

Negatif Poisson's Oranına Sahip Yapılar (Auxetic Structure) Hakkında Genel Bir Bakış: Literatür Çalışması

İsmail Erdoğan^{1*} 

¹Turkish Aerospace Industries (TAI), 06980, Kahramankazan, Ankara, Türkiye

Geliş: 03.11.2025, Kabul: 25.11.2025, Yayınlanma: 12.05.2025

ÖZ

Poisson's oranı yapıların önemli mekanik özelliklerinden birisidir. Tasarım ve üretim süreçlerinin gelişmesi ile birlikte farklı özelliklere sahip yapıların kullanımı ihtiyaç haline gelmiştir. Bu bağlamda, farklı özelliklere sahip yapıların oluşmasına olanak verecek auxetic yapılar detaylı bir şekilde incelenmeye başlanmıştır. Negatif Poisson's oranı özelliği gösteren bu yapılar, geleneksel yapılardan enerji sönümleme, darbe direnci gibi konularda üstün özelliklere sahiptir. Bunlara ek olarak, gelişen eklemeli imalat teknolojisi ile birlikte daha fazla üstün özellik kazanan auxetic kafes yapılar birçok araştırmacı tarafından farklı uygulama alanları ile bütünleşmiş, teorik ve deneysel olarak incelenmiş ve incelenmeye devam etmektedir. Bu kapsamlı inceleme çalışmasında, önceki çalışmalarda yer alan auxetic yapılar incelenmiş ve yapılan çalışmalar sunulmuştur. Yeni tasarlanmış ve mevcut auxetic yapıların farklı şartlar altında statik ve dinamik testler ile çalışıldığı çalışmaların incelendiği bu derleme çalışması kapsamında, 17 adet derleme çalışması ve 45 adet araştırma çalışması olmak üzere toplam 62 yayın incelenmiştir. Araştırma çalışmalarının 33 adedi hem teorik hem de deneysel, 8 adedi teorik ve 4 adedi ise deneysel niteliktedir. Ayrıca; incelenen çalışmalarda, en çok tercih edilen birim geometrisi re-entrant, en çok kullanılan malzemeler ABS, PLA, Onyx gibi plastikler ile alüminyum ve titanyum alaşımları, en çok incelenen mekanik özellik ise enerji sönümleme kabiliyeti olarak görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Poisson's oranı; Negatif Poisson's oranı; Auxetic; Auxetic yapı

An overview of negative Poisson's ratio structures (Auxetic structure): A comprehensive literature review

ABSTRACT

Poisson's ratio is one of the important mechanical properties of structures. With the development of design and production processes, the use of structures with different characteristics has become a necessity. In this context, auxetic structures, which will allow the formation of structures with different properties, have begun to be studied in detail. These structures, which show negative Poisson's ratio feature, have superior properties in terms of energy absorption and impact resistance than traditional structures. In addition to these, auxetic lattice structures, which have gained more superior features with the developing additive manufacturing technology, have been integrated into different application areas by many researchers and have been examined theoretically and experimentally and continue to be increasingly studied. In this comprehensive review study, the auxetic structures in previous studies were examined and the studies were presented. Within the scope of this review study, in which studies on newly designed and existing auxetic structures were studied under different conditions with static and dynamic tests, a total of 62 publications, 17 review studies and 45 research studies, were examined. 33 of the research studies are both theoretical and experimental, 8 of them are theoretical and 4 of them are experimental. In addition, in the studies examined, the most preferred unit geometry was re-entrant, the most used materials were plastics such as

ABS, PLA, Onyx and aluminum and titanium alloys, and the most examined mechanical property was energy absorption ability.

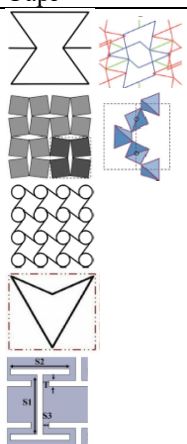
Keywords: Poisson's ratio; Negative Poisson's ratio; Auxetic; Auxetic structure

1. GİRİŞ

Poisson's oranı, bir eksen gerilimi üzerindeki yanıl sıkıştırmanın boylamasına uzamaya oranıdır ve pozitif veya negatif olabilir. Poisson's oranı negatif bir değeri alırsa bu yapılar auxetic olarak adlandırılır. Auxetic yapılar literatürde yeni geliştirilmiş yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Birçok araştırmacı, yeni tasarlanan auxetic yapıları literatüre kazandırmış ve bu yapıların mekanik özelliklerini ve uygulama alanlarını çalışmıştır.

Auxetic yapılar, Tablo 1a'de verildiği gibi birincil ve ikincil olmak üzere iki temel özellik sınıfına ayrılırlar. Negatif Poisson's oran özelliği, eş eğrilik davranışı ve değişken geçirgenlik birincil özellikleridir. İkincil özellik olarak ise, birçok çalışmada incelenen enerji emilimi, darbe direnci, kayma direnci, girinti direnci ve kırılma direnci özellikleri görülmektedir. Auxetic yapılar, Tablo 1b'de verildiği gibi çeşitli birim geometrileri ve düzenlerinde olabilir. Döner birimler, kiral birimler, re-entrant ve 3B/2B döner birimler bu konunun örnekleridir.

Çizelge 1: a) Auxetic özellikler, b) Auxetic yapılar (Cardoso ve ark., 2021).

Auxetic özellikler		Yapı	Tanım
Birincil özellikler	İkincil özellikler		Re-entrant, 3B Re-entrant yapı
Negatif Poisson's Ratio	Kesme direnci		Döner birimler, ve 2B döner yapı
Senklastik davranış	Girinti direnci		Kiral yapı
Değişken geçirgenlik	Kırılma direnci		Çift ok yapı
	Enerji emilimi		I Şekilli yapı
	Etki dayanımı		

a)

b)

Auxetic yapıların üretim yöntemleri ve süreçleri çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Auxetic yapılar, geleneksel imalat yöntemleri, eklemeli imalat yöntemleri ve bu iki yöntemin birleşimi ile de üretilir. Özellikle eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen auxetic yapılar literatürde çokça karşımıza çıkmaktadır. Auxetic yapıların mekanik özelliklerine ve imalat süreçlerine bakıldığında; yüksek mukavemet, hafiflik, yüksek kesme dayanımı, yüksek girinti direnci, yüksek senklastik davranış, iyi çatlama direnci, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, enerji sönmüleme, değişken malzeme yapısı ve yapı oranları gibi birçok avantajlarının yanı sıra, karmaşık yapı düzeninin ve üretiminin zor olması dezavantajları olarak gösterilmektedir. Auxetic yapılar; havacılık ve savunma sanayi, otomotiv ve inşaat sanayi, biyomedikal, sensör ve tekstil gibi birçok farklı uygulama alanında farklı amaç ve görevlerde kullanılabilmektedir.

Auxetic yapılar ile ilgili yeni araştırmalar yapılmış olup bu çalışmalardan bahsetmeden önce, konuyla ilgili bazı inceleme çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Wu ve ark. (Wu ve ark., 2019) tarafından yapılan ve 2019 yılında yayımlanan inceleme çalışmasında, Kiral auxetic yapıların mekanik tasarımı ve çok işlevli uygulamaları araştırılmış ve sunulmuştur. Zhang ve ark. (Zhang ve ark., 2020) tarafından yapılan ve 2020 yılında yayımlanan diğer bir inceleme çalışmasında, deformasyon ve enerji sönmüleme özelliklerine sahip eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen yapılar araştırılmış ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Öte yandan; Dogan ve ark. (Dogan ve ark. 2020) tarafından yapılan ve 2020 yılında yayımlanan bir inceleme çalışmasında da, eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmiş auxetic yapıların doku mühendisliği alanındaki durumu aktarılmıştır.

Cardoso ve ark. (Cardoso ve ark., 2021) tarafından yapılan ve 2021 yılında yayımlanan inceleme çalışmasında, Negatif mekanik/termomekanik özelliklere sahip yapısal metamateryaller incelenmiştir. Wu ve ark. (Wu ve ark., 2021) tarafından yapılan ve 2021 yılında yayımlanan bir diğer inceleme çalışmasında, dinamik mekanik metamateryallerin mekanik enerji sönmüleme durumları araştırılmıştır. Luo ve ark. (Luo ve ark., 2021) tarafından yapılan ve 2021 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında, boru şeklindeki auxetic yapıların tasarımı, üretimi ve uygulama alanları hakkında bilgi verilmiştir. Ji ve ark. (Ji ve ark., 2021) tarafından yapılan ve 2021 yılında yayımlanan diğer bir inceleme çalışmasında ise, titreşim kontrol tabanlı metamateryale ve origami yapı özellikleri aktarılmıştır.

Lu ve ark. (Lu ve ark., 2022) tarafından yapılan ve 2022 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında; yeni tasarlanmış ve eklemeli imalat ile üretilmiş auxetic yapıların mekanik özellikleri sunulmuştur. Xue ve ark. (Xue ve ark., 2022) tarafından yapılan ve 2022 yılında yayımlanan diğer bir inceleme çalışmasında ise, negatif Poisson's oranlı kafes yapıları araştırılmış olup mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Jiang ve ark. (Jiang ve ark., 2022) tarafından yapılan ve 2022 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında, auxetic köpük yapıları üretimi, özellikleri ve uygulamaları incelenmiştir. Shukla ve ark. (Shukla ve ark., 2022) tarafından yapılan ve 2022 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında, lifli ve kompozit auxetic yapıların özellikleri ile uygulama alanları aktarılmıştır.

