



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



NANOKOMPOZİT TEKSTİL YÜZEYLERİNİN İLETKEN HALE GETİRİLMESİ VE SENSÖR ÖZELLİĞİ KAZANDIRILMASI

RUŞEN İNAN

DOKTORA TEZİ

Tekstil Mühendisliği (Türkçe)

Danışman

Prof. Dr. İsmail USTA

Eş Danışman

Doç.Dr.Yeşim Müge Şahin

İSTANBUL,

2024

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Ana Bilim Dalı Tekstil Mühendisliği programında ve İstanbul Arel Üniversitesi POTKAM merkezinde gerçekleştirilmiştir.

Doktora çalışmam boyunca bilgi ve deneyimleriyle vermiş olduğu her türlü destek, rehberlik ve yönlendirmeleri için saygıdeğer danışmanlarım Prof. Dr. İsmail USTA'ya ve Doç. Dr. Yeşim Müge Şahin'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Numune üretimi aşamasında Öğr. Gör. Erdi Buluş başta olmak üzere tüm Arel POTKAM çalışanlarına ve test aşamasında destek olan Prof. Dr. Erhan SANCAK ve Dr. Öğr. Üyesi Nergis DEMİREL GÜLTEKİN'e teşekkürlerime sunarım.

Bu zorlu süreçte beni hep motive eden, desteğiyle her zaman yanımda olan ve sevgisiyle problemlerin üstesinden gelmemi sağlayan hayat arkadaşım, Timur İNAN'a, hayatımızın her aşamasında bizim için hayatı kolaylaştıran, bizlere destek olan annelerimize ve babalarımıza, varlıkları ile yaşama enerjisi ve hayata tutunma azmi veren yavrularım Demir Alp İNAN ve Pelin İNAN'a teşekkürü borç bilirim.

İstanbul Arel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne tez çalışmasını 2019-ST07 nolu proje kapsamında destekledikleri için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	1
1.1 Gerilim Sensör Yapıları ve Mekanizmaları	2
1.1.1 Geometrik efekt	2
1.1.2 Piezoresistiv efekt.....	3
1.1.3 Çatlak Yayılımı	3
1.1.4 Ayrılma mekanizması.....	4
1.1.5 Tünel Efektı	4
1.2 Gerilim Sensör Yapılarının Performansları	5
1.2.1 Gerilebilirlik	5
1.2.2 Hassasiyet	5
1.2.3 Doğrusallık	6
1.2.4 Histeriz	9
1.2.5 Stabilitate ve sağlamlık	10
1.2.6 Aşım davranışı.....	10
1.3 Gerilim Sensör İmalat Yöntemleri.....	10
1.3.1 Kaplama teknolojisi.....	11
1.3.2 3D yazıcı teknolojisi.....	13
1.3.3 Kimyasal buhar biktirme ve transferi metodu	13
1.3.4 Eğirme işlemi.....	13
1.4 Karbon Nanotüp.....	15
1.4.1 Karbon nanotüp türleri.....	17
1.4.2 Karbon nanotüp yapıları	18
1.4.3 Karbon nanotüplerin özellikleri.....	21
1.4.4 Karbon nanotüplerin sentezi.....	23
1.4.5 Karbon nanotüplerin kullanım alanları.....	27
1.5 Literatür Çalışmaları	37
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	48
2.1 Materyal	48
2.1.1 Kullanılan kimyasallar ve maddeler	48
2.1.2 Kullanılan cihazlar.....	48
2.2 Yöntem.....	52

2.3	Karakterizasyon Teknikleri	58
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	61
3.1	Morfolojik İnceleme	61
3.2	Elektromekanik İnceleme	79
4.	SONUÇLAR	90
	KAYNAKLAR/REFERENCES	93
	ÖZGEÇMİŞ.....	100



ÖZET

NANOKOMPOZİT YÜZEYLERİNİN İLETKEN HALE GETİRİLMESİ VE SENSÖR ÖZELLİĞİ KAZANDIRILMASI

Bu çalışmada, Termoplastik Poliüretan (TPU) çözeltisine farklı konsantrasyonlarda ve değişik oranlarda Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (ÇDKNT) ve Sodyum Dodecyl Sülfate (SDS) eklenerek 12 adet çözelti oluşturulmuş ve bu çözeltilerden electrospining işlemiyle nanokompozit yüzeyler elde edilmiştir. Bu numunelerin uzamaya bağlı direnç değişimleri, sensör özelliğini değerlendirebilmek amacıyla uzamaya bağlı gauge faktör değişimleri ve sensör özelliğinin sürdürülebilirliğini değerlendirmek amacıyla da döngü testleri yapılmıştır.

İlk olarak, TPU granüllerinin üzerindeki nemi uçurmak için 1 saat 60°C’de etüvde kurutulmuştur. Ardından ağırlıkça %10’luk konsantrasyonuna sahip TPU çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti hazırlanırken 1 g ağırlığa sahip TPU granülleri, 10 ml Di metil Formamid (DMF): Tetrahidrofur THF çözücülerinde çözündürülmüştür. Bu çözelti hazırlanırken DMF/THF’in kütle oranı 2:3 olarak belirlenmiştir. Karışım oda sıcaklığında 2 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. İkinci olarak 30 ml DMF içerisine ağırlıkça %0.3, %0.5 ve %0.7 ÇDKNT ve ÇDKNT’lerin ağırlıkça 1/0, 1/20, 1/23, 1/26 oranında SDS eklenerek çözelti oluşturulmuştur. Bu çözelti 90 dk boyunca sonike edilerek ÇDKNT ve SDS’ler çözelti içerisinde homojenize edilmiştir. Elde edilen bu iki çözelti 1/1 oranında karıştırılarak 30 dk süreyle sonike edilerek stabil bir karışım elde edilmiştir. Ardından bu çözeltilerden 10 ml şırıngaya çekilerek elektrospinning yöntemi ile nanokompozit üretilmiştir. Nanokompozit üretiminde elektrospinning yöntemindeki uygulanan voltaj 32 kV, besleme hızı 1,6 mL/h, ortam sıcaklığı 21 ± 2°C, toplayıcı dönme hızı 280 rpm olarak ayarlanmıştır.

İkinci olarak elde edilen nanokompozit yapıların direnç değişimleri Keithley 2450

Sourcemeter cihazı ve Instron 4411 cihazıyla ölçülmüştür. Ölçümler için 3 cm x 1 cm boyutunda nanokompozit yüzeyler kesilerek Instron cihazında teste tabii tutulmuştur. Bu ölçüm esnasında Keithley direnç ölçüm cihaz probaları numuneye üstten ve alttan tutturularak gerilim altındaki direnç değişimleri 30 dk'lık süre boyunca ölçülmüştür. Ayrıca yine bu nanokompozit yüzeylerin sensör davranışlarının sürdürülebilirliği açısından aynı test koşullarında 100 tekrarlı olarak direnç değişimleri ölçülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre 0,3 ÇDKNT konsantrasyonunda 1/20 banyo oranında SDS ilave edilmiş , 0,5 ÇDKNT konsantrasyonunda 1/20 banyo oranında SDS ilave edilmiş 0,7 ÇDKNT konsantrasyonunda 1/26 banyo oranında SDS ilave edilmiş numunelerde en iyi sensör özelliği elde edilmiştir.

ABSTRACT

MAKING NANOCOMPOSITE TEXTILE SURFACES CONDUCTIVE AND GIVING THEM SENSOR FEATURES

In this study, 12 solutions were created by adding Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT) and Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) at different concentrations and rates to Thermoplastic Polyurethane (TPU) solution, and nanocomposite surfaces were obtained from these solutions by electrospinning process. Resistance changes of these samples due to elongation, gauge factor changes due to elongation in order to evaluate the sensor feature, and cycle tests were carried out to evaluate the sustainability of the sensor feature.

First, it was dried in an oven at 60°C for 1 hour to evaporate the moisture on the TPU granules. Then, TPU solution with a concentration of 10% by weight was prepared. While preparing this solution, TPU granules weighing 1 g were dissolved in 10 ml of DMF:THF solvents. While preparing this solution, the mass ratio of DMF/THF was determined as 2:3. The mixture was homogenized by stirring with a magnetic stirrer for 2 hours at room temperature. Secondly, a solution was created by adding 0.3%, 0.5% and 0.7% by weight of MWCNT and 1/0, 1/20, 1/23, 1/26 by weight of SDS to 30 ml of DMF. This solution was sonicated for 90 minutes and MWCNTs and SDSs were homogenized in the solution. These two solutions obtained were mixed in a 1/1 ratio and sonicated for 30 minutes to obtain a stable mixture. Then, 10 ml of this solution was drawn into a syringe and the nanocomposite was produced by the electrospinning method. In the nanocomposite production, the applied voltage in the electrospinning method was set as 32 kV, the feeding rate was 1.6 mL/h, the ambient temperature was $21 \pm 2^\circ\text{C}$, and the collector rotation speed was 280 rpm.

Secondly, the resistance changes of the obtained nanocomposite structures were measured with the Keithley 2450 Sourcemeter device and the Instron 4411 device. For measurements, nanocomposite surfaces of 3 cm x 1 cm size were cut and tested on the Instron device. During this measurement, Keithley resistance measuring device probes were attached to the sample from the top and bottom and the resistance changes under tension were measured for a period of 30 minutes. Additionally, in order to ensure the

sustainability of the sensor behavior of these nanocomposite surfaces, resistance changes were measured 100 times under the same test conditions.

According to the results obtained, the best sensor properties were obtained in the samples to which SDS was added at a bath ratio of 1/20 at a concentration of 0.3 MWCNT, to which SDS was added at a bath ratio of 1/20 at a concentration of 0.5 MWCNT, and to which SDS was added at a bath ratio of 1/26 at a concentration of 0.7 MWCNT. has been made.



YENİLİK BEYANI

Dünyada bilimsel çalışmalar sonucu ortaya çıkan teknolojik ilerlemeler her alanda insan hayatını kolaylaştırıcı etkiler meydana getirmektedir. Bu etkiler; iletişim, sağlık, eğitim, izlenebilirlik, otonom araçlar/yapılar ve askeri teknolojiler alanında kendisini göstermektedir. Bu gelişmelerden tekstil teknolojileri de etkilenecek yeni malzemeler, nanoteknoloji ve minyatür elektronikler, giyilebilir sistemleri daha kullanılabilir hale getirmektedir. Bu sistemlerin kurgulamasında ve realize edilmesinde nanoteknolojinin önemli bir katkısı bulunmaktadır. Yeni nesil tekstiller dış uyaranları algılayabilir, tepki verebilir, bunlara uyum sağlayabilir, aynı zamanda enerji ve bilgi üretip depolayabilirler. Giyilebilir cihazlar, giysilere takılarak, yapışkan bantlar veya elastik kayışlarla doğrudan insan derisine takılarak fiziksel, biyokimyasal sinyalleri ve hareketleri izlemek için kullanılabilir. Bu cihazların insan tenine ve eklemlerine uyumlu olarak kullanıcının hareketlerine yanıt olarak bükülebilecek, esneyebilecek, basınç uygulanabilecek kadar yumuşak ve sağlam olması beklenir. Giyilebilir sensör cihazlarının en önemli uygulamalarından biri gerilim algılamadır. Gerilim algılama günümüzde pek çok amaç için kullanılmaktadır. Tekstil esaslı giyilebilir/eklenebilir gerilim sensörleri sağlık alanında, vücut hareketlerinin izlenmesinde ve benzeri uygulamalarda kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Bu sensörler mikro veya makro ölçekte de tasarlanabilmekte ve üretilebilmektedir. Gerilim sensörlerinin üretiminde genellikle bir esnek yüzey üzerinde iletken madde biriktirme/oluşturma prensibi uygulanmaktadır. Bu sensörlerin üretiminde son yıllarda elektroçekim yöntemiyle iletken madde takviyeli polimerler yoğunlukla kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalarda iletken madde olarak; karbonnanotüpler (KNT), grafen, karbon siyahı, karbon, gümüş nanoteller ve gümüş/altın nanopartiküller kullanılmaktadır. Bu iletken maddelerin kullanımı ile çok farklı özelliklerde sensör geliştirme çalışmalarına rastlanılmaktadır. Özellikle son yıllarda karbon nanotüpler, grafen, gümüş ve altın nanopartiküller gerilim sensörü çalışmalarında iletken maddeler olarak kullanılmaktadırlar. Bu iletken maddelerin bir polimer içerisinde elektroçekim

yöntemiyle esnek bir yüzeye aktarılmalari ve bu yüzeyin sensör özellikleri üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekici boyutlardadır. Bu çalışmalardaki problemlerin en başında iletken maddelerin polimer içerisindeki aglomere olma durumlarıdır. Bu da elde edilen yüzeyin sensör davranışını olumsuz olarak etkilemektedir. Bu problemlere yönelik çalışmalar halen devam etmekte olup, iletken nano parçacık takviyeli gerilim sensörü tasarım ve üretim çalışmaları üzerine pek çok araştırmacı çalışmalar yapmaktadır.

Gerilim sensörlerinin üretiminde karşılaşılan aglomerasyon, düşük iletkenlik, ve stabilite sorunlarına yönelik olarak bu çalışma kapsamında, Termoplastik Poliüretan (TPU) çözeltisine farklı konsantrasyonlarda ve değişik oranlarda Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (ÇDKNT) ve Sodyum Dodecyl Sulfate (SDS) eklenerek 12 adet çözelti oluşturulmuş ve bu çözeltilerden elektroçekim metoduyla nanokompozit yüzeyler elde edilmiştir. Burada aglomerasyonu engellemek için SDS kullanılmış olup aynı zamanda çözeltinin iletkenliği artırılarak elektroçekim işlemleri esnasında daha verimli çalışma yapılmıştır. Elde edilen esnek yüzeylerin SEM incelemelerinde Karbon nanotüplerin homojen yayıldığı ve dolayısıyla aglomerasyonun olmadığı, bunun da stabil bir iletkenlik sağladığı tespit olunmuştur. Yapılan çalışmada karbon nanotüp konsantrasyonun da iletkenlik üzerinde etkili olduğu ve iletkenliğin 0,5 ve üzeri konsantrasyonlarda gerilim sensörü etkisini daha iyi ortaya çıkardığı anlaşılmıştır. Bu çalışma ile gerilim sensörü çalışmalarında literatürde bahsedilen konsantrasyon, aglomerasyon ve iletkenlik problemlerine yönelik olarak yeni yaklaşımlar getirilerek karbon nanotüplerin sensör uygulamalarında daha yoğun kullanımının yolu açılmıştır.

SEMBOLLER/SYMBOLS

nm: Nanometre

GPa: Gigapaskal

MPa: Megapaskal

m: Metre

g: Gram

W: Watt

ml: Mililitre

°C: Santigrat Derece

K: Kelvin

cP: Santipoise

Au: Altın

Ag: Gümüş

KV: Kilovolt

KΩ: Kilo ohm

MΩ: Mega ohm

GΩ: Giga ohm

KISALTMALAR/ABBREVIATIONS

TPU : Termoplastik Poliüretan
ÇDKNT: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
SDS: Sodyum Dodesil Sülfat
KNT: Karbon Nanotüp
NW: Nano tel
NP: Nano mikropplastik
GF: Gauge Faktör
LBL: Katman Katman Montaj Tekniği
TDKNT: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
RG: İndirgenmiş Grafen Oksit
FDM: Kaynaştırılmış Biriktirme Modellemesi
DIW: Doğrudan Mürekkep Yazma
KBB: Kimyasal Buhar Biriktirme
PANI: Polianilin
Ni: Nikel
Fe: Demir
GNF: Grafit Nanolif
NH₃: Amonyak
H₂: Hidrojen
C₂H₄: Etilen
SO₂: Kükürtdioksit
H₂S: Hidrojen Sülfat
O₂: Oksijen
STM: Taramalı Tünelleme Mikroskobu
AFM: Atomik Kuvvet Mikroskobu
KNF: Karbon Nanolif
PU: Poliüretan
PDMS: Poldimetil Siloksan
SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu
CB: Karbon Siyahı

EP:Epoksi

GNP: Grafen Nanotabakası

SHM: Yapısal Sağlık İzleme

ECPC: Elastomerik İletken Kompozit

PVDF: Polivinildenflorür

DMF: Dimetilformamid

THF:

Tetrahidrofuran



ŞEKİL LİSTESİ/ LIST OF FIGURES

Şekil 1.1 Daldırma kaplama yöntemiyle mürekkeple dekore edilmiş bir kumaş gerilim sensörünün hazırlık sürecinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 1.2 Damla döküm yöntemiyle G/CB/Ni sensörünün üretilmesinin şematik gösterimi	12
Şekil 1.3 TDKNT-RGO/TPU gerilim sensörünün püskürtme yöntemi prosedürü	13
Şekil 1.4 Eriyik eğirme işlemi sistematik gösterimi[10].....	14
Şekil 1.5 Elektrosponing yöntemi şematik gösterimi [10].	15
Şekil 1.6 Farklı Karbon Materyallerinin Yapısı.....	16
Şekil 1.7 TKDNT (A) ve ÇDKNT (B).....	18
Şekil 1.8 Bir grafit tabakasının genel yapısı.....	19
Şekil 1.9 KNT'lerin kiralitesinin temeli.	19
Şekil 1.10 Zigzag kiralite (n, m = 10, 0/Uzunluk = 20 Å/Bağ uzunluğu = 1,5 Å).....	20
Şekil 1.11 Grafen tabaka(a) ve Zigzag KNT(b).....	21
Şekil 1.12 Kiral Kiralite (n, m = 8, 6/Uzunluk = 20 Å/Bağ uzunluğu = 1,5 Å).....	21
Şekil 1.13 Ark Boşaltma Yöntemi Şematik Gösterme[52].	25
Şekil 1.14 Lazer Aşındırma Metodu	26
Şekil 1.15 Kimyasal buhar biriktirme metodu şematik gösterimi.....	27
Şekil 1.16 KNT kullanım alanları	27
Şekil 1.17 Sol: Karbon nanotüplerin kullanıldığı bir prototip alan emisyon ekranının şeması. Sağda: Tarafından üretilen bir prototip 4.5_ alan emisyon ekranı	28
Şekil 1.18 KNT tabanlı Lityum-İyon Bataryalarının Şematik Gösterimi	31
Şekil 1.19 KNT gaz sensörlerinin şematik görünümü:a-iki terminal ve b:üç terminal..	33
Şekil 1.20 Biosensörün şematik olarak gösterimi	34
Şekil 1.21 AFM ucunda ÇDNT'nin kullanıldığı bir örnek.....	36
Şekil 1.22 Nanocımbızın şematik olarak gösterimi	37
Şekil 2.1 Hassas Terazî	49
Şekil 2.2 Isıtıcılı manyetik karıştırıcı	50
Şekil 2.3 Etüv	50
Şekil 2.4 Sonikatör	51
Şekil 2.5 Elektroeğirme Cihazı	51
Şekil 2.6 Instron Cihazı.....	52

Şekil 2.7 Keithley	52
Şekil 2.8 ÇDKNT/TPU Çözeltilisinin Hazırlanması.....	53
Şekil 2.9 Farklı ÇDKNT oranları değişik SDS katkılarıyla elde edilen çözeltilerin Viskozite Değerleri.....	55
Şekil 2.10 Farklı ÇDKNT oranları değişik SDS katkılarıyla elde edilen çözeltilerin Viskozite Değerleri.....	56
Şekil 2.11 Farklı ÇDKNT oranları değişik SDS katkılarıyla elde edilen çözeltilerin İletkenlik Değerleri.....	57
Şekil 2.12 Farklı ÇDKNT oranları değişik SDS katkılarıyla elde edilen çözeltilerin İletkenlik Değerleri.....	58
Şekil 2.13 SEM Cihazı	59
Şekil 2.14 FTIR Cihazı.....	59
Şekil 2.15 Viskozimetre Cihazı.....	60
Şekil 2.16 İletkenlik Cihazı	60
Şekil 3.1 ÇDKNT 5000X SEM Görüntüsü	62
Şekil 3.2 ÇDKNT 10000X SEM Görüntüsü	62
Şekil 3.3 TPU 20000X SEM Görüntüsü	63
Şekil 3.4 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) SEM görüntüsü.....	63
Şekil 3.5 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) Nanolif Çapı Dağılımı	64
Şekil 3.6 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) SEM görüntüsü.....	65
Şekil 3.7 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) Nanolif Çapı Dağılımı ..	65
Şekil 3.8 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) SEM görüntüsü.....	66
Şekil 3.9 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) Nanolif Çapı Dağılımı ..	66
Şekil 3.10 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) SEM görüntüsü.....	67
Şekil 3.11 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) Nanolif Çapı Dağılımı	67
Şekil 3.12 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) SEM görüntüsü.....	68
Şekil 3.13 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) Nanolif Çapı Dağılımı ..	69
Şekil 3.14 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) SEM görüntüsü.....	70
Şekil 3.15 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) Nanolif Çapı Dağılımı	70
Şekil 3.16 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) SEM görüntüsü.....	71
Şekil 3.17 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) Nanolif Çapı Dağılımı	71
Şekil 3.18 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) SEM görüntüsü.....	72

Şekil 3.19 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) Nanolif Çapı Dağılımı	72
Şekil 3.20 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) SEM görüntüsü.....	73
Şekil 3.21 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) Nanolif Çapı Dağılımı ..	73
Şekil 3.22 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) SEM görüntüsü.....	74
Şekil 3.23 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) Nanolif Çapı Dağılımı	75
Şekil 3.24 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) SEM görüntüsü.....	75
Şekil 3.25 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) Nanolif Çapı Dağılımı	76
Şekil 3.26 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) SEM görüntüsü.....	77
Şekil 3.27 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) Nanolif Çapı Dağılımı	77
Şekil 3.28 FTIR analizi	78
Şekil 3.29 ÇDKNT 0.3 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında direnç değişimi	80
Şekil 3.30 ÇDKNT 0,5 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında direnç değişimi	81
Şekil 3.31 ÇDKNT 0.7 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında direnç değişimi	82
Şekil 3.32 ÇDKNT 0.3 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında $\Delta R/R_0$ değişimi.....	83
Şekil 3.33 ÇDKNT 0.5 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında $\Delta R/R_0$ değişimi.....	84
Şekil 3.34 ÇDKNT 0.7 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında $\Delta R/R_0$ değişimi.....	86
Şekil 3.35 0,3 ÇDKNT konsantrasyonunda ve 1/20 ÇDKNT:SDS konsantrasyonda yapılan gerilim-döngü testi.....	87
Şekil 3.36 0,5 ÇDKNT konsantrasyonunda ve 1/20 ÇDKNT:SDS konsantrasyonda yapılan gerilim-döngü testi.....	88
Şekil 3.37 0,7 ÇDKNT ,ÇDKNT:SDS 1/26 konsantrasyonda yapılan gerilim-döngü testi	89

TABLO LİSTESİ/LIST OF TABLES

Tablo 1.1 Farklı tipte gerilebilir gerilim sensörlerinin performans parametrelerinin karşılaştırılması.....	6
Tablo 1.2 Gerilebilir gerilim sensörlerinin performans sonuçlarının özeti [16]	9
Tablo 1.3 Farklı karbon malzemelerin mekanik ve termal özellikleri.....	16
Tablo 1.4 TDKNT ve ÇDKNT'lerin özellikleri [27]	18
Tablo 1.5 Farklı türlerdeki Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri.....	22
Tablo 1.6 Karbon Nanotüp Üretim Yöntemleri.....	24
Tablo 1.7 KNT ve diğer karbon malzemelerin hidrojen depolama değerleri	30
Tablo 2.1 ÇDKNT Çözeltileri Viskozite Ölçümleri.....	54
Tablo 2.2 TPU/ÇDKNT Viskozite Ölçüm Değerleri	55
Tablo 2.3 ÇDKNT İletkenlik Değerleri	56
Tablo 2.4 TPU/ÇDKNT İletkenlik Değerleri	57

1. GİRİŞ

Çağlar boyunca tekstillerin vücudu çevreden koruma ve estetik olmak üzere iki ana işlevi sağlamakta olduğu bilinmektedir [1]. Fakat son yıllarda yaşanan paradigma değişimi, etkileşim halinde olduğumuz tekstillerin akıllı hale gelmesine neden olmaktadır [2]. Güncel gelişmeler tekstil teknolojilerindeki yeni malzemeler, nanoteknoloji ve minyatür elektronikler, giyilebilir sistemleri daha kullanılabilir hale getirmektedir [3]. Bu sistemlerin kurgulamasında ve realize edilmesinde nanoteknolojinin önemli bir katkısı bulunmaktadır. Bu teknolojinin 2019 yılında dünya pazarındaki payı 5,1 milyar dolar iken, 2024 yılında 14,8 milyar dolara yükselmesi beklenmektedir [4]. Yeni nesil tekstiller dış uyaranları algılayabilir, tepki verebilir, bunlara uyum sağlayabilir, aynı zamanda enerji ve bilgi üretip depolayabilirler. Giyilebilir cihazlar, giysilere takılarak, yapışkan bantlar veya elastik kayışlarla doğrudan insan derisine takılarak fiziksel, biyokimyasal sinyalleri ve hareketleri izlemek için kullanılabilir. Bu cihazların insan tenine ve eklemlerine uyumlu olarak kullanıcının hareketlerine yanıt olarak bükülebilecek, esneyebilecek, basınç uygulanabilecek kadar yumuşak ve sağlam olması beklenir. Giyilebilir sensör cihazlarının en önemli uygulamalarından biri gerilim algılamadır [5]. Nanoteknoloji ve modern giyilebilir biyoelektronik cihazlardaki olağanüstü gelişmeler ışığında nanokompozit temelli giyilebilir gerilim sensörleri sağlık hizmetleri ve tıbbi teşhis, robotik sistemler, protezler, görsel gerçeklikler, profesyonel sporlar, eğlenceler için uygulama alanı bulmuştur [5]. Yüksek hassasiyet ve gerilim aralığına sahip esnek gerilim sensörü çeşitli alanlarda büyük potansiyeller vaat etmektedir. Esnek gerilim sensörleri direnç, kapasitans, piezoelektrik ve endüktans da dahil olmak üzere çeşitli ilkelere dayalı olarak geliştirilmiştir. Karbon bazlı nanomalzemeler (Karbon Nanotüp (KNT), grafen, karbon siyahı nanoparçacığı, karbon) ve metal bazlı nanomalzemeler (gümüş nanoteller, gümüş/altın nanopartiküller) içeren iletken nanomalzemeler algılama performansında belirleyici bir rol oynar. Esnek gerilim sensörünün çalışma mekanizması, deformasyonu dirençteki bağlı değişime dönüştürmektir. Bu nano malzemelerin yuvarlak şekli, ince ve tabakalı yapısı malzemelerden çeşitli iletken ağ elde edilebilmesini sağlamaktadır. KNT bu nanomalzemeler arasında tek katmanlı ve çok sayıda grafen nanoplakanın kıvrılmasıyla elde edilen tek boyutlu ince boru

şeklindeki yapısıyla üstün iletkenlik ve fiziksel özellikler sergiler [6].

1.1 Gerilim Sensör Yapıları ve Mekanizmaları

Gerilim sensörleri, esas olarak bir nesneye dış kuvvetler uygulandığında direnç veya kapasitans gibi elektriksel özelliklerini değiştirerek nesne üzerindeki mekanik deformasyonu ölçmek için kullanılır [7]. Gerilim sensörleri, malzemenin türüne, mikro/nano yapılara ve üretim sürecine bağlı olarak uygulanan gerilime farklı mekanizmalarla yanıt verir. Geleneksel gerilim ölçerlerin gerilim direnci tepkisi, malzemelerin geometrik etkilerinden ve piezodirençlerinden kaynaklanır [8]. Geleneksel gerilim ölçerlerden farklı olarak, gerilim sensörlerinin geliştirilmesinde algılama elemanları arasındaki bağlantının kesilmesi, tünelleme etkisi ve algılama filminde mikro çatlakların oluşturulması yoluyla başarılı bir şekilde geliştirilmiştir [6, 8]. Bu mekanizmalar, algılama malzemelerinin türüne, destekleyici malzemelerle yüzey etkileşimlerine ve üretim sürecine bağlı olarak gerilim sensörlerinin elektromekanik tepkisini ayarlar [6]. Gerilim sensörlerinin çalışma mekanizmaları geometrik efekt, piezoresistiv, çatlak yayılımı, tünelleme etkisi ve ayrılma mekanizması olmak üzere beş farklı şekilde incelenmektedir.

1.1.1 Geometrik efekt

Malzemelerin bir yönde gerilmesi üzerine, malzemenin çapraz yöndeki şekli Poisson oranına göre değişecektir [6, 9]. Bu geometrik değişiklikler, bazı dirençli ve kapasitif tekstil bazlı gerilim sensörlerinin gerilim algılama özelliklerinin kontrol edilmesinde anahtar rol oynamaktadır [9].

Malzemeler gerildiğinde Poisson oranı ν 'ye göre çekme yönünde yanal olarak büzülme eğilimi gösterirler, sıkıştırıldıklarında ise yanal olarak genişleme eğilimindedirler. Ohm kanununa göre bir iletkenin direnci;

$$R = \rho L / A$$

ile verilir; burada ρ öz direnç, L uzunluk ve A iletkenin kesit alanıdır [6, 8, 10].

Geometrik etki, kapasitif ve optik lif gerilim sensörlerinin gerilim algılama özelliklerinin kontrolünde önemli bir rol oynar. İlgili uzunluk, genişlik ve dielektrik kalınlığı l_0 , w_0 ve d_0 olan kapasitif tipte bir gerilim sensörü olduğunda ϵ gerilimi ile gerildiğinde, gerilim sensörünün uzunluğu $(1 + \epsilon) l_0$ 'a artarken, genişlik ve kalınlık $(1 -$

$v_{elektrot} \cdot \epsilon) w_0$ ve $(1 - v_{dielektrik} \cdot \epsilon) d_0$ 'a düşer. Bu nedenle, sensörün gerilme durumundaki kapasitansı şu şekilde türetilir [6, 8].

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{(1+\epsilon) l_0 (1-v_{elektrot} \epsilon) w_0}{(1-v_{dielektrik} \epsilon) d_0} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{(1+\epsilon) l_0 w_0}{d_0} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{(1+\epsilon) A_0}{d_0} = (1 + \epsilon) C_0 \quad (1)$$

Burada kapasitif tip sensörlerin kapasitansı uygulanan gerilimin doğrusal bir fonksiyonu olarak artar. Bu doğrusal fonksiyonun belirli bir miktar gerilim ile sınırlı olduğuna dikkat edilmelidir [8].

