

## Potansiyel Olarak Akıllı Malzemeler

Dursun Ekmekci <sup>1\*</sup> ve Emrah KAPLAN <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Türkiye

\*([dursunekmekci@gumushane.edu.tr](mailto: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). Potansiyel Olarak Akıllı Malzemeler. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(11), 776-783.

**Özet** – Akıllı malzemeler, çevresel koşullara duyarlı, geri dönüşümlü değişim gösterebilen ve belirli bir işlevi yerine getirebilen malzemelerdir. Bu özellikler, onları geleneksel malzemelere göre çok daha avantajlı hale getirir. Ancak, bir malzemenin akıllı malzeme olarak kabul edilip edilmeyeceği, kullanım alanına ve istenen özelliğe bağlıdır. Örneğin, bir inşaat malzemesi için dayanıklılık ve uzun ömür önemliyken, bir tıbbi implant için biyouyumluluk ve şekil hafızası gibi özellikler daha ön plana çıkar. Buna göre alttaki maddelerden ilk yedi maddesi her halükarda akıllı malzeme özelliği göstermekteyken, diğerleri potansiyel olarak akıllı malzeme özelliklerine sahiptir. Uygulandıkları yere göre tasarlayıcı tarafından bu özelliklerini kullanmaları sağlanabilir ya da henüz akıllı davranış özellikleri tam anlamıyla ortaya çıkarılmamış olabilir. Akıllı malzemeler, sürekli gelişen bir alan olup yeni malzemeler ve uygulamalar her geçen gün ortaya çıkmaktadır.

*Anahtar Kelimeler* – Yarı iletken malzemeler, Nanomalzemeler, Biyomalzemeler, Fotonik Kristaller.

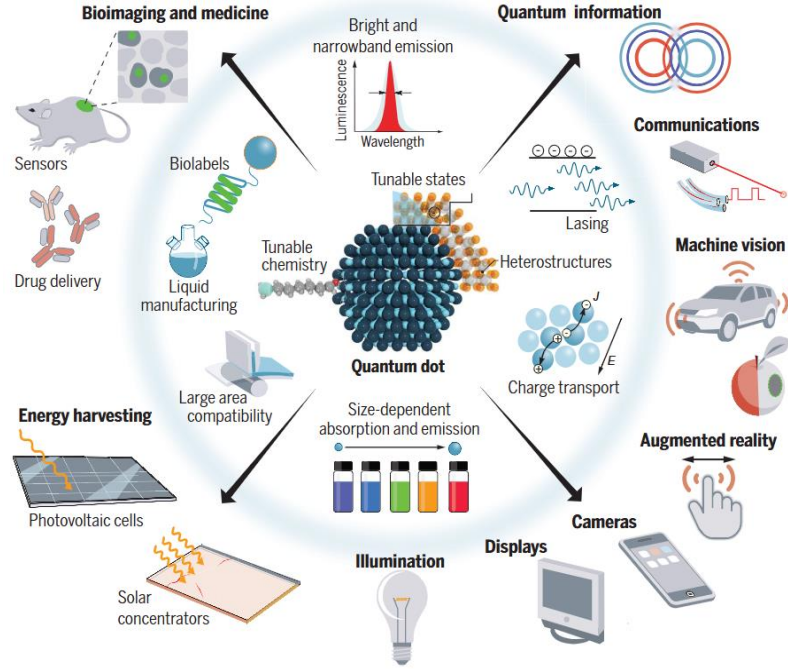
### I. GİRİŞ

Teknolojinin hızla geliştiği günümüzde, malzeme bilimi, yenilikçi çözümler sunan kritik bir alan haline gelmiştir. Özellikle, çevresel uyarılara tepki verebilen ve bu tepkileri faydalı bir şekilde dönüştürebilen "akıllı malzemeler," birçok sektörde çığır açıcı uygulamalara öncülük etmektedir. Akıllı malzemeler, dışsal fiziksel, kimyasal veya mekanik etkiler karşısında davranışlarını değiştirebilen özellikleri ile geleneksel malzemelerden ayrılır. Bu tür malzemelerin sunduğu esneklik ve işlevsellik, enerji, sağlık, inşaat, otomotiv ve havacılık gibi alanlarda yenilikçi tasarımlar geliştirilmesini mümkün kılar. Bu malzemelerle ilgili araştırmalar, yalnızca mevcut uygulamalara değil, aynı zamanda "potansiyel olarak akıllı" kategorisine giren, henüz tam anlamıyla keşfedilmemiş veya optimize edilmemiş malzemelere de odaklanmayı gerektirir. Potansiyel olarak akıllı malzemeler, uygun yapılandırma veya uyarılama teknikleriyle akıllı özellikler kazanabilecek, ancak şu an için tam anlamıyla bu yeteneklere sahip olmayan malzemeleri ifade eder. Bu yaklaşım, malzeme biliminin geleceğine yönelik heyecan verici fırsatlar sunmakta ve araştırmacılara geniş bir keşif alanı açmaktadır.

Bu bildiriye, potansiyel olarak akıllı malzemelerin temel özellikleri, dönüşüm süreçleri ve gelecekteki uygulama alanlarına yönelik potansiyel ele alınacaktır. Amacımız, bu malzemelerin teorik ve pratik açıdan taşıdığı değeri vurgulamak ve bu alandaki araştırmalara yeni bir perspektif kazandırmaktır.

