

Orhan Gülcan* 

General Electric Aerospace
Kartal / İstanbul

Kadir Günaydın 

General Electric Aerospace
Kartal / İstanbul

Uğur Şimşek 

Michigan Üniversitesi
Michigan / ABD

Proses Simülasyonuna Bağlı Olarak Lazer Toz Yatağı Füzyon Yöntemi ile Üretilen Ökzetik Latislerdeki Boyutsal Sapma Üzerinde Ökzetikliğin Etkisi

Negatif Poisson oranına sahip olan ve özellikle enerji absorbe etme özelliğine ihtiyaç duyulan endüstriyel uygulamalarda kullanım imkanı bulan ökzetik yapıların basma, çekme ya da bükme yüklemeleri altındaki mekanik davranışları literatürde incelenmiştir. Fakat bu yapıların, bir eklemeli imalat prosesi olan lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilmeleri neticesinde meydana gelen boyutsal sapmaları üzerinde, ökzetik özelliklerinin ne kadar etki ettiği konusunda herhangi bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu boşluğun doldurulmasına katkı sağlamak amacıyla, bu çalışmada beş farklı ökzetik yapı (re-entrant, trichiral, anti-trichiral, tetrachiral, anti-tetrachiral ve hexachiral) ve bir adet ökzetik olmayan yapının (bal peteği), Inconel 718 malzemedeki lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretimi sırasında meydana gelen, katmanlar arası yüksek sıcaklık farklı ve bunun neticesinde oluşan kalıntı gerilmeler ve boyutsal sapma miktarları, termomekanik simülasyon kullanılarak incelenmiştir. Her bir geometriye ait Poisson oranları da hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ökzetik yapıların lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilmeleri sırasında da ökzetik özellik gösterdiklerini göstermiştir. Çalışma sonucunda re-entrant yapının en yüksek, hexachiral yapının ise en düşük ökzetik özellik gösterdiği görülmüştür. Bir düğüm noktasına teğet olan duvarlardan oluşan chiral yapılar arasında, hexachiral yapı en fazla boyutsal sapma göstermiştir. Ökzetik olmayan bal peteği yapısı ise, ökzetik yapılara göre daha fazla boyutsal sapma göstermiştir.

Keywords: ökzetik latis, boyutsal sapma tahmini, proses simülasyonu

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 14 Mart 2024

Kabul: 31 Ekim 2024

*Sorumlu yazar: Orhan Gülcan

E-mail: orhan.gulcan@ge.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1452797>

GİRİŞ

Ökzetik yapılar negatif Poisson oranına sahip yapılardır. Yani doğadaki yapıların hemen hemen tamamı basma yükleri altında yükleme yönünde sıkışır, yanıl yönde ise genişlerken, ökzetik yapılar bunun tam tersi davranış gösterir: yükleme yönünde genişlerken yanıl yönde sıkışır [1]. Ökzetik yapıların bu üstün özellikleri onlara doğadaki diğer yapılara göre daha fazla enerji absorbe edebilme özelliği verir. Bu ayırt edici özelliklerinden dolayı ökzetik yapılar, havacılık ve uzay uygulamalarından otomotiv sanayiine kadar farklı endüstriyel uygulamalarda kullanım alanı bulabilmektedir [2].

Ökzetik yapılar farklı üretim metodları ile üretilebiliyor iken, eklemeli imalat alanında son yıllarda yaşanan teknik ilerlemeler ve farklı endüstrilerin eklemeli imalata karşı artan ilgilerinden dolayı, ökzetik yapıların farklı eklemeli imalat yöntemleri ile de üretilebilmeleri mümkün olmuştur. Lazer toz yatağı füzyon yöntemi metal eklemeli imalat yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde makine içindeki basım plakasının üzerine serilen metal tozları lazer enerji kaynağı ile ergitilir. Bir toz katmanının, üretilecek parçanın ilgili katmanına uygun olacak şekilde ergitilmesinden sonra basım plakası bir katman kalınlığı kadar aşağı iner. Ergitilen

toz katmanının üzerine yeni bir toz tabakası serilir ve lazer tarama ve ergitme işlemi devam eder. İlgili prosesin katman katman ilerlemesi neticesinde nihai parça elde edilmiş olur [3].

Lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile her ne kadar neredeyse sıfır atık malzeme ile çok karmaşık parçalar üretilebiliyor iken, üretim sırasında her bir katmanda meydana gelen yüksek sıcaklıklar ve katmanlar arasındaki ısı farklarından dolayı oluşan kalıntı gerilmeler nihai parçada deformasyonlara ve boyutsal sapmalara sebebiyet verebilmektedir. Bu da üretilen parçanın istenilen kalite gereksinimlerini sağlayamama problemine yol açabilmektedir [4]. Üretilen parçaların üç boyutlu ölçümlerinin yapılar, ölçülen boyutsal sapmalara göre tasarım değişikliklerine gidilmesi ve tekrar üretim yapılması her ne kadar uygun bir yöntem gibi görünse de, zaman ve maliyet artışı farklı yöntemlerin denenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla üretimden önce eklemeli imalat prosesinin mekanik ve termal olarak simüle edilmesi ve simülasyon sonucuna göre tasarım değişikliklerinin yapılması zaman ve maliyet açısından en uygun yöntem olarak görülmektedir [5]. Farklı eklemeli imalat proseslerinin simülasyonu için ticari olarak geliştirilen ve endüstride kullanılan yazılımlar bulunmaktadır [6].

Re-entrant, trichiral, anti-thrichiral, tetrachiral, anti-tetrachiral ve hexachiral literatürde en çok araştırılan ökzetik yapılarıdır. Re-entrant yapı balpeteği yapısının değiştirilmiş halidir. Bal peteği yapısının üst ve alt duvarları içe doğru büküldüğünde elde edilen papyon benzeri yapı re-entrant yapıdır [7]. Chiral tipi ökzetik yapılar ise merkezdeki bir silindir ve buna teğet olan duvarlardan oluşan yapılarıdır [8]. Her bir silindirdeki duvar adedine göre ilgili chiral yapı isimlendirilmektedir. Her bir silindire teğet olan üç adet duvar yapıya trichiral, dört adet duvar yapıya tetrachiral ve beş adet duvar yapıya ise hexachiral yapı denmektedir [9]. Bu yapılar merkezdeki silindir kendisine teğet olan duvarın iki karşıt yüzeyindedir. Eğer aynı yüzeyinde olur ise ilgili yapılara anti-chiral yapılar denmektedir (anti-trichiral, anti-tetrachiral gibi) [10]. Hem re-entrant yapılar hem de chiral yapılar sahip oldukları geometrik şekillerinden dolayı farklı mekanik özellikler göstermektedirler. Literatürde bu yapıların ökzetikliğinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi farklı çalışmalarda incelenmiştir. Jiang ve ark. re-entrant yapıların ökzetikliği üzerine yaptıkları çalışmada, bu yapıların basma yükleri altında %3-4 gerinime kadar ökzetikliğini koruduğunu göstermişlerdir [11]. Zhang ve ark. ise re-entrant yapıların çekme yükleri altında ökzetik özelliklerini 0.7 gerinim değerine kadar koruduğunu belirtmişlerdir [12]. Hu ve ark. re-entrant yapıların ökzetikliğinin duvar açılarının artması ile arttığını

