

Fonksiyonel Özelliklere Sahip Akıllı Malzemelerin İncelenmesi

Dursun Ekmekci ^{1*} ve Emrah KAPLAN ²

¹Makine Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Türkiye

²Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Türkiye

*(dursunekmekci@gumushane.edu.tr) Başlıca yazarın mail adresi

(Received: 11 December 2024, Accepted: 29 December 2024)

(5th International Conference on Scientific and Academic Research ICSAR 2024, December 23-24, 2024)

ATIF/REFERENCE: Ekmekci, D. & KAPLAN, E. (2024). Fonksiyonel Özelliklere Sahip Akıllı Malzemelerin İncelenmesi. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(11), 768-775.

Özet – Akıllı malzemeler, dış uyaranlara dinamik tepkiler verebilme yetenekleriyle bilim ve mühendislik alanlarında devrim yaratmaktadır. Bu bildiride, dört önemli akıllı malzeme sınıfı ele alınmaktadır: elektroaktif polimerler (EAP), şekil hafızalı malzemeler (SMM), faz değişim malzemeleri (PCM) ve akıllı hidrojenler. Elektroaktif polimerler, elektriksel uyaranlara mekanik yanıt verebilme özellikleriyle sensörlerden aktüatörlere kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil hafızalı malzemeler, termal veya mekanik uyaranlara tepki olarak orijinal şekillerine geri dönebilme kabiliyetleri sayesinde tıp, havacılık ve robotik gibi alanlarda kritik bir rol oynamaktadır. Faz değişim malzemeleri, enerji depolama ve ısı yönetimi uygulamalarında termal denge sağlama özellikleriyle öne çıkmaktadır. Akıllı hidrojenler ise biyomedikal cihazlardan çevresel sensörlere kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahip, uyarlanabilir ve çok fonksiyonlu yapılarıyla dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, bu malzeme türlerinin temel özellikleri, çalışma mekanizmaları ve endüstriyel uygulamaları derinlemesine incelenmiştir. Ayrıca, her bir sınıfın mevcut zorlukları ve gelecekteki gelişim potansiyelleri de tartışılmıştır. Akıllı malzemeler alanındaki bu kapsamlı analiz, sürdürülebilirlik, enerji verimliliği ve yüksek performanslı sistemlerin geliştirilmesine yönelik yeni fırsatlar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Elektroaktif Polimerler, Şekil Hafızalı Malzemeler, Faz Değişim Malzemeleri, Akıllı Hidrojenler.

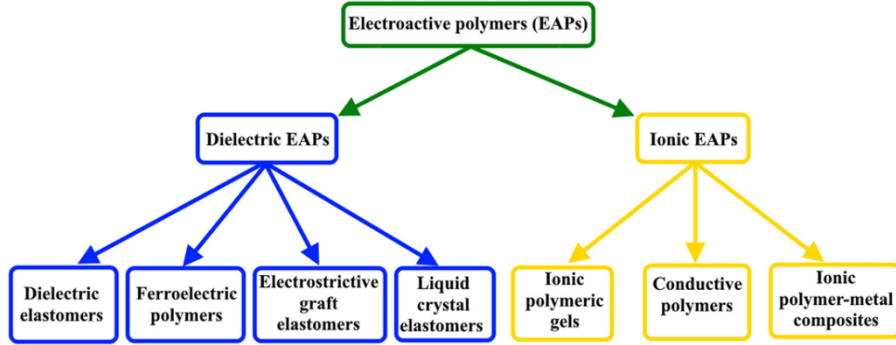
I. GİRİŞ

Akıllı malzemeler, dış uyaranlara dinamik tepkiler verebilme yetenekleriyle modern bilim ve mühendislikte önemli bir yer tutmaktadır. Bu bildiride, elektroaktif polimerler (EAP), şekil hafızalı malzemeler (SMM), faz değişim malzemeleri (PCM) ve akıllı hidrojenler olmak üzere dört temel akıllı malzeme sınıfı incelenmiştir. Elektroaktif polimerler, elektriksel uyaranlarla mekanik hareket üretebilme özellikleriyle sensörlerden aktüatörlere kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Şekil hafızalı malzemeler, termal veya mekanik uyaranlarla eski şekillerine geri dönebilme kabiliyetleri sayesinde tıp, robotik ve havacılık gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Faz değişim malzemeleri, enerji depolama ve ısı yönetiminde önemli bir rol oynayarak enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. Akıllı hidrojenler ise çevresel uyaranlara duyarlı yapılarıyla biyomedikal uygulamalardan çevresel sensörlere kadar çeşitli alanlarda uygulanabilirlik sunmaktadır. Bu çalışma, bu malzeme türlerinin temel özelliklerini,

uygulamalarını ve karşılaşılan zorlukları ele alarak gelecekteki araştırma ve teknolojik gelişmeler için önemli içgörüler sunmaktadır.

