

Kafes Yapılarda Ek Dikmelerin Mekanik Davranışa Etkisi

Mehmet Çağrı TÜZEMEN

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,
Nevşehir/Türkiye. ORCID: 0000-0002-1746-2864

Sorumlu Yazar: cagrituzemen@nevsehir.edu.tr

Geliş tarihi:18.05.2024

Kabul tarihi:10.06.2024

Özet

Bu çalışmada kafes yapıları oluşturan birim hürelere eklenen ek dikmelerin yapının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Birim hücre yapısı olarak piramit yapı seçilmiş ve bu yapıya yanıl ve çapraz destek dikmeler eklenerek farklı yükler altındaki davranışları karşılaştırılmıştır. Modellenen kafes yapılara sonlu elemanlar yöntemiyle çekme, eğme ve burulma momenti yükleri uygulanmıştır. Analizlerde malzeme olarak eklemeli imalatta da sıklıkla kullanılan Inconel 718 kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda piramit yapıya çapraz desteklerin eklenmesi ile çekme yükü altında en düşük gerilmeler elde edilirken, yanıl desteklerin eklenmesiyle de eğme ve burulma yükleri altında en düşük gerilmeler elde edilmiştir. Ancak yanıl ve çapraz dikmelerin eklenmesiyle kafes yapıda meydana gelen kütle artışlarının hesaba katılması gerekliliği unutulmamalıdır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Inconel 718, Mekanik Özellikler, Sonlu Elemanlar Analizi

Effect of Additional Struts on Mechanical Behavior in Lattice Structures

Abstract

In this study, the effect of additional struts added to the unit cells forming lattice structures on the mechanical properties of the structure was examined. Pyramid structure was chosen as the unit cell structure and lateral and cross support struts were added to the structure and its behavior under different loads was compared. Tensile, bending, and torsional moment loads were applied to the modeled lattice structures using the finite element method. Inconel 718, which is also frequently used in additive manufacturing, was used as the material in the analysis. As a result of the analysis, the lowest stresses were obtained under tensile load by adding cross struts to the pyramid structure, while the lowest stresses were obtained under bending and torsion loads by adding lateral struts. However, it should not be forgotten that the mass increases that occur in the lattice structure with the addition of lateral and cross struts must be considered.

Keywords: Additive Manufacturing, Inconel 718, Mechanical Properties, Finite Element Analysis



Bu makale Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) License ile lisanslanmıştır.

1. GİRİŞ

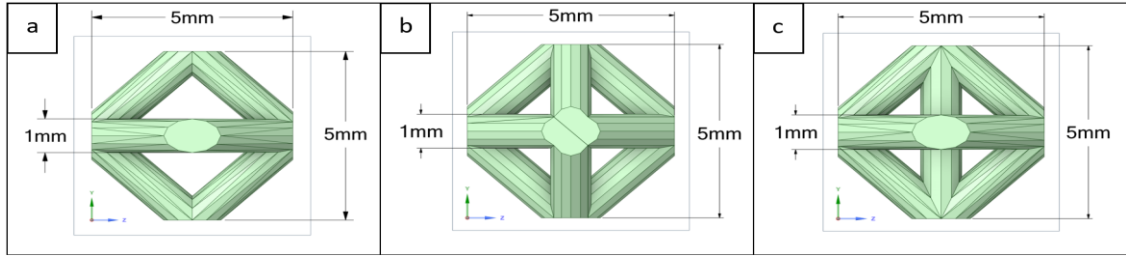
Eklemeli imalat üç boyutlu modelleme ile en basitinden en karmaşığına kadar çok çeşitli yapıların üretilmesinde kullanılan bir üretim yöntemidir. Karmaşık yapılar üretme, tasarım özgürlüğü, hızlı prototip oluşturabilmesi ve atıkların en aza indirilmesi eklemeli imalatın avantajları olarak sıralanabilir [1]. Eklemeli imalat ile üretilen parçalar havacılık-uzay, biyomedikal, savunma sanayi, otomotiv endüstrisi gibi farklı uygulama alanları bulabilmektedir [2–5]. Farklı üretim teknikleri de bulunmakla birlikte temelde eklemeli imalat, malzemelerin katman katman üst üste basılması işlemidir. Eklemeli imalat, sadece prototiplerle sınırlı kalmayıp, uygun maliyetli ürünler, güçlü ve hafif parçalar, esnek tasarımlar, malzeme israfının en aza indirilmesi, erişim kolaylığı, hızlı tasarım ile üretimler ve daha birçok avantaj sunması nedeniyle küçük ölçekli bir imalat olarak da kullanılmaktadır [6].

