

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015902 (336-342)

AKU J. Sci. Eng. 18 (2018) 015902 (336-342)

DOI: 10.5578/fmbd.66871

Alüminyum Metal Köpüğün Bilgisayar Destekli Mikro-CT Tomografi ile Yapısal Karakterizasyonu

Alpay Tamer ERTÜRK*, İsmet AYDIN*Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmit Kocaeli Türkiye*

e-posta: *tamer.erturk@kocaeli.edu.tr

*İletişimden sorumlu yazar

Geliş Tarihi:20.12.2017 ; Kabul Tarihi:20.04.2018

Özet

Bu çalışma bilgisayarlı x-ışını mikro tomografi (μ CT) metodunun temel prensiplerine bağlı matematiksel eşitlikler ve metodun metal köpük numunelere uygulanmasını kapsamaktadır. Metalik köpük malzemelerin gözenek yapısının boyut ve dağılım yönünden karakterize edilmesi mekanik, elektrik, ısı ve korozyon gibi kullanımlarına yönelik özelliklerinin kontrol edilmesi bakımından önemlidir. Bu çalışma laboratuvar koşullarında üretilmiş alüminyum köpüklerin x-ışını mikro tomografi (μ CT) tekniği ile analiz ve modelleme uygulamasının irdelene ve sonuçlarını içermektedir. Mikro-CT tarama işlemi Tübitak Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir. Kabinli x-ışını radyoskopi cihazı olarak YXLON marka Y.MU2000 DCT modeli kullanılmıştır. Tarama işlemi sırasında 200 kV, 4 mA, 1 mm filtre ve 0,4 mm odaklama parametreleri kullanılmıştır. Bu işlem sonrasında 3 farklı metal köpük morfolojisine ait tomografik görüntü ve veriler elde edilmiştir. Elde edilen veriler üzerinden mekanik özellikler sonlu elemanlar yaklaşımı ile analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Metal Köpük;
Mikroyapı;
Mikrotomografi;
X-ışını;
Deform 3D

Structural Characterization of Aluminum Metal Foam by Computer Assisted Micro-CT Tomography

Abstract

This study involves the computerized x-ray micro-tomography (μ CT) application on metal foam samples depending on its basic principles and mathematical equations. Characterization of the pore structure of metal foam materials in terms of size and distribution is important to analyze the mechanical, electrical, thermal and corrosion properties for their use. This work covers the analysis and modeling application of x-ray micro-tomography (μ CT) technique of aluminum foams produced in laboratory conditions. Micro-CT scanning was carried out at Materials Institute in TUBITAK Marmara Research Center. The YXLON brand Y.MU2000 DCT model device was used for the x-ray radiography. The screening was performed at 200 kV, 4 mA, 1 mm filter and 0.4 mm fading parameters. After this process, microtomographic images and data of 3 different metal foam morphology were obtained. Mechanical properties of the obtained data were analyzed by finite element approach.

Keywords

Metal Foam;
Microstructure;
Microtomography;
X-Ray;
Deform 3D

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Milimetre mertebesinde x veya gama ışını bilgisayarlı tomografi metodu 70'li yıllardan itibaren tıbbi teşhislerde kullanılmaya başlanmış ve zaman içerisinde farklı alanlarda da teknik kullanımları geliştirilmiştir. Radyoaktif x ve gama ışınlarının kullanıldığı farklı uygulama örnekleri arasında

arkeolojik buluntuların yaş tayini (arkeometri), mineraloji ve malzeme bilimi sayılabilir (Kachelrieß 2008).

Güncel uygulamalarından birisi gözenekli malzemelerin iç yapısının gözenek morfolojisi ve dağılımını inceleme ihtiyacı üzerine x-ışını ile mikrometre mertebesinde tomografi kullanımınıdır.

Özellikle açık gözenekli metal köpüklerde geçirgenlik ve kapalı gözenekli metal köpüklerde yapı homojenliği özelliklerinin tayini gerekmektedir (Khaled *et al.* 2017, Li *et al.* 2018).

