

Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Üretilen Mikro Kafes Yapıların Yüzeyinde Meydana Gelen Kusurların Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi

Altuğ UŞUN^{*1}, Recep GÜMRÜK^{1a}

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

(Alınış / Received: 30.11.2020, Kabul / Accepted: 10.12.2020, Online Yayınlanma / Published Online: 31.12.2020)

Anahtar Kelimeler

Mikro Kafes Yapılar
Seçici Lazer Ergitme
Hücresel Malzemeler
Eklemeli İmalat
Sonlu Elemanlar Yöntemi

Özet: Bu çalışmada seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen mikro kafes yapılarda meydana gelen boşluklar, yüzeye yapışan tozlar ve geometrik çarpılmalar gibi kusurların mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Mikro kafes yapılar 316L paslanmaz çelik malzemesinden, hacim merkezli kübik (BCC) yapı şeklinde, 200 µm çapında tellerden meydana gelecek şekilde üretilmiştir. Taramalı elektron mikroskopu görüntüleri kullanılarak yüzeyde meydana gelen kusurlar gerçeğe yakın katı modellenmiştir. Kafes yapıların mekanik özellikleri deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak basma testleri ile incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda hücre sayısının artırılması, buna bağlı olarak tel sayısının artırılması ile sonlu elemanlar sonuçlarının deneysel verilere yakınsadığı gözlemlenmiştir. Sıkışma bölgesinin gerçeğe yakın modellenmesinde, analiz süresi ve deneysel sonuçlara yakınsama göz önüne alındığında en az iki yarım hücrenin modellenmesi gerektiği görülmüştür. Parça üzerine yapışan mikro tozların gerilme değeri üzerinde çok etkisinin olmadığı görülse de erken temas bölgeleri oluşturmaları sebebi ile birim şekil değişiminin gerçeğe daha yakın hale getirdiği saptanmıştır.

Investigation of the Effects of Discontinuities on the Mechanical Properties of Micro Lattice Structures Produced by the Selective Laser Melting Method

Keywords

Micro Lattice Structures
Selective Laser Melting
Cellular Materials
Additive Manufacturing
Finite Element Analysis

Abstract: In this study, the effects of defects such as dust, voids and geometric distortions occurring in micro lattice structures produced by selective laser melting on mechanical properties were investigated. Micro lattice structures are made of 316L stainless steel material, in the form of a body-centered cubic (BCC) structure, with struts of 200 µm diameter. Defects occurring on the surface was modeled realistically using the scanning electron microscope images. The mechanical properties of the structure were examined by using the experimental and finite element method with compression tests. As a result of the tests carried out, it was observed that the finite element results converged to the experimental data by increasing the number of cells and increasing the number of wires accordingly. In the realistic modelling of the compression tests, considering the analysis time and the convergence to the experimental results, it is found out that at least two half-cells should be modeled. Although it is seen that the micro powders adhering on the part do not have much effect on the stress value, it has been determined that the strain value change makes it more realistic due to the early contact areas.

1. Giriş

Hücresel malzemeler yüksek mukavemet/ağırlık oranı, özgül 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. Hücresel malzemelerin

*İlgili yazar: altug@ktu.edu.tr

ORCID: 0000-0003-0773-9548

^{1a} ORCID: 0000-0002-1447-523X

mekanik, termal ve akustik özellikleri, sahip oldukları topolojik yapıya göre değişmektedir. Fakat karmaşık topolojik yapıya sahip hücresel malzemelerin konvansiyonel üretim yöntemleri ile imal edilmeleri nerdeyse imkansız veya çok zordur. Bu zorluğun aşılmasında eklemeli üretim yöntemlerinin gelişmesi önemli rol oynamıştır. Örneğin seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting, SLM) [1,2], lazer sinterleme [3-5], ultrasonik eklemeli imalat [6-8], eriyik yığıma modelleme (Fused Deposition Modeling, FDM) [9,10] vb. birçok eklemeli imalat yönteminin gelişmesine paralel günümüzde mikro ve makro ölçekte karmaşık yapıları hücresel malzemelerin üretimi mümkün olmaktadır.

Seçici lazer ergitme yöntemi, metalik mikro yapıların üretiminde kullanılan en önemli üretim yöntemlerinden biri olma potansiyeline sahip teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır [11,12]. Bu teknolojiyi kullanarak Ushijima vd. [13] ve Gümrük vd. [14-16], hacim merkezli kübik (Body Centered Cubic, BCC) yapıya sahip, paslanmaz çelik mikro kafes

blokları üretmiştir. Üretilen yapıların basma ve diğer yüklenme koşulları altındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır.

SLM ile üretilen kafes yapılar, oldukça karmaşık bir geometriye sahiptirler. Mikro tellerin yüzeyine yapışmış ergimemiş veya yarı ergimemiş 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 Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada ise katı modelin oluşturulmasında taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) kullanılarak gerçek geometrinin minimum kabul ile modellenmesi gerçekleştirilecektir. Bunun sonucunda geometrik çarpıklıkların ve tel üzerindeki yarı ergimemiş tozların mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir.