Kafes yapılar, yüksek miktarda gözeneklilik içeren, bir veya daha fazla tekrarlanan birim hücreye dayanan topolojik olarak sıralanmış yapılardır [7,8]. Eklemeli imalatta hafif parçalar üretmek veya var olan parçanın hafifletilmesini sağlamak için kafes yapılar sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yapılar tasarım özgürlüğü, çok fonksiyonluluğu, tekdüzeliği ve tekrarlanabilirliği ile öne çıkmaktadır [1]. Kafes yapıları mekanik tepkisi, morfolojisi ve geometrik dağılımına göre sınıflandırılabilir [9]. Metal eklemeli imalatta en çok titanyum, alüminyum, bakır, nikel, paslanmaz çelik alaşımlar gibi malzemelerin kullanıldığı söylenebilir [10,11]. Nikel bazlı kafes malzemeleri, yüksek sıcaklık direnci, korozyon direnci, hafiflik ve yüksek mukavemet gibi olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir ve bu da onları çeşitli hafif yapısal malzemeler üretmeye uygun hale getirir [12]. Banati ve ark. [13] yaptıkları çalışmada Inconel 718 alaşım tozları ile ürettikleri dikme tabanlı kafes yapılarda mikroyapının etkisini incelemişlerdir. Basma testleri sonucunda oluşan gerilmeleri haritalandırmak için sonlu elemanlar analizi yönteminden yararlanmışlardır. Sonuçta kafes yapıdaki değişikliklerin, temel malzemenin mikro yapısına ve takviye kafes alanlarının boyutuna büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermişlerdir. Seremet ve Babacan [14] seçici lazer ergitme ile üretilen ek dikmelere sahip kafes yapılarının basma yükü altındaki mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Ek dikmelere sahip numunelerin diğerlerine göre %18 ile %23 arasında daha yüksek özgül mukavemet gösterdiklerini bildirmişlerdir.


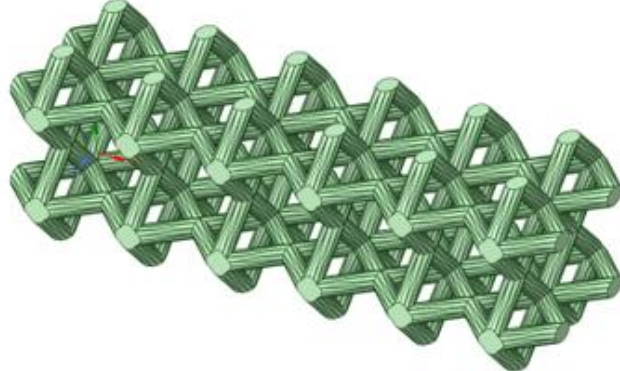

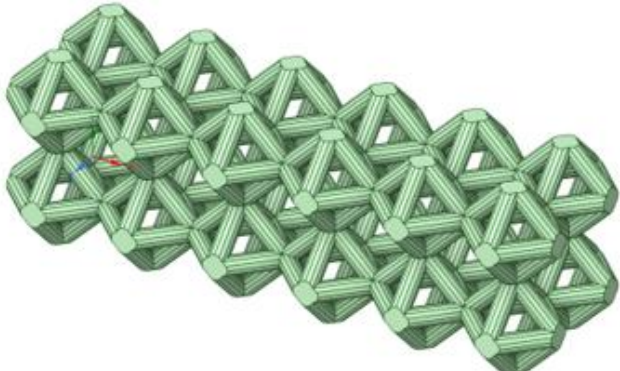

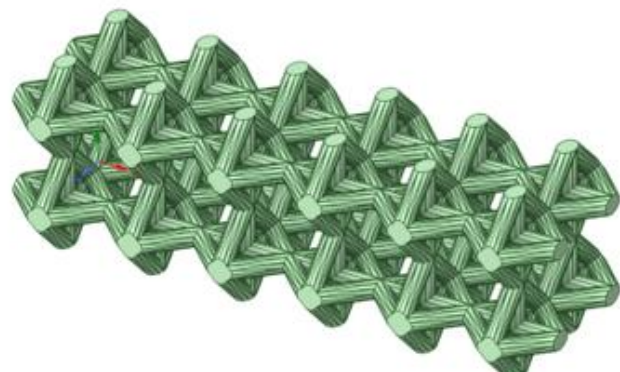
Birim hücre yapılarına ek dikmelerin eklenmesinin kafes yapılardaki deformasyon yapılarını değiştirdiğini ve yapının mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabileceğini gösteren pek çok çalışma bulunmaktadır [15–19]. Ancak yapılan çalışmalarda genellikle basma yükü altındaki davranışlar incelenmiştir. Bu çalışmada ise piramit birim hücre yapısına farklı doğrultularda dikmelerin eklenmesinin, yapının çekme, eğme ve burulma momenti altındaki dayanımlarına etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır.

2. GEREÇ ve YÖNTEMLER

Bu çalışmada eklemeli imalata yönelik olarak modellenen çeşitli kafes yapıların farklı yükler altındaki sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Modelleme için piramit (P), yanal ek dikmelere sahip yanal destekli piramit (P_y) ve çapraz ek dikmelere sahip çapraz destekli piramit (P_c) birim hücre yapıları seçilmiş ve SpaceClaim programı ile kafes yapılar modellenmiştir. Böylece farklı doğrultularda dikmelere sahip yapılar oluşturulmuştur. Seçilen birim hücre yapıları ile modellenen yapılar Şekil 1’de gösterilmiştir. Modellerin boyutları 10x10x30 mm’dir. Birim hücre boyutu 5 mm ve dikme kalınlıkları 1 mm’dir. Modellenen yapıların malzemesi Ansys kütüphanesinden eklemeli imalatta sıkça kullanılan Inconel 718 olarak seçilmiştir. Piramit, yanal destekli piramit ve çapraz destekli piramit birim hücre yapıları ile oluşturulan kafes yapıların kütleleri sırasıyla 3,49 g, 4,90 g ve 4,38 g olarak programdan alınan hacim verileri yardımıyla hesaplanmıştır.

