



HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

Modifiye Edilmiş Re-entrant Ökzetik Tasarımın Çekme Yüğü Altında İncelenmesi

Investigation of Modified Re-entrant Auxetic Design Under Tensile Load

Yazar(lar) (Author(s)): Ersan KIRAR¹

¹ ORCID ID: 0000-0002-7980-4815

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kırar E., “Modifiye Edilmiş Re-entrant Ökzetik Tasarımın Çekme Yüğü Altında İncelenmesi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 10(1): 26-35, (2025).

DOI: 10.46578/humder.1600321



Modifiye Edilmiş Re-entrant Ökzetik Tasarımın Çekme Yükü Altında İncelenmesi

Ersan KIRAR^{1,*}

¹Makine Programı, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye

Makale Bilgisi

Başvuru: 12/12/2024
Düzeltilme: 05/02/2025
Kabul: 17/02/2025
Yayınlanma: 31/03/2025

Alıntı

Kırar E., "Modifiye Edilmiş Re-entrant Ökzetik Tasarımın Çekme Yükü Altında İncelenmesi", Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 10(1): 26-35, (2025).

Öz

Ökzetik yapılar negatif poisson oranları sayesinde birçok uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle çekme yükü altında ökzetik yapılar hem boyuna uzama hem de enine genişleme özelliği sayesinde çok ilgi görmektedir. Literatürde çeşitli yükleme koşulları altında birçok ökzetik tasarım incelemesinin yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada da literatürde sıklıkla tercih edilen re-entrant ökzetik yapı şekilsel olarak modifiye edilmiştir. Orijinal ve şekilsel olarak modifiye edilen re-entrant ökzetik yapılar eşit çekme yükü altında incelenmiştir. Ayrıca ökzetik tasarımların ölçülerinin %30 artırılması/azaltılması durumlarının mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik tasarımda orijinale kıyasla daha fazla eş değer gerilme ve enine genişleme ve benzer boyuna uzama sonuçları elde edilmiştir. Şekilsel olarak modifiye edilen tasarımda orijinale kıyasla daha fazla gerilme elde edilse de deformasyon açısından ökzetik özelliklerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ökzetik yapılarda ölçü azaltılmasının ökzetik özelliklere olumlu etkilediği belirlenmiştir. Çalışmada da yüzde otuz oranında ölçüleri azaltılan ökzetik yapının ökzetik özelliklerinin daha iyi olduğu elde edilen poisson oranı ve deformasyon sonuçlarıyla tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ökzetik Tasarım, Çekme Yükleme, Negatif Poisson Oranı

Investigation of Modified Re-entrant Auxetic Design Under Tensile Load

Article Information

Received: 12/12/2024
Revised: 05/02/2025
Accepted: 17/02/2025
Published: 31/03/2025

Citation

Kırar E., "Investigation of Modified Re-entrant Auxetic Design Under Tensile Load", Harran University Journal of Engineering, 10(1): 26-35, (2025).

Abstract

Auxetic structures are frequently preferred in many applications due to their negative poisson ratios. Especially under tensile load, auxetic structures attract great attention due to both longitudinal extension and transverse expansion properties. It has been observed in the literature that many auxetic design studies have been conducted under various loading conditions. In this study, the re-entrant auxetic structure frequently preferred in the literature has been modified shapely. The original and shapely modified re-entrant auxetic structures have been examined under equal tensile load. In addition, the effect of increasing/decreasing the dimensions of auxetic designs by 30% has been investigated on mechanical properties. As a result of the study, more equivalent stress and transverse extension and similar longitudinal extension results have been obtained in the shapely modified auxetic design compared to the original. Although more stress has been obtained in the shapely modified design compared to the original, it has been determined that auxetic properties are better in terms of deformation. In addition, it has been determined that reducing the dimensions in auxetic structures has a positive effect on auxetic properties. In the study, it was determined that the auxetic structure, whose dimensions were reduced by thirty percent, had better auxetic properties, based on the obtained poisson ratio and deformation results.

Keywords: Auxetic Design, Tensile Loading, Negative Poisson Ratio

*İletişim yazarı, e-mail: ekırar@harran.edu.tr

*Corresponding author, ekırar@harran.edu.tr

DOI: 10.46578/humder.1600321

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Modern endüstrinin gelişimi sayesinde, benzeri görülmemiş fiziksel ve mekanik özelliklere sahip yeni malzeme ve yapıların ortaya çıkması büyük ölçüde hızlanmıştır [1]. Pozitif poisson oranıyla karakterize edilen geleneksel malzemelerin aksine, ökzetik malzemeler uzunlamasına gerildiğinde büzülme yerine yanal olarak genişleyecektir [1-2]. Ayrıca geometrik tasarımlarına göre tipik ökzetik yapılar re-entrant vb. çeşitli türlerde bulunabilmektedir [3]. Bu tür olağandışı deformasyon, kayma direnci, enerji emilimi ve kırılma direnci açısından ökzetik yapılar üstün mekanik performansının elde edilmesine yardımcı olmaktadır [1, 3, 4]. Bu sebeplerden dolayı ökzetik yapılar; paketleme, havacılık, ulaşım ve insan vücudunun korunması alanları gibi potansiyel mühendislik uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir [4].