Balan ve ark. (Balan ve ark., 2023) tarafından yapılan ve 2023 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında, auxetic yapıların geleceğe yönelik olan gelişmelerinden bahsedilmiştir. Vyavahare ve ark. (Vyavahare ve ark., 2023) tarafından yapılan ve 2023 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında, eklemeli olarak üretilmiş meta-biyo yapılar hakkındaki araştırmalar sunulmuştur. Zhou ve ark. (Zhou ve ark., 2023) tarafından yapılan ve 2023 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında, auxetic yapıların üretim, gelişim ve uygulama alanları hakkındaki araştırmalar sunulmuştur. Shirzad ve ark. (Shirzad ve ark., 2023) tarafından yapılan ve 2023 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında ise; Auxetic yapıların,

kemik implantlarında kullanılması ve konu ile ilgili son gelişmeleri aktarılmıştır. Huang ve ark. (Huang ve ark., 2023) tarafından yapılan ve 2023 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında, sıkıştırılmış katılardan ve bunlarla yakından ilişkili olan mekanik metamatallerle ilgili son çalışmaları gözden geçirmişlerdir. Montgomery-Liljeroth ve ark. (Montgomery-Liljeroth ve ark., 2023) tarafından yapılan ve 2023 yılında yayımlanan diğer inceleme çalışmasında, 2B auxetic petek yapılarının elastik özellikleri araştırılmış ve sunulmuştur.

Pek çok farklı yeni tasarlanmış ve geleneksel auxetic yapıların mekanik özellikleri araştırmacılar tarafından teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu inceleme çalışması kapsamında; yapılmış çalışmalar yayınlanma yıllarına göre geçmişten günümüze olacak şekilde aşağıda verilmiştir. İncelenen inceleme çalışmalarının ve araştırma çalışmalarının genel çıktıları, sonuç ve öneriler bölümünde incelenmiştir. Ayrıca gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Bu inceleme çalışması kapsamında, incelenen derleme ve araştırma çalışmaları Tablo 1'de özetlenmiş olup detaylı bir şekilde bu bölümde verilmiştir. Birçok araştırmacı tarafından teorik ve deneysel olarak yapılan çalışmalarda geleneksel ve yeni tasarlanmış auxetic yapılar incelenmiştir.

Negatif Poisson's oranı yapı geometrisi ve geometrik özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Bu bağlamda, Yolcu ve Baba (Yolcu ve Baba, 2022) tarafından yapılan teorik ve deneysel çalışmada; Poisson's oranının belirlenmesinde, hücresel yapıda olmaları ve ölçüm yönteminin standart olmaması durumlarını araştırılmıştır. Bu çalışma ile farklı ölçüm bölgeleri ve bu bölgeler üzerinden seçilen hedef noktalarının, yapıların Poisson's oranları üzerindeki etkisini sistematik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, incelenen auxetic yapının Poisson's oranı, bir görüntü analiz yazılım paket programı kullanılarak deneysel olarak araştırılmış ve deneysel sonuçlar, sayısal benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, negatif Poisson's oranının numune üzerinde seçilen ölçüm bölgesine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini gösterilmiştir.

Liu ve ark. (Liu ve ark., 2022) yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, 3 farklı 3 boyutlu auxetic yapının deformasyon mekanizmalarını araştırmışlardır. Küresel olarak deforme olmuş yapı, kısmen deforme olmuş yapı ve içsel deforme olmuş yapının incelendiği bu araştırma çalışmasında, içsel deforme yapısının yapısal gücünün, diğer yapılara göre 2-5 kat daha fazla olduğu, tüm sıkıştırma işlemi sırasında bir auxetic özelliği sergilediği ve ilk iki yapınınkinden daha büyük olan yapısal dayanıklılığa sahip olduğu sonuç olarak aktarılmıştır. Bu çalışmadaki auxetic yapılar kullanılarak hareket modülü ve algılama modülüne sahip sürünen bir robot tasarlanmıştır. Tıbbi tedavi ve diğer alanlarda potansiyel uygulama alanına sahip robotun

hareket modülü kısmen deforme yapısı kullanılarak tasarlanmış, algı modülü ise içsel deforme yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, ek olarak modüllerin birleşimi, ilerleme ve döndürme dâhil olmak üzere farklı işlevleri aktarılmıştır.

Galati ve ark. (Galati ve ark., 2022) metal eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmiş yeni bir 3 boyutlu bucklicrystal auxetic yapısının davranışlarını teorik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, delikli ince hiperbolik kabuklardan oluşan yeni bir auxetic yapı, bucklicrystal geometrisine dayalı olarak tasarlanmış ve bir metal eklemeli üretim süreci kullanılarak imal edilmiştir. Mekanik yapı özelliklerini karakterize etmek için sayısal sonlu eleman analizleri ve tek eksenli sıkıştırma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapının deformasyonu, geleneksel dijital görüntü korelasyon yöntemi ve yeni bir yaklaşım tabanlı X-ışını bilgisayarlı tomografi tarama analizi kullanılarak analiz edilmiştir. Önerilen yapının; malzeme ve tasarım parametrelerinin Poisson's oranı üzerindeki etkisi, yapının auxetic davranışını ayarlamak için tasarım değişkenlerini belirlemek üzere araştırılmıştır. Sonuçlar; tasarlanan yapının, en düşük değerde, yaklaşık -6 Poisson's oranı ile belirgin bir auxetic davranış sergilediğini göstermiştir.

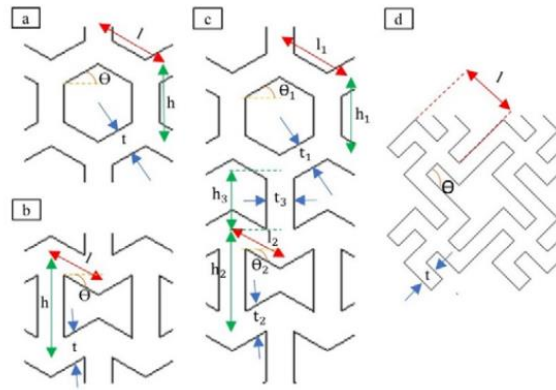
Yang ve ark. (Yang ve ark., 2022) balistik darbe etkilerini incelemek için yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, yeni tasarlanmış kompozit bir çift ok geometrisinde auxetic yapıyı incelemişlerdir. Çalışmada, farklı bağıl yoğunluklara sahip kompozit çift ok geometrilili auxetic yapının balistik sınır hızları, hasar alanı ve kopma mekanizması karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Bu çalışmada ek olarak, kompozit çift ok geometrilili auxetic yapının anti-penetrasyon performansları, deneysel sonuçlara dayalı olarak değerlendirilmiş ve tartışılmıştır.

Li ve ark. (Li ve ark., 2022) Auxetic yapıların uygulamalarını sınırlayan düşük sertlik karakterizasyonu hakkında çalışmışlardır. Bu çalışmada, Oluklu sac ve borulardan oluşan kompozit auxetic yapının mekanik özellikleri deneyler, sonlu elemanlar ve teori analizi ile incelenmiştir. Çalışma sonuçları, kompozit yapılarının geniş sıkıştırma gerinim aralığında belirgin negatif Poisson's oranı gösterdiğini ve kompozit yapılarının auxetic özelliklerinin sıkıştırma gerilimindeki artışla daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Diğer yandan, yapının rijitliği, küçük gerinim aşamasında oluklu levhaların kalınlığına bağlı iken, büyük gerinim aşamasında boruların malzeme parametreleri belirleyici rol oynamaktadır.

Zhang ve ark. (Zhang ve ark., 2022) yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, yeni tasarlanmış iki boyutlu auxetic yapının enerji sönümleme kapasitesini araştırmışlardır. Çalışma sonuçları, birim hücrelerin içindeki düzenlenmiş şekil ve üçgen tasarımın, enerji emme kapasitesini artırdığını göstermiştir. Oluşturulan bu yeni yapının, geometrik parametreler ayarlanarak farklı kullanım gereksinimlerine göre, en iyi enerji sönümleme ve hafiflik tasarımlarında kullanılabileceği aktarılmıştır.

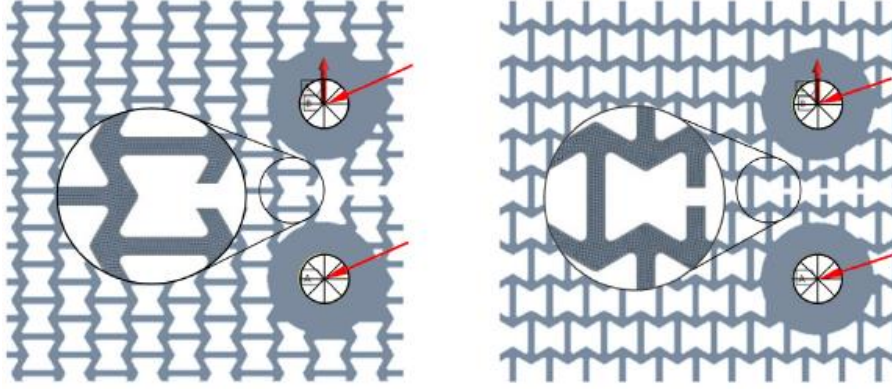
Changfang ve ark. (Changfang ve ark., 2022) yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, yüzey auxetic yapısını ele almışlardır. Bu çalışmada, çift ok birim hücre yapısında yüzeysel ve düzlemsel auxetic yapı olmak üzere iki farklı yapı tasarlanmıştır. Deneysel sonuçların simülasyonlar ile doğrulandığı bu çalışmada, incelenen yapıların sıkıştırma büzülmeleri davranışlarına bakıldığında en yüksek spesifik enerji emiliminin yüzeysel auxetic yapıda görüldüğü aktarılmıştır. Çalışmada ayrıca, bu tasarlanan yapıların, mekanik ve enerji sönümleme özelliklerinin farklı mühendislik uygulamalarında da kullanılabileceği aktarılmıştır.