Gözenekli veya köpük türü malzemelerin gözenek boyut dağılımı ve toplam porozite gibi gözenekli yapı özelliklerinin belirlenmesi mikro yapısal parametreleri hesaplamak için gereklidir. Ayrıca açık gözenek yapının kullanıldığı geçirgenlik özelliğinin ihtiyaç duyulduğu uygulamalarda akışın fiziksel parametrelerini ortaya koymak da bir diğer gerekliliktir. Bu analiz gereğini karşılamak için ilk uygulanan metot 2 boyutlu görüntüler üzerinden gözenek alanı morfolojisinin istatistiksel hesaplamalarla belirlenmesi olmuştur. Belirlenen morfoloji parametreleri üzerinden bir sonraki adımda ampirik eşitlikler türetilerek uygulamaya özel teknik yaklaşımlar aranmıştır. Söz konusu parametreleri belirlemek için alternatif başka bir yöntem ise bir kesit üzerindeki mevcut gözeneklerin boyut bilgileri kullanılarak istatistiksel yaklaşımla bütün yapının 3 boyutlu gözenek özelliklerinin türetilmesidir. Bu metotla türetilmiş gözenek yapılı model kullanılarak Navier-Stokes veya lattice Boltzmann eşitlikleri ile üç boyutlu akış simülasyonları yapmak mümkündür (Bock and Jacobi 2013).

Matematiksel yaklaşımlar sonucunda metalik köpüklerin mekanik davranışlarının göreceli yoğunluk ve hücre morfolojisine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte gerçek anlamda dikkate alınabilecek bir modelleme yaklaşımı için sadece bu iki özelliğe bağlı olarak yapılan açıklama yeterli görülmemektedir. Bu bilgilere ilaveten mikroyapı özelliklerinin (hücre kalınlığı ve eğriliği, yapı içindeki hücre dağılımı) incelenmesi bu malzemelerin davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi hususunda yardımcı olacaktır. Bu sebepten ötürü geometrik modellemeye duyulan ihtiyacın getirisi olarak yapılan bazı çalışmalar temel seviyede kalmışlardır (Pérez *et al.* 2016, Larner *et al.* 2014).

Gelişen morfoloji inceleme teknolojisinin etkisi ile yapılan çalışmalar sonucunda hücresel metallerin

daha gerçekçi geometrik modellerinin yapılabileceği anlaşılmıştır (Doroszko and Seweryn 2015). Bu morfoloji inceleme metotları arasında en yaygın uygulama bilgisayarlı mikro tomografik (mikro-CT) taramadır. Mikro-CT metodu ile belirli bir çözünürlüğe sahip 3 boyutlu piksel görünümü elde edilebilir. Bu görüntünün çeşitli paket programlar ile 3 boyutlu mesh yapıya aktarılması sayesinde mekanik davranışlarının gerçeğe yakın incelenmesi ve günümüz mühendislik problem çözüm tekniklerinde aktif kullanımı sağlanmaktadır.

Hüresel metallerin gerçek geometrilerine yakın bir sonlu elemanlar modeli oluşturularak elde edilecek yüksek gerçeklikli örneklemeler ile bu malzeme türünün oldukça doğru ifadesi yapılmış olabilecektir. Bu şekilde son ürün olarak ortaya çıkmış bir ürünün incelenip özelliklerinin tahlil edilmesi sürecine tersine mühendislik (reverse engineering) denilmektedir (Yu *et al.* 2017, Kowaluk and Wozniak 2017, Luetje *et al.* 2017). Örnek numune üzerinden mikro-tomografi ölçümleri ile tahribatsız olarak gözenek geometrilerinin istatistiksel tanımlaması yapılarak ihtiyaç duyulan yapısal özelliklerin ortaya konulması ise daha fazla veri üzerinden analiz sonucu verdiğinden diğer yöntemlere göre daha üstündür. Bu sayede geleneksel olarak nitelenebilecek metotlara göre daha etkin topolojik ve morfolojik tanımlama imkanı doğmuştur. Bu çalışma laboratuvar koşullarında üretilmiş alüminyum köpüklerin x-ışını mikro tomografi (μ CT) tekniği ile analiz ve modelleme uygulamasının irdeleme ve sonuçlarını içermektedir.