1.1.2 Piezoresistiv efekt

Bir gerilim uygulandığında malzemenin öz direncindeki değişime piezodirenç etkisi denir. Direncin değişim hızı $\Delta R/R = (1+2\nu)\epsilon + \Delta\rho/\rho$ olarak ifade edilebilir; burada $(1+2\nu)\epsilon$ geometrik değişikliklerin etkisidir. Oldukça gerilebilir elastomerler için ν 0,5'e yakındır ve $\Delta\rho/\rho$ malzemenin kendisinin piezoelektrik etkisini temsil eder [8, 10]. Bazı metallerin ve metal alışımlarının piezo direnci; gerilim ölçerlerin direncini birkaç kata kadar arttırabilirken, silikon ve germanyum gibi yarı iletken malzemeler, atomlar arasındaki bant aralığının değişmesiyle önemli ölçüde piezo direnci arttırır. Ek olarak yarı iletken KNT'ler ve oksit NW'ler (Çinko Oksit Nanotel) gibi nanoölçekli malzemeler ultra yüksek dirençli tepkiye sahiptir ve bu da bu malzemelerin oldukça gerilebilir alt tabakalara dahil edilmesiyle oldukça hassas gerilim sensörlerinin geliştirilebilmesine imkan verebilmektedir [6, 8].

1.1.3 Çatlak yayılımı

Uygulanan gerilimden kaynaklı yumuşak polimer katmanlarının üzerine kaplanan kırılğan ince filmler çatlamaya yol açar ve bu çatlak yayılır. Aslında çatlaklar, yüklenen gerilimi boşaltmak için gerilimin yoğunlaştığı bölgelerde başlama eğilimindedir [8]. Her ne kadar yapısal tasarımlar için çatlaklar istenmese de iletken ince filmlerdeki mikro çatlakların oluşturulması, oldukça hassas gerilim sensörlerinin geliştirilmesinde başarıyla kullanılmıştır. Mikro çatlakların açılması ve genişlemesi, KNT bazlı gerilim sensörlerinde, grafen bazlı gerilim sensörleri ve türevlerinde, metal NW ve NP bazlı gerilim sensörlerinde gözlemlenmiştir [6]. Mikro çatlakların yoğunluğu ve boyutu, uygulanan gerilimle artmış ve ince filmlerden yayılmasından sonra başlangıç durumuna geri dönmüştür. Ayrıca mikro çatlak kenarları, uygulanan gerilimin ortadan kalkıp yeniden bağlanmasıyla elektrik direncinin tamamen geri

kazanılmasını sağlamaktadır [8].

1.1.4 Ayrılma mekanizması

Dirençli tip gerilim sensörlerinde, yüklerin gerilmesi/bırakılması üzerine iletim ağındaki değişiklikler gerilme algılama davranışı olarak ortaya çıkar [6]. Gerilim sensörü, özellikle büyük bir gerilimde gerildiğinde, üst üste binen nanomalzemeler, kopmada çok daha küçük bir uzamaya ve elastomerik matrisle kıyaslandığında daha yüksek bir Young modülüne sahip olduklarından bağlantı kopma eğilimindedir [5, 8, 10]. İletken nanomateriyallerin bağlantısının kesilmesi, elektrik bağlantısı yolunu bloke eder ve sonuç olarak gerilim sensörünün iletkenliğini azaltır. Gerilim arttıkça, üst üste binen nanomateriyaller direncin sonsuza gittiği kritik bir gerilime ulaşana kadar kayarken ayırma mekanizmasının etkisi de artar. Gerilim sensörünün performansı büyük ölçüde bağlantı kesme ve yeniden bağlama işlemine bağlıdır. Üst üste binen nanomateriyallerin kalıcı olarak bağlantısının kesilmesi, gerilim algılama doğruluğunun geri döndürülemez bir şekilde bozulmasına neden olur [5].

1.1.5 Tünel efekti

Elektronların yalıtkan bir bariyerden geçmesine tünelleme denir [6, 8, 10]. İşlevsel nanomalzemelerden ve polimer matrislerden yapılan iletken nanokompozitler, yalnızca bağlı nanomalzemeler boyunca doğrudan elektrik yollarına değil, aynı zamanda bitişik nanomalzemeler arasında tünelleme etkisine de sahiptir [5, 6, 10, 11]. Elektronların iletken olmayan bariyerden geçerek kuantum tünelleme bağlantılarını oluşturduğu minimum mesafeye kesme mesafesi denir. Kesme mesafesi, yalıtım malzemesi türü, iletken dolgu maddeleri ve işlem parametreleri dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır.

Kuantum elektron bağlantılarından kaynaklanan tünelleme direnci, Simmon teorisi aracılığıyla hesaplanabilir.

$$R_{t\ddot{u}nel} = \frac{V}{AJ} = \frac{h^2 d}{Ae^2 \sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi d}{h}\sqrt{2m\lambda}\right) \quad (2)$$

Bu formülde; V elektrik potansiyelini, J tünelleme akım yoğunluğunu, A tünel açma bağlantısının kesit alanını, d iletken ile elastomer arasındaki mesafeyi, h Plank sabitini, e tek elektron yükünü, m elektron kütlesini ve λ enerji bariyerinin yüksekliğini

gösterir[5, 6, 10].

1.2 Gerilim Sensör Yapılarının Performansları

Gerilim sensörlerinin gerilim algılanma performansı, gerilebilirlik, hassasiyet veya gauge faktörü (GF), doğrusallık, histeriz, yanıt ve toparlanma süresi, aşma davranışı, dayanıklılık v.b farklı işlem parametreleriyle karakterize edilmiştir. Bu parametreler gerilebilir ve giyilebilir ürünler için çok önemlidir [8].

1.2.1 Gerilebilirlik

Bir gerilim sensörünün esneyebilirliği, sensörün fiziksel bütünlüğünü ve yanıt verme kararlılığını koruduğu maksimum gerilimi yansıtır. Bu parametre temel olarak matris veya alt katmanın türüne, üretim sürecine ve algılama elemanları olarak kullanılan mikro/nano malzemelerin en boy oranına bağlıdır [6]. Sensörün esneme davranışı kısıtlı elastik bölgeyi aştığında sensörde geri dönüşü olmayan hasara neden olabilir. Bir gerilim sensörünün tespit limiti, sensörün gerilim davranışı için kararlı bir geri besleme sinyali çıkardığı gerilim aralığıdır. Gerilim (ε) etkisi, sensörün uygulanan stres davranışına verdiği tepkidir. Sensörün deformasyon etkisini ölçmek için gerilim, gerilme davranışı altında gerilebilir esnek sensörün uzamasının (ΔL) orijinal uzunluğa (L_0) oranı olarak tanımlanır ve formül ile ifade edilir [7].

$$\text{Gerilim } \varepsilon = \Delta L / L_0 \times 100(\%) \quad (3)$$

1.2.2 Hassasiyet

Hassasiyet, sensör performansını değerlendirmek için önemli bir ölçümdür. Bir gerilim sensörünün hassasiyeti gauge faktör (GF) ile ifade edilir [10]. Dirençli tipte bir gerilim sensörünün GF'si denklem de ki gibi karakterize edilir.

$$GF = \Delta R / \varepsilon R_0 \quad (4)$$

burada $\Delta R = R - R_0$, $\varepsilon = \Delta L / L_0$.

R_0 sensör uygulanmadığındaki başlangıç direncidir (Ω olarak), R çekme işlemi sırasındaki dirençtir (Ω olarak), ε uygulanan gerilim oranıdır (Ω olarak), formül de gösterildiği gibi uzunluk deformasyonunun (ΔL) orijinal uzunluğa (L_0) oranıdır [7, 12].

Daha yüksek GF değerleri, sensörün uygulanan gerilime karşı daha duyarlı olduğunu gösterir. KNT'lere dayalı esnek gerilim sensörleri için hassasiyet, çeşitli algılama

mekanizmalarına, mikro yapılara, iletken malzemelere ve sensörlerin üretim süreçlerine bağlıdır.

1.2.3 Doğrusallık

Hasassiyetin yanısıra doğrusallık da sinyal tespitine fizibilite ve doğruluk kazandırdığı için bir diğer önemli parametredir [13]. Uygulanan gerilim aralığı dahilinde doğrusal bir çıktı yanıtı oldukça talep edilir ve genellikle R^2 (belirleme katsayısı) cinsinden verilerin karakterize edilmesiyle ölçülen doğrusal regresyon modellemesi kullanılır. Büyük bir R^2 değeri, sensör yanıtında yüksek derecede doğrusallık gösterir [14]. Sensörlerin doğrusal olmaması kalibrasyon sürecini karmaşık ve zor hale getirir. Doğrusal olmama, neredeyse dirençli tipteki gerilim sensörlerinin ana dezavantajlarından biridir [5]. Dirençli tip gerilim sensörlerinin çoğu, düşük gerilimlerde doğrusallık, büyük gerilimlerde ise doğrusal olmama özelliği gösterir [13]. Tabloda Farklı tipte gerilebilir gerilim sensörlerinin performans parametrelerinin karşılaştırılması verilmiştir [14].

Tablo 1.1 Farklı tipte gerilebilir gerilim sensörlerinin performans parametrelerinin karşılaştırılması

Kompozit Materyal	Yapısal Kategori	Sensör Tipi	Gauge Faktör	Esneyebilirlik %	Doğrusallık	Cevap (ms)
Karbon-bazlı kompozitler						
Karbon nanotüp (KNT)/ polidimetil siloksan(PDMS)	Hizalanmış KNT filmi	Direnç	780	65	1 doğrusal bölge	50
süper-radyal hizalanmış KNT (SRAKNT)/PDMS	Radyal hizalanmış KNT filmi	Direnç	1533	55	1 doğrusal bölge	-
Tek-duvarlı KNT (TDKNT)- indirgenmiş grafen oksit (rGO)/ termoplastik poliüretan (TPU)	Spiral iplik	Direnç	2160	620	5 doğrusal bölge	

Tablo 1.1'in devamı

KNT/PDMS	Hızalanmış PDMS'ler	Direnç	437	260	2 doğrusal bölge	-
Lazer kaynaklı grafen (UG)/PDMS/ ışığa duyarlı poliimid (PSPI)	Kapalı gözenekli uG	Direnç	380	120		90
Nanokarbon siyah (nCB)/PDMS	Gradyan dolgulu PDMS	Direnç	343	355	3 doğrusal bölge	-
TDKNT-karbon siyah (CB)/SR	Çok-katmanlı nanokompozit	Direnç	1.25	120	1 doğrusal bölge	60
Çok-duvarlı KNT ler (ÇDKNT)/ polikaprolakton	Nanokompozit	Direnç	5.0	70	Doğrusal olmayan	
Grafen/Stiren-akrilik/Lastik	Çok-katmanlı nanokompozite	Direnç	35	25	1 doğrusal bölge	
rGO/KNT/TPU	Nanokompozit	Direnç	150	400	1 doğrusal bölge	57
Nanotel (NW) & nanopartikül (NP) kompozitler						
Ag NWs/PDMS	Kırıksık film	Direnç	7.1	30	2 doğrusal bölge	
Ag NWs/ tiyollenmiş grafen köpük (TGF)/ işlevselleştirilmiş poliüretan (FPU)	Dolgulu makro gözenekli köpük	Direnç	11.8	60		40
Ag NPs/PDMS	Film şeridi	Direnç	10.08	70	1 doğrusal bölge	
Ag NWS/Ag NPs/ stiren-butadien-stiren (SBS)	Lif	Direnç	-	220		
Au/PDMS	Lif	Direnç	(R/1%)	100		

Tablo 1.1'in devamı

Ag Nws/ Polianilin (PANT)	Film şeridi	Direnç	5.0	500	2 doğrusal bölge	
Au/PDMS	İnce film	Direnç	5000	1	2 doğrusal	137
Sıvı Kompozitler						
EGaln/ stiren-b-etilen- b-butelien-b-stiren (SEBS)	Çekirdek- kabuk elyafı	Direnç		900		
sıvı metal elastomer- manyetoreolojik elastomer (LME- RME)	Kare Kanal	Direnç	63.5	(Comp) 40	2 doğrusal bölge	
Gliserol- KCl/Ekofleks	Sinüsoidal kanal	Direnç	2.7	100	1 doğrusal bölge	800
Etilen glikol (EG)- NaCl/Ekofleks	Dalgalı kanal	Direnç	-5	800	1 doğrusal bölge	
Bio-hibrid kompozitler						
Oksitlenmiş KNTs (oxCNrrs)/ poliakrilamid (PAAM)	Nanokompozit	Direnç	3.39	700	2 doğrusal bölge	300
Jelatin/PAAM/PEDO T:PSS	Nanokompozit	Direnç	1.58	2850	3 doğrusal bölge	200
Polivinil alkol (PVA)/ fitik asit (PA)/ amino- çokyüzlü oligomerik silseksioksan (POSS)	3D gözenekli nanokompozit	Direnç	3.44	125	1 doğrusal bölge	220
PVA/ poliakrilik amid-akrilik asit (PAMAA)/Gly/Na	Nanokompozit	Direnç	8.303	1000	3 doğrusal bölge	160
PVA/I3n/ polietilenimin/MXen (PBPM)	Nanokompozit	Direnç	4.9	(Comp) 4000		120

1.2.4 Histeriz

Histeriz, uyaran (yani gerilim sensörü durumunda uygulanan gerilim) kaldırıldığında orijinal yanıttan sapma derecesi olarak tanımlanır [14]. Ayrıca tepki süresi, sensörün yükleme yapıldığı andan yanıt vermeye başladığı ana kadar harcadığı minimum süredir. Tepki süresi ne kadar kısa olursa sensörün histeriz davranışı o kadar zayıf olur ve hassasiyet de o kadar yüksek olur [7]. Dirençli tip gerilim sensörleri histeriz gösterirken, kapasitif tip gerilim sensörlerinde histeriz genellikle ihmal edilebilir [5, 8, 14, 15]. Sensörün histeriz davranışını niceliksel olarak kaydetmek ve analiz etmek için, aşağıdaki denklem kullanılabilir.

$$DH = (A_{y\ddot{u}kleme\ yapılmış} - A_{y\ddot{u}kleme\ yapılmamış}) / A_{loadingy\ddot{u}kleme\ yapılmış} \quad (5)$$

Daha düşük bir histeriz değeri derecesi, sensör tepkisinde daha küçük bir histeriz derecesini gösterir [7, 14].

Tablo 1.2 Gerilebilir gerinim sensörlerinin performans sonuçlarının özeti [16]

Materyal	Sensör tipi	Esneyebilirlik (%)	Gauge faktör
KNTs-Ekoneks	Direnç	500	1-2,5
Hizalanmış KNTs-PDMS	Direnç	280	0,82
KNT-Ekofleks	Kapasitif	150	1
KNT-Ejderha derisi elastomer	Kapasitif	300	0,97
Grafen köpüğü-PDMS	Direnç	70	15-29
CB-TPE	Direnç	80	20
Grafen-lastik	Direnç	800	10-35
AgNW-PDMS	Direnç	70	2-14
CB-PDMS	Direnç	30	29,1
ZnO NW-PDMS	Direnç	50	114
CB-PDMS	Direnç	10	1,8-5,5
CB-Ekofleks	Direnç	400	3,8
Crff-silikon elastomer	Kapasitif	100	0,99
AgNW-Ekoneks	Kapasitif	50	0,7
Platinum (Pt)-PDMS	Direnç	2	2000
AuNW-PANI-lastik	Direnç	149,6	20,4-61,4
AgN-PEDOT:PSS/PU	Direnç	100	1,07-12,4
AuN-lateks lastik	Direnç	350	6,9-9,9
KNT-PEDOT: PSS/PU	Direnç	100	8,7-62,3

1.2.5 Stabilit  ve sağlamlık

Dinamik dayanıklılık, istikrarlı elektriksel işlevsellik ve mekanik bütünlük ile gerilim sensörlerinin uzun vadeli germe/bırakma döngülerine karşı dayanıklılığı temsil eder [8]. Dayanıklı bir gerilim sensörü, uzun vadeli döngüsel yükler sırasında istikrarlı tepkiye ve mekanik bütünlüğü sahiptir. Dayanıklı gerilim sensörleri, büyük ve dinamik gerilimlerin karşılanması gereken giyilebilir gerilim uygulamaları için idealdir [6]. Gerilim sensörlerinin performanslarındaki bozulmanın, yüksek gerilimler altında polimer alt tabakaların yorulması ve plastik deformasyonundan, algılayıcı nanomateriyallerin kırılması ve burkulmasından kaynaklandığı araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [8].

1.2.6 Aşım davranışı

Birçok gerilebilir gerilim sensöründe, dinamik gerilimlerin izlenmesi sırasında sıklıkla aşım (elektrik yanıtlarında bir pik noktası oluşması) sorunu meydana gelir. Bu aşım, uygulanan gerilimin elektriksel tepkisinin, istenen değere geri dönmeden önce istenen gauge değerini veya hedeflenen değeri aştığı olguyu ifade eder [17]. Böyle bir davranışın ana nedeni polimerik taban veya matrislerin gerilim gevşemesidir. Giyilebilir dirençli tipteki gerilim sensörleri, kapasitif sensörlerle karşılaştırıldığında genellikle daha büyük bir aşma sergilerler. Bunun nedeni, gerilim sensörleri aniden uygulanan bir gerilime maruz kaldığında polimerik tabanların veya matrislerin anında geri salınımıdır. Ayrıca polimerlerin iç yapısı ve bunların dış yük altındaki hareketi de aşım davranışına katkıda bulunur. Bu i  yapısal değişiklikler, dielektrik katmanın geçirgenliğini önemli ölçüde etkileyebilir ve kapasitif tip gerilim sensörlerinin k  k aşım davranışına neden olabilir. Öte yandan, bu k  k deformasyon iç yapı hareketleri ile iletken nanomalzemelerin konumunu değiştirerek gerilim sensörlerinin genel direncini doğrudan etkileyebilir. Bu nedenle, dirençli tipteki gerilim sensörlerinde aşım daha belirgindir. Aşım değerlerinin polimerlerin viskoelastisitine, gerilim sensörlerinin GF'lerine ve gerilim hızlarına bağlı olduğu bilinmektedir [6, 8].

1.3 Gerilim Sensör İmalat Yöntemleri

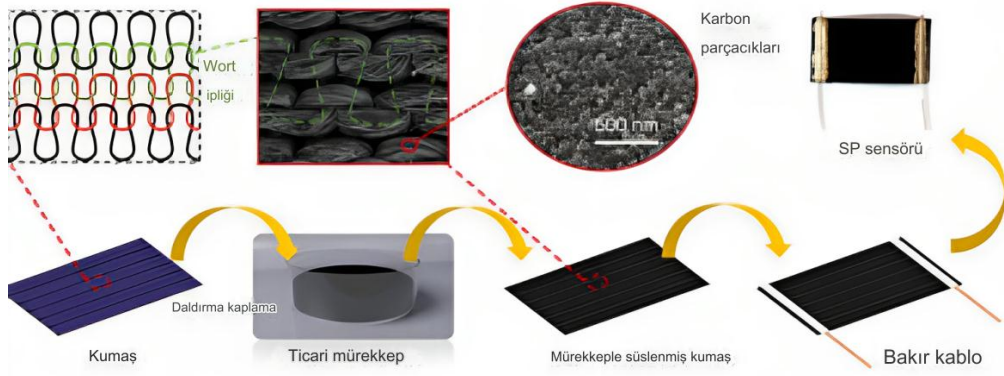
Gerilim sensörlerinin üretiminde çeşitli imalat teknikleri kullanılmaktadır. Bununla

birlikte, yeni bir imalat tekniğinin uygulamaya konulması veya mevcut imalatla iyileştirme, verimli, güvenilir, yüksek kaliteli ve endüstriyel ölçeklenebilir cihazların üretiminde ortaya çıkan teknik zorlukların aşılmasında yardımcı olabilir. Üretim prosesinin seçimi sadece istenen yapılara değil aynı zamanda fonksiyonel malzemenin mevcudiyetine ve alt tabaka tipine bağlıdır [7]. KNT gerilim sensörlerinin üretiminde kaplama yöntemi, 3D yazıcı tekniği, Kimyasal Buhar Biktirme ve Transferi Metodu ve Elektrospinning Prosesi gibi farklı üretim teknikleri kullanılmıştır. Bunlar arasında kaplama yöntemi film ve kumaş sensörlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılırken, desenli üretim için 3D yazıcı tekniği kullanılabilir, KNT'lerin büyütülmesi için çoğunlukla kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılır. Aynı zamanda büyümüş KNT'ler transfer yöntemiyle birleştirilmiş esnek tabakaya aktırılabilir. Elektrospinning işlemi, yüksek performanslı elyaf gerilim sensörlerinin üretimini mümkün kılmak için bir kaplama işlemiyle birleştirilebilir. Katman-katman (LBL) montaj tekniği, litografi ve çözelti karıştırma gibi diğer yöntemler de esnek gerilim sensörlerinin imalatında kullanılabilir [10].

1.3.1 Kaplama teknolojisi

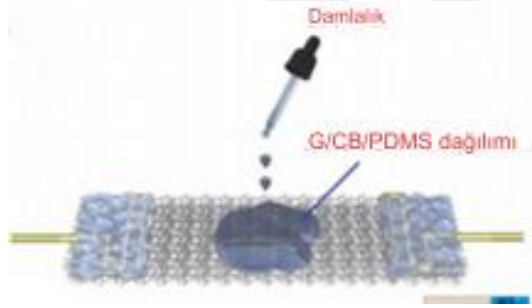
Esnek gerilim sensörlerinin hazırlanmasında en yaygın yöntemlerinden biri olan kaplama tekniği, sensörün elektriksel performansını karşılamak için esnek bir altlık malzemenin yüzeyinde belirli bir kalınlıkta iletken bir tabakanın oluşturulması tekniğidir [18]. Böyle bir kaplama işlemi; elyaf, iplik veya kumaş gibi tekstil yapısının farklı kategorilerinde başarıyla yapılabilir. Genel olarak elektriksel iletkenlik, doğası gereği iletken polimerler, iletken polimer kompozitler, metaller, karbon nanotüpler, karbon nano tozları ve grafen dahil olmak üzere iletken malzemelerin kaplanmasıyla elde edilebilir [19]. Kaplama yöntemi esas olarak daldırma kaplama yöntemini, damla döküm yöntemini ve püskürtme yöntemini içerir [18].

Daldırma kaplama yöntemi; fonksiyonel katmanın metalik, seramik, polimer filmler ve lifli malzemeler dahil olmak üzere çeşitli alt tabaka malzeme üzerine biriktirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir [19]. Bu teknik; alt tabaka malzemesinin belirli bir konsantrasyonda eşit şekilde dağılmış iletken çözeltiye tamamen daldırılması, bir süre sonra çıkarılması ve batırılmış alt tabaka malzeme yüzeyindeki son iletken malzemeyi ifade eder (Şekil 1.1) [18].



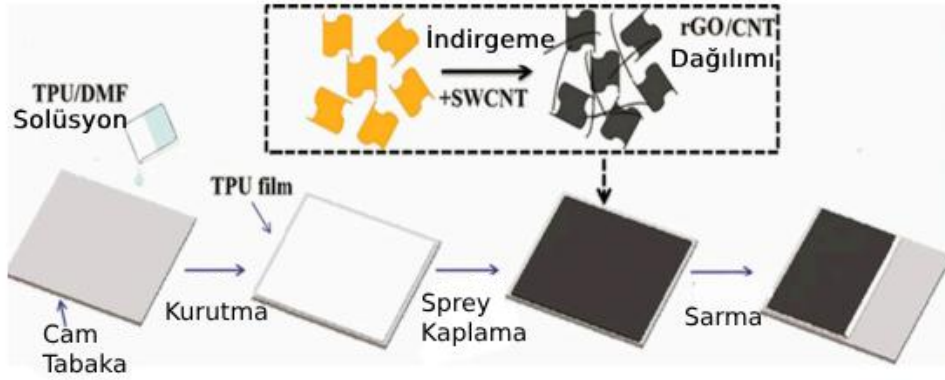
Şekil 1.1 Daldırma kaplama yöntemiyle mürekkeple dekore edilmiş bir kumaş gerilim sensörünün hazırlık sürecinin şematik gösterimi

Damla döküm yöntemi; alt tabaka malzemesinin yüzeyine eklenen az miktarda iletken malzeme çözeltisini almak için bir itici veya damlalık kullanmak ve çözücünün buharlaşmasıyla birlikte iletken bir tabaka oluşması esasına dayanır. Bu yöntem temel olarak nanokompozit bazlı esnek sensörlerin hazırlanmasında kullanılır (Şekil 1.2) [18].



Şekil 1.2 Damla döküm yöntemiyle G/CB/Ni sensörünün üretilmesinin şematik gösterimi

Püskürtme yöntemi; sıvı iletken malzemenin yüksek basınçlı bir püskürtme tabancası aracılığıyla atomize edilmesi ve daha sonra alt tabaka malzemenin yüzeyine eşit şekilde dağıtılması ve kurutulması yoluyla iletken bir katman oluşturma yöntemini ifade eder (Şekil 1.3). Püskürtme yöntemi iletken malzemelerin kullanımını etkili bir şekilde iyileştirebilir ve maliyetleri azaltabilir [18].



Şekil 1.3 TDKNT-RGO/TPU gerilim sensörünün püskürtme yöntemi prosedürü

1.3.2 3D yazıcı teknolojisi

Malzeme çeşitliliği, konrollü yapısal tasarım ve düşük maliyetli hazırlık süreçlerinden yararlanan 3D baskı teknolojisi, esnek gerilim sensörlerin alanında önemli bir rol oynamaktadır [20]. 3D baskı tabanlı KNT sensörleri kaynaştırılmış biriktirme modellemesi (FDM) ve malzeme ekstrüzyonuyla doğrudan mürekkep yazımı (DIW) şeklindedir. FDM teknolojisi, düşük üretim maliyeti ve yüksek malzeme kullanımı gibi avantajlara sahiptir, ancak malzemenin yüksek sıcaklıkta ön işleme tabi tutulması gerekir. FDM teknolojisiyle karşılaştırıldığında DIW teknolojisinin hazırlık süreci nispetten basittir ancak daldırma sırasında püskürtme ucu tıkanması sorunu mevcuttur [10].

1.3.3 Kimyasal buhar biriktirme ve transferi metodu

Kimyasal buhar biriktirme (KBB) yöntemi geniş alanlı KNT'lerin üretiminde çok avantajlıdır ve araştırmacılar, KNT filmlerini büyütmek için KBB tekniği kullanabilirler. Kaplama, karıştırma v.b hazırlanan KNT filmleri rastgele yönlendirme, birleştirme ve düşük KNT içeriği nedeniyle sensörün düşük mekanik ve elektriksel özellikler göstermesine neden olurken yönlendirilmiş KNT filmlerinin üretimi, sensörlerin genel performansını etkili bir şekilde arttırabilen KBB yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilir [10].

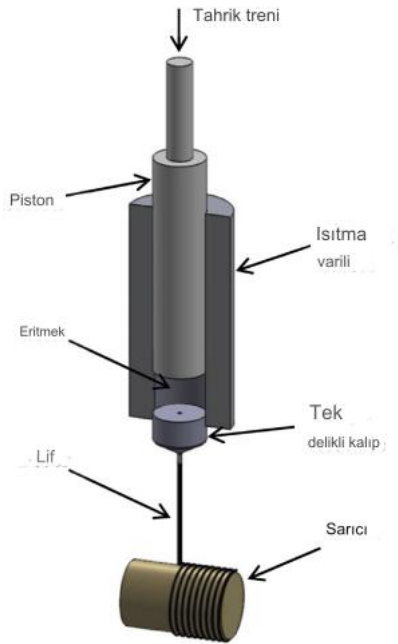
1.3.4 Eğirme işlemi

Günümüzde KNT'lere dayalı kumaş sensörleri çok sayıda giyilebilir cihazda

kullanılmaktadır. Nanoelyaflar ve iplikler, sensör performansını daha büyük ölçüde optimize edebilen geniş yüzey alanı ve yüksek gözeneklilik avantajlarına sahiptir. Eğirmeyi başarmanın anahtarı, iletken malzemenin polimer matrisi içinde eşit şekilde dağılabilmesidir. Tekstil sensörleri genellikle yaş eğirme, eriyik eğirme ve elektrostatik eğirme v.b yöntemleri ile hazırlanır.

Yaş Eğirme; İşlem genel olarak eğirme çözeltisinin hazırlanması, çözeltinin spinneret başlıklarından püskürtülerek ince akışın oluşturulması ve çözeltinin pıhtılaşması nedeniyle birincil lifin üretimi ve işlem sonrası sarma şeklinde gerçekleşir [19]. Yüksek gerilebilirlik (%300'ün üzerinde), yüksek hassasiyet (geniş gerinim aralığında, gauge faktör = 1378), yüksek tekrarlanabilirlik (>10 000 döngü) değerleriyle yaş eğirme gerinim sensörleri kullanımında yaygın kullanılan bir tekniktir [10].

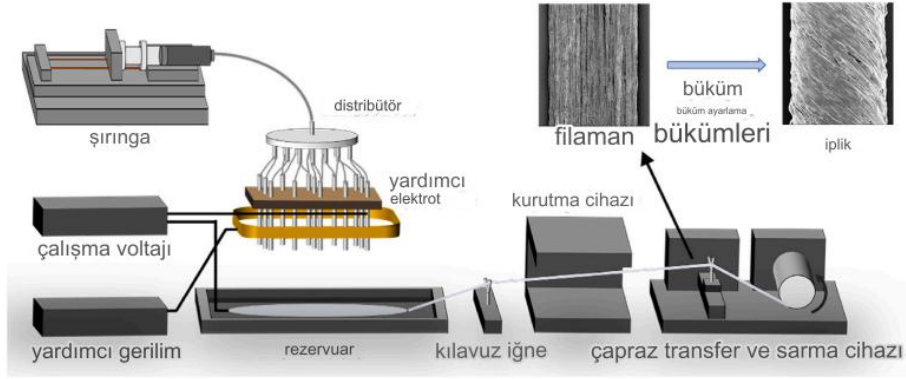
Eriyik eğirme; iletken dolgu maddelerinin yalnızca sınırlı bir şekilde dahil edilmesine izin verir, bu da genellikle eriyik viskozitesindeki artışa bağlı olarak düşük iletkenlikle sonuçlanır (Şekil 1.4) [10].



Şekil 1.4 Eriyik eğirme işlemi sistematik gösterimi[10]

Elektroeğirme (Elektrospining teknolojisi); düşük maliyeti, basit ekipmanı ve yüksek esnekliği nedeniyle oldukça ilgi görmüştür. Elektroeğirme, çeşitli malzemelerden ultra ince lifleri, tek tek lifler veya nanometreden mikrometreye kadar çaplara sahip dokusuz

yüzeyleri üretebilen oldukça çok yönlü bir yöntemdir [21]. Elektroeğirme teknolojisini kullanarak esnek sensörler hazırlamanın iki yolu vardır. Bunlardan birincisi, sensörler için doğrudan alt tabaka olarak kullanılan belirli bir esneme iletkenliğine sahip lifler üretmek için eğirme çözeltisine doğrudan iletken malzemeler eklemek iken, diğeri ise önce eğirme teknolojisiyle esnek elyafları hazırlamak, ardından iletken malzemeyi yüzeyine kaplamaktır (Şekil 1.5) [10].

