



Elektronik tekstillerde iletken mürekkep uygulamaları Conductive ink applications on electronic textiles

İbrahim ÜNER¹ , Banu Hatice GÜRCÜM^{2*} 

^{1,2}Tekstil Tasarımı Bölümü, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
ibrahim.uner.tekstil@gmail.com, banugurcum@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 21.10.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 10.04.2019
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.55890
Derleme Makalesi/Review Article

Öz

Bu araştırmanın amacı elektronik tekstil uygulamalarında kullanılan baskı yöntemlerinin incelenmesi ve bu baskı yöntemlerinde kullanılan farklı özelliklere sahip iletken mürekkeplerin işlem şartlarının, avantaj ve dezavantajlarının incelenmesidir. Araştırmada, iletken mürekkepler ile ilgili bir kavramsal çerçeve oluşturularak elektronik tekstiller alanında kullanımı ve önemi literatür açısından incelenmiştir. Çalışmada, gümüş içerikli iletken mürekkeplerin esnek malzemeler üzerine basılmasıyla, radyo frekansı tanımlama, elektromiyografi ve çeşitli sensör tasarımlarının yapıldığı görülmüştür. Serigrafi ve inkjet baskı teknikleri en çok kullanılan baskı teknikleri olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Giyilebilir, Elektronik, Baskı, İletken mürekkep

Abstract

This study was conducted to investigate printing techniques used in electronic textile applications and to examine the application conditions, advantages and disadvantages of the conductive inks used in these printing processes. This research is a conceptual framework designed to examine conductive inks within the scope of electronic textiles and their importance. In the study, it is seen that by printing of silver doped conductive ink on flexible materials, radio frequency identification (RFID), electromyography (EMG) and variety of sensors are designed. It was evaluated that screen printing and inkjet printing techniques are most familiar printing applications.

Keywords: Wearable, Electronic, Printing, Conductive ink

1 Giriş

Günümüzde kullanım yelpazesi giyilebilir elektroniklerden fonksiyonel ipliklere kadar uzanan [1], askeri [2], medikal ve sağlık [3], telekomünikasyon [4], spor [5] ve uzay [6] gibi birçok alanda uygulaması olan Elektronik tekstiller (e-tekstiller), konvansiyonel elektroniklerin mekanik uygulamalarla kumaşa adaptasyonu ile [7] etkili bir şekilde oluşturulmaktadır. Bu konuda karşılaşılan en temel problem entegre elektroniğin boyutu, ağırlığı ve esnek olmayan yapısının vücuda ergonomik olarak uyumlandırılması olmaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için e-tekstil uygulamalarında kullanılmak üzere yumuşak, esnek, kullanıcıdan rahatsızlık sağlayacak elektronik malzemelerin [8] geliştirilmesi söz konusu olmuş ve bu durum iletken malzemelerin kumaşa çeşitli şekillerde aplikasyonuna yol açmıştır.

E-tekstillerde iletken hatların oluşturulması, kabloların geleneksel olarak iştirilmesi, iletken ipliklerin dikilmesi, yalıtkan lifler yerine iletken liflerin kullanılması, iletken ipliklerin nakış yolu ile kumaşa aktarılması ve baskı tekniği (mürekkep) ile gerçekleşmektedir [7]. Metal liflerden yapılmış ipliklerin ve metal kaplı ipliklerin yetersiz iletkenlik özelliği, zayıf yıkama ve fiziksel dayanım özelliklerinden kaynaklanan bazı dezavantajlarının [9] bulunması iletken mürekkeple temel elektronik devrelerin tekstil yüzeylerine basılarak aktarılmasını gündeme getirmektedir. Basılı elektronik devrelerinin geliştirilmesinde tek adımlı veya çok adımlı olarak çeşitli baskı yöntemleri karşımıza çıkmaktadır.

İletken yolların oluşturulmasında kullanılan rotogravür [10], serigrafi baskı [11], inkjet baskı [12] gibi teknikler baskı ve sertleştirmeden oluşan iki adımlı fonksiyonel işlemlerdir [13]. Genellikle giyilebilir elektronikler fotolitografi [14], buhar

birikimi [15], elektroliz kaplama gibi çeşitli yöntemlerle üretilmektedirler. Bunlara alternatif olarak serigrafi baskı, gravür, fleksografi, inkjet baskı gibi yöntemler de elektroniklerin geliştirilmesinde kullanılmışlardır [16]. Gün geçtikçe baskı teknolojilerinin ve kullanılan mürekkeplerin geliştirilmesiyle bu alanda yapılan çalışma parametreleri de bunlara bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir.

Bu araştırma, e-tekstil uygulamalarında iletken yolların oluşturulmasında önemli bir yeri olan iletken mürekkep uygulamalarını incelemeyi hedefleyen bir taksonomi çalışmasıdır. E-tekstil uygulamalarında serigrafi ve inkjet baskı tekniklerinin ön plana çıkmakta olduğu bilindiğinden bu çalışmada iletken mürekkep uygulamalarında çok tercih edilen serigrafi ve inkjet baskı teknikleri üzerinde durulmuştur.

2 E-Tekstiller alanında kullanılabilir mürekkepler

Elektronik tekstil uygulamalarında, karşılaşılan en yaygın mürekkep türü gümüş içerikli olanıdır. Bunun yanı sıra karbon siyahı ve PEDOT: PSS (Poli (3,4-etilen dioksitiyofen)-poli(stiren sülfonat)) iletken polimerleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Tercih edilen mürekkeplerin esneklik özelliği, yüzeye yapışması, işlenebilirliği, maksimum işlem sıcaklığı ve sinterleme sıcaklığı gibi özellikleri önemli parametrelerdir [17]. Son zamanlarda, metal nano parçacıklı, karbon nanotüp, polimer katkılı malzemeler gibi farklı özelliklerdeki iletken mürekkepler, elektronik tekstillerde kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir. Bakır, gümüş ve altın gibi yüksek iletkenlikleri olan parçacıkları bünyesinde bulunduran iletken mürekkepler, parçacık ve nano parçacık katkılı olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Nano parçacıklı mürekkepler de kullanılan çözücülere bağlı olarak organik ve inorganik olarak

ayrılırlar [18]. Bu alanda kullanılan mürekkepleri iletken polimer mürekkepler, metalik iletken mürekkepler, grafen ve karbon nanotüp mürekkepler ve kompozit iletken mürekkepler olarak incelemek gerekmektedir.

2.1 Polimer iletken mürekkepler

35 yıl öncesinde keşfedilmiş iletken polimerlerin metalik iletkenlere alternatif olarak kullanılmaları pek fazla tercih edilmemiş, bu nedenle kullanım alanları sınırlı kalmıştır. Bu alanların başında polimer esaslı anten uygulamaları gelmektedir. Bununla birlikte biyo uyumlu olmaları nedeniyle yeşil sensör uygulamalarında son zamanlarda tercih edilen malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır [19]. Özellikle PEDOT: PSS [20], polipirol (PPy) [21] ve polianilin (PANI) [22] gibi iletken polimerlerin kolay uygulanabilirliği, esnekliği, hafifliği, biyo uyumluluğu ve düşük maliyetli olması yanı sıra esnek yüzeylere uyumlu mekanik özelliklere sahip olması onları giyilebilir elektronikler alanında önemli bir yere taşımaktadır.

İletken mürekkeplerde kullanılan katkı malzemeleri önemli bir ölçüt olmasına rağmen, kullanım alanlarını sınırlayan bazı dezavantajlar da getirmektedir. Örneğin polimer temelli iletken mürekkepler düşük iletkenlik değerleri ve zayıf ısı kararlılıklarına sahiptirler [23]. Hatta metal katkı ve karbon esaslı iletken malzemelerle karşılaştırıldığında iletkenlik özelliklerinin bazı uygulamalar için yetersiz olduğu görülmektedir. İletkenliklerini geliştirmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [16],[24].

İletken polimer mürekkeplerin son 10 yıl içerisinde pek çok basılı elektronik uygulamasında kullanıldığı görülmektedir. Bunlar arasında Borghetti ve diğ. [25], çalışmalarında gerinim ölçer sensörü geliştirmek amacıyla su bazlı iletken polimer olan PEDOT: PSS ile inkjet baskı tekniği kullanarak gerinim ölçer sensörü geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri basılı sensörü farklı iletken mürekkeple basılmış sensörlerle karşılaştırmıştır. Çalışmada, baskı sonrasında 130 °C'de 6 dk. süren sinterleme işlemi sonucunda ölçülen direnç değeri 92 $\mu\Omega/m$ 'dir. Çalışmada farklı iletken mürekkeple basılı sensör ile PEDOT: PSS içerikli basılı sensörlerin sonuçları arasında yakın bir ilişki olduğu görülmekte ve PEDOT: PSS mürekkeplerin elastomerik yüzeyler için daha iyi bir alternatif olabileceği belirtilmektedir.

Guerchouche ve diğ. [19] geri dönüşümlü ve biyo uyumlu sensörlerin geliştirilmesi amacıyla polimer bazlı anten tasarımı için serigrafi baskı tekniği ile PEDOT: PSS iletken mürekkebi cam yüzeye basmışlardır. PEDOT: PSS basılı antenin fiziksel ve elektriksel özellikleri incelenmiş ve baskı kalınlığının 7 μm , yüzey direncinin 9x52 Ω/sq olduğu belirtilmiştir. Çalışmada geliştirilen anten tasarımının kabul edilebilir değerlere sahip olduğu ve evlerde ve halka açık binalarda WIFI girişi noktası uygulamalarında kullanılabileceği ifade edilmiştir.

