


Araştırma Makalesi

Neovius ve Schwarz-P Üçlü Periyodik Minimal Yüzey Yapılarının Mekanik Özelliklerinin Sayısal Analizi

 Mehmet Çağrı Tüzemen

Nevşehir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir/Türkiye.
Sorumlu Yazar: mcagrituzemen@gmail.com

Makale Bilgileri:

Geliş: 13/05/2024, Revizyon: 02/06/2024, Kabul: 19/06/2024.

ÖZET

Eklemeli imalat son yıllarda oldukça popüler bir üretim yöntemi olmuştur. Kuşkusuz onu bu popülerliğe taşıyan, geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi çok zor olan karmaşık şekilli yapıları üretebilme kapasitesidir. Bu karmaşık yapılara en iyi örnek ise hafiflikleri ile ön plana çıkan kafes yapılarıdır. Kafes yapılar içerisinde farklı bir sınıf olan üçlü periyodik minimal yüzey (ÜPMY) yüksek mukavemet ve enerji emilimi kapasitesi nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada Neovius ve Schwarz-P ÜPMY yapılarından oluşan modellerin sonlu elemanlar analizi (sayısal) yöntemiyle çeşitli yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Analizlerde malzeme olarak 316 paslanmaz çelik kullanılmıştır. 20x20x20 mm kübik ÜPMY yapılar birim hücre boyutu 10 mm, hacimsel doluluğu ise %10, %15 ve %20 olmak üzere üç farklı hacimsel dolulukta tasarlanmıştır. Tasarlanan yapılara sırasıyla basma, kayma ve basma-kayma bileşik yükleri uygulanmıştır. Her üç yükleme durumunda da Schwarz-P yapısında daha yüksek gerilmeler meydana gelmiştir. Basma yükü sonucunda Neovius yapılarda 17 MPa ile 29 MPa arasında gerilmeler oluşurken, Schwarz-P yapısında 86. MPa ile 190 MPa arasında gerilmeler meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: 316 Paslanmaz Çelik, Eklemeli İmalat, Mekanik Özellikler, Sonlu Elemanlar Analizi, Üçlü Periyodik Minimal Yüzey.

Numerical Analysis on Mechanical Properties of the Neovius and Schwarz-P Triple Periodic Minimal Surface Structures

ABSTRACT

Additive manufacturing has become a quite popular production method in recent years. Undoubtedly, what brings it to this popularity is its capacity to produce complex structures that are not possible to produce with traditional manufacturing methods. The best example of these complex structures is lattice structures, which stand out with their lightness. Triple periodic minimal surface (TPMS), which is a different class among lattice structures, is frequently preferred due to its high strength and energy absorption capacity. In this study, the behavior of models consisting of Neovius and Schwarz-P TPMS structures under various loads was examined using the finite element analysis method. 316 stainless steel was used as the material in the analyses. 20x20x20 mm cubic TPMS structures were designed with a unit cell size of 10 mm and three different volumetric filling levels: 10%, 15%, and 20%. Compression, shear, and compression-shear combined loads were applied to the designed structures, respectively. In all three loading cases, higher stresses occurred in the Schwarz-P structure. As a result of the compression load,

stresses between 17 MPa and 29 MPa occurred in the Neovius structures, while stresses between 86 MPa and 190 MPa occurred in the Schwarz-P structure.

Keywords: *316 Stainless Steel, Additive Manufacturing, Finite Element Analysis, Mechanical Properties, Triple Periodic Minimal Surface.*

I. GİRİŞ

Son yıllarda eklemeli imalat (3 boyutlu yazıcılar) mühendislik uygulamalarında sıkça tercih edilen bir üretim yöntemi haline gelmiştir (Akbulut ve ark. 2023; Dursun ve ark. 2022). Eklemeli imalat ile metal, polimer, seramik ve kompozit malzemeler kullanılarak üretim yapmak mümkündür (Akgümüş Gök ve ark., 2023; Canlıdınç, 2023; Kısasöz ve ark., 2023; Tayfun ve ark., 2023; Yılmaz ve ark., 2023). Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla karmaşık yapıların üretimi eklemeli imalat yöntemleri ile çok daha kolay yapılabilmektedir (Bozkurt ve ark., 2021). Bu yöntemle üretilen karmaşık yapılara örnek olarak kafes yapılar verilebilir. Kafes yapıları, dikmelere veya duvarlara dayalı birim hücre yapılarının periyodik olarak düzenlenmesiyle oluşturulan açık gözeneklere sahip hücresel yapılardır (Mishra ve ark., 2023). Üçlü periyodik minimal yüzey (ÜPMY) kafes yapıları sıklıkla kullanılan kafes yapılarından (Depboylu ve ark., 2023). Bu yapılar kesişen veya katlanmış yüzeyleri olmayacak şekilde matematiksel olarak oluşturulan yüzeylerdir (Benedetti ve ark., 2021). Sürekli kavisli yüzey geometrileri nedeniyle üretilebilirlik açısından yararlı olduğu kanıtlanmış birçok topolojik özelliğe sahiptir (Afshar ve ark., 2016; Bobbert ve ark., 2017; Maconachie ve ark., 2019). ÜPMY yapıların benzersiz mekanik ve biyolojik davranışları, bu yapıları ön plana çıkarmaktadır (Depboylu ve ark., 2023). Mekanik özellikleriyle birlikte hafifliklerinden dolayı, ÜPMY bazlı kafes yapılar üzerine pek çok çalışma mevcuttur (Qiu ve ark., 2024). Bu yapılar biyolojik/mekanik implantasyon gereksinimlerini karşılayabilen ve birçok karmaşık kemik iskelesini verimli bir şekilde oluşturabilen, gözenek ara bağlantısına sahip pürüzsüz bir yüzey sunmaktadır (Song ve ark., 2021).

