

SEÇİCİ LAZER ERGİTME METODU İLE COCR ALAŞIMI KULLANILARAK ÜRETİLEN İSKELE YAPILARININ MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**Özgün Ceren AKBAY¹**¹İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

ORCID NO: 0000-0002-7839-2484

Erkan BAHÇE¹¹İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

ORCID NO: 0000-0001-5389-5571

CebraİL ÖLMEZ²²Ostim Teknik Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu, Ankara, Türkiye

ORCID NO: 0000-0001-9111-0325

ÖZET

Vücuttaki kullanım yerlerine bağlı olarak implant üretiminde kullanılan malzeme türü değişmektedir. CoCr alaşımı yüksek dayanım, aşınma ve korozyon direnci gibi avantajlarından dolayı kalça implantlarında oldukça sık kullanılmaktadır. Gelişen eklemli imalat teknolojisi sayesinde farklı yoğunluklara sahip gözenekli kalça implantları üretilebilmektedir. Üretilen gözenekli kalça implantları daha düşük elastisite modülüne sahip olduğundan kemik ve implant arasında oluşan gerilmeler azaltılabilmektedir ve böylelikle implant üzerinde meydana gelen gevşeme, kırılma, deformasyon gibi problemler ortadan kaldırılabilir. Tasarlanan iskelelerin, yeni oluşturulan hücrelerin iç mimarisini desteklemesi gerekir. Bu nedenle vücutta kullanılan iskele yapılar kemiğin mekanik dayanımını korumak zorundadır. Bir kemik iskelesinin elastik modül, basınç ve gerilme dayanımı, maksimum gerilme ve bükülme modülü gibi mekanik özellikleri kemiklerin ve sert bağ dokularının yerine başarıyla geçebilecek şekilde olmalıdır ve hastanın kullanımında ya da düzenli faaliyetleri sırasında çökmemelidir. Bu yüzden yapılan bu çalışmada farklı birim hücre modelleri kullanılarak, hücre yoğunluğu ve şekil geometrisi belirlenip basma testine tabi tutulmuştur. Yapılan testler sonucunda iskeleler boyunca deformasyonun nasıl dağıldığı araştırılmış, değişen hücre modellerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Mekanik testler sonucunda iskele yapılarında farklı porozite oranları ve birim hücreler kullanıldığı için modeller birbirinden farklı mekanik özellikler göstermiştir. İskele modellerde maksimum gerilme Body Diagonalw With Nodes modelinde 247,58 MPa olarak ölçülürken, Dode Thick modelinde 240.7 MPa, Dode Thin modelinde 227.19 MPa olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Gözenekli yapı, Mekanik Test, Ansys Analiz**ABSTRACT**

The type of material used in implant production changes depending on the places of use in the body. CoCr alloy is frequently used in hip implants due to its advantages such as high strength, wear and corrosion resistance. Thanks to the developing additive manufacturing technology, porous hip implants with different densities can be produced. Since the porous hip implants produced have a lower modulus of elasticity, the stresses between the bone and the implant can be reduced, and thus problems such as loosening, fracture and deformation on the implant can be eliminated. The designed scaffolds must support the internal architecture of the newly created cells. For this reason, the scaffolding structures used in the body must maintain the mechanical strength of the bone. The mechanical properties of a bone scaffold, such as elastic modulus, compressive and tensile strength, maximum tensile and flexural modulus, should be such that they can successfully replace bones and hard connective tissues, and should not collapse during use or regular activities of the patient. Therefore, in this study, using different unit cell models, cell density and shape geometry were determined and subjected to compression test. As a result of the tests, it was investigated how the deformation was distributed along the scaffolds, and the results of the changing cell models were compared. As a result of the mechanical tests, different porosity ratios and unit cells were used in the scaffold structures, and the models showed different mechanical properties. Maximum stress in the scaffold models was measured as 247.58 MPa in the Body Diagonalw With Nodes model, while it was 240.7 MPa in the Dode Thick model and 227.19 MPa in the Dode Thin model.