2.2 Metal esaslı iletken mürekkepler

Metal esaslı iletken mürekkepler, polimer esaslı mürekkeplere nazaran yüksek iletkenliklerinden dolayı tercih edilmektedirler. İletken mürekkep uygulamalarında genellikle gümüş [26], bakır [27] ve metal organik bileşikler kullanılmaktadır. Literatürde metal nano parçacıklar, organometalik bileşikler ve iletken polimerlere göre yüksek elektrik ve termal iletkenliğinin yanı sıra sinterleme düzgünlüğü açısından da alternatif olarak görülmektedir. [28]. Fakat metal esaslı iletken mürekkeplerin seri üretimde maliyetleri de yüksektir [29].

Günümüzde çoğu iletken mürekkepler mikron boyutlarındaki gümüş parçacıkları içermektedir. Son zamanlarda da gümüş nano parçacıklar da metalik iletken mürekkeplerde kullanılabilmektedir. Nano ve mikro gümüşün yanı sıra bakır ve bakır oksitler de kullanılmaktadır. [30].

Yu ve diğ. [31], çalışmalarında, gümüş nano parçacıklı iletken mürekkep sentezini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, iletken mürekkebe katkı maddesi olarak PANI kullanılmış, sinterleme etkin maddesi olarak da hidroklorik asit (HCl) kullanılmıştır. Gümüş nano parçacıklı mürekkep, pamuklu kumaş ve A4 kağıdına serigrafi baskı tekniği ile basılmıştır. Basılan mürekkebin ortalama kalınlığı 15 μm , genişliği 1 mm ve viskozitesi 6.2-7.6 cp'dir. Baskı sonrası sinterleme işlemi 60 °C ve 30 dk. olarak gerçekleştirilmiştir. Basılı pamuklu kumaş direnci $2 \times 10^{-5} \Omega m$ iken A4 kağıdın direnci $1.9 \times 10^{-6} \Omega m$ olarak ölçülmüştür. Gümüş katkılı iletken mürekkeplere kıyasla bakır elementi de aynı iletkenlik değerlerine sahiptir ve gümüş oranla daha ucuz bir malzemedir. Bunlara rağmen bakırın önemli dezavantajı hızlı oksidasyon olmasıdır. Mürekkep içerisindeki bakırın havayla oksidasyonunu önlemek için yardımcı malzemeler kullanılmaktadır. Bakırın oksidasyonunu engellemek için ekstra işlemlerin yapılmaması halinde bakırın uygulama alanları sınırlı kalmaktadır [30]. Bakırın uygulama alanlarını genişletebilmek amacıyla çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir [32]-[36]. Gümüş ve altın elementinin yüksek maliyetli olması ve gümüşün iyon migrasyonunun fazla olması basılı elektroniklerde kullanımını kısıtlamaktadır. Bu yüzden bakır elementi bu tür uygulamalar için gelecek vaat etmektedir [28].

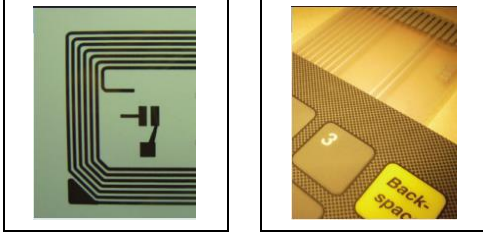
Bakır uygulamasının bulunduğu başka bir çalışma Cheng ve diğ. [28], tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada basılabilir elektroniklerde bakır nano parçacık mürekkeplerin dezavantajını ortadan kaldırmak için antioksidan bakır nano parçacık sentezlemişlerdir. Çalışmalarında kullanılan malzemeler çevre dostu ve seri üretime uygun malzemelerdir. Üretilen bakır nano parçacık iletken mürekkep esnek Poliimid (PI) üzerine basılmıştır. Baskı sonrası uygun değer sinterleme sıcaklığı ve süresi için 350 °C ve 400 °C, 30 dk. olarak tespit edilmiştir.

Khan ve diğ. [37], ise biyo elektroniklerin geliştirilmesi amacıyla altın elektrot üretimi yapmışlardır. Bunun için inkjet baskı tekniği ile altın nano parçacıklı mürekkep plastik yüzeye elektrot olarak basılmıştır. Baskı sonrası 200 °C'de sinterleme uygulanmıştır.

2.3 Karbon nanotüpler (CNTs) ve Grafen iletken mürekkepler

Kristal grafitlerden oluşan hegzagonal örgüdeki karbon atomlarının oluşturduğu silindirik yapılar olan karbon nanotüpler (CNTs) ilk olarak 1994 yılında tek katmalı CNT biçiminde Japonya'da üretilirken IBM tarafından ise 1996'da üretilenmiştir. Karbon siyahı ise mikron altı ebatlarda, yüksek yüzey alanına sahip bir malzemedir. Diğer taraftan grafen de tek katmanlı mikron ebatlarında ve katmanları boyunca iletkenlik özelliğine sahip bir malzemedir [38]. Karbon nanotüpler sahip oldukları özelliklerinden dolayı son zamanlarda fazla ilgi gören malzemeler arasındadır. Özellikle, elektriksel iletkenlik özelliklerinden dolayı transistörler, RFID [39], sensörler [40]-[42], fotonikler gibi birçok yenilikçi alanlarda kullanılmaktadır [43]. Düşük maliyetli kontaktörler ve tamamlayıcı direnç sistemleri için nano karbon mürekkepler geliştirilmiştir. Bu mürekkepler çeşitli elektrik devrelerinin

oluşturulmasına fırsatlar sunmakta ve bu alanda fiyat açısından da öne çıkmaktadır [44].



Şekil 1: Methode Electronics™ karbon mürekkep uygulamaları [44].

Grafen ve karbon siyahından meydana gelen iletken karbon malzemeler, batarya üretimi, süper kapasitör, elektrokimyasal sensörler, enerji toplama sistemleri gibi basılı elektronik uygulamalarında mürekkep ya da kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır [38]. Son zamanlarda esnek mantık devreleri, nanoüreteçler ve güneş pili, gerinim ve dokunsal sensörler, biyo ilhamlı araçlar gibi pek çok alanda grafen esaslı elektroniklerin kullanıldığı görülmektedir [45]. Çözültüler içerisinde grafen parçacıkların geniş yüzey alanı ve düzgün birikim özellikleri göstermesi serigrafi baskı, inkjet baskı ve püskürtme baskı gibi tekniklerin kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Fan ve diğ. [46] çalışmalarında açıkladıkları yöntemle, karbon nanotüp esaslı mürekkep üretimi yapmışlardır. CNT mürekkep, inkjet baskı tekniği ile kâğıt üzerine basılmış (Şekil 2) ve iletkenlik parametreleri dijital ohmmetre ile değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda CNT konsantrasyonu arttıkça yüzey direncinde azalma gözlenmiştir.



Şekil 2: Çok katmanlı karbon nano tüp uygulaması [46].

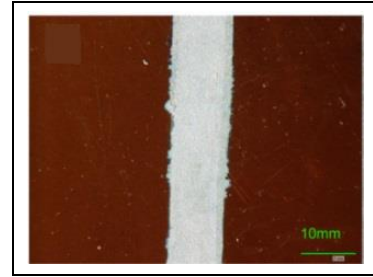
Menon ve diğ. [11] çalışmalarında geliştirdikleri çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT) formülasyonunda çözücü olarak etanol, katkı malzemesi olarak MWCNT, bağlayıcı (binder) olarak polivinilpirolidon (PVP) ve birikinti önleyici (dispersant) olarak sodyum dodesil sülfat (SDS) kullanmışlardır. Serigrafi baskı tekniğini kullandıkları çalışmada, mürekkep konsantrasyonu ağırlıkça % 9 olarak ayarlanmıştır. Basılı MWCNT oda sıcaklığında sertleştirme işlemi yapılmış ve bu özelliğinden dolayı, yüksek sinterleme işlemi gerektiren diğer mürekkeplere alternatif olarak gösterilmiştir.

Phillips ve diğ. [38], çalışmalarında farklı grafit ve karbon siyahı oranlarında mürekkeplerin iletkenliklerini incelemişlerdir. Polietilen tereftalat (PET) üzerine serigrafi baskı tekniği ile basılan mürekkepler 100 °C'de 30 dk. sinterleme işlemine maruz bırakılmıştır. Çalışmada karbon siyahı ve grafitin serigrafi baskı tekniği ile iletken mürekkep uygulamalarında kullanılabileceği gösterilmiştir.

2.4 Kompozit iletken mürekkepler

Kompozitler farklı maddelerin istenilen amaca yönelik, belli düzende bir araya getirilmesi ile hazırlanan malzemelerdir. Kompoziti oluşturan maddelerin arasında birincil kimyasal etkileşimler bulunmaz ve çoğu kez kompozitteki bileşenlerin birbirleri ile temas ettiği noktalar gözle ayırt edilebilir. Kompozit malzemeleri hazırlamaktaki temel amaç, değişik maddelerin iyi özelliklerini tek bir yapı altında birleştirebilmektir. Metal nano parçacık iletken mürekkeplerin bazı dezavantajlarından dolayı organometalik mürekkepler geliştirilmiştir. Fakat bu mürekkeplerinde yüzeye yapışma ve direnç/iletkenlik gibi bazı özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bunun için kompozit iletken mürekkepler geliştirilmiştir.

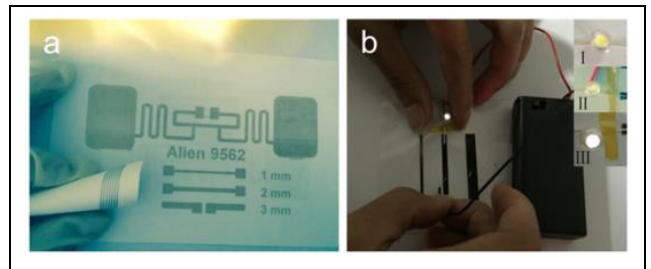
Yang ve diğ. [47], çalışmalarında, nano gümüş/organik gümüş kompozit iletken mürekkep sentezi yapmışlardır. Kompozit iletken mürekkep inkjet baskı tekniği ile şekil 3'te görüldüğü gibi Poliimid (PI) film üzerine basılmış ve 250 °C 30 dk. sinterleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 3: PI film üzerine Nano-Organik gümüş mürekkep inkjet baskı [47].

