

**NANOKOMPOZİT TABANLI ESNEK DOKUNSAM
SENSÖRLER**

**NANOCOMPOSITE–BASED FLEXIBLE TACTILE
SENSORS**

YETER ŞEKERTEKİN

DOÇ. DR. DİNÇER GÖKCEN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Mina ve Taylor'a

ÖZET

NANOKOMPOZİT TABANLI ESNEK DOKUNSALE SENSÖRLER

Yeter ŞEKERTEKİN

Doktora, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Dinçer GÖKCEN

Haziran 2023, 138 sayfa

Esnek elektronik cihazların geleneksel elektronik dünyasında daha fazla yer bulmaya başlamasıyla, akıllı cihazların ve insan–makine arasında daha fazla etkileşim gerektiren uygulamaların birçok alanda kullanımını önemli ölçüde artırmıştır. Dışardan gelen mekanik bir etkiyi elektrik sinyallerine dönüştürme işleviyle esnek elektroniğin önemli bir temel taşı olan dokunsal sensörler, elektrofizyolojik sinyallerin takip edilerek hastalık teşhis ve tedavisinin sağlandığı ve protez cihazların işlevlerinin artırıldığı sağlık sektörü başta olmak üzere, ticari veya eğitim amaçlı geliştirilen robotik sistemlerde, sanal ve artırılmış gerçeklik uygulamalarında, yeni nesil dokunmatik ekranların geliştirilmesinde ve yapay zekanın entegre edildiği çeşitli uygulamalarda en temel bileşendir. Bu sebeple, yapılacak geliştirmeler ve iyileştirmeler, esnek dokunsal sensörleri kullanma potansiyeli olan cihaz ve uygulamalarda etkinliği ve performansı doğrudan etkilediği için çok önemli bir yere sahiptir. Esnek dokunsal sensörlerin üretilmesinde kullanılan malzemelerin çeşitliliği, sensörlerin farklı üretim metotları ve çalışma mekanizmaları bu alanda çok geniş bir araştırma yelpazesi sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, sensörlerin algılayıcı tabakalarında polimer ve iletken dolgu maddelerinden oluşan polimer nanokompozitler kullanılarak esnek alt tabakalar üzerinde üretim yapılmıştır. Özellikle biyo uyumlu olmaları ve kullanım kolaylığına sahip olmaları

sebebiyle polimer olarak polivinil alkol (PVA) ve sodyum aljinat (SA) tercih edilmiştir. Kullanılan iletken dolgu maddeleri arasında ise karbon siyahı (CB), karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen nanoplateletler (GnP'ler) ve gümüş nanoparçacıklar (Ag NP'ler) yer almaktadır. Her bir nanokompozit, bir polimerden ve bir dolgu maddesinden oluşacak şekilde farklı nanokompozit üretimleri yapılmış, nanokompozitler karakterize edilmiş ve farklı sensör tasarımlarıyla nanokompozit tabanlı sensörler üretmek amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen esnek dokunsal sensörler; PVA–CB, PVA–CNT, PVA–GnP, PVA–Ag NP, SA–CB ve SA–CNT nanokompozitlerine dayalıdır. Kâğıt, eriyik üfleli ve pamuk kumaşlar üzerinde serigrafi yöntemiyle üretilen dokunsal sensörlere ek olarak, herhangi bir alt tabaka kullanılmadan üretilen sensörler de bulunmaktadır. Üretilen sensörler, farklı basınç değerleri altında elektromekanik ölçümleri alınarak test edilmiştir. Bu testlerde sensörlerin piezorezistif, kapasitif, empedans ve faz açısı özellikleri ve tepki–toparlanma süreleri incelenmiştir. Aynı tasarımla üretilen PVA–fCNT, PVA–GnP ve PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı sensörlerde, uygulanan kuvvete karşı faz açısı değişiminin dokunma algılamada kullanılabileceği gösterilmiş ve PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı sensör bir eldivene monte edilerek dolu bir şişeyi tutmak ve kaldırmak adımlarından oluşan bir uygulamada, bir empedans analizörü devresi üzerinden alınan ölçümlerle test edilmiştir. SA–CB nanokompozit tabanlı sensör üzerinden, kuvvet uygulanan noktanın ve kuvvetin büyüklüğünün tayin edilmesi konsepti gösterilmiştir. Ayrıca, herhangi bir alt tabaka olmadan üretilen sensörlerin ise belirli frekans aralıklarında frekans cevapları incelenerek eşdeğer devreleri oluşturulmuştur. Elde edilen veriler, polimer nanokompozit tabanlı esnek dokunsal sensörlerin algılama işlevini etkin bir şekilde yerine getirdiğini göstermektedir. Ayrıca, farklı tasarımlarda sensörlerin analizi için empedans ölçümlerinin alınması, aynı anda sensörün hem kapasitif hem de piezorezistif özelliklerini değerlendirme imkânı tanımıştır. Farklı frekans aralıklarında sensörlerin farklı çalışma mekanizmalarına sahip olabileceği ve buna bağlı olarak eşdeğer devrelerinin oluşturulabileceği gösterilmiştir. Direnç ve kapasitans değişiminin dokunmayı algılamada kullanılabilmesi gibi, tasarıma bağlı olarak faz açısı değişiminin de aynı amaçla kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: empedans sensörü, esnek dokunsal sensör, frekans cevabı, kapasitif sensör, piezorezistif sensör, polimer nanokompozit

ABSTRACT

NANOCOMPOSITE–BASED FLEXIBLE TACTILE SENSORS

Yeter SEKERTEKIN

Doctor of Philosophy, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Dincer GOKCEN

June 2023, 138 pages

The use of smart devices and applications that require more interaction between human and machine has increased significantly in many areas since flexible electronic devices starting to find more place in the traditional electronics world. Tactile sensors, which are an important part of flexible electronics with the function of converting an external mechanical effect into electrical signals, are used especially in the biomedical field to diagnose and treat diseases by monitoring electrophysiological signals and to increase the functionality of prosthetic devices. Besides, tactile sensors are the most fundamental component in robotic systems developed for commercial or educational purposes and in the development of next-generation touch screens as well as in various applications where artificial intelligence is integrated. For this reason, the developments and improvements have a very important place as they directly affect the efficiency and performance of devices and applications that have the potential to use flexible tactile sensors. The variety of materials used in the production of flexible tactile sensors, different production methods and working mechanisms of the sensors offer a wide range of research opportunities.

In this thesis, polymer nanocomposites consisting of polymer and conductive fillers were used in the sensing layers of sensors that are fabricated on flexible substrates. Polyvinyl alcohol (PVA) and sodium alginate (SA) were preferred as polymers, especially because they are biocompatible and easy to use. Carbon black (CB), carbon nanotubes (CNTs), graphene nanoplatelets (GnPs) and silver nanoparticles (Ag NPs) were used as conductive fillers. Different nanocomposites were produced so that each nanocomposite consists of a polymer and a filler, the nanocomposites were characterized and used to produce nanocomposites-based sensors with different sensor designs. The obtained flexible tactile sensors are based on PVA-CB, PVA-CNT, PVA-GnP, PVA-Ag NP, SA-CB and SA-CNT nanocomposites. In addition to tactile sensors produced by screen-printing on paper, melt-blown and cotton fabrics, there are also sensors produced without using any substrate. Produced sensors were tested via electromechanical measurements under different pressure values. PVA-fCNT, PVA-GnP and PVA-Ag NP nanocomposites-based sensors fabricated with the same structural design have shown that the phase angle change versus applied force can be used in touch sensing. Also, the PVA-Ag NP nanocomposite-based sensor mounted on a glove was tested in an application consisting of holding and lifting a full bottle, with measurements taken over an impedance analyzer circuit. The concept of determining the point where force is applied and the magnitude of the force are demonstrated using the SA-CB nanocomposite-based sensor. In addition, the frequency responses of the sensors produced without any substrate were examined in certain frequency ranges and their equivalent circuits were created.

The obtained data show that polymer nanocomposite-based flexible tactile sensors perform the sensing function effectively. In addition, taking impedance measurements for the analysis of sensors in different designs gave the opportunity to evaluate both the capacitive and piezoresistive properties of the sensor at the same time. It has been shown that sensors in different frequency ranges can have different operating mechanisms and equivalent circuits can be determined accordingly. It has been demonstrated that the change in resistance and capacitance can be used for touch sensing, as is usually the case, and depending on the design, the phase angle change can be used for the same purpose.

Keywords: impedance sensor, flexible tactile sensor, frequency response, capacitive sensor, piezoresistive sensor, polymer nanocomposite

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tez danışmanım Doç. Dr. Dinçer Gökçen'e doktora eğitimim süresince verdiği destek ve çalışmalarımı inceleyip sunduğu geribildirimler için içtenlikle teşekkür ederim.

Tez izleme ve tez savunma komitesinde yer alan Dr. Öğr. Üyesi Yakup Özkazanç'a önerileri ve sunduğu farklı bakış açıları dolayısıyla teşekkür ederim.

Tez savunma komitesinde yer alan Prof. Dr. Haluk Külâh ve Dr. Öğr. Üyesi Şölen Kumbay Yıldız'a tezimi inceleyerek verdikleri geribildirimler ve öneriler için teşekkür ederim.

Serigrafi işlemini öğrenmemde yardımcı olan Doç. Dr. Ozan Bilginer'e ve bir kısım SEM görüntülerini elde etmemde yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Cem Bayram'a teşekkür ederim.

Tez çalışmasında üretilen nanokompozitlerin karakterizasyonlarının yapıldığı Bilkent UNAM, ODTÜ MERLAB ve HUNİTEK'e, ayrıca Hacettepe Üniversitesi Mikro ve Nano Sistemler Araştırma Laboratuvarı'na teşekkür ederim.

Son olarak, tez izleme ve tez savunma komitesinde yer alan sevgili Dr. Öğr. Üyesi İtir Köymen Meral'e bu süreç boyunca verdiği tavsiyeleri, önerileri ve ayrıca manevi desteği için minnettarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. DOKUNSAK SENSÖRLER VE ÖZELLİKLERİ	7
2.1. Dokunsal Sensörler	7
2.1.1. Dokunsal Sensörlerin Değerlendirilme Kriterleri	9
2.1.1.1. Transfer Fonksiyonu	9
2.1.1.2. Hassasiyet	10
2.1.1.3. Ölçeklenebilirlik	11
2.1.1.4. Doğruluk	11
2.1.1.5. Çözünürlük	12
2.1.1.6. Histerezis	12
2.1.1.7. Doğrusal Olmama	12
2.1.1.8. Tekrarlanabilirlik ve Tepki – Toparlanma Süreleri	13
2.1.1.9. Diğer Özellikler	13
2.2. Dokunsal Sensörlerin Çalışma Mekanizmaları	14
2.2.1. Piezorezistif Algılama	14
2.2.2. Kapasitif Algılama	15
2.2.3. Piezoelektrik Algılama	16
2.2.4. Diğer Çalışma Mekanizmaları	17
2.3. Esnek Dokunsal Sensör Üretimi	18

2.3.1.	Sensör Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Polimer Nanokompozitler	18
2.3.2.	Sızıntı Teorisi	20
2.3.3.	Sensör Üretim Metotları.....	21
2.4.	Sensör Malzemelerinin Karakterizasyonu	23
2.4.1.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Görüntüleme	23
2.4.2.	Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile Görüntüleme.....	23
2.4.3.	Raman Spektroskopisi.....	24
2.5.	Sonuçlar.....	25
3.	ÜRETİLEN POLİMER NANOKOMPOZİTLER	26
3.1.	Polivinil Alkol (PVA) – Karbon Siyahı (CB) Nanokompoziti	26
3.1.1.	Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu	27
3.2.	Polivinil Alkol (PVA) – İşlevselleştirilmiş Karbon Nanotüp (fCNT) Nanokompoziti	29
3.2.1.	Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu	35
3.3.	Polivinil Alkol (PVA) – Gümüş Nanoparçacık (Ag NP) Nanokompoziti.....	37
3.3.1.	Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu	37
3.4.	Polivinil Alkol (PVA) – Grafen Nanoplatelet (GnP) Nanokompoziti.....	40
3.4.1.	Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu	41
3.5.	Sodyum Aljinat (SA) – Karbon Siyahı (CB) Nanokompoziti.....	43
3.5.1.	Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu	44
3.6.	Sodyum Aljinat (SA) – İşlevselleştirilmiş Karbon Nanotüp (fCNT) Nanokompoziti	45
3.6.1.	Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu	46
3.7.	Sonuçlar.....	47
4.	DOKUNSAK SENSÖR TASARIMLARI	49
4.1.	Sensör Tasarımı – 1	50
4.1.1.	PVA–CB Nanokompoziti ile Dokunsal Sensör Üretimi.....	50
4.1.2.	Elektromekanik Ölçüm Sonuçları.....	52
4.1.2.1.	Dokunsal Sensörün Kapasitif Özellikleri	53
4.1.2.2.	Dokunsal Sensörün Piezoempedans Özellikleri	55
4.1.2.3.	Dokunsal Sensörlerin Tepki ve Toparlanma Süreleri	57
4.2.	Sensör Tasarımı – 2	58

4.2.1.	PVA–fCNT, PVA–GnP ve PVA–Ag NP Nanokompozitleri ile Dokunsal Sensörlerin Üretimi	58
4.2.2.	Elektromekanik Ölçüm Sonuçları.....	59
4.2.2.1.	Dokunsal Sensörlerin Piezoempedans Özellikleri	59
4.2.2.2.	Dokunsal Sensörlerin Tekrarlanabilirlik Özellikleri ve Tepki-Toparlanma Süreleri.....	62
4.2.2.3.	Dokunsal Sensörlerin Frekans Cevabı Özellikleri	64
4.2.2.4.	Polivinil Alkol (PVA) – Gümüş Nanoparçacık (Ag NP) Nanokompozit Tabanlı Dokunsal Sensörün Uygulamada Kullanımı	66
4.3.	Sensör Tasarımı – 3.....	69
4.3.1.	SA–CB Nanokompoziti ile Dokunsal Sensör Üretimi.....	69
4.3.2.	Elektromekanik Ölçüm Sonuçları.....	71
4.3.2.1.	Dokunsal Sensörün Piezoempedans Özellikleri.....	71
4.3.2.2.	Kuvvet Uygulanan Noktanın Belirlenmesi	74
4.3.2.3.	Kuvvet Büyüklüğünün Belirlenmesi	77
4.4.	Sensör Tasarımı – 4.....	78
4.4.1.	SA–fCNT Nanokompozitleri ile Dokunsal Sensörlerin Üretimi.....	78
4.4.2.	Elektromekanik Ölçüm Sonuçları.....	79
4.4.2.1.	Dokunsal Sensörlerin Piezoempedans Özellikleri	79
4.4.2.2.	Dokunsal Sensörlerin Frekans Cevabı Özellikleri	80
4.5.	Sonuçlar.....	83
5.	YORUMLAR VE ÖNGÖRÜLER.....	85
6.	KAYNAKLAR	94
EKLER	105	
EK 1 - Tezden Türetilmiş Yayınlar	105	
EK 2 - Tezden Türetilmiş Bildiriler	106	
EK 3 - Tez Çalışması Orjinallik Raporu.....	107	
ÖZGEÇMİŞ	108	

ŞEKİLLER DİZİNİ

- Şekil 2.1** (a) Bükülmüş durumdayken dokunma işleminin gerçekleştirildiği esnek ekran [71] (b) Robotik dokunsal sistem [72] (c) Artırılmış gerçeklik ortamında *i.* çiçeğin tutulması *ii.* saksıya dikilmesi [73] (d) nabız sinyalinin izlenmesi [74] (e) protez kola yerleştirilen sensörün ‘düşün ve hisset’ işleviyle kullanılması [75].....9
- Şekil 2.2** Esnek dokunsal sensör üretim yöntemleri (a) Serigrafi [120] (b) mürekkep püskürtmeli baskı [121] (c) fleksografik baskı [122] (d) 3B baskı [123].....22
- Şekil 3.1** (a) Boş selüloz kâğıdın (görüntü boyutları: 5 µm x 5 µm) ve (b) selüloz kâğıda serigrafi baskılı PVA–CB nanokompozit mürekkebin (görüntü boyutları 10 µm x 10 µm) 3B AFM görüntüleri ile (c)–(d) saf PVA’nın, (e)–(f) selüloz kâğıdın ve (g)–(h) selüloz kâğıt üzerindeki PVA–CB nanokompozitinin 2K ve 60K büyütme değerlerinde SEM görüntüleri.28
- Şekil 3.2** Karbon allotropları (a) sp^3 hibritleştirilmiş karbon atomlarının bir tetrahedral kafes düzenlemesinde birbirine bağlandığı kristal bir yapıya sahip olan elmas (b) Karbon atomlarının tüp şeklinde bağlandığı tüp yapıda fulleren (c) karbon atomlarının beşgenler ve altıgenler halinde birbirine bağlandığı küre biçimli fulleren [136, 137] (d) grafen (e) grafen nanoplatelet [158].....30
- Şekil 3.3** CNT’leri işlevselleştirme aşamaları34
- Şekil 3.4** (a) Pamuk kumaşın x500 büyütülmüş SEM görüntüsü. PVA–fCNT nanokompozitinin (b)–(c) büyütülme oranları farklı SEM görüntüleri (d) Raman spektroskopisi.....36
- Şekil 3.5** PVA–Ag NP nanokompozitinin (a)–(b) büyütülme oranları farklı SEM görüntüleri (c) Raman spektroskopisi.....39
- Şekil 3.6** PVA–GnP nanokompozitinin (a)–(b) büyütülme oranları farklı SEM görüntüleri (c) Raman spektroskopisi.....42
- Şekil 3.7** Sensör malzemelerinin SEM ve AFM görüntüleri (a) 2K büyütmede saf eriyik üfleli kumaş (b)–(c) farklı büyütmelerde eriyik üfleli kumaş üzerinde SA–CB nanokompoziti.....45
- Şekil 3.8** Gliserin içeren SA–fCNT nanokompozitinin (a) 500 nm ölçek barında görüntüsü (b) 200 nm ölçek barında görüntüsü47

Şekil 4.1 Dokunsal sensörün (a) üst ve (b) tabakaları. (c) Üst ve alt tabakaların bir araya getirilmesiyle oluşturulan sensör (d) Dokunsal sensörün eşdeğer devresi	50
Şekil 4.2 Sensör üretiminde kullanılan serigrafi aşamaları (a) eleği foto emülsiyonla kaplama (b) kurutma (c) ultraviyole ışığa maruz bırakma (d) temizleme (e) kurutma (f) rakle kullanarak mürekkebi yayma	51
Şekil 4.3 (a) Dokunsal sensörün yapısı ve ölçüm pedleri (b) yüksek hassasiyette otomatik kuvvet uygulayıcı düzenek (c) en üstteki sensör dizisinde konumları numaralandırılan sensör dizisi	52
Şekil 4.4 Dokunsal sensörlerin (a) kapasitans–basınç özellikleri (b) histerezis davranışları	53
Şekil 4.5 Dokunsal sensörün empedans özellikleri. (a) direnç–frekans (b) reaktans–frekans ve (c) empedans–frekans grafikleri	56
Şekil 4.6 Belirli bir basınç uygulandığı durumda kapasitansın zamanla değişimi	57
Şekil 4.7 (a) Aktif ve elektrot katmanların üretiminin şematik gösterimi (b) Bir araya getirilen elektrot ve aktif tabakaların şematik yanal kesit alanı görüntüsü	58
Şekil 4.8 (a) Üretilen elektrot tabakası. Üretilen nanokompozit tabanlı sensörler (b) PVA–fCNT (c) PVA–GnP (d) PVA–Ag NP	59
Şekil 4.9 Nanokompozit tabanlı sensörlerin empedanslarının ve faz açılarının basınçla değişimi (a) PVA–fCNT (b) PVA–GnP (c) PVA–Ag NP	61
Şekil 4.10 Nanokompozit tabanlı sensörlerin dayanıklılık testleri (a) PVA–fCNT (b) PVA–GnP (c) PVA–Ag NP	63
Şekil 4.11 PVA–fCNT nanokompozit tabanlı sensörün 30 kPa basınç altında (a) empedans ve (b) faz açısının frekansa karşı değişimi	64
Şekil 4.12 PVA–GnP nanokompozit tabanlı sensörün 30 kPa basınç altında (a) empedans ve (b) faz açısının frekansa karşı değişimi	65
Şekil 4.13 PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı sensörün 30 kPa basınç altında (a) empedans ve (b) faz açısının frekansa karşı değişimi	66
Şekil 4.14 Empedans analizörü kullanılarak oluşturulan devrenin blok şeması	67
Şekil 4.15 Dokunsal sensör ölçümlerinin bir empedans analizör devresi üzerinden alınmasıyla gerçekleştirilen uygulama	68
Şekil 4.16 Şişenin kaldırılması ve bırakılması adımlarının ardışık olarak tekrarlanmasına göre empedansın değişimi	68

Şekil 4.17 (a) Sensörün üç katmanı ve (b) basınç uygulandığında sensörün elektriksel eşdeğer devresi	69
Şekil 4.18 Sensörün üst ve alt aktif tabakaları.....	70
Şekil 4.19 (a) Kuvvet uygulanacak noktaları numaralandırılan sensör (b) Kuvvet uygulama ve ölçüm platformu.....	71
Şekil 4.20 ‘5’ numaralı konuma uygulanan kuvvetin (a) T1–B2 ölçüm noktalarından alınan empedansla değişimi (b) bu empedanstan elde edilen kapasitansla değişimi	72
Şekil 4.21 ‘5’ numaralı konuma uygulanan kuvvetin (a) T2–B1 ölçüm noktalarından alınan empedansla değişimi (b) bu empedanstan elde edilen kapasitansla değişimi	73
Şekil 4.22 Çeşitli ölçüm metotlarıyla elde edilen kapasitansların uygulanan kuvvete göre değişimi.....	74
Şekil 4.23 (a) Sensörün eşdeğer devresi (b) ‘3’ numaralı konuma basınç uygulandığında sensör üzerindeki varsayılan direnç değerleri	75
Şekil 4.24 Sensöre kuvvet uygulandığında ölçülen direnç değerleriyle kuvvet uygulanan noktanın tespiti	77
Şekil 4.25 T2–B1 noktalarından alınan empedans kullanılarak elde edilen kapasitansın uygulanan kuvvet ile değişimi.....	77
Şekil 4.26 Gliserin içeren ve içermeyen nanokompozitlere dayalı dokunsal sensörler ..	79
Şekil 4.27 Sensörlerin empedansının uygulanan ağırlıkla değişimi (a) Gliserin içermeyen nanokompozit tabanlı sensör (b) Gliserin içeren nanokompozit tabanlı sensör	80
Şekil 4.28 Gliserin içermeyen nanokompozit tabanlı sensörün frekansa bağlı olarak (a) empedansının değişimi (b) faz açısının değişimi	81
Şekil 4.29 Gliserin içeren nanokompozit tabanlı sensörün frekansa bağlı olarak (a) empedansının değişimi (b) faz açısının değişimi	82
Şekil 4.30 (a) Gliserin içermeyen nanokompozit tabanlı sensörün eşdeğer devresi (b) gliserin içeren nanokompozit tabanlı sensörün eşdeğer devresi	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Bazı doğrusal olmayan fonksiyonlar ve denklemleri	10
Çizelge 4.1 Sensörlerin hassasiyetlerinin belirli basınç aralıklarında hesaplanması	55
Çizelge 5.1 Farklı malzemeler ve üretim yöntemleri kullanılarak yapılan sensör üretim çalışmaları	86
Çizelge 5.2 Tez çalışmasında üretilen dokunsal sensörlerin çeşitli açılardan literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırılması.....	89

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

R_t	Üst elektrotun direnci (Tasarım – 1)
R_b	Alt elektrotun direnci (Tasarım – 1)
ΔR	Direncin değişim miktarı
ΔZ	Empedansın değişim miktarı
C	Kapasitans
R_0	Başlangıç direnci
Z_0	Başlangıç empedansı
C_0	Başlangıç kapasitansı
R_{XT}	Basınç uygulanan nokta ile T1 noktası arasındaki direnç (Tasarım – 3)
R_{XB}	Basınç uygulanan nokta ile T2 noktası arasındaki direnç (Tasarım – 3)
R_{YT}	Basınç uygulanan nokta ile B1 noktası arasındaki direnç (Tasarım – 3)
R_{YB}	Basınç uygulanan nokta ile B2 noktası arasındaki direnç (Tasarım – 3)
Θ	Faz açısı
X_c	Kapasitif reaktans
S	Hassasiyet
$T1...T4$	Üst elektrotun ölçüm noktaları (Tasarım – 1)
$B1...B4$	Alt elektrotun ölçüm noktaları (Tasarım – 1)
ϵ	Dielektrik sabiti
s	Gerinim (strain)
σ_{ac}	AC iletkenlik
σ_{dc}	DC iletkenlik
ρ	Özdirenç
n	Kesirli üstel bileşen

f	Frekans
F	Kuvvet
P	Basınç
ΔP	Basıncın değişim miktarı
A	1. Dielektrik malzeme ile temas eden elektrotların alanı 2. İletkenin alanı
d	1. Elektrotlar arasındaki uzaklık 2. Piezoelektrik gerinim (strain) katsayısı
l	İletkenin uzunluğu
l_x	Basınç uygulanan noktanın T1 noktasına uzaklığı (Tasarım – 3)
l_y	Basınç uygulanan noktanın T2 noktasına uzaklığı (Tasarım – 3)
p	Dolgu malzemesinin kompozit yapıdaki miktarı
p_c	Sızıntı eşiği
D	Elektriksel yer değiştirme
E	Elektrik alan
ϵ^T	Dielektrik katsayılarının tensörü
T	Gerilim (stress) tensörü
t	İletken malzemenin boyutuyla alakalı üstel bileşen
i, j, k	Uzamsal yönler

Kısaltmalar

3B	3 Boyutlu
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
ALD	Atomik Katman Biriktirme
CB	Karbon Siyahı
CNT	Karbon Nanotüp
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DMF	Dimetilformamid
EBSD	Elektron Geri Saçılım Kırınımı
EDS	X-ışınım Spektroskopisi
Gf	Gauge faktörü
MWCNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
NMP	N-Metil-Pirolidon
PAA	Poliakrilik Asit
PAAM	Poliakrilamid
PANi	Polyanilin
PDA	Polidopamin
PDMS	Polidimetilsiloksan
PEDOT	Polipolistiren Sülfonat
PEG	Poliäten Glikol
PET	Poliäten Tereftalat
PETG	Poliäten Tereftalat Glikol
PPy	Polipirol
PTFE	Politetrafloroäten
PVA	Polivinil Alkol
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme

PVDF	Poliviniliden Florür
PZT	Kurşun Zirkonat Titanat
RMS	Ortalama Karekök
SC	Sodyum Kolat
SDS	Sodyum Dodesil Sülfat
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SPM	Taramalı Uç Mikroskopisi
SWCNT	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
TPU	Termoplastik Poliüretan
TWCNT	İki Duvarlı Karbon Nanotüp

1. GİRİŞ

Geleneksel elektronik cihazlarda kullanılan malzemelerin, esnek, bükülebilir, katlanabilir ve gerilebilir özelliklere sahip malzemelerle yer değiştirmesi sonucunda elektronik dünyasında farklı bir perspektif sunan yeni nesil esnek elektronik cihazlar, mekanik açıdan iyileştirilmiş ve parçası olacağı sistemle daha uyumlu bir şekilde kullanılabilme özellikleriyle geleneksel elektroniğe bir yenilik getirmektedir. Özellikle, akıllı elektronik cihazlarda ve tüketici elektroniğinde kullanımıyla ön plana çıkan ve esnek elektroniğin önemli bir kolunu oluşturan esnek dokunsal sensörler, insanların bir makine ile bir arayüz üzerinden gerçek zamanlı iletişim kurarak etkileşim içinde olması durumunu ifade eden insan–makine etkileşimini daha kolay ve etkin bir hale getirmenin önemli bir parçasıdır [1, 2].

İnsan–makine etkileşiminde rol alan esnek dokunsal sensörler, kalp atış hızı ve vücut ısısı gibi hayati belirtilerin izlendiği sağlık takibi ve hastalık teşhisi başta olmak üzere biyomedikal uygulamalarda [3], dokunmayı ve sıcaklığı algılayabilen protez uzuvların geliştirildiği elektronik deri (e–deri) uygulamalarında [4], çeşitli endüstrilerde kullanılan yumuşak robotların geliştirildiği robotik uygulamalarda [5], akıllı sistemlerin dokunmatik ekranlarında [6] ve yapay zekâ [7] gibi çeşitli alanlardaki umut verici kullanımları sayesinde hem araştırma dünyasında hem de giyilebilir elektronik piyasasında gittikçe artan bir ilgi görmektedir. Kıyafet üzerine veya doğrudan deri üzerine yerleştirilebilen esnek sensörlerin biyo uyumluluk, kendini iyileştirebilme, kendi kendine çalışabilirlik, bükülebilirlik, gerilebilirlik ve hafiflik gibi özelliklerin birkaçına veya tamamına sahip olmaları, giyilebilir elektronikte kullanılabilmelerinde belirleyici faktörlerdir. Çeşitli alanlarda taşıdıkları bu potansiyelden dolayı esnek sensörler teknoloji ile etkileşim şeklimizde büyük bir değişim başlatmıştır.

Dokunsal sensörler ile ilgili çalışmalar 2000’li yıllara kadar her ne kadar robotik ve biyomedikal alanda ön planda olsa da akıllı telefonların ve dokunmatik ekranların popülerlik kazanmasıyla dokunsal sensörlerin kullanım alanları dokunsal ara yüzlere ve giyilebilir teknolojilere yayılmaya başlamıştır. 2000’li yıllarda trendin bu yönde olması dokunsal sensörlerin özellikle doğrudan cilt üzerine yerleştirilebilen ve aynı anda vücut sıcaklığı, kalp atışı ya da hastalık teşhisinde önem taşıyabilecek normal olmayan sinyaller gibi birçok elektrofizyolojik sinyal hakkında geribildirim sağlayabilen sistemlerde kullanımının önünü açmıştır [8].

Giyilebilir elektroniğin temel bileşenlerinden biri olan dokunsal sensörler, mekanik bir uyarıyı elektriksel bir sinyale dönüştüren sistemlerdir. Esas olarak algılama işlevinin gerçekleştiği aktif tabakadan ve bu algılamayı elektriksel sinyaller olarak ileten elektrotlardan oluşurlar. Silikon tabanlı sensörlerin katı ve esnetilebilir olmaması, üretimlerinin nispeten kompleks bir sürece dayanması ve pahalı cihazlar gerektirmesinden dolayı bu sensörlere alternatif olarak polimer nanokompozit tabanlı esnek dokunsal sensörler geliştirilmiştir. Esnek ve yalıtkan bir yapıda olan polimerler iletken dolgu maddeleri ile belirli oranlarda bir araya getirildiğinde belirli bir iletkenliğe sahip olan nanokompozitler oluşur. Bu yapılar, genellikle sensörün aktif tabakası olarak kullanılır. Yaygın olarak kullanılan polimer matrisleri arasında polidimetilsiloksan (PDMS) [9, 10], termoplastik poliüretan (TPU) [11, 12], polimid [13, 14], Ecoflex [15, 16], doğal kauçuk [17, 18] ve polietilen tereftalat (PET) [19, 20] gibi elastomerlerin yanında, poli (3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT) [21, 22], polivinil alkol (PVA) [23, 24], poliakrilamid (PAAM) [25, 26], poliakrilik asit (PAA) [27, 28], polidopamin (PDA) [29, 30], polipirol (PPy) [31, 32] ve aljinat [33, 34] gibi hidrojeller de yer almaktadır. Yaygın olarak tercih edilen karbon bazlı dolgu maddeleri ise karbon siyahı (CB) [23, 35], karbon nanotüpler (CNT'ler) [36, 37], grafen [38, 39], grafen oksit [40, 41] ve karbon fiber [42, 43] ile metal nanoparçacıklar [44, 45], nanoteller [46, 47], iyonik sıvılar [48, 49] ve Mxenlerdir [50, 51].

Esnek dokunsal sensörler, mekanik uyarıyı elektriksel sinyallere dönüştürme yöntemine göre başlıca piezorezistif, kapasitif, piezoelektrik ve triboelektrik olarak sınıflandırılabilir. Piezorezistif algılamada sensöre uygulanan kuvvet, sensörün direncinde bir değişikliğe sebep olur. Değişen elektriksel özellik, tek ya da çok katlı algılayıcı tabaka ile elektrot arasındaki direnç olabileceği gibi, algılayıcı tabakanın içsel direnci de olabilir [52]. En temel kapasitif algılama yönteminde ise iki iletken yapı arasına bir dielektrik katmanın yerleştirilmesiyle elde edilen bir yapı söz konusudur. Kapasitansı ifade eden $C=A\epsilon/d$ eşitliğinde A , dielektrik tabaka ile temas halinde olan elektrotların yüzey alanı, ϵ dielektrik katsayısı ve d ise iki elektrotun arasındaki mesafedir. Böyle bir yapıya kuvvet uygulandığı zaman elektrotlar arasındaki mesafe azalacağı için kapasitansta bir artış meydana gelir. Kapasitansta meydana gelen bu değişim, dokunmanın varlığını algılamak için kullanılır. En çok çalışılan ve kullanılan yöntemler arasında piezorezistif ve kapasitif algılama yöntemleri ilk sıralardadır. Bir diğer algılama mekanizması ise, piezoelektrik etki adı verilen bir olguya dayanmaktadır. Bu özelliğe sahip olan bir malzemeye bir kuvvet uygulandığında anyonların (negatif iyonlar) ve

katyonların (pozitif iyonlar) yer değiştirmesi sonucu elektrik dipolleri oluşur [53]. Ayrılan yükler piezoelektrik malzemenin uçlarında veya yüzeylerinde birikerek pozitif ve negatif yüklü alanlar oluşturur. Yüklerin birikmesi ve ortaya çıkan elektrik dipolleri, malzeme boyunca bir piezoelektrik potansiyeli oluşturur. Üretilen piezoelektrik potansiyel uygun elektrotlar ve devre kullanılarak bir elektriksel sinyale dönüştürülebilir ve ölçülebilir [54]. Bir diğer metot ise triboelektrik etkiye dayalı algılama yöntemidir. Triboelektrik yöntemde, iki farklı malzeme arasındaki sürtünme kaynaklı elektriksel etkilerden faydalanılarak mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Sensöre bir kuvvet uygulandığında malzemelerden biri elektron kazanma eğilimindeyken (negatif yüklü hale gelir), diğeri elektron kaybetme eğilimindedir (pozitif yüklü hale gelir). Bu yük transferi bir elektriksel potansiyel farkı oluşturur. Üretilen elektriksel potansiyel fark elektrik enerjisine dönüştürülmek üzere biriktirilebilir. Toplanan bu enerji ise, algılama sisteminin kendisine güç sağlamak için kullanılabilir. Uygulanan basıncın büyüklüğü temas alanını, sürtünme kuvvetini ve sonuçta ortaya çıkan triboelektrik yük transferini etkiler. Bahsedilen algılama yöntemlerinin her birinin tek başına kullanılmasının yanında kullanım amacına bağlı olarak hibrit olarak kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [55].

Dokunsal sensör üretimlerinde tercih edilen malzemeler ve algılama mekanizmalarının yanında dokunsal sensörlerin elektromekanik ve esneklik özelliklerini etkiledikleri için sensör üretiminde seğilen metotlar da önem taşımaktadır. Günümüzde en fazla kullanılan dokunsal sensör üretim yöntemleri arasında elektro-eğirme [56], kaplama [57] ve çeşitli baskı yöntemleri [58, 59] yer almaktadır. Elektro-eğirme, bir polimer çözeltisini döndürerek ince film oluşturma sürecini ifade eder. Genellikle dokunsal sensörler için esnek alt tabakalar veya iletken katmanlar üretmek için kullanılır. Çözelti bileşimi, çözeltideki çözücünün buharlaşma hızı ve döndürme hızı gibi parametreler kontrol edilerek döndürülen malzeme istenen elektromekanik özelliklere sahip olacak şekilde ayarlanabilir [60]. Bir diğer üretim yöntemi olan kaplama, bir alt tabaka yüzeyine ince bir malzeme tabakasının eklenmesinde kullanılır. Dokunsal sensörler bağlamında iletkenliği ve dayanıklılığı artırmak veya koruyucu bir katman sağlamak için çeşitli kaplamalar kullanılabilir. Metal oksitler veya iletken filmler gibi malzemeleri biriktirmek için kimyasal buhar biriktirme (CVD) veya fiziksel buhar biriktirme (PVD) gibi çeşitli kaplama teknikleri kullanılır. Örneğin, dokunmatik ekranlarda kullanılacak sensörler için indiyum kalay oksit (ITO) veya grafen gibi şeffaf iletken kaplamalar hem optik şeffaflığı korumak hem de dokunma hassasiyetini artırmak için dokunsal sensörlerin yüzeyine uygulanabilir [61]. Baskı yöntemlerinin kullanıldığı üretimlerde ise çoğunlukla serigrafı,

mürekkep püskürtmeli baskı veya fleksografik baskı gibi teknikler, iletken desenleri, sensör dizilerini veya elektrot yapılarını esnek alt tabakalar üzerine aktarmak için kullanılır. Esnek ve kavisli yüzeyler üzerinde dokunmaya duyarlı yapıların oluşturulmasına olanak sağladıkları için baskı teknikleri ayrıca önem taşımaktadır. Özellikle son yıllarda dokunsal sensör üretiminin farklı aşamalarında ya da doğrudan sensörün kendisini üretmek için kullanılan üç boyutlu (3B) baskı ise tasarım esnekliği ve hızlı üretim sağlamanın yanında, düşük maliyetli olması ve yüksek ticarileştirilebilme potansiyeline sahip olması sebebiyle tercih edilmektedir [62].

Dokunsal sensörlerin performansları çeşitli yollarla değerlendirilebilir. Bunlar arasında en temel olanlar; sensörün hassasiyetinin, tepki süresinin, doğrusal olduğu aralığın ve algılama gerçekleştirdiği aralığın belirlenmesidir. Sensörün geometrik yapısı ve boyutları, sensör üretiminde kullanılan malzemeler, sensörün üretim metodu ve algılama yöntemi, bahsedilen kriterleri doğrudan etkileyen unsurlar arasındadır. Esnek elektronik cihazlarda ve giyilebilir teknolojilerde daha iyi performansla sahip sensörler üretmek amacıyla bu unsurlar üzerinde gerçekleştirilen iyileştirmeler ve devam eden çalışmalar, süregelen gelişme ve büyümenin önümüzdeki yıllarda giyilebilir sensör pazarında da devam edeceğini göstermektedir. IDTechEx'in hazırladığı rapor, 2022'de toplam pazar değeri 81 milyar ABD dolarını aşan ve 2014'ten bu yana yıllık gelir açısından üç katına çıkan giyilebilir teknoloji pazarının 2033 yılına kadar 161 milyar ABD dolarına ulaşmasını öngörmektedir [63].

Esnek dokunsal sensörlerin, esnek elektronik alanındaki gelişmeler doğrultusunda potansiyeli oldukça yüksek uygulamalarda vazgeçilmez bir bileşen olarak yer alması ve polimer nanokompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerinin saf polimerlere göre daha üstün olması sebebiyle dokunsal sensör üretimlerinde gittikçe önemli bir yer edinmesi, bu tez çalışmasında nanokompozitlere dayalı esnek dokunsal sensör üretimleri konusunda bir motivasyon sağlamıştır. Bu sebeple polivinil alkol ve sodyum aljinat polimerleri, karbon siyahı, karbon nanotüp, gümüş nanoparçacık ve grafen nanoplatelet dolgu maddeleri ile kullanılarak nanokompozitler oluşturulmuş ve farklı tasarımlarda sensör üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen sensörler, hassasiyet, tepki-toparlanma süreleri ve tekrarlanabilirlik özelliklerinin yanında; piezorezistif, kapasitif, empedans ve faz açısı değişimleri açısından da incelenmiştir. Farklı sensör tasarımları üzerinden farklı incelemelerin yapıldığı tez çalışmasında; Tasarım-1 başlığında yer verilen çalışma, dokunsal sensörün uygulanan kuvvetle sensörün empedansının, direncinin ve

reaktansının değiştiğini göstermektedir. Ayrıca, polimer nanokompozit tabanlı sensörün, aynı tasarımda üretilen ticari bir iletken mürekkep tabanlı sensörden daha iyi performansa sahip olduğu da gösterilmiştir. Tasarım–2 ile verilen sensör çalışmasında ise faz açısına bağlı olarak bir algılama gerçekleştirildiğine değinilmiş ve farklı frekans aralıklarında farklı çalışma mekanizmalarının baskın olduğu gösterilmiştir. Tasarım–3 ile verilen sensör çalışmasında kuvvet uygulanan noktanın ve uygulanan kuvvetin büyüklüğünün belirlendiği bir çalışmaya yer verilmiştir. Tasarım–4’te ise sensörlerin frekans cevabı incelenerek eşdeğer devreleri oluşturulmuştur.

Bu tez çalışması, günümüzde çoğunlukla piezorezistif veya kapasitif özellikleri çalışılan dokunsal sensörlerin empedans ve faz açısı özelliklerinin incelenmesi ve bir basınç veya kuvvet uygulandığı durumda belirli frekans aralıklarında frekans cevaplarının araştırılması açısından önemlidir. Ayrıca, dokunsal bir sensöre kuvvet uygulanan konumun ve kuvvetin büyüklüğünün aynı anda belirlenmesi gibi çoklu işlevler kazandırılması ile ilgili bir çalışmaya, araştırma dünyasının da üzerinde durduğu konulardan biri olarak bu tezde yer verilmiştir. Tez kapsamında üretilen bütün polimer nanokompozit tabanlı dokunsal sensörlerin esnek olması planlanmış ve bu kriter, sensörü esnek alt tabaka üzerinde üreterek veya polimer nanokompoziti bir alt tabakaya ihtiyaç duymayacak şekilde esnek bir yapıda üreterek sağlanmıştır. Farklı nanokompozit malzemelerin farklı sensör tasarımlarıyla kullanılarak bahsedilen özellikler üzerinde durulması, literatürde konuyla ilgili bazı açıkların kapatılmasında rol almıştır.

Gerçekleştirilen alışmalar aşağıdaki sıralamayla verilmiştir:

- i. *Dokunsal sensörler ve zellikleri:* Bu kısımda, sensörlerin ve bu kapsamda esnek dokunsal sensörlerin başlıca özellikleri verilerek çalışma mekanizmalarından, üretim metotlarından, kullanılan malzemelerden ve bu malzemelerin karakterizasyon yöntemlerinden bahsedilmiştir. Güncel araştırmalara değinilmiş ve literatür dünyasından konuyla ilgili örnekler verilmiştir.
- ii. *Polimer nanokompozitler:* Bu kısımda, nanokompozitlerin kullanım amaçları, üretim yöntemleri anlatılmış ve tez çalışmasında üretilen polimer nanokompozitlerin üretim aşamalarına ve karakterizasyon süreçlerine yer verilmiştir.
- iii. *Dokunsal sensör üretimleri ve testleri:* Bu kısımda ise, üretilen polimer nanokompozitler farklı sensör tasarımlarında kullanılmış ve üretilen her

bir sensör için elektromekanik testler gerçekleştirilmiştir. Sensörlerin uygulanan farklı basınçlar altında piezorezistif, kapasitif ve empedans özelliklerindeki değişimler ölçülmüş; hassasiyet, çalışma aralıkları, tepki-toparlanma süreleri belirlenmiş ve frekans tepkisi incelenmiştir. Ayrıca, bir sensör tasarımında direnç ve kapasitans ölçümleri kullanılarak kuvvet uygulanan konum ve uygulanan kuvvetin büyüklüğü belirlenmiştir. Farklı bir sensör ise bir şişeyi tutup kaldırma ve indirme adımlarını içeren bir uygulamada bir empedans analizörü devresi ile kullanılmış ve bahsedilen süreçlerde empedansın değişimi izlenerek grafiğe dökülmüştür.

- iv.* Son aşamada ise tez çalışmasının bir özeti verilerek esnek dokunsal sensörler alanında geliştirilebilecek konulara ve gelecek öngörülerine yer verilmiştir.

2. DOKUNSAK SENSÖRLER VE ÖZELLİKLERİ

2.1. Dokunsal Sensörler

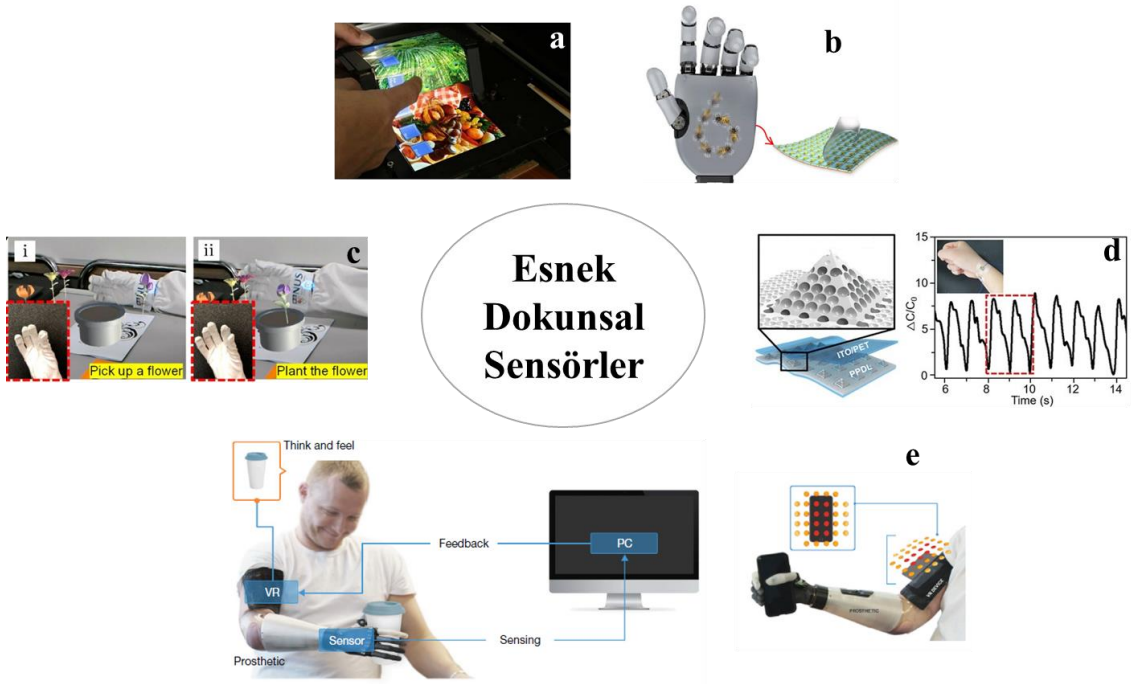
Sensör, genel tanımıyla kuvvet, sıcaklık, ses, mesafe, ışık, kimyasal veya biyolojik maddeler gibi uyanları algılayan ve bunu sayısal ve analog devreler veya mikrodenetleyiciler gibi elektronik cihazlar tarafından değiştirilebilen bir elektriksel sinyale dönüştüren bir cihazdır. Belirli uyan türlerine duyarlı olacak şekilde tasarlanan sensörlerin algılanan olgu hakkında bilgi taşıyan çıkış sinyalleri farklı amaçlar doğrultusunda işlenebilir ve analiz edilebilir [64].