A. Elektroaktif Polimerler

Elektroaktif Polimerler (EAP'ler), bir elektrik alanı uygulandığında şekil ve boyut değiştirebilen bir polimer sınıfıdır. Bu özellikler, onları biyolojik kaslara benzer işlevlere sahip malzemeler haline getirir ve bunlara "yapay kaslar" denir. EAP'lerin avantajları arasında düşük ağırlık, esneklik, geniş uyumluluk ve sessiz çalışma bulunur. Ancak, sınırlı aktüasyon gücüne sahiptirler ve bazı türlerde yüksek aktivasyon voltajları dezavantajlarıdır [1]. EAP'ler iyonik ve elektronik olmayan olmak üzere iki ana gruba ayrılır. İyonik EAP'ler: İyon taşımacılığı ile aktive edilen ve düşük voltajlarda bükülme hareketi sağlayan malzemelerdir. İletken polimerler ve iyonomerik polimer-metal kompozitlerdir (IPMC'ler). Elektronik EAP'ler: Elektriksel kuvvetlerle çalışırlar ve genellikle büyük mekanik enerji yoğunluğu sağlarlar [2]. EAP'ler, biyomimetik robotlarda lokomotor olarak biyolojik kasların yerini alabilir. Örnek uygulamalar arasında robotik balıklar ve mobil manipülatörler bulunur. EAP'ler çevresel veya biyolojik değişikliklere duyarlı sensörlerde kullanılır. İletken polimerler biyomedikal cihazlarda algılama elemanları olarak kullanılabilir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, özellikle yumuşak robotik uygulamalarda, büyük deformasyon kapasitesine sahip EAP'ler robotik kollar ve tutucular gibi cihazlarda kullanılabilir [3].



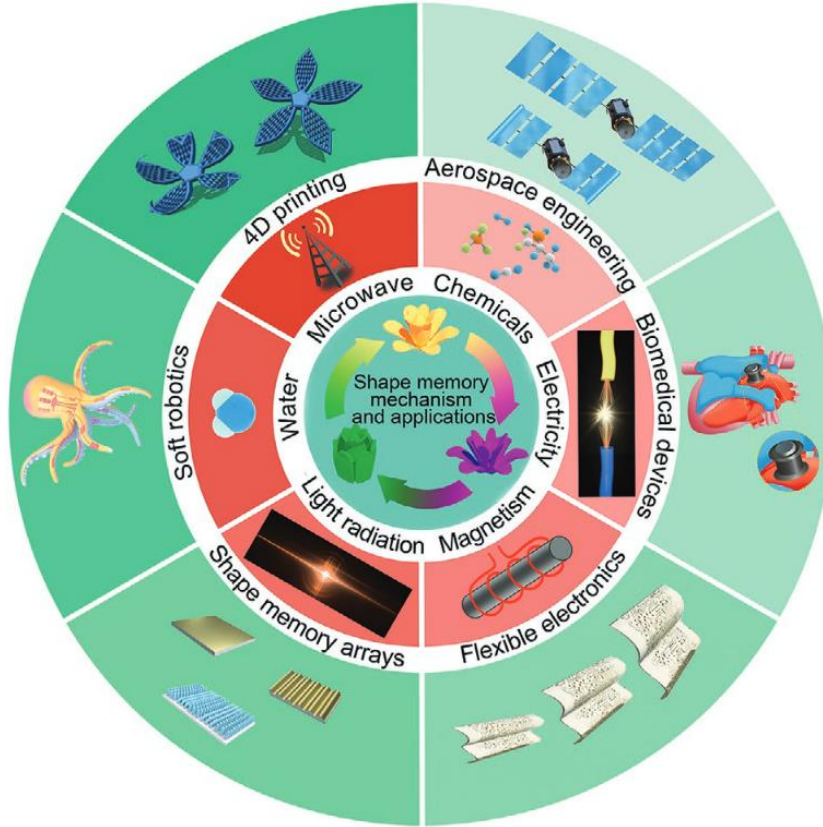
Şekil 1. Elektroaktif polimer grupları [3].

EAP'ler düşük voltajda büyük lokomotor kapasitesi sağladıkları için aktif kateterlerde ve protez cihazlarda kullanılır. EAP teknolojisi hızla gelişmektedir. Araştırma, malzemelerin aktüasyon dayanıklılığını ve güç yoğunluğunu artırmayı amaçlamaktadır. Gelecekte, EAP'lerin daha geniş biyomedikal ve endüstriyel uygulamalarda kullanılması beklenmektedir [4]. Elektroaktif polimerler, robotikten biyomedikal cihazlara kadar çok çeşitli alanlarda yeni uygulama olanakları sunarak gelecekteki mühendislik ve tıbbi çözümlere katkıda bulunur.

B. Şekil Hafızalı Malzemeler

İlk olarak, 1930 yılında İsveçli bir fizikçi olan Arne Ölander, altın-kadmiyum alaşımlarının şekil hafızası etkisini gösterebileceğini tanımladı. Daha sonra, Otsuka ve Wayman, Au-Cd alaşımının psödoelastik davranışını tanımladılar. 1950'lerde, Bakır-Alüminyum-Nikel alaşımı gibi malzemelerde benzer bir şekil hafızası etkisi gözlemlendi. Nitinol (Ni-Ti) alaşımı ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri Deniz Kuvvetleri Mühimmat Laboratuvarı tarafından keşfedildi. Daha sonra, Buehler ve Wang, Ni-Ti alaşımındaki psödoelastik etkiyi araştırdılar. Daha hafif ve daha kompakt yapısı nedeniyle, Ni-Ti alaşımı 1980'lerden beri oldukça yaygınlaştı. Şekil hafızalı malzemeler (SMM), belirli bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında önceki şekillerini hatırlayabilen akıllı malzemelerdir [5]. Şekil 2'de görüldüğü gibi, bu, martensitik dönüşüm adı verilen bir işlemle elde edilir. Psödoelastik davranışın oluşması için malzemede termoelastik dönüşüm mekanizmasının bulunması gerekir. Şekil hafızalı malzemeler arasında en yaygın olanı SMA'lardır. Ancak alaşımlara ek olarak Şekil Hafızalı Polimerler (SMP) ve Şekil Hafızalı