2. Materyal ve Metot

Metal köpük numunelerin üretiminde yer tutucu metodu uygulanmıştır. Söz konusu üretimlerde esas metal olarak AA6082 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Yer tutucu olarak 1-2 / 2-3 / 3-4 mm boyutsal aralıklarındaki 3 farklı tane yapısına sahip kristal formda sodyum klorür kullanılmıştır. Metal köpüklerin üretimlerine bağlı süreç süresi gözenek boyutuna göre değişmekle birlikte 100 ila 150 dk mertebesinde tamamlanmıştır. Üretim sisteminde 1,3 kW güçte ergitme ünitesi, ergitme potası, vakum ünitesi (750 mmHg), basınçlandırma sistemi, TP304L

kalite paslanmaz çelik koruyucu atmosfer kalıbı ve kontrol ünitesi bulunmaktadır. Gereken termal izolasyon refrakter tuğla ve taş yünü ile sağlanmıştır. Üretim sürecinde ilk aşamada kalıp içerisine yerleştirilen yer tutucu ile yarı mamul parça vakum altında ergime sıcaklığına ısıtılmıştır. Ardından atmosfer basıncı altında tane boyutuna bağlı sürelerle işlem tamamlanıp kalıp bozularak numune elde edilmiştir. Üretilen metalik köpük numunelerin mikro yapılarının incelenmesi ve sonlu elemanlar yöntemine adaptasyonu için bilgisayarlı mikro tomografik muayene yöntemi uygulanmıştır. Mikro-CT tarama işlemi Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir. Kabinli x-ışını radyoskopi cihazı olarak YXLON marka Y.MU2000 DCT modeli kullanılmıştır. Tarama işlemi sırasında 200 kV, 4 mA, 1 mm filtre ve 0,4 mm odaklama parametreleri kullanılmıştır. Bu işlem sonrasında 3 farklı gözenek tipine sahip metal köpüklerin tomografik görüntü ve verileri elde edilmiştir. Şekil 1'de bilgisayarlı tomografi cihazı, yöntemin şematığı ve iş akış basamakları görülmektedir.

Bahsi geçen işlem adımlarının fiziksel ve matematiksel temeli ise şu şekildedir. Bilgisayarlı tomografi analizinde numune üzerinden alınan bir dizi halindeki boyutsal görüntü verisi x ışını kaynağının ve algılayıcı detektörlerin farklı açılarla hareket ettirilmesi ile sonucu elde edilir. Malzeme kesiti boyunca kayba uğrayarak yol alan x-ışınları kullanılarak edilen veri sisteme entegre bilgisayar tarafından işlenerek kesit görüntüsü (cross-section) haline dönüştürülür. Malzeme kesiti boyunca kayıp $\mu(xy)$ katsayıları ile rakamsallaştırılır. Genel olarak bilgisayarlı x-ışını mikro tomografi (μ CT) tekniğinde 1 mm² kesitte çözünürlük duyarlılığı 0.1% kayıp oranındadır. Homojen yapı bir malzeme kesitinde yol alan x-ışını soğurma miktarı Beer yasası ile aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesap edilir (Vinegar and Wellington 1987).

$$\frac{I}{I_s} = e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho x} \quad (1)$$

Söz konusu Beer eşitliğinde doğrusal ilerlemede kayıp katsayısı, I_s gelen x-ışını yoğunluğu, I

detektörde algılanan ışın yoğunluğu, $\frac{\mu}{\rho}$ kütle kayıp katsayısı, ρ malzeme yoğunluğu, x ışın ilerleme yönünde malzeme kalınlığıdır. Farklı bileşen içeren malzemeler için ise μ , ρ , x sembolleri ifade edilen malzemeye bağlı değişkenlerin etkileri ayrı ayrı toplam alınarak formülde yerine konur. Birden fazla bileşeni olup birbiri içerisinde çözünemeyen malzeme yapısında S_i faz hacim bileşeni olarak ele alınmaktadır. Buna göre metal köpükler için söz konusu bu bileşen gözenek hacim oranı olarak ele alınabilir. Bu durumda yapı içerisinde bulunan serbest ya da kapalı gaz hacmi bir bileşen olarak ele alınmış olacak ve bileşenlerin yapıdaki hacim oranlarına göre μ katsayısı aşağıdaki eşitlikle elde edilir (Vinegar and Wellington 1987).