belirtmişlerdir [13]. Alderson ve ark. hexachiral, tetrachiral ve anti-tetrachiral yapıların silindir duvar kalınlığı/silindir radyusu değerinin düşük olduğu durumlarda ökzetik özellik gösterdiklerini belirtmiştir [14]. Anti-trichiral yapılarda ise duvar uzunluğu/silindir radyusu değerinin 5.5'ten düşük olduğu durumlarda, yapının ökzetik özellikler gösterdiği fakat özellikle bu değer 10'un üzerine çıktığı durumlarda ilgili yapının ökzetikliğini kaybettiği belirtilmiştir [15]. Tetrachiral yapıların yüksek basma yükleri altında ökzetik özellikler gösterdikleri [16], anti-tetrachiral yapıların ise ufak deformasyonlar altında ökzetik özellikler gösterdikleri [17] literatürde belirtilmiştir.

Literatürde lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilen ökzetik yapıların mekanik davranışları incelenmiştir. Gülcan, yaptığı deneysel çalışmada re-entrant, anti-tetrachiral ve balpeteği yapısını lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretmiş ve mekanik testlere tabi tutmuştur. Testler sonucunda anti-tetrachiral yapının en yüksek enerji absorbe edebilme özelliği gösterdiğini belirtmiştir [18]. Shao ve ark. re-entrant yapı ve anti-trichiral yapının birleşiminden oluşan yeni bir yapı tasarlamış ve AlSi10Mg malzemeden lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretmişlerdir. Elde edilen tasarım sayesinde basma geriliminde artış ve ökzetik özellikte iyileşme sağlanmıştır [19].

Literatürden görüldüğü kadarıyla, eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen ökzetik yapılar üzerine yapılan çalışmalar, "üretim sonrasında" odaklanmaktadır. Yani üretilen parçaların basma, çekme ya da bükme yüklemeleri altındaki mekanik özellikleri ve bu yapıların ökzetikliğinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, literatürdeki çalışmaların ana eksenini oluşturmaktadır. Lazer toz yatağı füzyon yönteminde "üretim sırasında" meydana gelen, katmanlar arasındaki yüksek sıcaklık farkları ve bunun neticesinde oluşan kalıntı gerilmeler kaynaklı deformasyonlar üzerinde ökzetikliğinin etkisi var mıdır? Literatür incelendiğinde bu kapsamda yapılan herhangi bir çalışma ile karşılaşılmamıştır.

Bu çalışmanın amacı literatürdeki bu açığa odaklanmak ve re-entrant, trichiral, anti-thrichiral, tetrachiral, anti-tetrachiral ve hexachiral ökzetik yapıların, lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilmeleri neticesinde meydana gelen boyutsal sapmaları üzerinde, ilgili geometrilerin ökzetikliğinin etkisini incelemektir. Bu amaçla proses simülasyonu kullanılmış ve parçalarda meydana gelen boyutsal sapmalar ölçülmüş ve Poisson oranları hesaplanmıştır. Ökzetik yapıların ökzetik olmayan yapılardan farkını gösterebilmek için, çalışmada bal peteği yapısı da incelenmiştir. Yapılan bu çalışma neticesinde, ökzetik yapılar kullanılarak tasarlanan ve lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilmesi düşünülen endüstriyel uygulamalarda, sadece üretim

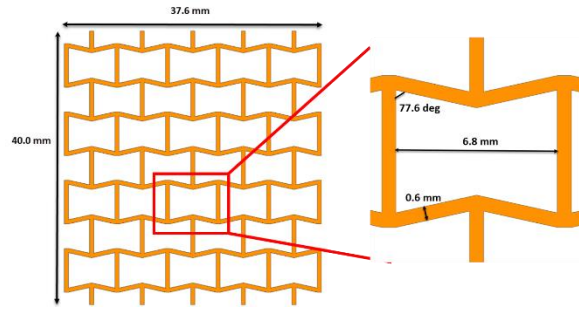
sonrası oluşan boyutsal sapma değil, üretim sırasında özetik yapıların negatif Poisson oranı özelliklerinden kaynaklanan boyutsal sapmanın da dikkate alınması gerektiğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, yapılacak analizlerde, üretim sırasında oluşacak olan boyutsal sapma miktarları da dikkate alınacak olup, gerçek uygulamayı en doğru şekilde yansıtacak analizler/simülasyonlar yapılabilecektir.

Çalışmanın bundan sonraki kısımları şu bölümleri kapsamaktadır. İkinci bölümde ilgili özetik yapıların modellenmesi ve simülasyon detaylarından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, simülasyon sonucu elde edilen boyutsal sapma miktarları ve Poisson oranları karşılaştırılmış ve farklı yapıların özetikliği irdelenmiştir. Sonuç bölümünde çalışmada elde edilen ana bulgular özetlenmiş ve ileride yapılması planlanan çalışmalardan bahsedilmiştir.

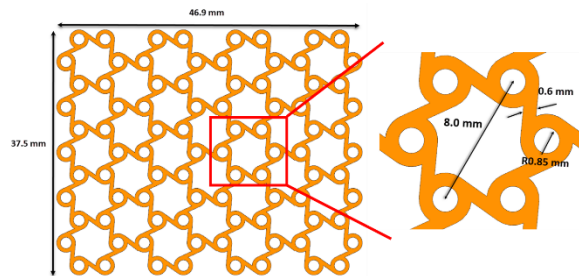
MALZEME VE METOD

Özetik Yapıların Modellenmesi Ve Deney Tasarımı

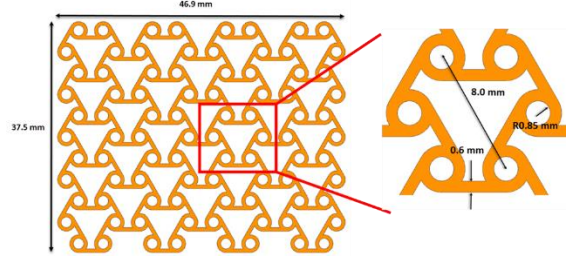
Re-entrant, trichiral, anti-trichiral, tetrachiral, anti-tetrachiral ve hexachiral özetik yapılar ve bal peteği yapısı Siemens NX 12 yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Her bir geometriye ait detay ölçüler Şekil 1-7 arasında gösterilmiştir.



