



# TEKSTİL VE MÜHENDİS

## (Journal of Textiles and Engineer)

<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>



### Halokromik Akıllı Tekstil Yüzeyleri ve Tıbbi Amaçlı Kullanım Olanakları

### Halocromic Smart Textile Surfaces and Their Medical Usage Possibilities

Ayben PAKOLPAKÇIL<sup>1</sup>, Esra KARACA<sup>2</sup>, Behçet BECERİR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online): 1 Ekim 2018 (1 October 2018)

#### **Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):**

Ayben PAKOLPAKÇIL, Esra KARACA, Behçet BECERİR (2018): Halokromik Akıllı Tekstil Yüzeyleri ve Tıbbi Amaçlı Kullanım Olanakları, Tekstil ve Mühendis, 25: 111, 214-224.

**For online version of the article:** <https://doi.org/10.7216/1300759920182511105>

**Sorumlu Yazara ait Orcid Numarası (Corresponding Author's Orcid Number) :**

<https://orcid.org/0000-0003-1777-3977>



**Derleme Makale / Review Article**

**HALOKROMİK AKILLI TEKSTİL YÜZEYLERİ VE TIBBİ  
AMAÇLI KULLANIM OLANAKLARI**

**Ayben PAKOLPAKÇIL<sup>1</sup>**  
**Esra KARACA<sup>2\*</sup>**  
**Behçet BECERİR<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye  
<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

*Gönderilme Tarihi / Received: 24.04.2018*  
*Kabul Tarihi / Accepted: 11.09.2018*

**ÖZET:** Akıllı tekstiller, son yıllarda birçok araştırmacının ilgisini çeken konulardan birisidir. Dış ortamdaki değişmelere bağlı olarak renk değiştiren kromik tekstiller ise; akıllı tekstil malzemelerinin bir alt kolu olup, bu alanda yapılan çalışmalar yoğunlaşarak artmıştır. Tekstil malzemeleri; mukavemet, esneklik, hafiflik, biyouyumluluk gibi avantajlara sahip olmasından dolayı uzun yıllardır sağlık sektörünün talep ettiği ihtiyaçları karşılamaktadır. Tekstil malzemelerine gerek konvansiyonel yöntemler gerekse nanoteknolojik uygulamalar kullanılarak halokromik özellik kazandırılabilir. Halokromik tekstiller, pH değiştiğinde renk değiştiren malzemelerdir ve diğer kromik tekstillere göre daha az bilinmekle birlikte, tıbbi alanda giderek artan bir kullanım potansiyeli oluşturmaktadır. Bu makalede; tıbbi tekstiller ve akıllı tekstillerin küresel pazar profili özetlenerek, halokromik tekstillerin üretimine ve özellikle tıbbi alandaki kullanımına yönelik araştırmalara yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tıbbi tekstiller, akıllı tekstiller, halokromizm, pH-indikatör, pH-sensör

**HALOCROMIC SMART TEXTILE SURFACES AND THEIR MEDICAL USAGE POSSIBILITIES**

**ABSTRACT:** In recent years, many researchers have been interested in smart textiles. The chromic textiles, being a subclass of intelligent textile materials, change their colors depending on environmental changes and the studies concerning this subject has increased in recent years. Textile materials have many advantages such as strength, flexibility, lightness, and biocompatibility so that they have been meeting the needs of the healthcare industry for many years. Halochromic properties could be given to the textile materials either by conventional methods or by using nanotechnological applications. Although halochromic textiles which change color with changing pH, are rarely known than other chromic textiles; they present an increasing usage potential in the future of medical textiles. In this article; the global market profile of medical textiles and intelligent textiles were summarized, and the researches of halochromic textiles concerning their production and especially their medical uses were outlined.

**Keywords:** Medical textiles, smart textiles, halochromism, pH-indicator, pH-sensor

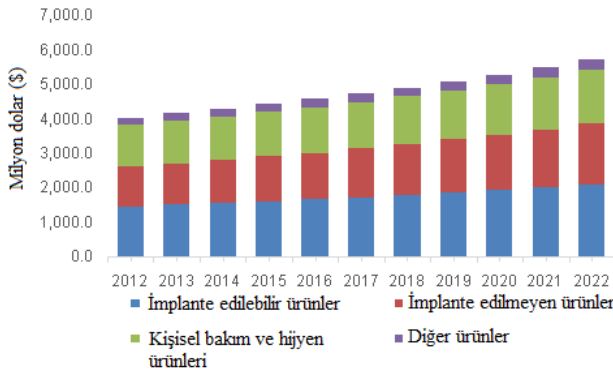
\* **Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** [ekaraca@uludag.edu.tr](mailto:ekaraca@uludag.edu.tr) <https://orcid.org/0000-0003-1777-3977>  
**DOI:** [10.7216/1300759920182511105](https://doi.org/10.7216/1300759920182511105), [www.tekstilmuhendis.org.tr](http://www.tekstilmuhendis.org.tr)

## 1. GİRİŞ

Günümüzde dijital, sağlık, ulaşım, enerji ve güvenlik gibi dinamik pazarlarda, tekstil sektörünün desteği oldukça önemlidir. Özellikle tıp alanında, yüzyıllardan beri tekstil malzemelerinden yararlanılmaktadır. Tekstil ürünlerinin tıbbi alanda kullanımı; 2014 yılında %10'luk pay ile ulaşım, endüstriyel, inşaat ve tarım tekstillerinden sonra beşinci sıraya yerleşmiştir [1].

Hem tekstil teknolojisinde hem de tıbbi prosedürlerde yapılan sürekli iyileştirmeler ve yenilikler sayesinde sağlık ve hijyen sektörleri gelişmektedir. Belli ihtiyaçlara cevap verecek şekilde tasarlanan tekstil malzemeleri; mukavemet, esneklik, biyoyumluluk, nem ve hava geçirgenliği gibi gereksinimlerin olduğu herhangi bir tıbbi ve cerrahi uygulamada kullanılabilir. Tıbbi uygulamalar için tasarlanan tekstil malzemeleri; monofilament, multifilament ve braid yapılı iplikler, dokuma, örme ve dokusuz yüzeyler veya kompozit yapılar halinde elde edilebilir. Uygulamalar, basit temizlik mendilinden kemik onarımına yönelik karmaşık kompozit yapılara kadar uzanır [2].

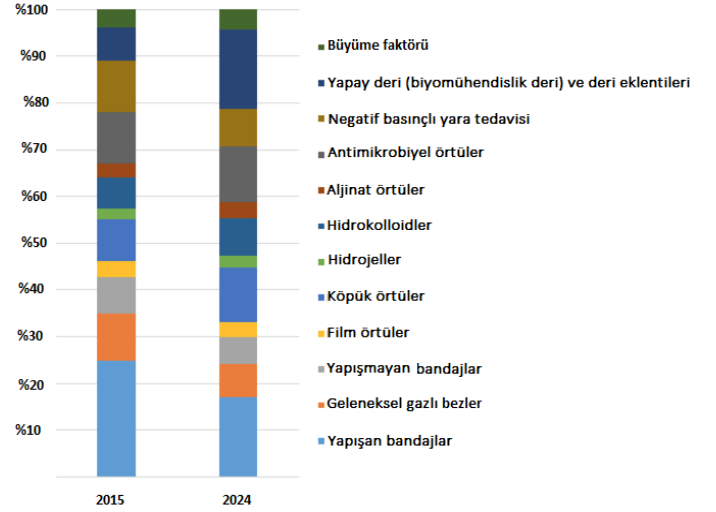
Küresel tıbbi tekstil pazarı, 2014 yılında 13,9 milyar dolar değerindedir ve ilerleyen yıllarda güçlü bir büyüme beklenmektedir. Özellikle; Avrupa'da nüfusun yaşlanmasının, yüksek kolesterol, hipertansiyon gibi kronik hastalıkların artışı nedeniyle sağlık konusundaki endişelerin artmasının ve sağlık uygulamalarındaki gelişmelerin, tıbbi tekstil pazarının büyümesinde önemli bir etkiye sahip olduğu tahmin edilmektedir. Şekil 1'deki grafikte de görüldüğü gibi, Avrupa'da tıbbi tekstil pazarına olan talebin artması öngörülmektedir [3].



Şekil 1. 2012-2022 yılları arasında ürün bazında Avrupa tıbbi tekstil pazarı [3]

Gelişmiş yara örtüleri için de çok yüksek bir pazar potansiyeli vardır. Yara bakımı endüstrisi; ABD ve Avrupa'da, 2003 yılında 3,5 milyar dolarlık, 2006 yılında ise 4,5 milyar dolarlık bir ticari büyüklüğe sahip olmuştur. Küresel pazarı en hızlı büyüyen alan olarak kabul edilen yara bakım endüstrisinin, 2018'de 16,3 milyar dolar değerinde olacağı tahmin edilmektedir [2]. Yara bakımı ürünleri; basit gazlı bez ve bandajlardan birçok farklı bileşenden oluşan kompleks sargı bezlerine, negatif basınçlı yara tedavi ürünlerinden yapay deri ürünlerine uzanan geniş bir alanı kapsar. Özellikle yapay deri ve deri eklenti uygulamalarında,

gelişen biyoteknolojik yöntemlerle birlikte büyük bir artış beklenmektedir. Bunun yanı sıra; alginatlı yara örtüleri, hidrokolloidler ve köpük uygulamalarında da önemli artış görüleceği tahmin edilmektedir (Şekil 2) [4].



