaplama malzemesinin mekanik özellikleri elde edilmiştir.

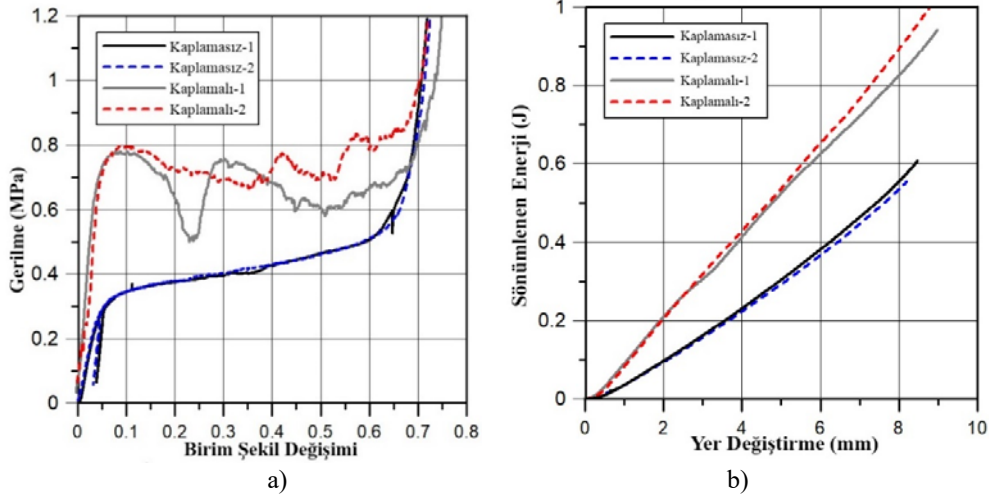
#### 3.2. Kafeslerin Basma Testi Sonuçları (Block Compression Test Results)

Kaplamasız ve kaplamalı kafes yapılar için basma birim şekil değişimine göre basma gerilmesi değişimi Şekil 7’de verilmiştir. Testlerin tekrarlanabilirliğini göstermek için her bir numuneden iki adet hazırlanmıştır. Şekilden görüldüğü gibi kaplanmış ve kaplanmamış kafes blokların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin karakteristiğinde ciddi farklar meydana gelmektedir. Kaplanmamış kafes yapılar belli bir yüke kadar elastik yüklendikten sonra yaklaşık 0,36 MPa değerinde başlangıç çökme gerilmesi ile plastik çökmeye başlamaktadırlar. Deformasyon devam ettikçe gerilme değerleri lineer bir artış göstermekte ve en son aşamada sıkışma (compaction) davranışı sergilemektedir. Bu klasik gerilme-birim şekil değiştirme davranışı, kafesi oluşturan mikro tellerin plastik eğilme deformasyonuna maruz kaldığını göstermektedir. Buna karşın kaplanmış kafes yapılarda mukavemet değeri başlangıçla yaklaşık 0,80 MPa bir gerilme değerine kadar hızla artmaktadır ve ardından kısmen düşüşler ve tekrar artışlar göstermektedir. Dikkat çeken bir nokta plato bölgesinde gerilme değerlerinin sabit olmamasıdır. Bu durum Nikel kaplamanın gevrek yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 1d’de görüldüğü üzere mikro telin üzerinde bulunan yoğun kusurlar (erimiş veya yarı erimiş mikro tozlar vb.) kaplama ile mikro tel arasında geometrik bir bağ oluşturmaktadır. Buradan kolayca anlaşılacağı üzere kaplama ve mikro tel ara yüzünde herhangi bir ayrılmanın (debonding) meydana gelmesi pek mümkün değildir. Ayrıca Şekil 7a’dan görüldüğü üzere kaplanmış malzemelerin elastisite modülleri kaplanmamış malzemelere göre ciddi artmaktadır. Şekil 7b kaplanmış ve kaplanmamış mikro kafes yapıların sönümlendiği enerjiyi





**Şekil 6.** a) DP800 b) Nikel kaplama için deneysel nano-indentasyon kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin sonlu elemanlar ile karşılaştırılması ve c) DP800 d) Nikel kaplama için tersine sonlu elemanlar sonucu  
(For a) DP800 b) Nickel coatings a comparison between finite element and experimental Nano-indentation force displacement curves and coatings results from the reverse analysis method for c) DP800, d) Nickel)