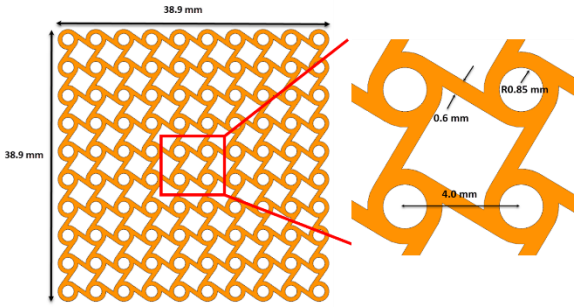
Şekil 1. Re-entrant geometri ve genel ölçüler. Özetik yapı kalınlığı 10 mm.



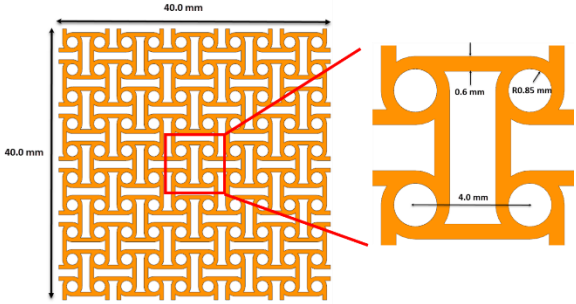
Şekil 2. Trichiral geometri ve genel ölçüler. Özetik yapı kalınlığı 10 mm.



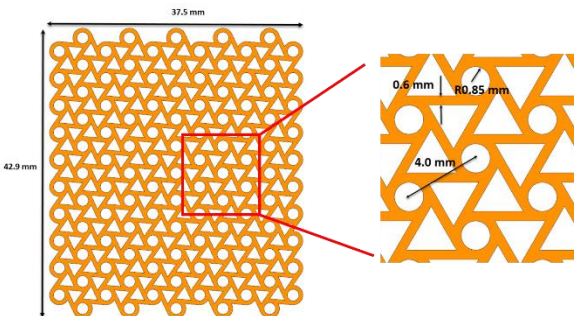
Şekil 3. Anti-trichiral geometri ve genel ölçüler. Özetik yapı kalınlığı 10 mm.



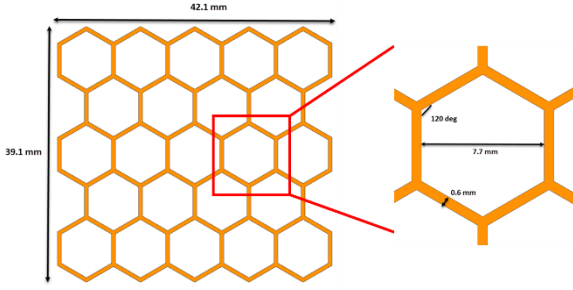
Şekil 4. Tetrachiral geometri ve genel ölçüler. Özetik yapı kalınlığı 10 mm.



Şekil 5. Anti-tetrachiral geometri ve genel ölçüler. Özetik yapı kalınlığı 10 mm.



Şekil 6. Hexachiral geometri ve genel ölçüler. Özetik yapı kalınlığı 10 mm.



Şekil 7. Balpeteği geometri ve genel ölçüler. Geometri kalınlığı 10 mm.

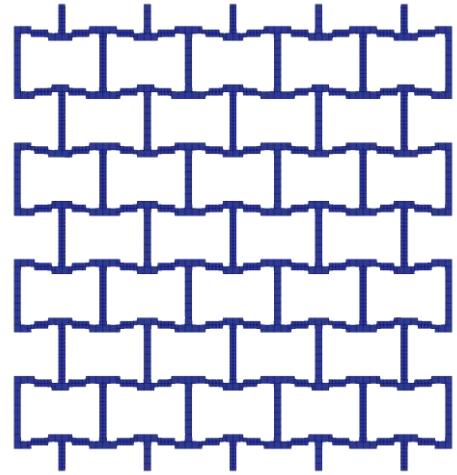
Termomekanik Simülasyon

Bu çalışmada Simufact Additive 4.1 simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Malzeme olarak lazer toz yatağı füzyon yönteminde sıkça kullanılan Inconel 718 malzemesi seçilmiştir. Simülasyon sırasında kullanılan malzeme ve proses parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Bir sonraki çalışmada numunelerin üretilip test edilmesi amaçlandığı için, üretim sırasında kullanılacak olan process parametreleri simülasyon sırasında kullanılmıştır. Farklı parametrelerin kullanılması, gerçek üretimi yansıtmayacağı için yanlış boyutsal sapma sonuçlarının elde edilmesine yol açacaktır.

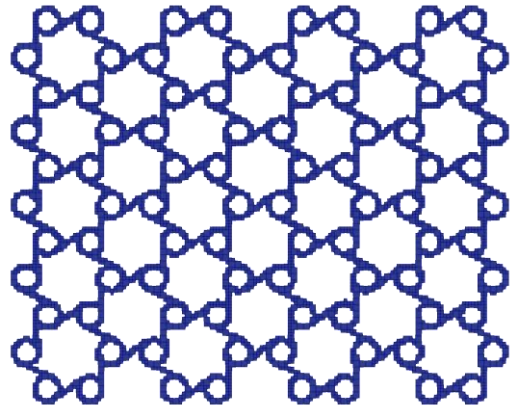
Simülasyon sonucu elde edilen sonuçların gerçeği mümkün olduğu kadar doğru yansıması için en önemli girdilerden birisi mesh boyutunun belirlenmesidir. Mesh boyutu belirlenirken dikkat edilmesi gereken en önemli etken ise parçadaki en ince cidar kalınlığıdır. Bu çalışmada kullanılan özketik yapıların cidar kalınlıkları 0.6 mm’dir. Çalışmanın başlangıcında 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 mm mesh boyutları ile yapılan ön çalışmalar, boyutsal sapma değerinin 0.2 mm mesh boyutunda yakınsadığını göstermektedir. Bundan dolayı 0.2 mm voxel mesh elemanlar kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Kullanılan mesh boyutu, en ince cidar kalınlığından küçük olduğu için, geometriyi uygun bir şekilde örmeyi sağlamıştır. Daha ince mesh boyutu kullanılması, simülasyon süresini uzatacak ama elde edilen sonuçların hassasiyetini değiştirmeyecektir. Simülasyon öncesi voxel elemanlar ile yeniden oluşturulan geometriler Şekil 8-14 arasında gösterilmiştir.

