

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

An Overview of the Reflections of Nanotechnology Applications on the Textile Industry and Future Perspectives

Semahat Doruk^a, Burcu Ulutas^c, Muhammed Bora Akin^{*c},

Submitted: 15.08.2024 Revised: 02.11.2024 Accepted: 26.11.2024 doi:10.30855/gmbd.0705AR11

ABSTRACT

Keywords: Nanotechnology, Textile, Fabric, Innovation

^a Çankırı Karatekin University,
Engineering Faculty,
Dept. of Chemical Engineering
18100 - Çankırı, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8476-2544

^b Çankırı Karatekin University,
Engineering Faculty,
Dept. of Chemical Engineering
18100 - Çankırı, Türkiye
Orcid: 0009-0002-9176-2790

^{c*} Çankırı Karatekin University,
Engineering Faculty,
Dept. of Chemical Engineering
18100 - Çankırı, Türkiye
Orcid: 0000-0003-3841-1633
e mail: mbakin@karatekin.edu.tr

*Corresponding author:
mboraakin@gmail.com

Textiles are integral to human life, spanning uses from clothing and home decor to industrial applications and economic contributions. Garments and accessories showcase personal expression, while home textiles enhance living spaces and provide comfort. The textile industry also offers employment to millions globally, with traditional textiles influencing cultural, social, and economic aspects of life. However, specific conditions demand specialized textiles. In industries like metal and chemical production, textiles with high heat resistance, flame retardancy, or chemical protection require advanced engineering and manufacturing technologies. As living conditions evolve, so do the demands on textiles. Beyond current features such as antibacterial properties, resistance to temperature extremes, and durability, future textiles will incorporate advanced functionalities. Innovations may include energy self-generation, integration with the Internet of Things (IoT), and sensor-based health monitoring to continuously track human well-being. This article explores recent advancements in nanotechnology applications in textiles and provides a roadmap for the future, emphasizing how technology is reshaping this essential industry to meet emerging needs.

Nanoteknoloji Uygulamalarının Tekstil Endüstrisine Yansımaları ve Gelecek Perspektifi Üzerine Genel Bir Bakış

ÖZ

Tekstiller, insan yaşamının ayrılmaz bir parçasıdır ve giyimden ev dekorasyonuna, endüstriyel uygulamalardan ekonomik katkılara kadar geniş bir kullanım yelpazesi sunar. Giysi ve aksesuarlar kişisel ifadeyi yansıtırken, ev tekstilleri yaşam alanlarını güzelleştirir ve konfor sağlar. Tekstil sektörü ayrıca dünya genelinde milyonlarca kişiye istihdam sağlamaktadır ve geleneksel tekstiller kültürel, sosyal ve ekonomik açıdan yaşamı etkilemektedir. Ancak, belirli koşullar özel tekstillere ihtiyaç duyar. Metal ve kimyasal üretim gibi sektörlerde, yüksek ısı direnci, alev geciktirici özellikler veya kimyasal koruma sağlayan tekstiller, ileri mühendislik ve üretim teknolojilerini gerektirir. Değişen yaşam koşulları, tekstillerin de bu ihtiyaçlara uyum sağlamasını zorunlu kılmaktadır. Antibakteriyel özellikler, ani ve büyük sıcaklık değişimlerine dayanıklılık ve fiziksel aşınmaya karşı koruma gibi güncel özelliklerin ötesinde, gelecekte tekstillerin enerji üretebilmesi, Nesnelerin İnterneti (IoT) ile entegrasyon sağlayabilmesi ve insan sağlığını sürekli izlemek için sensörlerle donatılması beklenmektedir. Bu makale, tekstillerde nanoteknolojinin son uygulamalarını inceleyerek geleceğe yönelik bir yol haritası sunmakta ve bu temel endüstrinin teknolojik yeniliklerle nasıl şekillendiğini vurgulamaktadır..

Anahtar Kelimeler:
Nanoteknoloji, Tekstil, Kumaş,
İnovasyon

1. Giriş (Introduction)

Tekstil endüstrisinde, gelişmiş özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi önemli ölçüde mühendislik birikimi kullansa da sınırların aşılması nanoteknoloji sayesinde mümkün olmaktadır. Nanoteknoloji kullanımı ile tekstil malzemeleri, leke direnci, alev geciktiricilik, kırışıklık direnci, nem yönetimi, antimikrobiyal özellikler, UV koruma ve toprak salım özellikleri gibi işlevler kazanabilmektedir [1]. Bu ilerlemeler çeşitli sektörlerde kullanılabilen yüksek performanslı tekstil malzemelerinin üretimini sağlamıştır [2]. Nanoteknoloji, akıllı ve çok fonksiyonlu tekstillerin üretimini kolaylaştırmış, böylece otomobilden ilaca geniş bir yelpazede uygulanabilen, sporculardan askerlere kadar farklı bireylere hitap eden ürünler ortaya çıkmıştır [3].

Nanoteknolojinin tekstillerde kullanımı, estetik, nefes alabilirlik ve esneklik gibi tekstillerin doğal özelliklerini korurken çeşitli işlevlere akıllı tekstillerin üretimine olanak tanımaktadır [4]. Tekstil malzemelerini işlevsel hale getirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır [5]. Nanoteknolojinin entegrasyonu, dayanıklılık, rahatlık, çevreye dost ürünlerin üretimi mümkün olmakta ve tüm bunların dışında üretim sırasında enerji tasarrufu sağlamak da mümkün olmaktadır [6].

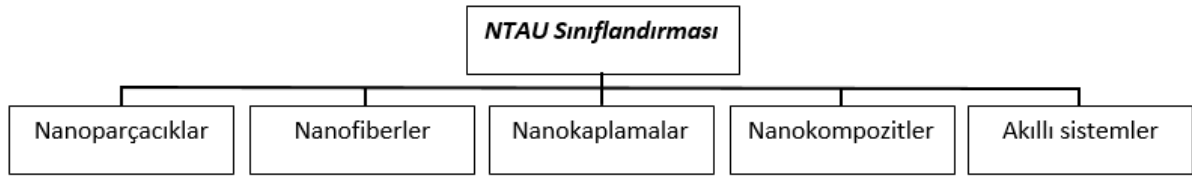
Tekstildeki nanoteknoloji uygulaması biyotıp, algılama teknolojisi ve hatta COVID-19 gibi hastalıklarla mücadele gibi alanlara kadar uzanarak tıp alanında karşılık bulmuştur [7,8]. TiO_2 ve ZnO gibi nanopartiküller, liflerde statik yükün dağıtılmasında kullanılmış, tekstillerde nanomalzemelerin elektrik iletkenliğinin avantajları da ortaya çıkarılmıştır [9]. Sadece bu örnekler bile nanoteknolojinin tekstiller üzerinde yeni çalışmalara açacağı yolları sergilemektedir.

1.1. Tekstil endüstrisinde nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications in the textile industry)

Nanoteknoloji, tekstil endüstrisi dahil olmak üzere çeşitli sektörler üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Tekstil ürünlerinde nanoteknolojinin entegrasyonu, sadece geliştirilmiş işlevselliklere sahip yenilikçi ürünlerin geliştirilmesi değil aynı zamanda üretim aşamasındaki nanoteknolojiye sahip teknolojinin kullanımını da kapsamaktadır. Nanoteknoloji ürünü olan gümüş nanopartiküller ile üretilen tekstiller, antibakteriyel, antiviral ve anti-inflamatuar aktiviteler gibi benzersiz özellikleri nedeniyle kozmetik ürünler ve elektronik bileşenler dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda ilgi çekicidir [10]. Nanoteknoloji, tekstil materyallerine işlevsel özellikler kazandırma şeklini devrim niteliğinde değiştirmiş, özelliklerini iyileştirme konusunda yeni olasılıklar açmıştır [11]. Yapılan çalışmalar, nanometre ölçekli materyallerin tekstiller içine entegre edilmesinin giysi renklerini geliştirebileceğini, anti-koku işlevleri sağlayabileceğini, UV koruması sunabileceğini ve insan biyozizmesini mümkün kılacağı göstermiştir [12].

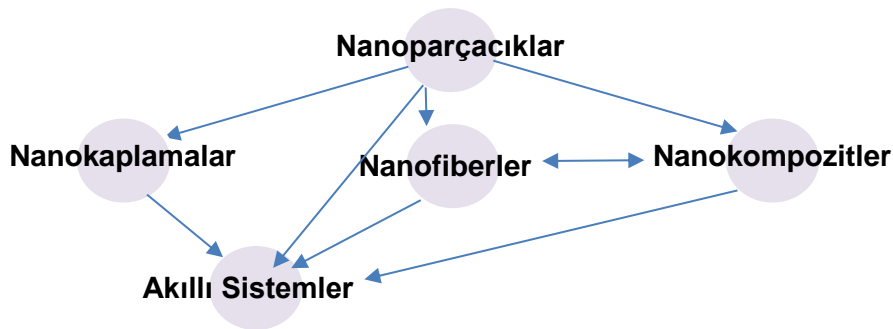
Ayrıca, nanoteknoloji, geleneksel ambalaj malzemelerinin ulaşamadığı işlevleri sunan aktif gıda ambalaj sistemlerinin geliştirilmesini kolaylaştırmıştır [13]. Tekstillerde nanoteknolojinin uygulanması, esnek, gözenekli ve iletken enerji tekstilleri gibi, tekstil işlevselliğini geliştirme potansiyeli ve çeşitliliğini sergileyen ürünlerin üretilmesinde de kullanılabilir [12]. Tüm bunların ötesinde, tekstillerde nanomalzemelerin sürdürülebilir kullanımı için yapılan araştırmaların tekstil üretiminde nanoteknolojinin faydalarından yararlanılırken çevresel etkilerin göz önünde bulundurulması da önemli bir gerekliliktir [14].

Nanoteknolojinin tekstil alanında uygulamaları (NTAU) geniş bir yelpaze olup bazı uygulamalar birden fazla sınıfa dahil olabilmektedir. Şekil 1'de yapılan sınıflandırma özellikle iplikten başlayarak giyilebilir ürüne doğru giden malzemelerin üretimi göz önüne alındığında nanoteknolojinin uygulamalarını içermektedir. Belirtmek gerekmektedir ki nanoteknolojinin tekstil alanında uygulamalarda kusursuz olması yapılacak bazı geliştirmelerin ve farklı alanlarda bulunan birtakım teknolojilerin bu alana edilmesiyle gerçekleşecektir.



Şekil 1. Nanoteknolojinin tekstil alanındaki uygulamalarının (ntau) sınıflandırılması (Classification of nanotechnology applications in textiles (NTAU))

NTAU, farklı alt sınıfların birbirleriyle etkileşim halinde olduğu karmaşık bir yapıya sahiptir. Nanoparçacıklar, hem nanokompozitlerin bir bileşeni olarak hem de nanokaplamaların yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Ayrıca, nanoparçacıklar nanofiberlerin üretiminde kullanılabilir ve bu şekilde nanofiberlerin özelliklerini iyileştirebilir. Dahası, nanoparçacıklar doğrudan akıllı sistemlerde sensör, aktüatör veya diğer fonksiyonel bileşenler olarak işlev görebilir. Nanofiberler, nanokompozitlerin yapısal bileşenleri olmanın yanı sıra, akıllı sistemlerde sensör veya aktüatör olarak işlev görebilir. Nanokompozitler, nanofiberlerin üretiminde kullanılabilir ve bu şekilde nanofiberlerin özelliklerini iyileştirebilir. Nanokaplamalar, akıllı sistemlerin yüzey işlevselliğini artırarak bu sistemlerin performansını iyileştirir. Nanokompozitler ise akıllı tekstil ürünlerinin dayanıklılığını ve işlevselliğini artırarak bu ürünlerin daha etkin kullanılmasını sağlar. NTAU için varolan etkileşimlerin daha iyi anlaşılması için ilişkiler ağı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. NTAU ilişkilerinin gösterimi (Representation of NTAU Relationships)

1.1.1. Nanoparçacıklar (Nanoparticles)

Nanoparçacık, boyutları 1 ila 100 nanometre arasında olan parçacıklara verilen isimdir. Bu parçacıklar, atomlarının dizilimi ve yapıları nedeniyle benzersiz fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler gösterebilir. Özellikle nanoparçacığın yüksek yüzey alanı ile hacim oranı sağlaması, katalizör, sensör ve filtreleme gibi alanlarda uygulanmasını sağlamıştır [15].

Nanoparçacıklar metaller, seramikler, polimerler ve karbon bazlı malzemelerden üretilebilir. Üretim yöntemleri arasında kimyasal buhar çöktürme, sol-jel işlemi ve fiziksel buhar çöktürme yer almaktadır. Bu malzemelerin tek başına çeşitli uygulamalarda kullanılması dışında çeşitli malzemelere kompozit oluşturacak şekilde katılarak katıldıkları malzemelerin özelliklerini geliştirmek amacıyla da hizmet edebilmektedirler. Bu şekilde uygulamaları daha da genişler ve tıptan çevre teknolojisine, elektronikten enerji depolama ve dönüşüm sistemlerine kadar uzanır. Tıpta hedefli ilaç salım sistemleri, görüntüleme teknikleri ve kanser tedavisi için kullanılırken, çevre teknolojisinde su arıtma ve hava filtreleme sistemlerinde yer aldıkları gözlenmektedir [16,17].