### A. Yarıiletken Malzemeler

Yarı iletken malzemeler, elektriksel iletkenliği metaller ve yalıtkanlar arasında değişen malzemelerdir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, bu özellik sıcaklık, ışık, elektrik alanları veya kimyasal safsızlıklar tarafından kontrol edilebilir ve bu da onları modern elektronik sistemlerin temel yapı taşları haline getirir [1].



Şekil 1. Yarı iletken kuantum nokta teknolojileri [1].

En yaygın yarı iletkenlerden biri olan Silisyum (Si) örneğinden başlayabiliriz. Işığa tepki veren Si atomları, güneş panellerinin (fotovoltaik hücreler) yapımına olanak tanıyan bir elektrik akımı oluşturur. Si molekülleri, sıcaklık arttıkça iletkenlik değerindeki değişim sayesinde sıcaklık sensörü olarak kullanılabilirler. Kimyasal doping sayesinde BJT ve MOSFET gibi farklı transistörlerin üretiminde kullanılırlar. Geleneksel yarı iletkenler arasında silisyum, germanyum ve galyum bulunur; arsenit (GaAs) gibi malzemeler de vardır. Bu malzemeler mikroçiplerden güneş panellerine kadar birçok uygulamada kullanılır. Yarı iletken malzemeler genellikle üç ana kategoriye ayrılır. Yarı iletken sınıfındaki elementler arasında silisyum ve germanyum bulunur. Silisyum, elektronik devrelerde en yaygın kullanılan malzemedir [2]. Bileşik yarı iletken kategorisinde, galyum, arsenit gibi malzemeler bulunur ve yüksek hızlı elektronik cihazlarda kullanılırlar. Organik yarı iletkenler grubundaki malzemeler karbon bazlı bileşiklerden oluşur ve esnek elektronik gibi yenilikçi alanlarda kullanılır. Silisyum düşük maliyetlidir ancak bazı yüksek frekanslı uygulamalarda sınırlıdır. Galyum Arsenit yüksek hızlı ve verimli cihazlar için idealdir ancak maliyetlidir. Organik yarı iletkenler esnek ve hafif cihazlarda kullanılabilir ancak düşük kararlılık sorunu vardır [3].

Yarı iletkenler yapılarına ve özelliklerine göre 3 gruba ayrılabilir. Tek kristal yarı iletkenler yüksek saflığa ve düzenli bir atomik yapıya sahiptir. Mikroelektronik uygulamalarda kullanılırlar [4]. Polikristalin yarı iletkenler daha düşük maliyetlidir ancak performans açısından sınırlıdır. Amorf yarı iletkenler güneş panellerinde yaygın olarak kullanılır. Yarı iletken malzemelerin çok çeşitli uygulamaları vardır. Transistörlerde, diyotlarda ve mikroçiplerde kullanılırlar, bu nedenle mevcut teknolojik düzeyde elektronik cihazların yeri doldurulamaz bir parçasıdır. Fotovoltaik panellerde kullanılan silikon, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürür. Bu nedenle, güneş enerjisi sistemlerinin vazgeçilmez bir parçasıdır [5]. Galyum nitrid (GaN) gibi galyum bileşikli yarı iletkenler, ışık yayan diyotlarda (LED'ler) kullanılır. Yarı iletkenler, LED ve lazer teknolojisinin ana bileşenleridir. Yarı iletkenler, özellikle optik depolama, iletişim ve tıbbi cihazlar için kompakt, verimli ve yüksek performanslı lazer diyotların yapımında kullanılır.

Grafen gibi iki boyutlu malzemeler nanoelektronik cihazlarda çığır açıyor. Grafen, karbon atomlarının petek (altıgen) yapıda düzenlendiği, kalınlığı bir atom olan iki boyutlu bir malzemedir. elikten 200 kat daha güçlüdür, ancak son derece hafiftir. Ayrıca çok yüksek iletkenliğe, esnekliğe ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Kimyasal değişikliklere duyarlılığı, sensör uygulamalarında da kullanılması sağlar. Bugünün silikon tabanlı transistörlerinden çok daha yüksek performansla sahip kuantum transistörlerinin üretiminde kullanılması öngörülmektedir. Ayrıca gelecekte süper kapasitörler ve yeni nesil piller gibi esnek elektronik devrelerin ve esnek enerji depolama birimlerinin üretiminde kullanılması muhtemeldir [6]. Yarı iletken nanopartiküller veya kuantum noktaları optoelektronikte devrim yaratıyor. Bu malzemeler, geleneksel silikon teknolojisinin ötesine geçme, özellikle yüksek znrlkl ekranlarda, optik iletişimlerde ve gelişmiş biyoteknolojik uygulamalarda devrim yaratma potansiyeline sahiptir [1]. Yeni geliştirilen organik ve hibrit malzemeler, hem elektronik hem de fotonik işlevleri birleştiren çok işlevli cihazlarda da kullanılabilir. Gelecekte, yarı iletken teknolojisinin kuantum hesaplama, nöromorfik cihazlar ve yapay zeka sistemleri gibi alanlarda daha fazla ilerleme sağlaması bekleniyor. Yeni retim teknikleri ve malzeme yenilikleri, daha küçük, daha hızlı ve enerji açısından verimli yeni nesil cihazların üretilmesini sağlayacaktır [7].

