

## Özgün Bir Kafes (Lattice) Yapı Tasarımının Auxetic Davranışının İncelenmesi

Nuriye Nur KAYA<sup>1\*</sup>, İhsan TOKTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Product Design, Firat University, 23300 Ankara, Turkey

<sup>2</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Architecture And Fine Arts, Industrial Design Department, Ankara, Turkey

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 20/05/2024  
Düzeltilme: 24/06/2024  
Kabul: 25/06/2024

### Anahtar Kelimeler

Negatif Poisson Oranı  
Ökzetik yapılar  
Kafes yapı  
Stravaski hücre

### Article Info

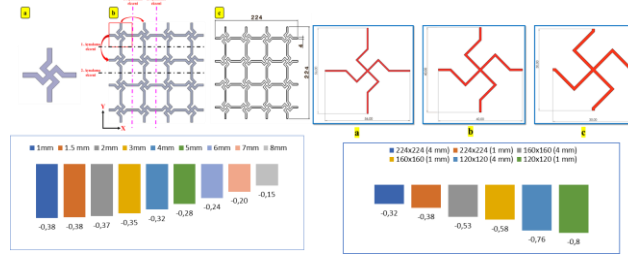
Research article  
Received: 20/05/2024  
Revision: 24/06/2024  
Accepted: 25/06/2024

### Keywords

Negative Poisson's Ratio  
Auxetic Structure  
Lattice Structures  
Stravaski Cell

### Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, mimari desenden esinlenerek oluşturulan özgün yapıya "Stravaski" adı verilerek ökzetik özelliği incelenmiştir. Ayrıca çalışılan latis yapının geometrik iç kalınlık değişkeni ile dikey ve yatay uzantıların kısaltılmasıyla oluşan birim hücre ile meydana gelen latis yapılarının negatif poisson oranı değerleri incelenmiştir. / In this study, the original structure inspired by the architectural pattern was named "Stravaski" and its auxetic property was analyzed. In addition, the geometric internal thickness variable of the lattice structure and the negative Poisson's ratio values of the lattice structures formed by the unit cell formed by shortening the vertical and horizontal extensions were analyzed.



**Şekil A:** Tasarlanan latis yapıların geometrik iç kalınlık ile Poisson oranı ilişkisi. / **Figure A:** The geometric internal thickness and Poisson's ratio of specified lattice systems are related.

### Önemli noktalar (Highlights)

- Literatürde bulunmayan özgün bir ökzetik latis yapı geometrisi tasarlanmış ve modellenmiştir. / A novel auxetic lattice structure geometry, not previously seen in the literature, has been created and modeled.
- İncelenen kafes yapı tasarımların hepsi negatif Poisson oranına sahiptir. / All of the designs examined have a negative Poisson's ratio. /
- İncelenen ökzetik yapı tasarımlarda geometrik iç kalınlığı arttıkça, Poisson oranı değerleri negative yönde sıfır değerine yaklaşmıştır. / In the examined auxetic structure designs, as the geometric inner thickness increases, the Poisson's ratio values approach zero in the negative direction

**Aim (Amaç):** Bu çalışmanın amacı, literatürde özgün bir ökzetik yapı tasarlayıp analizlerini gerçekleştirerek negatif poisson oranına sahip olduğunu belirlemektir. / The purpose of this work is to design, examine, and establish the existence of a novel auxetic structure with a negative poisson's ratio.

**Originality (Özgünlük):** Bu çalışmada literatürde olmayan özgün bir ökzetik kafes yapı tasarlanarak literatüre kazandırılmıştır. / A novel auxetic lattice structure, not previously seen in the literature, was constructed and introduced in this study.

**Results (Bulgular):** Dikey ve yatay uzantılarda yapılan kısaltmaların ve geometrik iç kalınlığın poisson oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Birim hücreler birbirlerine yaklaştıkça ve geometrik iç kalınlık azaldıkça kafes yapılarının ökzetiklik özelliği artmıştır. / It was observed that the shortening of the vertical and horizontal extensions and the geometric internal thickness have a significant effect on the Poisson's ratio. The euxetic property of the lattice structures increased as the unit cells approached each other and the geometric internal thickness decreased.

**Conclusion (Sonuç):** Analiz sonuçlarına göre geometrik iç kalınlık azaldıkça ve birim hücreler birbirlerine yaklaştıkça tasarımların auxetilik özelliği artmıştır. Tasarlanan latis yapının analiz sonuçları literatürdeki diğer yapılarla kıyaslanmıştır. / According to the results of the analysis, as the geometric inner thickness decreases and the unit cells get closer to each other, the auxetics of the designs increase. The analysis results of the designed lattice structure are compared with other structures in the literature.



## Özgün Bir Kafes (Lattice) Yapı Tasarımının Ökzetik Davranışının İncelenmesi

Nuriye Nur KAYA<sup>1\*</sup>, İhsan TOKTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Product Design, Fırat University, 23300 Ankara, Turkey

<sup>2</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Architecture And Fine Arts, Industrial Design Department, Ankara, Turkey

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 20/05/2024  
Düzeltilme: 24/06/2024  
Kabul: 25/06/2024

### Anahtar Kelimeler

Negatif Poisson oranı  
Ökzetik yapılar  
Kafes yapı  
Stravaski hücre

### Öz

Ökzetik (Ing.Auxetic) yapılar, geleneksel malzemelere göre geometrik tasarımlarından dolayı negatif poisson oranına sahip özel yapılardır. Bu yapılara çekme kuvveti uygulandığında enine genişlemeler izlenirken, basma kuvveti uygulandığında ise daralmalar gözlenmektedir. Bu yapılara çekme kuvveti uygulandığında enine genişlemeler izlenirken, basma kuvveti uygulandığında daralmalar gözlenmektedir. Örnek olarak kiral, ok ucu, re-entrant gibi birçok farklı birim hücre tasarımları mevcuttur. Bu çalışmada, mevcut literatürde yer almayan özgün olarak tasarlanmış ve Stravaski adı verilmiş bir hücre yapısının ökzetiklik özelliği araştırılmıştır. Farklı geometrik iç kalınlık ölçüleri verilerek tasarlanan kafes yapının sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve negatif poisson oranına sahip olduğu bulunmuştur. Geometrik iç kalınlığın negatif poisson oranına etkisi incelendiğinde 224×224 mm, 160×160 mm ve 120×120 mm'lik ölçüde tasarlanan Stravaski kafes hücre yapılarının, 1, 1.5, 2, 3, 5, 6, 7, 8 mm kalınlıklardan 1,0 mm geometrik iç kalınlıklarında en iyi ökzetik özellik davranışı sergilediği tespit edilmiştir. Üç farklı ölçüdeki Stravaski hücre yapılarından 120×120 mm'lik ölçüye sahip Stravaski kafes yapısının diğer yapılara göre en yüksek ökzetik özellik gösterdiği bulunmuştur.