Literatürde çeşitli ökzetik tasarımlar şekilsel olarak modifiye edilerek çalışılan oldukça çalışmaya rastlanmıştır. Çalışmalar incelendiğinde; Logakannan vd. [5] şekilsel olarak modifiye edilmiş yıldız şeklindeki ökzetik tasarımı basma yükü altında deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmasını yapmışlardır. Küçük ebatlı olan ökzetik yapıların daha iyi ökzetik özellik sergilediğini tespit etmişlerdir. Attard vd. [6] çalışmalarında yıldız şeklindeki ökzetik yapıları şekilsel olarak modifiye ederek mekanik özelliklerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ölçü parametresinin poisson oranına etkili olduğunu belirlemişlerdir. Gao vd. [1] çalışmalarında dönen latece yapıdan oluşan ökzetik tasarımın poisson oranını ve elastisite modülünü sonlu elemanlar yöntemiyle ve analitik incelemişlerdir. Ayrıca çalışmada kullanılan yöntem arasında uyum elde etmişlerdir. Dong vd. [3] re-entrant ökzetik tasarımı kendi içinde benzer geometriye sahip re-entrant ökzetik yapıya dönüştürerek deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle basma yükü altında mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda yeni tasarımda ökzetik yapı açısından iyileşme tespit etmişlerdir. Zhang vd. [4] çalışmalarında şekilsel olarak modifiye edilmiş re-entrant ökzetik tasarımın mekanik özelliklerini basma yükü altında sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ökzetik tasarımları eş değer gerilme ve deformasyon açısından karşılaştırmışlardır. Auricchio vd. [7] “bi-tetrachiral” ökzetik tasarımının çekme yükü altındaki mekanik özelliklerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmışlardır. Çalışmalarında iki yöntem arasında uyum elde ederek ökzetik tasarımların sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Wang vd. [8] çalışmalarında chiral ökzetik yapıyı basma yükü altında deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ve analitik olarak incelemesini yapmışlardır. Çalışma sonucunda deneysel ve analiz çalışması arasında uyum elde etmişlerdir. Ayrıca “large deflection theory” ye dayalı yaptıkları analitik hesapların sonuçlarının diğer yöntemlerden elde edilenle uyumlu olduğunu belirlemişlerdir. Biswas vd. [9] şekilsel olarak modifiye edilmiş re-entrant ökzetik yapıyı (bowtie auxetic structure) bal peteği yapısıyla hibrid plakaya dönüştürmüşlerdir. Elde ettikleri hibrid plakayı basma yükü altında sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Elde ettikleri verilere göre ökzetik tasarımların enerji absorbe etme yeteneklerini araştırmışlardır. Gohar vd. [10] çalışmalarında asimetrik yapıya sahip re-entrant ökzetik yapıyı basma testiyle ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırmasını yapmışlardır. Çalışma sonucunda modifiye ettikleri yeni ökzetik tasarımların ökzetik özelliklerinin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Ashfaq vd. [11] re-entrant ökzetik yapı dahil ökzetik tasarımları basma yükü altında mekanik özellik incelemesini hem deneysel hem de sonlu elemanlar yöntemiyle yapmışlardır. Çalışma sonucunda ökzetik yapıların değerlendirmesini yapmışlardır. Khan vd. [12] modifiye edilmiş re-entrant ökzetik yapıyı çekme ve basma yükü altında analitik ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik tasarımdan ökzetik özellikleri destekleyici sonuçlar elde etmişlerdir. Li vd. [13] çalışmalarında şekilsel olarak modifiye edilmiş re-entrant ökzetik yapıyı (augmented re-entrant honeycomb) çekme yükü altında sonlu elemanlar analizinde ve analitik olarak mekanik özellikler açısından değerlendirmişlerdir. Ayrıca iki yöntem arasında uyum elde etmişlerdir. Zhu vd. [14] çalışmalarında şekilsel olarak modifiye edilmiş re-entrant ökzetik yapıyı (elliptical annular re-entrant honeycomb) sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışma sonucunda modifiye edilmiş ökzetik tasarımın enerji depolama kabiliyetinin daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. Zang vd. [15] re-entrant ökzetik yapıları çekme yükü altında malzemenin elastik ve plastik deformasyon bölgesinde deformasyon kabiliyetini incelemişlerdir. Çalışmayı analitik ve sonlu elemanlar yöntemiyle uygulayarak ökzetik tasarımların ilk akma dayanımını ve deformasyon yapısını tespit etmişlerdir. Alomarah vd. [16] çalışmalarında re-entrant chiral ve re-entrant ökzetik yapıları çekme yükü altında hem deneysel hem de Ls dyna yazılımında sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışma sonucunda şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapıların ökzetik özelliklerinin daha iyi olduğu

