

## AUXHEX BİRİM HÜCRELİ SANDVIÇ YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN PARAMETRİK OLARAK İNCELENMESİ

Kadircan Saygı\* ve Kaan Yıldız†  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

### ÖZET

*Bu çalışmada, klasik altıgen balpeteği birim hücre yapısının ökzetik birim hücre yapısı ile bir araya getirilmesi sonucu ortaya çıkan hibrit birim hücrelerden oluşan AuxHex yapısının, tasarım parametreleri değiştirilerek aksel basma yükü altında sergilediği mekanik özellikleri incelenmiştir. Hücresel petekli yapıları oluşturan birim hücrelerin tasarım ve optimizasyonu, hücresel yapıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesine olanak sağladığından giderek daha popüler bir araştırma konusu haline gelmektedir. Bahsi geçen klasik altıgen şeklindeki birim hücrelerle ökzetik altıgen birim hücrelerle hibritleyerek ortaya çıkan AuxHex hücre yapısı hem pozitif Poisson oranına sahip hem de negatif Poisson oranına sahip yapıların avantajlarından yararlanmak için tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalarda AuxHex yapısının düzlem içi basma yüklerine karşı daha iyi bir dayanım değeri verdiği gözlemlenmiştir. AuxHex yapısının hem klasik altıgen şeklindeki balpeteği hücrelerin hem de ökzetik altıgen hücrelerin avantajlarından yararlanmak üzere tasarlanmış olması nedeniyle bu çalışma, tasarım parametrelerinin etkilerini ve birim hücrenin mekanik özelliklerinin nasıl iyileştirilebileceğini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma neticesinde artan düz ve eğik duvar uzunluklarıyla beraber sandviç yapısının elastite modülünün, basma kuvvetleri altındaki akma dayanımının, enerji absorbe edebilme yeteneğinin ve tokluğunun düştüğü gözlemlenmiştir. Lakin, artan birim hücre duvar kalınlıklarıyla beraber bütün bu mekanik özelliklerin ciddi derece artış gösterdiği ve yapıya pozitif etki ettiği sonucuna varılmıştır. Ek olarak birim hücreleri tasarlayabilmek için kullanılan açılı değerinin artmasıyla AuxHex sandviç yapısının elastite modülünün, basma kuvvetleri altındaki dayanımının, enerji absorbe edebilme yeteneğinin ve tokluğunun düştüğü sonucuna varılmıştır. Son olarak, dokuz farklı AuxHex sandviç yapısının gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerinin bir arada gösterilmesiyle, yapıdaki çökme davranışının büyük ölçüde düz duvarların uzunluğundaki değişime bağlı olduğu görülmektedir.*

### GİRİŞ

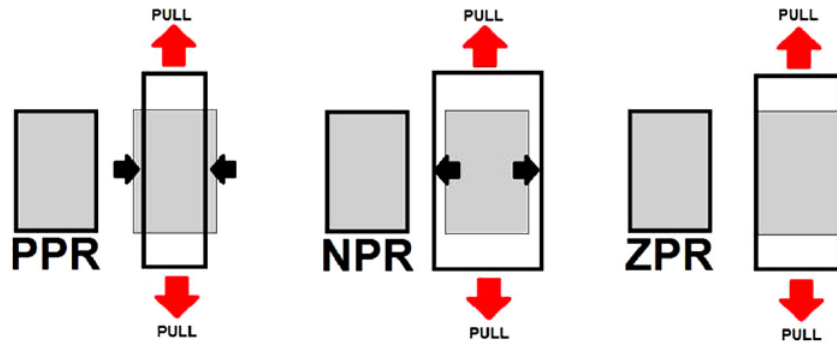
Hücresel petekli yapılar, sandviç panellerde dolgu malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Mühendislik uygulamaları için tasarlanan bu düşük yoğunluklu hafif yapıların temel amacı, yüksek

\*Yüksek Lisans Öğrencisi, Uçak ve Uzay Mühendisliği, E-posta: saygi15@itu.edu.tr

†Dr. Öğr. Üyesi, Havacılık Enstitüsü, E-posta: yildizkaa@itu.edu.tr

katılık-ağırlık oranı elde etmektedir. Sandviç yapıların üst ve alt yüzeyleri, fiber takviyeli kompozitler veya alüminyum alaşımları gibi hafif malzemelerden üretilir. Sandviç panellerde yaygın olarak kullanılan dolgu malzemesi, yüksek mukavemet ve enerji emme kapasitesi gibi mükemmel mekanik performansı nedeniyle havacılık ve uzay endüstrilerinde büyük ilgi görmektedir. Dolguyu oluşturan birim hücrelerin tasarımı ve optimizasyonu, sandviç yapıların mekanik özelliklerini değiştirebilmesi nedeniyle popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Araştırmacılar, farklı şekillerde birim hücreler üzerinde birçok tasarım incelemiştir. Farklı birim hücre şekillerinin yük altında nasıl deformasyona uğradığına ve tepki verdiğiğine bakılarak bu kafes yapılar üç kategoriye ayrılabilir: pozitif Poisson oranına (PPO-İng. *PPR*), sıfır Poisson oranına (SPO-İng. *ZPR*) ve negatif Poisson oranına (NPO-İng. *NPR*) sahip olanlar [Yu vd., 2018]. Bu üç farklı sınıflandırma, Şekil 1'de görsel olarak açıklanmıştır.



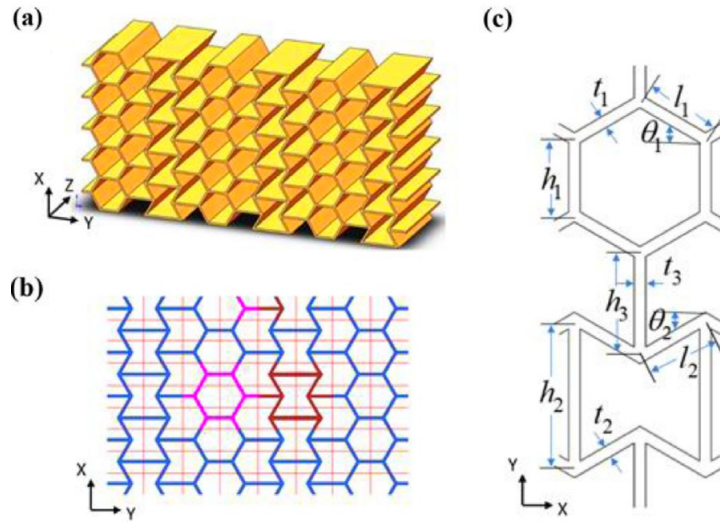
Şekil 1: PPO, NPO ve SPO'nun deformasyon davranışı [Del Broccolo vd., 2017].

Arılar tarafından ortaya çıkarılan balpetekleri gibi klasik altıgen şeklindeki yapılar da pozitif Poisson oranına sahip yapıların başlıca örnekleridir. Bu malzemeler, yandan itilirken yüksek mukavemet ve katılık gösterdiğinden araştırmacılar tarafından yoğun ilgi görmektedir. Farklı hammaddelerden üretilen klasik altıgen şeklindeki birim hücreler ve sandviç panellerin mekanik özellikleri hakkında teorik ve deneysel olarak birçok çalışma yapılmıştır. Klasik altıgen şeklindeki birim hücrelerle ortaya çıkan sandviç yapısının yüksek gerilmelere maruz kalmadan büyük miktarda birim şekil değiştirmesi nedeniyle iyi bir enerji absorbe eden yapı olduğu gösterilmiştir [Ashby, 2006]. Klasik altıgen şeklindeki birim hücrelerden oluşan sandviç yapısının basma ve kesme yükleri altındaki çökme mekanizması çalışılmış ve bu çalışma, klasik altıgen birim hücre duvarlarının burkulması, kırılması gibi çeşitli mühendislik fenomenleriyle çökme davranışı gösterdiğini ortaya koymuştur [Zhang ve Ashby, 1992].