Tyagi ve Manjaiah (Tyagi & Manjaiah, 2024) yaptıkları çalışmada 0° ve 90° doğrultularında ürettikleri Gyroid, Diamond ve Schwarz ÜPMY yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Her üç birim hücre yapısı ile üretilen numuneler de yaklaşık %50 bağlı yoğunluğa sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Üretimleri lazer toz yataklı füzyon yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Üretilen numunelere ısı işlem gibi ardıl işlemler uygulayarak akma ve çekme mukavemetlerini arttırmayı amaçlamışlardır. 0° ve 90° açılarla oluşturulan kafesler için elastik modül değerleri sırasıyla 11 GPa ile 7,5 GPa arasında değişmiştir. Dikey olarak üretilmiş kafesler, Schwarz kafes yapısı dışında, yatay olarak üretilmişlere kıyasla üstün çekme dayanımı ve yüzde uzama sergilemiştir. En yüksek çekme dayanımı ise yatay olarak üretilmiş Schwarz yapı vermiştir.

Mishra ve ark. (Mishra ve ark., 2023) yaptıkları çalışmada birim hücre boyutunun ve hücre duvar kalınlığının üçlü periyodik minimal yüzey kafes yapılarının basma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Schwarz-P ve Schwarz-D ÜPMY yapıları kullanılarak kafes yapıları oluşturulmuştur. Kafes yapılar lazer toz yataklı füzyon yöntemiyle eklemeli olarak üretilmiş olup, tasarım uygunluğu ve üretim hataları optik mikyografi ve taramalı elektron mikroskobu aracılığıyla incelemişlerdir. Numuneler, üretildiği haliyle ve ısı işlem görmüş koşullarda yarı statik tek eksenli basma testine tabi tutulmuştur. Kafes yapılarının mekanik özellikleri, hücre duvarlarının kalınlaşması ve hücre boyutlarının küçülmesiyle geliştiği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, kalın hücre duvarları kafes yapısında kırılma eğilimine neden olduğu için bu gibi durumlarda ısı işlem yapılmasını önermişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda Schwarz-D birim hücre yapısının Schwarz-P birim hücre yapısından daha yüksek basma dayanımına sahip olduğunu bildirmişlerdir.

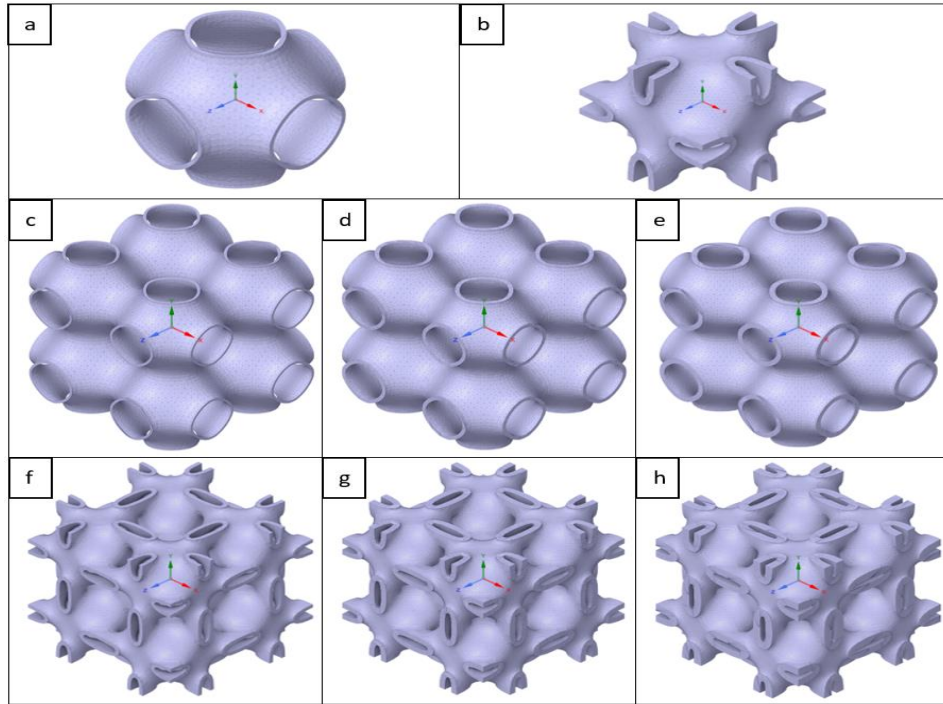
Wang ve ark. (Wang ve ark., 2021) yaptıkları çalışmada üçlü periyodik minimum yüzey yapısı kullanarak tasarladıkları modelleri sonlu elemanlar analizi yöntemiyle basma yükü altındaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. ÜPMY olarak Schwarz-P, Schoen's I-WP, ve Neovius hücre yapılarını kullanmışlardır. Geleneksel iki boyutlu hücresel yapıyla karşılaştırıldığında ÜPMY yapıların, dairesel bal peteklerin düzlem dışı ve düzlem içi basma testindeki mekanik aşırılıklarını dengelediğini bildirmişlerdir.