Chen ve diğ. [48], çalışmalarında nano gümüş/polivinilpirolidon kompozit iletken mürekkep sentezi yapmışlardır. Kompozit iletken mürekkep inkjet baskı tekniği ile kâğıt üzerine basılmıştır. Baskı sonrası UV sertleştirme süresi 1dk olarak ayarlanmıştır.

Zang ve diğ. [23], çalışmalarında gümüş nano parçacıklarını indirgenmiş grafen oksit (RGO) yüzeyine bağlayarak kompozit iletken mürekkep sentezi yapmışlardır. Kompozit iletken mürekkep PET yüzeyine inkjet baskı tekniği ile basılmış ve 100 °C' de 30 dk. sinterleme işlemi yapılmıştır. Şekil 4a, basılan esnek elektronikleri, şekil 4b ise elektrik iletkenliğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlarda basılabilir esnek elektronikler için uygun veriler elde edilmiştir.



Şekil 4: Kompozit iletken mürekkep inkjet baskı tekniği [23].

3 E-Tekstillerde baskı teknikleri

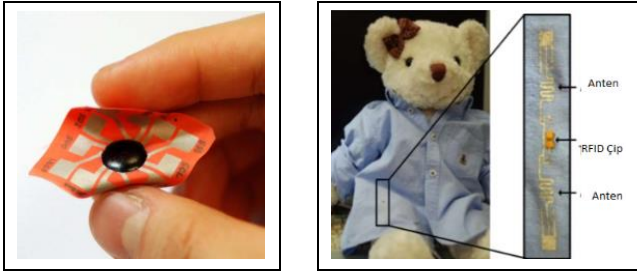
Akıllı ve iletken malzemelerin baskı yöntemleri ile birlikte kullanılabilir olması akıllı malzeme/ürün projelerinin artmasına imkân sağlamıştır. Giyilebilir malzemeler alanında yayınlanan çalışmalarda da 2000-2018 yılları arasında ciddi bir artış olduğu gözlenmiştir [12],[49]-[60]. Yapılan çalışmalar

incelendiğinde E-tekstiller alanında özellikle serigrafi ve inkjet baskı tekniklerinin daha sıklıkla kullanıldığı görülmüştür.

3.1 Serigrafi baskı tekniği

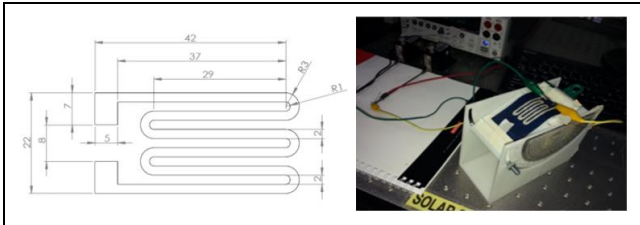
Serigrafi baskı tekniğinde istenilen desenin oluşturulmasının kolay olması elektrik ve elektronik alanında sıklıkla kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Düzlemsel ve dairesel [elek] olarak uygulanabilir [61] olan bu baskı işleminde karbon dışında, iletken, dielektrik ve hatta yüksek fonksiyonel malzemeler kullanılabilir [38]. Serigrafi baskı, tekstil anten üretimleri için gerekli baskı kalınlığı, baskı tekrarı gibi olanaklar açısından da oldukça uygun bir araçtır [62].

Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde, Rangel ve diğ. [63] çalışmalarında karbon siyahı ve grafit karışımı mürekkep ile naylon yüzey üzerine serigrafi baskı tekniği kullanmışlardır. Kim ve diğ. [8] ise, çalışmalarında giyilebilir düzlemsel devre kartı için serigrafi baskı ve püskürtme tekniğini kullanmışlardır. Bu çalışmada gümüş içeren iletken baskı patı (macun) tekstil malzemelerine serigrafi baskı ile uygulanmış, püskürtme prosesinde altın kullanılmıştır. Çalışmada birçok kumaş test edilmiş ve en iyi sonuç polyester kumaşa gözlenmiştir. Tasarlanan devrelerin kumaş üzerine aktarılmasıyla oluşan kumaş devre kartları giyilebilir sistemlerin temelini oluşturmuştur (Tablo 1). Çalışmada üretilen prototip uygulamalar Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5: Kumaş çip ve anten tasarımı [8].

Khironidin ve diğ. [18] çalışmalarında, ticari olarak bulunabilen gümüş iletken mürekkep (RS186-3600) kullanarak serigrafi baskı tekniği ile dokuma pamuk, polyester ve naylon tekstil malzemelerine gerinim ölçer sensörü basmışlardır (Şekil 6). Basılan kumaşların sertleştirme işlemleri dijital ışık işleme (DLP) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, tek kat baskı işleminin sertleştirilmesi sonucunda direnç değerlerinde dalgalanma görülmüştür. Çift kat baskı işleminin sertleştirilmesi ile direnç değerlerinde tutarlılık gözlenmiştir. Çalışmanın sonucunda kullanılan mürekkebin ve uygulanan sinterleme işlemlerinin esnek giyilebilir elektroniklerin geliştirilmesine imkân sağladığı düşünülmektedir (Tablo 1).

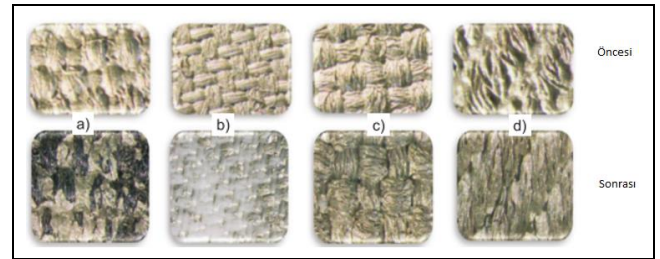


Şekil 6: Esnek gerinim ölçer sensör [18].

Filipowska ve diğ. [64], farklı tekstil yüzeylerine çeşitli iletken malzemeler kullanarak serigrafi baskı yöntemiyle iletken hatlar oluşturmuşlardır. Çalışmada farklı tekstil malzemesi olarak pamuk dokuma, polyester dokuma, pamuk/polyester dokuma, polyester dokusuz yüzey ve pamuk örme yüzey kullanılmıştır.

İletken mürekkep olarak gümüş, kobalt, demir (3) oksit nano parçacıkları, tek katmanlı karbon nanotüp (SWCNT) ve çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT) kullanılmıştır. Bu malzemelerin serigrafi baskı patı haline getirilmesi için ıslatıcı, bağlayıcı (binder), çapraz bağlayıcı ve kıvamlaştırıcılar kullanılmıştır. Yapılan çalışmada en düşük yüzey direnci MWCNT ile elde edilmiştir. Kumaş yapıları arasından dokuma kumaş ve dokusuz yüzeyler iyi sonuçlar gösterirken örme yüzeylerdeki esneme davranışından dolayı iletken yollarda kırılmalar oluştuğu gözlenmiştir.

Kazani ve diğ. [65], çalışmada gümüş esaslı elektro iletken mürekkepleri kullanmıştır. Baskı yapılan yüzeyler dokuma kumaş olarak seçilmiştir. 14 farklı kumaş yapısı üzerinde 2 farklı gümüş esaslı iletken mürekkep, serigrafi baskı tekniği ile uygulanmıştır. Serigrafi baskı işleminde her bir numune için 10 kez rakle çekim işlemi yapılmıştır. Sürtünme testi sonrasında kumaşların iletkenliğinde düşüş gözlenmiştir. İncelenen kumaşların mürekkebi absorpsiyonu sürtünme testinin sonucunu etkilediği görülmüştür. Yıkama testi sonrası kumaşların yarısına yakının iletkenliğini kaybettiği görülürken termoplastik poliüretan (TPU) kaplı kumaşların iletkenliklerini korudukları belirtilmiştir (Tablo 1). Şekil 7'de yıkama öncesi ve sonrası etkiler yer almaktadır.

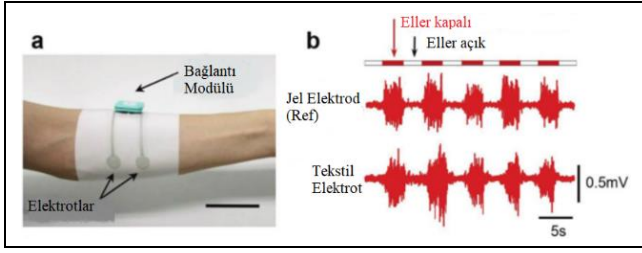


Şekil 7: İletken mürekkep baskılı kumaşların yıkama öncesi ve yıkama sonrası görünümü [65].

Furtak ve diğ. [56], tekstil tabanlı solunum sensörü çalışmalarında serigrafi baskı tekniğini kullanmışlardır. Çalışmada iletken malzeme olarak karbon nanotüp baskı patı, fotobaslatıcı ve alifatik üreten akrilat kullanılmıştır. Fotobaslatıcı ve alifatik üreten akrilat yardımcı malzemeleri sayesinde UV sertleştirme işlemi sonucunda akrilatlar çapraz bağlı bir hale dönüşmüştür. CNT baskı patı polyester/poliüretan ve poliamid/elastan çözgülü örme kumaş yüzeyine aktarılmıştır. 30 °C'de ön kurutma işleminden sonra UV sertleştirme işlemi ile çapraz bağlama gerçekleştirilmiştir. Basılan kumaşın yıkama testleri 20 tekrar olarak yapılmış ve sonucunda iletkenlik değerlerinde düşüş görülmüş fakat bu azalışın solunum sırasında kaydedilen minimum ve maksimum pik değerlerini önemli ölçüde etkilemediği açıklanmıştır. Sensörler solunum değerlerinin ölçülebilmesi için göğüs çizgisi ve göğüs çizgisi altı olmak üzere iki farklı yere basılmıştır.