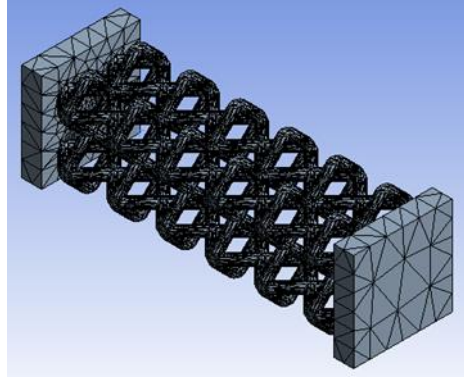


Şekil 1. Birim hücre yapılarının ölçüleri a) P, b) P_y , ve c) $P_ç$

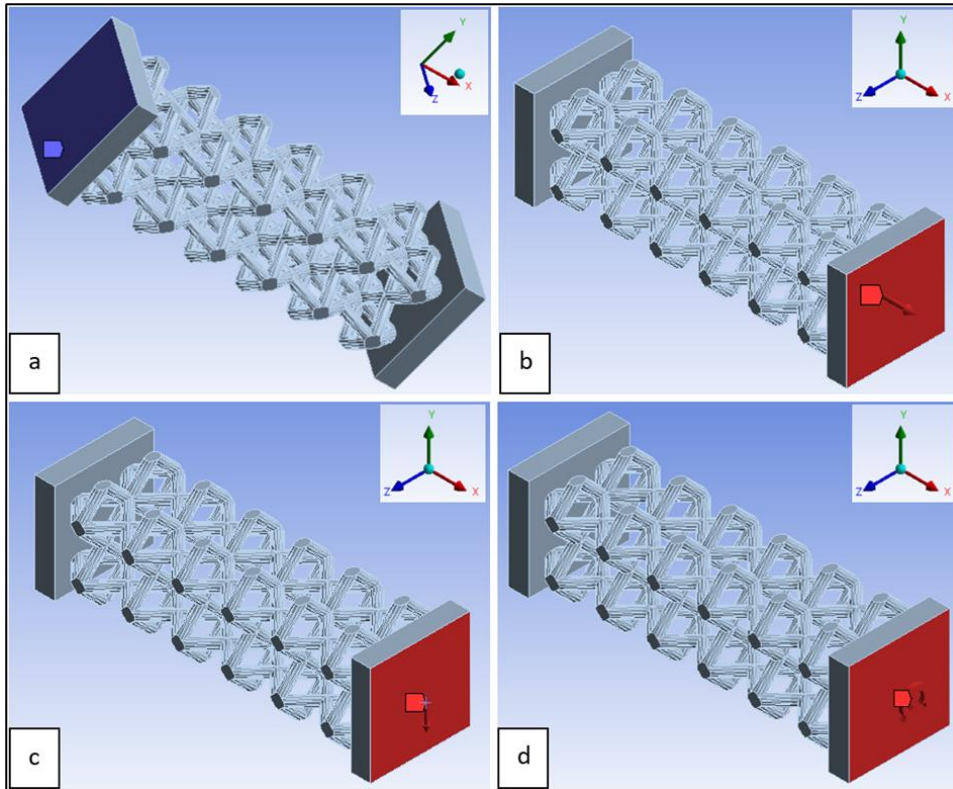
Kod	Birim Hücre Yapısı	Model	Kütle (g)
P	 Piramit		3,49
P_y	 Yanal Destekli Piramit		4,90
$P_ç$	 Çapraz Destekli Piramit		4,38

Şekil 2. Üç farklı birim hücre yapısı kullanılarak tasarlanan kafes yapı modelleri ve yapıların ağırlıkları

Sonlu elemanlar analizinde modellere uygulanacak yüklerin kafes yapı içerisinde eşit dağılılabilmesi için modellerde mesnetleme ve güç uygulanacak yüzeylerine 2 mm kalınlığında içi dolu tabakalar eklenmiştir. Tasarımları tamamlanan modeller Ansys programında Mekanik modülüne aktarılmıştır ve statik analiz tanımlanmıştır. Modellerde kafes yapıların olduğu yerde daha yoğun olacak şekilde ağ yapı oluşturulmuştur (Şekil 3). Oluşturulan ağ yapıların düğüm ve eleman sayıları sırasıyla şu şekildedir: P yapısı için 191890 ve 109483, P_y yapısı için 195783 ve 109589, P_c yapısı için 201667 ve 112824. Modellere sınır şartı olarak Şekil 4a'da mavi ile gösterilen yüzeyinden sabit mesnetleme yapılmıştır. Yükleme şartı olarak Şekil 4b'de kırmızı ile gösterilen yüzeyden +x yönünde 100 N çekme kuvveti, Şekil 4c'de -y yönünde 100 N eğme kuvveti ve Şekil 4d'de ise x eksenini etrafında 100 N/mm burulma momenti uygulanmıştır. Daha sonra analizler ayrı ayrı koşutularak her bir yükleme için modeller üzerinde oluşan von-Mises eşdeğer gerilmeleri incelenmiştir.