Kladovasilakis ve ark. (Kladovasilakis ve ark., 2022), eklemeli imalat ile üretilen üçlü periyodik minimal yüzeylerin mekanik özelliklerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Basma testi sonucunda en yüksek tepe dayanımı Neovius yapısında elde etmişlerdir. Schwarz elmas yapısı gerilme-gerinim eğrisinde plato bölgesinde mukavemetini kaybetmemiş ve en yüksek enerji emme verimliliğine sahip yapı olarak öne çıkmıştır. Numunelerin dayanım ve enerji emme kapasitelerinin, ÜPMY'lerin duvar yapılarıyla doğrudan ilgili olduğunu bildirmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalarda ÜPMY yapılarının genellikle basma ve çekme gibi yükler altındaki davranışlarının sıkça incelendiği görülmektedir. Oysa çok yönlü yüklemelerde geleneksel tasarımlara göre daha iyi konumda oldukları belirtilmektedir (Wang ve ark., 2021). Bu nedenle ÜPMY yapıların farklı doğrultularda ve çok yönlü yükler altındaki davranışlarının incelenmesi ve karşılaştırılması önem arz etmektedir. Bu çalışmada ÜPMY yapılar kullanılarak oluşturulan yapıların sonlu elemanlar analizi yöntemi ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri ile farklı duvar kalınlıklarına sahip Neovius ve Schwarz-P yapıları basma, kayma ve basma-kayma doğrultularında uygulanan yüklemeye altındaki davranışları incelenmiştir.

II. MALZEME VE YÖNTEM

Üçlü periyodik minimal yüzeylerin (ÜPMY) sonlu elemanlar analizi için öncelikle SpaceClaim programında modeller oluşturulmuştur. ÜPMY yapılar olarak Schwarz-P ve Neovius yapıları kullanılmıştır. Kafes yapılı modeller, boyutları 20x20x20 mm olacak şekilde kübik formda tasarlanmıştır. Bu kübik yapılar 10x10 mm birim hücre boyutuna sahip yapılardan oluşmaktadır. Her iki ÜPMY yapısı da %10, %15 ve %20 olacak şekilde üç farklı hacimsel doluluk oranlarında tasarlanmıştır (Tablo 1). ÜPMY birim hücre yapısında üç değişken vardır: birim hücre boyutu, duvar kalınlığı ve hacimsel doluluk. Bunlardan herhangi ikisinin programa girilmesi ile üçüncü değişken otomatik olarak belirlenmiş olur. SpaceClaim programına birim hücre boyutu ve hacimsel doluluk oranları veri olarak girilmiş duvar kalınlıkları program tarafından otomatik olarak alınmıştır. Tasarlanan kafes yapıları sonlu elemanlar analizi yönteminde yüklemenin ve mesnetlemenin geleceği noktalara birer mm kalınlığında düz katı plakalar eklenmiştir. Böylece gelen kuvvet kafes yapıya eşit şekilde dağıtılabilecektir. ÜPMY yapıları analiz süreleri de dikkate alınarak yüzey sayıları optimize edilmiştir.

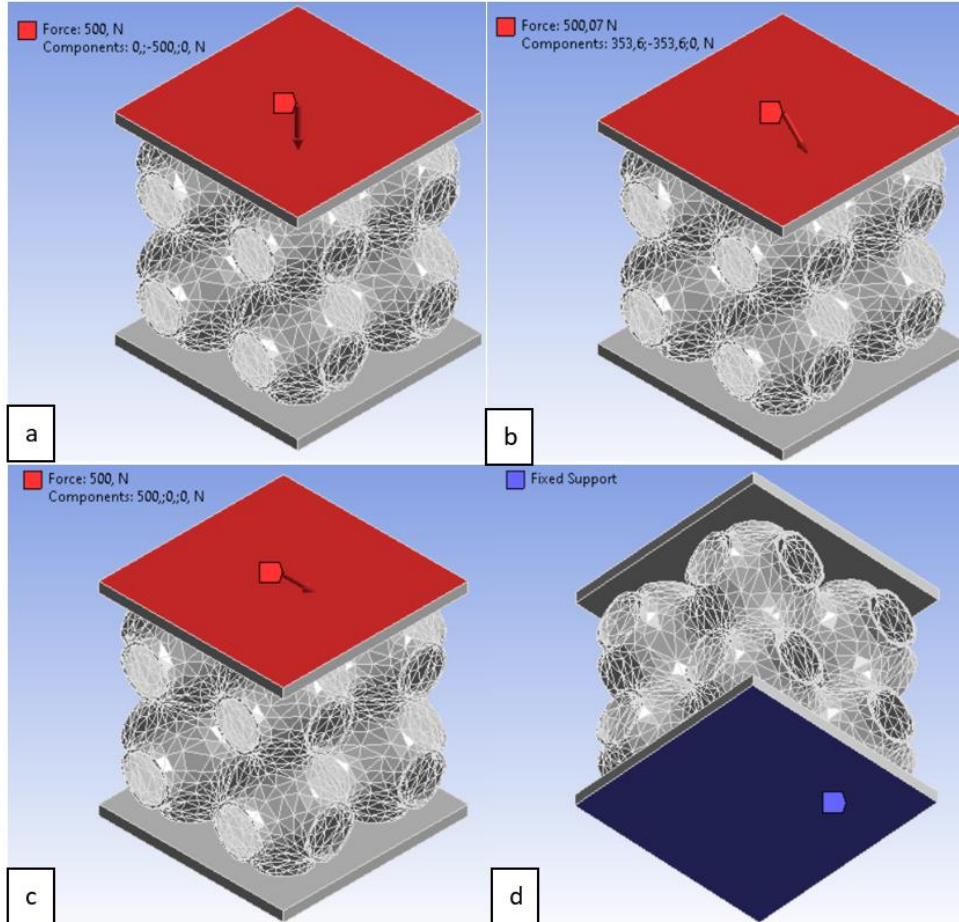


Şekil 1. a) Schwarz-P ve b) Neovius birim hücre yapıları ile bu yapılardan oluşturulan modeller c) Sp10, d) Sp15, e) Sp20, f) N10, g) N15 ve h) N20.

Tablo 1. Modellerin bazı fiziksel ve ağ yapı özellikleri.