Ergene ve Yalçın (Ergene ve Yalçın, 2022) yaptıkları deneysel çalışmada, PLA malzeme kullanarak eriyik yığma modelleme ile üretilen hafiflik ve yük absorpsiyonu gibi özellikleri ile negatif Poisson's oranı davranışa sahip Şekil 1'de gösterilen re-entrant, kiral ve hibrit yapının (re-entrant+bal peteği) ve geleneksel bal peteği yapısının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarına bakıldığında, hücresel yapıların yönleri ve giriş kalınlıklarının mekanik özelliklerini etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 1: Birim hücrelerin gösterimi, a) balpeteği, b) re-entrant, c) hibrit, d) kiral (Ergene ve Yalçın, 2022).

Neçemer ve ark. (Neçemer ve ark., 2022) yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, AA 7075-T651 alüminyum alaşım malzemeden yapılmış olan ve Şekil 2'de gösterilmiş farklı dizilimdeki re-entrant tipi auxetic yapıların yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Bu çalışmada, birim hücre diziliminin çatlak yolu ve yorulma ömrü üzerindeki etkisi detaylıca incelenmiştir. Deneysel ve hesaplama sonuçları; birim hücrenin diziliminin, yorulma ömrü üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

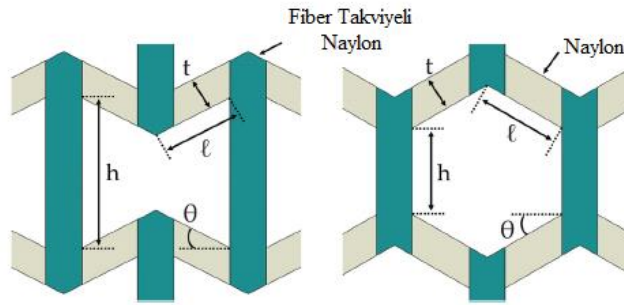


Şekil 2: Birim hücrelerdeki dizilimler ve çatlak yolları (Neçemer ve ark., 2022).

Winczewski ve Rybicki (Winczewski ve Rybicki, 2022) yaptıkları teorik çalışmada, beşgen motifli yeni tasarladıkları auxetic yapının mekanik davranışlarını incelemiştir. Bu incelenen yeni auxetic yapının, hem çekme hem de sıkıştırma rejimlerinde gözlemlenen negatif Poisson's oranının yanı sıra benzersiz mekanik özelliklere sahip olabileceği öne sürülmüştür.

Montemayor ve ark. (Montemayor ve ark., 2022) tarafından teorik ve deneysel olarak yapılan araştırma çalışmasında; bir kanat profiline entegre edilen Ti-24Zr-10Nb-2Sn alaşımı malzeme ile oluşturulmuş kiral ve re-entrant auxetic yapıların mekanik özellikleri değerlendirilmiştir.

Günaydın ve ark. (Günaydın ve ark., 2022) tarafından yapılan teorik ve deneysel çalışmada; Şekil 3'te gösterilen naylon ve fiber takviyeli naylon malzeme kullanılarak oluşturulan altıgen ve re-entrant auxetic yapıların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak, çoklu malzeme yaklaşımında re-entrant yapının enerji sönümleme, basınç dayanımı ve modül değerleri sırasıyla %60, %104 ve %201 oranında artmaktadır.



Şekil 3: Altıgen ve re-entrant auxetic yapılar (Günaydın ve ark., 2022).

Han ve ark. (Han ve ark., 2023) tarafından yapılan diğer bir teorik ve deneysel çalışmada ise, üç farklı auxetic tüp yapısının mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, yeni tasarlanmış auxetic tüp yapısının özgül enerji sönümleme kapasitesini artırdığını göstermektedir. Ayrıca, birim hücre parametrelerinin, mekanik özellikler üzerindeki etkisi de araştırılmıştır.

Zhang ve ark. (Zhang ve ark., 2023) tarafından auxetic kafes yapı üzerinde yapılan teorik ve deneysel çalışmada, yapının enerji sönümleme özelliği araştırılmıştır. Yapılan çalışma ile auxetic kafes yapının enerji sönümleme kapasitesinin geleneksel auxetic yapılardan 80 kat daha yüksek değerde olduğuna ve bu değer yaklaşık 2000 kJ/m³ değerinde olduğuna ulaşılmıştır. Dahası incelenen yapının; düşük su emme, yüksek kimyasal ve sıcaklık direncine sahip olması özellikleri ile zorlu koşullarda kullanılmasına olanak sağlayacağı aktarılmıştır.

Huo ve ark. (Huo ve ark., 2023) yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, köpük dolgu auxetic tüp yapılarının mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, dört farklı geometrik parametrenin incelendiği bu köpük dolgu auxetic yapıların, özgül enerji sönümleme davranışlarını iyileştirdiği aktarılmıştır.

Vyavahare ve ark. (Vyavahare ve ark., 2023) tarafından yapılan deneysel çalışmada, erimiş biriktirme modellemesi ile ABS ve PLA malzeme kullanılarak üretilen re-entrant auxetic yapının hücre tasarım faktörleri olan açı, genişlik ve kol uzunluğunun mukavemet, rijitlik ve özgül enerji sönümleme gibi mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, ABS yapılarının her üç tasarım faktöründeki artışla eğilme dayanımının arttığı; PLA yapılarda ise açının artması, kol genişliğinin ve uzunluğunun azalmasıyla iyileştiği aktarılmıştır.

Guo ve ark. (Guo ve ark., 2023) tarafından yapılan teorik ve deneysel araştırma çalışmasında; özel mikro yapıların, yeni tasarlanmış anti-kiral auxetic yapının mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, artan gerilim ile azalan auxetic etkinin her ikisi de daha düşük yarı eksen uzunluk oranından kaynaklandığını göstermektedir.

Jiang ve ark. (Jiang ve ark., 2023) tarafından auxetic yapıların üretimi ve maliyeti hakkında teorik ve deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada incelenen yapı, yenilikçi bir montaj stratejisi kullanılarak bir auxetic yapı ile iki bağımsız yapının yapışkanlar aracılığıyla birbirlerine montajlanması ile oluşturularak teorik ve deneysel olarak değerlendirilmiştir. Önerilen auxetic yapının, çok aşamalı yoğunlaştırma, ayarlanabilir rijitlik ve dayanıklılık açısından sadece mekanik performans açısından elverişli olmakla kalmayıp, aynı zamanda düşük maliyetli ve büyük ölçekli imalat da umut verici olduğu aktarılmıştır.

Etemadi ve ark. (Etemadi ve ark., 2023), Şekil 4'te verilen auxetic yapıların çekme ve basma altındaki mekanik özelliklerini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonuçları, her iki auxetic yapının da benzer mekanik özellikler sergilediklerini göstermiştir.

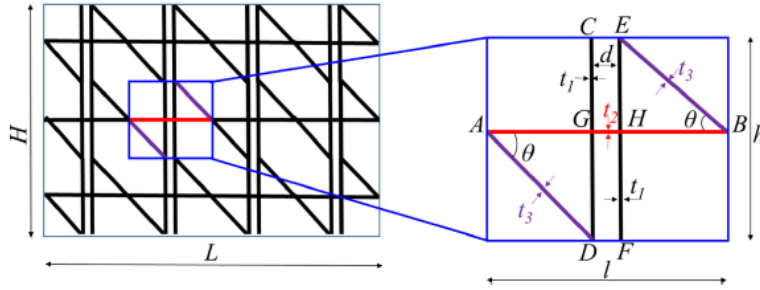


Şekil 4: Çalışmada incelenen Auxetic yapılar (Etemadi ve ark., 2023).

Sabari ve ark. (Sabari ve ark., 2023) metalik auxetic yapıların çekme ve basma testlerindeki plastik deformasyon davranışları üzerine yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, AA2017, AA5083, AA6082 ve AA7075 alüminyum alaşımlarından yapılan re-entrant auxetic yapıları kullanmışlardır. Çalışma sonuçları; çekme testinde, yapının kırılmanın başlangıcındaki pekleşme davranışının kuvvet ve hasar modu üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu, ancak Poisson's oranı üzerinde etken olmadığını göstermiştir. Basma testinde ise, temel malzemelerin sertleşme davranışının, burkulma oluşumunun, yapının enerji emme kabiliyetinin ve yükleme sırasında Poisson's oranı gelişimini belirleyerek yapıların auxetic'liği üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Pour ve ark. (Pour ve ark., 2023) yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, tek eksenli yarı statik sıkıştırma yüklemesi altında nanopartikülle güçlendirilmiş köpüklerle doldurulmuş re-entrant auxetic yapının mekanik davranışını araştırmışlardır. Çalışma sonuçları; re-entrant auxetic yapıya karbon nanotüplerin eklenmesinin, tepe noktasından sonra kuvvetin keskin bir şekilde azalmasını önlediğini, ağırlıkça %2 oranında karbon nanotüplerin kullanımının ise maksimum kırılma kuvvetini %75'e kadar artırdığını ve, nanotüp eklenmesinin enerji emilimini %130'a kadar artırdığını göstermiştir.