Keywords: Porous structure, Mechanical Test, Ansys Analysis

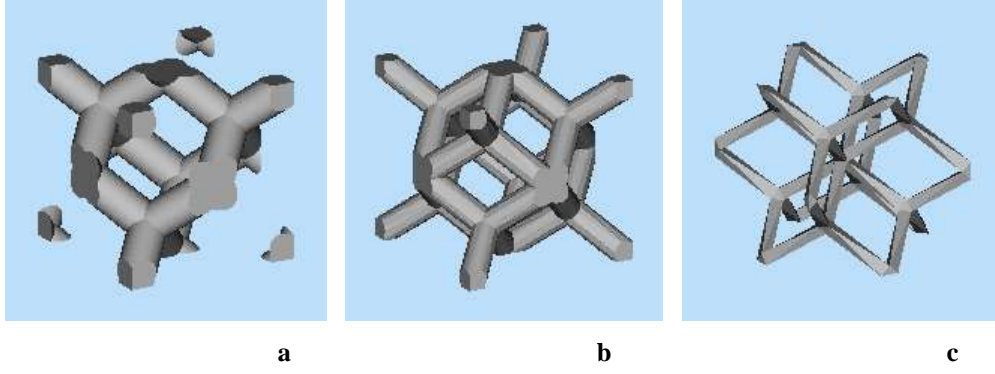
1.GİRİŞ

İskele üretimi ile ilgili olarak farklı alanlarda mikro yapı ve mekanik özellikler arasındaki ilişki esastır ve genellikle yenilikçi imalat yöntemlerini içerir. Son zamanlarda sıklıkla kullanılan ve yenilikçi imalat yöntemleri ile üretilebilen iskele yapılar, istenen tasarımda ya da mekanik performanslara sahip özelliklerde karşımıza çıkmaktadır. Örnek olarak kişiye özel biyomedikal implantların tasarımında veya doku oluşumu için kullanılan cihazlarda iskele yapılar çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda da iskele yapıların üretiminde CoCr ve alaşımları gibi metaller yaygın olarak kullanılmaktadır. CoCr alaşımları, mükemmel biyouyumlulukları, iyi korozyon direnci ve yüksek mukavemetleri nedeniyle genellikle ortopedik ve dental implantlarda sıklıkla kullanılmaktadır [1-3]. Günümüzde nüfusun yaşlanması, ekstrem sporların yaygınlaşması, hastalıklar, kazalar vb. olumsuz durumlar sonucunda implant değiştirme maliyetleri ve revizyon cerrahisinin bir sonucu olarak implant ömrünü arttırmak ve optimize etme ihtiyacı doğmuştur. Bu yüzden insan dokularına yakın mekanik özelliklere sahip iskeleler kullanılırsa, uzun ömürlü implantlar tasarlanabilir [4]. Bu konuda literatürde yapılan bazı çalışmalara bakılırsa; Geng vd. Rhombic Dodacahedron ve Body Cubic Center modellerinin mekanik özelliklerini karşılaştırıp farklı tipteki birim hücrenin farklı kırılma özelliklerine sahip olduğunu ve dikmelerin çapı arttıkça iskelelerin çekme mukavemetinin arttığı sonucuna varmışlardır [5]. Hamza vd. Gyroid Cellular hücre modeline sahip iskele yapısının kırılma tokluğunu ve çekme mukavemetini deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçlar, düşey yapı yönündeki numunelerde çekme, akma dayanımı ve uzamanın yatay yöndeki numunelere göre daha yüksek olduğunu göstermişlerdir [6]. Yan vd. SLM ile üretilen Gyroid Cellular kafes yapılarının üretilirliğini ve performansını değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, daha küçük birim hücre boyutlarına sahip iskele yapılarının içindeki dikmelerin daha yüksek nispi yoğunluklara sahip olduğunu ve iskele yapılarının birim hücre boyutundaki artışla hem akma mukavemetlerinin hem de Young modülünün azaldığı yönünde olmuştur [7,8]. Ma vd. Seçici Lazer Ergitme metodu ile farklı hacim yoğunluklarına sahip Gyroid Cellular modelinde iskele yapıları üretmişlerdir. Yarı statik sıkıştırma testleri, SLM kullanılarak üretilen 316L Gyroid Cellular kafes yapıları yüksek derecede tokluk göstermiştir [9]. Babae vd. Rhombic Dodacahedron iskele yapılarının mekanik özelliklerini analiz edip, elastik modül, akma dayanımı ve bağıl yoğunluk arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir [10]. Xiao vd. Rhombic Dodacahedron kafes yapılarının yük taşıma kapasitesini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlar hem yarı statik hem de dinamik yüklemelerde 45° boyunca kesme kırılması göstermiştir [11-13]. Li vd. Sonlu elemanlar modellemesi yoluyla mikro iskeleler tasarlayıp yapısal olarak optimize etmişlerdir. Deneysel testlerden, %10-30 'luk arasında bağıl yoğunluğa sahip iskelelerin enerji absorpsiyonunun bağıl yoğunluğa bağlı olarak artarak değiştiği sonucuna varmışlardır [14]. Choy vd. Seçici lazer ergitme metodu ile Ti₆Al₄V alaşımından üretilen kübik kafes ve petek kafes yapılarının mekanik özelliklerini çeşitli payanda çapı ve bağıl yoğunluklara bağlı olarak nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Test sonuçları, kafes yapılarının nispi yoğunluğunun mekanik özellikler üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [15]. Lin vd. farklı payanda çapına sahip bir dizi ağısı kabuk yapısını inceleyip ve artan dikme çapı ile mekanik özelliklerin değişimi üzerine çalışmışlardır [16].