**Şekil 7.** Akımsız Nikel kaplanmış ve kaplanmamış BCC mikro kafes yapıların ( $12,5 \times 12,5 \times 12,5 \text{ mm}^3$ ) basma test sonuçları  
a) gerilme-birim şekil değişimi eğrileri [24] b) mikro kafes yapıların sönümlediği enerjinin deformasyon miktarına göre değişimi (Compression test results of electroless nickel coated and uncoated BCC micro lattice structures ( $12,5 \times 12,5 \times 12,5 \text{ mm}^3$ ) a) stress-strain curves b) change of energy absorption by micro lattice structures with respect to deformation)

göstermektedir. Görüldüğü üzere kaplanmış kafes yapılar kaplanmamış yapılara göre daha fazla enerji sönümlenmektedir. Örneğin 8 mm deformasyon mesafesinde kaplanmış yapılar kaplanmamış yapılara göre %50'den daha fazla enerji sönümlenmektedir. Tablo 2, yapılan testler sonucunda ölçülen ve hesaplanan değerlerin bir özetini vermektedir. Kaplama durumunda kafesin spesifik elastisite

modülünde %50 değerinde artış ve spesifik mukavemetinde %75 değerinde artış gözlemlenmiştir. Buna karşın kaplanmış blokların kütledeki artış miktarı eşdeğer kaplanmamış durumuna göre ise %25'tir. Sonuçlar göstermektedir ki; Nikel kaplama uygulamasının seçici lazer ertirme yöntemi ile üretilmiş mikro kafeslerin spesifik mukavemetlerini ciddi şekilde iyileştirmesi mümkündür. Numunelerde sabit tutulan

fosfor oranı sabit tutulup farklı bileşen oranlarında kaplama çalışmalarıyla optimum bileşen oranı belirlenmesine yönelik kapsamlı bir deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca kaplama sonrası yapılabilecek işlemlerle (ısıtılma işlemi vb.) kaplanmış mikro kafes yapılarının mekanik özelliklerinin daha da iyileştirilmesi mümkün olabileceği öngörülmektedir.

### 3.3. Parametrik Çalışmalar (Parametric Studies)

Bu bölümde kaplama kalınlığı, hücre boyutu ve ara yüz etkilerini anlamak için bir dizi parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarla ilgili sonuçlar ve değerlendirmeler ayrı ayrı başlıklar altında sunulmuştur. Kaplanmış ve kaplanmamış mikro teller için üç boyutlu statik basma analizleri LS-DYNA'da yapılmıştır. Şekil 8'de basma testlerinin deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırılmasını göstermektedir.

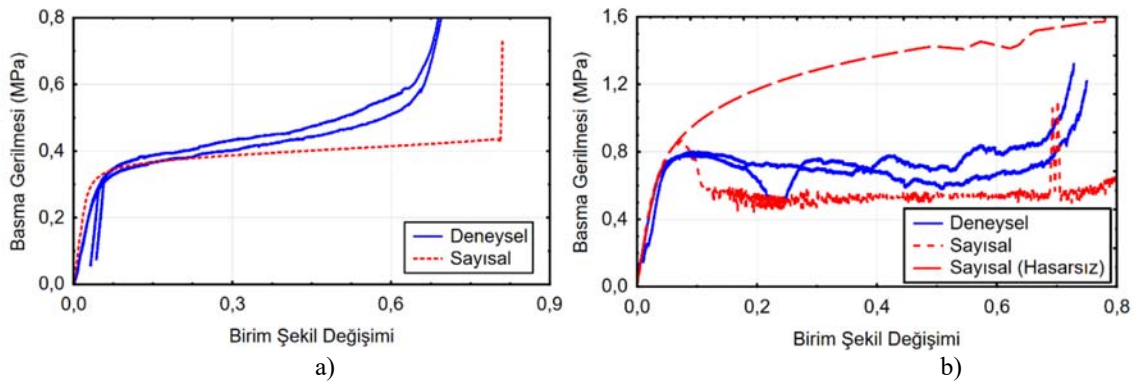
Şekil 8a'da görüldüğü üzere kaplamasız mikro tel için deneysel ve sayısal basma eğrileri, yüksek birim şekil değişimlerinden sonraki kısımlar hariç oldukça benzer elde edilmiştir. Şekil 8b'den görüldüğü gibi kaplamalı kafes yapıları için sayısal mukavemet değerlerinde deneysel sonuçlara göre başlangıç çökme gerilmesi değerinden sonra sürekli olarak bir artış meydana gelmektedir. Bu durumun kaplamanın gevrek karakteristiğinden kaynaklandığı kolayca anlaşılmaktadır. Mikro teller deformasyona uğrarken nikel kaplama en büyük eğilme gerilmesine maruz