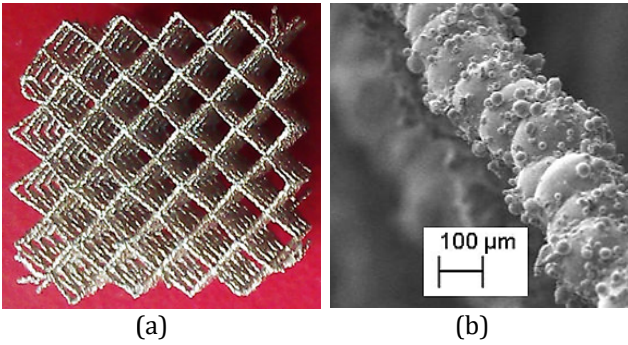
Şematik Gösterim	Açıklama	Nitelikler			
		Deneysele olarak elde edilen ortalama tel çapının modellenmesi	Değişken kesit alanı	Tel uzunluğu boyunca gerilme konsantrasyonlarını yakalama	Merkez eksenden kaçıklıklar
	Ortalama tel çapı bulunarak, bu çap değerine göre kusursuz model çizilmesi ile elde edilir [17,18]	✓	×	×	×
	Çeşitli kesit alanına sahip kirişlerin yan yana dizilmesi ile elde edilir [19]	✓	✓	✓	×
	N adet düğüm noktasına sahip eğrinin, bir eksen etrafında döndürülmesi ile elde edilir [20]	✓	✓	✓	×
	N adet kürenin bir araya gelmesi ile elde edilir [21]	✓	✓	✓	✓

Şekil 1. Hücresel yapıdaki kusurların oluşturulma yöntemlerinin karşılaştırılması

2. Yapılan Çalışmalar

2.1. Mikro Kafeslerin Üretimi

Testlerde kullanılan mikro kafes yapılar Liverpool Üniversitesinde, SLM MCP 250 Realizer II makinası tarafından üretilmiştir. Bu yöntemde mikro kafes yapıların SLM ile üretilmesindeki kullanılan parametreler; optimum lazer gücü 90W, katman kalınlığı 50 μm ve lazer tatbik süresi (laser exposure time) 1000 μs '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 μm 'dir. Üretilen mikro kafes yapının görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. SLM ile üretilen numunenin görüntüleri; a) BCC mikro kafes yapı ve b) mikro telin SEM görüntüsü

2.2. Mikro Kafeslerin Basma Testleri

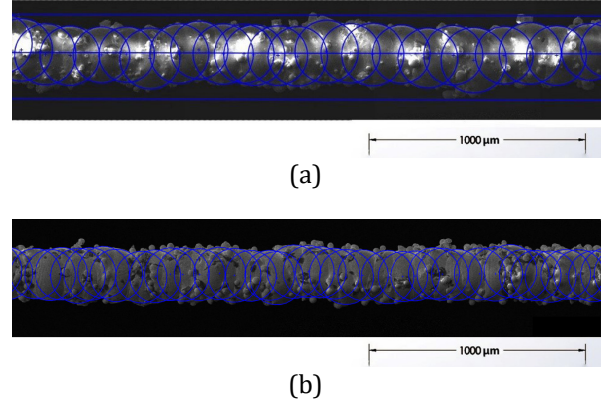
12.5 mm³ boyutlarındaki kafes yapılar Instron servo-hidrolik test cihazında basma testine tabi tutulmuştur. Yükleme hızı 0.5 mm/dakika alınmıştır ve bunun sonucunda birim şekil değişimi hızı $6.66 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ değerine tekabül etmektedir. Basma gerilmesi; uygulanan kuvvetin, kafesin şekil değişiminden önceki yüzey alanına (12.5x12.5 mm²) bölünmesi ile hesaplanmıştır. Kafes birim şekil değişimi ise baskı kafasının yer değiştirme eğrisinin, boğun ilk yüksekliğine (12.5 mm) bölünmesi ile elde edilmiştir. Paslanmaz çeliğin yoğunluğu 8000 kgm⁻³'tür. Kafeslerin yoğunluğu, kafes blokların imal edildiği 316L paslanmaz çelik malzemenin yoğunluğuna (8000 kgm⁻³) bölünerek spesifik yoğunluğu elde edilmiştir. Spesifik mekanik değerleri spesifik yoğunluk değerlerine bölünerek elde edilmiştir.

2.3. Mikro Tel Üzerindeki Geometrik Kusurların Modellenmesi

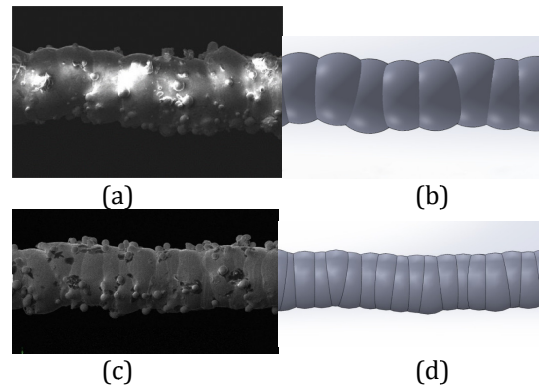
SLM ile üretilen mikro kafes yapılarında mikro boşluklar, ergimemiş tozlar, yarı ergimemiş tozlar, geometrik çarpıklıklar ve tekdüze olmayan çap değişimleri gibi birçok kusur bulunmaktadır. Bu