Tekstilde özellikle apreleme işlemleri kullanılarak, nanoparçacıklar tekstillerle birleştirilmektedir. İletken veya manyetik metaller veya metal oksitlerden oluşan çeşitli nanoparçacıklar, tekstillerin özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır [18]. Üstelik bu geliştirme sağlanırken tekstil yüzeyinin temel özelliklerini değiştirmemektedir [19]. Nanoparçacıkların uygulaması yapılan apre için kullanılan malzeme miktarını da azaltmaktadır [20]. Pamuklu kumaş üzerinde antibakteriyel, kolay leke çıkarma ve UV koruma özellikleri kazandırmak amacıyla nanoparçacıkları kumaş yüzeyine yerleştirilmektedir [21]. Plazma / nanopartiküllerin kullanılması sayesinde, tekstil liflerinin birçok özelliğinde büyük iyileşmelerin sağlandığı bir çalışmada bu iyileştirmeler kullanılan plazma ve nanopartikül türlerine bağlı olarak değişmektedir. SEM görüntüleri, kumaşların yüzey özelliklerinin değişirken hacim özelliklerinin değişmeden kaldığını göstermektedir. Uygulamadaki kolaylığı, çevresel

ve enerji tasarrufu avantajlarıyla, plazma/nanopartikül teknolojisinin tekstil sektörüne yüksek performanslı malzemeler geliştirme potansiyeli bulunmaktadır [22]. Nanoparçacıklarla modifiye dokuma tekstiller, boyutlarına ve konsantrasyonlarına bağlı olarak, çözgü ve atkı iplikleri arasına, ipliklerin içine veya selüloz liflerin nano ölçekli aralıklarına depolanabilir veya hapsedilebilmektedir [23]. Yenilikçi nanoparçacıklar, tekstillerde renk ve antimikrobiyal, hidrofilik, kendini temizleyen, ultraviyole (UV) koruması ve alev geciktirici gibi çeşitli fonksiyonel özellikler geliştirmede büyük potansiyel göstermiştir [24]. Antimikrobiyal tekstiller, bakır nanoparçacıkları, bakır oksit parçacıkları, gümüş nanoparçacıkları, titanyum dioksit ve grafen bazlı nanomalzemeler gibi aktif ajanlarla tekstillerin emdirilmesi veya kaplanması yoluyla geliştirilebilmektedir [25]. Ayrıca konjuge polimer nanoparçacıklara dayalı akıllı tekstiller, yapılan çamaşır testlerinden sonra etkili dayanıklılık sergileyerek, pratik uygulanabilirliklerini kanıtlamaktadır [26]. Pamuklu kumaşlarda çinko oksit nanoparçacıklar kullanarak yapılan fonksiyonel apreleme, antimikrobiyal özellikler, su iticilik, toprak direnci, anti-statik özellikler, boyanabilirlik, renk haslığı ve tekstil malzemelerinin dayanıklılık özelliklerini arttırmaktadır [27]. Araştırmacılar tekstil endüstrisinde üretilen geleneksel kumaşların özelliklerini arttırmak için tekstil lifleri üzerine nano boyutlu parçacıkların yerleştirilmesi için yeni teknikler arayışlarındadır [28]. Ayrıca tekstiller üzerine eş zamanlı nanoparçacıklar-biyopolimerlerin yerleştirilmesinin yararları üzerine de çalışılmakta ve antibakteriyel özelliklerin yıkama haslığı, biyoyuymululuk ve uzun süreli antibakteriyel etkilerin öne çıktığı görülmektedir [29]. Metal nanoparçacıklar kullanarak tekstillere antimikrobiyal apreler kazandırmaya odaklanan çalışmalarda, antimikrobiyal özellikler, etki mekanizmaları, toksisite çalışmaları bu yönde incelenmektedir [30].

1.1.2. Nanofiberler (Nanofibres)

Nanofiber, çapı nanometre ölçeğinde olan ince liflerdir. Nanolifler olarak da adlandırılmaktadırlar. Bu lifler, polimer veya seramik gibi çeşitli malzemeler kullanılarak özel üretim teknikleri ile elde edilir. En yaygın nanofiber üretim yöntemi elektro-çekim/elektro-eğirme (electrospinning)'dir [31] ve bu yöntem yüksek voltaj uygulanan bir polimer çözeltisinin ince bir uçtan geçirilerek liflerin çekilmesi olarak tarif edilebilir [32].

Nanofiberlerin yüksek yüzey alanı ve gözenekliliği sayesinde, özellikle filtreleme [33], tıbbi uygulamalar, doku mühendisliği, yara örtüleri [34], sensör teknolojisi ve çeşitli elektroniklerdeki uygulamalarda [35] kullanımları oldukça değerlidir. Örneğin, hava ve su filtrelerinde, nanofiberler zararlı mikroorganizmaları, virüsleri ve diğer kontaminantları etkili bir şekilde süzebilir. Aynı zamanda, hafiflikleri ve yüksek dayanıklılıkları sayesinde savunma ve havacılık sanayinde de tercih edilmektedir [36].

Nanofiber tekstil alanında yapılan çalışmalar, nanoteknoloji ve tekstil endüstrisinin kesişiminde önemli gelişmeleri ortaya koymaktadır. Elektro-eğirme ve nanofiber üretimi konularındaki ilerlemeler, endüstriyel tekstil işlemlerine dair bilgi birikiminin nanofiber oluşturma yöntemlerindeki yeni gelişmelerle birleştiğini göstermektedir [37]. Bu üstün özelliklere sahip lifler yeni nesil tıbbi iplikler ve tekstillerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır [38]. Bu tür nanolifler, tekstil endüstrisindeki geleneksel malzemelerin ötesinde performans ve işlevsellik sunmaktadır. Bu gelişmeler, nanometre ölçeğinde liflerin üretimini ve kullanımını artırarak tekstil endüstrisinde yeni olanaklar sunsa da üretim miktarlarının düşük ve pahalı olmaları bu ileri teknolojik malzemelerin tekstil üzerine kullanılmasından ziyade üstün özelliklerinin kullanılacağı alanlar farklılaşmaktadır.

Nanofiberlerin çok yönlülüğü, filtrasyon, biyomedikal uygulamalar, koruyucu ve fonksiyonel tekstiller gibi çeşitli teknolojik alanlarda kullanılmalarına olanak tanımaktadır [39]. Bu sayede, nanofiberlerin tekstil endüstrisindeki uygulama alanları sürekli genişlemekte ve daha işlevsel tekstil ürünlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Nanofiberler, çeşitli malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirme potansiyelleri için yoğun olarak incelenmektedir. Neisiany vd. (2017), karbon/epoksi kompozitlerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için işlevselleştirilmiş elektro-eğirilmiş poliakrilonitril nanofiberlerin eklenmesini araştırmıştır [40]. Abe ve Yano (2012), selüloz nanofiber tabanlı hidrojel ve yüksek mekanik dayanıklılıkları üzerine çalışmalar yapmış, nanofiberlerin polimer matrislerini güçlendirmedeki potansiyelini vurgulamıştır [41]. Beachley ve Wen (2009), doku mühendisliği uygulamaları için nanofiber güçlendirilmiş protein yapılarının üretimine odaklanmış, nanofiberlerin doku rejenerasyonunda yapısal destek ve rehberlik sağlama rolünü ön plana çıkarmıştır [42]. Li vd. (2014),

diş kompozitlerinin polimer nanofiberlerle güçlendirilmesini incelerken, nanofiberlerin diş materyallerinin mekanik özelliklerini geliştirmek için ideal nano dolgu maddeleri olarak potansiyelini ortaya koymaktadır [43]. Merkle vd. (2014), jelatin ve polivinil alkol kullanarak çekirdek-kabuk nanofiberlerin üretimini göstermiş, nanofiber yapılarında mekanik dayanıklılık ve biyoaktiviteyi entegre etmiştir [44]. Ayrıca, Abe vd. (2013), NaOH ile β -kitin nanofiberlerine dayalı sağlam hidrojel yapılarının hazırlanmasını incelerken, nanofiberlerin suda davranışını ve stabil ve sağlam hidrojel yapıları üzerine çalışmıştır [45].

Fiber takviyeli kompozitlerde üretim yöntemleri, numune kalınlığı, çekme hızı gibi faktörlerin Mod I kırılma tokluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir [46]. Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla, seçici lazer ergitme gibi eklemeli imalat yöntemlerinin avantajları bulunmasına rağmen, bazı zorluklarla karşılaşmaktadır [47]. Perovskit üretiminde döndürerek-kaplama (spin-coating), termal buharlaştırma gibi yöntemler sıkça kullanılmaktadır [48]. Üretim yöntemine bağlı olarak malzemenin mikroyapısını etkileyen işlem adımları önemlidir [49].

Üretim yöntemlerinin malzeme özellikleri üzerindeki etkileri geniş bir alanda incelenmektedir. Örneğin, baryum hekzaferrit malzemesinin manyetik özelliklerindeki değişimler farklı üretim yöntemleri kullanılarak incelenmiştir [50]. Ayrıca, implant destekli hibrit protezlerin üretiminde kullanılan materyaller ve yöntemler detaylı bir şekilde incelenmiştir [51]. Otomatik yapı üretim teknolojisinin avantajlarından biri de çeşitli malzemelerin kullanılabilmesidir [52].

Üretim yöntemlerinin sürdürülebilirlik açısından da önemi vardır. Fiber takviyeli polimerlerin kullanımı, daha sürdürülebilir ve yenilenebilir yapılar oluşturmaya katkı sağlayabilir [53]. Ayrıca, hidrojen üretim teknolojileri de sürdürülebilirlik açısından ele alınmaktadır [54].

1.1.3. Nanokaplamalar (Nanocoatings)

Nanokaplama, yüzeylerin nanometre boyutunda ince bir tabaka ile kaplanması işlemidir. Bu kaplama, genellikle metal, seramik veya plastik gibi malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek, dayanıklılığını artırmak, sürtünme direncini azaltmak, korozyon önlemek veya özel optik özellikler sağlamak amacıyla uygulanır [55]. Nanoteknoloji ve malzeme bilimi alanlarının gelişimiyle birlikte nanokaplama teknikleri de daha yaygın hale gelmiştir. Bu teknikler arasında buhar biriktirme, plazma destekli teknikler, kimyasal indirgeme ve kendiliğinden birleşme gibi yöntemler bulunmaktadır [56].

Literatürdeki son çalışmalar incelendiğinde, nanokaplamaların, antimikrobiyal özellikler ve emülsiyon sistemindeki stabilite sağlamak amacıyla *Porang (Amorphophallus muelleri)* raf ömrünü uzatmak için [57], fotovoltaik panellerin kendiliğinden temizlenme ve hidrofobik özellik sağlamak amacıyla [58], implantlar ve tıbbi cihazlarda biyouyumluluğun artırılması böylelikle implantın kemikle bütünleşme ve vücuda güçlü ve kalıcı bir şekilde entegre olması sürecini ve uzun vadeli klinik sonuçları iyileştirme amacıyla [59,60], enerji verimli binalarda sıcaklık kontrolü sağlamak ve anti-grafiti kaplamalar üretmek amacıyla [61] ve kendi kendini onarma amacıyla [62] çeşitli alanlarda kullanıldığı görülmektedir. Nanokaplamaların akıllı kumaşlar içindeki uygulamalarına bakıldığında, sol-jel teknikleri kullanılarak elde edilen nanokaplamalar, kumaşların yüzeyini pürüzsüzleştirerek suyun kumaş yüzeyine yapışmasını engellerken, sentetik kumaşların statik elektriği toplamasını önlemek için elde edilen nanokaplamalar kumaşa anti-statik özellikler katmakta, UV ışınlarını bloke edebilen çeşitli nanopartiküller güneş dayanımını arttırmakta ve metal nanopartikülleri kullanılan nanokaplamalar ile antibakteriyel özellikler mümkün olmaktadır [63,64].

1.1.4. Nanokompozitler (Nanocomposites)

Nanokompozitler, tekstil endüstrisine çeşitli işlevsellikler ve özellikler sunarak önemli bir etki yapmıştır. Polimer nanokompozitler, tekstiller için yenilikçi nano-bitirme malzemelerinin geliştirilmesine öncülük ederek, geleneksel kompozit malzemelerden ayrı benzersiz yapı-özellik ilişkilerine sahip farklı bir malzeme sınıfı yaratmıştır [65,66]. Bu nanokompozitler, tekstillerin çok işlevli bitirilmesi için etkin bir şekilde kullanılmış olup, artırılmış mekanik dayanıklılık, alev geciktiricilik, radyasyon koruması ve iyileştirilmiş dayanıklılık gibi avantajlar sağlamıştır [67,68]. Nanomalzemelerin kumaşlara entegrasyonu yaygın bir uygulama haline gelmiş olup, nanokompozit lifler, kaplamalar ve zeki polimerik nanokaplamalar, performansı artırmak ve yeni işlevler kazandırmak amacıyla tekstil ürünlerine dahil edilmektedir. Metalden nanopartiküllere, karbon

nanotüplere ve grafenlere kadar çeşitli nanomalzemeler, insan cildine rahatça yapıştırılabilen veya tekstillerle bütünleştirilerek fizyolojik parametreleri veya çevresel koşulları izleyebilen yüksek hassasiyetli giyilebilir sensörlerin geliştirilmesini sağlamıştır [69]. Nanokompozitler, fototermal ve antibakteriyel aktiviteler gibi özellikler içeren akıllı tekstillerin ilerlemesinde kritik bir rol oynamış, bu gelişmiş malzemelerin tekstil uygulamalarındaki çok yönlülüğünü ve potansiyelini vurgulamıştır [26]. Ayrıca, nanokompozitlerin yara örtüleri, temiz su üretimi ve antimikrobiyal özellikler gibi uygulamalar için tekstil kumaşlarında kullanılması, nanokompozitlerin çeşitli sektörlerdeki farklı zorlukları ele almadaki çeşitli ve etkili rollerini [70-72]. Genel olarak, nanokompozitler, tekstil teknolojisindeki ilerlemeye önemli katkılarda bulunmuş, tekstil malzemelerinde işlevsellik, sürdürülebilirlik ve performans için çözümler sunmuştur.