kalmaktadır ve bunun sonucunda kolayca lokal olarak hasara uğramaktadır. Bu durum deneysel basma eğrilerinden Bölüm 3'te bahsedildiği gibi kolayca anlaşılmaktadır. Kaplama kırılma gerilmesi sebebiyle, başlangıç çökme gerilmesi değerlerinden sonra kaplamalı mikro kafeslerin gerilmelerinde düşüşler ve salınımlar görülmektedir. Kaplamanın kırılma gerilmesini modellemek için kaplamaya basit bir yaklaşımla hasar (failüre) tanımlandı. Bu hasar tanımı, birim şekil değiştirme değeri 0,01 değerine ulaştığında ilgili elemanın analizden silinmesi esasına dayanmaktadır. Başka bir ifadeyle, sonlu elemanlar analizinde kullanılan elemanlar, tanımlanan birim şekil değişimine maruz kaldıklarında program tarafından silinmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, hasar verilen modelde, başlangıç çökme gerilmesi deneysel gerilmelere oldukça yaklaşımıştır ve sonrasında bir miktar düşüş yaptıktan sonra neredeyse sabit bir gerilme değeri etrafında salınım yaparak çökmeye devam etmektedir. Deneysel ve sayısal analizler arasında meydana gelen fark mikro tel yüzeylerinin oldukça kompleks (Şekil 1) olmasından, hasar mekanizmasının tam olarak modellenememesinden, ara yüz yapışma etkilerinin modellenememesinden, yüzeye yapışan tozların ve iç yapıdaki kusurların etkilerinin ihmal edilmesinden kaynaklandığı kolayca anlaşılabilir. Yine de elde edilen modelin kaplamanın hasar modelinin karmaşası ve mikro kafes yapılarının içerdiği ağır mikro kusurlar (düzgün olmayan tel çapı, mikro çatlaklar vb.) düşünüldüğünde kabul edilebilir olduğuna karar verilmiştir. Şekil 9'da bir birim hücrenin modeli, uygulanan sınır şartları ve %50 deformasyon

**Tablo 2.** BCC numunelerinin özellikleri ve deneysel test sonuçları (BCC Sample specifications and experimental results) [24].

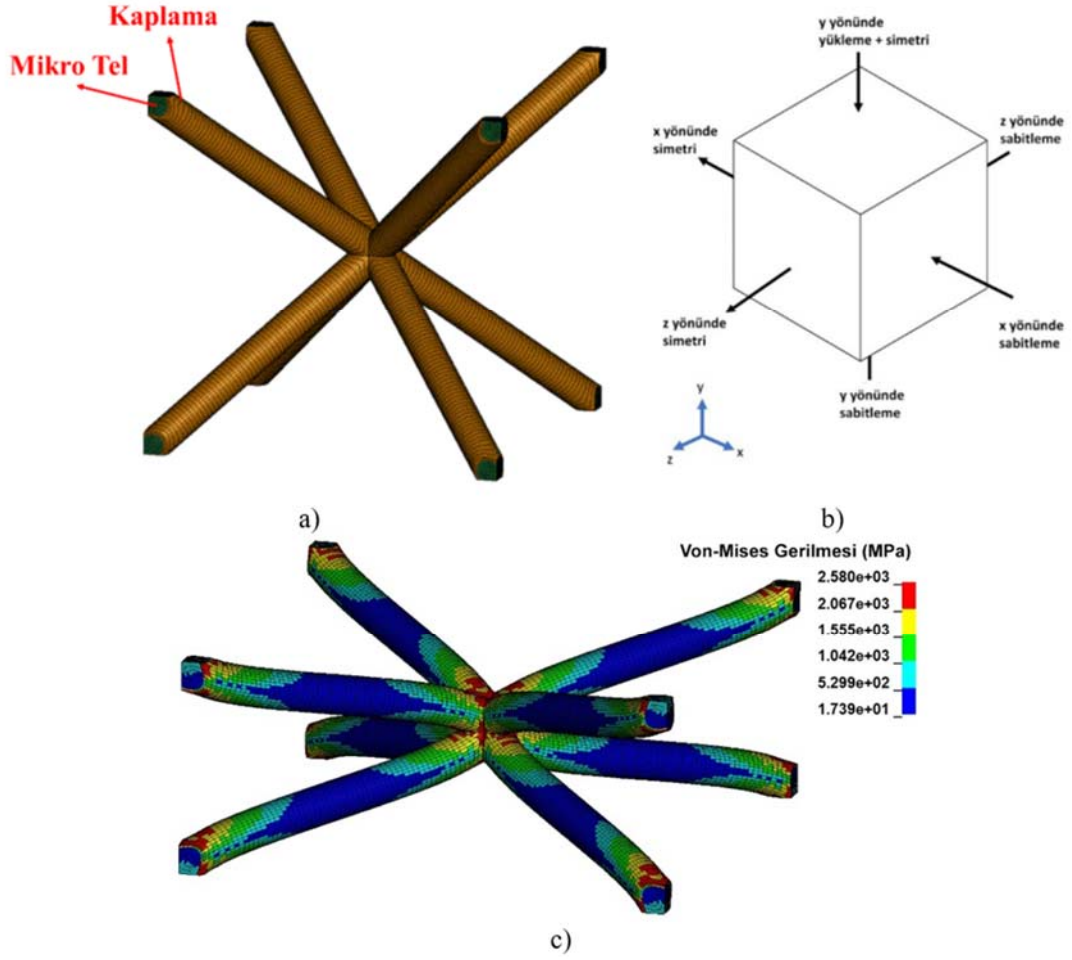
Numune	Ağırlık (g)	Hücre Boyutu (mm)	Başlangıç plastik çökme gerilmesi (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Spesifik yoğunluk	Spesifik başlangıç çökme gerilmesi (MPa)	Spesifik elastisite modülü (MPa)
Kaplamasız-1	0,55	12,5	0,36	7,94	0,0352	10,22	225,57
Kaplamasız-2	0,56	12,5	0,36	7,37	0,0358	10,05	205,86
Kaplamalı-1	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.