Son araştırmalar, PPO özelliğinden ziyade daha yüksek NPO gösteren re-entrant altıgen yapılarına odaklanmıştır [Huang vd., 2017; Li vd., 2018]. Bu özelliği gösteren ilk yapı, 1987'de Lakes tarafından tanıtılmıştır [Lakes, 1987]. Evans, 1991'de bu malzemeleri tanımlamak için "ökzetik" terimini ortaya atmıştır. [Evans vd., 1991] ve bu yapılar, aynı zamanda *ökzetik* malzemeler olarak da bilinir. *Ökzetik* yapılar, klasik hücresel yapıların aksine enerji emme ve titreşimleri izole etme konusunda belirgin avantajlar sunarlar [Ingrole vd., 2017; Zhang vd., 2018]. Örneğin, yapılan bir çalışmada *ökzetik* malzemelerin büyük deformasyonlara gerildiğinde nasıl davrandığının detaylı bir analizi yapılmıştır [Zhang vd., 2018]. Ayrıca, bu malzemelerin deformasyon sürecinin basitleştirilmiş bir modeline dayanan teorik bir model oluşturulmuştur. Bu model, hücre duvarlarının kalıcı olarak nasıl lineer olmayan bir şekilde deformasyon gösterdiğini de hesaba katmaktadır. Son olarak *ökzetik* yapıların benzersiz deformasyon özellikleri, yapının kayma modülünü, tokluğunu ve enerji emme yeteneğini arttırmaktadır [Yang vd., 2004; Sarvestani vd., 2018].

Literatürdeki bu çalışmalara rağmen, zaman içinde hem PPO hem de NPO özelliği gösteren hücresel yapılara ihtiyaç duyulmuştur. Bu bağlamda ilk çalışmalardan biri Del Broccolo vd. tarafından gerçekleştirilmiştir [Del Broccolo vd., 2017]. Çalışmada, AuxHex yapısının klasik ve

ökzetik altıgen birim hücrelerin birleştirilmesiyle elde edildiği Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu tasarım, geometrik parametrelerdeki değişikliklerle pozitif, sıfır ve negatif Poisson oranları elde edilmesine ve aynı zamanda düzlem içi basma dayanımını artırmaya olanak sağlamaktadır. Bu çalışmaya ek olarak, AuxHex yapısının elastisite modülü ve akma gerilimi için teorik formüller geliştirmişlerdir [Xu vd., 2019]. Bu teorik hesaplamalar daha sonra naylon malzeme örneklerinde yapılan deneyler ve sonlu elemanlar uygulamalarının sonuçlarıyla doğrulanmıştır.



Şekil 2: (a) AuxHex yapısı, (b) 2B AuxHex yapısı, (c) hibrit birim hücre yapısı [Xu vd., 2019].

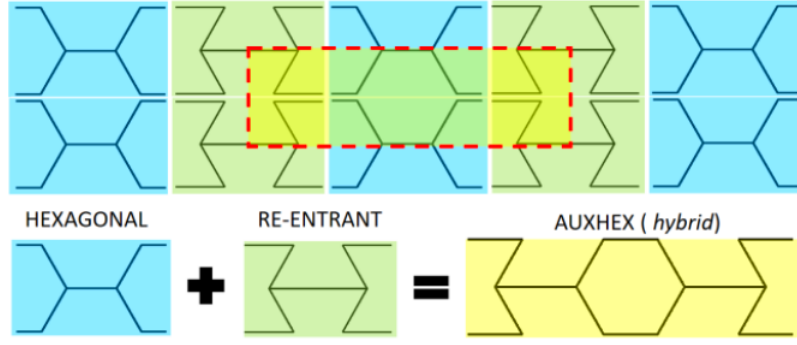
Bu çalışmada, AuxHex birim hücrelerine sahip sandviç yapıların mekanik özellikleri parametrik olarak incelenmiştir. Bilindiği kadarıyla AuxHex birim hücrelerinin farklı farklı tasarım parametrelerinin ve bunların mekanik özellikler üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmemiştir. Hem klasik altıgen şeklindeki hem de ökzetik altıgen birim hücrelerin avantajlarından yararlanmak üzere tasarlanan AuxHex yapısının tasarım parametrelerinin etkisi ve birim hücrenin mekanik özelliklerinin nasıl iyileştirilebileceği araştırılmıştır. Sonuçlar, birim hücre tasarımındaki geometrik parametrelerin değiştirilmesiyle mekanik özelliklerin ne kadar geliştirilebileceğini göstermiştir. Bu sayede AuxHex yapılar için optimum tasarım çözümleri geliştirilebilmesi amaçlanmıştır.

### AuxHex Birim Hücresi

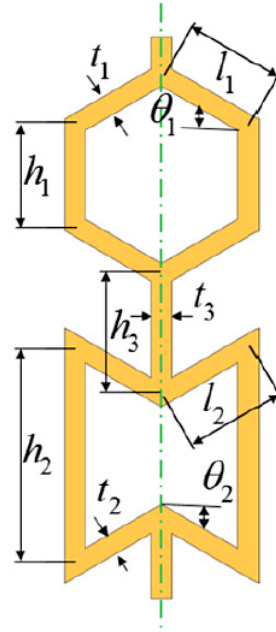
AuxHex birim hücresi, altıgen birim hücre ile ökzetik birim hücrenin hibritleşmesi sonucu oluşmaktadır. AuxHex yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir. AuxHex'i oluşturan birim hücrelerin aksine, hibrit birim hücre (AuxHex) tasarım parametrelerinde daha fazla esneklik sağlar. AuxHex birim hücresinin tam şeklini anlamak için bazı temel tasarım parametreleri tanımlanmış ve Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4'te gösterilen  $l_1$  ve  $h_1$  parametreleri sırasıyla klasik altıgen şeklindeki birim hücrenin eğik ve düz duvar uzunluklarını göstermektedir. Aynı birim hücre üzerindeki hücrenin açısı ve duvar kalınlıkları ise sırasıyla  $\theta_1$  ve  $t_1$  sembolleri ile ifade edilmektedir. Ökzetik altıgen birim hücre içinse  $l_2$  ve  $h_2$  sembolleri sırasıyla hücrenin eğik ve düz duvar uzunluklarını tanımlamaktadır. Ökzetik hücrenin duvar kalınlığını  $t_2$  tanımlarken aynı hücrenin açısını ise  $\theta_2$  ifadesi tanımlamaktadır. Son olarak, klasik altıgen ve ökzetik hücrelerin arasındaki uzunluk ve duvar kullanlığı, sırasıyla  $h_3$  ve  $t_3$  sembolleri ile ifade edilmiştir. AuxHex birim hücresi tasarlanırken daha düzgün bir birim hücre elde etmek için aşağıdaki ifade göz önünde bulundurulmalıdır:

$$l_1 \cos \theta_1 = l_2 \cos \theta_2 \quad (1)$$



Şekil 3: AuxHex birim hücre yapısı, iki farklı tipteki hücrenin bir araya getirilmesi [Del Broccolo vd., 2018].



Şekil 4: AuxHex birim hücre yapısı, iki farklı tipteki hücrenin bir araya getirilmesi [Xu vd., 2020].

## YÖNTEM

### Teorik Hesaplama

Bu çalışma kapsamında elastisite modülü ve akma dayanımının belirlenmesi için hem teorik formüllerden hem de sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmıştır. AuxHex yapısının elastisite modülü aşağıdaki formül ile teorik olarak hesaplanabilmektedir [Xu vd., 2019]:

$$E_1 = \frac{2E_s}{\left[ \frac{(h_1 + l_1 \sin \theta_1)}{t_1^3 \cos \theta_1} l_1^2 \sin^2 \theta_1 + \frac{(h_2 - l_2 \sin \theta_2)}{t_2^3 \cos \theta_2} l_2^2 \sin^2 \theta_2 \right]} \quad (2)$$

Denklem 1'in pay kısmında bulunan  $E_s$ , AuxHex yapısının yapıldığı malzemenin elastisite modülünü ifade etmekte olup, payda kısmında bulunan bütün değişkenler görsel olarak Şekil 4'te belirtilmektedir.  $h_1$  ve  $l_1$ , klasik balpeteği şeklindeki birim hücrenin kenar uzunluklarını belirtirken,  $t_1$  bu birim hücrenin duvar kalınlığını temsil etmektedir.  $h_2$  ve  $l_2$ , ökzetik birim hücrenin kenar uzunluklarını,  $t_2$  ise bu hücrenin duvar kalınlığını gösterir. Diğer yandan  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  ise sırasıyla

balpeteği ve ökzetik birim hücrelerin açılarını göstermekte,  $h_3$  ve  $t_3$  iki farklı birim hücrenin hibritlendiği kısımdaki uzunluğa ve duvar kalınlığına tekabül etmektedir.