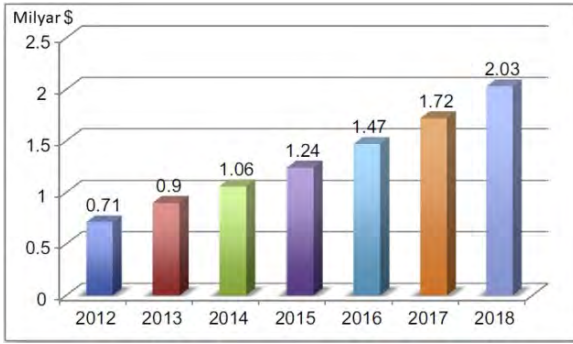
Şekil 2. 2015-2024 yılları arasında yara bakım ürünlerinin hacimsel değişimi [4]

## 2. AKILLI TEKSTİLLER

Akıllı tekstiller, çevresel şartları ve etkileri (ısı, ışık, basınç, pH, elektromanyetik dalgalar, ses, hareket, vb.) veya etki değişikliğini algılayıp tepki verme özelliğine sahip olan tekstil malzemeleridir. Bunlar; pasif, aktif ve çok akıllı tekstiller olarak üç sınıfta kategorize edilirler [5]. Pasif akıllı tekstiller, çevresel bir uyarıyı algılayabilen sensörlerdir. Şekil hafıza malzemeleri, hidrofobik veya hidrofilik tekstiller de bu kategorinin bir parçasıdır. Aktif akıllı tekstiller, koşullara ve uyarılara duyarlı ve bunları iletmek için sensörler ve aktüatörlerle donatılmıştır. Sıcaklık, ışık ve kirlilik gibi çevredeki çeşitli sinyalleri algılayabilen ve esnek veya minyatürize aktüatörler kullanarak nasıl tepki verileceğine karar veren sistemler bu kategorinin içerisinde yer alır [2]. Çok akıllı tekstiller ise, çevresel uyarıları algılayıp kendilerini bu uyarılara adapte edebilen sistemlerdir [6].

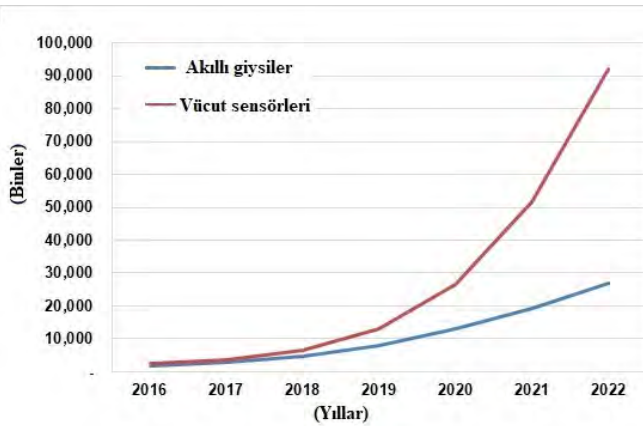
“Akıllı materyal” kavramı ilk kez 1989'da Japonya'da tanımlanmıştır. İlk akıllı tekstil ürünü ise, şekil hafıza özelliğine sahip bir ipek ipliğidir. 1960'larda şekil hafızalı malzemelerin ve 1970'lerde akıllı polimer jellerinin keşfi, akıllı malzemelerin doğuşu olarak kabul edilmektedir. 1990'lı yıllara kadar tekstil malzemeleri akıllı materyaller sınıfına sokulmamıştır. 1990'lı yılların sonuna doğru ilk araştırma, iletişimsel tekstiller üzerine yapılmıştır ve 2000'li yılların başında ilk tekstil elektronik yarı iletken bileşenler üretilmiştir [5].

Akıllı, dijital ve interaktif tekstil pazarı 2012-2018 yılları arasında hızla büyümektedir (Şekil 3) [2]. 2020 yılında ise, %34 oranında büyüyerek 4,7 milyar dolara ulaşacağı öngörülmüştür [7].



Şekil 3. 2012-2018 yılları arasında küresel çapta akıllı tekstil pazarı [5]

Akıllı kumaşlar ve interaktif tekstiller, biyomedikal mühendisliği alanında birçok potansiyel uygulamaya sahip olmakla birlikte nispeten yeni bir araştırma alanıdır. Vücut ile temas halindeki tekstillere entegre olan sensörler, birçok yararlı fizyolojik sinyali yakalama yeteneğine sahiptir [8]. Amerika'daki pazar araştırma şirketi Tractica, dünya pazarında akıllı giysi ürünleri sevkiyatının 2016 yılında 1,7 milyon adetten 2022 yılında 26,9 milyon adede, vücut sensörlerinin ise daha büyük bir artışla 2016 yılında 2,4 milyon adetten 2022 yılında 92,1 milyon adede ulaşacağını öngörmektedir (Şekil 4). Ayrıca, 2022 yılı sonunda, akıllı giysiler ve vücut sensörlerinin birlikte yıllık 19 milyar dolar gelir getireceğini tahmin etmektedir [9]. Pek çok çalışmada fizyolojik değişimlerin ve çevresel etkenlerle iletişimin izlenmesi amacıyla; akıllı tekstillerin özellikle sağlık ve tıp alanında bandaj, plaster, yara bakım ürünü, cerrahi dikiş ipliği, protez, sağlık personeli giysisi olarak kullanımları araştırılmaktadır [10].



Şekil 4. Akıllı giysiler ve vücut sensörlerinin 2016-2022 yılları arasında sevkiyat adetleri [9]

### 3. RENK DEĞİŞTİREN TEKSTİLLER

Renk değiştiren tekstiller; dışarıdan gelen bir uyarıcı etkisi ile renk değiştirme özelliğine sahip akıllı tekstil materyalleridir. Kromik boyarmadde olarak tanımlanan renk değiştiren boyarmaddelerin, tekstil materyallerinin yapısına değişik yöntemler ile katılması sonucunda elde edilirler. Kromik bir boyarmadde, geleneksel boyama yöntemleri ile kumaşların boyanmasında kullanılabilir, polimer ile karıştırılarak lif/nanolif üretimi aşamasında yapıya dahil edilebilir veya reçine ile kaplama, baskı, sol-jel gibi yöntemlerle kumaş yüzeyine uygulanabilir [11-15].

Değişik pek çok renk değiştirme mekanizması vardır ancak, çoğunlukla dışarıdan gelen uyarıcı etkisi ile boyarmaddenin elektron yoğunluğu ya da moleküler yapısı değişir ve renk değişimi gerçekleşir. Uyarıcı etkisi ortadan kalktığı zaman kararlı oldukları ilk hallerine geri dönerler ve ilk renklerini alırlar [16, 17]. Son yıllarda, insanların çevre şartlarındaki değişimi algılaması konusunda yardımcı olan pek çok renk değiştiren ürün ortaya çıkmıştır (Şekil 5).



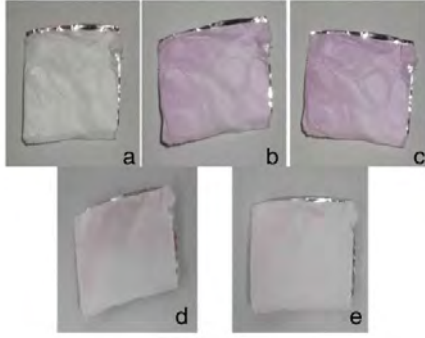
Şekil 5. Çeşitli dış etkiler ile renk değiştiren materyaller [18-20]

Renk değişimi; ışık etkisi ile gerçekleşiyorsa fotokromik, ısı etkisi ile gerçekleşiyorsa termokromik, elektrik akımı ile gerçekleşiyorsa elektrokromik, çözelti etkisi ile gerçekleşiyorsa solventkromik, pH değişimi ile gerçekleşiyorsa halokromik olarak adlandırılır. Günümüzde en fazla bilinen ve üzerinde çalışılan kromik materyaller, ışık veya ısıya duyarlı olanlardır. Bunlardan farklı ve daha az bilinen bir tip kromizm ise halokromizmdir [21, 22].

Fotokromizm ve termokromizm; kimya, sağlık ve biyoloji gibi diğer alanlarda uygulanan ilginç fizikokimyasal olaylardır. Renk değiştirebilme özelliklerin biyoalgılama uygulamalarında kullanılması geliştirilmeye devam etmekle birlikte, literatürde çok az sonuç bildirilmiştir [17].

Shuiping ve ark. [23]; polisakarit esaslı bir polimer olan selüloz asetat çözeltisine spiropiran türevi bir fotokromik boyarmadde ilave ederek, elektro çekim yöntemiyle fotokromik nanolifli yüzey üretmiştir. Ultraviyole-görünür (UV-VIS) spektrofotometri ve floresans mikroskopu sonuçları, elde edilen nanolifli yüzeylerin iyi fotokromik ve floresan özellikleri sağlayabileceğini göstermiştir (Şekil 6). Mükemmel ışık duyarlılığına sahip fotokromik nanoliflerin, optik cihazlar ve/veya biyosensör uygulamaları için büyük bir potansiyele sahip olabileceğine değinilmiştir.