**Şekil 8.** Kaplanmış ve kaplanmamış mikro kafes teller için gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin karşılaştırılması; a) kaplanmamış, b) kaplanmış

(Comparison of block stress strain between experiment and finite element analysis for coated strut; a) uncoated, b) coated)



**Şekil 9.** BCC geometrisine sahip kaplamalı bir birim hücrenin a) model ve ağ yapısı b) sınır şartları ve c) deformasyon davranışı (Finite element model of a coated cell with BCC geometry a) model and mesh b) boundary conditions and c) deformation behavior)

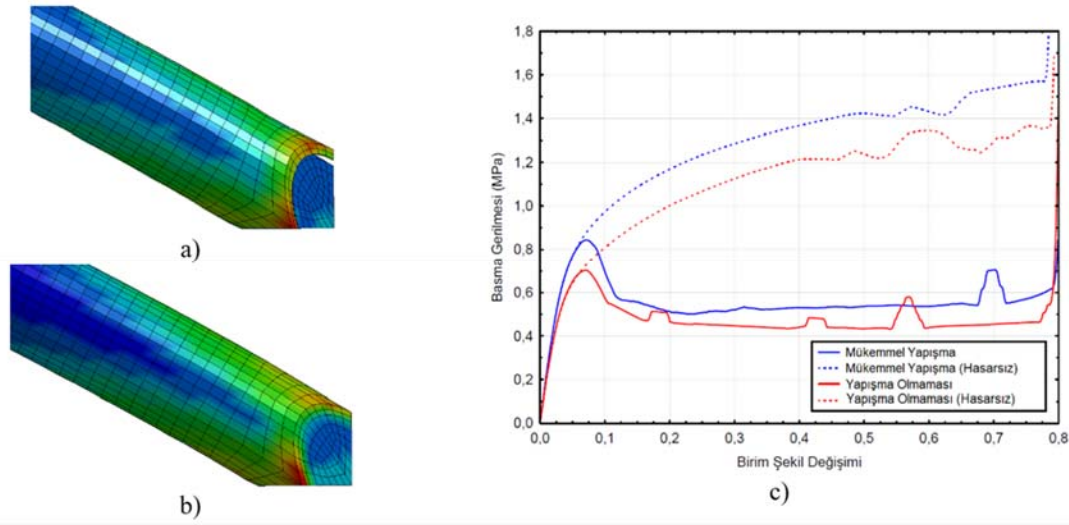
sonucunda elde edilen Von-Mises gerilme dağılımı verilmektedir. Şekil 9b'den de görüldüğü üzere modelin üç normaline sabitlendi ve diğer üç normaline simetri sınır şartı uygulandı. Şekil 9c'de hücre için von-Mises gerilme dağılımı ve deformasyon davranışı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere maksimum gerilme mikro tellerin kesişim noktalarına yakın bölgelerde gelmektedir. Bunun sebebi momentin bu noktalarda maksimum değere ulaşmasıdır. Ayrıca bu tip bir davranış mikro tellerin eğilme dominant bir davranışa maruz kaldığını göstermektedir [3, 4].

### 3.3.1. Kaplama-mikro tel ara yüz etkileri (The influence of coating-strut interface)

Nikel kaplama ile mikro tellerin arasında ara yüz yapışma etkisini incelemek için iki sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. İlk analizde kaplama ve mikro teller arasında herhangi bir yapışma olmaması durumu için simülasyon yapılmıştır. Bunun için sonlu elemanlar modelinde kaplama ve mikro teller arasında sadece sürtünmesiz temas algoritması (sliding contact algorithm) tanımlanmıştır. İkinci durumda ise mükemmel yapışma durumu Bölüm 4.2'de bahsedildiği

şekilde analiz edilmiştir. Bunun için ağ yapısı oluşturulurken kaplama ve mikro tellerin yüzeylerindeki düğüm noktalarının aynı noktada ortak olacak şekilde modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Böylece ara yüzde aynı düğüm noktalarını kullandıkları için doğal olarak herhangi bir ayrışma veya birbirine göre izafi hareket söz konusu olamamaktadır.