## Investigation of the Auxetic Behavior of an Original Lattice Structure Design

### Article Info

Research article  
Received: 20/05/2024  
Revision: 24/06/2024  
Accepted: 25/06/2024

### Keywords

Negative Poisson's Ratio  
Auxetic Structure  
Lattice Structures  
Stravaski Cell

### Abstract

Auxetic structures are special structures with a negative Poisson's ratio due to their geometric design compared to conventional materials. Transverse expansions are observed when a tensile force is applied to these structures, while contractions are observed when the compressive force is applied. Transverse expansions are observed when tensile force is applied to these structures, while contractions are observed when compressive force is applied. For example, there are many different unit cell designs, such as chiral, arrowhead, and re-entrant. In this study, the auxetic property of a uniquely designed cell structure called Stravaski, which is not included in the existing literature, was investigated. Finite element analysis of the lattice structure designed by giving different geometric internal thickness dimensions was performed, and it was found to have a negative Poisson's ratio. When the effect of geometric internal thickness on the negative Poisson's ratio was examined, it was found that Stravaski lattice cell structures designed in 224×224 mm, 160×160 mm, and 120×120 mm dimensions exhibited the best auxetic property behaviour at 1.0 mm geometric internal thickness. Among the Stravaski lattice cell structures with three different dimensions, it was found that the Stravaski lattice structure with a dimension of 120×120 mm showed the highest auxetic properties compared to the other structures.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ökzetik yapılar, geleneksel malzelerin pozitif poisson oranına sahip olmasının tam tersine, kendine özgün geometrik yapıların olmasından ötürü negatif poisson oranı özelliği göstermektedir. Ökzetik yapılara çekme kuvveti uygulandığında

enine genişlerken, basma kuvveti uygulandığında enine daralma özelliği göstermektedir [1]. Bu nedenle bu yapılar enerji sönmüleme kabiliyeti [2], kopma dayanımı [3], akustik davranış [4], kırılma tokluğu [5] gibi üstün özelliklere sahiptirler. Sahip oldukları bu özelliklerinden ötürü otomotiv,

havacılık, savunma ve medikal gibi sektörlerde oldukça tercih edilmeye başlanmıştır [6].

Tüm ökzetik yapılarda birim hücre tasarımı esastır [7]. Birim hücrede yapılan yenilikler ile yapıların özellikleri iyileştirilmektedir. Ökzetik yapılar çalışmaya başlandığı günden bugüne kadar birçok iki boyutlu ve üç boyutlu ökzetik yapılar geliştirilmiştir [8]. Bal peteği ve re-entrant yapılar en kapsamlı incelenen ökzetik yapılar olmuştur. Bal peteği ve re-entrant yapılarıdaki düşük sertlik ve düşük mukavemet gibi olumsuzluklara yönelik bu yapılarda bir dizi yenilikler yapılmıştır [9,10]. Fu ve arkadaşları [11], re-entrant yapısının hücre duvarlarına, yatay ve dikey bağlantılar ekleyerek yapıyı daha mukavim hale getirmişlerdir. Ayrıca tek re-entrant birim hücrelerinin deformasyon noktalarını ve ezilme mukavemetini geliştirmek için farklı hücrelerden oluşan hibrit hücre konfigürasyonları da çalışmışlardır [9,12,13]. Hiyerarşik tasarımlar ile ökzetik yapıları geliştirmek etkili bir yöntem olmuştur. Kullanılan hücre yapılarının köşeleri ve duvarları gibi bazı parçalar daha küçük yapılarla değiştirilmektedir. Bu küçük alt yapılar ile deformasyon noktaları optimize edilerek, enerji emilimi ve ezilme mukavemeti önemli ölçüde artırılmıştır [14,15]. Su ve ekibi [16] ökzetik özelliğe sahip yeni bir hiyerarşik tüp tasarlamışlar ve Euler kiriş teorisine dayanarak negatif poisson oranlı hiyerarşik tüplerin küçük deformasyonlar altındaki eşdeğer elastik parametrelerini üretmişlerdir. Tan ve arkadaşları [14] re-entrant hücre yapısının hücre duvarlarını iki farklı hiyerarşik yapı ile tasarlayarak ezilme kuvvetini arttırdığını bulmuşlardır. Zhang ve arkadaşları [17], re-entrant hücre yapısını yeni bir dikey dikme ile birleştirerek yeni bir ökzetik yapı tasarlamış ve bu yapının mekanik davranışlarını inceleyerek, esnekliğin geleneksel re-entrant yapısına göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Khan ve arkadaşları [18], benzer şekilde re-entrant yapısının değiştirilmiş formunun, geleneksel re-entrant yapısıyla kıyaslandığında negatif poisson oranının arttığını belirlemişlerdir. Ataalp ve Türkmen'in yaptıkları çalışmada re-entrant, antichiral ve bal peteği yapılarının darbe yüklemesi altında ökzetik özellik gösteren re-entrant ve antichiral yapıların geleneksel yapılara göre daha yüksek direnç gösterdiklerini bulmuşlardır [19]. Usta ve ekibi [20] re-entrant dolgu çarpışma kutularının dinamik çarpma yükü altında sergilediği davranış incelemiştir. Ökzetik yapılar dinamik yükler altında çarpışma tüplerinin

dayanımını ve enerji absorbe etme kapasitesini artırdığı görülmüştür [20].