kusurlar mikro kafes yapıların mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu amaçla geometrik kusurların, gerçeğe yakın modellenebilmesi için, gerçek tellerin SEM görüntüleri üzerinden kusur dağılımlarının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3'te 90° ve 35° açı ile üretilen iki mikro telin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde 35°deki mikro tel 90°'ye göre daha kompleks yapıdadır. Şekilden görüldüğü üzere her iki mikro tel kürelerin yan yana dizilmesi ile temsil edilebilmektedir. Bu çalışmada, katı modelin oluşturulmasında, teli oluşturan boğunların tam daire ve kusursuz olduğu kabul edilmiştir. Bu yaklaşım ilk defa Ravari ve Kadhodaei [21] tarafından uygulanmıştır. Her bir kürenin çapı ve kürelerin merkez koordinatlarının belirlenmesinde SolidWorks programından yararlanılmıştır. SolidWorks programına SEM resimleri aktarılmış ve Şekil 3'te gösterildiği gibi her küreye bir daire çizilmiştir. Sonra her bir dairenin çapı ve merkez koordinatları ölçülmüştür.



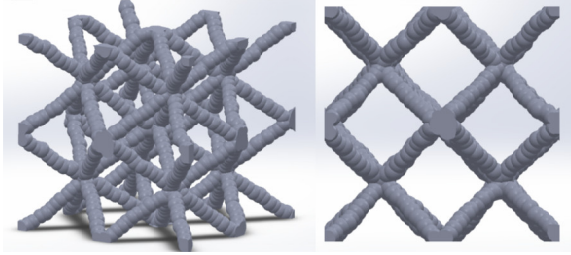
Şekil 3. Mikro tellerin SEM görüntüsü üzerinde SolidWorks programı ile daire uydurulması; a) 35° ve b) 90° üretim açısına sahip mikro tel



Şekil 4. 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

Mikro tel benzetilmesi yapıldıktan sonra oluşturulan dairelerin çapları (r_1, r_2, \dots) şekil üzerinden

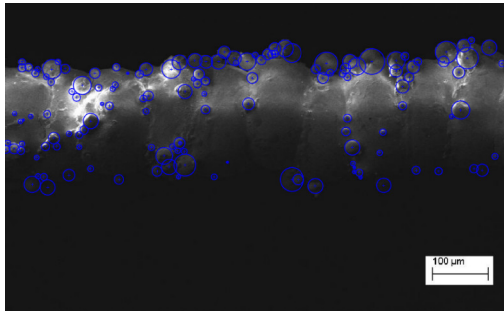
ölçülmüştür. İki küre arasındaki mesafeler de ölçülerek elde edilen veriler listelenmiştir. Aynı işlemler 35° ve 90°'de üretilmiş teller için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Elde edilen sayısal değerleri kullanarak Solidworks programı içerisinde mikro tellerin katı modelini oluşturulacak bir makro geliştirilmiştir. Makro yardımı ile üretilen tellerin görüntüleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere makro ile oluşturulan katı modeller gerçek mikro tellere oldukça benzemektedir.



Şekil 5. Makro ile oluşturulmuş mikro teller ile kafes yapısının katı modellenmesi

2.4. Mikro Tel Üzerindeki Tozların Modellenmesi

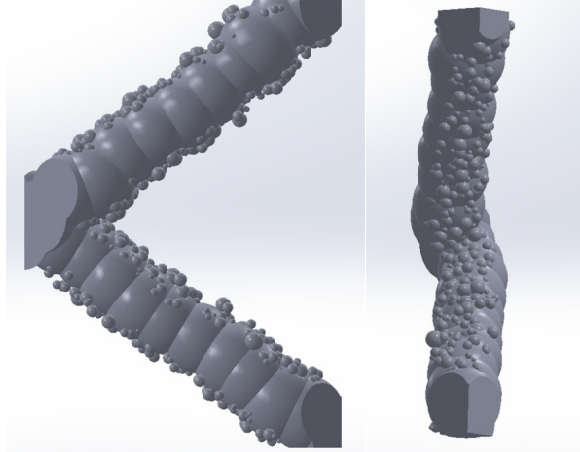
Şekil 1b'de görüldüğü üzere mikro kafes yapı ve mikro tellerin üzerinde çok sayıda erimemiş tozlar bulunmaktadır. Bu erimemiş tozların, kafes yapı deformasyonuna ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi bu bölümde amaçlanmıştır. Fakat tozların modellenmesi oldukça zordur. Literatürde μ -CT tarama yöntemi ile gerçek geometrinin alındığı çalışmalar bulunmaktadır [22,23]. Fakat bu çalışmalarda mikro yüzeyleri düzeltmek amacıyla uygulanan filtreleme yöntemleri tozların modellenen çıkarılmasına veya tam modellenememesine sebep olmaktadır. Tozların modellenmesi için bu çalışma kapsamında SolidWorks programında bir makro yazımı gerçekleştirilmiştir. Bu makronun uygulanabilmesi için tel üzerindeki tozlar sayılmış ve boyutları not edilmiştir.



Şekil 6. Mikro teller üzerinde tozların dağılımını ve boyutlarının SEM görüntüsü üzerinden belirlenmesi

Toplamda 4500 μ m uzunluğundaki tel üzerinden tozların sayımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayım sonucunda 100 μ m uzunluğundaki bir mikro tel üzerinde ortalama 19.86 adet erimemiş veya yarı erimemiş toz bulunduğu görülmüştür. Ortalama toz boyutu 20-25 μ m arasında olduğu görülmüştür.