Sensörlerin önemli bir alt dalı olarak dokunsal sensörler, insan derisinin algılama özelliğini taklit etmek amacıyla geliştirilmiş cihazlardır. İnsan ağırlığının yaklaşık %16'sına karşılık gelen deri tabakası, beyinde basınç, titreşim ve esneme gibi etkenleri de kapsayan bir takım uyanlara yanıt vermekle sorumlu özelleşmiş mekanoreseptörlerden, nöronlardan ve sinapslardan oluşan karmaşık bir ağ aracılığıyla, dokunma, sıcaklık, ağrı, basınç ve propriyosepsiyon (vücut pozisyonu ve hareket hissi) algısını kapsayan bir takım somatik algılama işlevlerini yerine getirir [65].

Derideki statik basınç dağılımı, Merkel hücresi reseptörü tarafından algılanır. Ruffini uçları, parmak uçlarında derinin esnediğini ve kaydığını tespit edebilirken; Meissner cisimciği, 10 ile 50 Hz arasında düşük frekanslı titreşimler olarak sınıflandırılan uyanlar için en yüksek hassasiyeti sergiler ve hafif dokunmayı, kavranılan bir cismin kontrolünü ve yüzeyler arasındaki doku ayrımını gerçekleştirebilir. Pacinian parçacıkları, 200 ile 300 Hz frekans aralığında deri ile bir nesne arasındaki görelî hareketlerin ortaya çıkardığı titreşimleri algılamak üzere özelleşmiştir ve yüzeyin nasıl bir dokuya sahip olduğunun algılanmasında kritik bir rol oynar [66]. İnsanların elleriyle, herhangi bir zorlu görevi herhangi bir robotik sistemin yapabileceğinden daha hassas ve daha yüksek doğrulukta yerine getirmesini sağlayan reseptörler bahsedilen dört reseptördür [67]. Dokunsal sensörlere ilham olan insan ellerinin algılama ve çalışma mekanizmasının haricinde, eklem veya kas gibi vücudun başka kısımlarındaki algılamalar da hesaba katıldığında, buradaki reseptörlerden alınan duyasal uyanlara bağlı olarak bir sınıflandırma yapmak mümkündür. Örneğin; kinestetik adı verilen algılama çeşidi eklemlerdeki ve kaslardaki reseptörlerden gelen uyanları işlerken; kutanöz algılama, diğerk bir kullanımıyla dokunsal algılama, deriye gömülü reseptörlerden alınan duyasal uyanlarla ilgilidir. Kinestetik ve kutanöz algılamanın her ikisinden alınan veriler ise haptik algılama sınıfını oluşturmaktadır [68]. Haptik algılamanın bir parçası olan dokunsal algılama ile

dokunulan yapının ya da cismin dışsal özellikleri hakkında bilgi sahibi olunurken; cisim hareket ettirildiğinde kinestetik algılama aracılığıyla alınan geri bildirim sayesinde cismin ağırlığı ve uygulanan tork hakkında bilgi sahibi olunabilir. Böylece cisim ve dokunan taraf arasında çift taraflı bir iletişim sağlandığından, uygulamaya göre faydalı bir etkileşim sağlanması mümkün olur [69]. Buna ek olarak, dokunsal algılama, bir cisme hafif bir şekilde dokunulduğunda (soft touch), diğer bir deyişle dokunulan ve dokunan yapı arasındaki mesafe sıfır olduğunda veya cisme bir miktar basınç uygulanmasına bağlı olarak meydana gelen dokunma şekline göre sırasıyla dokunma sensörü ya da dokunsal sensör adını alabilir. Bu bilgiler ışığında, dokunsal algılama, bir alana uygulanan bir temas olayının belirli bir özelliğini algılama, lme ve ardından sinyalleri yorumlama işlemi olarak tanımlanabilir [70]. Dokunsal algılama çevreden gelen dış uyaranları algılamaya izin veren en önemli bileşenlerden biridir. Bu sebeple, özellikle robotikte ve insan–makine etkileşiminin gerektiği yeni nesil cihazlarda dokunsal sensörlere yönelik artan bir talep vardır.

Günümüzde, esnek ekranlarda [71], robotik dokunma işleviyle kullanılan cihazlarda [72], artırılmış ve sanal gerçeklik uygulamalarında [73], sağlık takibinde [74] ve protez yapıların daha işlevsel hale getirilmesinde [75] önemli bir yere sahip olan dokunsal sensörlere dair bazı çalışmalar şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 (a) Bükülmüş durumdayken dokunma işleminin gerçekleştirildiği esnek ekran [71] (b) Robotik dokunsal sistem [72] (c) Artırılmış gerçeklik ortamında *i.* çiçeğin tutulması *ii.* saksıya dikilmesi [73] (d) nabız sinyalinin izlenmesi [74] (e) protez kola yerleştirilen sensörün ‘düşün ve hisset’ işleviyle kullanılması [75]

2.1.1. Dokunsal Sensörlerin Değerlendirilme Kriterleri

Dokunsal sensörlerin performansının incelenmesinde önem taşıyan maddeler, diğer sensör türleriyle benzerlikler göstermektedir. Genel olarak incelenen hususlar arasında, sensörün giriş ve çıkış değerleri arasındaki ilişkinin incelendiği hassasiyet ve transfer fonksiyonu, sensörün ölçeklenebilirliği, çalışma aralığı ve tepki süresi gibi unsurlar yer almaktadır. Bunlara ek olarak sensör ve kullanılacağı uygulama özelinde başka özellikler de incelenebilir.

2.1.1.1. Transfer Fonksiyonu

Dokunsal bir sensöre uygulanan uyarın ile elde edilen çıkış arasındaki ilişki sensörün transfer fonksiyonuyla ifade edilebilir. Transfer fonksiyonu bir grafikte görselleştirilebileceği gibi belirli uyarınlara karşılık gelen çıkış değerlerini gösteren bir tablo da kullanılabilir. Sensörün özelliği hakkında önemli bilgiler içermesinin yanı sıra, transfer fonksiyonu sensörün kalibrasyonu ya da performansını tahmin etmek için de kullanılabilir. Transfer fonksiyonları özellikle benzetim ortamında sensör çalışmasını göstermek için kullanılmaktadır. Uyarın ve çıkış sinyali arasındaki ilişkiyi belirleyen

matematiksel ifadeyi etmek için eğri uydurma (curve fitting) yöntemlerini içeren bazı yaklaşımlar mevcuttur.

Örneğin; dokunsal bir sensöre kuvvet uygulanıp empedanstaki değişim ölçülüyorsa, giriş değeri kuvvete (F) karşılık gelen empedans değeri Z üzerinden Denklem 2.1 yazılabilir.

$$Z = Z_0 + B(F - F_0) \quad (2.1)$$

Burada Z_0 ve F_0 sırayla empedans ve kuvvet değerlerinin başlangıç değerleridir. B ise sensörün hassasiyetini ifade eder. Eğer kuvvet geniş bir aralıkta uygulanıyorsa, sensör doğrusal olmaktan uzaklaşabilir. Doğrusal olmama durumunun ihmal edilebildiği sensörler olmasına rağmen kimi zaman bu mümkün olmayabilir. Böyle durumlarda doğrusal olmayan bazı matematiksel ifadelerle yaklaşımlar yapılabilir. Çizelge 2.1’de en çok kullanılan bazı doğrusal olmayan fonksiyonlar ve denklemleri verilmiştir [64].

Çizelge 2.1 Bazı doğrusal olmayan fonksiyonlar ve denklemleri

Doğrusal Olmayan Fonksiyon	Denklem
Logaritmik	$Y = M + N \ln x, x = e^{\frac{Y-M}{N}}$
Üstel	$Y = M e^{kx}, x = \frac{1}{k} \ln \frac{Y}{M}$
Güç	$Y = M + N x^k, x = \sqrt[k]{\frac{Y-M}{N}}$

Eğer bir sensörün transfer fonksiyonu yukarıda verilen hiçbir denklemle ifade edilemiyorsa polinom yaklaşımları kullanılabilir.

2.1.1.2. Hassasiyet

Dokunsal bir sensörün hassasiyeti, kuvvet veya basınç gibi bir uyarının, direnç, kapasitans ya da empedans gibi bir çıkış sinyalinde ne kadarlık bir değişime sebep olduğunun bir göstergesi olarak tanımlanır. Gerinim sensörlerinde hassasiyet ‘gauge faktörü’ (Gf) adı verilen bir kavram üzerinden tanımlanırken; dokunsal sensörlerde gerinim yerine kuvvet veya basınç hesaba katılır. Yüksek hassasiyet her zaman arzu edilen bir kriter olmakla beraber, hassasiyeti yüksek sensörler aynı zamanda daha yüksek

doğruluk oranına, çözünürlüğe ve sinyal gürültü oranına sahiptir [76]. Birçok sensörde farklı ölçüm aralıklarında farklı hassasiyetler gözlemlenebilir. Hassasiyet, sensöre dair uyarının ve çıkış sinyallerinin değerleri incelenerek hesaplanabileceği gibi, sensörün transfer fonksiyonu üzerinden de hesaplanabilir. Doğrusal bir fonksiyona sahip sensörün eğimi sabit bir sayı iken; doğrusal olmayan bir fonksiyonun eğimi, sabit bir sayı değildir. Bu tür fonksiyonlarda, farklı uyarın aralıkları için hassasiyetlerin incelenmesi gerekir. Dokunsal bir sensörün hassasiyeti ve algılama gerçekleştirdiği aralık arasında bir ödüleşme söz konusudur. Bu nedenle, yüksek hassasiyette ve geniş çalışma aralığına sahip sensörler üretmek, üzerinde oldukça çalışılan konular arasındadır.

2.1.1.3. Ölçeklenebilirlik

Ölçeklenebilirlik, dokunsal bir sensörün çıkış ölçüm aralığını ve uygulanabilir giriş uyarınlarının bir sınırlamasını tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Ölçüm hatalarının kabul edilebilir bir aralıkta olması şartıyla, kuvvet veya basınç gibi bir giriş uyarınlarının minimum ve maksimum değerleri arasındaki fark sensörün tam ölçekli girişini ifade ederken; bu minimum ve maksimum değere karşılık gelen elektriksel çıkış sinyalleri arasındaki fark ise tam ölçekli çıkışı açıklamak için kullanılır [77].

2.1.1.4. Doğruluk

Doğruluk oranı, dokunsal sensöre giriş olarak uygulanan basınç veya kuvvetin gerçek değerinden en yüksek sapmasıdır. Gerçek değer, giriş uyarını baz alınarak belirlenir ve bir miktar belirsizliğe sahip olarak kabul edilir. Elektriksel çıkış sinyalinden hesaplanan değer ile gerçek giriş uyarını değeri arasındaki fark, sapma olarak tanımlanabilir. Dokunsal sensör üretiminde söz konusu olan malzeme farklılıkları, tasarım hataları, üretim toleransları ve diğer sınırlamalar, sensörlerin aynı koşullar altında test edildiğinde bile gerçek transfer fonksiyonlarında farklılıklara sebep olabilir. Gerçek transfer fonksiyonlarının işleyişinin belirli bir doğruluk sınırı içinde kalması için, her bir sensör benzer koşullar altında kalibre edilerek hatalar minimuma indirilebilir. Eğer bir dokunsal sensörün çıkış sinyalinde olası değerleri üretmek için interpolasyon gibi yöntemler kullanılıyorsa bu işlemler sonucunda oluşan hata da sensörün doğrusallığını etkiler. Bu işlem, dokunsal sensörlerin belirli bir cihaza özel olarak ayarlanmalarını sağladığı için, satın alınan her bir sensör arasındaki farklılıklardan bağımsız olarak hata sınırları daraltılmış olur [78]. Doğruluk derecesi, histerezis, ölü bant, kalibrasyon ve tekrarlanabilirlik gibi unsurlardaki her bir hatanın toplam etkilerini içerir. Doğruluğu artırmak için, hataya neden olan her faktör göz önünde bulundurulmalı ve azaltılmalıdır.

2.1.1.5. Çözünürlük

Dokunsal bir sensörün çözünürlüğü, kuvvet veya basınç gibi bir giriş uyarısında meydana gelen en küçük değişimin elektriksel çıkış sinyalinde algılanması özelliğine karşılık gelir. Başka bir deyişle, çıkış sinyalinde algılanabilecek en küçük giriş uyarını, çözünürlüğü tanımlamak için kullanılır. Çözünürlük, genellikle tam ölçekli girişin bir yüzdesi, bit, mesafe veya volt cinsinden verilir. Eğer en küçük giriş uyarını ve giriş aralığı arasındaki fark çok büyükse giriş aralığı *dB* alınarak da hesaplama yapılabilir [79].

Uzamsal çözünürlük ise, dokunsal bir sensörde iki farklı noktaya uygulanan uyarının ayırt edilebileceği en küçük uzaklıktır. Uzamsal çözünürlük vücudun farklı bölgeleri için değişiklik gösterir ve bu değer parmak uçları için yaklaşık 1 mm iken; avuç içleri için 7 mm'dir [80].

2.1.1.6. Histerezis

Dokunsal bir sensör, bir niceliği ölçerken giriş parametresinin artan veya azalan yönde uygulanmasına göre farklı sonuçlar verebilir. Histerezis hatası, aynı uyarın noktasının artan ve azalan yönlerinde ölçülen değerlerin gösterdiği farklılık üzerinden hesaplanır [81]. Artan ve azalan döngüdeki değerler arasındaki maksimum sapma tam ölçekli girişe bölünerek histerezis hatası belirlenebilir. Histerezis hataları, çoğunlukla sensör malzemelerinden, sensör yapısından veya sıcaklık ve nem değişikliklerinden kaynaklanır. Özellikle algılayıcı işlevinde polimer kullanılan sensörlerde polimerin toparlanma süresinden kaynaklı olarak geniş histerezis eğrileri oluşabilir. Sensörün, tekrarlanan ölçümlerde doğruluk oranının yüksek olması için histerezis hatasının az olması istenir.

2.1.1.7. Doğrusal Olmama

Çoğu dokunsal sensörün kapasitans, direnç ya da empedans üzerinden alınan çıkış sinyali, girişte uygulanan basınç ya da kuvvet parametrelerinin değişimi ile doğrusal olmayan bir şekilde değişir. Doğrusal olmama hatası, transfer fonksiyonları doğrusal olmayan fonksiyonlarla ifade edilen ve transfer fonksiyonu eğrisine düz çizgilerle yaklaşımların yapıldığı sensörler için kullanılan bir ifadedir. Dokunsal bir sensörün doğrusallığı sıcaklık veya rüzgâr gibi faktörlerden dolayı da değişebilir. Bu etkenler sensör özelliklerini doğrusal olmayan bir şekilde etkileyerek sensörün girişi ve çıkışı arasındaki ilişkiyi değiştirir. Genel olarak, bir sensörün tasarımını basitleştirmek için ve ölçülen değer gerçek değere ne kadar yakın olduğunun belirlendiği kalibrasyon işlemi için giriş uyarını ve ölçülen değer arasında doğrusal bir ilişki olması istenir. Doğrusallaştırma ile doğrusal

olmayan bir transfer fonksiyonu eğrisi, mümkün olduğu kadar düz bir çizgiye yaklaştırılır [82].

2.1.1.8. Tekrarlanabilirlik ve Tepki – Toparlanma Süreleri

Tekrarlanabilirlik hatası, dokunsal bir sensörün aynı koşullar altında birden fazla çalışma döngüsünde çıkış değerleri arasındaki maksimum fark olarak ifade edilir. Dokunsal bir sensöre belirli bir aralıktaki kuvvet veya basıncın uygulanarak birden fazla ölçüm döngüsü tekrarlandığında elde edilen çıkış sinyalleri arasındaki maksimum fark tekrarlanabilirlik hatasını verir. Genellikle, tekrarlanabilirlik hatası, giriş uyarınının tam aralığının yüzdesi olarak ifade edilir.

Dokunsal sensörlerin bir giriş uyarındaki anlık bir değişikliğe tepki vermeleri için bir süre geçmesi gerekir. Dokunsal sensörlerin dinamik cevabını değerlendirmek için kullanılan parametrelerden olan tepki süresi, bir uyarın varlığında sensörün çıkışının önceki durumundan nihai yerleşik durumuna ulaşması için gereken süre olarak tanımlanabilir ve genellikle sensörün maksimum çıkış değerinin %90'ına ulaşmasına kadar geçen süre olarak tanımlanır. Toparlanma süresi ise sensörün maksimum çıkış değerinden minimum çıkış değerinin %10'una düşmesi için gerekli süredir [83]. İnsan-makine etkileşiminin gerektiği sağlık izleme sistemleri, sanal gerçeklik cihazları gibi sistemlerde daha verimli bir etkileşim olması için dokunsal sensörlerin tepki süresinin 100 ms ve altında olması tercih edilir [84]. Ayrıca, sensörün tepki ve toparlanma süreleri değerlendirilirken ölçüm devresinin sinyali işleme ve yanıt verme süreleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu süreler, genellikle ns veya μ s seviyelerinde olmasına rağmen, sensörün kullanıldığı uygulamaya göre önem taşıyabilir ve sensörün tepki süresine eklenir.

2.1.1.9. Diğer Özellikler

Dokunsal sensörler kullanım amaçlarına, kullanılacakları ortama ve çıkıştan ölçülecek değere göre farklı gerekliliklere sahip olabilirler. Mobil bir cihazda kullanılacak sensörle, robotikte, uzay veya sualtı çalışmalarında kullanılacak sensörlerden beklenen kriterler farklıdır. Bu sebeple, gerekli kriterlerin belirlenmesi sensörlerin kullanım amacına bağlıdır. Sensörlerde gerek duyulması halinde incelenebilecek diğer özellikler arasında; doyum noktası, ölü bant bölgesi, çıkış sinyalinin biçimi, güç tüketimi, güvenilirlik ve belirsizlik ile uyarın sinyalinin değişken olması durumunda önem taşıyan dinamik özellikler yer almaktadır. Bu özellikler ve detaylandırılmayan farklı sensör özellikleri kullanım açısından ayrıca önem arz edebilir. Örneğin nesnelerin interneti

uygulamalarında güç tüketimi büyük önem taşıırken askeri uygulamalarda çalışma ve depolanma koşullarından dolayı güvenilirlik büyük önem taşıyabilmektedir.

2.2. Dokunsal Sensörlerin Çalışma Mekanizmaları

2.2.1. Piezorezistif Algılama

Piezorezistif algılama, mekanik bir etki (gerinim veya basınç) altında malzemenin direncinin değişmesi ilkesine dayanır. Piezorezistif dokunsal sensörlerde, uygulanan basınç, sensörün direncini genellikle arayüz etkileşimi ve birden çok katman arasındaki etkileşimle değiştirir. Arayüz etkileşimi, algılayıcı malzeme ve iletken elektrot ara yüzündeki direncin değişimini ifade eder. Uygulanan basınç ile iki katman arasındaki temas alanı değişime uğradığı için direnç de değişir. Birden fazla katmandan oluşan piezorezistif sensörlerde ise benzer olarak, uygulanan basınç, katmanlar arasındaki temas direncini etkileyerek algılamayı gerçekleştirir. Sensör üzerinden ölçülen direnç, çoğunlukla algılama katmanında kullanılan malzemenin direncine ve sensörü ölçüm devresine bağlamak için kullanılan ara yapıların direncine bağlıdır. Sensörün hassasiyeti ve doğruluğu, algılayıcı malzemenin piezorezistif özellikleri ve sensör yapısının tasarımı gibi unsurlara bağlıdır. Direncin ifade edildiği Denklem 2.2, basitliği ve kolay ölçüm imkânı sunması sebepleriyle piezorezistif sensörlerin özelliklerinin araştırılmasında sıkça kullanılır.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.2)$$

Denklemde ρ ; öz direnç, l ; sensörün uzunluğu, A ise enine kesit alanıdır.

Piezorezistif algılamaya dayalı gerinim (strain) sensörlerinin hassasiyetine ‘gauge faktörü’ (Gf) adı verilir ve Denklem 2.3 üzerinden hesaplanır.

$$Gf = \frac{\Delta R/R_0}{s} \quad (2.3)$$

Denklemde, ΔR ; direnç değişimini, R_0 ; başlangıç direnç değerini, s ise uygulanan gerinimi ifade etmektedir. Dokunsal sensör işlevinde kullanılan piezorezistif sensörlerde ise gerinim yerine uygulanan basınç aralığı alınarak hassasiyet hesaplanır [85].

Piezorezistif sensörler, algılama katmanında kullanılan nanokompozitler açısından incelendiğinde, elektriksel iletkenliğin polimer matrisi içindeki iletken parçacıkların dağılımından ve parçacıklar arasındaki bağlantıdan etkilendiği söylenebilir. Piezorezistif

etki, nanokompozite bir kuvvet uygulandığında bu iletken parçacıkların dağılımındaki değişikliklerden kaynaklanır [86]. Bir basıncın uygulanmadığı durumda iletken parçacıkların birbirleriyle doğrudan temasını önleyen ve elektron akışını engelleyen bir polimer yalıtkan katmanı vardır ve nanokompozit yüksek dirence sahiptir. Bir dış kuvvet uygulandığında ise iletken parçacıklar birbirine yaklaşarak elektron taşınması için yollar oluşturur. Bu artan bağlantı, direncin düşmesine ve elektriksel iletkenliğin artmasına neden olur. Nanokompozitteki iletken parçacıkların yoğunluğu, piezorezistif etkinin optimize edilmesinde çok önemli bir rol oynar. İletken parçacıkların miktarının artan dış kuvvetler altında hâlen iletken yollar oluşturabildiği sızıntı eşiğine yakın bir konsantrasyona sahip olması istenir. Bu eşik, sensörün hassasiyetini ve basınç değişikliklerine tepkisini en üst düzeye çıkarır.

Bunlara ek olarak, sinyalin ölçümünün kolayca yapılabilmesi, piezorezistif dokusal sensörlerin bir başka avantajıdır. Wheatstone köprü devresi veya gerilim bölücü bir devre kullanılarak dirençte meydana gelen değişimleri belirlemek mümkündür. Bu ölçüm devreleri, güvenilir ve kolay yorumlanabilir bir çıkış sinyali sağlamak için sensöre entegre edilebilir. Genel olarak, direnç denkleminin ve algılama mekanizmasının basitliği, sinyal alma kolaylığı ile birlikte piezorezistif basınç sensörlerini, doğruluk ve entegrasyon kolaylığının istendiği çeşitli uygulamalar için uygun bir seçenek haline getirir [87].

2.2.2. Kapasitif Algılama

Kapasitif algılama, sensörün kapasitansında meydana gelen değişime dayalı bir çalışma mekanizmasıdır. Kapasitans, A ; elektrotlar arasındaki temas alanı, ϵ ; dielektrik sabiti, d ; elektrotlar arasındaki mesafe olmak üzere Denklem 2.4 ile hesaplanabilir.

$$C = A \frac{\epsilon}{d} \quad (2.4)$$

Bu denkleme göre, kapasitans çoğunlukla elektrotlar arasındaki temas alanı, dielektrik sabiti ve elektrotlar arasındaki uzaklık parametreleriyle kontrol edilir. Bu yaklaşımlar arasında, elektrotlar arasındaki mesafenin değişimi, basıncı kolayca algılamayı sağlayan temel husustur. Bu yaklaşıma göre, herhangi bir basıncın uygulanmadığı başlangıç durumunda, elektrotlar arasındaki mesafe basınç uygulandığı duruma göre daha fazla olduğu için, sensör küçük bir başlangıç kapasitansına sahiptir. Bir dış kuvvet uygulandığında ise dielektrik tabaka sıkıştırılır ve iki elektrot arasındaki mesafe azalarak

kapasitans yükselir. Bu nedenle, kapasitif bir sensör, kapasitansta meydana gelen değişiklik ile algılamayı gerçekleştirebilir.

Sadece dokunmanın algılanması amacıyla geliştirilen kapasitif sensör teknolojileri genel olarak karşılıklı kapasitif (mutual capacitive) ve kendinden kapasitif (self capacitive) sistemler olarak iki ana kategoriye ayrılabilir. Kendinden kapasitif bir sistemde, kapasitif değişiklikler toprağa göre ölçülür ve bir elektrot ile iletken bir yapı (kullanıcının parmağı gibi) kapasitörün iki katmanı gibi davranır. Yapıya dokunulduğunda kendinden kapasitif sistemin elektroduna ek bir kapasitans eklenir. Sistem, kapasitanstaki bu değişiklikleri ölçerek dokunmaları veya yakınlığı algılayabilir ve yorumlayabilir. Öte yandan, karşılıklı kapasitans, iki 'yükü' nesne arasındaki bir kapasitans anlamına gelir. Bu durumda kapasitif değişimler iki iletken tabaka veya elektrot arasında ölçülür. Parmak gibi bir nesne sensör yüzeyine yaklaştığında veya dokunduğunda elektrotlar arasındaki kapasitansta değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler ölçülerek dokunuşları veya yakınlığı algılamak için analiz edilir [62]. Günümüzde akıllı cihazların dokunmatik ekranlarında ağırlıklı olarak bu yöntem kullanılmaktadır. Fakat, bu yöntemin kullanıldığı sensörlerde uygulanan mekanik etkinin sadece dokunma ya da basınç olup olmadığı ayırt edilememektedir.

Konfigürasyonlarına (örneğin; paralel, silindirik ve küresel), dielektrik malzemelere (örneğin; polimerik ve akışkan) ve kapasitans değişimine neden olan mekanizmalara (örneğin; alan değişimi) veya üretim yöntemlerine göre (örneğin; mikro işleme) sınıflandırılabilen kapasitif sensörler, yüksek çözünürlüğe, geniş bant genişliğine, basit tasarıma, düşük maliyete ve dayanıklı yapıya sahiptir [78].

2.2.3. Piezoelektrik Algılama

Piezoelektrik malzemeler, uygulanan bir kuvvet veya basınç sonucunda bir elektrik polarizasyonu veya yüzey elektrik yükü oluşturarak bir gerilim üretilmesini sağlayan malzemelerdir. Mekanik etki, malzeme içindeki negatif ve pozitif yüklerin yer değiştirerek bir polarizasyon oluşmasına sebep olur ve karşıt yüzeylerde biriken bu yükler arasında bir gerilim farkı oluşur [88]. Ters piezoelektrik etkide ise malzemeye gerilim uygulanması sonucunda mekanik bir tepki elde edilir ve bu özelliği mikro ve nano boyutlarda eyleyicilerde sıklıkla kullanılır. Eğer uygulanan gerilim AC olursa, malzemedeki mekanik dalgalanmalar gözlemlenir ve farklı yönlerde mekanik ölçümler alınabilir. Piezoelektrik etkinin bahsedilen dinamik yapısı ve çalışması için dış bir elektriksel kaynağa ihtiyaç duymaması bu algılama metodunun kendi kendine çalışan

dokunsal sensör tasarımlarında veya enerji hasadı uygulamalarında oldukça tercih edilmesinde rol oynamaktadır.

Bir malzemenin piezoelektrik katsayısı, malzemeye uygulanan mekanik etkinin ne kadar polarizasyon oluşmasını sağladığı bilgisini verdiği için verimliliği belirleyen en önemli unsurlardandır. Polarizasyon ve piezoelektrik katsayısı arasındaki ilişki Denklem 2.5 ile verilmiştir [89]. Denklemde D , elektriksel yer değiştirmeyi; E , elektrik alan vektörünü; d piezoelektrik gerinim (strain) katsayısını; ε^T dielektrik katsayılarının tensörünü ve T , gerilim (stress) tensörünü göstermekte ve i, j, k ise uzamsal yönlere karşılık gelmektedir.

$$D_i = d_{ij}T_j + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (2.5)$$

Piezoelektrik etkinin görüldüğü ve iletken olmayan malzemeler arasında seramikler (örneğin; kurşun zirkonat titanat (PZT)), kristaller (örneğin; lityum niyobat (LiNbO_3)), Poliviniliden florür (PVDF) ve silikon üzerinde ince film şeklinde üretilen alüminyum nitrür (AlN) gibi malzemeler yer alır [90]. Piezoelektrik etkiye sahip malzemeler, aynı zamanda sensörlerde algılayıcı görevinde olan polimer nanokompozitlerde dolgu maddesi olarak kullanılabilir.

2.2.4. Diğer Çalışma Mekanizmaları

Dokunsal sensör üretimlerinde en çok kullanılan algılama mekanizmaları arasında yer alan piezorezistif, kapasitif ve piezoelektrik yöntemlerin dışında tercih edilen diğer algılama yöntemleri ise optik, manyetik ve triboelektrik algılama yöntemleridir. Optik yöntem, uygulanan kuvvete karşılık ışığın şiddetinde meydana gelen değişimi kullanarak algılama işlemini gerçekleştirir ve yüksek hassasiyet, geniş çalışma aralığı, zor şartlarda kararlı çalışma gibi olumlu özelliklere sahip olmasına rağmen, esnek yapılarla kullanılmasının zorluğu, güç tüketimi ve boyutlarının küçültülmesi başta olmak üzere bazı dezavantajları da beraberinde getirir [65, 91]. Manyetik algılama, manyetik özellikleri mekanik bir etkiyle değişebilen malzemelerin kullanımına dayanır. Malzemeye bir kuvvet uygulandığında değişen manyetik akı ölçülerek algılama gerçekleştirilir [92]. Yüksek hassasiyete ve temassız algılamayla sunduğu kullanım kolaylığına rağmen, manyetik algılamanın diğer algılama metotlarına göre daha az tercih edilmesinin başlıca sebepleri arasında uygun malzemelerin eksikliği ile manyetik alan ve gürültülere karşı savunmasız olması gelmektedir [93]. Triboelektrik etki, bir malzemenin sürtünme yoluyla başka bir malzemeyle temas ettikten sonra elektrik yüklü hale geldiği bir olguyu ifade eder. Elektrostatik etkinin bir sebebi olan triboelektrik etki, tek ve çift

elektrotlu yapılarla kullanımına göre farklı sensör tasarımlarıyla kullanılmaktadır [94]. Kullanılabilecek malzeme çeşitliliği, yüksek hassasiyete sahip olması, diğer algılama mekanizmalarıyla kullanılabilme avantajlarının yanında, çıkış sinyalinde kararsızlıklar, kompleks üretim süreci ve sistemin paketlenmesinde zorluklar mevcuttur [95, 96]. Tüm bu yöntemlere ek olarak, temassız algılamada önemli bir yeri olan yakınlık (proximity) sensörleri, farklı algılama yöntemleri kullanılarak üretilebilir. Örneğin; kapasitif veya endüktif mekanizmaya göre üretilen yakınlık sensörleri iletken olan veya olmayan cisimleri algılamak; ultrasonik yakınlık sensörleri sesi yansıtan nesnelere algılar [97].

Dokunsal sensörlerin algılama mekanizmasının seçiminde önem taşıyan bir diğer unsur da sensörün giriş uyarınının durağan ya da dinamik olmasıyla ilgilidir. Durağan bir dokunsal sensörün girişine uygulanan etki düşük frekanslı ya da DC bir sinyal iken, dinamik bir dokunsal sensör, titreşim gibi yüksek frekanslı bir girişe sahip olabilir. Bu sebeple algılama yöntemine karar verilirken bu özellik de göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin; durağan bir giriş için piezoelektrik algılama yöntemi yetersiz kalacak ve durağan bir girişin algılanması için farklı mekanizmalarla hibrit bir yapı oluşturulması gerekecektir [98].

2.3. Esnek Dokunsal Sensör Üretimi

2.3.1. Sensör Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Polimer Nanokompozitler

Esnek dokunsal sensörler, giyilebilir elektronik, robotik ve biyomedikal dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda temel bileşenlerdir. İletken veya iletken olmayan bir polimer matrisinin iletken nano dolgu maddeleri ile birleşerek oluşturduğu fonksiyonel nanokompozitler esnek sensörlerin üretiminde çok önemli bir rol oynar. Nanokompozitlerin üretimi sentez ve işleme süreçleri, karıştırma, püskürtme, katmanlı yapılandırma gibi işlemleri içerebilir. Esnek nanokompozitlerde bir mekanik deformasyon meydana geldiğinde, direnç, kapasitans veya empedans değerlerinde bazı değişiklikler meydana gelebilir. Bu durum, nanokompozitin fiziksel yapısındaki değişikliğin iletken yollarda veya dolgu maddeleri arasındaki ara yüzey etkileşimlerinde yol açtığı değişikliğin bir sonucudur [99]. Elektriksel özelliklerdeki bu değişiklik ölçülebilir ve uygulanan mekanik uyarınla ilişkilendirilerek nanokompozitin bir sensör olarak işlev görmesini sağlar. Nanokompozitlerde kullanılan farklı iletken dolgu maddeleri arasında CNT'ler [100], grafen [101], metal nanoparçacıklar [102] (örneğin; gümüş veya altın), iletken polimerler [103] ve bu malzemelerin hibrit kombinasyonları yer alır. Her dolgu maddesi, farklı elektriksel özellikler ve mekanik esneklik sunarak

çeşitli dokunsal sensör tasarımlarına olanak tanır. Nanokompozit üretiminde bu dolgu maddeleriyle kullanılan polimerler ise elastomerler ya da hidrojeller olabilir. Elastomerler arasında en çok kullanılanlar; PDMS [104], Ecoflex [105], PET [106] iken; biyo uyumlu, toksik olmayan ve özellikle biyomedikal uygulamalarda tercih edilen hidrojellere örnek olarak ise PVA [107], aljinat [108], PDA [29], PEDOT [10] ve PPy [22] verilebilir.

Metal, seramik ve polimer nanokompozitler olarak sınıflandırılan nanokompozitlerden polimer nanokompozitler, bir polimer matrisi ile en az bir boyutu 100 nm'nin altında olan bir iletken dolgu malzemesinin bir araya getirilmesiyle oluşan yapılardır [109, 110]. Elde edilen bu yapıların saf polimerlere ya da polimer kompozitlere kıyasla mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinin daha üstün olması, onların başta sensörler olmak üzere, tıbbi aygıtlarda ve yapay organlarda, insan-makine iletişimi alt sistemlerinde ve robotik alanlarında pek çok uygulama için tercih edilmelerinde rol oynar. Polimer olarak doğal ya da sentetik polimerler, elastomerler ya da hidrojeller gibi biyo polimerler kullanılırken; dolgu maddesi olarak CB, CNT'ler, grafen, metal nanoparçacıklar veya metal nanoteller kullanılmaktadır. Ayrıca hem polimerlerde hem de dolgu maddelerinde kullanım amacına göre birden fazla malzeme kullanılabilir.

Polimer nanokompozitlerin bahsedilen gelişmiş özellikleri taşıyabilmesi, polimer ve dolgu maddesi arasındaki arayüz etkileşiminin artmasına, başka bir deyişle dolgu malzemesinin polimer matrisi içinde mümkün oldukça homojen bir şekilde dağılmasına bağlıdır [111]. Bu dağılımda, polimerin ve dolgu maddesinin yapısı, dolgu maddesinin uzunluk-çap oranı ve dolgu maddesinin polimer içindeki miktarı önem taşımaktadır. Dolgu maddesinin polimer matrisi içinde homojen dağılımı, hâlâ üzerinde çalışılan ve yeni yöntemlerin geliştirilmekte olduğu bir konudur.

Polimer nanokompozitlerin üretilmesi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlar içinde en yaygın olarak kullanılanları; çözelti karıştırma (solution mixing), eriyik karıştırma (melt blending) ve yerinde polimerizasyon (in situ polymerization) metotlarıdır [112]. Çözelti karıştırma metodu, özellikle laboratuvar ortamında kullanılan bir üretim yöntemidir ve tez çalışmasında üretilen tüm nanokompozitler bu metotla üretilmiştir. Bu yöntemde, polimer ve dolgu maddesi ayrı ayrı uygun çözücülerde çözüldükten sonra karıştırılır. Çözücüler, birbirlerine karışabilmeleri şartıyla farklı olabilir. Çözelti karıştırma metoduyla nanokompozit hazırlanırken çoğunlukla sonikasyon, manyetik karıştırma ve yüksek hızlı homojenleştirme teknikleri kullanılır [113]. Bu tekniklerin olası bir dezavantajı, dolgu maddesinin yapısal olarak zarar görerek bazı özelliklerini kaybetme

ihtimalinin olmasıdır. Eriyik karıştırma metodu, özellikle uygun çözücüsü olmayan ve çözelti karıştırma tekniğinin uygulanamadığı polimerlerle nanokompozit üretmek için kullanılır [113]. Bu metotta dolgu maddesi, erimiş haldeki polimere eklenir. Bu sebeple dolgu malzemesinin birikerek belli noktalarda yığılmasının önüne geçilmesine dikkat edilmelidir. Ayrıca polimerin erime ve zarar görme sıcaklıkları da göz önünde bulundurulmalıdır [114]. Eriyik karıştırma metodu özellikle endüstriyel alanda düşük maliyetle nanokompozit üretimi için uygun bir seçenektir [113]. Bir diğer nanokompozit üretim yöntemi ise yerinde polimerizasyon tekniğidir. Bilindiği gibi polimerler monomerlerin polimerizasyon işlemine tabi tutulması sonucu elde edilir. Bu teknikte dolgu malzemelerinin monomerler içinde dağılımı sağlanır ve sonrasında ısı, ışık ya da başka bir uygun başlatıcı (precursor) eşliğinde polimerizasyon işlemi başlatılır [115]. Dolgu maddesi sonradan polimere eklenmediği için bu sayede dolgu malzemesinin yığılmasının önüne de geçilmiş olur. Yerinde polimerizasyon metodunun başlıca avantajları arasında dolgu maddesi ile polimer arasında yüksek arayüz etkileşimi sağlamasıdır [116].

2.3.2. Sızıntı Teorisi

Polimer nanokompozitin özellikleri, polimer matrisinin ve dolgu maddesinin özelliklerinin bir arada değerlendirilmesi ile belirlenir. Tek başına yalıtkan olan bir polimer malzeme, iletken dolgu maddesinin kompozit yapıdaki ağırlıkça miktarı arttıkça iletken hale gelir. Sızıntı teorisi, nanokompozit içinde düzenli ya da rastgele dağılan bu iletken parçacıklar arasındaki bağlantıyı tanımlamak için ileri sürülmüştür [117]. Bu teoriye göre, nanokompozitlerin iletken hale gelmesi dolgu maddesinin kritik bir değere ulaştığı anda gerçekleşmektedir. Bu değere ise sızıntı eşiği (percolation threshold) adı verilmiştir. Başka bir deyişle, yalıtkan durumdan iletkenliğe ani bir geçişin olduğu değer, sızıntı eşiğidir. Nanokompozitin iletkenliğinin, dolgu malzemesinin iletkenliği ve miktarı ile ilişkili verildiği Denklem 3.1, sızıntı teorisini ifade etmek için kullanılır [118].

$$\sigma = \sigma_0 (p - p_c)^t \quad (2.6)$$

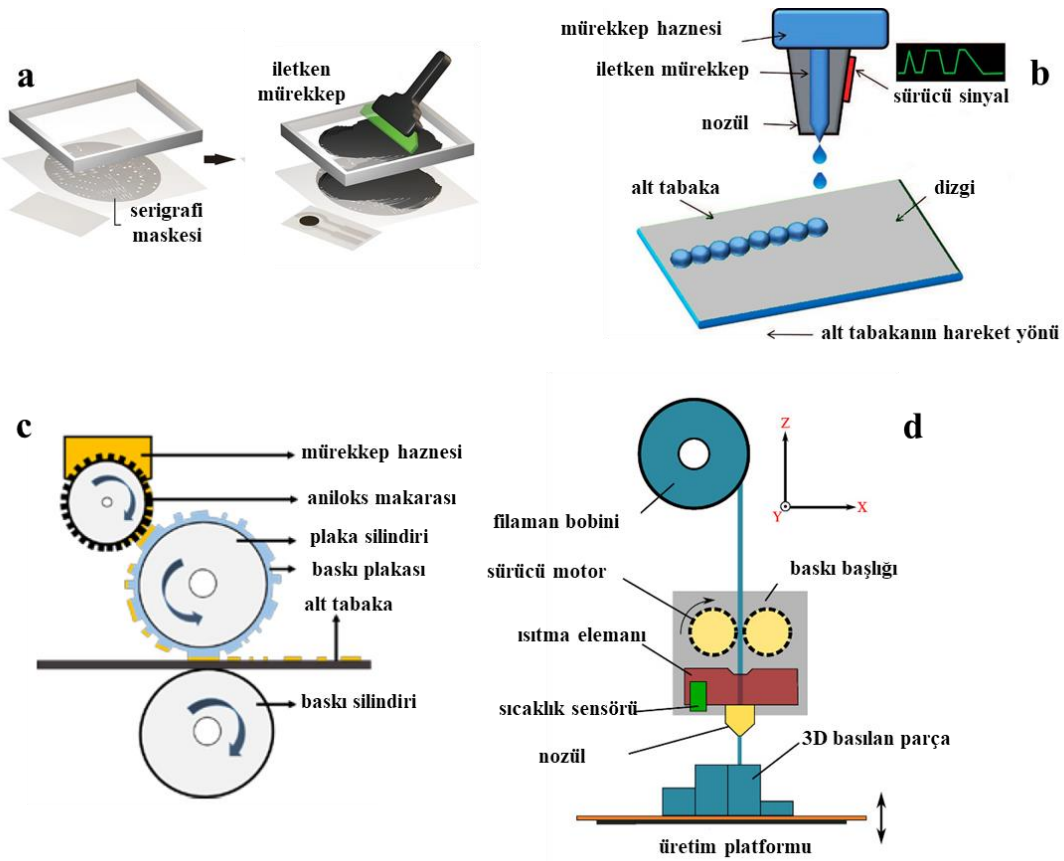
Burada σ nanokompozit yapının iletkenliği, σ_0 dolgu malzemesinin içsel iletkenliği, p dolgu malzemesinin kompozit yapıdaki miktarı, p_c sızıntı eşiği ve t ise iletken malzemenin boyutuyla alakalı üstel bileşendir. Bu değer iki boyutlu ve üç boyutlu malzemeler için sırasıyla genellikle 1.3 ve 2 olarak alınır [119].

2.3.3. Sensör Üretim Metotları

Günümüzdeki dokunsal sensörlerin üretiminde ve geliştirmelerinde kullanılan elektro-eğirme, kaplama, baskı ve aktarma yöntemleri, bu sensörlerin elektromekanik ve esneklik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen ana yöntemlerdir. Bu yöntemler, dokunsal sensörlerin hem malzeme bileşimine kara vermek hem de üretim süreci için bir yol çizmede çok önemli bir rol oynar [62]. Döndürme yöntemi, elektro-eğirme veya çözelti döndürme gibi teknikler kullanılarak bir malzemenin bir alt tabaka üzerine biriktirilmesini içeren bir işlemdir. Bu yöntem, dokunsal sensör yüzeyinde iletken polimer veya nano malzemeler gibi ince, düzgün fonksiyonel malzeme katmanlarının oluşturulmasını sağlar. Kaplama, dokunsal sensörün yüzeyine ince bir malzeme tabakasının uygulanmasını içerir. Metal oksitler veya iletken filmler gibi malzemeleri biriktirmek için kimyasal buhar biriktirme (CVD), atomik katman biriktirme (ALD) veya fiziksel buhar biriktirme (PVD) gibi çeşitli teknikler kullanılır. Kaplama, sensörün iletkenliğini, şeffaflığını ve dayanıklılığını etkileyen önemli bir yöntemdir. Serigrafi baskı, mürekkep püskürtmeli baskı veya fleksografik baskı gibi yöntemler, sensörün alt tabakası üzerine iletken mürekkepleri veya metalik nanoparçacıklar veya iletken polimerler gibi iletken malzemeler içeren fonksiyonel malzemeleri aktararak dokunmaya veya basınca duyarlı yapılar oluşturulabilir. Baskı teknolojileri, iletken mürekkeplerin plastik veya esnek filmler gibi esnek tabakalar üzerine aktarılmasını mümkün hale getirdiğinden dolayı esnek dokunsal sensörler oluşturmak için uygun bir seçenektir. Esnek malzemelerin iletken baskı teknikleriyle kullanımı, kavisli veya düzensiz yüzeylere uyum sağlayabilen dokunsal sensörlerin üretilmesini sağlayarak onları giyilebilir cihazlar veya esnek ekranlar gibi uygulamalar için kullanışlı hale getirir. Ayrıca, mürekkep püskürtmeli baskı gibi tekniklerle, hassas boyutlara ve yerleşime sahip, dokunmaya duyarlı öğelerin oluşturulmasını sağlayan ince desenler ve karmaşık tasarımlar elde etmek mümkündür. Bu hassasiyet, güvenilir ve doğru dokunma algılamalı dokunsal sensörler oluşturmak için bir gerekliliktir. Ölçeklenebilirlik ve maliyet açılarından bakıldığında, baskı teknolojisi, fazla sayıda dokunsal sensörün üretimine izin vererek, seri üretim için kolayca ölçeklendirilebilir. Ek olarak, iletken mürekkeplerin veya macunların kullanımı, fotolitografi veya vakumlu biriktirme gibi geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha uygun maliyetli olabilir ve bu da baskı yöntemlerini esnek dokunsal sensörler üretmek için daha ekonomik hale getirir. Baskı teknikleri, dokunsal sensör yapısı içindeki diğer bileşenlerle entegrasyonu kolaylaştırabilir. Örneğin; iletken elemanların yanına yalıtkanlar, koruyucu kaplamalar veya sensör elektrotları gibi ek

katmanlar basılmasına ihtiyaç duyulduğunda üretim süreci kolaylaştırılır ve çok işlevli dokunsal sensörlerin oluşturulması sağlanır. Şekil 2.2’de en çok kullanılan baskı metotlarından serigrafi [120], mürekkep püskürtmeli baskı [121], fleksografik baskı [122] ve 3B baskı [123] metotlarının şematik gösterimi yer almaktadır.