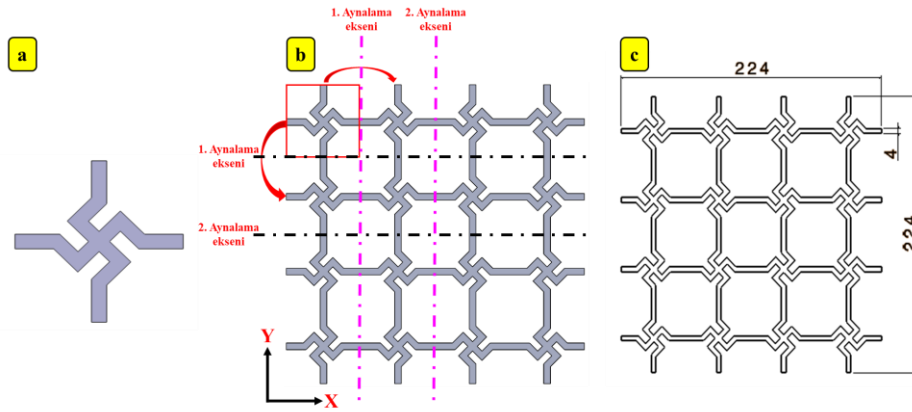
Bu çalışmada, mimari eserdeki bir desenden esinlenerek Stravaski adında yeni bir kafes yapı tasarlanmıştır. Çalışmanın asıl amacı, mevcut literatürde daha önce çalışılmayan bir hücre tasarımının ökzetiklik özelliği saptanarak literatüre yeni bir ökzetik özellikli birim hücre yapısı kazandırılmasıdır. Bu nedenle 4×4 matrisli olarak çalışılan kafes yapı, ilk olarak 56×56 mm birim hücre ölçüsü ile 1 mm geometrik iç kalınlıktan başlayarak 1.5 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm'ye kadar tasarımlar gerçekleştirilmiş ve sonlu eleman analizleri yapılmıştır. 56×56 mm'lik birim hücre ile oluşan kafes yapının geometrik iç kalınlığı azaldıkça negatif poisson oranının arttığı gözlenmiştir. Birim hücrelerin ölçüsü değiştirilmeden sadece dikey ve yatay uzantılarından yapılan kısaltmalar ile 40×40 mm'lik ve 30×30 mm'lik birim hücrelerde 4×4 matrisli yapı olacak şekilde 4 mm ve 1 mm geometrik iç kalınlıklarda sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları irdelendiğinde dikey ve yatay uzantılar kısaltıldıkça yani birim hücreler birbirlerine yaklaştıkça negatif poisson oranının arttığı gözlenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

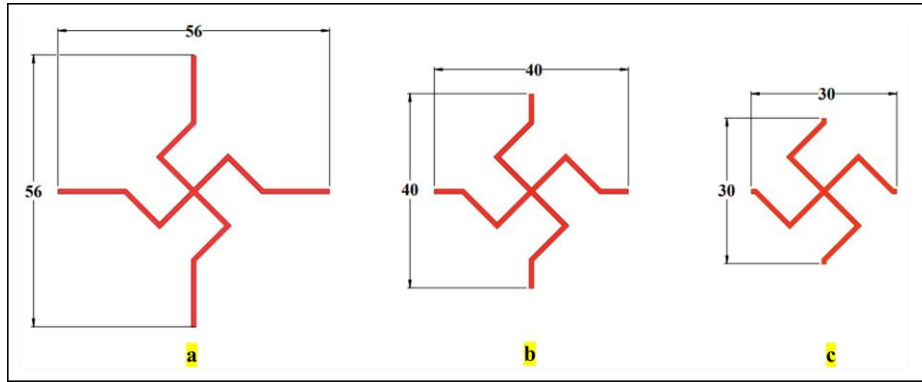
### 2.1. Birim Hücre Geometrisi (Birim Hücre Geometrisi)

Birim hücre geometrisi bir mimari eserden esinlenerek ızgara yöntemi ile çizilmiştir [21]. Birim hücre tasarımları AUTOCAD yazılımı ile 2B olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1a). 2B olarak çizilen tasarımlar SOLIDWORKS çizim programı yardımıyla 3B haline çevrilmiştir. Tasarımı yapılan birim hücre, aynalama yöntemi ile çoğaltılarak matrisli yapılar oluşturulmuştur. Birim hücre, Şekil 1b'de ifade edildiği gibi ilk olarak X eksen yönünde 1. aynalama eksen ve ardından 2. aynalama eksen kullanılarak 4 matrisli hücre yapısı haline getirilir. Daha sonra X eksen yönünde aynalanan bu birim hücreler Y eksen yönünde sırasıyla 1. ve 2. aynalama eksenleri yardımıyla çoğaltılarak 4×4 matrisli kafes yapı elde edilmiştir. İlk olarak Şekil 1c'de görülen 224×224 mm'lik bir simetrik yapı oluşturulmuştur. Bu kafes yapı için 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 3 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm geometrik iç kalınlık ölçüleri değişken olarak kullanılmış ve poisson oranları hesaplanmıştır.