Seramikler (SMC) de mevcuttur. SMP'ler hafifliği, esnekliği ve düşük üretim maliyetiyle öne çıkmaktadır. Yüksek hassasiyetleri ile uzay yapıları ve esnek robotlarda başarılı sonuçlar verirler [6].



Şekil 2. Şekil hafızalı polimerlerin (SMP'ler) şeması: mekanizma, çalıştırma yöntemleri ve uygulamalar [6].

Öte yandan SMC'ler sınırlı şekil hafızasına sahiptirler, ancak yüksek sıcaklık direnci ve kimyasal atalet gibi avantajlara sahiptirler. Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık gerektiren havacılık ve uzay alanlarında kullanılırlar [7]. Şekil hafızalı alaşımlar (SMA), yüksek deformasyon kabiliyetleri ile yük taşıma veya karmaşık hareketlerde etkili bir şekilde kullanılabilirler. Şekil Hafızası Etkisi (SME), yani ısıtıldığında önceki şekline geri dönebilme yeteneği ve mekanik yük altında yüksek esneklik kapasitesi sayesinde çok zor görevlerde kullanılabilirler. Hafiflikleri ve yüksek mekanik mukavemetleri sayesinde özellikle biyomedikal ve havacılık uygulamalarında büyük avantajlar sağlarlar [8]. Akıllı bir malzeme olan şekil hafızalı alaşım (SMA), şekil hafızası etkisi (SME), süperelastisite (SE), yüksek enerji tüketimi ve biyoyumluluk gibi birçok istenen özelliğe sahiptir. Otomobil, havacılık, robotik ve biyomedikal alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil hafızalı alaşımlar (SMA'lar) ve polimerler, belirli sıcaklık veya gerilim değişiklikleriyle deformasyondan sonra ilk şekillerine dönebilirler. Polimerler gibi bazı şekil hafızalı malzemeler, ışık, manyetik alan veya elektrik akımı gibi farklı uyaranlarla aktive edilebilir. Sonuç olarak, Fe-Mn-Si SMA'lar, KOBİ işlevine sahip yapısal malzemeler pazarına uyacaktır [9].

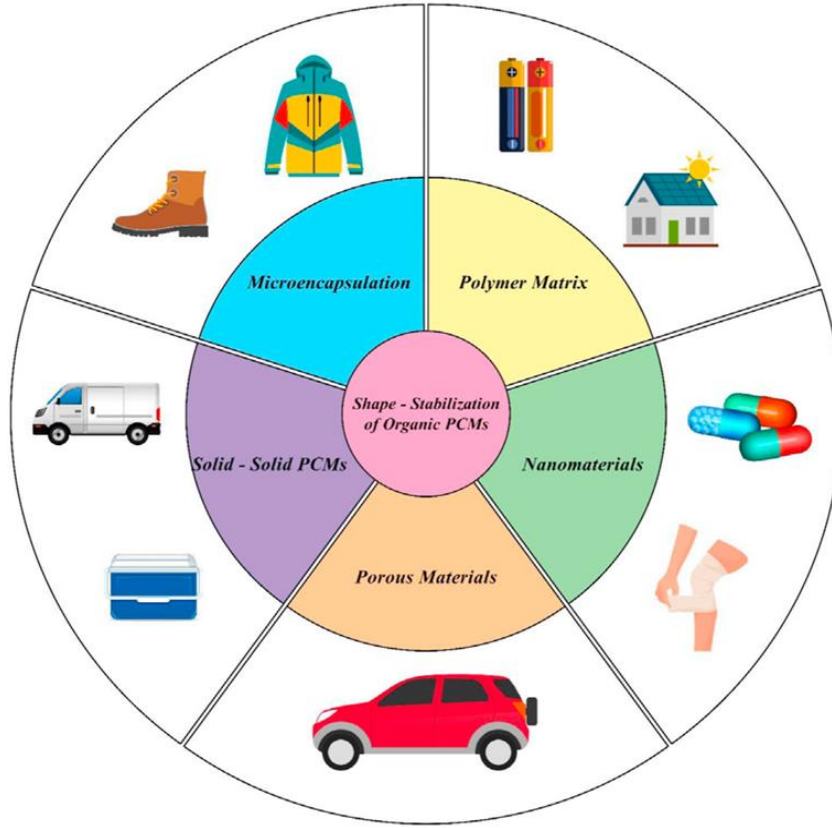
SMA'lar nikel-titanyumdur (Nitinol). Bu alaşım, yüksek korozyon direnci ve biyoyumluluk özellikleriyle tıbbi uygulamalar için idealdir. Ayrıca gelecekte akıllı sistemler ve enerji verimliliği gibi alanlarda daha yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Bakır ve demir bazlı şekil hafızalı alaşımlar düşük maliyet ve farklı mekanik özellikler sağlar. Bakır bazlı alaşımlar daha geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilir ancak daha düşük esnekliğe sahiptir. Demir bazlı alaşımlar yüksek mukavemete sahiptir. Kısalmasına ek olarak, şekil hafızası kapasitesi daha düşüktür [10]. SMA'lar Süper elastik davranışları, enerji emme kapasiteleri ve uzun ömürlü performansları onları mühendislik ve biyomedikal alanlarda vazgeçilmez kılar. SMA ile gerçekleştirilen birçok tıbbi uygulama vardır. Nitinol vasküler stentler vücut sıcaklığına ulaştıklarında genişler ve daralmış damarları genişletir ve tıkanıklıkların tedavisinde rol oynar. SMA, kemik plakaları ve omurga düzeltme cihazları gibi ortopedik implantların üretiminde kullanılır. Bu cihazlar vücut sıcaklığına duyarlı bir şekilde şekil değiştirir ve hem deformasyonu azaltır hem de kemik