Ticarileştirme potansiyeli, entegrasyon kolaylığı ve büyük ölçekli üretim kapasitesi göz önüne alındığında 3B baskı teknolojisi de umut verici bir üretim yöntemi olarak görülmektedir. Eklemeli imalat olarak da bilinen 3B baskı, dijital tasarımlara dayalı malzemeleri katmanlayarak üç boyutlu nesnelerin oluşturulmasını sağlar. Dokunsal sensörler bağlamında, belirli geometrilere ve işlemlere sahip sensör bileşenleri veya sensör üretiminde kullanılacak yapılar üretmek için 3B baskıdan yararlanılabilir. 3B baskı, üretim sürecinde esneklik sunarak farklı malzemelerin entegrasyonuna ve karmaşık tasarımların gerçekleştirilmesine olanak tanır.



Şekil 2.2 Esnek dokunsal sensör üretim yöntemleri (a) Serigrafi [120] (b) mürekkep püskürtmeli baskı [121] (c) fleksografik baskı [122] (d) 3B baskı [123]

2.4. Sensör Malzemelerinin Karakterizasyonu

2.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Görüntüleme

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), çok çeşitli malzemelerin yüzey yapısını yüksek çözünürlükte araştırmak için kullanılan etkili bir görüntüleme tekniğidir. SEM, bir numunenin yüzeyini taramak için odaklanmış bir elektron demeti kullanır ve elektron demetinin numune ile etkileşimi tarafından yayılan veya dağılan çeşitli elektronları tespit ederek ayrıntılı görüntüler üretir. Bir SEM cihazının temel bileşenleri, bir elektron kaynağı, elektron ışınını odaklamak için elektromanyetik lensler, ışın konumunu kontrol etmek için tarama bobinleri ve numuneden bilgi toplamak için çeşitli detektörleri içerir. Elektron ışını numune ile etkileşime girdiğinde, farklı fiziksel olayları tetikleyebilir. Bunlardan biri, ikincil elektronların oluşumudur. İkincil elektronlar, birincil elektron demetinin etkisiyle numune yüzeyinden yayılan düşük enerjili elektronlardır. Bunlar, numune yüzeyinin morfolojisini görüntülemek için yaygın olarak kullanılırlar. Geri saçılan elektronlar, numunenin atom çekirdeği ile etkileşime girdikten sonra geri dönen yüksek enerjili elektronlardır. Bu elektronlar, numunede bulunan elementlerin atom numarasına duyarlıdır ve elde edilen görüntülerde element bileşimi ve kontrast hakkında bilgi sağlar. SEM cihazlarında farklı fiziksel olaylara dayalı olarak görüntüleme yapılabilir. İkincil elektronlar genel görüntüleme amacıyla kullanılırken; geri saçılan elektronlar malzeme bileşeni bilgisi de içerebilmektedir. Numune yüzeyi boyunca elektron ışınını tarayarak ve etkileşimden yayılan veya dağılan elektronları saptayan SEM, yüksek büyütmede numunenin yüzey morfolojisi, topoğrafyası ve bileşimi hakkında ayrıntılı bilgi sağlayan iki boyutlu bir görüntü oluşturur [124].

SEM görüntüleme, malzeme bilimi, nanoteknoloji, biyoloji, jeoloji ve yarı iletken karakterizasyonu dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra, dokusal sensörlerde kullanılan nanokompozit malzemelerin alt tabaka üzerindeki dağılımını incelemek, parçacık boyutunu ve şeklini araştırmak için kullanılmaktadır [109]. SEM cihazlarında kullanılan ek düzenekler arasında elektron dağılımı X-ışınım spektroskopisi (EDS), elektron demeti litografisi ve elektron geri saçılım kırınımı (EBSD) yer almaktadır.

2.4.2. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile Görüntüleme

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), yüzeylerin nano ölçekte yüksek çözünürlüklü görüntülenmesini ve karakterizasyonunu sağlayan çok yönlü bir mikroskopi tekniğidir.

Taramalı uç mikroskopisi (SPM) tekniklerinden birisi olan AFM kullanılarak kusurlar ve pürüzlülük gibi yüzey özelliklerinin görselleştirilmesi ve mikron altı çözünürlüğe sahip 3B görüntüler elde edilmesi mümkündür. Geleneksel optik mikroskopiden farklı olarak AFM, görüntü oluşturmak için görünür ışığı kullanmaz. Bunun yerine, bir numunenin yüzeyi ile etkileşime geçmek için kiriş yapısının (kantilever) üzerine yerleştirilen küçük ve keskin bir uç (tip) kullanır. Tip bir numunenin yüzeyini taradığında, arkasından yansıyan lazer ışını bir detektör tarafından ölçülerek kantileverin sarpması kaydedilir. Kaydedilen sarpmalar, yüzeyin topoğrafik görüntülerini oluşturmak için kullanılır [125].

AFM ile görüntüleme işlemleri farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilir ve bunlar yaygın olarak mod olarak tanımlanır. Bu modlar, aralıklı temas modu, temassız mod ve temas modudur. Temassız modda taranacak yüzey ile yüzeyin üzerinde konumlandırılan kantilever arasındaki kuvvet algılanır. Bu modda elde edilen taramaların görüntüleri temas veya aralıklı temas modundan daha düşük çözünürlüğe sahiptir. Temas modunda, kantilever yüzey boyunca sürüklenerek yüzeyin bir haritası elde edilir. Kantileverin sürüklenme hareketinin hem örneğe hem de uca zarar verme ya da verilerde bozulmalara sebep olma gibi sakıncaları vardır. Aralıklı temas modunda ise, kantilever yüzeye belirli aralıklarla dönüşümlü olarak temas ettirilerek ve ardından yüzeyden kaldırılarak bir tarama gerçekleştirilir ve bu sayede yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir. Temas modunda olduğu gibi kantilever yüzey boyunca sürüklenmediği için taranacak yüzeyin ya da kantileverin zarar görme olasılığının azaltılmasına ek olarak temassız modda karşılaşılan sınırlamaların da üstesinden gelinir [126].

2.4.3. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, yükleme etkisinin olmadığı, katıların kristalliğini ölçebilen, organik ve inorganik türleri tespit edebilen titreşimli bir spektroskopik tekniktir [127]. Örnekle doğrudan temas olmadığı için Raman spektroskopisi aynı zamanda tahribatsız bir analiz yöntemidir. Raman spektroskopisinde, bir numune, numunedeki moleküllerle etkileşime giren tek renkli bir ışık kaynağıyla, tipik olarak bir lazerle ışınlanır. Gelen lazer ışını ile numune arasındaki etkileşimler, saçılan ışığın frekansını (veya dalga sayısını) değiştirir. Her malzeme frekansta meydana gelecek bu değişim, malzemenin moleküler yapısıyla yakından bağlantılı olduğu için malzemelerin karakterizasyonu yapılabilir [124]. Rayleigh saçılması olarak adlandırılan saçılmada, gelen fotonların çoğu ilk enerjilerini ve dalga boylarını koruyarak elastik olarak saçılır. Bununla birlikte, fotonların küçük bir kısmı, moleküler titreşimlerin ve dönmelerin enerjisine karşılık gelen bir miktar

enerji kaymasıyla sonuçlanan esnek olmayan saçılmalara maruz kalır. Saçılan ışık toplanıp bir spektrometre kullanılarak analiz edildiğinde Raman spektrumu olarak bilinen elde edilen spektrum, numunedeki moleküllerin titreşim modlarına karşılık gelen belirli dalga sayılarında veya frekanslarda tepe noktaları gösterir. Bu tepeler, özellikle nanokompozitlerde belirli kimyasal bağların, fonksiyonel grupların veya moleküler türlerin varlığını belirlemek için kullanılabilir. Tepelerin yoğunluğu, moleküllerin konsantrasyonu veya görece miktarı hakkında bilgi sağlar [128].

Raman spektroskopisinin katıları, sıvıları ve gazları ve hatta sulu ortamlardaki numuneleri analiz etmek için kullanılabilir olması onu diğer analitik tekniklere göre avantajlı kılmaktadır. Ayrıca, çok az numune hazırlığı gerektirir ve gerçek zamanlı, tahribatsız ölçümler sağlayabilir. Raman spektroskopisi moleküler tanımlama, kalite kontrol ve kimyasal görüntüleme gibi uygulamalar için kimya, malzeme bilimi, adli tıp ve biyoloji dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.5. Sonuçlar

Bu bölümde, dokunsal sensörlerin özellikleri verilmiştir. Dokunsal sensörleri değerlendirmek için kullanılan hassasiyet, çalışma aralığı, tepki süresi ve histerezis özellikleri başta olmak üzere, uygulama bazında performansa etki edebilecek kriterlere değinilmiştir. Ayrıca, triboelektrik, empedans ve manyetik yöntemlerin de dahil olduğu çalışma mekanizmaları incelenmiştir. Dokunsal sensör üretiminde önem taşıyan malzeme seçimi ve polimer nanokompozitler anlatılarak günümüzde en çok tercih edilen sensör üretim metotlarına yer verilmiştir. Buna ek olarak, malzeme karakterizasyonunda önemli yer tutan SEM ve AFM görüntüleme teknikleri ile Raman spektroskopinin çalışma prensipleri irdelenmiştir.

3. ÜRETİLEN POLİMER NANOKOMPOZİTLER

3.1. Polivinil Alkol (PVA) – Karbon Siyahı (CB) Nanokompoziti

Polivinil alkol (PVA) tatsız, kokusuz, biyo uyumlu ve çoğunlukla beyazımsı renkte olan, tanecikli ya da toz yapıda bulunabilen sentetik bir polimerdir. Viskozitesine ve hidroliz derecesine göre çeşitleri olan PVA, toksik olmamasının yanında sahip olduğu üstün optik ve dielektrik özellikleri ile yüksek yük tutma kapasitesi sayesinde birçok uygulamada kullanılmaktadır [129].

PVA polimerinde bulunan hidroksil gruplarının sayısı polimerin fizikokimyasal ve mekanik özelliklerinin şekillenmesinde önemli bir rol oynar. PVA'nın hidroliz derecesi, moleküler ağırlıkla birlikte değerlendirildiğinde erime noktası, pH, viskozite gibi özelliklerde farklılık gösteren PVA üretimleri yapılabilir [130].

Yeni polimerik malzemelerin geliştirilmesi, yeni bir polimerin kimyasal sentezinden ziyade çoğunlukla var olan polimerlerin birleştirilmesi ya da değiştirilmesi işlemlerine dayanır. Böylece, araştırmacıların mevcut polimerlerin özelliklerini herhangi bir uygulama kapsamında belirli ihtiyaçları karşılayacak şekilde uyarlaması mümkün olur. PVA diğer malzemelerle hidrojen bağı aracılığıyla etkileşime girebilmek için karbon zincirine bağlı çok sayıda hidroksil grubu içerir. Bu da elektronik, optoelektronik, biyomühendislik ve diğer çeşitli alanlarda esnek cihazlar oluşturmak için nanokompozit yapımında PVA'yı ideal bir polimer matrisi yapar [130]. PVA nanokompozitleri, metal, ametal, metal oksit, karbon nanolifler, karbon nanotüpler, silikatlar veya bu malzemelerin kombinasyonlarından yapılan nano dolgu maddeleri içerebilir.

Karbon siyahı (CB), karbon parçacıklarının bir toz formudur. Çoğunlukla küresel şekilli, ve ince bir yapıda bölünmüş olarak bulunan CB parçacıklarının yüzey alanının 1000 m²/g'den büyük ve parçacık boyutunun 50 nm'den küçük olmasının yanında, yoğunluğu grafitin yoğunluk değeri olan 2.25 g/cm³ten düşüktür [131]. CB'nin kurum ve siyah karbona göre daha yüksek temel karbon içeriğine ve daha iyi kontrol edilebilen özelliklere sahip olması piller, süper kapasitörler ve sensörler gibi ticari ve tüketici ürünlerinde çok sayıda uygulamada kullanılmasını mümkün kılmıştır [132]. CB'nin seri üretiminde yüksek verimi ve geniş parçacık boyutu kontrolü nedeniyle fırınlama işlemi (furnace process) kullanılır [35].

Tez çalışmasında üretilen dokunsal sensörlerden biri PVA (MW: 85.000–124.000, Aldrich) – CB (Sigma–Aldrich) nanokompoziti tabanlıdır. Çözelti karıştırma metoduyla

üretileen nanokompozit, sensörde algılayıcı tabaka olarak kullanılmış ve serigrafı yöntemiyle selüloz kâğıt üzerinde belirli bir geometride üretilmiştir.

PVA'nın jel haline getirilip ardından dolgu maddesi olarak CB eklenmesiyle elde edilen nanokompozit, aşağıda verilen aşamalar takip edilerek üretilmiştir:

- Üretime tanecikli yapıdaki 3.14 gr PVA'nın 38 ml deiyonize suda çözdürülmesiyle başlanmıştır [133]. Bu işlemde manyetik karıştırıcı aracılığıyla çözelti 750 rpm ve 80°C'de 30 saat süreyle karıştırılmış ve PVA jel hale getirilmiştir.
- Ardından, kademeli olarak CB nanoparçacıkları sıcak çözeltiliye eklenerek serigrafı için uygun viskoziteye sahip bir çözelti elde edilmesi hedeflenmiştir. Nihayetinde, jel üzerine 2.182 gr CB ilave edilerek çözelti 500 rpm'de 2 saat manyetik karıştırıcıda işleme tabi tutulduğunda uygun viskoziteye sahip bir mürekkep elde edilmiştir.

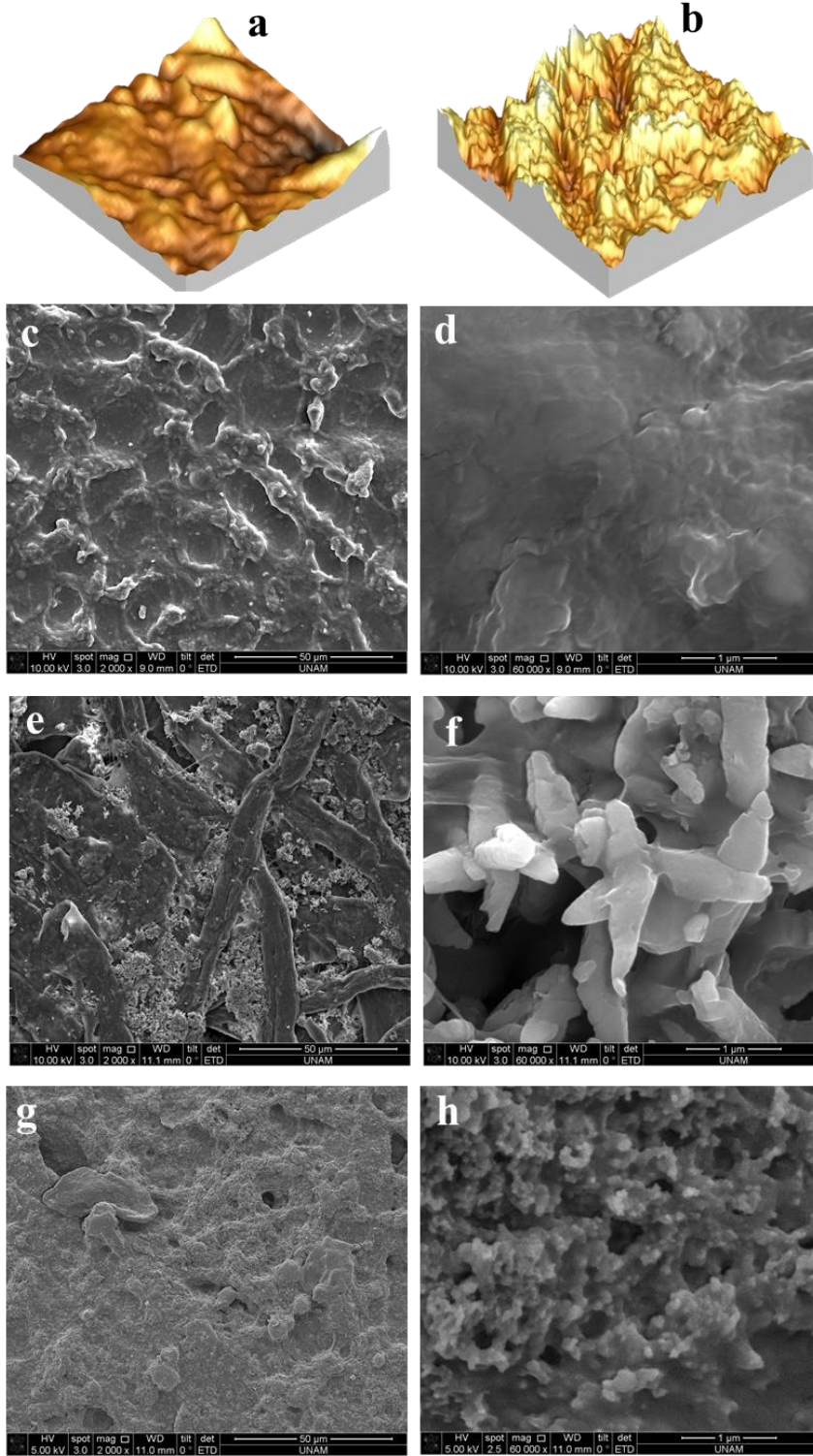
Nanokompozit serigrafı işleminde kullanılacağı için, üretimde göz önünde bulundurulması gereken hususlardan biri, nanokompozit mürekkebinin serigrafıye uygun viskoziteye sahip olması ve istenilen elektriksel ve mekanik özellikleri de sağlayacak şekilde hazırlanmasıdır. CB'nin nanokompozit içindeki sızıntı eşiği ise ağırlıkça %2.61 olarak bulunmuştur.

3.1.1. Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu

Üretilen PVA–CB nanokompoziti selüloz kâğıt üzerine yayılarak SEM (FEI Quanta 200 FEG) ve AFM (Nanomagnetics) aracılığıyla incelenmiştir. SEM ile yüzey morfolojisi hakkında bilgi elde etmek amaçlanırken; AFM ile 3B görüntüleme özelliğinden yararlanılarak alt tabaka olarak kullanılan malzeme ile nanokompozit arasındaki yüzey etkileşimleri incelenmiştir.

Şekil 3.1a–b, sırayla boş selüloz kâğıt ve PVA–CB nanokompozitinden elde edilen 3B AFM görüntülerini göstermektedir. Yüksek çözünürlüklü AFM görüntüleri, CB nanoparçacıklarının birikimli yapılar oluşturan polimer matrisine dağıldığını göstermektedir. Bu çıkarım ise SEM görüntüleri ile uyumludur. Bunun yanında, ticari kâğıdın düzenli olmayan yüzey yapısı nanokompozitin kâğıt üzerinde düzenli olmayan dağılımına yol açmış olabilir. AFM analizinden elde edilen ortalama karekök (RMS) pürüzlülüğü, yüzey morfolojisinin bir göstergesidir. Selüloz kâğıt üzerine PVA–CB sürülmesiyle elde edilen baskılı yüzeyin AFM görüntülerinin istatistiksel analizine göre

RMS pürüzlülüğü 56.8 nm iken, boş kâğıdın RMS pürüzlülüğü 72.4 nm'dir. SEM görüntüleri ile ilgili tartışılacağı gibi, nanokompozit malzeme lifli selüloz kâğıttaki boşlukları doldurur ve bu da pürüzlülüğün azalmasını sağlar.



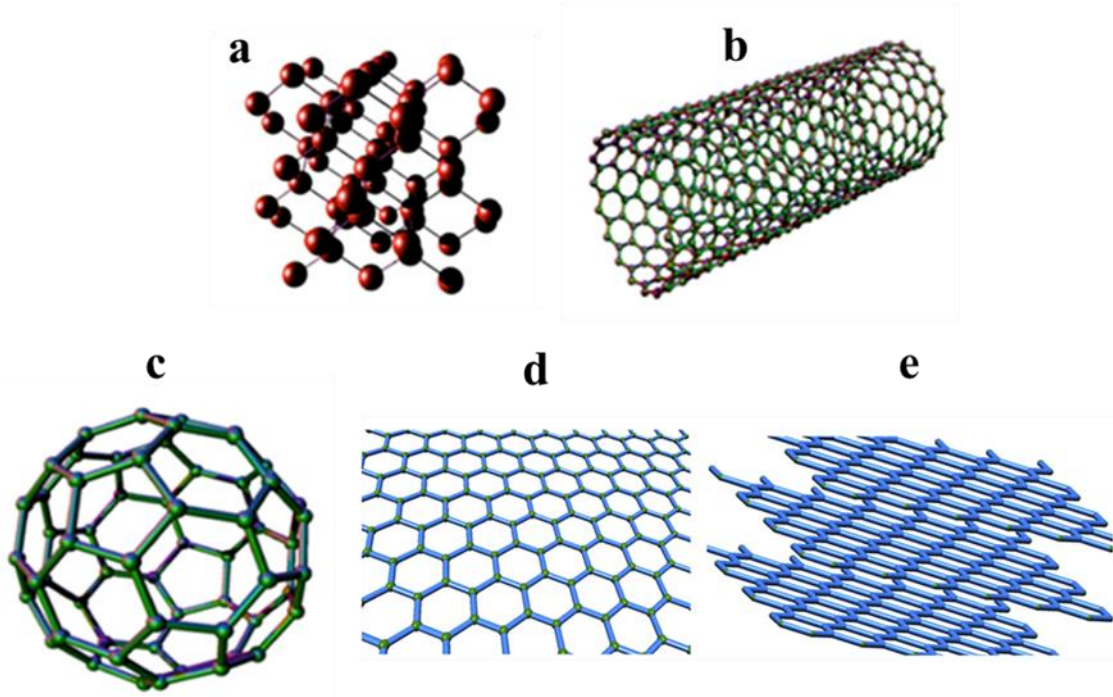
Şekil 3.1 (a) Boş selüloz kâğıdın (görüntü boyutları: 5 μm x 5 μm) ve (b) selüloz kâğıda serigrafî baskılı PVA–CB nanokompozit mürekkebin (görüntü boyutları 10 μm x 10 μm) 3B AFM görüntüleri ile (c)–(d) saf PVA'nın, (e)–(f) selüloz kâğıdın ve (g)–(h) selüloz kâğıt üzerindeki PVA–CB nanokompozitinin 2K ve 60K büyütme değerlerinde SEM görüntüleri.

Şekil 3.1'deki SEM görüntüleri farklı ölçek barlarında elde edilmiştir (Şekil 3.1c–e–g: 2K, Şekil 3.1d–f–h: 6K). Şekil 3.1c–d saf PVA'nın kâğıt üstünde alınan görüntülerine aitken; Şekil 3.1e–f boş selüloz kâğıda ait mikro yapıyı göstermektedir. Bu görüntülerden, selüloz kâğıdın lifli yapılara sahip olduğu ve kâğıt üzerinde kurutulan saf PVA çözeltisinin lifli yapılar arasındaki boşlukları doldurduğu çıkarımı yapılabilir. PVA–CB nanokompozitinin selüloz kâğıt alt tabakası üzerine serigrafi ile basılması ile elde edilen örneklerin SEM görüntüleri ise Şekil 3.1g–h'de verilmiştir. Bu görüntüler, PVA'nın, PVA–CB nanokompozitinin ve selüloz kâğıdın yüzeydeki dağılımlarının birbirine benzemediğini ve her malzemenin yüzeyde kendine ait özellikleri sergilediğini göstermektedir. Şekil 3.1d ve Şekil 3.1h karşılaştırıldığında, CB nanoparçacıklarının polimer matrisi içinde topaklanması net bir şekilde gözlemlenebilir. Bu, aynı zamanda Şekil 3.1h'nin, PVA matrisine CB nanoparçacıklarının eklenmesiyle gözenekli yapıların oluştuğunu da göstermektedir. CB nanoparçacıklarının nanokompozit yapıdaki dağılımı, mekanik özelliklerin yanı sıra sensörün algılayıcı tabakası olarak kullanılacak malzemede hassasiyet, çabuk yanıt verme ve iletkenlik elde etmek için göz ardı edilmeyecek bir öneme sahiptir. CB nanoparçacıklarının boyutu, SEM ile elde edilen görüntülerden yaklaşık 100 nm olarak bulunmuştur. Bu bulgu, kullanılan CB özellikleriyle uyumludur [134].

3.2. Polivinil Alkol (PVA) – İşlevselleştirilmiş Karbon Nanotüp (fCNT)

Nanokompoziti

CNT'ler başta elektronik ve biyomedikal uygulamalar olmak üzere pek çok nanoteknoloji alanında kullanılan ve kendine has özellikleri olan bir karbon allotropudur. Bir C_{60} molekülünün iki yarısı arasına bir grafen silindirin yerleştirilmesi şeklinde bir yapısı olan CNT'ler, her iki ucu, altı beşgen kapakla kapatılmış grafit silindirleridir [135]. Yaklaşık 1000 olan uzunluk ve çap oranlarından dolayı CNT'ler bir boyutlu yapılar olarak değerlendirilir. CNT'lerin diğer karbon bazlı yapılarla karşılaştırılması Şekil 3.2'de verilmiştir [136, 137].



Şekil 3.2 Karbon allotropları (a) sp^3 hibritleştirilmiş karbon atomlarının bir tetrahedral kafes düzenlemesinde birbirine bağlandığı kristal bir yapıya sahip olan elmas (b) Karbon atomlarının tüp şeklinde bağlandığı tüp yapıda fulleren (c) karbon atomlarının beşgenler ve altıgenler halinde birbirine bağlandığı küre biçimli fulleren [136, 137] (d) grafen (e) grafen nanoplatelet [158]

CNT'lerin sahip oldukları sp^2 hibridize C–C bağları mekanik açıdan üstün özellikler göstermesini sağlamıştır. Ayrıca, CNT'lerin bir diğer avantajı ise üstün termal, elektronik ve mekanik özelliklerin kombinasyonunun başka bir malzemede olmamasıdır [135]. Karbon nanotüplerin Young modülü değeri 1 TPa'dan daha büyüktür. Bu değer, çeliğin Young modülünden büyük olmasının yanında diğer bütün karbon fiberlerden de büyüktür ve elmasın Young modülü değerine yakındır. Ayrıca CNT'lerin elektriksel iletkenliği 1000 S.cm^{-1} seviyelerine ulaşabilir ve $2800 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar dayanabilir [138].

CNT'ler silindirik tüpü oluşturan grafit levhaların sayısına göre genel olarak üç sınıfa ayrılabilir. Bunlar tek duvarlı, çift duvarlı ve çok duvarlı CNT'lerdir. 1–2 nm çapında olabilen tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT'ler), tek bir grafit levhadan oluşur. İki duvarlı nanotüpler (TWCNT'ler) ise iki grafit levhadan oluşur. Çok duvarlı karbon nanotüpler de (MWCNT'ler) ikiden fazla grafit levhadan oluşur. Tek duvarlı karbon nanotüplerden daha büyüktürler ve her bir nanotüp $\sim 0.7 \text{ nm}$ çapındadır. Uzunluğu onlarca mikrometre olabilen MWCNT'ler, eşmerkezli silindireler oluşturan iç içe geçmiş birçok tek duvarlı tüpten oluşur [135, 137].

Karbon nanotüplere üstün özellikler kazandıran C–C bağları ve halka yapıları, düşük kimyasal reaktiviteye, dolayısıyla polimerlerle etkileşime bir engel oluşturmaktadır. CNT'ler içeren nanokompozitlerde polimer matrisi ile gelişmiş bir fizikokimyasal etkileşim kurulabilmesi için CNT'lerin kimyasal ya da fiziksel yöntemlerle yüzeylerinde bazı değişimlerin gerçekleştirilmesi bir gerekliliktir. İşlevselleştirme adı verilen bu süreçte kullanılacak yöntemin belirlenmesi büyük ölçüde polimerin yapısına bağlıdır. Uygulanan yöntem sonucunda nanotüplerin çoğunlukla uç kapaklarında ya da kusurlu yan duvarlarında değişimler meydana gelir. Bu değişim, π -konjugasyonunun kaybı sonucunda sp^2 den sp^3 hibridizasyonuna geçişi içerir. İşlevsel hale getirilen CNT'lerin bir polimer matrisinde dağılımı iyileşir ve elde edilen nanokompozitte polimer ve CNT'ler arasındaki yük aktarma yeteneği gelişir. Kullanılan yöntemler arasında en yaygın olanı, farklı organik grupların kimyasal yöntemler kullanılarak kovalent bağlanmasıdır. Bununla birlikte, kusur grubu veya kusur bölgesi işlevselleştirilmesi, sürfaktanlarla kovalent olmayan işlevselleştirme ve kovalent olmayan ekzohedral ve endohedral işlevselleştirmeler de alternatif yöntemlerdir [138-140].

Oksidasyon, en çok kullanılan kovalent işlevselleştirme metodudur. Takip edilen işlemin adımlarına göre en sonda kullanılabileceği gibi başlangıçta da kullanılabilir. Oksidasyon, işlevselleştirme amacının dışında CNT'lerin sentezinde saflaştırma yöntemi olarak da kullanılmaktadır. Oksidasyon yöntemi, plazma işlemi gibi fiziksel yöntemlerle gerçekleştirilebileceği gibi kimyasal yöntemlerle de gerçekleştirilebilir. Plazma işlemi tüp yapıları çok az zarar vererek oksidasyon işlemini gerçekleştirir. Fakat, kimyasal yöntemlerle kıyaslandığında elde edilen karboksil fonksiyonel grupların yoğunluğunun oldukça az olduğu görülür [139]. CNT'lere uygulanan kimyasal bir işlemde nanotüplerde meydana gelebilecek hasarla, elde edilecek fonksiyonel gruplar arasında bir ödünleşme olduğu bir gerçektir. Buna rağmen literatürde yer alan pek çok işlevselleştirme çalışmasında kimyasal yöntemler tercih edilmiştir [139]. Oksidasyon işlemi için kullanılan kimyasal yöntemlerde sadece nitrik asit ya da nitrik asit ve sülfürik asitin birlikte kullanıldığı seçenekler vardır. İşlemin sonucunda elde edilen nanotüplerin su dahil pek çok çözücüde kararlı çözeltileri elde edilebilir [138].

Kovalent olmayan işlevselleştirme metodunda CNT'lerin yan duvarlarının ve uç kapağının konjuge sistemi bozulmaz ve bu nedenle malzemenin nihai yapısal özellikleri etkilenmez. Kovalent olmayan metotlarda sodyum dodesil sülfat (SDS) [141] ve sodyum kolat (SC) [142] gibi çeşitli sürfaktanlar kullanılarak CNT'ler ile hidrofobik bir etkileşim

gerçekleştirilir. Fakat, kovalent olmayan işlevselleştirmenin, CNT'ler ve polimer arasında kovalent bağın olmaması nedeniyle, kovalent işlevselleştirmeye kıyasla daha düşük işlevselleştirme kararlılığı ve etkisiz polimer güçlendirme eğiliminde olduğuna dikkat edilmelidir [138].

Tez çalışmasında üretilen dokunsal sensörlerden biri PVA (MW: 40.000–50.000, Shuangxin Co. Ltd) – fCNT nanokompoziti tabanlıdır. CNT'lerin işlevselleştirilmesi için takip edilen aşamalar Şekil 3.3'te verilmiştir. Bu işlemde [143] makalesinde önerilen yöntem bazı değişiklikler yapılarak uygulanmıştır.

Aşağıda verilen aşamalar takip edilerek CNT'ler işlevsel hale getirilmiştir:

- İşlemler, saf haldeki sülfürik asitin (H_2SO_4) (%95–97, Merck) ve nitrik asitin (HNO_3) (%65, Sigma–Aldrich) yaklaşık olarak yarı yarıya seyreltilip 3:1 (60 ml: 20ml) oranında karıştırılmasıyla başlamıştır.
- Ardından, elde edilen asidik çözeltiye 1 gr saf CNT'ler (safılık: >96%, dış çap: 10–20 nm, Nanografi) eklenmiştir. 40 kHz'lik sonikatörde 2 saat işleme tabi tutulan çözelti daha sonra 0.22 μm politetrafloroetilen (PTFE) filtre kâğıdı ile filtrelenmiştir.
- Bu oksidasyon işleminden sonra açığa çıkan karbon parçacıklarını çözülden ayırmak için 4:1 (40 ml: 10 ml) oranında sülfürik asit ve hidrojen peroksit (H_2O_2) (%35, Merck) çözeltisi kullanılmıştır. Hazırlanan çözeltiye oksidasyon aşamasında filtrelenen CNT'ler eklenmiş ve 30 dakika bekletilmiştir.
- Bu işlemin ardından çözelti 500 ml deiyonize suya azar azar eklenmiştir. Nihai çözelti 0.22 μm PTFE filtre ile filtrelendikten sonra filtrenin altında toplanan sulu çözeltinin pH değeri nötr oluncaya kadar filtre kâğıdı üzerindeki CNT'ler deiyonize su ile yıkanmıştır.

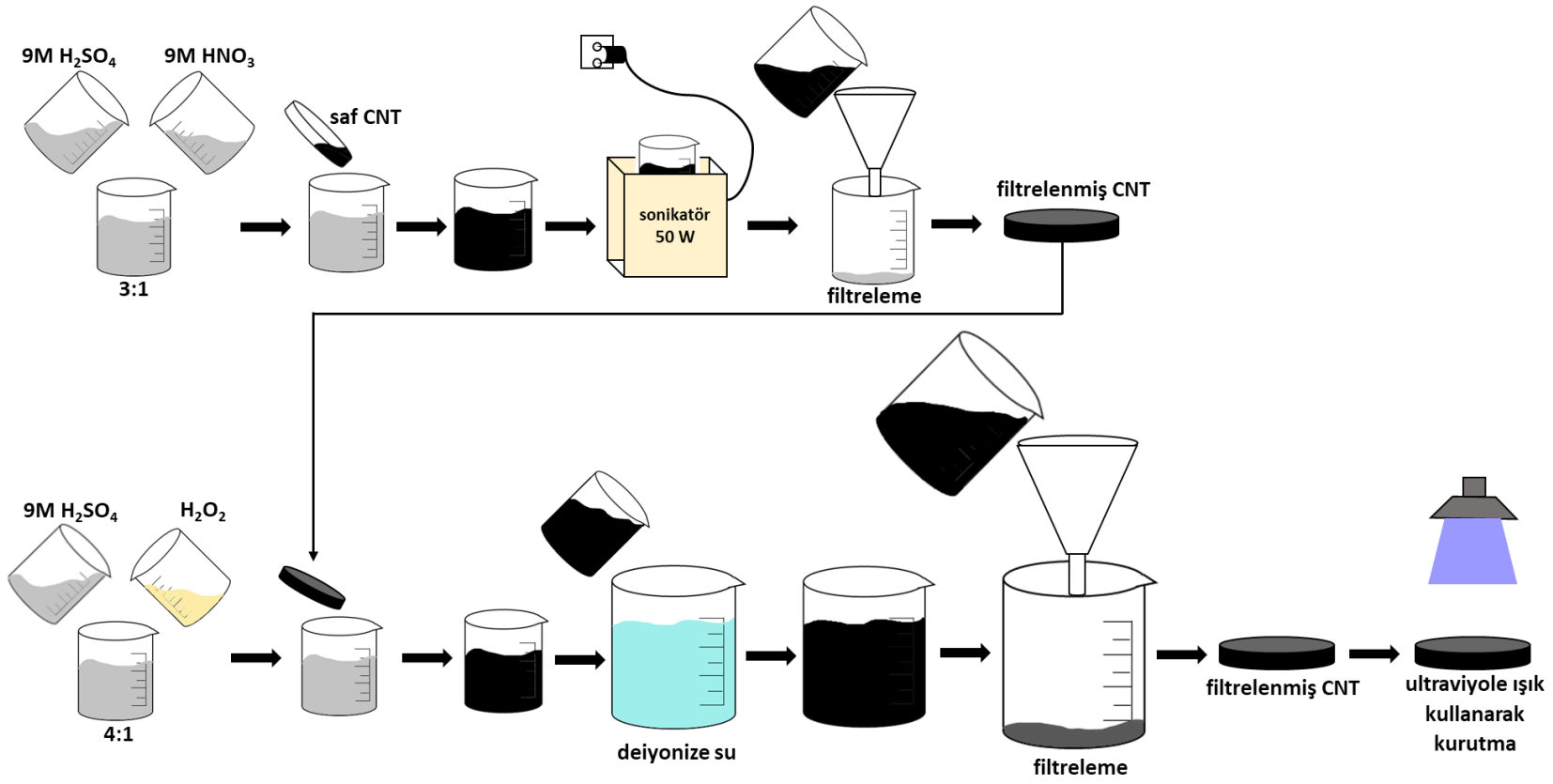
Son durumda elde edilen CNT'lerin kurutulması, 24 saat boyunca ultraviyole ışık altında tutulmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Üretilen nanokompozit için ise şu adımlar takip edilmiştir:

- Toz yapıdaki PVA ve deiyonize su oranı 1:10 olacak şekilde PVA çözeltisi hazırlanmıştır.

- Polimer içinde daha iyi dağılabilmesi için CNT'ler öncesinde bir miktar deiyonize suya eklenerek yarım saat sonikasyon işlemine tabi tutulmuştur ve ardından sulu çözelti halinde PVA çözeltisine eklenmiştir.
- Aynı zamanda, sızıntı eşiğini bulabilmek için CNT'ler kontrollü bir şekilde ve adım adım eklenmiştir. 0.05 gr'dan başlanarak işlevsel CNT'ler önce deiyonize suda 1 saat boyunca 50 W sonikatörde işleme tabi tutulmuştur.
- Suda homojen bir şekilde dağılımı sağlanan CNT'ler hazırlanan PVA çözeltisine eklenerek karıştırma işlemi manyetik karıştırıcıda 1 saat daha sürdürülmüştür.

CNT'lerin çözeltisindeki su miktarından dolayı PVA çözeltisindeki 1:10 oranı aynı kalmadığından, her bir aşamada bu oranın sabit kalmasına dikkat edilmiştir. Nihai durumda yaklaşık 0.3 gr CNT'ler içeren bir nanokompozit elde edilmiştir ve sızıntı eşiği ağırlıkça %1.3 olarak bulunmuştur [144].



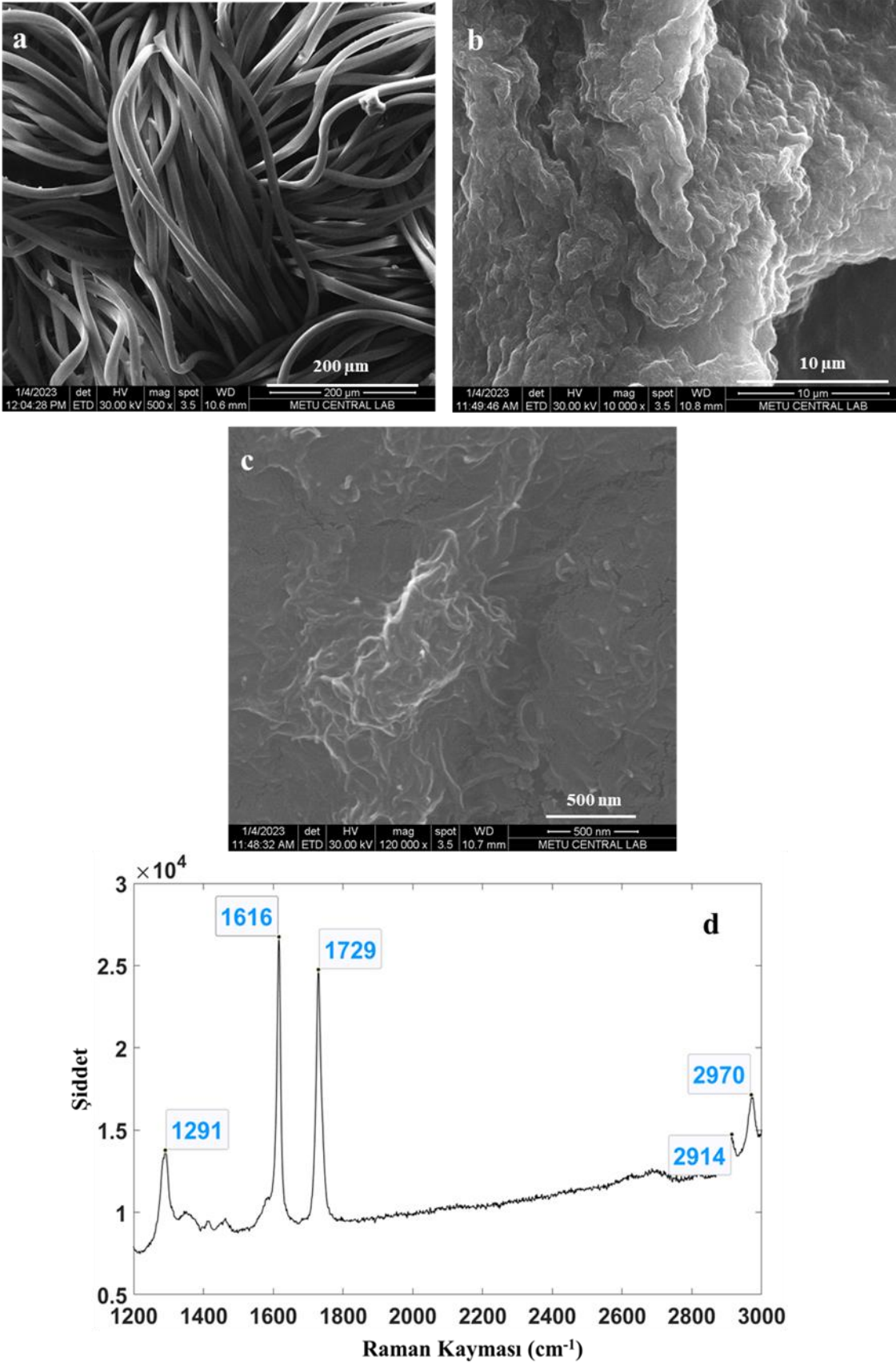
Şekil 3.3 CNT'leri işlevselleştirme aşamaları

3.2.1. Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu

Üretilen PVA-fCNT nanokompozitinin morfolojik yapısının araştırılması ve dolgu maddesinin nanokompozit içindeki dağılımının değerlendirilmesi için SEM görüntüleme (FEI Quanta 400F) kullanılırken; malzemeyi tanımlayarak ve özelliklerini belirleyerek kendine özgü özelliklerini incelemeye, yani ‘parmak izi’ elde etmeye Raman spektroskopiden (Bruker, dalgaboyu: 532 nm) faydalanılmıştır. Raman spektroskopisi ayrıca malzemenin saflığı ve barındırdığı kusur hakkında da önemli bilgiler sağlamaktadır. Nanokompozit ile sensör üretiminde alt tabaka olarak kumaş kullanılacağı için karakterizasyon nanokompozitin kumaş üzerinde kurutularak elde edildiği örnekler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4a, kumaşın liflerini net bir şekilde gösteren bir görüntüdür. Lifler ve nanokompozit arasındaki etkileşim, nihai yapının genel mekanik özelliklerini ve performansını belirlemede kritik bir faktördür. Lifler, nanokompozit yapıya yapısal destek ve esneklik sağlar ve bu iki bileşen arasındaki etkileşim, mekanik deformasyon veya sıcaklık değişiklikleri gibi sensör uygulamalarında sensörün tepkisine doğrudan etki eden fiziksel uyarıları etkileyebilir. Lifler ve nanokompozit arasındaki etkileşimi optimize ederek sensörün hassasiyetini, dayanıklılığını ve diğer performans özelliklerini iyileştirmek mümkündür.

Şekil 3.4b ve c ise, kumaş üzerinde aynı numuneyi sırasıyla 10 µm ve 500nm ölçek barlarında gösteren görüntülere aittir. Her iki görüntü de CNT'lere ait tüp yapısını göstermesinin yanı sıra, bileşikteki fCNT'lerin tekdüze bir dağılımını göstermektedir. Bu, nanokompozit malzemenin özelliklerini geliştirebildiği için istenen bir durumdur. Nanokompozit üretiminde saf CNT kullanmak yerine fCNT kullanımının temel sebepleri arasında nanotüpler ile polimer matris arasındaki etkileşimin artması ve bunun da mekanik ve elektriksel özelliklerin gelişmesini sağlaması yer almaktadır. Bu çalışmada gözlemlenen fCNT'lerin tekdüze dağılımı, nanokompozit malzemenin sensörlerde veya diğer uygulamalarda kullanımının uygun bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.4d, nanokompozitin Raman kaymasını göstermektedir. 1291 ve 1616 cm^{-1} 'deki tepeler sırasıyla D-bandı ve G-bandı olarak adlandırılır. D-bandı, CNT'lerin kalitesi ve amorf karbonun varlığı hakkında bilgi sağlarken, G-bandı sp^2 bağımlı gösterir [145]. D-bandı ve G-bandının yoğunluklarının oranı ise CNT'lerin kusurları hakkında bilgi verir. Bu oranın yüksek olması kusurun yüksek olduğuna işaret eder. I_D/I_G oranı bu çalışmada yaklaşık 1.86 iken [146] tarafından yürütülen çalışmada 2.56'dır. Ayrıca 2970 cm^{-1} 'deki tepe CNT'lerin üretim yöntemine bağlı olarak C-H bağımlı gösterir [147].



Şekil 3.4 (a) Pamuk kumaşın x500 büyütülmüş SEM görüntüsü. PVA-fCNT nanokompozitinin (b)-(c) büyütülme oranları farklı SEM görüntüleri (d) Raman spektroskopisi

3.3. Polivinil Alkol (PVA) – Gümüş Nanoparçacık (Ag NP) Nanokompoziti

Gümüş, toksik olmayan, termal, optik, manyetik ve elektriksel özellikleri açısından umut verici olan bir elementtir [148]. Gümüşün elektriksel iletkenliğinin çok yüksek olması ve bu sebeple elektrik devrelerinde yaygın olarak kullanılmasının yanında sahip olduğu anti bakteriyel ve anti mikrobik özellikleri dolayısıyla sağlık alanında ve çeşitli endüstrilerde de kullanımı gittikçe artmaktadır [149, 150]. Gümüşün nanoparçacıklar halinde çeşitli şekillerde ve 1–100 nm arasındaki boyutlarda üretilmesi için fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler mevcuttur [148].

