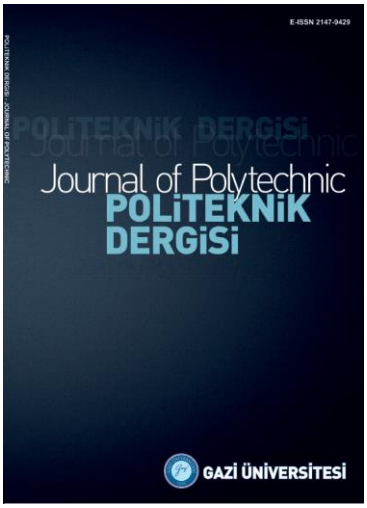


POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)
URL: http://dergipark.org.tr/politeknik

ERKEN GÖRÜNÜM

Şekil hafızalı mekanik metamalzemeler: tasarım, üretim ve uygulamalar

Shape memory mechanical metamaterials: design, fabrication, and applications

***Yazar(lar) (Author(s))**: Gülcan AYDIN[1], Hacer ÇELEBİ[2], İdris CANDAN[3], Sait Eren SAN[4]*

ORCID[1]: 0000-0003-4627-961X

ORCID[2]: 0000-0001-7248-388X

ORCID[3]: 0000-0002-9950-713X

ORCID[4]: 0000-0001-5042-4555

To cite to this article: Aydın G., Çelebi H., Candan İ. and San S. E., "Şekil Hafızalı Mekanik Metamalzemeler: Tasarım, Üretim ve Uygulamalar", ***Journal of Polytechnic***, *(*): *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Aydın G., Çelebi H., Candan İ. ve San S. E., "Şekil Hafızalı Mekanik Metamalzemeler: Tasarım, Üretim ve Uygulamalar", ***Politeknik Dergisi***, *(*): *, (*).

Erişim linki (To link to this article): http://dergipark.org.tr/politeknik/archive

DOI: 10.2339/politeknik.1701964

Şekil Hafızalı Mekanik Metamalzemeler: Tasarım, Üretim ve Uygulamalar

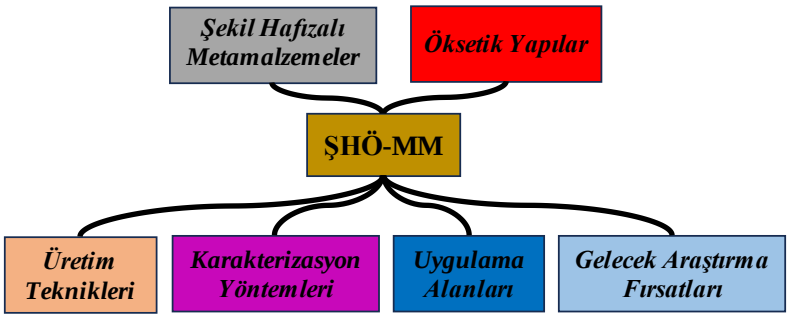
Shape Memory Mechanical Metamaterials: Design, Fabrication, and Applications

Önemli noktalar (Highlights)

- *Şekil hafızalı ve öksetik yapıların birleşimiyle oluşan metamalzemeler incelenmiştir. / The structure of metamaterials formed by combining shape memory and auxetic structures was examined.*
- *Bu malzemelerin birleşimi programlanabilirlik ve enerji soğurma gibi üstün özellikler sağlar. / Their combination enables superior features like programmability and energy absorption.*

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu derleme, şekil hafızalı ve öksetik yapıların birleşimiyle oluşan hibrit metamalzemelerin temel ilkeleri, üretimi, karakterizasyonu ve uygulamalarını ele almaktadır. / This review explores the fundamentals, fabrication, characterization, and applications of hybrid metamaterials combining shape memory and auxetic structures.



Şekil. Grafik Özet / **Figure.** Graphical Abstract

Amaç (Aim)

Şekil hafızalı öksetik metamalzemelerin tasarımı, üretim süreçleri ve uygulama alanlarının incelenmesi amaçlanmaktadır. / This study aims to examine the design, fabrication processes, and application areas of shape memory auxetic metamaterials.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Literatür taramasına dayanarak, yapıların mekanik özellikleri, üretimi ve analizleri bütüncül şekilde değerlendirilmiştir. / Based on the literature review, the structures' mechanics, fabrication, and analyses are holistically evaluated.

Özgünlük (Originality)

Bu çalışma, iki yenilikçi malzeme sınıfını birlikte ele alan Türkçe kaynak eksikliğini gidererek alana özgün ve kapsamlı bir katkı sağlamaktadır. / This study addresses the lack of Turkish sources examining both innovative material classes together and provides an original and comprehensive contribution to the field.

Bulgular (Findings)

Entegre yapılar, geri kazanım ve enerji soğurma gibi özellikleriyle çok işlevli uygulamalara uygundur. / Integrated structures are suitable for multifunctional applications due to features like recovery and energy absorption.

Sonuç (Conclusion)

Şekil hafızalı ve öksetik yapıların birleşimi, 4B baskı ve yapay zekâ desteğiyle akıllı sistemler için yeni olanaklar sunar. / Combining shape memory and auxetic structures enables new smart system opportunities, especially with 4D printing and AI support.

Etik Standartların Beyanı (*Declaration of Ethical Standards*)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

ERKEN GÖRÜNÜM

Şekil Hafızalı Mekanik Metamalzemeler: Tasarım, Üretim ve Uygulamalar

Derleme Makalesi / Review Article

Gülcan AYDIN[1*], Hacer ÇELEBİ[2], İdris CANDAN[1], Sait Eren SAN[1]

[1]Fizik Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, 41001, Kocaeli, Türkiye
[2]ÖSYM, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 19.05.2025 ; Kabul/Accepted : 06.07.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 16.07.2025)

ÖZ

Bu derleme çalışması, şekil hafızalı malzemeler (ŞHM) ile öksetik yapıların birleştirilmesi yoluyla oluşturulan şekil hafızalı öksetik metamalzemelerin (ŞHÖ-MM) temel prensiplerini, üretim tekniklerini, karakterizasyon yöntemlerini ve çok yönlü uygulama potansiyellerini kapsamlı biçimde ele almaktadır. ŞHM'lerin çevresel uyaranlara duyarlı, geri dönüşümlü şekil değiştirme yetenekleri ile öksetik yapıların negatif Poisson oranı gibi olağanüstü mekanik tepkileri bir araya getirilerek programlanabilir, çok işlevli ve yüksek performanslı sistemlerin tasarlanması mümkün hale gelmektedir. Çalışmada, bu hibrit metamalzemelerin ölçek bağımlı deformasyon mekanizmaları detaylı şekilde incelenmiş; sonlu elemanlar analizi, malzeme modelleri ve çok ölçekli hesaplamalı yaklaşımlar aracılığıyla gerçekleştirilen güncel simülasyon çalışmaları değerlendirilmiştir. Ayrıca, eriterek biriktirme, stereolitografi, PolyJet baskı ve lazer kesim gibi ileri üretim tekniklerinin bu sistemlerin imalatında kullanımları açıklanmıştır. Karakterizasyon yöntemleri kapsamında, mekanik testler, termal analizler ve şekil geri kazanım performans ölçümleri ele alınmıştır. Biyomedikal implantlar, yumuşak robotik sistemler, esnek elektronikler, darbe emici yapılar ve giyilebilir teknolojiler gibi çeşitli alanlardaki uygulamalara ilişkin son gelişmelere de yer verilmiştir. Literatürde bu iki yenilikçi malzeme sınıfının birlikte değerlendirildiği Türkçe kaynakların bulunmaması nedeniyle, bu çalışma mevcut boşluğu doldurarak akademik literatüre özgün ve bütüncül bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, bu malzeme sistemlerinin geleceğine dair öngörüler doğrultusunda, 4B yazıcı teknolojileri, yapay zekâ destekli tasarım optimizasyonları ve çok malzemeli üretim yaklaşımları çerçevesinde araştırma fırsatları da tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şekil Hafızalı Malzemeler, öksetik yapılar, mekanik metamalzemeler, negatif poisson oranı, şekil hafıza etkisi.

Shape Memory Mechanical Metamaterials: Design, Fabrication, and Applications

ABSTRACT

This review comprehensively examines the fundamental principles, fabrication techniques, characterization methods, and versatile application potentials of shape memory auxetic metamaterials (SMAMs), which are created through the integration of shape memory materials (SMMs) and auxetic structures. By combining the environmentally responsive and reversible shape-changing capabilities of shape memory materials with the exceptional mechanical responses of auxetic structures such as a negative Poisson's ratio, it becomes possible to design programmable, multifunctional, and high-performance systems. The study explores the scale-dependent deformation mechanisms of these hybrid metamaterials in detail and evaluates recent simulation studies carried out using finite element analysis, material modelling, and multiscale computational approaches. Furthermore, advanced manufacturing techniques such as fused deposition modeling, stereolithography, PolyJet printing, and laser cutting are discussed in the context of producing these systems. Within the scope of characterization methods, mechanical testing, thermal analysis, and shape recovery performance measurements are addressed. Recent developments in various application areas such as biomedical implants, soft robotic systems, flexible electronics, impact-absorbing structures, and wearable technologies are also presented. Given the lack of Turkish sources that jointly address these two innovative material classes, this work fills a critical gap in the literature and provides an original and holistic contribution to academic research. In addition, future research opportunities are discussed in the context of 4D printing technologies, AI-assisted design optimizations, and multi-material manufacturing approaches.

Keywords: Shape memory materials, auxetic structures, mechanical metamaterials, negative poisson's ratio, shape memory effect.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzemeler, teknolojik ilerlemenin temelini oluşturur ve birçok endüstrideki yeniliklerin yapı taşıdır. Dev köprü yapılarından ileri elektronik sistemlere kadar uzanan geniş bir uygulama yelpazesinde, malzemeler; işlevsellik, mekanik dayanım, ısı iletimi ve elektriksel performans gibi kritik gereksinimlerin karşılanmasında belirleyici bir rol üstlenmektedir. Bu bağlamda, malzeme bilimi, bir malzemenin iç yapısı, özellikleri, işlenme süreçleri ve nihai performansı arasındaki karmaşık ilişkileri inceleyerek modern mühendislikte karşılaşılan zorluklara yönelik çözüm yolları geliştirmeyi amaçlamaktadır.

**Sorumlu Yazar (Corresponding Author)*
e-posta : gulcan.aydin@kocaeli.edu.tr

ÖN GÖRÜNÜM

Geleneksel malzemeler, yaygın kullanım alanlarına rağmen; çok işlevsellik, çevresel koşullara uyum ve aşırı ortam şartlarında kararlılık gibi konularda çeşitli sınırlamalara sahiptir. Örneğin, havacılık ve uzay mühendisliğinde hem hafif hem de yüksek dayanıma sahip yapıların elde edilmesi hâlâ önemli bir mühendislik sorunudur. Benzer şekilde, çoğu malzemenin izotropik (tüm yönlerde aynı özellikte olan) özellik göstermesi, yönlü tepki gerektiren enerji soğurma veya titreşim sönümleme gibi uygulamalarda kısıtlayıcı olabilmektedir.

Bu noktada metamalzemeler, geleneksel malzemelerin ötesinde çözümler sunar. Kimyasal bileşimlerinden ziyade, mikroskobik ölçekte tasarlanmış periyodik geometrik yapılar sayesinde benzersiz özellikler kazanan bu yapılar, doğada rastlanmayan davranışların mühendislik düzeyinde gerçekleştirilmesini mümkün kılar. Metamalzeme kavramı ilk kez 1968 yılında Veselago [1] tarafından negatif kırılma indisine sahip elektromanyetik ortamlar bağlamında ortaya atılmıştır. Ardından Pendry [2] ve Smith'in [3] öncü çalışmalarıyla bu kavram, elektromanyetikten mekanik ve akustik alanlara doğru genişlemiştir.

Metamalzemelerin gelişimiyle birlikte, günümüzde bu yapılar; elektromanyetik, optik, mekanik, akustik [4,5], termal ve mikrodalga uygulamalarında araştırma ve geliştirme odağında yer almakta, çok işlevli yapıların tasarlanmasında yenilikçi bir platform sunmaktadır. Özellikle mekanik metamalzemeler, yalnızca içerdikleri malzemenin özelliklerine değil, aynı zamanda yapısal geometrilerine bağlı olarak olağanüstü mekanik davranışlar sergilemektedir. Dalga yönlendirme, enerji dağılımını kontrol etme ve programlanabilir şekil değiştirme gibi işlevler, bu tür malzemeler aracılığıyla gerçekleştirilebilmektedir.

Mekanik metamalzemeler kapsamında özellikle iki önemli yapı grubu dikkat çekmektedir: şekil hafızalı malzemeler (ŞHM) ve öksetik yapılar. ŞHM'ler; sıcaklık, elektromanyetik alan, nem ya da pH gibi dış uyaranlara tepki vererek geçici bir şekilden orijinal şekline geri dönebilme yeteneğine sahiptir. Bu tür yapıların oluşturulmasında şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA) [6], şekil hafızalı polimerler (ŞHP), şekil hafızalı seramikler (ŞHS) ve şekil hafızalı jeller (ŞHJ) yaygın olarak kullanılmaktadır. Söz konusu malzemeler; sensör, aktüatör ve yumuşak robot gibi birçok akıllı sistemin temelini oluşturmaktadır.

Öte yandan, negatif Poisson oranı gösteren öksetik yapılar, çekme etkisi altında enine genişleyebilme özellikleri sayesinde yüksek enerji sönümleme kapasitesi ve üstün kırılma tokluğu [7] gibi avantajlar sunmaktadır. Bu özellikler, onları özellikle koruyucu ekipmanlarda, biyomedikal stent [8] ve implantlarda ve hafif yapısal takviyelerde tercih edilir hâle getirmektedir.

Son yıllarda eklemeli imalat (3D baskı) ve dijital üretim teknolojilerindeki gelişmeler, bu iki malzeme sınıfının mikro-mimari ölçekte birleştirilmesini mümkün kılmıştır. Bu durum, daha gelişmiş ve çok işlevli metamalzeme sistemlerinin tasarlanmasına zemin hazırlamıştır. Ancak mevcut literatürde, şekil hafızalı malzemeler ile öksetik yapıların birlikte ve bütüncül biçimde ele alındığı kapsamlı Türkçe kaynakların yetersiz olduğu görülmektedir.