iyileşmesini optimize eder. Ortodontik teller ve endodontik cihazlar da Nitinolün biyomedikal uygulamalarına örnektir [11]. Diş kök kanal tedavisinde kullanılan endodontik cihazlar, sundukları esneklik ve dayanıklılık sayesinde hassas prosedürlere kolay adaptasyon ve kolaylık sağlar. Esnek, kendiliğinden oluşan SMA ile üretilen cihazlar laparoskopi ve diğer minimal invaziv cerrahi uygulamalarında kullanılır. Laparoskopik cerrahi için SMA ile güçlendirilmiş aktif forsepsler, elektrikli ısıtma sayesinde hızlı tepki ve hassas kontrol sağlar. Bu özellikler cerrahların daha dar alanlarda daha etkili çalışmasını sağlar. Ayrıca, SMA ile güçlendirilmiş robotik sistemler minimal invaziv cerrahide esnek hareket ve yüksek hassasiyet sunar. Bu cihazlar geleneksel cerrahi aletlere göre daha az invazivdir ve cerrahi hassasiyeti artırırken hasta iyileşmesini hızlandırır. SMA'lar ortopedik cerrahide ve kardiyovasküler cerrahide sıklıkla stent gibi tıbbi cihazlarda kullanılır [12]. Nitinol Stentler vücut sıcaklığında genişleyerek damar tıkanıklıklarını gidermeye yardımcı olur. SMA tabanlı minimal invaziv cerrahi aletler cerrahi teknolojilerinde devrim yaratmaya devam ediyor.

SMA'lar, adaptif kanat sistemleri, titreşim izolasyonu ve düşük şok salınımlı cihazlar gibi havacılık uygulamalarında kullanılır. Isıtıldığında şekil değiştirme yeteneği, uçak ve uzay aracının verimliliğini artırır. Adaptif Kanat Sistemlerinde Kullanılır SMA'lar, uçuş sırasında kanat geometrisini değiştirerek yakıt verimliliğini artırır [13]. Titreşimi ve gürültüyü azaltmak için uçaklarda Titreşim İzolasyonu için kullanılır. SMA'lar, uzay aracının Güneş Yelkenleri ve Antenleri gibi konuşlandırılabilir yapısal elemanlardaki düşük şok salınımlı mekanizmalarda tercih edilir. SMA'lar, düşük güç gereksinimleriyle insan kas hareketlerini taklit eden yumuşak robotlarda kullanılır. Minyatür SMA aktüatörleri, tıbbi robotik cerrahi aletlerinde ve mikrocihazlarda kullanılır. Şekil hafızalı alaşımlar, yumuşak robotik sistemlerde aktüatör olarak kullanılır. Bu malzemeler düşük ağırlıkları ve yüksek kuvvet-ağırlık oranları nedeniyle robotik kollar ve manipülatörler için idealdir [14]. Otomotiv sektörü, endüstriyel ve tüketici ürünleri SMM'leri kullanılır. SMA'lar, sıcaklığa yanıt vererek otomotiv egzoz sistemlerinde egzoz gazı akışını optimize eden Uyarlanabilir Egzoz Sistemlerinin yapımında kullanılır [15]. Yangın Algılama ve Güvenlik Sistemlerinde Kullanılır SMM'ler, sıcaklık arttığında kapıları veya vanaları otomatik olarak kapatarak yangını kontrol etmek için elektromekanik elemanlar olarak hareket eder. SMA teknolojisi, deforme olduğunda eski şeklini geri kazanabilen esnek gözlük çerçeveleri için kullanılır. SMM'lerin çok yönlülüğü, bu teknolojiyi enerji, ulaşım, sağlık, mühendislik ve robotik gibi çok çeşitli uygulamalara sahip geleceğin temel malzemelerinden biri haline getirmiştir [16]. Özellikle düşük sıcaklıklı SMM'ler ve daha yüksek mukavemete sahip yeni nesil alaşımlar, geleceğin akıllı cihazlarına katkıda bulunacaktır.