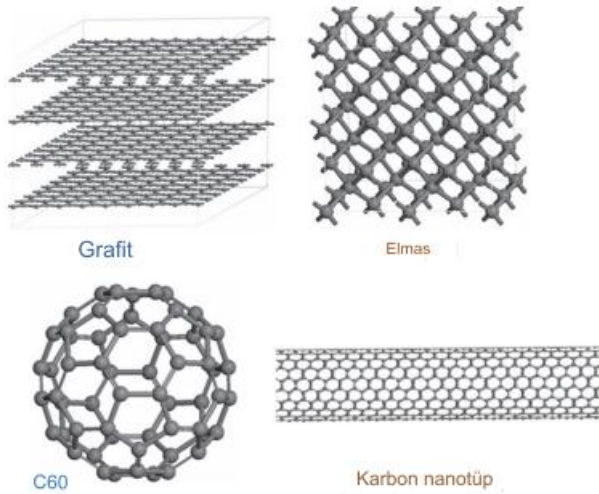


Şekil 1.5 Elektrospining yöntemi şematik gösterimi [10].

1.4 Karbon Nanotüp

Karbon, atomlarının diziliş şekline bağlı olarak dünyada bilinen en çok yönlü elementtir. Karbon; metal oksitlerin indirgenmesi için 6000 yıldan fazla süredir kullanılırken, grafit formu 1779'da ve bundan 10 sene sonra da elmas formu bulunmuştur [22, 23]. Kroto ve ark. 1985 yılında 60 karbon atomu (C₆₀) içeren fullereneri keşfetmeleri nedeniyle 1996 yılında ki Nobel Kimya Ödülünü aldılar. Fullerener beşgen ve altıgen yüzlerden oluşan karbon atomlarından meydana gelen kafes benzeri yapılardır [24].

Karbonun genel yapıları; grafit, elmas, karbon nanofiber, camsı karbon, siyah karbon, karbolit, amorf karbon, sıvı karbon, fullerene ve karbon nanotüp şeklindedir (Şekil 1.6) [22].



Şekil 1.6 Farklı Karbon Materyallerinin Yapısı

Karbon nanaotüpler, Lijima tarafından ark boşalım yöntemi ile 1991 yılında keşfedilmiştir [25]. Nanotüpler uzun ve ince fullerenlerden oluşmaktadır. Karbon nanotüplerin duvarları altıgen karbondan (grafit yapısı) oluşan bir silindirik yapı şeklindedir ve bu uçlar küresel silindirik şeklinde kapanmıştır [24]. Karbon nanotüpler, bilinen diğer malzemelerden oldukça farklı özellikleriyle nanoyapılı malzemelerin önemli ve yeni bir sınıfını meydana getirirler [26]. Oldukça yüksek yüzey alanı ve geniş en-boy oranına sahip karbon nanotüpler; yüksek dayanıklılık, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik gibi eşsiz özelliklere sahiptirler [27-29]. Tablo 1 'de Karbon nanotüplerin diğer karbon malzemeler ile karşılaştırmalı olarak özellikleri verilmiştir [27, 28].

Tablo 1.3 Farklı karbon malzemelerin mekanik ve termal özellikleri

Özellik	Grafit	Elmas	C60	TDKNT	ÇDKNT
Yerçekimi ($g \cdot an^{-3}$)	2.09-223	3.5	1.7	0.8	1.8
Elektriksel İletkenlik ($S \cdot cm^{-1}$)	$2.5 \times 10^4 P$ 3.3`	10^3	10^{-5}	10^2-10^6	10^3-10^5
Isıl İletkenlik	3000P 6`	900-2320	OA	-.6000	-.2000
Termal Genleşme katsayısı (K^{-1})	$-1 \times 10^{-6} P$ 29×10^{-6} `	$1 \sim 3 \times 10^{-6}$	6.2×10^{-5}	İhmal edilebilir	İhmal edilebilir
Termal Genleşme	450-650	777	>600	>600	>600

Tablo 1.3'ün devamı

Yüzey Alanı (m ² g ⁻¹)	Değişken	10-50	>100	>100	>100
Modül (GPa)	1000P	500-1000	14	1200	1000
	36.5'.				

1.4.1 Karbon nanotüp türleri

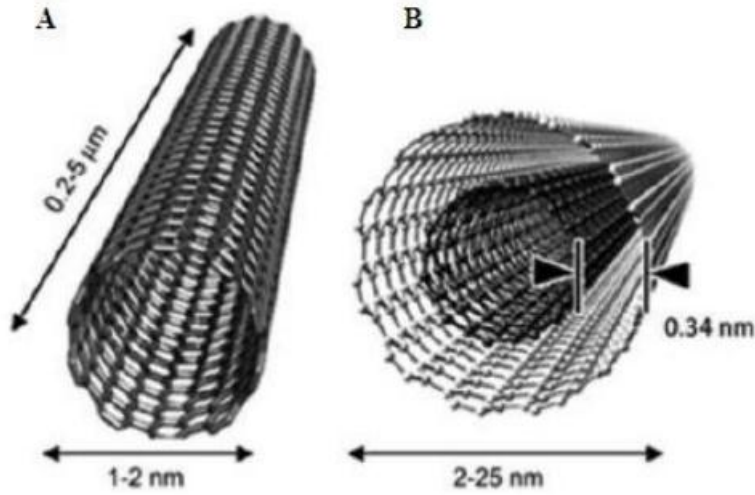
KNT'ler, grafen parçasının yuvarlanarak nanometre boyutunda küresel bir silindir şeklinde sarılmasıyla oluşur. Bu grafen tabakalarının hangi yöne yuvarlandığı karbon nanotüplerin özellikleri üzerinde belirleyicidir. Katman sayısı, KNT'lerin türlerini belirtir ve KNT'ler Tek Katmanlı Karbon Nanotüp ve Çok Katmanlı Karbon Nanotüp olmak üzere ikiye ayrılır [30].

1.4.1.1 Tek duvarlı karbon nanotüpler

Tek duvarlı Karbon nanotüpler 1993 yılında ark boşaltma yöntemiyle sentezlendi ve o tarihten bugüne elektriksel özellikleri ve olası uygulamaları araştırılmaktadır [31, 32]. KNT'ler tek bir grafit katmanının kesintisiz bir silindir şeklinde bükülmesinden oluşmaktadır ve uzunluk/çap oranı genellikle yaklaşık 1000 veya daha fazla olduğu için tek boyutlu yapılardır. Her iki ucu kapatılmış grafit tüpü şeklindeki bir TDKNT'nin yan duvarı ve tüpün uç kapağı olmak üzere birbirinden farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri olan iki ayrı bölgeden oluşur. TDKNT'lerin çapları türlerine ve sentezleme yöntemine göre değişiklik göstermekle beraber 1-2 nm aralığındadır [22, 33].

1.4.1.2 Çok duvarlı karbon nanotüpler

Farklı çaplara sahip tek duvarlı karbon nanotüplerin iç içe geçmesiyle çok duvarlı karbon nanotüpler oluşur ve özellikleri TDKNT'lerden farklıdır . KNT'lerin iç çapları her ne kadar 0,4 nm'ye kadar inerse de, genellikle 5 nm civarındadır. Dış çapları ise yaklaşık 15 nm civarındadır . Katmanlar arasındaki mesafe yaklaşık 0,34 nm'dir ve bu değer grafitin katmanlar arası değerinden biraz daha büyüktür (Şekil 1.7). ÇDKNT'lerin kimyasal direnci TDKNT'lere göre daha iyi olduğu ve çapları daha büyük olduğu için işlem yapmak daha kolaydır ve bu nedenle TDKNT'lere göre avantajlıdır. ÇDKNT, kimyasal stabilitesi ve mekanik mukavemeti yüksek olduğu için endüstriyel uygulamalar için caziptir (Tablo 2), [30].



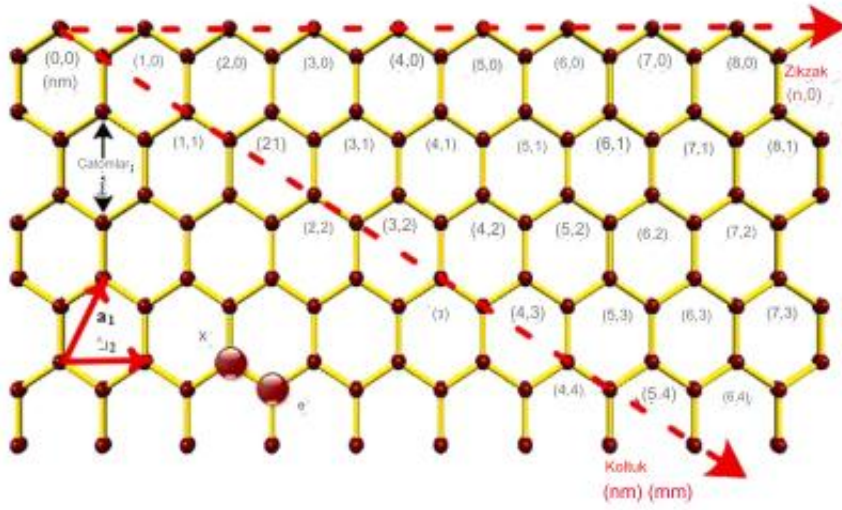
Şekil 1.7 TKDNT (A) ve ÇDKNT (B)

Tablo 1.4 TKDNT ve ÇDKNT'lerin özellikleri [27]

Özellik	TKDNT	ÇDKNT
Çap	1-2 nm	5-100 nm
Uzunluk	100-1000 nm	15,000 nm
Elastik modülü	1000-3000 GPa	300-1000 GPa
300 K'da Termal iletkenlik	3000-6000 W/Mk	3000-6000 W/Mk
Band aralığı	0-0,5 eV	2,9-3,7 eV
Yoğunluk	2600 p(kg/m ³)	1600 p(kg/m ³)
Spesifik Sıcaklık	425 c _p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	796 c _p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
Erime Sıcaklığı	3527°C	3527°C
Gerilme Direnci	22,2 ±2,2 GPa	11-63 GPa

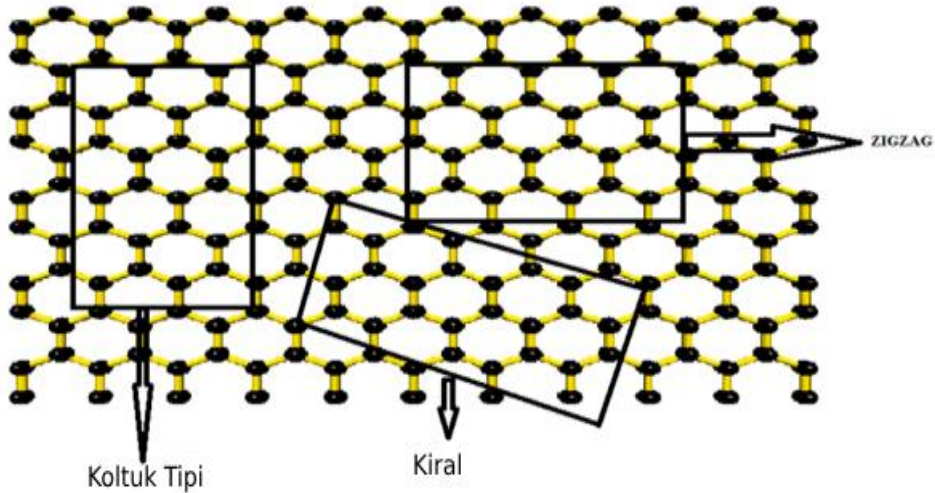
1.4.2 Karbon nanotüp yapıları

Karbon nanotüpler, altıgen kafes şeklinde grafitlerden oluşan silindirik yapılardır ve bu altıgen kafesler birbirine simetri eksenini boyunca zigzag, koltuk tipi veya simetri ekseninden farklı bir yöne kiral olarak bağlanabilirler [34]. Şekil 9'da grafitten gelen tek düzlem halindeki grafen tabakası, a_1 ve a_2 temel vektörleri tarafından oluşturulan grafen kafesi de görülmektedir. Burada $a_1 = a(\sqrt{3}, 0)$ ve $a_2 = a(\sqrt{3}/2, 3/2)$ temel vektörü, $|a_1| = |a_2| = \sqrt{3}a$ 'dır. Burada “a” 0,142 nm değerindeki C–C bağ uzunluğudur. Şekil 1.8'de gösterildiği gibi grafenin birim hücreinde iki atom (X ve Y) bulunur.



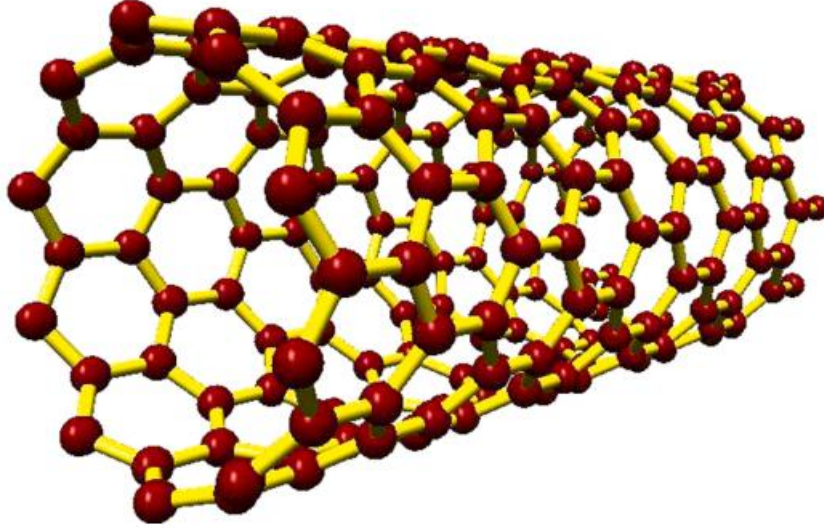
Şekil 1.8 Bir grafit tabakasının genel yapısı

İki altıgenin merkezleri vektör eklemeleriyle birbirine bağlandığında kiral vektör adı verilen yapı oluşur. Kiralite, KNT'lerin elektriksel özelliklerini bilmemizi sağlayan temel özelliktir [35-37]. KNT'ler kiraliteleriyle ilişkili olarak yarı iletken ya da metalik özellikte olmaktadır [38]. Nanotüpün kiral vektörü, Ch , $Ch = n\hat{a}_1 + m\hat{a}_2$, olarak tanımlanır. Burada $\hat{a}_1$ ve $\hat{a}_2$ iki boyutlu hegzagonal örgüde birim vektörleridir ve n ve m tamsayılarıdır. Nanotüpler $m=0$ için “zigzag” şeklinde, $n=m$ iken “koltuk tipi” ve geri kalan durumlarda ise “kiral” yapıdadır (Şekil 1.9) [25, 27].



Şekil 1.9 KNT'lerin kiralitesinin temeli.

Şekil 1.10'da KNT'lerin farklı kiralitesini göstermektedir.



Şekil 1.10 Zigzak kiralite (n, m = 10, 0/Uzunluk = 20 Å/Bağ uzunluğu = 1,5 Å)

Dikdörtgen şeridin kiral vektörü (C) ve KNT'nin çapı ilişkilidir ,

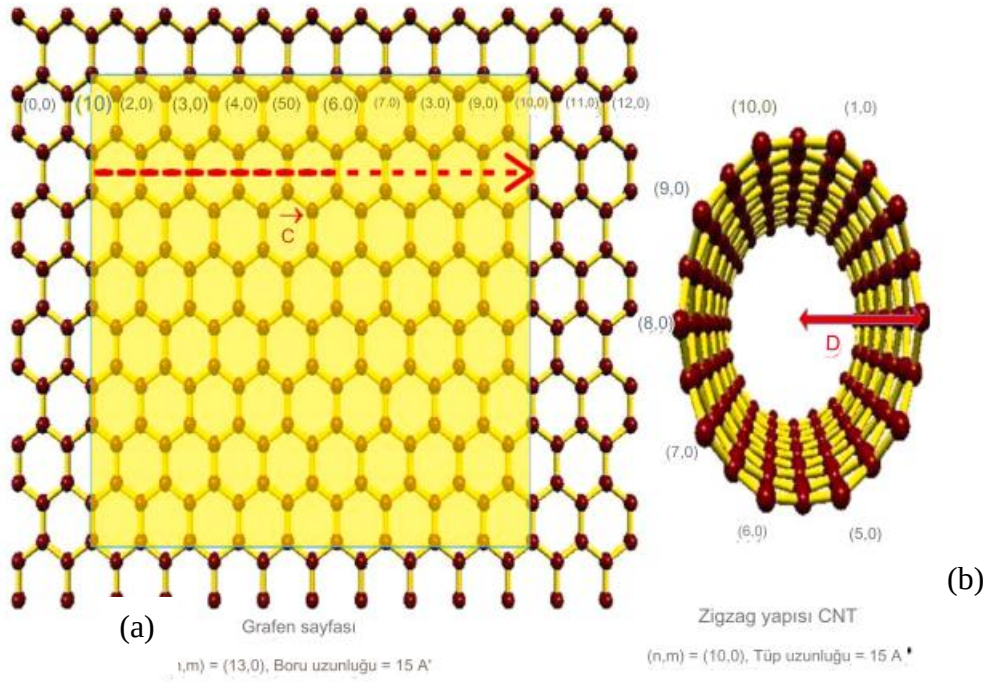
$$D = C/2\pi = (\sqrt{3}/2\pi)a\sqrt{(m^2 + n^2 + mn)}$$

burada C = Kiral vektör = $na_1 + ma_2$,

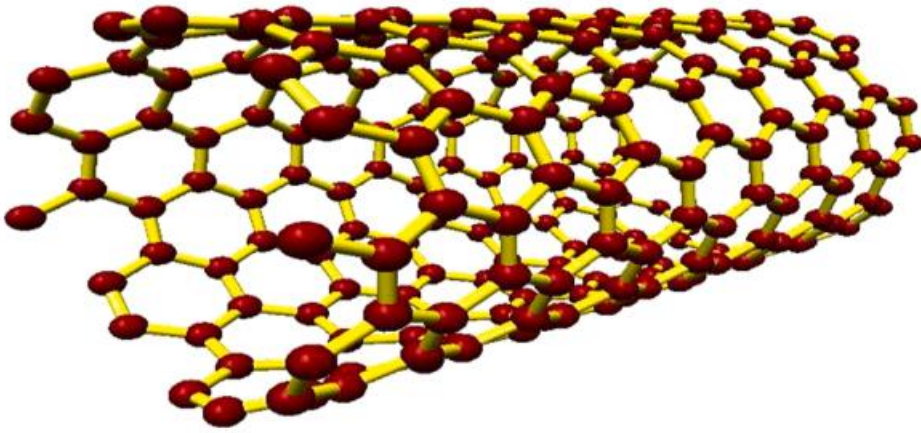
D = KNT'nin çapını simgelemektedir [35, 36].

Şekil 1.11'de bir grafen tabakasının karbon nanotüp yapısına dönüşümü görülmektedir.

Burada tüp uzunluğu 15 Å'dur. Şekil 1.11' de ki "D" tüp çapını ve ayrıca grafen tabakasının yuvarlanma yönünü de göstermektedir [35, 36]. Şekil 1.12 de ise kiral kiralite görülmektedir.



Şekil 1.11 Grafen tabaka(a) ve Zigzag KNT(b)



Şekil 1.12 Kiral Kiralite $(n, m = 8, 6)$ /Uzunluk = 20 Å/Bağ uzunluğu = 1,5 Å.

1.4.3 Karbon nanotüplerin özellikleri

Oldukça yüksek yüzey alanına sahip karbon nanotüpler mükemmel elektriksel ve termal iletkenlik, aynı zamanda yüksek mekanik dayanıklılık gösterdikleri için çeşitli uygulama alanları için çok kuvvetli bir malzeme pozisyonundadırlar [37, 39].

1.4.3.1 Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri

Karbon nanotüplerin en önemli özellikleri arasında yüksek elastiklik modülü, oldukça hafif olması ve bilinen en dayanıklı lif olması gelmektedir. Karbon nanotüplerin olağanüstü mekanik özelliklere sahip olmasının nedeni; grafen katmanındaki karbon-karbon kimyasal bağıdır ve bu nedenle de karbon nanotüpler, kompozit malzemelerin güçlendirilmesinde de önemli uygulama potansiyeli gösterirler [40-42]. Nanotüpün şeklinin değişebileceği, ancak bölgesel atomik bağlantısının değişmediği, elastik deformasyonlar ve atomik bağlantısının değiştiği, geri dönüşümü olmayan davranışların her ikisinde de karbon nanotüpler oldukça elastik ve güçlüdür. Çok yüksek açılarla bükülebildikleri gibi aynı zamanda bilinen hiçbir malzemeyle kıyaslanamayacak gerilme mukavemetine sahiptirler [40].

Young modülü, Poisson oranı, elastik sabitlerdeki deformasyona tepki, çekme ve basma şekil değiştirmeleri, akma mekanizması ve hasar anında mukavemet, tokluk ve büküldüğünde burkulma Karbon nanotüplerin mekanik özelliklerini karakterize eden en önemli parametrelerdir [41].

Nanotüplerin yapısına bağlı olarak mekaniksel özellikler değişmektedir. Tablo 1.5'te karbon nanotüplerin mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir [24, 30, 31].

Tablo 1.5 Farklı türlerdeki Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri

Malzeme	Young Modülü (TPa)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Kopma Uzunluğu (%)
TDNT	~1 (~1-5 aralığı)	13-53 ^D	-
Koltuk TDNT	0.94 ^K	126.2 ^K	23.1
Zigzag TDNT	0.94 ^K	94.5 ^K	15.6-17.5
Kiral TDNT	0.92	-	-
ÇDNT	0.8-0.9 ^D	150	-
Paslanmaz Çelik	~0.2	~0.65-1	15-50
Kevlar®	~0.15	~3.5	~2
Kevlar® ^K	0.25	29.6	-

1.4.3.2 Karbon nanotüplerin elektriksel özellikleri

Bir KNT'nin elektronik yapısı 2 boyutlu grafitten oluşur bununla birlikte karbon

nanotüpler tek boyutlu yapılar olduğu için çaplarına ve sarmallıklarına bağlı elektronik özellik gösterirler.

Belirli n ve m kombinasyonlarına sahip KNT; metalik veya yarı iletken olabilir. $n=m$ olduğunda metalik, $n+m$ 'nin toplamı üçün katı olduğunda yarı iletkenidir. Koltuk tipli KNT yapıları metalik iken, diğer KNT yapıları metalik veya yarı iletken olabilir. Nanotüpün çapına ve kiralitesine bağlı olarak elektriksel özellikler değişkenlik gösterir [27].

1.4.3.3 Karbon nanotüplerin termal özellikleri

KNT'lerin termal özellikleri, eşsiz yapısı ve küçük boyutuyla doğrudan ilgilidir. Küçük boyutları nedeniyle kuantum etkileri önemlidir. KNT, makro ve mikro ölçekte düşük boyutlu fonon yapısı ile ideal bir malzemedir [27]. KNT'lerin termal özellikleri fononlar tarafından belirlenir [43]. Elmas ve grafit gibi karbon allotraplarının termal iletkenliği oldukça iyidir, ancak KNT'lerin termal iletkenliği elmas ve grafitden de daha iyidir [27, 44].

Düşük sıcaklık, özgül ısı ve yığın içinde tüplerin komşuları arası etkileşimi hesaplanarak KNT'lerdeki fonon sayısı tespit edilir. Karbon nanotüp sistemlerinin spesifik ısı ve termal iletkenliği öncelikle fononlar tarafından belirlenir. Yüksek sıcaklıklara (normalde 750 °C ve vakum atmosferik basınçta 2800 °C) kadar dayanıklılık gösterebilirler ve atomik bağlarının kuvveti nedeniyle termal iletkenlikleri de oldukça iyidir. KNT'lerin ısı iletkenliğini; atomik düzenleme, nanotüplerin uzunluğu ve çapı, morfolojileri ve safsızlıkların varlığı etkiler [27].

Yapılan teorik çalışmalarda, tek duvarlı nanotüplerin termal iletkenliğinin oda sıcaklığında 200 W/mK'in üstünde [44], Çok duvarlı nanotüplerin termal iletkenliklerinin ise 300 W/mK'nin üstünde olduğu gösterilmiştir [44, 45].

1.4.4 Karbon nanotüplerin sentezi

Karbon nanotüpleri sentezlemek için yaygın olarak kullanılan üç yöntem vardır. Bunlar; Ark Boşaltma, Lazer aşındırma ve Kimyasal buhar biriktirme (KBB) yöntemleridir. Tüm yöntemlerde karbon nanotüpleri oluşturmak için karbon malzeme ve bir enerji kaynağı kullanılır. Karbon kaynağı; karbon elektrotları veya gazlar olabilir, enerji ise KBB durumunda olduğu gibi ark deşarjından veya ısıdan gelebileceği gibi, lazer

ablasyon yönteminde olduğu gibi lazer ışınından da gelebilir [46]. Tablo 1.6’da karbon nanotüp üretim yöntemleri kıyaslanmıştır [47].

Tablo 1.6 Karbon Nanotüp Üretim Yöntemleri

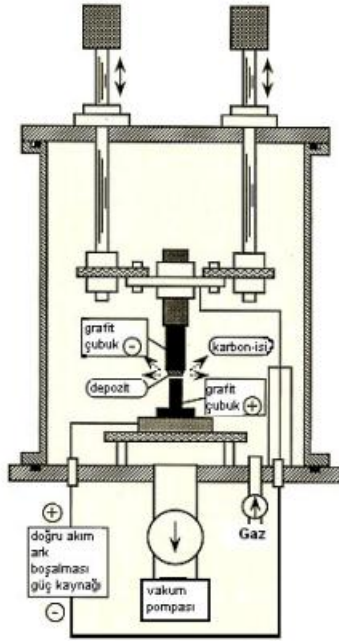
Metot	Ark Boşalım	Lazer Aşındırma	KBB
Verim	%30-%90	%20-%100	%70 üzeri
Tek Duvarlı Nanotüpler	0.6-1.4 nm çapındaki kısa tüplerde	0.6-4 nm değişen çaptaki uzun tüplerde	1-2 nm tek caph ve 5 mikron uzunluktaki tüplerde
Çok duvarlı Nanotüpler	iç çapı 1-3 nm, dış çapı ise 10 nm olan kısa tüplerdir.	Çapları 10 ile 240 nm arasında değişen uzun tüplerdir.	Pahalı bir yöntemdir.
Avantajları	Ucuz, basit ve katalizörsüz ÇDNT üretiminde	Oldukça yüksek saflıkta oda sıcaklığında üretim, kontrol edilebilir çap	Basit, ucuz, düşük sıcaklık, yüksek saflık, yüksek verim, kontrol edilebilir çap
Dezavantajları	Yüksek sıcaklık, safsızlıklar	ÇDNT için uygun değil	Pahalı bir yöntemdir
Tek Duvarlı ve Çok Duvarlı Yapılar	Her ikisi için uygun	TDNT için uygun	Her ikisi için uygun

1.4.4.1 Ark boşaltma yöntemi

KNT üretiminde ilk olarak ark boşaltma yöntemi 1991 yılında Lijima tarafından keşfedilmiştir [48]. Bu yöntem, TDKNT ve ÇDKNT üretimi için bir gazın elektriksel olarak parçalanması ve plazma oluşturulmasını içerir ve kolay bir yöntemle kaliteli bir üretim yapılır [23]. Bu yöntemde biri anot diğeri katot olmak üzere iki grafit elektrot kullanılır ve bu elektrotların arasında bir doğru akım oluşturulması sonucunda nanotüp sentezlenir [49]. Bu işlemde elektrotlar birkaç mm aralıklarla yerleştirilerek yaklaşık 100 A’lık akım , 20 V’luk gerilim ve 2000-3000 °C yüksek sıcaklık ile karbonu sıcak bir plazmaya buharlaştırılır ve bunlardan bazıları nanotüpler halinde tekrar yoğunlaşır

[34, 50]. Fulleren üretime benzer olan bu yöntemde(Şekil 1.13); farklı olarak iki grafit elektrot arasında helyum veya argon gibi inert gaz ortamı oluşturulur [23].

Bu yöntemde anot elektrotta Kobalt, Nikel veya Demir gibi metal tozunun eklenmesiyle çapları $1,2 \pm 0,1$ nm çapında tek duvarlı nanotüpler elde edilir (Şekil 1.13) [34, 43]. Standart ark boşaltma yönteminde ise 2-20 nm çapında çok duvarlı nanotüpler elde edilir [43]. Ark boşaltma yönteminde, işlem sırasında genellikle diğer birçok karbon bileşiği de üretilir ve bu sebeple ürünün saflaştırılması güçtür [51].



Şekil 1.13 Ark Boşaltma Yöntemi Şematik Gösterme[52].

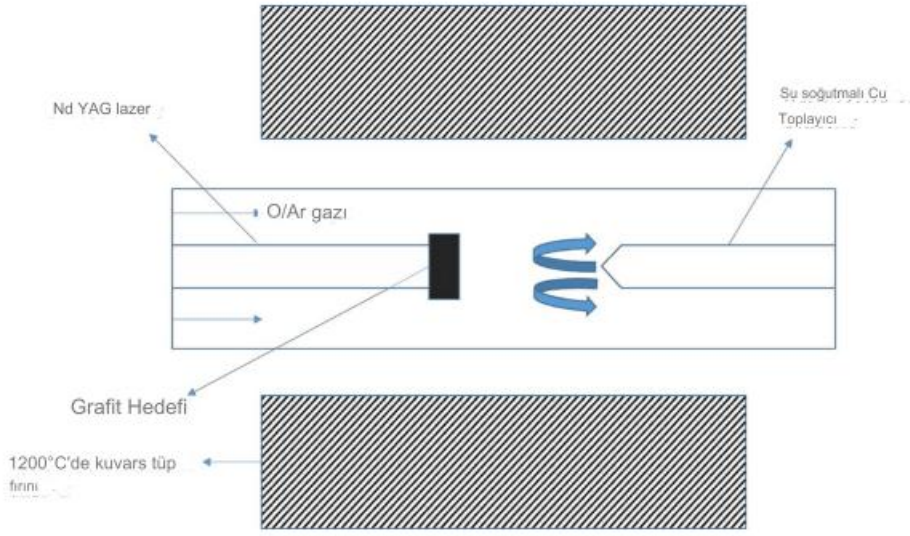
1.4.4.2 Lazerle aşındırma yöntemi

İlk olarak 1995 yılında, Rice Üniversitesinden *Smalley* ve ark. tarafından tek duvarlı nanotüplerin üretimi için kullanılmıştır. Bu yöntemde grafit parçası 500 Tor basınç 1200 °C sıcaklıktaki kuvars tüp fırının içinde lazer ünitesinin bombardımanı ile buharlaştırılarak KNT sentezlenmesi gerçekleştirilmektedir [27, 53].

Bu yöntemle buharlaştırılan grafitten çıkan karbon kümeleri, Helyum ve Argon gazlarıyla oluşturulan inert bir atmosfer altında su soğutmalı bakır toplayıcı üzerinde toplanırlar. Bakır toplayıcı üzerinde karbon nanotüplerin yanısıra nano parçacıklar da bir miktar oluşmaktadır.

