MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASINCA DUYARLI MWCNTS DEKORATİF ELEKTROSPUN MWCNTS/TPU NANOLİF YAPILARIN SENTEZ VE PİEZORİZİSTİF KARAKTERİZASYONU

İHSAN FATİH ERTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı Tekstil Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Muhammet UZUN

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Abdulkadir ŞANLI

İSTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BASINCA DUYARLI MWCNTS DEKORATİF ELEKTROSPUN MWCNTS/TPU NANOLİF YAPILARIN SENTEZ VE PİEZORİZİSTİF KARAKTERİZASYONU

İHSAN FATİH ERTAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı Tekstil Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Muhammet UZUN

EŞ-DANIŞMAN
Dr. Abdulkadir ŞANLI

İSTANBUL, 2024

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen herkese teşekkür etmek istiyorum. Öncelikle, değerli danışmanım Prof. Dr. Muhammet Uzun'a, bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik ettiği için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması Dr. Abdulkadir Şanlı danışmanlığında TUBİTAK 3501 projesi kapsamında Türk Alman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi desteği ile hazırlanmıştır.

Bugüne dek aldığım her kararda yanımda olan, desteğini esirgemeyen, yürüdüğüm yolda beni inançla destekleyen, yoluma ışık tutan kıymetli aileme, varlığıyla bana umut olan her zaman yanımda olduğunu hissettiren hayat arkadaşım Serpil Tatlı'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

EKİM 2024 **İHSAN FATİH ERTAŞ**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
ÖZET iv
ABSTRACT v
SEMBOLLER vi
1. GİRİŞ VE AMAÇ 1
1.1. Nanofiber Ve Nanoteknoloji 3
1.2. Nanoteknolojinin Tekstilde Kullanımı 4
1.2.1. Su Geçirmezlik 4
1.2.2. UV Koruması 5
1.2.3. Antimikrobiyal 5
1.2.4. Antistatik 5
1.2.5. Kırışıklık Direnci 5
1.2.6. Yangına Dayanıklılık 5
1.2.7. Giyilebilir Sensörler 6
1.3. Tekstilde Kullanılan Nanomalzemeler 7
1.4. Elektronik Tekstiller 8
1.5. Akıllı Tekstiller 9
1.6. Sensör Özelliğindeki Tekstiller 11
1.7. Basınç Sensörleri 12
1.8. Karbon Lifi İçeren Maddeler 13
1.9. Karbon Nanotüp(CNT) 14
1.10. Termoplastik Poliüretan(TPU) 16
1.11. CNT/TPU Basınç Sensörleri Ve Günümüz Teknolojisindeki Önemi 18
1.12. İletken Polimerler 18
1.13. Elektro Eğirme Yöntemi 21
1.14. Elektroeğirme Yöntemini Etkileyen Parametreler 22
2. GENEL BİLGİLER 23
2.1. Materyal 23
2.2. Kullanılan Malzemeler 24
2.2.1. Hassas Terazi 24
2.2.2. Numune İletkenliği Ölçüm Cihazı 24

2.2.3. Çözelti İletkenliği Ölçüm Cihazı 24
2.2.4. Viskozimetre 25
2.1.2. Çalışmadaki Çözücü Kimyasallar 30
2.2. Metod 31
2.2.1. CNT/TPU Çözeltisinin Hazırlanması 31
2.2.2. Elektrospinning Aşaması 34
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 35
3.1. Tahta Parçalarıyla Yapılan Basınç Testi 35
3.2. Arpa Şehriye/Nohut Ve Bakır Bant İle Yapılan Basınç Testi 36
3.3. Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi Sonuçları 38
3.4. Bağıl Direnç Testi 41
3.5. FTIR Sonuçları 43
3.6. Sem Analizi Sonuçları 44
3.7. Kalınlık Ölçümü 48
3.8. Çözelti İletkenliği Ve Viskozite Testi 50
3.9. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi Sonuçları 51
3.10. Şişme Testi 53
4. SONUÇ 56
Kaynakça 60

ÖZET

BASINCA DUYARLI MWCNTS DEKORATİF ELEKTROSPUN MWCNTS/TPU NANOLİF YAPILARIN SENTEZ VE PİEZORİZİSTİF KARAKTERİZASYONU

Son yıllarda küresel giyim ve tekstil sanayilerinde geleneksel ürünlerden bilgiyi algılayan,yenilikçi ve katma değeri yüksek akıllı teknik tekstillere doğru geçiş çalışmaları yapılmaktadır. Giyilebilir biyosensörler, kişiselleştirilmiş sağlık ve tıpta devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Deri yüzeyinde çalışmakta olan bu sistemler ile sürdürülebilir ve noninvaziv hastalık teşhisi ve aynı zamanda sağlık takibi sağlamaktadır. Bu sebeplerden giyilebilir elektronik cihazlara yönelik artan talebi karşılamak için fiziksel ve mekanik değişiklikleri izlemek amacıyla çeşitli sensörler geliştirilmiştir. Yüksek gerilim duyarlılığının yanı sıra hem de iyi nefes alabilirliğe sahip çok işlevli esnek bir sensör tasarlamak günümüz çalışmalarının ana konusudur. Bununla ilgili olarak tekstil mühendisliğinin, kimya, elektronik ve malzeme bilimi gibi diğer bilimlerle, multidisipliner bir çalışma alanına zemin oluşturmuştur. Giyilebilir sensörler, akıllı tekstillerin önemli bir kısmını oluşturmaktadır ve geleneksel tekstillere inovatif bir bakış açısı yaratacak gelişmeleri içermektedir. Elektronik elemanlar rijittir ve genellikle bükülme hareketleri altında deforme olmaktadır. Giyilebilir kumaş sensörler, geleneksel elektronik sensörlerle kıyaslandığında esneklik, hafiflik veucuzluk gibi birçok farklı avantaja da sahip olduğunu göstermektedir.

Bu tez kapsamında esnek, iletken ve hassas bir yapıda olabilmesi için piezorezistif basınç sensörü olarak kullanılmak üzere elektro eğirme tekniğinden yararlanılarak karbon nanotüp (CNT)/ termoplastik poliüretan (TPU) nanolif yapılar üretilmiştir. İlk aşamada literatürdeki standart üretim metodu uygulanarak CNT:TPU:DMF,TPU:DMF, TPU:THF ve TPU:DMF:THF çözeltileri hazırlanarak elektrospinning ile nanolif yapılar üretilmiştir. Çeşitli oranlarda (%0,5 CNT- %0,75CNT- %1CNT) hazırlanıp elektro eğirme cihazında üretilerek karbon nanotüp etkisi gözlemlenmiştir. Böylece optimum karbon nanotüp oranı belirlenmiştir. Daha sonra çözücü etkisine bakmak amacıyla saf TPU çözeltisini THF, DMF ve THF:DMF(1:1) şeklinde üretim yapılarak bu defa çözücüden kaynaklı değişimler de gözlenmiştir. Daha sonra elektro eğirme parametreleri değiştirilerek denemeler yapılarak optimum çekim parametreleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, kolektör dönüş hızı, mesafesi ve çekim süresi değiştirilmiştir. Elde edilen ürünlerin karakterizasyonu için gerekli analiz ve ölçümler gerçekleştirilerek uygun üretim parametreleri belirlenmiştir.

ABSTRACT

SYNTHESİS AND PİEZORESİSTİVE CHARACTERİZATİON OF PRESSURE-SENSİTİVE MWCNTS DECORATED ELECTROSPUN MWCNTS/TPU NANOFİBROUS STRUCTURES

In recent years, the global garment and textile industries have been working on the transition from traditional products to innovative, high-value-added smart technical textiles that perceive information. Wearable biosensors have the potential to revolutionize personalized health and medicine. With these systems operating on the skin surface, it provides sustainable and noninvasive disease diagnosis and health monitoring at the same time. For these reasons, various sensors have been developed to monitor physical and mechanical changes in order to meet the growing demand for wearable electronic devices. Designing a multifunctional flexible sensor with both high voltage sensitivity and good breathability is the main theme of today's work. In relation to this, it has formed the basis for a multidisciplinary field of study of textile engineering with other sciences such as chemistry, electronics and materials science. Wearable sensors constitute an important part of smart textiles and include developments that will create an innovative perspective on traditional textiles. Electronic elements are rigid and usually deform under bending movements. Wearable fabric sensors also show that they have many different advantages compared to traditional electronic sensors, such as flexibility, lightness and cheapness. Within the scope of this thesis, carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) nanoliferous structures have been produced by using electro spinning technique to be used as piezoresistive pressure sensor in order to have a flexible, conductive and sensitive structure. At the first stage, nanoliferous structures were produced by electrospinning by preparing CNT:TPU:DMF, TPU:DMF, TPU:THF and TPU:DMF:THF solutions by applying the standard production method in the literature. The carbon nanotube effect was observed by preparing solutions containing carbon nanotubes in various proportions (0.5% CNT-0.75%CNT-1CNT) and producing them in an electro spinning device. The optimal ratio of carbon nanotubes was determined.

Order to look at the solvent effect, pure TPU solution was produced in the form of THF, DMF and THF:DMF(1:1) and solvent- induced changes were observed this time. Then, the optimum shooting parameters were determined by changing the electro spinning parameters and conducting experiments. In this context, the collector rotation speed, distance and shooting time have been changed. The necessary analyses and measurements were carried out for the characterization of the obtained products and the appropriate production parameters were determined.

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

rpm : Tambur dönüş hızı

% : Yüzde

°C : Santigrat derece

µS/cm : İletkenlik ölçü birimi

µm: mikrometre

cm : Santimetre

cP : Centipoise

h: Saat

Kv:Kilovolt

kOhm : Kiloohm

mOhm: Megaohm

mL : Mililitre

mL/h : Saatteki mililitre akış

mm : Milimetre

nm : Nanometre

w/w : Kütlece Yüzde

%wt: Çözelti konsantrasyon yüzdesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Tekstilde Nanoteknoloji Uygulamaları 4
Şekil 2.1.KERN PFP200-3 Hassas Terazi 24
Şekil 2.2.Resistivity Test Fixture Cihazı 24
Şekil 2.3.WTW COND3110 İletkenlik Ölçüm Cihazı 25
Şekil 2.4.Brookfield RVDVE Viskozimetre 25
Şekil 2.5.Isolab Manyetik Karıştırıcı.....26
Şekil 2.6.Inovenso NE300 Elektro Eğirme Cihazı 26
Şekil 2.7.MITUTOYO 547-401 Kalınlık Ölçüm Cihazı 27
Şekil 2.8.Quorum® SC7620 Kaplama Cihazı 27
Şekil 2. 9.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....28
Şekil 2.10.Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) Analiz Cihazı.....29
Şekil 2. 11.Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometrisi (FT-IR) Analiz Cihazı 29
Şekil 2. 12.Kullanılan Dimetilformamid (DMF) Ve Kimyasal Yapısı 30
Şekil 2.13.Kullanılan Etanol(EtOH) Ve Kimyasal Yapısı.....31
Şekil 2.14.CNT:TPU:DMF Çözeltisi Hazırlanış Aşamaları.....31
Şekil 2. 15.CNT İçeren (a) ve Saf TPU'lu (b) Nanolif Örnekleri 34
Şekil 3.1.Tahta Parçalarıyla Uygulanan Basınç Testi 35
Şekil 3.2. Arpa Şehriye ve Nohut ile Uygulanan Basınç Testi…… 36
Şekil 3.3.Daldırma Yapılmış(a) ve Daldırma Yapılmamış(b) FTIR Sonuçları..... …..43
Şekil 3.4.CNT: TPU: DMF (1) (a), CNT: TPU: DMF (0,75) (b), CNT: TPU: DMF (0,5) (c) , TPU:DMF (d) , TPU:THF (e) , TPU:DMF:THF (f) Sem Görüntüleri…… ….. 45
Şekil3.5.d-CNT/CNT:TPU:DMF(1)(a),d-CNT/CNT:TPU:DMF(0,75)(b), d- CNT/CNT:TPU:DMF (0,5)(c),d CNT/TPU:DMF(d),d-CNT/TPU:DMF(e), CNT/:TPU:DMF:THF (f)…….. ….. 46
Şekil 3.6.Daldırma İşlemi Yapılmamış Basınç Sensörü Numunelerinin DSC Eğrileri..... 52
Şekil 3. 7.Daldırma İşlemi Yapılmış Basınç Sensörü Numunelerinin DSC Eğrileri……..... …..52

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1.Tekstilde Kullanılan Nanomalzemelerin Özellikleri 8
Tablo 2.1.Kullanılan ham maddeler ile kimyasallar ve tedarik edilen firmaları 23
Tablo 2. 2.Elektro eğirme Parametreleri..... 33
Tablo 3.1. Tahta Parçalarıyla Uygulanan Basınç Testi …….. …...35
Tablo 3.2. Bakır Bant Arpa Şehriye Basınç / Direnç Değerleri-TPU……..... …...37

Tablo 3.3.Bakır Bant Arpa Şehriye Basınç / Direnç Değerleri……... …..38
Tablo 3.4. 1.Hafta Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi……... 39
Tablo 3.5. 2.Hafta Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi……... …...39
Tablo 3.6. 3.Hafta Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi…….. …..39
Tablo3.7.4.Hafta Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi……. …...39
Tablo 3.8. 2 cm^2 Alana Sahip Sensör Numunelerinin Bağıl Basınç Değerleri……. ….. 42
Tablo 3.9. Nanolif Yapılardaki Dikey ve Yatay Kalınlık Değerleri……..… …...49
Tablo 3.10.Çözelti İletkenlik ve Viskozite Değerleri…….. …… …...50

GRAFİK LİSTESİ

Grafik 3.1. Bakır Bant Arpa Şehriye Basınç / Direnç Grafiği..... 37
Grafik 3.2.Bakır Bant Arpa Şehriye Basınç / Direnç Grafiği-TPU 38
Grafik 3.3.Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü-CNT 39
Grafik 3.4.Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü -TPU 40
Grafik 3.5. Bağıl Basınç TPU- CNT 42
Grafik 3.6. Dikey ve Yatay Kalınlık Değerleri.....49
Grafik 3.7. Daldırma Yapılmış Numunelere Uygulanan Şişme Testi 55
Grafik3.8.Daldırma Yapılmamış Numunelere Uygulanan Şişme Testi 55

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Son zamanlarda, esnek giyilebilir gerinim/basınç sensörleri, insan sağlığı izleme,yapay elektronik cilt (E-skin), konuşma tanıma sistemlerindeki büyük potansiyele sahip uygulamalarıyla sadece gelişmiş malzeme performansları nedeniyle değil, aynı zamanda çeşitli alanlardaki ticari potansiyelleri nedeniyle de, son yıllarda fazlasıyla ilgi çekmektedir [1]. Basınç sensörü, hareket algılama, sağlık takibi, insan-makine etkileşimi ve yapay zeka teknolojisi gibi farklı uygulamalarla insanların her geçen gün daha çok talep ve ilgi göstermesine sebep olmaktadır. Nanoteknoloji ile ilgili yapılan çalışmalarda günümüzde daha çok nanolif üretimi ile apılmakta olan araştırmalarına odaklanmaktadır. Bazı üniversitelerde yapılan projelerin amaçları arasında nanolif yapıda da üretilebilen nanotüplerin metal matris içinde homojen bir şekilde dağılmasıyla kompozit malzemelerin üretilmesi, mekanik, termal ve elektriksel özelliklerin iyileştirilmesi ve bsınca duyarlı hassasiyeti yüksek olarak şekillendirme çalışmaları yer almaktadır. Bu amaçla, hedeflenen basınç sensörü bazı tipik özelliklere sahip olmalıdır. Elastomer özellikte olmasının yanı sıra mükemmel elektriksel özellikler, hızlı tepki süresi, uzun hizmet dayanıklılığı, sürdürülebilir kullanım yüksek hassasiyet ve düşük üretim maliyeti vb. gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir [2,3]. Giyilebilir sensör uygulamaları için yapay algılama sistemlerinin kullanımı,sağlık izleme sorunları için yaygın olarak kullanılmaktadır ve giyilebilir elektronik ya da cilde takılan cihazlar için daha fazla gelişme gerekmektedir. Bu tür mikro ve nano ölçekli cihazların bu işlevleri, kendi kendine güç sağlayan giyilebilir basınç sensörleri aracılığıyla sağlık izleme için daha yüksek hassasiyete yönelik piezo-elektrik, triboelektrik ve piezodirençli mekanizmalara dayanmaktadır.Örneğin, klinik ayak basıncı algılama sistemleri genellikle ayak basıncı dağılımını analiz etmek için kullanılır. Boks veya yumruk basıncına dayalı olan sensör sistemleri de atlet eğitimi için yaygın olarak kullanılmaktadır.Çeşitli basınç sensörleri türleri arasında daha dayanıklı olanlar sistem entegrasyonu için kolaylık sağlaması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Esnek basınç sensörleri, direnç , kapasitans, piezoelektriklik ve endüktans dahil olmak üzere çeşitli ilkelere dayalı olarak geliştirilmiştir. Esnek basınç sensörünün çalışma mekanizması, deformasyonu dirençteki bağıl değişime dönüştürmektir. Bu nanomalzemelerin yuvarlaklık, levha ve ince yapı gibi farklı yapıları nedeniyle, çeşitli iletken ağlar elde edilebilir. Bunların arasında, tek bir katmanın veya birden fazla grafen nanoplaka katmanının kıvrılmasıyla elde edilen benzersiz

tek boyutlu ince boru şeklindeki yapıya sahip CNT'ler,olağanüstü iletkenlik ve fiziksel özellikler sergiler [4].

Son zamanlardaki arayüzey teknolojisi araştırma alanı, nanomalzemelerin (kil, grafen, karbon nanotüpler vb.) lif yüzeyine veya matris içine girmesinin büyük ilgi gördüğünü göstermektedir. Her iki yaklaşımda da potansiyel olarak FRP kompozitlerinin mekanik performansında önemli bir kazanımlar elde edilir. Bu çalışmalara bakılarak matris içinde veya lif yüzeyi üzerinde dağılmış işlevselleştirilmiş nanomalzemelerin varlığının sadece arayüzey yapışmasını iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda çatlak köprüleme, çatlak saptırma ve çatlak durdurma mekanizmaları yoluyla geçerli kırılma mekanizmalarını da değiştirdiği görülmektedir [5].

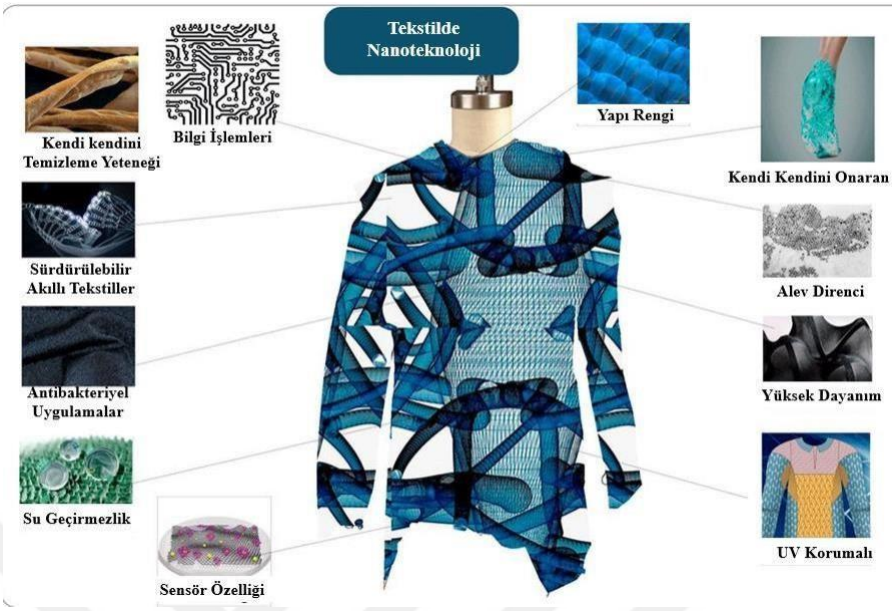
Sensör uygulamaları için kullanılan polimerlerden olan kısa lif takviyeli polimer (SFRP) kompozitler, mükemmel mekanik özelliklere, düşük üretim maliyetine, nispeten kolay şekillendirilebilirliğe, korozyon direncine ve karmaşık geometri şekilleri için tasarım özgürlüğüne sahip hafif malzemelerdir. Olağanüstü genel performansı sayesinde SFRP kompozitleri birçok endüstriyel üründe, özellikle otomobil bileşenlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. SFRP kompozitlerinin üretimindeki en yaygın üretim süreci olan enjeksiyon kalıplama, kompozitlerde kaçınılmaz olarak karmaşık mikro yapılara neden olur. Katmanlı yüzey-çekirdek-yüzey yapısı, lif oryantasyon dağılımı, lif uzunluğu dağılımı ve lif içeriği varyasyonu sırasıyla gözlenir ve ölçülür. Karmaşık mikroyapılar, SFRP kompozitlerinin karmaşık mekanik davranışlarına neden olur. Farklı yönlerde dağılan lifler tarafından belirlenen SFRP kompozitlerinin önemli bir anizotropisi vardır. Lineer elastik liflere rağmen polimer matrisin plastik akışı, kompozitlerin elastik olmayan performansını üretir. Ayrıca, lif içeriği, lif uzunluğu ve sıcaklık varyasyonlarının hepsinin, kompozitlerin elastik modülü ve kırılma mukavemeti üzerinde belirgin etkileri vardır [6]

Bu çalışmada elektroeğirme metodu kullanılarak basınca oldukça duyarlı olan CNT/TPU esaslı giyilebilir sensörlerin tasarımı hedeflenmiştir. CNT esaslı nanolif yapılardaki CNT'lerin yapının yüzeyine çıkabilmesi için bu defa 10 ml Etanol içerisinde %1'lik CNT çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltinin içerisine daha önceden elde ettiğimiz nanolif yapıları 2x1 cm boyutunda keserek çözelti içerisine 5'er dakika daldırılmış ve CNT kaplı yapılar elde edilmiştir.Daha sonra desikatör içerisinde 5 dakika ve daha sonra 2 saatlik etüvde gerçekleştirilen kurutma sonucunda

CNT’lerin yüzeye daha homojen dağıldığı ve yüzeye yakın olduğundan dolayı multimetre ile rahatlıkla elektriksel ölçümlerine bakıldığı gözlenmiştir.Daha sonra elde edilen bu yapıların karakterizasyonu için SEM,FTIR,DSC,şişme degredasyon, gibi morfolojik testler yapılmıştır. Mekanik özellikleri için ise kalınlık,kopma mukavemeti testleri uygulanmıştır. Numunelerin kenarlarına daha stabil elektriksel ölçümler alabilmek için bakır bantlar yapıştırılmıştır. Elde edilen değerler not edilmiş ve daha sonra yapılar iki ucundan çekilerek uzama miktarları optik olarak gözlemlenmiştir.Aynı yapılara farklı olarak bu sefer üstüne arpa şehriye koyarak ağırlık altındaki elektriksel değişimleri gözlenmiştir.0.15 gram ile 50 gram arasında farklı ağırlıklarla denemeler yapılmıştır. Meydana gelen basınç değişimleri not edilmiştir.

1.1. Nanofiber Ve Nanoteknoloji

Nanolifler, Ulusal Bilim Vakfı'na (NSF) ve lif bilimi ile ilgili literatüre göre en az bir boyutu 100 nanometreden (nm) küçük olan yapılar olarak tanımlanır, ancak genellikle bir mikrondan daha küçük bir çapa sahip oldukları kabul edilir. Adı, metrenin milyarda birini veya üç ila dört atom genişliğinde sembolize edilen bir bilim ölçüm birimi olan nanometre kelimesinden gelmektedir [7]. Standart liflere kıyasla olağanüstü derecede yüksek hacim-yüzey oranı nedeniyle, nanolifler düşük özgül kütle, düşük yoğunluk ve yüksek gözenek hacmi gibi benzersiz özellikler gösterir ve bu da nano lifleri filtrasyon ve enerji depolama gibi geniş bir uygulama yelpazesi için faydalı kılar [8]. Özelliklerini geliştirmek için nanoparçacıkları standart tekstillerle birleştirmenin yanı sıra, artık tamamen nano ölçekli liflerden üretilen tekstiller üretilebilmektedir. Araştırmacılar, ayırt edici ve kullanışlı özelliklere sahip kumaşların geliştirilmesinde bu nanoliflerin kullanımıyla çok daha ileri gidebilmişlerdir [9]. Nanoteknoloji, tekstillerdeki maddeyi anlamak, kontrol etmek ve manipüle etmek olarak tanımlanabilir, böylece atomların, moleküllerin ve ayrıca yığın maddelerin kimyasal, biyolojik ve fiziksel özellikleri işlenebilir, birleştirilebilir ve yeni nesil gelişmiş malzemeleri araştırmak için modifiye edilebilir, yapılar, aparatlar ve sistemler geliştirilmiştir. Nanoteknoloji, pürüzsüz tuşe, yüksek çekme mukavemeti, dayanıklılık, spesifik yüzey yapısı su iticilik, antimikrobiyal özellikler ve yangın itici gibi gerekli tekstil özelliklerini üretmek için kullanılır.
Şekil 1.1.’de Tekstildeki nanoteknoloji alanında yapılmakta olan uygulamaları verilmiştir.