$$\mu_i = \sum p_i S_i \quad (2)$$

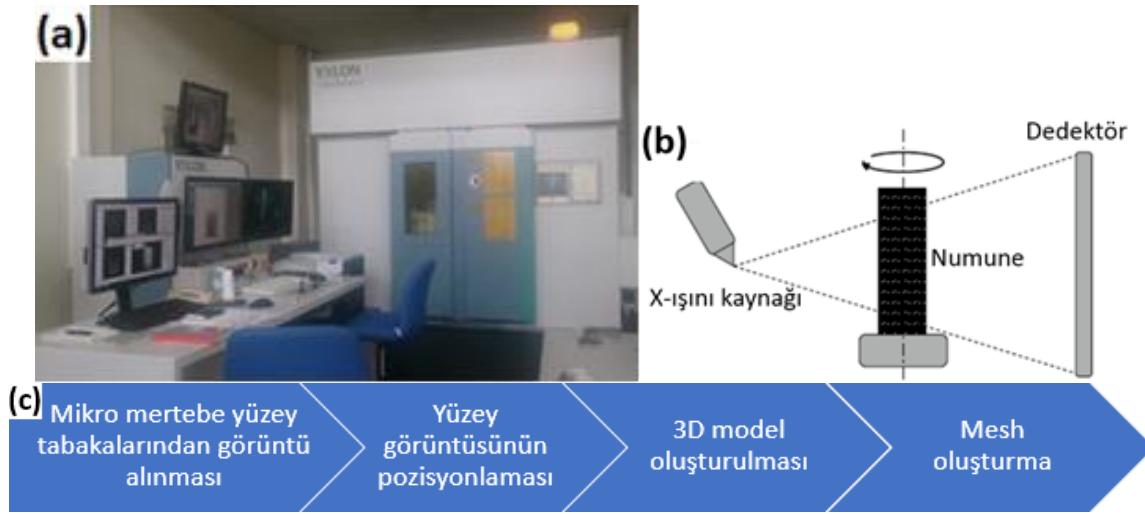
X-ışınlarının soğurulması ve kayıplar yaşanmasında farklı mekanizmalar rol oynamaktadır. X-ışınlarının enerji seviyesine bağlı olarak soğrulma mekanizmalarının etkinliği farklılaşmaktadır. Genel olarak, μ yoğunluğa ve kimyasal bileşime bağlıdır. Yüksek enerjili olan yaklaşık 100 keV'un üzeri enerji mertebelerinde x-ışın fotonunun malzeme içerisindeki bir atoma çarparak saçılma olayı Compton saçılmasıdır. Bu olayda saçılan foton dalga boyu giriş dalga boyundan daha büyük olmaktadır. X-ışını enerji değeri 100 keV'un altında ise malzemenin atom numarasına (Z) bağlı olarak fotoelektrik soğrulma baskın rol oynar. Bu soğrulma mekanizmaları göz önüne alındığında μ katsayısı aşağıdaki şekilde formüle edilir.

$$\mu \approx \rho \sigma(E) + \left(\frac{bZ}{E^2}\right) \rho \quad (3)$$

Bu eşitlikte $\sigma(E)$ Klein-Nishira sabiti, ρ elektron yoğunluğu, E ise keV cinsinden enerji seviyesi, Z atom numarası ve $b=9.8 \times 10^{-24}$ sabit değeridir. Bu eşitliğe göre ağır elementler x-ışınlarını hafif olanlara göre daha fazla soğuracaklardır. Çünkü ağır elementler fotoelektrik bölgesinde μ soğrulma katsayısında bir artış gösterir. Doğrusal soğrulma katsayısı olan μ bir malzeme için x-ışını kaynağının enerji seviyesi ve elementin atom numarasına göre değişkenlik gösterir (Vinegar and Wellington 1987).

