



TEKSTİL VE MÜHENDİS

(Journal of Textiles and Engineer)



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

Elektronik Tekstillere Yönelik Akıllı Kumaş Sensörleri

Smart Fabric Sensor for Electronic Textile

Ayşe Didem EROL, Suat ÇETİNER
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online): 31 Aralık 2017 (31 December 2017)

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

Ayşe Didem EROL, Suat ÇETİNER (2017): Elektronik Tekstillere Yönelik Akıllı Kumaş Sensörleri, Tekstil ve Mühendis, 24: 108, 305-320.

For online version of the article: <https://doi.org/10.7216/1300759920172410810>



Derleme Makale / Review Article

ELEKTRONİK TEKSTİLLERE YÖNELİK AKILLI KUMAŞ SENSÖRLERİ

Ayşe Didem EROL
Suat ÇETİNER*

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü,
Kahramanmaraş, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 03.05.2017
Kabul Tarihi / Accepted: 02.11.2017

ÖZET: Son yıllarda küresel piyasada tekstil ve giyim sanayi, geleneksel tekstil ürünlerinden, bilgiyi adapte eden ve dolayısıyla yeni ve katma değeri yüksek akıllı tekstillere doğru kaymaya başlamıştır. Bu durum tekstil mühendisliğinin, kimya, elektronik ve malzeme bilimi gibi diğer bilimlerle, multidisipliner bir çalışma alanını oluşturmuştur. Sensörler, akıllı tekstiller alanının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır ve geleneksel tekstillere fark yaratacak gelişmeleri içermektedir. Bu makalede akıllı kumaş sensör çeşitleri ve literatürdeki uygulamaları ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı tekstiller, kumaş sensörleri, piezorezistif, PEDOT:PSS

SMART FABRIC SENSOR FOR ELECTRONIC TEXTILE

ABSTRACT: In recent years, in the global market, the textile and apparel industry has begun to shift from traditional textile products to intelligent textiles that adapt to information and therefore are new and added value. This has created a multidisciplinary study field with textile engineering and other sciences such as chemistry, electronics and material science. Sensors constitute a significant part of the smart textiles field and include developments that make a difference to traditional textiles. In this article, smart fabric sensor types and applications in the literature are discussed.

Keywords: Smart textiles, fabric sensors, piezoresistive, PEDOT: PSS

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: suatcetiner@ksu.edu.tr
DOI: 10.7216/1300759920172410810, www.tekstilvemuhendis.org.tr

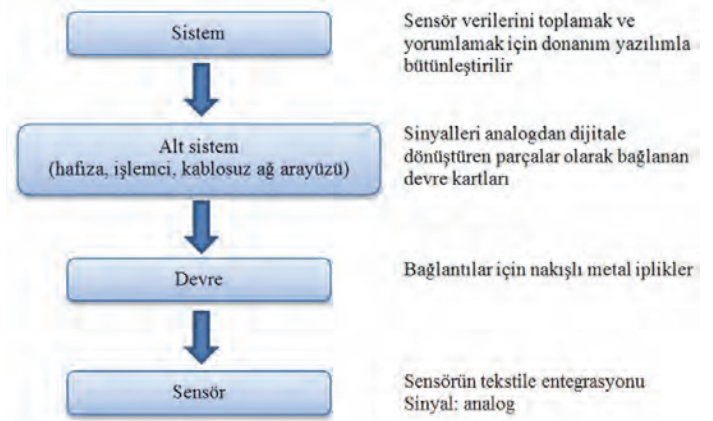
1. GİRİŞ

Avrupa'daki tekstil ve giyim sanayi, uzun zaman önce yapısal bir değişime uğramıştır. Üretim tesislerinin düşük ücretli ülkelere taşınması ve giderek artan şiddetli küresel rekabet bu durumu ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte, tekstil ve hazır giyim endüstrisi hala önemli bir sanayi sektörüdür ve bu nedenle Avrupa'daki sosyal ve ekonomik refah için büyük önem taşımaktadır. Küresel pazardaki öncü rolünü korumak için Avrupa, yaratıcı moda tasarımı, kalite, inovasyon, yeniden yapılanma, tüketici ve marka oluşturma konuları üzerine daha fazla odaklanmaktadır. Ürünlerin kalite ve işlevselliğine, tek başına fiyattan ziyade hizmetlerin esnekliğine ve hızlı yanıtlarına odaklanarak fark yaratmak mümkündür. Bu amaca ulaşmak için gerekli ön koşul; malzeme bilimi, tekstil mühendisliği, kimya ve elektronikten bilişim alanına kadar, akıllı tekstiller alanındaki en son araştırma sonuçlarının ve aktif araştırmaların yayılmasıdır. Bilgiyi adapte eden ve dolayısıyla yeni ve katma değeri yüksek ürünleri pazara sunan teknolojiyi firmalara aktarmak için, uzun, orta ve kısa vadede uygulamalı araştırmalara ihtiyaç duyulacaktır. Sensörler, akıllı tekstiller alanının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır ve bahsedilen farkı yaratacak gelişmeleri içermektedir. Bu makalede akıllı kumaş sensör çeşitleri ve literatürdeki uygulamaları ele alınmıştır.

Akıllı tekstil sistemleri çeşitli düzeylerde düşünülmektedir. Üst düzey sistemlerde, genel performans, güç yönetimi, üretilebilirlik, maliyet, tuşe ve hata toleransı gibi yönleri değerlendirilmektedir. Bir düzey aşağısında, bellek depolama ve iletim, sensör işleme ve üst düzey devre ve yazılım tasarımı ile girdi ve çıktı verilerinin denetlenmesi gibi akıllı tekstil alt sistemlerini içermektedir. Son seviyede ise, tekstille entegrasyonu mümkün olan çeşitli sensörler ve veri giriş ve çıkış cihazları yer almaktadır. Örneğin, basit bir akıllı tekstil sistemi, tekstil esaslı iletken iplikleri kullanan bir veri işlemcisine ve bellek depolama birimine bağlanan sensörlerden oluşabilmektedir. Çevresel faktörlerden kaynaklanan sensör sinyallerindeki değişiklikler, tekstilde işlenebilir (diğer bir deyişle, işlemcilere bağlanabilir) veya ileri analiz için harici bir bilgisayara iletilebilmektedir. Son olarak sistem, veri işlemcisi tarafından gönderilen veya kablosuz bağlantı yoluyla alınan sinyallere yanıt veren çeşitli veri çıkışı cihazlarını içerebilmektedir. Şekil 1'de basit bir akıllı tekstil sisteminin şeması gösterilmiştir [1].

Bazı özel durumlarda akıllı tekstiller, algılama ve kullanıcı geri bildirimini birleştiren bileşenler içerebilmektedir. Bu basit sistemler, bir hesaplama ögesine sahip değildir ve bunun yerine çevresel değişimlere, tekstil yüzeyinde meydana gelen değişikliklerle anında cevap vermektedirler. Örneğin, kumaşlar belirli sıcaklıklarda rengini değiştiren mürekkepler veya reçineler ile kaplanabilir ve böylece çevre sıcaklığındaki değişiklikler üzerine kolorimetrik geri bildirim sağlayabilmektedir. Geleneksel bir akıllı tekstil sisteminde bu renk değişikliği tespit edilecek ve bir yazılım programı için bir girdi olarak kullanılacaktır. Bu program daha sonra bu bilgiyi, tekstil tarafından deneyimlenen ortamdaki değişime ilişkin geri bildirim sağlamak için kullanabilmektedir. Bununla birlikte, renkteki görünür değişim gözlemci için hızlı geri bildirim sağlayabilmektedir. Bu tür

sistemlerin dezavantajı, sağlanabilecek geri bildirim türünün sınırlı olması, çok ayrıntılı olmaması, geçici olması ve çok akıllı bir tekstil sisteminin elde edilememesidir. Bu tip bir sistemde sensör, hesaplama elemanına bağlı olmadığından başka geri bildirim türleri sağlamak için de kullanılamaz. Sensör, bir fiziksel miktarı (ışık yoğunluğu, basınç, sıcaklık, vb.) ölçen ve onu saklayıp, analiz edilebilen bir sinyale dönüştüren cihazdır. Akıllı tekstiller bağlamında, akıllı giysilere entegre edilmiş sensörler, genellikle insanlardaki fizyolojik parametreleri (nabız, sıcaklık vb.) ölçmek ya da birisi halı üzerinde yürürken veya sensörlü bir sandalyeye oturduğunda basınç dağılımı değişiklikleri gibi çevre ortamındaki değişiklikleri belirlemek için uyarlanmıştır. Birçok akıllı tekstil, geleneksel silikon esaslı sensörleri kullanarak çalışmaktadır, ancak yeni fonksiyonelleştirilmiş lifler, özel kumaşlar ve kaplamalar, dikiş veya örme gibi yeni entegrasyon yöntemlerini kullanarak tekstillerde yeni algılama yetenekleri elde edilmiştir. Şekil 2'de farklı algılama yeteneklerine sahip çeşitli devre bileşenleri gösterilmektedir [1].

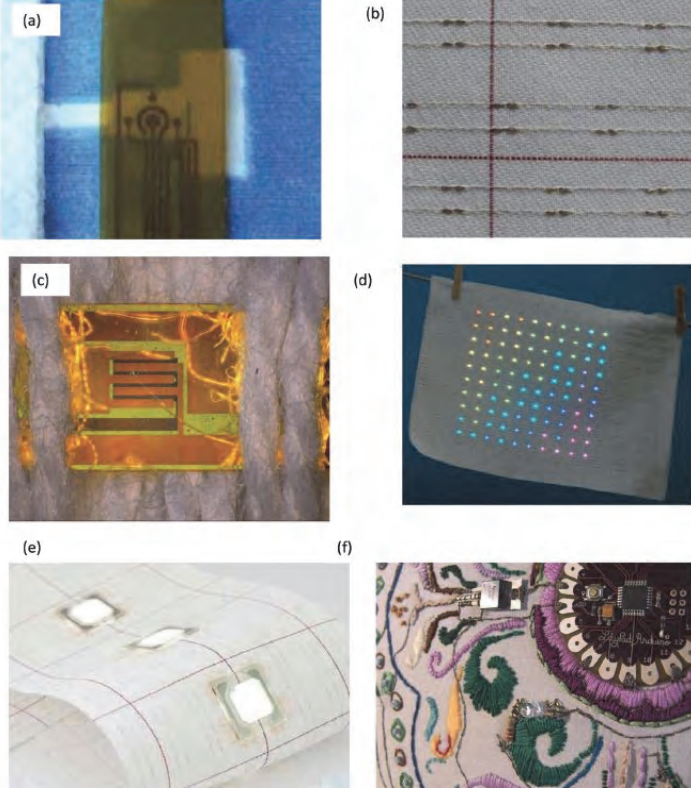


Şekil 1. Akıllı bir tekstil sisteminin şematik yapısı [2]

Algılama özellikleri ile tanımlanan kumaşlar, akıllı kumaş sensörleri (AKS) olarak adlandırılmaktadır. Bunlar; sıcaklık, basınç, solvent, kuvvet, gerilim vb birçok fiziksel ve kimyasal uyarıcıya karşı duyarlıdır. Duyarlı elemanlar, modifiye edilen ya da duyarlılaştırılan yapısal kumaş elemanına bağlı olarak her seviyede kumaşlara dahil edilebilmektedir. AKS'ler, akıllı kumaş dönüştürücülerin (AKD) daha genelleştirilmiş bir bölümüdür. Kumaşların doğası, insan teniyle direkt temas halinde olan sensörlerin dizaynı için onları ideal bir araç yapmaktadır. Bu giyilebilir teknolojiler; tıp, savunma ve havacılık sektörlerini kapsayan çeşitli alanlarda aktif bir araştırma noktası olmuştur, çünkü AKD'ler, konvansiyonel elektroniklerle tek başına mümkün olmayan teknolojik imkanlar sağlamaktadır. AKD'ler, buldukları nesneyi veya çevreyi etkileyerek veya ölçerek işlevsellik sunmaktadır. AKD'lerin üç önemli kategorisi vardır [3]:

- Sensörler: Kapasitif, rezistif, optik ve güneş gibi çeşitli fiziksel doğanın özelliklerini algılayan kumaşlar.
- Aktüatörler: Bazı çevre koşullarında harekete geçebilen kumaşlar. Bu tür kumaşlara elektroaktif kumaşlar örnek verilebilir.

- Batarya ve enerji üretimi: Batarya esaslı kumaşlar ve enerji üretmek için kişinin termal enerjisini ya da kinetik enerjisini kullanan veya çevrelerini kullanan kumaşlar.