Yapının akma dayanımını elde edebilmek içinse aşağıdaki formüller kullanılmıştır [Xu vd., 2019]:

$$(\sigma_1)_{pl}^i = \sigma_y \times \frac{t_1^2}{l_1^2} \times \frac{1}{2(h_1/l_1 + \sin\theta_1) \sin\theta_1} \quad (3)$$

$$(\sigma_1)_{pl}^{ii} = \sigma_y \times \frac{t_2^2}{l_2^2} \times \frac{1}{2(h_2/l_2 - \sin\theta_2) \sin\theta_2} \quad (4)$$

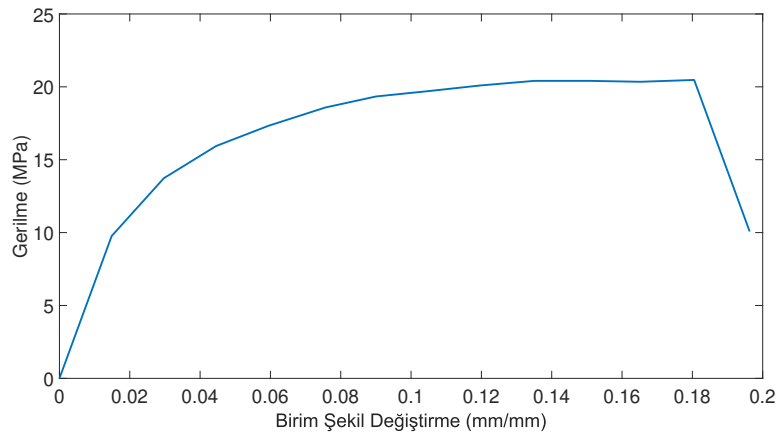
Denklem 3 ve 4'te görülen  $\sigma_y$ , birim hücrelerin yapıldığı malzemenin akma dayanımını temsil etmektedir. Eğer herhangi bir birim hücre yapısından biri plastik deformasyona uğramaya başlarsa AuxHex yapısının akma dayanımına ulaştığı kabul edilebilir. Özetle  $(\sigma_1)_{pl}^i$  ve  $(\sigma_1)_{pl}^{ii}$ 'den küçük olan değer, AuxHex yapısının akma dayanımını temsil edecektir.

### Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar modelinin doğrulaması için daha önce literatürde ele alınan bir model seçilmiştir. Bu modele göre AuxHex yapısının alt plakası her yönde kısıtlanmıştır. Üst taraftaki plakaya ise eksenel yönde basma şeklinde, 0.75 mm/mm birim şekil değiştirme değerine tekabül edecek bir yer değiştirme sınır koşulu tanımlanırken kalan yönler alt plakadaki gibi kısıtlanmıştır. Referans çalışmadaki gibi model, 3x4 sayıda birim hücre içermektedir. Üst ve alt plakaların kalınlıkları 1.00 mm olarak verilirken hücrelerin diğer tasarım parametreleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Z yönündeki uzunluk ise 40 mm olarak alınmıştır. İlgili çalışmadaki kullanılan PA2200 kodlu naylon malzemesi, 930 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa ve 0.395 Poisson oranına sahiptir. 0.55 mm kalınlık için malzeme özelliklerini tanımlayan gerilme-birim şekil değiştirme grafiği sayısallaştırılarak edilerek sonlu elemanlar programı ABAQUS'e aktarılmıştır. İlgili malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5'te gösterilmektedir. PA2200 malzemesinin 0.55 mm kalınlıkta elastisite modülü 908 MPa ve akma dayanımı 16 MPa'dır.

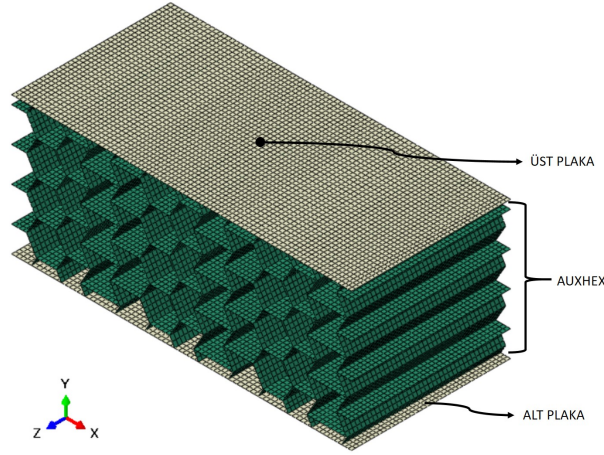
Tablo 1: Birim hücre yapısı için tasarım parametreleri

Yapı	$l_1$ (mm)	$h_1$ (mm)	$t_1$ (mm)	$\theta_1$ (°)	$l_2$ (mm)	$h_2$ (mm)	$t_2$ (mm)	$\theta_2$ (°)	$h_3$ (mm)	$t_3$ (mm)
AuxHex	5	5	0.55	30	5	10	0.55	30	7.5	0.55



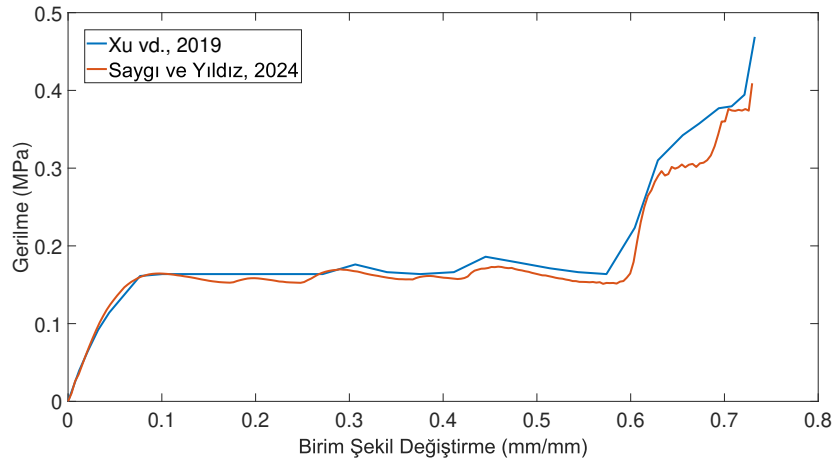
Şekil 5: Malzemenin çekme testinde ortaya çıkan gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

AuxHex yapısı, sonlu elemanlar modelinde ABAQUS programının S4R tipindeki 2 boyutlu, dörtgen kabuk (shell) elemanları kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca sonlu elemanlar çözümü elde edilirken azaltılmış entegrasyon (reduced integration) ve kum saati kontrolü (hourglass control) kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeline genel bir kontakt tanımlaması (hard contact) yapılarak hücrelerin birbiriyle olan etkileşimi simüle edilmeye çalışılmıştır. Sonlu elemanlar modeli sonucunda AuxHex yapısının üst plakasından elde edilen kuvvet-yer değiştirme verileri literatürdeki sonuçlarla kıyaslanabilmeleri adına gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine çevrilmiştir.



Şekil 6: Sonlu elemanlar modeli

Gerilme-birim şekil değiştirme açısından elde edilen sonuçların referans çalışmayla [Xu vd., 2019] karşılaştırılması Şekil 7’de gösterilmiştir. Bu karşılaştırma, yakın sonuçlar elde edildiğini göstererek sonlu elemanlar modelinin ileri analizler için doğrulandığını kanıtlamaktadır.



Şekil 7: Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrisi

## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

AuxHex yapısının farklı tasarım parametrelerine göre mekanik özellikleri elde edilmiştir. İncelenen mekanik özellikler arasında elastisite modülü, akma dayanımı, %10 ve %25 birim şekil değiştirme değerlerindeki enerji absorbe kapasitesi ve AuxHex yapısının tokluğu bulunmaktadır.