Jin ve diğ. [66], ise gümüş/floro-elastomer karışımı mürekkebi 30 denye naylon ve poliüretan örme kumaş yüzeyine serigrafi baskı tekniği ile basmışlardır. Örme kumaş yapısı yüksek esneme özelliğinden dolayı ve spor giyim alanlarında yaygın kullanılmasından dolayı tercih edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda fiziksel açıdan sağlam ve kolay basılabilen elektromiyografi (EMG) görüntüleme amaçlı ürün tasarımı yapılmıştır (Şekil 8), (Tablo 1).

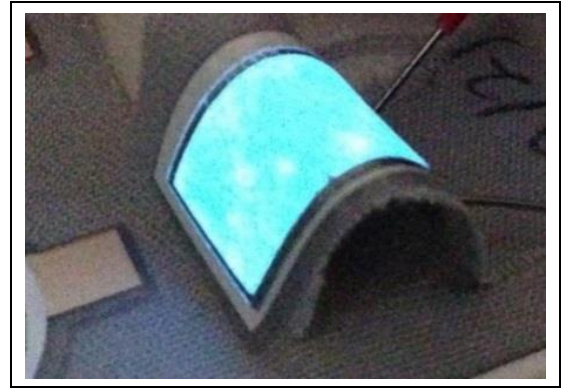
Paul ve diğ. [67], biyo potansiyel görüntüleme (EKG, EOG, EMG) amacıyla tekstil elektrotların geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Serigrafi baskı işleminin kalitesini arttırmak amacıyla tekstil yüzeyi poliüretan ile kaplanmıştır [68].



Şekil 8: EMG ölçümü için cildi saran kompresyon kıyafet [66].

Böylece daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Elektrotların oluşturulması için gümüş katkılı iletken mürekkep serigrafi tekniği ile basılmıştır. Çalışmada kullanılan iletken mürekkebin düşük sıcaklıklarda sinterlenebilmesi, tekstil yüzeylerinde kullanılmasına olanak sağlamıştır. Gümüş elektrotların sürtünme gibi fiziksel şartlardan etkilenmemesi için iletken kauçuk ile üzeri kapatılmıştır.

Vos ve diğ. [69], çalışmalarında pamuk/polyester karışımı kumaş üzerine elektrolüminesans lamba basmayı hedeflemişlerdir (Şekil 9). %65/%35 oranında polyester/pamuk kumaş üzerine altı katman halinde serigrafi baskı işlemi uygulanmıştır. Mürekkeplerin sertleştirme sıcaklıkları 130 °C'den az olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9: Elektrolüminesans dokuma kumaş [69].

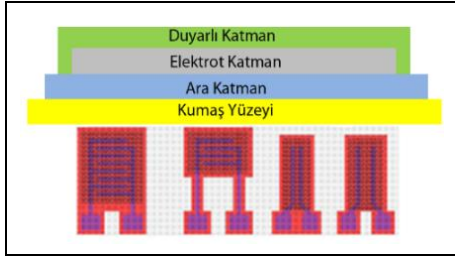
Almusallam ve diğ. [70] kurşun zirkonat titanat (PZT)/polivinilidinden florür (PDVF) polimer kompozitini serigrafi baskı tekniği ile esnek e-tekstillere üretiminde kullanmışlardır. Çalışmada 12/1 oranında PZT/polimer en uygun karışım oranı olarak tespit edilmiştir. PZT/polimer piezoelektrik malzemelerin, duyarlı elektronik malzemelerin üretiminde önemli bir yere sahip olduğu gösterilmeye çalışılmıştır.

Tablo 1: E-Tekstillerde serigrafi baskı tekniği uygulamaları.

Ref.	Malzeme	Direnç/İletkenlik	Uygulama Türü	Basılan Yüzey	Sinterleme Sıcak	Sinterleme Süresi	Baskı Kalınlığı	Çalışma Amacı
[8]	Gümüş ve Altın	13.35Ω/m	Serigrafi ve Püskürtme	PET kumaş	-	-	10 µm	RFID için kumaş yapılı anten
[17]	Gümüş mürekkep Acheson Electrodag® PM-406	2.5-0.05 Ω	Serigrafi baskı	PE-Al-PET	80-100-120 °C	5-10-15 sn.	13-15 µm	-
[18]	Gümüş mürekkep RS186-3600	Co: 40/75 Ω PES: 20/50 Ω Nylon:20/25Ω	Serigrafi baskı	Pamuk-PET-Nylon	Fırın:100 °C DLP:35-40 °C	Fırın: 5-30 dk. DLP: 5-30 dk.	46-49.5 µm	Gerinim ölçer sensörü
[31]	Monodispers gümüş NPs %30	2×10-5Ω m	Serigrafi baskı	Pamuk kumaş	60 °C	30 dk.	-	Esnek Elektronikler
[50]	Gümüş/gümüş klorid mürekkep (E2414, Ercon, Wareham, MA) Karbon mürekkep (E3449, Ercon, Wareham, MA)	-	Serigrafi	PET, Pamuk, Gore-tex	125 °C	30 dk.	-	DNT ve TNT patlayıcılar için sensör
[56]	Karbon Nanotüp	-	Serigrafi	PET/PU çözgüdü örme PA/Elas. Çözgüdü örme	30 °C ön kurutma UV sertleştirme	-	-	Solunum sensörü
[58]	Gümüş baskı patı Fabinks-TC-AG1	-	Serigrafi	PET/Pamuk	130 °C	10 dk	5 µm	Nem Sensörü
[63]	Karbon siyahı ve Grafit karışımı çözelti	-	Serigrafi baskı	Nylon	338 °K	-	100 µm	-
[66]	Gümüş/Floroelastomer mürekkep	0.06 Ω sq-1	Serigrafi baskı	Nylon ve PU Örme kumaş	90 °C 160 °C	2 sa. 30 sn.	-	EMG görüntüleme sistemi
[65]	Electrodag PF 410 5025 gümüş mürekkep	0.030 - 0.129 Ω/sq 0.020-0.104 Ω/sq.	Serigrafi	Pamuk, PET, Poliamid dokuma kumaşlar	120 °C	15 dk. 5-7 dk.	-	Esnek, iletken giyilebilir elektronikler
[67]	Fabink-UV-IF1 Karbon siyahı katkılı kauçuk	-	Serigrafi	Pamuk/PET	120 °C 100 °C	10 dk. 30 dk.	5 µm 30 µm	Biyo potansiyel algılama sistemi
[69]	-	-	Serigrafi	Pamuk/PET	<130 °C	-	-	Elektrolüminesans
[71]	Nano gümüş kolloid/ PVP-WPU/ kalınlaştırıcı	0.197 Ω/cm	Serigrafi	PET Kumaş	Oda sıcaklığı	-	1.9 mm/ 20 µm	-
[64]	Gümüş, kobalt, Demir 3 oksit, SWCNT, MWCNT	6.5×10 ⁵ 2.9×10 ¹²	Serigrafi	Pamuk dokuma/PET dokuma/Pamuk/PET dokuma PET dokusuz yüzey Pamuk Örme	160 °C	30 dk.	-	-

Wang ve diğ. [50] nitro aromatik patlamaların tespiti için tekstil temelli sensör geliştirmeye çalışmışlardır. Bunu için pamuk, polyester ve Gore-tex teknik kumaşlara serigrafi baskı tekniği uygulanmıştır. Geliştirilmek istenen sensör için gümüş/gümüş klorür (E2414, Ercon, Wareham, MA), karbon (E3449, Ercon, Wareham, MA) ve yalıtkan mürekkepler (E6165, Ercon, Wareham, MA) kullanılmıştır. Baskı işlemi ardından sinterleme için 125 °C'de 30 dk işlem uygulanmıştır. Yapılan çalışmada sensör için en uygun kumaşın GORE-TEX olduğu belirtilmiştir.

Kutzner ve diğ. [58] doğrudan polyester/pamuk karışımı kumaş üzerinde serigrafi baskı yöntemiyle nem sensörü basmışlardır. Bunun için öncelikle kumaş yüzeyinin pürüzlülüğünü azaltmak için poliüretan tabanlı ara katman 4 kat olarak kumaş yüzeyine uygulanmıştır (Şekil 10).



Şekil 10: Nem sensörü için uygulanan farklı baskı desenleri ve uygulama aşaması [58].

Her bir katman sonrasında UV sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra gümüş içerikli baskı patı yarı otomatik serigrafi baskı makinası (DEK 248) ile kumaş yüzeyine aktarılmıştır. Sinterleme işlemi 130 °C'de 10 dk'da gerçekleştirilmiştir. Neme duyarlı malzeme olarak Nafion çözeltisi mikro pipetleme yöntemi ile uygulanmıştır. Geliştirilen nem sensörü %30-%90 relatif nem ve 15-35 °C sıcaklıklar arasında test edilmiştir. Çalışmanın sonucunda elde edilen sensörün fiziksel etkilere karşı hassas olduğu görülmüştür. Bu problemin aşılması amacı ile ilerleyen çalışmalarda neme duyarlı katman üzerine nefes alabilir membran uygulaması yapılması amaçlanmaktadır.

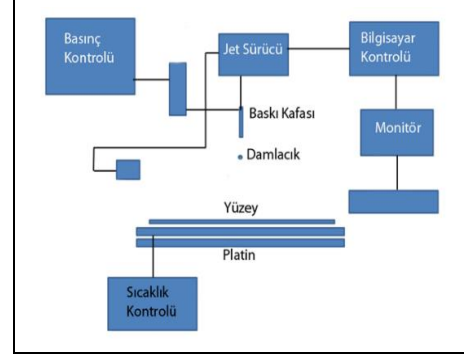
Yukarıda açıklanan elektronik tekstil uygulamaları amaç, kullanılan malzeme, erişilen iletkenlik değeri, uygulama türü, baskının yapıldığı yüzey çeşidi, sinterleme sıcaklığı, süresi ve baskı kalınlığı yönlerinden incelenmiş ve Tablo 1'de özetlenerek sunulmuştur.