Şekil 2. Çeşitli tekstil devre bileşenleri a) Kumaş içerisinde sıvı toplama (ter) iyonik sensörleri b) İletken iplikler yerleştirilmiş kumaş (Bunlar sıcaklık sensörleri olarak kullanılabilir) c) Kumaşa bağlanmış ince film transistörü d) İletken iplikler kullanarak dokunmuş, bir pasif matrise tutturulmuş, kumaş ekran LED'leri e) Kumaşa yapıştırılmış bir OLED f) Kumaşa dikiş ile entegre Lilypad Arduino mikrodenetleyici çipi [1]

2. AKILLI ALGILAMA FONKSİYONELLİĞİ İÇİN YÜZEY MODİFİKASYONLARI

Kumaş yüzeyleri, AKD'lere dönüştürülmek üzere yapının her aşamasında modifiye edilebilmektedir. Birinci aşama modifikasyon, bir tekstil yüzeyi oluşturabilen iletken materyallerden üretilmiş lifsi yapıları kapsayacaktır. İkinci aşama sentetik ipliklerle bunların yerine geçen iplikleri içerecektir. Üçüncü aşama modifikasyon, örneğin bir kaplamayla kumaşa algılama özellikleri kazandırmak için kumaş yüzeyini değiştirmeyi içerecektir. Dördüncü aşama ise, fonksiyonel bir kompozit yapı oluşturmak için birçok duyarlı kumaşın kullanımını kapsayacaktır [3].

2.1. Algılama özellikleri sağlayan dışsal modifikasyonlar

Algılama özellikleri sağlamak için modifikasyonlar kumaş yüzeyine herhangi bir seviyede eklenebilmektedir. Örneğin dışarıdan algılama amaçlı elemanlar bağlanarak modifiye edilmiş kumaşlar, "elektronik tekstiller" olarak adlandırılmaktadır ve genelde rezistörler veya kumaşa entegre edilen devre çipleri gibi

konvansiyonel elektronik elemanların yüzeyel bağlanmasını kapsamaktadır. Kaplamalar; lif, iplik veya dokuma kumaş gibi yüzeylere yapılan dışsal modifikasyonun bir diğer türüdür. Kumaş sensörlerine yönelik kaplama teknikleri; film baskı, inkjet baskı, elektrokaplama, elektrosuz kaplama, ince film kaplama, buhar biriktirme ve termoset kaplamaları içermektedir. Kaplamalar gerilme, kesme ve eğilme davranışlarını kapsayan kumaş mekaniklerini değiştirmektedir [4]. Bu tür kompozit davranışı temelde kaplama uygulandıktan sonra iplik hareketliliğindeki değişmeden kaynaklanmaktadır [5]. Kaplama yoğunluğunu etkileyen parametreler; kaplama malzemesinin viskozitesi ve homojenitesi, gerilme, eğilme rijitliği [6], gözeneklilik ve yüzey kaplama faktörüdür [7].

2.2. İçsel modifikasyonlar ve lif, iplik ve kumaş sensör özelliklerinin tasarımı

Lifler ve iplikler, farklı mekanik ve kimyasal uyarılara duyarlı materyallerden yapılabilmektedir. Lifler ve iplikler, kumaş malzemelerinin dışında algılama elemanları oluşturma noktasına gelinceye kadar, sensörlü lif ve ipliklerle yer değiştirdiği için, entegrasyon daha fazla sağlanmaktadır. Pasif ve aktif devre elemanlarının, iletken iplikler [8] ve diğer yumuşak materyallerden [9] yapılabildiği önceki çalışmalarda bildirilmiştir. Bu yöntemler iletken malzemelerin nakış ve film baskı işlemlerini içermektedir. Liflerin kendisi geleneksel ve geleneksel olmayan yöntemlerle duyarlı materyallerden yapılabilmektedir. Elektro çekim, yaş çekim, kendiliğinden meydana gelme, taraklama, tarama ve eriyik çekim, duyarlı materyallerden lif yapmak için kullanılan bazı yöntemlerdendir. Bununla birlikte istenilen fonksiyonelliğe bağlı olarak, sensör elemanı kumaşa uygun bir şekilde dahil etmek için kıvrım, örtme derecesi, yoğunluk, eğilme rijitliği ve kalınlık gibi kumaş yapısal parametrelerinin de göz önüne alınması gerekmektedir. Bu üretim seçenekleri spesifik bir uygulamaya ihtiyaç duyulduğunda isteğe göre özelleştirilebilmektedir.

Sayısal veya analitik çalışmalar kullanılarak kumaş parametrelerinin güvenilir tahmini, belirli özellikte lifler olduğunda ve bu lifler kumaşlarla birleştirilebilir olduğunda akıllı kumaşların yapısı için kullanışlı bir araçtır. Bu tahmin; filament ve kesikli iplikler kullanılarak üretilen tekstil yapılarının (dokuma, örme, dokusuz yüzey, tufting vb) iç geometrilerini içeren kumaş modelleri kullanılarak yapılabilmektedir. Literatürde bulunan modellerin çoğu, lif veya iplik düzeyinde gerçekleştirilen çalışmalarını tanımlar. Ancak ideal bir model, farklı kumaş yapısal düzeyleri hakkında bilgi gerektirir. Örneğin bir kumaş geçirgenliği modeli, mikrogözenekliliği (lif aralığı), makro gözenekliliği (iplik aralığı) ve katlı kumaş olduğu durumda kompozit düzeyindeki gözenekliliği içermesi gerekecektir. Yaygın olarak uygulanabilir çok seviyeli modeller henüz tam olarak geliştirilmiş değildir [3].

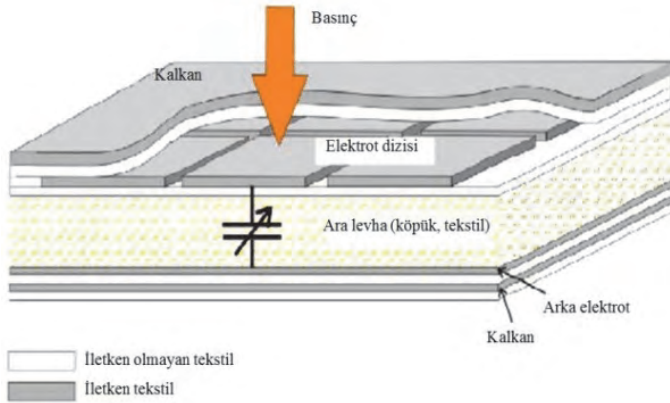
3. AKILLI KUMAŞ SENSÖRLERİ

Kumaş ve giysilere elektroniklerin entegrasyonu, sıradan tekstil ürünlerine önemli fonksiyonel özellik ve katma değer kazandırma noktasında önemli bir kapı aralamıştır. Bu tür yeni

malzemeler; iletişim, sağlık, koruma ve giyilebilir teknoloji alanlarında ticari ürünlere dönüşüm sürecine girmiştir. Elektronik tekstil ürünlerinde önemli sistem ve yapı bileşenlerinden biri de akıllı kumaş sensörleridir. Bu bölümde giyilebilir elektronik tekstillerde kullanılan sensör türlerinden bahsedilmiştir.

3.1. Basınç sensörleri

Basınç sensörleri medikal gözlem için yataklara dahil edilmiştir [10] ve spor giyim, iç giyim ve sokak modasında kullanılan tekstil klavyeleri ve dokunmatik pedler geliştirmek gibi çeşitli ticari uygulamalarına da rastlanmıştır [11]. Çeşitli basınç sensörleri, iki iletken tekstil elektrot tabakası arasına yerleştirilen bir ara malzeme kullanılarak geliştirilmiştir (Şekil 3) [12]. Elektrotlar, iletken iplikler veya malzemelerin tekstillere nakış veya kaplanması ile elde edilmektedir. Basınca duyarlı diğer ara malzeme alternatifleri elektroaktif polimerlerdir [13,14].



Şekil 3. Her iki tarafında iki koruyucu katman ve bir dizi tekstil kapasitörüne sahip sensör şeması [12]

3.1.1. Kapasitif Basınç Sensörleri

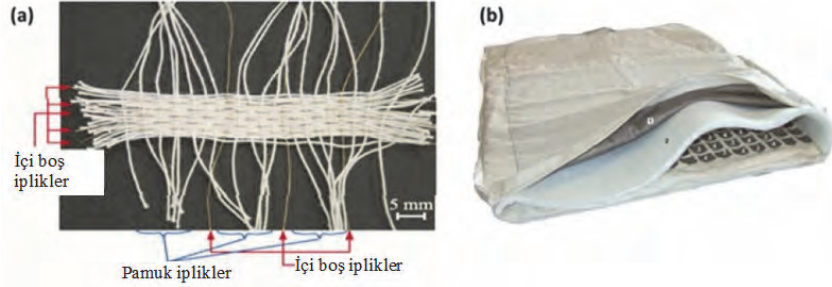
Kapasitif kumaş sensörleri genellikle basınç ve dokunsal algılama uygulamaları için tasarlanmaktadır. Birçok farklı tasarımlar ve materyaller, kumaşlara uygulamak için test edilmekte ve prototipi yapılmaktadır. Bunlar, adapte olmuş elektroniklerden içsel modifiye edilmiş materyallere kadar uzanmaktadır, ama hepsinde iki elektrotu ayıran bir yalıtkan (dielektrik) eleman ortak olarak bulunmaktadır. Adapte olmuş elektroniklerde, e-tekstiller özelleştirilmiş metotlar kullanarak entegre edilen geleneksel kapasitörleri kullanılmaktadır. Genellikle adapte olmuş bir kapasitör, kumaş yüzeyine dikilebilen, yapılandırılabilen ve diğer elektroniklere veya tellere lehimlenebilen bir çerçeveye monte edilmektedir. Kumaş kapasitörleri, çeşitli yalıtkanlar ve ara levhalar tarafından ayrılan elektrot plakaları gibi davranan uygun iletken materyallerden yapılabilmektedir. Sensör özelliği gösteren yapılar iletken iplik/kumaş olması durumunda dokunabilmekte [15], dikilebilmekte [16,17] ve nakış yapılabilmektedir veya iletken mürekkepler [18], polimerler ve boyalar [19] olması durumunda boyanabilmekte, baskılanabilmekte, püskürtülebilmekte ve filmlenebilmektedir. Kullanılan yalıtkanlar; sentetik köpükler, kumaş boşlukları ve/veya yumuşak polimerler olabilmektedir. Kumaş sensör kapasitörleri tek bir eleman olarak kullanılabilir ancak dağıtılmış ölçümler elde etmek için diziler halinde de yerleştirilebilmektedir. Her durumda bunlar genellikle klasik kapasitör yapımına uymaktadır. Diziliş kapasitansı, DAQ sistemlerine bağlanan çoklayıcı ve mikrodenetleyici elektrotlarının kesişen satır ve sütunlarında ölçülmektedir [20, 21]. Diğer farklı kapasitif algılama mekanizmaları; anahtarlar, dokunsal temas ve insan vücudunun direncini kullananları kapsamaktadır [22]. Tablo 1, farklı malzemelerden üretilen kapasitif sensörlerin uygulama alanlarını ve basınç değeri hassasiyetini göstermektedir.

Tablo 1. Basınç algılayan kumaş kapasitörleri [3]

Tür	Elemanlar	Ölçülen değişken	Basınç aralığı	Boyut
e-nakış	c-iletken iplik d-giysi	Elektriksel bağlantı	Dokunma algılama	mm-cm aralığı
Desenli elektrotlar	c-iletken mürekkep d-sentetik köpük	Kalınlığı sıkıştırma	Mak. 13.6 kPa	Çekirdek alanı: 32 mm ² , 64x64 piksel
Nakışlı elektrotlar/ kaplanmış kumaş	c-gümüş kaplı dokuma, iletken iplik d-tekstil ara levhası	Kalınlığı sıkıştırma, k=6 mm	0-12 N cm ⁻¹	Çekirdek alanı: 35.1 cm x 40.5 cm Piksel=2x2 cm
Yüzey dokunmatığı	c-PEDOT d-Naylon	Film ve parmak arası kapasitans bağlantısı	0-2 pF	Çekirdek: 470 µm çap Alan=5 cm
Lamine elektrotlar	c-metal biriktirilmiş ince film, d-parilen yüzey-silikon kauçuk	Kesişme noktası kapasitans değişimi	0-50 mN	Çap=250 µm Kalınlık=40 µm
3D tekstil kapasitörü	c-iletken kumaş d-3D tekstil	Kalınlığı sıkıştırma k _{min} =5.5 mm	0-0.75 N cm ⁻²	Sensör alanı=3x3 cm ²
CrosLite™ kapasitör	c-gümüş kaplı tekstil d-PCCR (tescilli kapalı hücre reçine)	Kalınlığı sıkıştırma k=5 mm	0-30 N cm ⁻²	10 mm x 10 mm

*c, iletken eleman; d, yalıtkan eleman.

Kapasitif kumaş sensörleri, mikroparçalardan büyük algılama alanlarına kadar birçok skalada yapılabilmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Kapasitif esaslı basınç sensörleri. (a) Geleneksel pamuk ipliği ile dokunmuş basınca duyarlı içi boş iplikler [20]. (b) Klasik yapılı nakışlı elektrotlar [21].