Tablo 1. Malzeme ve proses parametreleri [20]

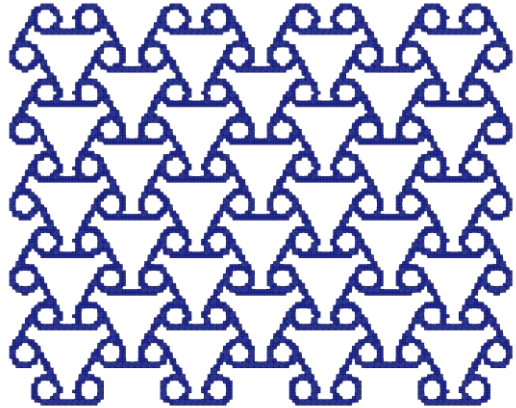
Parametre	Değer
Lazer gücü	285 W
Tarama hızı	960 mm/s
Tarama aralığı, yanal sapma	0.1 mm
Toz katman kalınlığı	0.04 mm
Tarama şekli	Meander
Basım ortamı	Argon
Basım plakası ilk sıcaklık	110 °C
Malzeme standardı	UNS N07718
Toz tanecik büyüklüğü	0.01-0.04 mm



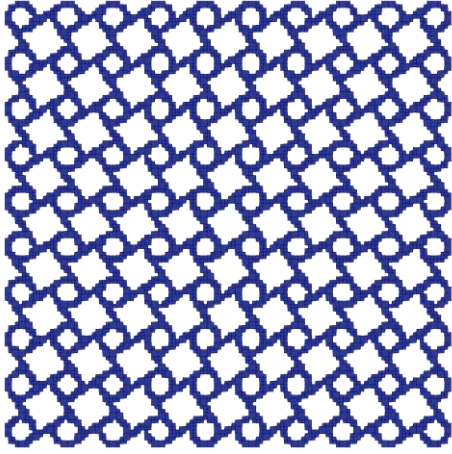
Şekil 8. Voxel elemanlar ile yeniden oluşturulan re-entrant geometri. Voxel elemanların yapıyı tamamen ördüğü görülmektedir. Mesh boyutu 0.2 mm.



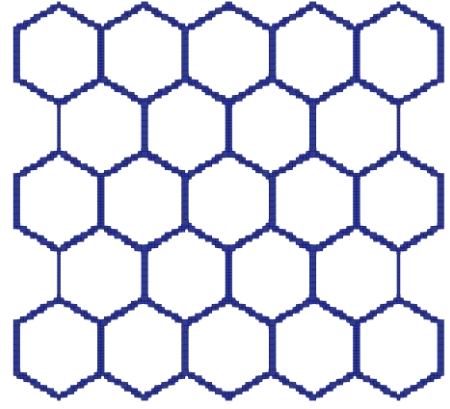
Şekil 9. Voxel elemanlar ile yeniden oluşturulan trichiral geometri. Voxel elemanların yapıyı tamamen ördüğü görülmektedir. Mesh boyutu 0.2 mm.



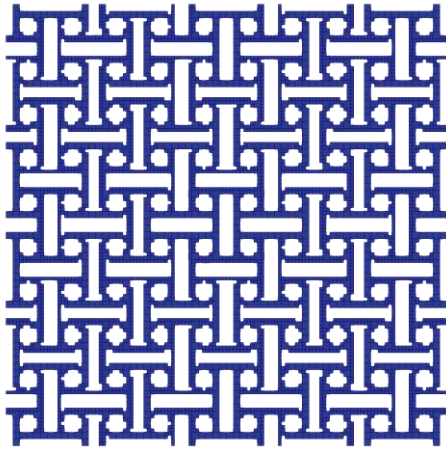
Şekil 10. Voxel elemanlar ile yeniden oluşturulan anti-trichiral geometri. Voxel elemanların yapıyı tamamen ördüğü görülmektedir. Mesh boyutu 0.2 mm.



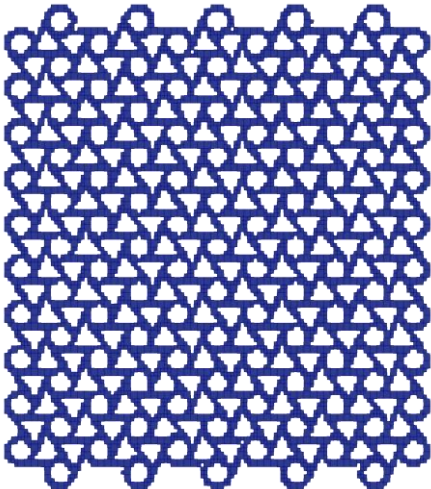
Şekil 11. Voxel elemanlar ile yeniden oluşturulan tetrachiral geometri. Voxel elemanların yapıyı tamamen ördüğü görülmektedir. Mesh boyutu 0.2 mm.



Şekil 14. Voxel elemanlar ile yeniden oluşturulan balpeteği geometri. Voxel elemanların yapıyı tamamen ördüğü görülmektedir. Mesh boyutu 0.2 mm.



Şekil 12. Voxel elemanlar ile yeniden oluşturulan anti-tetrachiral geometri. Voxel elemanların yapıyı tamamen ördüğü görülmektedir. Mesh boyutu 0.2 mm.



Şekil 13. Voxel elemanlar ile yeniden oluşturulan hexachiral geometri. Voxel elemanların yapıyı tamamen ördüğü görülmektedir. Mesh boyutu 0.2 mm.

Boyutsal Sapmaların Ölçülmesi ve Poisson Oranlarının Hesaplanması

Simülasyon sonucu elde edilen deforme olmuş geometriler, orjinal geometriler ile GOM Inspect yazılımı kullanılarak üst üste çakıştırılmış ve simülasyon sonucu elde edilen deforme geometrinin orjinal geometriden boyutsal olarak ne kadar saptığı yine aynı yazılım içinde ölçülmüştür. Her bir geometri için birbirine dik iki eksendeki boyutsal sapmaların orjinal uzunluklara oranları ile elde edilen gerinim değerlerinin oranı hesaplanarak Poisson oranları bulunmuştur.