2.MATERYAL METOT

2.1 Tasarım

Yapmış olduğumuz çalışmada bir bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak modeller tasarlandı ve STL formatında kaydedildi. Üç boyutlu baskı işleminden önce uygun formatta kaydedilen modeller, bir dilimleyici yazılımına aktarıldı. Böylelikle üç boyutlu nesne belirlenen katman kalınlığına göre dilimlenerek, üç boyutlu yazıcının objeyi üretirken ihtiyaç duyduğu G-kodları elde edildi. Bu kodlar sayesinde modelin yazıcı tablası üzerindeki pozisyonu, yönü, sıcaklığı ve baskı hızı ayarlandı. Literatür taramalarından yola çıkarak modellerdeki et kalınlığının minimum 0,5 mm olması gerektiğinden kalınlık 1 mm olarak tercih edildi. Tasarlanan modelde parçaların birbiriyle kesişen köşelerinin çok olması bağlanma kapasitesini ve üretimi zorlaştırdığından model olarak daha sade olan Body Diagonals With Nodes, Dode Thick ve Dode Thin birim hücre modelleri kullanıldı. (Şekil.1) Tasarlanan iskelelerin ölçüleri 10x10x10 mm olarak belirlendi ve tasarım yapılırken birim hücrelerin üzerine 1x1 cm genişliğinde, 1 cm kalınlığında plakalar yerleştirilmiştir ve üretim yapılmıştır.



Şekil 1: İskele Tasarımında Kullanılan Birim Hücreler.

a) Body Diagonals With Nodes b) Dode Thick c) Dode Thin

2.2 Üretim

Bilgisayar Destekli Tasarım yazılımı kullanılarak tasarlanan Body Diagonal With Nodes, Dode Thick ve Dode Thin birim hücre modeline sahip iskeleler STL formatında kaydedilip Concept Laser marka metal yazıcıya aktarılmıştır. (Şekil.2) Bu çalışma kapsamında lattice yapılarının üretiminde kullanılan malzeme CoCr alaşımıdır. CoCr tozunun parçacık boyutu 15-50 μm 'dir. CoCr alaşımına ait özellikler mekanik özellikler Tablo.1'de verilmiştir. Gözenekli yapıların üretiminde Tablo.2 'de verilen işleme parametrelerine göre üretim gerçekleştirildi.

Tablo.1 CoCr Alaşımına ait Mekanik Özellikler

Özellik	Değer
Elastisite Modülü	240 Gpa
Çekme Mukavemeti	900-1540 Mpa
Tokluk	-100 MPa
Akma Dayanımı	450 Mpa
Yorulma Dayanımı	310 Mpa