3.2 İnkjet baskı tekniği

İnkjet baskı tekniği temel olarak sürekli ve talebe bağlı damla miktarlı (DOD-Drop on Demand) inkjet olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılmaktadır [43]. Şekil 11'de inkjet baskının şematik gösterimi verilmiştir. Bu teknik birçok avantajları barındırdığı gibi bazı uygulama zorluklarını da içermektedir. Bunun ilk aşaması kullanılan mürekkebin formülasyonudur [73]. İnkjet baskıda kullanılacak olan mürekkebin birçok parametrelerde kontrol edilmesi gerekmektedir. Genellikle, mürekkep düşük yüzey gerilimi ve düşük viskoziteye sahip olmalıdır [43]. İnkjet baskı tekniği iletken yolların oluşturulmasında gümüş ve bakır nano parçacıklı mürekkepleri kullanılmaktadır. Karbon nanotüp mürekkepler de metalik mürekkepler gibi bu teknikte kullanılabilir. Ayrıca, bu süreç, çevreye zarar veren aşındırma malzemelerinin kullanıldığı aşamaları da içermemektedir [72].

Calvert ve diğ. [49] iletken polimer ve iletken kompozitlerin tekstil tabanlı gerinim sensörü olarak kullanılabilirliğini

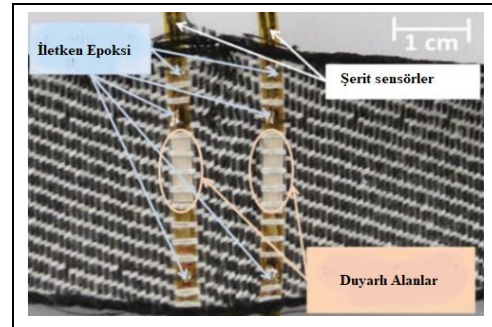
araştırmışlardır. Sensörün geliştirilmesi için PEDOT: PSS ve hidrojel içerikli karbon siyahı, inkjet baskı yöntemiyle tekstil yüzeyi üzerine aktarılmıştır. Uygulanan gerinim testleri sonucunda hassas değişimler gözlenmekle birlikte döngüsel gerinim uygulamalarında dokuma kumaşın geometrisinden kaynaklanan kararsızlıklar görülmüştür.



Şekil 11: İnkjet baskı tekniği teknik gösterimi [73].

Mattana ve diğ. [55] dokuma kumaş yapısında nem ve sıcaklık sensörü üzerinde çalışmışlardır. Nem ve sıcaklık sensörünün geliştirilmesi için fotolitografi ve inkjet baskı teknikleri kullanılmış ayrıca avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada diğer çalışmalara kıyasla farklı bir yol izlenerek baskı işlemleri doğrudan kumaş üzerine yapılmamıştır. Poliimid malzeme üzerine basılan sensörler daha sonra dokuma aşamasında kumaşa dahil edilmiştir (Şekil 12).

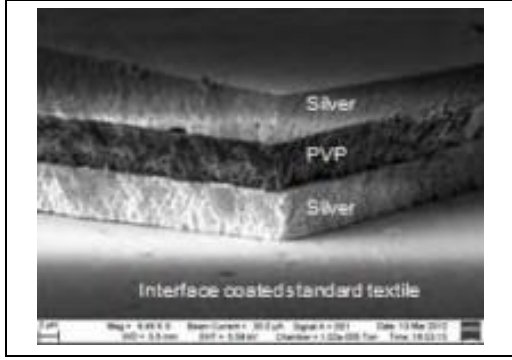
Her iki yöntem sıcaklık ve nem sensörü açısından incelendiğinde, fotolitografi tekniğinin daha iyi rezistans ve kapasitans değerleri sergilediği görülmüştür. Diğer yandan inkjet baskı tekniği mekanik baskılara karşı iyi bir sağlamlığa sahip olduğunu ispatlamıştır. Ayrıca düşük maliyet ve geniş uygulama alanına sahip olması da bir ayrıcalıktır.



Şekil 12: Dokuma kumaş yapısına dahil edilmiş nem ve sıcaklık sensörü [55].

Weremczuk ve diğ. [54] tekstil tabanlı nem sensörünün akıllı tekstiller alanındaki potansiyel kullanım imkânını ortaya koymuşlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışmada nem sensörünün geliştirilmesini hedeflemişler ve gümüş iletken mürekkep ve Nafion çözeltisini (sülfonat tetrafloraetilen) tekstil yapısı üzerine inkjet baskı tekniği ile aktarmışlardır.

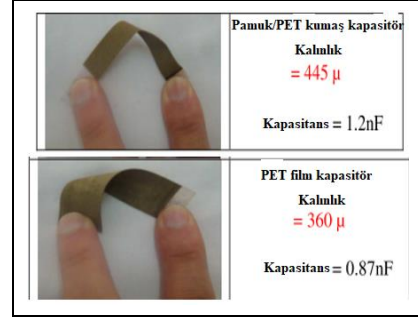
Li ve diğ. [74] ise, çalışmalarında esnek kapasitör üretimi için %65/%35 Polyester/pamuk karışımı dokuma kumaşa inkjet baskı tekniği ile gümüş (Ag) ve polivinil fenol (PVP) mürekkepleri kullanmıştır. Çalışmada Ag/PVP/Ag olarak üç katmanlı baskı yapılarak kapasitör oluşturulmuş (Şekil 13) ve bu baskıda PVP yalıtkan mürekkep olarak kullanılmıştır (Tablo 2).



Şekil 13: Üç katmanlı inkjet baskı ile kapasitör tasarımı [74].

Bidoki ve diğ. [75], inkjet baskı tekniği ile gümüş katkılı mürekkepler üzerinde çalışmıştır. Araştırmada, pamuk,

polyester ve pamuk/polyester karışımı bezayağı dokuma kumaşlar baskı yüzeyi olarak kullanılmıştır (Şekil 14)(Tablo 2).

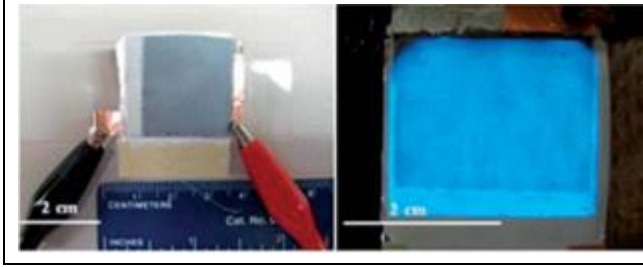


Şekil 14: Pamuk polyester ve polyester film üzerine inkjet baskı tekniği [75].

Tablo 2: E-Tekstillerde inkjet baskı tekniği uygulamaları.

Ref.	Malzeme	Direnç/İletkenlik	Uygulama Türü	Basılan Yüzey	Sinterleme Sıcak	Sinterleme Süresi	Baskı Kalınlığı	Çalışma Amacı
[29]	Grafen NPs mürekkep PEDOT:PSS	0.435×10^5 Sm	Mürekkep baskı	İpek kumaş	-	-	-	Havacılık için anten tasarımı
[49]	Hidrojel Karbon siyahı U5603	4×10^3 S/m	HP inkjet baskı	Pamuk, naylon 66	-	--	-	Gerinim sensörü
[54]	Gümüş mürekkep SunTronic [®]		İnkjet baskı Dimatix DMP 2831	Tekstil	200 °C	-	-	Nem sensörü
[55]	U5603 gümüş mürekkep Gümüş Mürekkep (U5714)		Fotolitografi inkjet baskı	Poliimid	290 °C	30 dk.	5 µm	Nem ve sıcaklık sensörü
[62]	Gümüş Mürekkep (U5714)	$5.7 \Omega/\text{sq}^{-1}$	İnkjet baskı Dimatix DMP-2831	%65/%35 PET/Pamuk	150 °C	30 dk.	3 µm	Tekstil yama anten
[72]	Gümüş Mürekkep (U5714)	-	İnkjet baskı Dimatix DMP-2831	Kapton, Esnek kumaş PET/PAM. Kumaş Kaplama PET/PAM. kumaş	150 °C 175 °C 200 °C 225 °C	45 dk. 15 dk. 10 dk. 3 dk.	3 µm	Tekstil anten tasarımı
[74]	Ag/ PVP/Ag	-	İnkjet baskı	%65/%35 Polyester /pamuk kumaş	150 °C (Ag) UV (PVP)	-	4-5 µm	Kumaş kapasitör
[76]	CNT/PEDOT: PSS İletken mürekkep	$245 \Omega \text{sq}^{-1}$	İnkjet baskı	PET ve Nylon kumaş	75 °C	1 sa.	-	Elektrolüminesans tekstiller
[75]	Gümüş mürekkep	$0.034-5.54 \times 10^{-5}$ S/m	İnkjet Transfer baskı (Ofis yazıcı)	Pamuk, PET Pamuk-PET	150 °C	15 sn.	5-7.5 µm	-
[79]	Reaktif Gümüş mürekkep Gümüş Katkılı mürekkep DGP 40LT-15C	$0.116-0.622 \Omega/\text{sq}^{-1}$	İnkjet baskı	PAN, PP, PET, Pamuk/PET, Pamuk/ Yün	90 °C	15 dk.		Tektronik uygulamaları
[86]	Gümüş Nitrat ve askorbik asit	$1.43-2.08 \times 10^6$ S/m	İnkjet baskı Dimatix DMP 2831	Pamuk, Pamuk/Polyester Luminox 310	130 °C	20 dk.	20/8 µm	Tekstil temelli yer tespit devresi
[87]	Gümüş Nitrat ve askorbik asit	1.2417×10^4 S/m	İnkjet baskı	PET	50 °C	-	40 µm	-
[78]	Paladyum mürekkep	2632 S/m	İnkjet baskı ve Elektroliz kaplama	PET	60 °C	30 dk.	-	Esnek yapılı Anten

Hu ve diğ. [76], ise inkjet baskı tekniği ile CNT/PEDOT: PSS kompozit iletken mürekkep üzerinde araştırmalar gerçekleştirmiştir. Baskı yüzeyi olarak PET ve Naylon 6.6 kumaşlar tercih edilmiştir (Şekil 15). Çalışmada elektrolüminesans tekstillerin geliştirilmesi amaçlanmıştır (Tablo 2).