Lazerle aşındırma ve Ark boşaltma metodlarının her ikisinde grafitin yüksek ısılarda

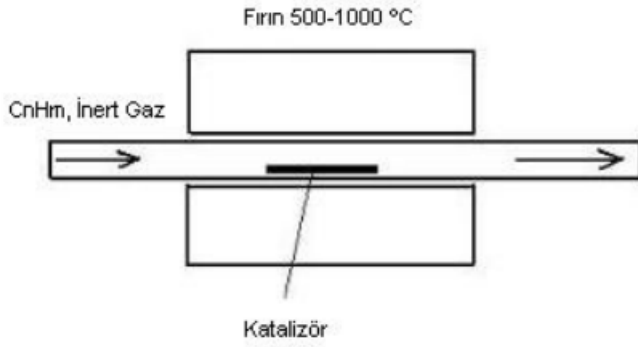
KNT formuna dönüşümü açısından benzer metodlardır. Ancak lazerle aşındırma yöntemi daha yüksek akma dayanımı, daha nitelikli tek duvarlı karbon nanotüpler üretmek için uygun olmasına karşın, yüksek maliyet ve düşük üretim kapasitesi nedeniyle pek rağbet görmemektedir [27]. Lazerle aşındırma yönteminin şematik gösterimi Şekil 1.14’te verilmiştir.



Şekil 1.14 Lazer Aşındırma Metodu

1.4.4.3 Kimyasal buhar biriktirme yöntemi

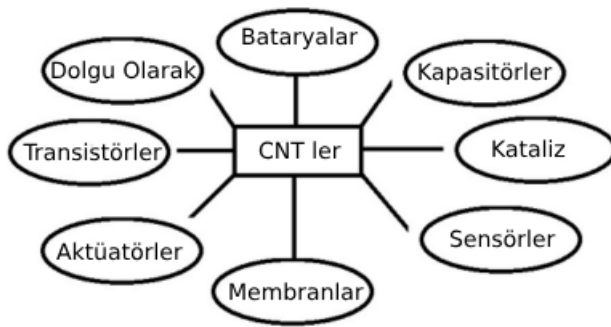
Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi; diğer karbon nanotüp üretim yöntemlerine göre daha düşük maliyetli, basit, üretim kapasitelerinin sınırlı oluşu, kolaylıkla ulaşılabilen hammadde, istenilen şekilde ve boyutta nanotüp üretimine imkan verme, geniş yüzey alanına olanak verme gibi avantajlarından dolayı tercih edilir [35, 47, 51, 54]. Bu yöntemle; yüksek sıcaklıklarda Metan, Etan, Karbon monoksit ve asetilen gibi karbonca zengin gazlar kullanılmaktadır. Bir enerji kaynağı yardımıyla Karbon atomik karbona dönüştürülür ve yüzeye difüzlemek için de Ni, Fe, Co gibi bir katalizatör kullanılır ve bu işlemin sonunda da karbon nanotüp yapısı meydana gelir [35, 47, 54]. Şekil 1.15’te Kimyasal Buhar Biriktirme metodu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.15 Kimyasal buhar biriktirme metodu şematik gösterimi

1.4.5 Karbon nanotüplerin kullanım alanları

KNT'ler çeşitli uygulamalara uygun olmaları nedeniyle 1991 yılında *Lijima* tarafından keşfedilmedilerinden günümüze kadar en hızlı büyüyen nanomateriyallerdir [46]. KNT'ler eşsiz fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde çok fazla uygulama alanında kullanılabilirler[42]. Birçok araştırmacı, nanoteknoloji ve KNT'lerin dolgu maddesi olarak kullanımına yönelik çok sayıda çalışmayla birlikte, malzeme bilimi, tıp, elektronik ve enerji depolama v.b birçok alanlarda yeni özelliklerin ortaya çıkarılması ve bu konudaki uygulamaların artırılması için çalışmışlardır [46]. Şekil 1.16'da KNT'nin kullanım alanları verilmektedir.



Şekil 1.16 KNT kullanım alanları

1.4.5.1 Karbon Nanotüplerin dolgu malzemesi olarak kullanımı

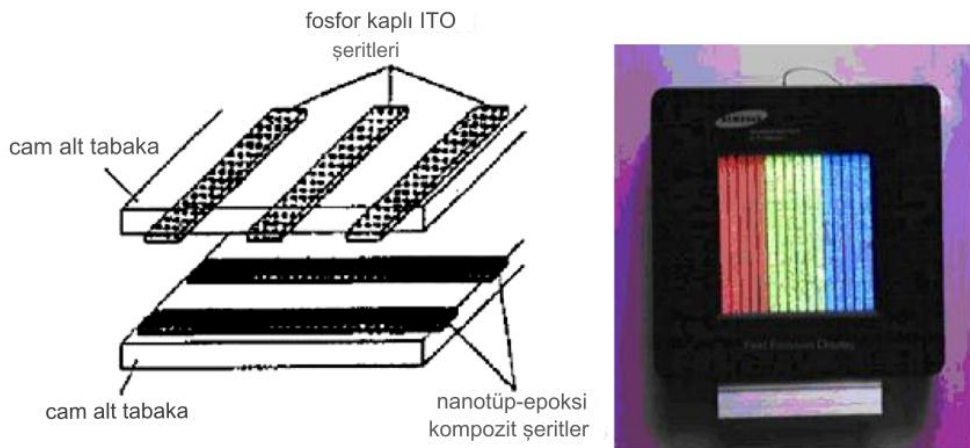
Nanoteknolojinin en gelişmiş alanlarından biri KNT'lerin nanokompozitler oluşturmak için dolgu maddesi olarak farklı malzemelerde kullanılmasıdır. KNT'ler farklı

polimerik ve diğer malzemelere, o malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerini neredeyse mükemmele yakın aralığa getirmesi amacıyla eklenir [37, 46].

KNT'leri diğer malzemelerle katkılama için; katkılama (doping), yüzey daldırma (deep-coating) ve doldurma (filling) gibi yüzey modifikasyonu içeren metodlar kullanılmıştır. Bu yöntemlerin içinde doldurma yöntemi, hibrit nano yapıların özelliklerini geliştirmekle birlikte KNT'lerin içinde nanopartiküller, nanoçubuklar ve nanoteller formunda yeni bir dizi malzeme ürettiği için önemlidir [55].

1.4.5.2 Karbon Nanotüplerin alan emisyonu cihazı olarak kullanımı

KNT yüzeyleri ile anot arasına bir potansiyel uygulandığında elektrikli cihazlarda emisyon kaynağı olarak kullanılabilir. KNT'lerin beşgen şeklindeki yapısı nedeniyle olan eğrilik veya oksitlenmiş uçların olması sebebiyle elektronlar uçlarından kolayca yayılır [56]. KNT'lerin küçük yarıçapları, yüksek yüzey alanı, yapısal bütünlük, yüksek iletkenlik ve kimyasal stabilite ile birleştiğinde istenilen miktarda alan emisyonu oluşmasını sağlar [23, 27, 37]. Anot ve katot arasına yüksek bir elektrik alanı uygulanarak sürekli elektron emisyonu elde edilir (Şekil 1.17) [37]. Bu prensiple KNT'ler; düz panel ekranlar, parlak lambalar, yoğun ışık kaynakları ve X-ışını kaynakları gibi birçok elektronik cihazın üretiminde kullanılabilir. KNT'ler bileşenlerin uzun ömürlü olması, uzun zaman boyunca istikrarlı alan emisyonu, düşük emisyon eşik potansiyelleri, ultra yüksek vakum ihtiyacının olmaması ve yüksek akım yoğunlukları gibi avantajları sayesinde alan emisyonu için kullanılırlar [57].



Şekil 1.17 Sol: Karbon nanotüplerin kullanıldığı bir prototip alan emisyon ekranının şeması. Sağda: Tarafından üretilen bir prototip 4.5_ alan emisyon ekranı

1.4.5.3 Karbon Nanotüplerin kompozit olarak kullanımı

Karbon nanotüplerin mekanik özellikleri dikkate alındığında, karbon nanotüpün kullanımıyla tamamıyla yeni bir kompozit malzeme sınıfı mümkün olabilir [23]. Günümüzde KNT'ler; güçlü, esnek, yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe (gümüşten daha yüksek) sahip ileri malzemelerdir. Ağırlıkça %5-10 KNT katılan kompozitler özel uygulamalar için iyi bir performans elde etmek amacıyla kullanılabilir. Örneğin; sensörler, süper kapasitörler, fotovoltaik uygulamalar, bakır gibi nano ölçekli uygulamalarda yüksek sağlamlığa sahip ara bağlantı elemanı gibi kullanılması uygundur [37].

1.4.5.4 Karbon Nanotüplerin süperkapasitör ve aktüatör olarak kullanımı

Geniş yüzey alanları ve yüksek elektriksel iletkenliklerinden dolayı KNT'ler elektrokimyasal cihazlarda kullanımı en iyi malzemelerdir[37, 57]. KNT süper kapasitörleri yüksek güç gerektiren uygulamalarda lityum pillere üstün bir alternatif olarak kabul edilir[58] ve yüksek güç ve depolama kapasitesi gerektiren cihazlara yönelik uygulamalarda kullanılabilir[37, 57]. KNT'lerde enerji yoğunluğu 7 Wh/Kg iken güç 20 KW/Kg'a kadar çıkmaktadır. KNT-gömülü süper kapasitörler, hibrid elektrikli araçlar için ani hızlanma sağlamak ve fren enerjisini elektriksel olarak depolamak için kullanılabilir [37, 57]. Birden fazla yolla KNT tabanlı süper kapasitörler üretilir. Bunlar; saf KNT tabanlı kapasitörler, Metal/KNT kapasitörler, Polimer/KNT kompozit kapasitörlerdir [58]. Aktüatörler önemli cihazlardır fakat sıcaklığın artmasıyla verimin azalması önemli bir sorundur. Bu nedenle modifiye edilmiş KNT aktüatörler birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır [37, 57].

1.4.5.5 Karbon Nanotüplerin hidrojen depolama kaynağı olarak kullanımı

Çevresel etkenlerin kirlilik üzerine olumsuz etkileri konusundaki bilincin artması yeşil teknolojilerin geliştirilmesine yönelik önemli gelişmelere sebep olmuştur. En büyük kirlilik sorunu araçların enerji sağlamak amacıyla ham petrolün ya da hidrokarbonların yakılmasından dolayı ortaya çıkan yan ürünlerdir [37].

KNT'ler küçük boyutları, pürüzsüz yüzey topolojisi ve yapılarında yalnızca grafit düzlemlerinin açığa çıkması sebebiyle oluşan mükemmel yüzey özgünlükleri nedeniyle

enerji depolama ve üretimi için değerlendirilmektedir [23]. İçi boş silindirik yapıya sahip oldukları için KNT'ler verimli gaz ve metal kaplar olarak işlev görebilir. Metaller, metal karbürler ve oksitler gibi birçok önemli kimyasal türün kimyasal işlemler, ark boşaltma yöntemi, katı hal reaksiyonları ve elektrokimyasal teknikler dahil olmak üzere farklı yöntemlerle KNT'nin çekirdeğine eklenebileceği gösterilmiştir. Yapılan çalışmalar birtakım problemlerden dolayı KNT'lerin hidrojen depolamak için en iyi malzeme olamayabileceğini (tablo 1.7), ancak deneyler ve ileri hesaplamalara devam edilmesi gerektiğini göstermektedir [57].

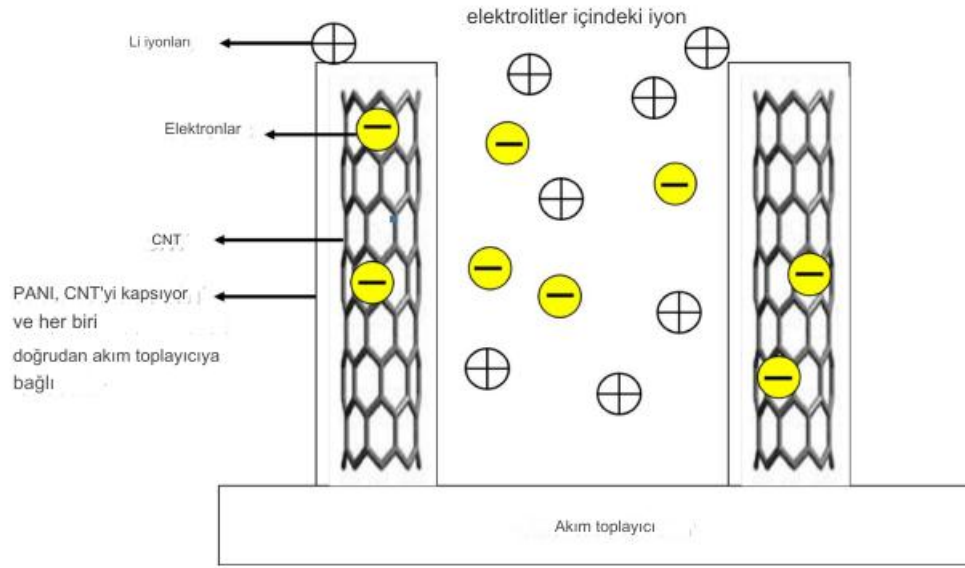
Tablo 1.7 KNT ve diğer karbon malzemelerin hidrojen depolama değerleri

<u>Materyal</u>	<u>Mak. wt%</u>	<u>H₂ T (K)</u>	<u>P (MPa)</u>
TDKNT ler (düşük saflık)	5-10	133	0.040
TDKNT ler (yüksek saflık)	~4	300	0.040
GNFler (boru şeklinde)	11.26	298	11.35
GNFler (balık sırtı)	67.55	298	11.35
GNS (plaket)	53.68	298	11.35
Grafit	4.52	298	11.35
GNFler	0.4	298-773	0.101
Li-GNFler	20	473-673	0.101
Li-grafitler	14	473-674	0.101
K-GNFler	14	<313	0.101
K-grafit	5.0	<313	0.101
TDNTler (yüksek saflık)	8.25	80	7.18
TDNTler (-50% saflık)	4.2	300	10.1

1.4.5.6 Karbon Nanotüplerin Lityum-İyon bataryası olarak kullanımı

Lityum, elektronegatifliği en düşük element olduğundan dolayı eşsiz özelliklere sahiptir [57]. Lityum-İyon bataryalar; cep telefonları, uçaklar, lambalar, tıbbi cihazlar, mobilite cihazları gibi birçok elektronik cihazda enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır[59]. Bu

bataryalar, biri grafit diğeri metal oksit olan iki elektrot arasından lityum iyonları geçtiğinde bir elektrik akımı üretir. KNT'den üretilen elektrotlar, amorf karbon elektrotlardan on kat daha ince ve hafif iken iletkenlikleri bin kattan daha fazladır. Şekil 1.18'de PANI/KNT kompozit ve bir Li elektrottan oluşan bir Li-İyon pili gösterilmektedir. Burada PANI/KNT kompoziti katot rolü oynamaktadır. PANI/KNT kompoziti, yüksek özgül kapasitans, üstün hız kapasitesi ve yüksek kararlılık da dahil olmak üzere üstün bir elektrokimyasal kapasitif performans sağlar ki bu da bu alandaki uygulamalar için oldukça umut vaad edicidir [27].



Şekil 1.18 KNT tabanlı Lityum-İyon Bataryalarının Şematik Gösterimi

1.4.5.7 Karbon Nanotüplerin Biyomedikal Alanında Kullanımı

Gen terapisi, kanser tedavileri ve yaşamı tehdit eden hastalıklara yönelik yeni çözümlerle alakalı nanotıp bilimi en hızlı büyüyen alan haline gelmiştir. KNT'ler eşsiz özellikleri ve karakteristikleri ile bilim insanlarının nanotıpta yeni alanlar geliştirmesine imkan verirler. TDKNT'ler ve ÇDKNT'ler diğ er ilaç dağılım yöntemlerine göre daha güvenli ve etkili alternatifler olarak görülmektedirler [57].

1.4.5.8 Karbon Nanotüplerin Sensör Olarak Kullanımı

Sensör; bir sinyali (uyarıyı) algılayan ve bu uyarıyı elektronik olarak ölçebilen bir sinyale dönüştüren ve değişik alanlarda sık kullanılan önemli tespit cihazlarıdır [56, 60]

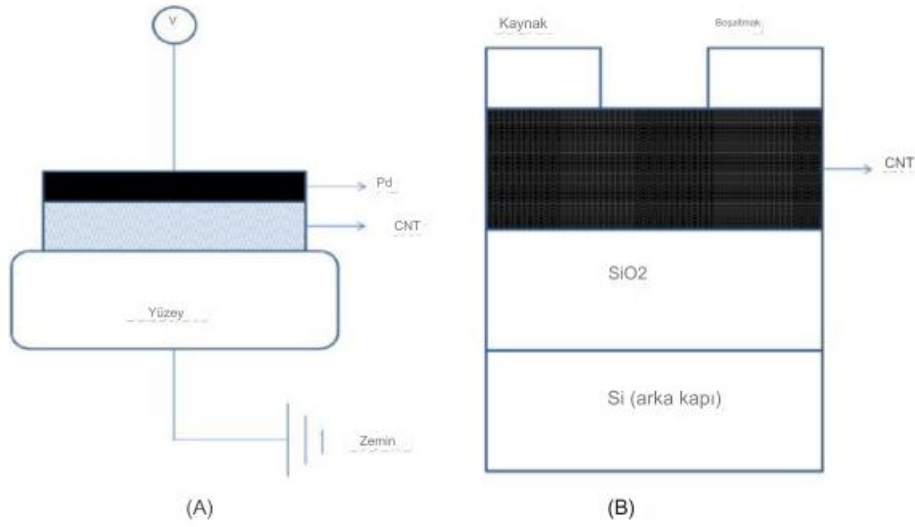
. KNT tabanlı sensörler geleneksel sensörlere kıyasla izotropik olmaları, daha iyi algılama yeteneğine sahip olmaları, boyutlarının küçük olması, daha geniş yüzey alanına ve nispeten daha iyi elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olmaları sebebiyle avantajlı durumdadırlar [59]. KNT tabanlı sensörler seçicilikleri ve hassasiyetleri için uygun bir kaplama veya belirli bir fonksiyonel grubun eklenmesiyle kimyasal olarak uygulanır [37]. KNT'ler genel olarak Gaz sensörü, Faz sensörü, Ph sensörü, Bio sensör, Basınç sensörü, ve Gerilim sensörü olarak farklı alanlarda kullanılırlar.

Gaz Sensörü:

Gaz sensörleri; ortamlarda bulunan kimyasal veya kimyasal içerikli bir kaynaktan yayılan ve uçucu olan gazların tespit edilmesi amacıyla kullanılan kimyasal tespit sensörleridir. Bu sensörler, lokal kimyasal çevredeki değişiklere yanıt veren bir cihaz olarak da tarif edilebilir. Bu yanıt, çevredeki değişimin büyüklüğüne göre ölçeklenebilecek şekilde tahmin edilebilir olmalıdır ve buna ek olarak bir kimyasal sensörün ilgili kimyasal moleküle karşı hassas ve seçici olması gerekir [27]. KNT'nin son derece yüksek kapasitesi ve KNT özelliklerinin yüzeylerinde adsorbe edilen atomlara ve moleküllere karşı mükemmel duyarlılığı, nanotüpler temelinde sensör tasarlama olanağı sağlar [61]. Gaz halindeki moleküllerin adsorbsiyonun, KNT'lerden elektronu saldığı veya aldığı, bunun da KNT'lerin elektriksel özelliklerinin değişmesine neden olduğu tespit edilmiştir[62].

Bugüne kadar KNT'ler; NH_3 , NO_2 , H_2 , C_2H_4 , CO , SO_2 , H_2S ve O_2 gibi gazlara karşı hassasiyet göstermiştir ve bu da mükemmel performansa sahip gaz sensörleri geliştirmek için ilham olmuştur [27, 62, 63].

İki terminalli ve Üç terminalli gaz sensörü olmak üzere iki farklı düzende gaz sensörü vardır. Bu sensörler Şekil 1.19'da gösterilmektedir [27].



Şekil 1.19 KNT gaz sensörlerinin şematik görünümü:a-iki terminal ve b:üç terminal

İki terminalli sensörler basit yapılarırken, üç terminalli sensörlerin hassasiyetleri daha yüksektir(6). Gaz sensörleri genel olarak çevresel izleme, kimyasal süreçlerin kontrolü, uzay görevleri, tarım, tıbbi uygulamalar v.b alanlarda kullanılır [62].

Faz Sensörü:

Faz sensörleri, hareketli bir sıvı veya gazın akış hızını veya miktarını ölçmek için kullanılan cihazlardır. Bu cihazların performansını arttırmak için faz sensörlerine yeni malzemeler eklenmiştir. *Ghos ve ark.* KNT'lerin faz sensörlerinin performanslarını arttırmak için eklenebileceğini göstermişlerdir [62]. Yapılan çalışmalar KNT sensörünün elektrik potansiyeli ile sıvı akış hızının doğrusal bir bağlantısı olduğunu ispatlamıştır [59] . KNT'den oluşan bir nanokompozitdan geçen sıvı, geleneksel sıvı akış teorisine göre tahmin edilenden dört ila beş kat daha hızlıdır. Bunun nedeni KNT duvarındaki neredeyse sürtünmesiz bir arayüzden kaynaklanmaktadır [64].

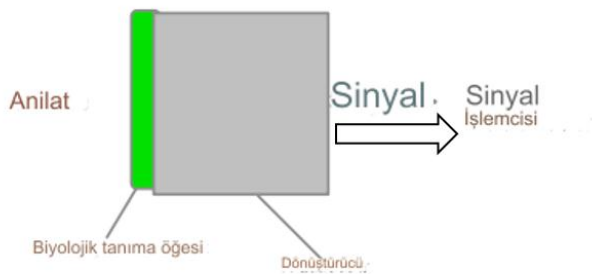
Ph Sensörü:

Su bazlı çözeltideki hidrojen iyonu aktivitesini belirtmek için kullanılan, asitliğini veya bazlık derecesini gösteren logaritmik ölçeğe pH adı verilir [16]. pH'ın tespiti ve kontrolü,insan yaşamını etkileyen birçok çevresel, biyolojik ve kimyasal süreç için önemlidir [16, 65, 66]. pH sensörlerinin potansiyometrik, kapasitif , kimyasal dirençli, lüminesans, şekil/kütle ve optik gibi birçok türü vardır [65, 67]. Katı hal elektrotları için metal oksitler gibi pH'a duyarlı malzemeler; çözelti geçişini sağlamak için grafen,

boyut değiştiren malzemeler için altın kaplı polimer; optik özelliklerini değiştiren polimerler kullanılmış ve test edilmiştir [65]. Genellikle sert cam elektrot veya sert silikon alt katmana dayanan ticari pH sensörlerinin aksine, giyilebilir elektrotlar, elektronik cilt veya nöronal implantlar gibi birçok alanda esnek tabanlı sensörler aracılığıyla önemli gereksinim sağlanmaktadır [67]. pH algılama için KNT'ler, iyi mekanik dayanıklılıkları, yüksek yüzey-hacim oranı, kimyasal işlevselleştirme kolaylığı ve ayarlanabilir elektriksel özellikleri nedeniyle en uygun malzemelerdir [62, 65].

Biosensrler:

Nanomalzemeler boyutsal olarak küçük olmaları ve geniş yüzey/hacim oranlarıyla kimyasal ve biosensrler için eşsiz malzemelerdir [37, 56]. Biosensr, biyolojik bir element kullanarak niceliksel veya yarı niceliksel analitik bilgi sağlayan elektronik cihazlardır [68]. KNT bazlı biosensrler yüksek hassasiyet, geniş yüzey alanı ve içi boş boru şeklinde yapı nedeniyle yüksek biyolojik aktiviteyi koruyan enzimi immobilize etmek için kullanılabilir [69]. Biyosensörler kimyasal sensörlerden iki açıdan ayrılırlar. Bunlardan ilki; biyosensörlerdeki algılama elemanı proteinler, oligo- veya polinükleotidler, mikroorganizmalar ve tüm biyolojik dokular gibi biyolojik malzemelerden oluşur. Diğeri ise; biyosensörlerin uygulama alanı biyolojik süreçleri izlemek ve biyomollekllerin tespiti içindir [62]. Bir biyosensör; ilgilenilen maddeyi tanıyan biyolojik tespit elemanı, biyolojik tanımayı ölçülebilir bir sinyale dönüştüren dönüştürücü ve çıktıyı işlenebilir bir sinyale dönüştüren bir sinyal işletim sistemi olmak üzere üç bölümden oluşur(şekil 1.20)[68].



şekil 1.20 Biosensörün şematik olarak gösterimi

KNT'ler kusursuz çözünürlük ve biyouyumluluk özellikleri sayesinde yüksek biyolojik aktiviteye sahip malzemelerdir. Bu zelliklerinin yanısıra çok çeşitli elektroaktif türler

için hızlı elektron transfer kinetiği gözlemlenmektedir ve KNT'ler kolayca işlevselleştirilebildiği için neredeyse talep edilen herhangi bir kimyasal türün KNT yüzeyine eklenmesinin kolay olabileceğini göstermektedir. Bu sebeple, KNT'lerin sp² hibridizasyonu, küçük boyutu ve mükemmel elektronik özellikleri ile hareketsizleştirilmiş biyosistemlerin spesifik tanıma özellikleri, KNT'leri geniş bir biyosensör yapısı yelpazesi için oldukça ilgi çekici hale getirmektedir [62].

Basınç sensörü:

Dış mekanik uyaranları elektrik çıkış sinyallerine dönüştürebilen sensörler basınç sensörleri olarak isimlendirilir ve bu sensörler yapay zeka, robot, tıbbi cihazlar ve insan hareketi izleme alanlarında önemli bir rol oynar [70]. Farklı tipteki birçok basınç sensöründen en sık kullanılanlardan bir tanesi düşük maliyet, hafiflik ve yüksek esneklik özellikleri nedeniyle piezodirençli basınç sensörleridir. Piezoelektrik tabanlı basınç sensörleri, dipollerin basınç altında bir iç polarizasyon oluşturmak üzere yeniden yönelmesiyle ortaya çıkan piezoelektrik etkiye dayanır [71, 72].

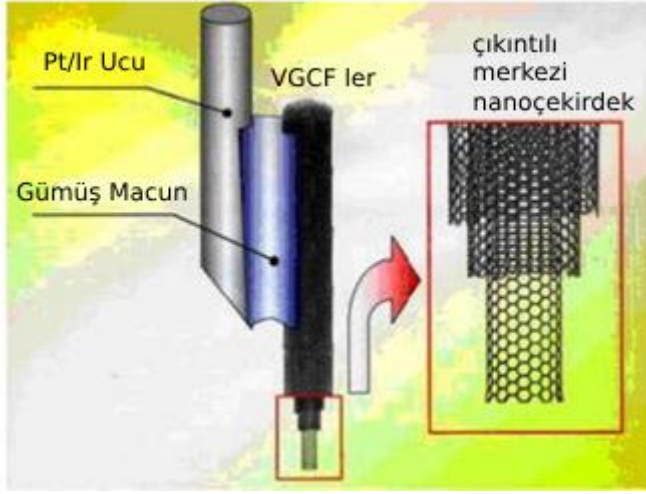
Gerilim sensörü

Yüksek performanslı gerilim sensörleri, yüksek hassasiyet, gerilebilirlik, stabilite, tepki hızı, süreç ve üretim maliyetleri gibi birçok avantaj içerir [73, 74]. Tipik gerilim sensörleri değişen gerilimler altında değişen elektrik sinyallerini tespit etme prensibine göre çalışırlar [75] ve yapısal sağlık izleme, görüntüleme ve basınç algılama gibi çeşitli uygulamalarda mükemmel performans gösterirler. Bu gerilim sensörleri, yalnızca vücut hareketlerini ve sağlık koşullarını tespit etmek için değil aynı zamanda büyük vücut gerilimlerini tespit etmek için elektronik cihazlara entegre edilebilir veya giysilere ve insan derisine takılabilir. Gerilim sensörlerinin yapıları genellikle hassas bileşenler, elektrotlar ve elektrik kabloları içerir ve hassas bileşenin performansı sensör yapısında belirleyici bir rol oynar [75].

1.4.5.9 Karbon Nanotüplerin prob olarak kullanımı

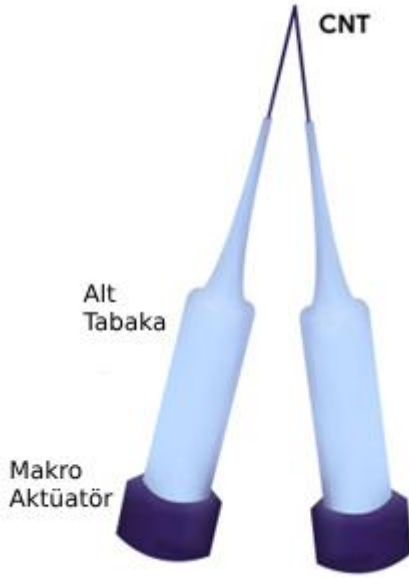
Görüntüleme teknolojisinde, kullanılan prob uçları görüntüyü daha yüksek çözünürlükte elde etmek için kullanılan ana malzemelerdir. ÇDKNT iletken olduğundan normal bir prob yerine ÇDKNT'lerin; taramalı tünelleme mikroskobu (STM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) (Şekil 1.21) ve elektrostatik kuvvet mikroskobu gibi cihazlarda görüntüleme problemleri olarak kullanılması görüntülemede daha iyi netice verir [23, 37,

56].



Şekil 1.21 AFM ucunda ÇDNT'nin kullanıldığı bir örnek

Özel kimyasal ve/veya biyolojik gruplar, kimyasal olarak modifiye edilmiş nanotüp uçlarının sensör olarak kullanılabileceğini ortaya çıkardılar. Bu sensörler herhangi bir kimyasal yapının içine bilinçli veya kasti olarak maddeleri tespit etmek için [56]. KNT'lerin elektromekanik tepkisi, nanoyapı elemanlarının ele alınmasına ve araştırılmasına yardımcı olacak nano cımbızların oluşturulmasının yolunu açtı. ÇDKNT'ler problemlerin iki farklı tabanına yerleştirilerek oluşturulan nanocımbız modeli Şekil 1.22'de gösterilmektedir [59]. Bu nano alet, iki karbon silindir arasındaki elektrostatik etkileşime göre çalışır ve nanotüplerin mevcut teknolojileri kullanımı konusunda ilerleme gösterdiğini ve daha da artacağını açıkça göstermektedir [56].



Şekil 1.22 Nanocimbızın şematik olarak gösterimi

1.5 Literatür Çalışmaları

Bharadwaj ve ark. Yaptıkları çalışmada termoplastik poliüretan (TPU) içerisine ağırlıkça değişen yüzdeye sahip çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT) eklemesiyle nanokompozit gerilim sensörleri hazırlamışlardır. Bu gerilim sensörlerini hazırlarken yüksek hızlı homojenleştirme; ÇDKNT'ler arasında ki Van der Waals çekim kuvvetini azaltarak TPU matrisindeki dağılılabirliği arttırdığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları değerlendirmeler sonucunda (ağırlıkça %0,1 ÇDKNT eklendiğinde) %0,1 konsantrasyonda ve %50 gerilimde 1389 gauge faktör değerine ulaşılmış, 0,1 ÇDKNT eklenmesi durumunda gauge faktör değerinin %0 - 50 gerilim aralığında maksimum olduğunu bulmuşlardır [76].