Sergio ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada kapasitif algılama yoluyla geniş bir kumaş parçası üzerinde uygulanan basınç bilgilerinin çözülmesi üzerine bir yaklaşım sunmuşlardır. Önerilen sensör, dirençleri tekstil yüzeyine uygulanan basınca bağlı olan yayılmış bir dizi kapasitör ve sonraki direnç değişimlerini elde eden elektronik bir sistem içermektedir. Kapasitörler farklı yollarla uygulanabilmektedir ancak bu çalışmada elastik sentetik köpüğün zıt iki yanında yerleştirilmiş iletken liflerin sıraları ve sütunları arasında uygulanmıştır [23].

Meyer ve arkadaşları, insan vücudu üzerindeki basıncı ölçmek için giysiye entegre edilerek tasarlanmış kapasitif bir basınç sensörü üzerine çalışmışlardır (Şekil 5). Uygulama alanları, rehabilitasyon, basınç-yara önleme veya kas hareketi nedeniyle hareket algılama gibi, yüksek bölgesel çözünme ile yumuşak ve bükülebilir sensör gerektiren bütün alanları kapsamaktadır. 2x2 cm uzaysal çözünürlük ve 0-10 N/cm² arasında değişen ölçüm aralığıyla ortalama %4' den az hata ile birkaç kumaş basınç sensörü geliştirmişlerdir. Kolun üzerine uygulanan basınç sensörü, kas hareketinden dolayı 0 ila 135 derece arasındaki koldaki sapmayı belirlemektedir [12].

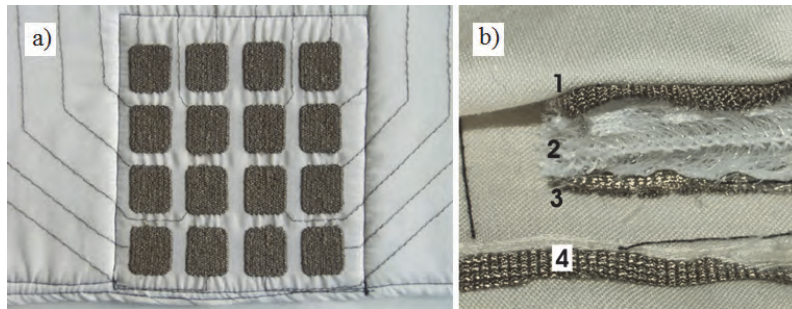
3.1.2. Rezistif basınç sensörleri

Basınç ve elektriksel direnç arasında bağlantı kurmak, kumaş basınç sensörleri yapmanın bir diğer yoludur. Bu tür sensörler; lif, iplik veya kumaş formunda üretilebilmektedir. Nakışlı iletken ipliklerin kesişme noktasına uygulanan basınç, kesişen ipliklerin

temas direncinde bir değişim meydana getirir. Kumaşa uygulanan basıncın konumu, direnç değişiminin gerçekleştiği konum tespit edilerek tanımlanabilmektedir [24]. İletken elastik iplikler dokunulduğunda benzer bir algılama ilkesi bulunur; böylece uygulanan basınç altında aralarındaki temas direnci artar [25]. İletken iplik kombinasyonları ve iletken kumaş katmanları, basınç algılama birimleri oluşturmada da kullanılmaktadır. Bunun bir örneği, farklı elektrik butonları olarak davranan, bölgeleri algılama sistemi oluşturan bir ağ tarafından ayrılmış tabakalarla Cu-Ni elektrokaplı poliester iletken kumaşlardır [26]. Basınç uygulandığında ağırlıklı tarafında bulunan tabakalar bir temas durumu oluşturarak birbirine dokunmaktadır. Aktifleştirilen bölgelerin sayısı, uygulanan basıncın seviyesini verecektir. Basıncıdaki değişiklikler ayrıca, elektrik akımı [27] ve empedans tomografisi ile de [28] tespit edilmektedir. Literatürde bulunan bazı rezistif basınç algılama mekanizmaları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Elastik olarak gecikmelerine rağmen köpükler, iletken polimerler kullanılarak yüzey kaplama uygulanmasıyla basınca duyarlı yapılabilmektedir; basınç uygulanması ile temas noktalarındaki hacimsel artışa bağlı olarak iletkenlikte değişiklik meydana getirmektedir [29].

Rezistif basınç sensörü geliştirmek için kullanılan diğer mekanizmalar Şekil 6'da gösterilmektedir. Basınç algılama için ticari olarak kullanılan kapasitif ve rezistif cihazlar, sağlık sektöründe olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [21].

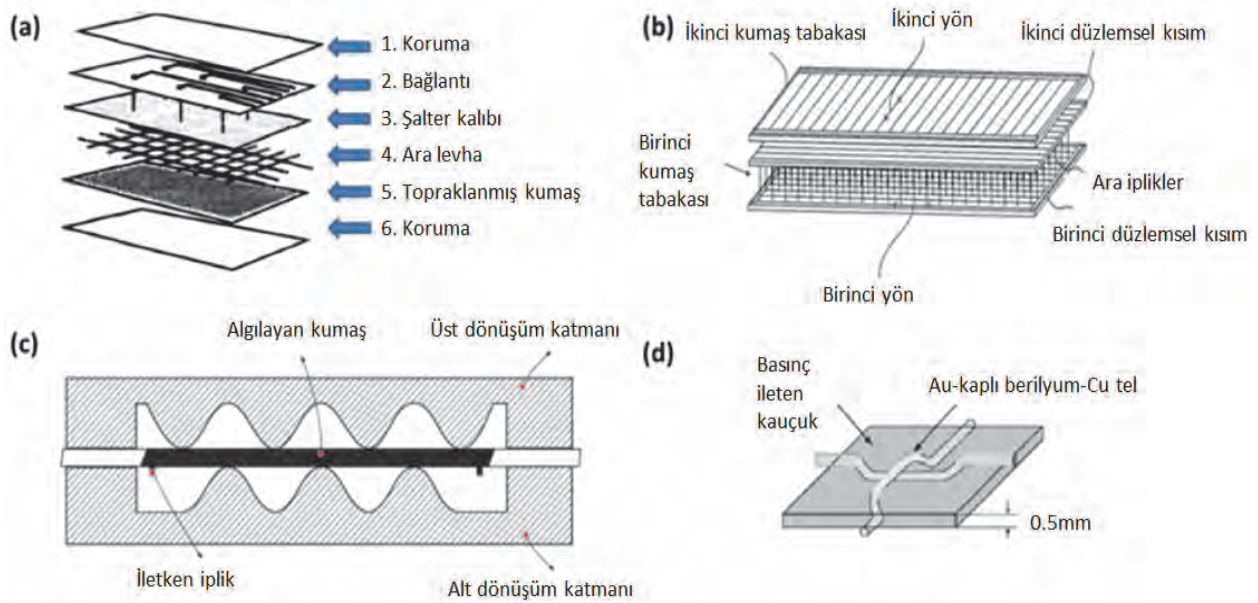


Şekil 5. a) İletken ipliklerle işlenmiş 16 algılama elemanlı kumaş basınç sensörü b) Kapasitif kumaş sensörü tasarımı, 1, 3: Üst ve alt elektrot, 2: İki kat sıkıştırılabilir ara parça, 4: Koruma [12]

Tablo 2. Rezistif kumaş basınç sensörleri [3]

Tür	Elemanlar	Basınç aralığı	Boyut	Özellik
Dokunsal sensör butonu	-Cu, Ni kaplama kumaş -Poliester ağ taban e192	70–500 g mm ⁻²	Algılama hücresi: 2.3 mm x 4.35 mm	Algılama mekanizması aktifleştirilen algılama hücre sayısına bağlıdır
Dişli yapı	-İletken kumaş -Yumuşak elastomer taban	0–2000 kPa	10x16x4.8 mm ³	Dişli, uygulanan basınç altında kumaşta bir gerilim üretir
Poliüretan köpük	-PPy -Poliüretan	1000–7000 N m ⁻²	1.7 cmx1.7 cmx1.3 cm	İletkenlik basma gerilmesiyle birlikte artar
İletken köpük esaslı	Berilyum Au-kaplı bakır tel ile birlikte karbon polimer	0–0.2 MPa	3 mmx3 mm	Direnç uygulanan yükte birlikte değişir
QTC*—Ni esaslı	Basınca duyarlı kompozit	%25 basınç	Çap=5.5 mm Kalınlık=2 mm	Butonlama (elektrik verme) davranışı

*QTC: Kuantum tünelleme kompozitleri

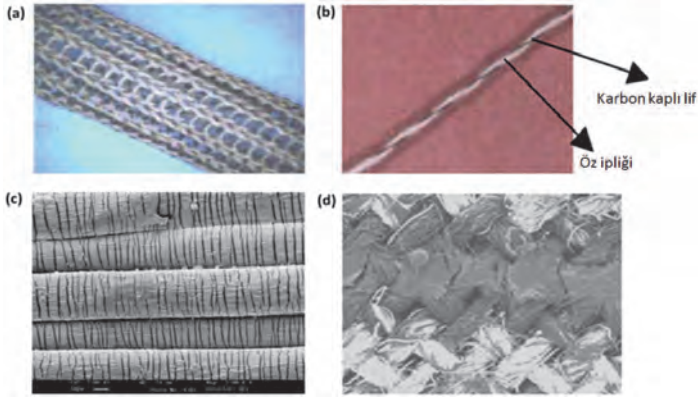
**Şekil 6.** Basınca duyarlı kumaş sensörleri (a) Rezistif butonlara dayanan dokunsal basınç sensörü [26] (b) Elektex'in kumaş sensör teknolojisindeki elektrik akımına dayanan basınç sensörü [27] (c) Diş yapısında rezistif kumaş basınç sensörü [30] (d) Au-kaplı berilyum-bakır elektrotlara sahip basınca duyarlı kauçuk [31]

3.2. Gerilim sensörleri

Tekstil yüzeyleri, farklı seviyelerde çeşitli yöntemlerle mekanik gerilmelere duyarlı yapılabilmekte; gerilime duyarlı materyallerden yapıldıklarında, gerilmeye hassas olabilmekte ve duyarlı olmayan liflerle duyarlı olan lifleri karıştırarak iplikler modifiye edilebilmektedir. Kumaşlar, uygun malzemelerle kaplanarak gerilmeye karşı duyarlı hale getirilebilmektedir. Elektronik ölçümler, kapasitif ölçümler kadar karışık değildir; bu nedenle prototip uygulaması, diğer kumaş algılama teknolojilerine kıyasla nispeten basittir [3]. Şekil 7'de çeşitli kumaş gerilim sensörlerine örnekler gösterilmiştir.

Paslanmaz çelik metal lifler, Şekil 7a'da gösterildiği gibi bir piezorezistif kumaş üretmek için örülebilmektedir. Çubuk

yönünde gerildiği zaman, örülmüş sensörün direnci başlangıçta artar ve sonra azalır. Dirençteki ilk artış, mevcut uzunluğun artmasına bağlıdır. Bununla birlikte direnç azaldığında, iplikler arasındaki boşluklar azalır ve paralel iletkenlik yolları ekleyerek ağ direncini düşüren daha iyi temas sağlanır. Bu algılama prensibi iletken ipliklere [36], metal liflere [37] ve karbon liflere [32] de uygulanabilmektedir. İplik esnekliğini artırmak için spandeks öz kullanılabilir. Gerilme algılaması sağlayan diğer mekanizmalar, iletken olmayan örgülere gerilim duyarlı ipliklerin entegrasyonunu gerektirir. Bu tür uygulama, karbon örme bir piezorezistif sensör [38] ve örme poliakrilonitril esaslı bir sensör olması durumunda geçerlidir. Benzer şekilde iplikler, elastik bir öz etrafında piezorezistif lifler sarılarak duyarlı elemanlar haline gelebilmektedir. Doğrusallık, sensörün doğruluk hassasiyetini artırmaktadır [33].



Şekil 7. Kumaş gerilim sensörleri (a) Paslanmaz çelik örme kumaş sensör [32] (b) Elastik lifler ve poliester liflerle birlikte karbon kaplı lifin atkı yönünde kullanılmasıyla oluşan iplik sensörü [33] (c) %6 gerilimde polipirrol kaplı Lycra liflerinin SEM görüntüsü [34] (d) Dokuma pamuk kumaş üzerinde PEDOT baskılı sensör [35]

3.2.1. Algılama özelliği sağlayan piezo kaplamalar

Kumaşlar, elastik özelliklerinden dolayı genellikle polimer formunda olan piezorezistif [39], piezoelektrik [40] veya piezokapasitif [41] kaplama materyalleri uygulanarak akıllı kumaşlara dönüştürülebilmektedir. Boyalar da kullanılabilen ancak esnekliği ve uyumluluğu sınırlıdır. Kaplamalar genelde uzama, basınç ve diğer mekaniksel uyarıların değişmesi için ya iletken dolgularla dışarıdan modifiye edilmekte ya da içeriden duyarlı hale getirilmektedir. Duyarlı kaplamalar genellikle, gerilim algılaması kazandırmak için lifler, iplikler ve kumaşlar gibi esneyebilir yüzeylere uygulanmaktadır. Kaplanmış sensörün elastik toparlanması kumaş yapısının esnekliğine, içerdiği liflere ve elastan liflerin içeriğine bağlı olacaktır [3].