### AuxHex Birim Hücresinin Tasarım Parametreleri

AuxHex birim hücre yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4'te gösterilen birim hücreyi tanımlayan tasarım parametreleri için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

$$1) h = h_1 = h_2/2 = h_3$$

$$2) l = l_1 = l_2$$

$$3) \theta = \theta_1 = \theta_2$$

$$4) t = t_1 = t_2 = t_3$$

$h$  ve  $l$  parametreleri, 2.5 mm artış aralığıyla 5 ile 10 mm arasında değerler alacak,  $\theta$  ise 20° ile 40° arasında 10°'lik artışlarla değiştirilecektir. Kalınlık değeri ( $t$ ) ise 0.1 mm artışlarla 0.4 mm değerinden 0.6 mm değerine çıkarılacaktır. Sonuçlara göre değerlendirmeyi kolaylaştırmak amacıyla farklı tasarım parametreleriyle ortaya çıkacak AuxHex sandviç yapıları için bir kodlama sistemi geliştirilmiştir. Örneğin, esas (baseline) olarak ele alınacak modelde  $h = 7.5$  mm,  $l = 7.5$  mm,  $\theta = 30^\circ$ ,  $t = 0.5$  mm olacaktır ve buna göre bu yapının kodlanması *H7.5-L7.5-TH30-T0.5* şeklindedir. Tüm kodlamalar ve ilgili tasarım parametreleri, Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2: Her bir AuxHex birim hücresi için kodlamalar ve ilgili tasarım parametreleri

Kodlama	h (mm)	l (mm)	$\theta$ (°)	t (mm)
H7.5-L7.5-TH30-T0.5	7.5	7.5	30	0.5
H5-L7.5-TH30-T0.5	5	7.5	30	0.5
H10-L7.5-TH30-T0.5	10	7.5	30	0.5
H7.5-L5-TH30-T0.5	7.5	5	30	0.5
H7.5-L10-TH30-T0.5	7.5	10	30	0.5
H7.5-L7.5-TH20-T0.5	7.5	10	20	0.5
H7.5-L7.5-TH40-T0.5	7.5	10	40	0.5
H7.5-L7.5-TH30-T0.4	7.5	10	30	0.4
H7.5-L7.5-TH30-T0.6	7.5	10	30	0.6

### Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Bu bölümde AuxHex yapısını tanımlayan tasarım parametrelerinin yapının mekanik özelliklerine nasıl etki ettiği incelenmiştir. İlk olarak AuxHex yapısının elastisite modülü ve akma dayanımı üzerindeki değişen tasarım parametrelerinin etkisi, hem teorik formüller (Denklem 2, 3, ve 4) hem de sonlu elemanlar modellerinin sonuçları kullanılarak elde edilmiştir. Sonrasında ise tasarım parametrelerindeki değişikliklerin AuxHex yapısının enerji absorbe kapasitesi ve tokluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen bütün elastisite modülü, akma dayanımı, enerji absorbe kapasitesi ve tokluk değerleri özgül olarak hesaplanmış olup, tüm sonuçlar ilgili AuxHex yapısının kütlesine bölünmüştür.

Elastisite modülü ve akma dayanımı: İlk olarak AuxHex yapısı üzerinde düz duvar uzunluğunun ( $h$ ) etkisini görebilmek için **H5-L7.5-TH30-T0.5**, **H7.5-L7.5-TH30-T0.5** ve **H10-L7.5-TH30-T0.5** şeklinde kodlanan yapılar değerlendirmeye alınmıştır. Artan  $h$  değeriyle beraber yapının elastisite modülü ( $E$ ) ve akma dayanımı ( $AD$ ) değerleri Tablo 3 ve 4'te verilmiştir.

Tablo 3: Artan düz duvar uzunluğuyla ( $h$ ) teorik ve sonlu elemanlar bazlı özgül elastisite modülü sonuçları.

E (MPa/kg)	<b>H5-L7.5-TH30-T0.5</b>	<b>H7.5-L7.5-TH30-T0.5</b>	<b>H10-L7.5-TH30-T0.5</b>
Teorik	38.671	21.133	13.390
Sonlu Elemanlar	39.241	21.187	13.075

Tablo 4: Artan düz duvar uzunluğuyla ( $h$ ) teorik ve sonlu elemanlar bazlı özgül akma dayanımı sonuçları.

AD (MPa/kg)	<b>H5-L7.5-TH30-T0.5</b>	<b>H7.5-L7.5-TH30-T0.5</b>	<b>H10-L7.5-TH30-T0.5</b>
Teorik	2.529	1.612	1.115
Sonlu Elemanlar	2.477	1.300	0.901

Tablo 3 ve 4'teki sonuçlara göre AuxHex yapısının düz olan duvar uzunluğu arttıkça yapının elastisite modülü ve akma dayanımı değerleri düşmektedir.

Elastisite modülü ve akma dayanımı alt başlığı altında ikinci olarak AuxHex yapısının artan eğik duvar uzunluğuyla elastisite modülü ve akma dayanımının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Eğik duvar uzunluğunun ( $l$ ) etkisini görebilmek için H7.5-L5-TH30-T0.5, H7.5-L7.5-TH30-T0.5 ve H7.5-L10-TH30-T0.5 şeklinde kodlanan yapılar değerlendirmeye alınmıştır. Artan  $l$  değeriyle beraber yapının elastisite modülü (E) ve akma dayanımı (AD) değerleri Tablo 5 ve 6'da verilmiştir.

Tablo 5: Artan eğik duvar uzunluğuyla ( $l$ ) teorik ve sonlu elemanlar bazlı özgül elastisite modülü sonuçları.

E (MPa/kg)	H7.5-L5-TH30-T0.5	H7.5-L7.5-TH30-T0.5	H7.5-L10-TH30-T0.5
Teorik	55.918	21.133	10.309
Sonlu Elemanlar	55.800	21.187	9.938

Tablo 6: Artan eğik duvar uzunluğuyla ( $l$ ) teorik ve sonlu elemanlar bazlı özgül akma dayanımı sonuçları.

AD (MPa/kg)	H7.5-L5-TH30-T0.5	H7.5-L7.5-TH30-T0.5	H7.5-L10-TH30-T0.5
Teorik	3.200	1.612	0.944
Sonlu Elemanlar	2.812	1.300	0.791

Tablo 5 ve 6'daki sonuçlara göre artan  $l$  değeriyle beraber AuxHex yapısının elastisite modülünün ve akma dayanımının ciddi derecede düştüğü sonucu elde edilmiştir.

Elastisite modülü ve akma dayanımı alt başlığı altında üçüncü olarak AuxHex yapısının artan hücre iç açısıyla ( $\theta$ ) elastisite modülü ve akma dayanımının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Artan açı değerinin ( $\theta$ ) etkisini görebilmek için H7.5-L7.5-TH20-T0.5, H7.5-L7.5-TH30-T0.5 ve H7.5-L7.5-TH40-T0.5 şeklinde kodlanan yapılar değerlendirmeye alınmıştır. Artan  $\theta$  değeriyle beraber yapının elastisite modülü (E) ve akma dayanımı (AD) değerleri Tablo 7 ve 8'de verilmiştir.

Tablo 7: Artan birim hücre açısıyla ( $\theta$ ) teorik ve sonlu elemanlar bazlı özgül elastisite modülü sonuçları.

E (MPa/kg)	H7.5-L7.5-TH20-T0.5	H7.5-L7.5-TH30-T0.5	H7.5-L7.5-TH40-T0.5
Teorik	49.007	21.133	11.506
Sonlu Elemanlar	44.714	21.187	13.055



Tablo 8: Artan birim hücre açısıyla ( $\theta$ ) teorik ve sonlu elemanlar bazlı özgül akma dayanımı sonuçları.