C. Faz Değişim Malzemeleri

PCM'ler, sıcaklık değişimlerine tepki vererek termal enerjiyi depolayabilen ve serbest bırakabilen akıllı malzemelerdir. Örneğin, katı-sıvı geçişi gibi tek bileşenli bir faz değişim süreçleri sistemi, sabit sıcaklıklarda büyük termal enerji depolamaları gerçekleştirebilir. Bu özelliklerin uygulanması, enerji verimliliği ve enerji depolama alanında yerini bulmuştur [17]. PCM'leri üç ana sınıfa ayırabiliyoruz: organik, inorganik ve hibrit. Organik PCM'ler, parafinler ve yağ asitleri nedeniyle dahil edilmiştir; düşük toksiktir ve kimyasal olarak karardır. Buna karşılık, bu tür malzemeler büyük bir dezavantaj gösterir: düşük termal iletkenlikleri. İnorganik faz değişim malzemeleri ile ilgili olarak, daha yüksek termal iletkenlik ve daha yüksek enerji yoğunluğu gibi özellikler gösteren tuz hidratları ve metalik faz değişim elementleri içerirler. Dahası, aşırı soğuma gibi bazı ek sorunlar gösterebilirler. Hibrit PCM'ler, birinin diğerine göre avantajlarını optimize etmek için farklı organik ve inorganik malzemeleri birleştirir [18]. PCM'ler, ısı dalgalanmalarını azaltmak ve enerji tasarrufu sağlamak için duvarlar, tavanlar ve zeminler gibi binalarda enerji verimliliğinde kullanılır. Elektronik soğutma sistemlerindeki PCM'ler sayesinde termal yönetim performansı, elektronik cihazların ömrünün artırılmasını sağlar. Yenilenebilir enerji depolama: Sahada, güneş enerjisi ve atık ısının depolanmasında PCM kullanımıyla enerji kullanımı optimize edilir. Organik ve inorganik PCM'ler: dikkate alınması gereken bazı uygulamaya bağlı avantajlar ve dezavantajlar vardır. Organik PCM'ler, düşük enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen düşük fiyatlı ve toksik olmayan seçenekler sunar. Şekil 3'te gösterildiği gibi, inorganik PCM'ler daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ancak çevresel toksisite ve maliyet nedeniyle sınırlıdır [19].



Şekil 3. PCM'lerin uygulanması [19].

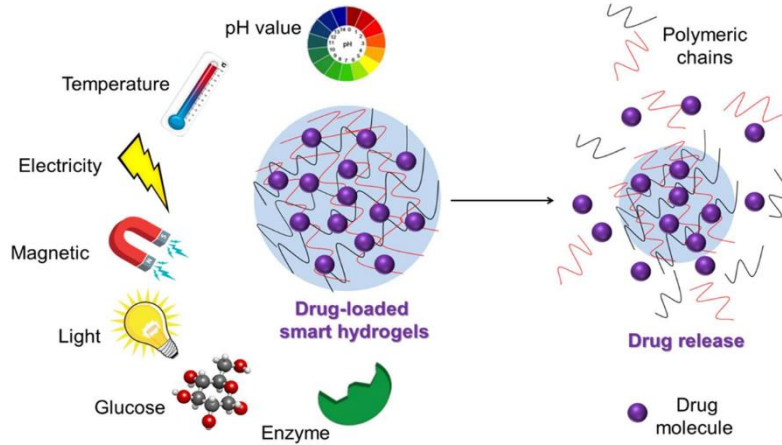
Son yıllarda, PCM'lerin performansını iyileştirmek için nanoteknoloji tabanlı çözümler geliştirilmiştir. Nanokapsülleme tekniği, sızıntı olmadan PCM'lerin termal iletkenliğini iyileştirir. İleri Kompozit Malzemeler kapsamında değerlendirilen MOF ve karbon bazlı malzemelerle güçlendirilmiş PCM'ler daha geniş uygulama alanları sağlar. Gelecekte, PCM'lerin sürdürülebilir enerji çözümlerinde daha fazla kullanılması beklenmektedir. Akıllı binalarda ve yenilenebilir enerji projelerinde enerji yönetimi sistemlerinde kritik bir rol oynayacaklardır [20]. Ayrıca, çevre dostu ve düşük maliyetli PCM'lerin geliştirilmesi devam etmektedir.

D. Akıllı Hidrojeller

Akıllı hidrojeller, çevresel uyarılara (örn. sıcaklık, pH, ışık, manyetik alan) yanıt vererek fiziksel veya kimyasal özelliklerini değiştirebilen yüksek su içeriğine sahip üç boyutlu polimerik ağlardır. Hidrojeller biyoyumlulukları, düşük toksisite ve mekanik uyarlanabilirlikleri nedeniyle biyomedikal ve çevresel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır [21]. Bu malzemeler, özellikle su tutma kapasiteleri ve biyolojik ortamlarda güvenli bir şekilde işlev görme yetenekleri nedeniyle, kontrollü ilaç salınımı ve doku mühendisliği gibi alanlarda önemli bir yer edinmiştir. Akıllı hidrojeller, reaktifliklerine göre dört sınıfa ayrılır: sıcaklığa duyarlı, pH'a duyarlı, ışığa duyarlı ve manyetik alana duyarlı. Sıcaklığa duyarlı hidrojeller, belirli bir sıcaklık değişiminde faz değiştirir. Örneğin, PNIPAM bazlı Hidrojeller, alt kritik çözünürlük sıcaklığının altında şişer ve ilacı hapsederken, bu sıcaklık aşıldığında büzülür ve ilacı serbest bırakır. Bu kontrollü salınım özelliği sayesinde, ilacın istenen miktarda salınmasını sağlamak için belirli sıcaklık değerleri ayarlanabilir [22]. pH'a duyarlı hidrojeller, çözeltinin pH seviyesine bağlı olarak şişme veya büzülme davranışı gösterir. Farklı pH seviyelerine duyarlılığı sayesinde özellikle kanser tedavisinde hedefli ilaç salınımı için kullanılır. Işığa duyarlı hidrojeller, ışık dalga boylarına tepki verir ve mekanik veya kimyasal değişikliklere uğrar. Göz ameliyatlarında kullanılan bu tip hidrojeller, minimal invaziv tedavilerde doku hasarını en aza indirir ve hızlı iyileşme sağlar. Manyetik alana duyarlı hidrojeller, manyetik alan uygulandığında şekil, hacim veya mekanik özelliklerde değişikliklere uğrar. Bu