### B. Süperiletken Malzemeler

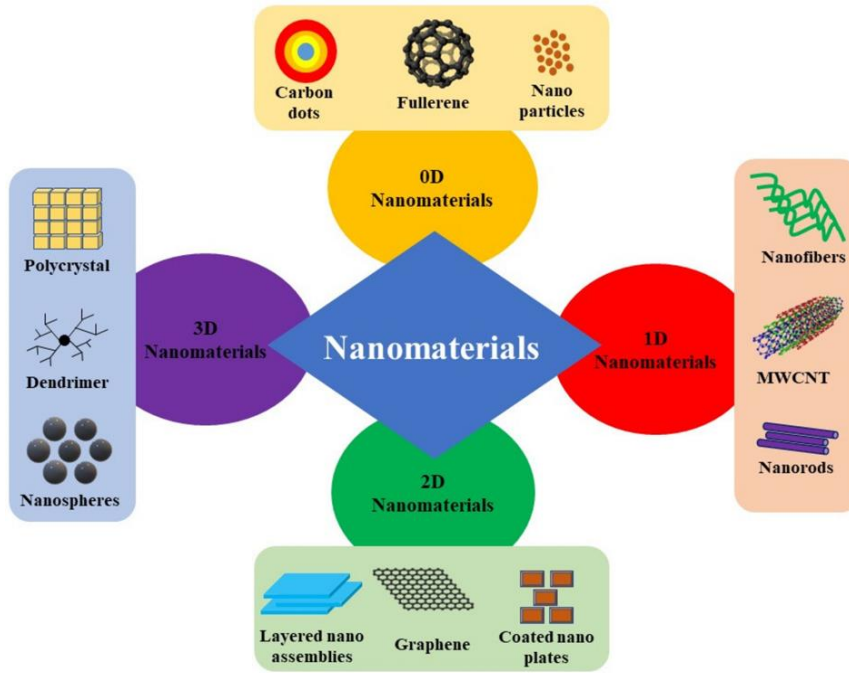
Süperiletken malzemeler, elektriksel direncin tamamen ortadan kalktığı ve manyetik akının malzemedен dışarı itildiği (Meissner etkisi) olağanüstü bir fiziksel duruma ulaşan özel maddelerdir. Bu belirli bir kritik sıcaklığın altında gerçekleşir ve malzemeye bağlı olarak değişir [8]. İlk süperiletkenler cıva gibi düşük sıcaklık malzemeleri olarak keşfedilmiş olsa da, bu alan aşağıda belirtildiği gibi daha yüksek kritik sıcaklıklara sahip yeni malzemelerle genişlemiştir. Süperiletken malzemeler fiziksel özellikleri ve kimyasal yapılarına göre birkaç kategoriye ayrılabilir. 30 k'nin altındaki kritik sıcaklıklara sahip düşük sıcaklık süperiletkenleri çoğunlukla niyobyum-titanyum gibi metaller içerir [9]. İtiryum baryum bakır Oksit gibi malzemeler yüksek sıcaklık süperiletkenleri grubuna girer ve 77 k'nin üzerinde çalışabilir. İnce filmlerden oluşan iki boyutlu süperiletkenler, kuantum özellikleri nedeniyle son yıllarda araştırmanın odak noktası olan malzemelerdir. Düşük sıcaklık süperiletkenleri daha güvenilir bir altyapı sunar ancak sıvı helyum gerektirir. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri sıvı nitrojenle çalışabilir, bu da işletme maliyetlerini azaltır [10]. İki boyutlu süperiletkenler yüksek hızlı elektronik cihazlarda büyük potansiyele sahiptir, ancak üretim süreçleri karmaşıktır.

Süperiletken malzemeler, manyetik alana tepkilerine göre iki ana kategoriye ayrılır. Bir manyetik alanla aniden süperiletken olmaktan çıkan Tip I süperiletkenler, saf metallere oluşur [11]. Geniş manyetik alan aralıklarında süperiletken kalabilen Tip II süperiletkenler, karmaşık oksitler gibi yüksek sıcaklık speriletkenleridir. Süperiletken malzemeler hem küçük ölçekli hem de büyük ölçekli teknolojilerde devrim yaratmıştır. Enerji uygulamalarında kullanılan süperiletken kablolar, elektriksel kayıpları önleyerek enerji verimliliğini artırır [12]. Manyetik rezonans görüntüleme cihazları, tıbbi cihazlarda süperiletken malzemelerin kullanımına önemli bir örnektir. Bu cihazlar, güçlü bir manyetik alan üretmek için süperiletken malzemeler kullanır. Maglev trenleri, süperiletken mıknatıslar sayesinde sürtünmesiz hareket eder. Bu nedenle, süperiletkenler doğrudan ulaşım sektöründe yerlerini almıştır. Yeni süperiletkenlerin keşfi için veri odaklı yapay zeka yaklaşımları kullanılmaktadır. Yüksek basınç desteği sayesinde oda sıcaklığında süperiletkenlik özellikleri gösterebilen malzemeler üzerinde araştırmalar yürütülmektedir [13]. Gelecekte süperiletken malzemelerin enerji verimliliği, sürdürülebilir ulaşım ve kuantum bilgisayarları gibi alanlarda daha yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Üretim maliyetlerinin azaltılması ve yeni malzeme keşifleri bu teknolojilerin daha geniş çapta benimsenmesini sağlayacaktır.