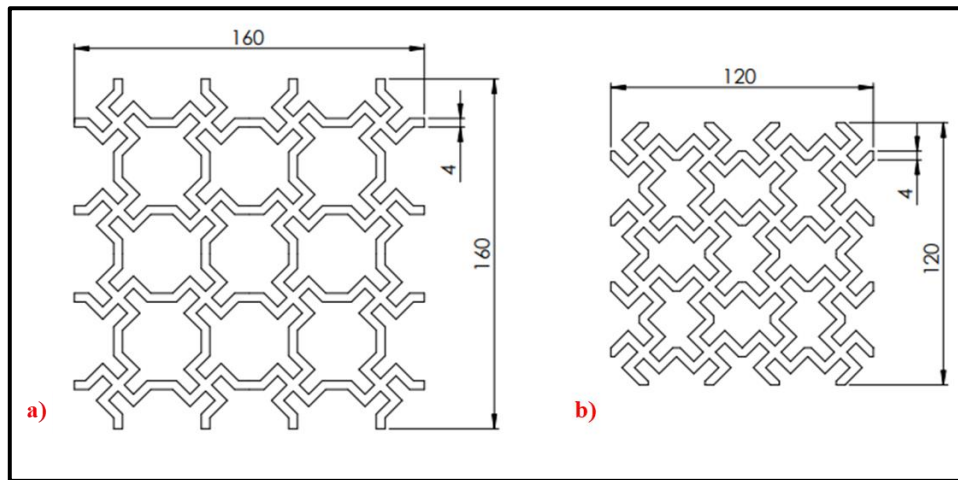
Diğer 4×4 matrisli yapıları oluşturmak için birim hücrenin dikey ve yatay uzantıları kısaltılarak elde edilen yeni matrisli yapıların poisson oranı değişimi incelenmiştir (Şekil 2).



Şekil 1. a) Birim hücre, b) aynalama yöntemi, c) 4×4 matrisli kafes yapı (a) Unit cell, b) mirroring method, c) 4x4 matrix lattice structure)



Şekil 2. Birim hücrelerin dikey ve yatay uzantılarının kısaltılmış hali a) 56×56 mm'lik birim hücre, b) 40×40 mm'lik birim hücre, c) 30×30 mm'lik birim hücre (The shortened version of vertical and horizontal extensions of unit cells a) 56×56 mm unit cell, b) 40×40 mm unit cell, c) 30×30 mm unit cell)



Şekil 3. Stravaski kafes yapısının a) 160×160 mm'lik matrisli kafes yapısı, b) 120×120 mm'lik matrisli kafes yapısı (Stravaski lattice structure a) 160×160 mm matrix lattice structure, b) 120×120 mm matrix lattice structure)

Birim hücrenin dikey ve yatay uzantılarının kısaltılmasıyla oluşan 160×160 mm ile 120×120 mm'lik matrisli Stravaski kafes yapılarının 1 mm ve 4 mm geometrik iç kalınlıktaki poisson oranları incelenmiştir (Şekil 3).

## 2.2. Poisson Oranı Hesaplaması (Poisson's Ratio Calculation)

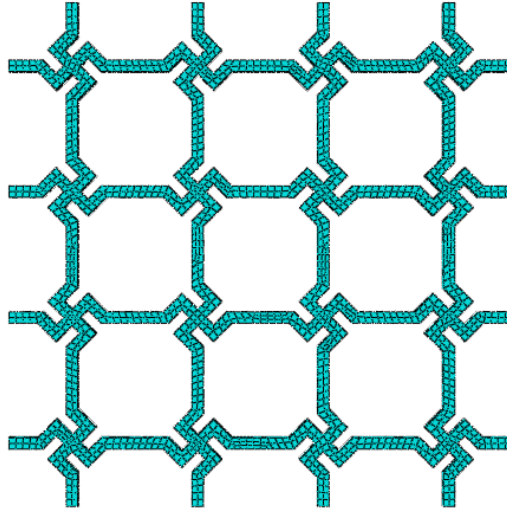
Poisson oranı enine gerilmenin boyuna gerilmeye oranıdır ve işareti negatiftir. Ancak bu negatif olma durumu formülden gelmektedir ve geleneksel malzemelerde çekme kuvveti yönünde, dikey artış olurken yatay yönde daralma meydana gelmektedir [22]. Buradaki daralmadan kaynaklı olarak  $\epsilon_x$ 'in (-) işaretli olması ve iki eksi işaretin yan yana gelerek pozitif işarete dönüşmesinden ötürü pozitif poisson oranı elde edilmektedir. Negatif poisson oranı ise bu durumun tam tersi şeklinde olmaktadır. Ökzetik bir yapı çekme kuvvetine maruz kalınca dikey yönde artış olurken yatay yönde de genişleme görülmektedir. Bu durumda  $\epsilon_x$ 'in (+) işaretli olmasıyla poisson oranı negatif olarak elde edilmektedir. Tasarımlarda 1, 2 ve 3 nolu denklemler kullanılarak poisson oranı hesaplamaları yapılmıştır.

$$v = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}, \quad v : \text{Poisson oranı} \quad (1)$$

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_{x0}} = \frac{L_{x1} - L_{x0}}{L_{x0}}, \quad (2)$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta L_y}{L_{y0}} = \frac{L_{y1} - L_{y0}}{L_{y0}}, \quad (3)$$

Burada, v: Poisson oranı,  $\epsilon_x$ : enine uzama,  $\epsilon_y$ : boyuna uzama,  $L_0$ : ilk boy,  $L_1$ : son boy olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Stravaski yapısının ağ elemanları görünümü (Mesh elements view of the Stravaski structure)

## 2.3. Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis)

Yeni kafes yapının negatif poisson oranına sahip olup olmadığını tespit etmek için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Solidworks tasarım programından x.t formatında kaydedilen tasarımlar ABAQUS CAE analiz programına aktararak analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analiz çalışmalarında analiz sonuçlarının doğruluk hassasiyetini arttırmak için mesh kalitesi oldukça önem teşkil etmektedir. Bu sebeple mesh aşamasında düğüm noktaları ne kadar çok olursa, analizlerin sonuçlarının doğruluğuda bir o kadar fazla olacaktır. Bu nedenle tasarımlar Von mises gerilimi maksimum seviyeye ulaşana kadar meshlerdeki ağ modellerinde yapılan uygulamalarla mesh yakınsaması gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda 20 düğümlü kuadratik yapı, azaltılmış entegrasyonlu altıgen elemanlarla ağ (mesh) haline getirilmiştir. Ağ boyutu, ABAQUS kontrolü tarafından herhangi bir uyarı veya hata bulunmayacak ve ayrıca yapının deformasyonuna uygun olacak şekilde seçilmiştir. Tasarıma ait mesh yapısı Şekil 4'te verilmiştir. Bütün tasarımlarda malzeme olarak yapı çeliği atanmıştır (Tablo 1). Toplamda 12 farklı analiz gerçekleştirilmiştir.