malzemeler hedefli ilaç iletimi ve biyomedikal sensörlerde yaygın olarak kullanılır. Farklı tasarımlar sayesinde, manyetik alanın etkisiyle yön değişikliği ve kontrollü ilaç salınımı sağlanabilir [23].

Hidrojeller, tıbbi alanda kontrollü ilaç salınımı, doku mühendisliği ve tedavi süreçlerinde kullanılır. Akıllı hidrojeller, ilaçların hedefli salınımını sağlayarak yan etkileri azaltır. Örneğin, enzime duyarlı hidrojeller yalnızca belirli biyokimyasal koşullar altında aktive olur. Hidrojeller, hücre büyümesi ve çoğalması için uygun bir mikro ortam sağlar ve doku rejenerasyonunda kullanılır [24]. Akıllı hidrojeller, nem dengesini koruyarak yara iyileşme sürecini hızlandırır ve ayrıca enfeksiyon riskini azaltır. Akıllı hidrojeller, esneklikleri ve hassasiyetleri nedeniyle robotik kollarda ve biyomedikal sensörlerde kullanılır [25]. Işığa veya manyetik alanlara duyarlı olan bu hidrojeller, hedef odaklı biyomedikal cihazlarda gelişmiş kontrol mekanizmaları sunar. Sıcaklığa duyarlı hidrojeller, pH duyarlı hidrojellerden daha geniş uygulama alanlarına sahip olmasına rağmen, genellikle zayıf mekanik özelliklere sahiptirler. Manyetik alana duyarlı hidrojeller, hedef odaklı uygulamalarda daha iyi sonuçlar verir, ancak üretim maliyetleri yüksektir. Enzime duyarlı hidrojeller biyolojik olarak daha spesifik tepkiler sağlar, ancak çevresel kararlılıkları düşüktür. Hidrojellerin zamanla değişen yapılar oluşturmasını sağlayan 4D baskı teknolojisi, tıbbi cihazların tasarımında devrim yaratmıştır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, nanomalzemelerle güçlendirilmiş hidrojeller daha yüksek termal ve mekanik dayanıklılık sunar [26].



Şekil 4. pH, sıcaklık, elektrik, manyetikler, ışık ve biyomoleküller (glikoz ve enzim dahil) dahil olmak üzere çeşitli dış uyaranlar, akıllı bir hidrojelinden ilaç salınımını kontrol ediyor [26].

Birden fazla çevresel faktöre yanıt veren hidrojeller, karmaşık biyomedikal sorunları çözmeye büyük bir potansiyele sahiptir. Gelecekte, akıllı hidrojellerin kişiselleştirilmiş tedavi yöntemlerinde ve gelişmiş biyomedikal cihazlarda daha yaygın olarak kullanılması bekleniyor. Potansiyelleri özellikle yapay organlarda, kanser tedavisinde ve nörolojik hastalıklarda artmaktadır [21]. Akıllı malzemeler, çevresel koşullara duyarlı ve geri dönüşümlü olarak değişebilen malzemelerdir. Bu değişiklikler tekrarlanabilir ve öngörülebilirdir. Bu özellikler onları geleneksel malzemelerden çok daha avantajlı hale getirir. Yetenekleri sayesinde belirli bir işlevi yerine getirebilen tasarımlar yapılabilir. Ancak bir malzemenin akıllı malzeme olarak kabul edilip edilmemesi, kullanım alanına ve istenen özelliğe bağlıdır. Örneğin, bir inşaat malzemesi için dayanıklılık ve uzun ömür önemliyken, tıbbi bir implant için biyoyumluluk ve şekil hafızası gibi özellikler daha belirgindir. Buna göre, yarı iletkenler, süperiletkenler, nanomalzemeler, manyeto/elektro-reolojik ve fotonik ve biyomalzemeler akıllı malzeme özelliklerine sahip olma potansiyeline sahiptir. Ancak, nerede uygulandıklarına bağlı olarak, tasarımcı tarafından kullanılabilirler veya akıllı davranış özellikleri henüz tam olarak ortaya çıkarılmamış olabilir. Akıllı davranıştan kastedilen, malzemenin çevresel uyaranlara verdiği belirli, işlevsel ve tekrarlanabilir tepkilerdir. Bir malzemenin tam anlamıyla "akıllı" olarak kabul edilip edilmemesi yalnızca potansiyeline değil, aynı zamanda bu özelliklerin belirli bir uygulamada etkili bir şekilde kullanılıp kullanılmadığına da bağlıdır. Akıllı malzemeler her zaman tasarımcı tarafından hazır yapılmayabilir; bazen kendi başlarına "akıllı" davranış sergilerler. Örneğin, termokromik malzemeler harici bir müdahale olmadan renk değiştirebilir