Ding ve ark. Yaptıkları çalışmada bir poliüretan (PU) matrisine gömülü elektrospun karbon nanoliflere (KNF'ler) dayanan bir gerilim sensörü geliştirmişler ve KNF/PU sensörünün piezodirenç özellikleri ve gerilim algılama mekanizmasını araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmada, KNF/PU sensörünün %300'e kadar gerilebilirliğine, 72 gauge faktör ve 8000 döngü sırasında üstün stabilite ve tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca parmak, el bileği ve dirseğin bükülme direnci kaydedilmiş ve elde edilen sonuçlar KNF/PU tabanlı gerilim sensörlerinin insan hareketinin izlenmesine yönelik esnek ve giyilebilir cihazlarda umut verici uygulamalara sahip olabileceğini göstermişlerdir [77].

Zhang ve ark. Yaptıkları çalışmada nanotüp dispersiyonun iyi olması ve düşük süzülme eşiğinin ($p_c \sim \%0,35$ ağırlık) sağlandığı bir çözelti hazırlanması ile üretilen termoplastik poliüretan (TPU) çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) elastomerik nanokompozit filmlerin döngüsel yükleme altındaki direnç tepkisini incelemişlerdir. $\%5$ 'lik bir gerilim genliğinde; gerilime bağlı direnç, döngüsel yüklemeyle iyi bir geri kazanılabilirlik ve tekrar üretilebilirliği göstermiştir. Daha büyük gerilimler uygulandığında ise direncin yalnızca küçük bir kısmının geri kazanılabildiği ve tek bir yükleme döngüsü uygulandığında çift direnç piki ortaya çıktığı gözlemlenmiştir [78].

Li ve ark. Yaptıkları çalışmada oldukça esnek gerilim sensörünün imalatı için karboksillenmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (KNT'ler) ile elektrospun tekniği ile üretilmiş Termoplastik poliüretan (TPU) lifleri kullanmışlardır. Püskürtme ve ultrasonik destekli biriktirme yöntemleriyle TPU elyafın üzerinde ağırlıkça $\%12$ 'ye ulaşan KNT biriktirmeyi başarmışlar ve bunun neticesinde de $0,01$ S/cm yüksek iletkenlik, 57 Gauge Faktör değeri, $\%0-760$ gerinim aralığında, geniş bir algılama aralığı boyunca yüksek doğrusallık değerlerine ulaşmışlardır. Ayrıca, elde ettikleri gerilim sensörleri, düşük bir gerinimi ($\%2$) tespit etme kapasitesine sahip oldukları ve yüksek seviyede dayanıklılığı korurken hızlı tepki verdiklerini tespit etmişlerdir. Bunun yanısıra 60 dakikalık suyla yıkamaya tabii tutulduğunda uzun vadeli stabilite ve dayanıklılıkla birlikte hızlı yanıt süresi (45 ms) sergilediklerini gözlemlemişlerdir [79].

Şanlı yaptığı çalışmada elektroğrılmış yapıdaki KNT/TPU matını iki PDMS altlığı arasına yerleştirerek bir yapı üretmiştir. KNT (-COOH fonksiyonlaştırılmış)/TPU numunelerindeki KNT'ler, manyetik karıştırma, ultrasonik banyo ve sonikasyon olmak üzere üç farklı dispersiyon tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Numunelerin detaylı mikroskobik incelemesi yapılarak, elektromekanik özellikleri, piezoresistif özellikleri ve elektroğrılmış sandviç yapıdaki KNT/TPU gerilme sensörü mekanizması incelenmiştir [80].

Sang ve ark. KNT morfolojisinin polimer kompozit özellikleri üzerindeki etkilerini ve yapı-özellik ilişkisini anlamak için yaptıkları çalışmada eriyik karışımli TPU nanokompozitlerin elektriksel süzülme eşiği (Φ_c) ağırlıkça $\%0,82$ iken çok duvarlı karbon nanotüplerin elektriksel süzülme eşiği (Φ_c) ağırlıkça $\%3,02$ olduğunu ve lineer yerleşime dayalı olarak $\%0-100$ gerinim seviyesi için 18 gauge faktör, ağırlıkça $\%2$ CNS içeren TPU nanokompozitlerinin, ağırlıkça $\%5$ ile karşılaştırıldığında sırasıyla $\%0-$

44, %45-73 ve %74-100 gerinim seviyeleri için 15, 30 ve 58 gauge faktör değerleri gösterdiğini bulmuşlardır [81].

Wang ve ark. Yaş eğirme yöntemiyle elde ettikleri poliüreten (TPU) ve çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) bazlı lif şeklinde bir gerilim sensörü hazırlamışlardır. Yaptıkları çalışmada gözenekli yapının oluşmasının, katılaşma işlemindeki çözücü değişimiyle ilgili olduğunu ve algılama aralığının iyileştirilmesinde de faydalı olduğunu tespit etmişlerdir. Tek eksenli germe testinde, ÇDKNT/TPU lif şeklindeki sensör, ultrageniş bir uygulanabilir gerilim aralığı (%0-320), yüksek bir hassasiyet (%160 gerinimde 22.2 gauge faktör, %160-320 gerinim için ise 97,1 gauge faktör) ve hızlı tepki süresi (< 200 ms) değerlerini ulaşımlardır. Ayrıca ÇDKNT/TPU kompozit lif sensör, çoklu döngü testinde (%100 gerinimde 9700 döngü) iyi tekrarlanabilirlik ve mükemmel dayanıklılık sergilediklerini bulmuşlardır [82].

Sun ve ark. Yaptıkları çalışmada vakum filtreleme tekniği ile poli(dimetil siloksan) (PDMS) matrisi ile çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT'ler) içeren tamamen karbon iletken bir ağa dayalı bir epidermal gerilim sensörü geliştirmişlerdir. PDMS reçinesinin penetrasyonunu saniyeler içinde tamamlamak için ultrasonikasyon işlemi gerçekleştirmişler; dolaşmış ve kaplanmış ÇDKNT ağının , gerilim sensörünün elektriksel iletkenliğini (1430 S m^{-1}), uniformluğu (farklı katmanlarda sabit kalan), güvenilir algılama aralığını (%80'e kadar gerinim) ve döngüsel stabiliteyi büyük ölçüde arttırdığını bulmuşlardır. ÇDKNT'lerin PDMS matrisi içindeki homojen dağılımının, iki faz arasında güçlü bir etkilişime yol açtığı ve mekanik stabiliteyi büyük ölçüde arttırdığını (kopma sırasında yaklaşık %160 gerinim) gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada esnek, ters çevrilebilir ve ultra ince (<100 μm) film, yüksek doğruluk ve tam zamanlı insan hareketi algılama için epidermal gerilim sensörleri olarak doğrudan insan derisine yapışabildiği sonucuna ulaşmışlardır [83].

He ve ark. Yaptıkları çalışmada yüksek esnekliğe ve iyi iletkenliğe sahip ÇDKNT/TPU yapısını yaş eğirme işlemi ile elde etmişlerdir. Bu yapıda TPU esneklik verici malzeme olarak, ÇDKNT ise sensör özelliği vermek amacıyla kullanılmıştır. Daha sonra malzemenin yapısal, mekanik, elektriksel ve gerilme algılama özellikleri incelenmiştir. En iyi iletkenlik değeri 28 MPa ve %565 uzama oranında $6,77 \text{ S cm}^{-1}$ olarak elde edilmiştir [84].

Sui ve ark. Yaptıkları çalışmada modifiye edilmiş ÇDKNT'ler ve karboksil ÇDKNT'ler

(ÇDKNT-COOH) içeren termoplastik poliüretan (TPU) kompozitler, eriyik karıştırma ve çözelti karıştırma ile hazırlayarak dolgu malzemesinin TPU matrisindeki dağılımı ve kompozitlerin farklı işleme koşulları altındaki makro özelliklerini sistematik olarak araştırmışlardır. Saf ÇDKNT'ler için, ağırlıkça %2,5 oranında veya daha az oranda kullanımda daha iyi bir dispersiyon elde edildiği görülmüştür. Kritik konsantrasyon ağırlıkça %5,0'a çıkarıldığında benzer sonuç TPU/ÇDKNT-COOH kompozitlerinde de görülmektedir; bu, KNT ile TPU arasındaki etkileşimin, KNT'nin TPU matrisinde çözelti karıştırma yoluyla dispersiyonunda da rol oynadığını gösterir [85].

Fu ve ark. Yaptıkları çalışmada gerilebilir ve hassas bir gerilim sensörünü temel almışlardır. Bu çalışmada, mükemmel bir genel performansa sahip çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT)/polidimetilsiloksan (PDMS) kompoziti üretilmiş ve %7 ÇDKNT oranına sahip kompozitin %5 ve %9 ÇDKNT oranına sahip kompozitlerle karşılaştırıldığında gerilim sensörleri için ideal olduklarını tespit etmişlerdir. Bu kompozitlerin gauge faktör değerleri yalnızca %10-40 gerinim altında 5-9'a ulaşmakla kalmadığı, aynı zamanda dirence karşı gerilimdeki göreceli değişim eğrisinin de neredeyse doğrusal olduğunu gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak gerilim sensörünün düşük histeriz ile harekete anında yanıt verebildiğini ve 1000 döngü altında da büyük bir stabilite sergileyerek mekanik uyarılara karşı arzu edilen uzun vadeli dayanıklılığı da gösterdiğini bulmuşlardır. Daha sonra bu gerilim sensörünü, insan hareketlerini (parmak ve bilek bükülmesi) izlemek, hareket deformasyonunu hassas bir şekilde uygulamak için kullanmış ve ÇDKNT/PDMS dayanan bu sensörün yüksek hassasiyet, iyi gerilebilirlik, imalat kolaylığı ve biyomedikal sistemde giyilebilir elektronik cihazlar alanında umut verici pratik uygulama dahil olmak üzere çok sayıda olumlu özelliğe sahip olduğu sonucuna varmışlardır [86].

Ren ve ark. Elektrospinning yöntemiyle TPU elyaf matı hazırlamış daha sonra KNT'lerin ultrasonikasyon yoluyla TPU elyaf matına karışmasını sağlamak için basit ve etkili bir dozajlama yaklaşımı kullanmışlardır. KNT/TPU matların dikey ve yatay yönlerde algılama özellikleri kıyaslığında dikey yönde ki numunelerin ultra yüksek bir gerilme özelliğine (%900), mükemmel dayanıklılığa (%200 gerilimde 10.000 döngü) sahip olduğunu ve ultra düşük tespit sınırı (%0,5) ve 70 ms'lik hızlı yanıt süresiyle olumlu bir hassasiyet sergileyebildiklerini gözlemlemişlerdir [87].

Nankali ve ark. yaptıkları çalışmada vakum filtreleme yöntemini kullanarak

PDMS/ÇDKNT tabanlı gerilme sensörleri elde etmiş ve yapının elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Farklı konsanstrasyon oranlarındaki KNT numunelerinin elektriksel özellikleri incelenmiştir. Elde edilen ölçümler ışığında elektriksel direncin 12.5 K Ω - 22,8 M Ω arasında olduğu gözlemlenmiştir. 1,4-2,9 mg/mm² KNT konsantrasyon aralığına sahip piezoresistif filmler yüksek direnç düşümü göstermişlerdir. Dolayısıyla bu aralık süzülme eşik bölgesi olarak tanımlanmıştır. SEM görüntülerine göre bu bölgedeki gerilme sensörlerinin nanokompozit katman kalınlıklarının 790-1210 nanometre arasında olduğu gözlemlenmiştir. Süzülme eşığının 1,992 mg/mm² olduğu görülmüştür. Son olarak süzülme bölgesindeki sensörlerin minumum gauge faktörün belirlenmesi için bu bölgenin üst limitinde esnek bir gerilme sensörü seçilerek elde edilen numunenin piezoresistif özellikleri incelenmiştir [88].

Xu ve ark. KNT ağ tabanlı sensörlerin %0,5'ten %100'e kadar geniş bir gerilim aralığında mükemmel algılama performansı sergilediğini ve KNT'lerin yoğunluklarının 152'den 7,2 μ m'ye düşürülmesiyle gauge faktörleri 0,4'den 50'ye kadar önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir. KNT ağlarının yoğunluğunun azaltılması veya gerilme geriniminin arttırılması ile algılama mekanizmasının süzülme teorisinden tünel etkisine aktarıldığını keşfetmişler ve bu çalışma ile yüksek gerilebilir gerinim sensörlerini hazırlamak için hem kolay hem de KNT ağ tabanlı gerilim sensörlerinin yapısal tasarımı için temel ilkelerini sunmuşlardır [89].

Hao ve ark. yaptıkları çalışmada üç boyutlu karbon nanotüp (KNT) köpükle nanokompozit tabanlı esnek bir gerilim sensörü geliştirmişlerdir. KNT numunesi, şablon olarak melamin-formaldehit köpüğü kullanarak hazırlamışlar ve hazırladıkları malzemenin hidrofobik özellikleri ve kendiliğinden adsorbe etme yeteneği gösterdiği için sonuçta bir polimer matrisindeki KNT'lerin dispersiyon ve aglomerizasyon sorunlarını ortadan kaldırdığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonuçları; geliştirilen sensörün bir parmağın hareketini izleyebildiği ve basınç dağılımını görüntülemek için elektronik bir cilt görevi görebildiğini göstermiştir. Bu da geliştirilen bu sensörün giyilebilir ve esnek elektroniklerdeki uygulamalar için büyük potansiyelini ortaya koyduğu sonucuna ulaşmışlardır [90].

Zheng ve ark. Yaptıkları çalışmada termoplastik poliüretanın (TPU) sırasıyla sıfır boyutlu karbon siyahı (KS) ve tek boyutlu karbon nanotüpler (KNT'ler) ile birleştirilmesiyle esnek kompozitler hazırlamışlardır. KNT/TPU kompozitlerin KS/TPU

kompozitlere (ağırlıkça %1,00 ve yaklaşık %90 gerinim) kıyasla daha düşük bir süzülme eşiği (ağırlıkça %0,28) ve daha geniş algılama aralığı (yaklaşık %0-135 gerinim) gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca CB/TPU kompozitlerinin %20 gerinim altında 10,8'lik bir GF ile daha yüksek bir hassasiyet sergilerken, KNT/TPU kompozitlerin 6,8'lik daha düşük bir GF değeri gösterdiği tespit edilmiştir. Döngüsel testde her iki kompozitinde monotik olmayan “omuz piki (shoulder peak)” davranışı gösterdiği ve CB/TPU kompoziti için ilk pikin ikinci pikten daha yüksek olduğu, KNT/TPU kompozitinde negatif bir gerilim etkisi gösterdiği bulunmuştur. Yapılan bu çalışmada tutarsızlığın esas olarak dalga boyutundaki farka ve iletken ağırlığının etkisinden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır [91].

Cao ve ark. Yaptıkları çalışmada çekme gerilimine maruz kalan çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT)/ epoksi (EP) iletken kompozitlerin gerilim algılama davranışını ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Kopma yükünün artmasıyla birlikte hassasiyet ($\Delta R/R_0$, R_0 orjinal direnç, ΔR dirençteki anlık değişimdir) doğrusal bir şekilde arttığı ve hassasiyetin artmasıyla birlikte termoplastik iletken kompozitlerden oldukça farklı olarak kritik bir gerilimde (ϵ_c) azalmaya başladığı görülmüştür. Bu durum nanotüp temas noktalarının azalmasına, kritik gerilimden önce boşlukların artmasına ve yüksek bölgesel deformasyon bölgelerinde (ϵ_c 'den sonra) nanotüplerin yeniden yönlendirilmesine ve yoğun hizalanmasına dayandırılmıştır. Ayrıca uzama-gerilme döngüleri uygulandığında maksimum gauge faktör ($\Delta R/R_0$) değerleri, kritik gerilim etrafındaki farklı gerilimlerle belirgin bir eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Ve bu davranışları döngüsel deformasyon sırasında ağların kopup tekrar bağlanmasına dayandırmışlardır [92].

Bouhamed ve ark. Yaptıkları çalışmada çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT'ler)/epoksi kompozitlerin sonikasyon süresi ve kürleme süresi gibi işlem parametrelerinin deneysel incelemelerini yapmışlardır. Farklı sonikasyon sürelerinde dispersiyonların kalitesi, taramalı elektron mikroskopi (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile gerçekleştirilen gözlemlere dayanarak incelemişler, ek olarak elektriksel ve elektromekanik incelemeler yapmışlardır. Yaptıkları incelemelerde; hem SEM hem de AFM sonuçları düşük sonikasyon süresinde üretilen nanokompozitlerde, KNT'lerin zayıf dağılımı ve büyük topaklanmaların varlığı ve buna ek olarak zamanla homojenliğin arttığı ve uniform yapı oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Proses

parametrelerinin değiştirilmesiyle elektriksel ve elektro-mekanik davranış üzerinde ters bir etki görülmüştür. Daha yüksek yük altında iletim mekanizmasında farklı değişimliklere yol açan plastik deformasyonu sebebiyle tüm filmler direnç olarak büyük değişiklik göstermektedir [93].

Li ve ark. yaptıkları çalışmada karbon nanotüp/polidemetil siloksan (KNT/PDMS) nanokompozitlerine dayalı bir gerilim sensörü geliştirmişlerdir. KNT/PDMS süngerlerine sitrik asit monohidrat parçaları eklenmesiyle gözenekli bir yapı oluşmuştur ve ($GF = 15$, gerinim (ϵ) $> \%15$; $GF = 1,1$, $\epsilon < \%15$) hassasiyet değerleri alınmıştır, gözenekli yapıya sahip olmayan KNT/PDMS köpükleri ise ($GF = 3,2$, $\epsilon > \%10$; $GF = 0,12$, $\epsilon < \%10$) hassasiyete sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Yapılan bu çalışma KNT/PDMS köpüğünü temel alan gerilim sensörlerinde yalnızca parmak ve dirseğin bükülmesi, konuşma, su içme ve nefes alma gibi insan vücudu hareketlerini izleme yeteneği göstermekle kalmayıp aynı zamanda bir dielektrik elastomerin çalıştırılmasının tespiti gibi yumuşak robotikteki potansiyel uygulamalarını da gösterdiği anlaşılmıştır [94].

Ke ve ark. yaptıkları çalışmada yapısal sağlık izleme (SHM) ve insan vücudu hareket algılama uygulamaları için piezo dirençli gerilim sensörleri, genellikle karbon siyahı (KS), karbon nanotüpleri (KNT'ler) ve grafen nanotabakaları (GNP'ler) gibi karbon dolgularına dayanan polimer nanokompozitlerini incelemişlerdir. Bu çalışmada dallanmış karbon nanotüplere (karbon nanoyapılar (CNS) olarak bilinen) sahip termoplastik poliüretan (TPU) ve mükemmel elektrik iletkenliğine sahip hibrit dolgulardan (CNS+KNT veya CNS+GNP) oluşan yeni nanokompozitler eriyik karışımıyla üretilmişler ve örnek olarak da yalnızca ağırlıkça $\%2$ konsantrasyonda TPU/CNS ve TPU/CNS/GNP nanokompozitleri $\%50$ gerilim altında sırasıyla 28 ve 144'e kadar gauge faktöre (GF) sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışma da dolgu maddesinin morfolojik yapısının polimerik nanokompozitlerin elektriksel iletkenliği ve piezodirenç hassasiyeti üzerindeki etkileri aydınlatılmış, SHM ve vücut hareketi algılama uygulamaları için çok yüksek piezodirenç duyarlılığına sahip çok işlevli polimer nanokompozitlerin hazırlanmasına yönelik yeni bir strateji sunmaktadırlar [95].

Spinelli ve ark. yaptıkları çalışmada reel zamanlı yapısal sağlığın izlenmesi için ağırlıkça $\%0,3$ çok duvarlı (ÇD) karbon nanotüplerle (KNT'ler) güçlendirilmiş termoset yapılı epoksi reçineye dayalı gömülü sensörlerin geliştirilmesini incelemişlerdir.

Kompozitlerin depolama modülleri geniş bir sıcaklık aralığında 200 MPa'dan yüksek olması, özellikle havacılık uygulamaları için yapısal parçalar olarak güvenilirliklerini doğruladığı piezodirenç özelliklerini hem çekme hem de eğilme gerilimlerine maruz kalan numuneler üzerinde incelemişlerdir. Metalik malzemeler ve alaşımlar için kabul edilen benzer yaklaşımla akma dayanımı, elektriksel karakterizasyonun sağladığı bilgilerle başarılı bir şekilde karşılaştırıp reçine içindeki KNT'lerin iletken ağındaki morfolojik değişiklikler nedeniyle piezodirenç özelliklerinde meydana gelen değişikliklerle bozulma ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada numunelerin döngü testlerine tabii tutulduğunda malzemenin elektriksel ve mekanik özelliklerinin gerilim ile bağlantısını tahmin etmek için deneysel bir yasa önermişlerdir ve bununla da bükülmenin fonksiyonuna bağlı olarak ortalama KNT'ler arası parçacık mesafelerini de tahmin edebilmektedirler [96].

Zhou ve ark. Elastomerik iletken kompozitlere (ECPC'ler) dayalı esnek gerilim sensörlerinin, giyilebilir algılama elektroniklerinde oldukça önemli rol oynadığı ancak geniş tespit aralığı ile yüksek hassasiyet arasında iyi bir bağlantının sağlanmasının zor olduğundan yola çıkarak yaptıkları çalışmada KNT/TPU kompozitte, kolay ve toksik olmayan bir sıkıştırma kalıplama yöntemi olan fazla tuz filtreleme (plus salt-leaching) yöntemiyle gözenekli iletken ağ oluşumuyla oldukça gerilebilir ve hassas bir gerilim sensörü geliştirmişlerdir. Gözenekli iletken ağa sahip gerilim sensörü, ultra geniş algılama aralığı (%800 gerilim), geniş hassasiyet (gauge faktör 356,4), kısa tepki süresi (180 ms) ve geri gelme süresi (180 ms) nin yanı sıra üstün stabilitenin mükemmel kombinasyonunu sergilediğini tespit etmişlerdir. Elde edilen gözenekli yapının, gerilim uygulandığında iletken ağın deformasyonunu yoğunlaştırarak hassasiyetin artırılmasına fayda sağladığını görmüşlerdir [97].

Kumar ve ark. yaptıkları çalışmada piezoresistif gerilme/algılama için sağlam, esnetilebilir ve yüksek duyarlılıklı ÇDKNT destekli TPU nanokompozit hazırlamışlardır. ÇDKNT'nin TPU matrisi içindeki dağılımı düşük süzülme eşiği (ağırlık olarak %0.1) ve üstün elektriksel iletkenlik sağlamaktadır. ÇDKNT/TPU nanokompozitleri ÇDKNT konsantrasyonlarına bağlı olarak farklı hassasiyet ve gerilme aralıkları göstermiştir. Ağırlık olarak %0.3, %0.5 ve %1 oranında ÇDKNT yüklenmiş TPU nanokompozitleri için %15, %35 ve %45 gerilimde neredeyse lineer piezoresistif tepki elde edilmiş ve bunun yanında 22, 8.3 ve 7.0 gauge faktör değerleri elde

edilmiştir [98].

Zhang ve ark. Yaptıkları çalışmada esnek ve yüksek performanslı piezo dirençli gerilim sensörlerini, ticari poliüretan (PU) süngerler üzerinde karbon nanopartiküllerinin elektrostatik olarak katman katman montajıyla üretmişler ve sünger bazlı gerilim sensörlerinin çekme etkisi altında pozitif ve basınç değişimleri altında ise negatif piezodirenç özellikleri sergilediğini göstermişlerdir. Karbon nanotüplerin (KNT'ler) ve grafen nanotabakaların (GNT'ler) alternatif birleşiminin daha mükemmel yapının oluşturulmasına katkıda bulunduğu ve KNT'ler ile GNP'ler arasındaki sinerjik etki nedeniyle sensörün algılama performansını önemli ölçüde geliştirdiği tespit edilmiştir. Çalışmada KNT-PU ve KNT/GNP-PU gerilim sensörleri ile KNT/GNP/KNT-PU gerilim sensörleri karşılaştırılmış ve KNT/GNP/KNT-PU sensörünün daha geniş bir gerilim tespit aralığına ve daha yüksek bir lineerliğe sahip olduğu, ayrıca KNT/GNP/KNT@PU sensörünün yüksek hassasiyet (%60 çekme geriliminde $GF = 43.000$ ve %50 basınç geriliminde $GF = -1,1$) gösterdiği ve çok küçük gerilime (%0,005) tepki verme yeteneğinin de olduğu ayrıca 3000 döngü testi sırasında da olağanüstü stabilite gösterdiği görülmüştür. Mükemmel algılama performansı nedeniyle KNT/GNP/KNT-PU sensörünün, parmak hareketleri, bilek bükme ve yürüme v.b dahil olmak üzere çeşitli fizyolojik aktivitelerin izlenmesine olanak sağladığını göstermişlerdir [99].

He ve ark. yaş eğirme işlemiyle çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT)/Termoplastik Poliüretan (TPU) elyafına dayanan yüksek hassasiyete sahip giyilebilir bir gerilim sensörü elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu ÇDKNT/TPU lifin %5-100 gerilim aralığında yaklaşık 2800 gauge faktör değeriyle en yüksek gerilme direnci ve ultra yüksek hassasiyet gösterdiğini tespit etmişlerdir. KNT ile güçlendirilmiş kompozit liflerin iletkenliğinin yüksek gerilim hassasiyeti sağlaması nedeniyle direnç değişikliklerinin 2 boyutlu haritalamasına dayalı olarak bir nesnenin ağırlığını ve şeklini izlemek için kullanılabildiği sonucuna ulaşmışlardır. Buna ek olarak kompozit elyafı çeşitli insan hareketlerini algılayabilmesi için giyilebilir bir gerilim sensörü üretmek üzere bir dikiş makinesi kullanarak oldukça elastik bandaj üzerine dikmişlerdir ve bir eldiven üreterek parmak hareketlerinin algılandığını da tespit etmişlerdir. Bütün bunların ışığında ÇDKNT/TPU elyafının, yeni nesil gerilebilir tekstil bazlı gerilim sensörlerinin üretiminde yeni bir yol açabileceğini ileri sürmüşlerdir [100].

Liang ve ark. KNT'lere dayalı geliştirdikleri gerilim sensörlerinde hem yüksek hassasiyet (gauge faktörü (GF) = 13,5) hem de ultra gerilebilirliği (>550) başarılı bir şekilde birleştirmişlerdir. Elde edilen sensör sayesinde; hızlı yanıt hızı (<33 ms) ve eski haline geri gelme hızı (<60 ms) ile 8 Hz'lik mekanik sinyalin tespitini kolaylıkla gerçekleştirmişlerdir. Buna ek olarak, gradyan KNT gerilim sensörlerinin 12.000 döngülük dinamik testte olağanüstü dayanıklılık göstermenin yanı sıra mükemmel doğrusallık ve ultra düşük çalışma voltajı (10 mV) gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu özelliklerin ışığında elde ettikleri sensörün sağlık izleme, spor performansı izleme ve yumuşak tuşeli robotik uygulamalar için olağanüstü potansiyele sahip olduğu tespitinde bulunmuşlardır [101].

Nankali ve ark. yaptıkları çalışmada KNT-PDMS nanokompozit filmlere dayanan oldukça gerilebilir ve hassas gerilim sensörleri tasarlamışlar ve bu sensörlerin çevresel parametrelerin (sıcaklık ve bağıl nemdeki değişiklikler) gerilim algılama özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Tasarladıkları gerilim sensörleri maksimum 10 civarında gauge faktöre, %60'a kadar gerilebilirlik, yüksek dayanıklılık ve düşük histerezis ile 204 ms'lik tepki süresine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Gerilim sensörlerinin kontrollü sıcaklık ve bağıl nem seviyelerine uzun süreli maruz bırakılmasına ilişkin bu ayrıntılı çalışmada, bu parametrelerin gerilim davranışı, özellikle sıcaklık dalgalanmaları üzerindeki önemli etkisini ortaya koymaktadır. Tasarlanan bu gerilim sensörü havayla şişirilmiş bir balonun deformasyon durumu ve sağlık durumunun izlenmesi amacıyla insan vücudunun hareketlerini izlemek için gerilim sensörleri olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [88].

Joo ve ark. yaptıkları çalışmada Karbon nanotüpleri (KNT'ler) kullanarak esnek gerilim sensörleri üretmeye yönelik birçok çalışmada, KNT'leri dağıtmak için ve KNT çözeltisi yapmak için kullanılan spesifik çözücülerle ilgili bilgi eksikliği olduğundan yola çıkarak KNT çözeltilerinin çeşitli çözücülerle dağılma stabilitesi ve her bir KNT çözeltisinden yapılan KNT tabakalarının özelliklerini niceliksel olarak karşılaştırdıkları bir çalışma yapmışlardır ve uygun çözücü olarak akrilik kalıba uygun olan ve dispersiyon stabilitesi yüksek olan çözücüyü seçmişlerdir. Esnek KNT gerilim sensörünü, KNT'lerin esnek bir alt tabakaya aktarmasıyla geliştirmişlerdir ve bu sensörün %150'ye kadar uzatılabildiği (doğrusallık $R=0,998$) ve gauge faktör 26,7 olduğunu tespit etmişlerdir [102].

Wang ve ark. yaptıkları çalışmada %10, %12.5 ve %15 oranında ÇDKNT/TPU ile elektrospining yöntemini kullanarak nanolif filmler elde etmişlerdir. Matris yapı olarak TPU kullanılırken iletken yapı olarak ÇDKNT kullanılmıştır. Bütün performans değerleri göz önüne alındığında %12.5 oranında ÇDKNT içeren ÇDKNT/TPU nanolif filminin insan hareketi ve basınç algılama için en iyi değerleri elde ettiği gözlemlenmiştir [103].

Şanlı ve ark. yaptıkları çalışmada ÇDKNT /TPU nanoliflerinin morfolojik ve elektromekanik özelliklerine elektrospining parametrelerinin etkisi incelenmiştir. ÇDKNT konsantrasyonlarının yanı sıra elektrospining parametrelerinin de ÇDKNT/TPU nanolif mebranlarının morfolojik, elektromekanik ve sensör özelliklerine etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Kollektör hızındaki yavaşlama ve kolektör mesafesinin uzaması durumunda ve daha yüksek elektrospining sürelerinde daha homojen olarak dağılmış lif yapılarının elde edildiğini ve bu durumun iletkenliğe ve gerilme hassasiyetine olumlu yönde etki ettiğini gözlemlemişlerdir [104].

Georgousis ve ark. yaptıkları çalışmada ağırlıkça %0,5 ila %8 arasında değişen oranda eriyik karıştırma metoduyla hazırlanan iletken Polivinilidenflorür (PVDF)/ÇDKNT nanokompozitleri çekme işlemine tabii tutarak boyuna gerilim ve boyuna elektrik direnciyle beraber izlemiş ve nanokompozitlerin elektriksel direnç değişimini ($\Delta R/R_0$) ölçmüşlerdir. Çalışmalarında yalıtkan PVDF matrisinde dağılmış ÇDKNT'lerin her numunenin deformasyon seviyesi, direnç değişiklikleri tarafından yansıtıldığı için polimer/karbon nanotüp nanokompozitlerindeki gerilim seviyelerini izlemek için hassas bir yapı olarak kullanılma potansiyeline sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır [105].