Şekil 10'da kaplama-mikro tel ara yüzü için mükemmel yapışma ve yapışma olmaması durumları için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca şekil hasarsız modellerin sonuçlarını da içermektedir. Görülebileceği üzere, kafesin gerilme-birim şekil değişimi davranışı ara yüz yapışmasından ciddi şekilde etkilenmektedir. Ara yüzde mükemmel yapışma olması durumu, başlangıç çökme gerilmesi ara yüzde yapışma olmaması durumuna göre %27 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu artış miktarı yaklaşık olarak tüm gerilme eğrisi boyunca devam etmektedir. Ayrıca bir başka sonuç ise hasarsız olarak modellenmesi durumunda ara yüz yapışmasının, ara yüzde herhangi bir yapışma olmaması durumuna göre mukavemet değerlerinde ciddi farklar görülmektedir. Sonuçlar; kaplama ile mikro teller arasında iyi bir yapışma kalitesinin gerilme-birim şekil



**Şekil 10.** Kaplama ve mikro tellerde ara yüz etkilerinin sonlu elemanlar ile karşılaştırılması a) kaplama ile mikro tel yüzeyinde yapışma olmaması durumu için deformasyon davranışı b) kaplama ile mikro tel arasında mükemmel yapışma olması durumu için deformasyon davranışı ve c) iki durum için gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of interface effects between the coating and micro struts with finite elements a) deformation behavior in the absence of adhesion on the surface of micro strut and coating b) in case of excellent adhesion between coating and micro strut and c) stress-strain curves for both cases)

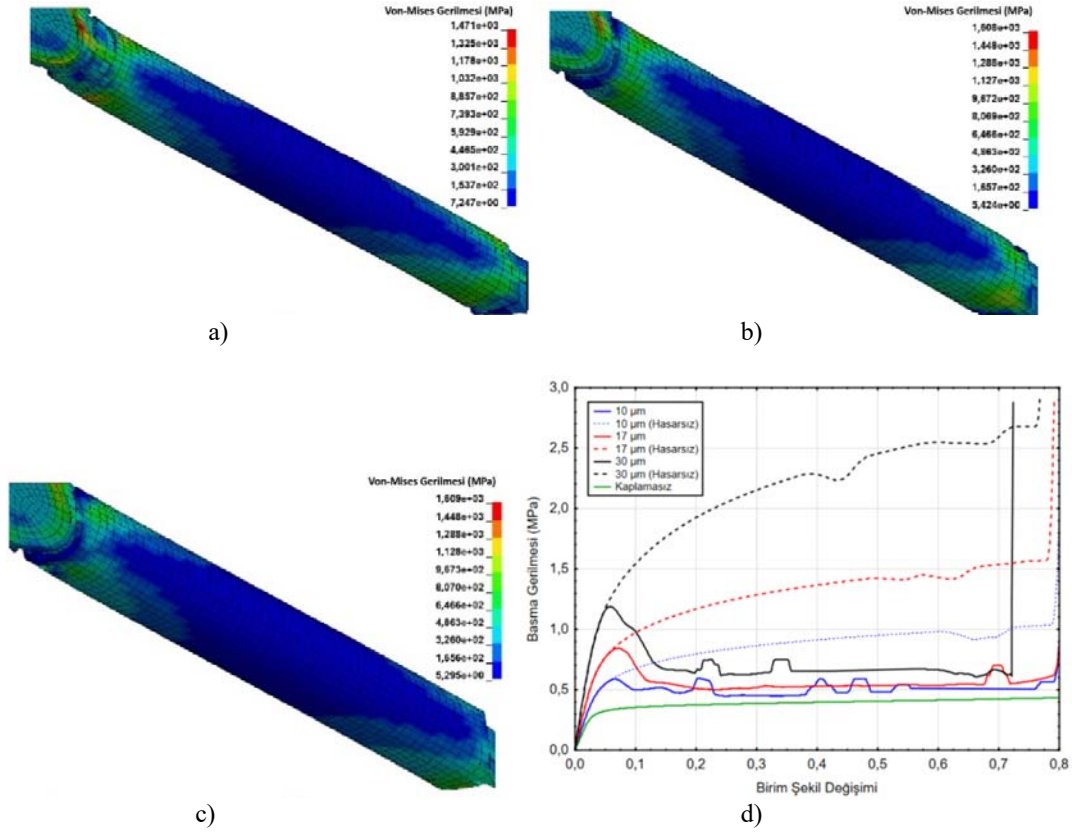
değiştirme eğrisi ve bunun paralelinde kaplamalı mikro kafes yapıların enerji sönmeme karakteristiği üzerinde ciddi bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Nikel kaplamalı kafeslerde ara yüzde mükemmel yapışma olmaması durumunda gerilme davranışlarında ciddi düşüşler elde edilmiştir. Bu düşüşün sebebini anlamak için Şekil 10'da nikel kaplamalı mikro tellerin 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 ayrılma göstermektedir (Şekil 10a). Mükemmel yapışma durumunda ise kaplama ve mikro tel arasında gerilme geçişleri düzgün olmakta ve yükü paylaşmaktadırlar (Şekil 10b). Meydana gelen ayrışmanın Nikel kaplamalı tellerin yük taşıma kapasitesini düşürdüğü kolayca anlaşılmaktadır.