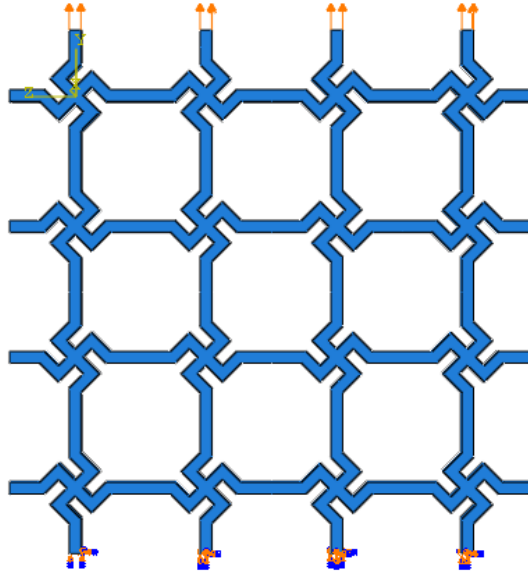
**Table 1.** Mechanical properties of AlSi10Mg aluminum alloy (AlSi10Mg alüminyum alaşımının mekanik özellikleri)

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Young's Modulus (Gpa)
AlSi10Mg	2,67 g/cm <sup>3</sup>	0,33	440	240	70

### 2.3.1. Sonlu elemanlar analizinde sınır koşulları

(Boundary conditions in finite element analysis)  
Kafes yapıların analizlerini gerçekleştirmek için tasarımın sınır koşulları oluşturulmuştur (Şekil 5). Tasarım alt kısmından sabitlenerek y eksenini yönünde 1 mm'lik sabit uzama gerilmesi

uygulanmıştır. Kafes yapının ağırlığı ihmal edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda sadece statik analiz yapılmış olup plastik bölgeye geçilmemiştir. Amacımız tasarladığımız yapının negatif poisson oranı hesaplamaktır. Bu nedenle tasarımların poisson oranını belirlemek için X ve Y yönündeki şekil değişimlerine bakılmıştır.



Şekil 5. Stravaski kafes yapısının sınır koşulları (Boundary conditions of Stravaski lattice structure)

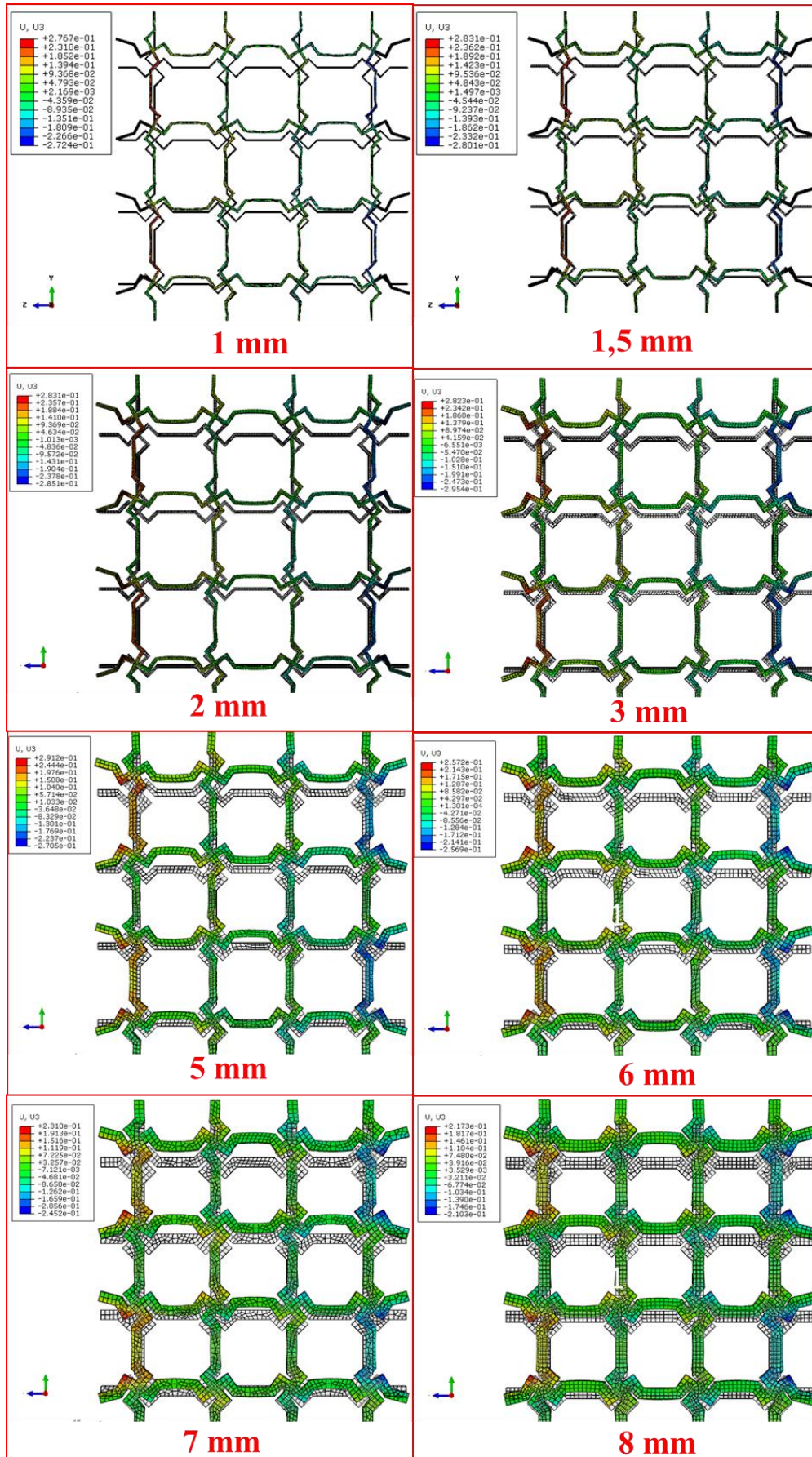
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tasarlanan kafes yapıların, geometrik iç kalınlık ile poisson oranı ilişkisi incelenmiştir. 4×4 matrisli kafes yapılardan 224×224 mm ölçüye sahip olan yapıya 8 farklı geometrik iç kalınlık, 160×160 mm ile 120×120 mm matrisli kafes yapılara 1 mm ve 4 mm olmak üzere 2 farklı geometrik iç kalınlık atanarak toplam 12 farklı kafes yapı analiz edilmiştir. Tasarımların her birine aynı değerlerde çekme işlemi uygulanmıştır. Kafes yapıların, X ve Y eksenini yönündeki şekil değişim miktarları Şekil 6'da görüldüğü gibi denklemlerde yerine konularak poisson oranları hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\Delta L_x}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{0.162 - (-0.160)}{224} = 0,00144 \\ \epsilon_y &= \frac{\Delta L_y}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{1}{224} = 0,00446 \\ \nu &= -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = \frac{0,00144}{0,00446} \quad \nu : \text{Poisson oranı} = -0,323\end{aligned}$$