Bu derleme çalışması, literatürdeki mevcut boşluğu doldurmak amacıyla şekil hafızalı malzemeler (ŞHM) ve öksetik yapıların ayrı ayrı ve birlikte sunduğu potansiyeli kapsamlı bir yaklaşımla ele almaktadır. Çalışmada, hibrit yapıların temel çalışma prensipleri, ölçek bağımlı deformasyon mekanizmaları, üretim teknikleri, karakterizasyon yöntemleri, sonlu elemanlar modellemeleri ve çok disiplinli uygulama alanları ayrıntılı olarak sunulmuştur. Böylece hem malzeme bilimi hem de uygulamalı mühendislik alanlarında kullanılabilecek güçlü bir başvuru kaynağı oluşturulması hedeflenmektedir.

2. YAPISAL VE MALZEME TEMELLİ YAKLAŞIMLARLA ŞEKİL HAFIZALI ÖKSETİK SİSTEMLERİN MEKANİZMASI (MECHANISM of SHAPE MEMORY AUXETIC SYSTEMS THROUGH STRUCTURAL and MATERIAL-BASED APPROACHES)

Şekil hafızalı öksetik metamalzemeler (ŞHÖ-MM), hem malzeme hem de yapı düzeyinde olağan dışı mekanik özellikler sunan hibrit sistemlerdir. Bu yapıların temelinde, negatif Poisson oranı sergileyen öksetik geometri ile termomekanik hafıza etkisine sahip şekil hafızalı malzeme (ŞHM) birleşimi yer alır. Bu iki bileşenin etkileşimi, dış uyaranlara bağlı olarak programlanabilen ve zamanla evrimleşen geometrik yanıtların elde edilmesini sağlar.

2.1. Öksetik Geometrinin Davranışı ve Rolü (Behavior and Role of Auxetic Geometry)

Öksetik geometriler, klasik yapılardan farklı olarak negatif Poisson oranı sergileyerek çekme yükü altında enine yönde genişleyen özgün bir deformasyon davranışı gösterir. Bu özellik, geri girintili (re-entrant), kiral, döner-rijit birimler ve origami tabanlı tasarımlar gibi özel geometrik düzenlemelerle elde edilir. Öksetik yapılar, stresin yapıya homojen dağılımını sağlarken, şekil hafızalı malzemelerle entegre edildiklerinde bu geometrik dönüşümleri belirli sıcaklık ve kuvvet eşiklerinde hafızaya alıp yeniden gerçekleştirebilir. Bu nedenle, öksetik geometri yalnızca mekanik tepkiyi yönlendirmekle kalmaz, aynı zamanda programlanabilir ve geri dönüşümlü şekil değişimlerinin gerçekleştirilmesinde kritik bir rol oynar.

2.1.1. Öksetik davranışın ölçek bağımlılığı (Scale dependency of auxetic behaviour)

Öksetik davranışın ölçek bağımlılığı, aynı malzemenin farklı boyut ölçeklerinde farklı Poisson oranları göstermesi ve bu davranışın altında yatan fiziksel mekanizmaların ölçeğe göre değişmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu bağımlılık, alt ölçeklerdeki yapısal özelliklerin üst ölçeklere nasıl yansıdığını ve hangi

ERKEN GÖRÜNÜM

mekanizmaların hangi boyut aralığında baskın olduğunu anlamak için kritik öneme sahiptir. Ölçek bağımlılığının doğru anlaşılması, farklı uygulama boyutları için öksetik malzemelerin tasarımında hangi değişkenlerin denetlenmesi gerektiğini belirlemede temel oluşturmaktadır.

Mikro ölçekte öksetik davranış [9-12], atomlar arası bağların yönelimi, bağ kuvvetleri ve kristal kafes geometrisi gibi temel özelliklerle belirlenmektedir. Arsenik, kadmiyum ve demir pirit gibi elementlerin kristal yapıları, çekme altında enine yönde de genişlemektedir. Bu davranış doğrudan atomik ölçekteki yapısal düzenden kaynaklanır ve malzemenin temel fiziksel özelliklerini oluşturmaktadır.

Mezo ölçekte gözlemlenen öksetik davranış (mikro ve makro arasındaki bölge) [13], malzemenin iç yapısına; yani hücresel geometriye, gözenek dağılımına ve lif yönelimine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Geri girintili yapılar, mikrogözenekli polimerler [14], köpük malzemeler ve origami benzeri katlanabilir yapılar bu kategoriye girmektedir. Bu ölçekte davranış, tasarım yoluyla programlanabilir hale gelmektedir. Aynı hücresel tasarımın farklı boyutlarda üretilmesi durumunda belirgin ölçek etkileri gözlenmektedir.

Makroskobik ölçekte, örneğin 1 mm'den büyük boyutlarda gözlemlenen öksetik davranış [15], alt ölçeklerdeki özelliklerin homojenleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan etkili (makroskobik) özellikler üzerinden şekillenmektedir. Bu ölçekte, yapının geometrisi, sınır koşulları, yükleme yönü ve numune boyutları davranışı önemli ölçüde etkilemektedir. Boyut etkisi nedeniyle, aynı malzemenin farklı boyutlarında farklı etkili Poisson oranları gözlemlenebilmektedir. Küçük numunelerde sınır etkileri baskın hâle gelirken, büyük yapılarda iç bölgeler karakteristik davranışı belirlemektedir.

Öksetik davranışın gerçek anlamda ölçek bağımlılığı, farklı ölçeklerde etkili olan mekanizmaların birbiriyle etkileşiminden kaynaklanmakta ve bu etkileşim çift yönlü bir süreç olarak değerlendirilmektedir. Her malzeme için ölçek bağımlı davranışın ortaya çıktığı belirli karakteristik boyut aralıkları bulunmaktadır. Bu kritik boyut kavramı, malzeme tasarımında hangi ölçekte hangi yaklaşımın tercih edilmesi gerektiğini belirlemede yol gösterici olmaktadır. Söz konusu çok ölçekli yaklaşım, öksetik malzemelerin eniyileme sürecinde ve farklı uygulama boyutları için uygun tasarım stratejilerinin geliştirilmesinde temel bir rehber niteliği taşımaktadır.

2.1.2. Negatif poisson oranı (Negative Poisson ratio)

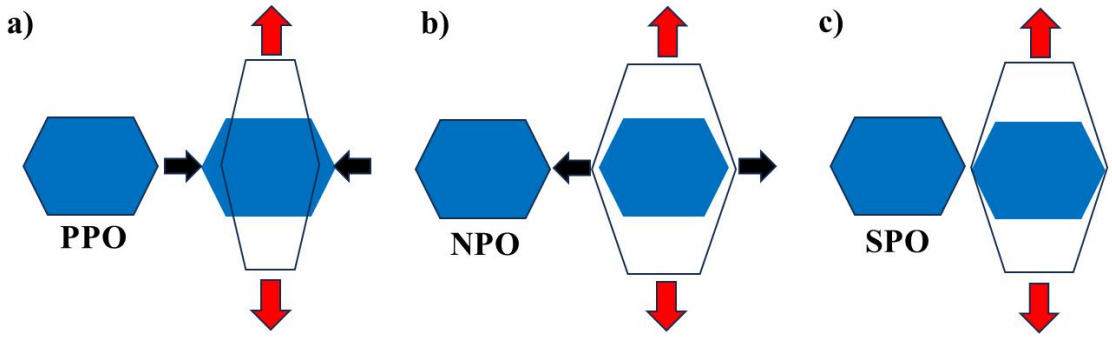
Öksetik yapı, negatif Poisson oranına (NPO) sahip bir mekanik metamalzemedir. Genellikle, bir malzeme sıkıştırıldığında yanlara doğru genişlemesi beklenmektedir [16,17]. Ancak, NPO'ya sahip malzemeler bunun tersini yaparak sıkışma altında yanlara doğru da daralmaktadır. Doğada bulunan birçok malzeme pozitif Poisson oranına (PPO) sahiptir, bu da çekme etkisi altında yanlara doğru daraldığını göstermektedir. Sıfır Poisson oranı (SPO), NPO ve PPO özellikleri gösteren yapılar Şekil 1'de deformasyon öncesi ve sonrası halleriyle birlikte simulmuştur. NPO davranışı ilk olarak 1944 yılında gözlemlenmiş; 1987 yılında ise −0,7 Poisson oranına sahip bir köpük yapısının geliştirilmesiyle bu alanda önemli bir dönüm noktası yaşanmıştır [18]. Bu gelişmeden itibaren, mekanik metamaddeler malzeme bilimi disiplininde yoğun araştırma konusu hâline gelmiştir. Dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar bu dikkat çekici konu üzerine çalışmalar yaparak çeşitli malzemeler ve yapılar için negatif Poisson oranlarını raporlamışlardır.

2.1.3. Öksetik yapılarda deformasyon mekanizması (Deformation mechanism in auxetic structures)

Öksetik özellikler çoğunlukla malzeme veya yapının geometrik düzenine bağlıdır [20]. Bu nedenle öksetik yapılar genellikle matematiksel modeller aracılığıyla tanımlanır [21,22]. Bu modeller, öksetik davranışı tahmin etmek, geometriyi optimize etmek ve istenilen performansı elde etmek amacıyla geliştirilir. Teorik olarak her ölçekte uygulanabilir olsalar da pratikte sınırlı ölçeklerde kullanılabilirler. Doğada ve yapay sistemlerde karşılaşılan öksetik yapılara yönelik araştırmalar, genellikle küçük ölçekli yapılardan esinlenerek yürütülür.

Deformasyon süreci hem öksetik etkinin derecesini hem de malzemenin mekanik özelliklerini belirleyen kritik bir

ÖRNEK GÖRÜNÜM



Şekil 1. Çekme kuvveti altında üç farklı Poisson oranı gözlemlenmektedir: (a) Pozitif Poisson oranı, (b) Negatif Poisson oranı ve (c) Sıfır Poisson oranı (It shows three different Poisson's ratios under tensile force: (a) Positive Poisson's ratio, (b) Negative Poisson's ratio, and (c) Zero Poisson's ratio) [19].

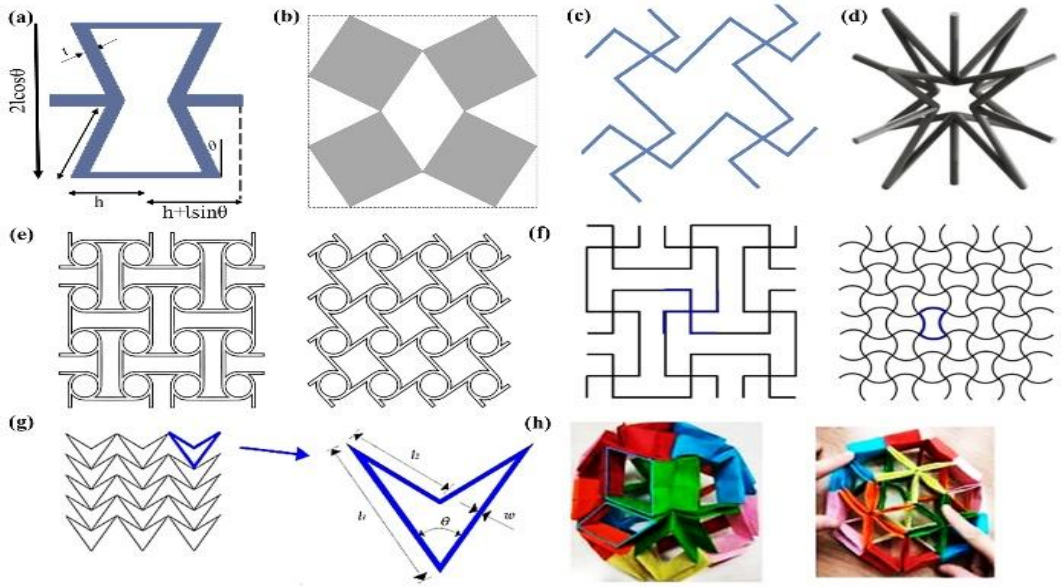
faktördür. Yapılar, belirli yöndeki gerilmeye karşılık tüm yönlerde genişleyen özel desenler veya deformasyon mekanizmalarına göre sınıflandırılır. Poisson oranı, eleman uzunlukları ve açıları değiştirilerek ayarlanabilir. Geri girintili yapılar düzleştirildiğinde öksetik davranış kaybolur. Bazı yapılar ise yalnızca belirli bir basınç eşiğini aştıktan sonra burkulma yoluyla öksetik davranış sergiler ve çekme altında bu özelliklerini göstermezler. Bu nedenle, farklı yapıların deformasyon mekanizmalarını ve geometrik özelliklerini anlamak, mühendislik uygulamaları için büyük önem taşır. Şekil 2'de bazı geometrik desenler verilmiştir.

2D Geri-Kıvrımlı (Re-entrant) Yapılar: Geri-kıvrımlı yapılarda, yapısal desen ile bütünlük arasındaki ilişki oldukça önemlidir. Çekme kuvveti uygulandığında, içe doğru eğilmiş kenarlar dışa doğru açılır ve hücreler yukarıya doğru genişler [23]. Bu davranış, kare kafes eksiklikleri, eşkenar dörtgen (lozenge) biçiminde eksik kirişler ve altıgen petek yapılar gibi düzenli geometrik tasarımlar aracılığıyla elde edilebilmektedir.

3D Geri-Kıvrımlı Yapılar: İki boyutlu geri-kıvrımlı sistemlerin üç boyutlu karşılıkları arasında papyon (bowtie) [24,25] ve ok başı (arrowhead) [26] gibi yapılar yer alır. Bu geometriler, poligonal şekiller kullanılarak kompleks ve hafif hacimsel tasarımların elde edilmesini sağlar. Ancak ince çubukların birbirine karmaşık şekilde bağlanması üretim zorlukları oluşturmaktadır. Özellikle eklemeli imalat (additive manufacturing) teknikleri gereklidir [27]. Ayrıca bu yapılar yorulma kaynaklı hasara karşı hassas olmaktadır. Bu nedenle genellikle hafif sandviç panellerde ve köpük yapıların matematiksel modellenmesinde tercih edilmektedirler.

Yıldız Geri-Kıvrımlı Yapılar: Bu yapılar, eşkenar üçgenlerden oluşan birim hücrelerin kafes biçiminde düzenlenmesiyle elde edilir. Üçlü, dörtlü veya altılı yıldız birimleri, çeşitli yönlerde neredeyse izotropik mekanik özellikler sunar. Geometriye bağlı olarak daha karmaşık şekiller de elde edilebilir.