### C. Nanomalzemeler

Nanomalzemeler, 1 ila 100 nanometre arasında değişen boyutlara sahip malzemelerdir ve yüksek yüzey-hacim oranıyla olağanüstü fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler gösterirler. Bu zellikler, nanomalzemeleri enerji depolama, elektronik, biyomedikal ve çevresel uygulamalar gibi çok çeşitli

uygulamalar için uygun hale getirir. Nanomalzemeler, yapılarındaki atomik düzenlemeyi değiştirerek elektriksel, manyetik, mekanik veya optik gibi yeni işlevsel özellikler kazanırlar. Malzemeler karakteristik olarak daha iletken, daha dayanıklı veya daha hafif hale gelirler ve böylece yüksek teknoloji uygulamalarında büyük avantajlar sağlarlar [14]. Nanomalzemeler genellikle yapılarına, boyutlarına ve bileşimlerine göre sınıflandırılır. Karbon nanotüpler, grafen ve karbon kuantum noktaları nanomalzemeleri gibi karbon bazlı malzemeler, yüksek iletkenlikle ekstra mekanik mukavemet sunar [15]. Altın ve gümüş nanopartiküller gibi metal ve metal oksit grubundan nanomalzemeler, ilaç dağıtımı, kanser tedavisi ve doku mühendisliği gibi biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer bazlı nanomalzemeler özellikle ilaç dağıtımı ve doku mühendisliği için geliştirilmiştir. Nanomalzemeler farklı sınıflandırma kriterlerine göre gruplandırılabilir. Şekil 2'de gösterildiği gibi, boyut ve şekil açısından nanopartiküller (0D), nanoteller (1D) ve nanofilmler (2D) gibi kategorilere ayrılırlar [16].



Şekil 2. Nanomalzemelerin sınırlı boyutluluklarına göre sınıflandırılması [16].

Kompozisyon açısından organik, inorganik ve hibrit olmak üzere nanomalzemeler olarak sınıflandırılırlar. Nanomalzemeler, piller ve süperkapasitörler gibi enerji depolama sistemlerinde verimliliği artırmak için kullanılır [17]. Nanomalzemeler biyomedikal alanda hassas biyosensörler, hedefli ilaç dağıtımı, sterilizasyon teknolojisi, hipertermi ile kanser tedavisi, tıbbi görüntüleme ve doku mühendisliğinde kullanılır. Çevresel uygulamalarda nanoteknoloji çözümleri su arıtımı ve kirlilik kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nanomalzemelerin sağladıkları birçok avantajın yanı sıra olumsuz yönleri de vardır. Karbon nanomalzemeler yüksek iletkenlik sunar, ancak üretim süreçleri karmaşık ve zordur. Metal bazlı nanomalzemeler yüksek yüzey enerjileri nedeniyle biyomedikal uygulamalarda tercih edilir, ancak toksisite riski taşırlar. Polimer bazlı nanomalzemeler biyoyoumluluk avantajına sahiptir, ancak termal dirençleri düşüktür. Bu nedenle, bu malzemeler belirli sıcaklıkların üzerinde şekil kaybı, mekanik özelliklerin zayıflaması ve hızlı aşınma gibi sonuçlar yaşayabilir [18]. Yapay zeka, nanomalzemelerin hızlı bir şekilde tasarlanmasını ve birçok farklı açıdan optimize edilmesini sağlar. Bu nedenle, termal, mekanik, optik, elektriksel, kimyasal ve biyolojik yönlerden daha verimli cihaz tasarımları mümkün olabilir. Hibrit nanomalzemeler yeni işlevler sunar. Gelecekte, nanomalzemelerin enerji depolama, biyoteknoloji ve çevre çözümleri gibi alanlarda daha geniş bir yer bulması bekleniyor. Daha sürdürülebilir üretim yöntemleri ve toksisite kontrolü, nanoteknolojinin etkinliğini artıracaktır [19].