Şekil 1.1. Tekstilde Nanoteknoloji Uygulamaları [76]

1.2. Nanoteknolojinin Tekstilde Kullanımı

Kendine özgü ve kullanışlı özelliklerinden dolayı nanoteknolojinin kumaş sektöründe kullanımı hızla artmıştır. Nanoteknolojinin kazançlı uygulamaları için pamuk ve diğer tekstil sektörlerinde önemli bir potansiyel bulunmaktadır. Uygulaması, kumaş işlemeyi ve ürün özelliklerini ve değerlerini ekonomik olarak genişletebilir. Nanoteknolojiyi kullanarak tekstiller çok işlevli hale gelebilir ve koku önleyici, antibakteriyel, kolay temizlenebilir, UV, su ve leke tutmaz özellikler içeren benzersiz işlevsel kumaşlar üretebilir [10].

1.2.1. Su Geçirmezlik

Su iticilik özelliği tekstil ve elyaf biliminin ana konularından biridir ve yüzyıllardır üretilmektedir. Tekstilin su iticiliği, kumaş yüzeyinden su iticiliği ve kumaşın penetrasyon, adsorpsiyon ve su emmeye karşı dirençli olması olarak tanımlanır. Substrat yüzey enerjisi, malzeme üzerindeki sıvı için temas ölçüm açısı ile tanımlanır. Aynı zamanda, sıvı için temas açısının ıslanabilirlik ölçümünün ortalamasıdır. Tekstil malzemelerinin su iticilik özelliği de nanoteknoloji desteği ile geliştirilebilmektedir. Kumaşa nanopartiküller eklendiğinde fonksiyonel performans olarak farklı bazı faydalar sağladığı görülmüştür. Kumaşa su iticilik özelliği kazandıran yaygın malzemelerden biri de mum olarak bilinir. Ancak balmumunun bazı dezavantajları da vardır. Kumaş üzerindeki mum kaplama hava geçirgenliğini engeller ve bu da yüzeyde kırılmalara neden olur [10].

1.2.2. UV Koruması

Son yüzyıllarda örtü örtüleri, şapkalar, perdeler ve tenteler gibi tekstil için UV engelleyiciuygulama miktarı önemli ölçüde artmaktadır. Kumaşın elyaf türü, kalınlığı, rengi ve kumaş açıklığıgibi bazı parametreleri değiştirildiğinde kumaşların UV engelleyici özelliği geliştirilebilir. İnorganik UV blokerleri genellikle ZnO,TiO_2, Al_2O_3 ve SiO_2 gibi yarı iletken oksitler olarak bilinir.Nano boyutlu çinko oksit ve titanyum dioksit, UV radyasyonunu püskürtmek için daha güçlü bir etkiye sahiptir, böylece kumaşı UV radyasyonundan daha iyi korurlar. Bu etkinin nedeni, birim kütle için nano parçacıkların daha büyük yüzey alanıdır [10].

1.2.3. Antimikrobiyal

Tekstillerde birçok antimikrobiyal kullanılmasına rağmen, organik silikonlar, fenoller, kuaterner amonyum tuzları ve organik metalik tekstillerde temel antimikrobiyal sınıflardır. Geniş bir antimikrobiyal etki spektrumu sergiler, bis-fenolik bileşik, Çinko oksit, titanyum dioksit, nano boyutlu gümüş, kitosan ve triklosan antibakteriyel özelliklerin iletilmesi için kullanılır [10].

1.2.4. Antistatik

Sentetik liflerin antistatik özelliğinin kötü olması nedeniyle nanoteknoloji kullanılarak tekstil malzemelerinin antistatik özelliklerini geliştirmek için birçok çalışma bulunmaktadır. Çinko oksit, titanyum dioksit, bıyık, silanenanosol ve anoantimon katkılı kalay oksit (ATO) gibi nano partikül boyutunun antistatik özellikler verebileceği hesaplandı. Bu malzemeler malzeme üzerindeki statik yükün verimli bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olur. Öte yandan, silanenanosol ile antistatik özellikler arttırılır [10].

1.2.5. Kırışıklık Direnci

Reçine, kumaşa kırışıklıklara karşı direnç kazandırmak için standart tekniklerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak reçine uygulama kısıtlamaları, elyafın gerilme mukavemetinde, su emmede, boyanabilirlikte ve aşınma direncinde ve ayrıca nefes alabilirlikte bir azalmayı içerir. Bazı bilim adamları, reçine kullanımının kısıtlamalarının üstesinden gelmek için sırasıyla ipek ve pamuğun kırışma gücünü artırmak için nano-silika ve nano-titanyum dioksit kullandılar [10].

1.2.6. Yangına Dayanıklılık

Yangına dayanıklı hale getirmenin bir yöntemi, alev geciktirici kimyasal katkı maddeleri eklemeden yanıcılığı azaltmak için ince bir tabaka halinde yangına dayanıklı malzeme ile

kaplamaktır. Bu yöntem, hiçbir katkı maddesi eklenmediğinden malzemenin bileşimini ve özelliklerini korur. Bir malzemenin alev geciktirici olarak işlev görmesinin iki temel yolu vardır. Birincisi, malzemenin ısı kapasitesini artırarak tutuşmayı önlemektir. Ancak bu başarısız olduğunda, bir sonraki adım yangının yayılmasını önlemektir [10].

1.2.7. Giyilebilir Sensörler

Esnek elektronik cihazlarda temsili bir ilerleme olan giyilebilir sensörler, insan derisine uygun şekilde lamine edilerek veya geleneksel tekstillerle birleşerek insan derisinin çeşitli dış uyaranlara algısını ve tepkisini simüle edebilir, bu da kişiselleştirilmiş sağlık bakımı izlemede birçok potansiyel uygulamaya olanak tanır. İnsan derisinin karmaşık işlevlerini taklit edecek giyilebilir sensörler tasarlanırken, herhangi bir eğrisel yüzeyle uyumlu bir şekilde bütünleşmek ve insan hareketinden kaynaklanan gerilmeleri barındırmak için mükemmel esneklik ve gerilebilirlik, yüksek hassasiyet, geniş algılama dahil olmak üzere, giyilebilir sensörler tasarlanırken dikkate alınması gereken birkaç önemli faktör vardır. Çoğu tekstil, çok sayıda ince lif ve iplikten oluşan üç boyutlu (3B) gözenekli hiyerarşik bir ağ yapısı oluşturur. Bu yapısal tekstil özellikleri, farklı türde fonksiyonel nanomalzemeleri birleştirmeyi kolaylaştırır ve yüksek performanslı giyilebilir sensörler geliştirmek için uygun bir platformdur. Ek olarak, esnek film benzeri yapıya dayalı diğer sensörlerle karşılaştırıldığında, elyaf ve tekstil tabanlı giyilebilir sensörler, giysilerle kolayca bütünleşme yetenekleri ve insan derisiyle temas halindeki yumuşaklıkları ve rahatlıkları nedeniyle geniş çapta araştırmalar devam etmektedir. Şu anda, karbon nanotüpler (CNT'ler), karbon nanofiberler, grafen, metal nanoteller veya bunların hibritlerini kullanan elektronik tekstiller geliştirmek için çok sayıda çaba harcanmaktadır. Tekstil tabanlı sensörler tasarlamak için yaygın olarak iki strateji benimsenmiştir. Basit elektronikleri doğrudan yerleştirmek veya iletken algılama malzemelerini geleneksel bir tekstil alt tabakasına yerleştirmek, karbonize pamuklu kumaş, CNT kaplamalı pamuklu kumaş, grafen kaplamalı polyester kumaş, Ag nanofiber ağları ile kaplanmış ipek kumaş gibi tekstil tabanlı sensörler elde etmek için yaygın bir yaklaşımdır. Bununla birlikte, bu sensörlerin çoğu, basınç veya esneme algılama gibi yalnızca tek bir işleve sahiptir ve karmaşık insan hareketleriyle ilgili çoklu mekanik deformasyonları çok modlu algılama yeteneğine sahip değildir [11].

1.3. Tekstilde Kullanılan Nanomalzemeler

Nanoteknolojinin avantajlı alanlarından biri de uygulama alanı oldukça fazla olan tekstil endüstrisidir. Tekstil alanındaki nanoteknoloji uygulamaları, tekstil malzemelerinin sağlamlığını büyük ölçüde geliştirmiş, konforlarını, hijyenik özelliklerini iyileştirmiş ve üretim fiyatlarını da düşürmüştür. Nanoteknoloji aynı zamanda ekonomi, enerji tasarrufu, çevre dostu olma, ambalajlama, madde salımı kontrolü, mikroskobik olarak ayrıştırma ve ürünlerin daha sonra kullanılmak ve kontrollü salıverilmek üzere depolanması alanlarında da birçok fayda sağlamaktadır. Tekstil malzemeleri, büyük bir yüzey alanına sahip belirli bir ağırlık veya kumaş miktarı için en uygun alt tabakaları sağlar. Nanopartiküller, büyük yüzey alanına ve yüksek yüzey gücüne sahip olduklarından, tekstiller için daha iyi afinite sağlayan ve istenen kumaş özelliğinin dayanıklılığının artmasıyla sonuçlanan işlem görmüş tekstiller için dayanıklılığı artıran kumaşı etkileyebilir. Lif yapışmalarını belirlemek için parçacıkların boyutu da gereklidir. Nanoteknolojinin bazı alanları, spor sektörü, cilt bakımı, giyim, uzay teknolojisi ve devasa ortamlarda gelişmiş güvenlik teknolojisi olarak bilinmektedir. Nanoteknolojiyi kullanarak, tekstiller çok işlevli hale gelebilir ve koku önleyici, antibakteriyel, kolay temizlenebilir, UV korumalı, leke ve su itici içeren özel amaçlı kumaşlar üretebilir [12].Tekstil endüstrisi için nanoteknoloji aynı zamanda gerçek bir ticaret fırsatına sahiptir. Bunun temel nedeni, kumaşlara farklı özellikler kazandırmak için kullanılan standart tekniklerin genellikle sürekli darbelere yol açmaması ve yıkandıktan veya giyildikten sonra özelliklerini kaybetmeleridir. Tablo 1.1.'de terkstilde kullanılan nanomalzemelerinn özellikleri gösterilmektedir. Nanoteknoloji, kumaşlara yüksek dayanıklılık gibi avantajlar katmaktadır. Nano partiküllerin büyük yüzey/hacim oranı ve ayrıca yüksek yüzey enerjisi nedeniyle kumaşlar için daha fazla ilgi görmekte ve fonksiyon dayanıklılığının artmasıyla sonuçlanmaktadır. Ayrıca, bir kumaş nano parçacıklarla kaplandığında, nefes alma veya ellerini hissetme kapasitelerini etkilemeyecektir [13].

Tablo 1.1. Tekstilde Kullanılan Nanomalzemelerin Özellikleri [14]

Karbon Siyahı Nanopartiküller ve ya Nanolifler	✓ Aşınma Direnci ✓ Daha Yüksek Çekme Mukavemeti ✓ İyi Kimyasal Dayanıklılık ✓ Elektriksel İletkenlik
Karbon Nanotüpler	✓ Olağanüstü Güçlü ✓ Hafif ✓ Elektriksel Olarak İletken ✓ Termal İletken
Metal Oksit Nanopartiküller	✓ Fotokatalitik ✓ Elektriksel Olarak İletken ✓ Uv Üretimi ✓ Antimikrobiyal
Metal Nanoparçacıklar	✓ Antimikrobiyal ✓ Güneş Hücreleri ✓ Estetik Özellikler
Kil Nanoparçacıkları	✓ Elektriksel Direnç ✓ Kimyasal Direnç ✓ Yangın Geciktirici ✓ Uv Koruması

1.4. Elektronik Tekstiller

Giyilebilir özellikte olan elektronik tekstiller zaman içinde geleneksel tekstil materyalleri için sadece bir örtü görevinde kullanılmaktadır. Her geçen yıl dgelişmekte ve ilerlemekte olan teknolojik gelişmeler ışığında bu malzemelere olan talepte paralel olarak artış göstermektedir. Bu sebeple elektronik tekstillerin işlevselliğini geliştirmek için akıllı tekstiller ortaya çıkmıştır.
Elektronik tekstil olarak da isimlendirilebilen akıllı tekstiller, fonksiyonel tekstillerden farklıdır ve karıştırılmamalıdır.

Fonksiyonel tekstiller malzeme ilavesi, terbiye gibi açılardan işlevsellik sağlarken akıllı tekstiller doğası gereği koşullar/uyaranlar tarafından oluşturulan verilerin yorumlanmasından sonra kullanıcısına geri bildirim verebilmektedir [15, 16]. Akıllı tekstil, aktif ve pasif akıllı tekstiller olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Pasif akıllı tekstil çevresel uyaranlara göre durumunu değiştirebilirken aktif akıllı tekstil, çevreden gelen çeşitli sinyalleri algılayabilen ve ardından anlamlı bir yanıt verebilen sensörler ve aktüatörlerle donatılmıştır [17].

Gelişen teknolojiler ve dünya çapındaki dijitalleşme ile giysiler elektroniklerin bir araya gelmesiyle yeni bir tür yüksek teknoloji ürünü olmaya başlamıştır. Elektronik tekstil, geleneksel endüstriyel sınırları aşan yeni tasarım yaklaşımları gerektiren gelişmekte olan bir teknolojidir. Bu zorlu disiplinler arası araştırma alanı, giyilebilir yerel izleme, hesaplama sistemleri ve kablosuz iletişim uygulamalarının geliştirilmesinde bir atılım yapmak için bilgi teknolojisi, mikrosistemler ve tekstil uzmanlarını bir araya getirmektedir [18]. Elektronik tekstil ürünlerinin başlangıcında özelliklerini kaybetmeden nasıl yeniden kullanılacağına dair büyük bir zorluk bulunmaktaydı.E-tekstille ilgili olan en önemli zorluklardan biri, onları yeniden kullanılabilir, yeterince verimli ve yıkama sürecinin üstesinden gelerek yaşam döngüleri boyunca dayanıklı bir hale getirmektir. Elektronik tekstilin bir başka zorluğu da uygun malzemelerin nasıl birleştirileceği sorunudur. Bu sorun, tekstil ve elektronik bakış açısıyla malzemeleri bir araya getirerek istenilen özellikleri sağlama ve hibrit malzemeler oluşturma bakış açısıyla aşılabilmektedir. Elektronik tekstil, konfora, hayatı kolaylaştırmaya ve güvenlik sorunlarına yönelik insanlığa hizmet eden çözümler olarak ortaya çıkarmaktadır [19].

1.5. Akıllı Tekstiller

Özellikle son yıllarda teknolojinin de gelişmesiyle birlikte giyilebilir teknolojinin artışı, günümüzde insan hayatının bütün alanlarında kullanılan kulaklıklar, akıllı saatler ve spor bantları gibi ayrı cihazlar biçiminde kullanılmaktadır. Bu malzemelerde kullanılacak olan giyilebilme özelliğine sahip cihazlar insan vücudundaki meydana gelebilecek olan her hareketi algılayabilme, kalp atış hızını, nabız artış veya azalışlara kadar insan vücudunda meydana gelebilecek bütün reaksiyonları takip ederek cep telefonları aracılığıyla bulut hizmetlerine ileterek kullanıcı arabirimi

olarak sunulmasına olanak sağlamaktadır [20]. Bu işlevler tipik olarak kendi yerleştirme istasyonlarında ayrı olarak şarj edilmesi gereken bağımsız aygıtlarla gerçekleştirilmektedir. Ayrıca veri toplama işlemi, tipik olarak bilek veya kulak gibi vücutta bir alet takmanın uygun olduğu bölgelerle sınırlı olmaktadır. Algılama cihazlarının giysilere entegrasyonu, vücudun etrafındaki dağıtılmış konumlarda algılamaya daha iyi erişim sağlamaktadır [21].Yüksek performanslı akıllı tekstil ürünleri geliştirmek için iyi elektriksel iletkenlik ve bükülmeye karşı yüksek dayanıklılık özellikleri gereklidir. Geçmişten günümüze nanoteknoloji ve malzeme biliminde gerçekleşen yenilikler, artık yeni iletken malzemeler üretebilmeyi ve bu malzemelerin kumaşla sorunsuz bir şekilde bütünleşebilmesini mümkün kılmıştır. Bu akıllı tekstil sistemlerini üretebilmek için önce akıllı malzemelerin belirlenen kumaş üzerine serilmesi gerekmektedir. Böylelikle işlevsel iletken bir kumaş oluşturulur.

İşlevsel bir iletken kumaşın gerçekleştirilebilmesi için başlıca dört gereklilik vardır:

✓ İletken kumaş,

✓ İletken lifler,

✓ İşlenmiş lifler

✓ İletken mürekkepler

Yukarıdaki dört malzemenin birbirine entegre edilmesiyle işlevsel iletken bir kumaş oluşturulabilmektedir. Bu maddelerin hepsi için bazı kısıtlamalar ve avantajlar da mevcuttur. Bir kumaş, çok sayıda küçük üniteden oluşan çok seviyeli ve çok malzemeli entegre bir platform olarak tanımlanabilir. İstenen kumaşı üretebilmek için farklı birimler, dış kuvvetler altında dokunabilir, örülebilir veya birleştirilebilir. Piyasada bulunan çok sayıdaki farklı malzeme, üzerine elektrik devrelerini yerleştirmek için tek bir yol kullanabilmeyi zorlaştırmaktadır. Yöntem seçimi sadece kumaşın yüzeyine değil aynı zamanda elektrik malzemelerinin özelliklerine de bağlıdır. Kumaş yapısı, elektrik devresini takmak ve yazdırmak için gereken bağı belirlemektedir.

1.4. Sensör Özelliğindeki Tekstiller

Son yıllarda çoğunlukla adli incelemeler ve sağlık alanında kullanılan akıllı kumaşlar, kablosuz iletişim ağları, güç kaynakları, bunları saklayıp bir gizli bir bölmede işleme ve elde edilen sonuçlar için karar verme adına geliştirilen veri toplama teknolojisi dahil olmak üzere çeşitli giyilebilir cihazlar ve sensörler geliştirilmiştir. Algılama teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte farklı amaçlar için çeşitli giyilebilir sensörler üretilmiştir. Örneğin, değişken dirençli bükülme sensörleriyle donatılmış giyilebilir cihazlar, insan eklemi bükülme açılarını ölçerek insan duruş tanıma ve hareket yakalama uygulamalarına olanak tanımaktadır. Vücuda takılan sensörlerin kombinasyonu giyilebilir sensörler vücuttaki hayati durumları algılamaya da hizmet etmektedir. Düşük maliyetli, giyilebilir sensör ve doğru değere sahip sağlık izleme sistemleri popüler hale gelmiştir. Nabız sensörü, kalp atışını algılamak amacıyla yaygın olarak kullanılan bir sensördür. Ayrıca nabız sensörü, fotopletismografi sensörünü kullanarak kalp atışını, kandaki oksijen seviyesini ve kan basıncını tespit etmek amacıyla da kullanılmaktadır. Küçük, güvenilir, basit bir sağlık monitörü olması fotopletismografi sensörünün avantajlı taraflarıdır. Bazı araştırmalarda akıllı saatler, sıcaklık, kalp atış hızı, kandaki oksijen, stres seviyesi ve kan basıncı gibi hayati durumları izleyebilmek için bir sağlık izleme cihazı olarak kullanılmıştır . Veriler ise bluetooth aracılığıyla bulut sunucu veritabanına bağlı olan cep telefonunlarına gönderilmiştir. Android işletim sisteminde akıllı saatlerde sağlığın izlenebilmesi için android işletim sisteminin kendi kullanıcı arayüzü vardır. Bazı araştırmalar da sağlığın web sitesi üzerinden izlenebildiğini göstermektedir. Yapılan bir çalışmada sağlık durumunu izlemek ve uyarılar sağlamak için Thingspeak, kullanıcıların durumunu göstermek için de LCD kullanılmıştır. Sağlık izleme sisteminde bir sensör okumasında eşiği belirlemek için kullanılan eşik algoritmaları ve veriler buluta gönderildikten sonra veri işleme için hastanın sağlık düzeyini belirleyecek çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritma ile doktorlar ve sağlık personeli, hastanın durumunun kötüleşip kötüleşmediğini öğrenebilmektedir. Bir başka son derece hassas ve ultra ince silikon stres sensörü çipi de görünmez hizalayıcıların bilek ve diş ortodontik kuvvetleri üzerindeki insan nabızlarının ölçümü için kullanılan inceltme ve laminasyon adına ayrı sensör çiplerinin yeniden yapılandırılmasıyla geliştirilmiştir.