Ag NP içeren nanokompozit yapılar, kullanılan polimere de bağlı olarak biyo uyumlu malzemeler olarak kullanılabilir. Ayrıca, elde edilen nanokompozit [151] çalışmasında yer verildiği üzere, elektriksel iletkenliği yüksek ve katalitik özellikleri olan bir yapıya sahip olur [152]. Polimerler ve dolgu maddesi olarak Ag NP içeren nanokompozitler, başta sensörler olmak üzere, enerji depolayıcı cihazlar, kaplamalar ve biyo medikal alanlarda kullanılmaktadır [152, 153].

Tez çalışmasında üretilen dokunsal sensörlerden biri PVA (MW: 40.000–50.000, Shuangxin Co. Ltd) – Ag NP (safılık:>%99.995, boyut: 18 nm, Nanografi) nanokompoziti tabanlıdır. Nanokompozit, aşağıda verilen aşamalar takip edilerek üretilmiştir:

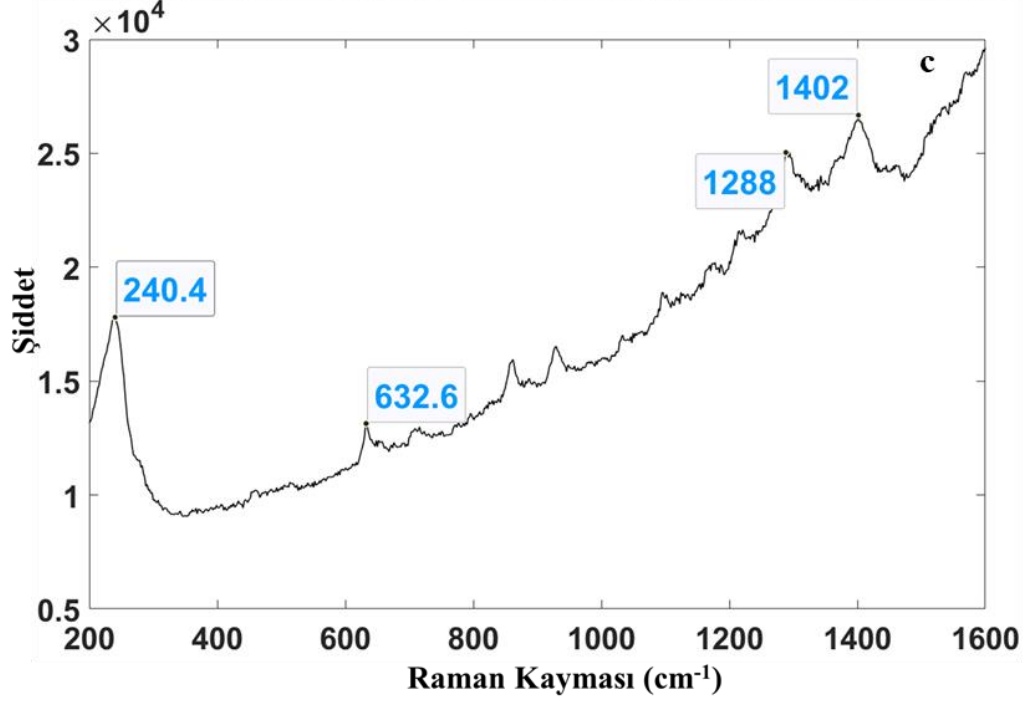
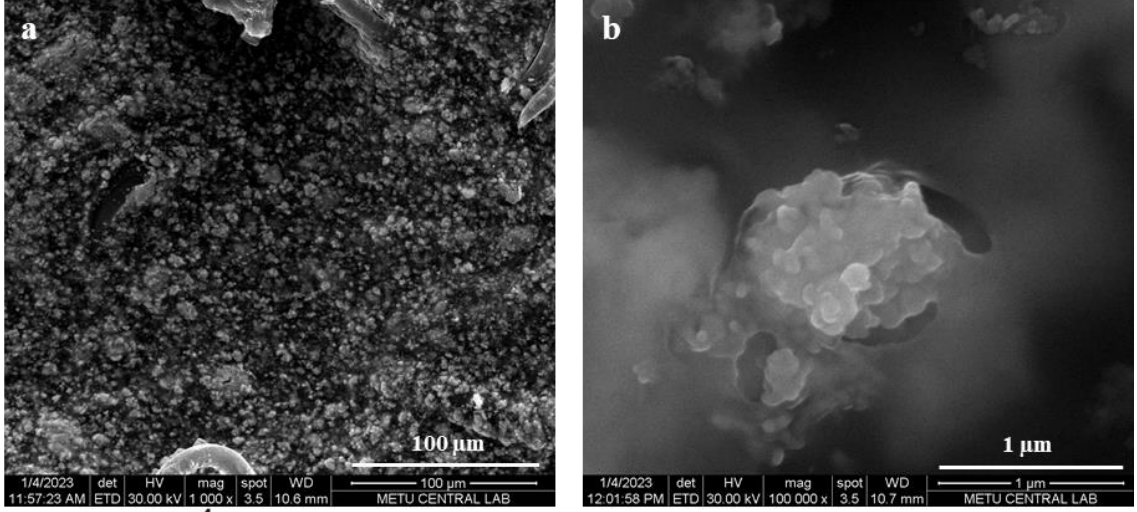
- PVA ile nanokompozit yapı oluşturmak için 0.1 gr'dan başlanarak Ag NP'ler ilk önce 5 ml aseton (safılık:>%99) içinde sonikatörde 30 dakikalık bir işlemle homojen bir şekilde çözülmüştür.
- Elde edilen homojen çözelti, daha önceden hazırlanan 1:10 oranında toz PVA ve deiyonize su içeren 5 ml PVA çözeltisine eklenerek manyetik karıştırıcı aracılığıyla 60 °C'de ve 600 rpm'de 1 saat karıştırılmıştır. Böylece asetonun buharlaşması sağlanmıştır.

Sızıntı eşiğini araştırmak amaçlı Ag NP'lerin kontrollü eklenmesi ile elde edilen bulgulara göre bu oran ağırlıkça yaklaşık %14 olarak bulunmuştur [154].

3.3.1. Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu

Şekil 3.5a ve b, kumaş üzerinde kurutulan PVA–Ag NP nanokompozitinin sırasıyla 100 µm ve 1 µm ölçek barlarında alınan SEM (Quanta, 400F) görüntüleridir. Daha önce bahsedildiği gibi, Ag NP bazlı nanokompozit, tez çalışmasında üretilen nanokompozitler arasında en yüksek sızıntı eşiğine sahiptir. Nanokompozitte bulunan Ag NP'lerin miktarı fazla olduğu için topaklanmaya neden olmuş olabilir. Topaklanma, nanoparçacıkların

etkin yüzey alanını azaltabileceği ve onların polimer matrisi ile etkileşim yeteneklerini sınırlayabileceği için nanokompozitin performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Ayrıca nanoparçacıklar arasında yalıtkan boşluklar oluşturarak nanokompozitin elektriksel iletkenliğini azaltabilir. Topaklanma sorununun üstesinden gelmek için, nanoparçacıkların sentezi sırasında veya nanokompozitin imalatı sırasında yüzey aktif maddeler veya dağıtıcılar kullanmak gibi çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bunlar, nanoparçacıkları stabilize etmeye ve topaklanmalarını önlemeye yardımcı olabilir, bu da daha düzgün bir dağılım ve nanokompozitin özelliklerinin gelişmesi ile sonuçlanır. Üretim aşamasında, aseton bu amaçla kullanılmıştır. Şekil 3.5c, Ag NP bazlı nanokompozitin Raman spektroskopisi (Bruker, dalgaboyu: 532 nm) sonuçlarına aittir. Bu analiz, bileşikte bulunan kimyasal bağlar hakkında bilgi sağlayan birkaç tepe noktası göstermektedir. 240 cm^{-1} 'deki tepe, nanokompozitte gümüş oksit (Ag_2O) veya diğer gümüş içeren bileşiklerin varlığından dolayı olabilecek Ag-O germe bandını gösterir [155]. $\sim 630\text{ cm}^{-1}$ 'deki tepe ise, nanoparçacıkların veya matris malzemesinin yüzeyinde bulunan fonksiyonel gruplardan kaynaklanabilecek C-N-C ve C-S-C bağlarının titreşimli gerilmesiyle ilgilidir [156]. Spektrumda karboksilik grupla ilgili iki tepe noktası da görülebilir. 1288 cm^{-1} 'deki tepe noktası, karboksilik gruptaki C=O bağının simetrik gerilme titreşimine karşılık gelirken; 1402 cm^{-1} 'deki tepe noktası, aynı bağın anti-simetrik gerilme titreşimine karşılık gelir [157, 158]. Bu tepe noktaları, nanoparçacıkların matris malzemedeki dağılımını iyileştirmek veya nanokompozitin yüzey özelliklerini değiştirmek için kullanılabilen karboksilik grupların varlığını gösterir.



Şekil 3.5 PVA–Ag NP nanokompozitinin (a)–(b) büyütülme oranları farklı SEM görüntüleri (c) Raman spektroskopisi

3.4. Polivinil Alkol (PVA) – Grafen Nanoplatelet (GnP) Nanokompoziti

Grafen, altıgen bir kafes yapısında düzenlenmiş karbon atomlarından oluşan iki boyutlu bir malzemedir. Tek tabakalı bağımsız bir grafitten oluşur ve var olduğu bilinen en ince malzemedir. Grafen, elektronik, enerji ve tıpta çeşitli uygulamalar için onu çekici bir malzeme yapan benzersiz mekanik, elektriksel ve termal özelliklere sahiptir. Grafenin benzersiz özellikleri, iki boyutlu yapısından ve karbon atomları arasındaki güçlü kovalent bağdan kaynaklanmaktadır. Elektriksel ve ısı iletkenliği çok yüksektir ve yüksek yüzey alanı/hacim oranı onu algılama ve kataliz uygulamaları için ideal bir malzeme yapar [159]. Grafen ayrıca inanılmaz derecede güçlü ve esnektir. Yüksek esnekliğe sahip olması, kırılmadan gerilmesini sağlar. Saf grafenin düşük üretim oranı ve yüksek satış maliyeti gibi sebeplerle geniş çapta üretilmemesine rağmen, tek katlı veya birkaç katlı grafenden oluşan, yapısal olarak grafit ve grafen arasında yer alan ve dikkate değer özellikleri olan grafen nanoplateletler (GnP'ler) düşük maliyetle üretilmektedir [160]. Şekil 3.2d–e’de grafen ve GnP’lerin bir gösterimi verilmiştir [161]. Morfolojik özelliklerine göre, grafen tek katmanlı grafen, birkaç katmanlı grafen (2–10 katman), nano ve mikro plateletler olarak sınıflandırılabilir. Çeşitli üretim teknikleriyle ortaya çıkan plateletler kalınlık, pulların yanal boyutu, uzunluk–çap oranı ve kusur konsantrasyonu bakımından farklılık göstermenin yanında, kalınlıkları 0.34–100 nm arasında değişir [162, 163]. Ayrıca, ticari olarak temin edilebilen GnP’ler, tek katmanlı grafen, birkaç katmanlı grafen ve nanoyapılı grafitin bir karışımıdır. Bu çeşitlilik, ortaya çıkan malzemenin özelliklerini ve farklı uygulamalardaki performansını etkileyebilir.

GnP’ler, hafif yapısı, uzunluk–çap oranının yüksek oluşu, elektriksel ve termal iletkenlikleri, düşük maliyetli ve mekanik dayanıklılıkları sebebiyle nanokompozitlerde dolgu maddesi olarak tercih edilen malzemelerden biridir [160]. Bu sebeple esnek elektriksel cihazların, dokusal sensörlerin, gerinim ve basınç sensörlerinin üretiminde ve biyomedikal uygulamalarda GnP’lerden yapılan nanokompozitlerin kullanıldığı görülür.

Tez çalışmasında üretilen dokusal sensörlerden biri PVA (MW: 40.000–50.000, Shuangxin Co. Ltd) – GnP (safılık: >%99.9, boyut: 3 nm, Nanografi) nanokompoziti tabanlıdır. Nanokompozit üretiminde kullanılan PVA polimerinin çözücüsü su olduğu için, GnP dolgu maddesini polimere eklenmeye hazır hale getirmek için deiyonize su kullanılmıştır. Önceki nanokompozit üretme aşamalarında olduğu gibi bu işlemde de

sızıntı eşiğini bulabilmek için GnP'ler kontrollü bir şekilde eklenmiş ve her bir aşamada direnç değeri ölçülmüştür.

Nanokompozit, aşağıda verilen aşamalar takip edilerek üretilmiştir:

- GnP'ler, 0.1 gr'dan başlanarak ilk önce deiyonize suda 1 saat süreyle 50 W sonikatörde işleme tabi tutulmuştur.
- Sonrasında ise homojen bir şekilde dağılan GnP'ler daha önce hazırlanan 1:10 oranındaki PVA çözeltisine eklenmiştir.
- Polimer matrisi olarak PVA kullanılan nanokompozitlerde olduğu gibi polimer çözeltisindeki PVA ve deiyonize su oranının 1:10 olmasına özen gösterilmiştir. Karıştırma işlemi 60 °C ve 600 rpm'de 1 saat sürdürülmüştür.

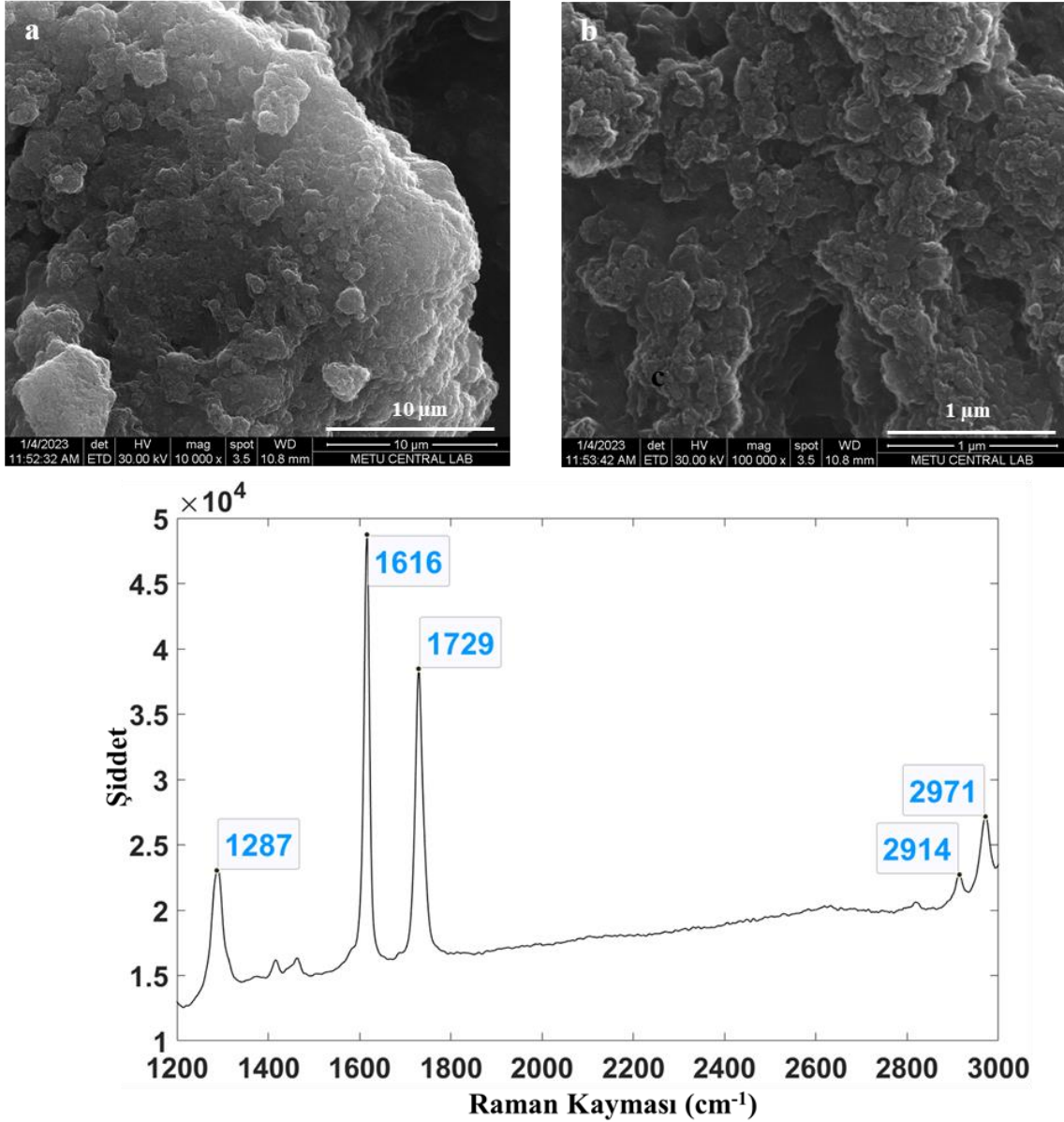
Bu nanokompozit için ise GnP'lerin sızıntı eşiği ağırlıkça yaklaşık %3.7 olarak bulunmuştur [164].

3.4.1. Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu

Grafen nanoplatelet bazlı nanokompozitin kumaş üzerindeki SEM (Quanta, 400F) görüntüleri Şekil 3.6a ve b'de sırasıyla 10 µm ve 1 µm ölçek barlarında verilmiştir. Nanoplateletler, yüksek yüzey alanlarından dolayı düze benzer bir yapıya sahiptir. Sonuç olarak, görüntüde açıkça görülebileceği gibi, nanokompozitin analizinde alt tabaka olarak kullanılan kumaştaki lifleri kaplayabilirler. Bu ise nanokompozitin mekanik özelliklerinin yanı sıra termal ve elektriksel iletkenliğini de geliştirebilir. Nanoplateletlerin yüksek yüzey alanı, onları, diğer malzemelerle etkileşime girme yeteneği gibi kompozitin yüzey özelliklerini geliştirmek için de faydalı kılar. Nanokompozitlerde GnP'lerin kullanımı, elektronikten birçok biyomedikal kullanıma kadar uygulamaların performansını geliştirme potansiyeline sahiptir.

GnP tabanlı nanokompozitin Raman spektroskopisi (Bruker, dalgaboyu: 532 nm) analizi ise Şekil 3.6c'de verilmiştir. Analizdeki ~2900 cm⁻¹'deki tepe noktası, grafen kafesindeki kusurlar ve düzensizlikle ilgili olan D-bandı ile ilişkilidir. Bu zirve aynı zamanda malzemede bulunan grafen katmanlarının sayısından da etkilenir ve zirvenin yoğunluğu azalan katman sayısı ile artar [165]. Hem fCNT'lerin hem de GnP tabanlı nanokompozitlerin Raman spektrumu tipik olarak kafes yapısındaki karbon atomlarının titreşim modlarıyla ilgili tepe noktaları içerir. Bu tepeler, kompozitte CNT'ler ve GnP'ler gibi karbon bazlı malzemelerin varlığını belirlemek için kullanılabilir. GnP'ler bazlı nanokompozitler söz konusu olduğunda, Raman spektrumu tipik olarak, grafen kafes

yapısındaki karbon atomlarının titreşim modları ile ilgili olan G–bandı ve 2D–bandı olarak bilinen iki önemli tepe noktası içerir. Bu tepe noktaları, genellikle sırasıyla yaklaşık 1580 cm^{-1} (G–bandı) ve $2700\text{--}2900\text{ cm}^{-1}$ (2D–bandı) civarındadır. Raman spektroskopisi, GnP’ler ve CNT’ler gibi karbon bazlı malzemelerin yapısını ve özelliklerini karakterize etmek ve bunların kompozit sistemlerdeki diğer malzemelerle etkileşimlerini analiz etmek için değerli bir araçtır.



Şekil 3.6 PVA–GnP nanokompozitinin (a)–(b) büyütülme oranları farklı SEM görüntüleri (c) Raman spektroskopisi

3.5. Sodyum Aljinat (SA) – Karbon Siyahı (CB) Nanokompoziti

Aljinat, kahverengi deniz yosunundan elde edilen doğal olarak oluşan bir heteropolisakkarittir ve α -L-mannuronik asit (M) ve β -D-guluronik asit (G) adlı değişken dizilerde düzenlenmiş iki üronik asitten oluşan doğrusal bir kopolimerdir [166]. Aljinatın benzersiz kimyasal yapısı, jel formuna getirilebilme, biyo uyumlu ve biyo bozunur olması, gıda, ilaç ve biyomedikal dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasını sağlar. Biyomedikal alanda, aljinat, doku mühendisliği ve rejeneratif tıpta potansiyel kullanımı için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [167]. Aljinat hidrojeller, hücre büyümesini ve doku oluşumunu desteklemek için yapı iskelesi olarak kullanılabilir. Bu hidrojeller aynı zamanda hücreleri, büyüme faktörlerini ve diğer terapötik maddeleri vücuttaki belirli bölgelere iletmek için kullanılabilir.

Aljinatın bir türevi olan SA'yı elde etmek için ($\text{NaC}_6\text{H}_7\text{O}_6$), aljinik asidin sodyum tuzu kullanılır. Suda çözünebilir olmasının ve jel haline gelebilmesinin yanında, kalsiyum klorür ile çapraz bağlanarak hidrojel haline getirilebilir bir polimerdir [168]. Kalsiyum iyonları, başka bir molekülle çapraz bağlanmak için sodyum aljinatta bulunan G monomeri ile kimyasal olarak reaksiyona girer ve bunun sonucunda jel yapıda olan aljinat katı bir yapıya dönüşür [169]. Sodyum aljinat tamamen biyo uyumlu ve güvenli olduğu için gıda ve sağlık endüstrisinde sıkça tercih edilmektedir [168].

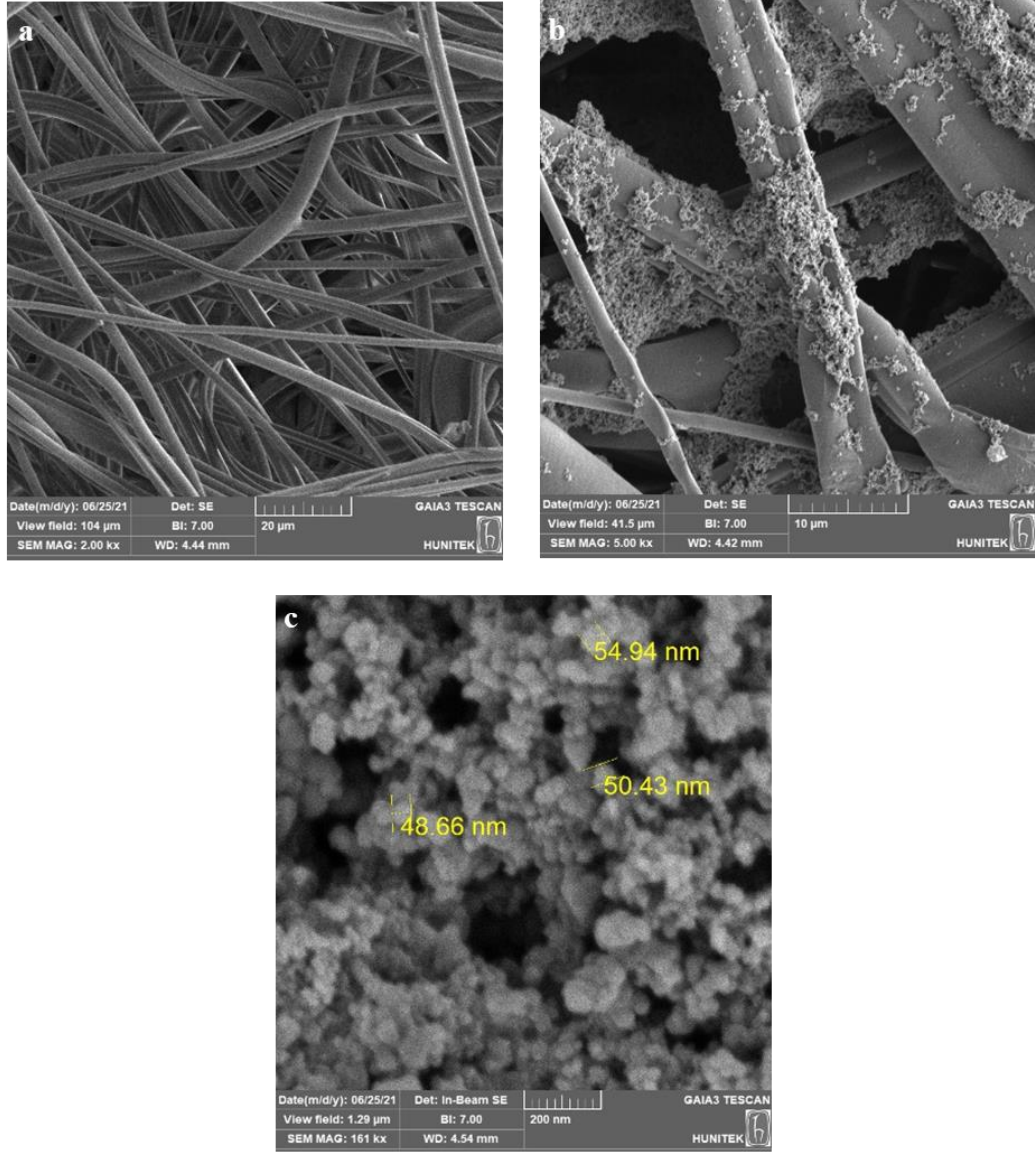
Tez çalışmasında üretilen dokusal sensörlerden biri SA (Alfasol)–CB (Sigma-Aldrich) nanokompoziti tabanlıdır. Nanokompoziti hazırlamak için takip edilen adımlar aşağıda verilmiştir:

- Üretime 1 gr SA'nın, 40 ml deiyonize suda çözdürülmesiyle başlanmıştır. Topaklanmayı önlemek için SA azar azar ilave edilmiş ve çözelti manyetik karıştırıcı kullanılarak 80 °C'de 2 saat süreyle ve 600 rpm'de homojen bir çözelti elde edilinceye kadar karıştırılmıştır.
- Nanokompozit oluşturmak için, jel haline gelen polimere dolgu maddesi olarak toplamda 2.1 gr CB kademeli olarak ilave edilerek karıştırma işlemi 80 °C ve 600 rpm'de 1 saat sürdürülmüştür.

Üretim sonucunda CB'nin nanokompozit içindeki sızıntı eşiği ağırlıkça %4.87 olarak bulunmuştur.

3.5.1. Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu

Nanokompozit malzemeleri bağlamında, SEM (GAIA 3, Tescan), malzemenin mikro yapısını ve matris malzemesi içindeki dolgu parçacıklarının veya diğer bileşenlerin dağılımını incelemek için kullanılabilir. Bu bilgi, sensör malzemelerinin tasarımını ve üretimini optimize etmenin yanı sıra, dış uyaranlara sensör tepkisini anlamak için önemlidir. SA–CB nanokompozitine dayalı üretilecek sensör eriyik üflemlerli (melt blown) kumaş üzerinde üretileceği için malzemenin karakterizasyonu nanokompozitin bu kumaş üzerinde kurutulmasının ardından gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7a kumaşın yapısındaki lifleri net bir şekilde göstermektedir. Kumaşın lifleri, SA–CB nanokompozit tabanlı sensörün esnekliğinde ve algılama aralığında önemli bir rol oynar. Liflerin varlığı sensörün, basınç, gerinim veya diğer fiziksel parametrelerdeki değişiklikleri algılamak için önemli olan harici uyaranlara yanıt olarak bükülmesine ve esnemesine olanak tanır. Ayrıca lifler, sensörün algılayıcı malzemesi olan nanokompozitin kumaş boyunca eşit şekilde dağılmasına yardımcı olabilir, bu da sensör yanıtının hassasiyetini ve doğruluğunu artırabilir. Genel olarak, sensör malzemesindeki lifler ve SA kombinasyonu esnek, duyarlı ve çok yönlü bir algılama platformu oluşturur. Şekil 3.7b–c, eriyik üflemlerli kumaş üzerindeki nanokompozit mürekkebin 10 µm ve 200 nm ölçek barlarında alınan görüntülerine aittir. Nanokompozit mürekkep, karbon parçacıkları ve kumaş lifleri arasında bir etkileşim oluşmasını sağlayarak bir basınç uygulanması durumunda lifler üzerindeki karbon parçacıklarının birbirine yaklaşarak direncin düşmesini ve iletkenliğin artmasını sağlar. Dirençteki bu değişiklik sensör tarafından algılanabilir ve basınç uygulanan yeri belirlemek için kullanılabilir. Nanokompozit mürekkebin kumaş liflerinde iletkenliğe ve genel sensör tepkisindeki değişikliğe katkıda bulunabilecek fiziksel bir deformasyon oluşturması da mümkündür. Şekil 3.7c, nanokompozit mürekkep malzemesindeki karbon parçacıklarını göstermektedir. Ölçümler, parçacık çapının ortalama olarak yaklaşık 50 nm olduğunu doğrular; bu da kullanılan CB özellikleriyle uyumludur.



Şekil 3.7 Sensör malzemelerinin SEM ve AFM görüntüleri (a) 2K büyütmede saf eriyik üflemlili kumaş (b)–(c) farklı büyütmelerde eriyik üflemlili kumaş üzerinde SA–CB nanokompoziti

3.6. Sodyum Aljinat (SA) – İşlevselleştirilmiş Karbon Nanotüp (fCNT) Nanokompoziti

Kısım 3.6'da bahsedildiği gibi SA, iki değerlikli (örneğin Ca^{2+} , Cu^{2+} , Sr^{2+}) ve üç değerlikli (örneğin Fe^{3+} , Al^{3+}) katyonlarla çapraz bağlanabilen ve çapraz bağlama işlemleriyle iyonotropik hidrojeller oluşturan suda çözünür bir bileşiktir [170]. Kısım 3.6'da SA, çapraz bağlama işlemi olmadan mürekkep formunda bir nanokompozit oluşturmak için kullanılmış ve sensör üretimi mürekkebin bir alt tabaka üzerinde kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise SA, kalsiyum klorür ile çapraz

bağlandığı için nanokompozit katı bir form halini almış ve bir alt tabaka kullanımına ihtiyaç duyulmadan işlemler gerçekleştirilmiştir.

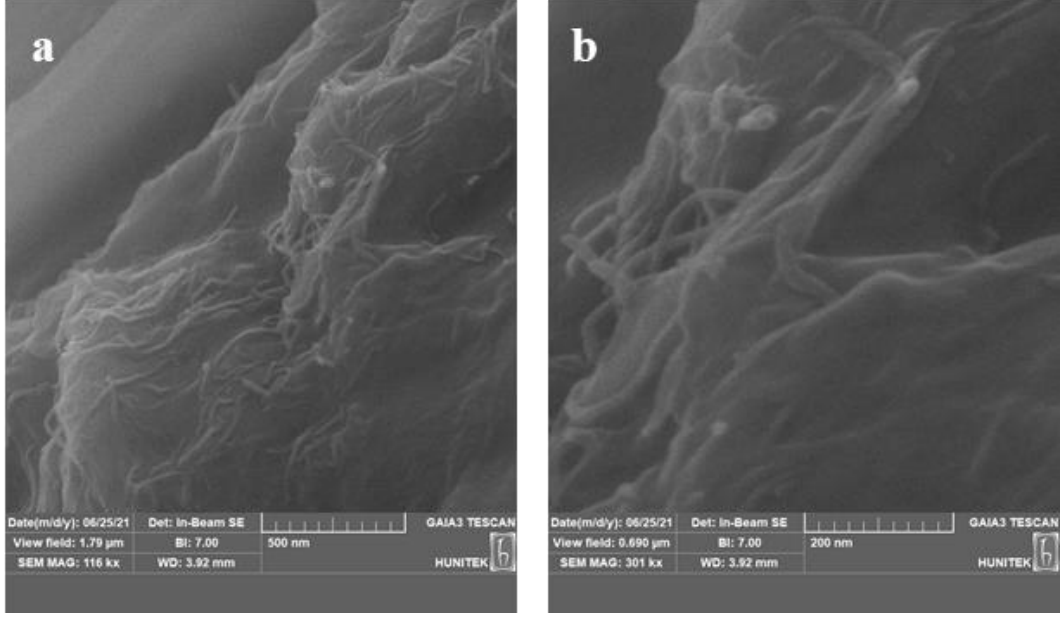
Tez çalışmasında üretilen dokunsal sensörlerden biri SA-fCNT nanokompoziti tabanlıdır. Nanokompoziti hazırlamak için takip edilen aşamalar aşağıdaki gibidir:

- İlk önce 2 gr SA 150 ml deiyonize suda çözündürülmüştür. Topaklanmayı önlemek için SA azar azar ilave edilmiş ve çözelti manyetik karıştırıcı kullanılarak 80 °C'de 2 saat süreyle ve 600 rpm'de homojen bir çözelti elde edilinceye kadar karıştırılmıştır.
- Ardından iki ayrı kaba alınan 5 ml sodyum aljinat çözeltisinin her ikisine de Kısım 3.3'te anlatılan yöntemle elde edilen fCNT'ler kademeli olarak, yaklaşık olarak çözeltinin %4'ü oranında ilave edilmiştir.
- Hazırlanan çözeltilerden biri kalsiyum klorür ile çapraz bağlanmıştır. Diğer çözeltiye ise çapraz bağlama işleminden önce yaklaşık 5 ml gliserin ilave edilerek karıştırılmış ve ardından çapraz bağlanmıştır.
- Kalsiyum klorür ile çapraz bağlanan ve sertleşen nanokompozit yapılar, ölçümler alınmadan önce 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir.

Nanokompozite gliserin gibi plastikleştiricilerin eklenmesi, nanokompozit tabanlı üretilen sensörün esnekliğini ve mekanik özelliklerini geliştirebilir. Gliserin, nanokompozitteki polimer zincirlerine nüfuz edebilen, daha kolay hareket etmelerini sağlayan ve komşu zincirler arasındaki etkileşimleri azaltan küçük bir moleküldür. Bu, farklı şekil ve boyutlarda kullanılacak sensörler için daha esnek ve elastik bir yapı oluşturabileceği için önemlidir. Ek olarak gliserin, polimer zincirlerinin iletkenliğini artırarak nanokompozitin elektriksel özelliklerini de geliştirebilir [171, 172].

3.6.1. Sensör Malzemesinin Karakterizasyonu

Şekil 3.8a-b, SA-fCNT nanokompozit mürekkebinin sırayla 500 nm ve 200 nm ölçek barlarında görüntülerini göstermektedir. Kısım 3.3'te üretilen fCNT'ler kullanılarak üretilen nanokompozite benzer olarak, CNT'lerin tüp yapısının belirgin olmasının yanında topaklanmanın olmadığı da görülmektedir



Şekil 3.8 Gliserin içeren SA–fCNT nanokompozitinin (a) 500 nm ölçek barında görüntüsü (b) 200 nm ölçek barında görüntüsü

3.7. Sonuçlar

Bu bölümde, tez bünyesinde üretilen dokunsal sensörlerde algılayıcı tabaka olarak kullanılan polimer nanokompozitlerin üretim ve karakterizasyon süreçleri anlatılmıştır. Bu kapsamda, polivinil alkol (PVA) ve sodyum aljinat (SA) farklı dolgu maddeleriyle kullanılarak nanokompozitler üretilmiştir. Bu dolgu maddeleri; işlevselleştirilmiş karbon nanotüpler (fCNT'ler), karbon siyahı (CB) nanoparçacıkları, grafen nanoplateletler (GnP'ler) ve gümüş nanoparçacıklardır (Ag NP'ler). Nanokompozitler sızıntı teorisi göz önüne alınarak üretilmiş ve karakterizasyonları gerçekleştirilerek algılama üzerindeki etkileri yakından incelenmiştir.

Bu nanokompozitlere ek olarak, CNT'lerin herhangi bir işleme uğramadan saf olarak kullanıldığı bazı nanokompozit üretim çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. Böylece, işlevselleştirilmiş CNT'lerle üretilen nanokompozitlerle bir karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen farklı nanokompozit deneylerinde, CNT'lerle en çok kullanılan çözücülerden dimetilformamid (DMF), N–Metil–Pirolidon (NMP) ve etanol kullanılmıştır. Polimerler olarak ise suda çözünebilir ve biyouyumlu bir polimer olan polietilen glikol (PEG), PVA ve serigrafi işleminde kullanım için oldukça iyi bir viskoziteye sahip olan polimetil metakrilat (PMMA) kullanılmıştır. Saf CNT'leri içeren nanokompozitlerin yanında, CB nanoparçacıklarıyla ve PVA ile nanokompozitler de üretilmiştir. Saf haldeki CNT'leri içeren nanokompozitlerin serigrafi işleminde

kullanılması amaçlanmışken, CB nanoparçacıklarını içeren nanokompozitler mürekkep püskürtmeli baskı, 3B baskı ve lazer kazıma metotları ile kullanılmıştır. Bu deneylerle ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 5'te Çizelge 5.1'de verilmiştir.

4. DOKUNSALE SENSÖR TASARIMLARI

Bölüm 3'te üretim ve karakterizasyon süreçleri anlatılan polimer nanokompozitler, farklı tasarımlarda sensör üretimlerinde kullanılmıştır. Dört farklı tasarımda üretilen dokunsal sensörlerin elektromekanik testleri yapılmış ve bu kapsamda uygulanan kuvvete veya basınca bağlı olarak sensörlerin kapasitif, rezistif ve empedans tepkileri incelenmiştir. Tasarım özelinde, frekans tepkisinin, kuvvet uygulanan konumun ve kuvvetin büyüklüğünün araştırılması gibi sensörlerin farklı özellikleri de araştırılmıştır. Ayrıca, üretilen sensörlerden biri uygulamalı bir çalışmada test edilmiştir.

Tasarım – 1 olarak verilen dokunsal sensör, her iki tabakası da selüloz kâğıt üzerinde serigrafi ile üretilen, 1 cm x 1 cm boyutlarında kare yapılara sahip 4x4'lük bir matris yapısından oluşan çift katlı bir yapıdır. Sensör bu şekilde tasarlanarak, hem rezistif ve kapasitif etkiler birlikte incelenmiş; hem de nanokompozit mürekkeple üretilen algılayıcı ince sütun yapıların algılamadaki başarılı etkinliği gösterilmiştir.

Tasarım – 2 olarak verilen dokunsal sensör, her iki tabakası da pamuk kumaş üzerinde serigrafi ile üretilen iç içe geçmiş iletken yollardan oluşan bir elektrot ve bu elektrotu tamamen kapsayacak şekilde aynı boyutlarda kare şeklinde bir algılayıcı tabakadan oluşmaktadır. Sensörün bu şekilde tasarlanmasının sebebi, tabakalar arasındaki temas alanına dayanarak bir algılama gerçekleştirmektir. Elektrot olarak IDE yapıların seçilmesinin sebebi ise sahip oldukları iletken yolların sayısına bağlı olarak sensörün cevap aralığının geliştirilebilmesidir.

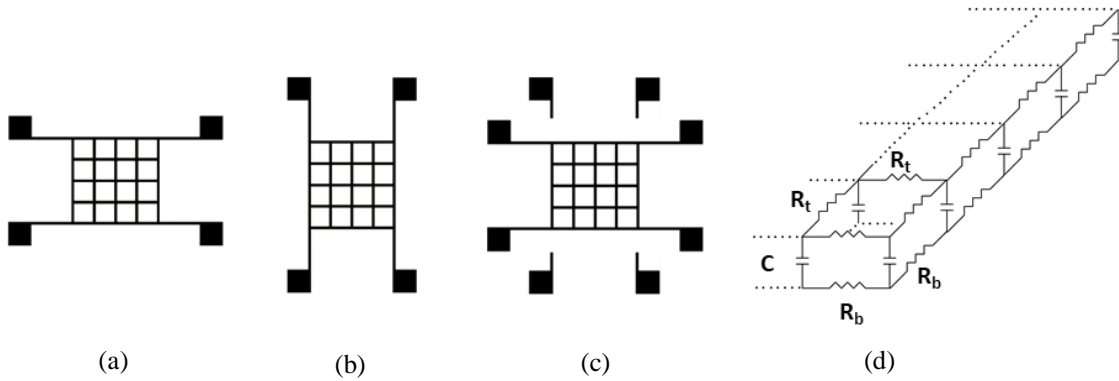
Tasarım – 3 olarak verilen dokunsal sensör, kumaş üzerinde serigrafi ile üretilen iki ayrı serpentin geometrideki yapının, baskı olan yüzleri dışa bakacak şekilde ve aralarında dielektrik malzeme olarak yine alt tabakada kullanılan kumaşın kullanılmasıyla elde edilen bir yapıdır. Bu sensör tasarımında incelenen özelliklerden biri kuvvet uygulanan noktanın belirlenmesi olduğu için ve serpentin yapı üzerinde de bunu test edebilmek için yeterli sayıda ayrı nokta belirlenebildiği için bu geometri tercih edilmiştir.

Tasarım – 4 olarak verilen dokunsal sensör ise farklı bir metotla üretildiği için serbest bir form halini almıştır, herhangi bir yüzeye mürekkep olarak uygulanmamıştır. Bu metotta, nanokompozit mürekkep çözeltisi çapraz bağlama işleviyle katı fakat esnek yapılara dönüşmüştür.

4.1. Sensör Tasarımı – 1

4.1.1. PVA–CB Nanokompoziti ile Dokunsal Sensör Üretimi

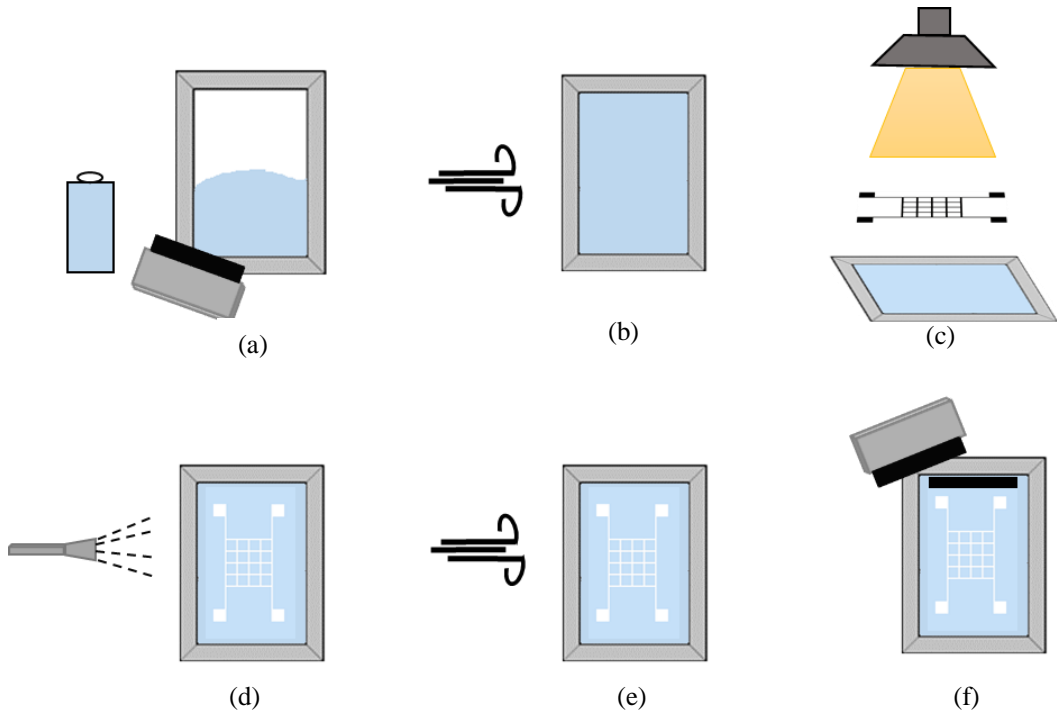
Kısım 3.2’de üretim süreci anlatılan PVA–CB nanokompoziti, Şekil 4.1’de verilen geometri kullanılarak dokunsal sensör üretiminde kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada, dokunsal sensör iki sensör dizisinin üst üste getirilmesiyle oluşturulmuştur. Nihai dokunsal sensör 4 cm x 4 cm boyutlarındadır ve diziyi oluşturan her bir karenin alanı 1 cm²’dir. Ayrıca, dizilerin uzantısı olarak görülen pedler ölçüm için kullanılmıştır. Şekil 4.1a ve b şematik olarak biri üstte diğeri de altta olacak şekilde yerleştirilen dizileri göstermektedir. Bantla kenarlarından birbirine yapıştırılan diziler Şekil 4.1c’deki gibi bir görünüme sahiptir. Şekil 4.1d ise oluşturulan yapının eşdeğer devresini göstermektedir. Burada C , selüloz kâğıdın kapasitansına karşılık gelen üst ve alt katmanlar arasındaki kapasitansı temsil eder. Üst tabakadaki nanokompozitin direnci R_t ile, alt tabakadaki nanokompozitin direnci ise R_b ile gösterilmiştir. Üst tabakadaki yapıya bir basınç uygulandığında, direnç ve kapasitans değerlerinin her ikisinde de bir değişim meydana gelir. Burdan hareketle, empedans değerlerine öncelik verilerek, algılamada direnç ve kapasitans değerlerinin birlikte değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Alt ve üst tabakaların her ikisi de serigrafi metoduyla üretilmiştir. Bu yöntemin aşamaları Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Dokunsal sensörün (a) üst ve (b) tabakaları. (c) Üst ve alt tabakaların bir araya getirilmesiyle oluşturulan sensör (d) Dokunsal sensörün eşdeğer devresi

İşlem, 28 μm açıklığa sahip ve 56 μm kalınlığında eleğin her iki yüzünün karanlık ortamda foto emülsiyon ile kaplanması ile başlar (Şekil 4.2a). Bu işlemin ardından elek kurutulur (Şekil 4.2b) ve istenen geometrideki maske elek üzerine yerleştirilerek

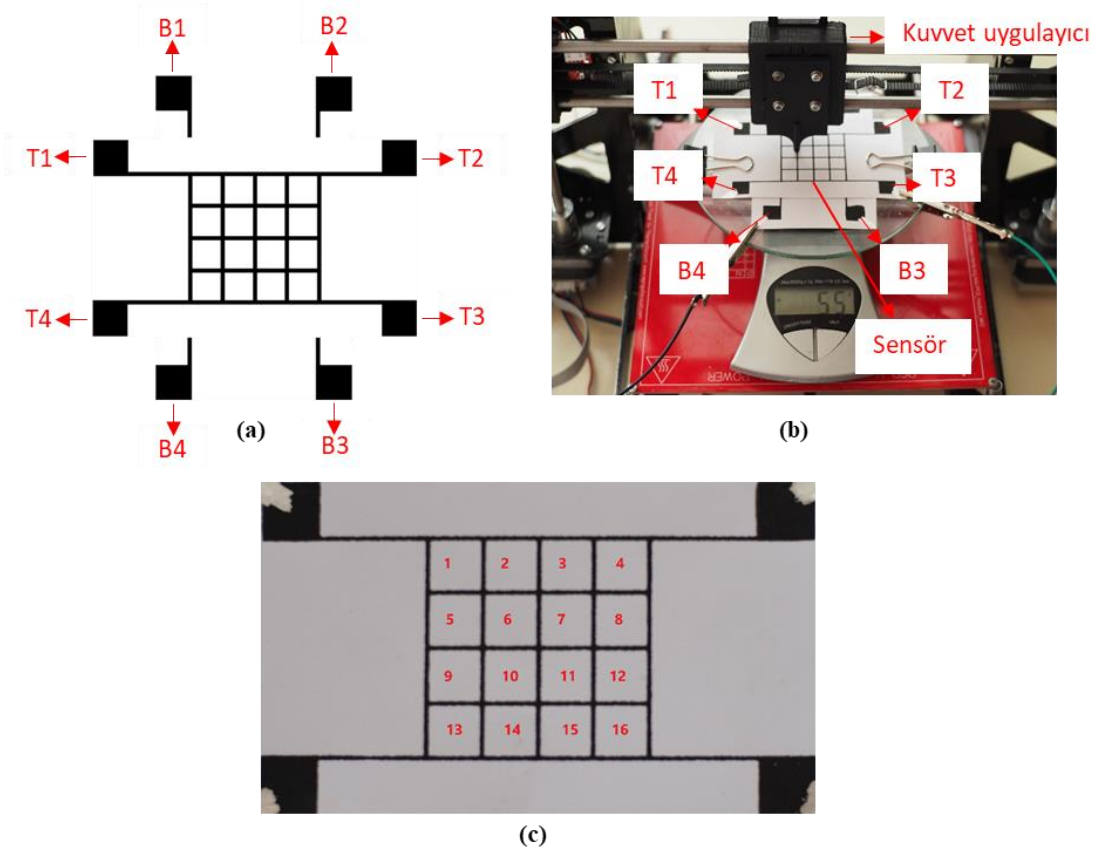
ultraviyole ışıktaki bekletilir (Şekil 4.2c). Bu işlem maskedeki yapının eleğe aktarılmasını sağlar ve işlemin süresi ışığın yoğunluğuna göre değişebilir. Sonrasında ise temizleme ve kurutma gerçekleştirilir (Şekil 4.2d–e). Serigrafinin son adımında ise alt tabaka olarak kullanılan selüloz kâğıt eleğin altına yerleştirilir ve bir miktar nanokompozit mürekkep maskenin üzerine dökülür ve rakle yardımıyla yayılması sağlanır (Şekil 4.2f). PVA–CB nanokompozitinin yanında, aynı adımlar takip edilerek ticari bir mürekkep (Bare Conductive) ile ikinci bir sensör üretimi gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, her iki sensörün performansını bazı açılardan karşılaştırmaktır. Alt tabaka olarak kâğıt kullanmanın en önemli sebepleri arasında, düşük maliyetli olması, kolay temin edilebilmesi ve hepsinden önemlisi, yazarak veya çeşitli baskı yöntemlerini kullanarak sensörler üretmeye imkân tanınmasıdır. Alt tabaka olarak kullanılacak polimerler genellikle hidrofobiktir ve üzerine mürekkep malzemesi uygulanmadan önce bazı işlemlerden geçmesi gerekmektedir [173].