Tablo.2 İşleme Parametreleri

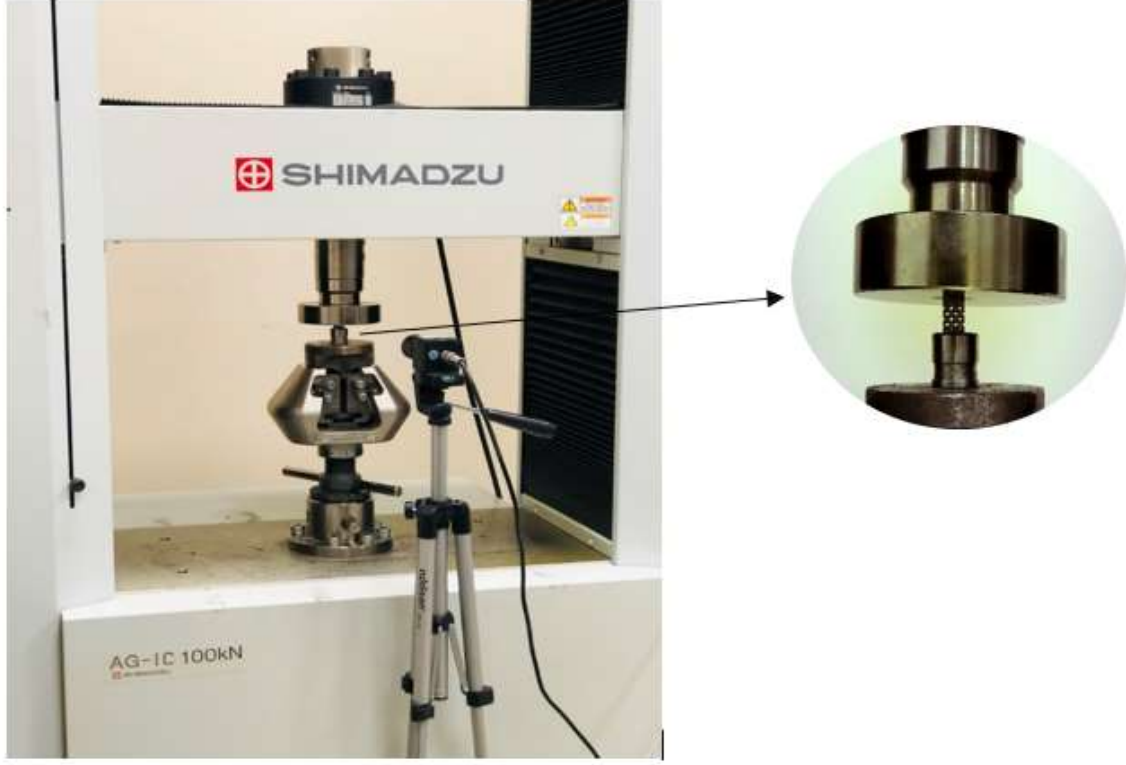
Özellik	Değer
Tabaka Kalınlığı (Minimum)	15 – 30 μm
Lazer Sistem	Fiber Lazer
Odak Çapı	50 μm
Âtıl Gazlar	Nitrojen veya Argon
Maksimum Tarama Hızı	7 m/s



Şekil.2 Concept Laser 3 Boyutlu Metal Yazıcı

2.3 Mekanik Test

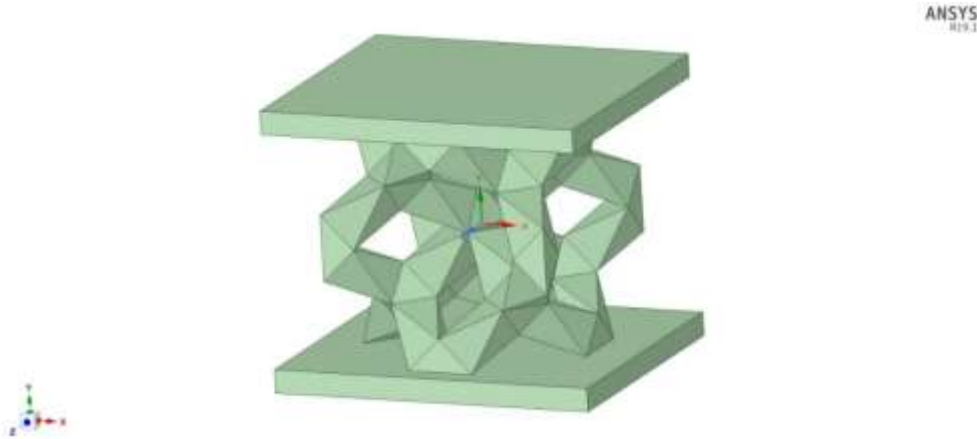
Test uygulanacak iskeleler basma cihazında bulunan iki plaka arasına yerleştirilip, iskelelerin ezilmesini sağlayan cihaz tarafından kuvvet uygulanmıştır. Basma testi yapılan numuneler uygulanan kuvvet ile aynı yönde kısılır ve kuvvete dikey yönde genişleme eğilimi gösterir [17]. Bu çalışmada üretilen iskele modeller üzerinde basma testleri yapılmıştır. Tüm basma testleri Shimadzu AG-IC cihazında ve ASTM standartlarını mümkün olduğunca yakın bir şekilde tekrarlamak için yapıldı. Deformasyonun sağlanması için veri hızı 0,1 m/s iken, makinenin rampa hızı 0.001778 m/s olarak ayarlandı. Testler artan yer değiştirme ile kuvvet azalana kadar yürütülmüştür. İskelelerin yanal yönde serbestçe genişlemesine izin veren temas yüzeylerindeki sürtünme kuvvetini en aza indirmek için kavramaya düz bir plaka yerleştirildi. Kavrama, küresel bir mesnet ile kendi kendini hizalayan bir yükleme bloğuna bağlandı ve modeller yer değiştirmenin düzgün bir şekilde uygulanmasını sağlamak için dikkatlice plakanın ortasına yerleştirildi. Kafes deformasyonu, modeller üzerindeki önceden tanımlanmış noktaların yer değiştirmelerini izlemek için kullanılan bir video gösterge sistemi kullanılarak karakterize edildi. Ölçülen yer değiştirmeler daha sonra modellerin eksenel ve yanal şekil değiştirmesini hesaplamak için kullanılmıştır. Veriler dışa aktarılıp ve Microsoft Excel'de analiz edilmiştir. Test cihazının görseli ve basma çeneleri arasına yerleştirilmiş örnek model Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil.3 Basma test cihazı ve örnek modelin test görüntüsü.