Şekil 15: Tekstil tabanlı elektrolüminesans araçlar [76].

Chauraya ve diğ. [72], giyilebilir haberleşme araçları geliştirmek amacıyla tekstil temelli dipol anten tasarımı yapmışlardır. Çalışmada inkjet baskı tekniği ile gümüş esaslı mürekkep (U5714) kullanılarak polyester/pamuk karışımı kumaş üzerine anten tasarımı basılmıştır. Çalışmada, tekstil malzemelerin yüzeylerinin kaba olmasından dolayı anten verimliliğini arttırmak amacıyla çeşitli yollar denenmiştir (Tablo 2).

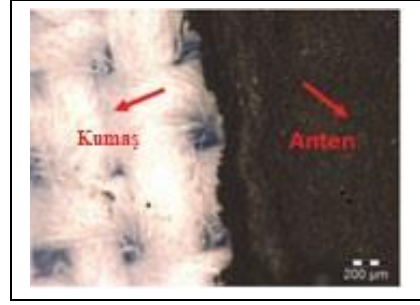
Whittow ve diğ. [62] E-tekstillerde kullanılmak üzere gümüş esaslı mürekkep ve inkjet baskı tekniği kullanarak mikro şerit yama anten tasarımı gerçekleştirmiştir. Çalışmada % 65/%35 polyester/pamuk karışımı kumaş baskı yüzeyi olarak seçilmiş ve 2 katmanlı baskı işleminin anten verimliliği açısından daha uygun olduğu ortaya konulmuştur (Tablo 2).

Mohtaram ve diğ. [78], diğer araştırmacılar gibi tekstil tabanlı anten tasarımı için polyester kumaşı baskı yüzeyi olarak tercih etmişlerdir. Çalışmada çok adımlı bir proses gerçekleştirilmiştir. Polyester kumaşa inkjet baskı işleminden önce sodyum hidroksit (NaOH) ile pişme işlemi uygulanmış sonrasında kalay 2 klorür (SnCl₂) ve hidroklorik asit (HCl) ile muamele edilmiştir. Ön işlem görmüş PET kumaş üzerine paladyum (Pd) mürekkep ile inkjet baskı tekniği kullanılarak anten baskı işlemi yapılmıştır. Bu işlem sonrasında nikel (Ni) elektroliz kaplama işlemi yapılarak inkjet baskı ve elektroliz kaplama yöntemleri birlikte kullanılmıştır.

He ve diğ. [77], çalışmalarında baskı teknolojisinde önemli bir yeri olan 3D baskı tekniği ile (Şekil 16) su bazlı grafen mürekkebi pamuklu kumaş üzerine baskı işlemini gerçekleştirmişlerdir. Tekstil esaslı radyo frekansı tanımlama (RFID) anten tasarımının nem testi ile performansı değerlendirilmiştir. Tasarlana grafen anten iyi derecede kablosuz (wireless) performansı göstermekle birlikte, nemden etkilenmediği ifade edilmiştir. (Tablo 2).

Stempien ve diğ. [79], yapmış oldukları çalışmada tektronik uygulamalarında kullanılmak üzere düşük sinterleme sıcaklığına ve yüksek iletkenliğe sahip mürekkep geliştirmeye çalışmışlardır. Bunun için reaktif gümüş mürekkep, [80]-[84]'de detaylı bir şekilde ifade edilen Tollen reaktifi ile sentezlenmiştir. Sentezlenen iletken mürekkep inkjet baskı tekniği ile 7 farklı kumaş üzerine 8 kat olarak basılmıştır. Baskı aşamasından önce kumaşların yüzey pürüzlülüğünü azaltmak amacı ile ticari olarak kullanılan yaygın olan Appretan-N 9415 ile terbiye işlemi yapılmıştır. Sertleştirme işlemi 90°C'de 15 dk' da gerçekleştirilmiştir. Basılan kumaşların yıkama ve kuru

temizleme işlemlerinden sonra iletkenlik değerlerindeki değişimler incelenmiştir.



Şekil 16: 3D baskı grafen anten tasarımı mikroskobik görüntüsü [77].

Stempien ve diğ. [85] polianilin (PANi) ve polipirol (PPy) iletken polimerlerin reaktif baskı tekniği ile farklı kumaş yapıları üzerine aktarımını amaçlamıştır. Poliakrilonitril (PAN), pamuk, polietilen tereftalat (PET), pamuk/PET, yün, pamuk/yün karışımı kumaşlar basılacak yüzey malzemesi olarak tercih edilmiştir. PANi ve PPy basılı iletken kumaşların elektromanyetik kalkanlama (EMI) özellikleri değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, PANi ve PPy'nin tekstil yüzeyine tutunmasını test etmek amacıyla yıkama ve kuru temizleme testleri gerçekleştirilmiştir.

Vaseem ve diğ. [86] ilk kez inkjet baskı tekniği kullanarak anten entegreli yer tespit devresini tekstil yapısı üzerine basmayı amaçlamışlardır. Kullanılan kumaşlar %100 pamuk, %65/%35 polyester/pamuk ve %85/%15 polyester/pamuk (Luminex 310) olarak tercih edilmiştir. Baskı sonrasında kumaşların yapısal özellikleri enstrümental analiz teknikleri ile incelenmiştir. ANYS bilgisayar programı sayesinde tekstil yapısı üzerinde ters F anten devresi optimize edilmiştir. Çalışmada, iletken mürekkep ile basılı anten devresi 4-6-8 kat olarak inkjet basılmış ve her biri için iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Baskı kat sayısı arttıkça iletkenlik değerlerinde artış görülmüştür. Üretilen anten kumaşın alan testleri sonucunda iletim uzunluğunun 55 m ve doğruluk mesafesinin 8 m olduğu görülmüştür.

Latifi ve diğ. [87], kâğıt ve polyester kumaş üzerine, yüksek iletkenlik değeri kazandırmak amacıyla, iki aşamalı inkjet baskı tekniği uygulamışlardır. İki aşamalı inkjet baskı için gümüş nitrat ve askorbik asit tercih edilmiştir. Deneysel aşamada 2-4 tekrar gümüş nitrat, 4-12 tekrar askorbik asit kumaş ve kâğıt yüzeye uygulanmış ve sonrasında doğrudan bir sertleştirme işlemine gerek kalmaksızın 50 °C'de kurumaya bırakılmıştır. Çalışmada en yüksek iletkenlik değeri için en uygun baskı tekrarları askorbik asit ve gümüş nitrat için sırasıyla 8 ve 3 olarak elde edilmiştir.

Yukarıda açıklanan elektronik tekstil uygulamalarında elektroniklerin basılması inkjet baskı tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalar amaç, kullanılan malzeme, erişilen iletkenlik değeri, uygulama türü, baskının yapıldığı yüzey çeşidi, sinterleme sıcaklığı, süresi ve baskı kalınlığı yönlerinden incelenmiş ve Tablo 2'de özetlenerek sunulmuştur.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada elektronik tekstillerde iletken mürekkep uygulamaları ve sıklıkla kullanıldığı görülen serigraf ve inkjet baskı teknikleriyle yapılan uygulamalar ayrı ayrı incelenmiştir.

Serigrafi baskı tekniği ile yapılan çalışmaların biyolojik sinyalleri algılama sensörleri ve gerinim sensör uygulamalarında kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda standart tekstil yüzeyleri kullanılmış ve düşük sıcaklıklarda (60-160 °C) sertleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Serigrafi baskı işlemi sonucunda 5-49.5 µm arasında baskı kalınlıkları elde edilmiştir. İnkjet baskı tekniği ile yapılan çalışmalar tekstil temelli anten tasarımları ve sensör uygulamaları alanında yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalarda standart tekstil yüzeyleri doğrudan ya da TPU ile kaplama yapılarak kullanıldığı görülmektedir. Baskı işleminden sonra sertleştirme işlemi düşük sıcaklıklarda (75-225 °C) gerçekleştirilmiştir. İnkjet baskı tekniği ile yapılan baskı işlemi sonucunda 3-20 µm arasında baskı kalınlıkları elde edilmiştir. Birden fazla tekrarda yapılan baskı işleminde tekrar sayısına bağlı olarak baskı kalınlıklarında artış görülmektedir. Kumaş yüzeyine uygulanan baskı işlem sayısı (tekrar sayısı) arttıkça iletkenlik değerlerinde artış olduğu görülmüştür.

İncelenen çalışmalarda tekstil yüzeyinin gözenekli yapıda ve esnek formda olması basılı devrenin verimliliğini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Tekstil yüzeyinin gözenekli yapısının TPU kaplanarak giderilmesiyle yüksek çözünürlükte baskı kalitesi elde edilmiştir. Bunun yanında elastomerik iletken mürekkeplerin kullanılması ile tekstil yapılarının esnemesinden kaynaklı problemler aşılmaya çalışılmıştır. Basılı E-tekstil uygulamalarında gümüş içerikli mürekkeplerin yanı sıra karbon siyahı ve iletken polimerlerinde kullanıldığı görülmüştür.