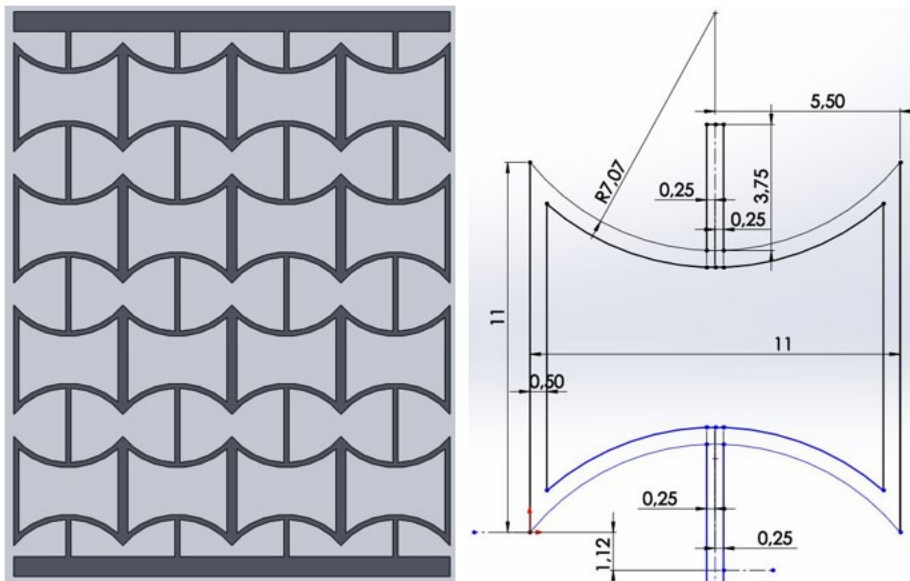
sonucuna varmışlardır. Can [17] çalışmasında re-entrant ökzetik yapının ölçülerini %40 azaltıp/arttırarak çekme yüklemesi altında incelemiştir. Çalışma sonucunda %40 ölçüsü azaltılan ökzetik yapının ökzetik özellik ve deformasyon açısından daha iyi olduğu sonucuna varmıştır. Çalışma sonucunda hem çekme dayanımı ve ökzetik etki açısından re-entrant chiral yapının daha iyi sonuç verdiğini belirlemiştir. Literatür incelemeleri sonucunda re-entrant ökzetik yapı dahil birçok ökzetik tasarımın şekilsel olarak modifiye edilerek çeşitli yükleme koşulları altında incelendiği tespit edilmiştir. Ancak çalışmada kullanılan şekilsel olarak modifiye edilmiş re-entrant ökzetik tasarımın incelemesine rastlanmamıştır. Ayrıca çalışmalarda ökzetik yapıların çekme yükü altındaki gerilme ve deformasyon yeteneklerinin incelendiği tespit edilmiştir. Literatür incelemesinde çeşitli yükleme koşulları altında re-entrant ökzetik tasarımların incelendiği belirlenmiştir. Özellikle ökzetik malzemelerin kompozit malzemelerde ve medilal uygulamalarda sıklıkla çekme yüküne maruz kalması nedeniyle çekme yükü altında inceleme yapan çalışmalarda rastlanmıştır. Ayrıca çeşitli ökzetik tasarımlarında şekilsel olarak modifiye edilerek çeşitli yükleme koşullarında mekanik özelliklerinin incelendiği tespit edilmiştir. Bu nedenle çalışmada da literatürde rastlanmayan şekilsel olarak modifiye edilmiş re-entrant ökzetik tasarım çekme yükü altında mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, orjinal ökzetik tasarımın şekilsel olarak modifiye edilmesi sonucundaki şekil değişiminin ökzetik özelliğe etkisi araştırılmıştır. Ayrıca orijinal ve şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik tasarımların ölçüleri %30 arttırılarak/azaltılarak ölçünün ökzetik yapıdaki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sayesinde yeni ökzetik tasarımın çekme yüklemesi altındaki deformasyon davranışı, poisson oranı ve gerilme dağılımı parametrelerine ölçü etkisinin göz önüne alınmasıyla literatüre yeni tasarım hakkında ekstra bilgi kazandırılmıştır. Çalışmadan elde edilen yeni ökzetik tasarım verileriyle literatüre hem yeni tasarım şekli hem de yeni tasarımın ökzetik özellikleri açısından katkı sağlanmıştır. Çalışmadan elde edilen bu bilgiler ışığında ileriki çalışmalarda tasarımın uygulamadaki kullanımına ışık tutacağı düşünülmektedir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

2.1 Materyal (Material)

2.1.1. Literatürden kullanılan ökzetik yapı (Auxetic structure used in literature)

Çalışma kapsamında literatürde [9] kullanılan re-entrant (Şekil 1) ökzetik tasarım referans olarak tercih edilmiştir. Tercih edilen re-entrant ökzetik tasarım şekilsel olarak modifiye edilerek Şekil 2'deki biçime dönüştürülmüştür. Şekilsel olarak modifiye edilen yeni tasarım literatürde olmayışı nedeniyle çalışmaya özgünlük katılmıştır.



Şekil 1. Şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik tasarım ve ölçüleri

2.1.2. Ökzetik yapı için malzeme seçimi (Material selection for the auxetic structure)

Alüminyum malzemenin esnek yapısı sayesinde ökzetik tasarımların mekanik olarak incelemesi kolayca yapılabilmektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan ökzetik yapı için ANSYS yazılımının malzeme kütüphanesindeki alüminyum malzeme kullanılmıştır. Tablo 1'de kullanılan malzemenin mekanik özellikleri sunulmuştur.

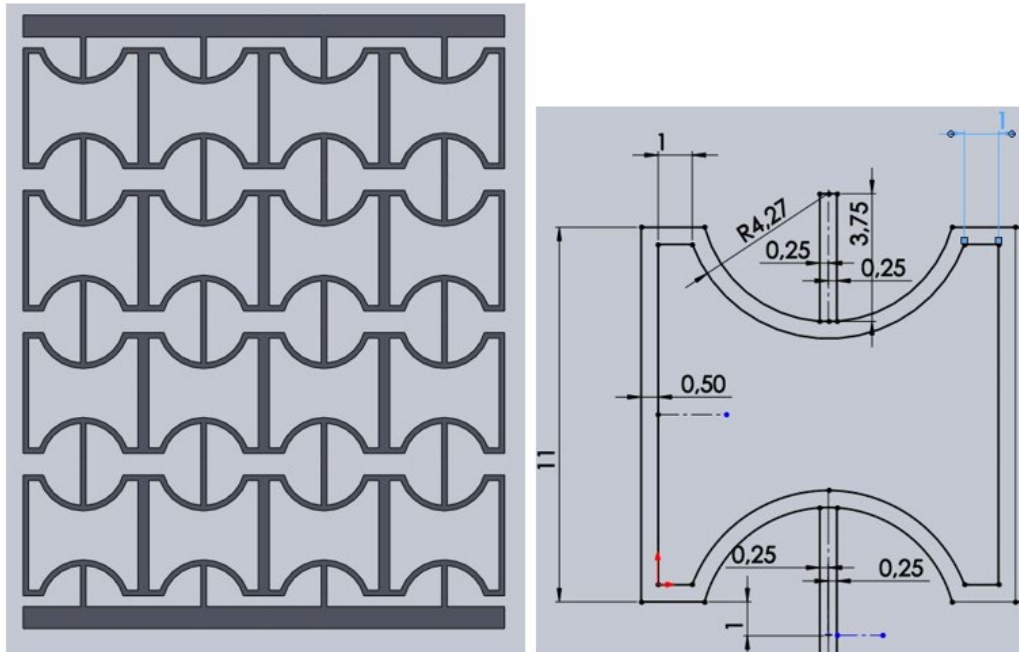
Tablo 1. Kullanılan alüminyum malzemenin mekanik özellikleri