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 7).



Şekil 7. Mikro tel üzerine eklenen tozların katı model görüntüsü

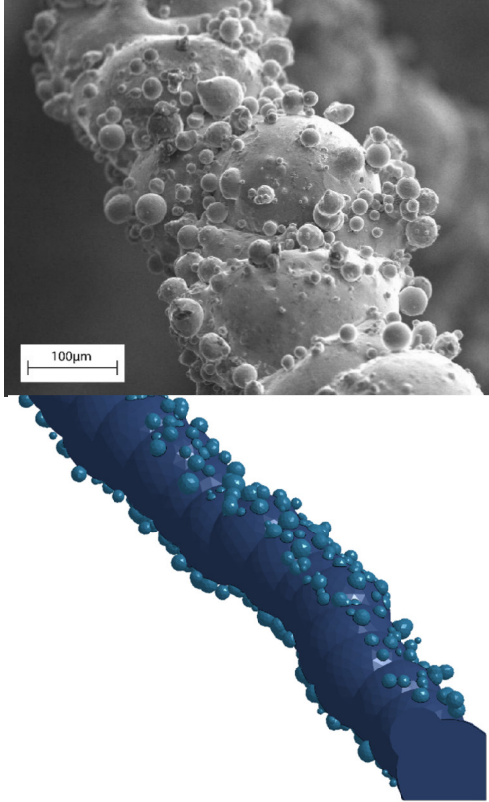
2.5. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Kusurlu yapıda üretilen modelin ağ yapısının oluşturulmasında dört yüzlü (tetrahedral) elemanlar kullanılmıştır. Düzgün dört yüzlü elemanların belirli bölgelerde yığılmasını engellemek amacıyla model hassas şekilde temizlenmiş ve gereksiz köşe çizgilerinden arındırılmıştır. 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. Bu sebeple optimum eleman boyutunun belirlenmesinde yakınsama analizi yapılmıştır.

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 yapının aksine gerçeğe yakın geometrinin analizinde birden fazla farklı telin modellenmesi gerekmektedir. Bu sebeple, gerçeğe yakın sonuçların elde edilmesinde gerekli olan en az tel sayısının belirlenmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çeyrek ve yarım kafesten oluşan modeller oluşturulmuş ve 1, 2 ve 3'er tane hücrenin üst üste gelmesi ile çeşitlendirilmiştir. Yapılan modellerde farklı geometrik kusurlara sahip tellerin kullanılmasına dikkat edilmiştir.

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. 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. Elde edilen model Şekil 8'de gösterilmiştir.



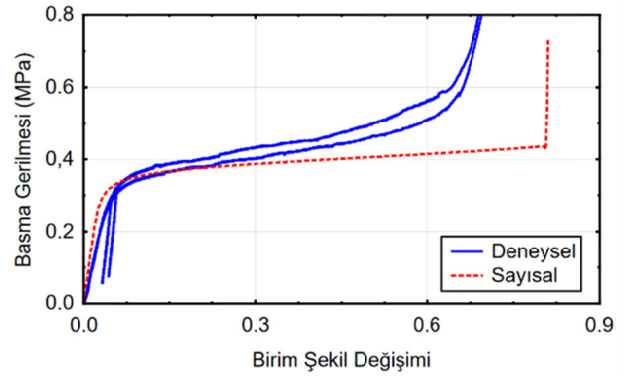
Şekil 8. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile SEM resimlerinin karşılaştırılması

3. Bulgular ve İrdeleme

3.1. Mikro Kafes Yapılarda 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 9'da 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 bölgesi olarak sıralanabilir [14]. Şekil 9'dan görüldüğü üzere; mikro tel için analizde maksimum sıkışma bölgesine kadar deneysel verilere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Eğrinin devamında meydana gelen iraksamanın, parça yüzeyinde bulunan kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



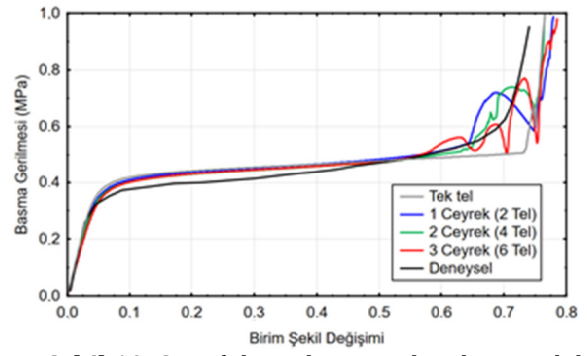
Şekil 9. BCC mikro kafes yapıların basma testinden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