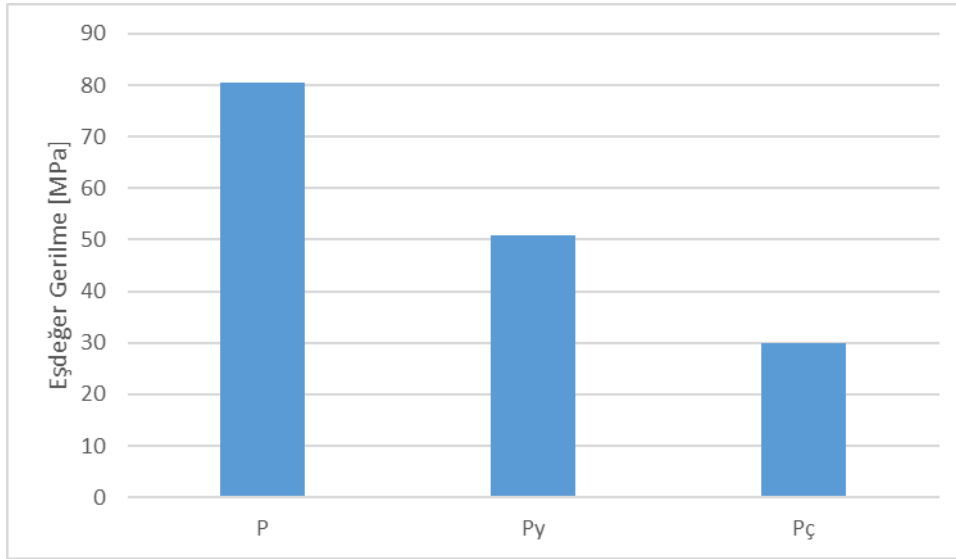
Şekil 3. Modellere uygulanan ağ yapı



Şekil 4. Yükleme ve sınır şartlar: a) Sabit mesnetleme, b) çekme kuvveti, c) eğme kuvveti, d) burulma momenti

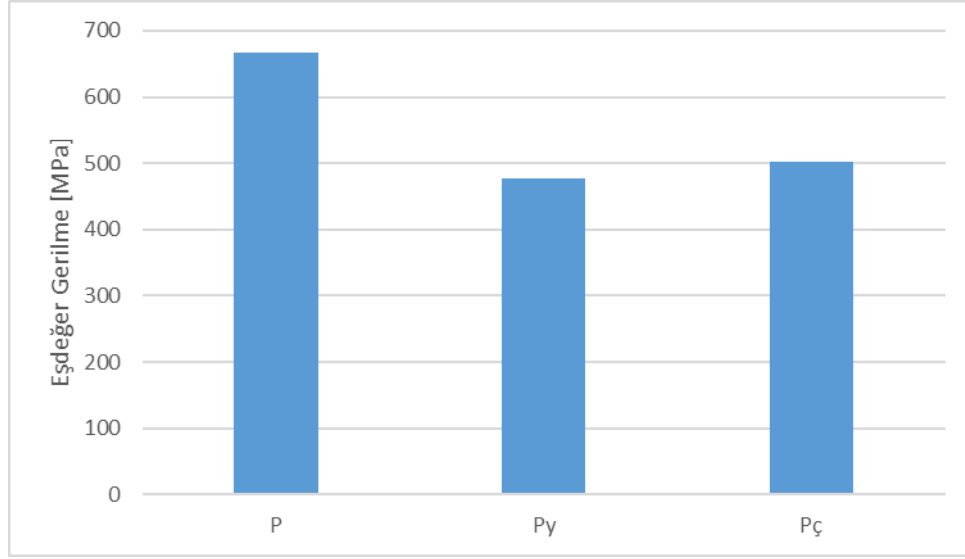
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Kafes yapıdaki modellere sonlu elemanlar analizlerinde uygulanan 100 N'luk çekme yükü sonucunda yapılardaki en yüksek von-Mises eşdeğer gerilmeler Şekil 5'te verilmiştir. Uygulanan yükleme sonucunda piramit (P) kafes yapısında yaklaşık olarak 80 MPa, yanal dikme desteğine sahip piramit (Py) kafes yapısında yaklaşık olarak 51 MPa, çapraz dikme desteğine sahip piramit (Pç) kafes yapısında ise yaklaşık olarak 30 MPa gerilme meydana gelmiştir. Yanal ve çapraz dikme desteği piramit kafes yapınınin kütlelerini sırasıyla %40 ve %26 oranında arttırmıştır. Buna karşılık yanal ve çapraz dikme destekli piramit yapılarda desteksiz piramit yapıya göre çekme yükü altındaki gerilmeler sırasıyla %37 ve %63 oranlarında azalmıştır.



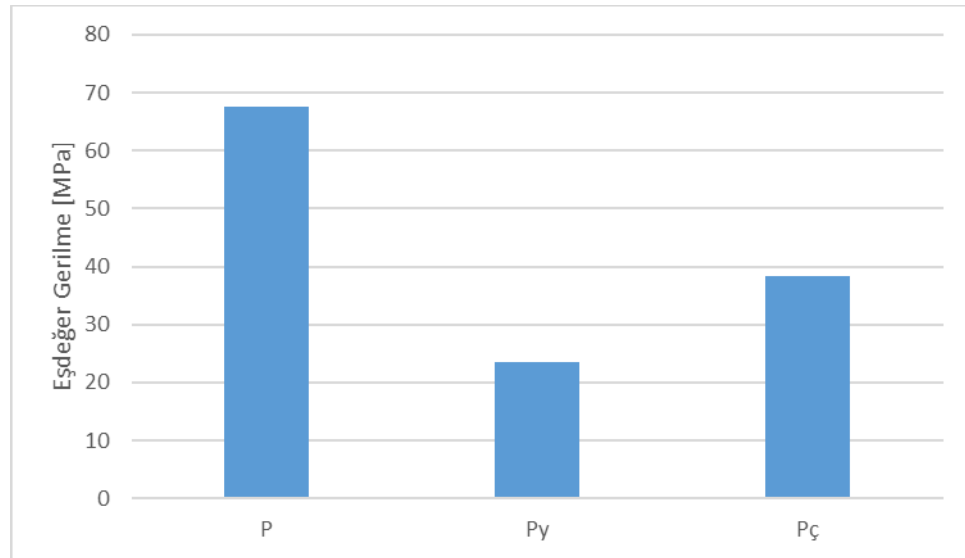
Şekil 5. Çekme yükü sonucunda kafes yapılardaki en yüksek von-Mises eşdeğer gerilmeler