Bohara ve ark. (Bohara ve ark., 2023) tarafından yapılan teorik ve deneysel çalışmada, Şekil 5'te tasarımı ve birim geometrik sınırları verilmiş, koruma performansını iyileştirmek için çok amaçlı bir optimizasyon modeli aracılığıyla yeni bir auxetic yapı oluşturulmuş ve incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları; elde edilen optimum tasarımın; hem yarı statik hem de patlatma yüklemeleri altında temel yapıdan daha iyi performans sergilediğini göstermiştir.



Şekil 5: Çalışmada incelenen Auxetic yapı (Bohara ve ark., 2023).

Singh ve ark. (Singh ve ark., 2023), kobalt krom malzeme ile seçici lazer eritme eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen re-entrant auxetic yapının geometrik parametrelerinin, Poisson's oranı üzerine etkisini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Auxetic yapının mekanik özelliklerinin ve Poisson's oranının, sıkıştırma testi ve dijital görüntü korelasyonu ile tespit edildiği bu çalışmada, incelenen auxetic yapının literatürdeki diğer yapılardan üstün mekanik özelliklere ulaştığı aktarılmıştır.

Lvov ve ark. (Lvov ve ark., 223) tarafından yapılan teorik ve deneysel çalışmada, biyomedikal cihaz modellemede kullanmak amacıyla Ti-6Al-4V malzeme ile seçici lazer eritme eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen re-entrant auxetic ve bal peteği yapılarının mekanik özellikleri incelenmiştir. Statik sıkıştırma testinin yapıldığı bu çalışmada; hücre kenarları arasındaki eğim açısı 90°'den az olan auxetic yapının, eğim açısı 90°'den büyük olan bal petek yapısına göre daha yüksek statik basınç dayanımı ve yorulma direnci gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada ayrıca, eğim açısının değişiminin mekanik özellikleri nasıl etkilediği de araştırılmıştır.

Yang ve ark. (Yang ve ark., 2023) tarafından yapılan teorik ve deneysel bir çalışmada, origami sanatından ilham alınarak oluşturulmuş 2B çift ok auxetic yapısı ile 3B çift ok auxetic yapısının yarı-statik ve dinamik sıkıştırma özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, 3B çift ok auxetic yapısının, 2B auxetic yapısına göre daha büyük enine sıkışma deformasyonu gösterdiğini ve izotropik ezilme direnci sağladığını göstermiştir. Buna ek olarak, 3B çift ok auxetic yapısının maksimum girinti derinliği, 2B çift ok auxetic yapıya göre en fazla %40'a kadar daha az olabileceği, bu durumun da onun üstün darbe direnci performansını ve darbeye dayanıklı uygulamalar için büyük potansiyelli kullanım olabileceğini göstermiştir.

Park ve ark. (Park ve ark., 2023), statik ve kinematik olarak mimari amaçla kullanmak üzere yeni tasarlanmış auxetic paslanmaz çelik çerçeve ve homojen poliüretan köpük katmanı içeren dışbükey deforme olabilen panel yapısının mekanik özelliklerini teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmada oluşturulan panel, çekme ve burkulma yükleri altında incelenmiş olup auxetic davranış sergilemiştir. Ek olarak, çeşitli geometrik parametrelerin ve malzeme özelliklerinin auxetic davranış üzerindeki etkileri, Taguchi yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Sarafraz ve ark. (Sarafraz ve ark., 2023) tarafından yapılan teorik çalışmada, auxetic bal peteği ve polimer ve fiber yüzey levhaları olan dikdörtgen sandviç panel yapılarının serbest titreşim ve burkulma davranışları incelenmiştir. Çalışma sonuçları, auxetic bal peteği yapısının kalınlığının artmasının burkulma yüklerini azalttığını göstermiştir. Ayrıca, auxetic bal peteği yapısının eğim açısının burkulma yükleri üzerinde etkisinin olmadığı aktarılmıştır.

Wang ve ark. (Wang ve ark., 2023) tarafından yapılan teorik ve deneysel çalışmada, auxetic bal peteği yapısının düşük hızda darbe yüklemesi altındaki enerji sönümleme özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonuçları irdelendiğinde; düşük hız darbe yüklemesi altında, auxetic bal peteği yapısı, auxetic olmayan bal peteği yapısına göre daha iyi enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca, hem içbükey açılı gradyan tasarımı hem de kalınlık gradyan tasarımı, auxetic bal peteği yapılarının enerji sönümleme performansını daha da artırabilir olduğu belirtilmiştir.

Li ve ark. (Li ve ark., 2023), yeni tasarlanmış ve seçici lazer eritme eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş re-entrant anti-kiral auxetic yapının düzlemsel sıkıştırma altında mekanik özelliklerini inceledikleri teorik ve deneysel çalışmada, ezilme ve deformasyon mekanizmasını sayısal olarak oluşturulan model ile doğrulamıştır. Çalışma sonuçlarına bakıldığında; düzlemsel sıkıştırma altında içbükey ve dönme deformasyonu sergilediği ve ortalama sıkıştırma gerilimi aynı kalınlıkta ve aynı kütlede nispeten yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada ek olarak, re-entrant anti-kiral auxetic yapının geometrik özelliklerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde ortaya koymak için parametrik analiz de yapılmıştır. Düğüm merkez mesafesinin, düğüm çapının ve duvar kalınlığının mekanik özellikler ve deformasyon modu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Diğer parametrelerle karşılaştırıldığında, duvar kalınlığının mekanik özellikler üzerinde nispeten fazla etkiye sahip olduğu ve duvar kalınlığı 0,4 mm'den 0,8 mm'ye çıktığında Young's modülü, akma dayanımı ve ortalama sıkıştırma gerilimi sırasıyla %447,27, %530,62 ve %370,87 arttığı aktarılmıştır.

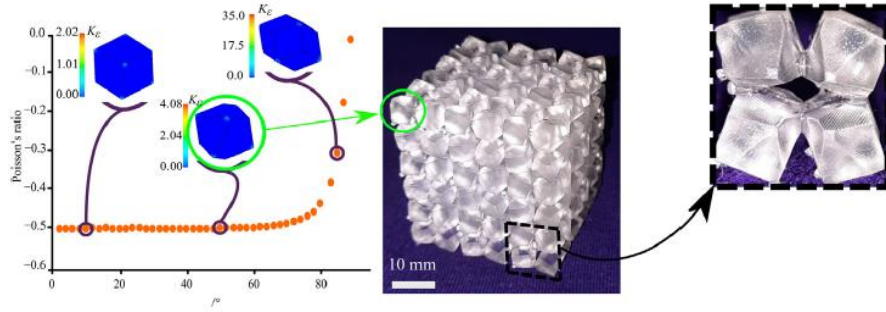
Błachut (Błachut, 2023) tarafından yapılan teorik çalışmada; negatif Poisson's oranı özelliğine sahip re-entrant yapının, mevcut dıştan basınçlı kap kapaklarının burkulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu sayısal çalışmanın sonuçları incelendiğinde, önerilen auxetic yapının basınç arızalarında auxetic olamayan yapıya göre %89'luk kazanç sağladığı görülmektedir. Auxetic katmanla desteklenen metalik kaplama yapısının diğer konfigürasyondan daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir.

Bohara ve ark. (Bohara ve ark., 2023) tarafından yapılan teorik ve deneysel bir diğer çalışmada ise, yeni tasarlanmış ve eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş auxetic yapının ezilme davranışları ve koruma performansı incelenmiştir. Auxetic yapı, yarı statik sıkıştırma yüküne maruz bırakılmış ve sayısal bu model

deneysel sonuçlarla kalibre edilmiştir. Yeni tasarlanan bu auxetic yapının, yük-deformasyon ilişkisi, Poisson's oranı, kırılma mekanizması ve enerji soğurma kapasitesi gibi üstün özellikleri araştırılmıştır.

Liu ve ark. (Liu ve ark., 2023), auxetic re-entrant femoral gövdelerinin kalça artroplastisinde stres azaltma kapasitesi üzerine teorik olarak çalışmışlardır. Çalışma sonuçları, gövde tasarımına bir auxetic yapının dâhil edilmesinin daha az strese neden olduğunu göstermiştir.

Galea ve ark. (Galea ve ark., 2023) tarafından teorik ve deneysel olarak yapılan çalışmada; Şekil 6'da gösterilen, yeni 3B döner birim auxetic yapı üretim metodu önerilmiş ve bu önerilen metod incelenmiştir. Bu çalışmada, sabit kesit alanına sahip sürekli boşluklar getirilerek 3B yardımcı metamatallerin üretilebileceği yeni bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Önerilen yapının birbirine bağlı çokgenler olarak tanımlanabildiği ve negatif Poisson's oranı sergilediği bulunmuştur.