3.2. Hücre Sayısının Mekanik Özelliklere Etkisi

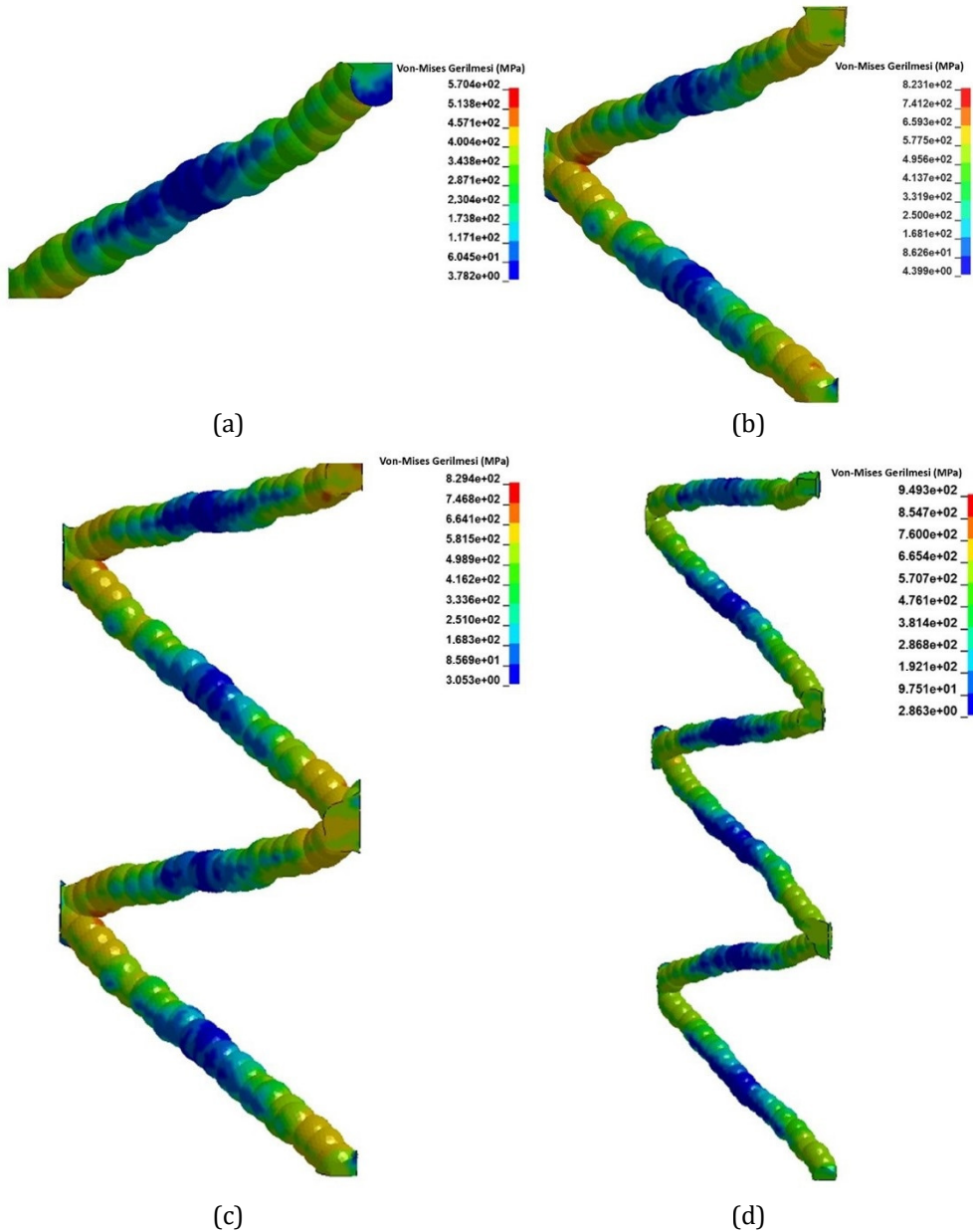
Mikro kafes yapılarda telin geometrik yapısındaki kusurlar Şekil 9'dan görüldüğü üzere sayısal değerlerin, deneysel verilerden iraksamasına sebep olmaktadır. Bu farkın sebebi tel geometrisinin düzgün silindirik bir geometriden çok uzak olmasıdır. Deneysel ve sayısal eğriler arasındaki farkları azaltabilmek için 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 arttırıldı.

Çeyrek hücrelere ait gerilme-birim şekil değiştirme davranışı sonuçları Şekil 10'da 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 artışın deneysel değere 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 11'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.