Şekil 6'da sonlu elemanlar analizi sonucunda 100N'luk eğme yükü altında yapılarda oluşan en yüksek von-Mises eşdeğer gerilmeler verilmiştir. Yük altındaki P, Py ve Pç kafes yapılarında sırasıyla 666 MPa, 478 MPa ve 502 MPa gerilmeler oluşmuştur. Desteksiz piramit kafes yapıya göre yanal destek dikmeleri yapıda oluşan gerilmeleri %28 azaltırken, çapraz destek dikmeleri ise %25 azaltmıştır. Yalnızca gerilmelere bakıldığında yanal destek dikmelerininin yapıdaki gerilmeleri düşürmede daha başarılı olduğu söylenebilir. Py'nin kütlelerinin Pç'ninkinden %12 daha fazla olmasına rağmen, Pç yapısındaki gerilmeler P'deki gerilmeleri, Py yapısındakilere göre %5 daha az düşürdüğü görülmektedir. Dolayısıyla kütle artışları da hesaba katıldığında Pç yapısının eğme yükü altında Py'ye göre daha iyi sonuç verdiği söylenebilir.



Şekil 6. Eğme yükü sonucunda kafes yapılarıdaki en yüksek von-Mises eşdeğer gerilmeler

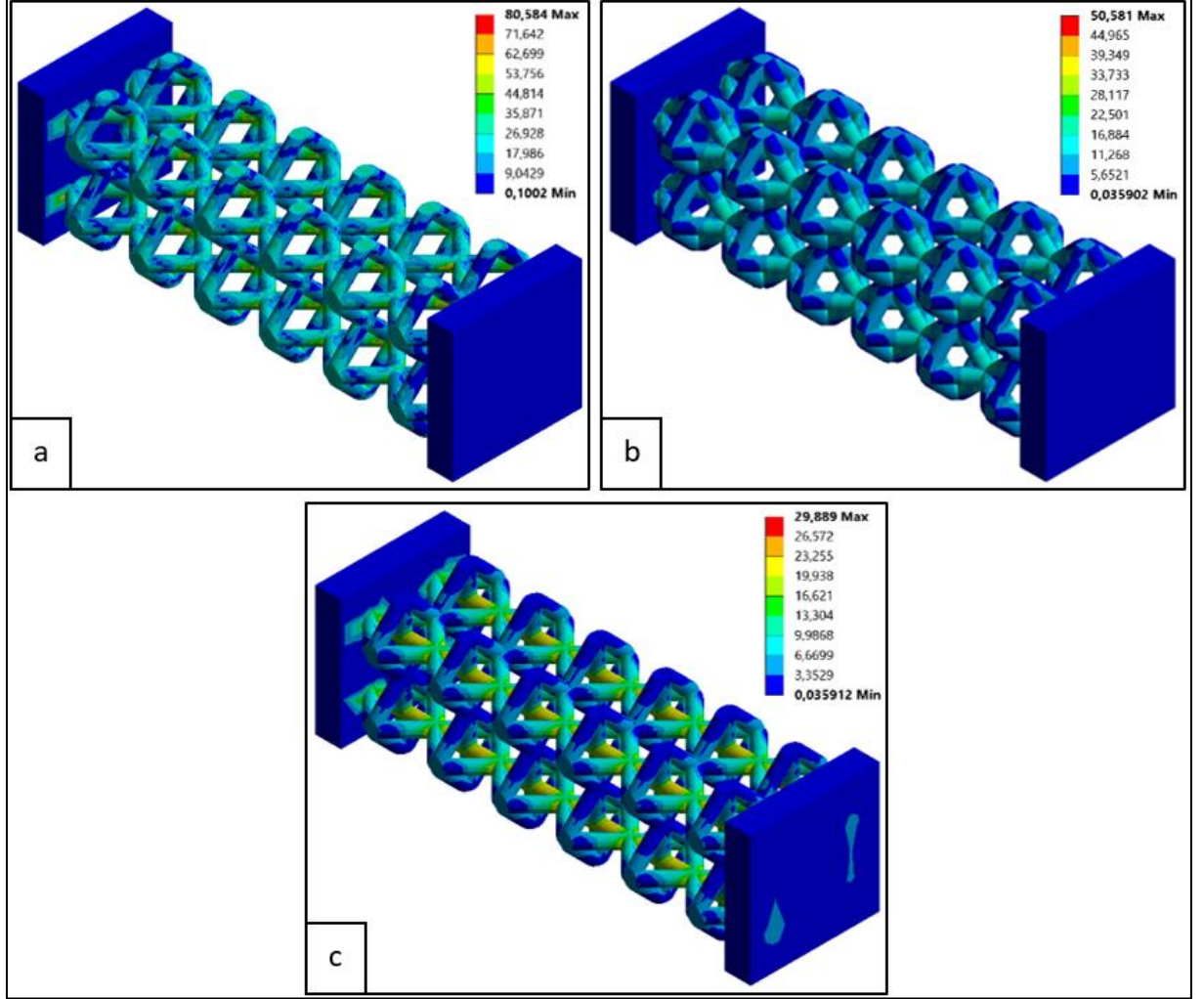
100 N/mm'lik burulma momentinin uygulandığı analizler sonucunda kafes yapılarda oluşan en yüksek gerilmeler Şekil 7'de verilmiştir. Burulma momenti sonucunda P kafes yapısında 68 MPa, yanal dikme desteğine sahip P_y yapısında 23 MPa, çapraz dikme desteğine sahip $P_ç$ kafes yapısında ise 38 MPa eşdeğer gerilmeler meydana gelmiştir. Ek dikme desteksiz yapıya göre yanal dikme destekli ve çapraz dikme destekli kafes yapılarda oluşan gerilmeler sırasıyla %65 ve %43 azalmıştır. P_y ve $P_ç$ yapıları kendi aralarında karşılaştırılacak olursak, P_y yapısının kütlesi $P_ç$ yapısına göre yaklaşık %12 fazla iken, P_y yapısında oluşan gerilmeler diğerine göre %39 daha düşüktür. Sonuç olarak burulma yüklemesi için yanal destekli P_y kafes yapının daha uygun olduğu söylenebilir.