1.1.5. Akıllı tekstiller (Smart textiles)

Akıllı tekstil, gelişmiş teknoloji ile donatılarak kullanıcıya çeşitli işlevler sağlayabilen kumaşlar olarak tanımlanabilir. Giysilere entegre edilmiş sensörler, aktüatörler ve kontrol mekanizmaları sayesinde çevresel değişikliklere tepki verebilir, kullanıcıların sağlık durumunu izleyebilir veya rahatlık ve performansı artırabilir. Akıllı tekstiller, gelişmekte olan bir alan olarak, etkileşimli ve duyarlı yeteneklere sahip çeşitli tekstil malzemelerini kapsar. Bu tekstiller, performans özelliklerine bağlı olarak pasif akıllı tekstiller, aktif akıllı tekstiller ve ultra akıllı tekstiller olarak sınıflandırılmıştır [73].

Pasif akıllı tekstiller, belirli uyarıcılara (sıcaklık, ışık, basınç gibi) tepki veren ancak bu verileri işlemeyen veya analiz etmeyen kumaşlardır. Bu akıllı tekstillerin ilk nesli olarak kabul edilebilir ve giyen kişinin sağlığı veya çevre ile ilgili olarak çevresel koşullardaki değişiklikleri yalnızca algılamak ve izlemekle sınırlıdır. Dış değişiklikleri tespit etmek için bir sensör olarak işlev görürler; örneğin, yalıtım özelliklerine sahip montlar, dış sıcaklığın ne olduğuna bakılmaksızın aynı tepkiyi gösterir. Bu kategorideki tekstiller, anti-bakteriyel aktivite, anti-statik özellikler, UV koruması, alev geciktiricilik gibi çeşitli işlevler sunar [64].

Aktif akıllı tekstiller ise dış çevredeki değişiklikleri veya uyarıları algılamakla kalmaz, aynı zamanda çevreyle dinamik bir etkileşim içerisine girer ve ona aktif olarak tepki verebilir. Bu gelişmiş tekstiller, dış uyarıcılardaki modülasyona göre fonksiyonlarını otomatik olarak ayarlayarak çevresel değişikliklere adapte olurlar. Sensörler, mikroelektronik ve aktüatörler içeren bu tekstiller, çevresel değişiklikleri algılayabilir ve bu verileri kullanarak dinamik bir tepki verebilirler [64]. Örneğin, sıcaklık değişikliğine bağlı olarak ısıtma veya soğutma özelliği aktif hale gelebilir. Bu adaptasyon yeteneği, onların sadece hassas olmalarının ötesinde, aktif bir şekilde tepki verebilir bir aktüatör olarak da işlev görmelerini sağlar. Su geçirmez ve nem geçirgen kumaşlar (nefes alabilen kumaşlar), şekil hafızalı malzemeler, termal regülasyon sağlayan tekstiller gibi özelliklere sahip bu tekstiller, kullanıcıların konfor ve ihtiyaçlarına göre kendilerini ayarlayabilir. Bu özellikler, tekstillerin daha işlevsel ve kullanıcı dostu hale gelmesini sağlar, böylece günlük yaşamda pratiklikleri ve etkinlikleri artar.

Ultra akıllı tekstiller ise her zaman bir seçeneğe sahip şekilde dizayn edildiğinden çevresel uyarıcılara en iyi şekilde nasıl uyum sağlayacaklarına da karar verir. Dışarıdaki sıcaklığı algıladıktan sonra vücut sıcaklığını ısıtma veya soğutma yoluyla değiştirebilmek gibi karar bu tip tekstillere örnek olarak verilebilir. Son zamanlarda, bu tekstillerin üretimi, kimya, fizik, mekanik, elektronik, biyoloji gibi geleneksel tekstil teknolojisi ile çok disiplinli bilim dalları arasındaki başarılı ilişki sayesinde hızla artmıştır [64].

Akıllı tekstiller, spor ve sağlık izleme, askeri ve savunma, gelişmiş giyilebilir teknoloji ve günlük giyimde kullanılabilir. Akıllı tekstiller, kullanıcı deneyimini ve konforunu artırmak için tasarlanmış, çok işlevli ve etkileşimli giysiler sunmaktadır.

Çevre ve kullanıcılarla etkileşim kuracak şekilde tasarlanmışlardır, uyarıcılara duyarlılık göstermeleri, onlara tepki vermeleri ve tekstil yapısına işlevler entegre ederek uyum sağlamaları mümkündür [74,75]. Akıllı tekstiller, tıbbi tekstiller, koruyucu giysiler, dokunmatik ekranlar ve sensörler gibi çeşitli ürünlerin gelişiminde kritik bir rol oynayan iletken polimerlerin entegrasyonu ile daha da geliştirilebilir [76].

Elektroniklerin tekstillerle entegrasyonu, çevresel uyarıcılara duyarlılık ve tepki verebilme yeteneğine sahip elektronik tekstiller veya e-tekstillerin ortaya çıkmasına yol açmıştır [77]. Bu e-tekstiller sağlık,

wellness, spor ve hatta uzay keşfi gibi çeşitli sektörlerde uygulamalar bulmuştur [78]. Ayrıca, nanoteknolojideki ilerlemeler, mobil bağlantı, MP3 çalarlar ve navigasyon sistemleri gibi işlevlerle donatılmış akıllı giyilebilir tekstillerin geliştirilmesini sağlamıştır [79].

Bazı çalışmalarda, PANI/poliakrilonitril (PAN) nanolifler, gümüş nanopartikülleri, tek/çok duvarlı-nano karbon tüpler (SWCNT/MWCNT), Ag, Au ve Cu nanopartikülleri, esnek tekstiller, giyilebilir güneş tekstilleri, triboelektrik nanogeneratorlar ve tek parça halinde kendinden güç üreten veya şarj olabilen akıllı ve giyilebilir tekstillerde kullanılabilmiştir [79].

Akıllı tekstillerin sürdürülebilirliği bir soru işareti oluşturmakta, üretim teknolojilerinde, malzemelerde ve araştırma ve geliştirmede iyileştirmeler yapılmasını gerektirmektedir. Bu sayede rekabetçi ve çevre dostu olmaları sağlanacaktır [80]. Ayrıca, akıllı tekstillerin geliştirilmesi, tekstil fabrikasyon yöntemleri, sensör entegrasyonu ve ticari bileşenlerin tekstil mimarilerine entegrasyonu ile ilgili zorluklar ile birlikte fırsatlar da sunmaktadır [81].

Çalışmalar incelendiğinde nanoteknolojinin tekstilde özelliklerin birden fazlası üzerinde etkileri olmaktadır. Bu nedenle anlatım içerisinde sınıflandırılma yapılmış olsa da literatürdeki çalışmalarda geliştirmelerin etkilerinin iç içe geçtiği görülecektir.

2. Geliştirilmiş Kumaş Özellikleri (Enhanced Fabric Properties)

2.1. Dayanıklılık ve güç (Durability and strength)

Nano teknolojik işlem görmüş tekstiller, geleneksel malzemeleri aşan olağanüstü bir dayanıklılık ve çekme mukavemeti sergiler. Karbon nanotüpler veya grafen gibi nanopartiküller liflere gömülerek, onları inanılmaz derecede güçlü ancak hafif hale getirebilir. Bu ilerleme, inşaat ve spor gibi endüstriler için koruyucu giysilerin ve ekipmanların üretiminde özellikle yararlıdır [63]. Tablo 1'de tekstilde dayanım arttırmaya yönelik nanoteknolojik uygulamaları özetlemektedir.

2.2. Su iticilik, lekeden korunma ve kendini temizleme (Water repellency, stain protection, and self-cleaning)

Nanoteknoloji, süperhidrofobik malzemelerin geliştirilmesini sağlamıştır. Tekstillerin yüzey yapısını, su ve lekeleri iten kumaşlar yaratarak, giysinin ömrünü uzatır ve temizleme gereksinimlerini azaltır [86].

Titanyum dioksit gibi fotokatalitik özelliklere sahip nanopartiküller kullanılarak, kendini temizleyen kumaşlar organik bileşikler ve kirleticileri ışığa maruz kaldıklarında parçalayabilir. Bu özellik, özellikle hijyenin önemli olduğu tıbbi giysi ve spor giyim gibi uygulamalar için caziptir.

Tablo 1. Tekstilde dayanıklılık amaçlı nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for durability in textiles)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Mikro seviyede dokunmuş penetrasyon engelleyici kumaş üretimi	Nanolifler	[82]
Yüksek performanslı tekstillerin geliştirilmesi	Yenilikçi nanomalzemeler	[2]
Tekstilde giyim konforu	β -Siklodekstrin/Polyakrilonitril	[83]
Antistatik tekstil	Karbon siyahı/Polypropylene/polyamide (Naylon)	[84]
Yangın geçirmez tekstil	Nano-kaolinit	[85]
Tekstillerin estetik ve fonksiyonel iyileştirmesi	Estetik cazibe ve esneklik sağlayan nanomalzemeler	[4]
Yenilikçi tekstil işlevleri: leke direnci, alev geciktiricilik, kırışıklık direnci	Geliştirilmiş işlevselliğe sahip nanomalzemeler	[1]
İşlevsel tekstil malzemelerinin geliştirilmesi	Performansı artırılmış nanomalzemeler	[5]

Fotokatalitik özelliklere sahip nanopartiküller, özellikle titanyum dioksit, tekstillerle entegre edilerek işlevselliği artırılmış kendini temizleyen kumaşların oluşturulmasına yol açmıştır. Titanyum dioksit nanopartikülleri, pamuk ürünleri gibi tekstillerde olağanüstü fotokatalitik aktivite sergileyerek, kendini temizleme özellikleri sağlar [87]. Tekstil materyallerinin nano yapılar ile fonksiyonelleştirilmesi, fotokatalitik kendini temizleme, antimikrobiyal koruma, UV ışığından korunma, alev geciktiricilik ve nem yönetimi dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için faydalı olmuştur [88]. Yapılan çalışmalar, TiO₂ kaplı pamuk tekstillerinin önemli ölçüde kendini temizleme özelliklerine sahip olduğunu, bakterisidal aktivite ve kırmızı şarap ile kahve gibi lekelerin ayrıştırılmasını içerdiğini göstermiştir [89].

Titanyum dioksit nanopartiküllerinin tekstiller içine dahil edilmesi, antibakteriyel özellikleri artırdığı ve kendini temizleme işlevlerini başardığı gösterilmiştir [90]. Araştırmalar, ZnO nanopartiküllerini yün ve poliakrilonitril lifler üzerine yerleştirerek kendini temizleyen polimerik liflerin başarılı bir şekilde hazırlanmasını ve önemli fotokatalitik kendini temizleme aktivitesini sergilediğini vurgulamıştır [91]. Ayrıca, TiO₂ nanopartikülleri temelinde yüksek şeffaflığa sahip kendini temizleyen filmlerin sentezi başarılmış, ileri fotokatalitik özellikler sunulmuştur [92].

Bununla birlikte, fluoropolimer ve silika nanopartikülleri kullanılarak geliştirilen süperhidrofobik pamuk kumaşın, kendini temizleme özellikleri ile çok amaçlı uygulamalar sunduğu gösterilmiştir [86]. Pamuk kumaş üzerine BiOCl/Bi₂WO₆ fotokatalizörünün uygulanması, kendini temizleme, UV koruması ve fotokatalitik özellikler gibi işlevlerin geliştirilmesi konusunda umut vaat etmiştir [93]. TiO₂ nanotüpleri içeren hibrit membranlar, mükemmel fotokatalitik aktivite sergileyerek, kendini temizleme ve anti-fouling özelliklerini maksimize etmek için tasarlanmıştır.

Sonuç itibarıyla, özellikle titanyum dioksit olmak üzere fotokatalitik özelliklere sahip nanopartiküllerin tekstil sektöründe kullanılması, kendini temizleyen ve işlevselliği artırılmış kumaşlar yaratma konusunda bir devrim yaratmış ve tekstil ürünlerinin temizliği, dayanıklılığı ve performansı gibi alanlarda yenilikçi çözümler sunmuştur. Bu durum, özellikle hijyen ve işlevsellik açısından önem taşıyan sektörler için büyük önem arz etmektedir. Tablo 2, su iticilik, lekeden korunma ve kendini temizleme uygulamaları için bir özet sunmaktadır.