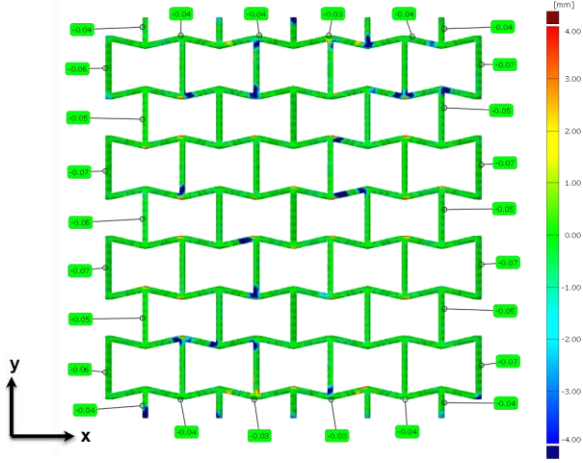
SONUÇ VE TARTIŞMA

Boyutsal Sapma Sonuçları

Re-entrant geometriye ait boyutsal sapma sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir. Re-entrant geometri, üretim sırasında oluşan yüksek sıcaklık farkı ve kalıntı gerilmeler neticesinde, bütün dış yüzeylerde içe doğru küçülmüştür. +x yönünde ortalama 0.06 mm, -x yönünde ortalama 0.05 mm, +y yönünde ortalama 0.04 mm ve -y yönünde ortalama 0.03 mm küçülme gözlemlenmiştir. Re-entrant yapının özketik özelliğinden dolayı bütün yüzeylerde boyutsal olarak farklı küçülme miktarları gözlemlenmiştir.

Trichiral ve anti-trichiral geometriler için boyutsal sapma sonuçları sırasıyla Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir. Trichiral geometri +x yönünde ortalama 0.07 mm, -x yönünde ortalama 0.07 mm, +y yönünde ortalama 0.06 mm ve -y yönünde ortalama 0.06 mm küçülmüştür. Anti-trichiral geometride ise +x yönünde ortalama 0.06 mm, -x yönünde ortalama 0.05 mm, +y yönünde ortalama 0.06 mm ve -y yönünde ortalama 0.06 mm küçülme gözlemlenmiştir. Re-entrant yapıdan farklı olarak

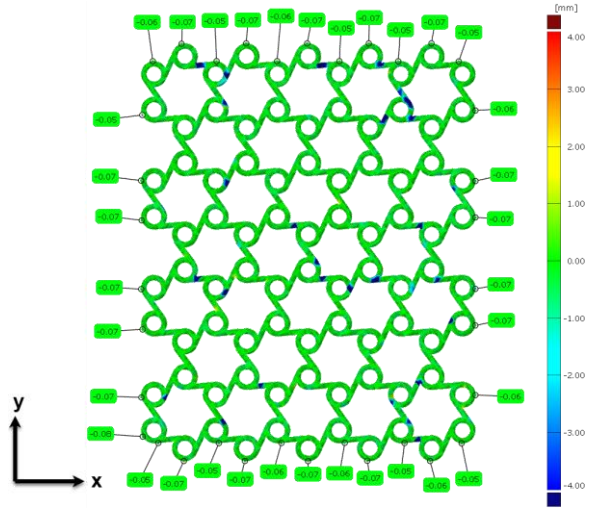
trichiral ve anti-trichiral yapılar da bütün yüzeylerde hemen hemen aynı miktarda küçülme gözlemlenmiştir. x ve y eksenlerindeki boyutsal sapmalarda ufak farklar olmasına rağmen, bu fark re-entrant geometrideki ile benzer değildir. Bu da trichiral ve anti-trichiral yapıların re-entrant yapılara nazaran, üretim sırasında daha az özetik özellik gösterdiğini göstermektedir.



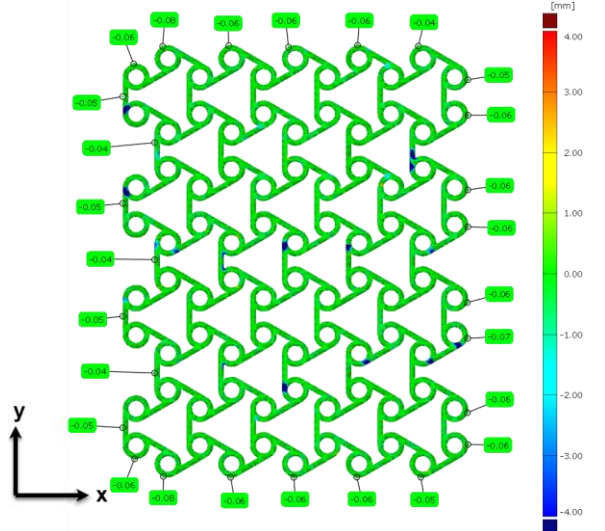
Şekil 8. Re-entrant geometri için boyutsal sapma sonuçları. "+", geometriden dışarı doğru, "-" geometriden içeri doğru boyutsal değişimi göstermektedir.

Tetrachiral ve anti-tetrachiral geometrilere ait boyutsal sapma sonuçları sırasıyla Şekil 11 ve 12'de gösterilmiştir. Tetrachiral geometri +x yönünde ortalama 0.07 mm, -x yönünde ortalama 0.07 mm, +y yönünde ortalama 0.08 mm ve -y yönünde ortalama 0.08 mm küçülmüştür. Anti-tetrachiral geometride ise +x yönünde ortalama 0.06 mm, -x yönünde ortalama 0.06 mm, +y yönünde ortalama 0.05 mm ve -y yönünde ortalama 0.05 mm küçülme gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar tetra yapıların x ve y eksenlerinde farklı miktarda deformasyon gösterdiğini göstermektedir. Fakat bu deformasyon farkları, re-entrant geometriden farklı, trichiral yapılara benzerdir. Bu da re-entrant yapıya göre tetra yapıların üretim sırasında daha az özetik özellik gösterdiğini göstermektedir.

Hexachiral geometriye ait boyutsal sapma sonuçları Şekil 13'te gösterilmiştir. Hexachiral geometri +x yönünde ortalama 0.08 mm, -x yönünde ortalama 0.08 mm, +y yönünde ortalama 0.08 mm ve -y yönünde ortalama 0.07 mm küçülmüştür. Hexachiral yapı x ve y eksenlerinde hemen hemen eşit miktarda deformasyon göstermiştir. Bu da hexachiral yapının, üretim sırasında sadece re-entrant yapıya göre değil, diğer chiral yapılara göre de daha az özetik özellik gösterdiğini göstermiştir.

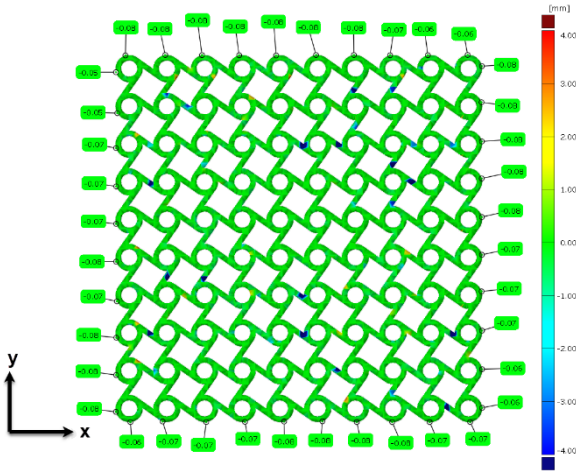


Şekil 9. Trichiral geometri için boyutsal sapma sonuçları. "+", geometriden dışarı doğru, "-" geometriden içeri doğru boyutsal değişimi göstermektedir.