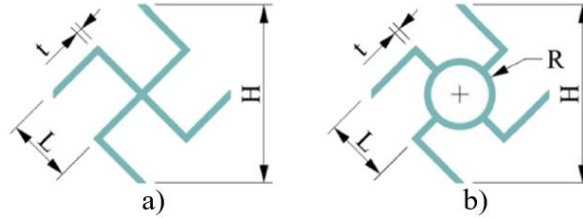
Şekil 6: 3B döner birim auxetic yapı ve Poisson's oranı değişimi (Galea ve ark.,2023).

Gupta ve Chanda (Gupta ve Chanda, 2023) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, I-şekline sahip auxetic yapılarının deri grefti alanındaki kullanımı incelenmiştir. Bu çalışmada, deri greftleri için önerilen I-şekilli auxetic yapının, -1,12 ile yüksek negatif Poisson's oranı ve 3,84 ile yüksek ağ oluşturma oranı sağladığı tespit edilmiştir. Bu önerilen deri greftinin ciddi yanık yaralanmalarında kullanılabileceği de ifade edilmiştir.

Jiang ve ark. (Jiang ve ark., 2023) tarafından yapılan teorik ve deneysel çalışmada, fıtıklaşmış lomber diskin potansiyel tedavisi için 3 boyut baskılı auxetic yapıli intervertebral disk implantı incelenmiştir. Bu çalışmada, "Bucklicrystal" yapıya sahip yeni bir yapay intervertebral disk implantı tasarlanmış ve termoplastik poliüretan malzemeden 3 boyut baskı ile üretilmiştir. Çeşitli koşullar altında implantın deformasyonu ve yük dağılım davranışı yükleme koşulları (eğilme, burulma, uzama ve bükülme) kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Doğal intervertebral disk ve 3 boyutlu implant karşılaştırıldığında, yeni implantın, pratik yükleme koşulları altında daha etkili stres transferi sağladığı görülmüştür. Çalışmada ek olarak, implantın kompresyon altında yanıl olarak büzülme yeteneği, potansiyel olarak semptomları hafifletmek için kullanılabılır olduğu da aktarılmıştır.

Liu ve ark. (Liu ve ark., 2023) yaptıkları teorik ve deneysel çalışmada, köpük dolgulu çift oklu auxetic yapının balistik darbeye karşı davranışlarını incelemişlerdir. Balistik darbe testlerinin yapıldığı bu çalışmada, kullanılan merminin gelen kinetik enerjisinin artması ile köpük dolgulu auxetic yapının özgül enerji Emilimi önce artmış, sonra azalmış ardından da sabit kaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada, köpük dolgusuz auxetic yapı ile köpük dolgulu auxetic yapı karşılaştırıldığında, balistik limit hız köpük dolgulu auxetic yapıda %6,12 oranında arttığı tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, göreceli yoğunluk artışı, köpük dolgulu auxetic yapıya nüfuz etme durumunu iyileştirmede olumlu bir etkiye sahip olduğu aktarılmıştır.

Pan ve ark. (Pan ve ark., 2023), Şekil 7'de verilen dairesel düğümler içeren yeni ve geleneksel auxetic kiral yapıların mekanik davranışlarını yarı statik tek eksen altında teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlara bakıldığında; yeni auxetic yapının, diğer geleneksel yapıya göre enerji Emilimini %34,1 oranında, özgül enerji Emilimini ise %13,3 oranında iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 7: Geleneksel (a) ve yeni tasarlanmış (b) Auxetic kiral yapı (Pan ve ark., 2023).

Varas ve ark. (Varas ve ark., 2023) tarafından yapılan deneysel çalışmada, eklemeli imalat teknolojisi ile polimer malzeme kullanılarak üretilmiş re-entrant auxetic yapısının farklı yüklemeler altındaki mekanik davranışları incelenmiştir. Çalışmada, numunelerde kullanılan birim hücrelerin sayısının ve boyutunun/ölçeğinin etkisi, hem statik hem de dinamik yükler ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, gerilme ve gerinim açısından yapı ve silindirik elemanların boyutlarının yanı sıra arasındaki temas, rijitlik yapısının gerektiği gibi değiştirilmesine yardımcı olduğunu göstermiştir.

Zhao ve ark. (Zhao ve ark., 2023) yaptıkları teorik ve deneysel bir çalışmada, alüminyum köpük ile doldurulmuş karbon fiber takviyeli auxetic yapıların enerji Emilimi ve spesifik enerji Emilimi kabiliyetlerini incelemiştir. Çalışmada, alüminyum köpük ile doldurulmuş karbon fiber takviyeli auxetic yapının iyi mekanik özellik sergilediği görülmüştür.

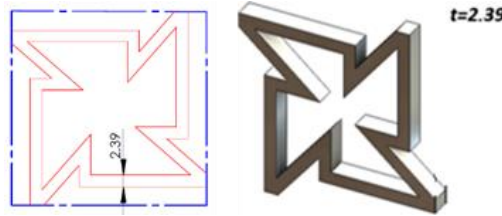
Zhou ve ark. (Zhou ve ark., 2023) tarafından teorik ve deneysel olarak yapılan araştırma çalışması, eklemeli olarak naylon ve onyx gibi iki farklı malzemeden üretilen altıgen, re-entrant ve çift ok auxetic yapıların farklı yarı statik yükleme koşullarında karşılaştırılmasını konu almaktadır. Deneysel sonuçların sonlu elemanlar analizi ile doğrulandığı bu çalışmada, çift ok auxetic yapısının diğer yapılara göre enerji Emilimi

davranışında üstün özellik gösterdiği aktarılmıştır. Ayrıca, Onyx ile üretilen çift ok auxetic yapısı özgül enerji miktarı, altıgen ve re-entrant yapılara kıyasla %125 ve %244 daha fazla olduğu ifade edilmiştir.

Zhao ve ark. (Zhou ve ark., 2023) tarafından yapılan bir diğer teorik çalışmada, karbon fiber takviyeli auxetic yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar; karbon takviyeli auxetic yapının, köşeye yakın yerlerde çatlama, delaminasyon ve kayma kırılmasını içerdiğini ve bununla birlikte kapalı yapıda dislokasyon deformasyonunun meydana geleceğini göstermiştir.

Song ve ark. (Song ve ark., 2023) negatif Poisson's oranlı çekirdeğe sahip çift ok yapısı içeren yeni bir çarpışma önleyici sistemin yapı tasarımı ve mekanik özelliklerini teorik ve deneysel olarak çalışmışlardır. Bu çalışmada, darbe yükü durumları için enerji emilimini arttırmak amacıyla negatif Poisson's oranına sahip yeni çift ok yapıları önerilmiş ve mekanik özelliklerine karşılık gelen tahmin formülleri çıkarılmıştır. Auxetic çarpışma önleyici sistemin, geleneksel çarpışma önleyici sistemlerine göre daha fazla enerji emme kabiliyetleri olduğu aktarılmıştır.

Erdoğan ve Toktaş (Erdoğan ve Toktaş, 2023) yaptıkları teorik çalışmada, Şekil 8'de geometrik motifi verilen literatürde olmayan yeni bir auxetic özellik gösteren birim hücreyi tasarlamış ve incelemişlerdir.



Şekil 8: Erdoğan ve Toktaş tarafından incelenen birim hücre ve analiz numunesi (Erdoğan ve Toktaş, 2023).

Bu çalışmada; yeni tasarlanan auxetic birim hücrenin, kafes kalınlığı (t) ve matris diziliminin Poisson's oranı üzerine etkisi incelenmiştir. Çalışmadaki incelenen tüm yapıların negatif Poisson's oranına sahip olduğu ve kafes kalınlığı artırıldıkça Poisson's oranının düştüğü, 4x2 kafes yapısının 4x4 kafes yapısından daha auxetic özellik gösterdiği aktarılmıştır. Bunlar ile birlikte, 4,9 mm kafes kalınlığı ile 4x2 matris yapısının -0,55 değeriyle en düşük negatif Poisson's oranına sahip olduğu aktarılmıştır. Ayrıca, 4x4 ve 4x2 kafes matrisin en düşük kafes kalınlığında maksimum deformasyon ve gerilmeye ulaştığı gözlemlenmiştir.

Roychoudhury ve ark. (Roychoudhury ve ark., 2023) tarafından yapılan teorik çalışmada, merkezi bir destek yapısı bulunan sinüzoidal re-entrant auxetic yapının mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada, auxetic yapının özelliğini artırmak için tek eksenli bir sıkıştırma kuvvetine yanıt olarak önerilen merkezi destek yapısının yüksek derecede auxetic etkinin elde edilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, değiştirilmiş auxetic yapının daha yüksek elastik modülü ve yük taşıma kapasitesi değerleri elde edildiği aktarılmıştır.