Alüminyum mekanik özellikleri	Değerler
Yoğunluk (kg/m ³)	2770
Elastisite modülü (GPa)	71
Poisson oranı	0.33
Bulk modülü (GPa)	69.61
Kayma modülü (GPa)	26.69
Çekme akma dayanımı (MPa)	280
Çekme maksimum dayanımı (MPa)	310

2.2. Yöntem (Method)

2.2.1. Şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik tasarım (Shapely modified auxetic design)

Çalışma kapsamında Şekil 1'de verilen ökzetik tasarım şekilsel olarak modifiye edilmiştir. Şekilsel olarak modifiye edilen yeni ökzetik tasarım çekme yükü altında orijinal formuyla karşılaştırılarak incelenmiştir. Ayrıca kullanılan orijinal ve şekilsel olarak modifiye edilmiş tasarımların ölçüleri %30 oranında artırılarak ve azaltılarak kullanılan ökzetik tasarımlarda ölçünün etkileri incelenmiştir. Kullanılan büyütme ve küçültme oranının seçiminde, tasarım ölçülerine uygun olacak şekilde eşit oranda büyütme ve küçültme kriteri kullanılmıştır. Özellikle ölçüleri küçültülmesi aşamasında ökzetik özelliğe etkisi olmayacak şekilde ve literatürde [17] tercih edilene benzer oran kullanılmıştır.



Şekil 2. Şekilsel olarak modifiye edilmiş ökzetik tasarım

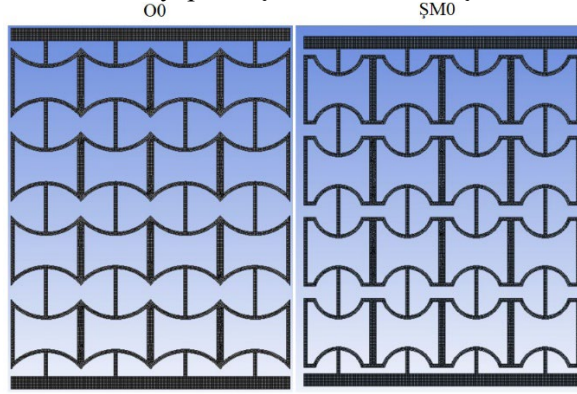
2.2.2. Ökzetik yapıların sonlu elemanlar analizi (Finite element analysis of auxetic structures)

Orijinal ve şekilsel olarak modifiye edilmiş ökzetik tasarımlar çekme yükü altında sonlu elemanlar analizinde incelenmiştir. Ökzetik tasarımların sonlu elemanlar modellemesinde ANSYS yazılımında statik

analiz bölümü kullanılmıştır. Malzeme elastik bölgede belirlenen bir çekme yükü altında inceleneceği için statik analiz bölümü tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi çalışmasında kullanılan ökzetik tasarımlar ve kısa kodları Tablo 2’de sunulmuştur.

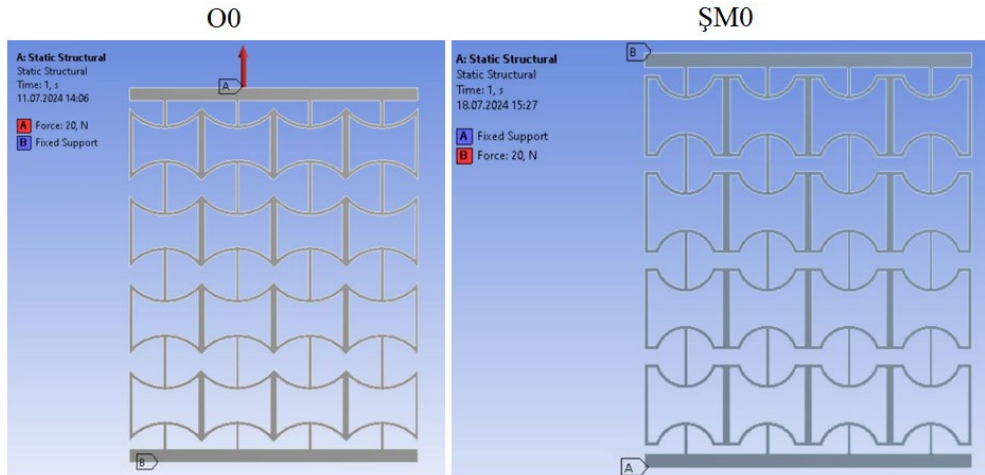
İncelenen ökzetik yapılar	Kısaltmaları
Orijinal tasarım	O0
%30 büyütülmüş orijinal tasarım	O+30
%30 küçültülmüş orijinal tasarım	O-30
Şekilsel modifiye edilmiş tasarım	ŞM0
%30 büyütülmüş Şekilsel modifiye edilmiş tasarım	ŞM+30
%30 küçültülmüş Şekilsel modifiye edilmiş tasarım	ŞM-30

Ökzetik yapılar katı modelleme yazılımında çizilmiştir. Hazırlanan katı modeller ANSYS yazılımına aktarılmıştır. Sonlu elemanlar modellemesinde ilk aşamada ANSYS kütüphanesindeki Alüminyum malzemesi (Tablo 1) seçilmiştir. Sonrasında katı model için yeterince doğru sonuçlar verecek mesh yapısı oluşturulmuştur. Mesh yapısında modelde basitleştirme amaçlı hekzahedron eleman tercih edilmiştir. Ökzetik tasarımlar için oluşturulan mesh yapıları Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Orijinal ve şekilsel modifiye edilmiş ökzetik tasarımların mesh yapısı

Ökzetik yapıların incelemesi için kullanılan sabit çekme yükü seçiminde, malzemenin plastik deforme olmaması durumu göz önüne alınmıştır. Bu nedenle denemeler ile elde edilen 20 N çekme yükü tüm modellere uygulanmıştır. Seçilen çekme kuvveti ökzetik tasarımın üst kısmına tanımlanmıştır. Ökzetik tasarımın alt tarafı da ankastre sabitlenmiştir (Şekil 4).