AD (MPa/kg)	H7.5-L7.5- <b>TH20</b> -T0.5	H7.5-L7.5- <b>TH30</b> -T0.5	H7.5-L7.5- <b>TH40</b> -T0.5
Teorik	2.635	1.612	1.165
Sonlu Elemanlar	1.555	1.300	1.211

Tablo 7 ve 8'deki değerlere göre artan birim hücre açısıyla beraber AuxHex yapısının elastisite modülü ve akma dayanımı değerleri düşmektedir.

Elastisite modülü ve akma dayanımı alt başlığı altında dördüncü ve son olarak AuxHex yapısının artan hücre duvar kalınlığıyla ( $t$ ) elastisite modülü ve akma dayanımının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Artan kalınlık değerinin etkisini görebilmek için H7.5-L7.5-TH30-**T0.4**, H7.5-L7.5-TH30-**T0.5** ve H7.5-L7.5-TH30-**T0.6** şeklinde kodlanan yapılar değerlendirmeye alınmıştır. Artan  $t$  değeriyle beraber yapının elastisite modülü ( $E$ ) ve akma dayanımı ( $AD$ ) değerleri Tablo 9 ve 10'da verilmiştir.

Tablo 9: Artan birim hücre duvar kalınlığıyla ( $t$ ) teorik ve sonlu elemanlar bazlı özgül elastisite modülü sonuçları.

E (MPa/kg)	H7.5-L7.5-TH30- <b>T0.4</b>	H7.5-L7.5-TH30- <b>T0.5</b>	H7.5-L7.5-TH30- <b>T0.6</b>
Teorik	12.574	21.133	31.953
Sonlu Elemanlar	11.818	21.187	31.765

Tablo 10: Artan birim hücre duvar kalınlığıyla ( $t$ ) teorik ve sonlu elemanlar bazlı özgül akma dayanımı sonuçları.

AD (MPa/kg)	H7.5-L7.5-TH30- <b>T0.4</b>	H7.5-L7.5-TH30- <b>T0.5</b>	H7.5-L7.5-TH30- <b>T0.6</b>
Teorik	1.199	1.612	2.032
Sonlu Elemanlar	0.987	1.300	1.839

Tablo 9 ve 10'da özetlenen sonuçlar, duvar kalınlığının artması ile mekanik özelliklerdeki artış arasında tutarlılık göstermektedir [Bhardwaj ve Mishra, 2024].

**Enerji emme kapasitesi ve tokluk:** Bu bölümde, 9 farklı AuxHex yapısının belirli birim şekil değiştirme değerlerinde (%10 ve %25 birim şekil değiştirme değerlerinde) enerji emme kapasitesi ve tokluğu incelenmiştir. Birim hücre tasarım parametreleri kullanılarak elastisite modülü ve akma dayanımı gibi doğrudan bir formülasyonla enerji emme kapasitesi ve tokluk değerlerini elde etmek mümkün değildir. Bu nedenle, her 9 farklı AuxHex yapısının sonlu elemanlar modelinin üst plakalarından elde edilen kuvvet-deplasman değerleri kullanılarak gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine dönüştürülmüştür ve bu sayede aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

$$EA_{0.1} = \int_0^{0.1} \sigma d\epsilon \quad (5)$$

$$EA_{0.25} = \int_0^{0.25} \sigma d\epsilon \quad (6)$$

$$Tokluk = \int_0^{0.75} \sigma d\epsilon \quad (7)$$

Denklem 5'teki  $EA_{0,1}$ , ilgili AuxHex yapısının %10 birim şekil değiştirme altında enerji emme kapasitesini ifade ederken aynı şekilde Denklem 6'daki  $EA_{0,25}$ , ilgili AuxHex yapısının %25 birim şekil değiştirme altında enerji emme kapasitesini vermektedir. Bütün AuxHex yapılarındaki sonlu elemanlar simülasyonu yaklaşık %75 birim şekil değiştirme değerine kadar analiz edildiği için tokluk değerini veren integral formülünün üst sınırı 0.75 olarak alınmıştır. Denklem 5, 6, ve 7'deki integrallerin hesaplanmasında ticari yazılım olan MATLAB kullanılmıştır.

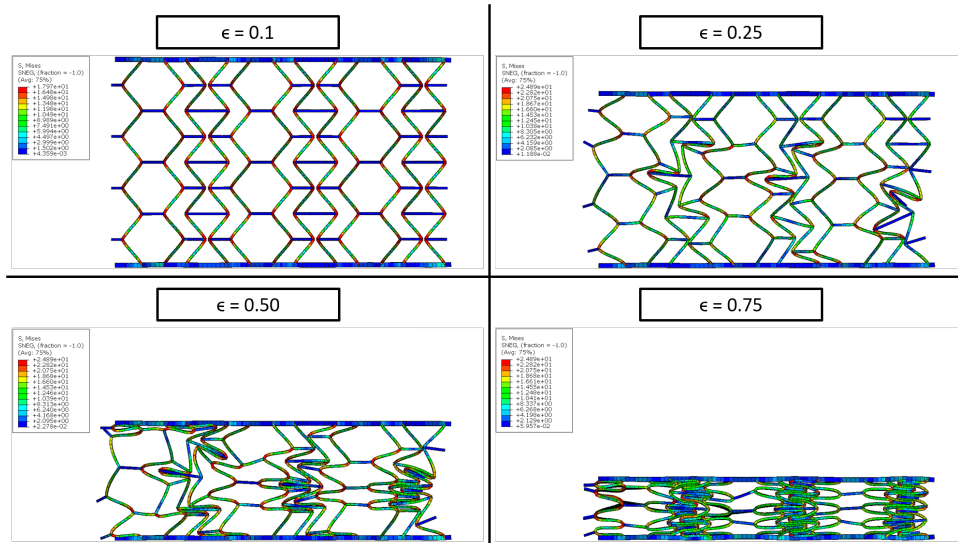
Enerji emme kapasitesi ve tokluk alt başlığı altında ilk olarak 3 farklı AuxHex yapısı üzerinde düz duvar uzunluğunun ( $h$ ) etkisini görebilmek için **H5-L7.5-TH30-T0.5**, **H7.5-L7.5-TH30-T0.5** ve **H10-L7.5-TH30-T0.5** şeklinde kodlanan yapılar incelenmiştir. Artan  $h$  değeriyle beraber yapıların enerji emme kapasitesi ve tokluk değerleri Tablo 11 'de verilmiştir.

Tablo 11: Artan düz duvar uzunluğu ( $h$ ) için özgül enerji emilimi ve tokluk sonuçları.

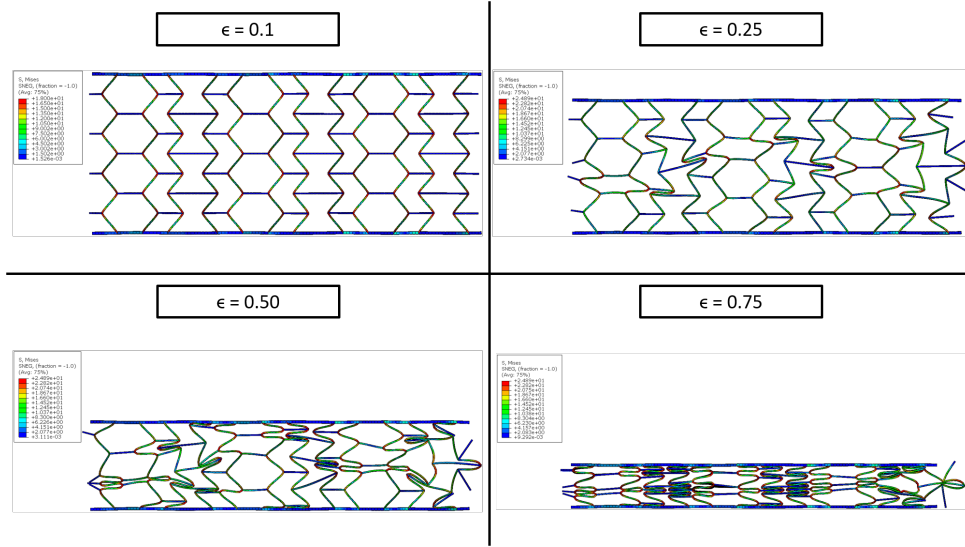
Birim Hücre Yapısı	$EA_{0,1}$	$EA_{0,25}$	Tokluk
<b>H5-L7.5-TH30-T0.5</b>	192.158	702.905	2760.166
<b>H7.5-L7.5-TH30-T0.5</b>	104.388	380.272	1350.340
<b>H10-L7.5-TH30-T0.5</b>	63.362	238.937	867.241