Tek eksenli dönme sırasında alınan radyografik görüntü dizilerinin birleştirilmesiyle 3 boyutlu tarama görüntüsü elde edildi. Görüntü kirliliğinin giderilmesi yüzeyin tesviye edilmesi işlemleri sonunda 3 boyutlu STereo Lithography (STL) formatına dönüştürüldü. Bu formatta elde edilen veri bir 3D Computer-Aided Drawing (CAD) yazılımına aktarıldı. Ardından sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analiz gerçekleştirildi. Metalik Köpüklerin Geometrik Modellenmesi işleminde elde

edilen tomografik görüntüler University of Utah Scientific Computing and Imaging (SCI) Institute tarafından hazırlanan açık kaynak görüntü segmentasyon ve işleme programı Seg3D ve hacim işleme programı ImageVis3D yardımıyla STL formatına çevrilmiştir. Ardından Meshmixer ve 3-matic mesh programları vasıtasıyla numune üzerinden parça kesilerek sonlu elemanlar yönteminde kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Sonlu elemanlar analiz programı olarak Deform-3D kullanılmıştır.



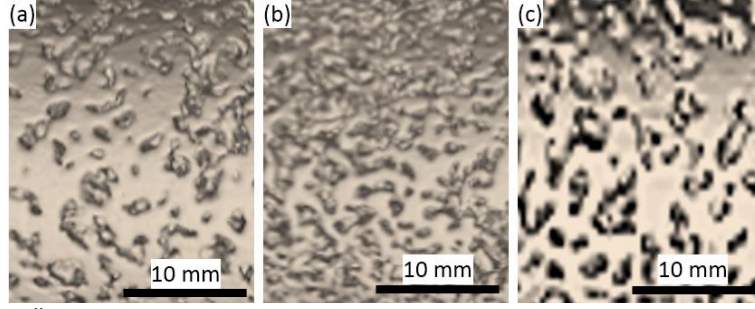
Şekil 1. Bilgisayarlı tomografi: a) YXLON marka Y.MU2000 DCT model cihaz, b) Yöntemin şematik gösterimi (Köll 2015) c) İş akış basamakları

3. Bulgular

3.1. Mikro-CT analizleri

Tomografik görüntüler 1024x1024x1024 çözünürlük değerinde olup görüntü işleme süreçleri ile sonlu elemanlar yönteminde kullanılmak üzere STL formatına dönüştürülmüştür. Uygulanan metotta geometri ayrıştırma için Seg3D programı kullanılmış ardından ImageVis3D ve Autodesk Meshmixer programları aracılığı ile sonlu elemanlar analizinde

kullanılmak üzere veriler alınmıştır. Veri gürültülerinin giderilmesine yönelik Materialise 3-Matic programı kullanılmıştır. Bu aşamada numuneleri basma testi simülasyonu için istenilen boyutlara sahip numune geometrilerine ulaşılmıştır. Elde edilen veriler sonlu elemanlar programına aktararak çözümleme aşamasına geçilmiştir. Şekil 2'de 3 farklı yapı karakteristiğine sahip mikro-tomografi görüntü örnekleri bulunmaktadır. Açık gözenekli metal köpük hücre topolojisi 1-2 / 2-3 / 3-4 mm boyutsal aralıklardaki 3 farklı yer tutucu tane yapısından kaynaklı olarak yapı karakteristiği açısından farklılık arz etmektedir.