Siegel ve ark. [24] tarafından yapılan çalışmada; kağıdın bir yüzeyine iletken teller yerleştirilmiş, diğer bir yüzeyi ise termokromik boyalarla desenlendirilmiştir. Elektrik akımı tellerden geçirilmiş, kağıt ısıtılmış ve termokromik boyalar yüzeyde görünür hale gelmiştir (Şekil 7). Geliştirilen cihazın, elektrik akımı varyasyonlarını konsantrasyonla ilişkilendiren bir elektro analitik biyoalgılama sistemine bağlanabileceği önerilmiştir.



**Şekil 6.** Fotokromik nanolifli yüzeyin UV ışınım altında (a) 0 s, (b) 10 s, (c) 20 s sonraki görüntüleri; 30 s UV ışımaya maruz bırakılan fotokromik nanolifli yüzeyin karanlık odada (d) 5 dk, (e) 10 dk sonraki görüntüleri [23]



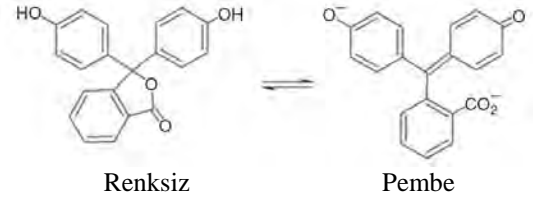
**Şekil 7.** Kağıt üzerindeki termokromik boyanın; (a) aktif olmadığı, (b) aktif olduğu hali [24]

#### 4. HALOKROMİK BOYARMADDELER

Halokromizm, çözeltiliye asit veya bazların eklenmesi sonucu çözeltide oluşan renk değişikliğidir ve ilk defa Von Baeyer tarafından tanımlanmıştır. Halokromizm, iyonokromizmin alt sınıfında yer alan  $H^+$  iyonuna bağlı bir renk değişimidir ve pH'nın değişmesi sonucu renkte tersinir bir değişiklik gözlenir. Renklilik yeni bir kromoforun oluşmasından kaynaklanır [25]. pH'daki değişiklik, çözelti içindeki iyonize olan ve iyonize olmayan yapıların oranında bir değişikliğe neden olur. Bu iki yapı farklı renklere sahiptir ve renkteki değişiklik çözeltinin de renginin değişmesine yol açar. Bazı halokromik boyarmaddeler bunları tekrar kullanılabilir yapan tersinir renk değiştirme özelliklerine sahiptir. Bu renk değişimi sayesinde, asit-baz titrasyonlarında pH-indikatörü olarak kullanılabilir ve halokromik maddedeki renk değişikliği, reaksiyonun dönüm noktasına karşılık gelir [26].

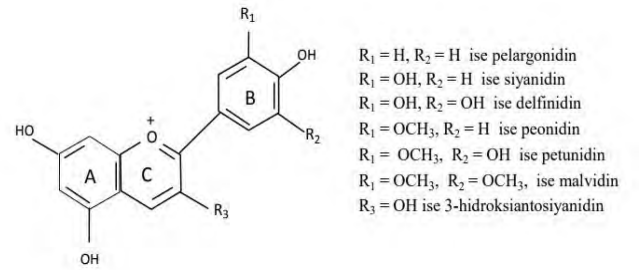
Halokromik sentetik boyarmaddeler başlıca; ftaleinler, triarilmetanlar, fluoranlar ve azo boyaları şekilde sınıflandırılır [27]. Bu boyarmaddelerin tanınmasındaki iki özellik; proton yüklenmesinin dengelenmesi ve bu protonların çözeltiye renk vermesidir [28]. Birçok halokromik boyarmaddede, renklerin birinden diğerine geçişinde batokromik (uzun dalga boyuna) veya hipsokromik (kısa dalga boyuna) yer değişimi gözlenir. Absorblamanın doruk noktası ise deprotonlanmadır. Bu boyarmaddeler içinde, ftaleinler özel bir sınıf oluştururlar. Çünkü, renksiz bir bileşikten (270 nm absorpsiyon dalgaboyunda) pH değişimi sonucunda renkli bir bileşik (yaklaşık 550 nm absorpsiyon dalgaboyunda) haline geçerler [21]. Şekil 8'de, asit-baz indikatörü olarak

kullanılan fenolftalein boyarmaddesinin asidik ortamda renksiz, bazik ortamda pembe renkli makromolekül yapısı verilmiştir.



**Şekil 8.** Fenolftalein boyarmaddesinde deprotonlanmayla halkanın açılması [21]

Halokromik boyarmadde özelliği taşıyan doğal pH-indikatörleri ise antosiyaninlerdir. Antosiyaninler; meyve, sebze, çiçekler, yaprak, kök ve diğer bitki depolama organlarında bulunan, kendine özgü pembe, kırmızı, mor ve maviye kadar geniş bir aralıktaki renkleri veren, suda çözünebilir nitelikteki doğal renk pigmentleridir. Antosiyaninlerin rengi, ortamın pH değerine bağlı olarak bir indikatör gibi değişim gösterir. Düşük pH değerlerinde mor-kırmızı, daha yüksek pH değerlerinde ise yeşil-mavi bir renk alırlar. Bir antosiyanin molekülünün (Şekil 9) yansıttığı renk, moleküler yapısı içindeki iki karbon halkasının hidroksilasyonuna bağlıdır. Bu yüzden, pigment kendi çevresinin pH'ına bağlı olarak rengini değiştirir. Antosiyaninlerde hidroksilasyon arttıkça renk maviye dönmektedir. Antosiyaninin renk değişimi kalıcı değildir ve çevre şartları değişikçe bu değişikliklere cevap vermeye devam eder [29-34].



**Şekil 9.** Antosiyaninlerin temel yapısı [31] (A, B, C: temel yapıyı oluşturan halkalar, R1, R2, R3: antosiyanin çeşitlerinin oluşumunu sağlayan gruplar)

#### 5. HALOKROMİK BOYARMADDE İÇEREN TEKSTİL YÜZEYLERİNİN ÜRETİMİNE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

##### 5.1. Konvansiyonel boyama yöntemiyle üretim

Konvansiyonel boyama yöntemleri, ekonomik ve kolay uygulanabilmesi nedeniyle uzun yıllardır tekstil sektöründe ürünlerin renklendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. pH ile renk değiştiren (pH-sensörü olarak kullanılacak) tekstil yüzeylerinin geliştirilmesine yönelik literatürde yer alan çalışmaların bir kısmı; genellikle klasik dokuma kumaşlara sentetik pH-indikatörü boyarmaddelerin konvansiyonel boyama yöntemleri ile uygulanmasını içermektedir. Bu çalışmalarda özellikle, halokromik boyarmaddeler ile lif yapısının etkileşimi ve renk değişiminin kalıcılığı incelenmiştir.

Schueren ve Clerck [11] yaptıkları çalışmada; pamuk, poliamid 6 ve poliamid 6,6 dokuma kumaşları, 10 farklı sentetik halokromik boyarmaddeyle konvansiyonel yöntem ile boyayarak pH 2-11 arasındaki renk değişimlerini incelemiştir. Poliamid esaslı kumaşlar tüm boyarmaddelerle, pamuklu kumaş ise bazı boyarmaddelerle iyi bir boyama performansı sergilemiştir (Şekil 10). pH-indikatör boyaları, sıvıların içerisinde hemen renk değiştirirken; tekstil kumaşlarına aktarıldıklarında renk değiştirme süresinin uzadığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonunda, parlak sarı (brillant yellow) ve alizarin halokromik boyarmaddelerin daha etkili olduğu ve lif cinsinin halokromizmi etkilediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 10. Brillant Yellow ile boyanmış pamuklu kumaşın pH ile renk değişimi [35]

Schueren ve ark. [14] yaptıkları çalışmada; halokromik nitrazin sarısı (nitrazin yellow) boyarmaddesini hem konvansiyonel boyama metoduyla uygulayarak poliamid 6 ve 6,6 tekstil yapısının, hem de polimer çözeltisine ekleyerek elektro çekim yöntemi ile elde edilmiş poliamid 6 ve 6,6 nanolifli yüzeylerin pH ile renk değişimini incelemiştir. Çalışmanın sonunda; poliamid tipinin ve tekstil yapısının, boyarmadde ile etkileşim mekanizmasını ve dolayısıyla halokromizmi etkilediği anlaşılmıştır.

Meyer ve ark. [36]; 10 farklı sülfonftalein pH-indikatör boyarmaddesini poliamid 6 kumaşının konvansiyonel boyama metodunda ve elektro çekim yöntemiyle nanolif eldesinde kullanmıştır. Çalışmada, sülfonftalein boyarmaddesinin renk değişiminden sorumlu her bir sübtitüent grupları incelenmiş ve halojen sübtitüent grupların renk değişiminde önemli rol üstlendiği gözlemlenmiştir.

Staneva ve Betcheva [37] yaptıkları çalışmada; sentezledikleri pH duyarlı yeni bir boyarmaddeyi kullanarak viskoz rayonu kumaş üzerinde pH değerine bağlı renk değişimini incelemiştir. pH 5,2-11,4 arasında sarıdan turuncu-kırmızıya doğru hızlı ve tersinir bir şekilde renk değişimi gözlemlenmiştir. Çalışmada; sentezlenen yeni halokromik boyarmaddenin moleküler yapısının, alkali pH aralığında renk ve fluoresan özelliklerin değişimi üzerindeki etkisine dikkat çekilmiştir.