Kaplanmış sensörün özellikleri; iç mekanikler (doğal mekanizmalar) ve ipliğin veya kumaş yüzeyinin geometrisi; kalınlık, yoğunluk, kırılma, elastikiyet, kaplamanın bileşimi ve yöntemi vb. faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Sensör özellikleri ayrıca, kaplama malzemesinin yüzeye bağlanma mekanizmasına ve yanıl kuvvetlerin lif temasını artırarak ipliklerin birlikte hareket etmelerine sebep olup olmayacağına bağlı olmaktadır. Piezorezistif kaplamalar olması durumunda, elektrik direncindeki bir değişiklik, yüzeye baskı kuvveti uygulamasının bir sonucu olarak ortaya çıkacaktır. Bu değişim belirli bir gerilim sensörünün hassasiyetinin ölçümü olan kriter faktörüyle hesaplanabilmektedir [34].

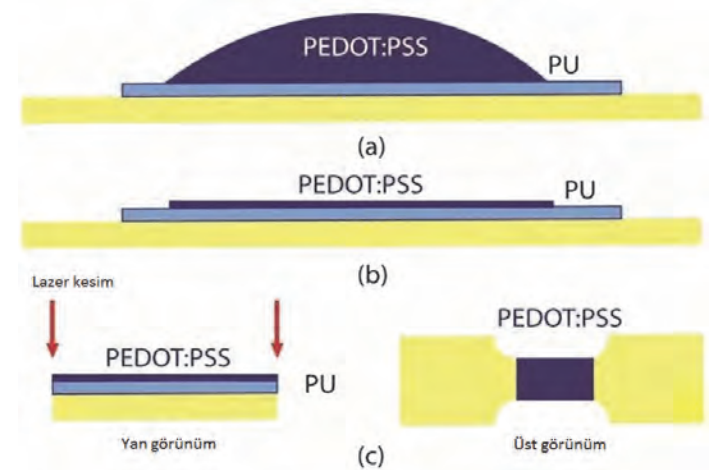
3.2.1.1. İntrinsik iletken kaplamalar

Polipirrol (PPy); yüksek iletkenliği, iyi çevresel kararlılığı, sentezinin kolaylığı ve toksik olmamasından dolayı kumaşlara uygulanan en önemli iletken polimerlerden biridir. Bu polimer mikroelektronik uygulamalarda yaygın olarak çalışılmaktadır [42]. Kumaşlara PPy uygulanmasında, farklı kaplama metotları ve yüzeyleri uygun olmaktadır. Bunların kriter faktörü ve maksimum gerilim gibi nihai sensör özellikleri üzerine etkisi bulunmaktadır. PPy, kimyasal ve elektrokimyasal polimerizasyon yöntemi ile üretilmektedir [43, 44]. PPy, %43 gerginliğe kadar doğrusal bir tepkiye sahip +2 kriter faktörüyle polikaprolaktam iplikler üzerine kaplanabilmektedir. Diğer taraftan kaplanmış elastan iplikler gerginliğe karşı doğrusal bir tepki vermemekte [45], ancak büyük deformasyon uygulamaları için onları çekici kılan, %600 civarında çok daha büyük bir gerginliğe sahip olmalarıdır.

Örme kumaşlar gibi yapılandırılmış kumaş yüzeyleri kullanılarak da iyi bir tepki elde edilmektedir. Çözelti polimerizasyonu kullanarak, ortaya çıkan kriter faktörü, naylon/likra [46, 47] ve PET/spandeks örme yüzeylerde [44] 2'ye yaklaşmaktadır. Tactel/likra örme kumaşlar üzerine kimyasal buhar biriktirme ile ince PPy kaplamanın, duyarlılığı artırdığı için etkili olduğu gösterilmiştir [48]. Polimerizasyon derecesinin de kaplanmış sensörün toplam direnç değeri üzerine etkisi vardır [44].

Politiyofen; yalnızca elektriksel iletkenlikleriyle değil, aynı zamanda elektroparlak ve optik özellikleri yanında işlenebilirlik ve çevresel stabilitelerinden dolayı sensör uygulamalarında kullanılan önemli bir iletken polimer sınıfını temsil etmektedir [49]. Suda çözünmemesi, spin kaplama yönteminin uygulanmasını zorlaştırır. Bununla birlikte, poli(4-sülfonat) ile poli(3,4-etilendioksitiyofen) veya poli(3,4-etilendioksitiyofen)-poli(stiren sülfonat) (PEDOT:PSS), yüksek çözünürlük gerektiren kaplama metotları için istenilen viskozite özelliklerine sahiptir. PEDOT:PSS, organik ince film transistörlerde elektrot malzemesi olarak veya organik ışık yayan diyotlarda delik transfer tabakası olarak geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bu polimerlerin lifler, kumaşlar ve poliüretan köpükler gibi diğer esneyebilir yüzeylerin [50] yanında mikroelektronik yüzeylere ve MEMS (mikroelektromekanik sistemler) ince filmlere (Şekil 8) [51] de kaplanabildiği literatürde bildirilmiştir.

Şekil 8. a) PEDOT:PSS solüsyonu, aralarında PU yapışma tabakası ile köpük şerit üzerine dökülür b) 24 saat sonra PEDOT:PSS köpük üzerinde kurutulur c) Kurutulmuş PEDOT:PSS daha sonra lazer kesim ile işlem görür ve numune standart kemik şeklini alır [51]



Şekil 8. a) PEDOT:PSS solüsyonu, aralarında PU yapışma tabakası ile köpük şerit üzerine dökülür b) 24 saat sonra PEDOT:PSS köpük üzerinde kurutulur c) Kurutulmuş PEDOT:PSS daha sonra lazer kesim ile işlem görür ve numune standart kemik şeklini alır [51]

PEDOT ayrıca nanotüpler [52], nanoteller [53], nanolifler [54] ve nanoçubuklar [55] gibi formlarında da üretilmektedir.

PEDOT esaslı piezorezistif sensörler, mikroelektronik gerilim ölçerlerden [56] biyomekanik ölçüm cihazlarına [57] kadar çeşitli uygulamalar için gerilim sensörü olarak kullanılabilir. PEDOT:PSS; düşük bant aralığı, üstün elektrokimyasal ve termal kararlılık ile mükemmel iletken özelliklere sahiptir. PPy sensörlerinin durumuna benzer şekilde, PEDOT kaplı sensörlerin iletkenliği, polimer üretimi ve kaplama metotlarıyla belirlenmektedir. PEDOT, sulu çözelti formunda olduğunda farklı yüzeyler üzerine spin kaplamanın [58] yanında dip kaplama [49] yapılabilir. Diğer uygulama metotları kimyasal buhar biriktirme, ink-jet (mürekkep püskürtmeli) baskıyı içermektedir [50].

Polianilin (PANi), elektriksel iletkenlik özelliği gösteren bir diğer iletken polimerdir. PANi kaplı kumaşların sensör, elektromanyetik kalkanlama ve değerli metallerin geri kazanımı gibi birçok uygulama alanına sahiptir. PANi, kumaş yüzeylerine kimyasal ve elektrokimyasal biriktirme ile sentezlenebilir [59] ve ıslak çekim, elektro çekim teknikleri ile üretilebilir [60]. Yüzeyin doğasının yanında uygulama tekniğinin, sensör özelliklerine bir etkisi bulunmaktadır. PANi; poliester, naylon, yün, akrilik, pamuk, silika ve cam üzerine kaplanabilir. Bütün bu yüzeylerin üzerindeki oksidatif polimerizasyon sonuçları, PANi kaplı yün ve poliester ipliklerin iletkenliğinin, $3 \Omega\text{cm}^{-2}$ civarında belli bir dirence sahip olan PANi kaplı pamuk, naylon ve akrilik ipliklerden daha az olduğunu göstermiştir [61]. Polietilen tereftalat (PET) eğrilmiş iplikler de PANi çözeltileriyle kaplanabilir ve bunlar $10^3\text{-}10^8 \Omega\text{cm}^{-2}$ arasında dirence sahip olmaktadır [62]. Eğrilmiş liflerin yüzdesine bağlı olarak, öz liflerin sayısı arttıkça daha az direnç olacaktır. Daha düşük direnç, çoğunlukla koloidal sıvı fazdan katı faza dönüştüren bir sistem olan sol-jel kaplı PET ipliklerden elde edilmiştir.

3.2.1.2. Ekstrinsik iletken kaplamalar

İntrinsik iletken polimer kaplamalar (%100 iletken polimerik kaplama) genellikle, iletken olmakla birlikte diğer polimer esaslı matrisler kadar esnek değildir [44]. Bu durum ekstrinsik iletken polimerlerin araştırılmasına neden olmuştur. Bu polimerik kaplamalar, iletken veya yarı iletken dolgular ve iletken olmayan yalıtkan matrislerin karışımlarından oluşmaktadır. Bu karışımların kaplamaları algılama özellikleri kazandırmak için kumaşlara uygulanabilir. Partiküller herhangi bir boyutta olabilmekte ve özellikle nanokompozitlerin iyi sensör özelliklerine sahip olduğu bilinmektedir. İletken polimerik kaplamalar, perkolasyon eşikine ulaşmak için yeterli katkılama (doplama) parçacıklarının eklenmesiyle, yani akımın geçmesini sağlamak için yeterli iletken temasın sağlanmasıyla elde edilebilir. İletim mekanizması, nanopartiküller ve nanotüpler gibi nanoelementler olması durumunda elektron tünelleme etkilerinden dolayı da meydana gelebilir [3].

Karbon katkılı polimerler, piezorezistif özelliklere sahiptir. Birçok yarı iletken materyal, iletken olmayan matrisleri katılamak ve piezorezistif kompozitler elde etmek için kullanılabilir. Grafite epoksi karışımları poliester yüzeylere kaplanabilir [64]. Polimerik matrisli karbon siyahı, ilginç elektriksel özelliklerinden dolayı çok fazla ilgi çekmektedir. Bu tür kompozitler, karbon siyahı dolgusunun miktarına bağlı olarak farklı bir piezorezistif davranışa sahiptir [3].

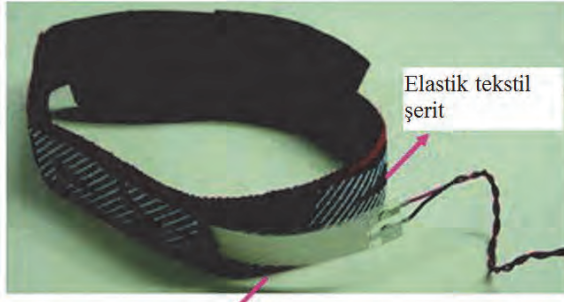
Karbon nanotüpler; ipliklere, kumaş yüzeylerine ve polimer yüzeylere kaplanabilmekte ve algılama özelliklerinden dolayı çok fazla ilgi çekmektedir. Gerginliğe maruz bırakıldığında, tek duvarlı karbon nanotüp kaplı iplikler, negatif bir piezorezistif etkiye sahip olabilmektedir. Yani uygulanan yük ile birlikte artan bir dirence sahip olmaktadır [65]. Bu durum lif bağlantılarının sayısındaki artıştan dolayıdır. Tek duvarlı karbon nanotüpler, PPy/SWCNT (tek duvarlı karbon nanotüp) kaplı örme kumaşlarda olduğu gibi yalnızca piezorezistif değil aynı zamanda kapasitif özelliklerle iletken kumaşlar yapmak için kalıplar formunda kullanılabilir [66].

SWCNT'ler, kumaş yüzeylerine bağlanabilen polidimetilsiloksan (PDMS) tabakalara baskılanarak gerilim sensörleri olarak kullanılabilir [67]. MWCNT'ler (çok duvarlı karbon nanotüp) de film formunda iken piezorezistif özelliklere sahip olabilmektedirler [68]. Karbon siyahı partiküllerde olduğu gibi, karbon nanotüplerin piezorezistif duyarlılığı, artan dolgu konsantrasyonu ile azalmaktadır [69]. İletken nanopartiküllerin kumaş katmanlarına elektrostatik olarak kendi kendine montajı, olası gerilimi algılayan özelliklere sahip iletken kumaşlar oluşturmak için başka bir olasılıktır. Burada lif yüzeyi; polimer kombinasyonları ve metaller, metal oksitler ya da yarı iletkenlerle kaynaştırılmaktadır [70]. Buna ek olarak karbon nanotüpler elektroaktif özelliklere sahiptir ve elektroaktif kumaşlar yapmada kullanılmaktadır [71].