Kiral Yapılar: Bu yapılarda, merkezî bir silindire bağlı eğimli kirişlerden oluşan birim hücreler, dış yüklemeler altında bükülüp dönebilir. Aynadaki yansımasıyla çakışmayan bu yapılar, dönel simetriye göre düzenlenmiştir [28]. Düzlem içi deformasyon altında yaklaşık −1 Poisson oranı sergileyebilirler. Tri-kiralden (üç kollu kiral) heksa-kirale (altı kollu kiral) kadar farklı konfigürasyonlar mevcuttur. Karşıt-kiral yapılarda ise bağlantılar simetrik olarak yerleştirilmiştir [29]. Bu yapılar, enerji soğurma [30-32], titreşim sönümleme [33], akustik kontrol [34], elektromanyetik gizleme ve ısıl yalıtım [35,36] gibi çok işlevli alanlarda kullanılabilir. Elastik enerji biriktirme yetenekleri sayesinde pasif enerji sönümleyici olarak da görev yapabilirler.



Şekil 2. Şematik gösterim: (a) Geri girintili petek birim hücre [22] (b) Dönen dikdörtgen birim hücre [41] (c) Eksik kirişli kafes yapısı (d) Sekiz kollu yıldız birim hücrenin 3B görünümü [42] (e) Kiral (sol) ve anti-kiral (sağ) kafes yapıları [43] (f) Eşkenar dörtgen ızgaralar (sol) ve sinüzoidal bağlar (sağ) [44] (g) Çift ok başı yapısının sol tarafında kafes yapısı, sağ tarafta ise büyütülmüş tek bir birim hücresi, l_1 ve l_2 (kolların uzunlukları), θ (iç açı) ve w (kiriş genişliği) gibi geometrik parametrelerle birlikte mavi renkle vurgulanmış olarak gösterilmektedir [45] (h) Origami yapısı, modüler birim levhalardan oluşmaktadır [46] (Schematic representation: (a) Backward-inclined honeycomb unit cell [22], (b) Rotating rectangular unit cell [41], (c) Incomplete beam lattice structure, (d) 3D view of an eight-armed star unit cell [42], (e) Chiral (left) and anti-chiral (right) lattice structures [43], (f) Lozenge grids (left) and sinusoidal ligaments (right) [44] (g) On the left side, the lattice structure of the double-arrowhead structure; on the right, a magnified view of a single unit cell, with geometric parameters such as l_1 and l_2 (arm lengths), θ (internal angle), and w (beam width) highlighted in blue [45], (h) Origami structure, consisting of modular unit sheets [46]).

İNİNİ

Döner-Rijit Birimler: Bu sistemlerde, köşelerinden bağlanmış kareler gibi temel şekiller dış kuvvetler altında dönerek genişleme ya da daralma gösterir. Üçgen [37], dikdörtgen ve paralelkenar gibi başka formlar da bu kategoriye girer. Bu yapılar, kesme ve katlama yöntemleriyle (örneğin kirigami [38]) üretilebilir ve geniş açılı deformasyonlara olanak tanır.

Origami Tabanlı Metamalzemeler: Origami, Japonca kökenli bir terim olup "katlamak" ve "kâğıt" kelimelerinden oluşur. Son yıllarda mühendislikte, özellikle de bilgisayar destekli tasarımla birlikte, bu yapıların kullanımı yaygınlaşmıştır. Origami sistemlerin mekanik yanıtları, katlanma sırası ve desenlerine bağlıdır. Miura-origami, Ron-Resch ve su bombası gibi örnekler hem pozitif hem negatif Poisson oranı sergileyebilir.

Mikrogözenekli Polimer Modelleri: Politetrafloroetilen (PTFE) [39] üzerinde yapılan araştırmalar, çok yüksek oranda negatif Poisson davranışı göstermiştir ($\nu = -12$) [40]. Bu davranışları, fibril-nodül etkileşimleriyle açıklanabilir; özellikle nodüller arasında yer alan fibrillerin çekme altında lateral genleşmeyi indüklemesi, hacimsel olarak genişleyen bir yanıt üretmektedir. Benzer davranış, sıvı kristal polimerler ve fiber takviyeli kompozitlerde de gözlenmiştir. Malzeme gerildiğinde, fibriller nodülleri yana doğru çeker ve bu da hacimsel genişlemeye neden olur, yani öksetik etkiyi oluşturur.

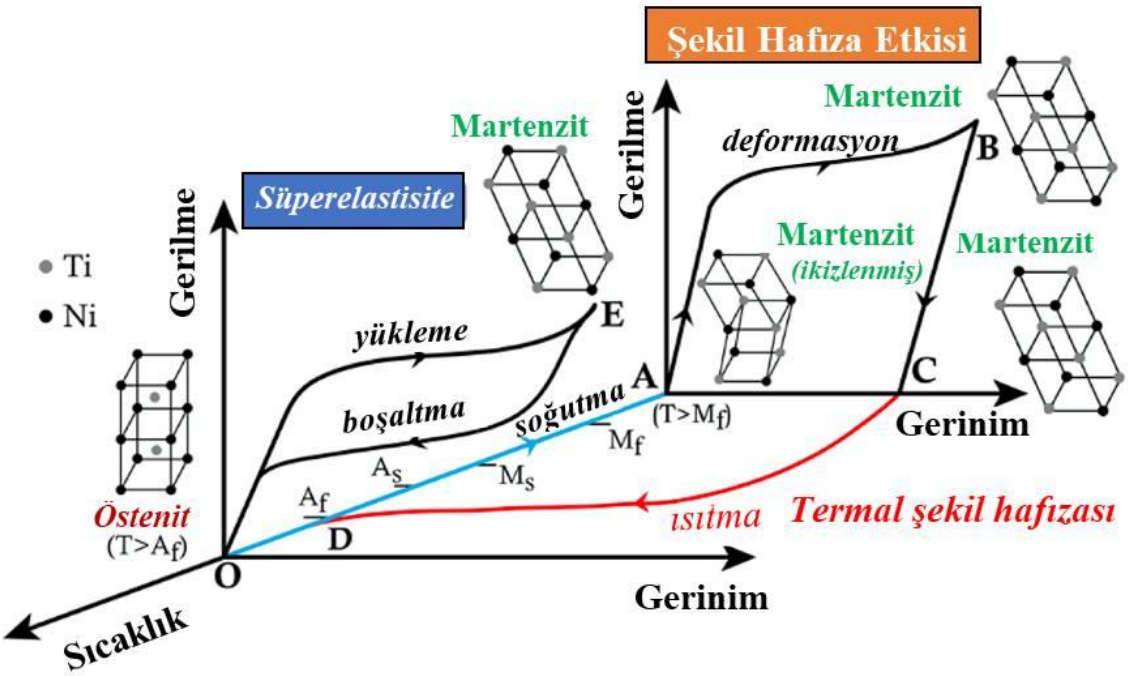
2.2. Şekil Hafızalı Malzemelerin Rolü (Role of Shape Memory Materials)

Akıllı malzemeler, sıcaklık, elektriksel veya manyetik alanlar, nem ya da ışık gibi çevresel uyaranlara tepki vererek fiziksel ya da kimyasal özelliklerinde kontrollü değişiklikler oluşturabilen ve uyaran ortadan kalktığında orijinal yapılarına geri dönebilen özel malzeme sistemleridir. Bu özellikleri sayesinde, mühendislik alanlarında tek başlarına ya da belirli kombinasyonlarla işlevsel çözümler sunarlar. Doğada da benzer şekilde çevresel etkilere karşı yüksek duyarlılık gösteren birçok sistem bulunmaktadır. Örneğin; bukalemunlar vücut sıcaklığı ve ruh halleri doğrultusunda renk değiştirebilir; mürekkep balıkları pigment hücrelerini kas yapıları aracılığıyla kontrol ederek kamuflaj sağlayabilir. Küstüm çiçeği (Mimosa pudica) adlı bitki ise mekanik bir uyaranla temas ettiğinde yapraklarını hızla kapatarak tepki verir. Bu örnekler, şekil değişimi ve uyaranlara duyarlılık gibi özelliklerin doğada ne kadar etkili ve çeşitli şekillerde kullanılabildiğini gösterirken mühendislik uygulamaları için de ilham verici bir zemin oluşturmaktadır.

Bu bağlamda, şekil hafızalı malzemeler (Shape Memory Materials, SMMs), belirli bir şekli "hatırlayabilme" ve dış uyaranlar sonucunda geçici olarak başka bir şekle büründükten sonra orijinal formlarına geri dönebilme yeteneğine sahip ileri malzeme sınıfıdır.

ŞHM'ler temel olarak dört ana sınıfa ayrılır: şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA) [47], şekil hafızalı polimerler (ŞHP), şekil hafızalı seramikler (ŞHS) ve şekil hafızalı jeller (ŞHJ). Bu malzeme grupları benzer fonksiyonları yerine

GÖRÜLÜM



Şekil 3. ŞHA'larda şekil hafızası etkisi (ŞHE) ve süperelastisitenin şematik gösterimi (A_s: Östenit fazı başlangıç, A_f: Östenit fazı bitiş, M_s: Martenzit fazı başlangıç, M_f: Martenzit fazı bitiş) (Schematic representation of the shape memory effect (SME) and superelasticity in SMAs (A_s: Austenite phase start, A_f: Austenite phase finish, M_s: Martensite phase start, M_f: Martensite phase finish) [49].

getirseler de her biri farklı bir mekanizma üzerinden çalışmaktadır.

ŞHA'larda şekil hafızası, Şekil 3'te gösterildiği üzere sıcaklığa bağlı olarak östenit ve martenzit fazları arasında gerçekleşen tersinir faz dönüşümleriyle ortaya çıkmaktadır. Östenit fazı, yüksek sıcaklıkta kararlı ve simetrik bir yapıya sahiptir. Soğuma ile martenzit fazına geçen malzeme, düşük simetrili yapısıyla şekil değişikliğine olanak tanımaktadır. Uygun sıcaklık aralıklarında, bu geçişler sayesinde malzeme orijinal formunu yeniden kazanabilir [48]. Ayrıca ŞHA'lar, uygulanan gerilme kaldırıldığında dahi kendiliğinden ilk şekline dönebilen "psödoelastik" özellikler de sergileyebilir.

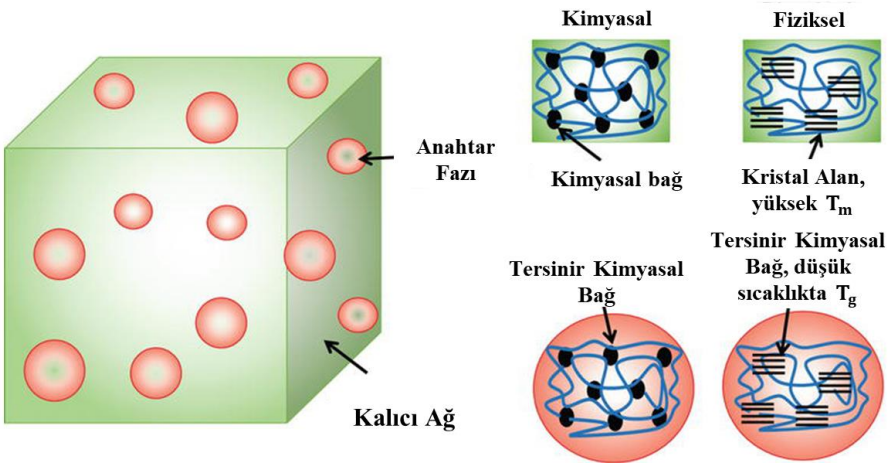
Şekil hafızalı polimerler, moleküler düzeyde yapılandırılmış kalıcı bir ağ ve programlanabilir geçici bir şekil arasında dönüşüm yapabilen sistemlere sahiptir. Bu dönüşümde "geçiş sıcaklığı" kritik bir rol oynar. Polimerler, bu sıcaklık üzerinde esnek hale gelir ve istenilen geçici şekil verilir. Soğutulduğunda bu şekil sabitlenir; tekrar ısıtıldığında ise başlangıçtaki şekline geri dönmektedir. Bu dönüşüm, Şekil 4'te görüldüğü üzere geçici şekli sabitleyen "anahtarlama segmentleri" ile yapısal bütünlüğü koruyan "kalıcı ağ segmentleri" arasında gerçekleşir. Şekil hafızalı polimerlerin üretiminde kullanılan moleküler tasarım, çapraz bağ yoğunluğu, molekül ağırlığı ve geçiş sıcaklığı gibi parametreler hem şekil hafızası etkinliğini hem de mekanik dayanımı belirleyici unsurlardır.

Şekil hafızalı seramiklerde ise dört temel mekanizma şekil hafızası etkisini sağlar: viskoelastik davranış, martenzitik faz dönüşümleri, ferroelektrik ve ferromanyetik etkiler. Martenzitik dönüşüm gösteren seramiklerde uygulanan gerilme ile östenit fazından martenzit fazına geçilir; bu geçici şekil, ısıtma ile geri kazanılır. Şekil 5'te görüldüğü gibi ferroelektrik seramiklerde, elektrik alan etkisiyle iyonlar yönlenir ve kristal yapıda geçici deformasyon oluşur. Alan kaldırıldığında veya sistem ısıtıldığında yapı eski hâline döner. Benzer şekilde ferromanyetik seramiklerde, manyetik alan uygulamasıyla yapısal değişim sağlanır ve alan kaldırıldığında malzeme orijinal geometrisine geri döner. Viskoelastik geri kazanım ise özellikle mika bazlı cam seramiklerde yüksek sıcaklıklarda sınırlı miktarda şekil değişimi sağlayabilir.