Tablo 2. Tekstilde su iticilik, lekeden Korunma ve kendini Temizleme için nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for water repellency, stain resistance, and self-cleaning in textiles)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Kendini temizleyen tekstil	TiO ₂ / Pamuk - Au-TiO ₂ film / Pamuk	[94,95]
Yağ-su arayüzlerinde emilmiş	SiO ₂ nanopartikülleri	[96]
Yağ iticilik	Perflorostilatlanmış dördüncül amonyum silan/SiO ₂	[97]
Su itici tekstiller	SiO ₂	[98]
Hidrofobik ve ısı yalıtımlı tekstiller	Silika aerogel	[99]
Süperhidrofobik pamuk kumaş geliştirilmesi	Fluoropolimer ve silika nanopartikülleri	[100]
Antibakteriyel ve antiviral özelliklerin sağlanması	Gümüş nanopartikülleri	[10]
Antimikrobiyal, anti-kirlenme	Gümüş NP / Pamuk	[101]
Çinko oksit nanopartikülleri ile kendini temizleyen ve antimikrobiyal özellikler kazandırılması	ZnO nanopartikülleri/PDMS kompoziti ile modifiye edilmiş polyester	[102]
Biyouyumlu ve antimikrobiyal kumaşlar	ZnO-Gallic Acid / Pamuk	[103]

2.3. UV koruma (UV protection)

Titanyum dioksit veya çinko oksit gibi nanopartiküller, zararlı ultraviyole (UV) ışınlarını bloke edecek şekilde kumaşlara entegre edilebilir. Bu uygulama, özellikle dış giyimde değerlidir ve kumaşın nefes alabilirliği ve konforunu korurken güneş hasarına karşı gelişmiş koruma sunmaktadır.

Tekstiller, UV blokaj ajanlarının tekstil matrisine entegre edilmesiyle UV koruyucu özelliklerle geliştirilebilir [104]. Ayrıca, araştırmalar, korona deşarj/hava RF plazması ve koloidal TiO₂ nanopartikülleri ile modifiye edilmiş polyester kumaşların, uzun süreli dayanıklılık ile antibakteriyel aktivite, UV koruması ve kendini temizleme etkileri gibi çok fonksiyonlu özellikler sunabileceğini göstermiştir [105]. Dahası, Polyester tekstiller üzerine çinko oksit nanopartikülleri/Polidimetilsiloksan (ZnO/PDMS) kompoziti entegrasyonu, UV ışığı altında çinko oksit nanopartiküllerinin antibakteriyel ve fotokatalitik etkileri nedeniyle birden fazla kendini temizleme özelliği sağlayabilir [102]. Tablo 3'te özellikle UV koruma elde etme amacıyla gerçekleştirilen bazı nanoteknolojik uygulamalar verilmektedir. Bununla birlikte UV koruma ile başka özelliklerin elde edilmesinde de başarılı olduğu incelenen tablo ile anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Geliştirilmiş kumaş özellikleri için nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for enhanced fabric properties)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
BiOCl/Bi ₂ WO ₆ fotokatalizörü ile işlevselliğin artırılması	BiOCl/Bi ₂ WO ₆ fotokatalizörü	[86]
Fotokatalitik özelliklere sahip kendini temizleyen kumaşlar	TiO ₂ nanopartikülleri	[87,89,90,92,106]
UV Koruyucu giysiler	PANI/TiO ₂	[107]
UV Koruyucu giysiler	Poliüretan bazlı MnO ₂ -FeTiO ₃	[108]
Kumaşların UV koruması için nanopartiküllerin entegrasyonu	Titanyum dioksit ve çinko oksit nanopartikülleri	[104]
Polyester kumaşların çok fonksiyonlu özellikler kazanması: antibakteriyel, UV koruması, kendini temizleme	Koronadeşarj/hava RF plazması işlenmiş ve TiO ₂ nanopartikülleri ile modifiye edilmiş polyester	[105]

3. Akıllı ve Fonksiyonel Tekstiller (Smart and Functional Textiles)

3.1. Termal düzenleme (UV protection)

Nanometre ölçeğinde faz değişim malzemeleri (PCM'ler) entegre ederek, tekstiller ısının emilmesini, depolanmasını ve salınmasını düzenleyebilir. Bu teknoloji, çeşitli çevresel koşullarda optimal vücut sıcaklığını korumak için spor giyim ve dış giyimde kullanılır. Akıllı ve fonksiyonel tekstillerin üretimindeki bazı çalışmalar Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. Akıllı ve fonksiyonel tekstil üretimindeki bazı nanoteknoloji uygulamaları (Selected nanotechnology applications in smart and functional textile production)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Biyomedikal ve algılama teknolojisinde nanoteknoloji kullanımı	Biyomedikal sensörler ve algılayıcılar	[7,8]
Elektrik iletkenliği ve statik yük dağıtımının iyileştirilmesi	TiO ₂ ve ZnO nanopartikülleri	[9]
Faz değişim malzemeleri ile termal konforun artırılması ve enerji verimliliği	PCM'lerin nanometre ölçeğinde tekstiller içine entegrasyonu	[109,110]
Form-stabil PCM'lerin ısı talebi ve arzını düzenlemesi	Form-stabil PCM'ler	[111]
Akıllı termal performans ve çeşitli sektörlerde PCM entegrasyonu	PCM mikrokapsüller ve termal olarak iletken katkı maddeleri	[112-115]
Tekstil bitirme	Aminoalkiltrialkoxysilanes	[116]
Tekstilde enerji depolama	Mn@ZnO/CNF	[117]
Tekstilde giyilebilir elektronik cihazlar	Grafen oksit	[118]
Tekstilde enerji depolama	PPy@MnO ₂ @rGO@iletken İplikler	[119]
Enerji depolayan kendi kendini iyileştiren tekstil lifleri	Fe ₃ O ₄ /PPy	[120]
Tekstilde enerji depolama	Al-NaOCl galvanik hücreler	[121]
Tekstilde esnek enerji depolama lifleri	LiFePO ₄ (katot)/Li ₄ Ti ₅ O ₁₀ (anot)/katı polyethylene oksit (elektrolit)/PVDF	[122]
Tekstilde aydınlatma etkisi	Polyurethane/poly(vinyl alkol) (PVA) katmanları	[123]
Giysi tipi ekranlar	Poly-vinyl alkol/SU-8 (düzleştirme katmanı)/Si-baz elastomerik (gerilim tamponu)	[124]
Tekstilde baskılı holografi	Au nanopartiküller	[125]
Floresan süperkapasitör lifler	MWCNT/Fluorescent boyalar	[126]
Akıllı kıyafetler, tabela ve sanat	Polimer fotonik bant aralığı (PBG) lifler	[127]
Tekstiller için esnek optik fiberler bazında basınç sensörü	Geniomer 200 (polisiloksan-üre-kopolimer ile bir polisiloksan)	[128]
Sürdürülebilir giyilebilir veya taşınabilir elektronikler ve akıllı sensör ağları	PTFE/Cu film	[129]
Araç, bina, dalgalar, rüzgar, yürüme vb. vibrasyon enerjisinin toplanması ve algılanması	Akrilik levhalar/yay/Silikon/Karbon nanofiber	[130]
Kendi gücüyle çalışan mekanosensasyon sistem	Bi1+xSmxFe1+xTixO3 /Selüloz	[131]
Titreşim sensörü/hava durumu sensörü	Poli(vinilidenflorür-ko-trifloroetilen) (P(VDF-TrFE)	[132]
Vücuttaki glukoz enerjisinin toplanması	MWCNT/PEDOT/Glukoz oksidaz	[133]
Vücuttaki glukoz enerjisinin toplanması/Algılama	Poli(etilenimin)/(tetraoktilamonyum bromür-stabilize edilmiş Au nanopartikül (TOA-Au NP)/tris-(2-aminoetil)amin (TREN))n, m-GOx: GOx/tris-(2-aminoetil)amin (TREN)m	[134]

Nanoteknoloji, PCM'ler tekstiller içine nanometre ölçeğinde entegre edilmesini kolaylaştırmış, böylece ısı emilimi, depolanması ve salınımının düzenlenmesini sağlamıştır. Bu teknoloji, çeşitli çevresel koşullar altında optimal vücut sıcaklığının korunmasına yardımcı olmak için spor giyim ve dış giyimde kullanılmıştır. PCM'lerin tekstiller içine dahil edilmesi, bu malzemelerin ısıyı etkili bir şekilde yönetmesini sağlayarak, çeşitli ortamlarda termal konfor sağlamak ve performansı artırmaktadır.

Araştırmalar, PCM'lerin özellikle yüksek gizli ısı kapasitesi ve minimal sıcaklık değişimleriyle faz geçişleri gerçekleştirme yetenekleri nedeniyle enerji yönetiminde, özellikle de güneş enerjisi kullanımında önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir [109]. PCM'lerle donatılmış tekstiller, gizli ısıyı emerek ve salarak enerji arzı ve talebi arasındaki boşluğu kapatmaya yardımcı olabilir, böylece termal düzenlemenin iyileştirilmesine katkıda bulunur [110]. Ayrıca, form-stabil PCM'lerin ısı talebi ve arzını etkin bir şekilde düzenleme konusunda umut vaat ettiği görülmüş, ancak substratlara yapışma ve rijitlik gibi zorluklar devam etmektedir [111].

Çalışmalar, akıllı termal performansları ve giyim, yatak takımları ve otomotiv iç mekanları dahil olmak üzere çeşitli sektörlerdeki potansiyel uygulamaları nedeniyle PCM'lerle entegre edilmiş tekstillerdeki artan ilgiyi vurgulamaktadır [112]. Kumaşlarda PCM mikrokapsüllerin kullanımı, dinamik ısı yönetimi yetenekleri sunarak termoregülasyon özelliklerini geliştirmek için araştırılmıştır [113]. Ayrıca, PCM mikrokapsüllerin termal olarak iletken katkı maddeleri ile modifikasyonu, tekstillerin termal performansını artırarak konfor ve işlevselliği geliştirmek için incelenmiştir [114].

Sonuç olarak, PCM'lerin tekstillerde nanometre ölçeğinde entegrasyonu, özellikle spor giyim ve dış giyim uygulamalarında termal düzenleme teknolojisinde önemli bir ilerleme temsil etmektedir. Nanoteknoloji kullanılarak PCM'lerin kumaşlara entegre edilmesiyle, bu malzemeler ısıyı etkili bir şekilde yönetebilir ve giyen kişilere çeşitli çevresel koşullarda artırılmış konfor ve performans sağlayabilir.

3.2. Sağlık ve Wellness izleme (Health and wellness monitoring)

Nanoteknoloji, tekstillerin içine sensörler ve elektronik bileşenlerin entegrasyonunu kolaylaştırarak, kalp atış hızı, sıcaklık ve kas aktivitesi gibi fizyolojik parametreleri izleyebilen akıllı tekstiller oluşturulmasına imkan sağlar. Bu yenilikler, hasta izleme ve rehabilitasyon dahil sağlık uygulamaları için umut vaat etmektedir. Tablo 5, sağlık alanında kullanılarak tekstillerin üretimi için literatürdeki bazı uygulamaları özetlemektedir.

Tablo 5. Sağlık alanında kullanılacak tekstil özellikleri için nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for textile features used in healthcare)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Sağlık, ilaç, moda, spor, askeri uygulamalarda akıllı tekstiller	Çok fonksiyonlu nanomalzemeler	[3]
Nanotıp bazında ilaç salımı	NanoTiO ₂ @DNA	[135]
Doku mühendisliği; giyilebilir veya implant edilebilir tıbbi cihazlar ve robotlar	Polilaktik asit/polidimetilsiloksan (PDMS)	[136]

4. Çevresel Etki ve Sürdürülebilirlik (Environmental Impact and Sustainability)

Nanoteknoloji tekstilleri, daha etkili boyama işlemleri ve kendini temizleyen malzemelerin geliştirilmesiyle tekstil endüstrisinde su ve kimyasal kullanımını azaltabilir. Ancak, bu teknolojilerin sürdürülebilirliği, potansiyel çevresel ve sağlık risklerini en aza indirmek için nanopartiküllerin güvenli üretimi, kullanımı ve imhasına bağlıdır.

Tekstillerde nanoteknoloji kullanımı, daha verimli boyama işlemleri ve kendini temizleyen malzemelerin geliştirilmesiyle tekstil endüstrisinde su ve kimyasal kullanımını azaltma fırsatı sunmaktadır. Titanyum dioksit gibi benzersiz özelliklere sahip nanopartiküllerin tekstiller içine dahil edilmesi, ışığa maruz kaldığında organik bileşikler ve kirleticileri parçalayan kendini temizleyen kumaşların yaratılmasına yol açabilir. Bu özellik, özellikle hijyenin kritik olduğu tıbbi giysiler ve spor kıyafetleri gibi uygulamalar için avantajlıdır.