Wang ve ark. yaptıkları çalışmada termoplastik poliüretan (TPU) lifli film ile daldırma kaplamalı ultrasonikasyonla işlenmiş karbon nanotüpler (KNT'ler) kullanarak yüksek hassasiyete sahip esnek bir gerilim sensörü üretmişlerdir. TPU/KNT gerilim sensörleri yüksek hassasiyet (maksimum gauge faktör 1571), olağanüstü çekme kuvveti ve sağlamlık (gerilim > 24 MPa, gerilim > %400), mükemmel dayanıklılık (%10 gerilimde 10.000 döngü) ve geniş çapta uygulanabilir germe aralığı (%0-400) özellikleriyle geniş kapsamlı bir performans sergilemektedirler [106].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Materyal

2.1.1 Kullanılan kimyasallar ve maddeler

Bu tez çalışmasında, %92'den fazla saflığa, 8-15 nm dış çapa sahip –COOH Fonksiyonlu ÇDKNT'ler Nanografi Nano Techonology (İstanbul,Türkiye)'den satın alınmıştır. Termoplastik poliüretan (TPU) (Ellastolan 1185A10) ise Biesterfeld GmbH (İstanbul,Türkiye)'den granül halinde, N,N-Dimethylformamide (DMF) ve Tetrahydrofuran (THF) Progen Kimya (İstanbul,Türkiye)'den, Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ise Merck (Almanya)'dan temin edilmiştir.

2.1.2 Kullanılan cihazlar

Bu tez çalışmasında TPU granüllerini, SDS ve ÇDKNT tozlarını ölçebilmek için hassas terazi, TPU granüllerini çözelti haline getirebilmek için ısıtıcılı manyetik karıştırıcı, TPU granüllerinin üzerindeki nemi uzaklaştırabilmek için etüv, ÇDKNT/SDS ve

TPU/ÇDKNT/SDS çözeltilerini homojen bir şekilde oluşturabilmek için sonikatör, nanokompozit yüzeyler elde edebilmek için elektroegirme cihazı, elde edilen nanokompozitlerin uzama ölçümlerini yapabilmek için de Instron ve direnç ölçümlerini yapabilmek için de Keithley cihazları (Şekil 2.1) kullanılmıştır.



Şekil 2.1 Hassas Terazî

-COOH fonksiyonlu ÇDKNT'lerin, TPU ve SDS'lerin tartımında kullanılmıştır. Kullanılan hassas terazî, okunabilirliği 1 g ile 0,1 mg arasında doğru ve sağlam tartım cihazıdır. Ağırlıktaki küçük farkların ciddi ölçüde etkilere sebep olabilmesi nedeniyle tartımlar rüzgarlıklı hassas terazide yapılmıştır.

Isıtıcılı manyetik karıştırıcı (Şekil 2.2), homojen bir çözelti elde etmek için kullanılır. Yapılan bu çalışmada TPU granüllerini DMF ve THF içerisinde homojen biçimde çözmek için kullanılmıştır. Kullanılan ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda bir balık



yardımıyla 500 rpm dönme hızı ve 60 °C’de TPU çözeltisi hazırlanmıştır.

Şekil 2.2 Isıtıcılı manyetik karıştırıcı

Etüv; değişik hacimlerde, sıcaklığın dijital veya analog ayarlanabildiği, iki kat saç katmandan oluşan laboratuvar fırınıdır. Çalışmamızda TPU granülleri, kullanımından önce üzerindeki üzerindeki nemi uzaklaştırmak için 60°C sıcaklıkta ki vakumlu etüvde



1 saat kurutulmuştur. Şekil 2.3’te etüv görülmektedir.

Şekil 2.3 Etüv

Çalışmamızda ilk olarak ÇDKNT ve SDS’nin daha sonra da TPU çözeltisi ile ÇDKNT/SDS karışımı ile birleştirilmesi için Bandelin marka sonikatör kullanılmıştır (Şekil 2.4). Sonikatör sayesinde ultasonik ses dalgalarıyla hem ÇDKNT/SDS karışımı hem de TPU/ÇDKNT/SDS çözeltilerinde homojenlik elde edilebilmiştir. Sonikasyon



işlemi 30W ve toplamda 2 saat uygulanmıştır.

Şekil 2.4 Sonikatör

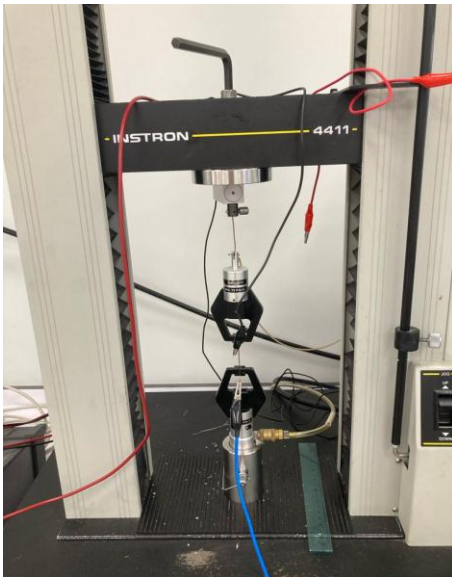
Nanokompozit tekstil yüzeylerini hazırlamak için Inovenso Nanospinner 24-XP elektrosspinning cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.5). Yüksek ölçekli voltaj kaynağı bağlantılarından biri çözeltinin doldurulduğu besleme ünitesi (şırınga) diğer ucu topraklama görevi yapan toplayıcı yüzeye bağlanarak çapları birkaç mikrondan başlayıp 100 nm'nin altına kadar değişen aralıktaki nanoliflerden meydana gelen polimer esaslı



yüzeyler elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Şekil 2.5 Elektroeğirme Cihazı

Yapılan çalışmada nanokompozitlerin uzama değerlerini ölçmek için Instron 4411 mukavemet test cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.6). Uzama testi, bir numunenin belli bir zaman aralığında tek ekseninde çekme kuvvetlerine maruz bırakılarak ölçüldüğü temel bir

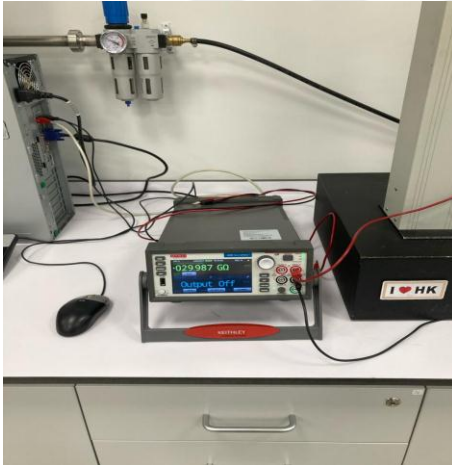


testdir.

Şekil 2.6 Instron Cihazı

Elde edilen nanokompozit malzemenin uzamaya bağlı direnç ölçümleri için 3 cm x 1 cm boyutunda kesilen nanokompozit yüzeyler Instron 4411 mukavemet cihazının çenelerine tutturularak test edilmiş ve elde edilen değerler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir.

Elde edilen nanokompozit yapıların elektriksel özelliklerini ölçebilmek için Keithley 2450 Sourcemeter cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.7). Instron 4411 mukavemet cihazının çenelerini tutturulmuş 3 cm x 1 cm boyutundaki nanokompozit yüzeylere Keithley 2450 Sourcemeter cihazına bağlı olan probler numuneye üstten ve alttan tutturularak gerilim altındaki dirençleri ölçülmüştür ve elde edilen değerler bilgisayar ortamında



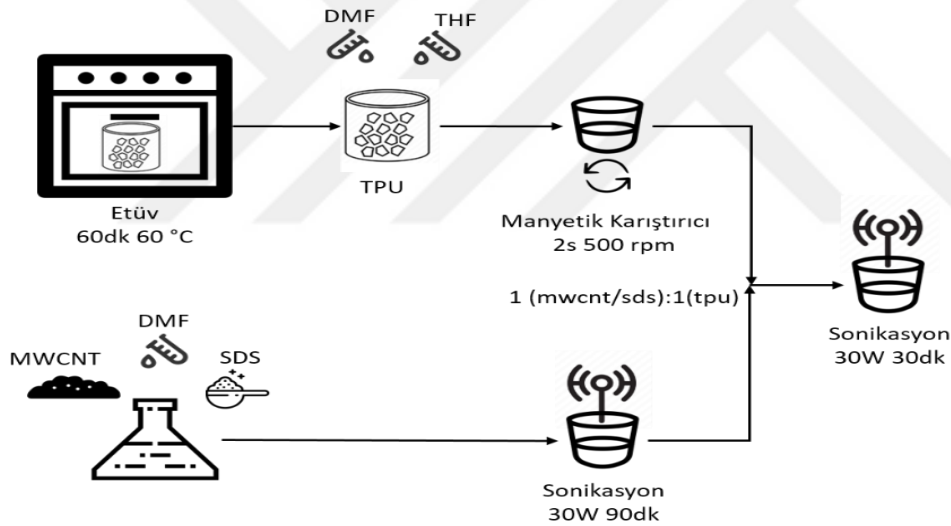
kaydedilmiştir.

Şekil 2.7 Keithley

2.2 Yöntem

Şekil 2.8’de şematize edilen numune hazırlama aşamasında ilk olarak, TPU granüllerinin üzerindeki nemi uçurmak için 1 saat 60°C’de etüvde kurutulmuştur. Ardından ağırlıkça %10’luk konsantrasyonuna sahip TPU çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti hazırlanırken 1 g ağırlığa sahip TPU granülleri, 10 ml DMF:THF çözücülerinde çözündürülmüştür. Bu çözelti hazırlanırken DMF/THF’in kütle oranı 2:3 olarak belirlenmiştir. Karışım oda sıcaklığında 2 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak

homojen hale getirilmiştir. İkinci olarak 30 ml DMF içerisine ağırlıkça %0.3, %0.5 ve %0.7 ÇDKNT ve ÇDKNT'lerin ağırlıkça (ÇDKNT:SDS) 1/0, 1/20, 1/23, 1/26 oranında SDS eklenerek çözelti oluşturulmuştur. Bu çözelti 90 dk boyunca sonike edilerek ÇDKNT ve SDS'ler çözelti içerisinde homojenize edilmiştir. Bu değerler dışında farklı ÇDKNT konsantrasyonları (0,1 ve 0,2) ve SDS katkıları (ÇDKNT:SDS) 1/14 ve 1/17 denenmiş ancak bu çözeltilerin iletkenlikleri gerilim sensörü olabilecek nanokompozit yapıların üretimi için yeterli değerlerde ölçülmemiştir. Bu nedenle çalışmalar optimize edilerek yukarıda belirtilen içerikler üretilmiştir. Elde edilen bu iki çözelti 1/1 oranında karıştırılarak 30 dk süreyle sonike edilerek stabil bir karışım elde edilmiştir. Ardından bu çözeltilerden 10 ml şırıngaya çekilerek elektrospinning yöntemi ile nanokompozit üretilmiştir. Nanokompozit üretiminde elektrospinning yöntemindeki uygulanan voltaj 32 kV, besleme hızı 1,6 mL/h, ortam sıcaklığı $21 \pm 2^\circ\text{C}$, toplayıcı dönme hızı 280 rpm olarak ayarlanmıştır.



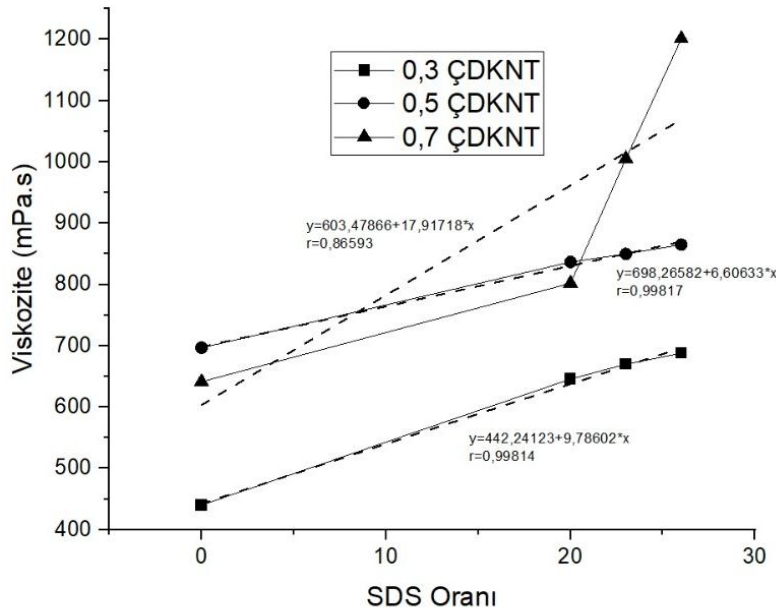
Şekil 2.8 ÇDKNT/TPU Çözeltisinin Hazırlanması

Çözelti hazırlama aşamasında ÇDKNT/SDS karışımının ve TPU/ÇDKNT/SDS karışımının viskoziteleri Lamy Rheology RM 100 Plus Viscometer kullanılarak ölçülmüştür. Viskozite ölçümü 400 rpm devirde R5 spindle türü kullanılarak yapılmıştır. Her iki çözeltinin de kesme hızına göre viskozite değerleri mPa.s cinsinden belirtilmiştir. Her bir ölçüm için üç tekrarlı test gerçekleştirilmiştir.

ÇDKNT/SDS karışımının viskozite ölçümleri Tablo 2.1'de özetlenmektedir. Yapılan ölçümlere göre Şekil 2.9'da görüldüğü gibi aynı ÇDKNT konsantrasyonlarında SDS oranı arttıkça viskozitenin arttığı görülmüştür.

Tablo 2.1 ÇDKNT Çözeltisi Viskozite Ölçümleri

Numune İçerik	ÇDKNT Viskozite (mPa.S)	Numune İçerik	ÇDKNT Viskozite (mPa.S)	Numune İçerik	ÇDKNT Viskozite (mPa.S)
0,3 ÇDKNT: SDS (1:0)	440,1	0,5 ÇDKNT: SDS (1:0)	696,8	0,7 ÇDKNT: SDS (1:0)	641,5
0,3 ÇDKNT: SDS (1:20)	645,8	0,5 ÇDKNT: SDS (1:20)	836,8	0,7 ÇDKNT: SDS (1:20)	802,2
0,3 ÇDKNT: SDS (1:23)	670,2	0,5 ÇDKNT: SDS (1:23)	850,1	0,7 ÇDKNT: SDS (1:23)	1005,3
0,3 ÇDKNT: SDS (1:26)	688,1	0,5 ÇDKNT: SDS (1:26)	865,2	0,7 ÇDKNT: SDS (1:26)	1201,2

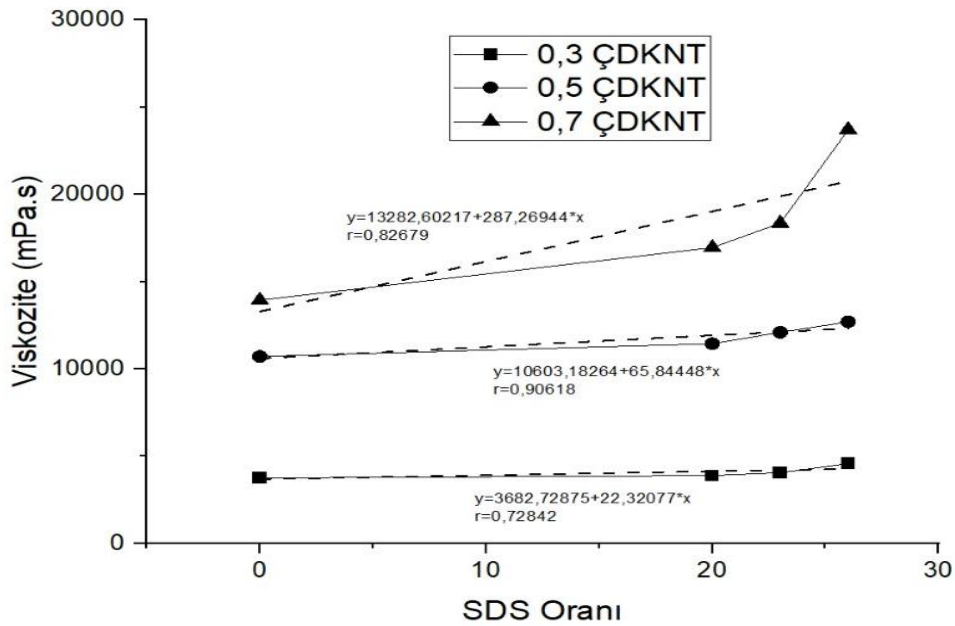


Şekil 2.9 Farklı ÇDKNT oranları değişik SDS katkılarıyla elde edilen çözeltilerin Viskozite Değerleri

TPU/ÇDKNT/SDS karışımının viskozite ölçümleri Tablo 2.2’de özetlenmektedir. Yapılan ölçümlere göre Şekil 2.10’da görüldüğü gibi SDS oranı arttıkça KNT TPU polimer matrisi içinde daha homojen dağılarak viskoziteyi de arttırmıştır. Aynı zamanda TPU polimer matrisi içerisinde KNT miktarının artması da viskozitenin artmasına sebep olmuştur.

Tablo 2.2 TPU/ÇDKNT Viskozite Ölçüm Değerleri

Numune İçerik	TPU/ÇDKNT Viskozite (mPa.S)	Numune İçerik	TPU/ÇDKNT Viskozite (mPa.S)	Numune İçerik	TPU/ÇDKNT Viskozite (mPa.S)
0,3 ÇDKNT: SDS (1:0)	3755	0,5 ÇDKNT: SDS (1:0)	10716	0,7 ÇDKNT: SDS (1:0)	13939
0,3 ÇDKNT: SDS (1:20)	3889	0,5 ÇDKNT: SDS (1:20)	11440	0,7 ÇDKNT: SDS (1:20)	16952
0,3 ÇDKNT: SDS (1:23)	4050	0,5 ÇDKNT: SDS (1:23)	12100	0,7 ÇDKNT: SDS (1:23)	18353
0,3 ÇDKNT: SDS (1:26)	4577	0,5 ÇDKNT: SDS (1:26)	12700	0,7 ÇDKNT: SDS (1:26)	23708



Şekil 2.10 Farklı ÇDKNT oranları değişik SDS katkılarıyla elde edilen çözeltilerin Viskozite Değerleri

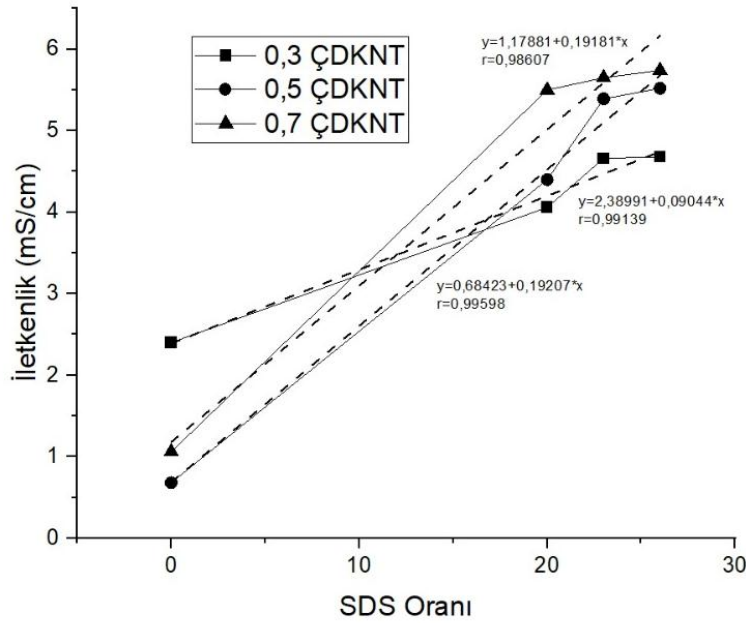
Çözelti hazırlama aşamasında ÇDKNT/SDS karışımının ve TPU/ÇDKNT/SDS karışımının iletkenlikleri WTW Profiline Cond 3110 İletkenlik ölçer cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Çözeltilerin iletkenlik değerleri ms/cm cinsinden belirtilmiştir. Her bir ölçüm için iki tekrarlı test gerçekleştirilmiştir.

ÇDKNT/SDS karışımının iletkenlik ölçümleri Tablo 2.3'te özetlenmektedir. Yapılan ölçümlere göre Şekil 2.11'de görüldüğü gibi SDS kullanılan çözeltilerde, KNT oranının artmasıyla beraber iletkenlik değeri artmasına karşın [107] SDS kullanılmayan çözeltilerde KNT'nin yeterli homojen dağılımının sağlanamamasından dolayı iletkenlik değerlerinde artış trendi gözlenmemiştir.

Tablo 2.3 ÇDKNT İletkenlik Değerleri

Numune İçerik	ÇDKNT iletkenlik mS/cm	Numune İçerik	ÇDKNT iletkenlik mS/cm	Numune İçerik	ÇDKNT iletkenlik mS/cm
0,3 ÇDKNT: SDS (1:0)	2,40	0,5 ÇDKNT: SDS (1:0)	0,68	0,7 ÇDKNT: SDS (1:0)	1,06

0,3 ÇDKNT: SDS (1:20)	4,06	0,5 ÇDKNT: SDS (1:20)	4,40	0,7 ÇDKNT: SDS (1:20)	5,50
0,3 ÇDKNT: SDS (1:23)	4,66	0,5 ÇDKNT: SDS (1:23)	5,39	0,7 ÇDKNT: SDS (1:23)	5,65
0,3 ÇDKNT: SDS (1:26)	4,78	0,5 ÇDKNT: SDS (1:26)	5,52	0,7 ÇDKNT: SDS (1:26)	5,74



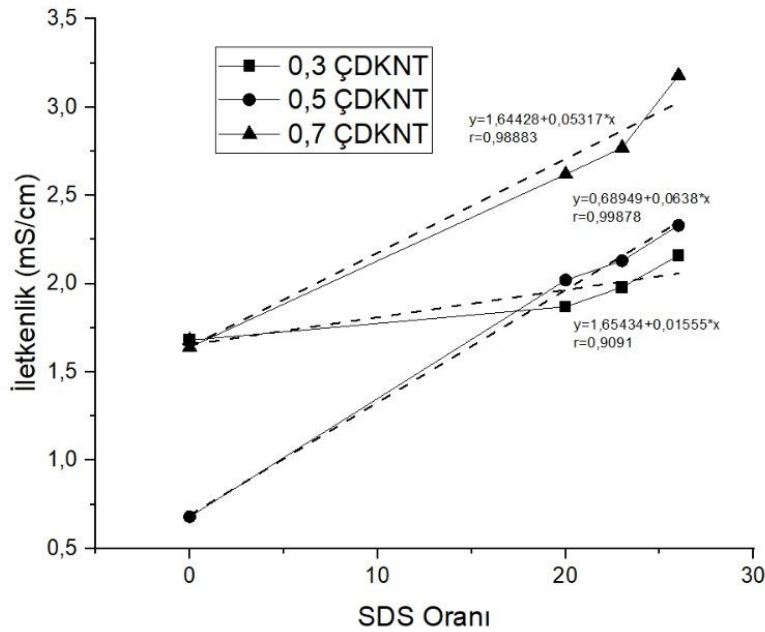
Şekil 2.11 Farklı ÇDKNT oranları değişik SDS katkılarıyla elde edilen çözeltilerin İletkenlik Değerleri

TPU/ÇDKNT/SDS karışımının iletkenlik ölçümleri Tablo 2.4'te özetlenmektedir. Yapılan ölçümlere göre Şekil 2.12'de görüldüğü gibi SDS kullanılmayan çözeltilerde belirgin KNT topaklanmaları gözlemlenmiştir. SDS kullanımı homojen dağılım sağlayarak nanokompozit yüzeylerin yüzey morfolojisinde topaklanmaya olanak vermemiştir. Bu sonuçlarda elde edilen iletkenlik değerleri ile uyumludur.

Tablo 2.4 TPU/ÇDKNT İletkenlik Değerleri

Numune İçerik	TPU/ÇDKNT iletkenlik mS/cm	Numune İçerik	TPU/ÇDKNT iletkenlik mS/cm	Numune İçerik	TPU/ÇDKNT iletkenlik mS/cm
0,3 ÇDKNT: SDS (1:0)	1,68	0,5 ÇDKNT: SDS (1:0)	0,68	0,7 ÇDKNT: SDS (1:0)	1,64

0,3 ÇDKNT: SDS (1:20)	1,87	0,5 ÇDKNT: SDS (1:20)	2,02	0,7 ÇDKNT: SDS (1:20)	2,62
0,3 ÇDKNT: SDS (1:23)	1,98	0,5 ÇDKNT: SDS (1:23)	2,13	0,7 ÇDKNT: SDS (1:23)	2,77
0,3 ÇDKNT: SDS (1:26)	2,16	0,5 ÇDKNT: SDS (1:26)	2,33	0,7 ÇDKNT: SDS (1:26)	3,18

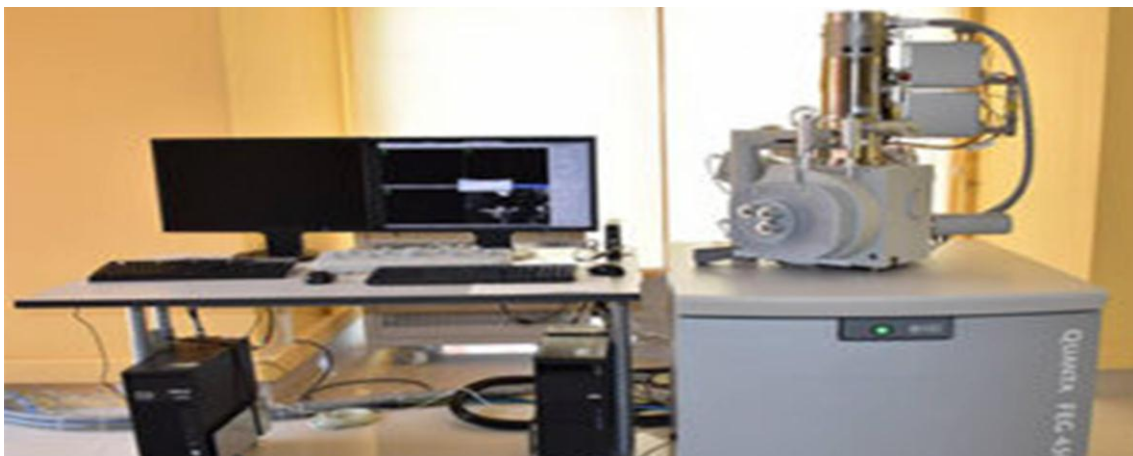


Şekil 2.12 Farklı ÇDKNT oranları değişik SDS katkılarıyla elde edilen çözeltilerin İletkenlik Değerleri

2.3 Karakterizasyon Teknikleri

Bu tez çalışmasında elde edilen nanokompozitlerin morfolojik incelemesini yapabilmek için SEM cihazı, ÇDKNT / SDS ve TPU/ÇDKNT/SDS çözeltilerinin viskozitelerini ölçmek için Viskozimetre cihazı ve ÇDKNT / SDS ve TPU/ÇDKNT/SDS çözeltilerinin İletkenliklerini ölçmek için İletkenlik ölçer cihazı kullanılmıştır.

Elde edilen nanokompozit yapıları FEI QUANTA 450 FEG ESEM SEM cihazıyla



analizleri yapılmıştır (Şekil 2.13).

Şekil 2.13 SEM Cihazı

SEM analizi, çeşitli malzemelerin yüksek çözünürlük performansı ile yüzeylerin görüntülenmesi, parçacıkların morfolojik yapısı, parçacık boyutları ve elementsel analizlerin belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. SEM cihazıyla elde edilen Nanokompozit yüzeylerin x 20000 görüntüleri çekilmiş ve yüzeydeki yapının dağılımı, boncuklanması ve lif çapları değerlendirilmiştir.

TPU, SDS, ÇDKNT ve farklı TPU/ÇDKNT/SDS nanakompozit yapıları JASCO FT/IR-6600 cihazıyla FTIR analizleri yapılmıştır (Şekil 2.14).

FTIR analizi, ayrı ayrı moleküllerin ve karışımların yapısını anlamak için kullanılan bir yapısal analiz metodudur.



Şekil 2.14 FTIR Cihazı

Elde edilen ÇDKNT/SDS ve TPU/ÇDKNT/SDS çözeltilerinin viskoziteleri Lamy Rheology RM 100 Plus Viscometer cihazıyla ölçülmüştür (Şekil 2.15). Farklı yoğunluktaki sıvıların akışkanlığını ölçmek için kullanılan viskozimetreler, sıvının akışa karşı direnci, aynı zamanda sıvının içindeki katı cismin hareketine gösterdiği direnci de



ölçmektedirler.