1.5. Basınç Sensörleri

Basınç sensörleri çoğunlukla elektronik cihazlarda anahtarlar ve arayüzler olarak ya da kullanan kişinin hayati belirtilerini takip etmek için kullanılır. Giysi, çorap, ayakkabı, yastık, kemer, kafa bandı ve hatta yataklara entegre edilebilmeleri nedeniyle spor, yaşlı bakımı, teşhis ve insan hareket algılama gibi çeşitli uygulamaları için tekstil tabanlı basınç sensörü araştırmaları yapılmıştır. Yataklara tıbbi gözlem yapılması amacıyla da basınç sensörleri eklenmiştir. Ayrıca basınç sensörlerinin spor giyim, iç giyim ve sokak modasında kullanılan tekstil klavyeleri ile dokunmatik yüzeylerin geliştirilmesi gibi çeşitli ticari uygulamaları yapılmıştır. İki iletken tekstil malzemesinin elektrot tabaka arasına koyulmuş bir ara malzeme ile kullanılarak çeşitli basınç sensörleri geliştirilmiştir. Elektrotlar, iletken ipliklerin veya malzemelerin dokumaya işlenmesi veya kaplanmasıyla elde edilmektedir [22, 23]. Basınç sensörleri, tekstil ürünleri geniş bir vücut alanı üzerinde cilt ile temas halinde olduğu için ağırlıklı olarak vücut parametrelerini algılamak ve izlemek adına kullanılmaktadır. Tekstil yüzeyleri çeşitli yöntemlerle mekanik zorlanmaya karşı farklı seviyelerde hassas hale getirilebilmektedir. Strese duyarlı malzemelerden yapıldıklarında esnemeye karşı hassas olabilir, hassas olmayan liflerle hassas olan liflerin karıştırılmasıyla ise iplikler modifiye edilebilir. Kumaşlar uygun malzemelerle kaplanarak tansiyona duyarlı hale getirilebilir. Elektronik ölçümler kapasitif ölçümler kadar karmaşık olmadığı için prototipleme diğer kumaş algılama teknolojilerine kıyasla daha basit bir teknoloji olmaktadır [24].Yapılan bir çalışmada termoplastik poliüretan elektrospun membran ve PDMS bileşimine dayanan ve kendiliğinden oluşan bir sandviç yapıya sahip yüksek performanslı bir basınç sensörü tasarlanmıştır . Basınç sensörü, AgNW'lerin termoplastik poliüretan elektrospun membran üzerine süzülerek iletken bir ağ oluşturacak şekilde bağlanması ve ardından sıvı PDMS kullanılarak döndürülerek kaplanması yoluyla üretilmiştir. Sandviç yapı, TPU elektrosbun membranının gözenekliliği ve PDMS'nin likiditesi temelinde AgNW'lerin havadan etkili bir şekilde korunmasını sağlayarak oluşturulmuştur. Sonuç olarak basınç sensörü, 30 günde neredeyse hiçbir değişiklik olmadan 50 S/cm mükemmel iletkenlik sergilemiştir. Esnek AgNW tabanlı sensör, yüksek hassasiyet, üstün güvenilirlik ve olağanüstü kararlılık ile hem esneme hem de bükülme deformasyonlarını algılayabilmektedir. Ayrıca geliştirilen basınç sensörü, parmak bükme, bilek ve

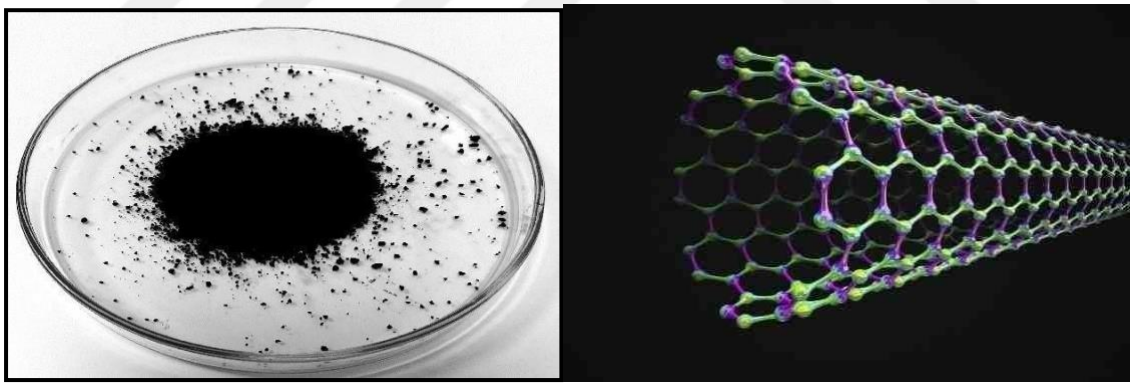
el sıkma hareketleri gibi insan hareketlerini algılamak için de kullanılabilmektedir. Bu sonuçlar bu sensörün giyilebilir elektronik uygulamalarında büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir

1.6. Karbon Lifi İçeren Maddeler

İçerisinde karbon lifi bulunan kompozit polimer malzemeler mukavemet özelliklerinin yüksekliğinden dolayı halen daha günümüzde de endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Basınçtaki kırılımın boyuna doğru meydana gelmesinden dolayı tek yönlü olup yapısında karbon lifi içeren kompozit yapıdaki polimer maddelerin uygulama ve tasarımı için oldukça önemli etmenlerden biri olarak kabul edilmektedir. Tek yönlü karbon lifi bulunan kompozit polimer malzemelerin sıkıştırılabilme özellikleri ile, matris yapıdaki maddelerin mekanik özellikleri ile yakından ilişkilidir [26]. Bu nedenle nanoparçacıkların matris içine dağıtılmasının modifikasyon şeması, kompozit malzemelerin sıkıştırma özelliklerini arttırmanın etkili bir yoludur. Doldurma nanoparçacıklarının sıkıştırma özellikleri üzerindeki etkisi, yüksek mukavemetli karbon lifi bulunan kompozit malzemelerin tasarımına ve imalatına rehberlik etmektedir [27]. Karbon lifi bulunan kompozit polimer malzemeler boyuna basınç dayanımını tahmin etmek için hata mekanizmalarını incelemek ve teorik ve analitik modeller geliştirmek için pek çok çalışma yapılmıştır. Karbon lifi bulunan kompozit malzemeler sıkıştırıcı hasar modları, fiziksel tabanlı modelleri geliştirmek için deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan bazı çalışmalarda liflerin mikroburkulma ve bükülme bandı oluşum hatasının, karbon lifi bulunan kompozit polimer malzemeler baskın boyuna basınç kırılma mekanizmaları olduğu bulunmuştur [28]. Üretim sürecindeki ilk lif hizasızlığı ve matris doğrusal olmama durumları, bükülme bandı oluşumunu indükleyebilir ve kompozitlerin yapsının çok büyük bir oranda zarar görmesine yol açabilir. Yapılan bir çalışmada malzeme ve geometri parametrelerinin tek yönlü karbon lifi bulunan kompozit polimer malzemeler basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin incelenmesi için lif mikroburkulması ve lif bükülmesini dikkate alan gelişmiş bir model geliştirilmiş ve Young matris modülünün en önemli parametre olduğuna dikkat çekilmiştir [29, 30]

1.7. Karbon Nanotüp(CNT)

Karbon nanotüpler (CNT'ler),önemli elektronik ve mekanik özelliklere sahip nanoyapılardır ve resmi olarak 1991 yılında Japon bilim adamı Sumio Iijima tarafından adlandırılmıştır. Nanotüpler, bir petek kafes içinde bir veya daha fazla grafen katmanının açık veya kapalı uçları olan silindirik yuvarlak, dikişsiz bir tüptür.CNT'lerin çapları nanometre ve ya mikrometre ölçeğindedir.Karbon nanotüpler(CNT'ler),grafitik nanoparçacıklar gibi grafit nanomalzemeler üzerine kapsamlı deneysel ve teorik çalışmalar, bunların olağanüstü fiziksel özelliklerini işaret etmiştir [31]. Geleneksel iletken malzemelerle karşılaştırıldığında, CNT'lerin fiyatı, esas olarak üretim ve saflaştırma sürecinin yüksek maliyeti ve küçük üretim ölçeği nedeniyle pahalıdır. Şekil 1.2.'de karbon nanotüp yapısı gösterilmiştir. Seri üretim teknolojisinin hızlı gelişimi ile CNT'lerin fiyatı önemli ölçüde düşmesi hedeflenmektedir. Ve dahaaz miktarda CNT dopingi, dikkate değer elektrik iletkenliği nedeniyle yüksek fiyat dezavantajını telafi edebilir. CNT'ler, elastik polimerlerle farklı şekiller oluşturmak için çeşitli yöntemlerle birleştirilebilir.Son sonuçlar, bu basınç sensörlerinin performanslarının, iletken ağların montaj yöntemleri ve mikro yapıları ile yakından ilişkili olduğunu göstermiştir [32].



Şekil 1.2. Karbon Nanotüp (CNT)

Elastomerik polimerlerle birleştirilmiş bir CNT'lerin süzülme ağı, süzülme ağı içindeki CNT'ler arasındaki sürekli temas nedeniyle yüksek gerilme altında bile elektrik iletkenliğini koruyabilir. Öte yandan, polidimetilsiloksan(PDMS), şeffaflığı, iyileştirilebilirliği, toksik olmaması ve biyouyumluluğu nedeniyle basınç algılama için nanomalzemelerle entegre esnek bir substrat olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.Bu nedenle, esnek ve biyo-uyumlu çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)-(PDMS) içeren piezo dirençli basınç sensörlerine sahip bir iç taban, basit bir veri

toplama sistemi ile farklı yapılar geliştirilmiştir. Bunun üzerine iletkenmalzemelerin ve esnek yapıların bileşimi üzerine çeşitli araştırmalar ortaya çıkmıştır.Cai ve arkadaşları, geçiş metali karbürleri veya nitrürler MXene ($Ti_3C_2T_x$), karbon nanotüpler (CNT) ve kapsamlı algılama yeteneği ile olağanüstü algılama performanslarına sahip yumuşak bir lateks kauçuk alt tabakaya dayalı çok yönlü ve ölçeklenebilir bir giyilebilir sağlık uygulamaları için fizyolojik sinyaller verebilen bir basınç sensörü tasarladılar [33].Esnekliği, iletkenliği ve çok yönlülüğü geliştirmek için esnek alt tabakalar üzerinde benzersiz iletken ağlar oluşturmak için çeşitli iletken malzemeler benimsendi [34, 35].

Karbon nanopartiküller, yüksek mukavemet, yüksek iletkenlik gibi birçok avantajlı mekanik ve elektriksel özelliklere olduğu için çok işlevli çimento kompozitleri üretiminde de kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalarla tatik yükleme altında CNT veya karbon nanolifler ile güçlendirilmiş çimento bazlı sensörlerin özdirençlerindeki fraksiyonel değişimi ile yük değişiklikleri arasında iyi bir korelasyon olduğu bulunmuştur. Bu özellikleri çimento bazlı sensörlerin yapısal sağlık izlemesi için basınç sensörleri olarak kullanılmasının uygun olduğunu göstermektedir. Çimento bazlı sensörün yapısal sağlık izlemesi için uygunluğunu incelemek adına sensörün piezodirenci döngüsel yükleme altında harmonik veya kademeli olarak artan sıkıştırma altında tekrarlanabilirliği ve hassasiyeti üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda dinamik olarak değişen yükleme ve farklı tekrarlanan sıkıştırma seviyeleri altında ÇDCNT ile düz çimento bazlı sensörün kendi kendini algılama davranışını keşfetmeye olan ilgisi üzerinde durulmuştur. Bu çalışmaların sonucunda sensörlerin özelliklerinin temel olarak basınç gerilimi genliğine, karışımına ve bileşenlerine bağlı olduğu görülmüştür [36].

1.8. Termoplastik Poliüretan(TPU)

Giyilebilir elektroniğin önemli bir alt alanı olan gerilebilir ve giyilebilir basınç sensörleri, kişisel sağlık izleme, insan hareket algılama, insan-makine arayüzleri ve yumuşak robotik gibi sağlıkla ilgili bir dizi potansiyel uygulamada kullanılmaktadır. Bu kapsamda film tipi basınç sensörleri geliştirilmiştir. Ancak bu sensörler, vücut hareketinin istenen yönde algılanması için insan derisine veya giysi kumaşına entegre edilememiştir. Gerilebilir iletken kompozit lifler, yumuşak polimer bazlı lifler doğal olarak gerilebilir ve uygun maliyetli olduğundan, bu sorunu ele almaya yönelik araştırmaların ilgisini çekmiştir. Doğrudan kumaşlara dikilebilir veya kumaşlara dokunabilirler. Bu liflerin bazıları giyilebilir basınç sensörleri olarak kullanılmış olsa da hem yüksek hassasiyet hem de geniş bir uygulanabilir basınç aralığı gereksinimi, oldukça zorlu olmaya devam etmektedir. Gerilebilir polimer esaslı kompozit lifler, çözelti fazında karıştırma ve kompozit liflerin hazırlanması ile polimer ipliklerin veya liflerin modifiye edilmesi şeklinde iki yöntemle hazırlanabilir. Genellikle birinci yöntem, kompozit lifde dolgu maddelerinin iyi dağılımını ve güçlü dolgu-matris etkileşimlerini elde etmek için avantajlıdır. Ayrıca, düşük viskoziteli bir polimer süspansiyonunda iletken dolgu miktarını ayarlayarak ortaya çıkan mekanik, elektriksel ve basınç algılama özelliklerini de kontrol edebilir. Temel olarak bu tür kompozitlerin basınç algılama özellikleri, piezodirençli etkilerinden kaynaklanır. Piezorezistif etkiler, polimer matrisindeki iletken dolgu maddeleri arasındaki bağlantıların değişmesinden kaynaklanan, uygulanan gerilime tepki olarak elektriksel direnç değişimi ile ilgilidir. Gauge faktörü (GF = 100 (DR/R) / ε, ayar faktörü, gösterge faktörü, S, duyarlılık), polimer matrisindeki iletken dolgu maddelerinin içeriğinden ve hizalanmasından etkilenir çünkü bu parametreler iletken elemanların etkin temas alanını ve germe sırasında mevcut iletken yolların sayısını belirler. Böylece polimer matrisindeki iletken dolgu maddelerinin hizalanması kontrol edilerek göreceli olarak yüksek iletkenliğe ve GF'ye sahip kompozit lifler elde edilebilir. Kompozit sensörlerde daha düşük bir iletken dolgu yüzdesi, daha yüksek bir hassasiyet sağlar [37]

Termoplastik poliüretan (TPU), bir poliolün diizosiyanat ile polimerizasyonu ve ardından bir diol ile bir zincir uzantısı ile elde edilen lineer blok kopolimerlerdir [38].Yüksek elastikiyete sahip malzemelerden biri olan termoplastik poliüretan (TPU), yüksek elastikiyet, düşük sıcaklıkta esneklik ve aşınma direnci ile karakterize edilir [39]. TPU'nun elastik özellikleri, termoplastikliği

ve dayanıklılığı, esas olarak polyester zincirlerden oluşan yumuşak segmentlerin ve esas olarak poliüretan bloklardan oluşan sert segmentin mikro etki alanı yapısı ayarlanarak kolayca uyarlanabilir. Bu nedenle TPU, çok yönlü mekanik özellikleri, kolay işlenmesi, toksik olmaması, mükemmel biyolojik olarak parçalanabilirliği ve biyouyumluluğu nedeniyle yumuşak ve sert doku mühendisliğinde son zamanlarda yaygın olarak uygulanmaktadır. TPU, vasküler greftler, kalp pili elektrotları, mesaneler, yapay kalp kapakçıkları ve diğer biyomedikal ürünler gibi biyomedikal cihazların imalatında kullanılmıştır [40].Termoplastik poliüretan elastomerler (TPU), vulkanize kauçuğun mekanik özelliklerini termoplastik polimerlerin işlenebilirliği ile birleştiren termoplastik elastomerlere (TPE) aittir. Normalde kauçukta bulunan kimyasal ağların olmaması nedeniyle tekrar tekrar eritilebilir ve işlenebilirler.Bugün, hızla büyüyen termoplastik elastomerler ailesi içinde önemli bir rol oynamaya devam ediyorlar ve uygulamaları hemen hemen tüm endüstriyel dallarda bulunabilir.TPU'nun sert segmentlere (HS) ve yumuşak segmentlere (SS) sahip lineer segmentli blok kopolimerler olduğu iyi bilinmektedir. Sert bölümler, fiziksel çapraz bağlar oluşturmak için zincirler arası hidrojen bağları ile bir arada tutulur. Erime sıcaklıklarında hidrojen bağları kopar ve lineer birincil zincirler serbest kalır. Bu arada, sert segmentlerdeki üretan bağlantıları (karbamat, –NHCOO–) kararsız hale gelir ve geri dönüşümlü olarak serbest izosiyanat ve alkole ayrışırken yumuşak bölümler, TPU'nun elastik özelliklerini açıklayan bir elastomer matrisi oluşturur [41, 42].



Şekil 1.3. Termoplastik Poliüretan (TPU)

1.9. CNT/TPU Basınç Sensörleri Ve Günümüz Teknolojisindeki Önemi

Giyilebilir cihazlar modern yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır ve ışıklı alt grupları olarak esnek kapasitif basınç sensörleri, ultra düşük güç tüketimi nedeniyle bu gün ve çağda önemli bir rol üstlenmiştir. Son yıllarda, kapasitif basınç sensörlerinin hassasiyetini geliştirmek için çok sayıda çalışmanın yanı sıra şiddetli bir tartışma yürütülmüştür, ancak düşük maliyetli bir yöntemle yüksek hassasiyetli bir sensörün seri üretiminin hayati bir zorluğu hala devam etmektedir.Endüstriyel talepleri karşılamak için, endüstriyel ölçekte ve düşük maliyetle sandviç yapılı kapasitifbasınç sensörleri üretmek için basit bir yöntem öneriyoruz; elektrospinning toplayıcı olarak, hem dış mikro yapı hem de iç gözenekler (çift yapı) ile dielektrik elde etmek için düzenli desenlere ve yapılara sahip paslanmaz çelik elekler kullanılmaktadır. Hazırlanan basınç sensörü, ortada dielektrik olarak termoplastik-üretan elektrospun nanofiber film ve elektrot olarak üst ve alt taraflarda iki iletken dokuma kumaştan oluşmaktadır [43]. Basınç sensörlerinin algılama performansları, duyarlılık, basınç aralığı, dayanıklılık, kararlılık, histerezis, tepki süresi ve basınç ile dirençteki bağıl değişim arasındaki doğrusallık gibi birçok açıdan değerlendirilir. Duyarlılığı değerlendirmek için Gauge faktörü (GF) kullanılır. GF değeri $GF = (R/R_0)$ ile hesaplanır, burada R direnç değişimi, R_0 başlangıç direnci ve mekanik basınçdir. CNT'ler,mükemmel mekanik, elektriksel ve termal özelliklerinden dolayı esnek elektronik cihazların sensörlerinde ve aktüatörlerinde ve biyomalzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır.İnsanlar fiziksel sağlığa daha fazla önem verdiğinden,hareket algılama işlevlerine sahip akıllı tekstiller tüketiciler tarafından tercih ediliyor. Şimdiye kadar, tekstil teknolojisi aracılığıyla doğrudan kumaşlara entegre edilebilen yüksek gerilim algılama performansına sahip iletken kompozit iplikler geliştirmek hala oldukça zordur. Burada, CNT'leri esnek TPU matrisine ve çok iğneli sıvı banyolu elektrospinning'e eşit bir şekilde dağıtarak %476'ya varan kopma uzamasına sahip oldukça gerilebilir bir karbon nanotüp (CNT)/termoplastikpoliüretan (TPU) nanofiberler üretilmektedir [44].

1.10. İletken Polimerler

İletken polimer kompozitler, özellikle giyilebilir algılama uygulamaları için kullanılan ideal algılama malzemeleridir. Düşük modülü, hafifliği, üstün esneklik özelliği, kolay işleme ve mekanik deformasyona karşı elektriksel direncinin uygun duyarlılığı sayesinde birçok esnek algılama elementi geliştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır. İletken polimer kompozit temelli yüksek performanslı akıllı esnek gerinim sensörlerinin insan hareketi algılama, sağlık takibi ve insan-makine etkileşiminde kullanıldığı birçok kez belirtilmiştir. İletken polimer kompozitler, ayrıca yeni kumaş algılama teknolojilerinde de kullanılmaktadır. Son yıllarda iki kategori kumaş gerinim sensörü sık bir şekilde belirtilmektedir. Bunlar iletken elastomer (CE) ve örme piezodirençli kumaş (KPF) sensörleridir. Bunlar sırasıyla kumaşlara CE serigrafi baskı ve iletken ipliklerinin kumaşlara örülmesiyle oluşturulmaktadır. Bu kumaş sensörler, kavisli insan cildine kolayca uyum sağlayabilir, giysilere dikişsiz olarak yerleştirilebilir ve bazı fonksiyonel ve akıllı giyilebilir cihazlar oluşturabilir. Bununla birlikte, iletken polimer kompozitlerin reolojik özelliklerinden dolayı bu sensörlerle belirli bir yayılmada kararlı bir yanıt elde etmek zordur. Viskoelastik malzemelerin gerilim gevşemesi, sıklıkla gözlemlenmiş ve tartışılmıştır. Bir viskoelastik malzeme için gerilme ve deformasyonun doğrusal olmayan davranışı, genellikle gerilme gevşemesi veya sürünme olarak bilinmektedir. CE ve KPF sensörleri, yalnızca saf iletken polimer kompozitler yerine kumaş- lif alt tabakadan oluştuğu için kumaş- lif ve iletken polimer arasındaki kısıtlamalar gerilimin mekanik davranışını etkilemektedir [45, 46].

İletken polimer kompozit temelli gerilebilir gerinim sensörleri, yaygın şekilde matris olarak elastik polimerleri kullanır. Fakat elastik polimerler her zaman omuz baş omuz formasyonuna ve dolayısıyla gerinim sensörlerinin zayıf geri kazanılabilirliğine yol açan güçlü mekanik histerezis etkisi gösterir [47].

Esnek polimer malzemelerin gerinim, basınç, kuvvet ve deformasyon ölçümleri gibi sensör uygulamalarında kullanımı önerilmektedir. Uyaranlardaki değişikliği algılamak için piezodirençli gerinim sensörü uygulamasında iletken polimer nanokompozitler (CPNC) oluşturulması adına iletken dolgu maddeli karbon nanolif ve iyonik sıvılar kullanılır [48].

Polimer bazlı gerinim sensörleri, hafif olmaları, kolay taşınabilirlikleri ve esnek davranışları sayesinde akıllı saatler, akıllı ekranlar, biyomedikal cihazlar gibi bazı cihazların yapımında

kullanılmaktadır [49]. Esnek sensörler, işleme, kuru ve ıslak koşullarda çalışabilme ve uyarlanabilir olma özellikleri sayesinde sıkça tercih edilmektedir. Geleneksel olarak kullanılan metal tabanlı gerinim sensörlerinin katı olması bu sensörlerin uygulamalarını sınırlandırmıştır. Metallere yakın mekanik özellikler göstermesi nedeniyle polimerler, sensör uygulamalarında metallerin yerine kullanılabilecek en uygun malzemeler olarak belirtilmiştir. Mekanik özellikler, farklı sensör uygulamaları için farklı polimer malzemeler kullanılarak uyarlanmıştır. Herhangi bir malzemenin mekanik davranışı, gerilme - şekil değiştirme eğrisi kullanılarak analiz edilir. Tekrarlanan araştırmalarla gerilme - gerinim özelliklerindeki değişiklik malzemenin çalışma davranışını belirler. Analiz araçları sayesinde fiziksel davranışların incelenmesi kolaydır. Fiziksel davranışların incelenmesi kadar hata davranışlarının da tahmin edilebilmesi çok önemlidir. Gerinim ve stresi belirlemek için matematiksel klasik yöntemler kullanılmaktadır, hata davranışını tahmin etmek için de analitik çalışmaların kullanımına başlanmıştır. Zamanla farklı malzemelerin davranışlarını tahmin etmek için çeşitli araç ve teknikler uygulanmıştır. Hata çalışmaları, gerilme gerinimi ve deformasyon davranışı analiz edilerek gerçekleştirilmiştir [5].

Piezoelektrik prensibi, aralıklı anlık kuvveti elektrik enerjisine dönüştürmek için uygundur. Kurşun zirkonat titanat (PZT) isimli bir piezoelektrik seramik malzeme kullanan güç üretim elemanları, diğer bir deyişle üzerine basıldığında elektrik üreten elementler hakkında çalışmalar yapılmıştır. PZT insan vücuduna zararlı bir madde olan kurşun içermesi nedeniyle mobilya üretiminde kullanılmaya uygun bir malzeme değildir. Kırılganlığı nedeniyle de dayanıklılık açısından sorun teşkil etmektedir [6].

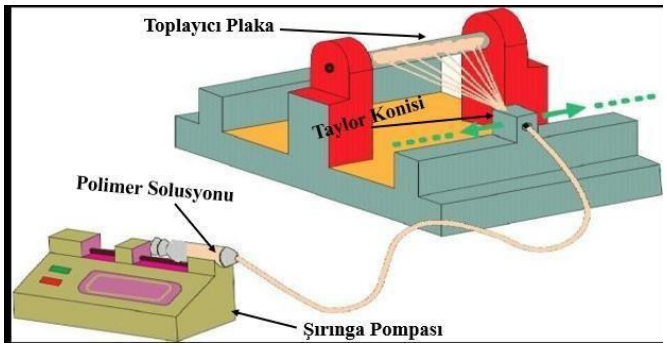
Günümüzde robotik dokunma uygulamaları, cilde monte edilebilir sensörler ve başka birçok uygulamada esnek ve gerilebilir gerinim ve basınç sensörlerine yönelik artan bir talep vardır. Yaygın metalik folyolar ve katı yarı iletkenler gibi geleneksel sensörleri düşük hassasiyet, düşük esneklik ve gerilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı farklı yapı şekilleri ile uyumsuz hale getirir. Bu durum yeni ortaya çıkan çeşitli bazı uygulamalarda bu sensörlerin kullanımını engeller. Gerilebilirlik bir cihazın deforme olduktan sonra orijinal şeklini geri kazanma yeteneğini ifade eder. Bu nedenle gerilebilirlik, özellikle cilde monte edilebilir veya robotik dokunmatik uygulamaları gibi kullanımlarda esnek elektroniklerin yeni gereksinimi olarak kabul edilir. Nanokompozit piezodirençli ve piezokapasitif malzemeler, yüksek hassasiyetleri ve kolay

üretilmeleri nedeniyle geleneksel malzemelere iyi bir alternatif sunar. Özellikle grafen, karbon nanotüpler (CNT) gibi akıllı karbon nanomalzemeler içeren polimer nanokompozitlere dayalı malzemeler, yüksek duyarlılıkları, üstün mekanik ve elektriksel özellikleri nedeniyle basınç ve gerinim sensörlerinin üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle polimer/CNT kompozitleri, diğer nanofiltrelere kıyasla üstün mekanik ve elektriksel özelliklere sahiptir [7].