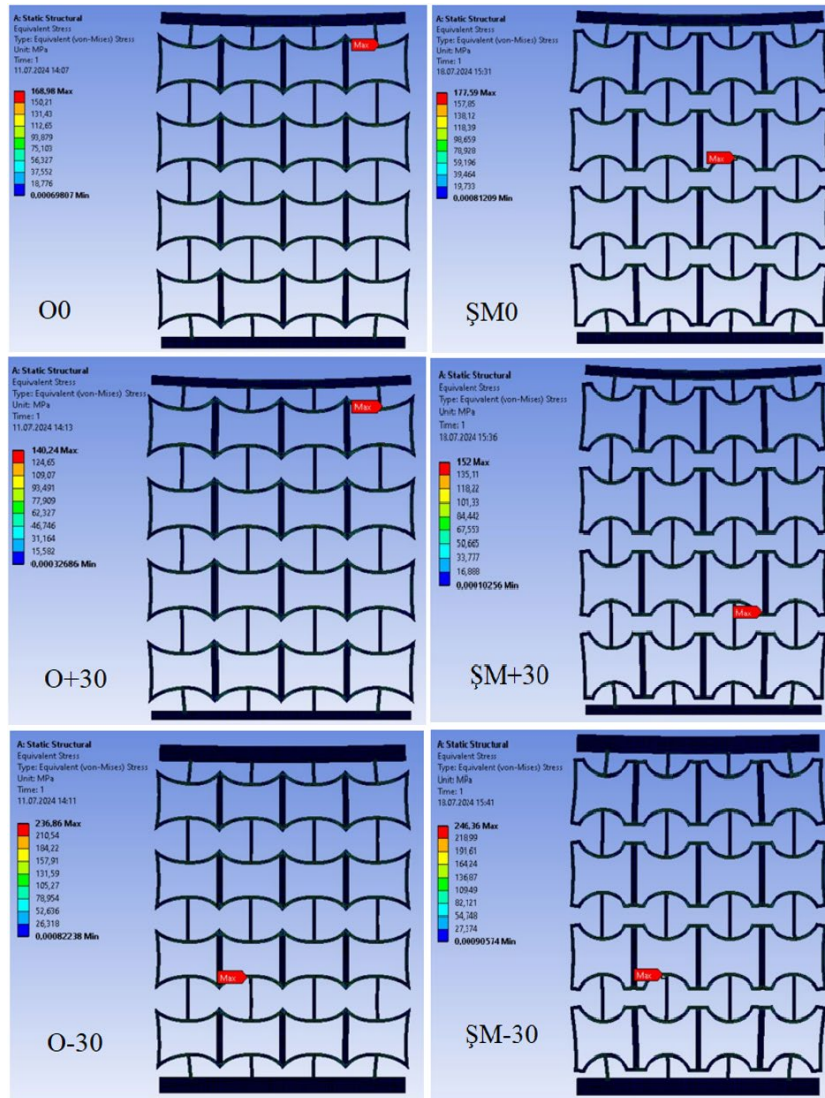
Şekil 4. Orijinal ve şekilsel modifiye edilmiş ökzetik tasarımların sonlu elemanlar modellemesi sınır şartları

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Çalışma kapsamında orijinal ve şekilsel modifiye edilmiş ökzetik yapılar eşit çekme yükü altında incelenmiştir. Ökzetik yapıların incelemesinde aksenal uzama, enine genişleme, Von mises eş değer gerilme ve poisson oranı tercih edilmiştir.

Tablo 3. Ökzetik tasarımların sonlu elemanlar analizi sonuçları

Ökzetik tasarımlar	Poisson oranı	Boyuna uzama (mm)	Enine genişleme (mm)	Von mises eş değer gerilme
O0	-0.2204	0.4001	0.0882	168.98
O+30	-0.2122	0.4237	0.0899	140.24
O-30	-0.2339	0.3716	0.0869	236.86
ŞM0	-0.3478	0.4069	0.1415	177.59
ŞM+30	-0.3241	0.4425	0.1434	152.00
ŞM-30	-0.3752	0.3686	0.1383	246.36