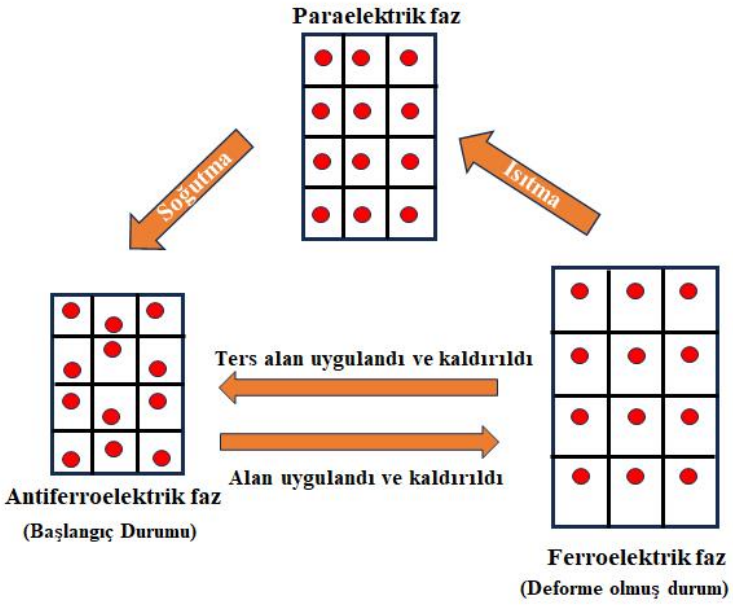
Şekil hafızalı jeller (ŞHJ), çapraz bağlı polimer ağları ve yüksek oranda çözücü içeriği sayesinde çevresel uyarıcılara duyarlı hâle getirilmiş sistemlerdir. Genellikle %90'dan fazla su içeren bu malzemeler, çevre dostu ve biyobozunur olmalarıyla dikkat çekmektedir. Jel yapısı, belirli bir sıcaklık üzerinde yumuşar ve dış kuvvet altında şekillendirilebilir. Sıcaklık düşürüldüğünde geçici şekil sabitlenmekte ve yeniden ısıtıldığında ise eski formuna dönmektedir. Bu süreç, polimer zincirlerinin yeniden düzenlenmesiyle gerçekleşir. Ayrıca, nano- veya mikroskobik katkı maddeleri ile geliştirilen ŞHJ'ler, deformasyon hassasiyetini ve tepkime hızını artırarak hassas uygulamalar için uygun hale getirilmiştir. Şekil 6'da şekil hafızalı hidrojellerin mekanizmaları gösterilmiştir.

Her bir ŞHM sınıfı, kendine özgü şekil değişim mekanizması, çevresel duyarlılığı ve geri kazanım gücü ile farklı mühendislik ve teknolojik uygulamalarda yer bulmaktadır. Otomasyon teknolojilerinden uzay mühendisliğine, akıllı tekstil sistemlerinden biyomedikal implantlara kadar geniş bir kullanım yelpazesi bulunan bu malzemeler, günümüzde nanoteknoloji, dört boyutlu (4B) yazıcılar ve çoklu uyaranlara duyarlı tasarımlarla daha da işlevsel hâle getirilmektedir. Gelecekte, gelişen üretim teknikleri ve disiplinler arası araştırmalar sayesinde şekil hafızalı malzemelerin çok daha yaygın alanlarda kullanılacağı öngörülmektedir.

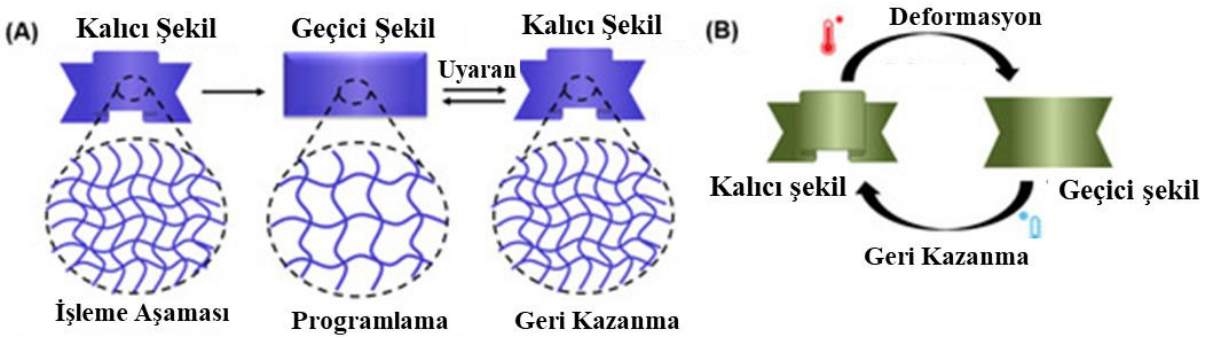
ÖN GÖRÜNÜM



Şekil 4. Şekil hafızalı poliüratanın genel yapısı, şekli kontrol eden bir "kalıcı ağ" ve dış uyaranlarla tetiklenebilen bir "anahtar fazı" içerir (T_m: Erime sıcaklığı, T_g: Cam geçiş sıcaklığı) (The general structure of shape memory polyurethane includes a "permanent network" that controls the shape and a "key phase" that can be triggered by external stimuli (T_m: Melting temperature, T_g: Glass transition temperature) [50].



Şekil 5. ŞHS mekanizmasının şematik gösterimi, malzemenin sıcaklık değişimlerine tepki olarak nasıl şekil değiştirdiğini ve bu süreçte mekanik kuvvetlerin nasıl etkileşime girdiğini göstermektedir (The schematic representation of the SME mechanism shows how the material deforms in response to temperature changes and how mechanical forces interact during this process) [51].



Şekil 6. Şekil hafızalı hidrojeller önce kalıcı bir şekle dönüştürülür. Programlama aşamasında bu şekil geçici bir forma bükülür. Dış uyaran uygulandığında, geçici şekil eski hâline döner. (B) Termal işlemle, polimer ağı ısıtılarak şekillendirilir ya da dondurma-çözme yöntemiyle kalıcı şekil kazandırılır ((A) Shape memory hydrogels are first transformed into a permanent shape. During the programming phase, this shape is bent into a temporary form. When an external stimulus is applied, the temporary shape returns to its original state. (B) Through thermal processing, the polymer network is shaped by heating, or a permanent shape is imparted using the freezing-thawing method) [52].

2.3. Entegre Davranış: Geometri ve Malzeme Etkileşimi (Integrated Behavior: Geometry and Material Interaction)

Şekil hafızalı öksetik metamalzemeler [53-55], dış uyaranlara tepki olarak hem iç yapılarında hem de genel geometrilerinde programlanabilir dönüşümler gerçekleştirebilen sistemlerdir. Bu malzemelerin çalışma mekanizması, iki temel fiziksel özelliğin bütünleşmesine dayanır: öksetik yapılarının negatif Poisson oranı sayesinde deformasyon altında genişleyebilme yeteneği ve şekil hafızalı malzemelerin belirli bir uyaranla (genellikle sıcaklık) orijinal formlarına geri dönebilme kabiliyeti.

Bir dış kuvvet uygulandığında, öksetik geometri sayesinde yapı homojen bir biçimde genişleyerek enerjiyi dağıtmaktadır. Aynı anda şekil hafızalı malzeme matrisi, bu deformasyonu termomekanik olarak "hafızaya" alır. Daha sonra, ısı gibi bir uyaran uygulandığında malzeme önceki yapısal formuna geri dönerken öksetik geometrinin de özgün şeklini yeniden kazanması sağlanır. Bu çift etkili tepki, yapının hem geçici olarak uyarlanabilir olmasına hem de kontrollü bir şekilde eski hâline dönmesine imkân tanır.

Yani sistem; deformasyon sürecinde öksetik yapının genişleyici davranışını kullanarak şekil değiştirir, ardından belirli bir uyaranla aktive edildiğinde, hafızasında kayıtlı olan ilk geometriye geri döner. Bu çift

yönlü ve programlanabilir etkileşim, mekanik olarak duyarlı, geri dönüşlü ve çok fonksiyonlu yapılar geliştirilmesini mümkün kılar. Şekil 7'de, geri girintili (re-entrant) birim hücre kullanılarak tasarlanmış bir öksetik metamalzemeye şekil hafızası kazandırılmasına yönelik örnek bir tasarım sunulmuştur. Bu model, hem şekil hafızalı polimerin termomekanik geri kazanım yeteneğini hem de öksetik yapıların negatif Poisson oranı gibi mekanik avantajlarını birleştirmesi bakımından özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Sunulan tasarım, yükleme, soğutma, boşaltma ve yeniden ısıtma adımlarını içeren kapalı döngüsel bir süreç üzerinden şekil hafızası işlevinin nasıl kazandırıldığını ortaya koymaktadır.

3. SON GELİŞMELER (RECENT DEVELOPMENTS)

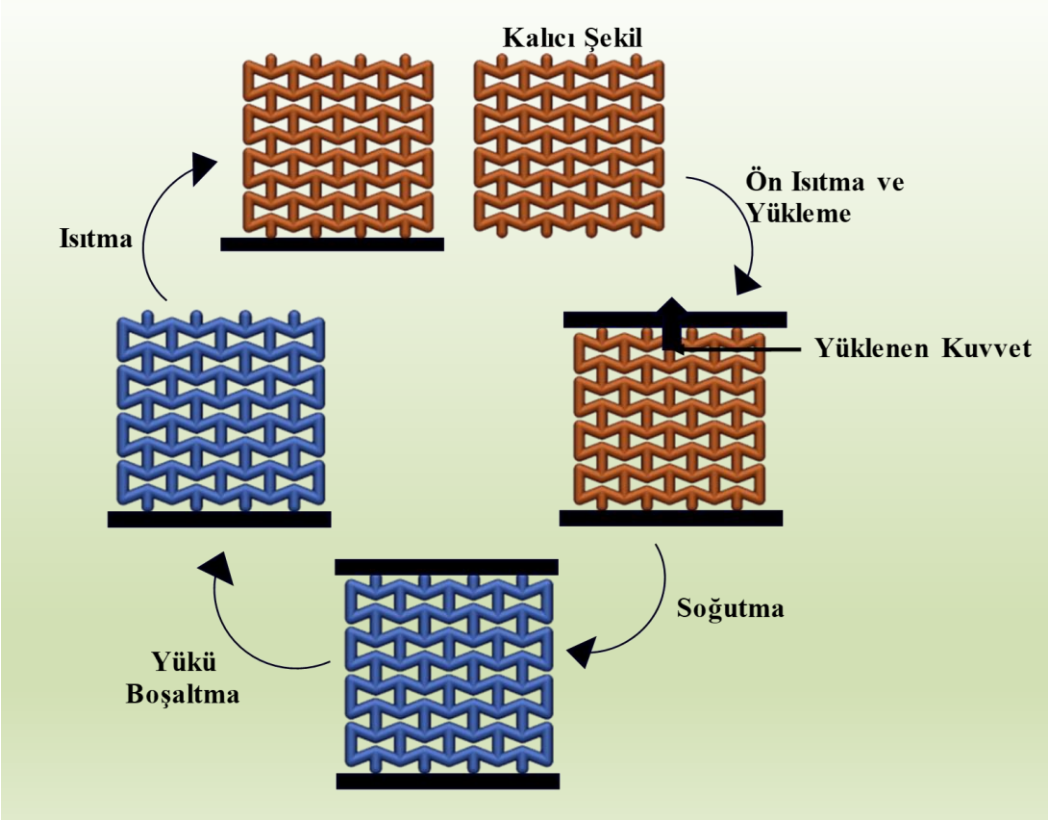
Son yıllarda şekil hafızalı öksetik metamalzemeler üzerine yapılan araştırmalar, bu malzemelerin benzersiz özelliklerini ve geniş uygulama potansiyellerini ortaya koymuştur. Özellikle negatif Poisson oranı gösterme yetenekleri, bu malzemelerin stres altında yanlamasına genişleyebilmesini sağlamaktadır. Bu özellik, onları birçok mühendislik ve biyomedikal alanda son derece değerli kılmaktadır. Şekil hafıza etkisi (ŞHE) ise, bu malzemelerin mekanik özelliklerini, özellikle Poisson oranı ve elastik modülü, dışsal uyaranlara (sıcaklık, elektriksel alan vb.) bağlı olarak dinamik şekilde değiştirebilmesini mümkün kılmaktadır. Böylece, şekil hafızalı öksetik metamalzemeler, programlanabilir ve uyarlanabilir özellikler sunarak çok çeşitli alanlarda uygulama imkânı tanımaktadır.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), şekil hafızalı öksetik metamalzemelerin mekanik ve termo-mekanik davranışlarının incelenmesinde son yıllarda giderek daha önemli bir araç haline gelmiştir. Deneysel maliyetleri azaltmak, tasarım optimizasyonu ve çok ölçekli mekanizmaları modellemek açısından SEY, metamalzeme araştırmalarında vazgeçilmez bir yöntemdir. Özellikle ABAQUS, COMSOL Multiphysics ve LS-DYNA gibi gelişmiş ticari yazılımlar kullanılarak geliştirilen modeller, viskoelastik davranış, faz geçişi, şekil hafıza etkisi ve öksetik deformasyon gibi karmaşık süreçlerin simülasyonunu mümkün kılmaktadır.

Zaman bağımlı şekil hafıza davranışlarını analiz etmek için en yaygın kullanılan modellerden biri Genel Maxwell Modelidir. Lei ve ark. (2019) [56], Poliaktik asit (PLA) tabanlı örgü yapılar üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, ABAQUS kullanarak periyodik sınır koşulları altında deneysel deformasyonları başarıyla simüle etmişlerdir. Bu yaklaşım hem hesaplama verimliliği hem de doğruluk sağlamıştır. Benzer şekilde, Wan ve ark. (2022) [57], C3D10 elemanları ve Williams-Landel-Ferry (WLF)

ÖRNEK



Şekil 7. Geri girintili birim hücre temel alınarak tasarlanan bu geometrik model, yapıya şekil hafızalı özellik kazandırma sürecine bir örnek (This geometric model, designed based on a re-entrant unit cell, illustrates the process of integrating shape memory functionality into the structure).

kayma fonksiyonunu kullanarak elastik modül ve Poisson oranı üzerine kritik bulgular sunmuştur.

Şekil hafızalı sistemlerde birden fazla bileşenin etkileşimi, hassas temas algoritmaları gerektirmektedir. Hassanin ve ark. (2020) [58], LS-DYNA kullanarak öksetik NiTi yapılar üzerine 7,62 mm APM2 mermisinin yüksek hızlı etkisini modellemişlerdir. Aşınan bir temas algoritması ve ince ağ yapısıyla yüksek hassasiyet sağlanmış; sürtünme ve ısı etkileri göz ardı edilerek model basitleştirilmiştir.

Li ve ark. (2021) [59], PLA tabanlı metamalzemelerde viskoelastik davranışı tanımlamak için ABAQUS içinde kullanıcı alt programı (UMAT) ile Maxwell modeli uygulamışlardır. Temsilci birim hücre ve periyodik sınır koşulları hem hesaplama süresini kısaltmış hem de deneysel yükleme koşullarını başarıyla yansıtmıştır.

Hou ve ark. (2023) [60], termoplastik poliüretan (TPU) gibi elastomerik malzemelerde büyük şekil değiştirme davranışını analiz etmek için neo-Hookean ve Ogden modellerini kullanmıştır. ABAQUS ortamında C3D8R elemanları ve genel temas koşulları ile yapılan simülasyonlar, deformasyon mekanizmalarına dair önemli içgörüler sunmuştur.