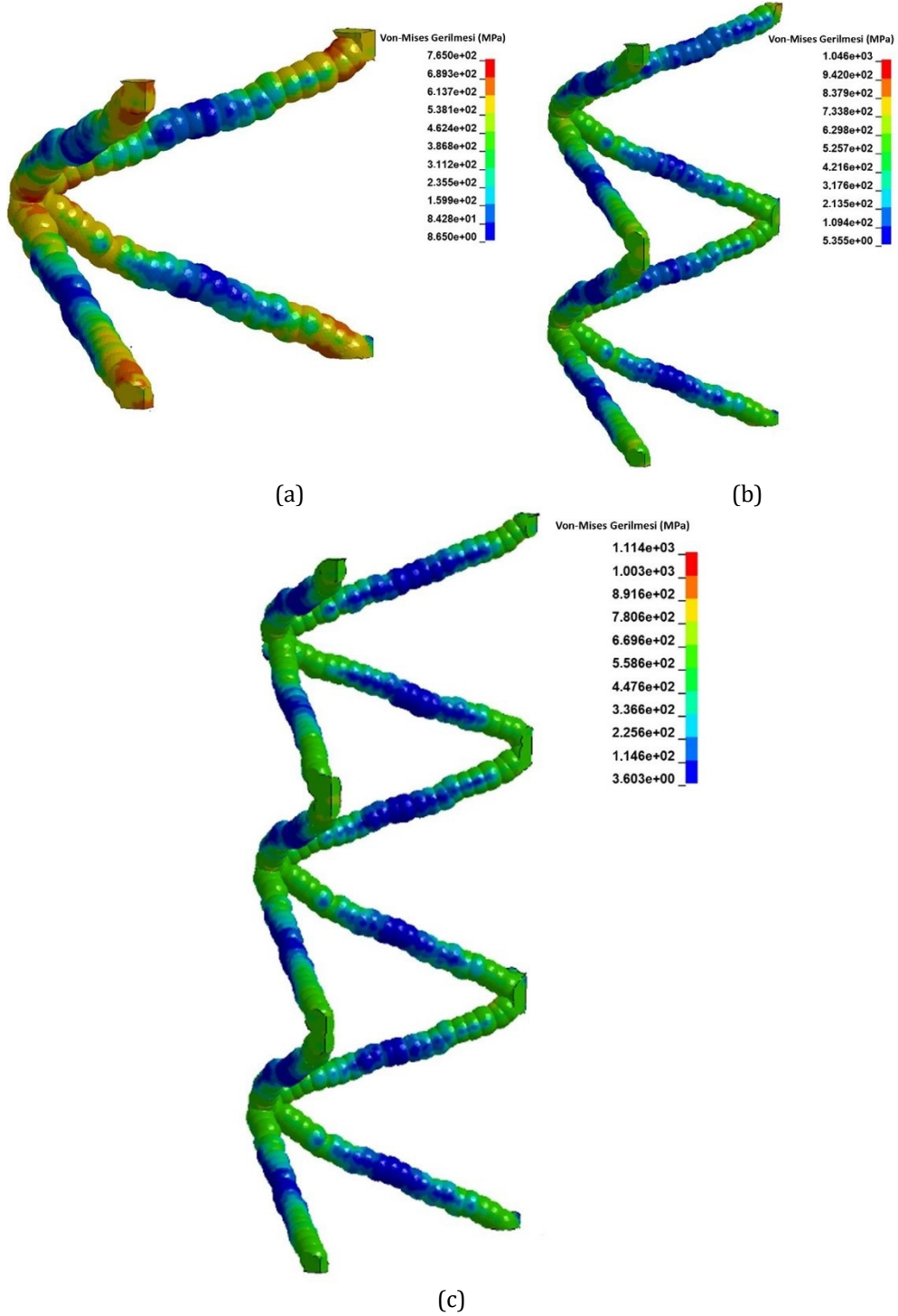
Şekil 10. Çeyrek hücrelerin gerilme-birim şekil değişimi davranışları



Şekil 11. Çeyrek hücre analizlerinde $\epsilon=0.3$ 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.

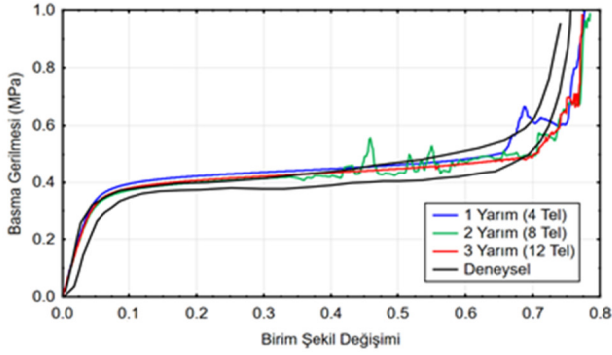


Şekil 12. Yarım hücre analizlerinde $\varepsilon=0.3$ değeri için von-Mises gerilme dağılımları; a) bir yarım hücre (4 tel), b) iki yarım hücre (8 tel) ve c) üç yarım hücre (12 tel)

Yarım hücelere ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri Şekil 13'te 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 değerin 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 12'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.