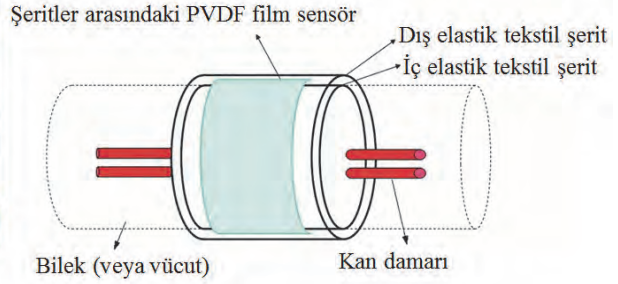
3.2.1.3. Piezoelektrik elementler ve kaplamalar

Piezoelektrik sensörler, basınç [72], gerilme kuvvetleri [40], sıkıştırma kuvvetleri [73] ve burulma gibi farklı fiziksel uyarılara karşılık bir basınç farkı oluşturacaktır. Bu sensörler, şekil algılama, ses tanıma ve ses çıkarma için de kullanılabilir [74]. Bu sensörler, direkt olarak eklenebilen, dokunabilen veya kumaşlara uygulanabilen ortak eksenli kablolar, filmler ve boyalar gibi farklı formlara girmektedir. Poliviniliden florür (PVDF) filmler, nabız takibi için silikon kauçuk ile kaplanabilmekte ve kumaş kollarına eklenebilir (Şekil 9) [40]. Piezoelektrik konsollar, pamuklu kumaş üzerinde PZT (kurşun zirkonat titanat) in film baskı tabakalarından üretilebilir [75]. Bu konsollar, ivme ölçerler (kuvvet sensörleri), enerji depolayıcılar ve rezonatörler olarak kullanılabilir. Piezoelektrik rezonans, dokunmatik sensör uygulamalarında kullanılabilir [76]. Yüksek elektrik alanlarında polimer çözeltisinden lif çekerek elde edilen PVDF nanolifleri, sadece piezoelektrik özellikler değil aynı zamanda ferroelektrik özellikler de sunmaktadır [77]. Ferroelektrik çipler, iletken matris içerisine yerleştirildiklerinde piezoelektrik hale gelebilirler, bu da basit yüzey pozisyon algılamasını mümkün kılar [78]. Hücresel polipropilen ferroelektrikler, dokunmatik sensörler olarak kullanılabilir [79].

Piezokapasitif kumaşlar, yalıtkan elastomeren yapılmış membranlar kullanılarak yapılabilir. Bu membranlar, her bir yüzeye bağlanan elektrotlarla birlikte klasik kapasitör konfigürasyonunda yerleştirilmektedir. Piezokapasitif etki, aktivatör'ün (membranlardan biri) iki elektrotu arasında yüksek voltaj farkı uygulandığında gözlemlenmektedir [41].



PVDF film
Elektrot alanı: 12 x 62 mm²
Film kalınlığı: 52 µm



Şekil 9. PVDF film sensörü gömülü fizyolojik algılama kemerinin fotoğrafı ve bir bilek (veya vücut) etrafında bağlanmış fizyolojik algılama kemerinin şematik gösterimi [40]

3.3. Optik kumaş sensörleri

Bir optik lif genel olarak, düşük kırılma indeksine sahip transparan bir materyal veya kaplama materyali sarılmış transparan bir özden oluşmaktadır. Optik liflerin doğasından gelen bazı avantajları; düşük yoğunluk, küçük boyut, esneklik, yapıya kolay gömülme ve elektromanyetik alandan etkilenmemedir [80]. Işığın iç yansımaları, lif boyunca ilerleyen ve dalga kılavuzu gibi davranan ışık dalgaları üretmektedir. Optik lif sensörleri (fiber optik sensör); bir ışık kaynağı, bir fotodetektör ve diğer elektronik ekipmanlardan oluşan bir sensör sistemine ihtiyaç duymaktadır. Yeterince küçük herhangi bir optik lif, dokuma [81], örme ve diğer bağlantı türleriyle [82] kumaş yüzeylerine adapte edilmektedir. Plastik ve polimerik optik lif sensörleri ve cihazları kumaşlara dahil edilmekte ve gerilme [80], sıcaklık [83], basınç [84], nem, organik ve inorganik bileşiklerin varlığı ve rüzgar hızını belirlemek için kullanılabilir. Fiber Bragg ızgara sensörleri de farklı fiziksel büyüklükleri ölçmek için kumaşlara gömülebilmektedir [83].

Algılama mekanizmaları genel olarak, lif enine kesit geometrisindeki değişiklikler [81], kaplama malzemesinin kırılma indeksi [82], spektral dalga boyu değişiklikleri [80], geçirgenlik ve diğer doğal materyal özelliklerinin neden olduğu, emilen ve yayılan ışık yoğunluğundaki değişiklikler ile ilişkilidir. Öz olarak kullanılan materyaller, poli(metilmetakrilat) [85], polikarbonat, polisterol, termoplastik silikon [81], polieter sülfon, polisülfon, polieterimid ve polistiren [86] içermektedir. Kumaş ekranlar, iletken iplikler kullanılarak LED bileşen dizilerinin dokunmasıyla mümkün olmaktadır. Kumaş dayanıklılığı için bu durumda tek şart iletken iplik bağlantılarının elektriksel olarak güvenilir olmasıdır.

Plastik optik lifler, kumaşlara entegre edilmiş ve oksimetre gözlemi için kıyafetlerde kullanılmıştır [87]. Ayrıca bu liflerden, deforme olduklarında ışık yoğunluğundaki değişimleri ölçerek çalışan basınç sensörleri geliştirilmiştir [81]. Kimyasal sensörler söz konusu olduğunda, optik lifler genellikle belirli reaktifle

reaksiyona giren ve lif içindeki ışık iletimini değiştiren, özel olarak tasarlanmış kaplama tabakasıyla kaplanmaktadır. Fiber optik sensörler, kimyasal ve biyolojik savaş tehditlerini, normalin üstündeki çevre sıcaklıklarını ve savaş alanındaki diğer tehlikeleri tespit etmek için asker üniformalarına entegre edilmiştir [82]. Georgia Tech Giyilebilir Anakart, kırılmış ışık yolları vasıtasıyla kumaşa olan hasarı tespit etmek için optik lifler kullanmıştır. Bu konsept, Sensatex tarafından, kıyafeti giyenin sıcaklığını ve nabzını ölçmek için kumaşta dokunmuş optik lifleri kullanan "LifeShirt"ün geliştirilmesi için ticarileştirilmiştir [88]. Ayrıca günümüzde sensörler spor alanında da önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin teniste topun hızını ölçen teknolojinin yanı sıra raketlere yerleştirilen alıcılar ve akıllı elbiselerle atletlerin performansları ölçülebilmektedir. Ancak bugüne kadar elektronik sensörler yerleştirilerek üretilen akıllı spor kıyafetleri oyuncunun rahat hareketini engelliyordu ve neme karşı da dayanıksızdı. İngiltere Cambridge'ten araştırmacılar elbisenin kendi kumaşının aktif alıcı olduğu bir ürünü geliştirmiştir. Burada fiber optik elbisenin içine entegre edilmiştir. Araştırmacılara göre Xelflex adı verilen bu akıllı kumaştan üretilen spor kıyafeti rahatlıkla giyilebilir, hatta yıkanabilir ve sporcuya performansıyla ilgili birçok bilgi sağlayabilmektedir [89].



Şekil 10. Optik lif entegre edilmiş sporcunun performansını ölçen akıllı giysi [89]

3.4. Kimyasal madde ve gaz tespiti için kumaş sensörleri

Zehirli gazlar ve kimyasalları algılama, işyerinde ve bilinmeyen ortamlarda bir güvenlik önlemi olarak önem taşımaktadır. Kimyasal algılama özelliklerine sahip kumaş sensörleri, algılama özellikleri olan e-tekstiller veya iletken polimerik kaplanmış tekstil yüzeyi olabilmektedir. E-tekstiller olması durumunda, küçültülmüş kimyasal veya gaz sensörleri, dikilerek kumaş yüzeyine bağlanabilmektedir. İkinci durumda, kimyasala duyarlı polimerler kumaş üzerine kaplanarak kullanılmaktadır. Kemo-rezistörler, elektrik dirençleri kimyasal çevreye duyarlı olan sensörlerdir. H_2 ve CO , metalik içeriklerle katılanmış iletken polimerler kullanılarak tespit edilebilmektedir. Bakır ve paladyum kalıntılarıyla [90] katılanmış PPy, bu gazlara maruz kaldığında dirençte değişiklik göstermektedir. Zehirli gaz sensörleri [43], PET veya naylon iplikler üzerine PPy [91] veya PANi ince filmler biriktirilerek üretilebilmektedir, sonra bu iplikler kumaş içerisine dokunmaktadır. Film belirli ppm'de amonyak (NH_3) ve azot dioksit (NO_2) maruz kaldığında dirençte bir değişim gözlenmektedir. PEDOT nanotüpler, amonyak tespiti için elektro çekim yöntemine göre buhar biriktirme polimerizasyonu ile üretilebilmektedir [52]. PEDOT nanotel dizileri nitrikoksitin (NO) konsantrasyon seviyelerini izlemek için kullanılabilir [53]. Etanol ve ozon tespit etme, elektrokimyasal kaplanmış PPy filament sensörleri kullanılarak elde edilmektedir [92]. PANi esaslı optik lif HCl ve NH_4OH 'e maruz kaldığında ışık emilimi değişmektedir.

Karbon nanotüpler, kanın ana proteini olan albumin dahil olmak üzere birçok maddeye karşı duyarlılığa sahiptir [93, 94]. Tek duvarlı karbon nanotüp iplik kompozitler, amonyum hidroksit, etanol, piridin ve trietilamin gibi amin açığa çıkaran bileşikler

ayırt edebilmektedir [95]. Polimerlerle gaz sensör için diğer mekanizmalar; optik cihazlar, piezoelektrik kristaller ve amperometrik metotları içermektedir. Lif ve tekstil şeklinde kimyasal sensörler ve özellikleri Tablo 3'te verilmiştir [96].

BIOTEX; insan terindeki pH ve elektrolit konsantrasyonunu tespit etmek için bir dizi kumaş sensörü geliştirmiştir (Şekil 11). pH sensörleri, obezite ve şeker hastalarını izlemek için kullanılmaktadır [111].



Şekil 11. BIOTEX pH sensörü [111]

Gaz sensör özelliklerine sahip kumaşların üretiminde kullanılan son yöntemler, tekstil ürününün gaza duyarlı bir tabaka ile kaplanmasını, gaza duyarlı nanoliflerin bir kumaşa dahil edilmesi ve ticari gaz sensörlerinin standart giyim ürünleriyle birleştirilmesini içermektedir [1]. Zürih Federal Teknoloji Enstitüsü, iklimlendirme sistemleri için basit kumaş gaz sensörleri geliştirme projesi olan TWIGS'e liderlik etmiştir [112].