#### D. Manyetorheolojik ve Elektoreolojik Malzemeler

Manyetorheolojik ve elektoreolojik malzemeler, belirli dış manyetik veya elektrik alanları altında reolojik özelliklerini kolayca değiştirebilen akıllı malzeme türleridir. Bu malzemeler, dış alana bağlı olarak akıcıdan yarı katı duruma kadar değişen durumlar alabilir; bunu akılda tutarak, çeşitli teknolojik kullanımlarda pratik uygulamalar bulurlar [20]. MR malzemeler manyetik alanların etkisi altında viskozitelerini ve elastik modüllerini değiştirirken, ER malzemeler elektrik alanlarının etkisi altında benzer şekilde davranır. Yapısal ve işlevsel özelliklere bağlı olarak, kategoriler manyetorheolojik ve elektoreolojik malzemeleri ayırt eder. Manyetorheolojik sıvılar, manyetik parçacıkların bir taşıyıcı sıvı içinde dağılmasından kaynaklanır ve özellikle araç süspansiyon sistemleri için hizmet eder. Manyetorheolojik elastomerler, elastik bir matris içinde dağılmış manyetik parçacıklar tarafından üretilir ve titreşim sönümlenme alanında uygulanır [21]. Elektoreolojik akışkanlar, bir elektrik alanının etkisi altında ve çok kısa bir sürede akışkanlık/viskozite özelliklerini aniden değiştiren özel malzemelerdir. Bir elektrik alanının uygulanması altında, parçacıklar viskoziteyi artırmak için sıvı içinde hizalanabilir ve elektrik alanının kesilmesiyle sıvı önceki akışkanlık durumuna geri döner. MR ve ER malzemeleri sıvılar olarak iki sınıfa ayrılabilir ve MR ve ER malzemeleri fiziksel yapılarına ve uygulama alanlarına göre iki sınıfa ayrılabilir: sıvılar ve elastomerler. Sıvılar yapı olarak akışkandır ve alan etkisine yüksek hassasiyetle yanıt verirler. Elastomerler sert bir yapı sunar ve uzun süreli mekanik yükler için daha uygundur. Dışarıdan uygulanan manyetik veya elektriksel etkilerle ayarlanan viskozite, farklı alanlarda uygulama örnekleri sunar. Otomotiv uygulamalarında, MR akışkanları normalde süspansiyon sistemlerinde titreşim kontrolü için uygulanır. MR elastomerler biyomedikal cihazlarda ve robotik sistemlerde hareket kontrolü ve sönümlenme sistemleri için kullanılmaktadır [22].

MR elastomerler sismik hafifletmede yapısal titreşim sönümlenme uygulamalarına uygulanabilir. MR Malzemeler daha yüksek hassasiyet ve daha geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir, ancak uygulama süreçleri pahalıdır. ER Malzemeler ile daha ekonomik seçenekler sunulmaktadır, bu da çevresel değişikliklere karşı daha savunmasızdır [23]. Nanomalzemelerle modifiye edilmiş MR ve ER malzemelerde verimlilik ve hassasiyet yüksek olabilir. Yüksek performanslı yeni nesil elastomerler daha geniş bir sıcaklık ve yük aralığında çalışma fırsatları sağlar. Yakın gelecekte manyetorheolojik ve elektoreolojik malzemelerin enerji tasarrufu ve hassas kontrol ile sürdürülebilir malzeme tasarımı gibi umut verici alanlarda daha fazla uygulama bulacağı beklenmektedir. Yeni üretim teknikleri ve hibrit malzeme tasarımları bu teknolojilerin uygulama olanaklarını daha da genişletmektedir [24].

#### E. Fotonik Kristaller

Fotonik kristaller, ışığın özelliklerini kontrol etmek için kırılma indisi periyodik olarak düzenlenen malzemelerdir. Bu tür kristaller, belirli bir dalga boyu aralığında ışığın yayılmasını engelleyen fotonik bant aralıkları oluşturur. Fotonik kristaller, optik sinyalleri yönlendirme, filtreleme ve kontrol etme gibi işlevleri nedeniyle modern optoelektronik uygulamalarda büyük öneme sahiptir. Fotonik kristaller, düzenlenme yapılarına ve boyutlarına göre üç ana gruba ayrılır. Tek boyutlu (1D) fotonik kristaller, yalnızca bir boyutta değişen bir kırılma indisine sahiptir ve ince film optiklerinde yaygın olarak kullanılır. İki boyutlu fotonik kristaller, yüzeysel düzenlemelere sahiptir ve genellikle sensörlerde ve lazerlerde kullanılır [25]. Üç boyutlu fotonik kristaller, üç boyutlu periyodik yapılarla daha geniş uygulama potansiyeline sahiptir, ancak üretimleri zordur. Fotonik kristaller, kullanılan malzemelere ve yapısal özelliklerine göre de sınıflandırılabilir. Doğrusal ve doğrusal olmayan kristaller ışık dalga boylarını dönüştürme yeteneğine sahipken, doğrusal kristaller ışığı pasif olarak yönlendirir. Topolojik fotonik kristaller, ışığın belirli yönlerde kayıpsız taşınmasını sağlayan topolojik özellikler sayesinde ışığın kristal yapılarda yüksek verimlilikle yönlendirilmesini sağlar [26].

Fotonik kristaller, kompakt ve hassas optik filtreler ve dalga kılavuzları gibi optik cihazların üretiminde kullanılır. Fotonik kristaller ayrıca çevresel ve biyomedikal analizlerde yüksek hassasiyetle çalışabilen sensörlerde de kullanılmıştır. Güneş panellerinde ve termofotovoltaik uygulamalarda kullanılan fotonik kristaller enerji verimliliğini artırır. 1D ve 2D fotonik kristaller daha kolay üretim teknikleriyle düşük maliyet sunar, ancak performans açısından sınırlıdır. 3D fotonik kristaller daha geniş uygulama

potansiyeline sahiptir, ancak üretim süreçleri karmaşıktır. Yeni topolojik fazların keşfi, fotonik kristallerin daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlamıştır. Kolloid Fotonik kristallerin kendi kendine montaj teknikleri ile düşük maliyetle üretilmesine olanak sağlanmıştır [27]. Gelecekte, fotonik kristallerin kuantum iletişimi, biyomedikal teşhis ve enerji yönetimi gibi alanlarda daha yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Üretim maliyetlerini düşürmek ve yeni topolojik özellikler keşfetmek, bu teknolojilerin geniş bir şekilde uygulanmasını sağlayacaktır.