Değerlerin birimi:  $kJ/m^3kg$

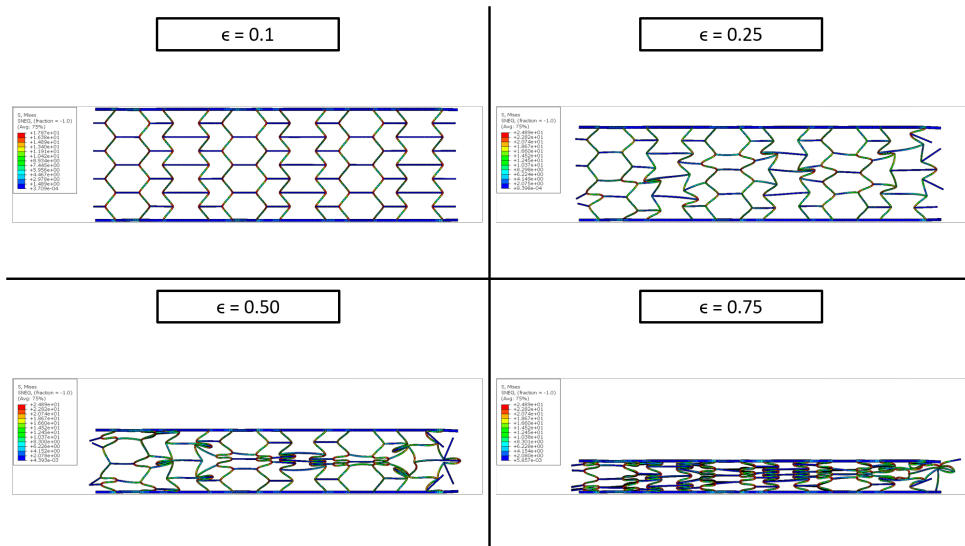
**H5-L7.5-TH30-T0.5**, **H7.5-L7.5-TH30-T0.5** ve **H10-L7.5-TH30-T0.5** şeklinde kodlanan yapıların deformasyon görüntüleri sırasıyla Şekil 8, 9, ve 10'da gösterilmektedir.



Şekil 8: H5-L7.5-TH30-T0.5 için deformasyon görüntüleri



Şekil 9: H7.5-L7.5-TH30-T0.5 için deformasyon görüntüleri.



Şekil 10: H10-L7.5-TH30-T0.5 için deformasyon görüntüleri.

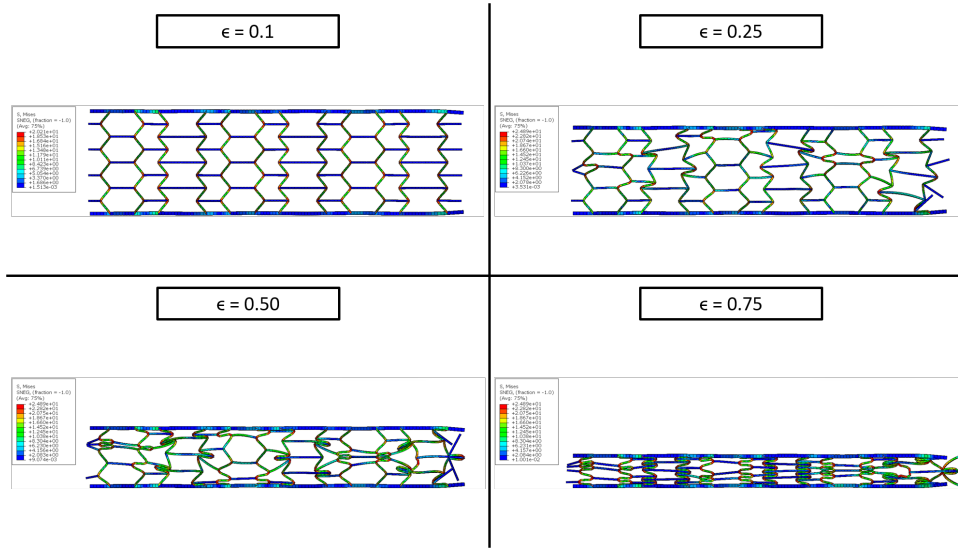
Enerji emme kapasitesi ve tokluk alt başlığı altında ikinci olarak 3 farklı AuxHex yapısı üzerinde artan eğik duvar uzunluğunun ( $l$ ) etkisini görebilmek için H7.5-L5-TH30-T0.5, H7.5-L7.5-TH30-T0.5 ve H7.5-L10-TH30-T0.5 şeklinde kodlanan yapılar incelenmiştir. Artan  $l$  değeriyle beraber yapıların enerji emme kapasitesi ve tokluk değerleri Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12: Artan eğik duvar uzunluğu için özgül enerji emilimi ve tokluk sonuçları ( $l$ ).

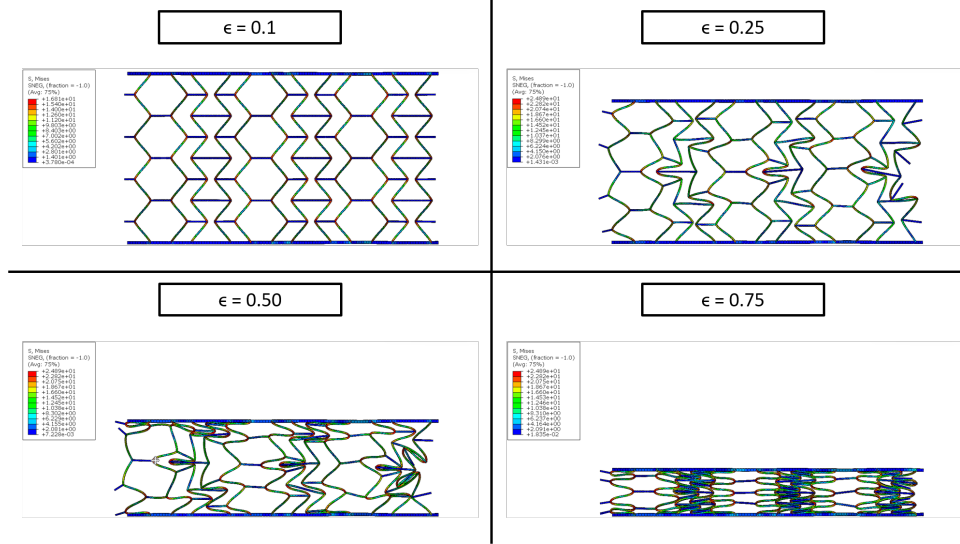
Birim Hücre Yapısı	EA <sub>0.1</sub>	EA <sub>0.25</sub>	Tokluk
H7.5-L5-TH30-T0.5	241.360	808.800	2799.200
H7.5-L7.5-TH30-T0.5	104.388	380.272	1350.340
H7.5-L10-TH30-T0.5	52.389	209.204	809.735

Değerlerin birimi:  $kJ/m^3kg$ .

H7.5-L5-TH30-T0.5 ve H7.5-L10-TH30-T0.5 şeklinde kodlanan yapıların deformasyon görüntüleri sırasıyla Şekil 11 ve 12'de gösterilmektedir.



Şekil 11: H7.5-L5-TH30-T0.5 için deformasyon görüntüleri.



Şekil 12: H7.5-L10-TH30-T0.5 için deformasyon görüntüleri.