Üç boyutlu 3D yazdırılabilir iletken polimerler, belirli şekil ve algılama gereksinimlerini karşılayabilen algılayıcı malzemelerdir. Bunlar, genellikle iletken polimer kompozitler kullanılarak kaynaşmış biriktirme modellemesi ve doğrudan mürekkep püskürtmeli baskı gibi 3D yazdırma yöntemleriyle hazırlanır. Bu polimerler adına gerinim algılama sinyali için çok iyi bir saptama yeteneğinin yanında yazdırılabilirliğinin sağlanması da gereklidir [8]. Bir 3D baskı yöntemi kullanılarak 3D yazdırılabilir iletken CNT'ler ve polidimetilsiloksan (PDMS) kompozitinin çekme numuneleri hazırlanıp bunların çok iyi gerinim algılama sinyallerine sahip olduğu ölçülmüştür [9]. Grafen takviyeli karbon nanoliflerin kompozitlerinde polimer matrisi içindeki dolgu düzeninin gerinim algılama sinyali üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir [10]. Farklı çekme koşulları altında CF/CB/PP iletken kompozitlerin gerinim algılama davranışında iki veya daha fazla iletken dolgu tarafından oluşturulan köprü ağı, polimerlerin daha yüksek stabiliteye sahip olmasına izin verir [11]. Esnek iletken kompozitler sınıfındaki metal dolgulu kompozitler ve karbon bazlı kompozitler, ayarlanabilir iletkenlikleri, yüksek ekranlama performansları ve geniş çalışma gerinimi aralıkları sayesinde esnek ve gerilebilir ekranlama uygulamaları için potansiyel malzemeler olarak kabul edilir [12]. Yapılan bir çalışmada gerilebilir ve şeffaf bir elektromanyetik arayüz (EMI) perdelemeuygulaması için gümüş nanotel ve PDMS birleştirilmiştir [13]. Yapılan başka bir çalışmada ise çalışma gerilimi aralığını artırmak için buruşuk yapıya sahip gerilebilir MXene/poliüretan kumaşlar üretilmiştir. Fakat bu çalışmada elektrik iletkenliği, uygulanan gerinimi %40'tan daha fazla bir oranda hızlıca düşürmüştür. Ayrıca, yüksek iletkenlik ve yüksek EMI perdeleme performansını artırmak için yüksek miktarda iletken dolgu maddesinin gerekli olduğu, bunun da gerilebilirliğin dikkate değer bir şekilde azalmasına yol açtığı görülmüştür [14].

1.11. Elektro Eğirme Yöntemi

Nanoteknoloji, malzemelerin nano düzeyde incelenmesi ve geliştirilmesi olarak tanımlanmaktadır.Gelişmiş uygulamalara sahip yeni materyaller yaratmadaki muazzam potansiyeli nedeniyle hızla büyüyen bilimsel disispline sahip alanlardan biridir. Bu teknoloji, elektronik, malzeme bilimi,kimya mühendisliği ve polimer mühendisliği gibi birçok farklı bilim ve mühendislik disiplinini büyük ölçüde etkilemiştir. Nanolifler, yüksek yüzey alanları ve gözeneklilikleri nedeniyle filtre ortamı, koruyucu giysilerde adsorpsiyon katmanları vb. gibi uygulamalarda aktif olarak kullanılmaktadırlar. Bu uygulamalar için elektro-eğirmenin nanolifleri üretmek için en uygun tekniklerden biri olduğu gözlenmiştir [50]. Düşük maliyetli ve basit bir yaklaşım olarak kabul edilen elektrospinning, hazırladığı fonksiyonel özelliklere sahip nanolifli malzemeler, şarj edilebilir piller, filtrasyon ve damıtma dahil olmak üzere çok sayıda alanda yaygın olarak uygulanabildiğinden,ilgi görmektedir [51]. Elektro-eğirme, kontrol edilebilir morfolojiye sahip pürüzsüz nanolifler hazırlayabilen, yüklü bir polimer çözeltisi veya yüksek voltajlı bir elektrik alanında eriyik kullanılarak nanolifler üretme sürecini ifade eder [52]. Elektro-eğirme,nanomalzemeleri imal etmek için kullanılabilecek en önemli tekniklerden biridir. Nanodan mikro ölçeğe kadar ultra küçük fiberler üreten gelişmiş bir sürekli fiber üretme tekniğidir. Ayrıca çok yönlü bir tekniktir, uygun maliyetlidir ve kolay erişilebilirdir. Tipik olarak, bir polimer çözeltisi içeren bir şırınga ile bir toplayıcı arasına belirli bir mesafe boyunca elektrostatik bir kuvvet uygulanır ve polimerik malzemenin yüzey geriliminin üstesinden gelmek için yeterince yüksek bir elektrik alanı yaratır. Böylece, polimerik çözelti, toplayıcı üzerinde biriken, birbirine bağlı gözenekli yapıya, yüksek yüzey alanına, yüksek gözenekliliğe ve hafifliğe sahip dokunmamış bir mat oluşturan bir lif yapısına dönüştürülecektir. Elektrospun nanofiber matlar, fonksiyonel katkı maddelerinin elektroeğirme çözeltisine karıştırılması, aktif bir tür, yüzey kaplaması veya arayüzey polimerizasyonu (IP) dahil edilmesi gibi belirli uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için değiştirilebilir [53, 54]



Şekil 1.4. Elektrospinning Şeması

1.12. Elektroeğirme Yöntemini Etkileyen Parametreler

CNT tabanlı nanolif yapıdaki basınç sensörü üretimi için kullanılan elektroeğirme yöntemi birden fazla parametreden etkilenerek değişim gösterebilen hassas bir yöntemdir. Üretim parametreleri göz önünde bulundurulacak olursa bu paramterelerde kendi içerisinde , çözeltinin etkilediği parametreler, işlemin yapıldığı koşullara ait parametreler ve çevresel sebeplerden meydana gelebilecek değişimlerden etkilenen parametreler olmak üzere üç farklı grup içerisinde incelenmektedir.Aynı zamanda kullanılan bu parametrelerde kaliteli bir nanolif basınç sensörü üretebilmek için oldukça büyük önem arz etmektedir.

Üretim yapılırken bahsi geçen bu parametrelerden rastgele birinden bile bir değişim yapılırsa diğer bütün parametrelerde bu değişimden etkilenebilmektedir.Bu yüzden üretim parametreleri üzerinde herhangi bir değişiklik yapılırken oldukça dikkatli olmak gerekmektedir.Aksi takdirde üretim istenilen gibi olmaz ve hemzaman hem de malzeme israfı söz konusu olmaktadır.Oldukça hassas bir üretim yöntemi olan elektro eğirme yöntemi bu değişimler ile aslında birçok farklı yapı elde etmek için oldukça elverişlive her geçen gün daha fazla tercih edilen bir yöntem olmaktadır [55]. Tablo 2.1.'de bahsi geçen paramtreler gösterilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Materyal

Bu çalışmada, elektro eğirme tekniği ile CNT:TPU esaslı nanolif yapılı hassas ve ölçeklenebilir piezorezistif basınç sensörünün sentezlenmiş ve elektromekanik özelliklerinin detaylı olarak karakterize edilmiştir. Bu amaçla; yüksek iletkenliğe sahip CNT çözücü olarak kullanılan DMF içerisinde çeşitli teknikler kullanılarak sonike edildikten sonra TPU ile manyetik karıştırıcıda karıştırılarak çözelti hazrlanmıştır. Elde edilen çözelti elektro eğirme cihazına beslenerek nanolif üretilmiştir. Üretilen nanolifler Etanol:CNT çözeltisine daldırılıp kurutularak karekterizasyon işlemleri bu yapılar üzerinde de yapılmıştır.

Bu çalışma da kullanılan hammadde ve malzemelerin satin alındığı firmalar ve malzeme isimleri firmalar Tablo 2.1' de gösterilmiştir.

Tablo 2.1.Kullanılan ham maddeler ile kimyasallar ve tedarik edilen firmaları

KULLANILAN KİMYASAL	TEDARİK EDİLEN FİRMA
Karbon Nanotüp (CNT)	Molchem Technologies (Londra, Birleşik Krallık)
Termoplastik Poliüretan (TPU)	Labor Teknik (İstanbul,Türkiye)
Dimetil Formamid(DMF)	Sigma Aldrich (USA)
Etanol (EtOH)	Sigma Aldrich (USA)
Tetrahidrofuran (THF)	Sigma Aldrich (USA)

2.2. Kullanılan Malzemeler

2.2.1.Hassas Terazi

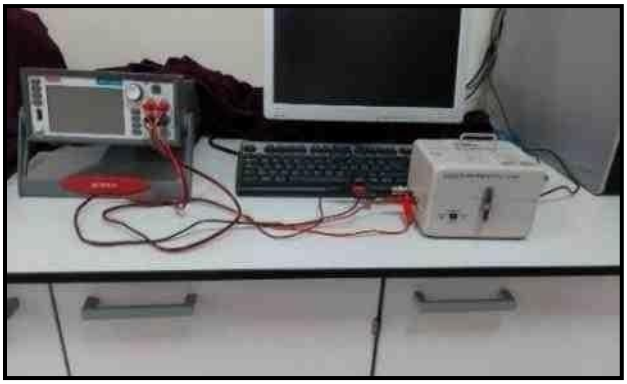
Hazırlanan CNT/TPU esaslı numunenin elektrospinninge koyulmadan önce konsatrasyon miktarını belirleyebilmek adına hangi malzemeden ne kadar alınması gerektiğini görebilmek için Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi KERN marka PFP200-3 model hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 2.1.KERN PFP200-3 Hassas Terazi

2.2.2. Numune İletkenliği Ölçüm Cihazı

Elektro eğirme yöntemi ile elde edilen nanolif malzemelerinin elektriksel direncini tespit etmek için KEITHLEY markasının 8009 Resistivity Test Fixture (Şekil 2.2.'de gösterilmiştir) model iletkenlik ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Resistivity Test Fixture Cihazı

2.2.3. Çözelti İletkenliği Ölçüm Cihazı

Hazırlanan CNT/TPU esaslı çözeltinin elektrospinning cihazına koyulmadan önce belirli testlere tabi tutmak gerekmektedir.Bu testlerden biri de çözelti iletkenliği testidir.WTW COND3110 İletkenlik Ölçüm Cihazı ile ölçümler yapılmıştır.Şekil 2.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3.WTW COND3110 İletkenlik Ölçüm Cihazı

2.2.4. Viskozimetre

Hazırlanan CNT/TPU esaslı numunenin elektrospinning cihazına koyulmadan önce belirli bir yoğunluğa sahip olması gerekmektedir.Bu yoğunluğunu ölçebilmek için ise Brookfield marka RVDVE model viskozimetre cihazı kullanılarak çözelti yoğunluğu ölçülmüştür.Şekil 2.4.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Brookfield RVDVE Viskozimetre

2.2.5. Manyetik Karıştırıcı

Hazırlanan CNT/TPU esaslı numunenin elektrospinning cihazına koyulmadan önce homojenolarak çözülebilmesi için ISOLAB marka ısıtıcılı manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Manyetik karıştırıcı cihazı, motor üzerine yerleştirilmiş bir mıknatıs kafanın dönme hızının değiştirilmesi, rezistans geriliminin ayarlanması ve ısının ayarlanması mantığı ile çalışır.



Şekil 2.5. Isolab Manyetik Karıştırıcı

2.2.2. Elektrospinning Cihazı

Nanolifleri üretmenin birçok yöntemi olmasına rağmen, elektro-eğirme belki de en çok yönlü işlemdir. Polimer, kompozitler, seramik ve metal nanolifler gibi malzemeler, doğrudan veya eğirme sonrası işlemler yoluyla elektro eğirme kullanılarak üretilmiştir. Bu, nanoliflerden yapılan ürünlerin performansını kesinlikle artıracak ve uygulamaya özel değişikliklere izin verecektir. Giyilebilir hassas basınç sensörü tasarımı için üretilmek istenen nanolif numuneleri için Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi INOVENSO marka NE300 Elektrospinning cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.6. Inovenso NE300 Elektro Eğirme Cihazı

2.1.1.6. Kalınlık Ölçüm Cihazı

Elektrospinning kullanılarak farklı parametrelerde üretilen nanolif yapıdaki basınç sensör numunelerinin kalınlıklarındaki değişimi gözlemlemek amacıyla Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi MITUTOYO marka 547-401 model saatli kalınlık ölçüm cihazı kullanılmıştır.Nanolif basınç sensörü numuneleri için tambur mesafesi ne kadar fazlaysa numune kalınlığı o kadar az olmaktadır.Bu sonucu teyit etmek amacıyla bu cihaz kullanılmkaktadır.



Şekil 2.7.MITUTOYO 547-401 Kalınlık Ölçüm Cihazı

2.1.1.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analiz Cihazı

Üretilen nanolif yapıdaki iletkenliği yüksek olan basınç sensör numunesinin yüzeylerine ait numunelerin morfolojik yapısını incelemek için SEM görüntüleri için numuneler Altın – Paladyum alaşımı ile kaplanmıştır. Numunelerin kaplama işlemi Quorum® marka SC7620 model kaplama cihazı ile yapılmıştır. Kaplama cihazında bulunan kafa bölümündeki yer alan Altın - Paladyum alaşımının vakum basıncı altında oluşturulan Argon plazması yardımıyla alaşım buharlaştırarak basınç sensörü numunelerinin üstüne kaplanmıştır. Kullanılan elektrik akımı değeri ve kaplama zamanı numune üstünde meydana gelen kaplamanın kalınlığı Şekil 2.8.'de gösterildiği gibi belirlenmektedir.



Şekil 2.8. Quorum® SC7620 Kaplama Cihazı

Sem analiz sonuçlarını görüp yorumlayabilmek adına mikroskop görüntülerini ZEISS® marka EVOMA 10 modeli taramalı elektron mikroskobu ile elde edilmiştir. EVOMA 10 elektronreferansı olarak Tungsten filaman kullanılarak elde edilen Termolüminesans radyasyonu kullanmaktadır. SEM içinde meydana gelen vakumu altında CNT:TPU esaslı nanolif sensör numunelerinin morfolojik özellikleri incelenmiştir. Kaplaması gerçekleştirilmiş olan numuneler örnek tutucu kaplara karbon iletken bant yardımıyla tutturulduktan sonra SEM cihazı içerisindeki eksenel yönlendirme tablasına kilitlenmiş ve cihaz vakum yüksek moduna alınmıştır. Şekil 2.9.'da kullanılan SEM analiz cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

2.1.1.8. Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) Analiz Cihazı

Diferansiyel tarama kalorimetrisi analizi numunenin ısıtılması, soğutulması ve eş sıcaklıkta tutulmasıyla oluşan enerji farklılıklarındaki değişimlerini analiz eder. Üretilen nanolif sensör numuneleri önce belirli kalıplara koymak için kesilip tartılıp not aldıktan sonra belirlenen sıcaklığa kadar önce belirli aralıklarla ısıtılıp daha sonra aynı aralıklarla soğutulurak meydana gelen salınan enerji miktarını ölçmek için yapılmıştır. Bu analizi ölçmek için Şekil 2.10.'da gösterilen SHIMADZU Marka DSC-60 Plus modelindeki diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.10. Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) Analiz Cihazı

2.1.1.9. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometrisi (FT-IR) Analiz Cihazı

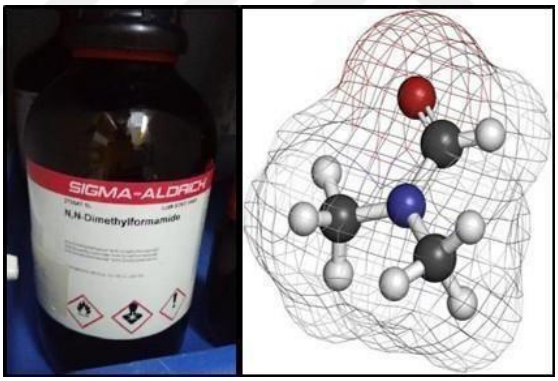
Elektro eğirme metodu kullanılarak üretilen CNT:TPU basınç sensörü numuneleri için yapısındaki farklı mikroorganizmalarındaki kimyasal bağların karakterizasyonunu analiz etmek amacıyla kullanılabilecek kısa zamanda yapılabilecek, güvenilir, hassas ve aynı zamanda maliyeti düşük olan FTIR analizi yapılmıştır. Bu analiz şekil 2.11.'de gösterildiği üzere JASCO marka FT/IR 4700 model FTIR spektroskopisi cihazı kullanılarak yapılmıştır.Bu cihazın yapısında bulunan kızılötesi ışınlar sayesinde, organik veya inorganik bileşiklerin karakterize edilmesinde yararlanılan bir cihaz olmaktadır. FTIR spektrumunda, maddelerin yapısında bulunan atomlarının arasında bulunan bağlardaki titreşim etkisiyle meydana gelen her birinin farklı anlam ifade ettiği frekanslardaki absorpsiyon pikleri ile farklı yorumlar yapılmasında yardımcı olacaktır.Optik izomerler dışında bütün pikler farklı anlam ifade etmektedir. Bu analiz sayesinde yapılan çalışmada elde edilen ürünlerin içerisinde neler olduğu konusunda bizlere yardımcı olan oldukça önemli bir testtir.Bu tes sayesinde elde edilen piklere bakılıp literatürler karşılaştırılarak nanolif yapıdaki basınç sensörü numunlerinin yapısında CNT:TPU oluduğu br nevi kanıtlanmıştır.



Şekil 2.11. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometrisi (FT-IR) Analiz Cihazı

2.1.2. Çalışmadaki Çözücü Kimyasallar 2.1.2.1.Dimetilformamid (DMF)

Dimetilformamid (DMF), fazlasıyla organik çözücülerle ve hatta suyla bile oldukça kolay bir şekilde karışıp çözülebilen renksiz bir sıvı haldeki kimyasal çözücüdür. Standart koşullar altında kokusuz olmasıyla ön plana çıksa da oda sıcaklığında bir süre açıkta beklediğinde, yapısında meydana gelen safsızlıkları nedeniyle, bozulmuş balık gibi ağır bir koku açığa çıkabilmektedir.DMF aslında adından da görüldüğü üzere formamid, amid bağlarının formik asitle oluşturduğu bir çeşit farklı türevidir.Ayrıca kaynama noktasının yüksek olmasaı sebebiyle polar, aprotik bir çözücüdür. Polar mekanizmaların meydana getirdiği SN_2 reaksiyonu gibi reaksiyonların gerçekleşmesini ve hızlı şekilde olmasını kolaylaştırmaktadır.Bu çalışada ise üretilen nanolif yapıdaki basınç sensörü için elektrospinning cihazına alınmadan önce çözeltiyi hazırlamak için CNT ve TPU için ortak çözücü olan DMF kullanılmıştır.Şekil 2.12'de kullanılan çözücü gösterilmiştir.

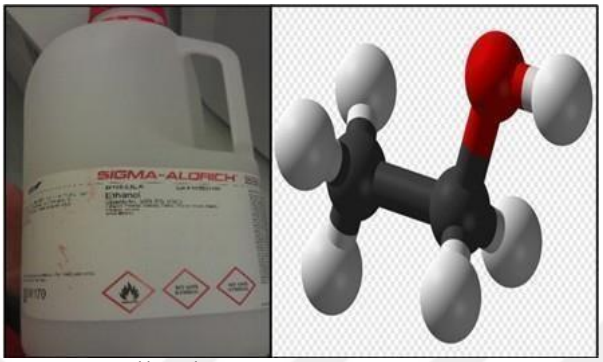


Şekil 2.12. Kullanılan Dimetilformamid (DMF) Ve Kimyasal Yapısı

2.1.2.2.Etanol (EtOH)

Mayalar kullanılarak fermantasyon işlemi ile üretilen etanol(EtOH),aynı zamanda nörotoksik, psikoaktif bir ilaçtır.Ancak gereğinden fazla tüketildiğinde zehirlenmeye de sebep olabilir. Rahatsız etmeyecek kadar hafif bir kimyasal kokusu olan bu kimyasal uçucu, yanıcı, renksiz bir çözücü olarakta kullanılan bir sıvıdır. Donma noktası düşük olan etanol, aynı zamanda termometrelerde ve antifriz olarak kullanılmaktadır.Bu çalışmada elektro eğirme metodu ile elde edilen nanolif yapıdaki hassas basınç sensörlerindeki iletkenliği artırmak ve CNT'lerin yüzeye tutunabilmeleri adına nanolif numunelere daldırma işlemi yapmak için hazırlanan çözeltide çözücü

olarak kullanılmıştır. Çünkü standart prosedürle üretilen numunelerdeki çözücü olan DMF kullanıldığında numunelerde erime meydana gelmekteydi.Bu yüzden literatürden farklı olarak alternatif çözücü etanol tercih edilip kullanılmıştır.