Abbaslou ve ark. (Abbaslou ve ark., 2023) tarafından yapılan çalışmada, geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip yeni bir re-entrant meta-trikiral auxetic vasküler stent yapısının mekanik özellikleri incelenmiştir. Önerilen ve incelenen auxetic yapının düzlem içi gerilme davranışı, sonlu elemanlar analizi yoluyla araştırılmış ve teorik sonuçlarını doğrulamak için deneysel testler yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan numunelerin üretimi eklemeli imalat teknolojisi ile yapılmıştır. Gerilim-gerinim eğrisi ve Poisson's oranı dâhil olmak üzere çeşitli geometrik parametrelerin tasarlanan auxetic yapısının düzlem içi davranışı üzerindeki etkisi sonucunda negatif Poisson's oranının -4,91 olarak bulmuşlardır. Sonrasında vasküler stent yapısına çevrilen bu auxetic birim yapısı yerleştirme işlemi sırasında stentin davranışını ve vasküler stent, arter ve plak arasındaki etkileşimi değerlendirmek için de teorik çalışma yapılmış vasküler stentin kısılması ve geri tepmesi gibi durumları da değerlendirilmiştir. Ayrıca vasküler stentin bükülme esnekliği teorik ve üç noktalı bükülme testlerine göre araştırılmıştır.

İNCELENEN LİTERATÜRÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

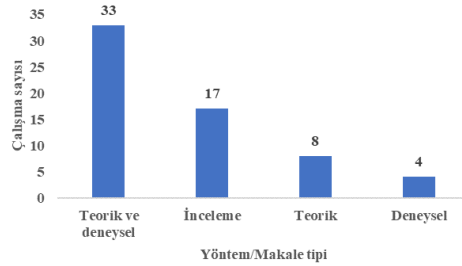
Bu derleme yer alan tüm çalışmaların tek bir tabloda özet halinde sunulmasının, çalışmaların karşılaştırılmasında kolaylık sağlayacağı düşünüldüğü için Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2: 2019 ve 2023 yılları arasında auxetic yapılarla ilgili önceki çalışmaların bir özeti.

Yazar(lar)	Yayın Yılı	Yöntem/Makale tipi	Auxetic Geometri(ler)
Wu ve ark.	2019	İnceleme	—
Zhang ve ark.	2020	İnceleme	—
Dogan ve ark.	2020	İnceleme	—
Cardoso ve ark.	2021	İnceleme	—
Wu ve ark.	2021	İnceleme	—
Luo ve ark.	2021	İnceleme	—
Ji ve ark.	2021	İnceleme	—
Lu ve ark.	2022	İnceleme	—
Xue ve ark.	2022	İnceleme	—
Jiang ve ark.	2022	İnceleme	—
Shukla ve ark.	2022	İnceleme	—
Balan ve ark.	2023	İnceleme	—
Vyavahare ve ark.	2023	İnceleme	—
Zhou ve ark.	2023	İnceleme	—
Shirzad ve ark.	2023	İnceleme	—
Huang ve ark.	2023	İnceleme	—
Montgomery-Liljeroth ve ark.	2023	İnceleme	—
Yolcu ve Baba	2022	Teorik ve deneysel	Re-entrant
Liu ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Re-entrant
Galati ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Kiral
Yang ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Çift ok
Li ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Re-entrant
Zhang ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Re-entrant
Changfang ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Çift ok
Ergene ve Yağın	2022	Deneysel	Re-entrant, kiral
Neçemer ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Re-entrant
Winczewski ve Rybicki	2022	Teorik	Re-entrant
Montemayor ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Re-entrant, kiral
Günaydın ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Re-entrant
Han ve ark.	2022	Teorik ve deneysel	Re-entrant
Zhang ve ark.	2023	Teorik ve deneysel	Re-entrant
Huo ve ark.	2023	Teorik ve deneysel	Döner birim

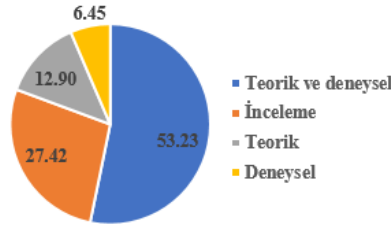
Vyavahare ve ark.	2023	Deneyisel	Re-entrant
Guo ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Anti-kiral
Jiang ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Etemadi ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Sabari ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Pour ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Bohara ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Singh ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Lvov ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Yang ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Çift ok
Park ve ark.	2023	Teorik	Re-entrant
Sarafraz ve ark.	2023	Teorik	Re-entrant
Wang ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Li ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant anti-kiral
Blachut ve ark.	2023	Teorik	Re-entrant
Bohara ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Liu ve ark.	2023	Teorik	Re-entrant
Galea ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Döner birim
Gupta ve Chanda	2023	Deneyisel	I Şekilli
Jiang ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Liu ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Çift ok
Pan ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Kiral
Varas ve ark.	2023	Deneyisel	Re-entrant
Zhao ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant
Zhou ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Re-entrant ve çift ok
Zhao ve ark.	2023	Teorik	Re-entrant
Song ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Çift ok
Erdoğan ve Toktaş	2023	Teorik	Re-entrant
Roychoudhury ve ark.	2023	Teorik	Re-entrant
Abbaslou ve ark.	2023	Teorik ve deneyisel	Hibrit Re-entrant ve kiral

Çalışma türüne ilişkin çalışmaların sayı ve yüzde dağılımları sırasıyla Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 9'dan da görüleceği üzere, hem teorik hem de deneyisel çalışmalar literatürde bolca bulunmaktadır.



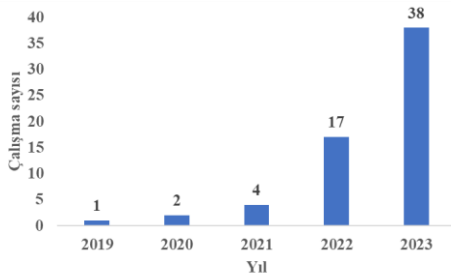
Şekil 9: Çalışma türüne göre incelenen önceki çalışmaların sayısı.

Auxetic yapıları inceleyen bu derleme çalışması kapsamında, 17 inceleme çalışması, 33 hem teorik hem de deneyisel çalışma, 8 adet teorik çalışma ve 4 deneyisel çalışma olmak üzere toplam 62 çalışma incelenmiştir. Şekil 10'dan da görüleceği gibi, incelenen kaynaklar arasında %53,23 oranında teorik ve deneyisel çalışmalar, %27,42 oranında inceleme çalışmalar, %12,90 oranında teorik araştırma çalışmalar, %6,45 oranında deneyisel araştırma çalışmalar yer almaktadır.

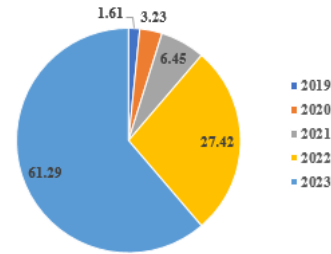


Şekil 10: Çalışma türüne göre incelenen önceki çalışmaların yüzde dağılımları.

Genel olarak auxetic yapılar ile ilgili çalışmaların artarak devam ettiği söylenebilir. Bu inceleme çalışmasında incelenen çalışmaların yayın yıllarına göre sayıları ve yüzde dağılımları Şekil 11’de ve Şekil 12’de sırasıyla gösterilmiştir. Şekil 11’den de görüleceği üzere bu alandaki çalışmalar artarak devam etmektedir. Şekil 12’den de görüleceği üzere bu derleme çalışmasında incelenen referans çalışmaları son 5 yıl içerisinde yayımlanmış çalışmaları içermektedir. Bu incelenen çalışmalardan, %61,29’u son 1 yılda yayınlanmış çalışmalardan oluşmaktadır.

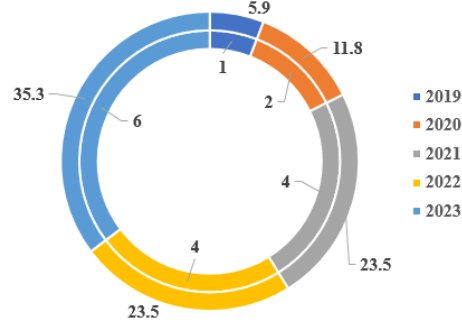


Şekil 11: Önceki çalışmaların yayın yıllarına göre sayısı.



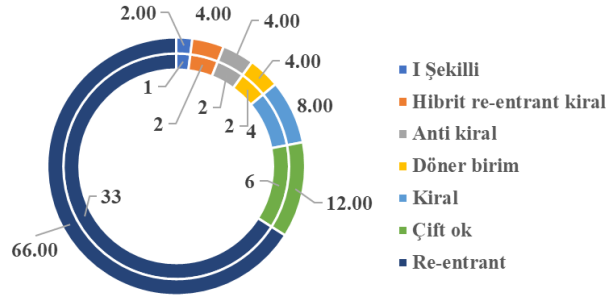
Şekil 12: Önceki çalışmaların yayın yıllarına göre yüzde dağılımları.

Öte yandan, Şekil 13’te önceki derleme çalışmalarının sayıları ve yıllara göre yüzde dağılımları gösterilmiştir. Şekil 13’te görüldüğü gibi, 17 derleme çalışması incelenmiştir. Bu inceleme çalışmasında 2019’dan 1 çalışma, 2020’den 2 çalışma ve 2021 ve sonrasında 14 derleme çalışması yer almaktadır. Dolayısıyla incelenen derleme çalışmalarının %82,3’ü son 3 yılda yayınlanmış çalışmaları içermektedir. Dolayısıyla bu inceleme çalışması, özellikle son üç yıldaki güncel derleme çalışmalarını içermektedir. Bu derleme çalışması önceki inceleme çalışmaları ile karşılaştırıldığında, içerik açısından üstün özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, toplam 62 kaynak taranmış ve literatürde yer almayan grafiklerle çalışma zenginleştirilmiştir.