### 3.3.2. Kaplama kalınlığının etkisi (Influence of the coating thickness)

Kaplama kalınlığının 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 11d'de gösterilmiştir. Şekil karşılaştırma amaçlı kaplamasız mikro telin sayısal eğrisi yanında hasar olmaması durumlarında elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini de içermektedir. Şekilden görüldüğü üzere hasar içeren modellerde kaplama kalınlığının artması ile kaplamasız duruma göre gerilme değerlerinde belirli miktarlarda 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 açık 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 gösterebilmektedir. Bu durum kaplama kalınlığının kaplanmış mikro telin basma davranışına etkisinin yanında kaplama malzemesinin hasar özelliğinin de çok önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Kolayca anlaşılacağı üzere kaplamanın mukavemetinin ve sünekliliğinin de oldukça yüksek olması kaplamalı mikro kafes yapılar için yüksek performans anlamına gelmektedir.

Şekil 11'den 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 sıkışma (densification) birim şekil değişim değeri, kaplamanın kalınlığına göre hafif bir azalma sergilemektedirler. Farklı kaplama kalınlıklarına sahip mikro yapıların  $\varepsilon=0,3$  deformasyonu durumunda, von-



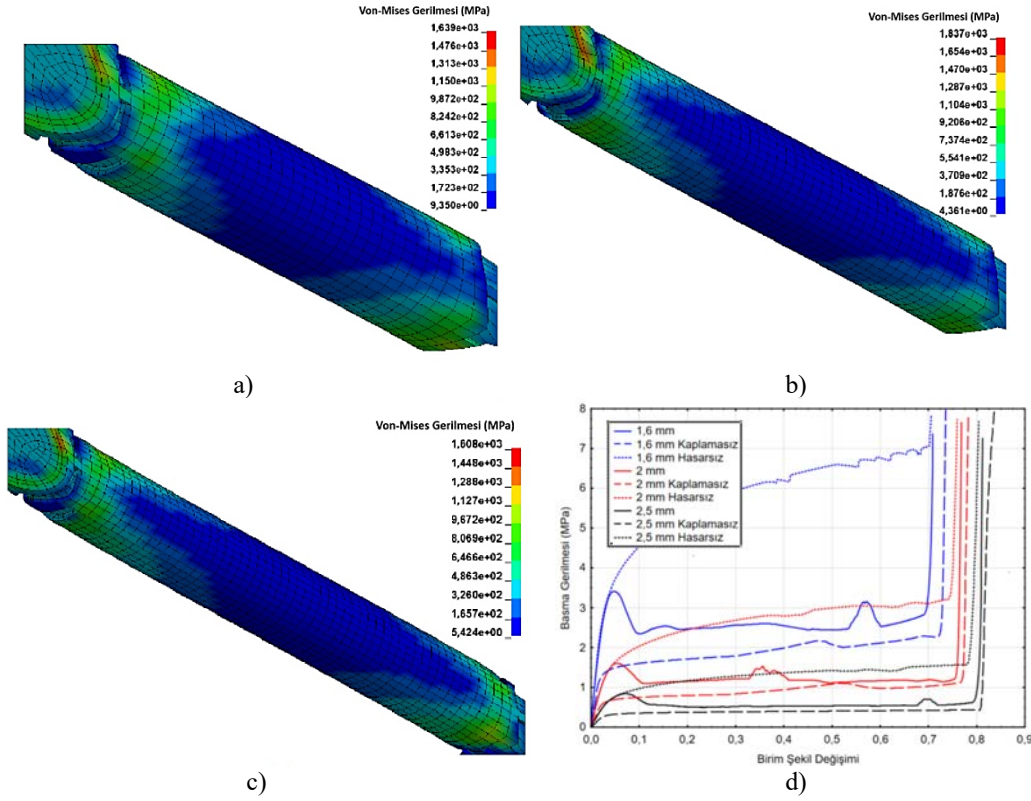
**Şekil 11.** Çeşitli kaplama kalınlığına sahip mikro tellerin sonlu elamanlar analiz sonuçları a) 10 b) 17 ve c) 30  $\mu\text{m}$  için deformasyon davranışı ile von-Mises gerilme dağılımı ve d) kaplama kalınlığının gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri üzerine etkisi (Finite element analysis results of micro struts with various coating thickness; deformation behavior for a) 10 b) 17 and c) 30  $\mu\text{m}$  coating thickness and d) Effects of the coating thickness on the stress-strain curves)