ÜPMY	Kod	Hacimsel Doluluk (%)	Birim Hücre Boyutu (mm)	Duvar Kalınlığı (mm)	Kütle (g)	Düğüm Sayısı	Öge Sayısı
Neovius	N10	10	10	0,5	17,7	18317	64397
	N15	15	10	0,75	23,2	19100	67554
	N20	20	10	1	28,1	21565	81223
Schwarz-P	Sp10	10	10	0,285	10,9	103655	52405
	Sp15	15	10	0,4275	13,2	67966	35474
	Sp20	20	10	0,57	15,2	62853	33482

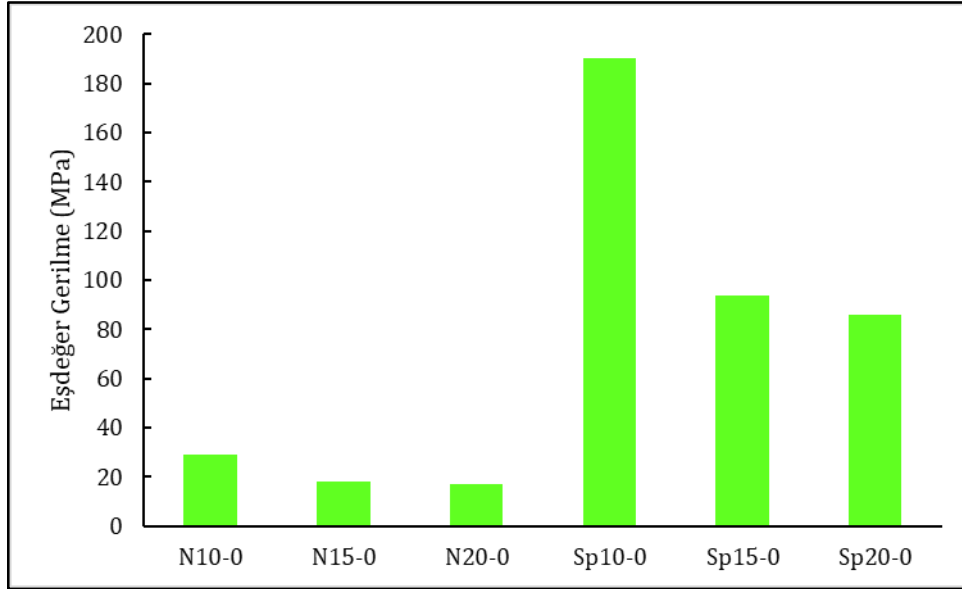
Tasarlanan modeller Ansys Workbench programına aktarılmıştır. Burada ilk olarak yapısal statik analizi seçilmiştir. Sonra eklemeli imalatta da sıklıkla kullanılan 316 paslanmaz çelik malzemesi tanımlanmıştır. Seçilen malzemenin elastisite modülü 195 GPa, poisson oranı 0,25, kayma modülü ise 7,8 GPa'dır. Daha sonra setup kısmında Ansys Mekanik modülüne geçiş yapılmıştır. Burada daha önce analiz sürelerinin uzunluğundan dolayı yüzey yapıları SpaceClaim programında azaltılan modellerde ağ yapı oluşturulmuştur. Ağ yapı dört yüzlü yöntem ve ikinci dereceden öge sırası ile oluşturulmuştur. Ağ yapılarıdaki düğüm sayısı ve öge sayısı Tablo 1'de verilmiştir. Kafes yapılara eklenen düz plakalardan birinden kuvvet uygulanırken birine ise sabit mesnetleme uygulanmıştır. Her bir yapı için yüzeyin normaliyile sırasıyla 0°, 45° ve 90° açı ile basma, basma-kayma ve kayma yükleri uygulanmıştır (Şekil 2). Yüzeylere 500 N yük uygulanmış ve von-Mises eşdeğer gerilme sonuçları incelenmiştir. Uygulanan yükleri belirtmek için Tablo 1'de gösterilen kodlamalara yükün uygulandığı açığı belirten 0, 45 ve 90 sayıları eklenmiştir.



Şekil 2. Modellere uygulanan yükler a) basma (0°), b) basma-kayma (45°), c) kayma (90°) ve d) sabit mesnetleme.