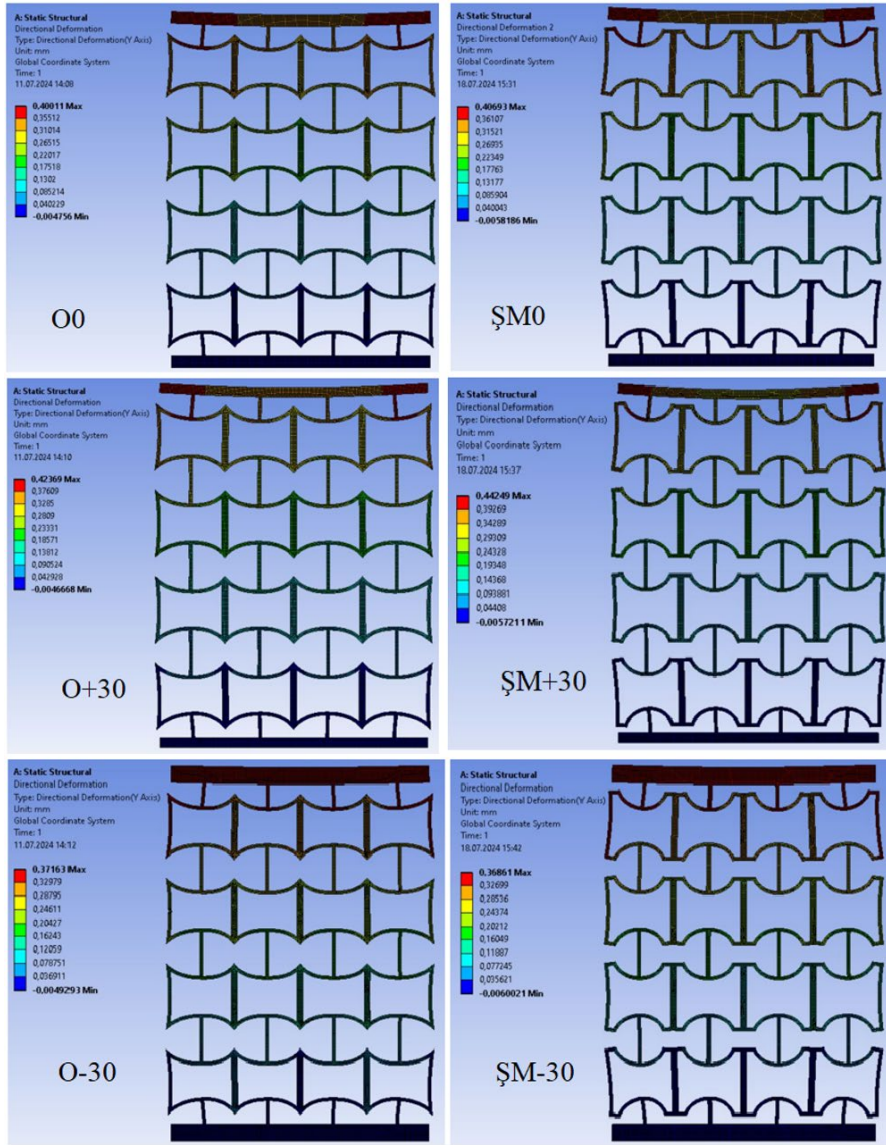


Şekil 5. Ökzetik yapıların Von mises eş değer gerilme sonuçları

Tablo 3 ökzetik tasarımların sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen deformasyon davranışını, poisson oranını ve eş değer gerilme sonuçlarını içermektedir. Tablo 3'teki boyuna uzama sonuçlarıyla tasarımın gerinim kabiliyeti incelenmiştir. Ayrıca ökzetik tasarımlarda boy değişiminin gerinime etkisi alınan boyuna uzama sonucuyla değerlendirilmiştir. Analizde kullanılan modelin uçlarındaki sınırlamalar

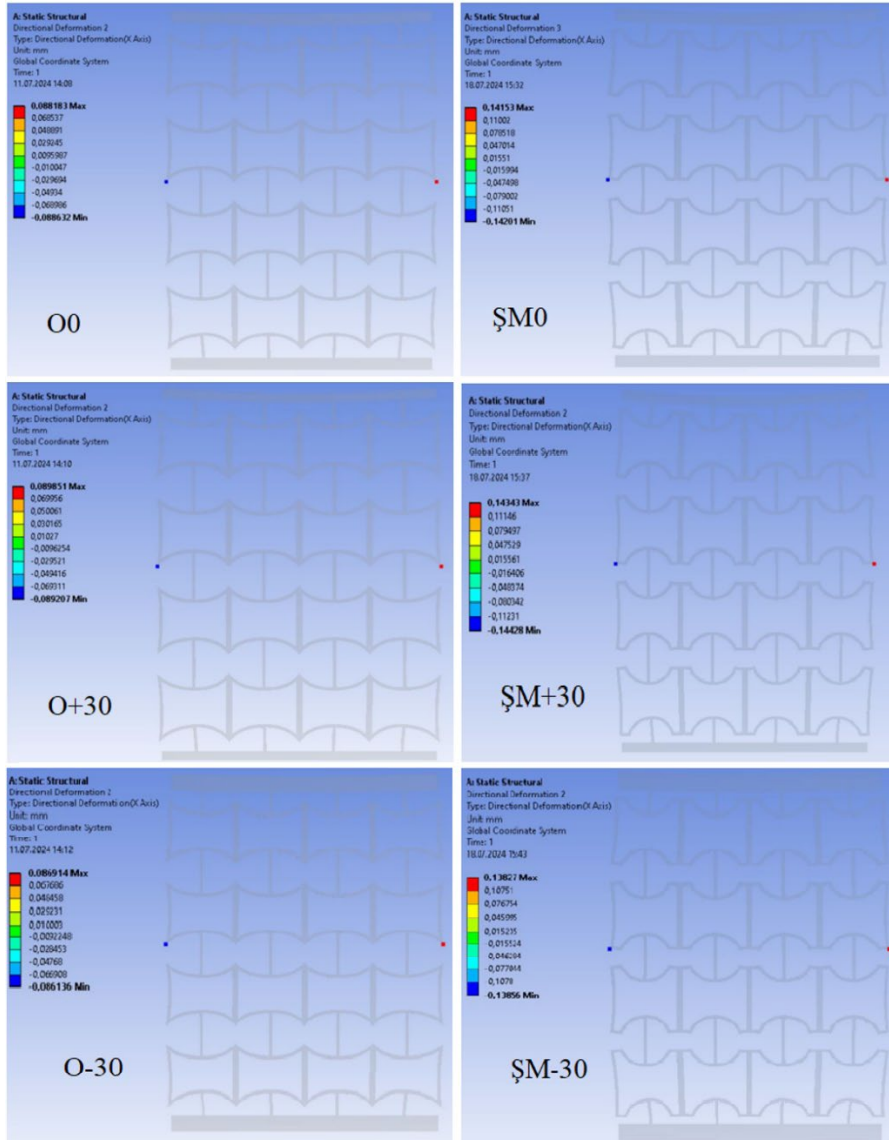
nedeniyle enine genişleme sonuçları için Şekil 7’de görülen tasarımların ortasındaki noktalar tercih edilmiştir. Elde edilen enine genişleme sonucuyla tasarımların ve boyut değişiminin enine genişlemeye etkisi incelenmiştir. Çalışmada enine genişleme ve boyuna uzama sonuçları kullanılarak da poisson oranı Tablo 3’teki gibi hesaplanmıştır. Ayrıca tüm tasarımlar için Şekil 5’te verilen Von mises eş değer gerilme sonucu alınmıştır. Eş değer gerilme sonucuyla tasarımların eşit yüklemeye altındaki gerilme dağılımları incelerken karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 3 ve Şekil 5’teki eş değer gerilme sonuçları incelendiğinde en fazla orijinal ökzetik yapıda 168.98 MPa ve şekilsel modifiye edilen yapıda ise 177.24 MPa elde edilmiştir. Ayrıca ökzetik yapıların %30 ölçüsel olarak büyütülmesi sonucunda orijinal yapının eş değer gerilmesinde %17.01 düşüş ve şekilsel modifiye edilende ise %18.96 düşüş elde edilmiştir. Ökzetik yapıların %30 ölçüsel olarak küçültülmesi sonucunda orijinal yapının eş değer gerilmesinde %40.17 artış ve şekilsel modifiye edilende ise %43.46 artış tespit edilmiştir. Elde edilen verilere göre ökzetik yapının ölçüsel büyütülmesiyle numunenin alanın artması nedeniyle gerilme sonuçlarını düşürdüğü ve ölçüsel küçültülmesinde ise alan azalması nedeniyle gerilmeye artış olmasının normal olduğu belirlenmiştir. Ökzetik yapıların eş gerilme sonuçlarında, şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapının eşit yük altında daha fazla gerilmeye sahip olması nedeniyle bu yönden olumsuz bir sonuç elde edilmiştir.