Şekil 4.2 Sensör üretiminde kullanılan serigrafî aşamaları (a) eleği foto emülsiyonla kaplama (b) kurutma (c) ultraviyole ışığa maruz bırakma (d) temizleme (e) kurutma (f) rakle kullanarak mürekkebi yayma

4.1.2. Elektromekanik Ölçüm Sonuçları

Üretilen dokunsal sensörlerin performanslarını çeşitli kriterler açısından değerlendirebilmek için birtakım testler uygulanmıştır. Testlerin uygulanabilmesi için nanokompozit tabanlı sensör üzerinde Şekil 4.3a'da belirtildiği gibi etiketlemeler yapılmıştır. Üst ve alt katmana yerleştirilen ölçüm noktalarını göstermek için *T* ve *B* gösterimleri kullanılmıştır. Empedans ölçümlerini almak için, ölçüm problemleri B1–T1 ve B2–T3 gibi ikili noktalara yerleştirilmiştir. Şekil 4.3b ise mekanik bir kuvvet uygulanması için tasarlanan otomatik kuvvet uygulama sistemini göstermektedir. Böylece kuvvet, her bir noktaya eşit miktarda uygulanabilmekte ve bu sayede bir karşılaştırma imkânı sağladığı için güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir. Alınan ölçümler, farklı basınç değerleri için empedans, kapasitans, direnç ve faz açısı değişim bilgilerini içermektedir. Ölçümleri kolaylıkla alabilmek için ölçüm pedlerine gümüş iletken mürekkep sürülmüş ve basınç uygulanan noktalar Şekil 4.3c'de gösterildiği gibi numaralandırılmıştır.

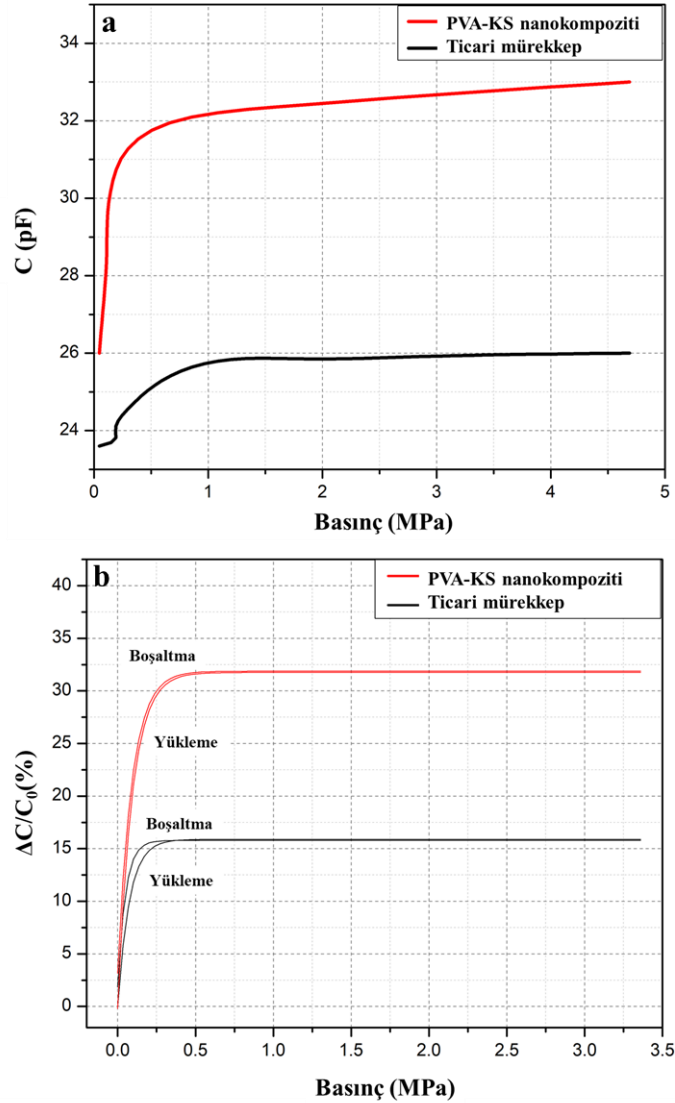


Şekil 4.3 (a) Dokunsal sensörün yapısı ve ölçüm pedleri (b) yüksek hassasiyette otomatik kuvvet uygulayıcı düzenek (c) en üstteki sensör dizisinde konumları numaralandırılan sensör dizisi

Sensör tasarımında dielektrik malzeme olarak işlev gören selüloz kâğıttan dolayı çoğunlukla empedans ve kapasitans değerleri üzerinde durulmuş ve sensörün kuvvet uygulanmasına ve kuvvetin kaldırılmasına ne kadar hızlı tepki verdiği incelenmiştir.

4.1.2.1. Dokunsal Sensörün Kapasitif Özellikleri

Kapasitansın sensör üzerine uygulanan basınçla nasıl değiştiği Şekil 4.4a’da verilmiştir. Bu grafik, Şekil 4.3c’de 2, 3, 6 ve 7 olarak etiketlenmiş diziler tarafından çevrelenmiş noktaya basınç uygulanarak ve T1–B3 problemleri kullanılarak alınan ölçümlere dayanmaktadır. Şekil 4.4a, PVA–CB nanokompozit bazlı dokunsal sensörün başlangıçta bir basınç uygulanmadığı durumda ve basınç uygulandığında ticari iletken mürekkep kullanılarak üretilen sensörden daha yüksek kapasitans değerlerine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.4 Dokunsal sensörlerin (a) kapasitans–basınç özellikleri (b) histerezis davranışları

Kapasitif bir sensörün hassasiyeti grafikteki eğrinin eğimi ile tanımlanır ve bu, performans değerlendirmesinin çoğunlukla önemli bir parçasını oluşturur [174]. Grafikteki veriler göz önüne alındığında, sensörlerin farklı basınç aralıklarında farklı hassasiyetlere sahip oldukları görülmektedir. Bu sebeple oluşturulan Çizelge 4.1’de bu aralıklar için sensörlerin hassasiyetleri verilmiştir. Ticari mürekkep bazlı sensör, 0.0469–1.8 MPa basınç aralığında 1.28 pF. MPa⁻¹ hassasiyete sahipken, PVA–CB nanokompozit tabanlı sensörün hassasiyeti ise aynı aralıkta 3.69 pF. MPa⁻¹’dir. Bu durum, sensörün hassasiyetinin 0.0469–1.8 MPa aralığında en yüksek seviyede olduğunu gösterir.

Bu sonuca göre, PVA–CB nanokompozit bazlı sensör, ticari mürekkep tabanlı sensörden daha iyi performans göstermekte ve bunun nanokompozit malzemedeki CB nanoparçacıklarından ve PVA içeriklerinden kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir. CB parçacıkları tarafından oluşturulan iletken yolların PVA matrisi üzerinde konumlanması ve PVA’nın aynı zamanda bir dielektrik malzeme işlevi görmesi nedeniyle selüloz kâğıdın kapasitif özelliklerine ek olarak PVA da ekstra kapasitans oluşturur. Ayrıca, selüloz kâğıdın lifli yapısı sayesinde küçük ölçekte sıkıştırılabilir olması da kapasitans değerini etkiler. Şekil 4.4a’da görülebileceği gibi PVA–CB nanokompozit tabanlı sensör daha yüksek basınç oranlarında doyuma ulaşır. Sensöre basınç uygulandığında ve ardından kaldırıldığında, polimerin ve kâğıdın viskoelastisitesi, sensörün başlangıç durumuna kıyasla farklı kapasitans değerlerinin ölçülmesine neden olur. Bu ise sensörlerin dinamik koşullar altında çalışmasında incelenmesi önemli bir kavram olan histerezisin varlığına işaret eder. Geniş histerezis, sensörler üzerinde geri dönüşü olmayan etkilere neden olabilir. Ayrıca, kapasitif sensörler, piezorezistif sensörlere göre daha az histerezis hatasına sahiptir [83]. Şekil 4.4b, hem PVA–CB nanokompozit sensörünün, hem de ticari mürekkep kullanılarak üretilen sensörün histerezis davranışını göstermektedir. Sensörlerin yükleme ve boşaltma esnasında sahip oldukları kapasitans değeri başlangıçtaki kapasitans değerine oranlanarak normalize edilmiş ve karşılaştırma, birimi olmayan bir parametre üzerinden yapılmıştır. Böylece, sensörlerin kapasitansındaki değişim daha net olarak ifade edilmiştir. Her iki sensör de iyi histerezis davranışlarına sahip olmasına rağmen, nanokompozit tabanlı sensörün kapasitans değeri daha yüksektir ve histerezis eğrisinin genişliği, ticari mürekkep tabanlı sensöre göre nispeten daha dardır.

Çizelge 4.1 Sensörlerin hassasiyetlerinin belirli basınç aralıklarında hesaplanması

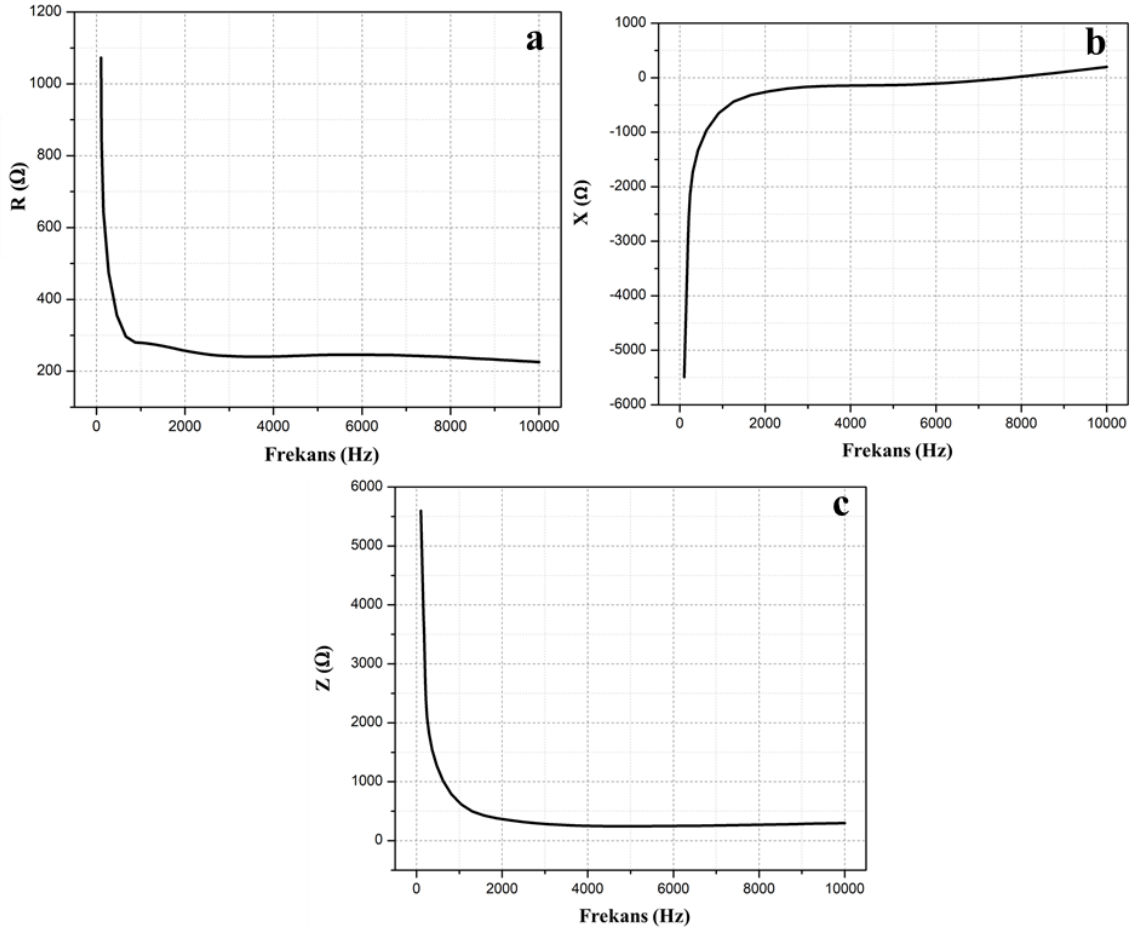
	Ölçüm Alınan Aralık (MPa)	Hassasiyet (pF. MPa ⁻¹)
Ticari karbon tabanlı mürekkep tabanlı sensör	0.0469–1.8	1.28
	1.8–4.7	0.052
PVA–CB nanokompozit tabanlı sensör	0.0469–1.8	3.69
	1.8–4.7	0.207

4.1.2.2. Dokunsal Sensörün Piezoempedans Özellikleri

Nanokompozit tabanlı sensörün piezoempedans ölçümleri Şekil 4.3c’de 2, 3, 6 ve 7 olarak etiketlenmiş diziler tarafından çevrelenen noktaya basınç uygulanarak T1–B3 problemlerinden alınan ölçümlere dayanmaktadır. Bir empedans analizörü kullanılarak (NI Elvis II+) farklı ölçüm pedi çiftlerinden farklı frekanslarda empedans ve faz açısı parametreleri ölçülmüştür. Cihazın frekans aralığı 200 Hz’den 10kHz’e kadar olacak şekilde ayarlanarak direnç, reaktans ve empedans değerleri incelenmiştir. Şekil 4.5a’da frekansın artışının dirençte bir azalmayla sonuçlandığı görülmektedir. Denklem 4.1’de ifade edilen Jonscher’in güç yasası, AC iletkenlik (σ_{ac}) ve frekans (f) arasındaki ilişkiyi ifade eder ve meydana gelen bu değişimin sebebini açıklar.

$$\sigma_{ac} = \sigma_{dc} + A(2\pi f)^n \quad (4.1)$$

Burada, σ_{dc} DC iletkenliği; A ön üstel faktörü ve n ($0 < n < 1$) kesirli üstü temsil eder. Eşitliğe göre frekansı artırmak, iletkenliği artırmaya yol açar. İletkenlik ve öz direnç arasındaki ilişki göz önüne alınırsa ($\sigma = 1/\rho$), frekansın artması ile artan iletkenlik, direncin azalmasına sebep olur. Şekil 4.5b ise, reaktansın artan frekansa karşı değişimini göstermektedir. Frekans yaklaşık 8 kHz’e kadar yükseldikçe reaktansın büyüklüğü azalır, bu da sensörün kapasitif özelliğinin artan frekanslarda azaldığını gösterir.



Şekil 4.5 Dokusal sensörün empedans özellikleri. (a) direnç–frekans (b) reaktans–frekans ve (c) empedans–frekans grafikleri

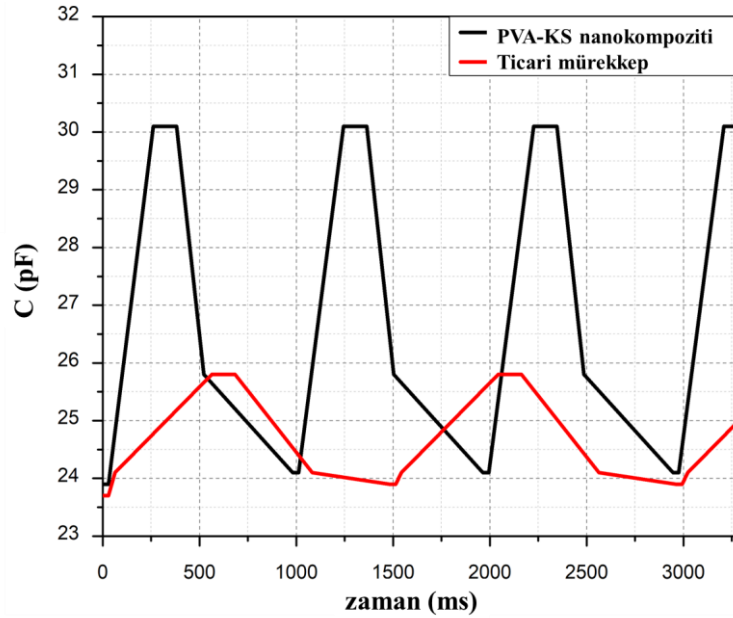
Denklem 4.2’de frekansa ve kapasitansa bağlı olarak ifade edilen kapasitif reaktans (X_c), uygulanan basıncın sabit tutulması koşulunda alınmıştır. Böylece, kapasitif reaktansın değişimini sadece değişen frekansa göre belirlemek mümkün olmuştur. Kapasitif reaktansın daha yüksek frekanslarda azaldığı ve sensörün yaklaşık 8 kHz’ten sonra endüktif bir özellik gösterdiği görülmektedir. Bu da faz açısının yükselmesi anlamına gelir.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4.2)$$

Artan frekans, empedansın da değişmesine sebep olur ve bu değişim Şekil 4.5c’de verilmiştir. Direncin artan frekansa karşı gösterdiği değişime benzer olarak, empedans da bir azalma eğilimi gösterir. Ayrıca, empedansın yüksek frekanslarda direnç değerine yaklaştığı görülmektedir.

4.1.2.3. Dokunsal Sensörlerin Tepki ve Toparlanma Süreleri

Dokunsal sensörlerin dinamik cevabını değerlendirmek için kullanılan parametrelerden olan tepki süresi, genellikle sensörün maksimum çıkış değerinin %90'ına ulaşmasına kadar geçen süre olarak tanımlanır. Toparlanma süresi ise sensörün maksimum çıkış değerinden minimum çıkış değerinin %10'una düşmesi için gerekli süredir [83]. Nanokompozit tabanlı ve ticari mürekkep tabanlı dokunsal sensörler 100 kPa'lık bir basıncın uygulanması ve basıncın kaldırılması koşulları uygulanarak test edilmiştir. Şekil 4.6 kapasitansta meydana gelen değişimi zamana bağlı olarak göstermektedir. Sonuçlar, PVA-CB nanokompozitinin tepki süresinin yaklaşık 230 ms; ticari mürekkep tabanlı dokunsal sensörün ise 530 ms olduğunu göstermektedir. Ayrıca, nanokompozit tabanlı sensörün toparlanma süresi yaklaşık 600 ms iken, ticari mürekkep tabanlı sensörün ise 1 s'ye yakındır. Sensörlerin toparlanma sürelerinin daha uzun olmasının nedeni, basınç uygulandıktan sonra mürekkep yapısında nano düzeyde değişimler meydana gelmesi ve kâğıt-mürekkep etkileşimine bağlanabilir. Nanokompozit tabanlı sensör özelinde, dolgu maddeleri ile polimer matrisleri arasındaki sürtünme kuvveti de toparlanma süresinin artmasına neden olur [175]. Ayrıca, ölçümler alınırken ölçüm cihazlarının neden olduğu enstrümantal gecikmeler de göz önünde bulundurulmalıdır.

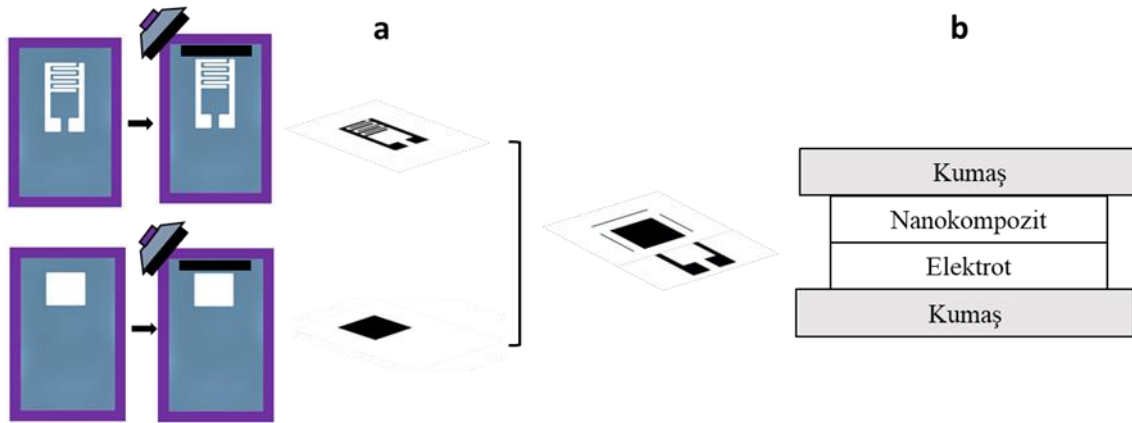


Şekil 4.6 Belirli bir basınç uygulandığı durumda kapasitanstın zamanla değişimi

4.2. Sensör Tasarımı – 2

4.2.1. PVA–fCNT, PVA–GnP ve PVA–Ag NP Nanokompozitleri ile Dokunsal Sensörlerin Üretimi

Şekil 4.7’de tasarımı verilen sensör, iletken elektrot ve aktif tabakalardan oluşan çift katlı bir sensördür. Elektrot tabakası şekilde görüldüğü gibi birbiri içine geçmiş iletken yollardan oluşmaktadır. Her iki tabaka da pamuk kumaş üzerinde serigrafî yöntemiyle üretilmiş ve baskı olan yüzeyler birbirine bakacak şekilde bir araya getirilmiştir. Nihai sensörün yanal kesit alanından alınacak bir görüntüde tabakaların yapısı Şekil 4.7b’deki gibi olacaktır. Bu tasarımla üretilen sensörlerin elektrot tabakalarında ticari karbon bazlı iletken bir mürekkep (Bare Conductive) kullanılmıştır. Aktif tabaka ise 1 cm x 1 cm boyutlarında kare şeklinde olacak biçimde nanokompozitler kullanılarak kumaş üzerinde üretilmiştir. Sensörün uzantısında yer alan pedler de ölçüm amaçlı kullanılmıştır.

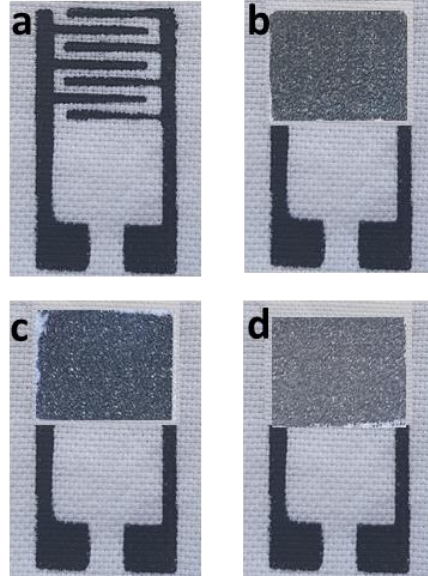


Şekil 4.7 (a) Aktif ve elektrot katmanların üretiminin şematik gösterimi (b) Bir araya getirilen elektrot ve aktif tabakaların şematik yanal kesit alanı görüntüsü

Sensör, elektrot ve aktif tabaka arasındaki temas alanının değişimine dayalı olarak bir algılama gerçekleştirmektedir. Sensör üzerinde herhangi bir basınç olmadığında, elektrot ve aktif katman arasındaki temas çok azdır ve tabakaların birbirine temasından kaynaklı oluşabilecek iletken yollar oluşmadığı için okunan empedans değeri oldukça büyüktür. Uygulanan basınç değeri artırıldıkça elektrotun iç içe geçmiş parmakları arasında bağlantılar oluşarak iletkenlik artmakta ve empedans değeri düşmektedir.

Her iki tabakanın üretimi için kullanılan metot olan serigrafî işlemi için Kısım 4.1’de anlatılan yöntemler takip edilmiştir [23].

Şekil 4.8 sırayla elektrot tabakasını, PVA-fCNT, PVA-GnP ve PVA-Ag NP nanokompozit tabanlı dokunsal sensörleri göstermektedir.



Şekil 4.8 (a) Üretilen elektrot tabakası. Üretilen nanokompozit tabanlı sensörler (b) PVA-fCNT (c) PVA-GnP (d) PVA-Ag NP

4.2.2. Elektromekanik Ölçüm Sonuçları

4.2.2.1. Dokunsal Sensörlerin Piezoempedans Özellikleri

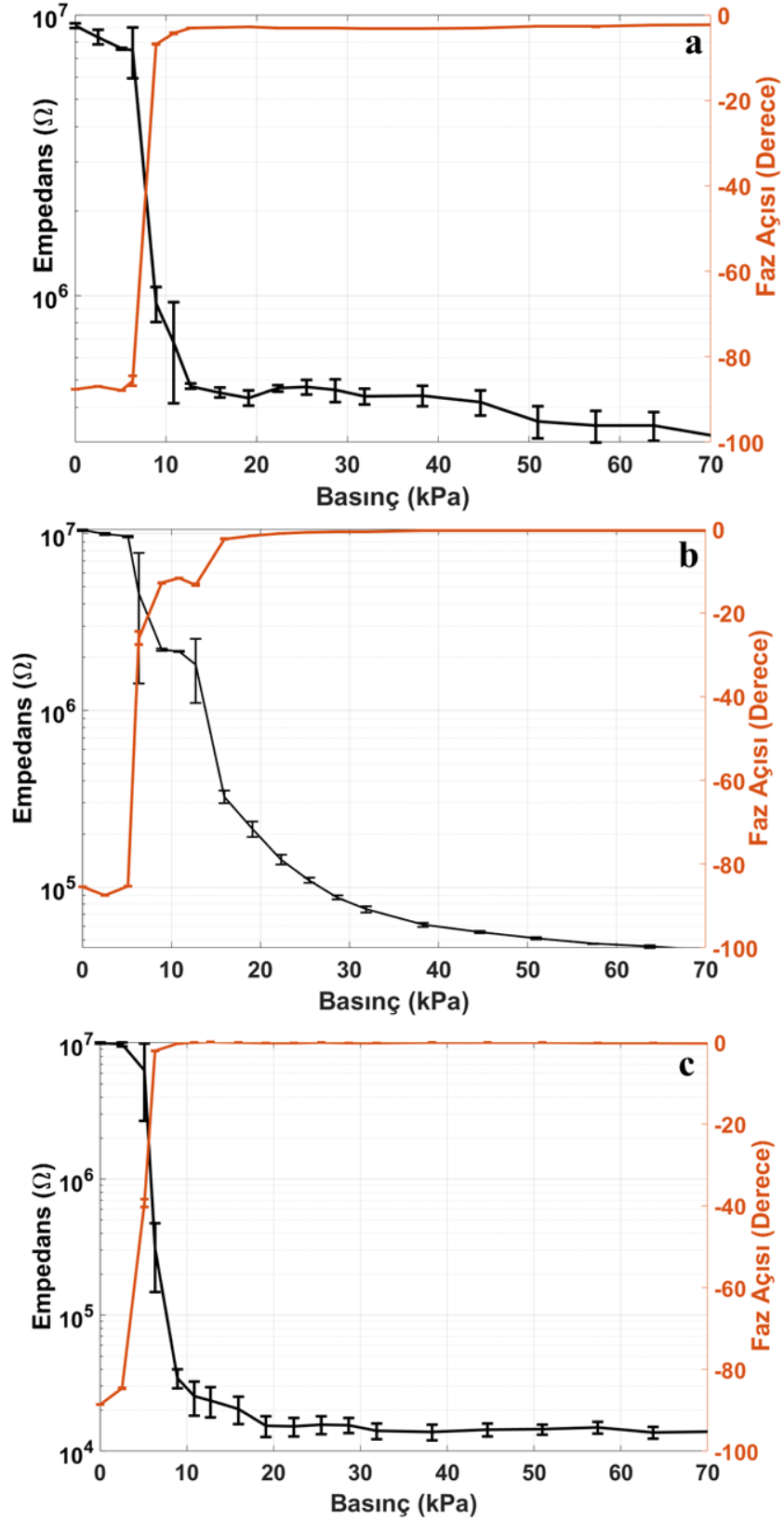
Dokunsal sensörlerin performans değerlendirmesinde incelenen parametrelerden biri uygulanan çeşitli basınç değerlerine karşı empedans değerlerinde meydana gelen değişimdir. Bu özellik incelenirken Kısım 4.1’de kullanılan otomatik kuvvet uygulayıcı sistem kullanılmıştır. Üretilen sensörler, yapısı gereği rezistif ve kapasitif özellikleri bir arada barındırdığı için ölçümler alınırken sadece rezistif ya da sadece kapasitif özellikler yerine empedans değerleri incelenmiştir. Şekil 4.9, uygulanan farklı basınç değerleri için sensörlerin empedansında ve faz açısında meydana gelen değişimleri göstermektedir. Ölçümler LCR metre ile (Keysight U1733C) 1 kHz’de alınmıştır. Alınan ölçümler art arda üç kez tekrar edilmiş ve empedans ve faz açısının standart hataları hesaplanarak hata çubukları olarak çizilmiştir. Şekil 4.9a üzerinden PVA-fCNT tabanlı sensörün hassasiyeti belirlenecek olursa, 0–10 kPa aralığında sensörün uygulanan basınca daha belirgin bir cevap verdiği görülmektedir. Bu nedenle sensörün hassasiyeti 0–10 kPa ve 10–70 kPa aralıkları için ayrı ayrı ayrı belirlenebilir. Denklem 4.3 ile verilen eşitlik, bir sensörün hassasiyetini (S) hesaplamak için kullanılır.

$$S = \frac{\Delta Z}{\Delta P} \quad (4.3)$$

Bu formülde, ΔZ başlangıçtaki ve son durumdaki empedans değerleri arasındaki farkı belirtirken; ΔP uygulanan basınç aralığını temsil eder.

Grafikteki verilerden hassasiyetin bu bölgeler için sırayla 0.846 ve $6.47 \times 10^{-3} \text{ M}\Omega \cdot \text{kPa}^{-1}$ olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca faz açısı, sensör üzerine uygulanan bir basınç olmadığında sensörün kapasitif olduğunu göstermektedir. Basınç arttıkça ise, faz açısı sıfıra yaklaşmakta ve sensör rezistif bir özellik sergilemektedir. Bu sebeple, sensörün sadece faz açısındaki değişimle bile dokunsal algılamayı gerçekleştirebileceği söylenebilir.

Şekil 4.9b, PVA–GnP nanokompozit tabanlı sensörün basınç tepkisini göstermektedir. Bu sensörün algılama aralığının PVA–fCNT tabanlı sensöre göre daha geniş olduğu ve 0–30 kPa ile 30–70 kPa aralıklarında algılama gerçekleştirdiği söylenebilir. Her iki aralık için hassasiyet değerleri incelenecek olursa, sırayla 0.8015 ve 0.032 $\text{M}\Omega \cdot \text{kPa}^{-1}$ olarak bulunur. PVA–fCNT tabanlı sensöre benzer olarak faz açısı herhangi bir basınç uygulanmadığı durumda negatiftir ve sensörün kapasitif olduğunu gösterir. Basınç arttıkça ise faz açısı sıfıra yaklaşır, bu da sensörün rezistif bir özellik kazandığının göstergesidir. Son olarak Şekil 4.9c ise PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı dokunsal sensörün uygulanan basınca karşı empedans tepkisini göstermektedir. 0–10 kPa aralığında empedansta keskin bir düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Empedansta böyle bir azalma, 10 kPa'ya kadar uygulanan basıncın sonucunda birçok iletim yolunun oluştuğunu gösterir. Bu nedenle, basınç 10 kPa'nın üzerinde yükseltildikçe empedansın azalması yavaşlar. Sensörün 0–10 kPa aralığında hassasiyeti 1 $\text{M}\Omega \cdot \text{kPa}^{-1}$; 10–70 kPa aralığında ise $3.83 \times 10^{-6} \text{ M}\Omega \cdot \text{kPa}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Faz açısı ise artan basınç durumunda PVA–fCNT ve PVA–GnP nanokompozit tabanlı sensörlere benzer bir eğilim gösterir.



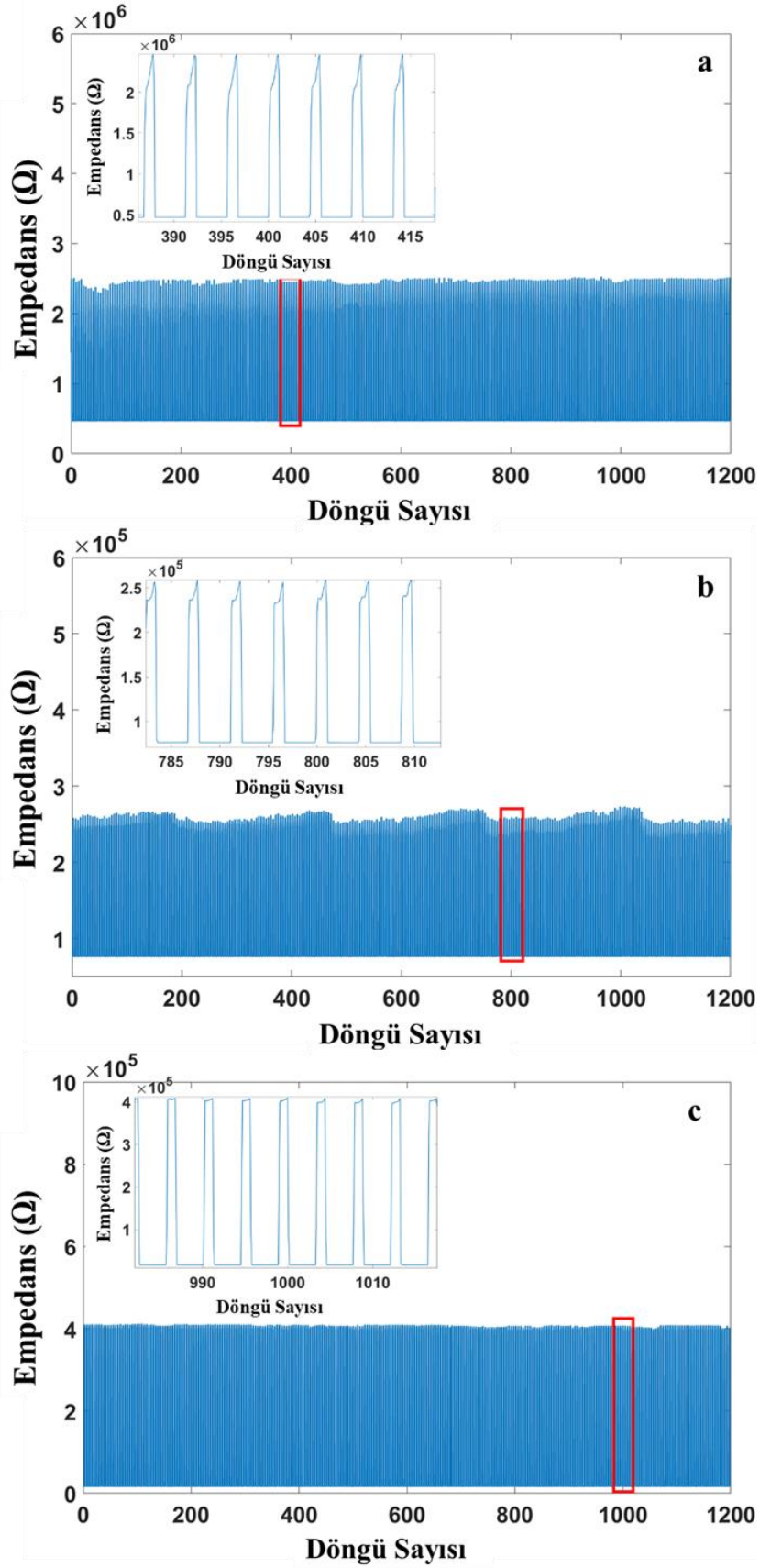
Şekil 4.9 Nanokompozit tabanlı sensörlerin empedanslarının ve faz açılarının basınçla değişimi (a) PVA-fCNT (b) PVA-GnP (c) PVA-Ag NP

4.2.2.2. Dokunsal Sensörlerin Tekrarlanabilirlik Özellikleri ve Tepki-Toparlanma Süreleri

Dokunsal sensörlerin dayanıklılığını ölçmenin bir yolu, sensöre kuvvet uygulama ve uygulanan kuvveti kaldırma şeklinde oluşturulan döngünün belirli bir süre devam ettirilmesidir. Bunun için bir önceki kısımda kullanılan otomatik kuvvet uygulayıcı sisteme benzer bir sistem kullanılmıştır. Şekil 4.10a'da elde edilen veri, PVA-fCNT nanokompozit tabanlı sensöre belirli aralıklarla 30 kPa'lık basıncın uygulanması-basıncın kaldırılması ile elde edilmiştir (Analog Discovery 2, Digilent).

Şekil 4.10a'dan görüleceği üzere, ihmal edilebilir düzeyde bir dalgalanmayla birlikte sensör 1200 döngü boyunca oldukça tutarlı bir çıkışa sahiptir. Aynı grafikte ekli olarak verilen küçük grafik ise çıkış sinyallerini daha yakından inceleme fırsatı vermektedir. Bu grafik sensörün tepki ve toparlanma sürelerini belirlemek için de kullanılabilir. Tepki süresi sensörün çıkışının maksimum değerinin %90'ına ulaştığı zaman olarak tanımlanırken; toparlanma süresi ise sensörün minimum değerinin %10'una düştüğü noktadır. Bu bilgiler doğrultusunda PVA-fCNT nanokompozit tabanlı sensörün tepki ve toparlanma süreleri sırasıyla 148 ms ve 140 ms olarak bulunmuştur. Benzer testler PVA-GnP ve PVA-Ag NP nanokompozit tabanlı sensörler için de gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10b, PVA-GnP tabanlı sensör için gerçekleştirilen dayanıklılık testini göstermektedir. Çıkış sinyalinde gözlemlenen empedans değeri az miktarda zayıflamaya uğrasa da 1200 döngü boyunca çıkış sinyalinin neredeyse sabit kaldığı çıkarımı yapılabilir. Ekli grafikteki değerler kullanılarak tepki ve toparlanma süreleri ise sırayla 164 ms ve 230 ms olarak hesaplanmıştır. Son olarak Şekil 4.10c PVA-Ag NP nanokompozit tabanlı sensör için dayanıklılık testini göstermektedir. Önceki iki nanokompozit tabanlı sensöre göre PVA-Ag NP nanokompozit tabanlı sensörün oldukça tutarlı bir çıkış sinyaline sahip olduğu görülmektedir. Tepki ve toparlanma süreleri ise 158 ms ve 164 ms olarak bulunmuştur.

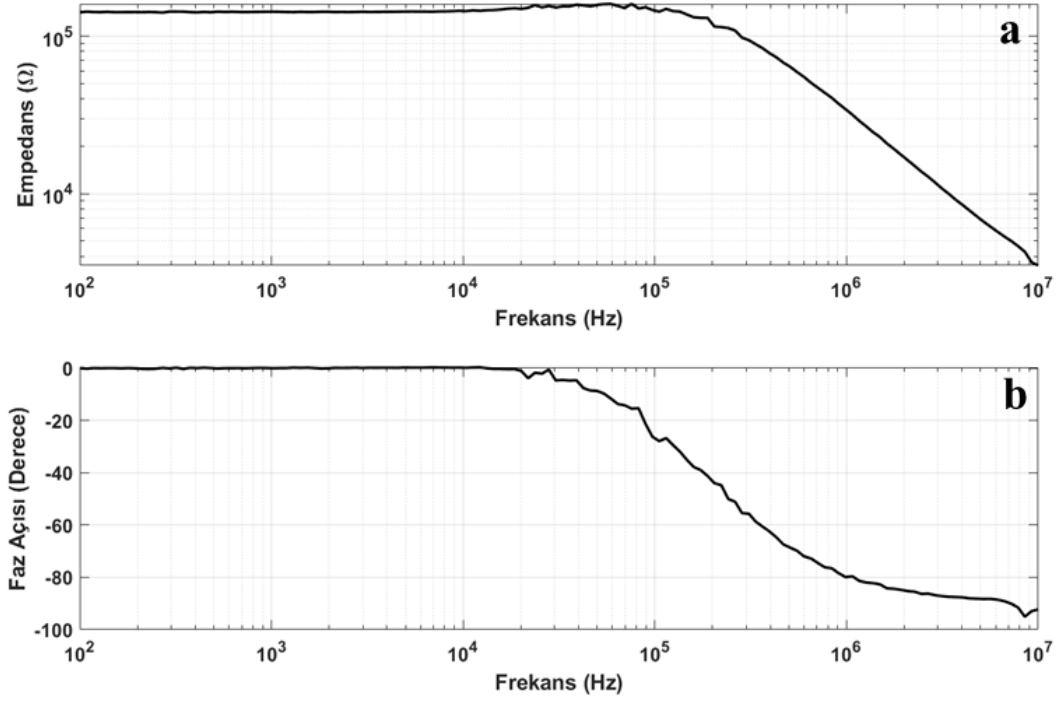
PVA-fCNT, PVA-GnP ve PVA-Ag NP nanokompozit tabanlı sensörler karşılaştırıldığında, en hassas sensörün PVA-Ag NP tabanlı sensör olduğu görülür. Sensörlerin tümü en az 1200 döngü boyunca kararlı ve dayanıklı bir yanıtı sahip olsa da PVA-Ag NP tabanlı sensör nispeten daha karardır. En düşük tepki ve toparlanma süresine sahip sensör ise PVA-fCNT nanokompozit tabanlı sensördür.