5 Kaynaklar

- [1] Cherenack KH, Kinkeldei T, Zysset C, Troster G. "Woven thin-film metal interconnects". *IEEE Electron Device Letter*, 31(7), 740-742, 2010.
- [2] Bilir MZ, Gürcüm BH. "Ballistic wearable electronic vest design". *Journal of Indian Textile*, 47(7), 1-22, 2017.
- [3] Zhu Z, Liu T, Li G, Li T, Inoue Y. "Wearable Sensor Systems for Infants", *Sensors*, 15 (2), 3721-3749, 2015.
- [4] Vallozzi L, Vandendriessche W, Rogier H, Hertleer C, Scarpello ML. "Wearable textile GPS antenna for integration in protective garments". *Antennas Propag. (Eucap), 2010 Proc. 4th Europe Conference*, Barcelona, Spain, 12-16 April 2010.
- [5] James DA. *Sensors and wearable technologies in sport technologies. Trends and approaches for implementation*. 1st ed. Singapore, Springer, 2016.
- [6] Simon C, Potter E, McCabe M, Baggerman C. "Smart Fabrics Technology Development". National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, A Nasa Innovation Fund Project Final Raport, 2010.
- [7] Castano LM, Flatau AB. "Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review". *Smart Material Structure*, 23(5), 1-27, 2014.
- [8] Kim H, Kim Y, Kim B. Ve Yoo HJ. "A wearable fabric computer by planar-fashionable circuit board technique". *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, Washington, DC, USA, 03-05 June 2009.
- [9] Jeong KS, Yoo SK. *Electro-Textile Interfaces : Textile-Based Sensors and Actuators*. Editors: Cho G. Smart Clothing Technology and Application, 89-111, USA, CRC Press, 2009.
- [10] Secor EB, Lim S, Zhang H, Frisbie CD, Francis LF, Hersam MC. "Gravure printing of graphene for large-area flexible electronics". *Advance Materials*, 26, 4533-4538, 2014.
- [11] Menon H, Aiswarya R, Surendran KP. "Screen printable mwcnt inks for printed electronics". *Research Advance*, 7(70), 44076-44081, 2017.
- [12] Molina-Lopez F, Briand D, De Rooij NF. "All additive inkjet printed humidity sensors on plastic substrate". *Sensors Actuators, B Chemical*, 166-167, 212-222, 2012.
- [13] Roberson DA, Wicker RB, Murr LE, Church K, Macdonald E. "Microstructural and process characterization of conductive traces printed from ag particulate inks". *Materials*, 4, 963-979, 2011.
- [14] Ouyang S, Yingtao X, Dongping W, Dalong Z, Xin X, Tan T, Fong, HH. "Surface patterning of pedot: Pss by photolithography for organic electronic devices". *Journal of Nanomaterial*, 2015-603148, 1-9, 2015.
- [15] Kong YC, Yu DP, Zhang B, Fang W, Feng SQ, "Ultraviolet-emitting ZnO nanowires synthesized by a physical vapor deposition approach". *Applied Physics Letters*, 78(4), 407-409, 2001
- [16] Gao M, Li L, Song Y. "Inkjet printing wearable electronic devices". *Journal of Material Chemical, C*, 5(12), 2971-2993, 2017.
- [17] Willfahrt A, Fischer T. "Improving the electrical performance and mechanical properties of conductive ink on thin compound substrate". *Journal of Print Media Technology Research*, 5, 7-14, 2016.
- [18] Khirotdin RK, Cheng TS, Mokhtar KA. "Printing of conductive ink tracks on textiles using silkscreen printing". *ARPN Journal of Engineering and Applied Science*, 11(10), 6619-6624, 2016.
- [19] Guerchouche K, Herth E, Calvet LE, Roland N, Loyez C. "Conductive polymer based antenna for wireless green sensors applications". *Microelectronic Engineering*, 182, 46-52, 2017.
- [20] Zielke D, Gogolin R, Halbich MU, Marquardt C, Lövenich W, Sauer R, Schmidt J. "Large-Area PEDOT: PSS/C-Si heterojunction solar cells with screen-printed metal contacts". *Solar RRL*, 2(3) 1-6, 2018.
- [21] Shin KH, Cho J, Jang J, Jang HS, Park ES, Song K, Kim SH. "Polypyrrole top-contact electrodes patterned by inkjet printing assisted vapor deposition polymerization in flexible organic thin-film transistors". *Organic Electronics*, 13(5), 715-720, 2012.
- [22] Kale BB, "Ink-Jet printed conducting polyaniline based flexible humidity sensor". *14th International Meeting on Chemical Sensors*, Nurnberg, Germany, 20-23 May 2012.
- [23] Zhang W, Bi E, Li M, Gao L. "Synthesis of Ag/Rgo composite as effective conductive ink filler for flexible inkjet printing electronics". *Colloids Surfaces A Physicochemical Engineering Aspects*, 490, 232-240, 2016.
- [24] Yao H, Fan Z, Cheng H, Guan X, Wang C, Sun K, Ouyang J. "Recent development of thermoelectric polymers and composites". *Macromolecular Rapid Communications* 39(6), 1-22, 2018.
- [25] Borghetti M, Serpelloni M, Sardini E, Pandini S, "Mechanical behavior of strain sensors based on PEDOT: PSS and silver nanoparticles inks deposited on polymer substrate by inkjet printing". *Sensors and Actuators A: Physical*, 243, 71-80, 2016.

- [26] Dearden AL, Smith PJ, Shin DY, Reis N, Derby B, O'brien P. "A low curing temperature silver ink for use in ink-jet printing and subsequent production of conductive tracks". *Macromolecular Rapid Communications*, 26, 315-318, 2004.
- [27] Rickerby J, Simon A, Jeynes C, Morgan TJ, Steinke JHG. "1.1, 1.5, 5.5-Hexafluoroacetylacetonate copper (I) poly (Vinylsiloxane)S as precursors for copper direct-write". *Chemical Material*, 18(10), 2489-2498, 2006.
- [28] Cheng C, Li j, Shi T, Yu X, Fan J, Liao G, Li X, Cheng S, Zhong Y, Tang Z. "A novel method of synthesizing antioxidative copper nanoparticles for high performance conductive ink". *Journal of Material Science Materials in Electronics*, 28(18), 13556-13564, 2017.
- [29] Kumar J, Basu B, Talukdar FA, Nandi A. "Graphene-Based wideband antenna for aeronautical radio-navigation applications". *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 5071(11), 1-9, 2017.
- [30] Kela L., Auvinen A, Tapper U, Hokkinen J. "Metallic nanoparticles for conductive inks". *Congreso Internacional De Metalurgia Y Materiales Sam-Conamet/Iberomat/Materia*, Santa Fe, Argentina, 21-24 October 2014.
- [31] Yu D, Wang Z, Wang W, Jiang Z. "Low temperature sintering nano-silver conductive ink printed on cotton fabric as printed electronics". *Progress in Organic Coatings*, 101, 604-611, 2016.
- [32] Lee JW, Han J, Lee DS, Bae S, Lee SH, Lee SK, Moon BJ, Choi CJ, Wang G, Kim TW. "2d single-crystalline copper nanoplates as a conductive filler for electronic ink applications". *Small*, 14(8), 1-7, 2018.
- [33] Ye S, Stewart IE, Chen Z, Li B, Rathmell AR, Wiley BJ. "How copper nanowires grow and how to control their properties". *Accounts of Chemical Research*, 49(3), 442-451, 2016.
- [34] Wei C, Liu Q. "Shape-, Size-, and density-tunable synthesis and optical properties of copper nanoparticles". *Crystengcomm*, 19(24), 3254-3262, 2017.
- [35] Kuroda K, Nakako H, Inada M, Noudou T, Kumashiro Y. "Development of copper materials and processing for printed electronics". *The Japan Institute of Electronics Packaging*, 5(1), 20-25, 2012.
- [36] Patil SA, Ryu CH, Kim H.S. "Synthesis and characterization of copper nanoparticles (Cu-Nps) using rongalite as reducing agent and photonic sintering of Cu-Nps ink for printed electronics". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 5(2) 239-245, 2018.
- [37] Khan Y, Pavinatto FJ, Liln MC, Liao A, Swisher SL, Mann K, Subramanian K, Maharbiz MM, Arias AC. "Inkjet-Printed flexible gold electrode arrays for bioelectronic interfaces". *Advance Functional Material*, 26(7), 1004-1013, 2016.
- [38] Phillips C, Al-Ahmadi A, Potts SJ, Claypole T, Deganello D, "The effect of graphite and carbon black ratios on conductive ink performance". *Journal of Material Science*, 52(16), 9520-9530, 2017.
- [39] Yang L, Orecchin G, Shaker G, Lee H, Tentzeris MM. "Battery-Free rfid-enabled wireless sensors". *MTT-S International Microwave Symposium*, Anaheim, CA, USA, 23-28 May 2010.
- [40] Consts-De E, Li J, Cabrera, CR. *Latest Advances in Modified/Functionalized Carbon Nanotube-Based Gas Sensors*. Editors: Suzuki S, Syntheses and Applications of Carbon Nanotubes and Their Composites, 337-366, Intech Open, 2013.
- [41] Anoshkin IV, Nasibulin AG, Mudimela PR, He M, Ermolov V, Kauppinen EI. "Single-Walled carbon nanotube networks for ethanol vapor sensing applications". *Nano Research*, 6(2),77-86, 2013.
- [42] Lorwongtragool P, Sowade E, Kerdcharoen T, Baumann RR. "All inkjet-printed chemical gas sensors based on cnt/polymer nanocomposites: comparison between double printed layers and blended single layer". *9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Thailand, 16-18 May 2012.
- [43] Tortorich R, Choi JW. "Inkjet printing of carbon nanotubes". *Nanomaterials*, 3(3), 453-468, 2013.
- [44] Methode Electronics, "Digital printable nano-ink technology inks formulated for critical electronic applications". USA Chicago, material raport, 2017.
- [45] Jang H, Park YJ, Chen X, Das T, Kim MS, Ahn JH. "Graphene-based flexible and stretchable electronics". *Advanced Material*, 28(22), 4184-4202, 2016.
- [46] Fan Z, Wei T, Luo G, Wei F. "Fabrication and characterization of multi-walled carbon nanotubes-based ink". *Journal of Materials Science*, 40(18), 5075-5077, 2005.
- [47] Yang ZG, Wang DY, Chang Y, Lu QS. "Nano-Organic silver composite conductive ink for flexible printed circuit". *Materials Technology: Advanced Performance Materials*, 30 (1), 54-59, 2015.
- [48] Chen GX, Chen YY, Cui YY, Chen QF, Chen T, Yang Y. "Morphology-Controlled fabrication of nano Ag/Poly (Vinyl Pyrrolidone) composites and their effect on electric conductive properties of Uv Ink". *Material Technology*, 31(1), 1-6, 2017.
- [49] Calvert P, Duggal D, Patra P, Agrawal A, Sawhney A. "Conducting polymer and conducting composite strain sensors on textiles". *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 484(1), 291-302, 2008.
- [50] Chuang MC, Windmiller JR, Santhosh P, Ramirez GV, Galik M, Chou TY, Wang J. "Textile-Based electrochemical sensing: effect of fabric substrate and detection of nitroaromatic explosives". *Electroanalysis*, 22(21), 2511-2518, 2010.
- [51] Yang Y. L, Chuang MC, Lou SL, Wang J. "Thick-Film textile-based amperometric sensors and biosensors". *Analyst*, 135(6), 1230-1234, 2010.
- [52] Ataman C, Kinkeldei T, Vasquez-Quintero A, Molina-Lopez F, Courbat J, Cherenack K, Briand D, Tröster G, de Rooij NF. "Humidity and temperature sensors on plastic foil for textile integration". *Procedia Engineering*, 25, 136-139, 2011.
- [53] Reddy ASG, Narakathu BB, Atashbar MZ, Rebros M, Rebrosova E, Joyce MK. "Fully printed flexible humidity sensor". *Procedia Engineering*, 25, 120-123, 2011.
- [54] Weremczuk J, Tarapata G, Jachowicz R. "Humidity sensor printed on textile with use of ink-jet technology". *Procedia Engineering*, 47, 1366-1369, 2012.
- [55] Mattana G, Kinkeldei T, Leuenberger D, Ataman C, Ruan JJ, Molina-Lopez F, Quintero AV, Nisato G, Tröster G, Briand D, de Rooij NF. "Woven temperature and humidity sensors on flexible plastic substrates for e-textile applications". *IEEE Sensors Journal*, 13(10), 3901-3909, 2013.
- [56] Furtak NT, Skrzetuska E, Krucińska I. "Development of screen-printed breathing rate sensors". *Fibres and Textile in Eastern Europe*, 21(6), 84-88, 2013.