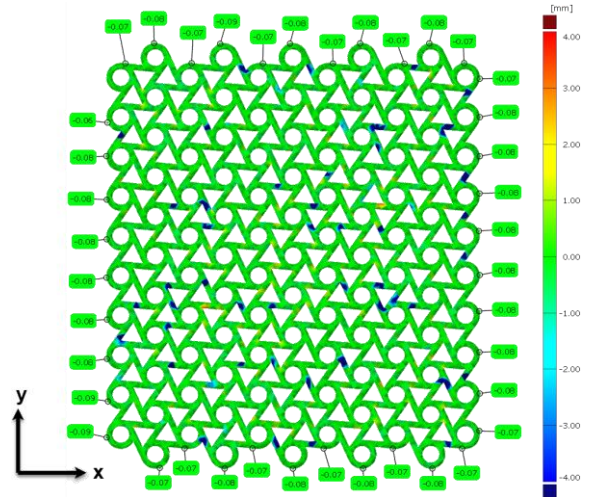


Şekil 10. Anti-trichiral geometri için boyutsal sapma sonuçları. "+", geometriden dışarı doğru, "-" geometriden içeri doğru boyutsal değişimi göstermektedir.

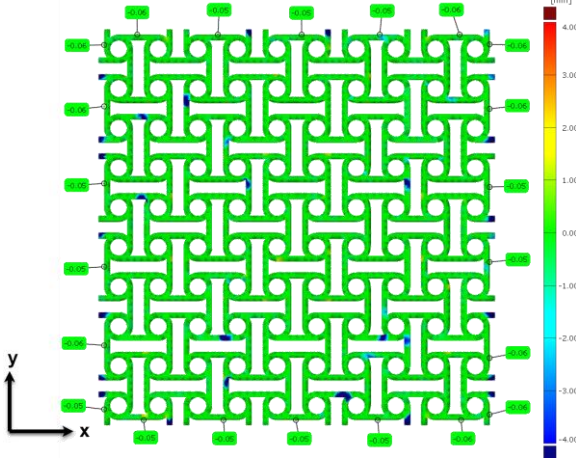
Chiral yapılar kendi içlerinde karşılaştırıldığında, hexachiral yapının en yüksek, trichiral yapıların ise en düşük boyutsal sapma gösterdiği görülmektedir. Bu da her bir düğüm noktasına teğet olan duvar miktarı arttıkça, geometrinin daha katı hale geldiğini, hacim oranının arttığını, bu da üretim sırasında daha yüksek sıcaklık farkları ve dolayısıyla kalıntı gerilmeler oluştuğunu ve nihayetinde parçadaki deformasyon miktarının arttığını göstermektedir.



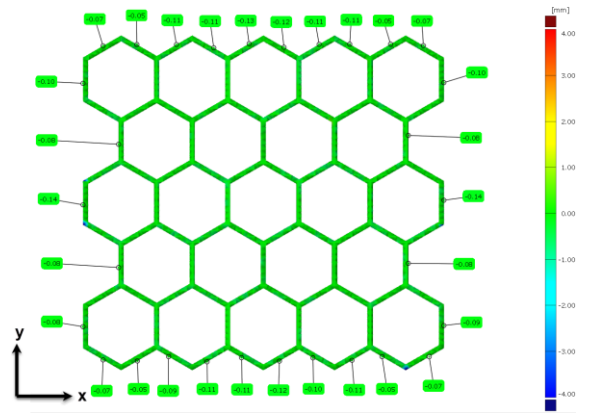
Şekil 11. Tetrachiral geometri için boyutsal sapma sonuçları. “+”, geometriden dışarı doğru, “-” geometriden içeri doğru boyutsal değişimi göstermektedir.



Şekil 13. Hexachiral geometri için boyutsal sapma sonuçları. “+”, geometriden dışarı doğru, “-” geometriden içeri doğru boyutsal değişimi göstermektedir.



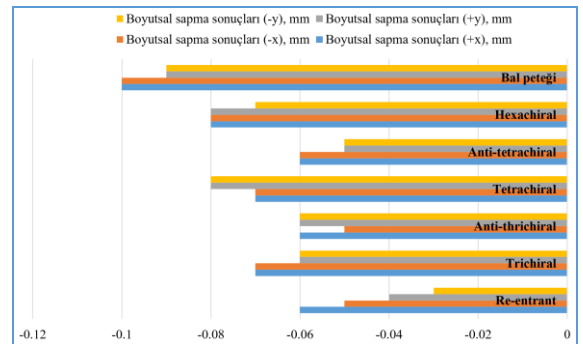
Şekil 12. Anti-tetrachiral geometri için boyutsal sapma sonuçları. “+”, geometriden dışarı doğru, “-” geometriden içeri doğru boyutsal değişimi göstermektedir.



Şekil 14. Balpeteği geometri için boyutsal sapma sonuçları. “+”, geometriden dışarı doğru, “-” geometriden içeri doğru boyutsal değişimi göstermektedir.

Re-entrant ve chiral gibi ökzetik yapıların üretimi sırasındaki boyutsal sapmaları, ökzetik olmayan yapılarla karşılaştırmak için bal peteği yapısının da termomekanik simülasyonu yapılmış ve boyutsal sapma sonuçları Şekil 14’te gösterilmiştir. Bal peteği geometrisi +x yönünde ortalama 0.10 mm, -x yönünde ortalama 0.10 mm, +y yönünde ortalama 0.09 mm ve -y yönünde ortalama 0.09 mm küçülmüştür. Dikkat edilirse, bal peteği yapısı ökzetik yapılara göre daha fazla deformasyon göstermiştir. Ökzetik yapılardaki ökzetik etkiden dolayı parçalar bal beteği yapısına nazaran daha az boyutsal sapma göstermiştir.

Farklı ökzetik yapılara ait +x, -x, +y ve -y yönlerindeki boyutsal sapma sonuçları grafiksel olarak Şekil 15’te gösterilmiştir. Şekil 15’ten de görülebileceği gibi farklı yönlerde, ökzetik yapılar, ökzetik olmayan balpeteği yapısına göre daha az boyutsal sapma göstermiştir.