Şekil 7. Burulma momenti sonucunda kafes yapılarıdaki en yüksek von-Mises eşdeğer gerilmeler

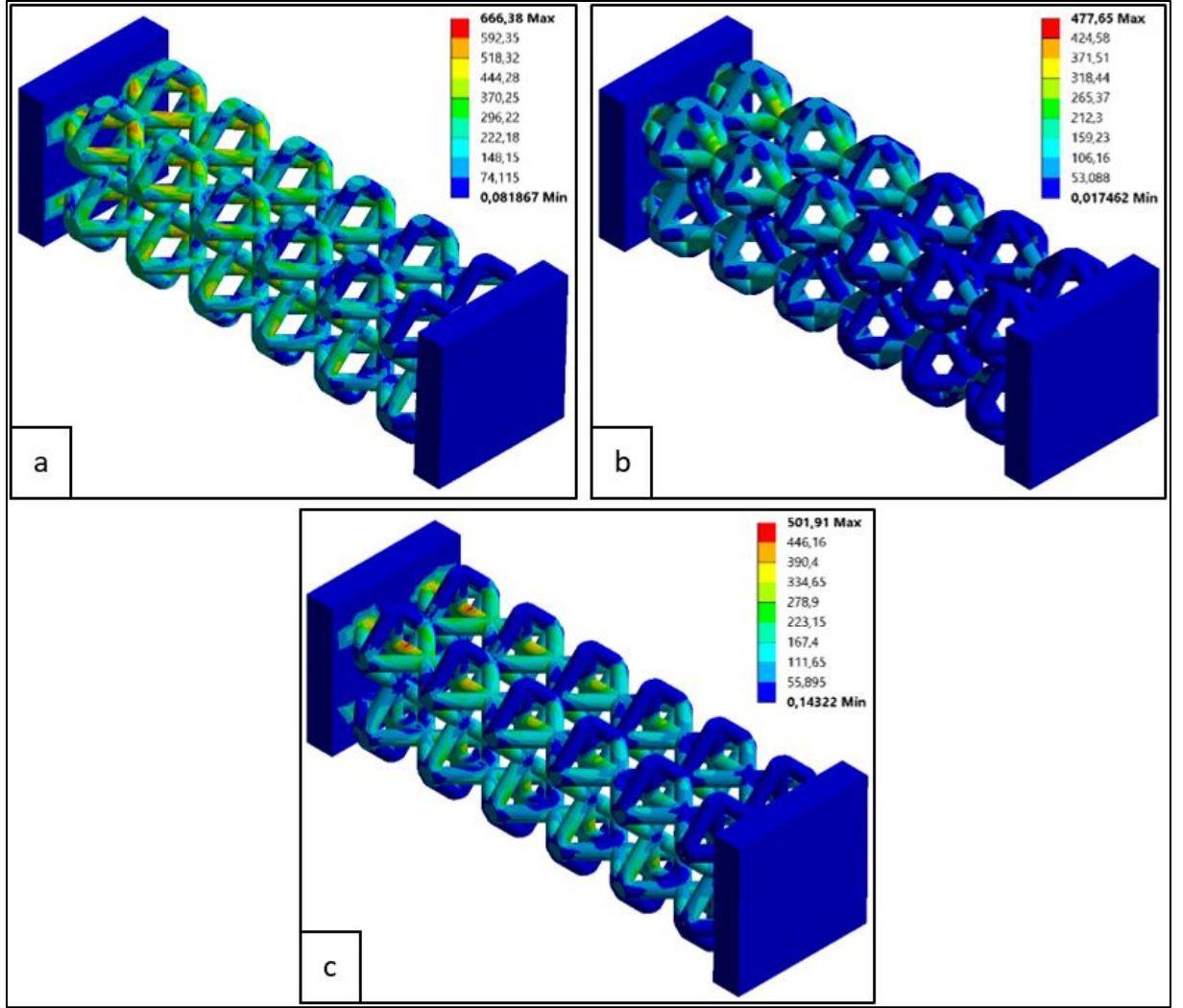
Çekme yükü altında P, P_y ve $P_ç$ kafes yapılarında oluşan eşdeğer gerilmeler Şekil 8'de verilmiştir. Kafes yapılar incelendiğinde özellikle birim hücre yapılarının birleştiği kesişim noktalarında gerilmeler daha yüksek

çıkıştır. P_c yapısındaki çekme kuvveti doğrultusunda bulunan ek dikmelerin yükü büyük oranda taşıdığı görülmüştür (Şekil 8c). Böylece yapıyı diğer birim hücreler ile oluşturulan yapılara göre çekme yüküne karşı daha dirençli hale getirmiştir.