Şekil 2.13.Kullanılan Etanol(EtOH) Ve Kimyasal Yapısı

2.2. Metod

2.2.1. CNT/TPU Çözeltisinin Hazırlanması

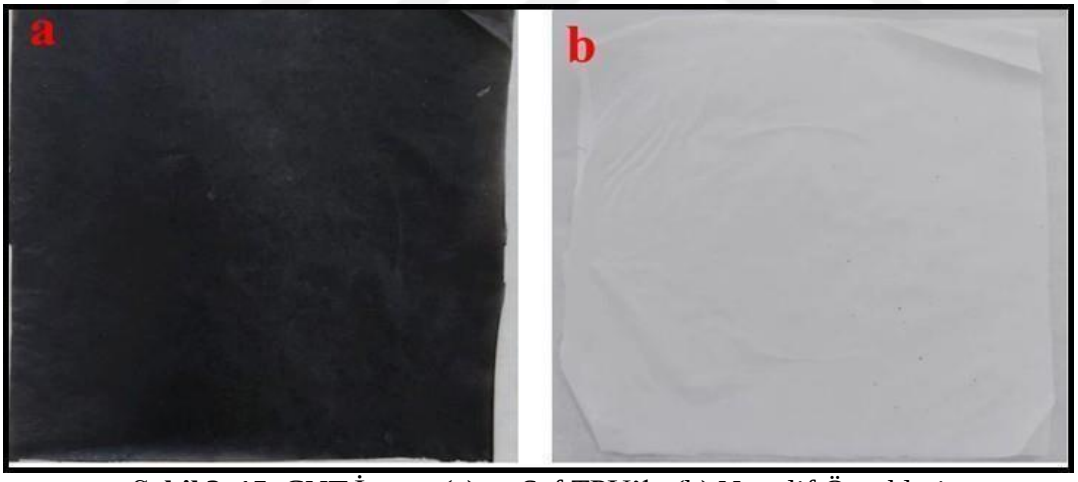
Bu çalışmada öncelikle saflık derecesi %92 olan ve 8-15 nm dış çapındaki CNT oranı %1-0,75-0,5 gibi farklı oranlarda CNT:TPU:DMF çözeltileri hazırlanmıştır. 10 ml'lik bir çözelti için 0,1 gram CNT üzerine 10 ml DMF eklenip daha sonra homojen karışması ve dispers olması için 30 dk 40 duty cycle şiddetinde sonikasyon işlemi uygulanmıştır. Daha sonra içerisine 1 gram TPU katılarak çözelti 3 saat manyetik karıştırıcıda homojen olacak şekilde çözelti hazırlanmıştır. Daha sonra kontrol numunesi olması adına saf TPU içeren numunelerde üretilmiştir. Önce TPU:DMF içerikli numuneler üretildikten sonra çözücü farklılığına vurgu yapabilmek ve yapısal eğişiklikleri gözelmeleyebilmek adına TPU:THF ve TPU:DMF:THF(1:1) çözeltileri hazırlanmış ve elektro eğirme metoduyla nanolif numneler üretilmiştir. Çözelti hazırlama işlem adımları Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14.CNT:TPU:DMF Çözeltisi Hazırlanış Aşamaları

2.2.2. Elektrospinning Aşaması

Hazırlanan çözelti her bir üretim için kütlece (w/w) %1, %0,75 ve %0,5 konsantrasyon oranlarında hazırlanmıştır.Daha sonra elektrospinninge koyulmadan önce viskozite ve çözelti iletkenliği testlerine tabi tutularak çözeltinin elektrospinnig aşaması için gerekli yoğunluk ve iletkenlik oranları bulunup literatürdeki oranlarla kıyasları yapılmıştır. Çözeltinin viskozitesi Brookfield (DV-E Viscometer) viskometre cihazı ile (s21 tipi mil, 60rpm), iletkenliği WTW (Cond 3110) iletkenlik cihazı ile ölçülmüştür.Hazırlanan çözeltnin iletkenlik ve çözeltinin viskozite değerleri Tablo 2.3'te gösterilmiştir.Daha sonra bu testlerden geçirilen çözelti şırıngaya çekilerek elektrospinning cihazına koyulmuştur. Tablo 2.2.'de gösterilen farklı parametrelerde üretimler yapılmıştır. Optimizasyon aşamaları bittikten sonra 15 cm mesafede ve 27 kV voltaj uygulanarak elde edilen numunelerin bu çalışma için daha esnek ve kullanışlı olabileceği görülmüştür. Tez aşamasındaki kalan üretimlerde bu parametrelerde üretim yapılmıştır. Elde edilen CNT içeren ve içermeyen nanolif numuneler Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 15. CNT İçeren (a) ve Saf TPU'lu (b) Nanolif Örnekleri

Tablo 2. 2. Üretim Parametreleri

CNT Konsantrasyonu (%wt)	Voltaj (kV)	Mesafe (cm)	Besleme Hızı (ml/h)	Tambur Hızı (Rpm)	İşlem Süresi (h)
0	30	15 20	2,7	100	4
0,5	27	15 20	2,7	100	4
	30	15 20			
0,75	27	15 20	2,7	100	4
	30	15 20			
	32	15 20			
1	27	15 20	2,7	100	4
	30	15 20			

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Tahta Parçalarıyla Yapılan Basınç Testi

Farklı parametrelerde üretilen nanoliflere uygulanan ağırlık miktarına göre yapısındaki değişimi gözlemlemek için uygulanan basınç testlerinin ilkinde daldırılmış nanolif yapılar üzerine belirli ağırlıklarda tahta parçaları koyularak bir multimetre yardımı ile yük koymadan önce ve yük koyduktan sonraki basınç/direnç değişimleri gözlemlendi. Yapılan bu basınç testine göre yük miktarı arttıkça direnç değerlerinde belirgin bir derecede azalma görüldü. 2x1 cm boyutundaki numuneler için her biri için 10'ar dk aralıklarla 5'er defa ölçülmüş ve ortalama değerler tabloya yazılmıştır. 0-50 gram ağırlıkları arasındaki ölçülen değerler Tablo 3.1.'de gösterilmiştir. 50 gram üstünde uygulanan ağırlıklar nanolif yapısındaki bağları koparmasından ve sağlıklı sonuçlar vermemesinden dolayı 50 grama kadar ölçümler yapılmıştır.

Tablo 3.1. Tahta Parçalarıyla Uygulanan Basınç Testi

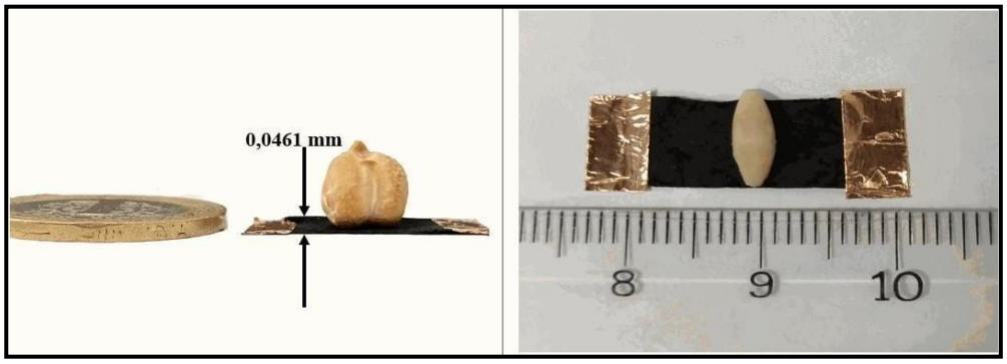
Ağırlık (gr)	d-CNT/TPU:DMF:CNT (0,5)	d-CNT/TPU:DMF:CNT (0,75)	d-CNT/TPU:DMF:CNT (1)	d-CNT/TPU:DMF	d-CNT/TPU:THF	d-CNT/TPU: THF:DMF
0	76,53	50,08	35,68	25,2	3,6	10
10	70,04	43,4	30,23	19,53	3,01	8,5
20	66,62	35,06	24,7	15,18	2,28	7,8
30	55,46	28,9	20,51	11,9	1,4	5,3
40	48.3	22.3	15,64	8.09	0,9	2.6
50	36.25	16.7	12,79	5.45	0,6	1.08



Şekil 3.1. Tahta Parçalarıyla Uygulanan Basınç Testi

3.2. Arpa Şehriye/Nohut Ve Bakır Bant İle Yapılan Basınç Testi

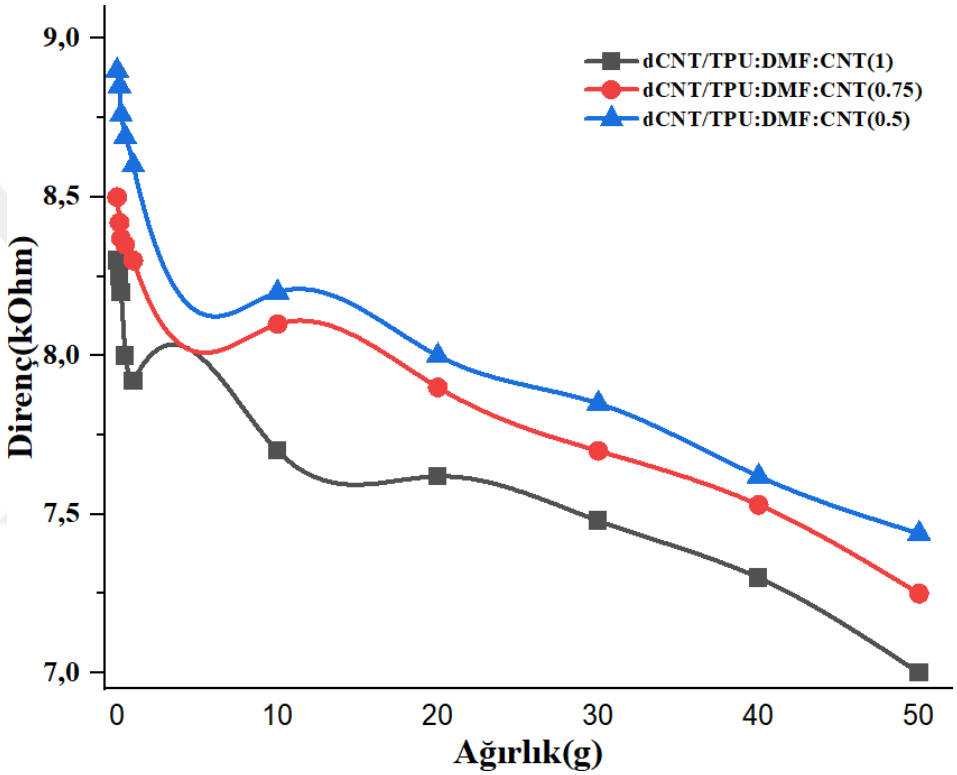
Tahta parçalarıyla yapılan denemelerde elde edilen sonuçların değişkenliğinden dolayı literatürdeki bu tarz nanolif sensör uygulamalarına uygun olarak her bir numunenin kenarlarına eşit mesafelerde bakır bant yapıştırılarak elde edilecek sonuçların stabil olması hedeflenmiştir. Şekil 3.2.'de numuneler ve basınç uygulanan malzemeler gösterilmiştir.Kesilen numunelerin ne kadar nanoboyutta olduğunu göstermek için bozuk para ile yan yana koyularak malzemenin boyutuna da bu şekilde vurgu yapılmıştır.Burada da görüldüğü üzere basınç sensörü olarakkullanılacak olan numuneler aslında bozuk para ile benzer boyutlar sahiptir.Yapılan bu testsonucunda elde edilen grafiklere bakıldığında yük miktarı arttıkça direnç değerlerinde zaman içerisinde lineer bir düşüş yaşandığı gözlenmiştir.Yük miktarı arttıkça direnç değeri azalmış olup bu duruma paralel olarak iletkenlik değeri de artmıştır.



Şekil 3.2. Arpa Şehriye ve Nohut ile Uygulanan Basınç Testi

Tablo 3.2. Bakır Bant Arpa Şehriye Basınç / Direnç Değerleri-CNT

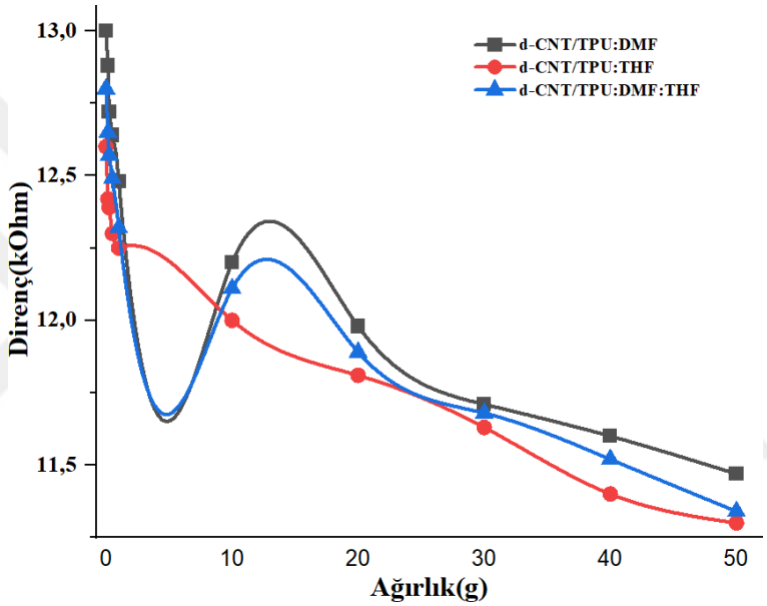
CNT İçeren Nanolifler /Ağırlık(g)	0	0,15	0,25	0,50	1	10	20	30	40	50
d-CNT/TPU:DMF:CNT(1)	8,3	8,25	8,2	8	7,92	7,7	7,62	7,48	7,30	7
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.75)	8,5	8,42	8,37	8,35	8,3	8,1	7,9	7,7	7,53	7,25
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.5)	8,9	8,85	8,76	8,69	8,6	8,2	8	7,85	7,62	7,44



Grafik 3.1. Bakır Bant Arpa Şehriye Basınç / Direnç Grafiği

Tablo 3.3. Bakır Bant Arpa Şehriye Basınç / Direnç Değerleri-TPU

CNT İçermeyen Nanolifler /Ağırlık(g)	0	0,15	0,25	0,50	1	10	20	30	40	50
d-CNT/TPU:DMF	13	12,88	12,72	12,64	12,48	12,2	11,98	11,71	11,6	11,47
d-CNT/TPU:THF	12,6	12,42	12,39	12,3	12,25	12	11,81	11,63	11,4	11,3
d-CNT/TPU:DMF:THF	12,8	12,65	12,57	12,49	12,32	12,11	11,89	11,68	11,52	11,34



Grafik 3.2. Bakır Bant Arpa Şehriye Basınç / Direnç Grafiği-TPU

3.3. Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi Sonuçları

Hazırlanan daldırılmış numunelerin zaman içindeki değişimini gözlemlemek için haftalık değişimleri ölçülmüştür.CNT katkılı nanolif basınç sensörlerinde CNT oranı fazla olan nunumelerde en stabil sonuçlar elde edilirken CNT oranı azaldıkça direnç değerinde ki artış iletkenlikteki CNT miktarının önemini göstermiştir. Tablo (3.3.-3.6)'da ölçüm değerleri gösterilmiştir. Grafik 3.3. ve Grafik 3.4.'te bu ölçümlerdeki değişimi yorumlayabilmek için grafiklerle de sonuçlar desteklenmiştir.

Tablo 3.4. 1.Hafta Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi

Nanolif Yapılar/Ağırlık(g)	0	0,15	0,25	0,50	1	10	20	30	40	50
d-CNT/TPU:DMF:CNT(1)	8,3	8,25	8,2	8	7,92	7,7	7,62	7,48	7,30	7
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.75)	8,5	8,42	8,37	8,35	8,3	8,1	7,9	7,7	7,53	7,25
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.5)	8,9	8,85	8,76	8,69	8,6	8,2	8	7,85	7,62	7,44
d-CNT/TPU:DMF	13	12,88	12,72	12,64	12,48	12,2	12,05	11,95	11,83	11,75
d-CNT/TPU:THF	12,6	12,42	12,39	12,3	12,25	12	11,98	11,83	11,74	11,63
d-CNT/TPU:DMF:THF	12,8	12,65	12,57	12,49	12,32	12,11	12	11,92	11,79	11,68

Tablo 3.5. 2.Hafta Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi

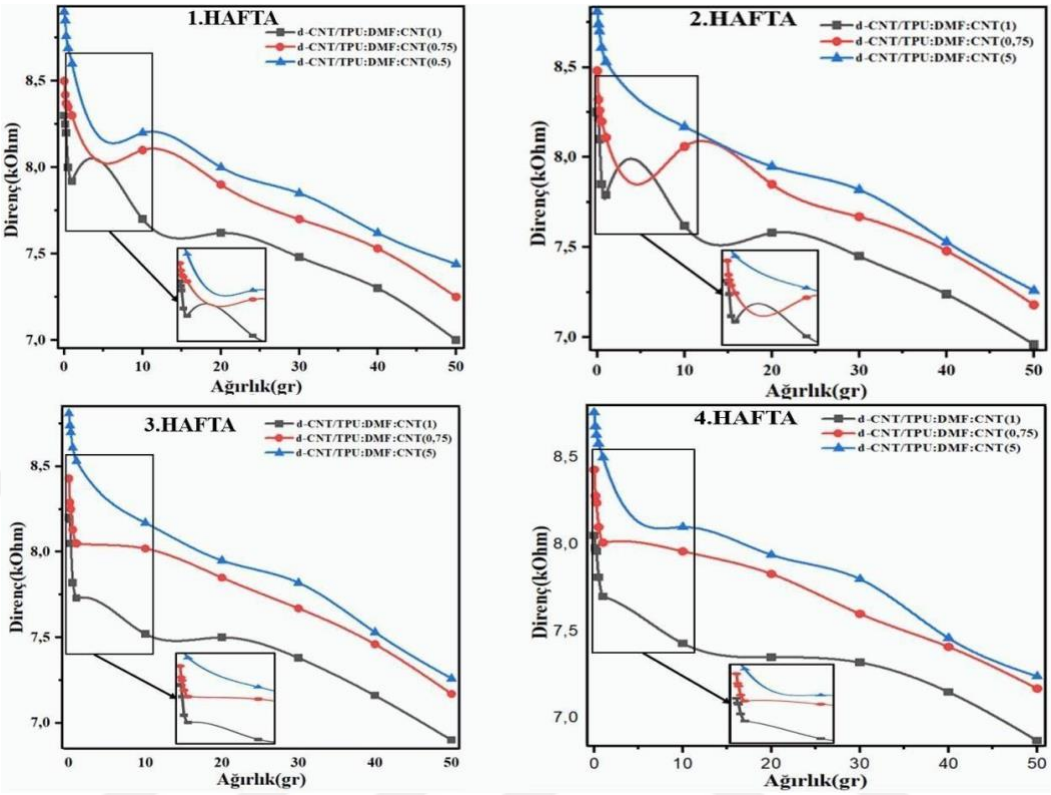
Nanolif Yapılar/Ağırlık(g)	0	0,15	0,25	0,50	1	10	20	30	40	50
d-CNT/TPU:DMF:CNT(1)	8,28	8,22	8,10	7,85	7,79	7,62	7,58	7,45	7,24	6,96
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.75)	8,48	8,32	8,26	8,20	8,11	8,06	7,85	7,67	7,48	7,18
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.5)	8,81	8,74	8,70	8,61	8,53	8,17	7,95	7,82	7,53	7,26
d-CNT/TPU:DMF	13,2	12,92	12,75	12,70	12,54	12,35	12,2	12,02	11,85	11,67
d-CNT/TPU:THF	12,8	12,57	12,46	12,4	12,35	12,16	11,97	11,75	11,58	11,46
d-CNT/TPU:DMF:THF	13	12,89	12,63	12,54	12,40	12,25	12,10	11,90	11,77	11,54

Tablo 3.6. 3.Hafta Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi

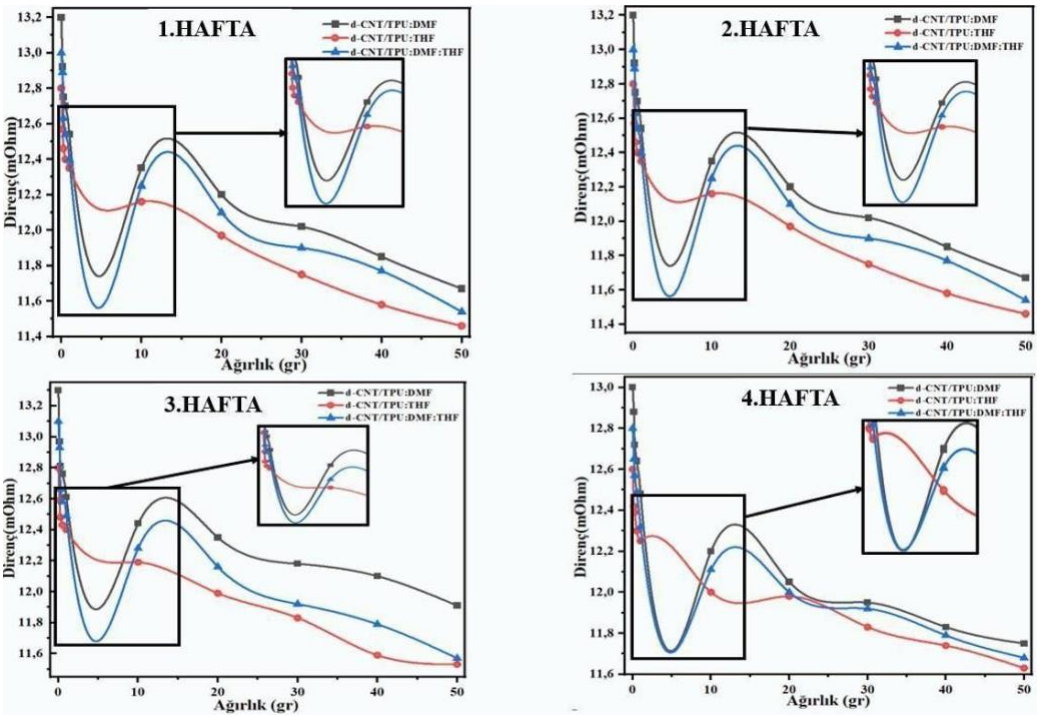
Nanolif Yapılar/Ağırlık(g)	0	0,15	0,25	0,50	1	10	20	30	40	50
d-CNT/TPU:DMF:CNT(1)	8,23	7,98	7,96	7,81	7,70	7,43	7,35	7,32	7,15	6,87
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.75)	8,43	8,28	8,24	8,10	8,01	7,96	7,83	7,60	7,41	7,17
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.5)	8,76	8,68	8,63	8,58	8,50	8,10	7,94	7,80	7,46	7,24
d-CNT/TPU:DMF	13,3	12,97	12,81	12,76	12,61	12,44	12,35	12,18	12,10	11,91
d-CNT/TPU:THF	12,8	12,59	12,48	12,43	12,4	12,19	11,99	11,83	11,59	11,53
d-CNT/TPU:DMF:THF	13,1	12,93	12,66	12,58	12,49	12,28	12,16	11,92	11,79	11,57

Tablo 3.7. 4.Hafta Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü Değişimi

Nanolif Yapılar/Ağırlık(g)	0	0,15	0,25	0,50	1	10	20	30	40	50
d-CNT/TPU:DMF:CNT(1)	8,25	8,19	8,05	7,82	7,73	7,52	7,50	7,38	7,16	6,90
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.75)	8,43	8,29	8,25	8,13	8,05	8,02	7,85	7,67	7,46	7,17
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0.5)	8,81	8,74	8,70	8,61	8,53	8,17	7,95	7,82	7,53	7,26
d-CNT/TPU:DMF	13,3	12,94	12,79	12,73	12,59	12,37	12,29	12,02	11,95	11,86
d-CNT/TPU:THF	12,8	12,57	12,46	12,4	12,35	12,16	11,97	11,75	11,58	11,46
d-CNT/TPU:DMF:THF	13	12,89	12,63	12,54	12,40	12,25	12,10	11,90	11,77	11,54



Grafik 3.3. Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü-CNT



Grafik 3.4. Haftalık Basınç/Direnç Ölçümü -TPU

Yapısında CNT olan nanolif numunlerinin daldırılması sonucunda haftalık olarak multimetre aracılığı ile alınan 5 direnç ölçümün ortalaması sonucunda elde edilen verilere göre her hafta direnç değerlerinde az da olsa düşüşler gözlenmiştir. Bu durum zaman içerisinde CNT'lerin yüzeye her geçen gün daha iyi tutunmasından dolayı iletkenlik değerlerinde de yükselme olduğu anlamına gelmektedir.Ancak,CNT katılmadan üretilen nanolif basınç sensörlerinde ise d-CNT/TPU:THF içeren malzemede diğer numunelere göre daha yüksek iletkenlik değeri ölçülmüştür.Aynı zamanda zaman içerisnde CNT katılarak daldırma işlemi uygulanan nanolif sensörü numunerindeki gibi her hafta daha da artan iletkenlik değerlerinin tersine her hafta ya sabit kalmış ya da iletkenlik değerlerinde azalma olmuştur. Daldırma işlemi sonucuna yapısında CNT olmayan nanolif malzemelerde CNT:Etanol çözeltisine daldırma işlemi yapıldıktan sonra CNT'lerin yüzeye tam olarak homojen şekilde dağılamadığı gözlenmiştir.Zaman içerisinde direnç değerlerinde ki artış ise daldırma işleminin ardından zaman içinde CNT'lerin nanolif yüzeyindeki etkinliğinin giderek azaldığı anlamına gelmektedir.