Bu teknolojilerin sürdürülebilirliğini sağlamak için, potansiyel çevresel ve sağlık risklerini en aza indirmek üzere nanopartiküllerin güvenli üretimi, kullanımı ve imhasının ele alınması hayati önem taşımaktadır. Tekstil boyası ile kirlenmiş atık suyun çevre dostu yöntemlerle işlenmesi, beyaz çürük

mantarları ve ligninolitik enzimlerin etkin boya bozunumu için kullanılması gibi sürdürülebilir uygulamalar, tekstil endüstrisinde sürdürülebilir uygulamalara katkıda bulunabilir [137]. Ayrıca, elektron ışını ile radyasyon, süperkritik sıvı boyama ve susuz boyama teknikleri gibi yenilikçi yöntemler kullanılarak yeşil boyama işlemlerinin keşfi, tekstil üretiminde su tüketimini ve kimyasal kullanımını önemli ölçüde azaltabilir [14,138,139].

Tekstil boyama süreçlerinin sürdürülebilirliğine yönelik çabalar, tekstil atık suyundan kaynakların geri kazanım stratejilerinin geliştirilmesini de içermektedir. Boya/tuz fraksiyonlaması için ultrafiltrasyon teknikleri, boya/tuzun biyokömür yardımıyla renksizleştirilmesi ve atık sudan boya/tuzun giderilmesi için nanomalzemelerin kullanımı gibi teknikler, çevresel etkiyi en aza indirebilir ve tekstil endüstrisinde sürdürülebilir uygulamaları teşvik edebilir [140-142]. Ayrıca, bitki kabuk ekstraktları kullanarak kumaş boyama veya ağaç boyayan mantarların pigmentlerini tekstil boya/tuz için çıkarma gibi doğal boyama yöntemlerini keşfetmek, sürdürülebilir ve çevre dostu tekstil üretimine yönelik eğilimle uyumludur [143,144].

Sonuç olarak, tekstillerde nanoteknolojinin entegrasyonu, yenilikçi boyama işlemleri ve kendini temizleyen malzemelerin geliştirilmesi yoluyla endüstriyi dönüştürme konusunda değerli bir fırsat sunmaktadır. Çevre dostu boyama tekniklerini kullanma, etkili atık su arıtma yöntemleri uygulama ve doğal boya kaynaklarını keşfetme gibi sürdürülebilir uygulamaları benimseyerek, tekstil endüstrisi daha çevre bilinçli ve sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerleyebilir. Tablo 6, çevresel etki ve sürdürülebilirlik için yapılan çalışmaların bazılarını vermektedir.

Tablo 6. Çevresel etki ve sürdürülebilirlik için nanoteknoloji uygulamaları (Nanotechnology applications for environmental impact and sustainability)

Uygulama	Kullanılan nanomalzeme	Kaynak
Çevresel etki ve sürdürülebilirlik üzerine odaklanma	Çeşitli nanomalzemeler ve sürdürülebilir teknolojiler	[14]
Tekstil üretiminde su ve kimyasal tüketiminin azaltılması ve çevre dostu boyama işlemleri	Sürdürülebilir ve çevre dostu nanoteknoloji uygulamaları	[14,137]
Dayanıklı ve çevre dostu tekstillerin üretimi	Çevre dostu nanoteknoloji malzemeleri	[6]
Tekstil boyama	Kopolimer-SiO ₂ nanocomposite / Polyester kumaş	[145]

5. Zorluklar ve Geleceğe Bakış (Challenges and Future Outlook)

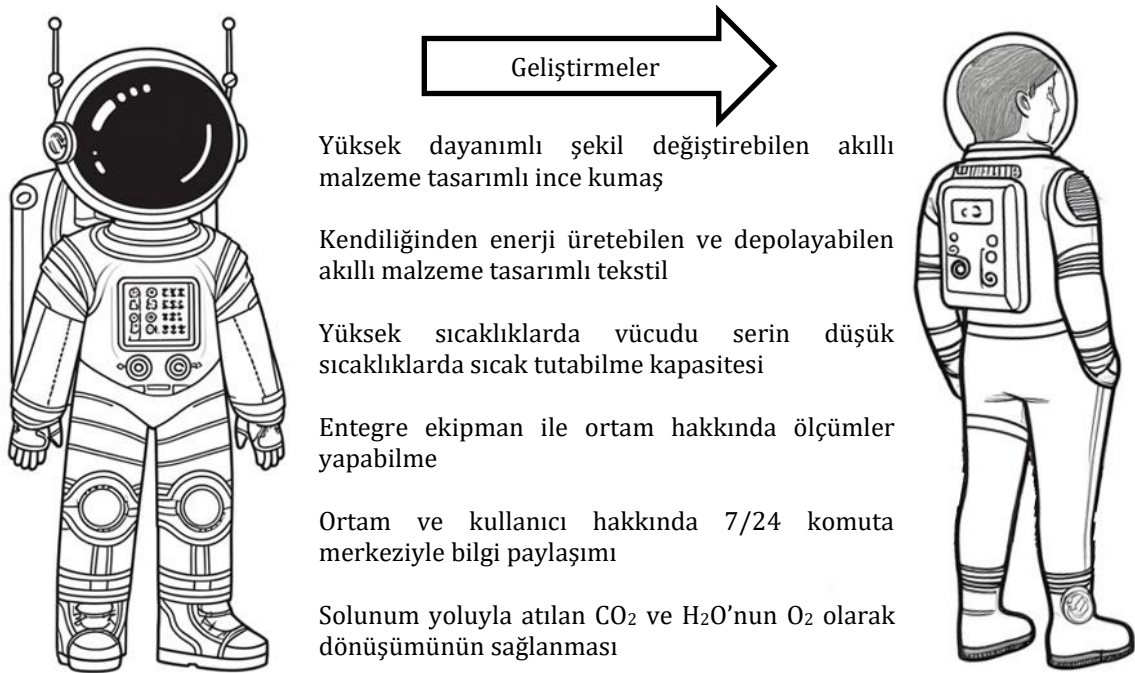
Nanoteknoloji, tekstil endüstrisi için dönüştürücü bir potansiyel sunuyor olsa da, maliyet, ölçeklenebilirlik ve düzenleyici uyum açısından zorluklar mevcuttur. Devam eden araştırmalar, bu engellerin üstesinden gelmeyi amaçlamakta, tekstillerin sadece daha işlevsel olmasını değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik ve refah katkısında da bulunmasını vaat etmektedir. Malzemeleri nanometre düzeyinde çeşitli şekillerde manipüle etmesi sayesinde, nanoteknoloji tekstil endüstrisi de dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde devrim yaratmıştır. Ütopik olarak görülen uzun süreli uzay görevlerinde ya da koloni yaşamında özel tekstil ürünleri gerekecektir ve bu malzemelerin üretilmesinde nanoteknolojinin önemli bir rol üstleneceği de ortadadır. Bu bağlamda literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bilim insanlarının beklentisi, nanoteknolojinin tekstile entegrasyonunun devam edeceği ve akıllı tekstillerin geliştirileceği yönündedir.

Gelecekteki çalışmalar, nanoteknoloji ve tekstil malzemeleri arasındaki etkileşimlerin daha derinlemesine anlaşılmasını ve nanomalzemelerin uzun vadeli etkilerinin incelenmesini hedeflemektedir. Özellikle, nanoteknolojinin insan sağlığı ve çevre üzerindeki olası olumsuz etkilerinin minimize edilmesi, araştırmaların önemli bir odak noktası olacaktır. Bu bağlamda, biyobozunur nanomalzemeler ve geri dönüştürülebilir nanokompozitlerin geliştirilmesi, tekstil endüstrisinin daha sürdürülebilir bir geleceğe yönelmesinde kritik bir rol oynayacaktır. Ancak bu teknolojilerin ölçeklenebilirlik ve ekonomik fizibilite gibi sınırlamaları, endüstriyel uygulamalara tam anlamıyla entegrasyonunu zorlaştırabilir. Ayrıca, düzenleyici çerçevelerin hızla gelişen bu teknolojiye uyum sağlaması gereklidir. Böylelikle yasal düzenlemelerin bilimsel ilerlemelerle paralel ilerlemesi sağlanabilecektir. Tüm bu unsurlar göz önüne alındığında, nanoteknolojinin tekstil endüstrisinde tam potansiyeline ulaşması için disiplinler arası işbirliklerinin ve uzun vadeli araştırma yatırımlarının artırılması kaçınılmazdır. Tekstillerle modifiye edilecek bir atmosfer dışı görev elbisesinin gelecekteki olası kabiliyetleri Şekil 3'te paylaşılmaktadır. Yapılması muhtemel geliştirmeler, nanoteknolojinin sunduğu yeniliklerle paralellik göstermektedir. Özellikle yüksek dayanımlı, şekil değiştirebilen ve ince kumaşlarla tasarlanan akıllı malzemeler, astronotların hareket kabiliyetini artırırken, bu malzemelerin

aynı zamanda enerji üretip depolayabilmesi, uzun süreli görevlerde kritik bir avantaj sunacaktır.

Bu elbiselerin vücut sıcaklığını yüksek sıcaklıklarda serin, düşük sıcaklıklarda ise sıcak tutabilme yeteneği, nanoteknoloji ile geliştirilen termal düzenleyici malzemelerin potansiyelini ortaya koymaktadır. Ayrıca, elbiseye entegre edilmiş ekipman sayesinde ortam ve kullanıcı hakkında anlık ölçümler yapılabilmekte, bu veriler 7/24 komuta merkeziyle paylaşılabilir. Bu tür gelişmeler, astronotların güvenliğini ve görev verimliliğini artırarak uzay keşiflerinin daha da ileriye taşınmasını sağlayacaktır.

Son olarak, solunum yoluyla atılan CO₂ ve H₂O'nun O₂ olarak geri dönüştürülmesi gibi biyomimetik yaklaşımlar, gelecekteki görev elbiselerinin otonom yaşam destek sistemleriyle donatılabileceğini göstermektedir. Bu tür yenilikler, nanoteknolojinin sınırlarını zorlayarak, insanlığın uzayda daha uzun süreler boyunca sağlıklı ve güvenli bir şekilde varlık göstermesine olanak tanıyacaktır.



Şekil 3. Bir atmosfer dışı görev elbisesinde gelecekte yapılması muhtemel geliştirmeler (Potential future enhancements in an extraterrestrial mission suit)

6. Sonuç (Conclusion)

Nanoteknolojinin tekstil endüstrisine etkilerinin önümüzdeki yıllarda daha da öne çıkma olasılığı insan ihtiyaçları ile şekillenecektir. Bununla beraber bu ihtiyaçların karşılanmasında çalışmalarla elde edilen bilgi ve birikim yeterli görünmektedir. Bulmacanın parçaları dağılmış şekilde karşımızda durmakta bu noktadan sonra gerekli malzemenin üretimi için entegrasyonun yapılması bulmacanın çözülmesi anlamına gelecektir. Bu bulmacanın çözülmesi için çeşitli disiplinler arası iş birlikleri ile gereken istek ve motivasyonun sağlanması şarttır. Bu sayede nanofiber ve nanopartiküllerle üretilen ileri teknolojik kumaşlar hazırlanacak ve farklı amaçlara hizmet edecek kumaşlarla tasarlanan akıllı giysiler insanın iletişim ihtiyacından sağlık sorunlarının tespitine ya da olası tehlike uyarılarının yapılması ve bunların ilgili birimlere aktarılması gibi interaktif işlevleri yaparken aynı zamanda nanogeneratörler, süperkapasitörler ve fotoelektronik cihazlar sayesinde enerjisini de insan hareketi yada güneş enerjisinden sağlayarak şarj ihtiyacı gerektirmeyecek şekilde üretililebilir.