2.4 Birim Hücreler İçin Sonlu Elemanlar Analizi

Çalışma kapsamında farklı geometrilerde hazırlanan hücresel birimler için sonlu elemanlar analizi yapıp sonuçları değerlendirilmiştir. CAD modeli hazırlanmış birim hücrelerin sonlu elemanlar metodu kullanılarak mesh yapıları belirlenmiştir. Mesh yapısı olarak hexahedral yapı modeli kullanılmıştır. Mesh atılma işlemi bittikten sonra analiz boyunca kullanılacak parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler tasarım değişkenlerini, uygulanacak kuvvetin büyüklüğünü, malzeme türünü ve sınır koşullarını içermektedir. Analiz işlemleri boyunca birim hücrelerin üzerine 1x1 cm genişliğinde, 1 cm büyüklüğünde plakalar yerleştirilmiştir ve alt plaka sabitlenmiştir. Örnek birim hücre üzerinde yapılan plaka yerleştirmelerine ait görsel Şekil 4’de verilmiştir.



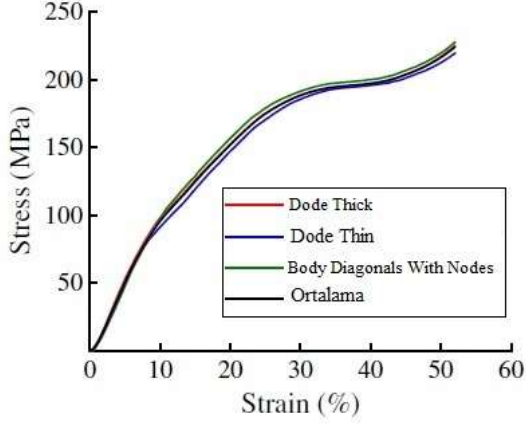
Şekil 4: Alt ve üst yüzeyine plaka yerleştirilmiş örnek birim hücre modeli.

3.TARTIŞMA VE SONUÇLAR

3.1 Mekanik Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

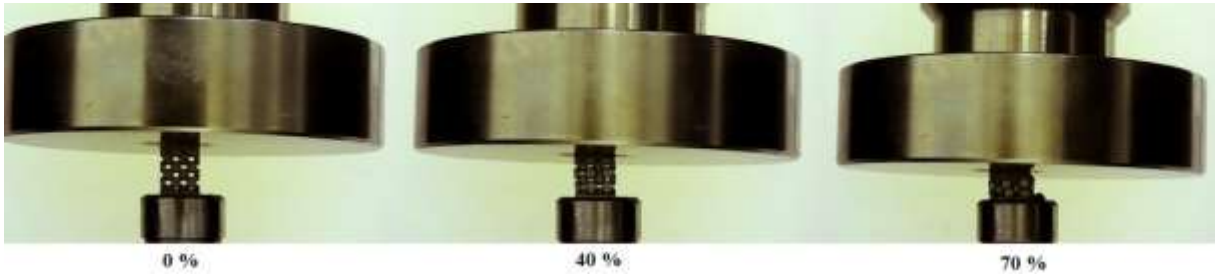
Sonuçları doğrulamak için üç numuneden oluşan her grupta tekrarlanan deneyler yapılmıştır ve elde edilen eğriler kabul edilebilir tekrarlanabilirlik göstermiştir. Tüm gerilim-gerinim eğrileri benzer eğilim göstermiştir ve