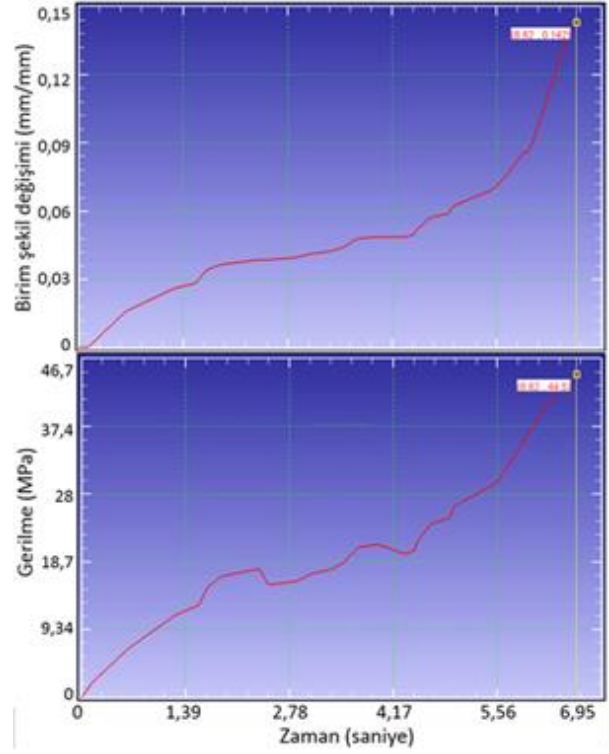


Şekil 2. Üç farklı yapı karakteristiğine sahip elde edilen mikro-tomografi görüntüleri

3.2. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Elde edilen 10x10x10 mm boyutlarında mikro-tomografi görüntü verileri Deform-3D entegrasyonu ile her bir deney numunesi için 0,01 mm/s hızında tek eksenli basma analizine tabi tutulmuştur. Modellemede numuneler tek eksenli bir yönde ankastre ve diğer yönde dış basma kuvveti etkisi altında hareketli kalıp koşullarında deformasyona zorlanmıştır. Program üzerinde tanımlama aşamasında sabit elastik modülü değeri kullanılmadan basma testi sonucu elde edilen gerilmeye karşı birim şekil değiştirme verileri adapte edilmiştir. Böylece malzemenin sadece lineer elastik davranışı değil deformasyonun tümüne bağlı mekanik özellikleri yüksek gerçeklikle analiz edilmiştir.