Chen ve ark. (2023) [61] Şekil 8'de gösterilen girintili üçgen eleman modellerini (Re-entrant triangular element model, RTEM) kullanarak 7×7 birim hücre içeren polietilen yapılar üzerinde 48°C sıcaklık değişimi etkisiyle oluşan geometrik dönüşümleri incelemişlerdir. Liu ve ark. (2023) [62] ise PLA'yı Maxwell modeliyle, TPU'yu ise doğrusal elastik olarak modelleyerek Poisson oranlarını hesaplamışlardır.

Lin ve ark. (2024) [63], yıldız şeklinde öksetik bir yapı ile kavisli kirişleri birleştiren çok-kararlı bir metamalzeme modeli geliştirerek, ABAQUS ortamında geri dönüşüm oranlarını ve Poisson oranını analiz etmiştir. Bu çalışma, y-ekseninde %94,18 ve x-ekseninde %91,20 geri dönüşüm oranları ile dikkat çekmiş; ayrıca −0,1499 gibi yüksek bir negatif Poisson oranı raporlanmıştır.

Park ve ark. (2024) [64], deneysel kuvvet-deformasyon eğrilerini SEY çıktılarıyla eşleştirerek kırılma davranışını analiz etmişlerdir. Kare ve yuvarlak kesimli öksetik örnekler arasındaki mukavemet farklarını belirleyerek, geometrik optimizasyonun performans üzerindeki etkisini vurgulamışlardır.

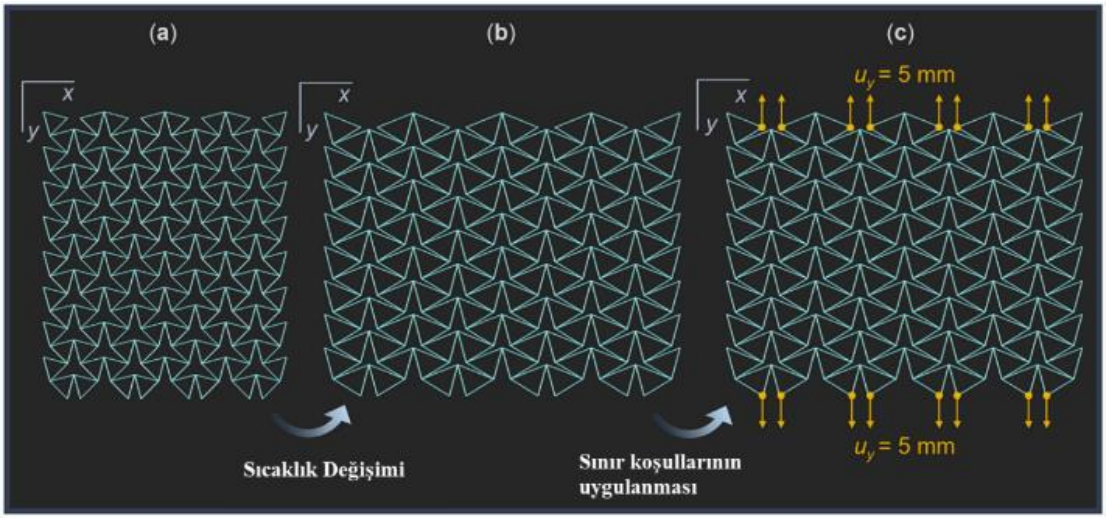
Bu gelişmeler, SEY'in şekil hafızalı öksetik metamalzemelerin tasarımında yalnızca doğrulama aracı değil, aynı zamanda yeni yapısal kavramların keşfine katkı sağlayan güçlü bir platform hâline geldiğini göstermektedir. Özellikle termo-mekanik modellerin ve kullanıcı tanımlı malzeme modellerinin yaygınlaşması, metamalzeme biliminin daha öngörülebilir ve kontrol edilebilir sistemler geliştirmesine olanak tanımaktadır.

3.2. Üretim Teknikleri (Production Techniques)

Gelişen üretim teknolojileri, şekil belleğine sahip malzemeler ve negatif Poisson oranı gösteren yapıları içeren yeni nesil yapay malzeme tasarımlarının gerçekleştirilmesinde önemli bir ivme kazandırmaktadır. Bu kapsamda, eklemeli imalat teknikleri ve hassas işleme yöntemleri, özgün tasarımların işlevsel malzemelere dönüştürülmesinde temel rol oynamaktadır. Özellikle eriterek biriktirme yöntemi, ışığa duyarlı reçine ile katılaştırma, püskürterek reçine biriktirme ve lazer ile kesme gibi teknikler, son dönemde yapılan çalışmalarda sıkça tercih edilen üretim yöntemleri olarak öne çıkmaktadır. Her bir yöntem, sunduğu teknik üstünlüklere göre farklı malzeme türleri ve yapısal karmaşıklık düzeylerine uygunluk göstermektedir.

Eriterek biriktirme yöntemi, düşük maliyetli ve çok yönlü olması sayesinde hem deneme amaçlı üretimlerde hem de işlevsel parça imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, termoplastik malzemenin katman katman eritilerek biriktirilmesine dayanır ve özellikle tasarım değişkenlerinin mekanik davranış üzerindeki doğrudan

ÖN GÖRÜNÜM



Şekil 8. Abaqus ortamında, (a) RTEM yapısının sonlu elemanlar modeli, (b) modele uygulanan sıcaklık değişimi ve (c) belirlenen sınır koşullarının gösterimi (In the Abaqus environment: (a) the finite element model of the RTEM structure, (b) the applied temperature change, and (c) the defined boundary conditions are shown) [61].

etkisini inceleme fırsatı sunmaktadır. Örneğin, Lei ve arkadaşları (2019) [56], dört kollu kare ağ yapıları mısır nişastası esaslı Polilaktik Asit (PLA) kullanarak üretmiş ve düzlemsel tasarımların silindirik yapılara dönüştürülebileceğini göstermiştir. Bodaghi ve arkadaşları (2019) [65] ise elastik özellik taşıyan poliüretan (TPU) bazlı şekil belleğine sahip polimer filamentler kullanarak programlanabilir yapılar elde etmiştir. Li ve arkadaşları (2021, 2022) [59,66], gözenekliliği değiştirilmiş örgü biçimleri ve at nalı şeklindeki yapıların mekanik tepkilerini incelemiştir. Wan ve arkadaşları (2022) [57] ise üçgen, kare ve altıgen örgülerin topolojik değişkenlerini analiz etmiştir. Yüksek sıcaklık dayanımına sahip polieter eter keton (PEEK) malzemesiyle üretim gerçekleştiren Ren ve arkadaşları (2022) [67], dönel simetrili kiral yapılara odaklanmıştır. Liu ve arkadaşları (2023) [62], çoklu başlık kullanarak PLA ve TPU malzemelerden çok bileşenli yapılar üretmiştir. Lin ve arkadaşları (2024) [63] ise yıldız biçimli negatif Poisson oranına sahip yapı ile eğrisel kiriş yapıyı birleştirerek işlevsel ve bütünleşik bir sistem elde etmiştir.

Stereolitografi (SLA), sıvı fotopolimer reçine tabakasını katman katman sertleştirmek için bir lazer veya dijital ışık kaynağı kullanan yüksek hassasiyetli bir eklemeli üretim yöntemidir. Dijital bir 3D model, ince katmanlara dilimlenir ve lazer, tasarıma göre reçineyi seçici olarak katılaştırır. Her katman tamamlandıktan sonra yapı platformu hareket ederek bir sonraki katmanın sertleştirilmesine olanak tanımaktadır. Yazdırma işlemi sona erdikten sonra parça, durulama, desteklerin çıkarılması ve UV kürleme gibi son işlemlere tabi tutulur. SLA, mükemmel yüzey kalitesi ve karmaşık detayları işleyebilme kabiliyeti sayesinde, prototip üretiminde özellikle dişçilik ve mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Pandini ve arkadaşları (2020) [68], yüksek hassasiyetli ayarlar kullanarak ürettikleri yapılarda, destek yerleşimi ve yapı yöneliminin yapısal kararlılık üzerinde doğrudan etkisi olduğunu göstermiştir.

PolyJet baskı yöntemi, sıvı fotopolimeri katman katman biriktirir ve her katmanı hızlı bir şekilde UV ışığıyla sertleştirir. Bu süreç, ŞHP metamalzemelerinin ayarlanabilir özelliklerle üretilmesini sağlamaktadır. Tao ve meslektaşları (2020) [69], ŞHP origami metamalzemeler üretmek için PolyJet 3D baskı teknolojisini kullanmıştır. Bir Objet 350 yazıcı ile fotopolimer katman katman biriktirilmiş ve UV ışığıyla kürlenerek çapraz bağlı ŞHP yapılar oluşturulmuştur. Başlangıçta katı ve camsı durumda olan ŞHP, camsı geçiş sıcaklığına (70 °C) ulaştığında yumuşayarak elastik hale gelmektedir. Böylece şekil hafızası davranışı sergilemektedir.

Lazer kesim, kontrollü kesme, kazıma veya desenleme işlemlerini gerçekleştirmek için bir lazer ışınının malzeme yüzeyine odaklanmasını içerir. Bu yöntem, özellikle karmaşık geometrilerin ve ince ayrıntıların üretiminde önemli avantajlar sunar ve metaller, polimerler, seramikler ile kompozitler gibi çeşitli malzemelere etkili bir şekilde uygulanabilir. Park ve arkadaşları (2024) [64], öksetik desenlere sahip ŞHA plakalarını lazerle keserek aktif bir öksetik akıllı metamalzeme geliştirmiştir. Tasarımda, iki eksen boyunca eşleştirilmiş deformasyona olanak tanıyan, uzunlamasına ve yanal yuvarlak kesimler içeren menteşeler oluşturulmuştur. Menteşe tasarımı, gerilim konsantrasyonunu en aza indirerek sağlam çift yönlü çalıştırma yetenekleri sağlamıştır. Bu yaklaşım, lazer kesimin ŞHA malzemeleriyle birleştirilerek ayarlanabilir öksetik metamalzemeler üretme potansiyelini vurgulamaktadır.

Bunlara ek olarak, köpükleştirme yöntemi gibi yardımcı üretim yöntemleri de öksetik yapılar elde etmek için kullanılmaktadır. Yao ve arkadaşları (2023) [70], şekil belleğine sahip epoksi reçineyi poliüretan köpükle birleştirerek, iki aşamalı sertleştirme ve sıkıştırma işlemleriyle kalıcı negatif bir Poisson oranına sahip köpük yapılar üretmiştir.

3.3. Karakterizasyon Yöntemleri (Characterization Methods)

Şekil belleğine sahip öksetik metamalzemelerin karakterizasyonu, bu malzemelerin mekanik, termal ve mikroyapısal özelliklerinin çok yönlü biçimde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Karakterizasyon teknikleri, sayısal öngörülerin deneysel verilerle karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, Poisson oranı, şekil geri kazanım verimliliği ve faz dönüşüm davranışı gibi performans parametrelerinin nicel olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Bu bölümde, literatürde sıkça kullanılan temel deneysel ve analitik yöntemler ile bu yöntemlerin kullanıldığı güncel örnek çalışmalar ele alınmaktadır.

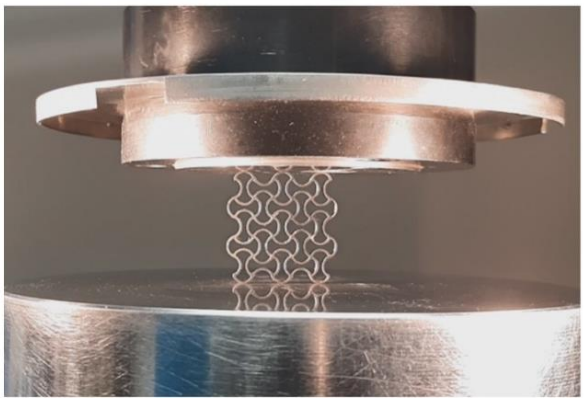
3.3.1. Mekanik karakterizasyon (Mechanical characterization)

Öksetik davranış ve şekil belleği performansını değerlendirmede en temel yöntemler mekanik testlerdir. Tek eksenli çekme ve basma testleri, gerilme-şekil değiştirme eğrileri, elastisite modülü (Young modülü) ve Poisson oranının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, Lei ve ark. (2019) [56], PLA malzemeden ürettikleri örgü yapıların mekanik performansını incelemek amacıyla tek eksenli çekme testleri gerçekleştirmiştir. Benzer şekilde, Li ve ark. (2021) [59], 25°C'de evrensel malzeme test cihazı kullanarak, 0,1 mm/s sabit hızda gerinim kontrollü basma testleri yapmış ve yük altındaki tepkileri analiz etmiştir. Wan ve ark. (2022) [57] ise oda sıcaklığında yaptıkları testlerle PLA esaslı metamalzemelerin elastik özelliklerini belirlemiş, yaklaşık 1,85 GPa Young modülü ve %9,2 uzama oranı elde etmiştir. Bu bulgular, statik yük altındaki performansın anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir.

Daha ayrıntılı deformasyon evrelerini incelemek amacıyla, yarı-statik basma testleri de yaygın olarak tercih edilmektedir. Hou ve ark. (2023) [60], hafif hücresel öksetik metamalzemelerin (LCAM) gerilme-şekil değiştirme eğrilerini üç evreye ayırmıştır: elastik

ERKEN GÖRÜNÜM

evre, burkulma ve yapısal asimetri içeren plato evresi ile yoğunlaşma evresi.



Şekil 9. Bir basma testi örneği (An example of a compression test) [71]

Çalışmada, kiral elemanların yanal rijitliği artırdığı ve Poisson oranını stabilize ettiği sonucuna ulaşılmıştır. En düşük negatif Poisson oranı (−0,1499) LCAM-4R yapısında gözlemlenmiş ve uzatılmış öksetik davranış sergilenmiştir.

Geniş gerinim aralıklarında malzeme davranışını analiz etmek amacıyla, Bodaghi ve ark. (2019) [65], poliüretan bazlı şekil belleği polimerlerini %40'a kadar gerinimle, 23°C ve 85°C sıcaklıklarında test etmiş ve yapısal bütünlüğün yanı sıra enerji sönümleme kapasitesinin korunduğunu raporlamıştır.