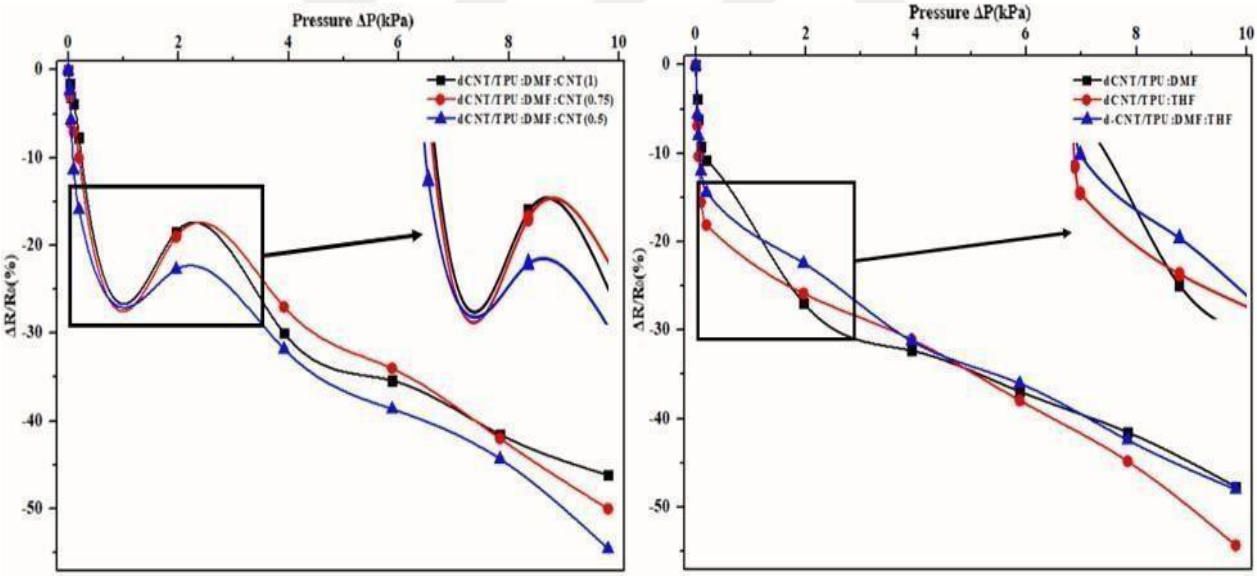
3.4. Bağıl Direnç Testi

Yapılan çalışmada $\Delta R/R_0$'a karşılık basınç eğrileri bulundu. Bütün numunelere uygulanan farklı ağırlıklara karşılık gelen basınçlar sonucunda 0,0490 kPa basınçtan sonraki tüm ölçüm aralığı boyunca doğrusal bir ilişki içinde değişimler gözlenmiştir. Özellikle TPU:DMF numunesinde 0,196-1,96 kPa aralığında keskin bir değişiklik meydana geldi. Bu ani duyarlılık değişikliği, bu iki çalışma bölgesindeki numune direnci değişikliğinden iki farklı mekanizmanın sorumlu olduğunu gösterir, yani 0–0,049 ve 0,196-1,96 ila 40 mmHg gibi düşük basınç bölgesinde çalışan sensörler için, direnç değişikliği esas olarak CNT ince nanolif direncinde basınca bağlı mikro çatlak oluşumundan kaynaklı olmasına bağlanmıştır. Mikro-çatlak oluşumunun, düşük basınç bölgesinde oldukça tersine çevrilebilir olduğu ortaya çıktı ve bu yapıların kararlı ve sürdürlebilir olabileceğini göstermiştir. Daha yüksek basınç bölgesinde, yani 3,92 kPa- 9,8 kPa aralığındaki keskin değişikliklerin olmaması ise CNT nanoliflerinin direncinin kısmi

kırılmasından kaynaklanabilir.Buradan da anlaşılacağı üzere maksimum basınç altında meydana gelen kırılmaların sürekli olmadığı yorumu yapılabilir. Numune boyutları 2x1 cm boyutunda olduğundan dolayı numune alanı 2 cm^2 olan her bir sensör numunesi için üstüne uygulanacak basınçlar için her bir ağırlığın bağıl basınç değerini kPa cinsinden Tablo 3.7.'de, elde edilen sonuçlar ise Grafik 3.5.'te gösterilmiştir.

Tablo 3.8. 2 cm^2 Alana Sahip Sensör Numunelerinin Bağıl Basınç Değerleri

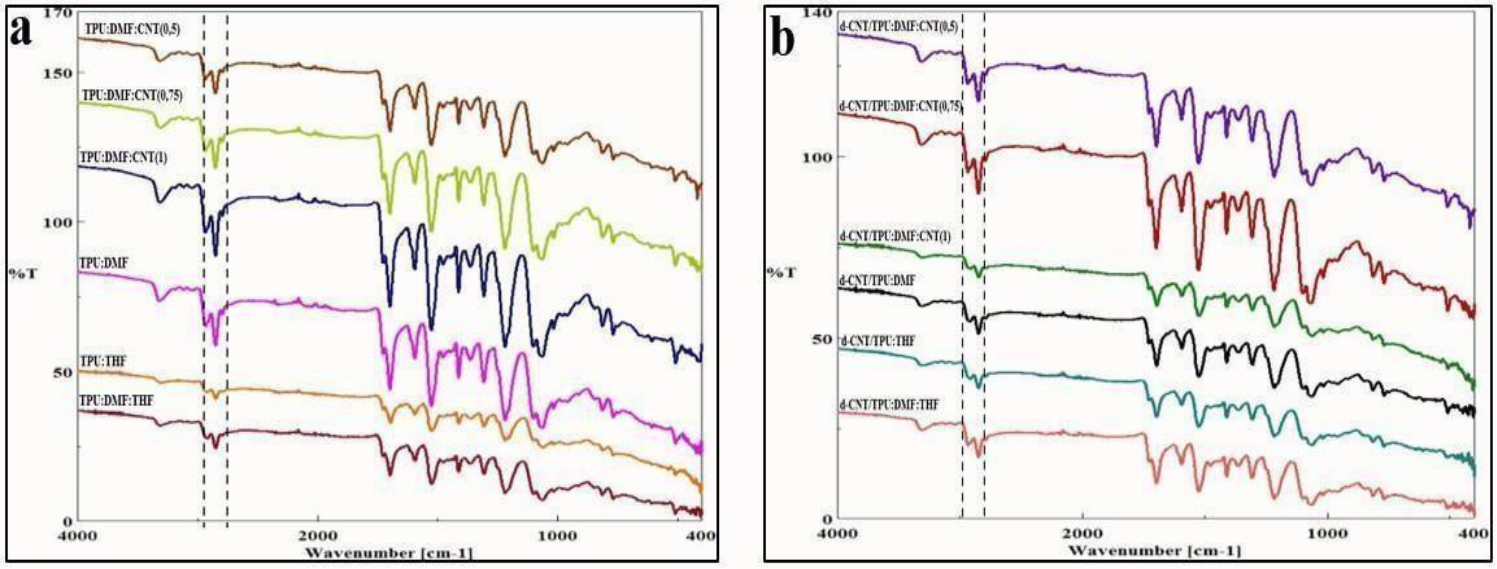
Ağırlık (gr)	0,15	0,25	0,50	1	10	20	30	40	50
Basınç (kPA)	0,0294	0,049	0,098	0,196	1,96	3,92	5,88	7,84	9,80



Grafik 3.5. Bağıl Direnç Testi TPU- CN

3.5. FTIR Sonuçları

Numunelerin kimyasal yapı karakterizasyonu, moleküller arasındaki bağ yapısı ve fonksiyonel grupları Fourier Kızılötesi Dönüşümlü Spektrofotometre (FTIR), JASCO FT/IR-4000 ile incelenmiştir. Elektro eğirme ile elde edilen nano yüzeylerin FTIR analizi Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Daldırma Yapılmış (a) ve Daldırma Yapılmamış(b) Ürünlerin FTIR Sonuçları

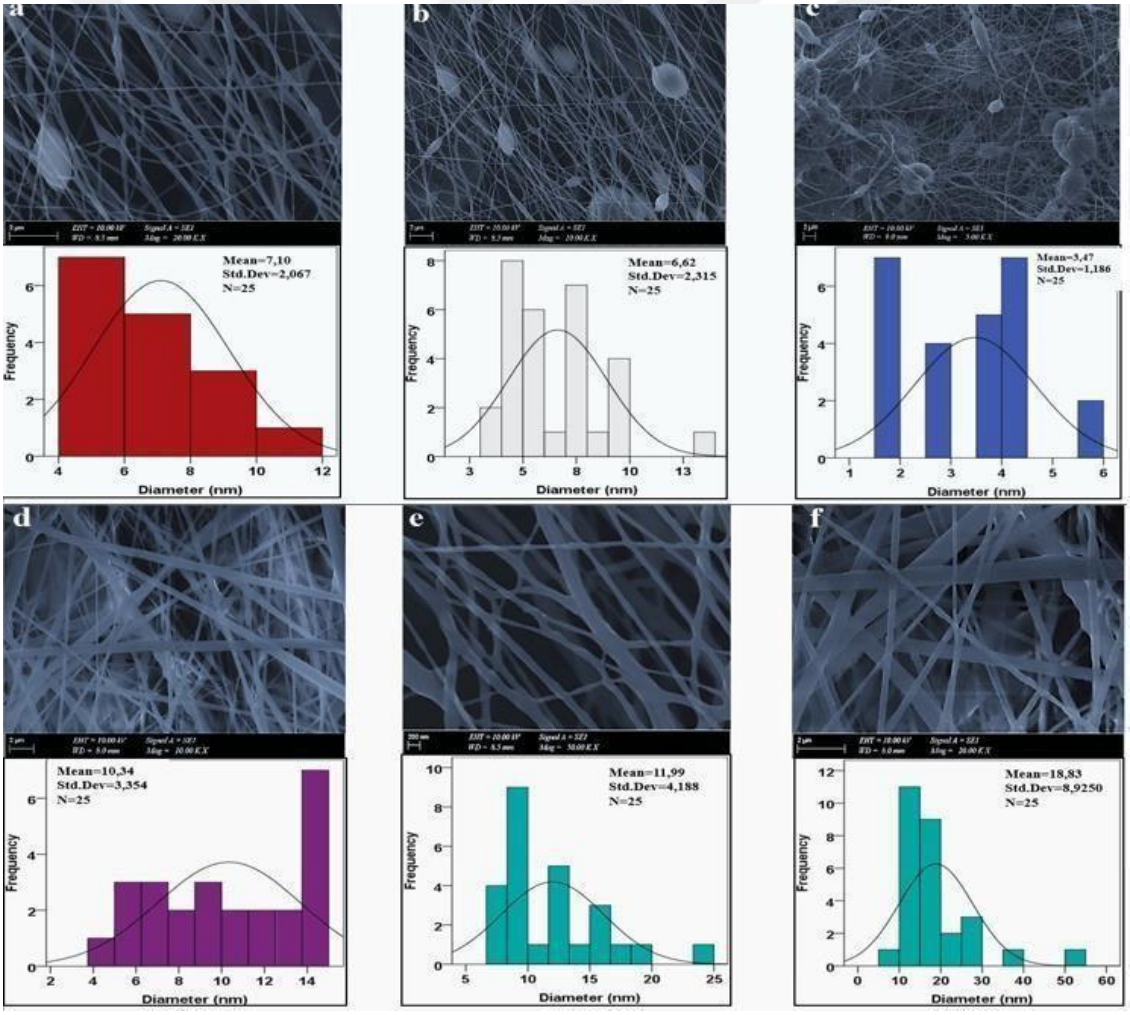
Saf TPU nanofiber için, 3315.03 cm^{-1} ve 3318 cm^{-1}'deki tepe noktaları, üretanların N–H ve C–O–C arasında oluşturdukları bağlardaki gerilmeleri göstermektedir. 1727.91 cm^{-1} ve 1594.84 cm^{-1}'de iki ek absorpsiyon tepe noktası −H−N−COO− gruplarına aittir. Ayrıca 2937.06 cm^{-1}ve 2935.13 cm^{-1} deki tepe alken –CH gerilme titreşimlerini temsil eder. % 0.5 ve %0.75 lik CNT içeren numunelerde ise 1413.57 cm^{-1},1411.64 cm^{-1} ve 1218.79 cm^{-1}'deki pikler, sırasıyla -CH_3'ün asimetrik ve simetrik deformasyonuna göstermektedir. 1016.30 cm^{-1}' deki tepe Si–O–Si' nin asimetrik germe bandı ile ilişkilidir. Ek olarak, 848.53 cm^{-1} 815.74 cm^{-1} ve 813.81 cm-^{1}'deki pikler sırasıyla Si–C ve Si–$(CH_3)_2$'ye aittir [57, 58]. Tüm TPU-CNT denemelerinde söz konusu piklerin net bir şekilde gözlemlenmesi TPU ve CNT'lerin oluşumunu doğrulamaktadır. Eklenen CNT'ler çok düşük miktarda olduğu için (ağırlıkça % 0,10), FTIR spektrumlarından herhangi bir tür etkileşime dair güçlü bir kanıt elde etmek oldukça zordur. N–H ve C=O gerilme titreşiminde sadece çok küçük değişiklikler kaydedilmiştir. Tüm nanokompozitlerde H-bağlı karbonil grubunun yoğunluğu, TPU granül'den daha düşüktür. Bu gözlem, TPU granül'ün karbonil grubu ile nanokompozitlerde , N-H ve O-H grupları arasındaki bazı etkileşimleri göstermektedir. Örneğin; TPU granülde N-H gerilmesi 3309 cm^{-1} pikini gösterirken d-CNT/TPU:DMF:CNT(0,5), d-CNT/TPU:DMF:CNT(1) gibi numunelerde bu pik 3315 cm^{-1} değerine kaymıştır. Aynı şekilde TPU granülde serbest C=O gerilmesine ve H-bağlı C=O gerilmesine karşılık gelen 2852 ve 2938 cm^{-1} pikler CNT eklenen numunelerde 2840 ve 2917 cm^{-1} değerlerine kaymıştır [59, 60].

3.6. Sem Analizi Sonuçları

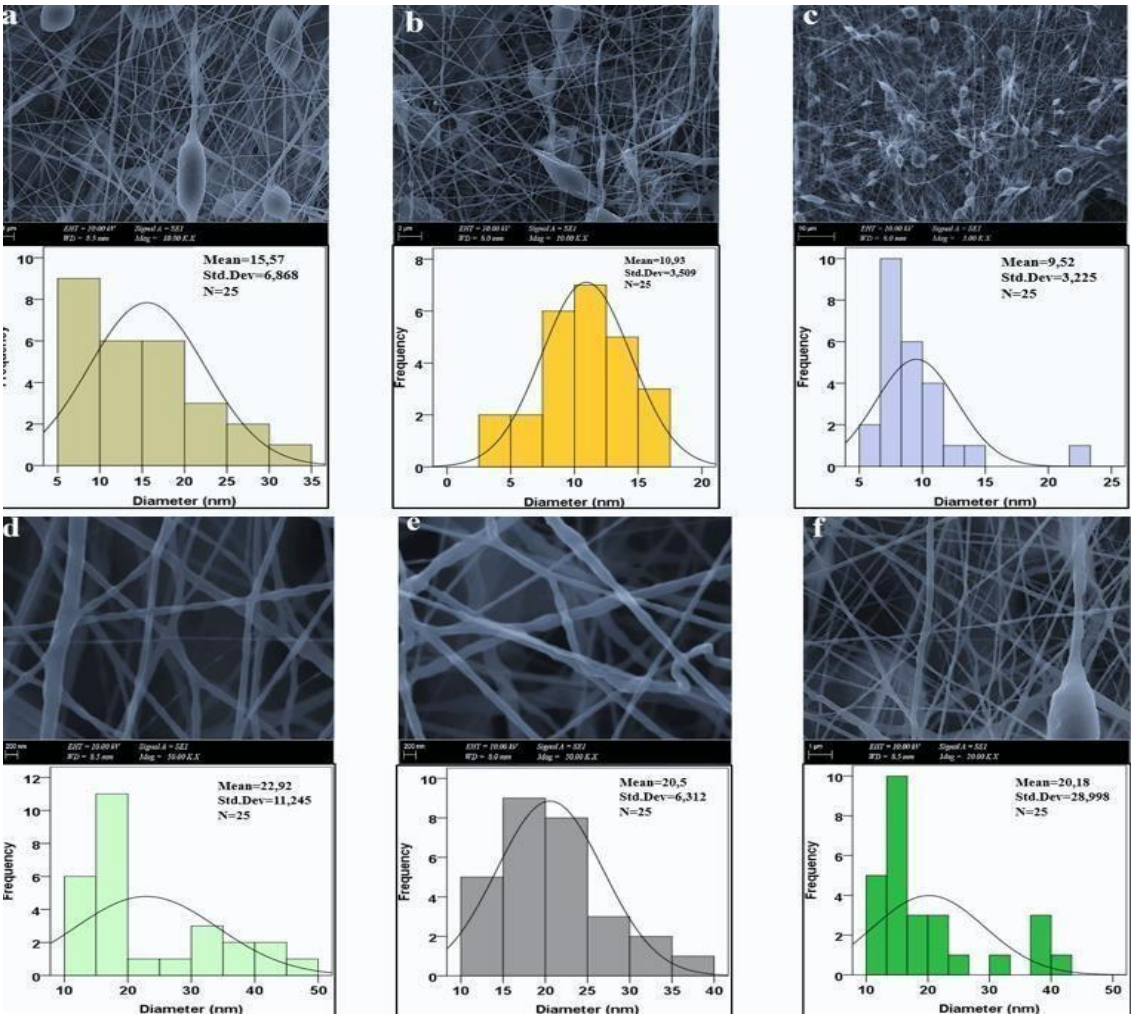
Elektro eğirme ile elde edilen nanoliflerin morfolojik yapısı ve analizi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Carl Zeiss Evo MA10) ile taranarak gözlemlenmiştir. Nano yüzeylerin SEM görüntüleri Şekil 3.4. ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir ve yorumlamaları aşağıda yapılmıştır.Optimum koşullar altında üretilen nanolif örneklerinin mikroskobik morfolojisini ve yüzey dokusunu incelemek içinSEM analizi yapıldı. Tüm nanofiber numunelerin yüzeyi 10 kV'da görüntülendi. Fiberin kalınlığının zaman zaman üniform olduğu, ancak yapının bazı bölgeleri için olmadığı sonucuna varılmıştır. Fibröz yapı iskeleleri bağ dokusu için uygun olduğu gözlenmiştir.CNT:TPU esaslı nanolif bsınç sensörü numuneleri ile hazırlanan bağ yapı iskelelerinin morfolojileri araştırılmıştır.Hazırlanan numunelerde TPU miktarı ve DMF miktarı eşit şekilde dağıtılmıştır. Numunelerde CNT miktarlarında ve hazırlama yöntemlerinde

değişiklikler yapılmıştır. TPU: DMF numunesinde DMF ve TPU mevcuttur. TPU: DMF SEM görüntüsünde TPU polimerlerinin yapısı görülmektedir.

CNT oranının arttığı CNT:TPU:DMF (0,5), CNT:TPU:DMF (0,75) ve CNT:TPU:DMF (1) numunelerinde ise nanoliflerin inceldiği görülmektedir. Solventin buharlaşması sonucu oluşan polimer birikmelerinin boyutları da küçülmüştür. Bu durum CNT'lerin birleşmesini kolaylaştırmıştır.Hazırlanan bütün numunelerde DMF ve TPU olduğuna dair görüntüler mevcuttur. TPU:DMF,TPU:DMF:THF ve TPU:THF nanolif numunelerinin SEM görüntülerinde TPU polimerlerinin yapısı net olarak görülmektedir.



Şekil 3.4.CNT: TPU: DMF (1) (a), CNT: TPU: DMF (0,75) (b), CNT: TPU: DMF (0,5) (c) , TPU:DMF (d) ,TPU:THF (e) , TPU:DMF:THF (f) Sem Görüntüleri



Şekil 3.5. d-CNT/CNT: TPU: DMF (1) (a),d-CNT/CNT:TPU:DMF (0,75) (b), d-CNT/CNT:TPU:DMF (0,5) (c),d-CNT/ TPU:DMF (d) , d-CNT/TPU:DMF (e), d-CNT/:TPU:DMF:THF (f)

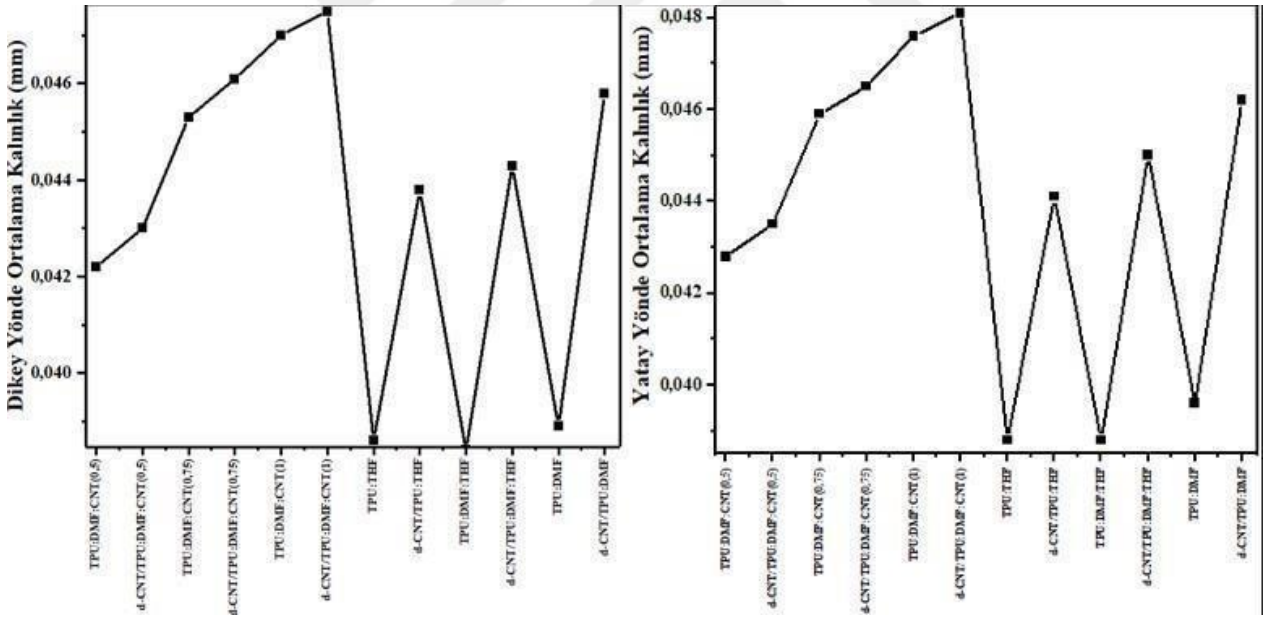
CNT:TPU:DMF(1), CNT:TPU:DMF(0,75) ve CNT:TPU:DMF(0,5) numunelerine bakıldığında CNT miktarı arttıkça TPU'dan gelen lif çaplarında gözle görülür bir daralma ve liflerde incelmeler mevcuttur.Bu durumun çözücü olarak kullanılan THF ve ya DMF'nin buharlaşması sonucu oluşabileceği düşünülen polimer birikmeleri ile gözlemlenmiştir. Solventin buharlaşması sonucu oluşan polimer birikmelerinin boyutları da küçülmüştür. Bu durum CNT'lerin birleşmesini kolaylaştırmıştır. Daldırılmış numunelerde ise lif yapılarında farklı bölgelerde birikmeler gözlenmiştir. Bu durumun daldırma işleminin manuel olarak yapılmasından kaynaklı olarak CNT'lerin nanoliflerin heryerine eşit şekilde dağılamamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. SEM görüntülerine bakıldığında nanoliflerden oluşan bir yüzey yerine daha çok polimer bulunduran ve ayrışmış nanolifler görülmektedir.Bu yapılarda doğal olarak CNT oranının daha çok yüzeye çıkartmak için artmış olması ve literatğrdeki standart yöntemleden farklı olarak etanol:cnt çözeltisine daldırılıp yöntem değişikliği uygulanması ile bu numunelerde yüzey morfolojisinin de bir takım değişimlere uğramasına yol açmıştır. Yüzeylerde de tamamen olmasa da homojen olan bölümlerinde göründüğü bir nano boyutta lif ve polimer dağılımı görülmemektedir. CNT:TPUesaslı nanofiber basınç sensörü numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 3.5 ve Şekil 3.6.'da gösterilmiştir. Görüntüler, tüm nanofiber yamaların sürekli ve bazı bölümlerde boncuksuz morfolojilere sahip olduğunu göstermiştir. Bu tek tip ve pürüzsüz morfolojiler, besinleri ve oksijenibağlı hücrelere dağıtmak için gözenekli bir ağ oluşturdu. Ortalama fiber çapı ve yönü, nanofiber yamaların karmaşık fizikokimyasal ve biyomedikal özelliklerini belirler. Nanofiber basınç sensörünumuneleri incelendiğinde daldırma yapılmış olan numunelerde lif çapları net şekilde artmıştır.Ortalama lif çapı en yüksek olan nunmune d-CNT/TPU:DMF numunesi olup ortalama çapı 22.92 ± 2,8 µm olan iç içe dokunmuş liflerden oluşturulmuştur.Ortalama lif çapı en düşük olan numune ise d-CNT/TPU:DMF (0,5) numunesi olup ortalama lif çapı 3,47±3,6 µm olarak ölçülmüştür.