Şekil 2.15 Viskozimetre Cihazı

Hazırlanan ÇDKNT/SDS ve TPU/ÇKDKNT/SDS çözeltilerinin iletkenlikleri, kullanılan elektrotlar aracılığıyla ölçü aletinin bir tarafında indüklenen elektrik enerjisinin, karşı elektrotlara geçme mertebesi prensibiyle çalışan WTW Profiline Cond 3110 İletkenlik ölçer cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 İletkenlik Cihazı

Nanokompozit yapıların direnç değişimleri Keithley 2450 Sourcemeter cihazı ve Instron 4411 cihazıyla ölçülmüştür. Ölçümler için 3 cm x 1 cm boyutunda nanokompozit yüzeyler kesilerek Instron cihazında teste tabii tutulmuştur. Bu ölçüm esnasında Keithley direnç ölçüm cihaz probaları numuneye üstten ve alttan tutturularak gerilim altındaki direnç değişimleri 30 dk'lık süre boyunca ölçülmüştür. Ayrıca yine bu nanokompozit yüzeylerin sensör davranışlarının sürdürülebilirliği açısından aynı test koşullarında 100 tekrarlı olarak direnç değişimleri ölçülmüştür.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

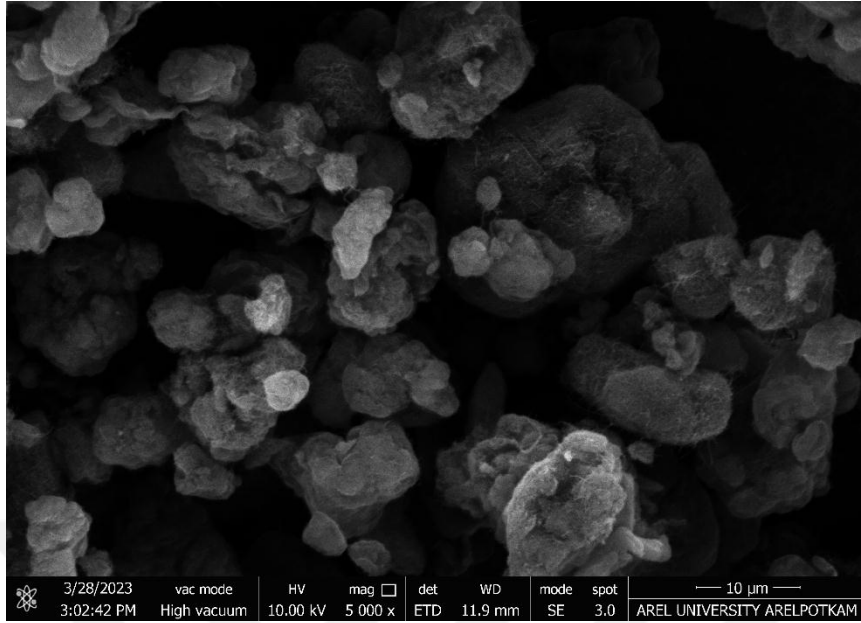
Farklı konsantrasyonlardaki ÇDKNT ve farklı oranda kullanılan SDS'lerden elde edilen nanokompozit yapılara ait mikroskopik testler, elektromekanik analizlerin sonuçları gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

3.1 Morfolojik İnceleme

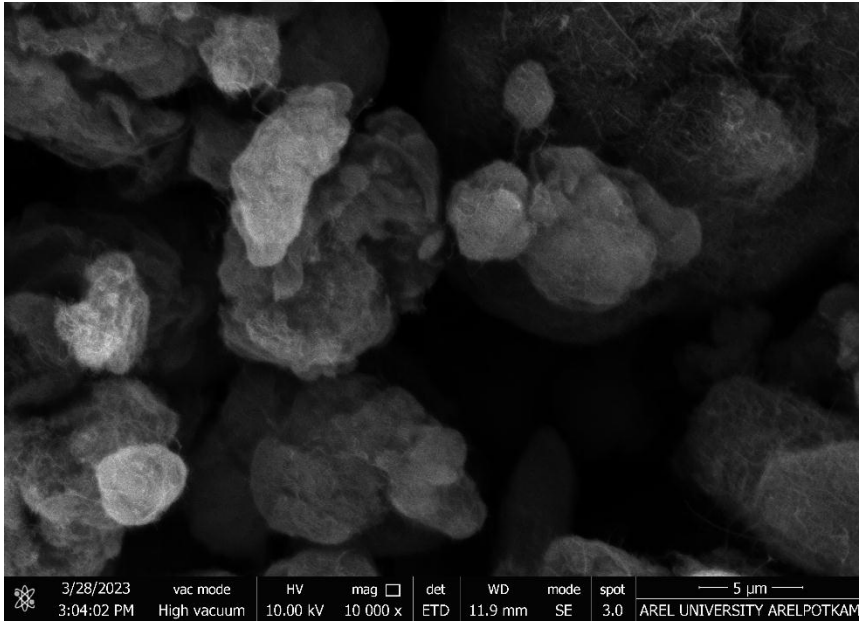
Bu tez çalışmasında kullanılan malzemelerin (ÇDKNT, SDS) ve elde edilen nanokompozit yapının (TPU/ÇDKNT/SDS) FTIR analizleri ayrıca ÇDKNT, TPU ve ÇDKNT/SDS/TPU nanokompozitlerin SEM analizleri yapılmıştır.

3.1.1 Sem Analizi

Bu tez çalışmasında elde edilen ÇDKNT, TPU ve farklı konsantrasyonlarda kullanılan ÇDKNT ve farklı oranlarda katkılanan SDS'den elde edilen 12 adet nanokompozitin 20.000 X SEM görüntüleri incelenerek yorumlanmıştır ayrıca aynı ölçekte SEM görüntüleri alınarak ImageJ yazılımı yardımıyla nanoliflerin çapı hesaplanarak ortalama lif çapları ve standart sapmaları hesaplanmıştır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de 5000 ve 10000 büyütülmüş ÇDKNT SEM görüntüleri incelenmiş ve bu yapıların homojen olmayan büyüklüklerde ovalimsi yapılar olduğu gözlemlenmiştir.

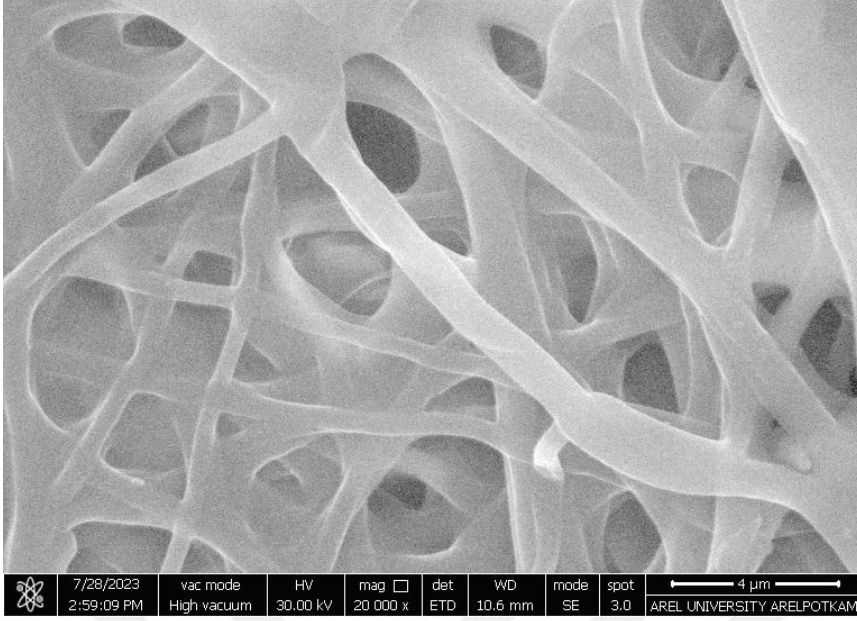


Şekil 3.1 ÇDKNT 5000X SEM Görüntüsü



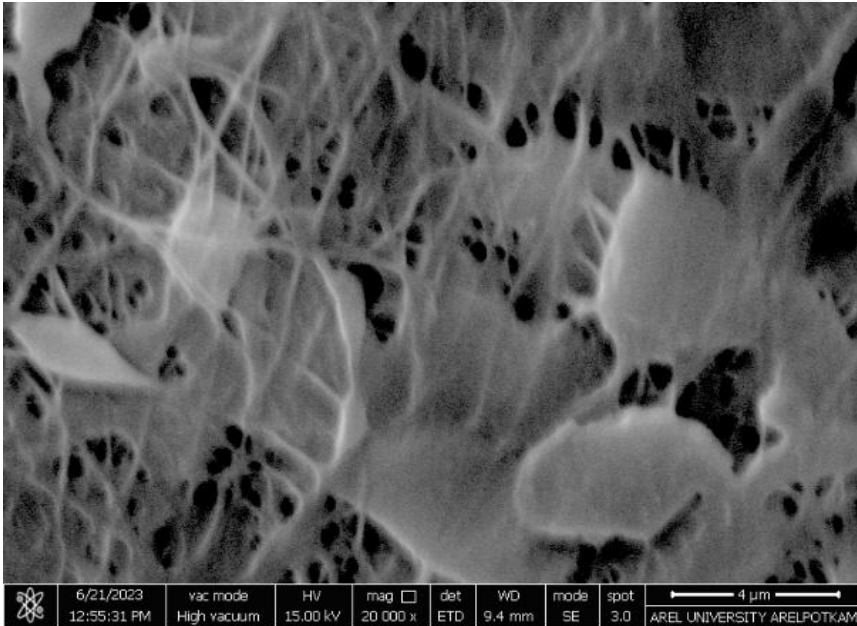
Şekil 3.2 ÇDKNT 10000X SEM Görüntüsü

Şekil 3.3'te 20000 büyütülmüş TPU SEM görüntüleri incelenmiş ve bu liflerin ortalama lif çapları 604 nm olarak ölçülmüştür.

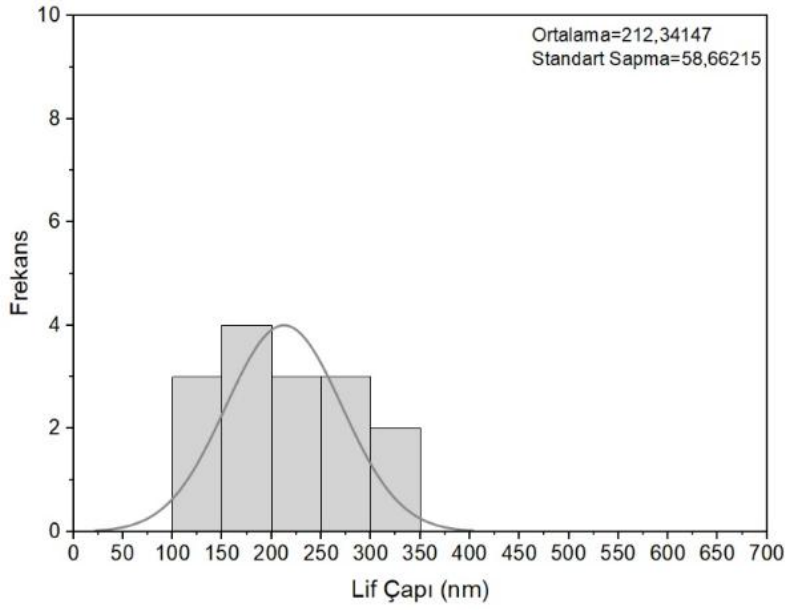


Şekil 3.3 TPU 20000X SEM Görüntüsü

Şekil 3.4'te ÇDKNT 0,3 SDS 0 üretilen nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 212,34 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



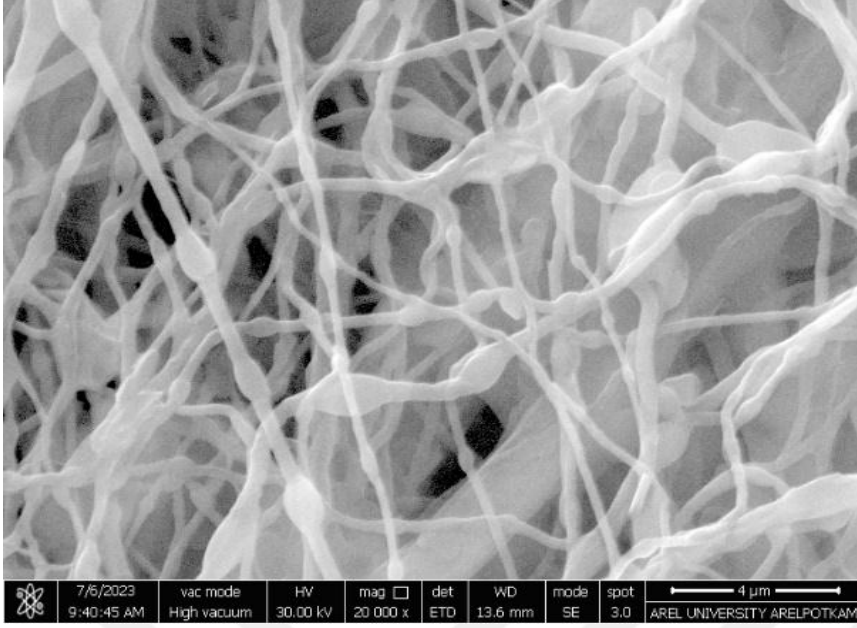
Şekil 3.4 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) SEM görüntüsü



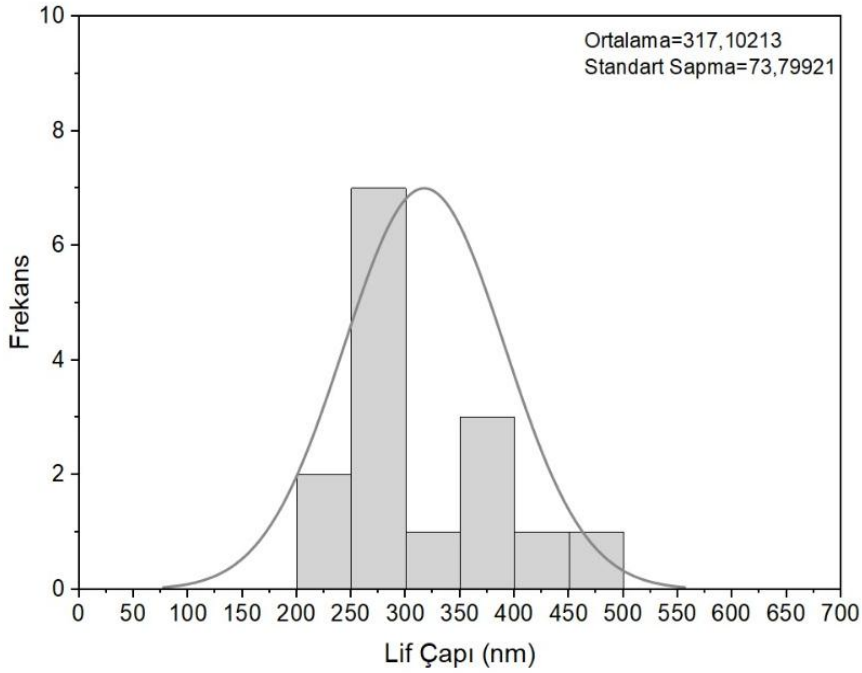
Şekil 3.5 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) Nanolif Çapı Dağılımı

Saf TPU'dan elde edilen nanolif yapılanmanın ÇDKNT kullanılan yapıya göre daha kalın olduğu bir başka deyişle ÇDKNT varlığının daha ince nanolif çaplarını oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu lif çaplarındaki azalma, polimer çözeltisindeki ÇDKNT'lerin varlığının elektriksel iletkenliğe neden olması ve buna bağlı olarak da şırınga ucundaki yüklenmenin artışıyla daha küçük nanolif yapılanmasına yol açmıştır [108]. Öte yandan sürfaktan (SDS) kullanılmadan üretilen nanokompozit yüzeylerde ÇDKNT'lerin yapılarının dağılmadan TPU liflerinin üzerinde aglomere halde olduğu gözlemlenmektedir.

Şekil 3.6'da 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) oranlarında üretilen nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 317,10 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) SEM görüntüsü

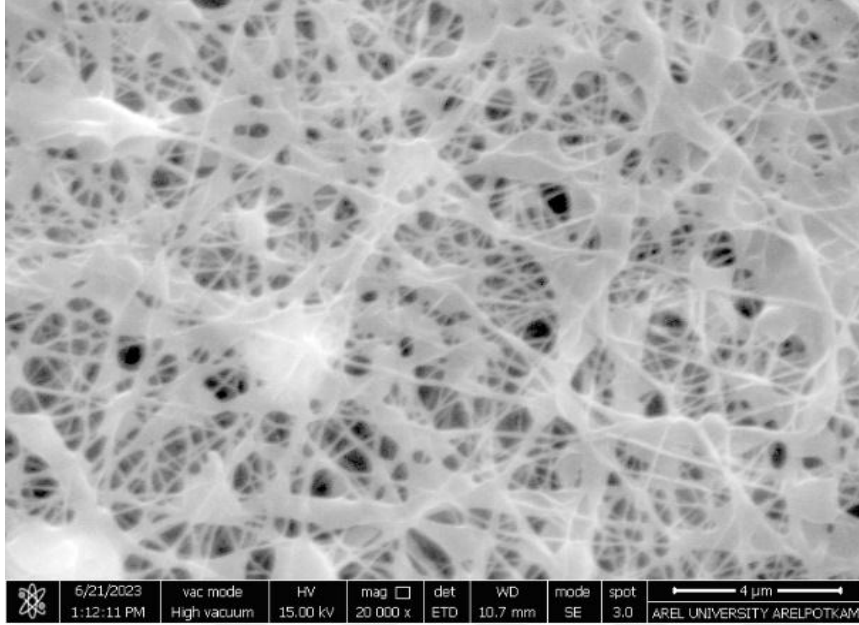


Şekil 3.7 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) Nanolif Çapı Dağılımı

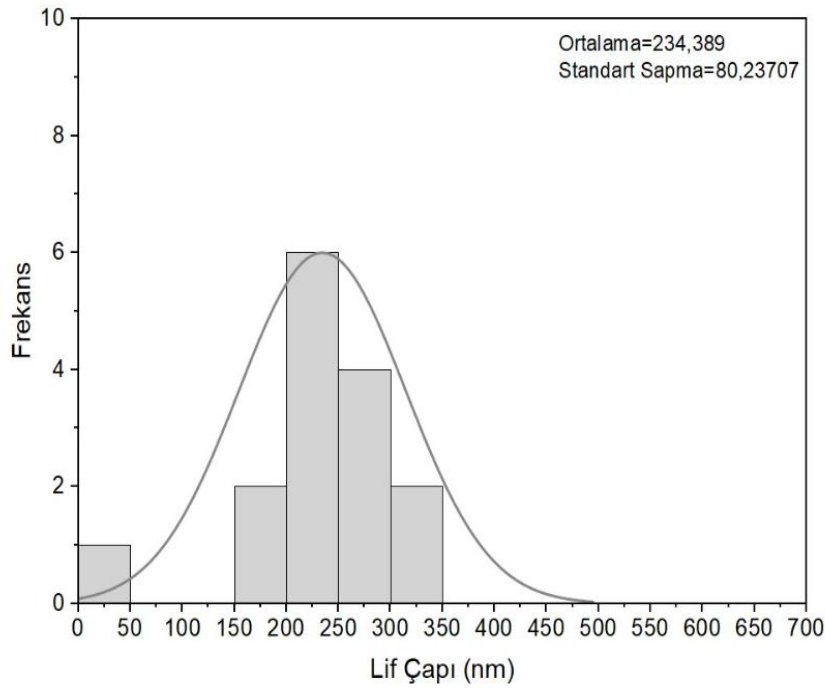
SDS kullanımıyla beraber ÇDKNT'lerin dağılarak yüzeyde daha küçük boncuklanma yaptığı ve aglomerasyonun (topaklanma) azaldığı görülmektedir. Aynı eğilim literatürde de rastlanmaktadır [108, 109].

Şekil 3.8'de 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) oranlarında üretilen

nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 234,38 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



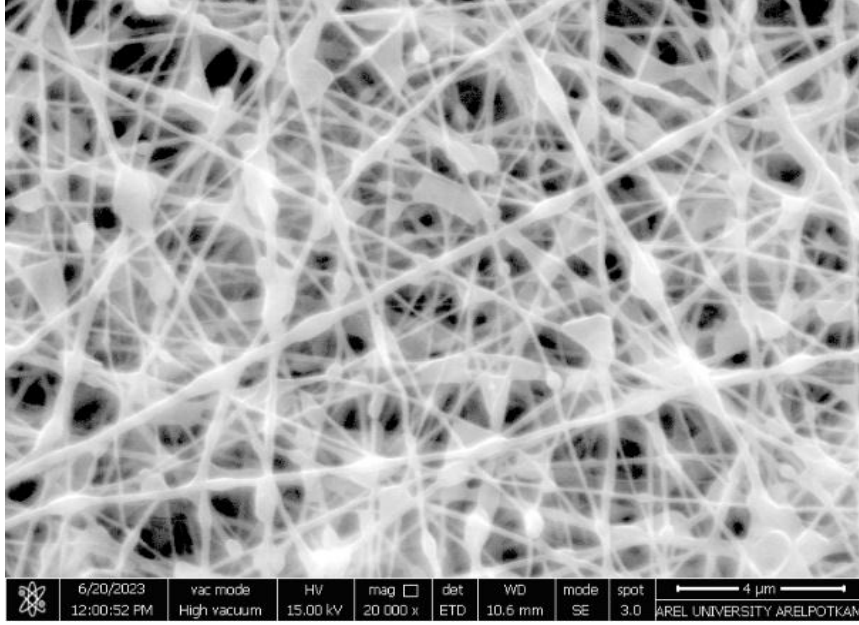
Şekil 3.8 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) SEM görüntüsü



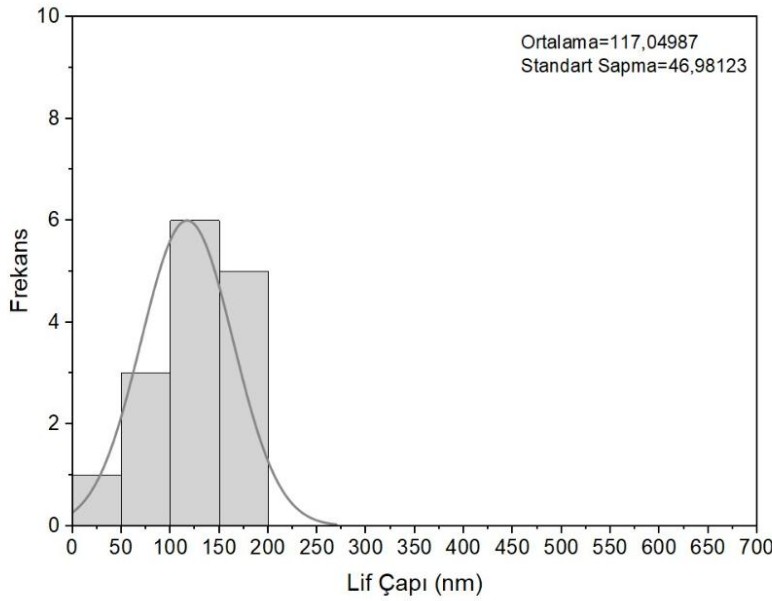
Şekil 3.9 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) Nanolif Çapı Dağılımı

SDS miktarının artması nanokompozitlerde ÇDKNT partiküllerinin yüzeye daha homojen bir şekilde yayılmasını sağlamış ve lif çaplarında bariz bir incelme gözlemlenmiştir.

Şekil 3.10'da 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) oranlarında üretilen nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 117,094 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



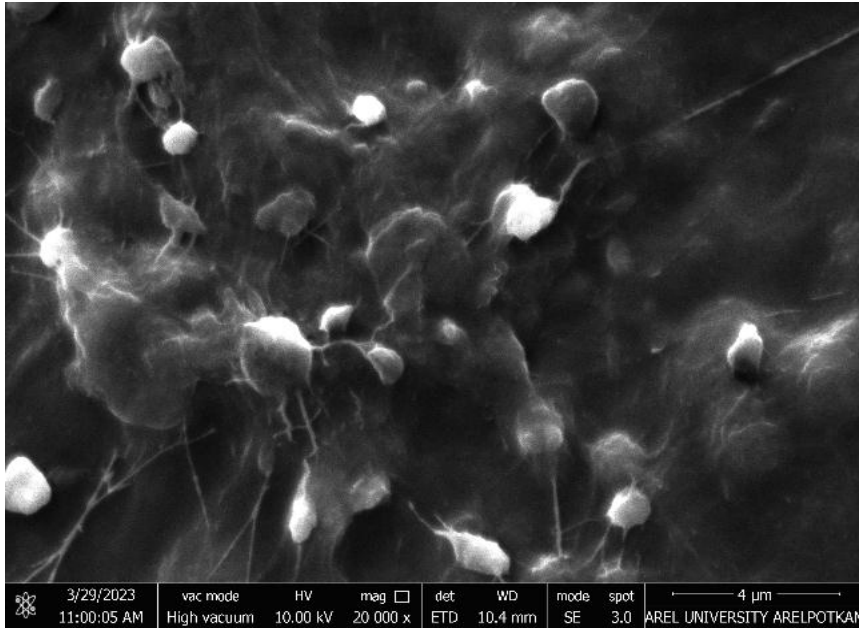
Şekil 3.10 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) SEM görüntüsü



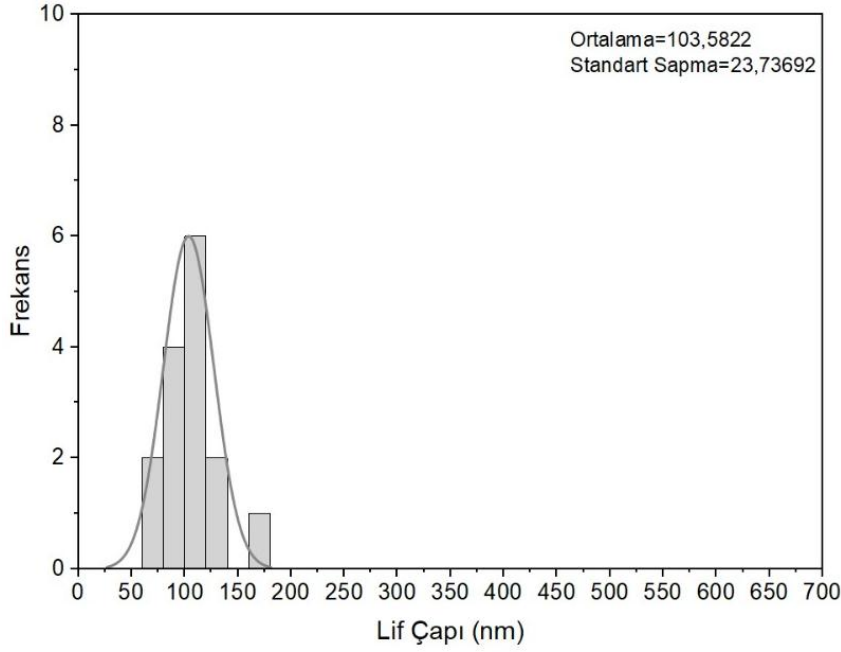
Şekil 3.11 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) Nanolif Çapı Dağılımı

SDS içeriğinin artmasıyla lif çaplarının daha da incelerek diğer numunelere (ÇDKNT:SDS 1:20, ÇDKNT:SDS 1:23) oranla daha gözenekli yapılar elde edilmiştir. Sürfaktan olarak kullanılan SDS'in varlığında ÇDKNT boncuklanma ve aglomerasyonun (topaklanma) az düzeyde olduğu ve homojen bir yapının elde edildiği görülmektedir.

Şekil 3.12'de 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) oranlarında üretilen nanokompozitin SEM görüntüsü görülmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 103,58 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



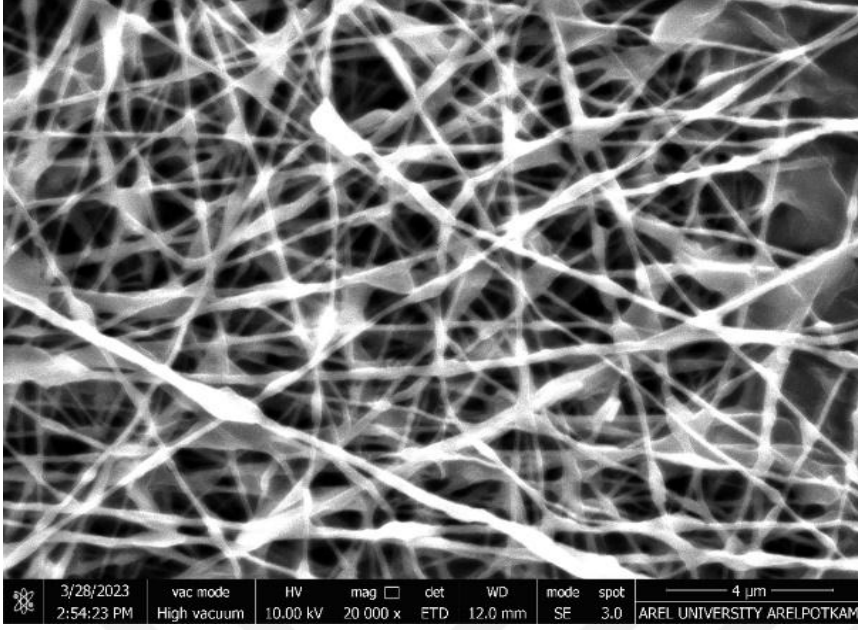
Şekil 3.12 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) SEM görüntüsü



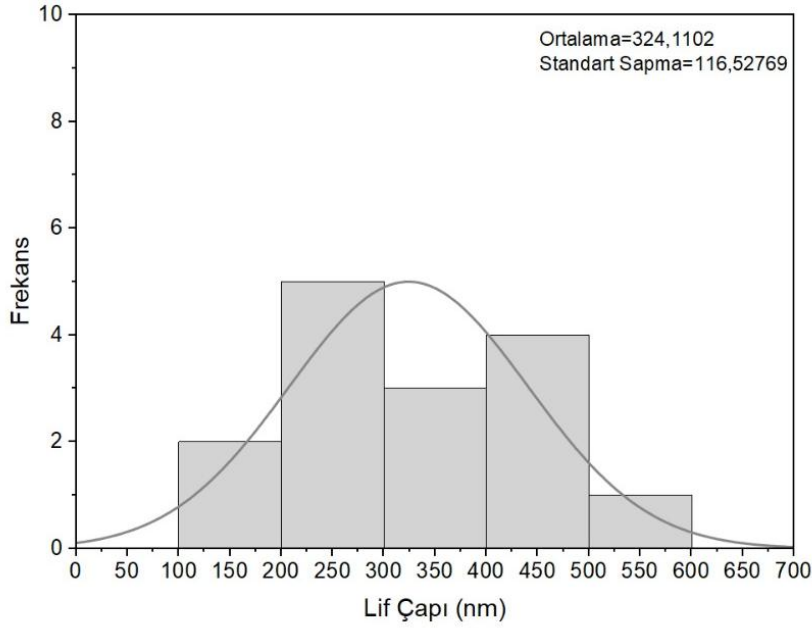
Şekil 3.13 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) Nanolif Çapı Dağılımı

Burada çözelti içerisindeki nanopartikül miktarının düşük düzeyde olması, polimerin elektroçekim esnasında daha iyi aktarıldığını ve böylece çap değerini olumlu etkilediği anlaşılmıştır.