Antibakteriyel ve antiviral özellikler tıbbi etkileşimin sınırlı olacağı kolonide mikrobiyal kontaminasyon riskini azaltacak, ince atmosferin neden olacağı UV ışınlarına karşı UV koruması zararlı radyasyona karşı etkin bir savunma sunacaktır. Söz konusu uzay görevlerinin bahsedilen geliştirmelerle yapılması nanoteknolojinin tekstil uygulamalarında bulunduğu karşılık büyük bir

potansiyel oluşturmaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] T. Jeevani, "Nanotextiles- A broader perspective," *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, vol. 2, no. 7, pp. 1–5, 2011. doi:10.4172/2157-7439.1000124
- [2] K. P. Chowdhury, M. A. B. H. Susan, and S. Ahmed, "Nanomaterials for multifunctional textiles," in *Emerging Applications of Nanomaterials*, Materials Research Foundations, pp. 169–217, 2023. doi:10.21741/9781644902288-8
- [3] M. A. Shah, B. M. Pirzada, G. Price, A. L. Shibiru, and A. Qurashi, "Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review," *Journal of Advanced Research*, vol. 38, pp. 55–75, 2022. doi:10.1016/j.jare.2022.01.008
- [4] A. K. M. A. Hosne Asif and M. Z. Hasan, "Application of nanotechnology in modern textiles: A review," *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 227–231, Jan. 2018. doi:10.14741/ijcet/v.8.2.5
- [5] A. A. El-Kheir and L. K. El-Gabry, "Potential applications of nanotechnology in functionalization of synthetic fibres (A review)," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 65, no. 9, pp. 67–85, 2022. doi:10.21608/EJCHEM.2022.106369.4891
- [6] A. Salman, F. A. Metwally, M. K. El-Bisi, and G. A. M. Emara, "Effect of geometrical yarn parameters: Conventional and compact ring spinning on certain functional properties of tio2nps treated woven cotton fabrics," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 63, no. 5, pp. 1757–1766, 2020. doi:10.21608/ejchem.2019.18226.2113
- [7] Y. Wang, S. Lu, J. Zheng, and L. Liang, "Advances in latest application status, challenges, and future development direction of electrospinning technology in the biomedical," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2022, pp. 1–18, Sep. 2022. doi:10.1155/2022/3791908
- [8] C. I. Idumah, "Influence of nanotechnology in polymeric textiles, applications, and fight against COVID-19," *Journal of the Textile Institute*, vol. 112, no. 12, pp. 2056–2076, 2021. doi:10.1080/00405000.2020.1858600
- [9] R. Mahmud and F. Nabi, "Application of nanotechnology in the field of textile," *IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering*, vol. 04, no. 01, pp. 01–06, Jan. 2017. doi:10.9790/019X-0401010106
- [10] S. Ahmed, M. Ahmad, B. L. Swami, and S. Ikram, "A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise," *Journal of Advanced Research*, vol. 7, no. 1, pp. 17–28, 2016. doi:10.1016/j.jare.2015.02.007
- [11] S. Shaarawy, "A review on the development of innovative capabilities in the textile finishing of natural fibers," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 62, no. Part 2, pp. 857–879, 2019. doi:10.21608/EJCHEM.2019.19009.2169
- [12] L. Hu et al., "Stretchable, porous, and conductive energy textiles," *Nano Letters*, vol. 10, no. 2, pp. 708–714, Feb. 2010. doi:10.1021/nl903949m
- [13] W. Kim, T. Han, Y. Gwon, S. Park, H. Kim, and J. Kim, "Biodegradable and flexible nanoporous films for design and fabrication of active food packaging systems," *Nano Letters*, vol. 22, no. 8, pp. 3480–3487, Apr. 2022. doi:10.1021/acs.nanolett.2c00246
- [14] H. Saleem and S. J. Zaidi, "Sustainable use of nanomaterials in textiles and their environmental impact," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 22, pp. 1–28, 2020. doi:10.3390/ma13225134
- [15] M. Naito, T. Yokoyama, K. Hosokawa, and K. Nogi, Eds., "Chapter 1 - Basic Properties and Measuring Methods of Nanoparticles," in *Nanoparticle Technology Handbook (Third Edition)*, Elsevier, 2018. pp. 3–47. doi:10.1016/B978-0-444-64110-6.00001-9
- [16] M. Naito, T. Yokoyama, K. Hosokawa, and K. B. T.-N. T. H. (Third E. Nogi, Eds., "Chapter 2 - Structural Control of Nanoparticles," Elsevier, 2018. pp. 49–107. doi:10.1016/B978-0-444-64110-6.00002-0
- [17] M. Naito, T. Yokoyama, K. Hosokawa, and K. B. T.-N. T. H. (Third E. Nogi, Eds., "Chapter 4 - Control of Nanostructure of Materials," Elsevier, 2018. pp. 169–253. doi:10.1016/B978-0-444-64110-6.00004-4
- [18] R. Mishra et al., "The production, characterization and applications of nanoparticles in the textile industry," *Textile Progress*, vol. 46, no. 2, pp. 133–226, 2014. doi:10.1080/00405167.2014.964474
- [19] S. Riaz et al., "Functional finishing and coloration of textiles with nanomaterials," *Coloration Technology*, vol. 134, no. 5, pp. 327–346, 2018. doi:10.1111/cote.12344
- [20] N. Vigneshwaran, "Application of Functional Nanoparticle Finishes on Cotton Textiles," *Trends in Textile Engineering & Fashion Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 358–362, 2018. doi:10.31031/tteft.2018.03.000568

- [21] I. S. Tania, M. Ali, and M. Akter, "Fabrication, characterization, and utilization of ZnO nanoparticles for stain release, bacterial resistance, and UV protection on cotton fabric," *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 17, 2022. doi:10.1177/15589250221136378
- [22] W. Raslan, A. El-Halwagy, and H. Elsayad, "Recent Advances in Plasma/Nanoparticles Treatments of Textile Fibers," *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, vol. 17, no. 2, pp. 87–105, 2020. doi:10.21608/jtcs.2020.33748.1042
- [23] I. Safarik et al., "Cotton Textile/Iron Oxide Nanozyme Composites with Peroxidase-like Activity: Preparation, Characterization, and Application," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 13, no. 20, pp. 23627–23637, May 2021. doi:10.1021/acsami.1c02154
- [24] C. K. Kundu, M. T. Hossen, and R. Saha, "Coloration with nanoparticles: Scope for developing simultaneous colouring and functional properties onto textile surfaces—a short review," *Coloration Technology*, vol. 138, no. 5, pp. 443–455, 2022. doi:10.1111/cote.12621
- [25] S. Currie et al., "Rechargeable Potent Anti-Viral Cotton Grafted with a New Quaternized N-Chloramine," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 9, no. 35, pp. 1–13, 2022. doi:10.1002/admi.202201338
- [26] D. Lee, J. S. Sang, P. J. Yoo, T. J. Shin, K. W. Oh, and J. Park, "Machine-washable smart textiles with photothermal and antibacterial activities from nanocomposite fibers of conjugated polymer nanoparticles and polyacrylonitrile," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 1, 2019. doi:10.3390/polym11010016
- [27] A. Yadav et al., "Functional finishing in cotton fabrics using zinc oxide nanoparticles," *Bulletin of Materials Science*, vol. 29, no. 6, pp. 641–645, 2006. doi:10.1007/s12034-006-0017-y
- [28] S. Fateixa, M. Wilhelm, H. I. S. Nogueira, and T. Trindade, "SERS and Raman imaging as a new tool to monitor dyeing on textile fibres," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 47, no. 10, pp. 1239–1246, 2016. doi:10.1002/jrs.4947
- [29] N. Vrinceanu, S. Bucur, C. M. Rambu, S. Neculai-Valeanu, S. Ferrandiz Bou, and M. P. Sucheai, "Nanoparticle/biopolymer-based coatings for functionalization of textiles: recent developments (a minireview)," *Textile Research Journal*, vol. 92, no. 19–20, pp. 3889–3902, 2022. doi:10.1177/00405175211070613
- [30] V. Bhandari, S. Jose, P. Badanayak, A. Sankaran, and V. Anandan, "Antimicrobial Finishing of Metals, Metal Oxides, and Metal Composites on Textiles: A Systematic Review," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 61, no. 1, pp. 86–101, Jan. 2022. doi:10.1021/acs.iecr.1c04203
- [31] M. Yazıcı, Ö. Önal, and O. Konuş, "Graphene Katkılı Sıvılaştırılmış Fındık Kabuğu / Polyvinyl pyrrolidone (PVP) Nanoyüzeylerin Elektrosinning Tekniği ile Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu," *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, vol. 21, no. 3, pp. 184–194, 2018.
- [32] M. Afshari, "1 - Introduction," in Woodhead Publishing Series in Textiles, M. B. T.-E. N. Afshari, Ed. Woodhead Publishing, 2017. pp. 1–8. doi:10.1016/B978-0-08-100907-9.00001-5
- [33] X. Qin and S. Subianto, "17 - Electrospun nanofibers for filtration applications," in Woodhead Publishing Series in Textiles, M. B. T.-E. N. Afshari, Ed. Woodhead Publishing, 2017. pp. 449–466. doi:10.1016/B978-0-08-100907-9.00017-9
- [34] T. R. Hayes and B. Su, "15 - Wound dressings," in Woodhead Publishing Series in Biomaterials, L. A. Bosworth and S. B. T.-E. for T. R. Downes, Eds. Woodhead Publishing, 2011. pp. 317–339. doi:10.1533/9780857092915.2.317
- [35] R. Bagherzadeh, M. Gorji, M. S. Sorayani Bafgi, and N. Saveh-Shemshaki, "18 - Electrospun conductive nanofibers for electronics," in Woodhead Publishing Series in Textiles, M. B. T.-E. N. Afshari, Ed. Woodhead Publishing, 2017. pp. 467–519. doi:10.1016/B978-0-08-100907-9.00018-0
- [36] S. Siengchin, "A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments," *Defence Technology*, vol. 24, pp. 1–17, 2023. doi:10.1016/j.dt.2023.02.025
- [37] C. J. Luo, S. D. Stoyanov, E. Stride, E. Pelan, and M. Edirisinghe, "Electrospinning versus fibre production methods: from specifics to technological convergence," *Chemical Society Reviews*, vol. 41, no. 13, pp. 4708–4735, 2012. doi:10.1039/C2CS35083A
- [38] P. A. Mouthuy, N. Zargar, O. Hakimi, E. Lostis, and A. Carr, "Fabrication of continuous electrospun filaments with potential for use as medical fibres," *Biofabrication*, vol. 7, no. 2, 2015. doi:10.1088/1758-5090/7/2/025006
- [39] A. Sattar, A. Khatri, S. Ali, and F. Ahmed, "Digital ink-jet printing of regenerated cellulose nanofibrous mats with reactive inks," *Coloration Technology*, vol. 140, no. 2, pp. 279–286, 2024. doi:1111/cote.12713
- [40] R. E. Neisiany, S. N. Khorasani, M. Naeimirad, J. K. Y. Lee, and S. Ramakrishna, "Improving Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composite by Incorporating Functionalized Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 302, no. 5, pp. 1–11, 2017. doi:10.1002/mame.201600551
- [41] K. Abe and H. Yano, "Cellulose nanofiber-based hydrogels with high mechanical strength," *Cellulose*, vol. 19, no. 6, pp. 1907–1912, 2012. doi:10.1007/s10570-012-9784-3
- [42] V. Beachley and X. Wen, "Fabrication of nanofiber reinforced protein structures for tissue engineering," *Materials Science*

and *Engineering C*, vol. 29, no. 8, pp. 2448–2453, 2009. doi:10.1016/j.msec.2009.07.008

[43] X. Li et al., “Resin composites reinforced by nanoscaled fibers or tubes for dental regeneration,” *BioMed Research International*, vol. 2014, 2014. doi:10.1155/2014/542958

[44] V. M. Merkle, L. Zeng, M. J. Slepian, and X. Wu, “Core-shell nanofibers: Integrating the bioactivity of gelatin and the mechanical property of polyvinyl alcohol,” *Biopolymers*, vol. 101, no. 4, pp. 336–346, 2014. doi:10.1002/bip.22367

[45] K. Abe, S. Ifuku, M. Kawata, and H. Yano, “Preparation of tough hydrogels based on β -chitin nanofibers via NaOH treatment,” *Cellulose*, vol. 21, no. 1, pp. 535–540, 2014. doi:10.1007/s10570-013-0095-0

[46] Z. Kaya, E. Balcioglu, and H. Gün, “Fiber Takviyeli Kompozitlerin Farklı Deformasyon Hızındaki Mod I ve Mod I/II Kırılma Davranışlarının İncelenmesi,” *Politeknik Dergisi*, vol. 25, no. 2, pp. 843–853, 2022. doi:10.2339/politeknik.707130

[47] B. Ergene, “Simulation of the production of Inconel 718 and Ti6Al4V biomedical parts with different relative densities by selective laser melting (SLM) method,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 37, no. 1, pp. 469–484, 2022. doi:10.17341/GAZIMMFD.934143

[48] A. Çoşgun and G. Yılmaz, “Damla Döküm Yöntemi ile Üretilen Perovskit Filmlerin Yaşlanma Süreçlerinin Elektriksel Karakterizasyon Teknikleri ile Belirlenmesi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, vol. 17, no. 1, pp. 44–54, 2022. doi:10.29233/sdufeff.992932

[49] H. İ. Yavuz and R. Yamanoglu, “ β Tipi Ti Alaşımlarının Özellikleri Üzerine Bir Derleme: Mikroyapı, Mekanik, Korozyon Özellikleri ve Üretim Yöntemleri,” *Politeknik Dergisi*, vol. 26, no. 4, pp. 1601–1620, 2023. doi:10.2339/politeknik.987216

[50] G. Sadullahoğlu, “Production and Characterization of B2O3 Added M-Type Barium Hexaferrite Composite Magnet,” *Uluslararası Mühendislik Arastırma ve Gelistirme Dergisi*, vol. 13, no. 2, pp. 382–389, 2021. doi:10.29137/umagd.737894

[51] N. Taş and F. Egilmez, “İmplant Destekli Hibrit Protezlerin Yapımında Kullanılan Materyaller ve Üretim Yöntemleri,” *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, pp. 1–1, 2021. doi:10.17567/ataunidf.757321

[52] Y. C. Toklu, A. E. Çerçevik, and M. Şahinöz, “Otomatik Yapı Üretim Teknolojisinde Kullanılabilecek Malzemelerin Belirlenmesi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 21, no. 1, p. 51, 2016. doi:10.19113/sdufed.73967

[53] Ş. Kılınçarslan and Y. Şimsek Türker, “Ahşap Malzemelerin FRP ile Güçlendirilmesinin Sürdürülebilirlik Açısından Değerlendirilmesi,” *Teknik Bilimler Dergisi*, vol. 10, no. 1, pp. 23–30, 2020. doi:10.35354/tbed.615101