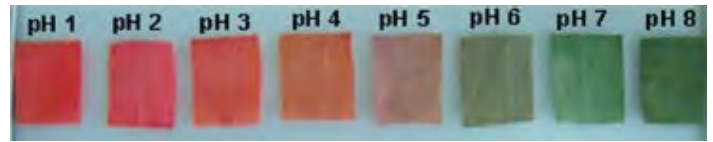
## 5.2. Sol-jel yöntemiyle üretim

Sol-jel tekniği basit bir yöntem olup; üretilen yüzeyler, üç boyutlu gözenekli inorganik ağ yapısına sahiptir. Bu ağ, hidroalkolik çözeltilerde hidroliz ve alkoksit  $M(OR)_n$  gibi bir metalorganik öncünün yoğunlaşması ile oluşur. Bu katı matris organik moleküller katılabilir. Tekstil endüstrisinde sol-jel tekniğinin, tekstil mamullerine güç tutuşurluk, su ve yağ iticilik, antistatik ve antimikrobiyel özellik kazandırma amaçlı pek çok uygulaması vardır [38].

Literatürde yer alan halokromik tekstiller ile ilgili çalışmaların bir kısmı ise, halokromik boyarmaddelerin çeşitli tekstil yüzeylerine uygulanma metodları üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalarda, özellikle sol-jel tekniğinin avantajları tartışılmıştır.

Schueren ve ark. [39]; pamuk, poliamid 6 ve poliamid 6,6 dokuma kumaşları üzerinde konvansiyonel yöntem ve sol-jel yöntemini kullanarak metil kırmızısı boyarmaddesini uygulamış ve halokromizmi araştırmıştır. Sol-jel yöntemiyle hem pamukta hem de poliamidde pH ile belirgin bir renk değişimi gözlemlenmiştir. Sonuç olarak; metil kırmızısı pH-indikatörü kullanıldığında, sol-jel yönteminin konvansiyonel boyamaya alternatif olabileceği gösterilmiştir.

Sun ve ark. [40] yaptıkları çalışmada; pamuklu kumaşları çeşitli halokromik boyarmaddeler kullanarak sol-jel yöntemi ile boyamış ve pH duyarlı bir tekstil sensörü geliştirmişlerdir. Halokromiklik; reflektans spektrofotometresi, infrared spektrofotometresi ve CIELAB renk sistemi ile karakterize edilmiştir. Kumaşların, farklı pH değerlerinde belirgin bir renk farklılığına sahip olduğu görülmüştür (Şekil 11).



Şekil 11. Sol-jel tekniğiyle renklendirilmiş pamuklu kumaşların farklı pH çözeltilerindeki renk değişimleri [40]

## 5.3. Elektro çekim yöntemiyle üretim

2000'li yıllarda, elektro çekim yöntemi ile elde edilen nanolif esaslı materyallere olan ilgi; üstün özelliklerinden (hacme oranla geniş yüzey alanı, çok küçük gözenek boyutu, esnek yüzey fonksiyonelliği) ve yaygın uygulama alanlarından (savunma, uzay, elektronik, filtrasyon, biyomedikal, tarım ve gıda) dolayı oldukça artmıştır. Bu nedenle; pH ile renk değiştiren nanolifli yüzeylerin üretimi son yıllarda ilgi gören alanlardan birisi olmakla birlikte, literatürde henüz sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır.

Schueren ve ark. [12]; poliamid 6,6 polimer çözeltisine bromkresol moru (bromocresol purple) ve parlak sarı (brillant yellow) halokromik boyarmaddeleri ekleyerek pH ile renk değişimini incelemiştir. Ardından gerçekleştirilen elektro çekim yöntemi ile elde edilen nanolifli yüzeyde, pH değişimine bağlı olarak renk değişimi açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonunda, halokromik boyarmaddenin elektro çekim parametrelerini ve lif çapını etkilemediği ortaya konulmuştur.

Agarwal ve ark. [13] yaptıkları çalışmada; beş farklı pH-indikatör boyarmaddeyi poliamid 6 çözeltisine ilave ederek, elektro çekim yöntemi ile halokromik nanolifli yüzey elde etmiştir. Elde edilen nanolifli yüzeyin, pH 1-10 arasında renk değişimi incelenmiş ve pH-indikatörlerinin lif morfolojisi üzerindeki etkisi optimize edilmiştir. Ayrıca, pH-sensör özelliği taşıyan nanolifli yüzeyin sıcaklık karşısında stabilizasyonu üzerine çalışılmıştır. Akıllı tekstil yüzeyinin, gıda paketlenmesi veya su filtrelerinde kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Steyaert ve ark. [41] tarafından yapılan çalışmada; poliamid 6 polimerinden boyarmadde içeren kopolimer ile elektro çekim yöntemiyle pH'a göre renk değiştiren nanolifli yüzey üretilmiştir. Elde edilen nanolifli yüzeyin hidroklorik asitli sulu çözeltisinin yanı sıra, asit buharı varlığında da pembeden turuncuya renk değiştirebildiği gözlenmiştir. Üretilen halokromik yüzeyin, asit buharı varlığında koruyucu giysilerde kullanılabileceği belirtilmiştir.

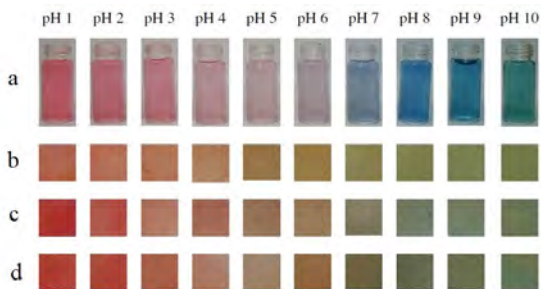
Sharifabad ve Bahrami [42] yaptıkları çalışmada; farklı konsantrasyonlarda hazırlanan poliakrilonitril (PAN) polimer çözeltisine, fenolftalein boyarmaddesini ilave ederek elektro çekim yöntemiyle nanolifli yüzey üretmişler ve halokromik davranışını incelemişlerdir (Şekil 12). Elde edilen halokromik nanosensörün tersinirliğinin ve tekrar kullanılabilirliğinin, iki yüz kez kullanımdan sonra bile kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Bu sonuç; halokromik nanosensörün, riskli yerlerde kullanımı için umut verici bulunmuştur.



Şekil 12. PAN/fenolftalein nanolifli yüzeyin pH 8-13 çözeltilerindeki renk değişimi [42]

Schoolaert ve ark. [43] yaptıkları çalışmada; polikaprolakton/kitosan polimer çözeltilerine metil kırmızısı (methyl red) ve bengal gülü (rose bengal) boyarmaddelerini ilave ederek, elektro çekim yöntemiyle biyouyumlu ve pH-sensör özelliğine sahip nanolifli yüzeyler üretmiştir. Elde edilen yüzeyler, çok kısa sürede (1 dakika) pH ile renk değiştirmiştir. Renk değişimi; asidik çözeltilerin yanı sıra asit buharında bile hızlı bir şekilde gerçekleştiğinden, yüzeylerin koruyucu giysilerde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Prietto ve ark. [44] tarafından yapılan çalışmada; zein polimer çözeltisine farklı konsantrasyonlarda mor lahana ekstraktı ilave edilerek, elektro çekim yöntemiyle pH-sensör özellikli nanolifli yüzeyler elde edilmiştir. Elde edilen yüzeyler farklı pH çözeltilerine daldırılarak renk ölçümleri yapılmış ve çıplak gözle ayırt edilebilir canlı renkler gözlemlenmiştir (Şekil 13). Geliştirilen ürünün; akıllı paketleme teknolojilerinde, gıda ve farmakolojik maddelerin tazeliğini korumada, pH değerinin ölçümünde kullanılmasının umut verici olduğu belirtilmiştir.



Şekil 13. (a) mor lahana ekstraktı, (b) %3, (c) %4, (d) %5 mor lahana ekstraktı içeren zein nanolifli yüzeyler [44]

## 6. HALOKROMİK BOYARMADDE İÇEREN TEKSTİL YÜZEYLERİNİN TIBBİ ALANDA KULLANIMINA YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Halokromik boyarmadde içeren tekstil yüzeyleri, birçok uygulama alanında yer alabilirler. Ortamda asit buharı varlığında koruyucu giysi olarak, yaraların iyileşme sürecinin takibinde renk değişimini gözlemlemede, bitkilerin büyümesi esnasında toprağın pH değerini kontrol etmede veya filtrelerin performansını belirlerken suyun pH derecesinin etkisini saptamada kullanılabılırler. Bununla birlikte, pH insan vücudu için hayati bir parametredir. Bu nedenle; ter, idrar, burun akıntısı gibi vücut sıvılarının asitliğinin belirlenmesinde halokromik özellikli tekstillerin kullanımı oldukça faydalıdır [21, 45, 46]. Giyilebilir pH-sensörleri; vücuda yakın temasta bulunarak, yara eksüdatları ve ter gibi biyolojik sıvılardan analizler yapabilir ve biyolojik parametreleri ölçebilir. EKG, solunum ve kan oksijenasyonu için de sensörler geliştirilmiştir. Böylece birçok fizyolojik parametreyi, gerçek zamanlı olarak ter bileşiminden izlemek mümkün olmuştur [47].