Şekil 4.10 Nanokompozit tabanlı sensörlerin dayanıklılık testleri (a) PVA-fCNT (b) PVA-GnP (c) PVA-Ag NP

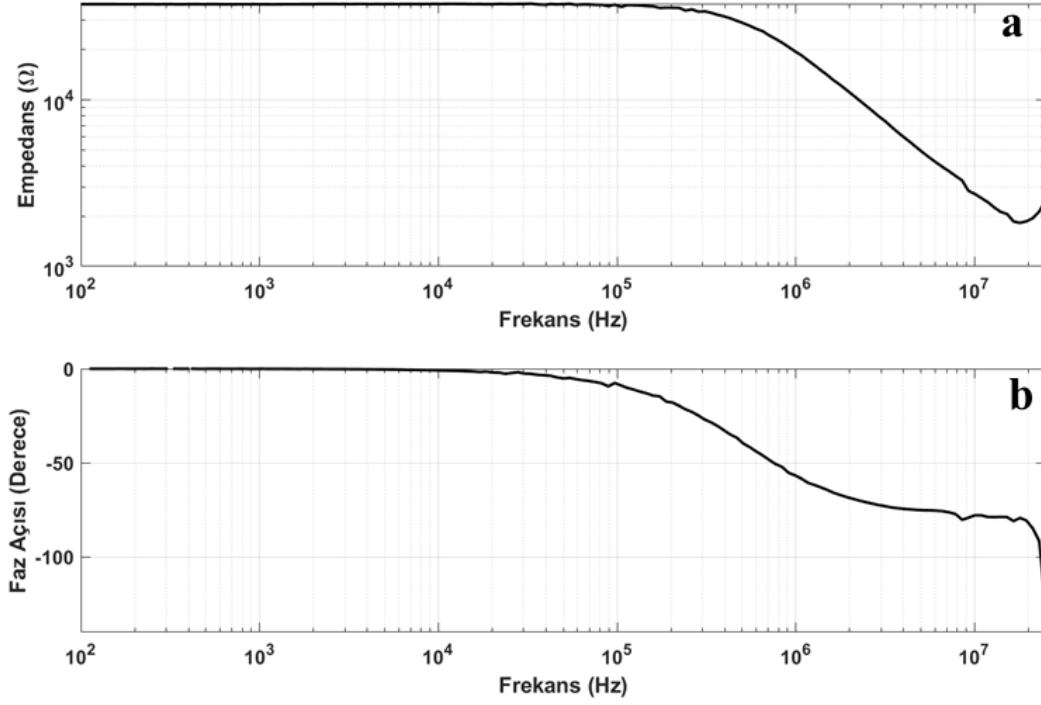
4.2.2.3. Dokunsal Sensörlerin Frekans Cevabı Özellikleri

PVA-fCNT, PVA-GnP ve PVA-Ag NP nanokompozit tabanlı dokunsal sensörlerin frekans tepkileri 100 Hz ile 25 MHz aralığında bir empedans analizörü (Analog Discovery 2, Digilent) ile incelenmiştir. İnceleme, sensörlere 30 kPa büyüklüğünde bir basınç uygulandığı durumda gerçekleştirilmiş ve empedans ve faz açısı değişimleri elde edilmiştir.



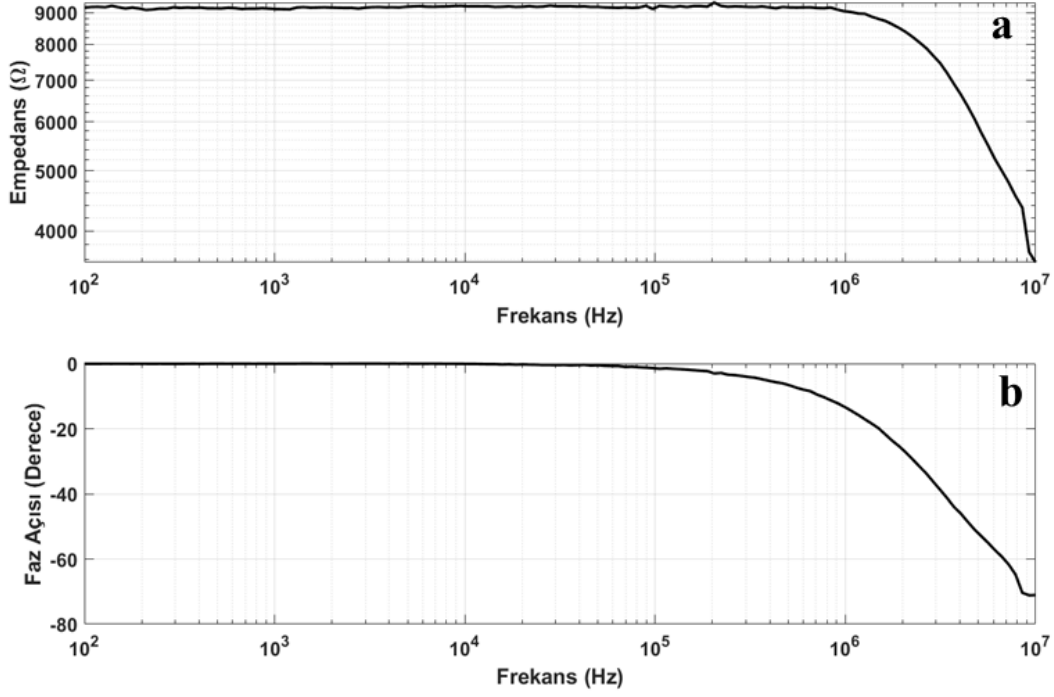
Şekil 4.11 PVA-fCNT nanokompozit tabanlı sensörün 30 kPa basınç altında (a) empedans ve (b) faz açısının frekansa karşı değişimi

Şekil 4.11a'da PVA-fCNT tabanlı sensörün frekansa karşılık gelen empedans değişimi görülmektedir. Empedansın 100 kHz'den sonra düşmeye başladığı görülmektedir; Şekil 4.11b'de yaklaşık 80 kHz'den sonra faz açısının negatif yönde arttığı görülmektedir. Bu ise sensörün kapasitif özellik kazanmaya başladığını göstermektedir. Sensörün çalışma mekanizmasının frekansa bağlı olduğu şeklinde yorumlanabilecek bu durum, sensörün farklı frekans aralıklarında farklı algılama mekanizmalarıyla çalışmasını mümkün kılabilir.



Şekil 4.12 PVA–GnP nanokompozit tabanlı sensörün 30 kPa basınç altında (a) empedans ve (b) faz açısının frekansa karşı değişimi

Şekil 4.12a ise PVA–GnP nanokompozit tabanlı dokunsal sensörün frekansa karşı empedans değişimini göstermektedir. PVA–fCNT ve PVA–GnP nanokompozitlerinde dolgu maddesi olarak kullanılan malzemelerin ikisi de karbon bazlı olduğu için frekans cevaplarının benzer olduğu görülmektedir. PVA–fCNT nanokompozit tabanlı dokunsal sensörden farklı olarak PVA–GnP nanokompozit tabanlı dokunsal sensörün faz açısı 10 MHz’den sonra hızla düşmüştür. Bu durum yüksek frekanslarda kapasitif özelliğinin hızla arttığı şeklinde yorumlanabilir. Şekil 4.13 ise, PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı dokunsal sensörün frekans yanıtına aittir. Bahsedildiği gibi frekans yanıtları sensörlere 30 kPa büyüklüğünde basınç uygulandığı durumda elde edilmiştir. Şekil 4.13a’da görülen empedansa karşılık frekans grafiğinde empedansın önceki iki sensöre göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı dokunsal sensöre uygulanan basınç miktarının çok fazla iletken yol oluşmasını sağlayarak empedansın düşük değerlerde olmasıyla sonuçlanmıştır. Şekil 4.13a’da görüldüğü gibi, PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı dokunsal sensörün empedans değeri 1MHz’den sonra azalmaya başlamıştır. Faz açısı ise 100 kHz’den sonra düşmeye başlayarak kapasitif algılama özelliği kazanmıştır.

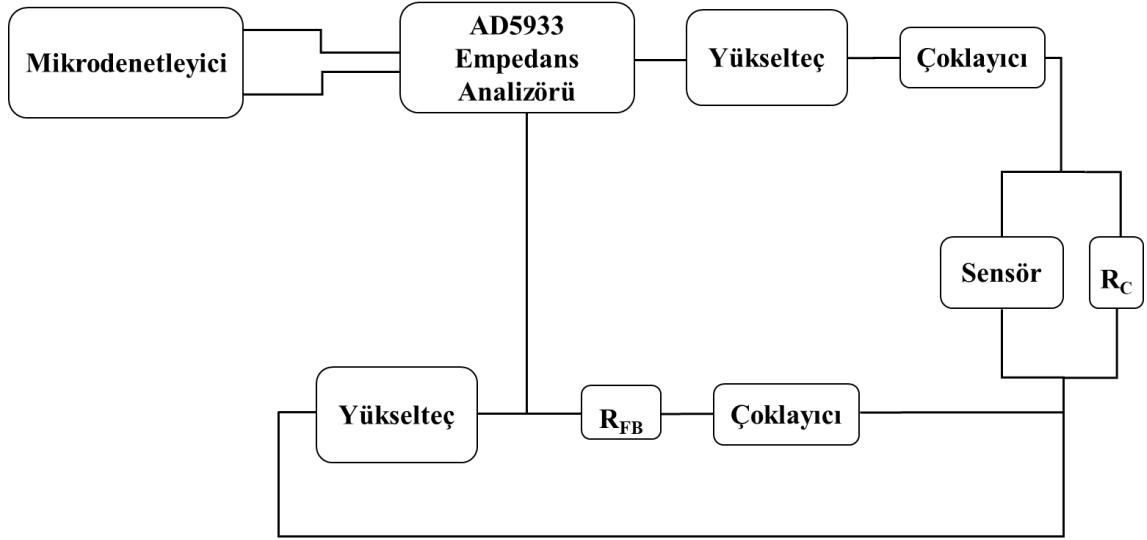


Şekil 4.13 PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı sensörün 30 kPa basınç altında (a) empedans ve (b) faz açısının frekansa karşı değişimi

Artan frekansa karşı PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı dokunsal sensörün daha kararlı bir tepki verdiği ve empedans ile faz açılarındaki değişimin daha yüksek frekanslarda gerçekleştiği söylenebilir. Kullanım amacına ve uygulamaya bağlı olarak bu özelliğin önem taşıyacağı durumlar söz konusu olabilir.

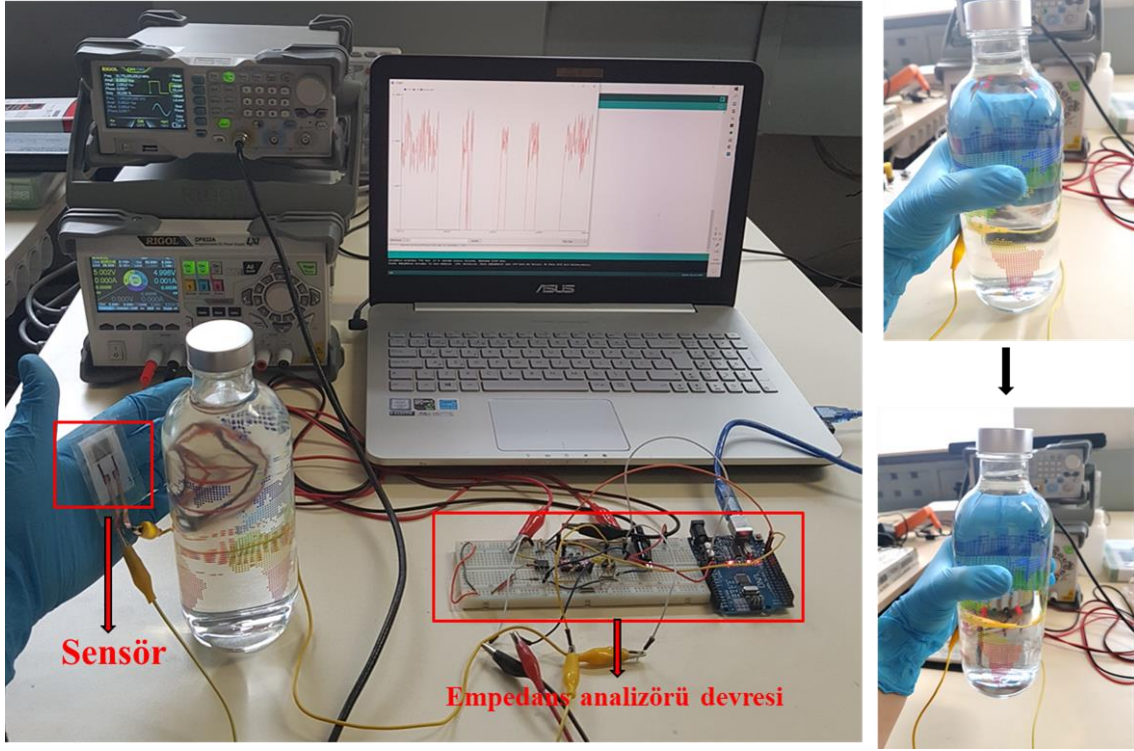
4.2.2.4. Polivinil Alkol (PVA) – Gümüş Nanoparçacık (Ag NP) Nanokompozit Tabanlı Dokunsal Sensörün Uygulamada Kullanımı

PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı sensör, elektromekanik test sonuçlarına göre polimer olarak PVAnın kullanıldığı nanokompozitler içinde en yüksek hassasiyete sahip sensör olması dolayısıyla ($1 \text{ M}\Omega \cdot \text{kPa}^{-1}$, 0–10 kPa aralığında) planlanan uygulama için kullanılmıştır. Uygulama, sensörün bir eldiven üzerine monte edilerek dolu bir şişeyi tutmak, bir miktar yukarı kaldırmak ve sonra da eski konumuna tekrar indirmek adımlarından oluşmaktadır. Ölçümlerin alındığı empedans analizör devresi, Şekil 4.14’te blok şeması olarak verilmiştir. Devrede yer alan AD5933 entegresi 12 bitlik ve 1 Hz–100 kHz aralığında ölçüm yapma imkanı sağlayan programlanabilir bir empedans dönüştürücüdür [176].

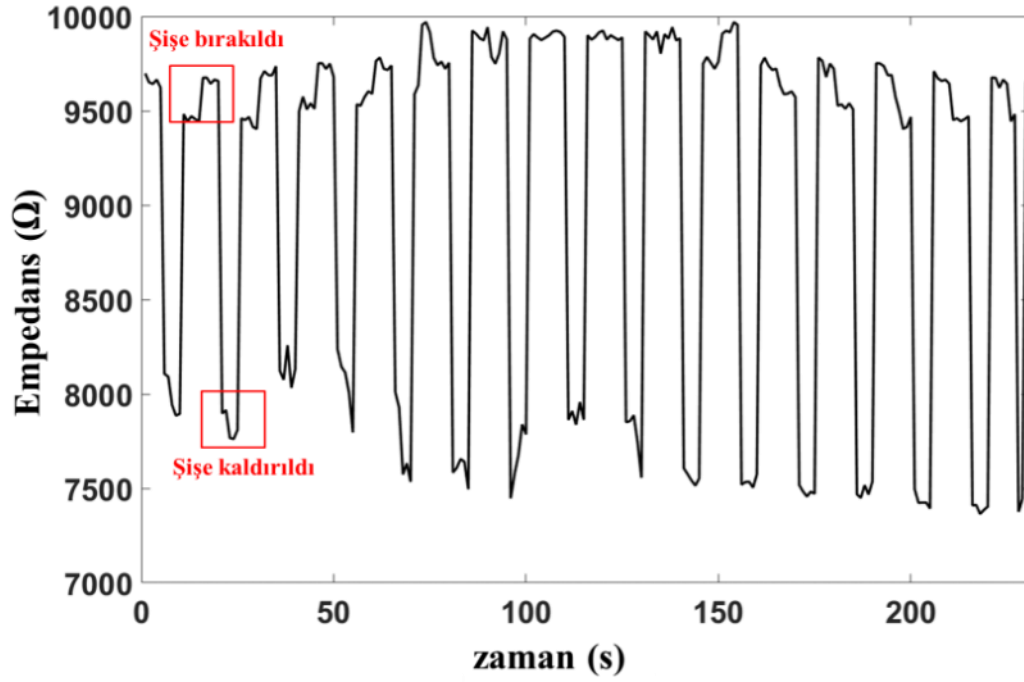


Şekil 4.14 Empedans analizörü kullanılarak oluşturulan devrenin blok şeması

Şekil 4.15'te ise deney platformu gösterilmiştir. PVA–Ag NP nanokompozit tabanlı sensörün elektromekanik testlerinden bilindiği üzere, uygulanan kuvvet arttıkça elektrot ve aktif tabaka arasındaki temas alanı artmakta ve oluşan iletken yollar empedansın düşmesine neden olmaktadır. Bu sebeple, dolu şişe sensörle temas edecek şekilde tutulduğunda ve bir miktar kaldırıldığında her adımda uygulanan kuvvet arttığı için empedansın da giderek düşmesi beklenmektedir. Aynı sebeple, şişe bırakıldığında ise sensöre uygulanan kuvvetin azalması nedeniyle empedansın da artması olasıdır. Şekil 4.16 ile verilen grafik, bahsedilen aşamalar gerçekleştirilerek elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.15 Dokunsal sensör ölçümlerinin bir empedans analizör devresi üzerinden alınmasıyla gerçekleştirilen uygulama

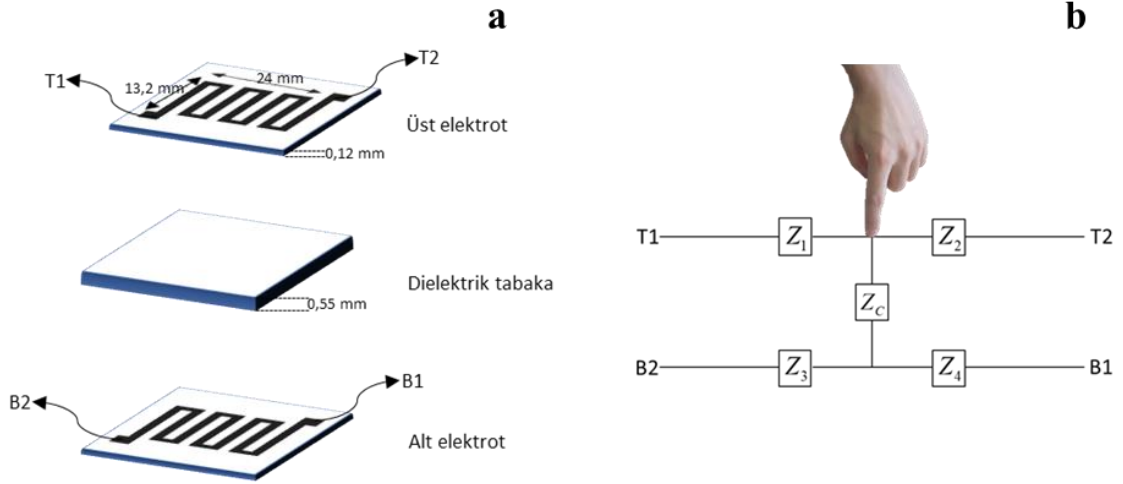


Şekil 4.16 Şişenin kaldırılması ve bırakılması adımlarının ardışık olarak tekrarlanmasına göre empedansın değişimi

4.3. Sensör Tasarımı – 3

4.3.1. SA–CB Nanokompoziti ile Dokunsal Sensör Üretimi

Şekil 4.17a’da tasarımı verilen sensör, üç katlı eriyik üflemlili kumaştan oluşmaktadır. Üst ve alt katmanlarda serpentin geometrisinde ve aynı boyutlarda aktif tabakalar yer almaktadır. Orta katman ise dielektrik katman işlevi görmektedir.



Şekil 4.17 (a) Sensörün üç katmanı ve (b) basınç uygulandığında sensörün elektriksel eşdeğer devresi

Şekil 4.17a’da görüldüğü gibi her aktif katmanda iki ölçüm noktası belirlenmiş ve $T1$ (Üst 1), $T2$ (Üst 2), $B1$ (Alt 1) ve $B2$ (Alt 2) olarak isimlendirilmiştir. Sensör üzerinde dokunulan yeri ve uygulanan kuvvetin büyüklüğünü belirlemek için ölçüm noktalarının ikili kombinasyonlarından elde edilen sonuçların kullanılması amaçlanmıştır. Sensörün her katmanı Şekil 4.17a’da şematik olarak detaylandırılmıştır. Katmanların oluşturduğu sensör yapısının eşdeğer devre modeli ise, karşılık gelen ölçüm noktalarıyla birlikte Şekil 4.17b’de gösterilmektedir. Sensörün aktif katmanları, SA–CB nanokompozitinden üretilmiştir. Nanokompozitteki dolgu maddesinden dolayı yapının direncine ek olarak kapasitif bileşenler de mevcuttur. Aradaki dielektrik katman da havanın dielektrik sabitine katkı sağlayarak kapasitansı artırmaktadır. Bu sebeple Şekil 4.17b’de bu değerler empedans (Z) ile ifade edilmiştir. Ayrıca yalnızca kapasitans veya yalnızca direnç yerine empedans değerlerini kullanma fikri, okuma devresinde daha az kablolama ve daha az karmaşıklık içermesi sebebiyle de tercih edilmiştir. $T1$, $T2$, $B1$ ve $B2$ noktalarının ikili kombinasyonlarından alınan empedans ölçümleri Z_{T1T2} , Z_{T1B1} , Z_{T1B2} , Z_{T2B1} ve Z_{T2B2} olarak ifade edilmiştir.

$$Z_{T1T2} = Z_1 + Z_2 \quad (4.4)$$

$$Z_{T1B1} = Z_1 + Z_4 + Z_C \quad (4.5)$$

$$Z_{T2B2} = Z_2 + Z_3 + Z_C \quad (4.6)$$

$$Z_{T2B1} = Z_2 + Z_4 + Z_C \quad (4.7)$$

$$Z_{T1B2} = Z_1 + Z_3 + Z_C \quad (4.8)$$

$$Z_{B1B2} = Z_3 + Z_4 \quad (4.9)$$

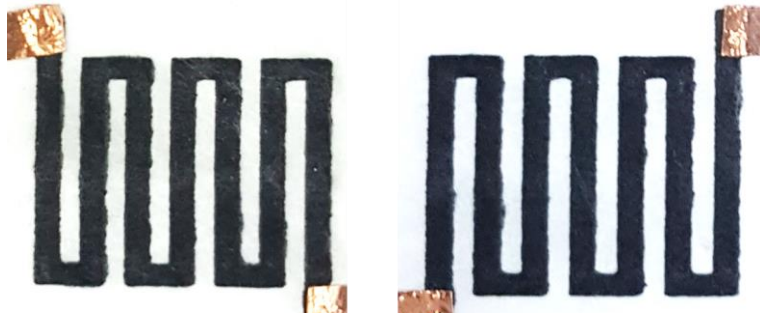
$$Z_C = \frac{Z_{T1B1} + Z_{T2B2} - (Z_{T1T2} + Z_{B1B2})}{2} = R_C - jX_C \quad (4.10)$$

$$R_C = Z_C \cos \theta_C \quad (4.11)$$

$$X_C = Z_C \sin \theta_C \quad C_C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{A\epsilon}{d} \quad (4.12)$$

Şekil 4.17b'ye göre ölçüm noktalarından ikili kombinasyonlar şeklinde alınacak ölçümlerde beklenen empedans değerleri Denklemler (4.4)–(4.10)'da ifade edilmiştir. Elektrotlar arasında oluşan empedans Denklem 4.10 ile ifade edilirken; bu empedans ifadesi kullanılarak türetilen direnç ve reaktans ifadeleri ise Denklem 4.11 ve 4.12'de verilmiştir. Sensör üzerine basınç uygulandığında, CB nanoparçacıkları ile kumaş arasındaki etkileşimden dolayı Z_C 'nin kapasitans bileşeni değişir. Uygulanan kuvvet arttıkça kumaşın lifli yapısından dolayı kumaşın kalınlığı azalır ve CB nanoparçacıkları birbirine yaklaşır. Başka bir deyişle, liflere yayılan nanokompozit içindeki nanoparçacıkların hareketi genel iletkenliği değiştirir.

Aktif katmanlar serigrafi yöntemiyle SA–CB nanokompoziti kullanılarak üretildikten sonra CB parçacıklarının birbirine yapışma oranını artırmak için serpentin yapılar 80 °C'de 10 dk. süreyle ısı üfleyiciye maruz bırakılmıştır. Üretilen sensör katmanları Şekil 4.18'de görülmektedir.

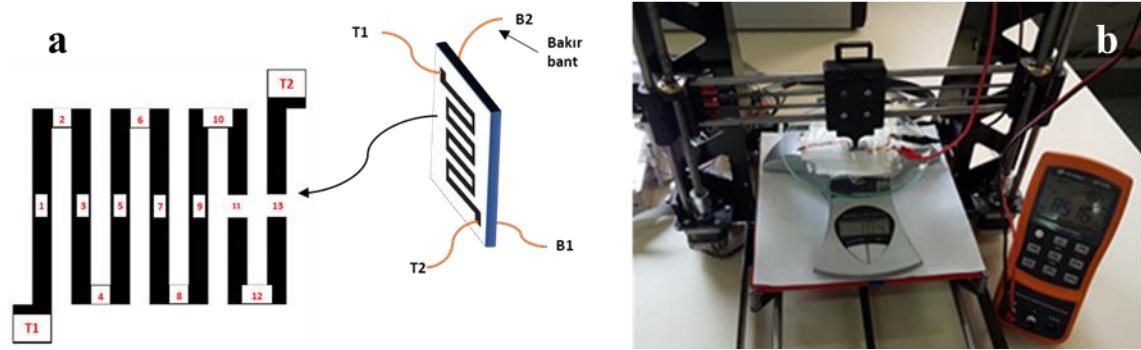


Şekil 4.18 Sensörün üst ve alt aktif tabakaları

Üst ve alt tabakaların aynı eriyik üfleme kumaş üzerinde üretiminden sonra, baskılı yüzler dış tarafa bakacak şekilde ve geometriler üst üste gelecek şekilde katlanmıştır. Ölçüm alabilmek için bakır bant her bir elektrot üzerindeki iki ölçüm noktasına yapıştırılarak iletken problar sağlamak için kullanılmıştır ve dielektrik katman olarak da geometrilerin boyutunda kumaş aktif tabakaların arasına yerleştirilmiştir. Son olarak, sensör koruma amaçlı PETG ile kaplanmıştır.

4.3.2. Elektromekanik Ölçüm Sonuçları

Üretilen sensöre farklı büyüklüklerde basınçlar uygulanarak sensör çeşitli kriterler açısından test edilmiştir. Testler için önceki kısımlardaki nanokompozit tabanlı sensörlerde kullanılan otomatik kuvvet uygulayıcı platform kullanılmıştır ve ölçüm sonuçları bir LCR metre (Keysight U1733C) üzerinden 1 kHz'lik frekansta alınmıştır. Sensörün çeşitli ölçüm noktalarından alınan empedans ve kapasitans değişimlerini incelemenin yanı sıra, bu sonuçlar basınç uygulanan noktayı belirlemek ve z yönünde uygulanan kuvvetin büyüklüğünü bulmak için kullanılmıştır. Şekil 4.19a'da sensörün şematik gösterimi ve basınç uygulanacak noktaların belirlenmesi amacıyla üst tabakada yapılan etiketlemeler görülmektedir. Şekil 4.19b'de ise sensörün düz bir şekilde yerleştirildiği kuvvet uygulama platformu yer almaktadır.

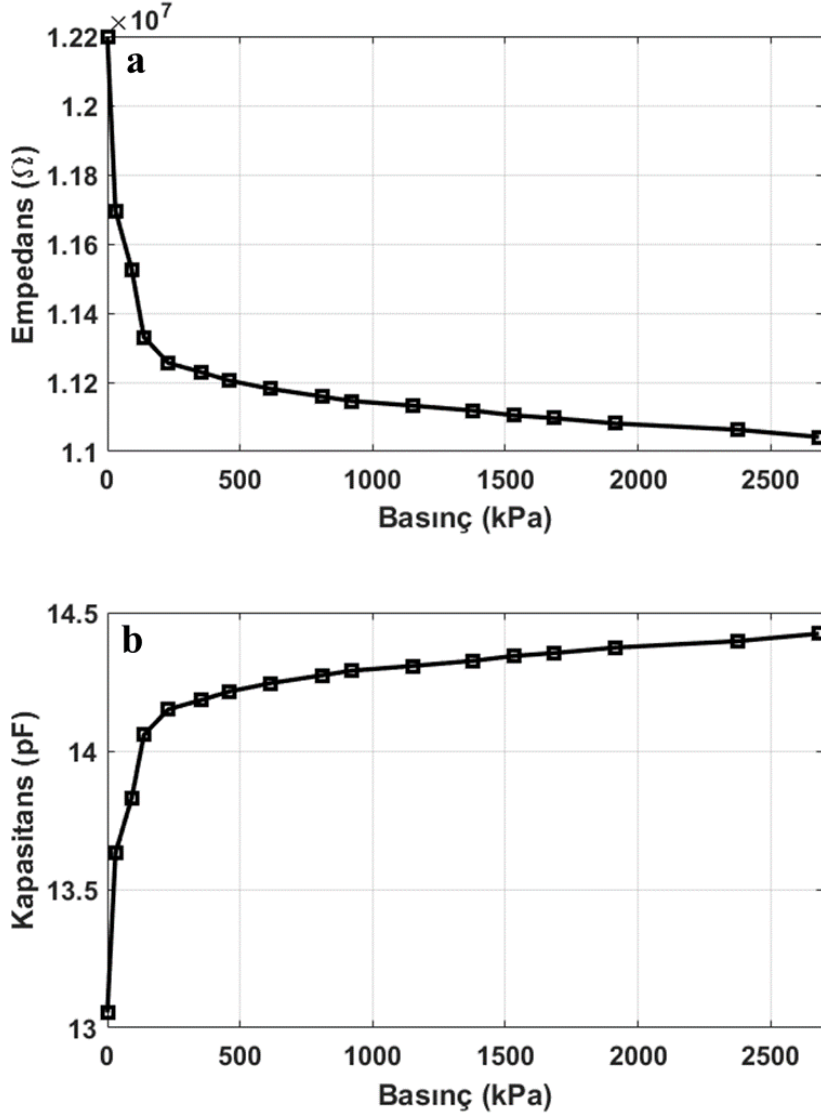


Şekil 4.19 (a) Kuvvet uygulanacak noktaları numaralandırılan sensör (b) Kuvvet uygulama ve ölçüm platformu

4.3.2.1. Dokunsal Sensörün Piezoempedans Özellikleri

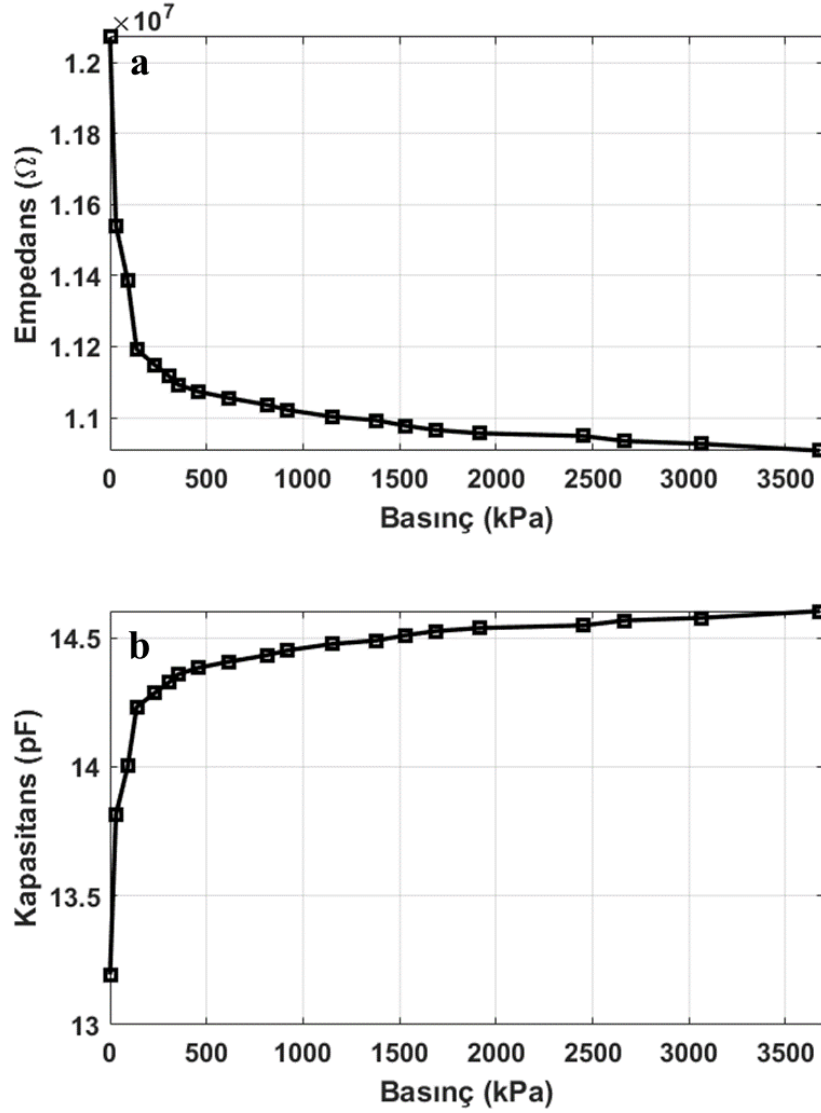
Denklem 4.10 ile ifade edilen empedans, direnç ve reaktans bileşenlerinden oluşur. Şekil 4.19a'da sensör üzerinde '5' olarak etiketlenen noktaya artan miktarlarda kuvvet uygulandığında T1–B2 ölçüm noktalarından alınan sonuçlara göre empedansta meydana gelen değişim Şekil 4.20a'da verilmiştir. Basınç arttıkça CB nanoparçacıklarının birbirine

yaklaşmasıyla direncin düştüğü söylenebilir. Aynı zamanda, artan kapasitans reaktansta da bir düşüğe sebep olur ve toplam değişim grafiğe Şekil 4.20a’daki gibi yansır. Şekil 4.20b’de ise bu empedans değerlerinden Denklem 4.12’ye göre çıkarılan kapasitans değerlerinin uygulanan kuvvete karşı değişimi görülmektedir. Beklendiği üzere artan oranlarda uygulanan kuvvet, Denklem 4.12’de kapasitans formülünde görüleceği gibi alt ve üst elektrotlar arasındaki mesafenin azalması sonucunda kapasitansın artışına sebep olmaktadır.



Şekil 4.20 ‘5’ numaralı konuma uygulanan kuvvetin (a) T1–B2 ölçüm noktalarından alınan empedansla değişimi (b) bu empedanstan elde edilen kapasitansla değişimi

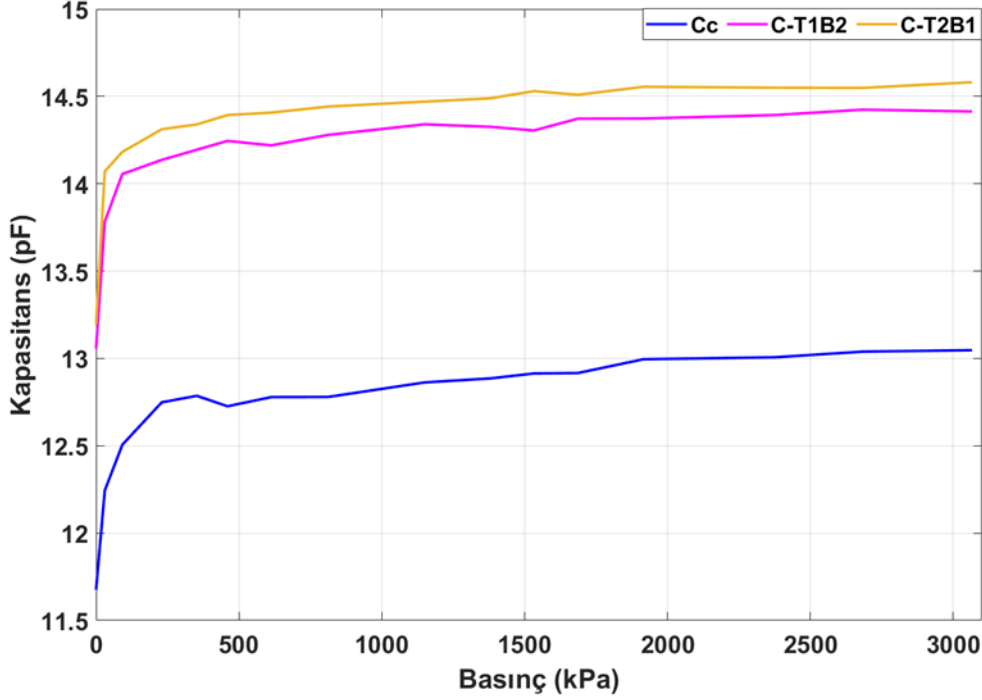
Şekil 4.21a ise ‘5’ nolu konuma kuvvet uygulandığında T2–B1 ölçüm noktalarından alınan empedans değerlerini göstermektedir. T1–B2 noktalarından alınan sonuçlara benzer olarak artan miktarlardaki kuvvete karşı empedans değerlerinin direnç ve reaktans değerlerindeki düşüşe bağlı olarak düştüğü görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.21b’de T2–B1 ölçüm noktalarındaki empedans değerlerinin kapasitans değerlerinin elde edilmesinde kullanılmasının sonucu görülmektedir.



Şekil 4.21 ‘5’ numaralı konuma uygulanan kuvvetin (a) T2–B1 ölçüm noktalarından alınan empedansla değişimi (b) bu empedanstan elde edilen kapasitansla değişimi

Farklı ölçüm noktalarından elde edilen sonuçlar, değişen miktarlarda kuvvet uygulanmasının empedansta bir değişim meydana getirmesi sebebiyle sensörün bir empedans sensörü olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Ayrıca, Denklem 4.10 ile

ifade edilen Z_c empedansının reaktansı da kullanılarak kapasitans değeri hesaplanmış ve Şekil 4.20b ve Şekil 4.21b’de ölçülen empedans değerleri kullanılarak elde edilen kapasitans değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bunun için eşitlikte belirtildiği gibi ilgili ölçüm noktalarından alınan Z_{T1T2} , Z_{T1B1} , Z_{B1B2} ve Z_{T2B2} empedans değerleri kullanılmıştır. ‘5’ nolu noktaya kuvvet uygulandığında T1–B2 ve T2–B1’den ölçülen empedans değerleri



Şekil 4.22 Çeşitli ölçüm metotlarıyla elde edilen kapasitansların uygulanan kuvvete göre değişimi

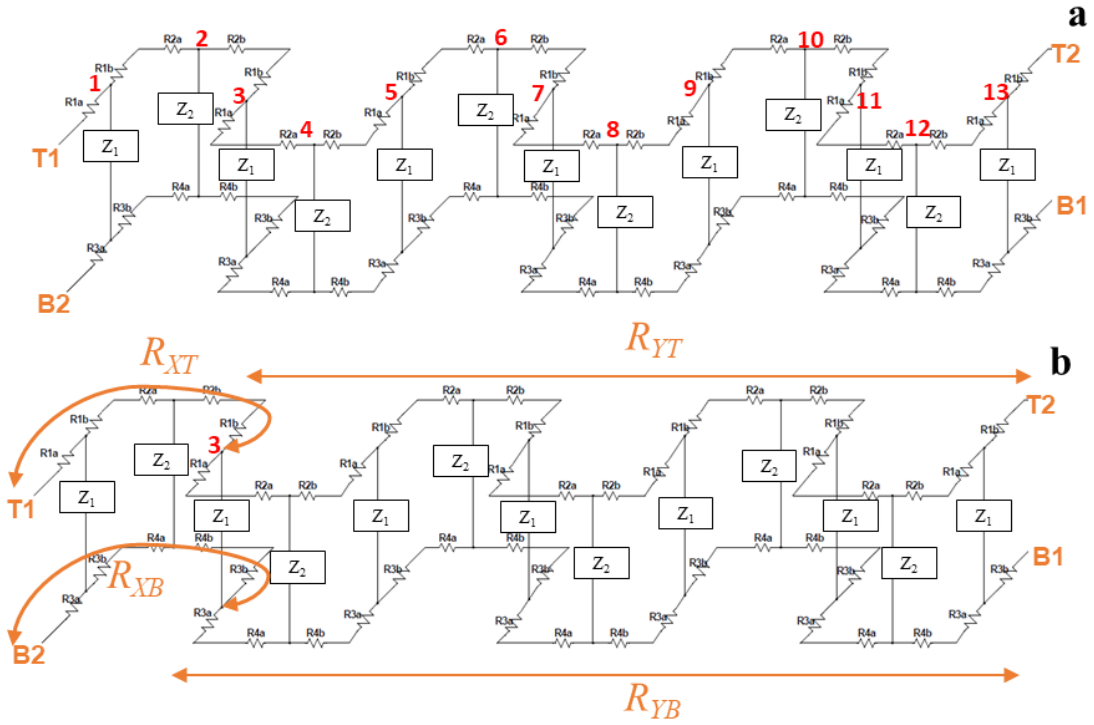
aracılığıyla elde edilen kapasitanslar karşılaştırıldığında, T2 ve B1 problemleri arasında Denklem 4.12’de A ’ya karşılık gelen alanın bir miktar daha büyük olduğu görülür. Başka bir deyişle ‘5’ nolu nokta referans alındığında, T2 ve B1 arasında üst üste gelen daha fazla iletken alan vardır. Bu sebeple T2–B1’den ölçümler sonucu çıkarılan kapasitansın, T1–B2’den büyük olması beklenir. Şekil 4.22’de bu beklentinin karşılandığı görülmektedir. Bu değerler incelenirken, ölçümde kullanılan kabloların az da olsa sahip oldukları kapasitans da göz önünde bulundurulmalıdır.

Bundan dolayı Denklem 4.10 kullanılarak hesaplanan C_c değeri önemlidir. Denklemden de görüleceği üzere, ölçülen empedans değerleri arasındaki fark alınmaktadır. Bu ise kabloların kapasitansını elimine etmeyi sağlar.

4.3.2.2. Kuvvet Uygulanan Noktanın Belirlenmesi

Dokunsal bir sensörden beklenen çıktılar arasında, sensör üzerinde dokunulan yerin konumuna dair bilgi vermesidir. Bu bilgiyi elde etmek için Şekil 4.19’da

numaralandırılan noktalara yaklaşık 1 N büyüklüğünde kuvvet uygulanarak T1–B2, T2–B1 ve T1–B1 noktalarından direnç değerleri ölçülmüştür. Çoğu kapasitif dokunsal sensör çalışmasında, dokunulan noktanın konumu, sensör ile dokunulan nesne arasındaki karşılıklı kapasitans değişimi ile belirlenir. Ancak bu çalışmalar, dokunulan nesnenin iletken olmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada, dokunulan yer, geleneksel rezistif sensörlerdeki işleme benzer şekilde direnç değişimi ile belirlenmiştir. Ölçümler alınırken alt ve üst elektrotlardaki kontaklar kullanıldığında, nanokompozit malzemeyle üretilen tabakalar ve dielektrik malzeme boyunca izlenen yol nedeniyle işaretli noktaların her biri uygulanan kuvvete farklı bir dirençle yanıt verir. Şekil 4.23a, sensörün eşdeğer devresini ve sensör üzerinde işaretlenen noktaların devrede karşılık geldiği yerleri göstermektedir. Üst ve alt tabakalardaki ölçüm noktaları da gösterilmiştir.



Şekil 4.23 (a) Sensörün eşdeğer devresi (b) ‘3’ numaralı konuma basınç uygulandığında sensör üzerindeki varsayılan direnç değerleri

Şekil 4.23b ise bir noktaya kuvvet uygulandığında iki ölçüm noktası arasında görülen direnç değerlerinin temsili olarak ‘3’ numaralı nokta üzerinden gösterimidir. Takip eden işlemler sadece bu nokta için verilmiştir ve aynı adımlar numaralandırılan her bir nokta için tekrarlandığında kuvvet uygulanan konum, sensörün uzunluk bilgisi ile ilgili olarak verilmiştir.

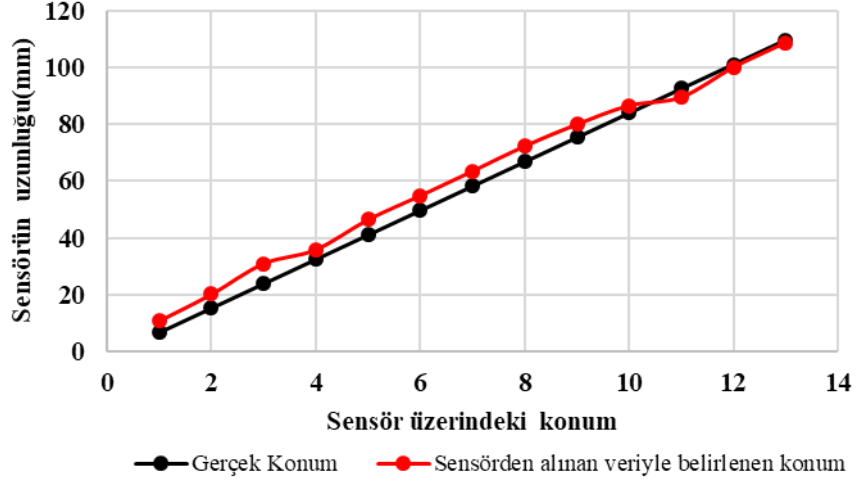
'3' numaralı noktaya kuvvet uygulandığında çeşitli ölçüm noktalarından alınan direnç değerleri şöyle verilebilir: R_{XT} , R_{XB} , R_{YT} ve R_{YB} Şekil 4.23b'de gösterilen direnç değerlerine karşılık gelmekle beraber R_M aradaki yapının direnç değeri için kullanılmıştır. T1–B2 noktalarından ölçülen direnç (R_{T1-B2}), R_{XT} , R_M , R_{XB} dirençlerinin toplamına eşit olarak 210 k Ω olarak ölçülmüştür. T2–B1 noktalarından ölçülen direnç (R_{T2-B1}) ise R_{YT} , R_M , R_{YB} dirençlerinin toplamına eşit olarak 577.7 k Ω olarak bulunmuştur. T1–B1 noktalarından ölçülen değer ($R_{T1-B1} \approx R_{\text{Toplam}}$) sensör üzerinden ölçülebilen maksimum direnç değerine karşılık gelerek 1650 k Ω şeklinde elde edilmiştir.

Sensörün alt ve üst tabalarındaki serpentin yapının ölçülen toplam uzunluğu 232.8 mm'dir ve bu bilgi Denklem 4.13'te kullanılırsa, β olarak tanımlanan sabit 7087.63 k Ω /m olarak elde edilir.

$$R_{\text{Toplam}} = \frac{\rho}{A} l = \beta(232.8 \text{ mm}) = 1650 \text{ k}\Omega \quad (4.13)$$

Direnci R_{XT} olarak gösterilen kısmın toplam uzunluğu l_x , direnci R_{YT} olarak gösterilen kısmın toplam uzunluğu l_y olarak düşünülürse T1–B2 ve T2–B1'den alınan sonuçlar Denklem 4.13'te kullanılarak bu uzunluk değerleri sırayla 29.63 mm ve 81.51 mm olarak bulunabilir.