her eğri dört deformasyon aşamasına ayrılmıştır: elastik deformasyon, plastik akma, sabit gerilim ve yoğunlaşma. Basma testinin başlangıcında, gerilme-gerinim eğrileri içbükey yönde olmuştur. Bu durumun nedeni, iskele yapı örneğinin üst ve alt yüzeyi olabilir. Basma testinin başlamasıyla, gerilme-gerinim eğrileri doğrusallık aşamasına girip kafes hasar görmeye başlamıştır. Son olarak tüm yapı çökmüştür, dikmeler birbirine bastırılmış bir şekilde yoğunlaşmıştır ve gerilim-gerinim eğrileri keskin bir şekilde yükselme eğilimi göstermiştir. İskele yapılarının mekanik test sonucu gerilim-gerinim eğrileri Şekil 5'de gösterilmektedir.



Şekil 5: Modellere ait stress-strain eğrisi

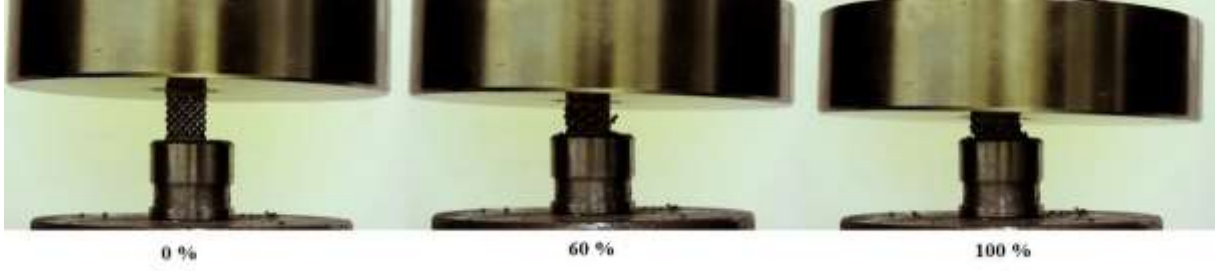
Mekanik testler sonucunda iskele yapılarda farklı porozite oranları ve birim hücreler kullanıldığı için modeller birbirinden farklı mekanik özellikler göstermiştir (Şekil.6) İskele modellerde maksimum gerilme Body Diagonals With Nodes modelinde 247,58 MPa olarak ölçülürken, Dode Thick modelinde 240.7 MPa, Dode Thin modelinde 227.19 MPa olarak ölçülmüştür.