Mises gerilme dağılımının benzer olduğu da gözlemlenmiştir (Şekil 11a, Şekil 11 b ve Şekil 11c). Yalnızca şekillerden 30  $\mu\text{m}$  kaplama kalınlığına sahip modelde hasara uğrayan elemanların diğerlerinde çok daha fazla olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, gerilme şiddetleri hariç mikro tellerin üzerindeki kaplamanın kalınlığının, gerilme dağılımı üzerine önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

### 3.3.3. Kaplama ve hücre boyutu ilişkisi (The relationship of the coating and cell size)

Önceki parametrik çalışmalar deneysel numunelere uygun olarak  $L=2,5$  mm hücre boyutu için gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde 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 üç farklı hücre boyutu için analizler gerçekleştirilmiştir. Hücre boyutunu değiştirmek için tellerin uzunlukları uygun şekilde skala edilmiştir. Bu değerler sırasıyla 1,6, 2 ve 2,5 olarak seçilmiştir. Şekil 12'de farklı hücre boyutları için elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

göstermektedir. Şekilde 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 [5] tarafından elde edilen sonuçla uyumludur. Kafes hücre boyutu düştükçe gerilmelerde ciddi artışlar söz konusudur. Bu çalışmada bu artışa kaplamanın etkisini anlamak için izafi değerler kullanılmaktadır. Yapılan sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçların bir özeti, hasar içermeyen modeller dikkate alınmaksızın Tablo 3'te verilmektedir. Tablo 3'e bakıldığında kaplamalı duruma göre kaplamasız duruma göre izafi elastisite modülü değerlerindeki artış 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 duruma göre 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 hücre boyutu küçüldükçe kaplama malzemesi daha yüksek eğilme gerilmelerine maruz kalması ve bunun sonucunda



**Şekil 12.** Farklı hücre boyutlarına sahip mikro tellerin analiz sonuçları a) 1,6 mm b) 2 mm ve c) 2,5 mm için deformasyon davranışları ile Von-Mises gerilme dağılımları ve d) gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Analysis results of micro struts with different cell sizes deformation behavior and Von-Mises stress distributions for cell sizes a) 1.6 mm b) 2 mm c) 2.5 mm and d) stress-strain curves)

**Tablo 3.** Farklı hücre boyutuna sahip mikro tellerin analiz sonuçlarının bir özeti (A summary of the analysis results of micro struts with different cell sizes)

	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 ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	560,78	783,80	367,72	516,67	239,90	338,28
Spesifik Elastisite Modülü ( $\text{MPa/kg.m}^{-3}$ )	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 ( $\text{MPa/kg.m}^{-3}$ )	0,0210	0,0327	0,0241	0,0474	0,0326	0,0582
Spesifik Başlangıç Çökme Gerilmesindeki Artış (%)	55,64		96,68		78,60	

hasarın artmasıdır. 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 incelendiğinde hücre boyutu küçüldükçe hem elastisite hem de gerilme değerleri ciddi artışlar gösterdiği görülmüştür. 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 12'de farklı hücre boyutlarındaki mikro tellerin hem hasar durumunu hem de Von-Mises gerilme dağılımlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere 1,6 mm hücre boyutundaki mikro tek diğerlerinden çok 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.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 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 artırdığı görülmüştür.

Ayrıca çalışma kapsamında kaplamalı mikro kafes yapılar için sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Model için gerekli olan kaplama malzemesinin mekanik özelliklerini elde etmek için nano-indentasyon testleri kullanarak geliştirilen özgün tersine sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve bilinen malzemeler ile doğrulanmıştır. Böylece Nikel kaplama için akma gerilmesi 750 MPa ve elastisite modülü 101 GPa olarak elde edilmiştir.