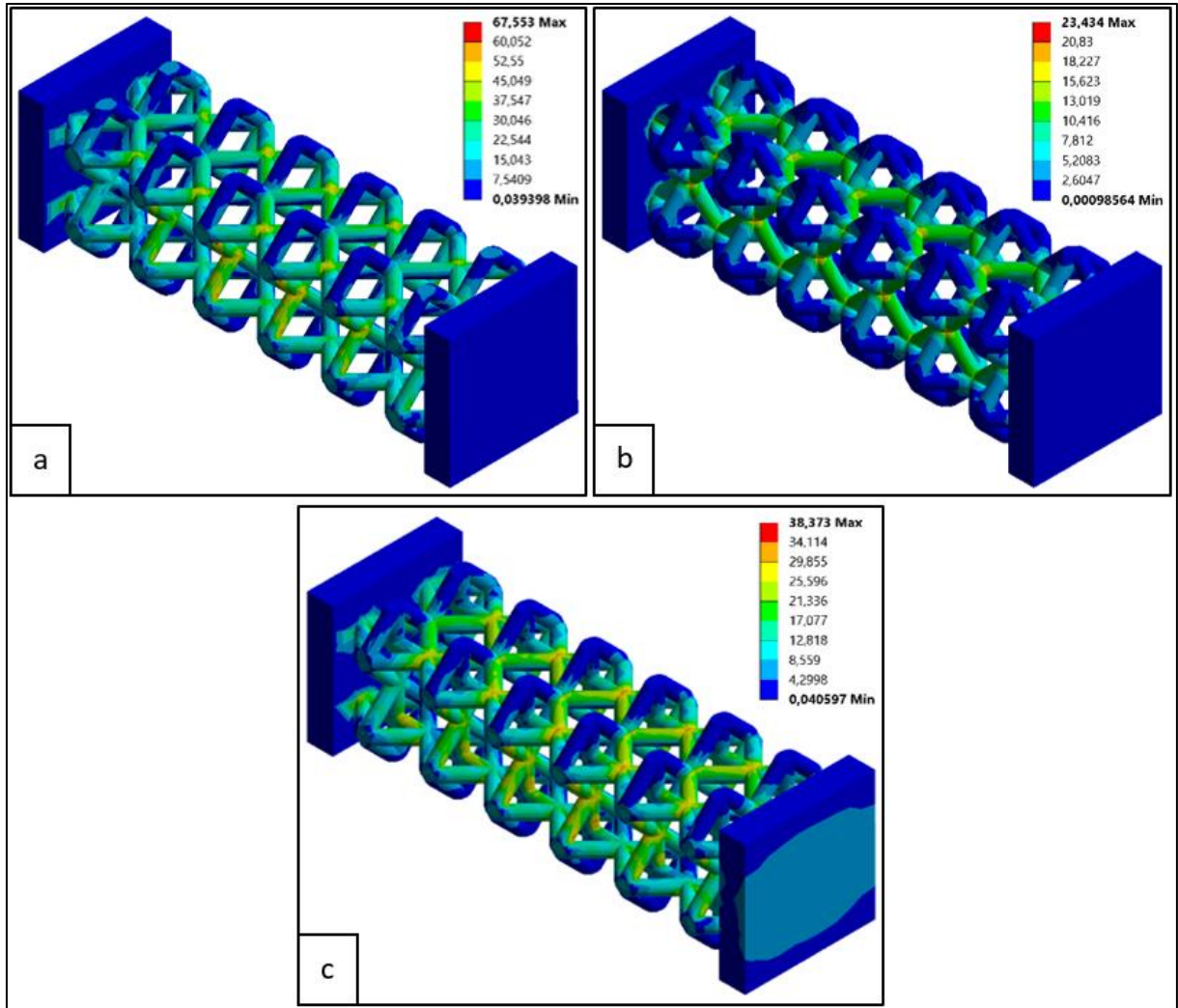
Şekil 8. Çekme yükü altında kafes yapılarda oluşan eşdeğer gerilmeler a) piramit (P), b) yanal destekli piramit (P_y) ve c) çapraz destekli piramit (P_c)

Sonlu elemanlar analizi sonucunda eğme yükü altında her üç kafes yapıda oluşan eşdeğer gerilmeler Şekil 9'da verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde kafes yapıların sabit mesnetleme yapıldığı tarafa yakın bölgelerde gerilmeler daha yüksek çıkmıştır. P_y ve P_c yapısındaki ek dikmelerin üzerinde daha fazla gerilme taşıdığı görülmüştür. Dolayısıyla ek dikmelerin yük dağılımında önemli bir rol oynadığı söylenebilir.