a) Body Diagonals With Nodes modeli deformasyon aşamaları



b) Dode Thick modeli deformasyon aşamaları

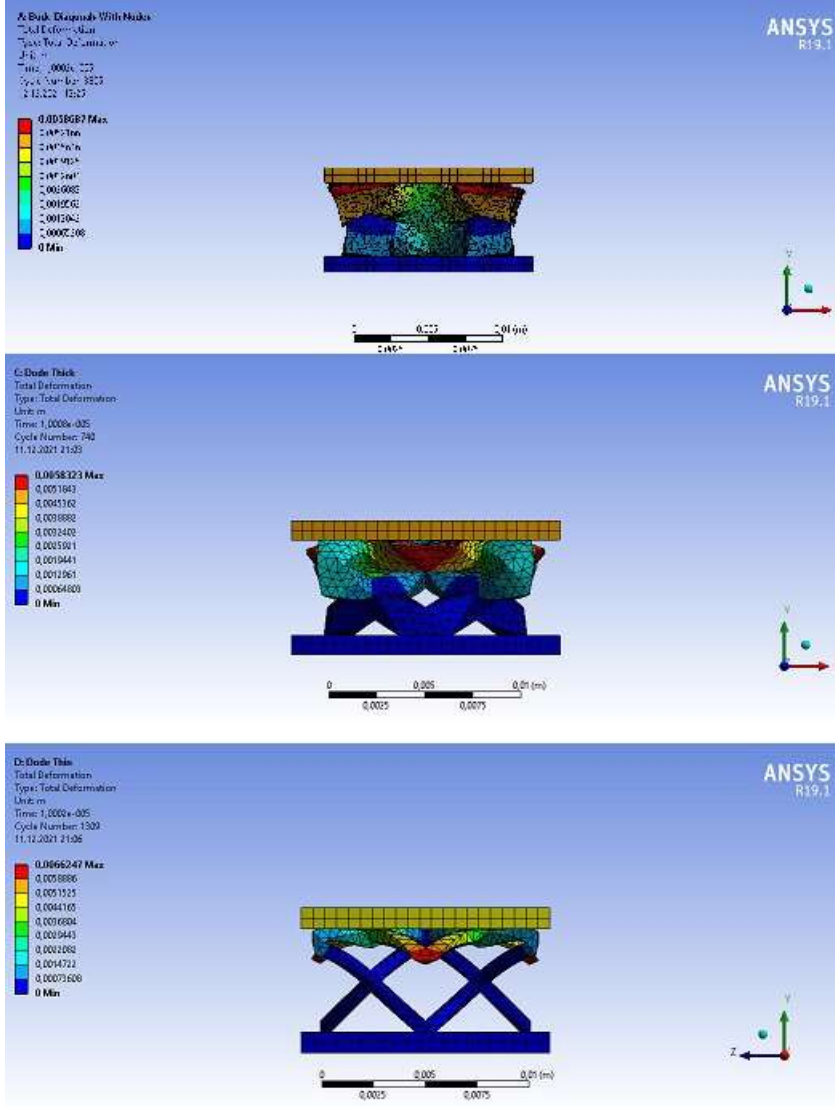


c) Dode Thin modeli deformasyon aşamaları

İlk %10'luk gerinim sırasında iskelelerin kafes bloklarının kenarı boyunca bir yarıçap oluşturarak yanal olarak genişlediği gözlemlenmiştir. Bu davranış lineer-elastik bölge ile ilgilidir. İskelelerin plastik bölgesi, kafes birim hücrelerinin üst ve alt sırasındaki büyük deformasyonlarla yaklaşık %10 gerinimde başlamıştır. Yapının ortasındaki kafes sıraları neredeyse hiç deforme olmamış durumdadır. Daha fazla sıkıştırma, iskele boyunca kırılma ile sonuçlanan daha yüksek plastik deformasyona yol açmıştır. %40'lik gerilmeden itibaren, iskeledeki dikmelerin gevrek kırıkları belirgindir ve giderek daha fazla birbirleri ile olan bağlantısını kaybetmişlerdir. %30-50 gerinimde kafes yapısının hemen hemen her yatay sırası, birbiriyle bir araya gelene kadar çökerek, rastgele bir yığın oluşturmuştur.

3.2 Birim Hücreler İçin Sonlu Elemanlar Analizinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde sunulan sonlu elemanlar analizi, deneysel sonuçların açıklamasını ve tartışılmasını kolaylaştırmak için yapısal davranışın (gerilme ve gerinimin esas olarak yoğunlaştığı yer) niteliksel bir haritasını sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. İskele yapılarına aksel z yönünde 100 MPa'lık bir kuvvet etki ederek ANSYS ile analiz yapılmıştır. Farklı dikme çapına sahip yapıların maksimum gerilmesinin farklı değerlere ancak aynı konumlara sahip olduğunu göstermektedir. İskele yapılarının maksimum Von Misses gerilimi sırasıyla 62.38, 41.93 ve 33.26 MPa'dır (Şekil 7). Farklı dikme çaplarına sahip yapılar aynı hassas konuma sahiptir, diğer bir deyişle farklı payanda çaplarına sahip yapılar aynı kırılma konumuna sahiptir. Bu nedenle, iskele yapıları farklı yükleme kapasitesine ancak aynı deformasyon moduna sahiptir.