[54] K. Al and E. Bayrakdar Ates, “Sustainable Hydrogen Production Technologies: Biomass Based Approaches,” *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 18–37, 2022. doi:10.55930/jonas.1101384

[55] B. Karagüzel Kayaoğlu, I. Göcek, H. Kizil, and L. Trabzon, “Functional nano and micro-scale thin film deposition on textiles: Emerging technologies and applications,” *Journal of Textile Engineering*, vol. 19, no. 88, pp. 39–47, 2012. doi:10.7216/130075992012198805

[56] K. Müller et al., “Review on the processing and properties of polymer nanocomposites and nanocoatings and their applications in the packaging, automotive and solar energy fields,” *Nanomaterials*, vol. 7, no. 4, 2017. doi:10.3390/nano7040074

[57] Ngakan Putu Gede Satria Kesumayasa, Suriati, and Rudianta, “Physicochemical Properties of Porang Nanocoating with the Addition of Essential Oils,” *Sustainable Environment Agricultural Science*, vol. 7, no. 2, pp. 130–138, 2023. doi:10.22225/seas.7.2.6842.130-138

[58] K. Willems, P. Lauweryns, G. Verleye, and J. Van Goethem, “Randomized controlled trial of posterior lumbar interbody fusion with Ti- And cap-nanocoated polyetheretherketone cages: Comparative study of the 1-year radiological and clinical outcome,” *International Journal of Spine Surgery*, vol. 13, no. 6, pp. 575–587, 2019. doi:10.14444/6080

[59] I. Dominguez, I. Del Villar, O. Fuentes, J. M. Corres, and I. R. Matias, “Interdigital concept in photonic sensors based on an array of lossy mode resonances,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1–11, 2021. doi:10.1038/s41598-021-92765-0

[60] T. Phan, J. E. Jones, M. Chen, D. K. Bowles, W. P. Fay, and Q. Yu, “A Biocompatibility Study of Plasma Nanocoatings onto Cobalt Chromium L605 Alloy for Cardiovascular Stent Applications,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 17, 2022. doi:10.3390/ma15175968

[61] M. I. Abdulraheem, A. Y. Moshood, Y. Chen, H. Chen, H. Zhang, and J. Hu, “Advancements in Designing Smart and Intelligent Nanocoatings,” in *Sustainable Approach to Protective Nanocoatings*, 2024. pp. 57–87doi:10.4018/979-8-3693-3136-1.ch003

[62] A. Thakur and A. Kumar, “Chapter 19 - Self-healing nanocoatings for automotive application,” in *Micro and Nano Technologies*, H. Song, T. A. Nguyen, G. Yasin, N. B. Singh, and R. K. B. T.-N. in the A. I. Gupta, Eds. Elsevier, 2022. pp. 403–427. doi:10.1016/B978-0-323-90524-4.00019-0

[63] E. Pakdel, J. Fang, J. Fang, L. Sun, X. Wang, and X. Wang, “Nanocoatings for Smart Textiles,” in *Smart Textiles*, 2018. pp. 247–300. doi:10.1002/9781119460367.ch8.

[64] T. I. Shaheen, “Nanotechnology for modern textiles: highlights on smart applications,” *Journal of the Textile Institute*, vol. 113, no. 10, pp. 2274–2284, 2021. doi:10.1080/00405000.2021.1962625

- [65] M. Zayed, M. Bakr, and H. Ghazal, "Recent developments in the utilization of polymer nanocomposites in textile applications," *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*, vol. 0, no. 0, pp. 0–0, 2023. doi:10.21608/jtcps.2023.193744.1172
- [66] S. Gowri, L. Almeida, T. Amorim, N. Carneiro, A. Pedro Souto, and M. Fátima Esteves, "Polymer Nanocomposites for Multifunctional Finishing of Textiles - a Review," *Textile Research Journal*, vol. 80, no. 13, pp. 1290–1306, Mar. 2010. doi:10.1177/0040517509357652
- [67] S. Gowri, M. A. Khan, and A. K. Srivastava, "Textile finishing using polymer nanocomposites for radiation shielding, flame retardancy and mechanical strength," *Textile & Leather Review*, vol. 4, no. 3, pp. 160–180, 2021. doi:10.31881/TLR.2021.07
- [68] J. Bouchard, A. Cayla, V. Lutz, C. Campagne, and E. Devaux, "Electrical and mechanical properties of phenoxy/multiwalled carbon nanotubes multifilament yarn processed by melt spinning," *Textile Research Journal*, vol. 82, no. 20, pp. 2106–2115, 2012. doi:10.1177/0040517512450760
- [69] S. Yao, P. Swetha, and Y. Zhu, "Nanomaterial-Enabled Wearable Sensors for Healthcare," *Advanced Healthcare Materials*, vol. 7, no. 1, pp. 1–27, 2018. doi:10.1002/adhm.201700889
- [70] S. Parham et al., "Textile/Al₂O₃-TiO₂ nanocomposite as an antimicrobial and radical scavenger wound dressing," *RSC Advances*, vol. 6, no. 10, pp. 8188–8197, 2016. doi:10.1039/C5RA20361A
- [71] L. Noreen et al., "Multifunctional Ag₃PO₄-rGO-Coated Textiles for Clean Water Production by Solar-Driven Evaporation, Photocatalysis, and Disinfection," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 5, pp. 6343–6350, Feb. 2020. doi:10.121/acsami.9b16043
- [72] V. T. Novi, A. Gonzalez, J. Brockgreitens, and A. Abbas, "Highly efficient and durable antimicrobial nanocomposite textiles," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, pp. 1–9, 2022. doi:10.1038/s41598-022-22370-2
- [73] D. C. Çelikel, "Smart E-Textile Materials," in *Advanced Functional Materials*, N. Tasaltin, P. S. Nnamchi, and S. Saud, Eds. Rijeka: IntechOpen, 2020. doi:10.5772/intechopen.92439
- [74] N. K. Persson, J. G. Martinez, Y. Zhong, A. Maziz, and E. W. H. Jager, "Actuating Textiles: Next Generation of Smart Textiles," *Advanced Materials Technologies*, vol. 3, no. 10, pp. 1–12, 2018. doi:10.1002/admt.201700397
- [75] N. Y. Abu-Thabit, "Chemical Oxidative Polymerization of Polyaniline: A Practical Approach for Preparation of Smart Conductive Textiles," *Journal of Chemical Education*, vol. 93, no. 9, pp. 1606–1611, Sep. 2016. doi:10.1021/acs.jchemed.6b00060
- [76] A. M. Grancarić, I. Jerković, V. Koncar, C. Cochrane, F. M. Kelly, D. Soulat, X. Legrand, "Conductive polymers for smart textile applications," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 48, no. 3, 2018. doi:10.1177/1528083717699368
- [77] K. Cherenack, C. Zysset, T. Kinkeldei, N. Münzenrieder, and G. Tröster, "Woven electronic fibers with sensing and display functions for smart textiles," *Advanced Materials*, vol. 22, no. 45, pp. 5178–5182, 2010. doi:10.1002/adma.201002159
- [78] B. Younes, "Smart E-textiles: A review of their aspects and applications," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 53, pp. 1–23, 2023. doi:10.1177/15280837231215493
- [79] A. Salman, F. A. Metwally, M. Elbisi, and G. A. M. Emara, "Applications of nanotechnology and advancements in smart wearable textiles: An overview," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 63, no. 6, pp. 2177–2184, 2020. doi:10.21608/ejchem.2019.18223.2112
- [80] S. H. W. Ossevoort, "14 - Improving the sustainability of smart textiles," in *Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers*, T. Kirstein, Ed. Woodhead Publishing, 2013. pp. 399–419. doi:10.1533/9780857093530.3.399
- [81] K. Cherenack and L. van Pieterse, "Smart textiles: Challenges and opportunities," *Journal of Applied Physics*, vol. 112, no. 9, p. 91301, 2012. doi:10.1063/1.4742728
- [82] E. Özdoğan, A. Demir, and N. Seventekin, "Nanoteknoloji ve tekstil uygulamaları," *Tekstil ve Konfeksiyon*, vol. 3, pp. 159–168, 2006.
- [83] L.-P. Yu, C.-Y. Xing, S.-T. Fan, F. Liu, B.-J. Li, and S. Zhang, "β-Cyclodextrin-Modified Polyacrylonitrile Nanofibrous Scaffolds with Breathability, Moisture-Wicking, and Antistatic Performance," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 60, no. 28, pp. 10217–10224, Jul. 2021. doi:10.1021/acs.iecr.1c01744
- [84] H. J. Choi, M. S. Kim, D. Ahn, S. Y. Yeo, and S. Lee, "Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1–12, 2019. doi:10.1038/s41598-019-42495-1
- [85] S. Jose, N. Shanmugam, S. Das, A. Kumar, and P. Pandit, "Coating of lightweight wool fabric with nano clay for fire retardancy," *Journal of the Textile Institute*, vol. 110, no. 5, pp. 764–770, 2019. doi:10.1080/00405000.2018.1516529
- [86] J. Chen et al., "Preparation of bioCl/bi2wo6 photocatalyst for efficient fixation on cotton fabric: Applications in uv shielding and self-cleaning performances," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 22, 2021. doi:10.3390/ma14227002
- [87] K. Qi, W. A. Daoud, J. H. Xin, C. L. Mak, W. Tang, and W. P. Cheung, "Self-cleaning cotton," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 16, no. 47, pp. 4567–4574, 2006. doi:10.1039/B610861J

- [88] M. A. Tănase et al., "Facile in situ synthesis of zno flower-like hierarchical nanostructures by the microwave irradiation method for multifunctional textile coatings," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 10, 2021. doi:10.3390/nano11102574
- [89] R. Dastjerdi and M. Montazer, "A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties," *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 79, no. 1, pp. 5–18, 2010. doi:10.1016/j.colsurfb.2010.03.029
- [90] H. F. Moafi, A. F. Shojaie, and M. A. Zanjanchi, "Semiconductor-Assisted Self-Cleaning Polymeric Fibers Based on Zinc Oxide Nanoparticles," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 121, no. 6, pp. 3111–3732, 2011. doi: 10.1002/app.34179
- [91] H. Wang, Y. Hu, L. Zhang, and C. Li, "Self-Cleaning Films with High Transparency Based on TiO₂ Nanoparticles Synthesized via Flame Combustion," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 8, pp. 3654–3662, Apr. 2010. doi:10.1021/ie901782w
- [92] B. K. Tudu, A. Kumar, and B. Bhushan, "Fabrication of superoleophobic cotton fabric for multi-purpose applications," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 377, no. 2150, pp. 1–13, 2019. doi:10.1098/rsta.2019.0129
- [93] Z. Geng et al., "High-performance TiO₂ nanotubes/poly(aryl ether sulfone) hybrid self-cleaning anti-fouling ultrafiltration membranes," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 3, 2019. doi:10.3390/polym11030555
- [94] G. Zhang, D. Wang, J. Yan, Y. Xiao, W. Gu, and C. Zang, "Study on the photocatalytic and antibacterial properties of TiO₂ nanoparticles-coated cotton fabrics," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 12, 2019. doi:10.3390/ma12122010
- [95] M. J. Uddin et al., "Cotton textile fibres coated by Au/TiO₂ films: Synthesis, characterization and self cleaning properties," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 199, no. 1, pp. 64–72, 2008, doi:10.1016/j.jphotochem.2008.05.004
- [96] S. Naderizadeh et al., "Superhydrophobic Coatings from Beeswax-in-Water Emulsions with Latent Heat Storage Capability," *Advanced Materials Interfaces*, vol. 6, no. 5, pp. 1–11, 2019. doi:10.1002/admi.201801782
- [97] M. Yu, G. Gu, W. D. Meng, and F. L. Qing, "Superhydrophobic cotton fabric coating based on a complex layer of silica nanoparticles and perfluorooctylated quaternary ammonium silane coupling agent," *Applied Surface Science*, vol. 253, no. 7, pp. 3669–3673, 2007. doi:10.1016/j.apsusc.2006.07.086
- [98] A. Synytska, R. Khanum, L. Ionov, C. Cherif, and C. Bellmann, "Water-Repellent Textile via Decorating Fibers with Amphiphilic Janus Particles," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 3, no. 4, pp. 1216–1220, Apr. 2011. doi:10.1021/am200033u
- [99] F. Shams-Ghahfarokhi, A. Khoddami, Z. Mazrouei-Sebdani, J. Rahmatinejad, and H. Mohammadi, "A new technique to prepare a hydrophobic and thermal insulating polyester woven fabric using electro-spraying of nano-porous silica powder," *Surface and Coatings Technology*, vol. 366, no. October 2018, pp. 97–105, 2019. doi:10.1016/j.surfcoat.2019.03.025
- [100] Y. Chen, J. Fu, B. Dang, Q. Sun, H. Li, and T. Zhai, "Artificial Wooden Nacre: A High Specific Strength Engineering Material," *ACS Nano*, vol. 14, no. 2, pp. 2036–2043, Feb. 2020. doi:10.1021/acsnano.9b08647
- [101] H. P. Aravind, S. A. Jadhav, V. B. More, K. D. Sonawane, and P. S. Patil, "Novel One Step Sonosynthesis and Deposition Technique to Prepare Silver Nanoparticles Coated Cotton Textile with Antibacterial Properties," *Colloid Journal*, vol. 81, no. 6, pp. 720–727, 2019. doi:10.1134/S1061933X19070019
- [102] S. Wirunchit, N. Wonganan, and W. Koetnuyom, "Multi Self-cleaning Properties of Zinc Oxide Nanoparticles/ Polydimethylsiloxane (ZnO/PDMS) Composite on Polyester Textile," *Current Applied Science and Technology*, vol. 23, no. 5, pp. 1–12, 2023. doi:10.55003/cast.2023.05.23.015
- [103] M. Salat, P. Petkova, J. Hoyo, I. Perelshtein, A. Gedanken, and T. Tzanov, "Durable antimicrobial cotton textiles coated sonochemically with ZnO nanoparticles embedded in an in-situ enzymatically generated bioadhesive," *Carbohydrate Polymers*, vol. 189, no. February, pp. 198–203, 2018. doi:10.1016/j.carbpol.2018.02.033
- [104] S. Mondal, "Nanomaterials for UV protective textiles," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 51, no. 4, pp. 5592S–5621S, 2022. doi:10.1177/1528083721988949.
- [105] D. Mihailović et al., "Multifunctional properties of polyester fabrics modified by corona discharge/air RF plasma and colloidal TiO₂ nanoparticles," *Polymer Composites*, vol. 32, no. 3, pp. 390–397, 2011. doi: 10.1002/pc.21053
- [106] Z. Wang, M. Xue, K. Huang, and Z. Liu, "Textile Dyeing Wastewater Treatment," *Advances in Treating Textile Effluent*, 2011. doi:10.5772/22670
- [107] J. Yu et al., "Cotton fabric finished by PANI/TiO₂ with multifunctions of conductivity, anti-ultraviolet and photocatalysis activity," *Applied Surface Science*, vol. 470, no. July 2018, pp. 84–90, 2019. doi:10.1016/j.apsusc.2018.11.112
- [108] N. R. Dhineshbabu and S. Bose, "UV resistant and fire retardant properties in fabrics coated with polymer based nanocomposites derived from sustainable and natural resources for protective clothing application," *Composites Part B: Engineering*, vol. 172, no. February, pp. 555–563, 2019. doi:10.1016/j.compositesb.2019.05.013
- [109] S. Xi, L. Wang, H. Xie, and W. Yu, "Superhydrophilic Modified Elastomeric RGO Aerogel Based Hydrated Salt Phase Change