Tablo 3. İletken kompozit tekstil yüzeylerinde kimyasal madde ve gaz sensör çalışma özeti [96]

Tür	Materyal*	Algılanan gaz	Algılama limiti	Ref.
Seramik	TiO_2 /gözenekli karbon lifleri	NO	5 ppm	[97]
	V_2O_5	NH_3	0.85 ppm	[98]
CNT	SWCNT/pamuk iplik/PEI	NH_3		[99]
	F-SWCNT/(PVC, kümen-PSMA, PSE and PVP)	Vücut kokuları	50 ppm	[100]
	CNT/naylon-6	Çeşitli polar ve apolar gazlar		[101]
	CNT/ SnO_2	CO	47 ppm	[102]
Polimer	polipirol/PET; polianilin/PET	DMMP, NH_3 , NO_2	21 ppm	[43]
	polianilin/optik lif	NH_3	50 ppm	[103]
	poli(vinil butiral)	aseton	50 ppm	[104]
	polipirol/PET	NH_3 ve HCl		[105]
	poli(difenilamin) /PMMA	NH_3	1 ppm	[106]
	PEDOT/poli(vinil alkol)	NH_3	5 ppm	[52]
	polianilin/poli(e-kaprolaktam)	NH_3 , NO_2	2.5 ppm	[107]
	polipirol/poli(vinil sülfonik asit sodyum tuzu)	etanol, ozon	0.01 ppm	[92]
	PMMA/polianilin	$(C_2H_5)_3N$	20 ppm	[108]
	poli(vinil alkol)/polianilin	aminler	100 ppm	[109]
polianilin/naylon 6	NH_3 , CO , C_3H_8	1000 ppm	[110]	

*PEI: poli (etilen imin), F-SWCNT: fonksiyonelleştirilmiş tek duvarlı karbon nanotüp, PVC: poli(vinil klorür), kümen-PSMA: kümen poli(stiren-ko-maleik anhidrit), PSE: poli(stiren-ko-maleik asit) kısmen izobutil/metil karışık ester, PVP: poli(vinil pirrolidon), PMMA: poli(metil metakrilat), PVS: poli (vinilsülfonik asit metil ester), DMMP: dimetilmetilfosfonat

3.5. Nem ve sıcaklığa duyarlı sensör kumaşlar

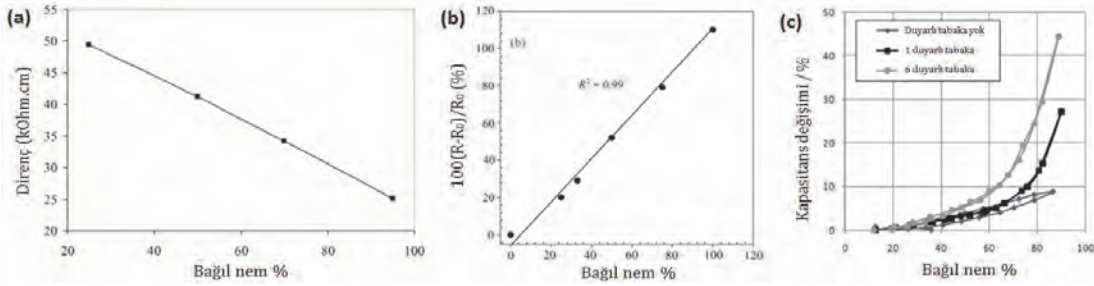
Polimerik esaslı nem sensörleri, rezistif ve kapasitif olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. İlki iletkenliğini değiştirerek nem değişimine tepki verirken, ikincisi dielektrik sabitini değiştirerek su buharına tepki vermektedir [113]. İletken polimerik esaslı nem sensörleri; PEDOT-PSS/PAN nanolifler [114], PEDOT-PSS/poliimid, PEDOT-PSS/likra tactel [49] ve PPy [115], elektriksel iletkenliklerini değiştirerek nem değişikliklerine tepki vermektedir. Nem sensör özelliği gösteren bu yüzeyler daha sonra kumaş yapısına dahil olabilmektedir [116]. Kapasitif nem sensörleri için uygun polimerler, polietersulfon (PES), polisülfon (PSF) ve divinil siloksan benzosiklobüten (BCB) dir. Diğer nem algılama araçları esnek transistörleri [117] içermektedir ve sandviç kumaşlarda yalıtıncılığı değiştirmektedir [118]. Kumaşlar üzerine kaplanmış sensörler, organik veya karbon esaslı olursa neme karşı reaksiyon göstermektedir. Literatürde bulunan nem sensör örnekleri Şekil 12'de gösterilmiştir.

Kumaşlarla uyumlu sıcaklık sensörleri, plastikler ve poliimid levhalar gibi esnek yüzeyler üzerinde üretilebilmekte ve daha

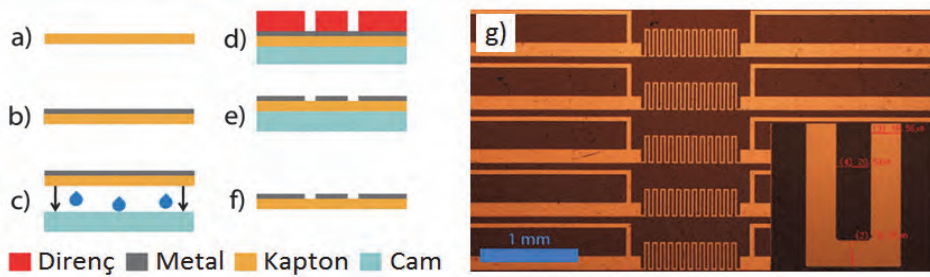
sonra kumaşlara dahil edilebilmektedir. Rezistif sıcaklık dedektörleri, platin, nikkrom (NiCr) ve esnek yüzeylere kaplanabilen malzemeler gibi elementlere sahiptir.

Kapton esaslı platin rezistif sıcaklık dedektörlerden yapılmış plastik şeritler, sıcaklığa duyarlı bir kumaş üretmek için kumaşlara dokunabilmektedir (Şekil 13) [120]. Altın bir rezistif sıcaklık dedektörü, esnek poliimid bir yüzey üzerinde üretilmiştir [116] ve direnci sıcaklıkla doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu sensör kumaş formunda da dokunabilmektedir [121]. İletken polimerler ve karbon esaslı iletken parçacıklı polimerler, sıcaklığa bağlı tepki vermektedir. Örneğin, PEDOT-PSS kaplı lifler, daha yüksek bir sıcaklığa maruz bırakıldığında yüzey direncinde azalma gözlemlenmiştir [49]. Kumaşlara uygulanabilen sıcaklığa duyarlı mürekkepler ve boyaların yanı sıra, fiber optik sensörler de bu görev [83] için kullanılabilir.

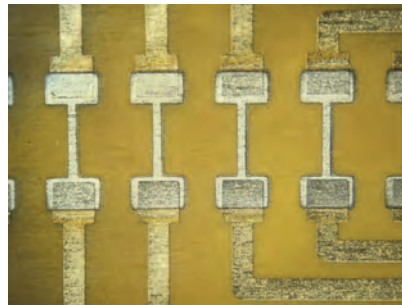
Şekil 14'te sualtı uygulamaları için geliştirilen esnek sıcaklık sensör dizileri gösterilmiştir.



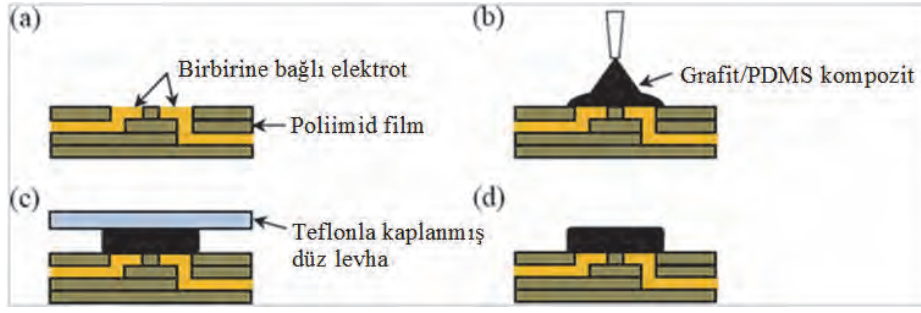
Şekil 12. Kumaş nem sensörleri. (a) PEDOT-PSS kaplı liflerin bağıl neme karşı direnci [49] (b) Ağırlıkça %9 PAN çözeltisi kullanılarak hazırlanan PEDOT-PSS/PAN sensörünün duyarlılığı [114] (c) Sensör tabaka olmaksızın (değiştirilmemiş poliimid yüzey) ve polimerik mürekkep sensör farklı tabaka kalınlıkları için bağıl neme karşı kapasitans değişimi [119]



Şekil 13. Esnek Kapton (poliimid film) yüzey üzerine rezistif sıcaklık dedektörlerinin üretim süreci (a) Kapton temizlenmesi (b) Ti/Pt tabakasının buharlaştırılması (c) Rezerv baskı (desenlendirme) için cam tutucu üzerine montaj (d) Rezerv desenlendirme (e) Metal aşındırma (f) Tamamlanmış rezistif sıcaklık dedektörü (g) Sensör tasarımını gösteren Kapton yüzeyinde rezistif sıcaklık dedektörlerinin görüntüsü [120]



Şekil 14. Geliştirilen sıcaklık sensör dizileri [122]



Şekil 15. Sıcaklık sensörü dizisini üretmek için proses akışı (a) Esnek baskılı devre (b) Birbirine bağlı elektrot üzerine grafit/PDMS kompozit uygulama (c) Kompozitleri düzleştirmek için teflonla kaplanmış düz levha uygulama (d) Kompoziti sabitleme ve plakayı çıkarma [123]

Alt tabakaya geçen ısı kaybını en aza indirmek ve tepki süresini kısaltmak için, ince nikel film rezistörleri, poliimid film yüzey üzerinde üretilmiştir. Su geçirmez kaplama dikkate alınarak polimerle uyumlu mikro üretim teknolojisi geliştirilmiştir. Su kanallarında hidrodinamik deneyler yardımıyla dinamik dalga akışının algılanabileceği gösterilmiştir [122].

Şekil 15'de esnek poliimid filmler üzerine bir grafit-polidime-tilsiloksan kompozit dağıtılarak sıcaklık sensörü dizileri üretmek için yeni bir yöntem sunulmuştur.

Üretilen sıcaklık sensörü dizisi, 4x4 cm² alanda 64 algılama hücresine sahiptir. Sensör dizisi, robotların algılama sistemi için insansı yapay deri olarak kullanılabilir. Ortam sıcaklığı değişimlerine maruz bırakılan kompozitlerin direnç değişimini belirlemek için, birbirine kenetlenmiş bakır elektrotlar esnek poliimid yüzey üzerine desenlendirilmiştir [123].

4. SONUÇ

Tekstil esaslı ürünler her ne kadar günlük hayatımızda kullandığımız en eski ve en önemli materyaller olsa da, giymekte olduğumuz ve çevremizde olan nesnelere, mevcut teknolojik gelişmelerin etkileri göz önüne alındığında, giysilere bakış açımız önemli ölçüde değişecektir. Takviye malzemeleri, tıbbi implantlar veya elektronik bileşenler olarak uygulanan yeni tekstil materyallerini, "tekstiller" olarak düşünmeden ve belki de farkında olmadan kullanılmaktayız. Bu alanda, daha önce tekstil konsepti ile ilişkili olmayan kullanımlar, ifadeler ve tasarım olanaklarından; algılama, tepki verme ve şekil değiştirme kabiliyetine sahip yeni materyaller oluşturulmaktadır. Üretimde çok küçük ölçeklerde entegrasyon araçları ile sensörler, bağlantılar ve görsel çıktılar gibi teknolojiler; geleneksel tekstiller, plastikler ve metaller ile yeni yollarla birleştirilmekte ve ilişkilendirilmektedir.

Başarılı bir sensör kumaş tasarımı ve gelişimi; birçok farklı disiplinde (örneğin; polimer, fizik, tekstil, malzeme, elektronik-haberleşme, yazılım, mekatronik mühendisliği, biyomühendislik vb) ortak multidisipliner çalışma sonucu ortaya çıkar. İstenilen sensör özelliklerinin tam analizi ve eksiksiz cihaz geliştirilmesinin yanı sıra bu multidisipliner işbirliği, başarılı prototip olanaklarını artıracaktır. Bu çalışmada giyilebilir elektronik tekstil uygulamalarına yönelik akıllı kumaş sensörlerin üretim yöntemleri ve

uygulama alanlarına değinilmiş, bu konuda yapılan çalışmalar hakkında detaylı literatür analizi sunulmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından (Proje No: 2016/6-22 YLS) desteklenmiştir

KAYNAKLAR

- Cherenack, K., van Pieteron, L., (2012), *Smart textiles: Challenges and opportunities*, Journal Of Applied Physics, 112, 9, 091301(1-14).
- Mattman, C., Amft, O., Harms, H., Tröster, G., Clemens, F., (2007), *Recognizing upper body postures using textile strain sensors*, Proceedings of 11th International Symposium on Wearable Computers (ISWC 07), 29-36, 11-13 October 2007.
- Castano, L.M., Flatau, A.B., (2014), *Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review*, Smart Materials and Structures, 23, 5, 1-27.
- Chen, Y., Lloyd, D.W., Harlock, S.C., (1995), *Mechanical characteristics of coated fabrics*, The Journal of The Textile Institute, 86, 4, 690-700.
- Farboodmanesh, S., Chen, J., Mead, J.L., White, K.D., Yesilalan, H.E., Laoulache, R., Warner S.B., (2005), *Effect of coating thickness and penetration on shear behaviour of coated fabrics*, Journal of Elastomers & Plastics, 37, 3, 197-227.
- Dubrovski P.D., Cebasek P.F. (2005). *Analysis of the mechanical properties of woven and nonwoven fabrics as an integral part of compound fabrics*, Fibres & Textiles in Eastern Europe, 13, 3(51), 50-53.
- Tracton, A.A., (2006), *Coatings Technology Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kallmayer, C., Simon, E., (2012), *Large area sensor integration in textiles*, International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD), 5, 20-23 March 2012, Chemnitz, Germany.
- Post, E.R., Orth, M., Russo, P.R., Gershenfeld, N., (2000), *Ebrodery: design and fabrication of textilebased computing*, IBM Systems Journal, 39, 3(4), 840-860.
- Engin, M., Demirel, A., Engin, E.Z., Fedakar, M., (2005), *Recent developments and trends in biomedical sensors*, Measurement, 37, 2, 173-188.
- Philips smart connections clothing*, <http://extra.shu.ac.uk/dac/philips.pdf>, erişim tarihi: 23.03.2017.