#### F. Biyomalzemeler

Biyomalzemeler, canlı organizmalarla uyumlu bir şekilde etkileşime girebilen ve cihaz tasarımlarında veya doğrudan biyolojik süreçleri izlemek, desteklemek veya değiştirmek için kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler genellikle tıbbi cihazların, implantların ve doku mühendisliği uygulamalarının temel bileşenleridir. Gelişen teknolojiyle birlikte biyomalzemeler, uyarılara yanıt verme, kendi kendini iyileştirme ve biyolojik süreçleri düzenleme gibi akıllı özellikler kazanmıştır [28]. Biyomalzemeler yapısal ve işlevsel özelliklerine göre doğal, sentetik ve hibrit olarak çeşitli kategorilere ayrılır. Doğal biyomalzemeler, kolajen, kitosan ve bakteriyel selüloz gibi doğal kaynaklardan elde edilir ve yüksek biyoyumluluk sunar. Sentetik biyomalzemeler polimerik, metalik ve seramik malzemelerden üretilir. Özellikle implant ve protezlerde kullanılırlar [29].

Hibrit Biyomalzemeler, doğal ve sentetik bileşenlerin bir araya getirilmesiyle üretilir. İşlevsel ve mekanik özellikler açısından üstün performans sağlarlar. Doğal malzemeler yüksek biyoyumluluk sunar ancak mekanik dayanıklılık açısından sınırları vardır. Sentetik malzemeler yüksek mekanik dayanıklılığa sahip ancak biyoyumluluk açısından optimizasyon gerektiren malzemelerdir [30]. Biyomalzemeler ayrıca biyolojik ve fiziksel özelliklerine göre de sınıflandırılabilir. Reaktif ve adapte olabilen biyomalzemeler, çevresel değişikliklere yanıt vererek biyolojik süreçleri düzenler. Kendi kendini onaran malzemeler, hasar gördüklerinde kimyasal reaksiyonlarla kendilerini onarabilen malzemelerdir. Adından da anlaşılacağı gibi biyomalzemeler, doku mühendisliği, ilaç dağıtımı ve tıbbi cihazlar gibi tıbbi alanlarda kullanılır. Biyomalzemeler, kemik ve yumuşak doku rejenerasyonunda yaygın olarak kullanılır [31]. Biyolojik uyarılara yanıt veren biyomalzemeler, kontrollü ilaç dağıtım sistemlerinde tercih edilir. Akıllı biyomalzemeler, implante edilebilir cihazlarda uzun ömür ve biyoyumluluk sunar. Yapay zeka, biyomalzemelerin tasarımını ve üretimini hızlandırır. Kişiselleştirilmiş doku mühendisliği çözümleri üç boyutlu baskı ile geliştirilmektedir [29]. Gelecekte, biyomalzemelerin kişiselleştirilmiş tedavi, sürdürülebilir sağlık çözümleri ve gelişmiş biyoteknolojik uygulamalarda daha geniş bir yer bulması beklenmektedir. Malzeme bilimi ve biyoteknolojideki ilerlemeler, yeni nesil biyomalzemelerin gelişimini hızlandıracaktır.

## II. GELECEKTEKİ ARAŞTIRMA İHTİYAÇLARI

Potansiyel olarak akıllı malzemeler alanında gelecekteki araştırmalar, hem teorik hem de uygulamalı birçok ihtiyacı içermektedir. Öncelikli olarak, yeni malzemelerin tasarımı ve keşfi, yüksek performanslı ve sürdürülebilir çözümler sunmak adına önem taşır. Bu bağlamda, malzeme özelliklerinin çevresel etkilere daha duyarlı hale getirilmesi, mikro ve nano ölçekli yapıların kontrolüyle mümkün olabilir. Enerji verimliliğini artıran ve çevresel etkileri en aza indiren üretim süreçlerinin geliştirilmesi, sürdürülebilirlik hedeflerini desteklerken, hibrit malzeme sistemleri ve fonksiyonel entegrasyon da farklı işlevlerin uyumlu bir şekilde bir araya getirilmesine olanak tanıyacaktır. Ölçeklenebilir ve ekonomik üretim yöntemlerinin yanı sıra, akıllı malzemelerin çeşitli sektörlerdeki performanslarının gerçek koşullarda test edilmesi ve standartlaştırılması gerekmektedir. Teorik modeller ve simülasyon teknikleri, bu malzemelerin davranışlarının daha iyi anlaşılmasını ve tasarımların optimize edilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, uzun vadeli dayanıklılık ve güvenilirlik araştırmaları, özellikle kritik uygulamalarda büyük önem taşımaktadır. Kendini düzenleyebilen ve çevresiyle etkileşime giren sistemlerin geliştirilmesi, akıllı malzemelerin sınırlarını genişletirken, etik üretim süreçleri ve toplumsal etkilerin değerlendirilmesi de sürdürülebilir bir



gelecek için vazgeçilmezdir. Bu çok yönlü yaklaşımlar, potansiyel olarak akıllı malzemelerin bilimsel ve teknolojik gelişiminde kritik bir rol oynayacaktır.