- [57] Wei Y, Torah R, Yang K, Beeby S, Tudor J. "Screen printing of a capacitive cantilever-based motion sensor on fabric using a novel sacrificial layer process for smart fabric applications". *Measurement Science and Technology*, 24(7), 1-12, 2013.
- [58] Kutzner C, Lucklum R, Torah R, Beeby S, Tudor J. "Novel screen printed humidity sensor on textiles for smart textile applications". *17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators Microsystems (Transducers Eurosensors)*, USA, 16-20 June 2013.
- [59] Hayat A, Marty JL. "Disposable screen printed electrochemical sensors: tools for environmental monitoring". *Sensors (Switzerland)*, 14(6), 10432-10453, 2014.
- [60] Skrzetuska E, Puchalski M, Krucińska I. "Chemically driven printed textile sensors based on graphene and carbon nanotubes". *Sensors (Switzerland)*, 14(9), 16816-16828, 2014.
- [61] Stoppa M, Chiolerio A. "Wearable electronics and smart textiles: a critical review". *Sensors (Switzerland)*, 14(7), 11957-11992, 2014.
- [62] Whittow WG, Chauraya A, Vardaxoglou JC, Li Y, Torah R, Yang K, Beeby S, Tudor J. "Inkjet-Printed microstrip patch antennas realized on textile for wearable applications". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 71-74, 2014.
- [63] Rangel J, Del-Real A, Castano V. "Smart conductive inks". *Chemical and Chemical Technology*, 2(4), 2-5, 2008.
- [64] Filipowska B, Wiśniewski B, Zawadzka Michalak L. "Creation of electro-conductive paths and patterns by screen printing on textile bases". *Textile Research Journal*, 88(3), 261-274, 2018.
- [65] Kazani I, Hertleer C, De Mey G, Schwarz A, Guxho G, Van Langenhove L. "Electrical conductive textiles obtained by screen printing". *Fibres and Textile Eastern European*, 90(1), 57-63, 2012.
- [66] Jin H, Matsuhisa N, Lee S, Abbas M, Yokota T, Someya T. "Enhancing the performance of stretchable conductors for e-textiles by controlled ink permeation". *Advance Material*, 29(21), 1-8, 2017.
- [67] Paul G, Torah R, Beeby S, Tudor J. "The development of screen printed conductive networks on textiles for biopotential monitoring applications". *Sensors Actuators, A Physics*, 206, 35-41, 2014.
- [68] Paul G, Torah R, Beeby S, Tudor J. "Novel active electrodes for ekg monitoring on woven textiles fabricated by screen and stencil printing". *Sensors Actuators, A Physics*, 221, 60-66, 2015.
- [69] De Vos M, Torah R, Beeby S, Tudor J. "Functional electronic screen-printing-electroluminescent lamps on fabric". *Procedia Engineering*, 87, 1513-1516, 2014.
- [70] Almusallam A, Yang K, Zhu D, Torah R, Komolafe A, Tudor J, Beeby SP. "Clamping effect on the piezoelectric responses of screen-printed low temperature pzt/polymer films on flexible substrates". *Smart Material Structure*, 24(11), 1-8, 2015.
- [71] Wang Z, Wang W, Jiang Z, Yu D. "A novel and simple method of printing flexible conductive circuits on pet fabrics". *Applied Surface Science*, 396, 208-213, 2017.
- [72] Chauraya A, Whittow WG, Vardaxoglou JC, Li Y, Torah R, Yang K, Beeby S, Tudor J. "Inkjet printed dipole antennas on textiles for wearable communications". *Iet Microwaves, Antennas Propagation*, 7(9), 760-767, 2013.
- [73] Khaleel HR, Al-Rizzo HM, Abbosh AI. *Design, Fabrication, and Testing of Flexible Antennas*. Editors: Kishk A. Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications, Intech Open, 2013.
- [74] Li Y, Torah R, Beeby S, Tudor J. "An all-inkjet printed flexible capacitor on a textile using a new poly (4-Vinylphenol) dielectric ink for wearable applications". *IEEE Sensors Proceeding*, Taiwan, 28-31 October 2012.
- [75] Bidoki SM, Nouri J, Heidari AA. "Inkjet deposited circuit components". *Journal of Micromechanics Microengineering*, 20(5), 1-7, 2010.
- [76] Hu B, Li D, Manandharm P, Fan Q, Kasilingam D, Calvert P. "Cnt/Conducting polymer composite conductors impart high flexibility to textile electroluminescent devices". *Journal of Material Chemical*, 22(4), 1598-1605, 2012.
- [77] He H, Akbari M, Sydänheimo L, Ukkonen L, Virkki J. "3d-Printed graphene antennas and interconnections for textile rfid tags: Fabrication and reliability towards humidity". *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017(1), 1-5, 2017.
- [78] Mohtaram F, Mottaghitlab V, Baghersalimi G. "Development and characterization of flexible antenna based on conductive metal pattern on polyester fabric". *Journal of Textile Institute*, 108(11), 1888-1898, 2017.
- [79] Stempien Z, Rybicki E, Rybicki T, Lesnikowski J. "Inkjet-printing deposition of silver electro-conductive layers on textile substrates at low sintering temperature by using an aqueous silver ions-containing ink for textronic applications". *Sensors Actuators, B Chemical*, 224, 714-725, 2015.
- [80] Walker SB, Lewis JA. "Reactive silver inks for patterning high-conductivity features at mild temperatures". *Journal of American Chemical Society*, 134(3), 1419-1421, 2012.
- [81] Wu Y, Li Y, Ong BS. "A simple and efficient approach to a printable silver conductor for printed electronics". *Journal of American Chemical Society*, 129(7), 1862-1863, 2007.
- [82] Ahn BY, Lewis JA. "Amphiphilic silver particles for conductive inks with controlled wetting behavior". *Materials Chemistry and Physics*, 148(3), 686-691, 2014.
- [83] Vaseem M, Lee KM, Hong AR, Hahn YB. "Inkjet printed fractal-connected electrodes with silver nanoparticle ink". *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4(6), 3300-3307, 2012.
- [84] Bidoki SM, Lewis DM, Clark M, Vakorov A, Millner PA, MCGorman D. "Ink-Jet fabrication of electronic components". *Journal of Micromechanics Microengineering*, 17(5), 967-974, 2007.
- [85] Stempien Z, Rybicki T, Rybicki E, Kozanecki M, Szykowska MI. "In-Situ deposition of polyaniline and polypyrrole electroconductive layers on textile surfaces by the reactive ink-jet printing technique". *Synthetic Metals*, 202, 49-62, 2015.
- [86] Krykpayev B, Farooqui MF, Bilal RM, Vaseem M, Shamim A. "A wearable tracking device inkjet-printed on textile". *Microelectronics Journal*, 65(1), 40-48, 2017.
- [87] Ghahremani M, Babaei M, Latifi M. "Evaluating silver tracks conductivity on flexible surfaces". *Journal of Industrial Textiles*, 46(2), 530-548, 2016.