3.3.2. Termal karakterizasyon (Thermal characterization)

Şekil belleği etkisinin görüldüğü sistemlerde, termal analiz yöntemleri kritik öneme sahiptir. Dinamik mekanik analiz (DMA), sıcaklık değişimleri altında malzemelerin viskoelastik özelliklerini ölçmeye olanak tanır. Bodaghi ve ark. (2019) [65], poliüretan SMP'leri −20°C ile 85°C arasında analiz ederek depolama ve kayıp modüllerini ve cam geçiş sıcaklığını (T_g) belirlemiştir. Li ve ark. (2021) [59], PLA tabanlı metamalzemelerde aynı yöntemi −30°C ile 110°C aralığında, 1 Hz frekansta uygulayarak termomekanik davranış ve şekil belleği geçişlerini haritalamıştır. Li ve ark. (2022) [66] ise 0 °C ile 110 °C arasında, 2 °C/dk ısıtma hızı ve 0,1% genlikte yapılan ölçümlerle malzemenin viskoelastik davranışını ve geçiş bölgelerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Yao ve ark. (2023) [70], ŞHP epoksi/poliüretan köpük yapılar üzerinde DMA'yı 0 °C ile 100 °C arasında 1Hz frekansta uygulamış, ayrıca termogravimetrik analiz (TGA) ile 800°C'ye kadar ısıl kararlılığı değerlendirmiştir. Bu çalışma, cam geçiş sıcaklığındaki kaymalar ile termal dayanıklılık arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur.

3.3.3. Şekil geri kazanım ve hareket analizi (Shape recovery and motion analysis)

Şekil geri kazanım kabiliyeti, bu tür malzemelerin en önemli işlevlerinden biridir. Bu özelliğin ölçülmesinde özel test protokolleri gereklidir. Yao ve ark. (2023) [70], şekil belleğine sahip köpükleri %25–%50 arasında sıkıştırmış; T_g + 20 °C'de ısıtma-soğutma döngüleri uygulayarak geri kazanım oranlarını ölçmüştür. Yükleme sırasında Poisson oranı, dijital görüntü korelasyonu (Digital Image Corelation, DIC) yöntemiyle izlenmiş; geri kazanım sonrası mikroyapı ise taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

Lin ve ark. (2024) [63], 70 °C su banyosunda test ettikleri metamalzemelerin önceden programlanmış örnekleri sıkıştırarak Poisson oranını ölçmüş ve y-ekseninde %94,18 şekil geri kazanımı elde etmiştir. Bu çalışma, termal uyarımın çok kararlı yapısal geri kazanımın sağlanmasında etkin bir rol oynadığını göstermiştir.

4. ŞEKİL HAFIZALI ÖKSETİK METAMALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI (APPLICATION AREAS of SHAPE MEMORY AUXETIC METAMATERIALS)

Son yıllarda şekil hafızalı öksetik metamalzemeler (ŞHÖ-MM'ler), uyarlanabilirlik, yeniden programlanabilirlik ve çok işlevlilik özellikleri nedeniyle çeşitli mühendislik alanlarında dikkat çekici uygulamalara konu olmuştur. Özellikle biyomedikal mühendisliği, esnek elektronikler, robotik sistemler, giyilebilir teknolojiler ve darbe dayanımı gerektiren yapılar gibi çok disiplinli alanlarda bu yapıların kullanımı hızla artmaktadır.

Bodaghi ve Liao (2019) [65] tarafından geliştirilen 4B baskı tabanlı ŞHP metamalzemeler, cam-kauçuk geçişine dayanan termomekanik programlanabilir ve yapısal kararlılık sunmuştur. Bu metamalzemeler, kendiliğinden genişleyebilen stentler, yük taşıyan öksetik iskeletler ve dokunmatik ekran sistemleri gibi çeşitli biyomedikal cihazlarda başarıyla uygulanmıştır.

Jebellat ve çalışma arkadaşları (2020) [72], negatif Poisson oranına sahip yapıları çekme ve basma altında incelemiş; ısıtma ile tetiklenen gerilme ve şekil geri kazanımı özelliklerini ortaya koymuştur. Bu özelliklerin dinamik biyomedikal ortamlar için adaptif stent tasarımlarında önemli avantajlar sağlayacağı vurgulanmıştır. Wan ve ekibi (2022) [57] ise 4B baskı teknolojisiyle üretilen öksetik 2D kafes yapıların programlanabilir mekanik davranışlarını ortaya koyarak, aktif tıbbi implantlar ve vücut içi cihazlar için yeni olanaklar sunmuştur.

Bu alanda dikkat çeken bir başka gelişmede, karbon nanotüp (Carbon nanotube, CNT) katkılı şekil hafızalı polimer köpük kullanılarak uzaktan, temassız fototermal aktüasyonun sağlanmasıdır. Çift bileşenli köpük sistemi içinde yalnızca CNT içeren bölge, 5 dakikalık ışık maruziyeti ile 90 °C üzerine çıkarak orijinal şekline geri dönerken, CNT içermeyen köpük ise 65 °C altında kalarak hareketsiz kalmıştır. Bu durum, kontrollü ısı iletimi ve yerel aktüasyon imkânı sunmaktadır [70].

Zheng ve çalışma arkadaşları (2022) [73], ışığa duyarlı PDMS (polydimethylsiloxane) temelli şekil hafızalı polimer kullanarak, öksetik, kiral ve burkulma kaynaklı deformasyonlara sahip esnek metamalzemeler

ÖN GÖRÜNÜM

geliştirmiştir. Seçici ışık uyarımıyla belirli bölgelerde deformasyon sağlanabilirken, küresel ışık uyarımıyla yapılar orijinal şekillerine dönebilmektedir. Bu yeniden programlanabilirlik, özellikle yumuşak robotik uygulamalarda yüksek potansiyel taşımaktadır.

Esnek elektronik alanında, Ren ve ekibi (2022) [67], gümüş kaplamalı öksetik ağ içerisine birleştirilmiş LED'ler kullanarak gerilebilir, döndürülebilir ve bükülebilir bir 2D metamalzeme geliştirmiştir. Bu sistem, farklı mekanik deformasyonlara rağmen elektriksel iletkenliğini koruyarak giyilebilir elektronikler ve aşırı çevresel koşullara dayanıklı akıllı cihazlar için umut vadetmektedir.

Robotik uygulamalarda, şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA) kullanılarak geliştirilen minyatür öksetik bir robotik tutucu, Joule ısıtması ile kapanıp soğutma ile açılabilmektedir. Bu tutucu, küçük nesnelerin hassas bir şekilde kavranması ve bırakılması gibi görevlerde başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak, ŞHA menteşe bölgelerinde oluşan bükülme kaynaklı hasarlar, yapısal tasarımda dikkatle ele alınması gereken önemli bir husustur [64].

Giyilebilir teknolojilerde, öksetik metamalzemeler insan eklem hareketlerine uyum sağlayan yapılar olarak öne çıkmaktadır. Dirsek ve diz eklemleri üzerinde test edilen kafes yapılar, hareket sırasında esnekliklerini ve nefes alabilirliklerini koruyarak uzun süreli kullanımda konfor sağlamıştır. Bu tasarımlar, özellikle kas aktivitesini ölçen giyilebilir elektromiyografik (EMG) cihazlarda kullanılmıştır. Öksetik ızgaralar üzerine entegre edilen esnek gümüş nanotel (Ag Nanowire, AgNW) elektrotlar, yüksek sinyal kararlılığı ve düşük gürültü oranı elde edilmesini sağlamıştır [74].

Hussnain ve ekibi (2024) [75], poliüretan bazlı şekil hafızalı polimer matrisi ile birleştirilmiş çok işlevli bir kompozit yapı olan "akıllı şekil hafızalı polimer kompozit" (intelligent shape memory composite, iSMPC) geliştirmiştir. Bu yapı, termal ve basınca duyarlı elektriksel direnç (piezorezistif) algılama özelliklerinin yanı sıra programlanabilir şekil değiştirme ve geri kazanım fonksiyonlarına sahiptir. Geliştirilen öksetik yapının Poisson oranı -0,44, şekil geri kazanımı %96, şekil sabitleme oranı %88 ve hacimsel kompaktlaşma oranı %62 olarak ölçülmüştür. Bu değerler, yapının yumuşak robotik, katlanabilir sistemler ve akıllı altyapılar gibi uygulamalarda yüksek performans sunabileceğini göstermektedir.

Darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda, Salmani ve Rezai (2025) [76], şekil hafızalı alaşımlar ile öksetik yapıları birleştirerek kinetik enerjiyi etkin biçimde absorbe eden hibrit sistemler geliştirmiştir. Bu sistemler, deformasyon sonrası kendini toparlayabilme yetenekleri sayesinde çarpışma enerjisini dağıtarak yapı bütünlüğünü korumuş ve başta uzay-havacılık, otomotiv ile kişisel koruyucu donanımlar olmak üzere birçok sektörde kullanım potansiyeli sunmuştur.

Bu gelişmeler, şekil hafızalı öksetik metamalzemelerin yalnızca mekanik performans açısından değil, aynı zamanda fonksiyonel çeşitlilik ve uyarlanabilirlik açısından da önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Özellikle 4B baskı teknolojileri, ışığa duyarlılık, nanomalzeme katkıları ve çoklu fiziksel yanıt verme özellikleriyle bu malzemeler, geleceğin akıllı ve adaptif mühendislik sistemlerinin temelini oluşturmaktadır.

5. FIRSATLAR VE ZORLUKLAR (OPPORTUNITIES and CHALLENGES)

Şekil hafızalı öksetik metamalzemeler (ŞHÖ-MM), öksetik yapıların üstün mekanik performansını şekil hafızalı malzemelerin çevresel uyaranlara duyarlılığıyla birleştirerek çok işlevli, akıllı ve adaptif sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yönleriyle ŞHÖ-MM'ler; biyomedikal, mühendislik, havacılık, otomotiv, yumuşak robotik ve esnek elektronik gibi birçok alanda önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak, üretim teknolojileri, malzeme uyumluluğu, sayısal modelleme ve uzun vadeli dayanıklılık gibi konular halen önemli zorluklar barındırmaktadır. Bu bölümde, ŞHÖ-MM'lerin sunduğu başlıca fırsatlar ve karşılaşılan teknik zorluklar detaylı şekilde ele alınmaktadır.

5.1. Fırsatlar (Opportunities)

Şekil hafızalı öksetik metamalzemeler, insan dokularını taklit edebilen yapılardır. Negatif Poisson oranına sahip öksetik geometriler, gerilme altında genişleyerek hücre çoğalmasını desteklemekte [77] ve gerilmenin dengeli dağılmasını sağlamaktadır. Şekil hafızalı alaşımlar (örneğin NiTi), vücut sıcaklığıyla aktive olarak kemiğe entegre olabilmektedir. Li ve arkadaşlarının [78] geliştirdiği biyouyumlu implant, kendini sabitleyebilen bir yapı sunarak kemik kaynaşmasını (osteointegrasyon) artırmakta ve iyileşme sürecini hızlandırmaktadır.

ŞHÖ-MM'ler, tersine çevrilebilir şekil değişimi ile çok eksenli deformasyona olanak tanımaktadır. Bu özellik, yumuşak robotik sistemlerde yüksek derecede esneklik ve işlevsellik sağlamaktadır. Öksetik yapıların şekil hafızalı alaşımlarla birleştirilmesi, aktüatörlerde programlanabilir hareketlerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Yapılan çalışmalarda %90'a varan şekil geri kazanımı rapor edilmiştir. Bu sistemler, geleneksel pnömatik robotlara kıyasla daha kompakt ve güvenilir çözümler sunmaktadır [79].

Robotik sistemlerle birlikte, ŞHÖ-MM'ler esnek ve yeniden şekillenebilir giyilebilir elektroniklerde de kullanılmaktadır. Yuan ve ekibi [74], EMG sinyallerini algılayabilen, nefes alabilir ve vücut hareketlerine uyum sağlayan bir sensör tasarlamıştır. Bu tür sistemler, sağlık takibi ve insan-makine arayüzlerinde etkili uygulama alanına sahiptir.

Koruyucu sistemler açısından, öksetik yapılar darbe enerjisini yayarak koruma sağlamaktadır. Negatif Poisson oranı, enerjinin daha geniş yüzeye yayılmasına yardımcı olur [80]. Şekil hafızalı öksetik köpükler, darbeye karşı dayanıklıdır ve deformasyon sonrası orijinal formunu geri kazanabilir [81-82]. Bu özellik,

ERKEN GÖRÜNÜM

kask astarları ve dizlik gibi koruyucu donanımlarda önemli avantajlar sağlamaktadır.

Hafiflik, hacimsel küçülme ve programlanabilir şekil değişimi gibi özellikler sayesinde, ŞHÖ-MM'ler havacılık ve uzay teknolojileri için cazip bir alternatif oluşturmaktadır [83]. Malakooti ve arkadaşları [84] tarafından geliştirilen öksetik meta-aerogeller, sıkıştırıldıklarında hacimce küçülmekte, soğutulduklarında formu korumakta ve ısıtıldıklarında orijinal boyutlarına dönmektedir. Bu davranış, uzay araçlarının modüler bileşenlerinin taşınması ve açılabilir güneş panelleri gibi yapılarda önemli faydalar sunmaktadır. Ayrıca, öksetik morfing kanat yapıları ile uçak performansının hız ve yük koşullarına göre optimize edilmesi mümkündür.

Bu yapılar, çarpışma anında enerjiyi soğurma ve titreşimleri sönümleme özellikleriyle otomotiv güvenlik sistemlerinde de etkili rol oymaktadır. Özellikle öksetik yapılı tamponlar, darbe enerjisinin daha geniş bir alana yayılmasını sağlayarak yolcu güvenliğini artırır. Şekil hafızalı bileşenler sayesinde, deformasyon sonrası kendini onarabilen veya şekil değiştiren parçaların üretimi mümkün hale gelmektedir. Bu yaklaşım hem araç bakım maliyetlerini azaltmakta hem de yapısal dayanıklılığı artırmaktadır.

Deprem yalıtımı ve enerji yönetimi gibi alanlarda, ŞHÖ-MM'lerin adaptif davranışları kritik avantajlar sunmaktadır. Öksetik yapılar, sismik dalgaları farklı frekanslarda dağıtarak yapının titreşim tepkisini azaltabilir [85]. Ayrıca, şekil hafızalı elemanlar, sıcaklık veya gerilme değişimlerine bağlı olarak bina cepheleri ya da iç mekân bölmelerinde otomatik konfigürasyon değişikliklerine olanak tanımaktadır. Bu sayede hem yapısal güvenlik hem de enerji verimliliği artırılabilmektedir.