12. Meyer, J., Lukowicz, P., Tröster, G., (2006), *Textile pressure sensor for muscle activity and motion detection*, Proceedings 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers, 69-72, 11-14 October 2006, Montreux, Switzerland.
13. *Intelligent textiles, soft products*, <http://www.ivt.ntnu.no/ipd/fag/PD9/2003/artikkel/Norstebo.pdf>, erişim tarihi: 23.03.2017
14. Carpi, F., De Rossi, D., (2005), *Electroactive polymer-based devices for e-textiles in biomedicine*, IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 9, 4, 295-318.
15. Zhang, R.Q., Li, J.Q., Li, D.J., Xu, J.J., (2011), *Study of the structural design and capacitance characteristics of fabric sensor*, Advanced Materials Research, 194-196, 1489-1495.
16. Avloni, J., Lau, R., Ouyang, M., Florio, L., Henn, A.R., Sparavigna, A., (2008) *Polypyrrolecoated nonwovens for electromagnetic shielding*, Journal of Industrial Textiles, 38, 1, 55-68.
17. Holleccek, T., Rüegg, A., Harms, H., Tröster, G., (2010), *Textile pressure sensors for sports applications*, 732-737, 1-4 November 2010, 9th IEEE Sensors Conference, Kona, HI.
18. Kim, H., Kim, Y., Kim, B., Yoo, H.J., (2009), *A wearable fabric computer by planar-fashionable circuit board technique*, 6th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, 282-285, 3-5 June 2009, Berkeley, CA.
19. Sergio, M., Manaresi, N., Campi, F., Canegallo, R., Tartagni, M., Guerrieri, R., (2003), *A dynamically reconfigurable monolithic CMOS pressure sensor for smart fabric*, IEEE Journal Solid-State Circuits, 38, 6, 966-975.
20. Hasegawa, Y., Shikida, M., Ogura, D., Sato, K., (2007), *Novel type of fabric tactile sensor made from artificial hollow fiber*, Proc. 20th Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, 603-606, 21-25 January 2007, Hyogo, Japan.
21. Meyer, J., Arnrich, B., Schumm, J., Troster, G., (2010), *Design and modeling of a textile pressure sensor for sitting posture classification*, IEEE Sensors Journal, 10, 8, 1391-1398.
22. Cho, G., Jeong, K., Paik, M.J., Kwun, Y., Sung, M., (2011), *Performance evaluation of textilebased electrodes and motion sensors for smart clothing*, IEEE Sensors Journal, 11, 12, 3183-3193.
23. Sergio, M., Manaresi, N., Tartagni, M., Guerrieri, R., Canegallo, R., (2002), *A Textile Based Capacitive Pressure Sensor*, First IEEE International Conference on Sensors, Volume:2, 1625-1630, 12-14 June 2002, Orlando, Florida, USA.
24. Hui, Z., Ming, T.X., Xi, Y.T., Sheng, L.X., (2006), *Pressure sensing fabric*, Proceedings of MRS, 920, 0920-S05-05.
25. Li, L.F., Ding, Y.S., (2009), *Design and analysis of parallel woven structurebased flexible resistive pressure sensor*, 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering ICBBE, 1-4, 11-13 June 2009, Beijing, China.
26. Inaba, M., Hoshino, Y., Nagasaka K., Ninomiya T., Kagami S., Inoue H. (1996), *A fullbody tactile sensor suit using electrically conductive fabric and strings*, International Conference on Intelligent Robots and Systems, Volume 2, 450-457, 4-8 November 1996, Osaka, Japan.
27. Sandbach, D.L., Burkitt, J., Walkington, S.M., Flory, K., (2005), *Fabric sensor International Patent WO2005031557 A1*.
28. Alirezaei H., Nagakubo A., Kuniyoshi, Y., (2009), *A tactile distribution sensor which enables stable measurement under high and dynamic stretch*, IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), 87-93, 14-15 March 2009, Lafayette, LA.
29. Brady, S., Diamond, D., Lau K.T., (2005), *Inherently conducting polymer modified polyurethane smart foam for pressure sensing*, Sensors Actuators A, 119, 2, 398-404.
30. Wang, Y., Hua, T., Zhu, B., Li, Q., Yi, W., Tao, X., (2011), *Novel fabric pressure sensors: design, fabrication and characterization*, Smart Materials and Structures, 20, 6, 065015.
31. Shimojo, M., Namiki, A., Ishikawa, M., Makino, R., Mabuchi, K., (2004), *A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electricalwires stitched method*, IEEE Sensors Journal, 4, 5, 589-596.
32. Zhang, H., Tao, X.M., Yu, T.X., Wang, S.Y., (2006), *Conductive knitted fabric as largestrain gauge under high temperature*, Sensors Actuators A, 126, 1, 129-140.
33. Huang, C.T., Shen, C.L., Tang, C.F., Chang, S.H., (2008), *A wearable yarn-based piezoresistive-sensor*. Sensors Actuators A. 141, 2, 396-403.
34. Wang, J.P., Xue, P., Tao, X.M., (2011), *Strain sensing behavior of electrically conductive fibers under large deformation*, Materials Science and Engineering: A, 528, 6, 2863-2869.
35. Calvert, P., Duggal, D., Patra, P., Agrawal, A., Sawhney, A., (2008), *Conducting polymer and conducting composite strain sensors on textiles*, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 484, 1, 291-302.
36. Gioberto, G., Dunne, L., (2012), *Theory and characterization of a top-thread coverstitched stretch sensor*, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 3275-3280, 14-17 October 2012, Seoul, Korea.
37. Pacelli, M., Caldani, L., Paradiso, R., (2006), *Textile piezoresistive sensors for biomechanical variables monitoring*, 28 th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS), 5358-5361, 30 Ağustos-3 Eylül 2006, New York.
38. Wijesiriwardana, R., Dias, T., Mukhopadhyay, S., (2003), *Resistive fibre-meshed transducers*, 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers ISWC, 200-209, White Plains, NY.
39. Sawhney, A., Agrawal, A., Patra, P., Calvert, P., (2006), *Piezoresistive sensors on textiles by inkjet printing and electroless plating*, Proceedings of MRS, 920, 0920-S05-04.
40. Kim, K.J., Chang, Y.M., Yoon, S.K., Hyun, J., (2009), *A novel piezoelectric PVDF filmbased physiological sensing belt for a complementary respiration and heartbeat monitoring system*, Integrated Ferroelectrics, 107, 1, 53-68.
41. Carpi, F., De Rossi, D., Kornbluh, R., Pelrine, R., Sommer-Larsen, P., (2008), *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers*, Elsevier, Amsterdam.
42. Scilingo, E.P., Lorussi, F., Mazzoldi, A., De Rossi, D., (2003), *Strain-sensing fabrics for wearable kinaesthetic-like systems*, IEEE Sensors Journal, 3, 4, 460-467.
43. Collins, G.E., Buckley L.J., (1996), *Conductive polymercoated fabrics for chemical sensing*, Synthetic Metals, 78, 2, 93-101.

44. Kim, H.K., Kim M.S., Chun S.Y., Park, Y.H. Jeon, B.S., Lee, J.Y., Hong, Y.K., Joo J. Kim S.H., (2003), *Characteristics of electrically conducting polymercoated textiles*, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 405, 1, 161-169.
45. Xue, P., Tao, X.M., Kwok, W.Y., Leung, M.Y., Yu, T.X., (2004), *Electromechanical behavior of fibers coated with an electrically conductive polymer*, Textile Research Journal, 74, 10, 929-936.
46. Campbell, T., Munro, B., Wallace, G., Steele, J., (2007), *Can fabric sensors monitor breast motion?*, Journal of Biomechanics, 40, 13, 3056-3059.
47. Wu, J., Zhou, D., Too, C.O., Wallace G.G., (2005), *Conducting polymer coated lycra*, Synthetic Metals, 155, 3, 698-701.
48. Li, Y., Leung, M.Y., Tao, X.M., Cheng, X.Y., Tsang, J., Yuen, M.C.W., (2005), *Polypyrrolecoated conductive fabrics as a candidate for strain sensors*, Journal of Materials Science, 40, 15, 4093-4095.
49. Daoud, W.A., Xin, J.H., Szeto, Y.S., (2005), *Polyethylenedioxythiophene coatings for humidity, temperature and strain sensing polyamide fibres*, Sensors and Actuators B: Chemical, 109, 2, 329-333.
50. Lang, U., Rust, P., Dual, J., (2008), *Towards fully polymeric MEMS: Fabrication and testing of PEDOT/PSS strain gauges*, Microelectronic Engineering, 85, 5-6, 1050-1053.
51. Chang, C.L., Fix, K., Wang, W.C., (2010), *Reliability of PEDOT/PSS strain gauge on foam structure*, Proceedings of SPIE7646, Nanosensors, Biosensors, and Info-Tech Sensors and Systems, 764616, 7-9 March 2010, San Diego, California, USA.
52. Kwon, O.S., Park, E., Kweon, O.Y., Park, S.J., Jang, J., (2010), *Novel flexible chemical gas sensor based on poly (3,4 ethylenedioxythiophene) nanotube membrane*, Talanta, 82, 4, 1338-1343.
53. Lu, H.H., Lin, C.Y., Fang, Y.Y., Hsiao, T.C., Ho, K.C., Yang, D., Lin, C.W., (2008), *NO gas sensor of PEDOT: PSS nanowires by using direct patterning DPN*, 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Personalized Healthcare through Technology, 3208-3211, 20-25 August 2008, Vancouver, Canada.
54. Martinez, O., Bravos, A.G., Pinto, N., (2009), *Fabrication of poly(vinylidene fluoridetri fluoroethylene)/poly(3,4ethylenedioxy thiophene) polystyrene sulfonate composite nanofibres via electro spinning*, Macromolecules, 42, 20, 7924-7929.
55. Jang, J., Chang, M., Yoon, H., (2005), *Chemical sensors based on highly conductive poly(3,4ethylenedioxythiophene) nanorods*, Advanced Materials, 17, 13, 1616-1620.
56. Lang, U., Rust, P., Schoberle, B., Dual, J., (2009), *Piezoresistive properties of PEDOT:PSS*, Microelectronic Engineering, 86, 3, 330-334.
57. Wang, X., Ostblom, M., Johansson, T., Inganas, O., (2004), *PEDOT surface energy pattern controls fluorescent polymer deposition by dewetting*, Thin Solid Films, 449, 1-2, 125-132.
58. Calvert, P., Patra, P., Sawhney, A., Agrawal, A., Duggal, D., (2007), *Printed conducting polymer strain sensors for textiles*, 23rd International Conference on Digital Printing Technologies/ Digital Fabrication, 831-835, 16-21 September 2007, Anchorage, AK.
59. Molina, J., Esteves, M.F., Fernandez, J., Bonastre, J., and Cases, F., (2011), *Polyaniline coated conducting fabrics, chemical and electrochemical characterization*, European Polymer Journal, 47, 10, 2003-2015.
60. Okuzaki, H., Harashina, Y., Yan, H., (2009), *Highly conductive PEDOT/PSS microfibrils fabricated by wet spinning and dip treatment in ethylene glycol*, European Polymer Journal, 45, 1, 256-261.
61. Nouri, M., Kish, M.H., Entezami, A.A., Edrisi, M., (2000), *Conductivity of textile fibres treated with aniline*, Iranian Polymer Journal, 9, 49, 49-58.
62. Kim, B., Koncar, V., Bruniaux, P., (2006), *Electro-mechanical and morphological properties of PET conductive polymer fibres - modeling and simulation*, Journal of Advanced Materials, 38, 3, 12-20.
63. Lang, E.J., Chou, T.W., (1998), *The effect of strain gage size on measurement errors in textile composite materials*, Composites Science Technology, 58, 3-4, 539-548.
64. Sau, K.P., Chaki, T.K., Khastgir, D., (1997), *Conductive rubber composites from different blends of Ethylenepropylenediene rubber and nitrile rubber*, Journal of Material Science, 32, 21, 5717-5724.
65. Kang, T.J., Seo, D.K., Kim, Y.H., Choi, A., Park, Y.W., Kim, D.-H., Hong, S.-H., Jin, K., Jeong, D.H., (2011), *Electromechanical properties of CNT-coated cotton yarn for electronic textile applications*, Smart Material and Structures, 20, 1, 8.
66. Panhuis, M.I.H., Wu, J., Ashraf, S.A., Wallace, G.G., (2007), *Conducting textiles from singlewalled carbon nanotubes*, Synthetic Metals, 157, 8-9, 358-362.
67. Yamada, T., Hayamizu, Y., Yamamoto, Y., Yomogida, Y., Izadi-Najafabadi, A., Futaba, D.N., Hata, K., (2011), *A stretchable carbon nanotube strain sensor for human motion detection*, Nature Nanotechnology, 6, 5, 296-301.
68. OlivaAvilés, A.I., Avilés, F., Sosa, V., (2011), *Electrical and piezoresistive properties of multiwalled carbon nanotube/polymer composite films aligned by an electric field*, Carbon, 49, 9, 2989-2997.
69. Alamusi, Hu, N., Fukunaga, H., Atobe, S., Liu, Y., Li, J., (2011), *Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites*, Sensors, 11, 11, 10691-10723.
70. Mecham, J.B., Cooper, K.L., Huie, K., Claus, R.O., (2001), *Electrostatic selfassembly processing of functional nanocomposites*, Proceedings of SPIE, Engineering Thin Films with Ion Beams, Nanoscale Diagnostics, and Molecular Manufacturing, 07 March 2010, San Diego, CA, USA.
71. Coyle, S., Wu, Y., Lau, K.T., De Rossi, D., Wallace, G., Diamond, D., (2007), *Smart nanotextiles: a review of materials and applications*, MRS Bulletin, 32, 5, 434-442.
72. Shirinov, A.V., Schomburg, W.K., (2008), *Pressure sensor from a PVDF film*, Sensors and Actuators A: Physical, 142, 1, 48-55.
73. Wang, Y.R., Zheng, J.M., Ren, G.Y., Zhang, P.H., Xu, C., (2011), *A flexible piezoelectric force sensor based on PVDF fabrics*, Smart Materials and Structures, 20, 4, 7.
74. Edmison, J., Jones, M., Nakad, Z., Martin, T., (2002), *Using piezoelectric materials for wearable electronic textiles*, 6th International Symposium on Wearable Computers (ISWC), 41-48, 7-10 October 2002, Seattle, WA.
75. Yang, W., Torah, R., Yang, K., Beeby, S., Tudor, J., (2012), *A novel fabrication process to realize piezoelectric cantilever structures for smart fabric sensor applications*, IEEE Sensors Conference, 1-4, 28-31 October 2012, Taipei, Taiwan.