Şekil 6. Ökzetik yapıların aksenal uzama sonuçları

Şekil 6 ve Tablo 3'teki boyuna uzama sonuçları incelendiğinde, orijinal ökzetik yapıda 0.400 mm ve şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapıda 0.407 mm uzama belirlenmiştir. Ayrıca ökzetik yapıların ölçülerinin %30 arttırılması sonucunda, orijinal ökzetik yapıda %6 artış ve şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapıda %8.6 artış belirlenmiştir. Ökzetik yapıların ölçülerinin %30 küçültülmesi sonucunda ise, orijinal ökzetik yapıda %7 düşüş ve şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapıda %9.34 düşüş belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ölçü artışına paralel olarak uzama artmış ve ölçü azalmasına bağlı olarak da uzamanın azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca şekilsel modifiye edilen ökzetik yapıyla orijinal ökzetik yapı arasında boyuna uzama açısından çok az bir fark olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda tüm ökzetik yapılarda boyuna uzama sonuçları elde edilmiştir. Bu deformasyon özelliğiyle literatüre [15, 16] uyum sağlamıştır.



Şekil 7. Ökzetik yapıların enine genişleme sonuçları

Tablo 3 ve Şekil 7'deki enine genişleme sonuçları incelendiğinde, orijinal ökzetik yapıda 0.088 mm ve şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapıda 0.142 mm enine genişleme belirlenmiştir. Ökzetik yapının ölçülerinin %30 arttırılması sonucunda, orijinal ökzetik yapıda %2.27 artış ve şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapıda %0.7 artış tespit edilmiştir. Ökzetik yapının ölçülerinin %30 küçültülmesi sonucunda ise, orijinal ökzetik yapıda %1.14 düşüş ve şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapıda %3.5 düşüş tespit edilmiştir. Analizden elde edilen sonuçlara göre ökzetik yapının enine genişlemesinde ölçü artışıyla artış

ve ölçü azalmasıyla da azalma gözlemlenmiştir. Elde edilen enine deformasyon sonuçlarıyla literatüre [15, 16] uyum sağlamıştır.

Tablo 3'teki ökzetik tasarımların sonlu elemanlar analizi sonuçları incelendiğinde orijinal ve şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik tasarımların ölçülerinin değişmesi sonucunda beklenildiği gibi az miktarda değişimle de olsa %30 oranında ölçüsü azaltılan ökzetik yapılarda daha uzun süreli ökzetik özellik tespit edilmiştir. Bu durum poisson oranındaki artışla da desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki [17, 5] çalışmaların sonuçlarına da uyum göstererek çalışma sonuçları teyit edilmiştir. Ökzetik yapıların %30 oranında ölçülerinin artmasıyla da ökzetik özelliklerinde az miktarda olsa düşüşler tespit edilmiştir. Bu durum hücre boyutlarının artışıyla daha kolay deforme olmasına bağlanmıştır. Ayrıca şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik tasarımdan orijinale kıyasla daha yüksek poisson oranı elde edilmiştir. Bu durumda, şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapının şekli nedeniyle enine genişleme sonuçlarının orijinale kıyasla daha fazla olmasına bağlanmıştır. Sonuç olarak şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapıda maksimum eş değer gerilme az daha fazla elde edilse de, enine daha fazla genişlemesi sonucunda negatif poisson oranı verisi artarak ökzetik özelliklerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışmada literatürde kullanılan orijinal ökzetik yapı şekilsel olarak modifiye edilmiştir. Ayrıca ökzetik yapıların ölçüleri %30 arttırılıp/azaltılması durumunun mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Mevcut çalışma için öncelikle belirtilen ökzetik yapılar katı modellenmiştir. Sonrasında Ansys sonlu elemanlar yazılında statik analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarında, maksimum eş değer gerilme, boyuna uzama, enine genişleme ve poisson oranı verileri kullanılarak ökzetik yapılar değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda;