5.2. Zorluklar (Challenges)

ŞHÖ-MM'lerin karmaşık geometrileri nedeniyle, ileri düzey üretim teknolojilerine ihtiyaç duymaktadır. Lazer destekli yazıcılar, çok malzemeli 3B baskı sistemleri ve mikro-kalıplama gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu üretim teknikler yüksek maliyetli olup sınırlı üretim hızlarına sahiptir. Abdelaal ve Darwish [86], böylesi detaylı mimarilerin endüstriyel ölçekte ekonomik olarak hâlâ uygulanabilir olmadığını belirtmektedir. Bu nedenle, yüksek hassasiyetin yanı sıra hızlı ve düşük maliyetli üretim çözümleri geliştirilmedikçe, ŞHÖ-MM teknolojilerinin yaygın endüstriyel kullanımı sınırlı kalacaktır.

Bu yapıların çok bileşenli doğası, farklı malzemelerin birlikte çalışmasını zorunlu kılar. Elastomer matris içerisinde yer alan şekil hafızalı alaşım teller veya farklı polimer fazlar, ara yüzeylerde gerilim birikimine neden olabilir. Malzeme uyumsuzluğu, yapısal ayrılma, çatlama veya şekil hafızası etkisinin kaybı gibi sorunlara yol açabilir. Bu nedenle, malzeme seçiminin yanı sıra, ara yüz mühendisliği, uygun bağlayıcı ajanların kullanımı ve termal genleşme katsayılarının uyumlu olacak şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Malzeme uyumluluğunun ötesinde, ŞHÖ-MM'ler tekrarlanan deformasyon döngüleri altında yorulma etkilerine karşı hassas yapıdadır. Karmaşık öksetik geometrilerde lokal gerilim yığılmaları oluşabilir ve bu durum özellikle ince duvarlı yapılarda çatlama riskini artırır. Ayrıca, şekil hafızalı alaşımlar ve polimerlerin uzun süreli çevrimsel yüklemeler sonrasında mekanik özelliklerinde bozulmalar meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla, ŞHÖ-MM'lerin servis ömürleri boyunca kararlı performans göstermesi için yorulma analizlerinin gerçekleştirilmesi ve tasarımlarının buna göre optimize edilmesi gereklidir.

Mekanik, termal ve yapısal davranışlarının simülasyonu için çok ölçekli, çok fiziksel modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak mevcut sayısal araçlar genellikle küçük deformasyon varsayımlarına dayanmaktadır. Ayrıca, yüksek doğruluklu simülasyonlar için önemli derecede hesaplama gücü gerektirmektedir. Bu sınırlılıklar, hızlı prototipleme ve ürün geliştirme süreçlerini yavaşlatmakta, gerçekçi tasarım senaryolarının kapsamını daraltmaktadır. Bu alandaki temel gereksinimler arasında, gelişmiş hesaplamalı modelleme tekniklerinin (örneğin, hücresel homojenizasyon, kullanıcı tanımlı materyal modelleri) bir arada uygulanması ve doğrulama testlerinin artırılması yer almaktadır.

6. GELECEK PERSPEKTİFLERİ (FUTURE PERSPECTIVES)

Şekil hafızalı öksetik metamalzemeler, doğada bulunmayan özellikleri yapay yollarla sunmaktadır [87]. Bu yapılar, şekil hafızalı polimerlerin veya alaşımların negatif Poisson oranına sahip geometrilerle birleşmesiyle elde edilir. Gelecekte bu alandaki gelişmeler, malzeme bilimi, mekanik tasarım, hesaplamalı modelleme ve üretim teknolojilerinin birlikte evrilmesiyle şekillenecektir.

Özellikle, 4B yazıcı teknolojileri, şekil hafızalı polimerlerle karmaşık öksetik kafeslerin üretimini mümkün kılmaktadır [57]. Bu yöntemle üretilen malzemelerin davranışı, üretim sonrası sıcaklıkla programlanabilir hâle gelir. Aynı anda farklı sertlikte malzemelerin basılabildiği çok malzemeli 3B yazıcılar sayesinde mekanik performans ve çevresel tepkiler birlikte kontrol altına alınabilmektedir. Örneğin, Chen ve Zheng'in [88] çalışmasında bu teknikle üretilen yapılar, yapay kaslar ve aktüatör sistemleri gibi uygulamalarda umut vaat etmiştir.

Üretim teknolojilerinin yanı sıra, mikro ölçekte imalat yöntemleri de büyük önem taşımaktadır. Özellikle mikro elektro-mekanik sistemler (MEMS) gibi mikro boyutlu uygulamalarda, düşük yoğunluklu ve yüksek geometrik karmaşıklığa sahip yapıların üretimi için bu teknikler kritik rol oynamaktadır. İki-foton polimerizasyonu gibi teknikler, yüksek çözünürlükte ve hassas üretim yeteneğini desteklemektedir.

Üretim tekniklerinin gelişimiyle birlikte, malzeme geliştirme alanında biyoçözünür polimerlerle oluşturulan

ERKEN GÖRÜNÜM

nanokompozit sistemlerin önemi giderek artmaktadır [89]. Poli(ε-kaprolakton) ve poli(laktid) gibi polimerler, medikal implantlar için uygunluk gösterirken, nanoparçacık takviyesi sayesinde bu sistemler hem mekanik olarak güçlendirilmekte hem de fonksiyonel özellikler kazanmaktadır. Örneğin, Fe_3O_4 katkılı nanoparçacık içeren kompozit sistemlerde uzaktan kontrollü şekil değişimi sağlanabilmiştir. Bu tür yapılar, aynı anda çevre dostu iskelet sistemleriyle birlikte akıllı işlevler de sunabilmektedir [90].

Tasarım süreçlerinde ise hesaplamalı araçlar ve yapay zekâ [91] uygulamaları giderek daha fazla rol oynamaktadır. Sonlu elemanlar analizleri, topoloji optimizasyonu ve genetik algoritmalar kullanılarak yüksek verimlilikte tasarımlar elde edilebilmektedir. Yapay zekâ destekli yaklaşımlar, büyük veri kümelerinden öğrenerek yeni yapı geometrileri oluşturabilmekte ve hedeflenen Poisson oranı ya da mekanik özellikler otomatik olarak optimize edilebilmektedir. Ayrıca, akıllı aktüatör sistemleri için çift yönlü harekete olanak tanıyan özel öksetik yapılar da bu sayede tasarlanabilmektedir [64].

Tüm bu gelişmeler ışığında, şekil hafızalı öksetik metamalzemelerin robotik, biyomedikal, uzay, savunma ve enerji gibi pek çok alanda kullanımı daha da yaygınlaşacaktır. Disiplinler arası iş birlikleri ve ileri üretim teknolojilerindeki yeniliklerle birlikte, bu malzemelerin çok işlevli ve çevreye duyarlı çözümler sunma potansiyeli de artacaktır.

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu derleme çalışması, şekil hafızalı malzemeler (ŞHM) ile öksetik yapıların birleşiminden oluşan şekil hafızalı öksetik metamalzemelerin (ŞHÖ-MM) yapısal ilkelerini, üretim yöntemlerini, karakterizasyon süreçlerini ve potansiyel uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele alarak, alandaki Türkçe kaynak eksikliğini gidermekte ve literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. ŞHM'lerin çevresel uyaranlara yanıt vererek programlanabilir şekil değişimleri gerçekleştirme yetenekleri, öksetik yapıların negatif Poisson oranı gibi olağandışı mekanik tepkileriyle bir araya getirilerek geri dönüşümlü, uyarlanabilir ve çok işlevli sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Çalışmada, ölçek bağımlı mekanik davranışlar ile birlikte geri-kıvrımlı, kiral, döner-rijit, origami tabanlı gibi çeşitli öksetik geometri türleri; ayrıca alaşım, polimer, seramik ve jel gibi farklı ŞHM sınıfları incelenmiştir. Bu bağlamda hem malzeme hem de yapı düzeyinde çift yönlü programlanabilirliğe sahip metamalzeme sistemlerinin tasarımına dair güncel yaklaşımlar sunulmuştur.

Üretim teknikleri açısından eriterek biriktirme, SLA, PolyJet ve lazer kesim gibi yöntemlerin sunduğu olanaklar değerlendirilmiş; karakterizasyon aşamasında ise mekanik testlerden termal analizlere, şekil geri kazanım ölçümlerinden mikroyapı incelemelerine kadar birçok yöntem irdelenmiştir.

Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemine dayalı çok fiziksel ve çok ölçekli modellemelerin, bu karmaşık yapıların davranışlarını öngörmede kritik rol oynadığı vurgulanmıştır. ABAQUS ve LS-DYNA gibi yazılımlarla geliştirilen modeller, şekil hafızası etkisi, viskoelastik davranışlar ve öksetik deformasyonlar arasındaki etkileşimlerin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

Biyomedikal implantlardan yumuşak robotik sistemlere, giyilebilir elektroniklerden darbe dayanımı yüksek koruyucu yapılara kadar uzanan uygulama örnekleri, bu malzeme sistemlerinin geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ancak; üretim sürecindeki zorluklar, malzeme uyumluluğu, yorulma davranışları ve modelleme karmaşıklığı gibi teknik engeller, çözülmesi gereken önemli konular arasında yer almaktadır.

Gelecekte, 4B yazıcı teknolojileri, çok malzemeli üretim sistemleri, yapay zekâ tabanlı tasarım optimizasyonları ve biyobozunur nanokompozitler gibi yeniliklerin ŞHÖ-MM sistemlerinin daha işlevsel ve yaygın hâle gelmesinde belirleyici olacağı öngörülmektedir. Disiplinler arası iş birlikleri ve ileri mühendislik yaklaşımları sayesinde, bu hibrit metamalzemelerin özellikle sağlık, havacılık, uzay, otomotiv ve yapı mühendisliği gibi stratejik alanlarda yeni nesil çözümler sunması beklenmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

FKA-2024-3938 numaralı proje ile vermiş oldukları destekten dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI
(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Gülcan AYDIN: Makalenin yazımı, düzeltilmesi ve yayına hazırlanması işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Hacer ÇELEBİ: Makalenin yazımı ve düzeltilmesi işlemlerini gerçekleştirmiştir.

İdris CANDAN: Makalenin yazımı ve düzeltilmesi işlemlerini gerçekleştirmiştir.

Sait Eren SAN: Makalenin yazımı ve düzeltilmesi işlemlerini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

ERKEN GÖRÜNÜM

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Veselago V. G., "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ε and μ", ***Soviet Physics Uspekhi***, 10(4): 509, (1968).

[2] Pendry J. B., Holden A. J., Robbins D. J. and Stewart W. J., "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", ***IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques***, 47(11): 2075–2084, (1999).

[3] Smith D. R., Pendry J. B. and Wiltshire M. C. K., "Metamaterials and Negative Refractive Index", ***Science***, 305(5685): 788–792, (2004).

[4] Aydın G., & San S. E., "Breaking the limits of acoustic science: A review of acoustic metamaterials", ***Mater. Sci. Eng. B***, 305, 117384, (2024).

[5] Yaman, P., Türkeş E., & Yuksel O. "Determination of the Construction Material for Phononic Band Gap Structures by Tribological Performance", ***Politeknik Dergisi***, 28(1):27-34, (2025).

[6] Wayman C. M., "Shape memory alloys", ***MRS Bulletin***, 18(4), (1993).

[7] Saxena K. K., Das R., Calius E. P., "Three Decades of Auxetics Research − Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review", ***Adv. Eng. Mater.***, 18(11): 1847–1870, (2016).

[8] Erdoğuş H. B. "Negatif Poisson Oranındaki Stent Tasarımının Üç Katmanlı Arter ve Asimetrik Plak Yapısına Göre Sanki-Statik Analizi", ***Politeknik Dergisi***, 27(5):1673–1680, (2024).

[9] Spanos I, Vangelatos Z, Grigoropoulos C, Farsari M., "Design and Characterization of Microscale Auxetic and Anisotropic Structures Fabricated by Multiphoton Lithography", ***Nanomaterials***, 11(2):446, (2021).

[10] Dudek K. K., Iglesias Martínez J. A., Ulliac G., Kadic M., "Micro-Scale Auxetic Hierarchical Mechanical Metamaterials for Shape Morphing", ***Adv. Mater.***, 34:2110115, (2022).

[11] Gaspar, N., Smith, C.W., Miller, E.A., Seidler, G.T. and Evans, K.E., "Quantitative analysis of the microscale of auxetic foams", ***Phys. Stat. Sol. (b)***, 242:550-560, (2005).

[12] Portone F., Amorini M., Montanari M., Pinalli R., Pedrini A., Verucchi R., Brighenti R., Dalcanale E., "Molecular Auxetic Polymer of Intrinsic Microporosity via Conformational Switching of a Cavitand Crosslinker", ***Adv. Funct. Mater.***, 33:2307605, (2023).

[13] Lyngdoh G. A., Kelter N. K., Doner S., Krishnan N. M. A., Das S., "Elucidating the auxetic behavior of cementitious cellular composites using finite element analysis and interpretable machine learning", ***Mater Des.***, 213:110341, (2022).

[14] Caddock B. D., Evans K. E., "Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties", ***J. Phys. D Appl. Phys.***, 22(12), (1989).

[15] Srivastava C., Mahesh V., Guruprasad P. J., Petrinic N., Scarpa F., Harursampath D., Ponnusami S. A., "Effect of damage evolution on the auxetic behavior of 2D and 3D re-entrant type geometries", ***Mech. Mater.***, 193: 104980, (2024).

[16] Kolken H. M. A., Zadpoor A. A., "Auxetic mechanical metamaterials", ***RSC Adv.***, 7(9): 5111–5129, (2017).

[17] Lakes R., "Advances in negative Poisson's ratio materials", ***Adv. Mater.***, 5(4): 293–296, (1993).

[18] Lakes R., "Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio", ***Science,*** 235(4792): 1038–1040, (1987).

[19] Del Broccolo S., Laurenzi S., Scarpa F., "AUXHEX – A Kirigami inspired zero Poisson's ratio cellular structure", ***Compos. Struct.***, 176: 433–441, (2017).

[20] Erdoğan İ., & Toktas İ., "Investigation of The Effect of Geometry Inner Thickness on New Designed Auxetic Structure", ***Politeknik Dergisi***, 26(2):901–912, (2023).

[21] Alderson K. L., Evans K. E., "The fabrication of microporous polyethylene having a negative Poisson's ratio", ***Polymer***, 33(20): 4435–4438, (1992).