Şekil 13: Önceki inceleme çalışmalarının yıllara göre sayıları ve yüzde dağılımları.

İncelenen çalışmalarda, farklı tipte birçok auxetic birim geometrisi ele alınmıştır. Şekil 14'te incelenen çalışmalarda konu edinilen geometri çeşitleri ve yüzdesel dağılımları verilmiştir. Şekil 14'ten de görüldüğü gibi, 33 adet çalışma re-entrant birim geometrisini ele almıştır. Çift ok, kiral, döner birim, anti-kiral ve I şekil birim geometrileri çalışmalarda incelenen diğer auxetic geometrileridir.



Şekil 14: Önceki çalışmalarda konu alınan auxetic yapı birim geometri sayıları ve yüzde dağılımları.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Malzeme ve yapıların önemli mekanik özelliklerinden biri olan Poisson's oranı, bilinen hemen hemen tüm malzeme ve yapılar için pozitiftir. Negatif Poisson's oranı gösteren malzeme ve yapıya auxetic denir. Auxetic yapılar, yeni bir yapı tasarlamak özellikle yapısal ve işlevsel bir göreve sahip sistem oluşturmak için önemlidir. Birçok araştırmacı bu konuda deneysel ve teorik çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada, auxetic yapılar hakkında literatürde yapılan çalışmaların derlemesi bulunmaktadır. Buna göre auxetic yapılar ile ilgili incelenen çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

- Bu derleme çalışması, daha önce yapılmış derleme çalışmaları ile karşılaştırıldığında içerik açısından üstün özelliklere sahip olduğu söylenebilir. Bu çalışma için toplam 62 kaynak taranmış ve literatürde yer almayan grafiklerle çalışma zenginleştirilmiştir.
- İncelenen çalışmaların yaklaşık %95,16'sı son 3 yıl içinde yayınlanmıştır. Bu bağlamda bu çalışmanın zengin içerikli, güncel ve kapsamlı bir derleme çalışması olduğu söylenebilir.

- Literatürde auxetic yapılar hakkında çoğunlukla %53,23 ile hem teorik hem de deneysel çalışma bulunmaktadır.

Öte yandan, auxetic yapılar ile ilgili incelenen çalışmalarda incelenen mekanik özellikler ve etkileri şu şekilde özetlenebilir:

- İncelenen çalışmalarda en çok rastlanan auxetic birim geometrisi re-entrant olarak gözlemlenmiştir.
- Teorik ve deneysel çalışmanın birlikte yapıldığı çalışmalarda, deneysel sonuçlar ile teorik çözümlemeler karşılaştırılmıştır.
- Çalışmalarda kullanılan deney numunelerinin çeşitli malzemelerden oluştuğu görülmektedir. ABS, PLA, Onyx gibi plastikler ile alüminyum alaşımlardan, titanyum alaşımlarına kadar farklı metalik malzemeler kullanılarak üretilen deney numuneleri ile çalışmalar yapılmıştır.
- Çalışmalarda kullanılan deney numunelerinin su jeti gibi geleneksel imalat yöntemleri ile üretimlere ek olarak 3B baskı ve seçici lazer eritme gibi eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretildiği görülmektedir.
- Çalışmalarda yeni tasarlanmış veya literatürde olan auxetic yapıların statik ve dinamik yük altında mekanik davranışları incelenmiştir.
- Çalışmalarda auxetic yapıların mekanik özellikleri ile geleneksel yapıların mekanik özellikleri; eş eğrilik davranışı ve değişken geçirgenlik, enerji emilimi, darbe direnci, kayma direnci, girinti direnci ve kırılma direnci özellikleri bakımından karşılaştırılmıştır.
- Bütün bunlara ek olarak auxetic yapıların kullanım alanları çalışmalarda incelenen yapıya göre aktarılmıştır. Özellikle savunma ve havacılık sanayisinde olmak üzere, sağlık sektöründe de çalışmalar artarak devam etmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

İ.E.: Kavramsallaştırma, yöntem, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama, yöntem, doğrulama, kaynaklar, gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- Abbaslou, M., Hashemi, R., Etemadi, E. (2023). Novel hybrid 3D-printed auxetic vascular stent based on re-entrant and meta-trichiral unit cells: Finite element simulation with experimental verifications. *Materials Today Communications*, 35, 105742.
- Blachut, J. (2023). Buckling behaviour of auxetic domes under external pressure. *Thin-Walled Structures*, 182(B), 110262.
- Bohara, R.P., Linforth, S., Thai, H.T., Nguyen, T., Ghazlan, A., Ngo, T. (2023). Multi-objective bulk scale optimisation of an auxetic structure to enhance protection performance. *Engineering Structures*, 280, 115729.
- Bohara, R.P., Linforth, S., Thai, H.T., Nguyen, T., Ghazlan, A., Ngo, T. (2023). Experimental, numerical, and theoretical crushing behaviour of an innovative auxetic structure fabricated through 3D printing. *Thin-Walled Structures*, 182(A), 110209.
- Cardoso, J.O., P. Borges, J.P., Velhinho, A. (2021). Structural metamaterials with negative mechanical/thermomechanical indices: A review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 31(6): 801-808.
- Changfang, Z., Changlin, Z., Jianlin, Z., Hongwei, Z., Kebin, Z., Yangzuo, L. (2022). Compressive mechanical behavior for surface auxetic structures. *Journal of Alloys and Compounds*, 894, 162427.
- Dogan, E., Bhushal, A., Cecen, B., Miri, A.K. (2020). 3D Printing metamaterials towards tissue engineering. *Applied Materials Today*, 20, 100752.
- Erdoğan, İ., Toktaş, İ. (2023). Investigation of the effect of geometry inner thickness on new designed auxetic structure, *Politeknik Dergisi*, 901-912.
- Ergene, B., Yalçın, B. (2022). Eriyik yığma modelleme (EYM) ile üretilen çeşitli hücresel yapıların mekanik performanslarının incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1): 201-218.
- Etemadi, E., Gholikord, M., Zeeshan, M., Hu, H. (2023). Improved mechanical characteristics of new auxetic structures based on stretch-dominated-mechanism deformation under compressive and tensile loadings. *Thin-Walled Structures*, 184, 110491.
- Galati, M., Calignano, F., Minosi, F. (2022). Numerical and experimental investigations of a novel 3D bucklicrystal auxetic structure produced by metal additive manufacturing. *Thin-Walled Structures*, 180, 109850.
- Galea, R., Farrugia, P.S., Dudek, K.K., Attard, D., Grima, J.N., Gatt, R. (2023). A novel design method to produce 3D auxetic metamaterials with continuous pores exemplified through 3D rotating auxetic systems. *Materials & Design*, 226, 111596.
- Günaydın, K., Rea, C., Kazancı, Z. (2022). Energy absorption enhancement of additively manufactured hexagonal and re-entrant (auxetic) lattice structures by using multi-material reinforcements. *Additive Manufacturing*, 59(A), 103076.
- Guo, Z., Li, Z., Li, X., Mo, Z., Li, J. (2023). Theoretical, numerical, and experimental study on quasi-static compressive behaviors of elliptical anti-chiral auxetic structure. *Materials Today Communications*, 34, 105059.
- Gupta, V., Chanda, A. (2023). Expansion potential of novel skin grafts simulants with I-shaped auxetic incisions. *Biomedical Engineering Advances*, 5, 100071.
- Han, D., Zhang, Y., Zhang, X.Y., Xie, Y.M., Ren, X. (2023). Lightweight auxetic tubular metamaterials: Design and mechanical characteristics. *Composite Structures*, 116849.
- Huang, J., Zhang, J., Xu, D., Zhang, S., Tong, H., Xu, N. (2023). From jammed solids to mechanical metamaterials : A brief review. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 27(1), 101053.
- Huo, R.Y., Han, D., Zhang, Y., Jiang, W., Fan, L.Y., Peng, X.W., Shi, G.C.J., Chu, M.H., Zhang, X.Y., Xie, Y.M., Ren, X. (2023). Mechanical properties of auxetic circular and square tubes filled with aluminum foam. *Engineering Structures*, 281, 115732.
- Ji, J.C., Luo, Q., Ye, K. (2021). Vibration control based metamaterials and origami structures: A state-of-the-art review.