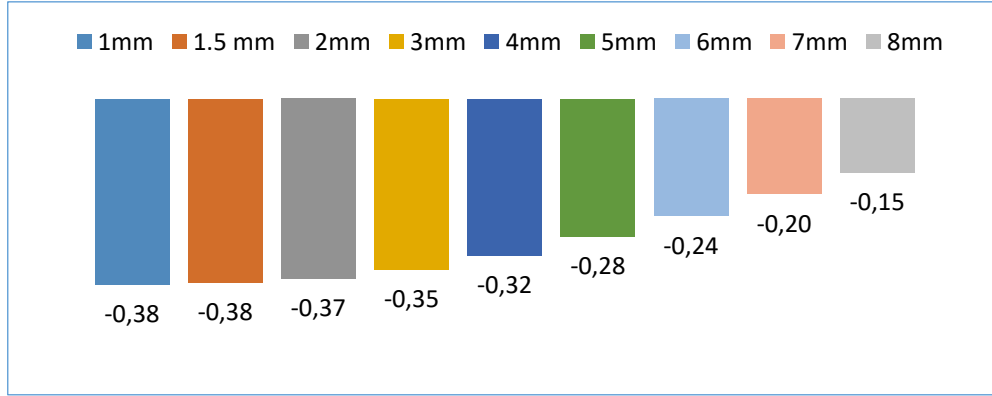
Şekil 6. 4 mm geometrik iç kalınlığa sahip kafes yapısının poisson oranı hesaplaması (Poisson's ratio calculation of a lattice structure with 4 mm geometric internal thickness)

Poisson oranları 1 mm ile 8 mm aralığında 8 farklı geometrik iç kalınlığa göre hesaplanmıştır. Her bir kalınlık için deformasyon görüntüleri eklenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. 224×224 mm kafes yapının 1, 1.5, 2, 3, 5, 6, 7, 8 mm kalınlıklarda deformasyonu görüntüleri  
(Deformation images of 224×224 mm lattice structure with thicknesses of 1, 1.5, 2, 3, 3, 5, 6, 7, 8 mm)

Aynı analiz, farklı kalınlıklar için tekrarlanırken, kalınlık azaldıkça yapının ökzetik davranışının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 8).



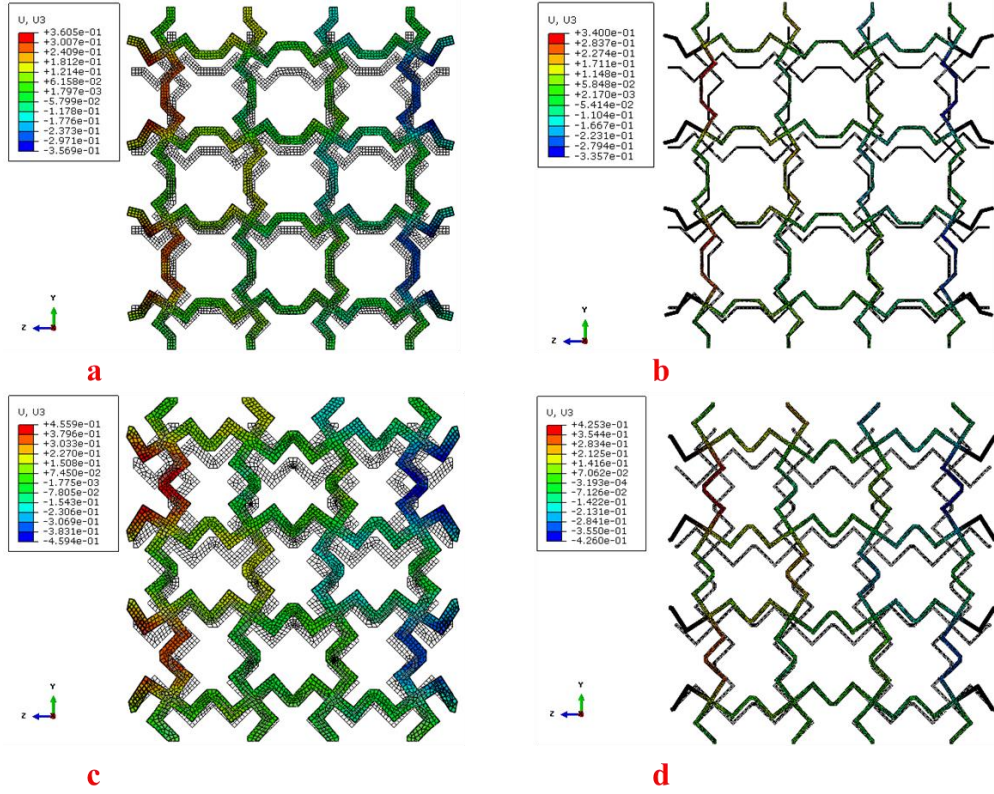
**Şekil 8.** 224×224 mm kafes yapının farklı geometrik iç kalınlıklarında poisson oranlarının karşılaştırılması (Comparison of Poisson's ratios of 224×224 mm lattice structure at different geometric internal thicknesses)