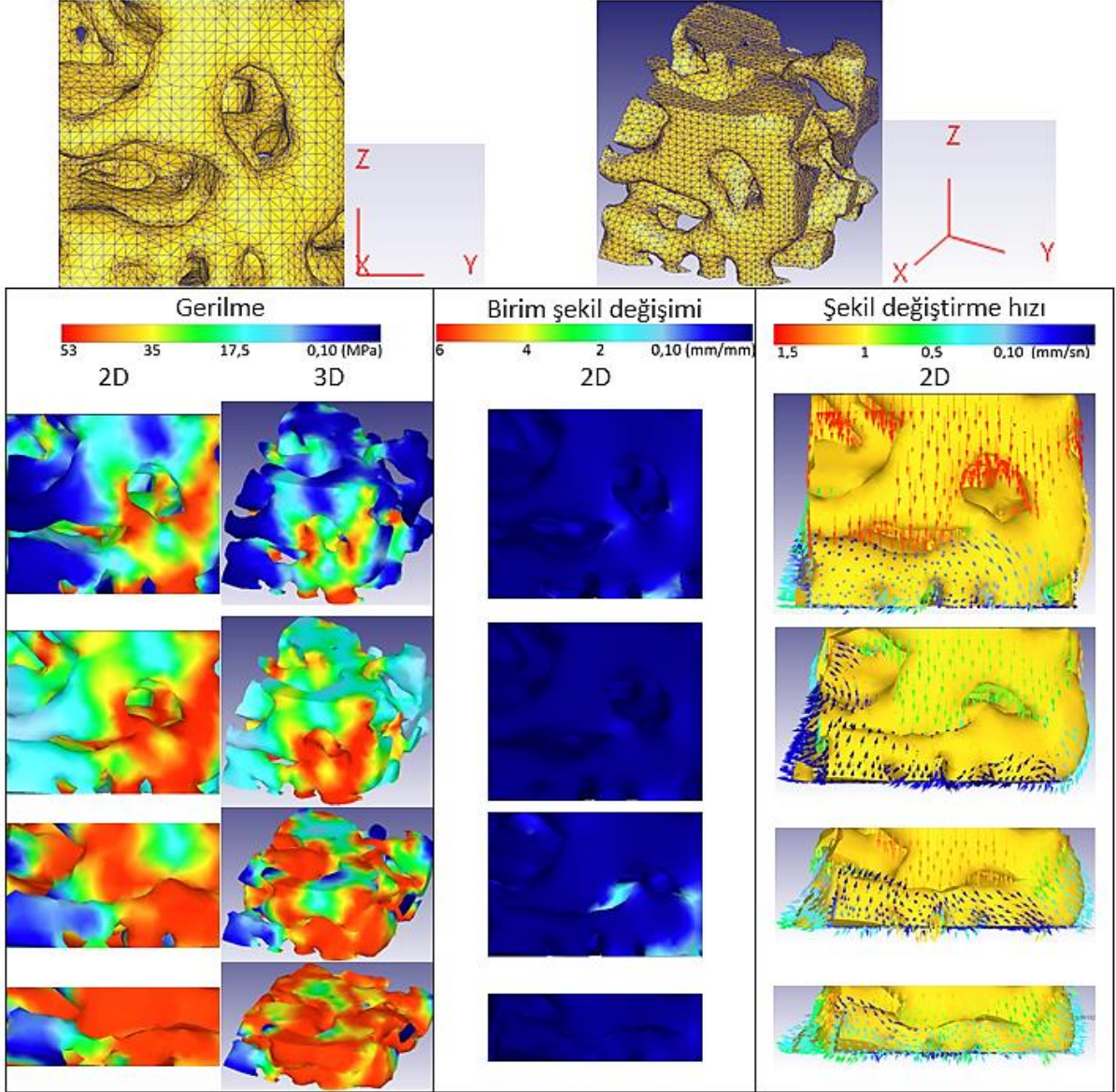
Şekil 3'de tek eksenli basma yükü altında zamana bağlı gerilme ile birim şekil değişimi grafikleri verilmiştir. Hücre duvarı düğüm noktaları verilerine göre meydana gelen gerilme-birim şekil değişimi değerlerinde metal köpük karakteristiğine uygun elastik bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgelerinden oluşan bir davranış izlenmektedir. Tek eksenli basma testi verileri değerlendirilirken gerilmenin eksi değerlerde olduğu bilinmelidir. Tek eksenli basma durumunda en düşük gözenek yapısına sahip (1-2 mm) numuneler için %50 deformasyonun altındaki Von Mises birim şekil değişimi kriterine göre yapılan analiz sonuçlarına göre maksimum birim şekil değişiminin metal köpük numunenin orta kısmında olduğu ve ortalama olarak $e = 0,01-0,5$ aralığında bir değer izlediği tespit edilmiştir.



Şekil 3. Tek eksenli basmada zamana bağlı gerilme ve birim şekil değişimi grafiği

Gözenek boyut aralığı arttıkça numunelerde birim şekil değişimi numunenin tamamına eş olarak yayılmaktadır. Bu davranış hücre boyunun büyümesine bağlı olarak duvar kalınlığı artışı sonucu meydana gelmektedir. Gözenek boyutu 2-3 mm aralığında olan numuneler için birim şekil değişimi numunelerin dış kısımlarına doğru yayılmaktadır. 1-2 ve 3-4 mm gözenek yapısına sahip numuneler 2-3 mm'e göre daha düşük gerilme değerlerinde hasarlanmaktadır. Şekil 4'de 3 mm gözenek yapılı numunelere ait sonlu eleman analiz görüntüleri verilmiştir. Tek eksenli basma analizinde meydana gelen deformasyon incelendiğinde hareketli plaka yönünden başlayan ve kademeli olarak numune kesiti boyunca ilerleyen bir şekil değişimi oluşmuştur. Gerilme değeri 53 ila 15 MPa, birim

şekil değişimi 1 mm/mm ve şekil değiştirme hızı 0,1 mm/sn değerlerinde bir deformasyon izlenmektedir.