- Mechanical Systems and Signal Processing, 161, 107945.
- Jiang, W., Ren, X., Wang, S.L., Zhang, X.G., Zhang, X.Y., Luo, C., Xie, Y.M., Scarpa, F., Alderson, A., Evans, K.E. (2022). Manufacturing, characteristics and applications of auxetic foams: A state-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering*, 235, 109733.
- Jiang, W., Zhang, X.G., Han, D., Wang, L., Chen, W.Q., Xie, Y.M., Ren, X. (2023). Experimental and numerical analysis of a novel assembled auxetic structure with two-stage programmable mechanical properties. *Thin-Walled Structures*, 185, 110555.
- Jiang, Y., Shi, K., Zhou, L., He, M., Zhu, C., Wang, J., Li, J., Li, Y., Liu, L., Sun, D., Feng, G., Yi, Y., Zhang, L. (2023). 3D-printed auxetic-structured intervertebral disc implant for potential treatment of lumbar herniated disc. *Bioactive Materials*, 20: 528-538.
- Li, K., Zhang, Y., Hou, Y., Su, L., Zeng, G., Xu, X. (2023). Mechanical properties of re-entrant anti-chiral auxetic metamaterial under the in-plane compression. *Thin-Walled Structures*, 184, 110465.
- Li, Z.Y., Wang, X.T., Ma, L., Wu, L.Z. (2022). Study on the mechanical properties of CFRP composite auxetic structures consist of corrugated sheets and tubes. *Composite Structures*, 292, 115655.
- Liu, B., Feng, J., Yu, K., Li, J., Hu, Q., Lin, Z., Fu, J. (2022). Three-dimensional auxetic structure design methods based on bulking-induced deformation and the application in soft crawling robot. *Composites Part B: Engineering*, 244, 110146.
- Liu, B., Wang, H., Zhang, M., Li, J., Zhang, N., Luan, Y., Fang, C., Cheng, C.K. (2023). Capability of auxetic femoral stems to reduce stress shielding after total hip arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Translation*, 38: 220-228.
- Liu, J., Yang, W., Liu, J., Liu, J., Huang, W. (2023). Ballistic impact analyses of foam-filled double-arrow auxetic structure. *Thin-Walled Structures*, 182(A), 110173.
- Lu, C., Hsieh, M., Huang, Z., Zhang, C., Lin, Y., Shen, Q., Chen, F., Zhang, L. (2022). Architectural Design and Additive Manufacturing of Mechanical Metamaterials: A Review. *Engineering*, 17: 44-63.
- Luo, C., Han, C.Z., Zhang, X.Y., Zhang, X.G., Ren, X., Xie, Y.M. (2021). Design, manufacturing and applications of auxetic tubular structures: A review. *Thin-Walled Structures*, 163, 107682.
- Lvov, V.A., Senatov, F.S., Shinkaryov, A.S., Chernyshikhin, S.V., Gromov, A.A., Sheremetyev, V.A. (2023). Experimental 3D printed re-entrant auxetic and honeycomb spinal cages based on Ti-6Al-4V: Computer-Aided design concept and mechanical characterization. *Composite Structures*, 310, 116766.
- Madhu, B.P., Mertens, J., Bahubalendruni, A.M.V.A.R. (2023), Auxetic mechanical metamaterials and their futuristic developments: A state-of-art review. *Materials Today Communications*, 34, 105285.
- Montemayor, R.D.P., Osorio, L.A.R., Lopez-Pavon, L., Garcia-Salazar, O., Moreno-Cortez, I.E., Kim, H.Y. (2022). Modeling of superelastic auxetic structures of Ti-Zr base alloy. *Finite Elements in Analysis and Design*, 201, 103705.
- Montgomery-Liljeroth, E., Schievano, S., Burriesci, G. (2023). Elastic properties of 2D auxetic honeycomb structures- a review. *Applied Materials Today*, 30, 101722.
- Nečemer, B., Vuherer, T., Glodež, S., Kramberger, J. (2022). Fatigue behaviour of re-entrant auxetic structures made of the aluminium alloy AA7075-T651. *Thin-Walled Structures*, 180, 109917.
- Pan, Y., Zhang, X.G., Han, D., Li, W., Xu, L.F., Zhang, Y., Jiang, W., Bao, S., Teng, X.C., Lai, T., Ren, X. (2023). The out-of-plane compressive behavior of auxetic chiral lattice with circular nodes. *Thin-Walled Structures*, 182(A), 110152.
- Park, E.B., Jeong, Y.C., Kang, K. (2023). A novel auxetic sandwich panel for use in structural applications: Fabrication and parametric study. *Materials Today Communications*, 34, 105383.
- Pour M.H.N., Payganeh, G., Tajdari, M. (2023). Experimental and numerical study on the mechanical behavior of 3D printed re-entrant auxetic structure filled with carbon nanotubes-reinforced polymethylmethacrylate foam. *Materials Today Communications*, 34, 104936.

- Roychoudhury, A., Singamneni, S., Das, S. (2023). Modification of a re-entrant sinusoidal auxetic structure with a central stiffener. *Materials Today: Proceedings*.
- Sabari, S., Andrade, D.G., Leitão, C., Simões, F., Rodrigues, D.M. (2023). Influence of the strain hardening behaviour on the tensile and compressive response of aluminium auxetic structures. *Composite Structures*, 305, 116472.
- Sarafraz, M., Seidi, H., Kakavand, F., Viliani, N.S. (2023). Free vibration and buckling analyses of a rectangular sandwich plate with an auxetic honeycomb core and laminated three-phase polymer/GNP/fiber face sheets. *Thin-Walled Structures*, 183, 110331.
- Shirzad, M., Zolfagharian, A., Bodaghi, M., Nam, S.Y. (2023). Auxetic metamaterials for bone-implanted medical devices: Recent advances and new perspectives. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 98, 104905.
- Shukla, S., Behera, B.K. (2022). Auxetic fibrous structures and their composites: A review. *Composite Structures*, 290, 115530.
- Singh, D., Tobin, D., Dowling, L., Trimble, D. (2023). Optimization of Cobalt Chrome 3D re-entrant Auxetics fabricated using Selective Laser Melting. *Engineering Structures*, 278, 115542.
- Song, Z., Liang, H., Ding, H., Ma, M. (2023). Structure design and mechanical properties of a novel anti-collision system with negative Poisson's ratio core. *International Journal of Mechanical Sciences*, 239, 107864.
- Varas, D., Pernas-Sánchez, J., Fjeldberg, N., Martín-Montal, J. (2023). Experimental analysis at different loading rates of 3D printed polymeric auxetic structure based on cylindrical elements. *Polymer Testing*, 119, 107930.
- Vyavahare, S., Mahesh, V., Mahesh, V., Harursampath, D. (2023). Additively manufactured meta-biomaterials: A state-of-the-art review. *Composite Structures*, 305, 116491.
- Vyavahare, S., Teraiya, S., Kumar, S. (2023). FDM manufactured auxetic structures: An investigation of mechanical properties using machine learning techniques. *International Journal of Solids and Structures*, 265–266, 112126.
- Wang, W.J., Zhang, W.M., Guo, M.F., Yang, J.S., Ma, L. (2023). Energy absorption characteristics of a lightweight auxetic honeycomb under low-velocity impact loading, *Thin-Walled Structures*, 185, 110577.
- Winczewski, S., Rybicki, J. (2022). Negative Poisson's ratio from pentagons: A new auxetic structure combining three different auxetic mechanisms. *Computational Materials Science*, 201, 110914.
- Wu, L., Wang, Y., Chuang, K., Wu, F., Wang, Q., Lin, W., Jiang, H. (2021). A brief review of dynamic mechanical metamaterials for mechanical energy manipulation. *Materials Today*, 44: 168-193.
- Wu, W., Hu, W., Qian, G., Liao, H., Xu, X., Berto, F. (2019). Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review. *Materials & Design*, 180, 107950.
- Xue, X., Lin, C. Wu, F., Li, Z., Liao, J. (2023). Lattice structures with negative Poisson's ratio: A review. *Materials Today Communications*, 34, 105132.
- Yang, Q., Li, Z., Hao, H., Chen, W. (2023). Compressive mechanical properties and dynamic behaviour of origami-inspired tri-directional auxetic metastructure, *Engineering Structures*, 281, 115751.
- Yang, W., Huang, R., Liu, J., Liu, J., Huang, W. (2022). Ballistic impact responses and failure mechanism of composite double-arrow auxetic structure. *Thin-Walled Structures*, 174, 109087.
- Yolcu, D.A., Baba, B. O. (2022). Measurement of Poisson's ratio of the auxetic structure. *Measurement*, 204, 112040.
- Zhang, J., Lu, G., You, Z. (2020). Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108340.
- Zhang, K., Zhang, X., Gao, Q., Chan, M., Zhang, S., Li, J., Liao, W.H. (2023). Ultrahigh energy-dissipation and multifunctional auxetic polymeric foam inspired by balloon art. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 167, 107435.
- Zhang, W.M., Li, Z.Y., Yang, J.S., Ma, L., Lin, Z., Schmidt, R., Schröder, K.U. (2022). A lightweight rotationally arranged auxetic structure with excellent energy absorption performance. *Mechanics of Materials*, 166, 104244.
- Zhao, C., Goh, K.L., Lee, H.P., Yin, C., Zhang, K., Zhong, J. (2023). Experimental study and finite element analysis

on energy absorption of carbon fiber reinforced composite auxetic structures filled with aluminum foam. *Composite Structures*, 303, 116319.

Zhao, C., Zhong, J., Goh, K.L., Liu, X. (2023). Mechanics of carbon fiber reinforced plastics negative Poisson's ratio structures. *Materials Today: Proceedings*.

Zhou, J., Liu, H., Dear, J.P., Falzon, B.G., Kazancı, Z. (2023). Comparison of different quasi-static loading conditions of additively manufactured composite hexagonal and auxetic cellular structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 244, 108054.

Zhou, X., Ren, L., Song, Z., Li, G., Zhang, J., Li, B., Wu, Q., Li, W., Ren, L., Liu, Q. (2023). Advances in 3D/4D printing of mechanical metamaterials: From manufacturing to applications. *Composites Part B: Engineering*, 254, 110585