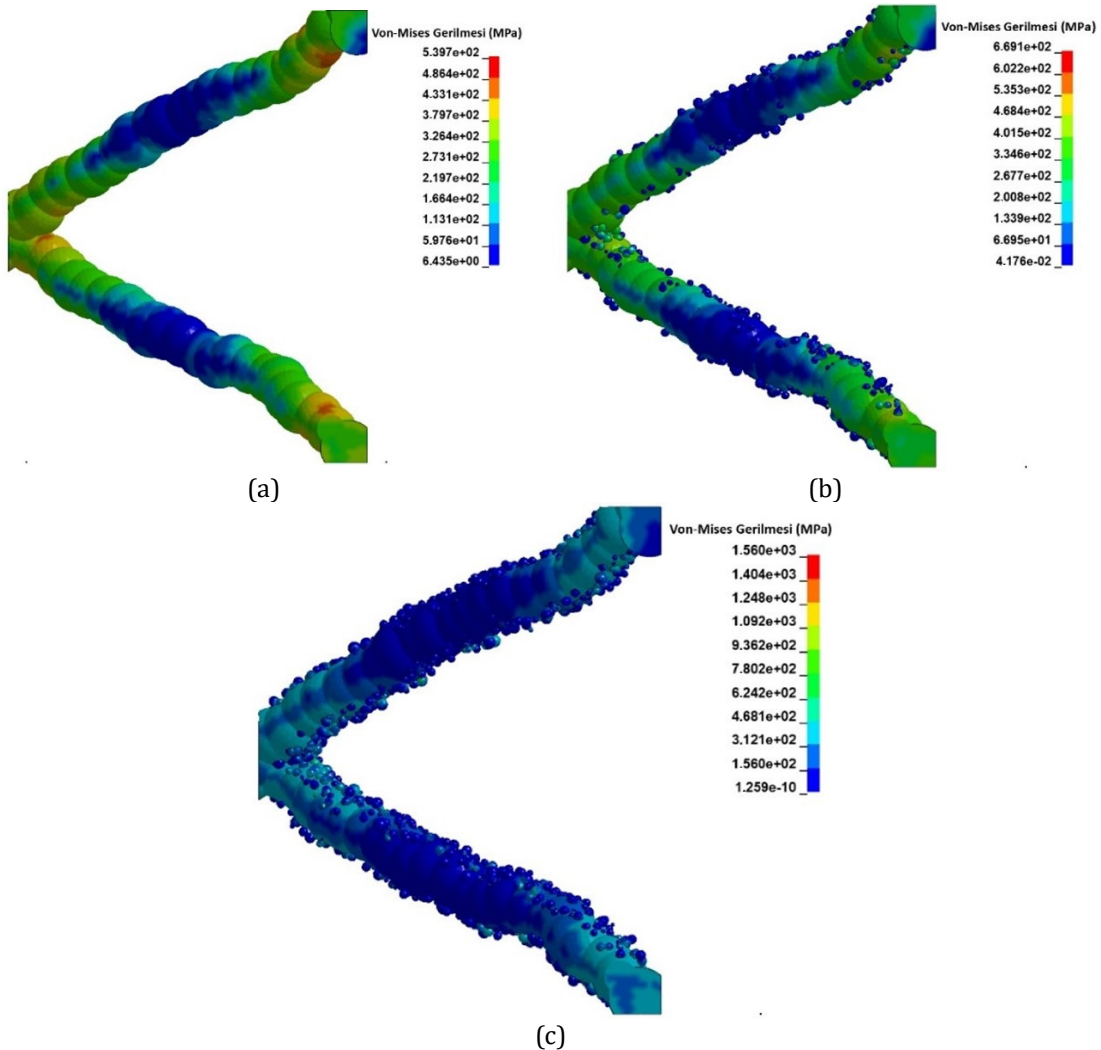


Şekil 13. Yarım hücreler için basma gerilmesi-birim şekil değişimi eğrilerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

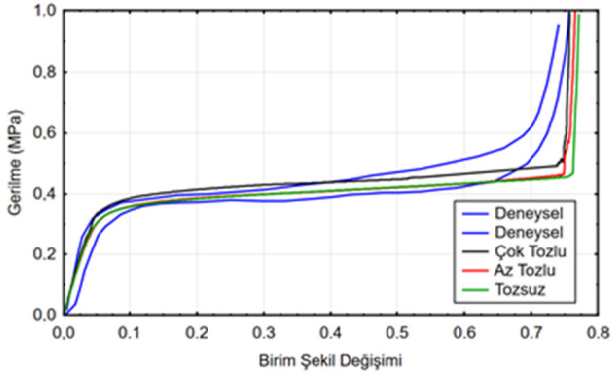
3.3. Yarı Ergimiş Tozların Mekanik Özelliklere Etkisi

Bu bölümde yarı ergimiş veya ergimemiş tozların, mikro kafes yapılarda 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. Mikro tellerin yan yüzeylerindeki tozların mekanik davranışa etkisi olmayacağından, sadece birbirine temas eden yüzeylerdeki tozların modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Tozlu modellerin von-Mises gerilme dağılımları Şekil 14'te verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, tüm toz oranları için mikro tellerdeki von-Mises gerilmeleri benzerlik göstermektedir (~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 15'te 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 eğrinin deneysel verilere oldukça benzediği görülmektedir.

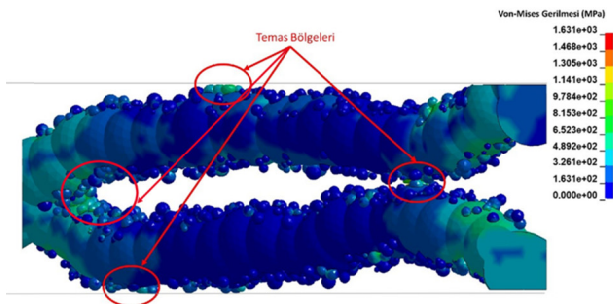


Şekil 14. Toz oranına göre von-Mises gerilme dağılımları a) tozsuz, b) az tozlu ve c) çok tozlu



Şekil 15. Toz yoğunluğuna bağlı olarak gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

Literatürde μ -CT tarama yardımı ile gerçek geometrinin modellenmesi üzerine bazı çalışmalar mevcuttur [22,24]. Bu çalışmalarda μ -CT tarama ile oluşturulan modeller üzerinde herhangi bir geometrik kabul (Şekil 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. Tozların maksimum birim şekil değişimini etkileyen temas noktaları Şekil 16'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 değişimini azaltacağı kolaylıkla söylenebilir. Buradan yola çıkarak deneysel kafes yapıların çok daha düşük birim şekil değişimi değerinde sıkışma göstermesinin nedeninin tozlar olduğu söylenebilir.