- Sonlu elemanlar analizinde mesh yapısından bağımsızlığı kontrol edilerek oluşturulan model sayesinde yeterince doğru sonuçlar alınmıştır. Tasarımların analiz sonuçları deformasyon, eş değer gerilme ve poisson oranı parametreleri açısından değerlendirilerek tasarımlar incelenmiştir.
- Orijinal ökzetik yapının maksimum eş değer gerilme sonucu şekilsel olarak modifiye edilene kıyasla daha az çıkmıştır.
- Şekilsel olarak modifiye edilen ve orijinal ökzetik yapılar arasında boyuna uzama açısından az miktarda fark tespit edilmiştir.
- Şekilsel olarak modifiye edilen ökzetik yapının orijinal tasarıma kıyasla daha fazla enine genişlediği belirlenmiştir.
- Şekilsel modifiye edilen yapının enine daha fazla genişlemesi sonucunda negatif poisson oranı verisi artarak ökzetik özelliklerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir.
- %30 oranında ölçüleri azaltılan ökzetik yapının ökzetik özelliklerinin daha iyi olduğu elde edilen poisson oranı ve deformasyon sonuçlarıyla belirlenmiştir.
- Çalışmada elde edilen yeni ökzetik tasarımla ilgili olumlu sonuçlarla literatüre yeni bir tasarım eklenmiştir. Ayrıca ökzetik yapının ölçü değişiminin ökzetik özelliklere etkisi kullanılan tasarımda araştırılarak literatüre katkı sağlanmıştır.

ARAŞTIRMA ve YAYIN ETİĞİ BEYANI (STATEMENT OF PUBLICATION ETHICS)

Çalışmanın tüm süreçlerinin araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu, etik kurallara ve bilimsel atıf gösterme ilkelerine uyduğumu beyan ederim.

YAZAR KATKISI (AUTHOR STATEMENT)

Ersan KIRAR: Sonlu elemanlar analizi çalışması, Veri Toplama, Veri İşleme, Yazım

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gao, Y., Wei, X., Han, X., Zhou, Z. & Xiong, J. (2021). Novel 3D auxetic lattice structures developed based on the rotating rigid mechanism. *International Journal of Solids and Structures*, 233, 111232.

- [2] Subramani, P., Rana, S., Oliveira, D. V. & Fangueiro, R. (2014). Xavier J. Development of novel auxetic structures based on braided composites. *Materials and Design*, 61, 286–295.
- [3] Dong, P., Hou, R., Hu, J., Lin, C., Liu, Y. & Qin, L. (2023). Novel self-similar re-entrant auxetic metamaterials (SREAM): Design, mechanical property, and geometric optimization. *Polymer Testing*, 122, 108015.
- [4] Zhang, X., Hao, H., Tian, R., Xue, Q., Guan, H. & Yang, X. (2022). Quasi-static compression and dynamic crushing behaviors of novel hybrid re-entrant auxetic metamaterials with enhanced energy-absorption. *Composite Structures*, 288, 115399.
- [5] Logakannan, K. P., Ramachandran, V., Rengaswamy, J., Gao, Z. & Ruan, D. (2020). Quasi-static and dynamic compression behaviors of a novel auxetic structure. *Composite Structures*, 254, 112853.
- [6] Attard, D., Farrugia, P. S., Gatt, R. & Grima, J. N. S. (2020). A novel class of auxetic hierarchical structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 179, 105631.
- [7] Auricchio, F., Bacigalupo, A., Gambarotta, L., Lepidi M., Morganti, S. & Vadalà F. (2019). A novel layered topology of auxetic materials based on the tetrachiral honeycomb microstructure. *Materials & Design*, 179, 107883.
- [8] Wang, Q., Yang, Z., Lu, Z. & Li, X. (2020). Mechanical responses of 3D cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression. *Materials & Design*, 186, 108226.
- [9] Biswas, A. N., Mahesh, N., Peri, S. R., Krishnan, B. R. & Sreekanth, P. S. R. (2022). Hybrid auxetic materials implemented in crates & non-pneumatic wheels for shock absorption. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1327–1334.
- [10] Gohar, S., Hussain, G., Ilyas, M. & Ali, A. (2021). Performance of 3D printed topologically optimized novel auxetic structures under compressive loading: experimental and FE analyses. *Journal of materials research and technology*, 15, 394-408.
- [11] Ashfaq, B., Hussain, G., Khan, M. B., Alkahtani, M. & Wei, H. A. (2024). novel design of mono and bi-cells based hybrid auxetic structures and assessment of their compressive properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 1620–1632.
- [12] Khan, S. Z., Mustahsan, F., Mahmoud, E. R. I. & Masood, S. H. (2020). A novel modified re-entrant honeycomb structure to enhance the auxetic behavior: Analytical and numerical study by FEA. *Materials Today: Proceedings*, vol:39, part 2, 1041-1045.
- [13] Li, X., Wang, Q., Yang, Z. & Lu, Z. (2019). Novel auxetic structures with enhanced mechanical properties. *Extreme Mechanics Letters*, 27, 59–65.
- [14] Zhu, D., Wei, Y., Shen, X., Yan, K., Yuan, M. & Qi, S. (2024). A novel elliptical annular re-entrant auxetic honeycomb with enhanced stiffness. *International Journal of Mechanical Sciences*, 262, 108732.
- [15] Zhang, J., Lua, G., Ruana, D. & Wang, Z. (2018). Tensile behavior of an auxetic structure: Analytical modeling and finite element analysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 136, 143–154.
- [16] Alomarah, A., Ruan, D., Masood, S., Sbarski, I. & Faisal, B. (2018). An investigation of in-plane tensile properties of re-entrant chiral auxetic structure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 2013–2029.
- [17] Can, H. O. (2017). *Akıllı Malzemelerin Mekanik Özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 52s.