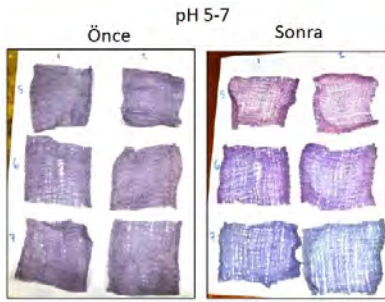
Özellikle yaraların pH derecesi, yaranın iyileşmesi hakkında önemli bilgiler verir. Yaraların iyileşme sürecinde pH'ın etkisi ve biyokimyasal süreçlerin pH'a duyarlılığı bilinmesine rağmen, yakın zamana kadar ilgi duyulan konulardan biri haline gelmemiştir. Geçen son yirmi yılda; yara iyileşme sürecinin, yara bölgesindeki pH'ın değişimi ile ilişkili olduğu ispatlanmıştır [48]. Yaradan yayılan sızıntının pH'ının yara iyileştikçe veya yaranın enfeksiyonu arttıkça değiştiği gözlemlenmiştir. Sağlıklı bir cildin pH'ı 4,8 ile 6 arasındadır. Bir yaranın iyileşme sürecinde pH önce baziktir, sonra nötr olur ve sonunda sağlıklı cildin pH'ına ulaşır [49-51].

Dolayısıyla, halokromik tekstillerin tıbbi alanda kullanımına yönelik çalışmalar daha fazladır. 2011 yılında Fraunhofer Araştırma Enstitüsü [52] araştırmacıları tarafından, içerisine pH ile renk değiştiren indikatör boyarmadde entegre edilmiş bir yara bandı geliştirilmiştir (Şekil 14). Yara bandı mor renge dönüştüğünde, iltihaplanmayı haber vermektedir. Teknik detayları verilmeyen çalışmanın bir prototip olduğu ve klinik araştırmaların başlatılacağı bildirilmiştir.



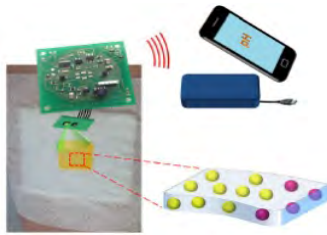
Şekil 14. Yara iyileşme sürecinde renk değiştiren yara bandı [52]

Coomber [53] tarafından alınan bir patentte; pamuklu bir sargı bezi, doğal pH-indikatör boyası olan ahududu ekstraktı kullanılarak renklendirilmiştir. Sarğı bezi, farklı pH çözeltileri ile muamele edilerek renk değişimi incelenmiştir (Şekil 15). Patentte; sarğı bezinin, yaraların iyileşme sürecindeki pH değişimini gözlemleyebilmek için kullanılabileceği önerilmiştir.



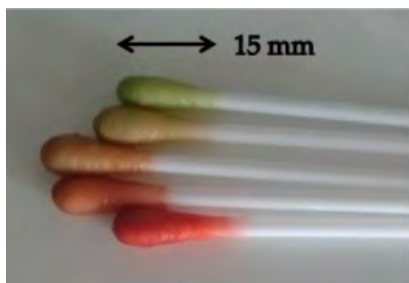
Şekil 15. Ahuduyla renklendirilmiş pamuklu sargı bezinin pH 5-7 çözeltileri ile muamele edilmeden önceki ve sonraki görüntüleri [53]

Kassal ve ark. [54] tarafından yapılan çalışmada; yaranın durumunun izlenebilmesi için pH'ın optik olarak saptanabilmesini sağlayan kablosuz akıllı bir bandaj tasarlanmıştır (Şekil 16). Tasarımda; pH duyarlı bir boyarmadde (GJM-534), selüloz ile karıştırılarak biyofilm üretilmiş ve ticari bir bandajın üzerine yerleştirilmiştir. Yaranın pH değişiminin kaydedilebilmesi için kablosuz radyo frekans (RFID) platformu kullanılmıştır. Elde edilen veriler akıllı bir telefona da aktarılabilmiştir.



Şekil 16. Kablosuz akıllı bandaj [54]

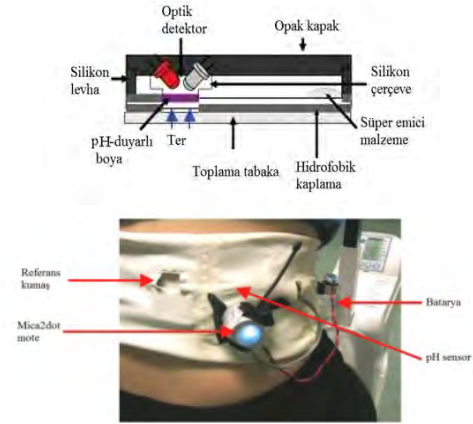
Schaude ve ark. [55] tarafından yapılan bir çalışmada; pH-sensörü pamuklu yara bakım çubukları (Şekil 17) geliştirilmiştir. Svap örneği almak için ucunda pamuk lifi bulunan çubuklar, iki farklı sentetik pH-indikatör boyarmaddeyle konvansiyonel boyama tekniğiyle boyanarak halokromik özellik kazandırılmıştır. GJM-492 pH-indikatör boyasıyla boyanan pamuk lifleri pH 5-7 arasında, GJM-503 pH-indikatör boyasıyla boyanan pamuk lifleri ise pH 6,5-8,5 arasında renk değişimi göstermiştir.



Şekil 17. pH-sensörü yara bakım çubukları [55]

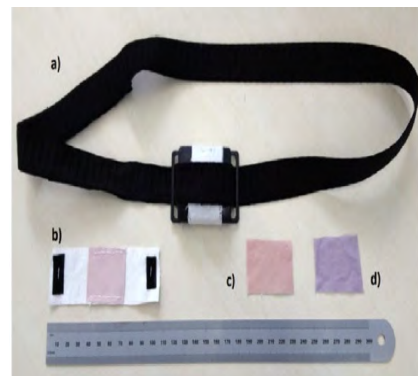
Özellikle dayanıklılık gerektiren sporlarda, atletlerin hidrasyon seviyelerinin belirlenmesinde ter analizinden yararlanmak için Morris ve ark. [56] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada; tekstil tabanlı biyosensörler (Şekil 18) kullanılarak, terin pH değerinin gerçek zamanlı olarak görüntülenmesi başarılmıştır.

Tasarlanan yapıda; nem emici, yüksek absorbans malzemeler ile hidrofobik malzemeler kullanılmıştır. Terin pH'a göre renk değişiminin gözlemlenmesi için nem emici kısımda bir pH-indikatörü olan bromkresol moru (bromkresol purple) boyarmadde kullanılmıştır. Tersinir renk değişiminin gözlemlenmesi için LED tekniği kullanılmış ve sarıdan maviye doğru bir renk değişimi kaydedilmiştir.



Şekil 18. (sol) pH-sensörü ve optik algılama sistemi; (sağ) sensörün kemer içine yerleştirilmesi [56]

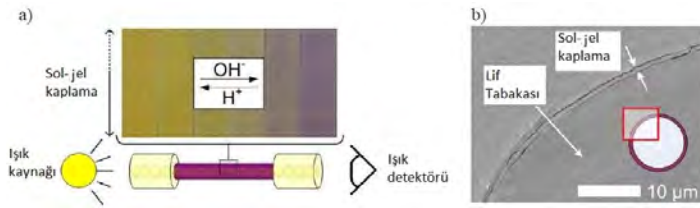
Caldara ve ark. [47] tarafından yapılan çalışmada; insan vücudunda terin pH değerinin sürekli takibi için giyilebilir akıllı bir kemer tasarımı yapılmıştır. Çalışmada; pamuklu bir kumaş, litmus doğal pH-indikatörü ile sol-jel metodu uygulanarak renklendirilmiştir. pH-sensörü olarak davranan akıllı tekstil kumaşı, elektronik elemanlar kullanılarak bir kemere entegre edilmiş ve terin ölçülen pH'ı bir bluetooth ara yüzey yardımıyla izlenmiştir. Hem farklı pH çözeltilerinde hem de insan üzerinde gerçek zamanlı spor sırasında denenen kemer, değişen pH değerlerine duyarlılık göstermiştir (Şekil 19). Araştırmacılar tarafından; ter sensörü olarak geliştirilen akıllı tekstil malzemesinin, sadece sporcular için vücut hidrasyonu ölçümünde değil tıbbi alanda yara takibi ve ilaç tüketiminin izlenmesinde de uygulama alanı bulabileceği belirtilmiştir.



Şekil 19. (a) Elektronik sistemlerle birleştirilen akıllı kumaştan elde edilen kemer; (b) akıllı kumaşın beyaz pamuklu kumaşa iliştirilmesi; akıllı kumaşın (c) pH 5'de, (d) pH 8'de çekilmiş fotoğrafı [57]

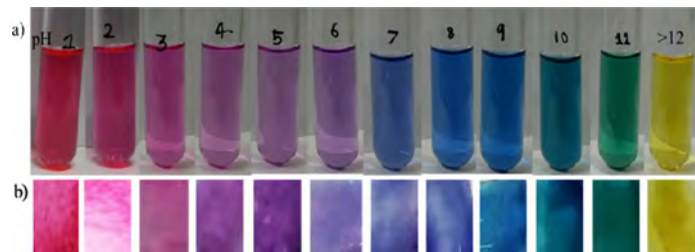


Pasche ve ark. [58] yaptıkları çalışmada; biyosensör lif üretimi ile yara iyileşmesini takip edebilen akıllı bir tekstil malzemesi geliştirmiştir. Cam ve polimetil metakrilat optik lifleri üç adet sentetik halokromik boyarmadde içeren bir polimer ile sol-jel yöntemi kullanılarak kaplanmış ve liflerin içinden geçen ışık miktarı ortam pH'ına bağlı olarak ölçülmüştür (Şekil 20). Üretilen pH-sensörü optik liflerin, bir yara örtüsü içine entegre edilebileceği, LED ışık kaynakları ve bir elektronik devre kullanılarak kablosuz bilgisayar bağlantısı ile yara iyileşmesinin takibinde kullanılabileceği belirtilmiştir.