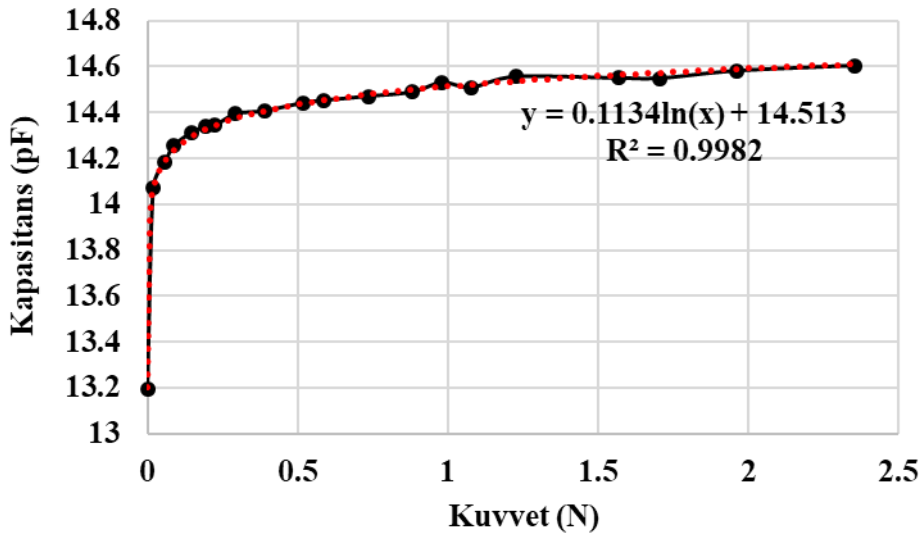
Bu durumda, toplam uzunluk (l_{Toplam}) l_x ve l_y 'nin toplamına eşit olarak 111.14 mm olarak elde edilir. Benzer işlemler numaralandırılan diğer noktalar için de gerçekleştirildiğinde ve sensörün gerçek uzunluğuna göre bir düzenleme yapıldığında Şekil 4.24'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.24 Sensöre kuvvet uygulandığında ölçülen direnç değerleriyle kuvvet uygulanan noktanın tespiti

4.3.2.3. Kuvvet Büyüklüğünün Belirlenmesi

Uygulanan kuvvetin belirlenmesi, dokunsal algılamada önem taşıyan bir konudur. İnsandaki dokunma duyusunu taklit etmek amacıyla ortaya konulan dokunsal algılama çalışmalarında dokunulan bölgeyi algılamanın yanı sıra insan derisindeki gibi uygulanan kuvveti hissedebilmek de bir gerekliliktir. Bu nedenle, bu çalışmada uygulanan kuvveti belirlemek için kapasitans değerleri kullanılmıştır. Bu kapasitans değerleri, çeşitli noktalardan alınan empedans ölçümleri aracılığıyla elde edilmiştir.



Şekil 4.25 T2–B1 noktalarından alınan empedans kullanılarak elde edilen kapasitansın uygulanan kuvvet ile değişimi

Şekil 4.25’de verilen grafik kapasitans ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiyi göstermektedir ve bu ilişki Denklemler 4.14 ve 4.15 ile verilmiştir. Kapasitansın biriminin pF ; kuvvetin ise N olduğuna dikkat edilmelidir.

Kısım 2.1.1’de anlatılan doğrusal olmayan transfer fonksiyonları açısından incelendiğinde, Şekil 4.25’de kapasitans ve kuvvet arasındaki ilişkinin logaritmik bir fonksiyonla ifade edildiği görülmektedir (Bknz. Çizelge 2.1). Yapılan çalışmada kapasitans ve kuvvet arasındaki ilişkinin en iyi ‘güç’ ve ‘logaritmik’ fonksiyonlarla elde edildiği görülmüştür. Veriler ve oluşturulan eğrinin birbirine ne kadar iyi uyduğunu gösteren R^2 değeri güç fonksiyonu için 0.9974 iken logaritmik fonksiyon için 0.9982 olarak bulunduğundan, giriş ve çıkış arasındaki bağlantıyı ifade etmek için logaritmik fonksiyon kullanılmıştır.

$$C = 0.1134 \ln(F) + 14.513 \quad (4.14)$$

$$F = e^{\frac{C}{0.1134} - 127.98} \quad (4.15)$$

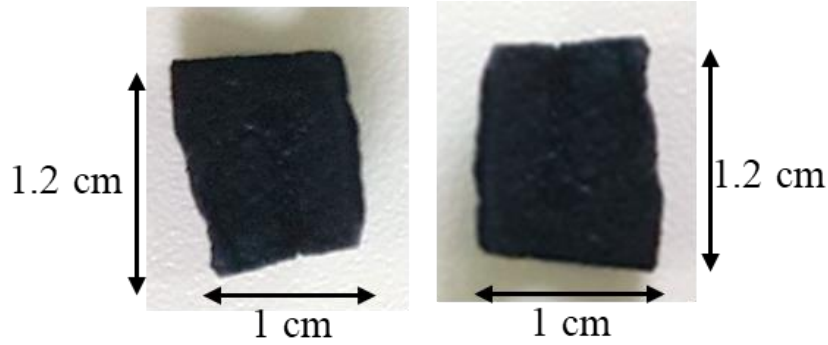
Sensör boyutuna ve dielektrik malzemeye bağlı olarak kapasitans değeri yaklaşık 1.2 N’den sonra Şekil 4.25’de gösterildiği gibi doyuma girmektedir. Bu çalışma sadece empedans değişikliklerini kullanarak uygulanan kuvveti belirlemeyi vurgulamaktadır. Bu sebeple, oluşturulan konsept farklı dielektrik malzemeler ve sensör tasarımları ile daha geniş kuvvet ve kapasitans aralıklarında da uygulanabilir.

4.4. Sensör Tasarımı – 4

4.4.1. SA–fCNT Nanokompozitleri ile Dokunsal Sensörlerin Üretimi

Bu çalışmada üretilen sensörler Kısım 3.7’de anlatılan SA–fCNT nanokompozitlerine dayalıdır. Sensör üretiminde önceki kısımlarda kullanılan serigrafi baskı gibi özel bir yöntem kullanılmamıştır. Kısım 3.7’de anlatılan üretim aşamaları sonucunda nanokompozitler herhangi bir başka işleme veya alt tabakaya gerek kalmadan sensör olarak kullanıma hazır hale gelmiştir. Çünkü kalsiyum klorür ile gerçekleştirilen çaprazlama işlemiyle esnekliği olan katı formda sensörler söz konusudur. Çapraz bağlama ile üretilen sensörler çeşitli işlemlerden geçirilerek belirli geometrilere sensörler de elde edilebilir. Bu çalışmada üretilen iki sensör arasındaki fark, bir sensörün gliserin içeriyor olmasıdır. Gliserinin sağladığı esnekliğe ek olarak frekans cevabı üzerindeki etkisi de araştırılmıştır.

Üretilen sensörler Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Sensörler 1.2 cm x 1 cm boyutlarında üretilmiştir.



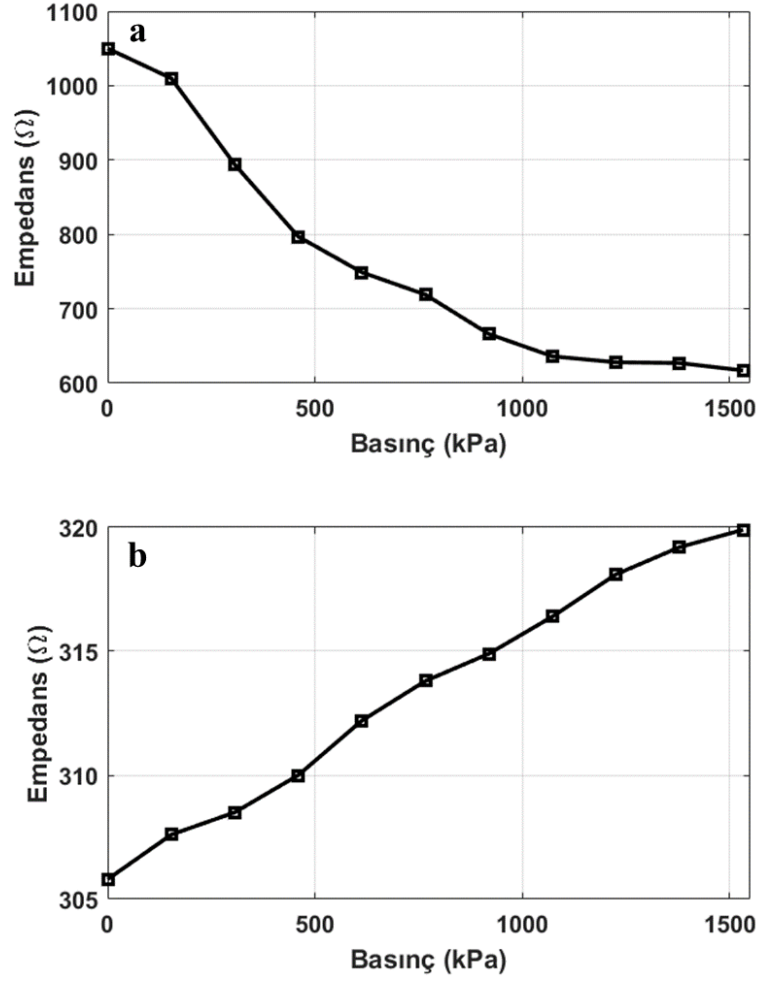
Şekil 4.26 Gliserin içeren ve içermeyen nanokompozitlere dayalı dokunsal sensörler

4.4.2. Elektromekanik Ölçüm Sonuçları

4.4.2.1. Dokunsal Sensörlerin Piezoempedans Özellikleri

Sensörler, önceki kısımlarda kullanılan otomatik kuvvet uygulayıcı sistem kullanılarak test edilmiş ve dokunsal sensörlerin empedans değerleri bir LCR metre (Keithley U1733C) ile 1 kHz’de kaydedilmiştir. Nanokompozitte gliserin içermeyen sensöre farklı kuvvetler uygulanarak empedansta görülen değişim kaydedildiğinde Şekil 4.27a elde edilmiştir. Uygulanan kuvvetin büyüklüğü arttıkça sensörün empedansının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi, basınç uygulandığında, CNT’lerin birbirine yaklaşarak iletken yollar oluşturması olabilir [177, 178]. Nanokompozitte gliserin içeren sensöre uygulanan basıncın empedansla değişimi ise Şekil 4.27b ile gösterilmiştir. Kuvvet arttıkça empedansın da yükseldiği görülmektedir. Bu durum, eklenen gliserinin CNT’ler arasındaki kopukluk ve mikro çatlakları artırmasından ve uygulanan kuvvetin büyüklüğü artırıldıkça bu kopukluk ve çatlaklarına artmasından kaynaklı olabilir [178].

Kısım 4.2.2.’deki incelemeye benzer olarak sensörlerin hassasiyeti hesaplandığında sonuçları Şekil 4.27a’da verilen sensör için hassasiyet 0–1.53 MPa aralığında $283.5 \Omega \cdot \text{MPa}^{-1}$ iken; Şekil 4.27b için aynı aralıkta $9.22 \Omega \cdot \text{MPa}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Gliserin içeren sensörün uygulanan basınca karşı empedansının oldukça az bir değişim gösterdiğini ve gliserin içermeyen dokunsal sensörün daha hassas olduğunu gösteren bu durum, CNT’lerin kısmi olarak topaklanmasına yol açan gliserinden kaynaklanmış olabilir. Gliserin içeren sensör daha az hassas olmasına rağmen, gliserinin plastikleştirici bir etkiye sahip olmasından dolayı daha esnek bir sensör elde edilmiştir.



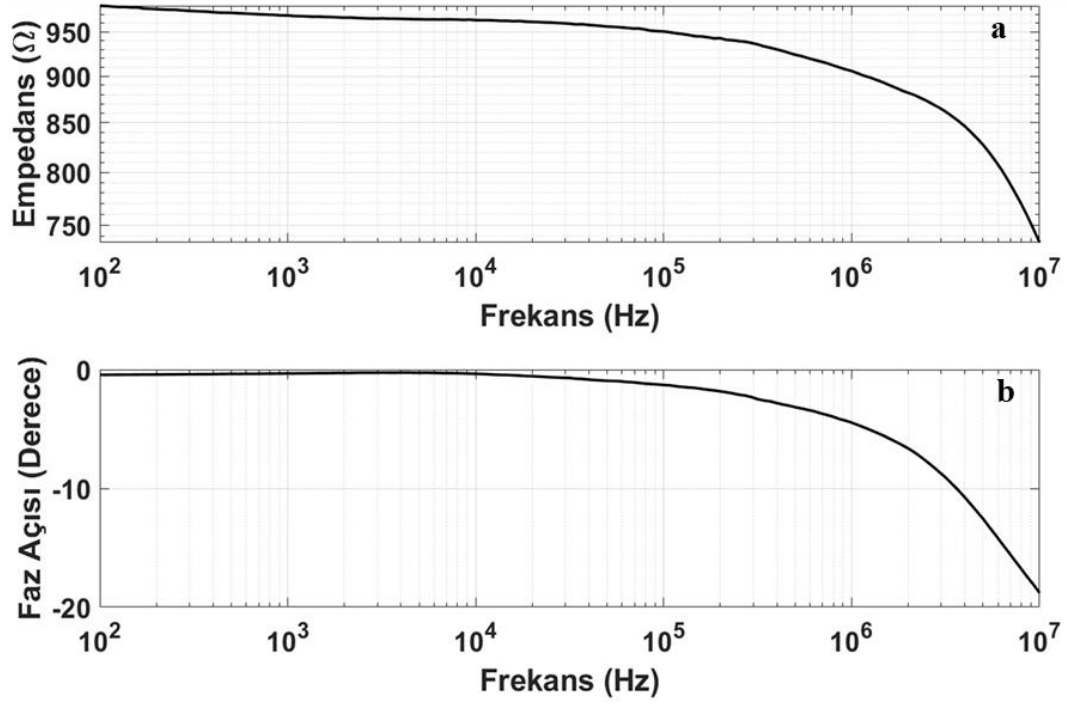
Şekil 4.27 Sensörlerin empedansının uygulanan ağırlıkla değişimi (a) Gliserin içermeyen nanokompozit tabanlı sensör (b) Gliserin içeren nanokompozit tabanlı sensör

Öte yandan, gliserinin nanokompozitte bir plastikleştirici görevi üstlenmesi ve sensörün mekanik yapısını ve elastikiyetini etkilemesi, gliserin içeren sensörün diğer sensöre göre daha az hassasiyete sahip olmasına rağmen daha esnek olmasını sağlamıştır.

4.4.2.2. Dokunsal Sensörlerin Frekans Cevabı Özellikleri

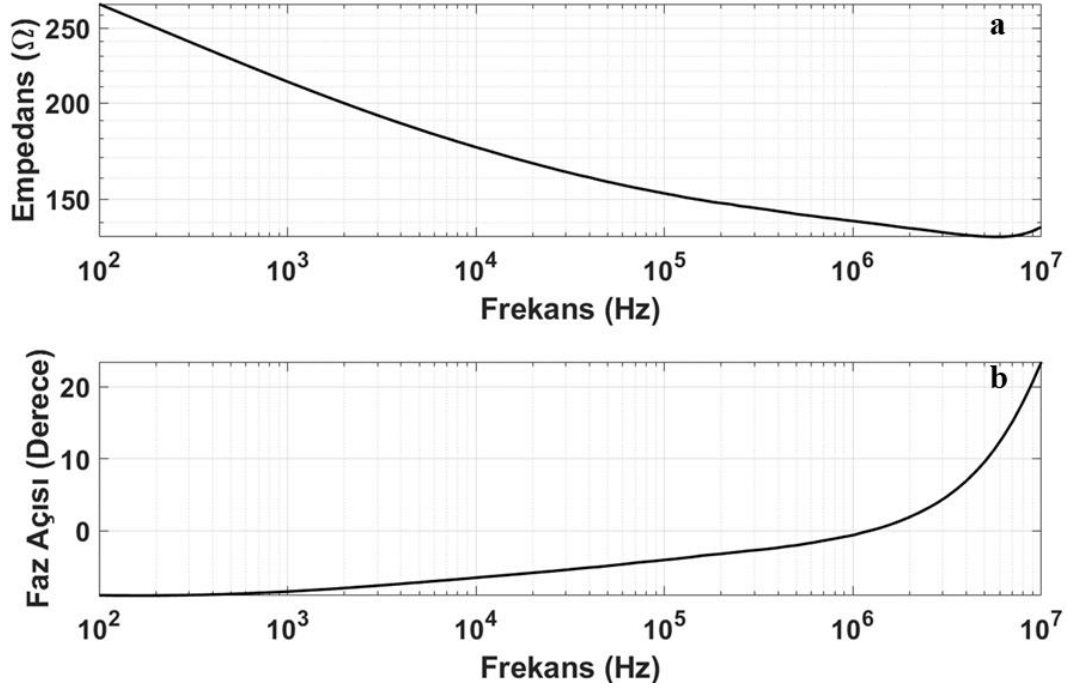
Empedans ölçümlerinin dokunsal sensörlerin piezorezistif ve kapasitif etkilerini birlikte değerlendirmek için kullanılmasının yanında, empedansın frekansla yakından ilişkili olduğu göz önüne alınarak sensörlerin frekans tepkisi belirli bir frekans aralığında empedansa bağlı olarak incelenmiştir. Sensörlerin frekans tepkileri, 100 Hz ve 10 MHz aralığında bir empedans analizör cihazı (Analog Discovery 2, Digilent) kullanılarak incelenmiştir. Şekil 4.28'deki veriler gliserinsiz nanokompozit tabanlı sensöre aittir. Şekil 4.28a, frekansa karşı empedans büyüklüğünü gösterirken; Şekil 4.28b ise faz açısının frekansla değişimini göstermektedir. 1 kHz'den sonra empedansın azalmaya başladığı

fark edilebilir düzeydeyken; faz açısı yaklaşık 10 kHz'den sonra azalmaya başlamıştır. Bu nedenle, sensörün çalışma mekanizmasının yaklaşık 10 kHz'e kadar piezorezistif olduğu söylenebilir. 10 kHz'ten sonra, nanokompozitteki CNT'ler çok sayıda mikro kapasitör üretebildikleri için sensör kapasitif algılama mekanizmasına yönelmeye başlamıştır [179].



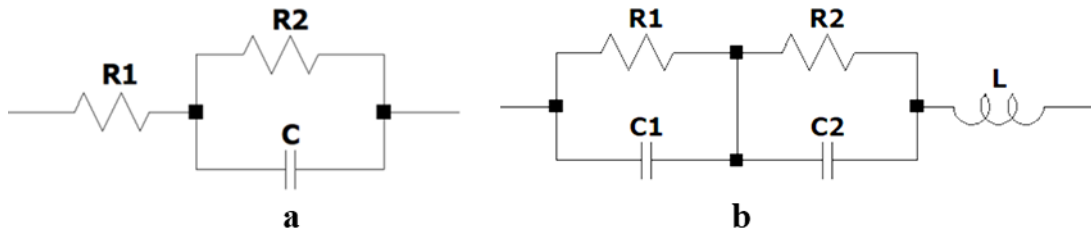
Şekil 4.28 Gliserin içermeyen nanokompozit tabanlı sensörün frekansa bağlı olarak (a) empedansının değişimi (b) faz açısının değişimi

Şekil 4.29'da verilen bilgiler ise, içinde gliserin bulunduran nanokompozit tabanlı sensöre aittir. Şekil 4.29a, frekans arttıkça empedansın düştüğünü göstermektedir. Azalmanın, Şekil 4.28a'dakinden daha belirgin olduğu görülmektedir. Şekil 4.29b ise faz açısının frekansla değişimini göstermektedir. Faz açısı, 1 MHz'e kadar negatif iken, ardından pozitive dönmüştür. Bu, çalışma mekanizması 1 MHz'e kadar piezorezistif olan sensörün, bu frekans noktasından sonra endüktif bir algılamaya doğru eğilim göstermesiyle açıklanabilir. Endüktif etki, nanokompozit içindeki CNT'lerin gliserin etkisiyle kıvrılmasından kaynaklanıyor olabilir [180].



Şekil 4.29 Gliserin içeren nanokompozit tabanlı sensörün frekansa bağlı olarak (a) empedansının değişimi (b) faz açısının değişimi

Sensörlerin empedans ve faz açısı bilgilerinin bir elektrokimyasal empedans spektroskopisi veri analiz programında (ZSimpWin) işlenmesiyle oluşturulan eşdeğer devreler ise Şekil 4.30'da verilmiştir. Şekil 4.30a, gliserin içermeyen sensörün eşdeğer devresine aittir. Devrede, paralel bağlı bir direnç ve kapasitörün bir dirence seri bağlı olduğu bir yapı görülmektedir ve devrenin eşdeğer empedansı Denklem 4.16 ile verilmiştir



Şekil 4.30 (a) Gliserin içermeyen nanokompozit tabanlı sensörün eşdeğer devresi (b) gliserin içeren nanokompozit tabanlı sensörün eşdeğer devresi

$$|Z| = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{R_2}} \quad (4.16)$$

Şekil 4.30b ise gliserin içeren sensörün empedans ve faz açısı bilgileri kullanılarak oluşturulan eşdeğer devresini göstermektedir. Paralel direnç ve kapasitans bileşenlerine sahip devrenin bir indüktör içerdiği de görülmektedir. Bu devreye ait eşdeğer empedans büyüklüğü ise Denklem 4.17’de ifade edilmiştir.

$$|Z| = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{j\omega C_1}} + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega C_2}} + j\omega L \quad (4.17)$$

İlk sensörün devresine de endüktif bileşenler eklenebilir. Fakat, büyüklüklerinin oldukça küçük olmaları ve bu yüzden frekans tepkisi grafiklerinde ana trend üzerinde kuvvetli bir etkiye sahip olmamaları nedeniyle ihmal edilebilirler. Bununla birlikte, gliserin içeren nanokompozit tabanlı sensörün devresindeki endüktif bileşenler ihmal edilemez, çünkü frekans cevabı spektrumunda oldukça belirgin bir etkileri vardır.

4.5. Sonuçlar

Bu bölümde, polimer nanokompozitlerin farklı tasarımlara sahip sensörlerin üretiminde yer alması ve üretilen sensörlerin birtakım testlere tabi tutularak değerlendirilmelerinin sonuçlarına yer verilmiştir. Tasarım-1 olarak adlandırılan sensörler PVA-CB nanokompoziti ve ticari iletken mürekkep kullanılarak, Tasarım-2 olarak adlandırılan sensörler PVA-fCNT, PVA-GnP, PVA-Ag NP nanokompozitleri kullanılarak, Tasarım-3 olarak adlandırılan sensörler SA-CB nanokompoziti kullanılarak, Tasarım-4 olarak adlandırılan sensörler ise SA-fCNT nanokompozitleri kullanılarak üretilmiştir. Yapılan elektromekanik testlerle, dokunsal sensörlerin basınca karşı empedans, piezorezistif ve kapasitif özellikleri incelenerek hassasiyetleri ve çalışma aralıkları belirlenmiştir. Ayrıca, tepki-toparlanma sürelerinin yanında frekans tepkileri de incelenmiştir. Tasarım-2 sensörü ile faz açısındaki değişim dokunmayı algılamayı mümkün kılarken, Tasarım-3 sensörü ile kuvvet uygulanan nokta ve uygulanan kuvvetin büyüklüğü belirlenebilmiştir. Tasarım-4 sensörü üzerinden de sensörün eşdeğer devresinin oluşturulabileceği gösterilmiştir.

Bu sensör üretimlerinin yanında, Bölüm 3’ün sonuçlar kısmında verilen ve Çizelge 5.1’de bileşenleri verilen nanokompozitler, farklı sensör üretim teknikleriyle kullanılmıştır. Saf CNT’ler içeren nanokompozitler, serigrafi ile serpentin yapıda sensörler üretmek için kullanılmıştır. Fakat, işlem görmeyen CNT’ler polimer matrisiyle arayüz etkileşimi sağlayamadığından ve çözelti içinde topaklanmaya meyilli olduğundan, CNT’leri içeren nanokompozitler alt tabakaya aktarılamamıştır. Ayrıca, CB nanoparçacıklarını barındıran

farklı nanokompozitlerin kullanıldığı sensörler için de farklı üretim teknikleri kullanılmıştır. Bunlardan, 3B baskı ve lazer kazıma yöntemlerinin kullanıldığı sensörlerde, alt tabaka ve algılayıcı nanokompozit tabaka arasında tam bir yapışma sağlanamadığı için üretilen sensörler verimli olmamıştır. Mürekkep püskürtmeli baskı yönteminde ise CB nanoparçacıklarını içeren nanokompozitlerle yapılan deneylerde dolgu maddesinin boyutu nozül çıkışının açıklığından büyük olduğu için nanokompozit alt tabakaya tamamen aktarılamamıştır.

5. YORUMLAR VE ÖNGÖRÜLER

Esnek dokunsal sensörlerin üretiminin işlendiği bu tez çalışmasında kullanılan nanokompozitler; polivinil alkol ve sodyum aljinat polimerlerinin karbon nanotüp, karbon siyahı, grafen nanoplatelet ve gümüş nanoparçacık dolgu maddeleriyle kullanılmasıyla üretilmiştir. Mikroskopik ve Raman karakterizasyonları yapılan nanokompozitler, farklı tasarımlarda sensör üretimlerinde kullanılmış ve sensörlerin elektromekanik özellikleri test edilmiştir. Bu özellikler arasında, uygulanan bir basınç altında sensörlerin piezorezistif, kapasitif ve empedans özelliklerinin değişimi, sensörlerin tepki süreleri ve çalışma aralıklarının belirlenmesi yer almaktadır. Frekans cevaplarının incelendiği sensör tasarımlarına ek olarak farklı sensör tasarımları için farklı özellikler de araştırılmıştır. Bu özellikler; bir basınç uygulandığı durumda sensörün eşdeğer devresinin belirlenmesi, kuvvet uygulanan konumun ve kuvvetin büyüklüğünün belirlenmesi gibi hususlardır. Farklı kullanım amaçlarına yönelik sensörler, ek özelliklerin incelenmesini gerektirebileceği gibi farklı tasarım, malzeme veya belirli bir algılama yönteminin kullanımını da gerektirebilir. Bu sebeple, dokunsal bir sensörün değerlendirilmesi, sensörün kullanılacağı uygulama çerçevesinde gerçekleştirilmelidir. Sensörün geometrisi, boyutları, kullanılan malzemeler gibi parametreler değiştirilerek aynı uygulama için sensörün performansı iyileştirilebileceği gibi, farklı bir uygulama için de optimize edilebilir.

Tez çalışmasında yer verilen nanokompozitlerin ve üretilen sensörlerin dışında, farklı malzemelerle ve üretim yöntemleriyle denenilen bazı çalışmalar ve sonuçları ise Çizelge 5.1’de verilmiştir. Malzeme odaklı olarak gerçekleştirilen deneylerde, özellikle işlem görmemiş CNT’lerin kullanımına odaklanılmıştır. Verilen sonuçlardan görüleceği üzere, CNT’lerin topaklanmasıyla sonuçlanan nanokompozitler 100 – 180 µm arasındaki açıklık büyüklüğüne sahip eleklerin kullanılacağı bir serigrafi işlemi için uygun değildir. Farklı üretim yöntemlerinin göz önüne alındığı sensör çalışmalarında ise, özellikle 3B baskı ve lazer kazıma yöntemlerinde, alt tabaka ve algılayıcı tabaka arasındaki etkileşimin yüksek olmasının sensör etkinliği için önem taşıdığı sonucuna varılmaktadır. Mürekkep püskürtmeli baskı yöntemiyle gerçekleştirilen deney ise, nanokompozitin elektriksel özelliklerini belirleyen dolgu maddelerinin tamamen alt tabakaya aktarımının önemini vurgulaması açısından önemlidir. Çeşitli malzemelerin ve üretim yöntemlerinin kullanıldığı bu deneyler, tez çalışmasında ayrıntılı özellikleri verilen nanokompozitlerin ve sensörlerin son versiyonlarının elde edilmesinde yol gösterici olmuştur.

Çizelge 5.1 Farklı malzemeler ve üretim yöntemleri kullanılarak yapılan sensör üretim çalışmaları

	Nanokompozit Mürekkep Bileşenleri	Sensör Üretim Yöntemi	Denenen Çalışma ve Sonuçlar
Malzeme Odaklı Sensör Üretim Çalışmaları	DMF–Etanol–CNT–PMMA	Serigrafi	<ul style="list-style-type: none">• 24 saat bekletilen çözeltide CNT çöktüğü için homojen bir karışım elde edilememiştir.• Sensör üretiminden önce, çözelti tekrar manyetik karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.• Kâğıt üzerinde serpentin yapı üretmek için farklı açıklıklara (100 ve 180 µm aralığında) sahip elekler kullanılsa da nanokompozitin alt tabakaya aktarımı yapılamamıştır.
	NMP–CNT–PMMA	Serigrafi	<ul style="list-style-type: none">• Homojen haldeki çözelti kâğıt üzerinde serpentin bir yapı üretmek için kullanılmıştır.• Farklı açıklıklarda (100 ve 180 µm aralığında) eleklerle kullanılan nanokompozitin alt tabakaya aktarımı yapılamamıştır.
	NMP–CNT–PEG	Serigrafi	<ul style="list-style-type: none">• Homojen haldeki çözelti kâğıt üzerinde serpentin bir yapı üretmek için kullanılmıştır.• Farklı açıklıklarda (100 ve 180 µm aralığında) eleklerle kullanılan nanokompozitin alt tabakaya aktarımı yapılamamıştır.

	DMF–CNT–PVA	Serigrafi	<ul style="list-style-type: none"> • Homojen haldeki çözelti kâğıt üzerinde serpentin bir yapı üretmek için kullanılmıştır. • Farklı açıklıklarda (100 ve 180 aralığında) eleklerle kullanılan nanokompozitin alt tabakaya aktarımı yapılamamıştır.
Üretim Yöntemi Odaklı Sensör Çalışmaları	CB–PVA	3B Baskı	<ul style="list-style-type: none"> • Baskı yönteminde kullanılan TPU filamentle elde edilen esnek serpentin yapı alt tabaka olarak kullanılmıştır. • Nanokompozit, bir şırınga yardımıyla geometriye aktarılmıştır. • Kuruduktan sonra, nanokompozitte çatlama ve alt tabakadan ayrılma meydana gelmiştir.
	fCNT–PVA	Mürekkep Püskürtmeli Baskı	<ul style="list-style-type: none"> • Nanokompozitteki dolgu maddesinin boyutu, nozülün çıkış açıklığına nazaran büyük kaldığı için verimli bir üretim yapılamamıştır.
	CB–PVA		<ul style="list-style-type: none"> • Nanokompozitteki dolgu maddesinin boyutu, nozülün çıkış açıklığına nazaran büyük kaldığı için verimli bir üretim yapılamamıştır.
	CB–PVA	Lazer Kazıma	<ul style="list-style-type: none"> • Alt tabaka olarak kullanılan poliüretan üzerine lazerle serpentin yapı kazanmıştır. • Nanokompozit, bir şırınga yardımıyla geometriye aktarılmıştır. • Kuruduktan sonra, nanokompozitte çatlama ve alt tabakadan ayrılma meydana gelmiştir.

Üretilen dokunsal sensörlerin başlıca özelliklerinin, muhtemel kullanım alanları da göz önünde bulundurularak literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırılmasına Çizelge 5.2’de yer verilmiştir. Bu çizelgede sensörlerin çalışma prensipleri, yapıları, üretimlerinde kullanılan malzemeler ve üretim yöntemleri incelenerek, bu etkenlerin tepki sürelerine, hassasiyete ve çalışma aralığına etkileri karşılaştırılmıştır.

Her ikisi de serigrafi ile üretilen ve nanokompozitte polimer olarak PVA içeren Tasarım – 1 ve Tasarım – 2 sensörleri karşılaştırılacak olursa, Tasarım – 1 sensörünün daha geniş bir aralıkta işlevsel olduğu, fakat daha yüksek tepki ve toparlanma sürelerine sahip olduğu görülür. Bu sebeple, nispeten daha dar aralıkta ve daha hızlı tepkinin beklendiği bir uygulamada Tasarım – 2 sensörü kullanılabilir. Ayrıca, Tasarım – 2’de yüksek hassasiyeti ve hızlı tepki süresini etkileyen bir diğer etmen ise Ag NP’ler olabilir. Kapasitif algılamaya dayanan benzer bir çalışma [181]’de sunulmuştur. PVA ve gümüş nanoteller ile üretilen sensörlerin yüksek hassasiyete ve hızlı tepki süresine sahip olduğunun görüldüğü bu çalışma, aynı zamanda, kapasitif sensörlerin yüksek hassasiyetle öne çıktığının da bir göstergesidir.

Farklı tekniklerle üretilmesine rağmen, nanokompozitte polimer olarak sodyum aljinat içeren Tasarım – 3 ve Tasarım – 4 sensörleri karşılaştırıldığında ise, gliserin içermeyen Tasarım – 4 sensörünün daha dar bir aralıkta daha hassas olduğu görülür. Bunun en önemli sebeplerinden biri dolgu maddesi olarak fCNT’ler içermesidir. Ayrıca, dokunsal sensörlerde genel olarak, daha dar bir aralıkta daha hassas sensörlerin elde edildiği de bir gerçektir. Bu nedenle, daha geniş aralıkta yüksek hassasiyetle çalışabilen sensörler üretmek oldukça zorlayıcı çalışma konuları arasındadır.

[182] ve [183]’te yer alan çalışmalar ise PDMS ve CNT’ler kullanılarak üretilen sensörlere aittir. Burada özellikle, kullanılan farklı üretim yöntemlerinin performansı nasıl etkilediği görülmektedir. [182]’de 3B baskı ve çözelti karıştırma tekniğiyle üretilen sensörün hassasiyeti 0 – 200 kPa aralığında 0.7 ve 1.3 kPa⁻¹ arasında değişirken; [183]’te kalıba dökme tekniğiyle üretilen sensörün hassasiyeti 0 – 1 N aralığında sadece 0.14 mV/N’dir. Kullanılan üretim yönteminin dışında algılama mekanizmasının etkisini görmek için de [183] ve [184]’te yer alan çalışmalar incelenebilir. Her iki çalışmada da PDMS, kalıba dökme işlemiyle üretime dahil edilirken, optik algılamaya dayalı [184] çalışmasında hassasiyet, tepki süresi ve çalışma aralığı [183]’ten daha gelişmiştir.

Çizelge 5.2 Tez çalışmasında üretilen dokunsal sensörlerin çeşitli açılardan literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırılması

Dokunsal Sensörler	Sensörün Çalışma Prensibi	Sensörün Geometrisi	Sensör Üretiminde Kullanılan Malzemeler	Sensör Üretim Yöntemi	Sensörün Hassasiyeti ve Çalışma Aralığı	Sensörün Tepki ve Toparlanma Süresi	Sensörün Kullanılabileceği Uygulamalar
Tasarım – 1	Piezorezistif, kapasitif, empedans	Kare dizilerden oluşan çift katlı yapı	PVA – CB	Serigrafi baskı	Kapasitif: 3.69 pF. MPa ⁻¹ (0.0469–1.8 MPa)	230 /600 ms	Fiziksel sinyallerin izlenmesi, gerçek zamanlı basınç dağılımının görüntülenmesi
Tasarım – 2	Piezorezistif, kapasitif, empedans	IDE ve kare geometrilerden oluşan çift katlı yapı	PVA – Ag NP	Serigrafi baskı	Piezoempedans: 1 MΩ. kPa ⁻¹ (0–10 kPa)	158 /164 ms	Protez uzuvlar ve robotik, dokunmatik ekranlar
Tasarım – 3	Piezorezistif, kapasitif, empedans	Serpentin geometrilerden oluşan çift katlı yapı	SA – CB	Serigrafi baskı	Piezoempedans: 316.14 Ω. kPa ⁻¹ (0–3678.75 kPa)	–	Kuvvet ve konum tahmini

Tasarım – 4	Piezorezistif, kapasitif, empedans	Kare yapı	SA – fCNT	Çapraz bağlama	Piezoempedans: 283.5 Ω . MPa ⁻¹ (0–1.53 MPa)	–	Robotik, artırılmış gerçeklik uygulamaları
[182]	Piezorezistif (Hertzian ve hiperelastik temas)	Hiyerarşik yapılar	MWCNT/PDMS	3B baskı, çözelti karıştırma	0.7 – 1.3 kPa ⁻¹ (0–200 kPa)	12.5 /37.5 ms	Fiziksel sinyallerin izlenmesi
[185]	Piezorezistif Piezoelektrik	Dalga şeklinde iç içe geçmiş yapılar	Selüloz	Dondurarak kurutma ve kimyasal işlemler	Piezoelektrik: 0.443 V. kPa ⁻¹	160 ms / –	Fiziksel sinyallerin izlenmesi, biyomedikal uygulamalar
[186]	Triboelektrik	Kare dizilerden oluşan matris	PDMS/ PEDOT: PSS/ polikaprolakton	Elektro – eğirme ve mikroişleme	7.78 mV/ kPa (40–200 kPa)	–	Gerçek zamanlı basınç dağılımını görüntüleme
[187]	DC–triboelektrik /AC–piezoelektrik	Çok katmanlı kare yapılar	PVDF/ PTFE/ Naylon	Biriktirme	0.1V/kPa (0–20 kPa)	67 ms / –	Kendi kendine çalışan

							anahtarlama cihazları
[183]	Piezorezistif	Dikdörtgen yapı	PDMS/CNT	Çözelti karıştırma ve kalıba dökme	0.14 mV/N (0–1 N)	530 ms / –	Kuvvet tahmini
[181]	Kapasitif	Çok katmanlı dikdörtgen yapılar	PVA/ gümüş nanoteller	Çözelti karıştırma, dondurma ve çözme	1.8862 kPa ⁻¹ (0–250 kPa)	25 /25 ms	Giyilebilir cihazlar, vücut hareketlerinin algılanması
[184]	Optik	U-şeklinde çok katmanlı yapı	PDMS/ altın nanoparçacıklar	Kalıplama, 3B baskı	3.05 dB. N ⁻¹ (0–4.5 N)	<23 ms / –	Vücut hareketlerinin gerçek zamanlı algılanması, robotik

Dokusal sensörlerin çalışma mekanizmalarının anlatıldığı kısımda, çalışma mekanizmalarının hibrit kullanımının da algılamaya olumlu etkisinin olduğundan ve uygulamaya bağlı olarak tercih edilebildiğinden bahsedilmiştir. Bu etkiyi değerlendirebilmek için sadece triboelektrik yöntemin kullanıldığı çalışma [186], piezoelektrik ve piezorezistif algılamının birlikte kullanıldığı çalışma [185] ve triboelektrik ve piezoelektrik algılamının birlikte kullanıldığı çalışma [187] ile karşılaştırılabilir. Çizelgeden de görüleceği üzere, hibrit algılama imkânı sunan çalışmalarda sensörlerin hassasiyeti daha yüksek ve tepki süreleri daha düşüktür. Sadece triboelektrik yöntemin kullanıldığı çalışma [186], kare şeklindeki matrislerle kullanımıyla Tasarım – 1 sensörüyle benzerlik gösterdiği için karşılaştırılırsa, Tasarım – 1 sensörünün daha geniş aralıkta olmasına rağmen daha yüksek hassasiyete sahip olduğu görülür.

Tez çalışmasında üretilen esnek dokusal sensörler, performans açısından literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılabilir olsa da pek çok açıdan geliştirilebilmeleri ve bir uygulamaya özel olarak optimize edilebilmeleri mümkündür. İyileştirmenin yapılabileceği alanlar arasında dört farklı tasarımdaki sensörlerin hepsinin daha küçük boyutlarda üretilmesi ve parçası olabileceği sistemle daha konforlu bir kullanımının sağlanması yer alabilir. Ayrıca, her bir sensörden elde edilen sonuçlar doğrultusunda kullanımı öngörülen uygulamalar için de geliştirilebilmeleri ihtimal dahilindedir. Örneğin; Tasarım – 1 sensörü için basınç dağılımını görüntüleme bir uygulama seçeneği iken; Tasarım – 2 ile üretilen sensörlerin protez uzuvlarda ve robotikte kullanımı söz konusu olabilir. Tasarım – 3, kuvvet uygulanan noktanın tespiti ve kuvvetin büyüklüğünün tahmininin gerekeceği robotik uygulamalarda veya dokunmatik ekranlarda kullanılabilir. Tasarım – 4 ise fiziksel sinyallerin izlenmesi için bir seçenek olabilir. En önemli kriterlerden olan uygulama seçiminin ardından, sensörün boyutları, hangi aralıkta hangi hassasiyetlerle çalışabileceği, hangi elektriksel sinyallerin ölçüleceği ve bunun için nasıl bir devre gerekeceği, sensör üretiminin ardından üzerinde çalışılacak konular arasındadır. Tez çalışmasında, polimer nanokompozitlerle esnek alt tabakalar üzerinde üretilen bu sensörlerin, ilk aşamada hangi olasılıkları barındırdığı araştırılmış ve öncül çalışmaları sunulmuştur.

Teknolojinin insan hayatını kolaylaştırmak için günbegün gelişimi ve değişimi, akıllı sistemler ve cihazların hiçbir dönemde olmadığı kadar hayatlarımızda yer edinmesini sağlamıştır. Bu sistemlerin mümkün olduğu kadar kullanıcı dostu olması ve işlevsel bir

şekilde kullanılması yolunda esnek elektronik, geleneksel elektronik cihazlarla mümkün olmayan uygulamaların hayata geçirilmesinde pek çok engeli aşarak birçok ihtimalin önünü açmıştır. Sağlık ve otomotiv sektörleri ile nesnelerin interneti başta olmak üzere, doğrudan insanla etkileşimin olduğu günümüz dijitalleşme çağında, esnek elektroniğin en hayati bileşenlerinden dokunsal sensörler, akıllı sistemlerin evrildiği yönün belirlenmesinde kilit rol oynamaktadır. Halihazırda geliştirilen yüksek performanslı malzemelere ve etkili, düşük maliyetli üretim metotlarına rağmen, dokunsal sensörlerin istenen verimde ve yaygınlıkta kullanılmasının önünde duran bazı engeller ve bu alanda çalışan araştırmacılar için zorlayıcı olan bazı unsurlar mevcuttur. Bunlar arasında öne çıkan en önemli sorunlar arasında; sensöre güç sağlanması, okunan değerlerin çok işlevli görevler gerçekleştirebilmek için doğru yorumlanması, geleneksel katı ve esnek olmayan elektronik cihazlarla yapılan bağlantıların tüm yapının esnekliğini ve uyumluluğunu etkilemesi, hassasiyet ve çalışma aralığı arasında sensörün kullanımını olumsuz etkilemeyecek uygun bir ayarlanmanın yapılması konuları yer almaktadır. Ayrıca, dokunsal sensörlerin üretiminde ve kullanımında bazı standartların oluşturulması, bahsedilen sorunlarda çözüm adımları atılarak iyileştirmelerin yapılabilmesi için araştırmacıların istihdamı ve bunun sürekliliğinin sağlanması da yakın gelecekte ilgileneilmesi gereken hususlar arasındadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] D. Baran, D. Corzo, G. Blazquez, Flexible Electronics: Status, Challenges and Opportunities, *Frontiers in Electronics*, 1 (2020).
- [2] P. Wang, M. Hu, H. Wang, Z. Chen, Y. Feng, J. Wang, W. Ling, Y. Huang, The Evolution of Flexible Electronics: From Nature, Beyond Nature, and To Nature, *Advanced Science*, 7 (2020) 2001116.
- [3] G.S. Lakshmi, S.R. Karumuri, G.S. Kondavitee, A. Lay-Ekuakille, Design and Performance Analysis of a Microbridge and Microcantilever-Based MEMS Pressure Sensor for Glucose Monitoring, *IEEE Sensors Journal*, 23 (2023) 4589-4596.
- [4] S. Baloda, N. Gupta, S. Singh, A Flexible Pressure Sensor Based on Multiwalled Carbon Nanotubes/ Polydimethylsiloxane Composite for Wearable Electronic-Skin Application, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 69 (2022) 7011-7018.
- [5] W. Yang, M. Xie, X. Zhang, X. Sun, C. Zhou, Y. Chang, H. Zhang, X. Duan, Multifunctional Soft Robotic Finger Based on a Nanoscale Flexible Temperature-Pressure Tactile Sensor for Material Recognition, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 13 (2021) 55756-55765.
- [6] C. Ouyang, D. Liu, K. He, J. Kang, Recent Advances in Touch Sensors for Flexible Displays, *IEEE Open Journal of Nanotechnology*, 4 (2023) 36-46.
- [7] Z. Shi, L. Meng, X. Shi, H. Li, J. Zhang, Q. Sun, X. Liu, J. Chen, S. Liu, Morphological Engineering of Sensing Materials for Flexible Pressure Sensors and Artificial Intelligence Applications, *Nano-Micro Letters*, 14 (2022).
- [8] H.R. Lim, H.S. Kim, R. Qazi, Y.T. Kwon, J.W. Jeong, W.H. Yeo, Advanced soft materials, sensor integrations, and applications of wearable flexible hybrid electronics in healthcare, energy, and environment, *Advanced Materials*, 32 (2020) 1901924.
- [9] I. Akhtar, S.-H. Chang, Highly aligned carbon nanotubes and their sensor applications, *Nanoscale*, 12 (2020) 21447-21458.
- [10] F.-L. Gao, P. Min, X.-Z. Gao, C. Li, T. Zhang, Z.-Z. Yu, X. Li, Integrated temperature and pressure dual-mode sensors based on elastic PDMS foams decorated with thermoelectric PEDOT:PSS and carbon nanotubes for human energy harvesting and electronic-skin, *Journal of Materials Chemistry A*, 10 (2022) 18256-18266.
- [11] J. Huang, D. Li, M. Zhao, A. Mensah, P. Lv, X. Tian, F. Huang, H. Ke, Q. Wei, Highly Sensitive and Stretchable CNT-Bridged AgNP Strain Sensor Based on TPU Electrospun Membrane for Human Motion Detection, *Advanced Electronic Materials*, 5 (2019).
- [12] Y. Qin, M. Qu, Y. Pan, C. Zhang, D.W. Schubert, Fabrication, characterization and modelling of triple hierarchic PET/CB/TPU composite fibres for strain sensing, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 129 (2020) 105724.
- [13] Y. Qin, Q. Peng, Y. Ding, Z. Lin, C. Wang, Y. Li, F. Xu, J. Li, Y. Yuan, X. He, Y. Li, Lightweight, Superelastic, and Mechanically Flexible Graphene/Polyimide Nanocomposite Foam for Strain Sensor Application, *ACS Nano*, 9 (2015) 8933-8941.
- [14] G. Wang, M. Li, J. Zhang, Z. Liang, Z. Shen, L. Liu, Z. Jiang, X. Chen, H. Song, Flexible, stable and durable polydopamine@lead zirconate titanate/polyimide composite membranes for piezoelectric pressure sensors and limb motion monitoring, *Composites Part C: Open Access*, 8 (2022) 100292.
- [15] H. Ding, Z. Wen, E. Qin, Y. Yang, W. Zhang, B. Yan, D. Wu, Z. Shi, Y. Tian, X. Li, Influence of the pore size on the sensitivity of flexible and wearable pressure sensors based on porous Ecoflex dielectric layers, *Materials Research Express*, 6 (2019).
- [16] M. Fortunato, I. Bellagamba, A. Tamburrano, M.S. Sarto, Flexible ecoflex®/graphene nanoplatelet foams for highly sensitive low-pressure sensors, *Sensors (Switzerland)*, 20 (2020) 1-19.