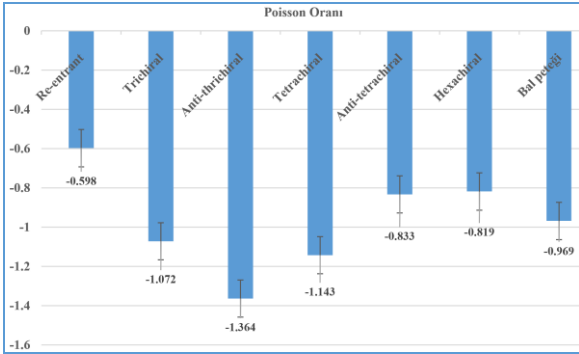


Şekil 15. Farklı eksenlerdeki boyutsal sapma sonuçları

Poisson Oranları

x ve y eksenlerdeki gerinimlerinin oranları sonucu elde edilen Poisson oranları Şekil 16'da gösterilmiştir. Burada elde edilen Poisson oranları parçalardaki basma ya da çekme yüklemeleri altında elde edilen Poisson oranlarından ziyade üretim sırasındaki katmanlar arasındaki yüksek sıcaklık farkları ve bunun neticende oluşan kalıntı gerilmeler ve boyutsal sapmalara ait olan Poisson oranlarıdır.

Poisson oranları incelendiğinde re-entrant yapının en yüksek orana (-0.598), anti-trichiral yapının ise en düşük orana (-1.364) sahip olduğu görülmektedir. Chiral yapılar kendi aralarında karşılaştırıldığında ise en yoğun ve düğüm noktasına en fazla teğet duvara sahip olan hexachiral yapının en yüksek Poisson oranına (-0.833) sahip olduğu görülmektedir. Düğüm noktasına teğet olan üç duvara sahip trichiral yapılarda, merkezdeki silindirin kendisine teğet olan duvarların iki karşıt yüzeyinde olduğu durumlarda (trichiral yapı), Poisson oranının (-1.072), merkezdeki silindirin kendisine teğet olan duvarların aynı yüzeyinde olduğu durumdaki (anti-trichiral yapı) Poisson oranından (-1.364) yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum düğüm noktasına teğet olan dört duvara sahip tetrachiral yapılarda tam tersidir: tetrachiral yapı -1.143 Poisson oranına sahipken, anti-tetrachiral yapı -0.833 Poisson oranına sahiptir.



Şekil 16. Farklı geometrilere ait Poisson oranları

Literatürde ökzetik yapıların ve özellikle re-entrant yapının biomedikal uygulamalarda kullanıldığı belirtilmiştir [21]. Lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretim sırasında ökzetik yapılardaki boyutsal sapmalar ve buna bağlı olarak Poisson oranlarının değişmesi ilgili biomedikal uygulamalarda (implant, kalça protezi vs.) uyumsuzluklara sebep olabilecektir. Hem re-entrant hem de chiral tipi ökzetik yapılar çimento harçlarında da kullanılabilir [22]. Daha fazla mukavemet ve enerji absorbe edebilme özelliği elde edebilmek için eklenen bu yapılarda meydana gelen boyutsal sapmalar, mekanik hesaplamalar ile elde edilen

sonuçlardan farklılıklara yol açacaktır. Farklı ökzetik yapılar otomotiv sanayinde, özellikle çarpışma kutusu tasarımlarında kullanılabilir [23]. Çarpma testlerinde doğru sonuçlar elde edebilmek için üretilen parçaların tasarıma mümkün olduğu kadar boyutsal olarak yakınsaması önem arz etmektedir. Uçak kanat yapılarında da kullanım imkanı bulan ökzetik yapılardaki boyutsal sapma ve farklı Poisson oranları, kanattan elde edilecek itme ve sürüklenme performansını doğrudan etkileyecektir [24].

SONUÇ

Bu çalışmada beş farklı ökzetik yapı (re-entrant, trichiral, anti-trichiral, tetrachiral, anti-tetrachiral ve hexachiral) ve bir adet ökzetik olmayan yapının (bal peteği), In718 malzemeden lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretimi sırasında meydana gelen, katmanlar arası yüksek sıcaklık farklı ve bunun neticesinde oluşan kalıntı gerilmeler ve boyutsal sapma miktarları, termomekanik simülasyon kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen boyutsal sapma sonuçları kullanılarak her bir geometriye ait Poisson oranları hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen temel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

- Re-entrant yapı ökzetik özelliğinden dolayı bütün yüzeylerde boyutsal olarak farklı küçülme miktarları göstermiştir. Trichiral, anti-trichiral, tetrachiral ve anti-tetrachiral yapılar ise re-entrant yapı ile kıyaslandığında, üretim sırasında daha az ökzetik özellik göstermişlerdir.
- Hexachiral yapı, bu çalışmada incelenen bütün ökzetik yapılar arasında, üretim sırasında en az ökzetik özellik gösteren yapı olmuştur.
- Boyutsal sapma miktarları, chiral yapılar özelinde karşılaştırıldığında, hexachiral yapı en yüksek, trichiral yapı en düşük boyutsal sapma göstermiştir.
- Ökzetik olmayan bal peteği yapısı, ökzetik yapılara göre daha fazla boyutsal sapma göstermiştir.
- Üretim sırasında en yüksek ökzetik özellik gösteren re-entrant yapı en yüksek Poisson oranına sahipken, anti-trichiral en düşük Poisson oranına sahiptir.

Bu çalışmanın devamı olarak, ilgili parçaların üretim ve basma testlerinin yapılması ve üretim sırasındaki ökzetik etki ile basma yüklemeleri altında, ilgili geometrilerin gösterdikleri ökzetik etkilerin karşılaştırması planlanmaktadır. Ayrıca sadece ökzetik tipi değil, et kalınlığı ve birim hücre sayısı gibi değişkenler de tasarıma eklenerek istatistiksel analiz çalışması yapılacaktır.

THE EFFECT OF AUXETICITY ON DIMENSIONAL DEVIATIONS FOR LASER POWDER BED FUSION PRODUCED AUXETIC LATTICES BASED ON PROCESS SIMULATION

The mechanical behavior of auxetic structures, which have a negative Poisson's ratio and can be used in industrial applications where energy absorption properties are needed, under compressive, tensile or bending loading, has been examined in the literature. However, there is no study in the literature on how much the auxetic properties affect the dimensional deviations of these structures as a result of their production by laser powder bed fusion method, an additive manufacturing process. In order to contribute to filling this gap, in this study, the high temperature difference between the layers and the resulting residual stresses and dimensional deviations that occurred during production of five different auxetic structures (re-entrant, trichiral, anti-trichiral, tetrachiral, anti-tetrachiral and hexachiral) and one non-auxetic structure (honeycomb) with laser powder bed fusion method from Inconel 718 material were investigated by using thermomechanical simulation. Poisson's ratios for each geometry were also calculated and compared. The results showed that auxetic structures also showed auxetic properties when produced by laser powder bed fusion method. As a result of the study, it was observed that re-entrant structure showed the highest and hexachiral structure showed the lowest auxetic properties. Among chiral structures consisting of walls tangent to a node, hexachiral structure showed the largest dimensional deviation. The non-auxetic honeycomb structure showed more dimensional deviations than the auxetic structures.