Şekil 8’de negatif poisson oranı, 1 mm geometrik iç kalınlıkta en yüksek değerde iken 8 mm geometrik iç kalınlıkta en küçük bulunmuştur. Geometrik iç kalınlık 1,5 mm’den 8 mm’ye doğru artıkça negatif poisson oranı doğrusal bir şekilde azalma sergilemiştir. Ancak, 1,5 mm’nin altında ki geometrik iç kalınlıklarda bir doygunluk noktasına ulaşmış ve negatif poisson oranında kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Farklı geometrik iç kalınlıklarda tasarlanan yapıların ekstrüzyon kalınlıkları 4 mm olarak sabit tutulmuştur. Zhang ve arkadaşları [24] re-entrant kiral yapısının analiz ve deney sonuçlarını incelemiştir. Tek yönlü uygulanan kuvvet yönünde deformasyon sırasında poisson oranı değerinin değiştiğini ve neredeyse -4’e kadar negatif poisson oranına ulaşarak ökzetik özellik gösterdiğini bulmuşlardır.

Bu çalışmada, dikey ve yatay uzantılarda yapılan kısaltmaların ve geometrik iç kalınlığın poisson oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Yapılan kısaltmalar poisson oranını belirlemede etkili olduğundan, bu kısaltmaların poisson oranı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla 160×160 mm ve 120×120 mm olarak tasarlanan kafes yapıların analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 9).

Şekil 9’da görüleceği üzere kafes yapılarda yapılan kısaltmalar artıkça negatif poisson oranı özelliği arttığı gözlenmiştir. 160×160 mm ölçüsündeki stravaski yapısında 4 mm ve 1 mm geometrik iç kalınlıkta X yönündeki genişleme ölçüsü yaklaşık olarak  $\pm 3,500 e^{-1}$  bulunurken, 120×120 mm ölçüsündeki Stravaski yapısında ise aynı kalınlıklarda X yönündeki şekil değişimi yaklaşık olarak  $\pm 4,500 e^{-1}$  olarak bulunmuştur.

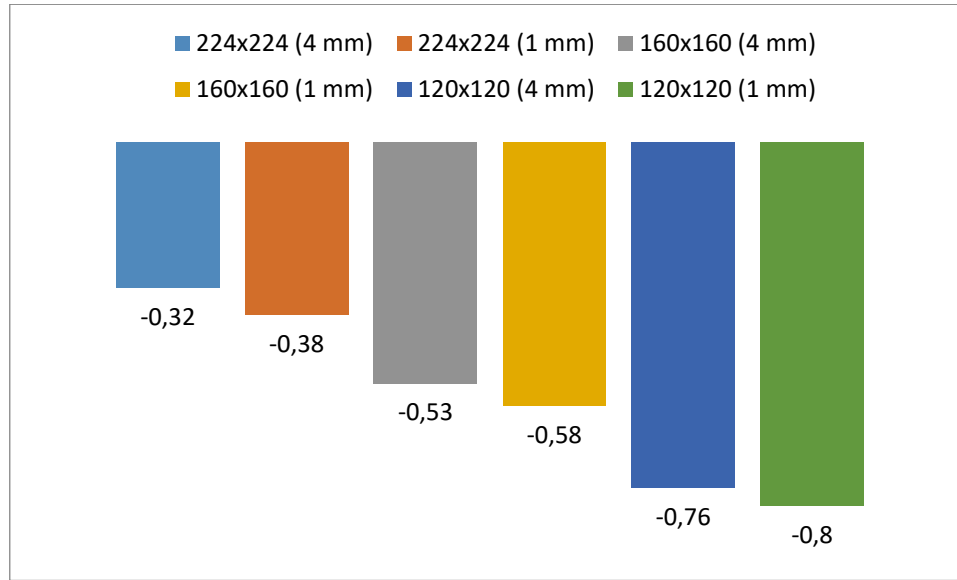




**Şekil 9.** Farklı ölçülerdeki Stravaski kafes yapılarının deformasyon görüntüleri a) 160×160 mm 4 mm geometrik iç kalınlıktaki stravaski kafes yapısı, b) 160×160 mm 1 mm geometrik iç kalınlıktaki stravaski kafes yapısı, c) 120×120 mm 4 mm geometrik iç kalınlıktaki stravaski kafes yapısı, d) 120×120 mm 1 mm geometrik iç kalınlıktaki stravaski kafes yapısı (Deformation images of Stravaski lattice structures of different dimensions a) 160×160 mm 4 mm geometric internal thickness Stravaski lattice structure, b) 160×160 mm 1 mm geometric internal thickness Stravaski lattice structure, c) 120×120 mm 4 mm geometric internal thickness Stravaski lattice structure, d) 120×120 mm 1 mm geometric internal thickness Stravaski lattice structure)

Bu yeni yapılar, önceki durumda olduğu gibi aynı yöntem ve sıra ile analiz edilmiştir. Yapıların deformasyonu bir öncekine göre çok daha fazla ökzetik davranış göstermektedir. En yüksek negatif poisson oranı 120×120 mm kafes yapının 1 mm geometrik iç kalınlığında -0,80 olarak bulunmuştur. Aynı yapının 4 mm geometrik iç kalınlığında ise bu değer -0,76'ya gerilemiştir. 160 x 160 mm kafes yapıda da aynı durum meydana gelmiş ve 1 mm geometrik iç kalınlıkta negatif poisson oranı -0,58 bulunurken 4 mm geometrik iç kalınlıkta bu değer -0,53 olarak ölçülmüştür. Kısaltma yapılmamış

224×224 mm'lik yapı ise en düşük negatif poisson oranı sergilemiş ve değerler 1 mm geometrik iç kalınlıkta -0,38 iken 4 mm geometrik iç kalınlıkta -0,32 olarak bulunmuştur (Şekil 10). Bu durumun, yapıda ökzetik davranışa neden olan 16 çekirdek figürünün yapılan kısaltmalarla birbirlerine yaklaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Meena ve ekibi [25] tarafından çalışılan S şeklindeki birim hücre tasarımında ökzetik tepkilerinin re-entrant hücre yapısına göre daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur.