- [17] A.E. Job, F.A. Oliveira, N. Alves, J.A. Giacometti, L.H.C. Mattoso, Conductive composites of natural rubber and carbon black for pressure sensors, *Synthetic Metals*, 2003, pp. 99-100.
- [18] B. Tang, X. Chen, Y. He, J. Zhou, H. Zhao, W. Chen, J. Wang, X. Wang, Fabrication of kapok fibers and natural rubber composites for pressure sensor applications, *Cellulose*, 28 (2021) 2287-2301.
- [19] V.S. Balderrama, J.A. Leon-Gil, D.A. Fernandez-Benavides, J. Ponce-Hernandez, M. Bandala-Sanchez, MEMS Piezoresistive Pressure Sensor Based on Flexible PET Thin-Film for Applications in Gaseous-Environments, *IEEE Sensors Journal*, 22 (2022) 1939-1947.
- [20] V. Rana, P. Gangwar, J.S. Meena, A.K. Ramesh, K.N. Bhat, S. Das, P. Singh, A highly sensitive wearable flexible strain sensor based on polycrystalline MoS₂ thin film, *Nanotechnology*, 31 (2020) 385501.
- [21] Y. Ding, J. Yang, C.R. Tolle, Z. Zhu, Flexible and Compressible PEDOT:PSS@Melamine Conductive Sponge Prepared via One-Step Dip Coating as Piezoresistive Pressure Sensor for Human Motion Detection, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10 (2018) 16077-16086.
- [22] H.H. Tai, B.A. Chen, Y.H. Liu, Y.J. Lu, J.C. Wang, Submillimeter-Scaled PEDOT:PSS/PPy Piezoresistive Pressure Sensor Array and Its Applications in Biomedicine, *IEEE Sensors Journal*, 22 (2022) 6418-6425.
- [23] Y. Sekertekin, I. Bozyel, D. Gokcen, A Flexible and Low-Cost Tactile Sensor Produced by Screen Printing of Carbon Black/PVA Composite on Cellulose Paper, *Sensors*, 2020.
- [24] T. Wang, J. Wang, Z. Li, M. Yue, X. Qing, P. Zhang, X. Liao, Z. Fan, S. Yang, PVA/SA/MXene dual-network conductive hydrogel for wearable sensor to monitor human motions, *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (2022) 51627.
- [25] Y. Li, D. Yang, Z. Wu, F.L. Gao, X.Z. Gao, H.Y. Zhao, X. Li, Z.Z. Yu, Self-adhesive, self-healing, biocompatible and conductive polyacrylamide nanocomposite hydrogels for reliable strain and pressure sensors, *Nano Energy*, 109 (2023).
- [26] M.J. Yin, Z. Yin, Y. Zhang, Q. Zheng, A.P. Zhang, Micropatterned elastic ionic polyacrylamide hydrogel for low-voltage capacitive and organic thin-film transistor pressure sensors, *Nano Energy*, 58 (2019) 96-104.
- [27] G. Ge, W. Yuan, W. Zhao, Y. Lu, Y. Zhang, W. Wang, P. Chen, W. Huang, W. Si, X. Dong, Highly stretchable and autonomously healable epidermal sensor based on multi-functional hydrogel frameworks, *Journal of Materials Chemistry A*, 7 (2019) 5949-5956.
- [28] X. Jing, H.-Y. Mi, X.-F. Peng, L.-S. Turng, Biocompatible, self-healing, highly stretchable polyacrylic acid/reduced graphene oxide nanocomposite hydrogel sensors via mussel-inspired chemistry, *Carbon*, 136 (2018) 63-72.
- [29] L. Han, L. Yan, M. Wang, K. Wang, L. Fang, J. Zhou, J. Fang, F. Ren, X. Lu, Transparent, Adhesive, and Conductive Hydrogel for Soft Bioelectronics Based on Light-Transmitting Polydopamine-Doped Polypyrrole Nanofibrils, *Chemistry of Materials*, 30 (2018) 5561-5572.
- [30] H. Li, Y. Li, Y. Wang, L. Liu, H. Dong, C. Zhang, T. Satoh, Skin-friendly PVA/PDA/Tyr-PEAm composite hydrogel with long-term antibacterial and self-recovery ability for wearable strain/pressure sensor, *European Polymer Journal*, 182 (2023).
- [31] Z. Li, L. Chen, M. Mu, H. Yu, Y. Li, X. Chen, Freezing-induced interfacial growth of polypyrrole layers on hierarchical carbon aerogels for robust ultrasensitive pressure sensors, *Industrial Crops and Products*, 186 (2022).
- [32] C. Yang, L. Li, J. Zhao, J. Wang, J. Xie, Y. Cao, M. Xue, C. Lu, Highly Sensitive Wearable Pressure Sensors Based on Three-Scale Nested Wrinkling Microstructures of Polypyrrole Films, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10 (2018) 25811-25818.

- [33] Y. Sekertekin, D. Gokcen, Composites of Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotube and Sodium Alginate for Tactile Sensing Applications, *Engineering Proceedings*, 2022.
- [34] L. Zhao, Z. Ren, X. Liu, Q. Ling, Z. Li, H. Gu, A Multifunctional, Self-Healing, Self-Adhesive, and Conductive Sodium Alginate/Poly(vinyl alcohol) Composite Hydrogel as a Flexible Strain Sensor, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 13 (2021) 11344-11355.
- [35] M.J. Yee, N.M. Mubarak, E.C. Abdullah, M. Khalid, R. Walvekar, R.R. Karri, S. Nizamuddin, A. Numan, Carbon nanomaterials based films for strain sensing application—A review, *Nano-Structures & Nano-Objects*, 18 (2019).
- [36] M. Nabeel, L. Kuzsella, B. Viskolcz, M. Kollar, B. Fiser, L. Vanyorek, Synergistic effect of carbon nanotubes and carbon black as nanofillers of silicone rubber pressure sensors, *Arabian Journal of Chemistry*, 16 (2023).
- [37] Z. Zhan, R. Lin, V.T. Tran, J. An, Y. Wei, H. Du, T. Tran, W. Lu, Paper/Carbon Nanotube-Based Wearable Pressure Sensor for Physiological Signal Acquisition and Soft Robotic Skin, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9 (2017) 37921-37928.
- [38] S. Lu, T. Nie, Y. Li, Y. Li, Z. Yao, N.Y. Kim, S. Li, A Highly Sensitive Flexible Pressure Sensor Based on Inter-Comb Structured Graphene Electrodes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 70 (2023) 1865-1870.
- [39] S.E. Zhu, M. Krishna Ghatkesar, C. Zhang, G.C.A.M. Janssen, Graphene based piezoresistive pressure sensor, *Applied Physics Letters*, 102 (2013).
- [40] G. Gilanizadehdizaj, D. Bhattacharyya, J. Stringer, K. Aw, Elucidating the Conducting Mechanisms in a Flexible Piezoresistive Pressure Sensor Using Reduced Graphene Oxide Film in Silicone Elastomer, *Sensors*, 23 (2023).
- [41] S. Wan, H. Bi, Y. Zhou, X. Xie, S. Su, K. Yin, L. Sun, Graphene oxide as high-performance dielectric materials for capacitive pressure sensors, *Carbon*, 114 (2017) 209-216.
- [42] C.S. Park, J. Park, D.W. Lee, A piezoresistive tactile sensor based on carbon fibers and polymer substrates, *Microelectronic Engineering*, 86 (2009) 1250-1253.
- [43] J. Zhu, X. Xue, J. Li, J. Wang, H. Wang, Y. Xing, P. Zhu, Flexible pressure sensor with a wide pressure measurement range and an agile response based on multiscale carbon fibers/carbon nanotubes composite, *Microelectronic Engineering*, 257 (2022).
- [44] D. Lee, H. Lee, Y. Jeong, Y. Ahn, G. Nam, Y. Lee, Highly Sensitive, Transparent, and Durable Pressure Sensors Based on Sea-Urchin Shaped Metal Nanoparticles, *Advanced Materials*, 28 (2016) 9364-9369.
- [45] Z. Wang, Z. Cheng, X. Jiao, D. Chen, T. Wang, Formation of SiO₂-Encapsulated Ag Nanoparticles on SiO₂ Nanofibers and Their Application as Robust, Flexible Pressure Sensor Working under High Temperatures, *ACS Applied Nano Materials*, 6 (2023) 6112-6120.
- [46] S. Gong, W. Schwalb, Y. Wang, Y. Chen, Y. Tang, J. Si, B. Shirinzadeh, W. Cheng, A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires, *Nature Communications*, 5 (2014).
- [47] L. Wang, Y. Geng, A facile method to pattern silver nanowires on sandpaper and its application in pressure sensors, *Flexible and Printed Electronics*, 8 (2023).
- [48] M. Zhang, X. Xia, L. Zhang, G. Zhao, C. Liu, N. Li, J. Xu, Y. Chen, X. Jian, Design of healable, porous polyurethane with large ionic liquids loading amounts towards ultra-durable pressure sensor, *European Polymer Journal*, 191 (2023).
- [49] S. Zhang, F. Wang, H. Peng, J. Yan, G. Pan, Flexible Highly Sensitive Pressure Sensor Based on Ionic Liquid Gel Film, *ACS Omega*, 3 (2018) 3014-3021.
- [50] D. Lei, N. Liu, T. Su, L. Wang, J. Su, Z. Zhang, Y. Gao, Research progress of MXenes-based wearable pressure sensors, *APL Materials*, 8 (2020).

- [51] X. Zheng, S. Zhang, M. Zhou, H. Lu, S. Guo, Y. Zhang, C. Li, S.C. Tan, MXene Functionalized, Highly Breathable and Sensitive Pressure Sensors with Multi-Layered Porous Structure, *Advanced Functional Materials*, 33 (2023).
- [52] W. Chen, X. Yan, Progress in achieving high-performance piezoresistive and capacitive flexible pressure sensors: A review, *Journal of Materials Science & Technology*, 43 (2020) 175-188.
- [53] H. Nassar, G. Khandelwal, R. Chirila, X. Karagiorgis, R.E. Ginesi, A.S. Dahiya, R. Dahiya, Fully 3D printed piezoelectric pressure sensor for dynamic tactile sensing, *Additive Manufacturing*, 71 (2023).
- [54] Q.T. Lai, Q.J. Sun, Z. Tang, X.G. Tang, X.H. Zhao, Conjugated Polymer-Based Nanocomposites for Pressure Sensors, *Molecules*, 28 (2023).
- [55] S.-Y. Xia, L.-Y. Guo, L.-Q. Tao, Y. Long, Z. Huang, J. Wu, J. Li, Self-Powered Paper-Based Pressure Sensor Driven by Triboelectric Nanogenerator for Detecting Dynamic and Static Forces, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 70 (2023) 732-738.
- [56] C. Zhi, S. Shi, Y. Si, B. Fei, H. Huang, J. Hu, Recent Progress of Wearable Piezoelectric Pressure Sensors Based on Nanofibers, Yarns, and Their Fabrics via Electrospinning, *Advanced Materials Technologies*, 8 (2023).
- [57] S. Ippili, V. Jella, J.M. Lee, J.S. Jung, D.H. Lee, T.Y. Yang, S.G. Yoon, ZnO-PTFE-based antimicrobial, anti-reflective display coatings and high-sensitivity touch sensors, *Journal of Materials Chemistry A*, 10 (2022) 22067-22079.
- [58] R. Goos, A. Verma, E. Ferraris, Development of a free-form piezo-resistive pressure sensor using advanced printing methods, *Procedia CIRP*, 2022, pp. 335-340.
- [59] Y. Tang, B. Dai, B. Su, Y. Shi, Recent Advances of 4D Printing Technologies Toward Soft Tactile Sensors, *Frontiers in Materials*, 8 (2021).
- [60] H.K. Lee, S.I. Chang, E. Yoon, A Flexible Polymer Tactile Sensor: Fabrication and Modular Expandability for Large Area Deployment, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 15 (2006) 1681-1686.
- [61] T. Gray, Transparent Conductors, in: T. Gray (Ed.) *Projected Capacitive Touch: A Practical Guide for Engineers*, Springer International Publishing, Cham, 2019, pp. 55-68.
- [62] A.H. Anwer, N. Khan, M.Z. Ansari, S.S. Baek, H. Yi, S. Kim, S.M. Noh, C. Jeong, Recent Advances in Touch Sensors for Flexible Wearable Devices, *Sensors (Basel)*, 22 (2022).
- [63] IDTechEx, *Wearable Technology Forecasts 2023-2033*, <https://www.idtechex.com/en/research-report/wearable-technology-forecasts-2023-2033/928>, 2023 (Erişim Tarihi: 17 Mayıs 2023).
- [64] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 2003.
- [65] W. Yang, M. Hon, H. Yao, B.C.K. Tee, *An Atlas for Large-Area Electronic Skins: From Materials to Systems Design*, Cambridge University Press, Cambridge, 2020.
- [66] K. Shimada, Morphological Configuration of Sensory Biomedical Receptors Based on Structures Integrated by Electric Circuits and Utilizing Magnetic-Responsive Hybrid Fluid (HF), *Sensors*, 2022.
- [67] M. Park, B.G. Bok, J.H. Ahn, M.S. Kim, Recent Advances in Tactile Sensing Technology, *Micromachines (Basel)*, 9 (2018).
- [68] R.S. Dahiya, M. Valle, Tactile Sensing: Definitions and Classification, in: R.S. Dahiya, M. Valle (Eds.) *Robotic Tactile Sensing: Technologies and System*, Springer Netherlands, Dordrecht, 2013, pp. 13-17.
- [69] O. Ozioko, W. Navaraj, M. Hersh, R. Dahiya, Tacsac: A Wearable Haptic Device with Capacitive Touch-Sensing Capability for Tactile Display, *Sensors (Basel)*, 20 (2020).
- [70] R.S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, G. Sandini, Tactile sensing-from humans to humanoids, *IEEE Transactions on Robotics*, 26 (2010) 1-20.

- [71] K. Watanabe, Y. Iwaki, Y. Uchida, D. Nakamura, H. Ikeda, M. Katayama, T. Cho, H. Miyake, Y. Hirakata, S. Yamazaki, A foldable OLED display with an in-cell touch sensor having embedded metal-mesh electrodes, *Journal of the Society for Information Display*, 24 (2016) 12-20.
- [72] Z. Zhao, J. Tang, J. Yuan, Y. Li, Y. Dai, J. Yao, Q. Zhang, S. Ding, T. Li, R. Zhang, Y. Zheng, Z. Zhang, S. Qiu, Q. Li, B. Gao, N. Deng, H. Qian, F. Xing, Z. You, H. Wu, Large-Scale Integrated Flexible Tactile Sensor Array for Sensitive Smart Robotic Touch, *ACS Nano*, 16 (2022) 16784-16795.
- [73] B. Dong, Y. Yang, Q. Shi, S. Xu, Z. Sun, S. Zhu, Z. Zhang, D.-L. Kwong, G. Zhou, K.-W. Ang, C. Lee, Wearable Triboelectric–Human–Machine Interface (THMI) Using Robust Nanophotonic Readout, *ACS Nano*, 14 (2020) 8915-8930.
- [74] K. Meng, X. Xiao, W. Wei, G. Chen, A. Nashalian, S. Shen, X. Xiao, J. Chen, Wearable Pressure Sensors for Pulse Wave Monitoring, *Advanced Materials*, 34 (2022).
- [75] X. Yu, Z. Xie, Y. Yu, J. Lee, A. Vazquez-Guardado, H. Luan, J. Ruban, X. Ning, A. Akhtar, D. Li, B. Ji, Y. Liu, R. Sun, J. Cao, Q. Huo, Y. Zhong, C. Lee, S. Kim, P. Gutruf, C. Zhang, Y. Xue, Q. Guo, A. Chempakasseril, P. Tian, W. Lu, J. Jeong, Y. Yu, J. Cornman, C. Tan, B. Kim, K. Lee, X. Feng, Y. Huang, J.A. Rogers, Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality, *Nature*, 575 (2019) 473-479.
- [76] V. Suresh Kumar, C. Krishnamoorthi, Development of electrical transduction based wearable tactile sensors for human vital signs monitor: Fundamentals, methodologies and applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, 321 (2021).
- [77] M.-H. Bao, Chapter 6 - Piezoresistive pressure transducers, in: M.-H. Bao (Ed.) *Handbook of Sensors and Actuators*, Elsevier Science B.V.2000, pp. 241-280.
- [78] W. Du, *Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies*, 2014.
- [79] G. Schönfelder, Measurement Errors, Measurement Accuracy and Measurement Parameters, in: E. Hering, G. Schönfelder (Eds.) *Sensors in Science and Technology: Functionality and Application Areas*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2022, pp. 793-802.
- [80] C. Chi, X. Sun, N. Xue, T. Li, C. Liu, *Recent Progress in Technologies for Tactile Sensors*, *Sensors*, 2018.
- [81] J. Oh, J.-O. Kim, Y. Kim, H.B. Choi, J.C. Yang, S. Lee, M. Pyatykh, J. Kim, J.Y. Sim, S. Park, Highly Uniform and Low Hysteresis Piezoresistive Pressure Sensors Based on Chemical Grafting of Polypyrrole on Elastomer Template with Uniform Pore Size, *Small*, 15 (2019) 1901744.
- [82] T. Islam, S.C. Mukhopadhyay, Linearization of the sensors characteristics: a review, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 12 (2019) 1-21.
- [83] M. Amjadi, K.-U. Kyung, I. Park, M. Sitti, Stretchable, Skin-Mountable, and Wearable Strain Sensors and Their Potential Applications: A Review, *Advanced Functional Materials*, 26 (2016) 1678-1698.
- [84] Y. Wan, Y. Wang, C.F. Guo, Recent progresses on flexible tactile sensors, *Materials Today Physics*, 1 (2017) 61-73.
- [85] Y. Zhu, Y. Liu, Y. Sun, Y. Zhang, G. Ding, Recent Advances in Resistive Sensor Technology for Tactile Perception: A Review, *IEEE Sensors Journal*, 22 (2022) 15635-15649.
- [86] Y. Li, L. Zheng, X. Wang, W. Huang, 2 - Resistive tactile sensors, in: Y. Zhou, H.-H. Chou (Eds.) *Functional Tactile Sensors*, Woodhead Publishing2021, pp. 13-30.
- [87] T. Nguyen, T. Dinh, H.-P. Phan, T.A. Pham, V.T. Dau, N.-T. Nguyen, D.V. Dao, Advances in ultrasensitive piezoresistive sensors: from conventional to flexible and stretchable applications, *Materials Horizons*, 8 (2021) 2123-2150.

- [88] Y. Ding, O. Onyilagha, Z. Zhu, 9 - Electrospun nanofibers for tactile sensors, in: Y. Zhou, H.-H. Chou (Eds.) *Functional Tactile Sensors*, Woodhead Publishing 2021, pp. 159-196.
- [89] Y. Qi, M.C. McAlpine, Nanotechnology-enabled flexible and biocompatible energy harvesting, *Energy & Environmental Science*, 3 (2010) 1275-1285.
- [90] E. Hering, K.-E. Biel, U. Guth, M. Liess, W. Vonau, Physical Effects of Sensor Use, in: E. Hering, G. Schönfelder (Eds.) *Sensors in Science and Technology: Functionality and Application Areas*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2022, pp. 5-145.
- [91] L. Zou, C. Ge, Z.J. Wang, E. Cretu, X. Li, Novel Tactile Sensor Technology and Smart Tactile Sensing Systems: A Review, *Sensors*, 2017.
- [92] P.S. Girão, P.M.P. Ramos, O. Postolache, J. Miguel Dias Pereira, Tactile sensors for robotic applications, *Measurement*, 46 (2013) 1257-1271.
- [93] T. Yang, D. Xie, Z. Li, H. Zhu, Recent advances in wearable tactile sensors: Materials, sensing mechanisms, and device performance, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 115 (2017) 1-37.
- [94] Z.L. Wang, Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors, *ACS Nano*, 7 (2013) 9533-9557.
- [95] M. Ma, Z. Zhang, Z. Zhao, Q. Liao, Z. Kang, F. Gao, X. Zhao, Y. Zhang, Self-powered flexible antibacterial tactile sensor based on triboelectric-piezoelectric-pyroelectric multi-effect coupling mechanism, *Nano Energy*, 66 (2019) 104105.
- [96] J. Tao, R. Bao, X. Wang, Y. Peng, J. Li, S. Fu, C. Pan, Z.L. Wang, Self-Powered Tactile Sensor Array Systems Based on the Triboelectric Effect, *Advanced Functional Materials*, 29 (2019) 1806379.
- [97] E. Hering, G. Schönfelder, S. Basler, K.-E. Biehl, T. Burkhardt, T. Engel, A. Feinäugle, S. Fericean, A. Forkl, C. Giebeler, B. Hahn, E. Halder, C. Herfort, S. Hubrich, J. Reichenbach, M. Röbel, S. Sester, Geometric Quantities, in: E. Hering, G. Schönfelder (Eds.) *Sensors in Science and Technology: Functionality and Application Areas*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2022, pp. 147-372.
- [98] J.W. Fastier-Wooller, T.-H. Vu, H. Nguyen, H.-Q. Nguyen, M. Rybachuk, Y. Zhu, D.V. Dao, V.T. Dau, Multimodal Fibrous Static and Dynamic Tactile Sensor, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14 (2022) 27317-27327.
- [99] M.A.U. Khalid, S.H. Chang, Flexible strain sensors for wearable applications fabricated using novel functional nanocomposites: A review, *Composite Structures*, 284 (2022).
- [100] H. Chen, Z. Su, Y. Song, X. Cheng, X. Chen, B. Meng, Z. Song, D. Chen, H. Zhang, Omnidirectional Bending and Pressure Sensor Based on Stretchable CNT-PU Sponge, *Advanced Functional Materials*, 27 (2017).
- [101] A. Al-Saygh, D. Ponnamma, M.A. AlMaadeed, P. Poornima Vijayan, A. Karim, M.K. Hassan, Flexible pressure sensor based on PVDF nanocomposites containing reduced graphene oxide-titania hybrid nanolayers, *Polymers*, 9 (2017) 33.
- [102] X. Han, Z. Lv, F. Ran, L. Dai, C. Li, C. Si, Green and stable piezoresistive pressure sensor based on lignin-silver hybrid nanoparticles/polyvinyl alcohol hydrogel, *International Journal of Biological Macromolecules*, 176 (2021) 78-86.
- [103] O. Kanoun, A. Bouhamed, R. Ramalingame, J.R. Bautista-Quijano, D. Rajendran, A. Al-Hamry, Review on Conductive Polymer/CNTs Nanocomposites Based Flexible and Stretchable Strain and Pressure Sensors, *Sensors*, 21 (2021) 1-29.
- [104] Y. Joo, J. Byun, N. Seong, J. Ha, H. Kim, S. Kim, T. Kim, H. Im, D. Kim, Y. Hong, Silver nanowire-embedded PDMS with a multiscale structure for a highly sensitive and robust flexible pressure sensor, *Nanoscale*, 7 (2015) 6208-6215.

- [105] S.J. Kim, S. Mondal, B.K. Min, C.G. Choi, Highly Sensitive and Flexible Strain-Pressure Sensors with Cracked Paddy-Shaped MoS₂/Graphene Foam/Ecoflex Hybrid Nanostructures, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10 (2018) 36377-36384.
- [106] E. Klimiec, W. Zaraska, S. Kuczyński, M. MacHnik, The investigation of electret film durability in polyethylene terephthalate (PET) from a certain angle of their application as pressure sensors, *Applied Mechanics and Materials*, 2012, pp. 1252-1258.
- [107] A. Hashim, Fabrication and characteristics of flexible, lightweight, and low-cost pressure sensors based on PVA/SiO₂/SiC nanostructures, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32 (2021) 2796-2804.
- [108] K. Ren, Y. Cheng, C. Huang, R. Chen, Z. Wang, J. Wei, Self-healing conductive hydrogels based on alginate, gelatin and polypyrrole serve as a repairable circuit and a mechanical sensor, *Journal of Materials Chemistry B*, 7 (2019) 5704-5712.
- [109] A. Dantas de Oliveira, C. Augusto Gonçalves Beatrice, *Polymer Nanocomposites with Different Types of Nanofiller, Nanocomposites - Recent Evolutions 2019*.
- [110] P.H.C. Camargo, K.G. Satyanarayana, F. Wypych, Nanocomposites: Synthesis, structure, properties and new application opportunities, *Materials Research*, 12 (2009) 1-39.
- [111] N. Bitinis, M. Hernandez, R. Verdejo, J.M. Kenny, M.A. Lopez-Manchado, Recent advances in clay/polymer nanocomposites, *Adv Mater*, 23 (2011) 5229-5236.
- [112] M.J. Dunlop, R. Bissessur, Nanocomposites based on graphene analogous materials and conducting polymers: a review, *Journal of Materials Science*, 55 (2020) 6721-6753.
- [113] T.K. Gupta, S. Kumar, Fabrication of Carbon Nanotube/Polymer Nanocomposites, *Carbon Nanotube-Reinforced Polymers 2018*, pp. 61-81.
- [114] M.I.B. Tavares, E.O.d. Silva, P.R.C.d. Silva, L.R.d. Menezes, *Polymer Nanocomposites, Nanostructured Materials - Fabrication to Applications 2017*.
- [115] F.R. Passador, A. Ruvolo-Filho, L.A. Pessan, Nanocomposites of Polymer Matrices and Lamellar Clays, *Nanostructures 2017*, pp. 187-207.
- [116] X. Wang, L. Wang, Q. Su, J. Zheng, Use of unmodified SiO₂ as nanofiller to improve mechanical properties of polymer-based nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 89 (2013) 52-60.
- [117] S.A. Mirmohammadi, S. Sadjadi, N. Bahri-Laleh, Electrical and Electromagnetic Properties of CNT/Polymer Composites, *Carbon Nanotube-Reinforced Polymers 2018*, pp. 233-258.
- [118] M. Nankali, N.M. Nouri, N. Geran Malek, M.A. Sanjari Shahrezaei, Electrical properties of stretchable and skin-mountable PDMS/MWCNT hybrid composite films for flexible strain sensors, *Journal of Composite Materials*, 53 (2019) 3047-3060.
- [119] F. He, S. Lau, H.L. Chan, J. Fan, High Dielectric Permittivity and Low Percolation Threshold in Nanocomposites Based on Poly(vinylidene fluoride) and Exfoliated Graphite Nanoplates, *Advanced Materials*, 21 (2009) 710-715.
- [120] H.J. Park, J.H. Yoon, K.G. Lee, B.G. Choi, Potentiometric performance of flexible pH sensor based on polyaniline nanofiber arrays, *Nano Converg*, 6 (2019) 9.
- [121] M.J. Uddin, J. Hassan, D. Douroumis, Thermal Inkjet Printing: Prospects and Applications in the Development of Medicine, *Technologies*, 10 (2022).
- [122] D. Maddipatla, B.B. Narakathu, M. Atashbar, Recent Progress in Manufacturing Techniques of Printed and Flexible Sensors: A Review, *Biosensors (Basel)*, 10 (2020).
- [123] M. Sarap, A. Kallaste, P. Shams Ghahfarokhi, H. Tiismus, T. Vaimann, Utilization of Additive Manufacturing in the Thermal Design of Electrical Machines: A Review, *Machines*, 10 (2022).
- [124] Q. Chen, H. Zhu, Structural Characterizations of Graphene, *Graphene 2018*, pp. 13-26.

- [125] G.J. Leggett, Scanning Probe Microscopy, Surface Analysis – The Principal Techniques 2009, pp. 479-562.
- [126] D.K. Schroder, Charge-Based and Probe Characterization, Semiconductor Material and Device Characterization 2005, pp. 523-562.
- [127] D.K. Schroder, Optical Characterization, Semiconductor Material and Device Characterization 2005, pp. 563-626.
- [128] M.E. Pemble, P. Gardner, Vibrational Spectroscopy from Surfaces, Surface Analysis – The Principal Techniques 2009, pp. 333-390.
- [129] I. Saini, A. Sharma, R. Dhiman, S. Aggarwal, S. Ram, P.K. Sharma, Grafted SiC nanocrystals: For enhanced optical, electrical and mechanical properties of polyvinyl alcohol, Journal of Alloys and Compounds, 714 (2017) 172-180.
- [130] N. Ben Halima, Poly(vinyl alcohol): review of its promising applications and insights into biodegradation, RSC Advances, 6 (2016) 39823-39832.
- [131] C. Daniel, J.O. Besenhard, Handbook of battery materials, John Wiley & Sons 2012.
- [132] A. Afzal, A. Kausar, M. Siddiq, Perspectives of Polystyrene Composite with Fullerene, Carbon Black, Graphene, and Carbon Nanotube: A Review, Polymer - Plastics Technology and Engineering, 55 (2016) 1988-2011.
- [133] B.B. Beenarani, C.P. Sugumaran, A flexible, cost-effective, and eco-friendly solid state supercapacitor based on PVA/KCl/Carbon black nanocomposite, Ionics, 26 (2020) 1465-1473.
- [134] D. Janczak, M. Słoma, G. Wróblewski, A. Młóżniak, M. Jakubowska, Screen-Printed Resistive Pressure Sensors Containing Graphene Nanoplatelets and Carbon Nanotubes, Sensors, 2014, pp. 17304-17312.
- [135] N.S.a.A.C. Kumar, History of Carbon Nanotubes, in: S.T. Jiji Abraham, Nandakumar Kalarikkal (Ed.) Handbook of Carbon Nanotubes, Springer 2022.
- [136] Z. Ren, Y. Lan, Y. Wang, Aligned carbon nanotubes: physics, concepts, fabrication and devices, Springer Science & Business Media 2012.
- [137] R. Ghasempour, H. Narei, CNT Basics and Characteristics, Carbon Nanotube-Reinforced Polymers 2018, pp. 1-24.
- [138] M.N. Norizan, M.H. Moklis, S.Z. Ngah Demon, N.A. Halim, A. Samsuri, I.S. Mohamad, V.F. Knight, N. Abdullah, Carbon nanotubes: functionalisation and their application in chemical sensors, RSC Adv, 10 (2020) 43704-43732.
- [139] F. Avilés, J.V. Cauich-Rodríguez, P. Toro-Estay, M. Yazdani-Pedram, H. Aguilar-Bolados, Improving Carbon Nanotube/Polymer Interactions in Nanocomposites, Carbon Nanotube-Reinforced Polymers 2018, pp. 83-115.
- [140] B. Ganesh Kumar, K.S. Prakash, Functionalization of carbon nanotubes: Fundamentals, strategies, and tuning of properties, Functionalized Carbon Nanomaterials for Theranostic Applications 2022, pp. 181-193.
- [141] S.M. Ghoreishi, M. Behpour, S. Mousavi, A. Khoobi, F.S. Ghoreishi, Simultaneous electrochemical determination of dopamine, ascorbic acid and uric acid in the presence of sodium dodecyl sulphate using a multi-walled carbon nanotube modified carbon paste electrode, RSC Adv., 4 (2014) 37979-37984.
- [142] X. Zeng, D. Yang, H. Liu, N. Zhou, Y. Wang, W. Zhou, S. Xie, H. Kataura, Detecting and Tuning the Interactions between Surfactants and Carbon Nanotubes for Their High-Efficiency Structure Separation, Advanced Materials Interfaces, 5 (2018).
- [143] E. Menna, F. Della Negra, M. Dalla Fontana, M. Meneghetti, Selectivity of chemical oxidation attack of single-wall carbon nanotubes in solution, Physical Review B, 68 (2003).
- [144] E.A. Farrag, R.A. Abdel-Rahem, S. Ibrahim, A.S. Ayesh, Electrical and optical properties of well-dispersed MWCNTs/PVA nanocomposites under different pH conditions, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 32 (2019) 442-453.

- [145] T. D'yachkova, A. Rukhov, E. Tugolukov, N. Usoltseva, Y. Khan, N. Chapaksov, Studying of Structural Changes of Graphene Layers of Carbon Nanotubes Functionalized by Raman Spectroscopy, *Liquid Crystals and their Application*, 17 (2017) 83-89.
- [146] T.-Y. Chen, T.-L. Lin, C.-C. Chen, C.-M. Chen, C. Chia-Fu, Improved Catalytic Performance of Pt Supported on Multi-Wall Carbon Nanotubes as Cathode for Direct Methanol Fuel Cell Applications Prepared by Dual-Stepped Surface Thiolation Processes, *Journal of the Chinese Chemical Society*, 56 (2009) 1236-1243.
- [147] N. Plank, Functionalisation of carbon nanotubes for molecular electronics, University of Edinburgh, 2005.
- [148] T.G. Sunil, S.H. Aditya, V.D. Shradhey, R.M. Omkar, S.K. Pranav, V.N. Supriya, G.K. Suresh, Silver Nanoparticles: Properties, Synthesis, Characterization, Applications and Future Trends, in: K. Samir, K. Prabhat, P. Chandra Shakher (Eds.) *Silver Micro-Nanoparticles*, IntechOpen, Rijeka, 2021, pp. Ch. 4.
- [149] D. Markus, S. Thathit, S.a. Ulwiyatus, M. Nandang, F. Abdulloh, H. Arif, N. Hadi, Modification of Electrical Properties of Silver Nanoparticle, in: M. Khan (Ed.) *Silver Nanoparticles*, IntechOpen, Rijeka, 2018, pp. Ch. 12.
- [150] W. Zhou, Z. Jia, P. Xiong, J. Yan, Y. Li, M. Li, Y. Cheng, Y. Zheng, Bioinspired and Biomimetic AgNPs/Gentamicin-Embedded Silk Fibroin Coatings for Robust Antibacterial and Osteogenetic Applications, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9 (2017) 25830-25846.
- [151] A. Grinou, H. Bak, Y.S. Yun, H.-J. Jin, Polyaniline/Silver Nanoparticle-Doped Multiwalled Carbon Nanotube Composites, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 33 (2012) 750-755.
- [152] M. Srikanta, G. Ankita Subhrasmita, N. Rozalin, M. Ram Naresh, Synthesis, Dielectric and Electrical Properties of Silver-Polymer Nanocomposites, in: K. Samir, K. Prabhat, P. Chandra Shakher (Eds.) *Silver Micro-Nanoparticles*, IntechOpen, Rijeka, 2021, pp. Ch. 1.
- [153] L. Ren, X. Zeng, X. Zhang, R. Sun, X. Tian, Y. Zeng, J.-B. Xu, C.-P. Wong, Silver nanoparticle-modified alumina microsphere hybrid composites for enhanced energy density and thermal conductivity, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 119 (2019) 299-309.
- [154] E. Palaimiene, S. Schaefer, J. Macutkevicius, J. Banys, A. Selskis, V. Fierro, A. Celzard, Electrical percolation and electromagnetic properties of polydimethylsiloxane composites filled with Ag nanoparticles of different sizes, *Polymer Composites*, 41 (2020) 4750-4756.
- [155] S. Linic, U. Aslam, C. Boerigter, M. Morabito, Photochemical transformations on plasmonic metal nanoparticles, *Nature Materials*, 14 (2015) 567-576.
- [156] R.R. Arvizo, S. Bhattacharyya, R.A. Kudgus, K. Giri, R. Bhattacharya, P. Mukherjee, Intrinsic therapeutic applications of noble metal nanoparticles: past, present and future, *Chemical Society reviews*, 41 7 (2012) 2943-2970.
- [157] D. Chen, X. Qiao, X. Qiu, J. Chen, Synthesis and electrical properties of uniform silver nanoparticles for electronic applications, *Journal of Materials Science*, 44 (2009) 1076-1081.
- [158] N. Joshi, N. Jain, A. Pathak, J. Singh, R. Prasad, C.P. Upadhyaya, Biosynthesis of silver nanoparticles using *Carissa carandas* berries and its potential antibacterial activities, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 86 (2018) 682-689.
- [159] A.S. Mohammed, K. Andrzej, Processing of Graphene/Elastomer Nanocomposites: A Minireview, in: S. Ashutosh (Ed.) *Nanocomposite Materials for Biomedical and Energy Storage Applications*, IntechOpen, Rijeka, 2022, pp. Ch. 9.
- [160] P. Cataldi, A. Athanassiou, I.S. Bayer, Graphene Nanoplatelets-Based Advanced Materials and Recent Progress in Sustainable Applications, *Applied Sciences*, 2018.

- [161] K. Bilisik, M. Akter, Graphene nanoplatelets/epoxy nanocomposites: A review on functionalization, characterization techniques, properties, and applications, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 41 (2021) 99-129.
- [162] A.E. Del Rio Castillo, V. Pellegrini, A. Ansaldo, F. Ricciardella, H. Sun, L. Marasco, J. Buha, Z. Dang, L. Gagliani, E. Lago, N. Curreli, S. Gentiluomo, F. Palazon, M. Prato, R. Oropesa-Nuñez, P.S. Toth, E. Mantero, M. Crugliano, A. Gamucci, A. Tomadin, M. Polini, F. Bonaccorso, High-yield production of 2D crystals by wet-jet milling, *Materials Horizons*, 5 (2018) 890-904.
- [163] R. Sengupta, M. Bhattacharya, S. Bandyopadhyay, A.K. Bhowmick, A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites, *Progress in Polymer Science*, 36 (2011) 638-670.
- [164] M. Hamidinejad, B. Zhao, A. Zandieh, N. Moghimian, T. Filleter, C.B. Park, Enhanced Electrical and Electromagnetic Interference Shielding Properties of Polymer–Graphene Nanoplatelet Composites Fabricated via Supercritical-Fluid Treatment and Physical Foaming, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10 (2018) 30752-30761.
- [165] M. Rashad, F. Pan, Z. Yu, M. Asif, H. Lin, R. Pan, Investigation on microstructural, mechanical and electrochemical properties of aluminum composites reinforced with graphene nanoplatelets, *Progress in Natural Science: Materials International*, 25 (2015) 460-470.
- [166] D. Yaling, Y. Ningning, O. Oseweuba Valentine, S. Amin, N. Lei, Alginate-Based Composite and Its Biomedical Applications, in: D. Irem, I. Esra, K.-G. Tugba (Eds.) *Properties and Applications of Alginates*, IntechOpen, Rijeka, 2021, pp. Ch. 6.
- [167] B. Kılıçarslan, I. Bozyel, D. Gökçen, C. Bayram, Sustainable Macromolecular Materials in Flexible Electronics, *Macromolecular Materials and Engineering*, 307 (2022).
- [168] K. Ankur, K. Ashish, K. Prashant, S. Arpana, T. Kanchan, G. Jitender, P. Manju, O. Balram Ji, Introduction to Alginate: Biocompatible, Biodegradable, Antimicrobial Nature and Various Applications, in: S. Dr. Ihana Aguiar, M. Dr. André Bellin, V. Dr. José Viriato Coelho (Eds.) *Alginate - Applications and Future Perspectives*, IntechOpen, Rijeka, 2023, pp. Ch. 5.
- [169] R. Lou, W. Yu, Y. Song, Y. Ren, H. Zheng, X. Guo, Y. Lin, G. Pan, X. Wang, X. Ma, Fabrication of stable galactosylated alginate microcapsules via covalent coupling onto hydroxyl groups for hepatocytes applications, *Carbohydrate Polymers*, 155 (2017) 456-465.
- [170] D.M. Roquero, E. Katz, “Smart” alginate hydrogels in biosensing, bioactuation and biocomputing: State-of-the-art and perspectives, *Sensors and Actuators Reports*, 4 (2022) 100095.
- [171] J. Yang, X. Sun, Q. Kang, L. Zhu, G. Qin, Q. Chen, Freezing-tolerant and robust gelatin-based supramolecular conductive hydrogels with double-network structure for wearable sensors, *Polymer Testing*, 93 (2021) 106879.
- [172] X. Li, L. Cao, L.-p. Chen, Multifunctional ionic conductive hydrogels based on gelatin and 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid as strain sensors, *Biochemical Engineering Journal*, 187 (2022) 108606.
- [173] A.T. Singh, D. Lantigua, A. Meka, S. Taing, M. Pandher, G. Camci-Unal, Paper-Based Sensors: Emerging Themes and Applications, *Sensors*, 18 (2018) 2838.
- [174] S.C.B. Mannsfeld, B.C.K. Tee, R.M. Stoltenberg, C.V.H.H. Chen, S. Barman, B.V.O. Muir, A.N. Sokolov, C. Reese, Z. Bao, Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers, *Nature Materials*, 9 (2010) 859-864.
- [175] S. Rao, S.N.S. Devi, A. Johns, E. Kalkornsurapranee, M.P. Sham Aan, J. Johns, Mechanical and thermal properties of carbon black reinforced natural rubber/polyvinyl

- alcohol fully-interpenetrating polymer networks, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 24 (2018) E21-E29.
- [176] M. Usach, How to Configure the AD5933/AD5934, 2013.
- [177] M. Mohiuddin, S. Van Hoa, Electrical resistance of CNT-PEEK composites under compression at different temperatures, *Nanoscale Research Letters*, 6 (2011) 419.
- [178] Y. Cai, J. Shen, G. Ge, Y. Zhang, W. Jin, W. Huang, J. Shao, J. Yang, X. Dong, Stretchable Ti₃C₂T_x MXene/Carbon Nanotube Composite Based Strain Sensor with Ultrahigh Sensitivity and Tunable Sensing Range, *ACS Nano*, 12 (2018) 56-62.
- [179] S. Tong, W. Yuan, H. Liu, Alamusi, N. Hu, C. Zhao, Y. Zhao, Linear strain sensor made of multi-walled carbon nanotube/epoxy composite, *Materials Research Express*, 4 (2017) 115008.
- [180] J. Chang, G. Liang, A. Gu, S. Cai, L. Yuan, The production of carbon nanotube/epoxy composites with a very high dielectric constant and low dielectric loss by microwave curing, *Carbon*, 50 (2012) 689-698.
- [181] P. Wang, G. Li, J. Liu, Z. Hou, C. Meng, S. Guo, C. Liu, S. Fan, Tailorable Capacitive Tactile Sensor Based on Stretchable and Dissolvable Porous Silver Nanowire/Polyvinyl Alcohol Nanocomposite Hydrogel for Wearable Human Motion Detection, *Advanced Materials Interfaces*, 8 (2021).
- [182] Z. Xu, D. Wu, Z. Chen, Z. Wang, C. Cao, X. Shao, G. Zhou, S. Zhang, L. Wang, D. Sun, A flexible pressure sensor with highly customizable sensitivity and linearity via positive design of microhierarchical structures with a hyperelastic model, *Microsystems and Nanoengineering*, 9 (2023).
- [183] A. Eisape, V. Rennoll, T. Van Volkenburg, Z. Xia, J.E. West, S.H. Kang, Soft CNT-Polymer Composites for High Pressure Sensors, *Sensors*, 22 (2022).
- [184] J. Guo, C. Shang, S. Gao, Y. Zhang, B. Fu, L. Xu, Flexible Plasmonic Optical Tactile Sensor for Health Monitoring and Artificial Haptic Perception, *Advanced Materials Technologies*, 8 (2023).
- [185] J. Luo, F. Liu, A. Yin, X. Qi, J. Liu, Z. Ren, S. Zhou, Y. Wang, Y. Ye, Q. Ma, J. Zhu, K. Li, C. Zhang, W. Zhao, S. Yu, J. Wei, Highly sensitive, wide-pressure and low-frequency characterized pressure sensor based on piezoresistive-piezoelectric coupling effects in porous wood, *Carbohydrate Polymers*, 315 (2023) 120983.
- [186] K.-B. Chang, P. Parashar, L.-C. Shen, A.-R. Chen, Y.-T. Huang, A. Pal, K.-C. Lim, P.-H. Wei, F.-C. Kao, J.-J. Hu, Z.-H. Lin, A triboelectric nanogenerator-based tactile sensor array system for monitoring pressure distribution inside prosthetic limb, *Nano Energy*, 111 (2023) 108397.
- [187] S. Naval, P. Verma, A. Jain, D. Mallick, Hybrid vector and pressure sensor for fingertip dynamics sensing using DC-triboelectric/AC-piezoelectric mechanisms, *Sensors and Actuators A: Physical*, 355 (2023) 114330.

EKLER

EK 1 - Tezden Türetilmiş Yayınlar

1. Sekertekin Y., Gokcen D. Fully Flexible Impedance–Based Pressure Sensing via Nanocomposites of Polyvinyl Alcohol filled with Multiwalled Carbon Nanotubes, Graphene Nanoplatelets and Silver Nanoparticles. 2023 (Gönderildi)
2. Sekertekin Y., Bozyel I., Gokcen D. A Flexible and Low-Cost Tactile Sensor Produced by Screen Printing of Carbon Black/PVA Composite on Cellulose Paper. Sensors. 2020; 20(10):2908. <https://doi.org/10.3390/s20102908>

EK 2 - Tezden Türetilmiş Bildiriler

1. Sekertekin, Y., Gokcen, D. Composites of functionalized multi-walled carbon nanotube and sodium alginate for tactile sensing applications, in Proceedings of the 9th International Electronic Conference on Sensors and Applications, 1–15 November 2022, MDPI: Basel, Switzerland, doi:10.3390/ecsa-9-13349