76. Krishna, G.M., Rajanna, K., (2004), *Tactile sensor based on piezoelectric resonance*, IEEE Sensors Journal, 4, 5, 691-697.
77. Ren, X., Dzenis, Y., (2009), *Novel continuous poly(vinylidene fluoride) nanofibres*, MRS Proceedings, Smart Nanotextiles, 920, 55-61.
78. Schwodiauer, R., Ortwein, C., Buchberger, G., Graz, I., Bartu, P., Bauer, S., (2008), *Flexible touchand pressure sensitive piezo elastomer stretch sensor for simple surface position detection*, 13th International Symposium on Electrets ISE13, C130, 15-17 September, Tokyo, Japan.
79. Kogler, A., Buchberger, G., Schwodiauer, R., Bauer, S., (2011), *Ferroelectret based flexible keyboards and tactile sensors*, 14th International Symposium on Electrets ISE, 201-202, 28-31 August 2011, Montpellier, France.
80. Tao, X.M., Tang, L.Q., Du, W.C., Choy, C.L., (2000), *Internal strain measurement by fibre Bragg grating sensors in textile composites*, Composites Science Technology, 60, 5, 657-669.
81. Rothmaier, M., Luong, M., Clemens, F., (2008) *Textile pressure sensor made of flexible plastic optical fibres*, Sensors, 8, 7, 4318-4329.
82. El-Sherif, M.A., Yuan, J., MacDiarmid, A., (2000), *Fiber optic sensors and smart fabrics*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 11, 5, 407-414.
83. Fernandez-Valdivieso, C., Matias, I.R., Arregui F.J., (2002), *Simultaneous measurement of strain and temperature using a fibre Bragg grating and a thermochromic material*, Sensors Actuators A, 96, 1, 21-24.
84. Li, Y.L., Chen, S.Y., Yang, L.H., Cao, L.H., (2011), *Study on three-dimension computer simulation of plain knitted fabrics*, Advanced Material Research, 213, 595-599.
85. Koncar, V., (2005), *Optical fiber fabric displays*, Optics and Photonics News, 16, 4, 40-44.
86. Selm, B., Gürel, E.A., Rothmaier, M., Rossi, R.M., Scherer, L.J., (2010), *Polymeric optical fiber fabrics for illumination and sensorial applications in textiles*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 21, 11, 1061-1071.
87. Luprano, J., (2008), *Bio-sensing textile for medical monitoring applications*, Advances in Science and Technology, 57, 257-265.
88. Wang, H., Peng, D., Wang, W., Sharif, H., Chen, H.h., Khoynzhad, A., (2010), *Resource-aware secure ECG healthcare monitoring through body sensor networks*, IEEE Wireless Communications, 17, 1, 12-19.
89. <http://tr.euronews.com/2015/03/26/sporda-performans-arttiracak-akilli-kumas-icat-edildi>, erişim tarihi: 26.04.2016.
90. Torsi, L., Pezzuto, M., Siciliano, P., Rella, R., Sabbatini, L., Valli, L., Zambonin, P.G., (1998), *Conducting polymers doped with metallic inclusions: new materials for gas sensors*, Sensors and Actuators B: Chemical, 48, 1-3, 362-367.
91. Hong, K.H., Oh, K.W., Kang, T.J., (2004), *Polyanilinnylon 6 composite fabric for ammonia gas sensor*, Journal of Applied Polymer Science, 92, 1, 37-42.
92. Jin, G., Norrish, J., Too, C., Wallace, G., (2004), *Polypyrrole filament sensors for gases and vapours*, Current Applied Physics, 4, 2-4, 366-369.
93. Shim, B.S., Chen, W., Doty, C., Xu, C.L., Kotov, N.A., (2008), *Smart electronic yarns and wearable fabrics for human biomonitoring made by carbon nanotube coating with polyelectrolytes*, Nano Letters, 8, 12, 4151-4157.
94. Bowman, D., Mattes, B.R., (2005), *Conductive fibre prepared from ultrahigh molecular weight polyaniline for smart fabric and interactive textile applications*, Synthetic Metals, 154, 1-3, 29-32.
95. Seesaard, T., Lorwongtragool, P., Kerdcharoen, T., (2012), *Wearable electronic nose based on embroidered amine sensors on the fabric substrates*, 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTICON), 1-4, 16-18 May 2012, Hua Hin, Thailand.
96. Weng, W., Chen, P., He, S., Sun X., Peng, H., (2016), *Smart Electronic Textiles*, Angewandte Chemie International Edition, 55, 21, 6140-6169.
97. Yun, J., Kim, H.-I., Lee, Y.-S., (2013), *A hybrid gas-sensing material based on porous carbon fibers and a TiO₂ photocatalyst*, Journal of Materials Science, 48, 23, 8320-8328.
98. Modafferi, V., Panzera, G., Donato, A., Antonucci, P.L., Cannilla, C., Donato, N., Spadaro, D., Neri, G., (2012), *Highly sensitive ammonia resistive sensor based on electrospun V₂O₅ fibers*, Sensors and Actuators B: Chemical, 163, 1, 61-68.
99. Zhang, W., Tan, Y.Y., Wu, C., Silva, S.R.P., (2012), *Self-assembly of single walled carbon nanotubes onto cotton to make conductive yarn*, Particology, 10, 4, 517-521.
100. Seesaard, T., Lorwongtragool, P., Kerdcharoen, T., (2015), *Development of Fabric-Based Chemical Gas Sensors for Use as Wearable Electronic Noses*, Sensors, 15, 1, 1885-1902.
101. Lala, N.L., Thavasi, V., Ramakrishna, S., (2009), *Preparation of Surface Adsorbed and Impregnated Multi-walled Carbon Nanotube/Nylon-6 Nanofiber Composites and Investigation of their Gas Sensing Ability*, Sensors, 9, 1, 86-101.
102. Yang, A., Tao, X., Wang, R., Lee, S., Surya, C., (2007), *Room temperature gas sensing properties SnO₂/multiwall-carbon-nanotube composite nanofibers*, Applied Physics Letters, 91, 13, 3110.
103. Shuai, S., Huang, Y., Tao, S., (2014), *Simultaneous Monitoring of Ammonia and Moisture Using a Single Fiber Optoelectrode as a Transducer*, IEEE Sensors Journal, 14, 3, 847-852.
104. Kinkeldei, T. Zysset, C., Münzenrieder, N., Tröster, G., (2012), *An electronic nose on flexible substrates integrated into a smart textile*, Sensors and Actuators B: Chemical, 174, 81-86.
105. Kincal, D., Kumar, A., Child, A.D., Reynolds, J.R., (1998), *Conductivity switching in polypyrrole-coated textile fabrics as gas sensors*, Synthetic Metals, 92, 53-56.
106. Manesh, K.M., Gopalan, A.I., Kwang-Pill, L., Santhosh, P., Kap-Duk, S., Duk-Dong, L., (2007), *Fabrication of Functional Nanofibrous Ammonia Sensor*, IEEE Transactions on Nanotechnology, 6, 5, 513-518.
107. Low, K., Horner, C.B., Li, C., Ico, G., Bosze, W., Myung, N.V., Nam, J., *Composition-dependent sensing mechanism of electrospun conductive polymer composite nanofibers*, Sensors and Actuators B: Chemical, 207, Part A, 235-242.
108. Ji, S., Li, Y., Yang, M., (2008), *Gas sensing properties of a composite composed of electrospun poly(methyl methacrylate) nanofibers and in situ polymerized polyaniline*, (2008), Sensors and Actuators B: Chemical, 133, 2, 644-649.
109. Gao, Y., Li, X., Gong, J., Fan, B., Su, Z., Qu, L., (2008), *Polyaniline Nanotubes Prepared Using Fiber Mats Membrane as the Template and their Gas-response Behavior*, Journal of Physical Chemistry C, 112, 22, 8215-8222.

110. Hong, K.H., Oh, K.W., Kang, T.J., (2004), *Polyaniline-nylon 6 composite fabric for ammonia gas sensor*, Journal of Applied Polymer Science, 92, 1, 37-42.
111. BIOTEX, *Bio-sensing textile for health management*, https://cordis.europa.eu/pub/ist/docs/mnd/biotex_en.pdf, erişim tarihi: 10.04.2017.
112. TWIGS: *Textiles with integrated gas sensors*, <http://www.nano-tera.ch/projects/308.php>, erişim tarihi: 10.04.2017.
113. Pereira, T., Silva, P., Carvalho, H., Carvalho, M., (2011), *Textile moisture sensor matrix for monitoring of disabled and bedrest patients*, IEEE International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 1-4, 27-29 April 2011, Lisbon, Portugal.
114. Panapoy, M., Singsang, W., Ksapabutr, B., (2010), *Electrically conductive poly(3,4ethylenedioxythiophene) poly(styrene sulfonate)/polyacrylonitrile fabrics for humidity sensors*, Physica Scripta, 2010, T139, 014056.
115. Hwang, L.S., Ko, J.M., Rhee, H.W., Kim C.Y., (1993), *A polymer humidity sensor*, Synthetic Metals, 57, 1, 3671-3676.
116. Kinkeldei, T., Zysset, C., Cherenack, K.H., Troster, G., (2011), *A textile integrated sensor system for monitoring humidity and temperature*, 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 1156-1159, 5-9 June 2011, Beijing, China.
117. Nilsson, D., Kugler, T., Svensson, P.O., Berggren, M., (2002), *An allorganic sensor-transistor based on a novel electrochemical transducer concept printed electrochemical sensors on paper*, Sensors and Actuators B: Chemical, 86, 2-3, 193-197.
118. Kim, H., Kim, Y., Kwon, Y., Yoo, H., (2008), *A 1.12 mW continuous healthcare monitor chip integrated on a planar-fashionable circuit board*, IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) - Digest Technical Papers, 150-603, 3-7 February 2008, Philadelphia, PA.
119. Starke, E., Turke, A., Krause, M., Fischer, W.J., (2011), *Flexible polymer humidity sensor fabricated by inkjet printing*, 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 1152-1155, 5-9 June 2011, Beijing, China.
120. Kinkeldei, T., Zysset, C., Cherenack, K., Troester, G., (2009), *Development and evaluation of temperature sensors for textile integration*, 8th IEEE Sensors Conference, 1580-1583, 25-28 October 2009, Christchurch, Canterbury, NZ.
121. Jung, S., Lauterback, C., Strasser, M., Weber, W., (2003), *Enabling technologies for disappearing electronics in smart textiles*, IEEE International Solid-State Circuits Conference - Digest of Technical Papers, 386-387, 13 February 2003, Philadelphia, PA.
122. Ma, B., Ren, J., Deng, J., Yuan, W., (2010), *Flexible thermal sensor array on PI film substrate for underwater applications*, IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 679-682, 24-28 January 2010, Wanchai, Hong Kong.
123. Shih, W.-P., Tsao, L.-C., Lee, C.-W., Cheng, M.-Y., Chang, C., Yang, Y.-J., Fan, K.-J., (2010), *Flexible Temperature Sensor Array Based on a Graphite-Polydimethylsiloxane Composite*, Sensors, 10, 4, 3597-3610.