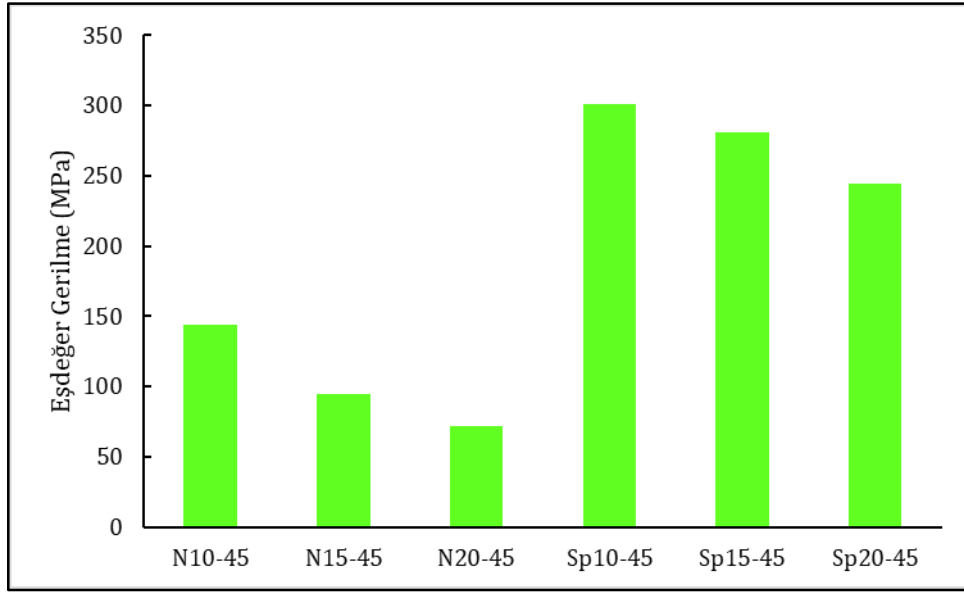
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sonlu elemanlar analizi sonucunda numunelerin 500 N'luk basma yükü altındaki eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Sonuçlara genel olarak bakıldığı zaman aynı yük altında Neovius hücre yapısına sahip numunelerde Schwarz-P yapısına sahip numunelere göre yapı içinde oluşan en yüksek gerilmenin oldukça az olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin duvar kalınlıklarındaki farklılıklar olduğu düşünülmektedir. Aynı hacimsel doluluğa (%10) sahip Sp10 ve N10 numunelerine bakıldığı zaman Schwarz-P birim hücre yapısına sahip numunenin duvar kalınlığının 0,285 mm iken Neovius birim hücre yapısına sahip numunenin duvar kalınlığı ise 0,5 mm'dir. Bu ise ÜPMY yapılarından kaynaklanan bir durumdur. Dolayısıyla aynı hacimsel doluluğa sahip numuneler arasında Neovius yapısının Schwarz-P yapısına göre daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır. Schwarz-P hücre yapısına sahip numunelerde eşdeğer gerilmeler 86 MPa ile 190 MPa arasında değişirken, Neovius yapısına sahip numunelerde ise eşdeğer gerilmeler 17 MPa ile 29 MPa arasında değişmektedir. Her iki birim hücre yapısı için de duvar kalınlıkları arttıkça, hacimsel doluluk oranları ve kütleleri artmakta ve yapıda oluşan en yüksek gerilmeler düşmektedir. Neovius yapısındaki kütle artışına kıyasla gerilmelerdeki düşüş oransal olarak daha fazla olmaktadır. Sonuç olarak Neovius yapısının Schwarz-P yapısına göre dayanım ağırlık oranının daha yüksek olduğu söylenebilir.



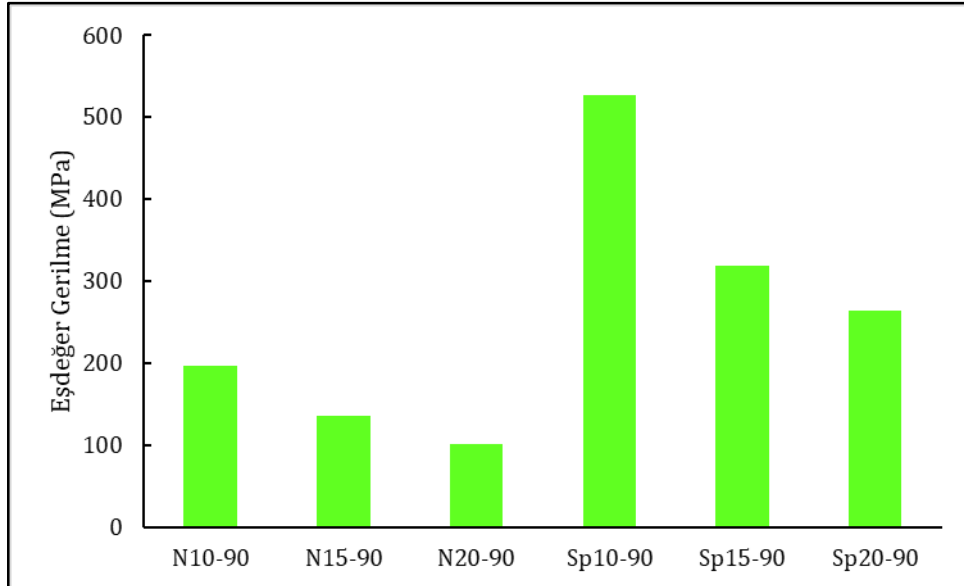
Şekil 3. ÜPMY yapılarında basma yükü altında oluşan en yüksek eşdeğer gerilmeler.

ÜPMY yapıların 500 N'luk basma-kayma bileşik yük altındaki eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 4'te verilmiştir. Basma yüküne benzer şekilde aynı yük altında Schwarz-P yapısına sahip numunelerde Neovius hücre yapısına sahip numunelere göre daha yüksek eşdeğer gerilmenin olduğu görülmüştür. Neovius numunelerinde eşdeğer gerilmeler 72 MPa ile 144 MPa arasında değişirken, Schwarz-P numunelerde ise eşdeğer gerilmeler 244 MPa ile 301 MPa arasında değişmektedir. Basma yüküne maruz kalan numunelere kıyasla bileşik yüklemelerde çok daha fazla gerilmelerin olduğu görülmüştür. Bunun nedeni basma yükünde hücre duvarlarına tek yönde yük gelirken, basma-kayma bileşik yüklemesinde çok yönlü olmaktadır. Bu durumda numuneler üzerinde oluşan gerilmeler artmaktadır.



Şekil 4. ÜPMY yapılarında basma-kayma bileşik yük altında oluşan en yüksek eşdeğer gerilmeler.