veya süperiletkenler manyetik alanı dışarı doğru itebilir ve sıfır direnç/kayıpla elektrik akımı iletebilir. Ayrıca, akıllı malzemelerin sürekli gelişen bir alan olduğu ve her gün yeni malzemeler ve uygulamalar ortaya çıktığı da unutulmamalıdır. Bu nedenle, akıllı malzeme kavramının kapsamı giderek genişlemektedir.

II. GELECEKTEKİ ARAŞTIRMA İHTİYAÇLARI

Akıllı malzemeler alanında gelecekteki araştırmalar, bu malzemelerin performansını artırmaya ve daha geniş uygulama alanlarına entegrasyonuna odaklanmalıdır. Elektroaktif polimerler için, enerji verimliliğini artıran ve daha düşük voltajlarda çalışan malzemelerin geliştirilmesi önemlidir. Ayrıca, dayanıklılık ve uzun ömür konularındaki mevcut sınırlamaların aşılması, bu malzemelerin endüstriyel ölçekli kullanımını kolaylaştıracaktır. Şekil hafızalı malzemeler için, daha hızlı tepki süreleri, artırılmış hafıza kapasitesi ve biyouyumluluğu yüksek malzemelerin tasarlanması öncelikli araştırma konularıdır. Bu tür malzemelerin karmaşık geometrilere uyarlanabilirliğini artırmak, özellikle biyomedikal ve robotik alanlarında önemli bir ilerleme sağlayabilir. Faz değişim malzemeleri için, enerji yoğunluğu ve termal stabiliteyi geliştiren formülasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin çevresel sürdürülebilirlik açısından geri dönüştürülebilir hale getirilmesi de kritik bir araştırma alanıdır. Akıllı hidrojeller için, duyarlılık, mekanik dayanım ve hedefe yönelik yanıt kabiliyetini artıran yeni moleküler tasarımlar geliştirilmelidir. Özellikle biyomedikal uygulamalarda, hidrojellerin kontrollü ilaç salımı ve biyosensör teknolojilerindeki potansiyelini en üst düzeye çıkaracak yenilikçi yaklaşımlar gerekmektedir. Genel olarak, bu malzemelerin entegrasyonu, maliyet etkin üretim teknikleri ve çevresel uyumluluk gibi konular da akıllı malzemelerin geniş çaplı benimsenmesini desteklemek için gelecekteki araştırma gündeminde yer almalıdır.

III. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Akıllı malzemeler, yenilikçi özellikleri ve geniş uygulama yelpazesıyla mühendislik, tıp, enerji ve çevre alanlarında önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Bu bildiride incelenen elektroaktif polimerler, şekil hafızalı malzemeler, faz değişim malzemeleri ve akıllı hidrojeller, dış uyaranlara karşı hassas ve dinamik tepkiler üretebilmeleriyle öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, enerji verimliliğinden biyomedikal cihazlara, adaptif sistemlerden çevresel sensörlere kadar çok çeşitli alanlarda çözüm sunmaktadır. Ancak, bu teknolojilerin potansiyelinin tam anlamıyla hayata geçirilebilmesi için daha fazla araştırma ve geliştirme çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Performans iyileştirmeleri, çevresel sürdürülebilirlik, maliyet etkin üretim süreçleri ve yeni uygulama alanlarının keşfi, bu malzemelerin gelecekteki başarısı için kritik öneme sahiptir. Genel olarak, akıllı malzemeler, multidisipliner işbirlikleri ve teknolojik yeniliklerle desteklendiğinde, sürdürülebilir bir geleceğin inşasında kilit rol oynamaya devam edecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Y. Bar-Cohen, K. J. Kim, H. R. Choi, and J. D. W. Madden, 'Electroactive polymer materials', *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 2, p. E01, Apr. 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/2/E01.
- [2] F. Carpi, R. Kornbluh, P. Sommer-Larsen, and G. Alici, 'Electroactive polymer actuators as artificial muscles: are they ready for bioinspired applications?', *Bioinspir. Biomim.*, vol. 6, no. 4, p. 045006, Nov. 2011, doi: 10.1088/1748-3182/6/4/045006.
- [3] A. V. Maksimkin, T. Dayyoub, D. V. Telyshev, and A. Y. Gerasimenko, 'Electroactive Polymer-Based Composites for Artificial Muscle-like Actuators: A Review', *Nanomaterials*, vol. 12, no. 13, Art. no. 13, Jan. 2022, doi: 10.3390/nano12132272.
- [4] A. F. Kanaan, A. C. Pinho, and A. P. Piedade, 'Electroactive Polymers Obtained by Conventional and Non-Conventional Technologies', *Polymers*, vol. 13, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2021, doi: 10.3390/polym13162713.
- [5] D. J. Hartl and D. C. Lagoudas, 'Aerospace applications of shape memory alloys', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 221, no. 4, pp. 535–552, Apr. 2007, doi: 10.1243/09544100JAERO211.
- [6] Y. Xia, Y. He, F. Zhang, Y. Liu, and J. Leng, 'A Review of Shape Memory Polymers and Composites: Mechanisms, Materials, and Applications', *Advanced Materials*, vol. 33, no. 6, p. 2000713, 2021, doi: 10.1002/adma.202000713.