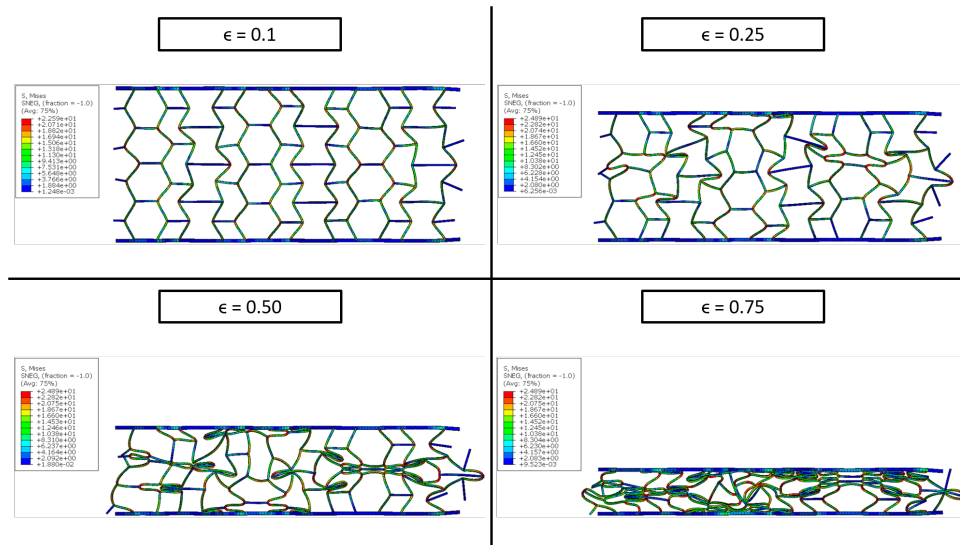
Enerji emme kapasitesi ve tokluk alt başlığı altında üçüncü olarak 3 farklı AuxHex yapısı üzerinde artan hücre iç açısının ( $\theta$ ) etkisini görebilmek için H7.5-L7.5-**TH20**-T0.5, H7.5-L7.5-**TH30**-T0.5 ve H7.5-L7.5-**TH40**-T0.5 şeklinde kodlanan yapılar incelenmiştir. Artan  $\theta$  değeriyle beraber yapıların enerji emme kapasitesi ve tokluk değerleri Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13: Artan birim hücre açısı için özgül enerji emilimi ve tokluk sonuçları ( $\theta$ ).

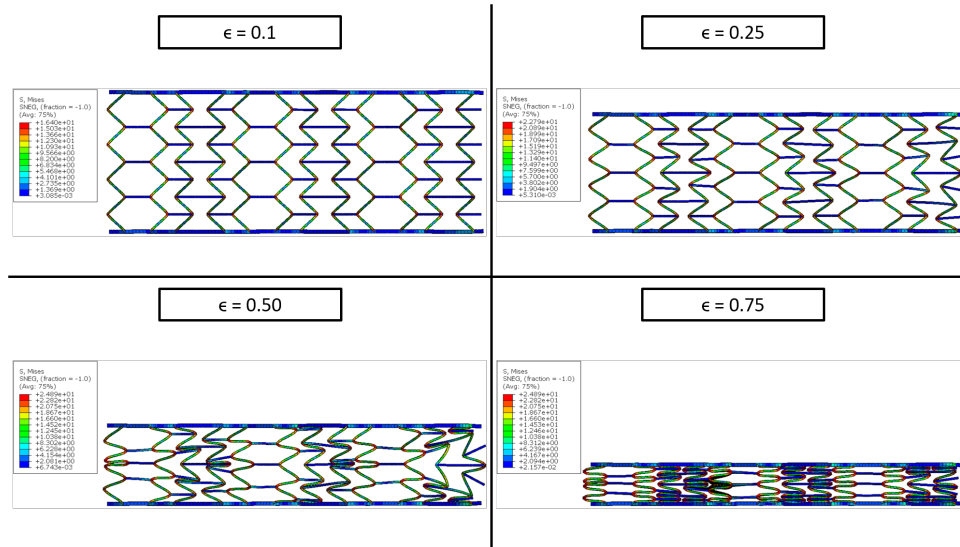
Birim Hücre Yapısı	EA <sub>0.1</sub>	EA <sub>0.25</sub>	Tokluk
H7.5-L7.5- <b>TH20</b> -T0.5	166.156	454.762	1575.510
H7.5-L7.5- <b>TH30</b> -T0.5	104.388	380.272	1350.340
H7.5-L7.5- <b>TH40</b> -T0.5	67.751	313.945	1255.017

Değerlerin birimi:  $kJ/m^3kg$ .

H7.5-L7.5-**TH20**-T0.5 ve H7.5-L7.5-**TH40**-T0.5 şeklinde kodlanan yapıların deformasyon görüntüleri sırasıyla Şekil 13 ve 14'te gösterilmektedir.



Şekil 13: H7.5-L7.5-TH20-T0.5 için deformasyon görüntüleri.



Şekil 14: H7.5-L7.5-TH40-T0.5 için deformasyon görüntüleri.

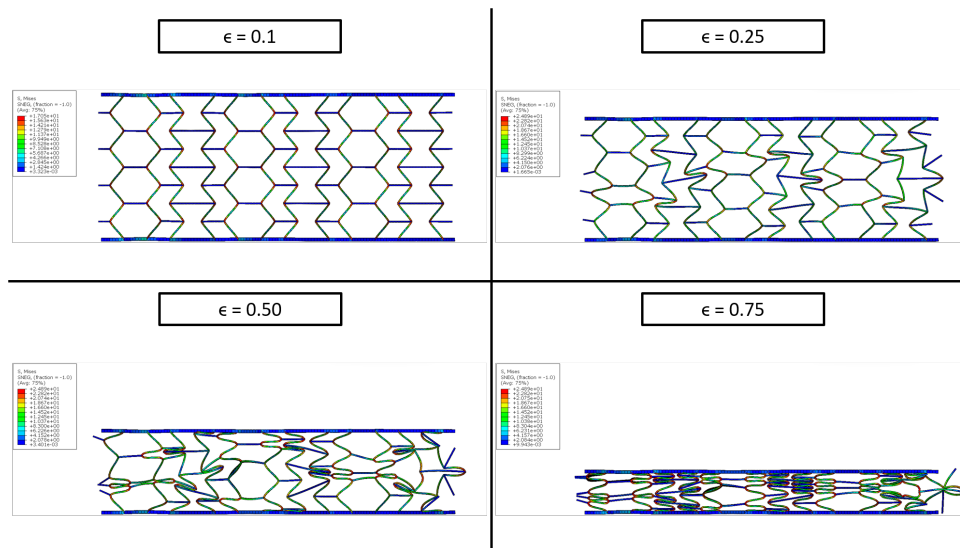
Enerji emme kapasitesi ve tokluk alt başlığı altında dördüncü ve son olarak 3 farklı AuxHex yapısı artan hücre duvar kalınlığının ( $t$ ) etkisini görebilmek için H7.5-L7.5-TH30-T0.4, H7.5-L7.5-TH30-T0.5 ve H7.5-L7.5-TH30-T0.6 şeklinde kodlanan yapılar incelenmiştir. Artan  $t$  değeriyle beraber yapıların enerji emme kapasitesi ve tokluk değerleri Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14: Artan birim hücre duvar kalınlığı ( $t$ ) için özgül enerji emilimi ve tokluk sonuçları.

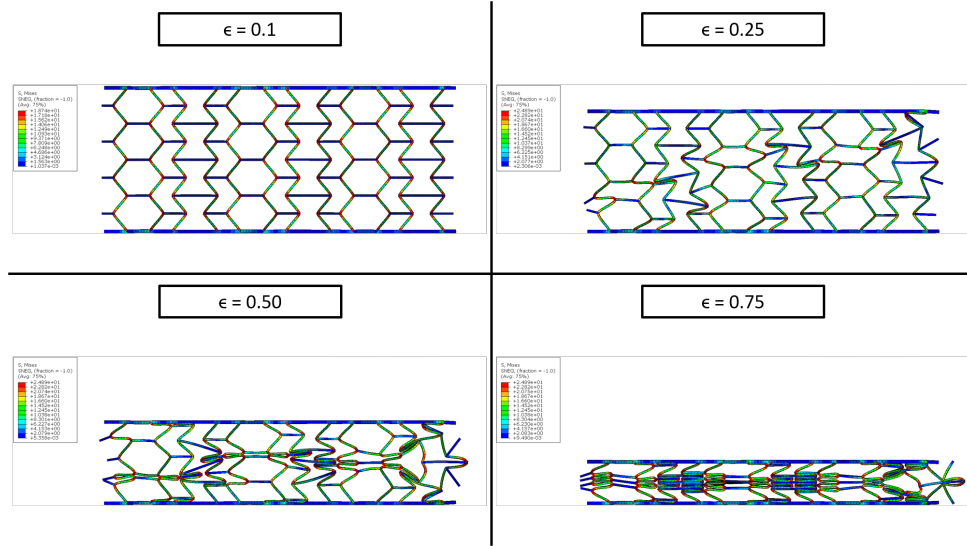
Birim Hücre Yapısı	EA <sub>0.1</sub>	EA <sub>0.25</sub>	Tokluk
H7.5-L7.5-TH30-T0.4	63.004	253.004	932.806
H7.5-L7.5-TH30-T0.5	104.388	380.272	1350.340
H7.5-L7.5-TH30-T0.6	145.000	515.476	1787.500

Değerlerin birimi:  $kJ/m^3kg$ .