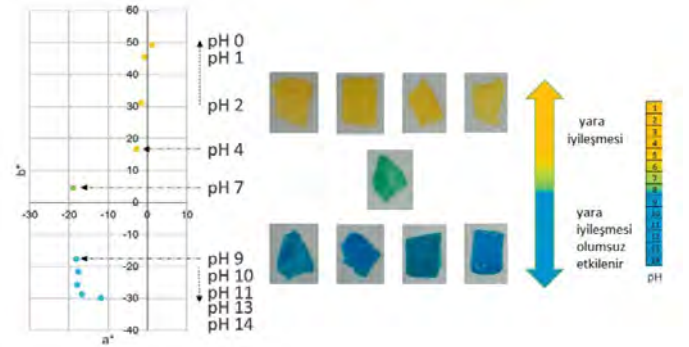
Şekil 20. (a) Fiber optik algılama prensibi; (b) pH'a duyarlı biyosensörün enine kesit SEM görüntüsü [58]

Devarayan ve Kim [59] yaptıkları çalışmada; rejener selüloz lifine mor lahanadan elde edilen doğal pH-indikatör pigmentini ekleyerek elektro çekim yöntemiyle nanolifli yüzey elde etmiştir. Nanobiyokompozit yapı üzerinde çeşitli stabilizasyon çalışmaları yapılmıştır. -50 °C'de 24 saat bekletilen numunenin RGB değerlerinde önemli bir değişikli gözlenmezken, 100 °C'de 24 saat bekletilen numunenin RGB değerlerinde önemli bir azalma görülmüştür. Bunun nedeni antosiyaninlerin yüksek sıcaklıkta degradasyona uğramasına bağlanmıştır. Elde edilen yüzey, pH 1-14 arasında çeşitli çözeltilere maruz bırakılarak renk değişimi incelenmiştir (Şekil 21) ve beş saniye içerisinde cevap alındığı gözlenmiştir. Nanolifli yüzeyin, alkol alma durumunu teşhis etmede veya hayati fonksiyonları ve bazı hastalıkların gelişimini izlemede kullanılabileceği önerilmiştir. Ayrıca; diş çürümelerinde önemli rol oynayan kritik pH değerinin, tükürükten alınan bir örnek üzerinde takip edilmesinde de oldukça yararlı olabileceği öne sürülmüştür.



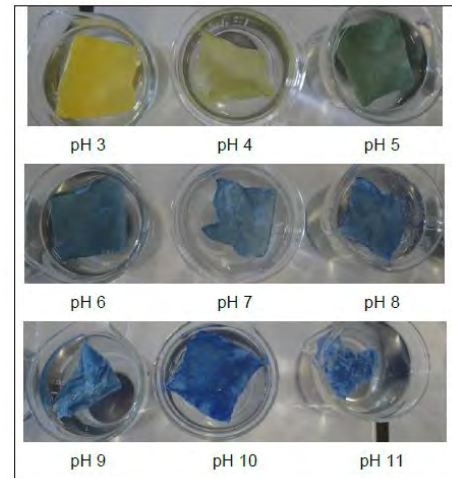
Şekil 21. (a) Mor lahanaya suyunun; (b) selüloz asetat/mor lahanaya nanolifli yüzeyin pH 1-14 arasındaki renk değişimi [59]

Kurecic ve ark [60] yaptıkları çalışmada; selüloz asetat polimerine bromkresol yeşili (bromocresol green) boyarmaddesi ilave ederek, iğnesiz elektro çekim yöntemiyle nanolifli yüzey üretilmiştir. Yüzeyin CIELAB renk uzayında renk değişimleri incelenmiştir (Şekil 22) ve pH 4-9 arasında sarıdan maviye doğru renk değişimi gözlenmiştir. Üretilen yüzeyin pH değişim aralığının yara iyileşmesindeki pH değişimine uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 22. pH'a bağlı olarak selüloz asetat/bromkresol yeşili yüzeyin CIELAB değerleri [60]

Schueren ve ark. [15] yaptıkları çalışmada; polikaprolakton (PCL) ve polikaprolakton/kitosan polimer çözeltilerine halokromik nitrazin sarısı (nitrazin yellow) boyarmaddesini ilave ederek elektro çekim yöntemiyle pH-indikatörü özelliğine sahip nanolifli yüzeyler üretilmiştir. PCL/nitrazin sarısı nanolifli yüzeyin farklı pH çözeltilerindeki renk değişimi Şekil 23'de verilmiştir. PCL nanolifli yüzeyde meydana gelen halokromik renk değişimi üç saat sürerken, PCL/kitosan yüzeyde beş dakika içerisinde gerçekleşmiştir. Çalışmada; elde edilen nanolifli yüzeyin pH-sensörü özelliğinden, tıbbi uygulamalarda yararlanılabileceği belirtilmiştir.



Şekil 23. PCL/nitrazin sarısı halokromik nanolifli yüzeyin pH 3-11 çözeltilerindeki renk değişimi [61]

## 7. HALOKROMİK BOYARMADDE İÇEREN TEKSTİL YÜZEYLERİNİN DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

Halokromik boyarmadde içeren tekstil materyallerinin uygulamalarda kullanılması durumunda; pH ile renk değişikliğinin gözlenmesi ve izlenmesi için geliştirilen yöntemler, aynı zamanda bu yüzeylerin fonksiyonel olarak yararlılıklarının da takibini sağlamaktadır. Halokromik tekstillerin değerlendirilmesi hem görsel olarak hem de teknolojik cihazlar ile nitel ve nicel yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda, subjektif ve objektif sonuçlar elde edilmektedir. Subjektif sonuç, nitel değerlendirme yöntemi ile elde edilir ve

değerlendirme yöntemi ne olursa olsun amaç görsel renk farkının algılanmasıdır. Objektif sonuç ise, nicel değerlendirme ile elde edilir ve görsel renk farkının sayısal bir değer olarak ifade edilmesidir. Nitel değerlendirmede; hem görsel renk değişimi izlenmekte hem de kablosuz radyo frekans (RFID) platformu, LED teknolojisi kullanımı veya bluetooth arayüzü gibi tekniklerle rengin değişimi izlenebilmektedir. Bu izlemede, tekstil materyalinin renginin kırmızı nüanslar ile mavi nüanslar arasında değişiminin görsel takibi yapılmaktadır. Literatürde yer alan nitel yöntem çalışmalarında ise, genellikle asetat tamponu ve/veya fosfat tamponu kullanılarak sodyum hidroksit (NaOH) ve hidroklorik asit (HCl) yardımıyla farklı pH değerlerinde tampon çözeltiler hazırlanmış ve elde edilen halokromik tekstiller bu çözeltilere daldırılıp çıkartılarak renk değişimleri gözlemlenmiştir.

Halokromik tekstillerin renklerinin ve ortam şartlarına bağlı olarak renklerdeki değişimin nicel metotlar ile değerlendirilmesinde, renk fiziği ve CIELAB renk uzayı temel alınmıştır. Nicel değerlendirmelerde renkler, CIEL\*a\*b\* ve RGB renk ölçüm sistemleriyle karakterize edilmiştir. RGB renk uzayı kırmızı (R), yeşil (G) ve mavi (B) bileşenlerden ve CIEL\*a\*b\* renk uzayı ise açıklık-koyuluk (L\*), kırmızı-yeşil (a\*) ve sarı-mavi (b\*) bileşenlerinden oluşmaktadır. CIEL\*a\*b\* değerleri kullanılarak iki farklı pH değerindeki renk farkı  $\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$  formülü esas alınarak hesaplanmaktadır. RGB değerlerindeki farklılık ise dönüşüm formülleri kullanılarak CIEL\*a\*b\* değerlerine dönüştürülür ve renk farkının sayısal değeri yine CIELAB renk uzayı birimleri ile elde edilmektedir. İki renk arasında  $\Delta E^*$  değerinin 5'in üzerinde olması, renklerin birbirinden ayrıt edilebilirliğini;  $\Delta E^*$  değerinin 12'in üzerinde olması ise, renklerin birbirinden tamamen farklı olduğunu göstermektedir [13, 59].

Halokromik tekstil yüzeylerinin değerlendirilmesinde genel olarak, nitel ve subjektif ölçümler gerçekleştirilmekte ve kullanım şartları altında renk değişimi görsel olarak takip edilmektedir. Ancak; renk fiziği bileşenleri kullanılarak elde edilen nicel değerlendirme, yapılacak olan nitel değerlendirmenin sınır şartlarının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır.