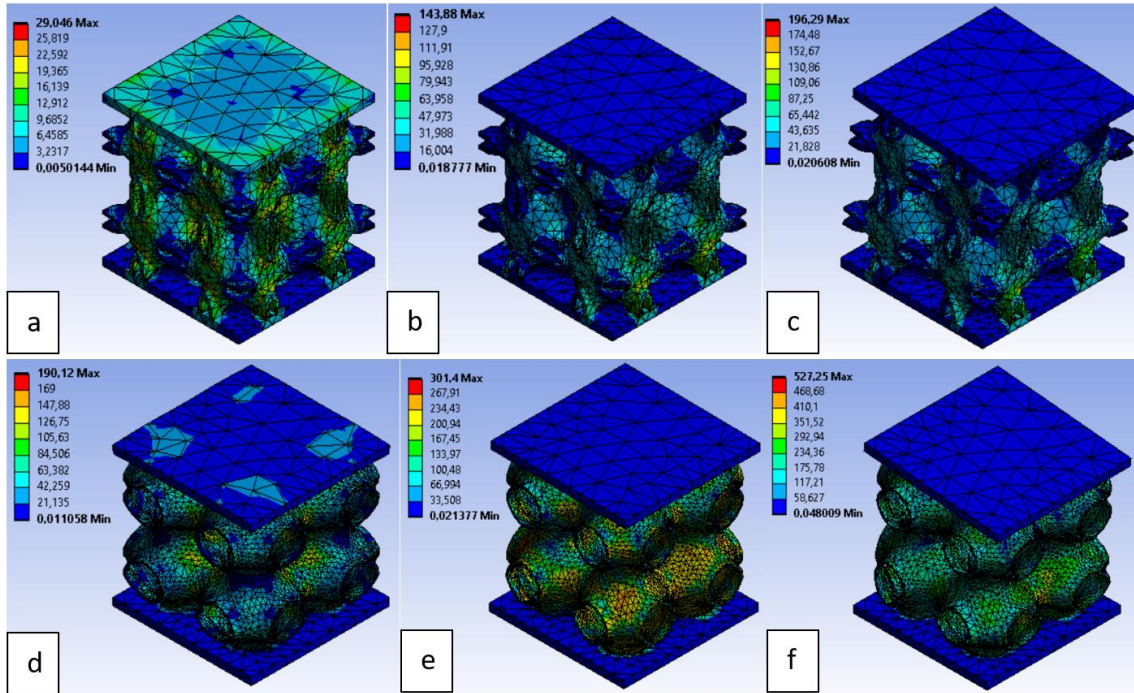
Yapılan analizler sonucunda ÜPMY yapıların 500 N'luk kayma yükü altındaki eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Kayma yüküne maruz kalan Neovius hücre yapılı numunelerde Schwarz-P yapılı olanlara göre yapıda oluşan en yüksek gerilmelerin daha az olduğu görülmüştür. Schwarz-P hücre yapısına sahip Sp10-90, Sp15-90 ve Sp20-90 numunelerinde eşdeğer gerilmeler sırasıyla yaklaşık olarak 527 MPa, 319 MPa ve 264 MPa bulunmuştur. Neovius yapısına sahip N10-90, N15-90 ve N20-90 numunelerinde ise eşdeğer gerilmeler sırasıyla yaklaşık olarak 196 MPa, 136 MPa ve 102 MPa bulunmuştur. Her iki ÜPMY yapısının da kayma yüklemelerinden ziyade basma yüklemelerine daha dayanıklı oldukları sonucuna varılmıştır.



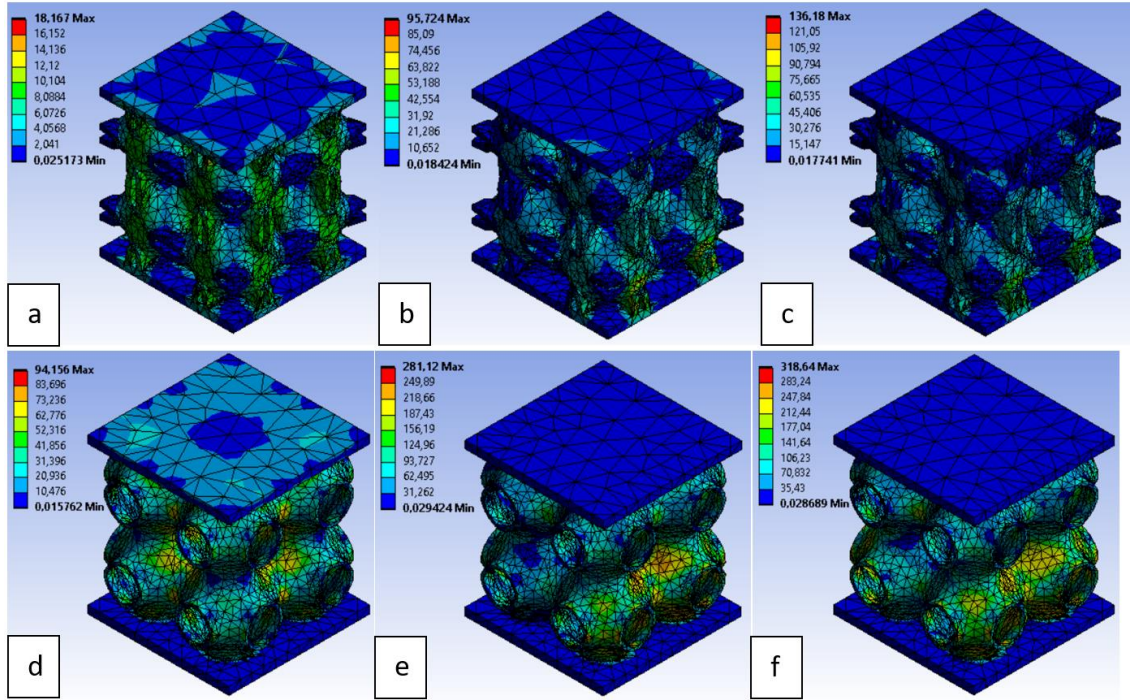
Şekil 5. ÜPMY yapılarında kayma yükü altında oluşan en yüksek eşdeğer gerilmeler.