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 çalışmalara göstermiştir ki; kaplama kalınlığı, hücre boyutu ve kaplama ara yüz etkileri kaplamalı mikro kafes yapıların mekanik özelliklerini ciddi şekilde etkilemektedir. Yine analizler göstermiştir ki; bu etkilerin şiddetleri kaplama malzemesinin hasar karakteristiğinden oldukça etkilenmektedir. Bu sebeple yüksek performans alabilmek için kaplamanın mekanik özellikleri yanında hasar şekil değişiminin de oldukça yüksek olması gerekmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmadaki yaklaşım üç boyutlu metal üretim teknolojilerinde mekanik özelliklerin belirlenmesi ve optimize edilmesi adına yeni bir araştırma konusu açmaktadır. Boşlukların azaltılması, kaplama ara yüzünün iyileştirilmesi, mikro kafes yapıların özelliklerinin iyileştirilmesi için uygulanan kaplama yönteminin iyileştirilmesine ışık tutulmuştur. Kaplama kalitesinin iyileştirilmesi, farklı kaplama malzemelerinin denenmesi ve bunların optimizasyonları üzerine çalışmaları yapılabilir. Bunun yanında kaplamanın mikro hücreli kafes bloklara, korozyon ve aşınma dayanımı veya iyileştirilmiş yapısal dayanım gibi çok amaçlı kullanım özelliklerinin de kazandırılabilceği belirtmek gerekmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Xiong J., Mines R., Ghosh R., Vaziri A., Ma L., Ohrndorf A., ... & Wu L., *Advanced micro-lattice materials*, *Adv. Eng. Mater.*, 17 (9), 1253-1264, 2015.
- Rashed M. G., Ashraf M., Mines R. A. W., Hazell P. J., *Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications*, *Materials & Design*, 95, 518-533, 2016.
- Ushijima K., Cantwell W. J., Mines R. A. W., Tsopanos S., Smith M., *An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures*, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 13 (3), 303-329, 2011.
- Gümrük R., & Mines R. A. W., *Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures*, *International Journal of Mechanical Sciences*, 68, 125-139, 2013.
- Gümrük R., Mines R. A. W., & Karadeniz S., *Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions*, *Mater. Sci. Eng. A*, 586, 392-406, 2013.
- Ozdemir Z., Hernandez-Nava E., Tyas A., Warren J. A., Fay S. D., Goodall R., ... Askes H., *Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments*, *International Journal of Impact Engineering*, 89, 49-61, 2016.
- Schaedler T. A., Jacobsen A. J., Torrents A., Sorensen A. E., Lian J., Greer J. R., ... Carter W. B., *Ultralight metallic microlattices*, *Science*, 334 (6058), 962-965, 2011.
- Schaedler T. A., Ro C. J., Sorensen A. E., Eckel Z., Yang S. S., Carter W. B., Jacobse A. J., *Designing metallic microlattices for energy absorber applications*, *Adv. Eng. Mater.*, 16 (3), 276-283, 2014.
- Bouwhuis B. A., Ronis T., McCrea J. L., Palumbo G., Hibbard G. D., *Structural nanocrystalline Ni coatings on periodic cellular steel*, *Composites Science and Technology*, 69 (3-4), 385-390, 2009.
- Sudagar J., Lian J., Sha W., *Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings—A critical review*, *J. Alloys Compd.*, 571, 183-204, 2013.
- Matik U., *Improvement of surface properties of iron based powder metal compacts by electroless NiB coating*, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1603-1610, 2018.
- Tsopanos S., Mines R. A. W., McKown S., Shen Y., Cantwell W. J., Brooks W., 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), 041011, 2010.
- Oliver W. C., Pharr G. M., *An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments*, *J. Mater. Res.*, 7(6), 1564-1583, 1992.
- Liu R., Li X., Wang H., Ding G., Yang C., Yang Z., *A new method for the micro-tensile testing of thin film*. In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2008. NEMS 2008. 3rd IEEE International Conference on. IEEE, 112-115, January 2008.
- Read D. T., Dally J. W., *A new method for measuring the strength and ductility of thin films*, *J. Mater. Res.*, 8 (7), 1542-1549, 1993.
- Dehm G., Wörgötter H. P., Cazottes S., Purswani J. M., Gall D., Mitterer C., 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), 1517-1521, 2009.
17. Jeong H. J., Lim N. S., Lee B. H., Park C. G., Lee S., Kang S. H., Lee H. W., Kim H. S., Local and Global Stress–Strain Behaviors of Transformation-Induced Plasticity Steel Using the Combined Nanoindentation and Finite Element Analysis Method, *Metall. Mater. Trans. A*, 45 (13), 6008–6015, 2014.
  18. Bouzakis, K. D., Michailidis, N., An accurate and fast approach for determining materials stress–strain curves by nanoindentation and its FEM-based simulation, *Mater. Charact.*, 56 (2), 147-157, 2006.
  19. Li Y., Stevens P., Sun M., Zhang C., Wang, W., Improvement of predicting mechanical properties from spherical indentation test, *International Journal of Mechanical Sciences*, 117, 182-196, 2016.
  20. De Bono D. M., Inverse Analysis and Microstructure Effects in Nanoindentation Testing, *Doktora Tezi*, University of Surrey, United Kingdom, 2017.
  21. Billur E., Çetin B., Music O., Şimşir C., Davut K., A potential solution to mystical materials in indentation test, *International Conference on the Technology of Plasticity*, Cambridge, United Kingdom, 1952-1957, 2017
  22. Poon B., Rittel D., Ravichandran G., An analysis of nanoindentation in linearly elastic solids, *International Journal of Solids and Structures*, 45 (24), 6018-6033, 2008.
  23. De Bono D. M., London T., Baker M., 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, 162–176, 2017.
  24. Gümrük R., Uşun A., Mines R., Enhancement of the mechanical performance of stainless-steel micro lattice structures using electroless plated nickel coatings, *Proceedings*, 2 (8), 494, 2018.