H7.5-L7.5-TH30-T0.4 ve H7.5-L7.5-TH30-T0.6 şeklinde kodlanan yapıların deformasyon görüntüleri sırasıyla Şekil 15 ve 16'da gösterilmektedir.

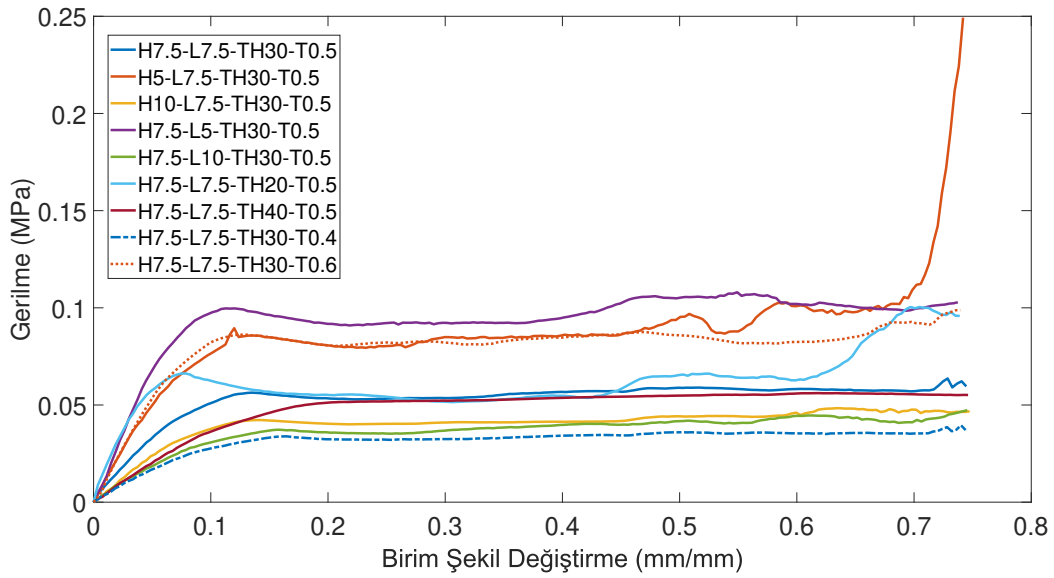


Şekil 15: H7.5-L7.5-TH30-T0.4 için deformasyon görüntüleri.



Şekil 16: H7.5-L7.5-TH30-T0.6 için deformasyon görüntüleri.

Son olarak, bahsi geçen 9 farklı AuxHex yapısının gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 17 olarak aşağıda verilmiştir.



Şekil 17: Bütün AuxHex yapıları için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.

## SONUÇ

AuxHex birim hücrelerinin tasarım parametrelerinin, elastisite modülü, akma dayanımı, farklı birim şekil değiştirme değerlerindeki enerji emme kapasitesi ve tokluk üzerindeki etkilerini görmek için hem teorik hesaplamalar hem de sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizler ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- 1) AuxHex birim hücrelerinin düz ve eğik duvar uzunlukları arttıkça sandviç yapının elastisite modülü, akma dayanımı, enerji emme kapasitesi ve tokluğu azaldı.
- 2) Tüm mekanik özellikler, AuxHex birim hücre duvar kalınlıklarının artmasıyla önemli ölçüde artmış ve yapı üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır.
- 3) AuxHex sandviç yapısının elastisite modülü, akma dayanımı, enerji emme kapasitesi ve tokluğu, AuxHex birim hücrelerinin tasarımında kullanılan birim hücre açısı arttıkça azalmıştır.

Şekil 17, bütün gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerini bir özet olarak göstermektedir. Grafiklere göre yapıların çökme davranışının büyük ölçüde düz duvar uzunluğundaki değişikliklerle ilişkili olduğunu görülmüştür. Ayrıca, birim hücre açısının  $20^\circ$  olduğu H7.5-L7.5-TH20-T0.5 modelinde de çökme davranışı gözlemlenebilir.



## Kaynaklar

- Ashby, M. F., 2006. *The properties of foams and lattices.*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 364(1838), 15-30.
- Bhardwaj, S., Mishra, D. K., 2024. *Effect of different strut thickness on the mechanical behaviour of 3D printed auxetic structures.*, Materials Today: Proceedings.
- Del Broccolo, S., Laurenzi, S., Scarpa, F., 2017. *AUXHEX –A Kirigami inspired zero Poisson’s ratio cellular structure.*, Compos Struct 2017;176:433–41.
- Del Broccolo, S., Ouisse, M., Foltete, E., Scarpa, F., 2018. *Bandgap capability of hybrid Kirigami inspired cellular structures.*, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 257, No. 1, pp. 681-692). Institute of Noise Control Engineering.
- Evans, K. E., Nkansah, M. A., Hutchinson, I. J., Rogers, S. C., 1991. *Molecular network design.*, Nature, 353(6340), 124-124.
- Huang, J., Zhang, Q., Scarpa, F., Liu, Y., Leng, J., 2017. *In-plane elasticity of a novel auxetic honeycomb design.*, Composites Part B: Engineering, 110, 72-82.
- Ingrale, A., Hao, A., Liang, R., 2017. *Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement.*, Materials and Design, 117, 72-83.
- Lakes, R., 1987. *Foam structures with a negative Poisson’s ratio.*, Science, 235(4792), 1038-1040.
- Li, X., Lu, Z., Yang, Z., Wang, Q., Zhang, Y., 2018. *Yield surfaces of periodic honeycombs with tunable Poisson’s ratio.*, International Journal of Mechanical Sciences, 141, 290-302.
- Ma, C., Lei, H., Liang, J., Wu, W., Wang, T., Fang, D. (2018). *Macroscopic mechanical response of chiral-type cylindrical metastructures under axial compression loading.*, Materials and Design, 158, 198-212.
- Sarvestani, H. Y., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., Hermenean, K., 2018. *3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance.*, Composite Structures, 200, 886-909.
- Xu, M., Xu, Z., Zhang, Z., Lei, H., Bai, Y., Fang, D., 2019. *Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies.*, International Journal of Mechanical Sciences, 159, 43-57.
- Xu, M., Liu, D., Wang, P., Zhang, Z., Jia, H., Lei, H., Fang, D. (2020). *In-plane compression behavior of hybrid honeycomb metastructures: Theoretical and experimental studies.*, Aerospace Science and Technology, 106, 106081.
- Yang, W., Li, Z. M., Shi, W., Xie, B. H., Yang, M. B., 2004. *Review on auxetic materials.*, Journal of materials science, 39, 3269-3279.
- Yu, X., Zhou, J., Liang, H., Jiang, Z., Wu, L. (2018). *Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: a brief review.*, Prog Mater Sci 2018;94:114–73.
- Zhang, J., Ashby, M. F. (1992). *The out-of-plane properties of honeycombs.*, International journal of mechanical sciences, 34(6), 475-489.
- Zhang, J., Lu, G., Ruan, D., Wang, Z. (2018). *Tensile behavior of an auxetic structure: Analytical modeling and finite element analysis.*, International Journal of Mechanical Sciences, 136, 143-154.