Neovius ve Schwarz-P üçlü periyodik minimal yüzeyler kullanılarak %10, %15 ve %20 hacimsel dolulukla oluşturulan yapıların sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen eşdeğer gerilmelerin yapıdaki dağılımları sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir. Gerilme dağılımları incelendiğinde yalnızca basma yüküne maruz kalan numunelerde (a ve d) şekillerinde gerilme dağılımının daha homojen olduğu görülmektedir. Yalnızca kayma yüküne maruz kalan numunelerde (c ve f) yükün yönüne bağlı

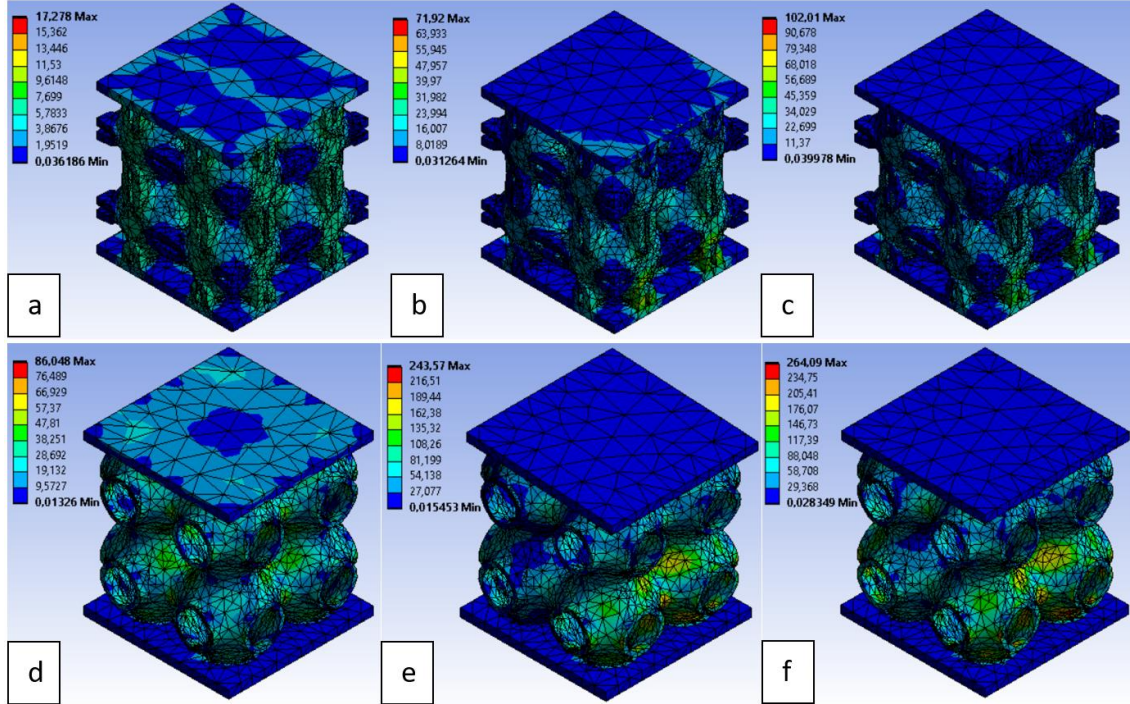
olarak yapıda hem basma hem de çekme gerilmesi oluşmuştur. Bu durum yapının genelinde homojen bir gerilme dağılımının önüne geçmiştir. 45° açıyla yapılan bileşik yüklemeye maruz kalan numuneler hem basma hem de kayma yüküne maruz kalmaktadır. Basma yükünden dolayı yapının her yerinde basma gerilmesi oluşurken, kayma yükünden dolayı yapıda eğilme meydana geldiğinden yapının belirli bölgesinde çekme belirli bir bölgesinde ise basma gerilmesi oluşmaktadır. Bu bileşik yükleme durumunda yapının basma-çekme yüküne maruz kalan bölgesindeki gerilmeler daha düşük çıkarken hem basmadan hem de kaymadan dolayı gelen basma kuvveti yapının ilgili bölgesindeki gerilmelerin daha yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Neovius (a, b ve c) ve Schwarz-P (d, e ve f) yapıları incelendiğinde birim hücreyi oluşturan duvar yapısının gerilmeler üzerindeki etkileri daha net görülmektedir. Neovius yapısında yatay ve dikey duvarların varlığı Schwarz-P yapısına göre daha fazla iken, Schwarz-P yapısında ise yuvarlak duvarların varlığı daha fazladır. Neovius yapısının üst ve alt taraflarındaki çapraz desenli duvarları Schwarz-P yapısına göre basma yükü altında daha yüksek mukavemet göstermesini sağlamaktadır (Kladovasilakis ve ark., 2022). Ayrıca aynı hacimsel doluluğa sahip yapı elde edebilmek için Neovius yapısında daha kalın duvarlar kullanılmaktadır. Birim hücre oluşturan duvarların bu özelliklerinden dolayı Neovius yapısında aynı yük altında daha az gerilme oluşmaktadır.



Şekil 6. Sonlu elemanlar analizi sonucunda %10 hacimsel dolulukdaki ÜPMY yapılarında oluşan gerilmeler a) N10-0, b) N10-45, c) N10-90, d) Sp10-0, e) Sp10-45 ve f) Sp10-90.



Şekil 7. Sonlu elemanlar analizi sonucunda %15 hacimsel dolulukdaki ÜPMY yapılarında oluşan gerilmeler a) N15-0, b) N15-45, c) N15-90, d) Sp15-0, e) Sp15-45 ve f) Sp15-90.