Şekil 9. Eğme yükü altında kafes yapılarda oluşan eşdeğer gerilmeler a) piramit (P), b) yanıl destekli piramit (P_y) ve c) çapraz destekli piramit (P_ç)

Bir diğler yükleme tipi olan burulma momentii altında kafes yapılarda oluşan eşdeğler gerilmeler Şekil 10'da verilmiştir. P_y ve P_ç yapılarındaki en yüksek gerilmelerin yanıl ve çapraz ek dikmelerin üzerinde olduğu görülmüştür. Dolayısıyla bu dikmelerin burulma yükünü taşıdığı ve yapıdaki gerilmeleri düşürdüğü söylenebilir. Şekil 10b'de yanıl destek dikmeleri sayesinde yapıda oluşan gerilmelerin azaldığı görülebilmektedir.



Şekil 10. Burulma momenti altında kafes yapılarda oluşan eşdeğer gerilmeler a) piramit (P), b) yanal destekli piramit (P_y) ve c) çapraz destekli piramit (P_c)

4. SONUÇ

Kafes yapılarda yanal destek ve çapraz destek dikmelerinin kafes yapılarda çekme, eğme ve burulma yükleri altındaki davranışlarına etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çapraz destekli kafes yapıdaki çekme kuvveti doğrultusunda bulunan ek dikmelerin yükü büyük oranda taşıdığı sonucuna varılmıştır. Eğme yükü altında ise yanal destekli kafes yapıda en düşük gerilmeler meydana gelmiştir. Ancak ek dikmeler nedeniyle kafes yapıların kütlelerinin artışından dolayı üretim maliyetleri de hesaba katılarak benzeri bir yüklemeye maruz kalacak parçada çapraz destek seçimi daha uygun olabilecektir. Burulma momenti karşısında her iki destek dikmeleri de yapıdaki gerilmelerde büyük düşüşler sağlamıştır. P_y ve P_c yapıları kendi aralarında kıyaslandığında ise, P_y yapısındaki yük fazlalığına rağmen P_c yapısına göre gerilmeleri oldukça fazla düşürmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Compos B Eng 2018;143:172–96.
2. Chaudhary R, Fabbri P, Leoni E, Mazzanti F, Akbari R, Antonini C. Additive manufacturing by digital light processing: a review. Progress in Additive Manufacturing 2022 8:2 2022;8:331–51.

3. Aydın DS, Yıldırım ÇV, Şirin Ş. Üretim Parametrelerinin Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Ti6Al4V Alaşımının Çekme Dayanımı, Elastisite Modülü ve Uzama Özelliklerine Etkisi. *Duzce University Journal of Science and Technology* 2024;12:1–17.
4. Ergene B, İspartalı H, Karakılınç U. Eriyik yığıma modelleme ile üretilen PET-G parçaların katman yüksekliğine ve test sıcaklığına bağlı darbe davranışı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2023;38:1345–60.
5. Balcı A, Küçükaltun F, Aycan MF, Usta Y, Demir T. Reproducibility of Replicated Trabecular Bone Structures from Ti6Al4V Extralow Interstitials Powder by Selective Laser Melting. *Arab J Sci Eng* 2021;46:2527–41.
6. Bhatia A, Sehgal AK. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review. *Mater Today Proc* 2023;81:1060–7.
7. 7Ataollahi S. A review on additive manufacturing of lattice structures in tissue engineering. *Bioprinting* 2023;35.
8. Distefano F, Pasta S, Epasto G. Titanium Lattice Structures Produced via Additive Manufacturing for a Bone Scaffold: A Review. *J Funct Biomater* 2023;14.
9. Tyagi SA, M M. Additive manufacturing of titanium-based lattice structures for medical applications – A review. *Bioprinting* 2023;30.
10. Zaharia SM, Lancea C, Kruk A, Cempura G, Gruszczyński A, Chicos LA, et al. Mechanical Properties and Microstructure of Inconel 718 Lattice Structures Produced by Selective Laser Melting Process. *Materials* 2024;17.
11. Dursun AM, Tüzemen MÇ, Salamcı E, Yılmaz O, Ünal R. Investigation of Compatibility Between Design and Additively Manufactured Parts of Functionally Graded Porous Structures. *Journal of Polytechnic* 2021:1–1.
12. Wang Z, Zhao Z, Bai P, Ren J, Liu B, Naik N, et al. The microstructure and property evolutions of Inconel718 lattice structure by selective laser melting. *Adv Compos Hybrid Mater* 2024;7.
13. Banait S, Liu C, Campos M, Pham MS, Pérez-Prado MT. Effect of microstructure on the effectiveness of hybridization on additively manufactured Inconel718 lattices. *Mater Des* 2023;236.
14. Seremet H, Babacan N. Compressive properties of AlSi10Mg lattice structures with novel BCCZZ and FCCZZ configurations fabricated by selective laser melting. *Rapid Prototyp J* 2024.
15. Leary M, Mazur M, Williams H, Yang E, Alghamdi A, Lozanovski B, et al. Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): Mechanical properties, deformation and failure modes. *Mater Des* 2018;157:179–99.
16. Mazur M, Leary M, Sun S, Vcelka M, Shidid D, Brandt M. Deformation and failure behaviour of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2016;84.
17. Lei H, Li C, Meng J, Zhou H, Liu Y, Zhang X, et al. 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.
18. Babacan N, Seremet H. Investigation of the load-bearing capacity of Co-Cr lattice structures fabricated by selective laser melting. *J of 3D Printing Tech Dig Ind* 2022;6:286–91.
19. Noronha J, Leary M, Brandt M, Qian M. AlSi10Mg hollow-strut lattice metamaterials by laser powder bed fusion. *Mater Adv* 2024;5:3751–70.