- [7] N. Zhang and M. Asle Zaem, 'Nanoscale self-healing mechanisms in shape memory ceramics', *npj Comput Mater*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, May 2019, doi: 10.1038/s41524-019-0194-z.
- [8] F. Li, Y. Liu, and J. Leng, 'Progress of shape memory polymers and their composites in aerospace applications', *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 10, p. 103003, Sep. 2019, doi: 10.1088/1361-665X/ab3d5f.
- [9] K. K. Alaneme and E. A. Okotete, 'Reconciling viability and cost-effective shape memory alloy options – A review of copper and iron based shape memory metallic systems', *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 1582–1592, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jestch.2016.05.010.
- [10] R. Sarvari *et al.*, 'Shape-memory materials and their clinical applications', *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, vol. 71, no. 5, pp. 315–335, Mar. 2022, doi: 10.1080/00914037.2020.1833010.
- [11] A. Biesiekierski, J. Wang, M. Abdel-Hady Gepreel, and C. Wen, 'A new look at biomedical Ti-based shape memory alloys', *Acta Biomaterialia*, vol. 8, no. 5, pp. 1661–1669, May 2012, doi: 10.1016/j.actbio.2012.01.018.
- [12] N. Sharma, T. Raj, and K. K. Jangra, 'Parameter optimization and experimental study on wire electrical discharge machining of porous Ni40Ti60 alloy', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 231, no. 6, pp. 956–970, May 2017, doi: 10.1177/0954405415577710.
- [13] R. J. H. Wanhill and B. Ashok, 'Shape Memory Alloys (SMAs) for Aerospace Applications', in *Aerospace Materials and Material Technologies: Volume 1: Aerospace Materials*, N. E. Prasad and R. J. H. Wanhill, Eds., Singapore: Springer, 2017, pp. 467–481. doi: 10.1007/978-981-10-2134-3_21.
- [14] M. Balasubramanian, R. Srimath, L. Vignesh, and S. Rajesh, 'Application of shape memory alloys in engineering – A review', *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2054, no. 1, p. 012078, Oct. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2054/1/012078.
- [15] J. Mohd Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, 'A review of shape memory alloy research, applications and opportunities', *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 1078–1113, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.11.084.
- [16] G. Costanza and M. E. Tata, 'Shape Memory Alloys for Aerospace, Recent Developments, and New Applications: A Short Review', *Materials*, vol. 13, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13081856.
- [17] S. Wu, T. Yan, Z. Kuai, and W. Pan, 'Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review', *Energy Storage Materials*, vol. 25, pp. 251–295, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ensm.2019.10.010.
- [18] B. Nie, A. Palacios, B. Zou, J. Liu, T. Zhang, and Y. Li, 'Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, p. 110340, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110340.
- [19] L. Yang, X. Jin, Y. Zhang, and K. Du, 'Recent development on heat transfer and various applications of phase-change materials', *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, p. 124432, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124432.
- [20] X. Zhang, Q. Shi, L. Luo, Y. Fan, Q. Wang, and G. Jia, 'Research Progress on the Phase Change Materials for Cold Thermal Energy Storage', *Energies*, vol. 14, no. 24, Art. no. 24, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14248233.
- [21] Y. Zhang and B. M. Wu, 'Current Advances in Stimuli-Responsive Hydrogels as Smart Drug Delivery Carriers', *Gels*, vol. 9, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2023, doi: 10.3390/gels9100838.
- [22] M. J. Ansari *et al.*, 'Poly(N-isopropylacrylamide)-Based Hydrogels for Biomedical Applications: A Review of the State-of-the-Art', *Gels*, vol. 8, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/gels8070454.
- [23] D. Jiao, Q. L. Zhu, C. Y. Li, Q. Zheng, and Z. L. Wu, 'Programmable Morphing Hydrogels for Soft Actuators and Robots: From Structure Designs to Active Functions', *Acc. Chem. Res.*, vol. 55, no. 11, pp. 1533–1545, Jun. 2022, doi: 10.1021/acs.accounts.2c00046.
- [24] S. Correa *et al.*, 'Translational Applications of Hydrogels', *Chem. Rev.*, vol. 121, no. 18, pp. 11385–11457, Sep. 2021, doi: 10.1021/acs.chemrev.0c01177.
- [25] X. Sun, S. Agate, K. S. Salem, L. Lucia, and L. Pal, 'Hydrogel-Based Sensor Networks: Compositions, Properties, and Applications—A Review', *ACS Appl. Bio Mater.*, vol. 4, no. 1, pp. 140–162, Jan. 2021, doi: 10.1021/acsabm.0c01011.
- [26] A. Bordbar-Khiabani and M. Gasik, 'Smart Hydrogels for Advanced Drug Delivery Systems', *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 7, Art. no. 7, Jan. 2022, doi: 10.3390/ijms23073665.