Şekil 8. Sonlu elemanlar analizi sonucunda %20 hacimsel dolulukdaki ÜPMY yapılarında oluşan gerilmeler a) N20-0, b) N20-45, c) N20-90, d) Sp20-0, e) Sp20-45 ve f) Sp20-90.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada Neovius ve Schwarz-P üçlü periyodik minimal yüzey yapılarının çeşitli yüklemeler altında davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Yapılar %10, %15 ve %20 hacimsel doluluk oranlarında tasarlanmış ve basma, kayma ve basma-kayma bileşik yüklerinde maruz bırakılmıştır. Yapılan analizler sonucunda kayma yükünün her iki yapıda da en yüksek gerilmeleri verdiği

görülmüştür. Neovius yapısı Schwarz-P yapısına göre her üç yükleme koşulunda da daha dayanıklı çıkmıştır. Neovius ÜÇMY yapısında yatay ve dikey duvarların varlığı Schwarz-P yapısına göre daha fazla olduğu için daha fazla yük taşıyabildiği düşünülmektedir. Aynı hacimsel dolulukta Neovius yapısında daha kalın duvarlar bulunduğu için yük taşıma kapasitesi artmaktadır. ÜÇMY yapılarda yükleme koşullarında uygun tasarım iyileştirmeleri yapılması dayanıklılık açısından önemlidir. ÜÇMY yapılar bu çalışmadaki gibi bir bileşik yüklemeye maruz kalacaksa basma kuvvetinin çok olacağı bölgede yapısal en iyileştirme veya duvar kalınlığının artırılması ile yapıda oluşan gerilmeler düşürülebilir. Son olarak ilgili yapıların benzer duvar kalınlıklarına sahip olması durumunda yük altındaki davranışları gelecek çalışmalarda incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Afshar, M., Anaraki, A. P., Montazerian, H., & Kadkhodapour, J. (2016). Additive manufacturing and mechanical characterization of graded porosity scaffolds designed based on triply periodic minimal surface architectures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 62, 481-494.
- Akbulut, A., Top, N., & Gökçe, H. (2023). El için tasarlanan kafes yapıların yapısal davranışlarının incelenmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 4(2), 92-100.
- Akgümüş Gök, D., Kiliçtek, S., Gök, S., & Yakut, N. (2023). Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma. *Gümüşhane University Journal of Science and Technology*, 13(3), 517-537.
- Benedetti, M., du Plessis, A., Ritchie, R. O., Dallago, M., Razavi, N., & Berto, F. (2021). Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication. *In Materials Science and Engineering R: Reports*, 259-300.
- Bobbert, F. S. L., Lietaert, K., Eftekhari, A. A., Pouran, B., Ahmadi, S. M., Weinans, H., & Zadpoor, A. A. (2017). Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties. *Acta Biomaterialia*, 53.
- Bozkurt, Y., Gülsoy, H. Ö., & Karayel, E. (2021). Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı. *El-Cezeri*, 8(2), 962-980.
- Canlıdınç, M. (2023). Topoloji Optimizasyonu ile Metal Eklemeli İmalat Yönteminin Endüstriyel Uygulamaları. *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 9(2), 552-565.
- Depboylu, F. N., Poyraz, Ö., Yasa, E., & Korkusuz, F. (2023). Lazer-Toz Yatağında Füzyon ile Üretilen Ti6Al4V Gyroid Yapıların Basma Dayanımlarının Nümerik Modellenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 270-283.
- Dursun, A. M., Tüzemen, M. Ç., Salamcı, E., Yılmaz, O., & Ünal, R. (2022). Investigation of compatibility between design and additively manufactured parts of functionally graded porous structures. *Politeknik Dergisi*, 25(3), 1069-1082.
- Kladovasilakis, N., Tsongas, K., Kostavelis, I., Tzovaras, D., & Tzetzis, D. (2022). Effective mechanical properties of additive manufactured triply periodic minimal surfaces: Experimental and finite element study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(11), 7169-7189.
- Kıyasöz, B. Ö., Tütük, İ., Koç, E., Karabeyoğlu, S. S., & Kıyasöz, A. (2023). Seçici lazer sinterleme yöntemiyle üretilen PA 12 matrisli seramik takviyeli kompozitlerin aşınma davranışının incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(2), 1029-1036.
- Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., & Brandt, M. (2019). SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. *Materials and Design*, 183, 108137.
- Mishra, A. K., Chavan, H., & Kumar, A. (2023). Effect of cell size and wall thickness on the compression performance of triply periodic minimal surface based AlSi10Mg lattice structures. *Thin-Walled Structures*, 193.
- Qiu, N., Wan, Y., Shen, Y., & Fang, J. (2024). Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 261.
- Song, K., Wang, Z., Lan, J., & Ma, S. (2021). Porous structure design and mechanical behavior analysis based on TPMS for customized root analogue implant. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 115.
- Tayfun, Ü., Murat Yılmaz, V., & Arslan, Ç. (2023). Eklemeli İmalat Yönteminde Filament Olarak Kullanılan Polimerik Malzemeler. *Journal of Smart Systems*, 2(1), 45-67.
- Tyagi, S. A., & Manjiaiah, M. (2024). Printability, post-processing and mechanical behaviour of sub-millimetre sized SS 17-4PH TPMS lattice structures. *Materials Today Communications*, 38.

- Wang, Z., Wang, X., Gao, T., & Shi, C. (2021). Mechanical behavior and deformation mechanism of triply periodic minimal surface sheet under compressive loading. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(19).
- Yılmaz, M., Yılmaz, N. F., Kılıç, A., & Mazi, H. (2023). Eklemeli imalat yönteminde polilaktik asit (PLA)/peroksit kompozitinin in-situ olarak çapraz bağlama tekniği ile üretilebilirliğinin araştırılması. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(2), 859-868.