**Şekil 10.** Dikey ve yatay uzantıların kısaltılmasıyla oluşan yapıların poisson oranı ilişkisi (Poisson's ratio relationship of structures formed by shortening vertical and horizontal extensions)

Genel olarak azalan geometrik iç kalınlığın yapıların negatif poisson oranlarında artışa neden olduğu gözlenmiştir. Gelecek çalışmalarda Stravaski yapısının deneysel çalışmaları literatürde

bulunan diğer geometrik tasarımlarla karşılaştırılarak birbirlerine göre avantaj ya da dezavantajları incelenebilir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Nuriye Nur KAYA:** Modelleme, analiz ve makale yazım sürecini yapmıştır.

She has done the modeling, analysis and article writing process.

**İhsan TOKTAŞ:** Konu ve makale değerlendirmesine katkıda bulunmuştur.

Contributed to topic and article evaluation.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, 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>.

[2] M. Xu, Z. Xu, Z. Zhang, H. Lei, Y. Bai, D. Fang, Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies, Int J Mech Sci. 159 (2019) 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.05.044>.

[3] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, Prog Mater Sci. 46 (2001) 559–632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5).

[4] K.E. Evans, A. Alderson, Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking!, Advanced Materials. 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).

[5] C. Huang, L. Chen, Negative Poisson's Ratio in Modern Functional Materials, Advanced Materials. 28 (2016) 8079–8096. <https://doi.org/10.1002/adma.201601363>.

[6] A. Alderson, K.L. Alderson, Auxetic materials, Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng. 221 (2007) 565–575. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO185>.

- [7] R. Gatt, L. Mizzi, J.I. Azzopardi, K.M. Azzopardi, D. Attard, A. Casha, J. Briffa, J.N. Grima, Hierarchical Auxetic Mechanical Metamaterials, *Sci Rep.* 5 (2015) 8395. <https://doi.org/10.1038/srep08395>.
- [8] C. Qi, F. Jiang, A. Remennikov, L.-Z. Pei, J. Liu, J.-S. Wang, X.-W. Liao, S. Yang, Quasi-static crushing behavior of novel re-entrant circular auxetic honeycombs, *Compos B Eng.* 197 (2020) 108117. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108117>.
- [9] L. Yang, O. Harrysson, H. West, D. Cormier, Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing, *Int J Solids Struct.* 69–70 (2015) 475–490. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.05.005>.
- [10] C. Qi, F. Jiang, S. Yang, A. Remennikov, Multi-scale characterization of novel re-entrant circular auxetic honeycombs under quasi-static crushing, *Thin-Walled Structures.* 169 (2021) 108314. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108314>.
- [11] M.-H. Fu, Y. Chen, L.-L. Hu, Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs, *Compos Struct.* 175 (2017) 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.007>.
- [12] K.P. Logakannan, V. Ramachandran, Rengaswamy, Z. Gao, D. Ruan, Quasi-static and dynamic compression behaviors of a novel auxetic structure, *Compos Struct.* 254 (2020) 112853. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112853>.
- [13] M. Xu, D. Liu, P. Wang, Z. Zhang, H. Jia, H. Lei, D. Fang, In-plane compression behavior of hybrid honeycomb metastructures: Theoretical and experimental studies, *Aerosp Sci Technol.* 106 (2020) 106081. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106081>.
- [14] H.L. Tan, Z.C. He, K.X. Li, E. Li, A.G. Cheng, B. Xu, In-plane crashworthiness of re-entrant hierarchical honeycombs with negative Poisson's ratio, *Compos Struct.* 229 (2019) 111415. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111415>.
- [15] Y. Chen, T. Li, Z. Jia, F. Scarpa, C.-W. Yao, L. Wang, 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations, *Mater Des.* 137 (2018) 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.028>.
- [16] Y. Sun, N. Pugno, Hierarchical Fibers with a Negative Poisson's Ratio for Tougher Composites, *Materials.* 6 (2013) 699–712. <https://doi.org/10.3390/ma6020699>.
- [17] X. Zhang, R. Tian, Z. Zhang, G. Li, W. Feng, In-plane elasticity of a novel vertical strut combined re-entrant honeycomb structure with negative Poisson's ratio, *Thin-Walled Structures.* 163 (2021) 107634. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107634>.
- [18] S.Z. Khan, F. Mustahsan, E.R.I. Mahmoud, S.H. Masood, A novel modified re-entrant honeycomb structure to enhance the auxetic behavior: Analytical and numerical study by FEA, *Mater Today Proc.* 39 (2021) 1041–1045. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.083>.
- [19] YL Tezi: Numerical and experimental investigation of the impact performance of 3d lattices with negative poisson's ratio / Negatif poisson oranlı 3 boyutlu latislerin çarpma dayanıklılığın deneysel ve sayısal İncelenmesi Yazar:Altuğ Ataalp Danışman: Prof. Dr. Halit Süleyman Türkmen
- [20] F.Usta, Ökzetik Dolgulu Çarpışma Tüplerinin Dinamik Çarpma Yükleri Altında Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Conference: 8. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı (UHUK-2020) At: Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara
- [21] Jay Bonner, *Islamic geometric patterns*, New York, USA, 1999.
- [22] M. Lei, W. Hong, Z. Zhao, C. Hamel, M. Chen, H. Lu, H.J. Qi, 3D Printing of Auxetic Metamaterials with Digitally Reprogrammable Shape, *ACS Appl Mater Interfaces.* 11 (2019) 22768–22776. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06081>.
- [23] H. Ateş, N. Kaya, Mechanical and Microstructural Properties of Friction Welded AISI 304 Stainless Steel to AISI 1060 Steel AISI 1060,
- [24] J. Zhang, G. Lu, Z. Wang, D. Ruan, A. Alomarah, Y. Durandet, 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>.
- [25] [25] J.K. Meena, S. Singamneni, Investigation of a Novel Chiral S-Shaped Auxetic Structure under Large Tensile Deformation, *Physica Status Solidi*

(b) 257 (2020).  
<https://doi.org/10.1002/pssb.202000239>.