### III. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Potansiyel olarak akıllı malzemeler, malzeme biliminin geleceğini şekillendiren yenilikçi bir alan olarak öne çıkmaktadır. Çevresel uyarılara duyarlı hale getirilebilen, işlevselliği artırılmış ve farklı sektörlere uygulanabilir özelliklere sahip bu malzemeler, enerji, sağlık, çevre, otomotiv ve daha pek çok alanda çığır açıcı fırsatlar sunmaktadır. Ancak, bu malzemelerin tam potansiyelinin ortaya çıkarılması, disiplinler arası iş birliği, ileri malzeme tasarımı, ölçeklenebilir üretim teknikleri ve performans testleri gibi çeşitli araştırma alanlarında yoğun bir çaba gerektirmektedir. Bu bildiride, potansiyel olarak akıllı malzemelerin temel özellikleri, dönüşüm süreçleri ve gelecekteki uygulama alanları ele alınmıştır. Gelecekte yapılacak araştırmalar, bu malzemelerin daha verimli, dayanıklı ve sürdürülebilir hale getirilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca, teorik modellerden pratik uygulamalara kadar geniş bir yelpazeyi kapsayan bu alan, malzeme bilimiyle teknoloji arasındaki bağı daha da güçlendirecektir. Potansiyel akıllı malzemeler, yalnızca bilimsel yenilikleri değil, aynı zamanda toplumun geleceğini de şekillendirme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, bu alandaki araştırmaların desteklenmesi ve geliştirilmesi, hem akademik hem de endüstriyel açıdan stratejik bir öncelik olarak görülmelidir.

### KAYNAKLAR

- [1] F. P. García de Arquer, D. V. Talapin, V. I. Klimov, Y. Arakawa, M. Bayer, and E. H. Sargent, 'Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges', *Science*, vol. 373, no. 6555, p. eaaz8541, Aug. 2021, doi: 10.1126/science.aaz8541.
- [2] Y.-J. Mii, 'Semiconductor Innovations, from Device to System', in *2022 IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits (VLSI Technology and Circuits)*, Jun. 2022, pp. 276–281. doi: 10.1109/VLSITechnologyandCir46769.2022.9830423.
- [3] W. Hu *et al.*, 'Ambipolar 2D Semiconductors and Emerging Device Applications', *Small Methods*, vol. 5, no. 1, p. 2000837, 2021, doi: 10.1002/smt.202000837.
- [4] T. Kim *et al.*, 'Progress, Challenges, and Opportunities in Oxide Semiconductor Devices: A Key Building Block for Applications Ranging from Display Backplanes to 3D Integrated Semiconductor Chips', *Advanced Materials*, vol. 35, no. 43, p. 2204663, 2023, doi: 10.1002/adma.202204663.
- [5] W. Huang, M. Wang, L. Hu, C. Wang, Z. Xie, and H. Zhang, 'Recent Advances in Semiconducting Monoelemental Selenium Nanostructures for Device Applications', *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 42, p. 2003301, 2020, doi: 10.1002/adfm.202003301.
- [6] M. Shrivastava and V. Ramgopal Rao, 'A Roadmap for Disruptive Applications and Heterogeneous Integration Using Two-Dimensional Materials: State-of-the-Art and Technological Challenges', *Nano Lett.*, vol. 21, no. 15, pp. 6359–6381, Aug. 2021, doi: 10.1021/acs.nanolett.1c00729.
- [7] S. B. Mitta *et al.*, 'Electrical characterization of 2D materials-based field-effect transistors', *2D Mater.*, vol. 8, no. 1, p. 012002, Nov. 2020, doi: 10.1088/2053-1583/abc187.
- [8] C. Yao and Y. Ma, 'Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications', *iScience*, vol. 24, no. 6, p. 102541, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.isci.2021.102541.
- [9] K. Ilieva and O. Dinolov, 'State-of-the-art of superconducting materials and their energy-efficiency applications', in *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, Nov. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/EEAE49144.2020.9279004.
- [10] J. Shimoyama and T. Motoki, 'Current Status of High Temperature Superconducting Materials and their Various Applications', *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 292–304, 2024, doi: 10.1002/tee.23976.
- [11] X. Gui, B. Lv, and W. Xie, 'Chemistry in Superconductors', *Chem. Rev.*, vol. 121, no. 5, pp. 2966–2991, Mar. 2021, doi: 10.1021/acs.chemrev.0c00934.
- [12] M. Yazdani-Asrami, S. Seyyedbarzegar, A. Sadeghi, W. T. B. de Sousa, and D. Kottonau, 'High temperature superconducting cables and their performance against short circuit faults: current development, challenges, solutions, and future trends', *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 8, p. 083002, Jul. 2022, doi: 10.1088/1361-6668/ac7ae2.
- [13] L. Boeri *et al.*, 'The 2021 room-temperature superconductivity roadmap', *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 34, no. 18, p. 183002, Mar. 2022, doi: 10.1088/1361-648X/ac2864.