## 8. SONUÇ

Sağladığı yüksek istihdam, üretim potansiyeli ve ihracat gelişiyle, ülkemizin önde gelen ve hali hazırda vazgeçilmez bir sanayi dalı olan tekstil sektörünün devamlılığını sağlamak ve rekabet edebilirliğini güçlendirmek için, teknik/akıllı tekstil gibi katma değeri yüksek ürünlerin üretimine yönelme ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır.

Akıllı tekstiller; tıp, kimya, elektronik, mekatronik, yazılım gibi birçok farklı disiplini bir araya getiren bir çalışma alanıdır. Multidisipliner yaklaşımla yapılan çalışmalardan katma değeri yüksek ürünler üretilebilir. Ülkemizdeki tekstil sanayinde genellikle konvansiyonel uygulamalar daha ön planda yer almaktadır. Gelişmiş teknolojilerle üretim gerektiren akıllı tekstillerin sanayiye yeni bir nefes getireceği düşünülmektedir.

Dünya nüfusunun artması, nüfusun yaşlanması, insanların kişisel bakım ve hijyene daha fazla önem vermesi gibi sebeplerden dolayı tıbbi tekstil ürünlerine olan talebin artması beklenmektedir. Diyabet, obezite ve kanser gibi hastalıkların sebep olduğu iyileşmesi geciken ve/veya iyileşme sürecinde oluşan yaralar, hastaların yaşam kalitesini hem fiziksel hem de psikolojik açıdan olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle; yara tedavilerinde, geleneksel yara örtülerinden daha etkili uygulamalara gereksinim duyulmaktadır.

Boyama teknolojilerinde halihazırda, rengin kararlılığı mutlak ön koşul iken; kromik malzemelerin tekstildeki uygulamaları arttıkça, renk değiştiren tekstillerin önemli bir pazar potansiyeline sahip olduğu kabul edilmektedir. Renk değiştiren bir tekstil ürünü, kolayca fark edilebilir sinyal veren bir sensör olarak kullanılabilir. Ayrıca; esneklik, nefes alabilirlik, tekrar kullanılabilirlik, yıkanabilirlik ve hafiflik gibi özelliklere sahip tekstil malzemelerinin sensör olarak değerlendirilmesi önemli avantajlar sağlayacaktır.

Tekstil malzemelerine çeşitli yöntemlerle halokromik özellik kazandırılabilir. Halokromik tekstillerin kullanım sürecinde en önemli kriterler; algılama yeteneği, seçicilik, duyarlılık ve tepki süresidir. Tekstil esaslı pH-sensörlerinin algılama kabiliyetinin artırılmasının bir yolu da yüzey alanını artırılmasıdır. Nanolifler, yüksek gözenekli yapısı, geniş yüzey alanı ve küçük gözenek boyutu gibi birçok avantaja sahiptir. Bu nedenle, nanolifli pH-sensörü üretimine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

Bu çalışmada; halokromik özellik kazandırılmış akıllı tekstil malzemelerinin tıbbi alanda kullanımı değerlendirilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda genelde, pamuk, poliamid ve akrilik esaslı dokuma kumaşlara sentetik halokromik boyarmaddeler konvansiyonel boyama metotları ile aktarılmıştır. Ancak, bunların insan sağlığı üzerindeki alerjik, toksik ve başka zararlı etkilerinin yanı sıra çevre üzerindeki olumsuz etkileri yeterince incelenmemiştir. Ayrıca, konvansiyonel uygulamalarda pH hassasiyeti kalıcı olmamıştır. Doğal halokromik boyarmaddelerin kullanımına yönelik yapılan çalışmaların henüz yetersiz olduğu dikkate alındığında; özellikle nanoteknolojinin verdiği imkanlar kullanılarak üretilecek tekstil yüzeyleri ile doğal pH-indikatörlerinin birleştirilmesinin tıp alanında yeni uygulamalara fırsat tanıyabilecek potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir.

Sonuç olarak; pH ile renk değiştiren tekstil uygulamalarının pek çoğunun prototip aşamasında olmasına rağmen, değişen ve gelişen teknolojiyle birlikte orta vadede pazarda yer bulabilecek konuma gelebileceği değerlendirilmiştir.

## TEŞEKKÜR

*Bu derleme çalışması; TÜBİTAK tarafından desteklenen 116M540 no'lu "Çeşitli Doğal Bitki Ekstraktları Kullanılarak pH ile Renk Değiştiren Sodyum Alginat/Polivinil Alkol Nanolifli Yara Örtüsü Üretimi ve in vivo Çalışmalarla Değerlendirilmesi" adlı proje kapsamında hazırlanmıştır.*

## KAYNAKLAR

- Swiss Textiles, *Technical Textiles Swiss Innovations as Solutions to Global Challenges*, [http://www.swisstextiles.ch/cms/upload/dokumente/Publikationen/Brochure\\_Technical\\_Textiles\\_Web.pdf](http://www.swisstextiles.ch/cms/upload/dokumente/Publikationen/Brochure_Technical_Textiles_Web.pdf), 5 Temmuz 2018.
- Rajendran, S., Anand, S.C., Rigby, A.J., (2016), *Handbook of Technical Textiles - 2nd Edition*, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Grand View Research, *Medical Textiles Market Analysis by Raw Material (Non-woven, Knitted, Woven), by Application (Implantable Goods, Non-implantable Goods, Healthcare & Hygiene Products) and Segment Forecasts to 2022*, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/medical-textiles-market>, 28 Haziran 2018.
- Prlog Press Release Distribution, *MedMarket Diligence*, <https://www.prlog.org/12521207-global-wound-management-technologies-driving-22-4-billion-market-by-2024-according-to-new-medmarket-diligence-report.html>, 28 Haziran 2018.
- Koncar, V., (2016), *Smart Textiles and Their Applications*, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Rajendran, S., (2009), *Advanced Textiles for Wound Care*, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Markets and Markets, *Smart Textiles Market by Type, Function, Industry & Geography - Global Forecast to 2020*, <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/smart-textiles-market-13764132.html>, 28 Ocak 2018.
- Langenhove, L., (2015), *Advances in Smart Medical Textiles*, Woodhead Publishing, İngiltere.
- Tractica, *Smart Clothing and Body Sensor Shipments to Reach 119 Million Units Annually by 2022*, <https://www.tractica.com/newsroom/press-releases/smart-clothing-and-body-sensor-shipments-to-reach-119-million-units-annually-by-2022/>, 28 Haziran 2018.
- Mecnika, V., Hoerr, M., Krievins, I., (2014), *Smart Textiles for Healthcare: Applications and Technologies*, Rural Environment. Education. Personality, 7-8 Şubat 2014, Jelgava.
- Schueren, L.V., Clerck, K.D., (2010), *The Use of pH-indicator Dyes for pH-sensitive Textile Materials*, Textile Research Journal, 80(7), 590-603.
- Schueren, L.V., Mollet, T., Ceylan, Ö., Clerck, K.D., (2010), *The Development of Polyamide 6.6 Nanofibres with a pH-Sensitive Function by Electrospinning*, European Polymer Journal, 46(12), 2229-2239.
- Agarwal, A., Raheja, A., Natarajan, T.S., Chandra, T.S., (2012), *Development of Universal pH Sensing Electrospun Nanofibers*, Sensors and Actuators B:Chemical, 161(1), 1097-1101.
- Schueren, L.V., Hemelsoet, K., Speybroeck, V., Clerck, K.D., (2012), *The Influence of a Polyamide Matrix on the Halochromic Behaviour of the pH-Sensitive Azo Dye Nitrazine Yellow*, Dyes and Pigments, 94(3), 443-451.
- Schueren, L.V., Meyer, T., Steyaert, I., Ceylan, Ö., Hemelsoet, K., Speybroeck, V., Clerck, K.D., (2013), *Polycaprolactone and Polycaprolactone/Chitosan Nanofibers Functionalised with the pH-Sensitive Dye Nitrazine Yellow*, Carbohydrate Polymers, 91(1), 284-293.
- Pakolpakçıl, A., (2013), *Akıllı Tekstillerde Kullanılmak Üzere Halokromik Boyalarla Boyanmış Poliamid 6,6 Kumaşın Yaş Haslıklarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Mattila, H., (2006), *Intelligent Textile and Clothing*, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Hali Industrial Co.Ltd., *Thermochromic Pigment*, [http://www.halipigment.com/html\\_products/Thermochromic-pigment-21.html#image\\_4](http://www.halipigment.com/html_products/Thermochromic-pigment-21.html#image_4), 15 Nisan 2018.
- Royal Society of Chemistry, *Colour Changing Fabrics Without Weaving*, [http://www.rsc.org/Publishing/ChemTech/Volume/2010/11/colour\\_changing\\_fabrics.asp](http://www.rsc.org/Publishing/ChemTech/Volume/2010/11/colour_changing_fabrics.asp), 15 Aralık 2017.
- Seeboth, A., Loetzsch, D., Ruhmann, R., (2011), *Piezochromic Polymer Materials Displaying Pressure Changes in Bar-Ranges*, American Journal of Materials Science, 1(2), 139-142.
- Schueren, L.V., Clerck, K.D., (2012), *Coloration and Application of pH-Sensitive Dyes on Textile Materials*, Coloration Technology, 128(2), 82-90.
- Avella-Oliver, M., Morais, S., Puchades R., Maquieira, Á., (2016), *Towards Photochromic and Thermochromic Biosensing*, Trends in Analytical Chemistry, 79, 37-45.
- Shuiping, L., Lianjiang, T., Weili, H., Xiaoqiang, L., Yanmo C., (2010), *Cellulose Acetate Nanofibers with Photochromic Property: Fabrication and Characterization*, Materials Letters, 64, 2427-2430.
- Siegel, A.C., Phillips, S.T., Wiley, B., Whitesides, G.M., (2009), *Thin, Lightweight, Foldable Thermochromic Displays on Paper, Lab on a Chip*, 9(19), 2775-2781.
- Laurent, H.B., Dürr, H. (2001), *Organic Photochromism*, Iupac Pure and Applied Chemistry, 73(4), 639-665.
- Shindy, H.A., El-Maghraby, M.A., Eissa, F.M., (2009), *Synthesis, Absorption Spectra Studies, Solvatochromism and Halochromism of Polymethine Cyanine Dyes*, Coloration Technology, 125, 104-110.
- Bamfield, P. (2001), *Chromic Phenomena the Technological Applications of Colour Chemistry*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Peters, A.T., Freeman H.S., (1995), *Modern Colorants: Synthesis and Structure*, Springer Netherlands, Cornwall.
- Glover, B.J., Martin, C. (2012), *Anthocyanins*, Current Biology, 22(5), 147-150.
- Ahmadiani, N., Robbins, R.J., Collins, T.M., Giusti, M.M., (2016), *Molar Absorptivity (ε) and Spectral Characteristics of Cyanidin-based Anthocyanins from Red Cabbage*, Food Chemistry, 197, 900-906.
- Hepsağ, F., Hayoğlu, İ., Hepsağ, B., (2012), *Karadut Meyvesinin Antosiyanin İçeriği ve Antosiyaninlerin Gıda Sanayinde Renk Maddesi Olarak Kullanım Olanakları*, Gıda Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7(1), 9-19.
- Wang, L., Stoner, G., (2008), *Anthocyanins and their Role in Cancer Prevention*, Cancer Letters, 269, 281-290.
- Saldamlı, İ., (2014), *Gıda Kimyası*, Hacettepe Yayınevi, Ankara.
- Keleş, Y., (2015), *Antosiyanin Pigmentlerin Biyokimyası ve Analizi*, Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi, 8(1), 19-25.