3.7. Kalınlık Ölçümü

Numune kalınlıkları, Mutituyo 547-401 absolute Dijital Kalınlık Ölçüm Cihazı ile belirlenmiştir. Her bir ölçüm dikey ve yatay olmak üzere 5'er kez tekrarlanmış ve ortalam ölçümler alınmıştır. Ölçümlerin ortalama değerleri Tablo 3.1. de detaylı olarak verilmiştir.CNT oranı arttıkça numune kalınlıklarında artışlar net şekilde gözlemlenmiştir.Aynı zamanda daldırma işlemi uygulanan numunelerde de kalınlık artışı olmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; üretim yönü baz alınarak numunelerin yatay yöndeki ortalama kalınlıklarının dikey yöndeki ortalama kalınlıklarına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Elektro eğirme cihazı üretim sistemi düşünüldüğünde; çözelti plaka üzerine yüzey eni doğrultusunda beslendiğinden dolayı dikey yüzeykalınlığı ortalama olarak daha fazladır. Aynı üretim şartları ve parametreleri ile üretilen numunelerde CNT kullanımlıyla birlikte kalınlık artışı olduğu görülmektedir. İçerisinde CNT bulunmayan TPU:DMF,TPU:THF ve TPU:DMF:THF numunelerinde numune kalınlığı CNTkatılmadığı için daha az olduğu görülmüştür. Yani CNT artışıyla doğru orantılı olacak şekilde numune kalınlığı artış göstermiştir. Ayrıca daldırma işlemi yapılan nanolif numunelerinde CNT'lerin yüzeye çıkmasıyla birlikte CNT miktarının artışıyla dolaylı olarak numune kalınlığındaartış görülmektedir. Bu da kalınlık üzerindeki etkili faktörlerin başında CNT katkranının geldiğinigöstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar Grafik 3.6'da detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 3.9. Nanolif Yapılardaki Dikey ve Yatay Kalınlık Değerleri

	Dikey yönde Ort.Kalınlık (mm)	Yatay yönde Ort. Kalınlık (mm)
TPU:DMF:CNT(0,5)	0,0422	0,0428
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0,5)	0,0430	0,0435
TPU:DMF:CNT(0,75)	0,0453	0,0459
d-CNT/TPU:DMF:CNT(0,75)	0,0461	0,0465
TPU:DMF:CNT(1)	0,0470	0,0476
d-CNT/TPU:DMF:CNT(1)	0,0475	0,0481
TPU:THF	0,0386	0,0388
d-CNT/TPU:THF	0,0438	0,0441
TPU:DMF:THF	0,0384	0,0388
d-CNT/TPU:DMF:THF	0,0443	0,0450
TPU:DMF	0,0389	0,0396
d-CNT/TPU:DMF	0,0458	0,0462



Grafik 3.6. Dikey ve Yatay Kalınlık Değerleri

3.8. Çözelti İletkenliği ve Viskozite Testi

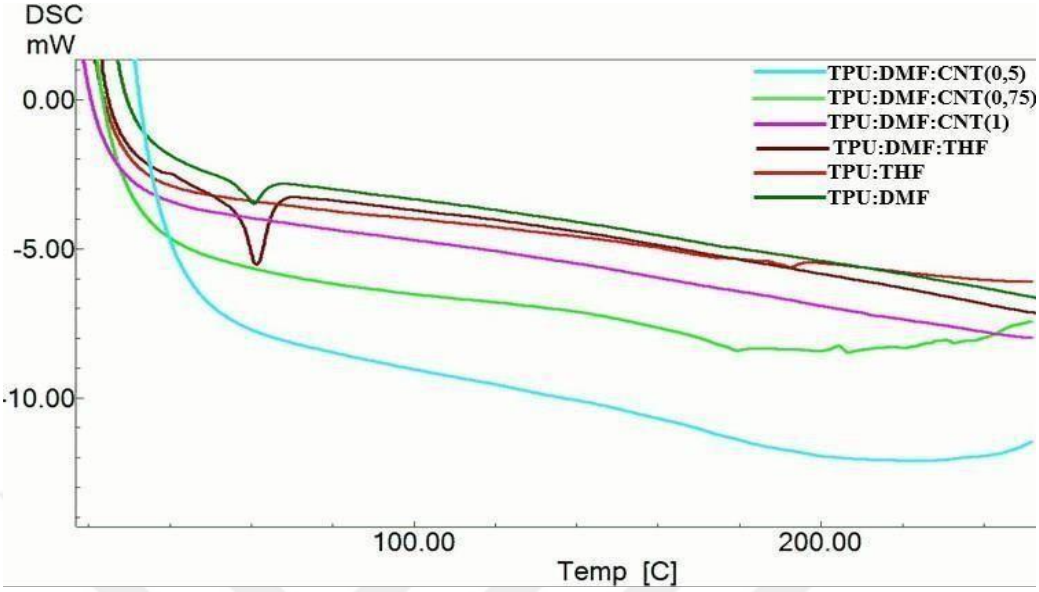
Aşağıdaki tablo incelendiğinde; uygulanan tekniğin ve CNT katkı oranının çözelti viskozitesi üzerinde direkt olarak etkili olduğu görülmektedir. Saf TPU çözeltilerinde CNT katkı maddesi içermediğinden dolayı en düşük viskozite değerlerine sahiptir. En düşük oran olan %0,5'lik çözelti ile viskozite değeri yaklaşık 2,5 kat artış göstermektedir. Bu da katkı oranının viskozite değerini büyük oranda artırdığını ispatlamaktadır. CNT oranı artıkça doğru orantılı olacak şekilde viskozitenin de yükseldiği görülmektedir.Çözelti iletkenliği testinden elde edilen sonuçlara göre ise en düşük iletkenlik değerine sahip olan çözelti; 0,8 µS/cm ile TPU:THF başta olmak üzere diğer saf TPU çözeltileridir. Bu değerler göz önüne alındığında; aynı yöntem ve parametreler ile elde edilen çözeltilerin iletkenlik değerleri karşılaştırıldığında, CNT katkısı ile iletkenlik bariz bir şekilde artış göstermiştir. Özellikle saf TPU çözeltisi ile başlangıç katkı oranı olan %1 lik CNT:TPU:DMF çözeltisi karşılaştırıldığında iletkenlik değeri en yüksek oranda artış göstermiştir. Bu da CNT nano partiküllerinin iletkenlik üzerinde direkt etkili olduğunu göstermektedir. CNT oranı ne kadar artarsa iletkenlik değerleri de buna paralel olarak artış göstermektedir. Böylelikle, CNT katkı oranı ile çözelti ile çözelti iletkenliği arasında doğru orantı olacak şekilde bir ilişki bulunduğu tespit edilmiştir. Değerler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3. 10. Çözelti İletkenlik ve Viskozite Değerleri

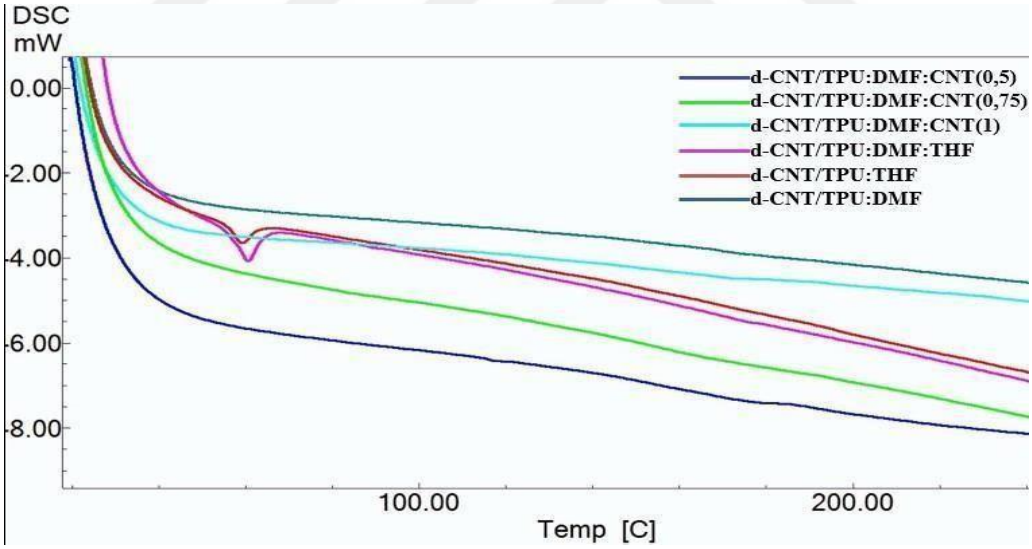
Çözelti Konsantrasyonu (%wt)	Viskozite Değeri (cP)	İletkenlik Değeri (µS/cm)
0 (TPU:DMF)	195	1,3
0 (TPU:THF)	152	0,8
0 (TPU:DMF:THF)	135	1,1
0,5	596	7,6
0,75	649	9,4
1	724	12,8

3.9. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi Sonuçları

Numunelerin erime ve kristalizasyon davranışlarını belirlemek için Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizi Shimadzu Corporation DSC-60 Plus/60A Plus Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazı ile azot atmosferinde gerçekleştirilmiştirc. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilen daldırma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış nanolif basınç sensörü numunelerinin DSC termogramları, tüm numunelerin,moleküler zincirlerinin bozunmasıyla bağlantılı başlangıçta özellikle d-CNT/TPU:DMF:THF ve TPU:DMF:THF numunesinde 75°C civarında endotermik bir tepe ile karakterize edilen benzer bir termal davranış sergilediğini göstermektedir.Bu durum nanolif sensör numunelerine birden fazla çözücü girdiğinde yapısında meydana gelen değişim olarak yorumlanabilir. CNT: TPU: DMF (0,75) basınç sensörü nanolif numunesinde yaklaşık 180 ℃ , 215 ℃ ve 230℃ sıcaklıklarında yeni dalgalanmalardan kaynaklı bozulmalar meydana geldi. Erime endotermik zirveleri,erime noktasından daha düşük sıcaklıklarda bozunduğu için hiçbir numunede gözlenmedi [61, 62]. DSC ısıtma taramaları sırasında, cam geçişinde konformasyonel değişikliklerde ilgili herhangi bir değişiklik gözlemlenmedi.Genellikle yüksek kristalli numunelerde gözlenen bu davranış, FTIR verilerini desteklemektedir.



Şekil 3.6. Daldırma İşlemi Yapılmamış Basınç Sensörü Numunelerinin DSC Eğrileri



Şekil 3. 7. Daldırma İşlemi Yapılmış Basınç Sensörü Numunelerinin DSC Eğrileri

3.10. Şişme Testi

Vücut içinde yapı iskelelerinin şişme ve bozunma davranışlarını incelemek amacıyla bu testler yapılmıştır. Phosphate-buffered saline (ph: 7.4) vücut dokusu sıvısının pH ına yakın olduğundan dolayı bu test için kimyasal kullanılmıştır.Şişme testi için vücut sıvısı taklit edildiğinden malzeme şişmeye uğrar ve hacimce daha fazla alan kapladığından vücutta immün yanıtının artmasına sebep olur. Aynı zamanda materyalin fazla şişmesi çevre dokulara bası yaparak doku stresine sebep olabilir. Degredasyon hedefe bağlı olarak geliştirilen sisitemde vücutta ne kadar sürede bozunduğunun saptanmasını sağlamak için kritik rol oynamaktadır. Bu kapsamda,vücutta kalış süresinin tayininin yapılması için degredasyon testi uygulanmıştır. Şişme testini daha detaylı olarak tanımlamak gerekirse öncelikle şişme, bu çalışmada kullanılan polimer yapısındaki hacminin belirli bir oranda ani gerçekleşen ve zaman içerisinde denge haline gelen bir değişim olarak tanımlanabilir. Bu işlem sadece tercih edilen çözücülerin yapısına katılarak çözünen polimerlerin gözenek ve boşluklarına yayılarak polimer evresine geçmesi kadar basit bir reaksiyon değildir. Şişme testi esnasında kullanılan çözücü içerisinde bulunan moleküllerin yapısal boşluklara dağılımı sağlanırken, polimerin süper moleküler yapılarının arasını da zorla açar. Buna yapılar arası şişme denir. Eğer çözücü molekülleri yapıların içine girerse, makromoleküller zorla açılır. Buna da yapı içi şişme denir. Çözücü içeriği artarken, polimer yapısı yavaş yavaş birbirinden ayrılır ve çözeltide içinde çözücü bulunan oynak bir polimerik ağ yapı meydana gelir [63].

Bu çalışmada bu testin yapılma sebebi insan vücuduna koyulacak olan nanolif basınç sensörü numunelerinin insan vücudunda herhnagi bir sıvıyla temas ettikten sonra nanolif yüzeyinde meydana gelebilecek bozunmadan kaynaklı şişmenin ne kadar zaman içinde tekrar denge haline geldiğini gözlemlemek amacıyla yapılmıştır. Elde edilen numunelerin üstüne tampon çözelti amacıyla kullanılan ve pH değeri 7.4 olan Phosphate Buffered Saline (PBS) kullanılmıştır.Molekül ağırlığı yüksek olan malzeme daha kısa sürede şişmektedir. TPU bu alanda molekül ağırlığı yüksek olduğundan 2 gün sonunda şişme ve degredasyonu etkilediği görülmüştür. Aynı zamanda bu durum yapı iskelesinin kristallik özelliğini de etkiler.Kristal özelellikte ki polimer zincirleri birbirne daha yakın oldugundan aralarındaki çözücü geçişi çok iyi sağlanamdığından dolayı daha uzun sürede bozunma süresi göstermektedir. Ancak TPU amorf bir malzeme oldugundan dolayı polimer

zinvcirleri birbirinden daha uzak olduğu için su ve sıvı geçişi daha kısa sürede olur. Bu test sonucunda PBS ile temas eden numune yapısında önce belirli bir miktarda kütlesel artış gözlenmiştir. Daha sonra belirli gün aralıklarında tartılan numune ilk tartılan ağırlığına yaklaşmıştır.

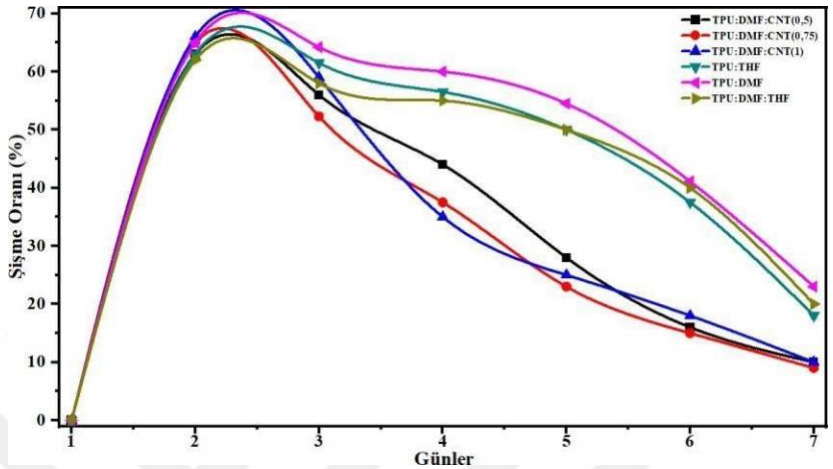
Üretilen basınç sensörlerinin yapısında ki CNT miktarının artmasıyla şişme yüzdelerinin arttığı belirlendi. Nanolif basınç sensörlerinin şişme davranışları zamana karşı incelendi. Nanofiber yapı iskeleleri bir hafta boyunca PBS içinde inkübe edildi ve test sırasında aynı PBS kullanıldı. Şişme değerlerinin zamanla değişimi 37ºC'de 7 gün boyunca incelendi. Etüvde kurutulup sabit tartıma getirilen disk şeklindeki kuru nanoliflerin ilk tartımları (w_D) alındıktan sonra, nanolifler 50,0 ml fosfat tamponu (PBS, pH=7,4) içeren ağzı kapalı şişelere konuldu. Belirli zaman aralıklarında ortamdan alınan nanolifler, yüzeyleri hafif bir şekilde kâğıtlakurulanarak tartıldı ve tekrar şişme ortamına konuldu. Bu işleme nanolifler denge şişme değerine ulaşıncaya kadar devam edildi ve nanolif disklerin kütlelerindeki değişimler kaydedildi. Bu test sonucunda nanolif yapı iskeleleri PBS'de hızla şişti ve 7 gün içinde denge durumuna ulaştı.

Grafik 3.7 ve Grafik 3.8 önceden belirlenmiş zamanlarda 37°C sıcaklıkta CNT:TPU esaslı numunelerdeki bağ yapı iskelelerinin şişme oranları gösterilmektedir. İskelelerin şişme hızı, denge durumuna ulaşana kadar zamanla arttı. 7 günlük inkübasyondan sonra, d-CNT/TPU:DMF:CNT(1) yapısından elektrospun yapılan nanolif yapılar için maksimum %70 şişme oranı gözlemlendi.Yapıdaki CNT oranı arttıkça şişme yüzdesinin arttığı gözlenmiştir. Kalan diğer numunelerde de yüksek şişme oranı gözlense de CNT miktarındaki artışla orantılı olarak bu oranın maksimum seviyeye çıktığı görülmüştür.En düşük şişme oranı ise d-CNT/TPU:DMF numunesinde %65 olarak gözlenmlenmiştir. Bu testte sıvı ortam olarak fosfat tamponlu salin (PBS, pH = 7.4) kullanılmış ve PBS'li yapı iskeleleri 37°C'de 250 rpm ile bir termosallayıcı (BIOSAN TS-100C) üzerine yerleştirilmiştir.

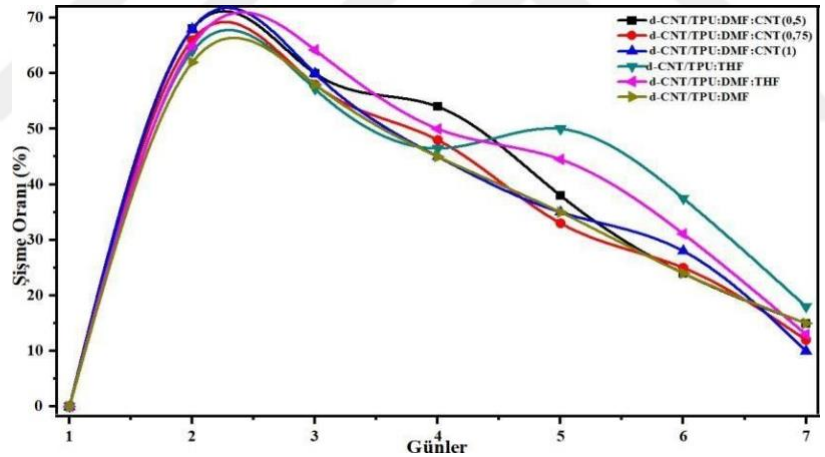
Bağ iskelelerinin şişme oranı Denklem 3.1. kullanılarak hesaplandı.

$$SR = \frac{W_S - W_D}{W_D} \cdot 100 \qquad Denklem\ 3.1.$$

W_S ve W_D sırasıyla şişmiş ve kuru ağırlık değerlerini temsil etmektedir.



Grafik 3.7. Daldırma Yapılmamış Numunelere Uygulanan Şişme Testi



Grafik 3.8. Daldırma Yapılmış Numunelere Uygulanan Şişme Testi

4. SONUÇ

Nanolif basınç sensörlerinin yapısındaki bileşen (martis) içerisinde dağılan CNT'ler ile iletkenliği yüksek olan yapılardır. Bu çalışma kapsamında, hassas ve ölçeklenebilir piezorezistif basınç sensörü yapılarında kullanılmak üzere elektro eğirme tekniği ile çok duvarlı karbon nanotüp/ termoplastik poliüretan esaslı nanolifler üretilmiştir. Bu kapsamda başlangıçta CNT katkı oranı değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Akabinde bu defa CNT olmayan yapılar için farklı çözücüler denenerek nanolifler üretilmiştir.Elde ediilen bu numunelerde CNT'lerin yeterince nanolif yapıların yüzeyine çıkmadığı düşünülerek bu defa eldeki numuneleri %1 konstantrasyonda Etanol:CNT çözeltisi hazırlanmıştır.Bu çözelti hazırlanırken 1 saat ve 60 duty cycle sonikasyon şiddetinde çözelti dispersiyonu sağlanmış olup solusyon hazırlanmıştır.Daha sonra eldeki nanolif numuneler 2x1 cm boyutunda kesilerek çözelti içerisine 1 saat süre ile daldırılıp kurutulmuştur.Daha sonra bu numunelerden multimetre ile direnç ölçümleri alınabilmiş olup CNT'lerin yüzeye çıktığı da teyit edilmiş oldu. Son olarak üretim parametreleri optimize edilmiş ve optimum sonuçlar ışığında üretim tekrarlanmıştır.

Elde edilen çözeltilerin analizi ele alındığında, çözelti viskozite ölçümleri neticesinde, en yüksek viskoziteye sahip olan numune d-CNT/TPU:DMF:CNT (1) olan numune olduğu görülmüştür. Çünkü artan CNT konstantrasyonunun katkı maddesinin çözelti içerisinde dağılımı yüksek seviyede sağlamış olup çözelti yoğunluğu daha fazla artış göstermiştir. Çözelti iletkenlik ölçümleri neticesinde, en düşük iletkenlik değerine sahip olan çözelti; 0,8 µS/cm ile TPU:THF içeriğine sahip saf TPU çözeltisidir. CNT katkısı ile iletkenlik değerinde net bir artış gözlenmiştir.Çözelti iletkenliği üzerinde etkili bir parametre olarak CNT konstantrasyonu artışı ve çözücü değişiminden

kaynaklanan değişimler olarak göze çarpmıştır. CNT oranındaki artışa göre paralel olarak çözelti viskozitesi ve çözelti iletkenliği artış göstermektedir.

Üretilen nanoliflerin karakterizasyonu SEM analizi, FT-IR, kalınlık ölçümü, bağıl direnç,hassasiyet,basınca dayaı farklı parametrelerdeki ölçümler , ısıl analiz olan DSC , elektriksel iletkenlik- direnç ölçümü ve elektromekanik ölçümler gerçekleştirilerek yapılmıştır. SEM görüntüleri değerlendirildiğinde; tüm nanolif tiplerinde fiberlerin pürüzsüz yüzeyi belli başlı birikmeler dışında korunmuştur. Konsantrasyondan bağımsız olarak hiçbir türde nanolif yüzeyinde damlalar, erime kusurları veya başka kusurlar gözlenmemiştir. Yapıya CNT ilavesi ile nanofiber yamaların ortalama lif çapı artmıştır. Yapıdaki CNT konsantrasyonu arttıkça nanofiber yamaların iletkenlik eğerleri de paralele olarka arttığı sonucuna varılmıştır. Daldırılmış numunelerde ise lif yapılarında farklı bölgelerde birikmeler gözlenmiştir. Bu durumun daldırma işleminin manuel olarak yapılmasından kaynaklı olarak CNT'lerin nanoliflerin heryerine eşit şekilde dağılamamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Görüntüler, tüm nanofiber yamaların istisnai birikmeler dışında genel olarak homojen, sürekli ve boncuksuz morfolojilere sahip olduğunu gösterdi. Bu tek tip ve pürüzsüz morfolojiler, besinleri ve oksijeni bağlı hücrelere dağıtmak için gözenekli bir ağ oluşturdu. Ortalama fiber çapı ve yönü, nanofiber yamaların karmaşık fizikokimyasal ve biyomedikal özelliklerini belirler.CNT esaslı nanolif basınç sensörlerinde, daldırılmamış numunelerde ortalama çapı 3,47 ± 3,5 μm daldırılmış numunelerde ise 9,50 ± 6,5 μm olan iç içe dokunmuş liflerden oluşturulmuştur. Bu yapılarda doğal olarak CNT oranının daha çok yüzeye çıkartmak için artmış olması ve literatürdeki standart yöntemleden farklı olarak Etanol:CNT çözeltisine daldırılıp yöntem değişikliği uygulanması ile bu numunelerde yüzey morfolojisinin de bir takım değişimlere uğramasına yol açmıştır.

FTIR anlizine bakıldığı zaman , nanolif yapılarında H-bağlı karbonil grubunun yoğunluğu, TPU granül'den daha düşüktür. Bu gözlem, TPU granül'ün karbonil grubu ile nanokompozitlerde N-H ve O-H grupları arasındaki bazı etkileşimleri göstermektedir. CNT bazlı nanofiber malzemelerin moleküler yapısına duyarlı FTIR spesifik absorpsiyon bantları görülmektedir. Bu nanofiber yamalar 3315.03 cm^{-1} ve 3318 cm-1'de zirveler gösterdi. 1727.91 cm^{-1} ve 1594.84 cm^{-1}'de iki ek absorpsiyon tepe noktası bunlar sırasıyla amid I ve amid II de N-H bükülmesini temsil ediyordu.