Şekil 16. Tozlu modelin çökme durumunda meydana gelen temas bölgelerinin gösterimi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada mikro kafeslerin mekanik özelliklerinin araştırılması ve seçici lazer ergitme yönteminde meydana gelen geometrik kusurların modellenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar SLM ile üretilmiş 316L paslanmaz çelik mikro kafesler için gerçekleştirilmiştir.

• Sıkışma bölgesinin gerçeğe yakın modellenmesi için iki yarım hücre yeterli olacağı görülmüştür. 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.

• 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 değerlerin gerçeğe daha da yaklaşacağı ön görülmüştür.

Kaynakça

- [1] Tsopanos S, Mines RAW, McKown S, Shen Y, Cantwell WJ, Brooks W, et al. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures. *J Manuf Sci Eng* 2010;132:041011.
- [2] Gümrük R, Altuğ UŞ. Akımsız nikel kaplanmış mikro kafes yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 2020 Oct 1;35(4):1783-98.
- [3] Cerardi A, Caneri M, Meneghello R, Concheri G, Ricotta M. Mechanical Characterization of Polyamide Cellular Structures Fabricated Using Selective Laser Sintering Technologies. *J Mater* 2012.
- [4] Yan C, Hao L, Hussein A, Young P, Raymond D. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Mater Des* 2014;55:533-41.
- [5] Yan C, Hao L, Hussein A, Young P, Huang J. Materials Science & Engineering A Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering. *Mater Sci Eng A* 2015;628:238-46.
- [6] Hahnlen R, Dapino MJ. Composites : Part B NiTi – Al interface strength in ultrasonic additive manufacturing composites. *Compos PART B* 2014;59:101-8.
- [7] Dehoff RR, Babu SS. Characterization of interfacial microstructures in 3003 aluminum alloy blocks fabricated by ultrasonic additive manufacturing. *Acta Mater* 2010;58:4305-15.
- [8] Friel RJ, Harris RA. Ultrasonic additive manufacturing A hybrid production process for novel functional products. *Procedia - Soc Behav Sci* 2013;6:35-40.

- [9] Karamooz Ravari MR, Kadkhodaei M, Badrossamay M, Rezaei R. Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *Int J Mech Sci* 2014;88:154–61.
- [10] Rezaie R, Badrossamay M, Ghaie A, Moosavi H. Topology optimization for fused deposition modeling process. *Procedia - Soc Behav Sci* 2013;6:522–7.
- [11] Xiong J, Mines R, Ghosh R, Vaziri A, Ma L, Ohrndorf A, et al. Advanced Micro-Lattice Materials. *Adv Eng Mater* 2015;17:1253–64.
- [12] Poon B, Rittel D, Ravichandran G. An analysis of nanoindentation in linearly elastic solids. *Int J Solids Struct* 2008;45:6018–33.
- [13] Ushijima K, Cantwell WJ, Mines RAW, Tsopanos S, Smith M. An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures. *J Sandw Struct Mater* 2011;13:303–29.
- [14] Gümrük R, Mines RAW. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures. *Int J Mech Sci* 2013;68:125–39.
- [15] Gümrük R, Uşun A, Mines RAW. Enhancement of the Mechanical Performance of Stainless Steel Micro Lattice Structures Using Electroless Plated Nickel Coatings. *Proceedings* 2018;2:494.
- [16] Gümrük R, Mines RAW, Karadeniz S. Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions. *Mater Sci Eng A* 2013;586:392–406.
- [17] Ptochos E, Labeas G. Elastic modulus and Poisson's ratio determination of micro-lattice cellular structures by analytical, numerical and homogenisation methods. *J Sandw Struct Mater* 2012;14:597–626.
- [18] Gorny B, Niendorf T, Lackmann J, Thoene M, Troester T, Maier HJ. In situ characterization of the deformation and failure behavior of non-stochastic porous structures processed by selective laser melting. *Mater Sci Eng A* 2011;528:7962–7.
- [19] Campoli G, Borleffs MS, Amin Yavari S, Wauthle R, Weinans H, Zadpoor AA. Mechanical properties of open-cell metallic biomaterials manufactured using additive manufacturing. *Mater Des* 2013;49:957–65.
- [20] Karamooz Ravari MR, Kadkhodaei M, Badrossamay M, Rezaei R. Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling. *Int J Mech Sci* 2014;88:154–61.
- [21] Karamooz Ravari MR, Kadkhodaei M. A Computationally Efficient Modeling Approach for Predicting Mechanical Behavior of Cellular Lattice Structures. *J Mater Eng Perform* 2015;24:245–52.
- [22] Lozanovski B, Leary M, Tran P, Shidid D, Qian M, Choong P, et al. Computational modelling of strut defects in SLM manufactured lattice structures. *Mater Des* 2019;171:107671.
- [23] Lei H, Li C, Meng J, Zhou H, Liu Y, Zhang X. Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis. *Mater Des* 2019;169:107685.
- [24] Araya-Calvo M, López-Gómez I, Chamberlain-Simon N, León-Salazar JL, Guillén-Girón T, Corrales-Cordero JS, et al. Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology. *Addit Manuf* 2018;22:157–64.