35. Schueren L.V., (2008), *pH-sensitieve Textielmaterialen als Nieuwe*, M.Sc. Thesis, Ghent University, Ghent.
36. Meyer, T.D., Steyaert, I., Hemelsoet, K., Hoogenboom, R., Speybroeck, V.V., Clerck, K.D., (2016), *Halochromic Properties of Sulfonphthaleine Dyes in a Textile Environment: The Influence of Substituents*, Dyes and Pigments, 124, 249-257.
37. Staneva, D., Betcheva, R., (2007), *Synthesis and Functional Properties of New Optical pH Sensor Based on Benzo [de]anthracen-7-one Immobilized on the Viscose*, Dyes and Pigments, 74(1), 148-153.
38. Carmona, N., Bouzas, V., Jimenez, F., Plaza, M., Perez, L., Garcia, M.A., Villegas, M.A., Llopis, J., (2010), *Cobalt (II) Environment Characterization in Sol-Gel Thermochemical Sensors*, Sensors and Actuators B: Chemical, 145, 139-145.
39. Schueren, L.V., Clerck, K.D., Brancatelli, G., Rosace, G., Damme, E., Vos, W., (2012), *Novel Cellulose and Polyamide Halochromic Textile Sensors Based on the Encapsulation of Methyl Red into a Sol-gel Matrix*, Sensors and Actuators: B. Chemical, 162(1), 27-34.
40. Sun, X., Branford-White, C., Yu, Z., Zhu, L., (2015), *Development of Universal pH Sensors Based on Textiles*, Journal of Sol-Gel Science and Technology, 74, 641-649.
41. Steyaert I., Vancoillie, G., Hoogenboom, R., Clerck K. D., (2015), *Dye Immobilization in Halochromic Nanofibers Through Blend Electrospinning of a Dye-containing Copolymer and Polyamide-6*, Polymer Chemistry , 6, 2685-2694.
42. Sharifabad, A.N., Bahrami S.H., (2016), *Halochromic Chemosensor from Poly(acrylonitrile)/Phenolphthalein Nanofibers as pH Sensor*, IEEE Sensors Journal, 16(4), 873-880
43. Schoolaert E., Steyaert, I., Vancoillie G., Geltmeyer J., Lava K., Hoogenboom R., Clerck, K.D., (2016), *Blend Electrospinning of Dye-functionalized Chitosan and Poly(*e*-caprolactone): Towards Biocompatible pH-sensors*, Journal of Materials Chemistry B, 4(26), 4493-4622.
44. Prieto, L., Pinto, V.Z., Halal S.L.M.E., Morais, M.G.D., Costa, J.A.V., Lim, L.T., Dias, A.R.G., Zavareze, E.D.R., (2018), *Ultrafine Fibers of Zein and Anthocyanins as Natural pH Indicator*, Journal of the Science of Food and Agriculture, 98, 2735-2741.
45. Schueren, L. V., Clerck, K.D., (2013), *Halochromic Textile Materials as Innovative pH-sensors*, Advances in Science and Technology, 80, 47-52.
46. Ferrara, M., Bengisu, M., (2014), *Materials that Change Color: Smart Materials*, Intelligent Design. Milano: Springer, London.
47. Coyle, S., Lau, K. T., Moyna, N., O'Gorman, D., Diamond, D., Di Francesco, F., Costanzo, D., Salvo, P., Trivella, M.G., De Rossi D., Taccini, N., Paradiso, R., Porchet, J.A., Ridolfi, A., Luprano, J., Chuzel, C., Lanier, T., Revol-Cavalier, F., Schoumacker, S., Mourier, V., Chartier, I., Convert, R., De-Moncuit, H., Bini, C., (2010), *BIOTEX-biosensing Textiles for Personalised Healthcare Management*, IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 14(2), 364-370.
48. Schneider, L.A., Korber, A., Grabbe, S., Dissemond, J. (2007), *Influence of pH on Wound-Healing: A New Perspective for Wound-Therapy?*, Archives of Dermatological Research, 298, 413-420.
49. Gethin, G. (2007), *The Significance of Surface pH in Chronic Wounds*, Wounds UK, 3(3), 52-56
50. Leveen, H., Falk, G., Borek, B., Diaz, C., Lynfield, Y., Wynkoop, B.J., Mabunda, G.A., Rubricius, J.L., Christoudias, G.C., (1973), *Chemical Acidification of Wounds An Adjuvant to Healing and the Unfavourable Action of Alkalinity and Ammonia*, Annals of Surgery, 178(6), 745-750.
51. Romanelli, M., Gaggio, G., Coluccia, M., Rizzello, F., Piaggese, A. (2002), *Technological Advances in Wound Bed Measurements*, Wounds, 14(2), 58-66.
52. Fraunhofer Research Institution, *Dressing Indicates Infections*, <http://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2010/11/dressing-indicates-infections.html>, 17 Nisan 2018.
53. Coomber A., (2018), Patent number: 9855364, *Wound Dressing Materials Incorporating Anthocyanins Derived from Fruit or Vegetable Sources*.
54. Kassal, P., Zubaka, M., Scheiplb, G., Mohr, G.J., Steinberg, M.D., Steinberg, I.M. (2017), *Smart Bandage with Wireless Connectivity for Optical Monitoring of pH*, Sensors and Actuators B , 246, 455-460.
55. Schaudé, C., Fröhlich, E., Meindl, C., Attard, J., Binder, B., Mohr, G.J., (2017), *The Development of Indicator Cotton Swabs for the Detection of pH in Wounds*, Sensor, 17, 1-13.
56. Morris, D., Schazmann, B., Wu, Y., Coyle, S., Brady, S., Fay, C., Hayes, J., Lau, K. T., Wallace, G., Diamond, D., (2008), *Wearable Technology for Bio-Chemical Analysis of Body Fluids During Exercise*, 30th Annual International IEEE EMBS Conference, 20-24 Ağustos 2008, Vancouver, Canada.
57. Caldara, M., Colleoni, C., Guido, E., Re, V., Rosace, G., (2016), *Optical Monitoring of Sweat pH by a Textile Fabric Wearable Sensor Based on Covalently Bonded Litmus-3 glycidoxypropyltrimethoxysilane Coating*, Sensors and Actuators B, 222, 213-220.
58. Pasche, S., Schyrr, B., Wenger, B., Scolan, E., Ischer, R., Voirin, G., (2013), *Smart Textiles with Biosensing Capabilities*, Advances in Science and Technology, 80, 129-135.
59. Devarayan, K., Kim, B.S., (2015), *Reversible and Universal pH Sensing Cellulose Nanofibers for Health Monitor*, Sensors and Actuators B:Chemical, 209, 281-286.
60. Kurecic M., Hribernik, S., Virant, N., Ojstršek, A., Smole, M.S., Kleinschek, K.S., (2016), *Polysaccharide Based Nanofibers with pH-sensitive Function*, Tekstil, 65(5-6), 166-170.
61. Steyaert I., (2011), *Hybrid Electrospun Structures for pH-Sensitive Wound Dressings*, M.Sc. Thesis, Ghent University, Ghent.