Şekil 4. Takribi 3 mm gözenek yapılı numunelere ait sonlu eleman analiz görüntüleri

4. Tartışma ve Sonuç

Geçmiş modelleme çalışmaları içerisinde magnezyum ve alümina köpükler için gerçekleştirilen numerik analizde MSC Marc program sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmış daha uzak yakınlıkta uyumluluk elde edilmiştir (Miedzinska and Szymczyk 2010). Bir diğer çalışmada ise (Michailidis *et al.* 2009) açık hücreli

nikel köpük yapının deneysel verileri ile sonlu elemanlar yöntem verileri karşılaştırılmış yükleme altında yapı çökmelerinin hücre kenarlarına yakın bölgede geliştiği tespit edilmiştir. Yükleme altında oluşan gerilmenin ilk etapta bölgesel bükülme ardından kırılmalara yol açtığı belirtilmiştir.

Önceki çalışmalar mekanik davranışa yönelik noktasal analiz sonuçları içerirken mevcut çalışmada

Şekil 3'te sunmuş olduğumuz tek eksenli basmada zamana bağlı gerilme ve birim şekil değişimi grafiği ile yapısal bir analiz sağlanmıştır. Bu nedenle literatürde mevcut çalışmalardan farklı olarak Deform-3D analizinde deformasyon davranışının eğri verileri üzerinden analizinin daha üstün modelleme sonucu sağladığı tespit edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar Kocaeli Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri birimi (KOU-BAP, 2015/89) tarafından sağlanan finansman için teşekkür ederler.

5. Kaynaklar

Al-Athel, K.S., Aly, S.P., Arif, A.F.M., Mostaghimi, J., 2017. 3D modeling and analysis of the thermo-mechanical behavior of metal foam heat sinks, *International Journal of Thermal Sciences*, **116**, 199-213.

Bock, J. and Jacobi, A.M., 2013. Geometric classification of open-cell metal foams using X-ray micro-computed tomography, *Materials Characterization*, **75**, 35-43.

Doroszkó, M. and Seweryn, A., 2015. Modeling of the tension and compression behavior of sintered 316L using micro computed tomography, *Acta Mechanica et Automatica*, **9(2)**, 70-74.

Kachelrieß, M., 2008. Micro-CT Molecular Imaging I. Handbook of Experimental Pharmacology. Springer, 23-52.

Köll, J., 2015. Modeling of Rigid Foams. Doctoral Thesis, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 40.

Kowaluk, T., Wozniak, A., 2017. A new threshold selection method for X-ray computed tomography for dimensional metrology, *Precision Engineering*, **50**, 449-454.

Larner, M., Acker J., Dávila L.P., 2014. The random porous structure and mechanical response of lightweight aluminum foams, *Materials Research Society*, **1662(1)**, 201-210.

Li, Y., Xia, X.L., Sun, C., Ai, Q., Liu, B., Tan, H.P., 2018. Tomography-based analysis of apparent directional spectral emissivity of high-porosity nickel foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **118**, 2018, 402-415.

Luetje, M., Wicke, M., Bacaicoa, I., Brueckner-Foit, A., Geisert, A., Fehlbier, M., 2017. 3D characterization of fatigue damage mechanisms in a cast aluminum alloy using X-ray tomography, *International Journal of Fatigue*, **103**, 363-370.

Michailidis, N., Stergioudi, F., Omar, H, Tspas, D.N., 2009. Investigation of the mechanical behavior of open-cell Ni foams by experimental and FEM procedures, *Advanced Engineering Materials*, **10(12)**, 1122-1126.

Miedzinska, D., Szymczyk, W., 2010. Numerical and experimental study of real foam microstructure models, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, **10(2)**, 309-314.

Pérez, L., Lascano, S., Aguilar, C., Domanci, D., 2015. Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young's modulus, *Materials Design*, **83**, 276-283.

Wellington, S.L., Vinegar, H.J., 1987. Tomographic imaging of three-phase flow experiments, *Review of Scientific Instrumentation*, **58(1)**, 96-107.

Yu, J., Lynn, R., Tucker, T., Saldana, K., Kurfess, T., 2017. Model-free subtractive manufacturing from computed tomography data, *Manufacturing Letters*, **13**, 44-47.