1413.57 cm^{-1},1411.64 cm^{-1} ve 1218.79 cm^{-1}'deki pikler, sırasıyla C-H'nin asimetrik gerilmesine olarak yorumlandı.

Isıl analiz olarak yapılan DSC sonucu değerlendirildiğinde, TPU'nun termal bozunması, N–H ve C=O grupları tarafından üretilen hidrojen bağlarının kırılmasıyla başlamış, ardından sert ve yumuşak blokların ayrışması takip etmiştir. TPU ile karşılaştırıldığında, TPU/CNT'lerin, karboksil ile modifiye edilmiş CNT'ler ve TPU arasında hidrojen bağları oluştuğundan ve böylece TPU'nun termal stabilitesini arttırdığından, daha yüksek ilk bozunma sıcaklıklarına sahip oldukları bulundu.Bununla birlikte, CNT'lerin yüksek termal iletkenliğinden etkilenen TPU/CNT'ler, saf TPU'dan daha düşük nihai bozunma sıcaklıkları sergiledi. TPU'nun termal bozunmasının, NH ve CO grupları tarafından oluşturulan hidrojen bağlarının kırılmasıyla başladığı, ardından nispeten düşük sıcaklıklarda sert blok ayrışmasının ve yüksek sıcaklıklarda yumuşak blok bozulmasının takip ettiği gözlenmiştir.

Genel olarak bu çalışma sonucunda elektro eğirme metoduyla üretilen CNT:TPU esaslı basınç sensörü tasarımında ilk aşamada literatürdeki standart metodlardan biriyle sürekli farklı parametreler denenerek optimizasyon aşaması yapıldıktan sonra üretilen nanolif yapılara uygulanan elektriksel ölçümler sonucunda kayda değer herhangi bir sonuç alınamamıştır.Bunun gerekçesi olarak ise CNT'lerin yeteri kadar yüzeyde olmadığı düşünülmüştür. Buna çözüm olarak bu defa çalışmanın devamında CNT'lerin yüzeye çıkabilmesi adına öncelikle CNT:DMF çözeltisi hazırlanıp daldırma denemeleri yapılmıştır .Ancak bu denemeler sonucunda aynı çözücü ileüretilen nanolif yapının yine aynı çözücü kullanılarak hazırlanan çözeltiye daldırılmasından dolayınanolif ypılarında direk erime gözlenmiştir. Bu sebeple farklı bir çözücü arayışına girilmiş ve %1 konstantrasyona sahip CNT:Etanol çözeltisi hazırlanmıştır. Daha sonra 2x1 cm boyutunda kesilen nanolifler bu çözelti içine daldırılarak CNT'lerin yüzeye çıkması sağlanmıştır. Bu işlem sonucunda net olarak görülen sonuç CNT oranı ne kadar fazla ise elde edilmek istenen nanolif basınç sensörü numunesi de o kadar iletken ve hassas bir yapıya sahip ve aynı zamanda pürüzsüz bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Ancak manjel bir daldırma yapıldığından dolayı CNT'ler yüzeye %100 homojen bir şekilde dağılmadığından bölgesel ölçümlerde zaman zaman farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu da SEM sonuçlarında ki bazı bölgelerdeki birikmeleri açıklamaktadır.Yapılan daldırma işlemi SEM sonuçlarıyla örtüşmektedir.Aynı zamanda daldırılan numunelerdeki FTIR

sonuçlarında görülen pikler literatür ile kıyaslandığında bu çalışmada CNT ile çalışıldığının kanıtı olmuş aynı zamanda daldırma işlemi ile bu piklerde belli başlı tepe noktaları dışında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.Uzun vaadede bu numunelerin zaman içerisinde direnç değerlerindeki değişimi görmek amacıyla haftalık direnç ölçümleri belirli ağırlıklar altında alınarak daldırma yapılan numunelerdeki CNT lerin yüzeyde ne kadar kaldığını görmek ve ölçülen direnç değerlerinin özellikle virgülden sonra ki hanelerinde ufak tefek değişimlerin olduğunu görmek CNT lerin yüzeyde 1 ay boyunca her hafta alınan ölçümlerde etkisini kaybetmediği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma ile literatüre farklı bir bakış açısı kazandırılığı düşünülmüştür ve devamı olabilecek bir çalışmadır. Farklı parametreler ile de basınç sensörü üretimleri denenerek çalışmanın sürdürülebilirliği için gerekli işlemler devam edecektir.

KAYNAKÇA

[1] S. Demiroglu, S. Vivekanandhan, M. Misra Ve Ö. Seydibeyoğlu, «The Use Of Nanotechnology For Fibre-Reinforced Polymer Composites,» Fiber Technology For Fiber-Reinforced Composites, Pp. 277-297, 2017.

[2] A. B. Rashid, M. Haque, M. Islam Ve R. U. Labib, «Nanotechnology-Enhanced Fiber-Reinforced Polymer Composites: Recent Advancements On Processing Techniques And Applications,» Heliyon, Pp. 1-29, 2024.

[3] J. Huang, M. Zhao, Y. Hao, D. Li, J. Feng, F. Huang Ve Q. Wei, «Flexible, Stretchable, And Multifunctional Electrospun Polyurethane Mats With 0d-1d-2d Ternary Nanocomposite-Based Conductive Networks,» Advanced Electronic Materials , 2021.

[4] A. Ahmed, Y. Jia, Y. Huang, N. A. Khoso, H. Deb, Q. Fan Ve J. Shao, «Preparation Of Pvdf-Trfe Based Electrospun Nanofibers Decorated With Pedot-Cnt/Rgo Composites For Piezo-Electric Pressure Sensor,» Journal Of Materials Science: Materials İn Electronics, Pp. 14007-14021, 2019.

[5] G. Li, K. Dai, M. Ren, Y. Wang, G. Zheng, C. Liu Ve C. Shen, «Aligned Flexible Conductive Fibrous Networks For Highly Sensitive, Ultrastretchable And Wearable Strain Sensors,» Journal Of Materials Chemistry C, 2018.

[6] S. Kumar, G. Graninger, S. Hawkins Ve B. Falzon, «A Nanostructured Cellulose-Based İnterphase Layer To Enhance The Mechanical Performance Of Glass Fibre-Reinforced Polymer Composites,» Composites Part A: Applied Science And Manufacturing, 2021.

[7] Z. Li, Z. Liu, Z. Lei Ve P. Zhu, «An İnnovative Computational Framework For The Analysis Of Complex Mechanical Behaviors Of Short Fiber Reinforced Polymer Composites,» Composite Structures, 2021.

[8] G. Mayakrishnan, R. Vanaraj, T. Kitauchi, R. Kanthapazham, S. C. Kim Ve I. S. Kim, «Preparation And Characterization Of Polymer-Based Electrospun Nanofibers For Flexible Electronic Applications,» Advanced Materials For Electrocatalysis And Energy Storage, 2023.

[9] I. Farooq Ve A. Al-Abduljabbar, «Electrospun Polymer Nanofibers: Processing, Properties, And Applications,» Polymers 2023, 2022.

[10] N. Ashammakhi, A. Ndreu, N. L. Ve Y.Yang, «Advancing Tissue Engineering By Using Electrospun Nanofibers,» Regeneratif Medicine, Pp. 547-574, 2008.

[11] S. Gouda Ve J.Patra, «Application Of Nano Technology İn Textile Engineering: An Overview,» Journal Of Engineering And Technology Research, 2023.

[12] K. Qi Ve Y. Zhou, «Weavable And Stretchable Piezoresistive Carbon Nanotubes-Embedded Nanofiber Sensing Yarns For Highly Sensitive And Multimodal Wearable Textile Sensor,» Carbon 170, 2020.

[13] I. Alghoraibi, Different Methods For Nanofibers Design And Fabrication, Şam: Handbook Of Nanofibers,2018.

[14] W. Weng, P. Chen, S. He, X. Sun Ve H. Peng, «Smart Electronic Textiles,» Angewandte Chemie , 2016.

[15] I.Kiron, «Application Of Nanotechnology İn Textile Industry,» 07 10 2024. [Çevrimiçi]. Available: Https://Www.Fibre2fashion.Com/İndustry-Article/7135/Application-Of-Nanotechnology-İn-Textile-İndustry.

[16] «Nanotechnolohy Textiles,» 15 9 2024. [Çevrimiçi]. Available: Https://Www.Azonano.Com.

[17] G. Ehrmann Ve A. Ehrmann, «Electronic Textiles,» Encyclopedia, Pp. 115-130, 2021.

[18] T. Hughes Ve T. Dias, «A Historical Review Of The Development Of Electronic Textiles,» Fibers, Pp. 1-15, 2018.

[19] E. Ismar, S. K. B. Ezgi Ismar, F. Kalaoglu Ve V. Koncar, «Futuristic Clothes: Electronic Textiles And Wearable Technologies,» Global Challanges, 2020.

[20] J. Woo, S. Y. Cho, J. Jeong, D. Seok, R. Kim, Y. Soo, T. Kim, B. Choi, W. Hong Ve H. J. Kim, «Pyroprotein-Based Electronic Textiles With High Stability,» Europe Pmc, 2016.

[21] Y. Zhuang, Y. Guo, J. Li, Y. Yu, K. Jiang, H. Zhang Ve S. Guo, «Study On The Forming And Sensing Properties Of Laser-Sintered Tpu/Cnt Composites For Plantar Pressure Sensors,» The International JournalOf Advanced Manufacturing Technology, P. 2211–2222, 2021.

[22] B. Earp, D. Dunn, J. Phillips Ve R. Agrawal, «Enhancement Of Electrical Conductivity Of Carbon Nanotube Sheets Through Copper Addition Using Reduction Expansion Synthesis,» Materials Research Bulletin, 2020.

[23] J. Lee, H. Kwon, J. Seo, S. Shin, J. H. Koo, C. Pang, S. Son, J. Hyung, Y. Hoon, D. Eun Ve T. Lee, «Conductive Fiber-Based Ultrasensitive Textile Pressure Sensor For Wearable Electronics,» Advanced Materials, 2015.

[24] R. Moriche, A. Jiménez, M. Sánchez, S. Prolongo Ve A. Ureña, «High Sensitive Damage Sensors Based On The Use Of Functionalized Graphene Nanoplatelets Coated Fabrics As Reinforcement İn Multiscale Composite Materials,» Composites Part B: Engineering, Pp. 31-37, 2018.

[25] L. Castano Ve A. Flatau, «Smart Fabric Sensors And E-Textile Technologies: A Review,» Smart MaterialsAnd Structures, 2014.

[26] L. Lu, X. Wei, Y. Zhang, G. Zheng, K. Dai, C. Liu Ve C. Shen, «A Flexible And Self-Formed Sandwich Structure Strain Sensor Based On Agnw Decorated Electrospun Fibrous Mats With Excellent Sensing Capability And Good Oxidation İnhibition Properties,» Journal Of Materials Chemistry C, 2017.

[27] M. Ren, Y. Zhou Ve Y. Wang, «Highly Stretchable And Durable Strain Sensor Based On Carbon Nanotubes Decorated Thermoplastic Polyurethane Fibrous Network With Aligned Wave-Like Structure,» Chemical Engineering Journal 360, 2023.

[28] D. Mamalis Ve T. Flanagan, «Effect Of Fibre Straightness And Sizing İn Carbon Fibre Reinforced PowderEpoxy Composites,» Composites Part A: Applied Science And Manufacturing, Pp. 93-105, 2018.

[29] R. Hoepffner, G. Kapeller, M. Aufleger Ve M. Goltz, «Distributed Fiber Optic Strain Sensing İn Concrete Structures, Loose Soil Material And Landslides,» Wasserwirtschaft, Pp. 35-41, 2012.

[30] B. Wang, G. Fang, X. Tan Ve J. Liang, «Nvestigation On The Longitudinal Compressive Strength Of Unidirectional Carbon Fiber/Nanoparticles Reinforced Polymer Composites Using Fft-Based Method,» Composite Structures, 2020.

[31] H. Zhang, L. Quan, A. Gao, Y. Tong, F. Shi Ve L. Xu, «The Structure And Properties Of Polyacrylonitrile Nascent Composite Fibers With Grafted Multi Walled Carbon Nanotubes Prepared By Wet Spinning Method,» Polymers, 2019.

[32] J. Cai, S. Chawla Ve M. Naraghi, «Piezoresistive Effect Of İndividual Electrospun Carbon Nanofibers ForStrain Sensing,» Carbon 77, Pp. 738-746, 2014.

[33] M. Gdoutos Ve C. Aza, «Self Sensing Carbon Nanotube (Cnt) And Nanofiber (Cnf) Cementitious Composites For Real Time Damage Assessment İn Smart Structures,» Cement And Concrete Composites,Pp. 162-169, 2024.

[34] X. Xu, Y. Chen, P. He, S. Wang, K. Ling, L. Liu, P. Lei, X. Huang, H. Zhao, J. Cao Ve J. Yang, «Wearable Cnt/Ti3c2tx Mxene/Pdms Composite Strain Sensor With Enhanced Stability For Real-Time Human Healthcare Monitoring,» Nano Research, P. 2021, 2875–2883.

[35] J. Chen, Q. Yu, X. Cui, M. Dong, J. Zhang, C. Wang, J. Fan, Y. Zhu Ve Z. Guo, «An Overview Of Stretchable Strain Sensors From Conductive Polymer Nanocomposite,» Journal Of Materials Chemistry C,2019.

[36] H. Pourgheysari, H. Pourzamani, A. Ebrahimi Ve G. Bonyadinezhad, «Comparison Between Distilled Water And Dimethylformamid As Solvent To Fabricate Electrodes Coated With Single Wall Carbon Nanotubes,» International Journal Of Environmental Health Engineering, 2023.

[37] Y. Jang, H. Lim, H. Kim, H. Yun, C. Lee Ve Y. Seo, «Strain-Detecting Properties Of Hybrid Pe And Steel Fibers Reinforced Cement Composite (Hy-Frcc) With Multi-Walled Carbon Nanotube (Mwcnt) Under Repeated Compression,» Results İn Physics, 2020.

[38] J. H. Eun, S. M. Sung, M. Seong, B. Choi Ve J. S. Lee, «Effect Of Mwcnt Content On The Mechanical And Piezoelectric Properties Of Pvdf Nanofibers,» Materials & Design, 2021.

[39] J. Ye Ve J. Si, «Surface Modification Of Electrospun Tpu Nanofiber Scaffold With Cnf Particles By Ultrasound-Assisted Technique For Tissue Engineering,» Macromolecular Materials And Engineering, 2023.

[40] L. Tong, X. Wang, X. He, D. Nie, J. Zhang, B. Zhang, Z. Guo Ve Z. Long, «Electrically Conductive Tpu Nanofibrous Composite With High Stretchability For Flexible Strain Sensor,» Nanoscale Research Letters, 2018.

[41] A. Kumar Ve D. Kumar, «Effect Of Nanofiber On Material Properties Of Vapor-Grown Carbon Nanofiber Reinforced Thermoplastic Polyurethane (Tpu/Cnf) Nanocomposites Prepared By Melt Compounding,» Composites Part A: Applied Science And Manufacturing, Pp. 1471-1482, 2023.

[42] A. Frick Ve A. Rochman, «Characterization Of Tpu-Elastomers By Thermal Analysis (Dsc),» Polymer Testing, Pp. 413-417, 2004.

[43] R. Li, M. Panahi, T. Chen, A. Wang, R. Xu Ve X. Xiao, «Highly Sensitive And Flexible Capacitive Pressure Sensor Based On A Dual-Structured Nanofiber Membrane As The Dielectric For Attachable Wearable Electronics,» Applied Electronic Materials, 2022.

[44] J. Tang, Y. Wu, S. Ma Ve T. Yan, «Flexible Strain Sensor Based On Cnt/Tpu Composite Nanofiber YarnFor Smart Sports Bandage,» Composites Part B Engineering, 2022.

[45] X. Wang, Q. Li Ve X. Tao, «Enhanced Electromechanical Resilience And Mechanism Of The Composites-Coated Fabric Sensors With Crack-İnduced Conductive Network For Wearable Applications,» Smart Materials And Structures, 2022.

[46] W. Lu Ve C. Macosko, «Comparing The Compatibility Of Various Functionalized Polypropylenes With Thermoplastic Polyurethane (Tpu),» Polymer, 2004.

[47] S. Yong Ve K. Aw, «Modeling Electrical Resistance Behavior Of Soft And Flexible Piezoresistive SensorsBased On Carbon-Black/Silicone Elastomer Composites,» Sensing And Imaging , 2022.

[48] X. Cui, Y. Jiang, Z. Xu, M. X, Y. Jiang, P. Song, Y. Zhao Ve H. Wang, «Stretchable Strain Sensors With Dentate Groove Structure For Enhanced Sensing Recoverability,» Composites Part B: Engineering, 2024.

[49] B. Prasad, V. Rathi Ve P. Patil, «Modelling And Simulation Of Conductive Polymer Nanocomposites Based Piezoresistive Strain Sensor,» Materials Today Proceedings, 2021.

[50] C. Zhou, W. Sun, C. Jia, L. Xu, K. Dai, X. Yan Ve M. Li, «Highly Stretchable And Sensitive Strain SensorWith Porous Segregated Conductive Network,» Applied Materials & Interfaces, 2019.

[51] T. Subbiah Ve G. Bhat, «Electrospinning Of Nanofibers,» Journal Of Applied Polymer Science, Pp. 557 - 569, 2005.

[52] Y. Li, J. Zhu, H. Cheng, G. Li, H. Cho, M. Jiang, Q. Gao Ve X. Zhang, «Developments Of Advanced Electrospinning Techniques: A Critical Review,» Advanced Materials Technologies, 2021.

[53] H. Chen, M. Huang, Y. Liu, L. Meng Ve M. Ma, «Functionalized Electrospun Nanofiber Membranes ForWater Treatment: A Review,» Science Of The Total Environment, 2020.

[54] A. Nayl, N. Awwad, J. Wu Ve X. Mo, «Review Of The Recent Advances İn Electrospun Nanofibers Applications İn Water Purification,» Polymers, 2022.

[55] T. We Ve S. Ramakrishna, «A Review On Electrospinning Design And Nanofibre Assemblies,» Nanotechnology, 2024.

[56] Z. Qin, X. Sun, Q. Yu, H. Zhang, X. Wu, M. Yao, W. Liu, F. Yao Ve J. Li, «Carbon Nanotubes/Hydrophobically Associated Hydrogels As Ultrastretchable, Highly Sensitive, Stable Strain, And Pressure Sensors,» Applied Materials & Interfaces, 2020.

[57] X. Wang, R. Xue, M. Li Ve X. Guo, «Strain And Stress Sensing Properties Of The Mwcnt/Tpu NanofiberFilm,» Surfaces And Interfaces, 2022.

[58] T. Xu Ve H. Peng, «Development Of Mxene-Based Flexible Piezoresistive Sensors,» Journal Of Polymer Engineering, 2024.

[59] J. Xiao, J. He, W. Wang, M. Chen Ve R. Guo, «A Multifunctional Flexible Strain Sensor Based On An Excellent Sensing Performance Pdms-Mxene@Cnt/Tpu Nanofiber Membrane With Hydrophobic And Photothermal Conversion Performance,» New Journal Of Chemistry, 2023.

[60] W. Wang, Y. Ma, T. Wang, K. Ding, W. Zhao, L. Jiao, D. Shu, C. Li, F. Hua, H. Jiang Ve B. Cheng, «Double-Layered Conductive Network Design Of Flexible Strain Sensors For High Sensitivity And Wide Working Range,» Applied Materials & Interfaces, 2022.

[61] M. Lin, Z. Zheng, L. Yang, M. Luo, L. Fu, B. Lin Ve C. Xu, «A High-Performance, Sensitive, Wearable Multifunctional Sensor Based On Rubber/Cnt For Human Motion And Skin Temperature Detection,» Advanced Materials, 2022.

[62] C. Li, B. Zhou, Y. Zhou, J. Ma, S. Chen, S. Jerrams Ve L. Jiang, «Carbon Nanotube Coated Fibrous TubesFor Highly Stretchable Strain Sensors Having High Linearity,» Nanomaterials 2022.

[63] J. Luo, H. Lu, Q. Zhang Ve Y. Yao, «Flexible Carbon Nanotube/Polyurethane Electrothermal Films,» Carbon, 2024.

[64] N. Karaca, G. Temel, D. K. Balta Ve M. Aydin, «Preparation Of Hydrogels By Photopolymerization Of Acrylates İn The Presence Of Type I And One-Component Type Iı Photoinitiators,» Journal Of Photochemistry And Photobiology A Chemistry , Pp. 1-6, 2010.

[65] O. Akalın, «Gelatın Hydrogels Synthesıs, Swellıng/Degradatıon Behavıours Investıgatıon And Formatıon Of Suıtable İmmobilized Lipase-Gelatın Hydrogels Systems,» Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.

[66] Z. Eivazi, A. Solouk, M. Shafieian Ve M. Haghbin, «Electrospun Polyurethane/Carbon Nanotube Composites With Different Amounts Of Carbon Nanotubes And Almost The Same Fiber Diameter For Biomedical Applications,» Materials Science Journal, 2021.

[67] L. Du, X. Quan, X. Fan Ve G. Wei, «Conductive Cnt/Nanofiber Composite Hollow Fiber Membranes With Electrospun Support Layer For Water Purification,» Journal Of Membrane Science , 2019.

[68] J. Li, X. Liu, H. Sun, L. Wang, J. Zhang, L. Deng Ve T. Ma, «An Optical Fiber Sensor Coated With Electrospinning Polyvinyl Alcohol/Carbon Nanotubes Composite Film,» Sensors, 2020.

[69] W. Li, F. Xu, W. Liu Ve L. Sun, «A Novel Flexible Humidity Switch Material Based On Multi-Walled Carbon Nanotube/Polyvinyl Alcohol Composite Yarn,» Sensors And Actuators B Chemical , 2023.

[70] Y. Song, H. Chen, Z. Su Ve X. Chen, «Highly Compressible Integrated Supercapacitor–Piezoresistance-Sensor System With Cnt–Pdms Sponge For Health Monitoring,» Wiley, 2017.

[71] Y. Lu, J. Jiang, S. Yoon, K. Shik, J.-H. Kim, S. Park, S.-H. Kim Ve L. Piao, «High-Performance Stretchable Conductive Composite Fibers From Surface-Modified Silver Nanowires And Thermoplastic Polyurethane By Wet Spinning,» Applied Materials & Interfaces, 2024.

[72] K. Maity Ve D. Mandal, «All-Organic High-Performance Piezoelectric Nanogenerator With Multilayer Assembled Electrospun Nanofiber Mats For Self-Powered Multifunctional Sensors,» Applied Materials & Interfaces, 2024.

[73] L. Wang, Y. Chen, H. Wang Ve L. Lin, «Highly Stretchable, Anti-Corrosive And Wearable Strain Sensors Based On The Pdms/Cnts Decorated Elastomer Nanofiber Composite,» Chemical Engineering Journal, 2024.

[74] S. Chen, R. Wu, P. Li, Q. Li, Y. Gao, B. Qian Ve F. Xuan, «Acid-Interface Engineering Of Carbon Nanotube/Elastomers With Enhanced Sensitivity For Stretchable Strain Sensors,» Applied Materials & Interfaces, 2018.

[75] F. D. Jiang, G. Hua Ve L. Zhang, «Preparation And Characterization Of Polyurethane/Multi-Walled Carbon Nanotubes Composites With Multi Functional Performance,» Advanced Materials Research, 2023.

[76] S. Bıçakçı, «Tekstil Sektöründe Dijital Dönüşüm Ve Yeni Nesil Ürünler,» 7 03 2019. [Çevrimiçi]. Available: Https://Www.Sanayinindijitaldonusumu.Com/Tekstil-Sektorunde-Dijital-Donusum-Ve-Yeni- Nesil-Urunler/. [Erişildi: 15 09 2024].

✓