Şekil 7. Birim hücreler için sonlu elemanlar analizi

4.GENEL SONUÇLAR

SLM metodu ile CoCr tozundan üretilen kafes yapıları, sıkıştırma testi sırasında gevrek kırılma mekanizması göstermiştir. Kafes yapısı boyunca gevrek kırılmalar ve yapı ile bağlantılarını kaybeden dikmeler nedeniyle sıfır gerilime keskin bir düşüş bile gözlemlendiği durumlar oluşmuştur. Isıl işlem, kafes yapılarının mekanik tepkisini iyileştirebilir ve stresin sıfır seviyeye düşmesini önleyebilir. Hafif iskele tasarımları seçici lazer ergitme imalat yöntemi ile kolaylıkla üretilebilir. Bir iskele malzemenin akma dayanımının, tek tek kabuk akma dayanımı ile üst üste yerleştirilebileceği gösterilmiştir.

REFERANSLAR

- [1] M. Zhu, G. Xu, M. Zhou, Q. Yuan, J. Tian, and H. Hu, "Effects of tempering on the microstructure and properties of a high strength bainite rail steel with good toughness," *Metals*, vol. 8, no. 7, p. 484, 2018.
- [2] E. Fiorese, F. Bonollo, and E. Battaglia, "A tool for predicting the effect of the plunger motion profile on the static properties of aluminium high pressure die cast components," *Metals*, vol. 8, no. 10, p. 798, 2018.
- [3] G. Jeon, K. Kim, J.-H. Moon, C. Lee, W.-J. Kim, and S. Kim, "Effect of Al 6061 alloy compositions on mechanical properties of the automotive steering knuckle made by novel casting process," *Metals*, vol. 8, no. 10, p. 857, 2018.

- [4] A. Deing, B. Luthringer, D. Laipple, T. Ebel, and R. Willumeit, "A porous TiAl6V4 implant material for medical application," *International journal of biomaterials*, vol. 2014, Article ID 904230, 8 pages, 2014.
- [5] X. Geng, Y. Lu, C. Liu, W. Li, Z Yue, *Int. J. Solids Struct.* 2015, 21, 168.
- [6] Alsalla, H., Hao, L., & Smith, C. (2016). Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *Materials Science and Engineering: A*, 669, 1-6.
- [7] Yan, C., Hao, L., Hussein, A., & Raymont, D. (2012). Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 62, 32-38.
- [8] Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Bubb, S. L., Young, P., & Raymont, D. (2014). Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 856-864.
- [9] Ma, S., Tang, Q., Feng, Q., Song, J., Han, X., & Guo, F. (2019). Mechanical behaviours and mass transport properties of bone-mimicking scaffolds consisted of gyroid structures manufactured using selective laser melting. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 93, 158-169.
- [10] Babaee, S., Jahromi, B. H., Ajdari, A., Nayeb-Hashemi, H., & Vaziri, A. (2012). Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron cellular structures. *Acta Materialia*, 60(6-7), 2873-2885.
- [11] Xiao, L., Song, W., Wang, C., Liu, H., Tang, H., & Wang, J. (2015). Mechanical behavior of open-cell rhombic dodecahedron Ti-6Al-4V lattice structure. *Materials Science and Engineering: A*, 640, 375-384.
- [12] Xiao, L., Song, W., Wang, C., Tang, H., Liu, N., & Wang, J. (2016). Yield behavior of open-cell rhombic dodecahedron Ti-6Al-4V lattice at elevated temperatures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 115, 310-317.
- [13] Xiao, L., Song, W., Wang, C., Tang, H., Fan, Q., Liu, N., & Wang, J. (2017). Mechanical properties of open-cell rhombic dodecahedron titanium alloy lattice structure manufactured using electron beam melting under dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*, 100, 75-89.
- [14] Li, X., Tan, Y. H., Willy, H. J., Wang, P., Lu, W., Cagirici, M., ... & Ding, J. (2019). Heterogeneously tempered martensitic high strength steel by selective laser melting and its micro-lattice: Processing, microstructure, superior performance and mechanisms. *Materials & Design*, 178, 107881.
- [15] Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., & Wei, J. (2017). Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials & Design*, 131, 112-120.
- [16] Lin, K., Gu, D., Hu, K., Yang, J., Wang, H., Yuan, L., ... & Meng, L. (2021). Laser powder bed fusion of bio-inspired honeycomb structures: Effect of twist angle on compressive behaviors. *Thin-Walled Structures*, 159, 107252.
- [17] Öztürk, B. (2020). 3 boyutlu yazıcı ile üretilen sandviç yapıların statik ve dinamik yük altında davranışlarının incelenmesi (Master's thesis, Bursa Teknik Üniversitesi).