Keywords: auxetic lattice, dimensional deviation prediction, process simulation

KAYNAKÇA

- Gao, J., Cao, X., Xiao, M., Yang, Z., Zhou, X., Li, Y., Gao, L., Yan, W., Rabczuk, T. and Mai, Y., Rational designs of mechanical metamaterials: Formulations, architectures, tessellations and prospects, *Mater. Sci. Eng. R.*, 156 (2023) 100755. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100755>.
- Xue, X., Lin, C., Wu, F., Li, Z. and Liao, J., Lattice structures with negative Poisson's ratio: A review, *Mater. Today Commun.* 34 (2023) 105132. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105132>.
- Volpato, G. M., Tetzlaff, U. and Fredel, M. C., A comprehensive literature review on laser powder bed fusion of Inconel superalloys, *Addit. Manuf.*, 55 (2022) 102871. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102871>.
- Taghian, M., Mosallanejad, M. H., Lannunziata, E., Del Greco, G., Iuliano, L. and Saboori, A., Laser powder bed fusion of metallic components: Latest progress in productivity, quality, and cost perspectives, *J. Mater. Res. Technol.*, 27 (2023) 6484-6500. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.049>.
- Li, C., Snarr, S. E., Denlinger, E. R., Irwin, J. E., Gouge, M. F., Michaleris, P. and Beaman, J. J., Experimental parameter identification for part-scale thermal modeling of selective laser sintering of PA12, *Addit. Manuf.*, 48 (2021) 102362. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102362>.
- Jia, Y., Naceur, H., Saadlaoui, Y., Dubar, L. and Bergheau, J. M., A comprehensive comparison of modeling strategies and simulation techniques applied in powder-based metallic additive manufacturing processes, *J. Manuf. Process.*, 110 (2024) 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.048>.
- Evans, K. E. and Alderson, A., Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking!, *Adv. Mater.*, 12 (2000) 617-628. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200005\)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3).
- Yu, X., Zhou, J., Liang, H., Jiang, Z. and Wu, L., Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, *Prog. Mater. Sci.*, 94 (2018) 114-173. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.003>.
- Lorato, A., Innocenti, P., Scarpa, F., Alderson, A., Alderson, K. L., Zied, K. M., Ravirala, N., Miller, W., Smith, C. W. and Evans, K. E., The transverse elastic properties of chiral honeycombs, *Compos. Sci. Technol.*, 70 (2010) 1057-1063. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.07.008>.
- Grima, J. N., Gatt, R. and Farrugia, P-S., On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures. *Phys. Status Solidi B*, 245 (2008) 511-520. <https://doi.org/10.1002/pssb.200777704>.
- Jiang, Y., Rudra, B., Shim, J. and Li, Y., Limiting strain for auxeticity under large compressive deformation: chiral vs. re-entrant cellular solids, *Int. J. Solids Struct.*, 162 (2019) 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.11.035>

12. Zhang, J., Lu, G., Wang, Z., Ruan, D., Alomarah, A. and Durandet, Y., Large deformation of an auxetic structure in tension: Experiments and finite element analysis, *Compos. Struct.*, 184 (2018) 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.076>.
13. Hu, L. L., Zhou, M. Zh. and Deng, H., Dynamic crushing response of auxetic honeycombs under large deformation: Theoretical analysis and numerical simulation, *Thin-Walled Struct.*, 131 (2018) 373-384. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.04.020>.
14. Alderson, A., Alderson, K. L., Attard, D., Evans, K. E., Gatt, R., Grima, J. N., Miller, W., Ravirala, N., Smith, C. W. and Zied, K., Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading, *Compos. Sci. Technol.*, 70 (2010) 1042-1048. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.07.009>.
15. Hu, L. L., Ye, W. K. and Wu, Z. J. Mechanical property of anti-trichiral honeycombs under large deformation along the x-direction, *Thin-Walled Struct.*, 145 (2019) 106415. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106415>.
16. Zhong, R., Fu, M., Yin, Q., Xu, Q. and Hu, L., Special characteristics of tetrachiral honeycombs under large deformation, *Int. J. Solids Struct.*, 169 (2019) 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.04.020>
17. Mousanezhad, D., Haghpanah, B., Ghosh, R., Hamouda, A. M., Nayeb-Hashemi, H. and Vaziri, A., Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach, *Theor. Appl. Mech. Lett.*, 6 (2016) 81-96. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2016.02.004>.
18. Gülcan, O., Crashworthiness of laser powder bed fusion processed In718 auxetic metamaterials, *J Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 46 (2024) 414. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-04927-6>.
19. Shao, Q., Ding, C., Ji, X., Mu, J., Wang, X., Xue, Y., Fabrication, microstructure and mechanical properties of a 3D re-entrant anti-trichiral honeycomb structure with excellent auxeticity and mechanical performance, *J. Mater. Res. Technol.*, 32 (2024) 841-859. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.07.098>.
20. Yavari, R., Smoqi, Z., Riensche, A., Bevans, B., Kobir, H., Mendoza, H., Song, H., Cole, K., Rao, P., Part-scale thermal simulation of laser powder bed fusion using graph theory: Effect of thermal history on porosity, microstructure evolution, and recoater crash, *Mater. Des.*, 204 (2021) 109685. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109685>.
21. Jiang, D., Thissen, H., Hughes, T. C., Yang, K., Wilson, R., Murphy, A. B., Nguyen, V., Advances in additive manufacturing of auxetic structures for biomedical applications, *Mater. Today. Comm.*, 40 (2024) 110045. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110045>.
22. Momoh, E. O., Jayasinghe, A., Hajsadeghi, M., Vinai, R., Evans, K. E., Kripakaran, P., Orr, J., A state-of-the-art review on the application of auxetic materials in cementitious composites, *Thin-Walled Struct.*, 196 (2024) 111447. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111447>.
23. Gomes, R. A., de Oliveira, L. A., Francisco, M. B., Gomes, G. F., Tubular auxetic structures: A review, *Thin-Walled Structures*, 188 (2023) 110850. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110850>.
24. Madhu, B. P., Johnney, M. A., Bahubalendruni, M. V. A. R., Auxetic mechanical metamaterials and their futuristic developments: A state-of-art review, *Mater. Today Comm.*, 34 (2023) 105285. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105285>.