- Materials for Effective Solar Thermal Conversion and Storage," *ACS Nano*, vol. 16, no. 3, pp. 3843–3851, 2022. doi:10.1021/acsnano.1c08581
- [110] J. Wu et al., "A Trimode Thermoregulatory Flexible Fibrous Membrane Designed with Hierarchical Core–Sheath Fiber Structure for Wearable Personal Thermal Management," *ACS Nano*, vol. 16, no. 8, pp. 12801–12812, Aug. 2022. doi:10.1021/acsnano.2c04971
- [111] J. Cui et al., "Ultra-Stable Phase Change Coatings by Self-Cross-Linkable Reactive Poly(ethylene glycol) and MWCNTs," *Advanced Functional Materials*, vol. 32, no. 10, pp. 1–10, 2022. doi:10.1002/adfm.202108000
- [112] M. A. Ali, A. G. Hassabo, K. M. Seddik, S. Y. M. Gad, and N. M. Aly, "Characterization of the Thermal and Physico-Mechanical Properties of Cotton and Polyester Yarns Treated with Phase Change Materials Composites," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 65, no. 13, pp. 21–37, 2022. doi:10.21608/EJCHEM.2022.143640.6270
- [113] C. Cherif, N. H. A. Tran, M. Kirsten, H. Brünig, and R. Vogel, "Environmentally friendly and highly productive bi-component melt spinning of thermoregulated smart polymer fibres with high latent heat capacity," *Express Polymer Letters*, vol. 12, no. 3, pp. 203–214, 2018. doi:10.3144/expresspolymlett.2018.19
- [114] V. Skurkyte-Papieviene, A. Abraitiene, A. Sankauskaite, V. Rubeziene, and J. Baltusnikaite-Guzaitiene, "Enhancement of the thermal performance of the paraffin-based microcapsules intended for textile applications," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 7, pp. 1–16, 2021. doi:10.3390/polym13071120
- [115] M. A. Ali, A. G. Hassabo, K. M. Seddik, Sarah yahia, and N. M. Aly, "Characterization of the Thermal and Physico-Mechanical Properties of Cotton and Polyester Yarns Treated with Phase Change Materials Composites," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 65, no. 131, pp. 21–37, 2022. doi:10.21608/ejchem.2022.143640.6270
- [116] T. Textor and B. Mahltig, "A sol-gel based surface treatment for preparation of water repellent antistatic textiles," *Applied Surface Science*, vol. 256, no. 6, pp. 1668–1674, 2010. doi:10.1016/j.apsusc.2009.09.091
- [117] E. Samuel, B. Joshi, M. W. Kim, Y. Il Kim, M. T. Swihart, and S. S. Yoon, "Hierarchical zeolitic imidazolate framework-derived manganese-doped zinc oxide decorated carbon nanofiber electrodes for high performance flexible supercapacitors," *Chemical Engineering Journal*, vol. 371, no. February, pp. 657–665, 2019. doi:10.1016/j.cej.2019.04.065
- [118] N. Nan et al., "A Stretchable, Highly Sensitive, and Multimodal Mechanical Fabric Sensor Based on Electrospun Conductive Nanofiber Yarn for Wearable Electronics," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 1–11, 2019. doi:10.1002/admt.201800338
- [119] Y. Huang et al., "From Industrially Weavable and Knittable Highly Conductive Yarns to Large Wearable Energy Storage Textiles," *ACS Nano*, vol. 9, no. 5, pp. 4766–4775, May 2015. doi:10.1021/acsnano.5b00860
- [120] Y. Huang et al., "Magnetic-Assisted, Self-Healable, Yarn-Based Supercapacitor," *ACS Nano*, vol. 9, no. 6, pp. 6242–6251, Jun. 2015. doi:10.1021/acsnano.5b01602
- [121] H. Qu, O. Semenikhin, and M. Skorobogatiy, "Flexible fiber batteries for applications in smart textiles," *Smart Materials and Structures*, vol. 24, no. 2, p. 25012, 2014. doi:10.1088/0964-1726/24/2/025012
- [122] Y. Liu, S. Gorgutsa, C. Santato, and M. Skorobogatiy, "Flexible, Solid Electrolyte-Based Lithium Battery Composed of LiFePO₄ Cathode and Li₄Ti₅O₁₂ Anode for Applications in Smart Textiles," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 159, no. 4, pp. A349–A356, 2012. doi:10.1149/2.020204jes
- [123] W. Kim et al., "Soft fabric-based flexible organic light-emitting diodes," *Organic Electronics*, vol. 14, no. 11, pp. 3007–3013, 2013. doi:10.1016/j.orgel.2013.09.001
- [124] S. Choi et al., "Multi-directionally wrinkle-able textile OLEDs for clothing-type displays," *npj Flexible Electronics*, vol. 4, no. 1, p. 33, Nov. 2020. doi:10.1038/s41528-020-00096-3
- [125] Q. Zhao, A. K. Yetisen, A. Sabouri, S. H. Yun, and H. Butt, "Printable Nanophotonic Devices via Holographic Laser Ablation," *ACS Nano*, vol. 9, no. 9, pp. 9062–9069, Sep. 2015. doi:10.1021/acsnano.5b03165
- [126] M. Liao et al., "Multicolor, Fluorescent Supercapacitor Fiber," *Small*, vol. 14, no. 43, pp. 1–6, 2018. doi:10.1002/smll.201702052
- [127] I. Sayed, J. Berzowska, and M. Skorobogatiy, "Jacquard-Woven Photonic Bandgap Fiber Displays," *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. 14, no. 4, pp. 97–105, 2010. doi:10.1108/RJTA-14-04-2010-B011
- [128] M. Wasim, M. R. Khan, M. Mushtaq, and A. Naeem, "Surface Modification of Bacterial Cellulose by Copper and Zinc Oxide Sputter Coating for UV-Resistance/Antistatic/Antibacterial Characteristics," *Coatings*, vol. 10, no. 4, pp. 364, 2020. doi:10.3390/coatings10040364
- [129] S. W. Chen et al., "An Ultrathin Flexible Single-Electrode Triboelectric-Nanogenerator for Mechanical Energy Harvesting and Instantaneous Force Sensing," *Advanced Energy Materials*, vol. 7, no. 1, 2017. doi:10.1002/aenm.201601255
- [130] M. Xu et al., "A Soft and Robust Spring Based Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Arbitrary Directional Vibration Energy and Self-Powered Vibration Sensing," *Advanced Energy Materials*, vol. 8, no. 9, pp. 1–9, 2018.

doi:10.1002/aenm.201702432

[131] Y. Zhang et al., "Performance Enhancement of Flexible Piezoelectric Nanogenerator via Doping and Rational 3D Structure Design For Self-Powered Mechanosensational System," *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 42, pp. 1–12, 2019. doi:10.1002/adfm.201904259

[132] J. H. Lee et al., "Micropatterned P(VDF-TrFE) film-based piezoelectric nanogenerators for highly sensitive self-powered pressure sensors," *Advanced Functional Materials*, vol. 25, no. 21, pp. 3203–3209, 2015. doi:10.1002/adfm.201500856

[133] C. H. Kwon et al., "High-power biofuel cell textiles from woven bisrolled carbon nanotube yarns," *Nature Communications*, vol. 5, pp. 1–7, 2014. doi:10.1038/ncomms4928

[134] C. Kwon et al., "High-power hybrid biofuel cells using layer-by-layer assembled glucose oxidase-coated metallic cotton fibers," *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, p. 4479, Oct. 2018. doi:10.1038/s41467-018-06994-5

[135] S. Ortelli, G. Malucelli, M. Blosi, I. Zanoni, and A. L. Costa, "NanoTiO₂ @DNA complex: a novel eco, durable, fire retardant design strategy for cotton textiles," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 546, pp. 174–183, 2019. doi:10.1016/j.jcis.2019.03.055

[136] B. Mirani et al., "Facile Method for Fabrication of Meter-Long Multifunctional Hydrogel Fibers with Controllable Biophysical and Biochemical Features," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 8, pp. 9080–9089, Feb. 2020. doi:10.1021/acsami.9b23063

[137] V. Kumar, P. Pallavi, S. K. Sen, and S. Raut, "Harnessing the potential of white rot fungi and ligninolytic enzymes for efficient textile dye degradation: A comprehensive review," *Water Environment Research*, vol. 96, no. 1, pp. 1–23, 2024. doi:10.1002/wer.10959

[138] Y. Song, Y. Meng, K. Huo, Z.-Q. Wang, Y. Li, M. Yu, B. Zhang, J. Li "Greenly and Efficiently Dyeing Cotton Fabric with Custom-Tailored Reactive Dyes via Electron Beam Irradiation," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 12, no. 8, pp. 3121–3129, 2024. doi:10.1021/acssuschemeng.3c07075

[139] G. Varadarajan and P. Venkatachalam, "Sustainable textile dyeing processes," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 113–122, 2016. doi:10.1007/s10311-015-0533-3

[140] H. Mamane, S. Altshuler, E. Sterenzon, and V. K. Vadivel, "Decolorization of dyes from textile wastewater using biochar: A review," *Acta Innovations*, no. 37, pp. 36–46, 2020. doi:10.32933/ActaInnovations.37.3

[141] S. Yadav, S. Punia, H. R. Sharma, and A. Gupta, "Nano-remediation for the decolourisation of textile effluents: A review," *Nanofabrication*, vol. 7, no. 217, pp. 217–243, 2022. doi:10.37819/nanofab.007.226

[142] M. Jiang, K. Ye, J. Deng, J. Lin, W. Ye, S. Zhao, and B. Van der Bruggen "Conventional Ultrafiltration As Effective Strategy for Dye/Salt Fractionation in Textile Wastewater Treatment," *Environmental Science & Technology*, vol. 52, no. 18, pp. 10698–10708, Sep. 2018. doi:10.1021/acs.est.8b02984

[143] G. Weber, H. L. Chen, E. Hinsch, S. Freitas, and S. Robinson, "Pigments extracted from the wood-staining fungi *Chlorociboria aeruginosa*, *Scytalidium cuboideum*, and *S. ganodermophthorum* show potential for use as textile dyes," *Coloration Technology*, vol. 130, no. 6, pp. 445–452, 2014. doi:10.1111/cote.12110

[144] D. Tatman and G. Karakan Günaydin, "Natural Dyeing of Buldan Handwoven Fabrics With Plant Shell Extracts: a Step Towards Sustainable Textile," *Muğla Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 127–136, 2021. doi:10.22531/muglajsci.886688

[145] H. M. Ahmed, M. M. Abdellatif, S. Ibrahim, and F. H. H. Abdellatif, "Mini-emulsified Copolymer/Silica nanocomposite as effective binder and self-cleaning for textiles coating," *Progress in Organic Coatings*, vol. 129, no. October 2018, pp. 52–58, 2019. doi:10.1016/j.porgcoat.2019.01.002

This is an open access article under the CC-BY license