- [14] S. Thangudu, 'Next Generation Nanomaterials: Smart Nanomaterials, Significance, and Biomedical Applications', in *Applications of Nanomaterials in Human Health*, F. A. Khan, Ed., Singapore: Springer, 2020, pp. 287–312. doi: 10.1007/978-981-15-4802-4\_15.
- [15] G. Speranza, 'Carbon Nanomaterials: Synthesis, Functionalization and Sensing Applications', *Nanomaterials*, vol. 11, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2021, doi: 10.3390/nano11040967.
- [16] Paras *et al.*, 'A Review on Low-Dimensional Nanomaterials: Nanofabrication, Characterization and Applications', *Nanomaterials*, vol. 13, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/nano13010160.
- [17] M. A. Subhan, K. P. Choudhury, and N. Neogi, 'Advances with Molecular Nanomaterials in Industrial Manufacturing Applications', *Nanomanufacturing*, vol. 1, no. 2, Art. no. 2, Sep. 2021, doi: 10.3390/nanomanufacturing1020008.
- [18] X. Zheng, P. Zhang, Z. Fu, S. Meng, L. Dai, and H. Yang, 'Applications of nanomaterials in tissue engineering', *RSC Adv.*, vol. 11, no. 31, pp. 19041–19058, May 2021, doi: 10.1039/D1RA01849C.
- [19] S. A. Mazari *et al.*, 'Nanomaterials: Applications, waste-handling, environmental toxicities, and future challenges – A review', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 2, p. 105028, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105028.
- [20] A. K. Bastola, M. Paudel, L. Li, and W. Li, 'Recent progress of magnetorheological elastomers: a review', *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, no. 12, p. 123002, Nov. 2020, doi: 10.1088/1361-665X/abbc77.
- [21] S. S. Kang, K. Choi, J.-D. Nam, and H. J. Choi, 'Magnetorheological Elastomers: Fabrication, Characteristics, and Applications', *Materials*, vol. 13, no. 20, Art. no. 20, Jan. 2020, doi: 10.3390/ma13204597.
- [22] Y. Kim and X. Zhao, 'Magnetic Soft Materials and Robots', *Chem. Rev.*, vol. 122, no. 5, pp. 5317–5364, Mar. 2022, doi: 10.1021/acs.chemrev.1c00481.
- [23] M. Keshavarzian, M. M. Najafizadeh, K. Khorshidi, P. Yousefi, and S. M. Alavi, 'Comparison of the application of smart electrorheological and magnetorheological fluid cores to damp sandwich panels' vibration behavior, based on a novel higher-order shear deformation theory', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 236, no. 2, pp. 225–244, Apr. 2022, doi: 10.1177/09544089211037803.
- [24] M. Vinyas, 'Computational Analysis of Smart Magneto-Electro-Elastic Materials and Structures: Review and Classification', *Arch Computat Methods Eng*, vol. 28, no. 3, pp. 1205–1248, May 2021, doi: 10.1007/s11831-020-09406-4.
- [25] U. Biswas, C. Nayak, and J. K. Rakshit, 'Fabrication techniques and applications of two-dimensional photonic crystal: history and the present status', *OE*, vol. 62, no. 1, p. 010901, Dec. 2022, doi: 10.1117/1.OE.62.1.010901.
- [26] G.-J. Tang, X.-T. He, F.-L. Shi, J.-W. Liu, X.-D. Chen, and J.-W. Dong, 'Topological Photonic Crystals: Physics, Designs, and Applications', *Laser & Photonics Reviews*, vol. 16, no. 4, p. 2100300, 2022, doi: 10.1002/lpor.202100300.
- [27] J. Wang, P. W. H. Pinkse, L. I. Segerink, and J. C. T. Eijkel, 'Bottom-Up Assembled Photonic Crystals for Structure-Enabled Label-Free Sensing', *ACS Nano*, vol. 15, no. 6, pp. 9299–9327, Jun. 2021, doi: 10.1021/acsnano.1c02495.
- [28] K. B. Kumar, A. Rajitha, A. K. Rao, K. Alam, A. Albawi, and G. Sethi, 'SMART Materials for Biomedical Applications: Advancements and Challenges', *E3S Web Conf.*, vol. 430, p. 01133, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202343001133.
- [29] W. Park, H. Shin, B. Choi, W.-K. Rhim, K. Na, and D. Keun Han, 'Advanced hybrid nanomaterials for biomedical applications', *Progress in Materials Science*, vol. 114, p. 100686, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.pmatsci.2020.100686.
- [30] C. Kalirajan, A. Dukle, A. J. Nathanael, T.-H. Oh, and G. Manivasagam, 'A Critical Review on Polymeric Biomaterials for Biomedical Applications', *Polymers*, vol. 13, no. 17, Art. no. 17, Jan. 2021, doi: 10.3390/polym13173015.
- [31] C. Montoya, Y. Du, A. L. Gianforcaro, S. Orrego, M. Yang, and P. I. Lelkes, 'On the road to smart biomaterials for bone research: definitions, concepts, advances, and outlook', *Bone Res*, vol. 9, no. 1, pp. 1–16, Feb. 2021, doi: 10.1038/s41413-020-00131-z.