[22] Masters I. G., Evans K. E., "Models for the elastic deformation of honeycombs", ***Compos. Struct.***, 35(4): 403–422, (1996).

[23] Smith C. W., Grima J. N., Evans K. E., "A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model", ***Acta Mater.***, 48(17): 4349–4356, (2000).

[24] Yang L., Harrysson O., West H., Cormier D., "Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing", ***Int. J. Solids Struct.***, 69–70: 475–490, (2015).

[25] Wang X. T., Wang B., Li X. W., Ma L., "Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures", ***Int. J. Mech. Sci.***, 131–132: 396–407, (2017).

[26] Guo M. F., Yang H., Zhou Y. M., Ma L., "Mechanical properties of 3D hybrid double arrow-head structure with tunable Poisson's ratio", ***Aerosp. Sci. Technol.***, 119: 107177, (2021).

[27] Jefferson A., Schneider J., Schiffer A., Hafeez F., Kumar S., "Dynamic crushing of tailored honeycombs realized via additive manufacturing", ***Int. J. Mech. Sci.***, 219: 107126, (2022).

[28] Spadoni A., Ruzzene M., "Elasto-static micropolar behavior of a chiral auxetic lattice", ***J. Mech. Phys. Solids***, 60(1): 156–171, (2012).

[29] Alderson A., et al., "Elastic constants of 3-, 4- and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading", ***Compos. Sci. Technol.***, 70(7): 1042–1048, (2010).

[30] Dudek K. K., Gatt R., Mizzi L., Dudek M. R., Attard D., Grima J. N., "Global rotation of mechanical metamaterials induced by their internal deformation", ***AIP Adv.***, 7(9): 95121, (2017).

[31] Miller W., Smith C. W., Scarpa F., Evans K. E., "Flatwise buckling optimization of hexachiral and tetrachiral honeycombs", ***Compos. Sci. Technol.***, 70(7): 1049–1056, (2010).

[32] Lai C. Q., Daraio C., "Highly porous microlattices as ultrathin and efficient impact absorbers", ***Int. J. Impact Eng.,*** 120: 138–149, (2018).

[33] Agnese F., Remillat C., Scarpa F., Payne C., "Composite chiral shear vibration damper", ***Compos. Struct.***, 132: 215–225, (2015).

[34] Spadoni A., Ruzzene M., "Structural and Acoustic Behavior of Chiral Truss-Core Beams", ***J. Vib. Acoust.***, 128(5): 616–626, (2006).

[35] Wei K., Peng Y., Qu Z., Pei Y., Fang D., "A cellular metastructure incorporating coupled negative thermal

ERKEN GÖRÜNÜM

expansion and negative Poisson's ratio", ***Int. J. Solids Struct.***, 150: 255–267, (2018).

[36] Yu H., Wu W., Zhang J., Chen J., Liao H., Fang D., "Drastic tailorable thermal expansion chiral planar and cylindrical shell structures explored with finite element simulation", ***Compos. Struct.***, 210: 327–338, (2019).

[37] Grima J. N., et al., "On the auxetic properties of generic rotating rigid triangles", ***Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.***, 468(2139): 810–830, (2012).

[38] Tang Y., Yin J., "Design of cut unit geometry in hierarchical kirigami-based auxetic metamaterials for high stretchability and compressibility", ***Extreme Mech. Lett.***, 12: 77–85, (2017).

[39] Vavlekas D., et al., "Role of PTFE paste fibrillation on Poisson's ratio", ***Polym. Test.***, 61: 65–73, (2017).

[40] Ma P., Chang Y., Boakye A., Jiang G., "Review on the knitted structures with auxetic effect", ***J. Text. Inst.***, 108(6): 947–961, (2017).

[41] Attard D., Casha A. R., Grima J. N., "Filtration Properties of Auxetics with Rotating Rigid Units", ***Materials,*** 11(5): 725, (2018).

[42] Wang Y., Alsaleh N. A., Djuansjah J., Hassanin H., El-Sayed M. A., Essa K., "Tailoring 3D Star-Shaped Auxetic Structures for Enhanced Mechanical Performance", ***Aerospace***, 11(6): 428, (2024).

[43] Wang W., Wang J., Hai H., Xu W., Yu X., "Study of In-Plane Mechanical Properties of Novel Ellipse-Based Chiral Honeycomb Structure", ***Appl. Sci***., 12(20): 10437, (2022).

[44] Kim Y., Son K., Lee J., "Auxetic Structures for Tissue Engineering Scaffolds and Biomedical Devices", ***Materials***, 14(22): 6821, (2021).

[45] Wen Q., Li P., Zhang Z., Hu H., "Displacement Measurement Method Based on Double-Arrowhead Auxetic Tubular Structure", ***Sensors***, 23(23): 9544, (2023).

[46] Hu F., Li T., "An Origami Flexiball-Inspired Metamaterial Actuator and Its In-Pipe Robot Prototype", ***Actuators***, 10(4): 67, (2021).

[47] Aksöz S., Arslan R., Kardeş Sever N., Bostan B. "NiTi Esaslı Saclara Uygulanan Farklı Çözündürme ve Yaşlandırma Isıl İşlemlerinin Metalografik ve Mekanik Özelliklere Etkileri", ***Politeknik Dergisi***, 26(2):693–700, (2023).

[48] Casati R., Passaretti F., Tuissi A., "Effect of electrical heating conditions on functional fatigue of thin NiTi wire for shape memory actuators", ***Procedia Eng***., 10: 3423–3428, (2011).

[49] Srivastava R., Alsamhi S. H., Murray N., Devine D., "Shape Memory Alloy-Based Wearables: A Review, and Conceptual Frameworks on HCI and HRI in Industry 4.0", ***Sensors***, 22(18): 6802, (2022).

[50] Thakur S., Hu J., Thakur S., Hu J., "Polyurethane: A Shape Memory Polymer (SMP)", ***Aspects of Polyurethanes***, (2017).

[51] Uchino K., "Antiferroelectric shape memory ceramics", ***Actuators***, 5(2): 11 (2016).

[52] Farrukh A., Nayab S., "Shape memory hydrogels for biomedical applications", ***Gels***, 10(4): 270 (2024).

[53] Jung I., Lee S., "Shape recovery properties of 3D printed re-entrant strip using shape memory thermoplastic polyurethane filaments with various temperature conditions", ***Fash. Text***., 10: 27, (2023).

[54] Liu R., Xu S., Luo X., Liu Z., "Theoretical and Numerical Analysis of Mechanical Behaviors of a Metamaterial-Based Shape Memory Polymer Stent", ***Polymers***, 12(8): 1784, (2020).

[55] Skarsetz O., Slesarenko V., Walther A., "Programmable Auxeticity in Hydrogel Metamaterials via Shape-Morphing Unit Cells", ***Adv. Sci***., 9(23): e2201867, (2022).

[56] Lei M., Hong W., Zhao Z., Hamel C., Chen M., Lu H., and Qi H. J.,"3D printing of auxetic metamaterials with digitally reprogrammable shape", ***ACS Appl. Mater. Interfaces***, 11 (25): 22768-22776 (2019).

[57] Wan M., Yu K., Sun H., "4D printed programmable auxetic metamaterials with shape memory effects", ***Compos. Struct***., 279: 114791 (2022).

[58] Hassanin H., Abena A., Elsayed M. A., Essa K., "4D printing of NiTi auxetic structure with improved ballistic performance", ***Micromachines***, 11(8): 745 (2020).

[59] Li Z., Liu Y., Wang Y., Lu H., Lei M., Fu Y. Q., "3D printing of auxetic shape-memory metamaterial towards designable buckling", ***Int. J. Appl. Mech***., 13(01): 2150011 (2021).

[60] Hou R., Dong P., Liu Y., "Novel lozenge-chiral auxetic metamaterials (LCAMs): Design and numerical studies", ***Mater. Lett.***, 331: 133440 (2023).

[61] Chen Y., Ye W., Xu R., Sun Y., Feng J., Sareh P., "A programmable auxetic metamaterial with tunable crystal symmetry", ***Int. J. Mech. Sci***., 249: 108249 (2023).

[62] Liu Y., Shu D. W., Lu H., "3D printing shape memory polymer of laminated multi-component metamaterial towards optimization of auxetic and shape recovery behaviors", ***Smart Mater. Struct.***, 32(2): 025014 (2023).

[63] Lin L., Zhang H., Fan C., "The study on the properties of a metamaterial composed of star-shaped auxetic and curved-beam multi-stable structure", ***Mech. Adv. Mater. Struct.***, 31(29): 11979–11995 (2024).

[64] Park Y. J., Ahn H., Rodrigue H., "Shape-memory alloy-based auxetic smart metamaterials: Enabling inherently bidirectional actuation", ***Adv. Intell. Syst.***, 6(11): 2400040 (2024).

[65] Bodaghi M., Liao W. H., "4D printed tunable mechanical metamaterials with shape memory operations", ***Smart Mater. Struct.***, 28(4): 045019, (2019).

[66] Li Z., Liu Y., Lu H., Shu D. W., "Tunable hyperbolic out-of-plane deformation of 3D-printed auxetic PLA shape memory arrays", ***Smart Mater. Struct.***, 31(7): 075025, (2022).

[67] Ren L., et al., "3D Printing of Auxetic Metamaterials with High-Temperature and Programmable Mechanical Properties", ***Adv. Mater. Technol.***, 7(9): 2101546, (2022).

[68] Pandini S., et al., "Shape memory response and hierarchical motion capabilities of 4D printed auxetic structures", ***Mech. Res. Commun.***, 103: 103463, (2020).

[69] Tao R., et al., "4D printed origami metamaterials with tunable compression twist behavior and stress-strain curves", ***Compos. B Eng***., 201: 108344, (2020).

[70] Yao Y., Xu Y., Chen H., Kang Y., Liu Y., Leng J., "Fabrication and characterization of shape memory auxetic metamaterial", ***J. Intell. Mater. Syst. Struct.***, 34(1): 101–110, (2023).

ERGEN GÖRÜNÜM

[71] Abel J., et al., "Fused filament fabrication of niti components and hybridization with laser powder bed fusion for filigree structures", ***Materials***, 14(16): 4399, (2021).

[72] Jebellat E., Baniassadi M., Moshki A., Wang K., Baghani M., "Numerical investigation of smart auxetic three-dimensional meta-structures based on shape memory polymers via topology optimization", ***J. Intell. Mater. Syst. Struct.***, 31(15): 1838–1852, (2020).

[73] Zheng X., Uto K., Hu W. H., Chen T. T., Naito M., Watanabe I., "Reprogrammable flexible mechanical metamaterials", ***Appl. Mater. Today***, 29: 101662, (2022).

[74] Yuan Y., et al., "3D printed auxetic metamaterials with tunable mechanical properties and morphological fitting abilities", ***Mater. Des***., 244: 113119, (2024).

[75] Hussnain A., Kulkarni S., Khan K. A., "2D material-enhanced multi-fold self-sensing and programmable deployable lattice structure", ***Sci. Rep.***, 14(1): 20244, (2024).

[76] Salmani A., Rezaei S., "High-velocity impact analysis of modern shape-memory alloy auxetic structures", ***Aust. J. Mech. Eng.***, 1-22, (2025).

[77] Shirzad M., Zolfagharian A., Bodaghi M., Nam S. Y., "Auxetic metamaterials for bone-implanted medical devices: Recent advances and new perspectives", ***Eur. J. Mech. A Solids***, 98: 104905, (2023).

[78] Li S., Hassanin H., Attallah M. M., Adkins N. J. E., Essa K., "The development of TiNi-based negative Poisson's ratio structure using selective laser melting", ***Acta Mater.***, 105: 75–83, (2016).

[79] Woo, J, & Abel, J. "Soft Actuators from Flexible Auxetic Metamaterials and Shape Memory Alloys Springs", ***Adaptive Structures and Intelligent Systems***. Austin, Texas, USA. September 11–13, V001T04A013. ASME., (2023).

[80] Foster L., Peketi P., Allen T., Senior T., Duncan O., Alderson A., "Application of auxetic foam in sports helmets", ***Appl. Sci***., 8(3): 354, (2018).

[81] Scarpa F., Pastorino P., Garelli A., Patsias S., Ruzzene M., "Auxetic compliant flexible PU foams: Static and dynamic properties", ***Phys. Status Solidi B***, 242(3): 681–694, (2005).

[82] Lvov V. A., Senatov F. S., Veveris A. A., Skrybykina V. A., Lantada A. D., "Auxetic metamaterials for biomedical devices: Current situation, main challenges, and research trends", ***Materials***, 15(4): 1439, (2022).

[83] Konaković-Luković M., Konaković P., Pauly M., "Computational design of deployable auxetic shells", ***Advances in Architectural Geometry*** 2018, Gothenburg, Sweden: Chalmers Univ. Technol., 94-111, (2018).

[84] Malakooti S., et al., "Meta-Aerogels: Auxetic shape-memory polyurethane aerogels", ***ACS Appl. Polym. Mater.***, 3(11): 5727–5738, (2021).

[85] Ungureanu B., Achaoui Y., Enoch S., Brûlé S., Guenneau S., "Auxetic-like metamaterials as novel earthquake protections", ***EPJ Appl. Metamater.***, 2: 17, (2015).

[86] Abdelaal O., Darwish S. M. H., "Analysis, fabrication and a biomedical application of auxetic cellular structures", ***Int. J. Eng. Innov. Technol. (IJEIT)***, 2(3): 218–223, (2012).

[87] Siniauskaya V., Wang H., Liu Y., Chen Y., Zhuravkov M., Lyu Y., "A review on the auxetic mechanical metamaterials and their applications in the field of applied engineering", ***Front. Mater***., 11: 1453905, (2024).

[88] Chen D., Zheng X., "Multi-material additive manufacturing of metamaterials with giant, tailorable negative Poisson's ratios", ***Sci. Rep.***, 8(1): 1–8, (2018).

[89] Islam R., Maparathne S., Chinwangso P., Lee T. R., "Review of shape-memory polymer nanocomposites and their applications", ***Appl. Sci.***, 15(5): 2419, (2025).

[90] Zhang X., Lu X., Wang Z., Wang J., Sun Z., "Biodegradable shape memory nanocomposites with thermal and magnetic field responsiveness", ***J. Biomater. Sci. Polym. Ed.***, 24(9): 1057–1070, (2013).

[91] Tezsezen E., Yigci D., Ahmadpour A., Tasoglu S., "AI-based metamaterial design", ***ACS Appl. Mater. Interfaces***, 16(23): 29547, (2024).

ERKEN GÖRÜNÜM