Şekil 3.14'te 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) oranlarında üretilen nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 324,11 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) SEM görüntüsü

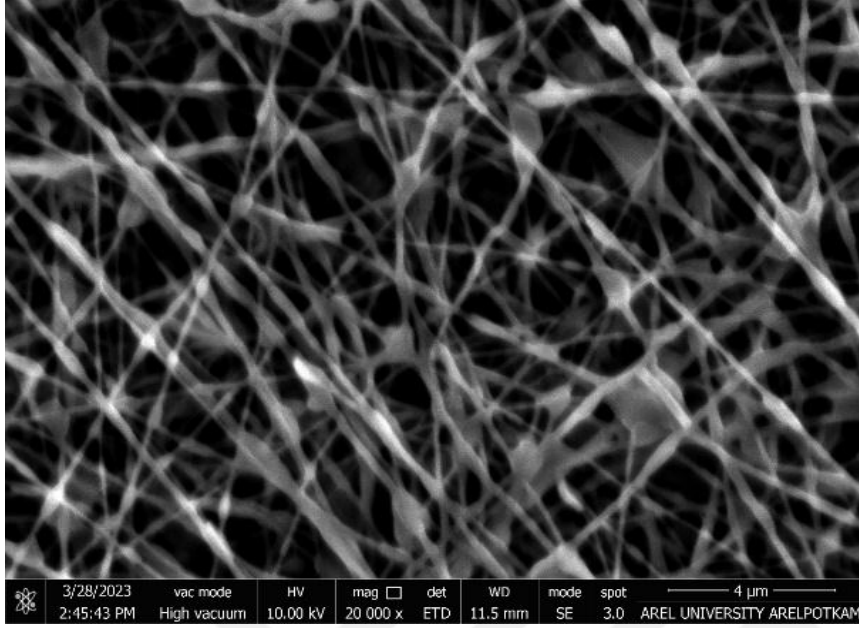


Şekil 3.15 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) Nanolif Çapı Dağılımı

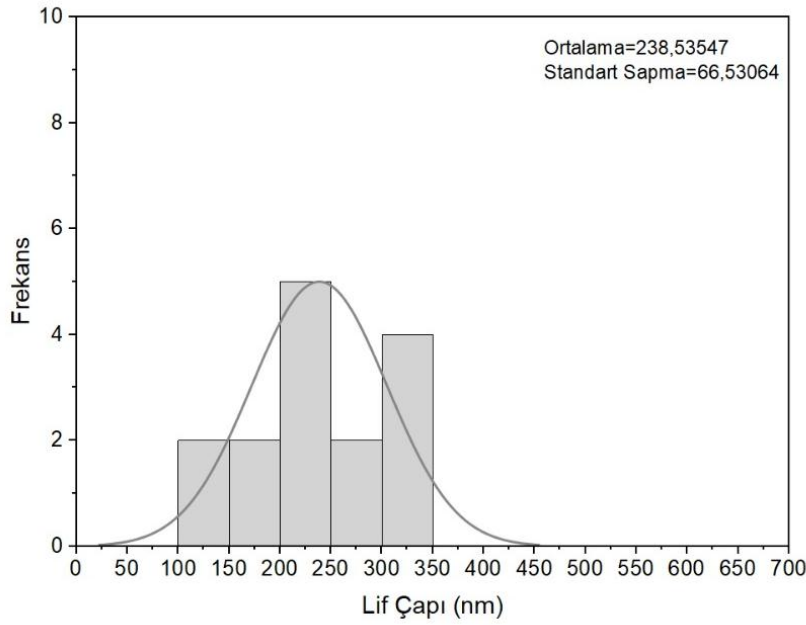
Ayrıca elde edilen yüzeylerde SDS varlığından dolayı boncuklanma ve aglomerasyonun (topaklanma) az miktarda olduğu görülmektedir [109]. Sürfaktan kullanımı artan ÇDKNT'nin lif çaplarını arttırmadaki etkisini tolere ederek homojen dağılıma sebep olmuş ve sensör özelliğinde iyileşme kaydedilmiştir.

Şekil 3.16'da 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) oranlarında üretilen

nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 238,53 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



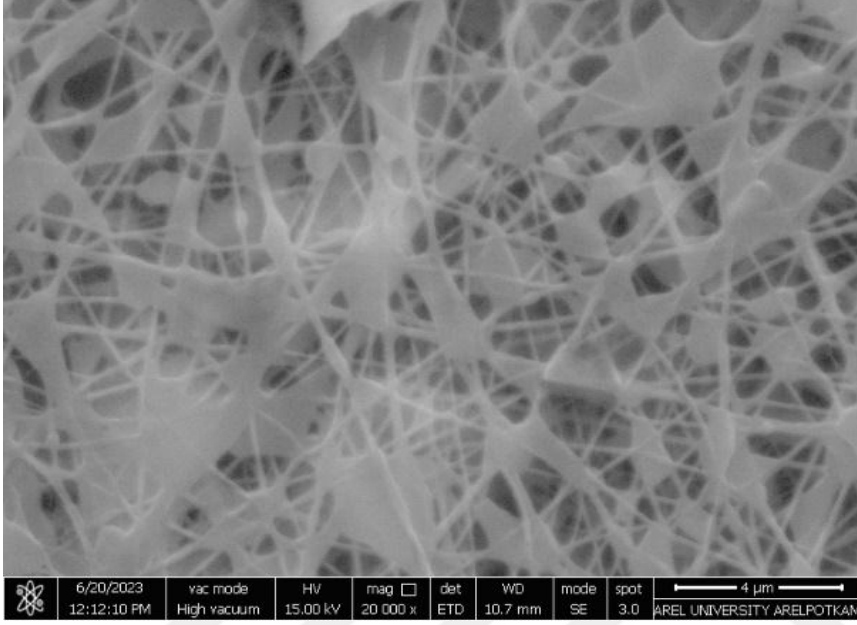
Şekil 3.16 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) SEM görüntüsü



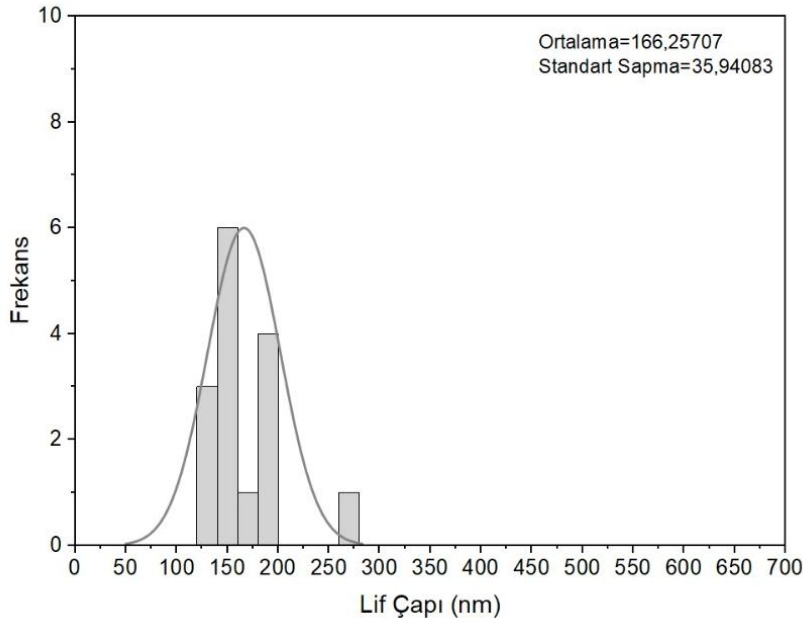
Şekil 3.17 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) Nanolif Çapı Dağılımı

Sürfaktan varlığıyla ÇDKNTlerin birbirinden ayrılması sağlanarak boncuklanma ve aglomerasyonun önüne geçilmiştir.

Şekil 3.18’de 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) oranlarında üretilen nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 166,257 nm’dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



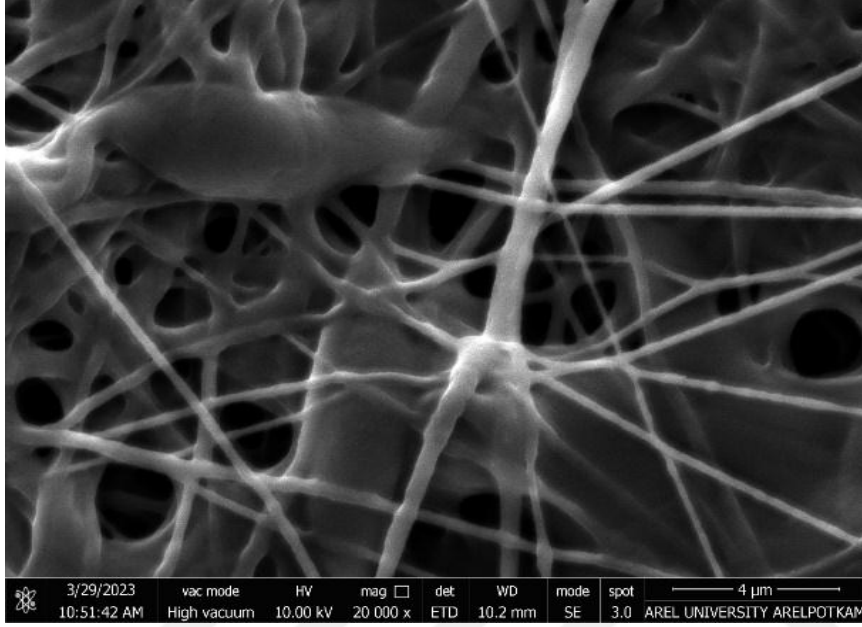
Şekil 3.18 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) SEM görüntüsü



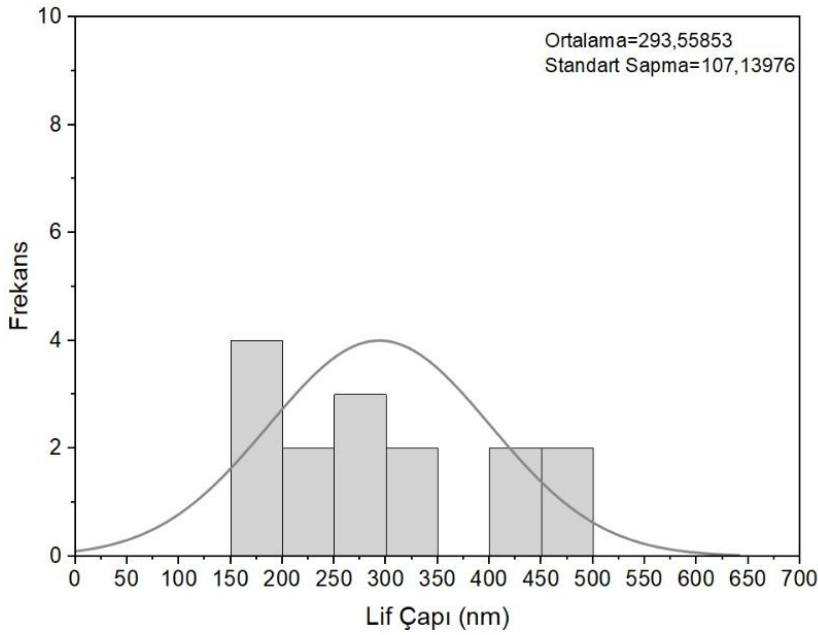
Şekil 3.19 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) Nanolif Çapı Dağılımı

Sülfaktan miktarının artmış olmasına rağmen artan viskoziteyi süspanse edemeyerek ÇDKNT topaklanmasının görüldüğü gözlemlenmiştir.

Şekil 3.20’de 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) üretilen nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalam lif çapı 284,125 nm’dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



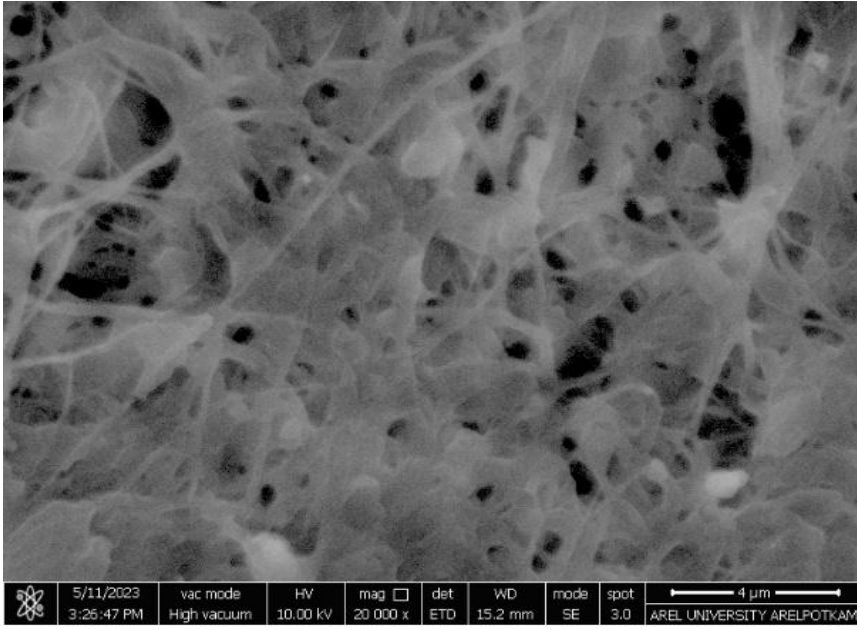
Şekil 3.20 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) SEM görüntüsü



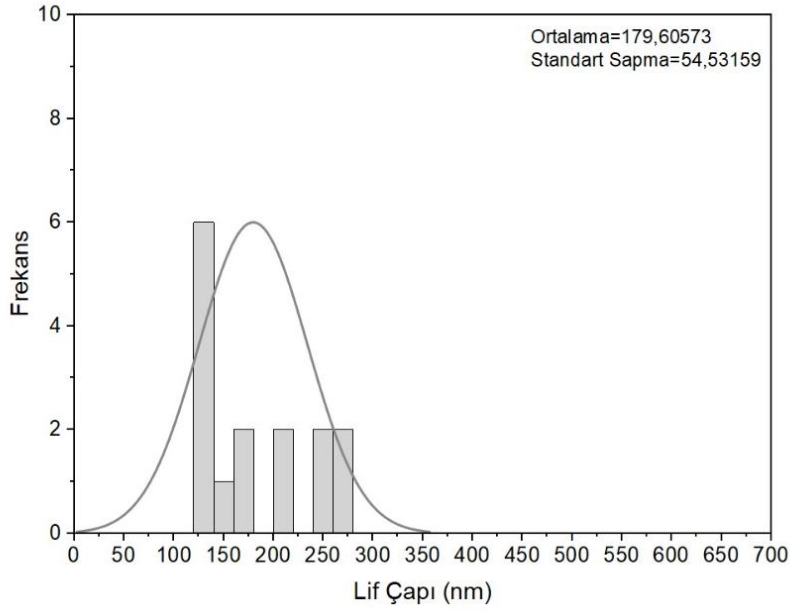
Şekil 3.21 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:0) Nanolif Çapı Dağılımı

Ayrıca elde edilen yüzeylerde boncuklanma ve aglomerasyonun (topaklanma) yoğun olduğu görülmektedir. Bu gibi bir eğilim literatürde de gözlemlenmiş olup ÇDKNT'nin artmasıyla daha kalın lifler elde edilmiş ve sürfaktan kullanılmayan numunede homojen dağılım elde edilememiştir [110].

Şekil 3.22'de ÇDKNT 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) üretilen nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 179,60 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



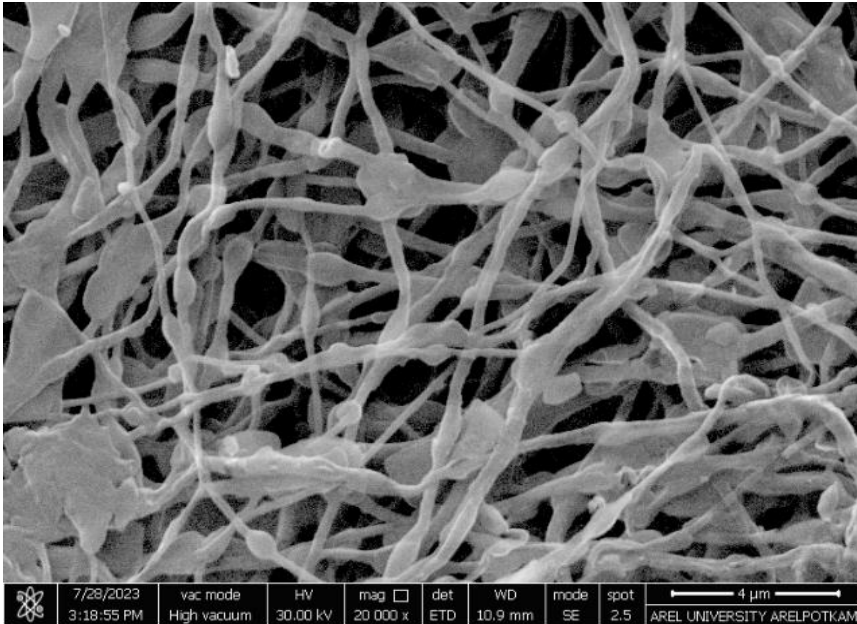
Şekil 3.22 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) SEM görüntüsü



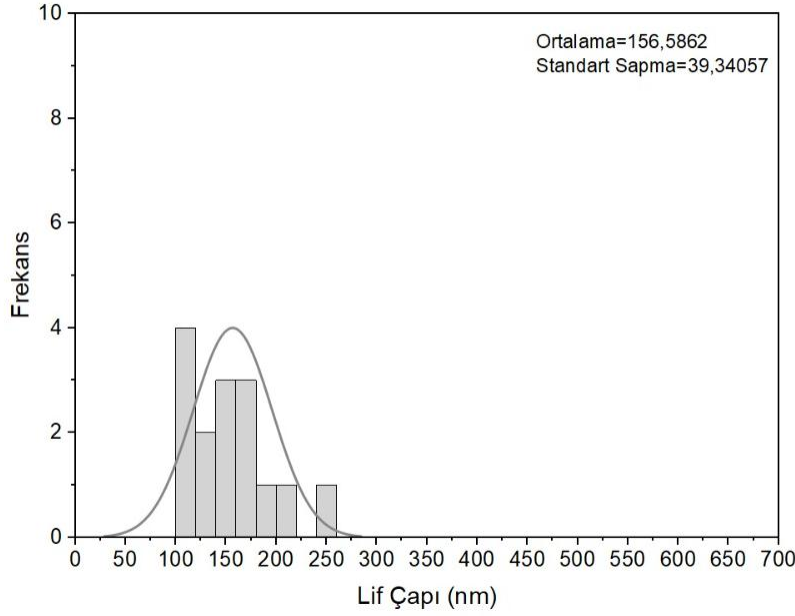
Şekil 3.23 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:20) Nanolif Çapı Dağılımı

Ayrıca elde edilen yüzeylerde boncuklanma ve aglomerasyonun (topaklanma) bir miktar azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 3.24'te 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) üretilen nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 156,58 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



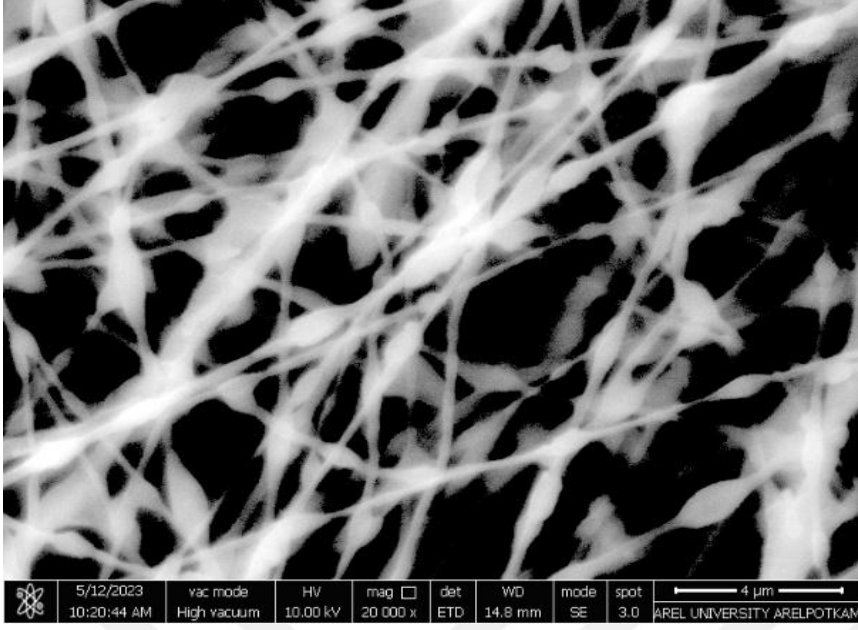
Şekil 3.24 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) SEM görüntüsü



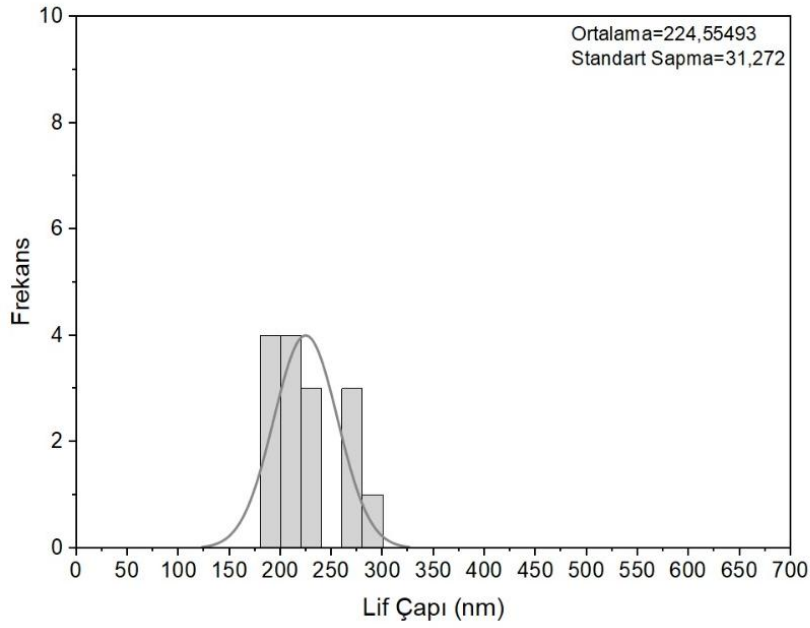
Şekil 3.25 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:23) Nanolif Çapı Dağılımı

Lif çapındaki azalmanın nedenin artan elektriksel iletkenlik sonucu şırınga ucundan çıkan solüsyonun iyice ayrılmasıyla oluştuğu düşünülmektedir (Ayrıca elde edilen yüzeylerde boncuklanma ve aglomerasyonun SDS kullanılmayan numuneye göre (topaklanma) azaldığı görülmektedir [111].

Şekil 3.26'da 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) üretilen nanokompozitin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Elde edilen yüzeyde ortalama lif çapı 224,55 nm'dir ve de lif çap dağılımı Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.26 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) SEM görüntüsü



Şekil 3.27 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS (1:26) Nanolif Çapı Dağılımı

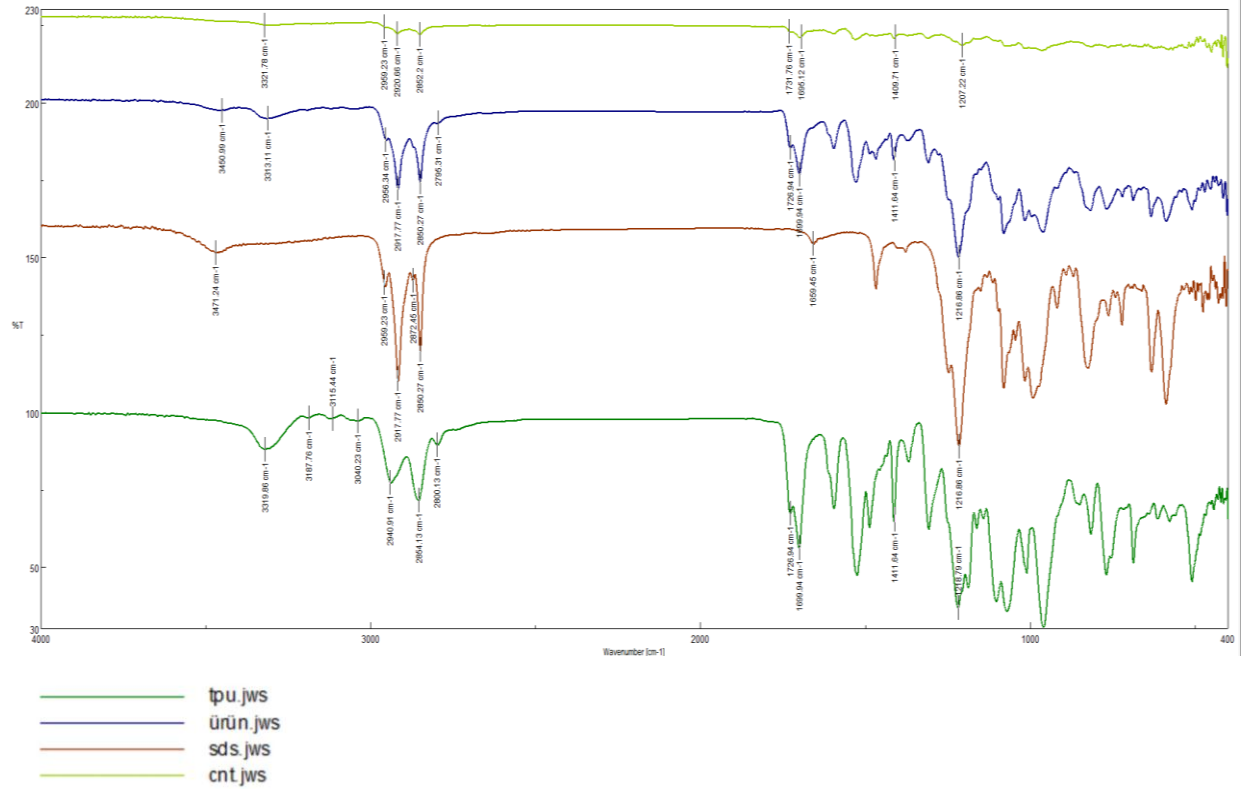
Homojen bir lif yapısının meydana gelmemesinin ÇDKNT miktarındaki artışın neden olduğu yüksek iletkenlik sebebiyle gerçekleştiği düşünülmektedir [111]. Bununla birlikte sağlanan yüksek elektriksel iletkenlik nanokompozitin sensör özelliği

göstermesine neden olmuştur.

Elde edilen nanokompozitlerin lif çapı aralıkları 103,58 – 284.125 arasında değişmekte olduğu görülmüştür.

3.1.2.FTIR Analizi

Numunelerin FTIR yapısal spektrumu Şekil 3.28’de gösterilmektedir. Termoplastik poliüretanın (TPU) FTIR spektrumu genellikle 3300-3500 cm^{-1} arasında N-H (amid) ve Hidroksil (-OH) varlığı gözlemlenmektedir. Ayrıca 1700-1800 cm^{-1} ’de karbonil gruplarının, 1600-1700 cm^{-1} arasında üre fonksiyonel grubunun ve 1100-1300 cm^{-1} aralığında ester gruplarına bağlı C-O karakteristik bantlarının göstergesidir [112].



Şekil 3.28 FTIR analizi

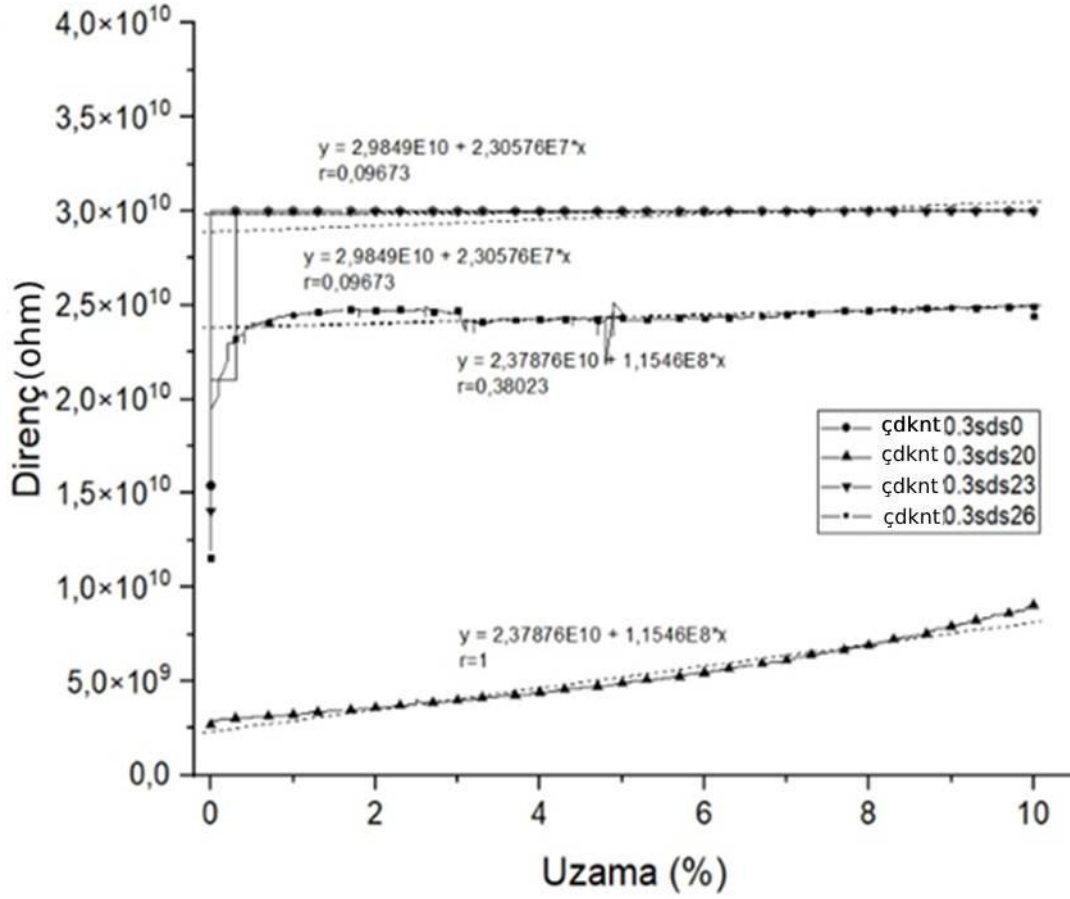
Karbon nanotüplerin (KNT) FTIR spektrumu genellikle 1500-1800 cm^{-1} bandında karboksil ve keton gruplarının, 2800-3000 cm^{-1} aralığında alifatik C-H bağları ve 2200-2400 cm^{-1} ’de $\text{C}\equiv\text{C}$ bağların varlığını göstermektedir [113]. Sodyum dodesil sülfatın FTIR spektrumu incelendiğinde 3000-2800 cm^{-1} arasında olan bantlar, metil (CH_3),

metilen (CH₂) ve metin (CH) gruplarından kaynaklanan alifatik C-H bağlarına aittir. Öte yandan 1700-1600 cm⁻¹ arasında olan pikler ise karbonil (C=O) gruplarının varlığını göstermektedir. 1500-1300 cm⁻¹ arasında olan bantların karbonat (COO-) gruplarına ait olduğu düşünülmektedir. 1200-1000 cm⁻¹ aralığında sülfat (SO₄-) gruplarının varlığı gözlemlenmiştir [114]. Karbon Nanotüpler (KNT) için ise 1500-1800 cm⁻¹ aralığında karakteristik C=C (alken) fonksiyonel pikleri gözlemlenmiştir. Kompozit membran FTIR spektrumu incelendiğinde; içeriğindeki tüm maddelerin kompozit yapının pikleriyle örtüştüğü tespit edilmiştir. KNT katkısı ile SDS ve TPU pik şiddetlerinde azalma gözlemlenmiş ve konumları kaymıştır. SDS madde ilavesi TPU matrisinin pik şiddetlerini arttırırken, KNT katkısı TPU ve SDS pik şiddetlerini azaltmıştır.

3.2 Elektromekanik İnceleme

Farklı ÇDKNT ve değişen oranlarda SDS ilavesiyle elde edilen nanomebranların sensör davranışlarını incelemek için elektromekanik testler yapılmıştır. Elde edilen nanokompozit numunelerden 3 cm x 1 cm boyutunda 3'er adet dikey yönde test numunesi hazırlanmış, elektriksel ölçüm yapabilmek için bakır elektrotlar numunenin her iki tarafına tutturulmuştur. Daha sonra bu numuneler Instron cihazında teste tabii tutulmuştur. Bu ölçüm esnasında Keithley direnç ölçüm cihaz probaları numuneye üstten ve alttan bir bakır tel aracılığıyla tutturularak gerilim altındaki direnç değişimleri 30 dk'lık süre boyunca ölçülmüştür. Bu incelemelerde elde edilen değerlerin korelasyon ve regrasyon analizleri yapılarak sonuçların istatiki açıdan da geçerliliği analiz edilmiştir.

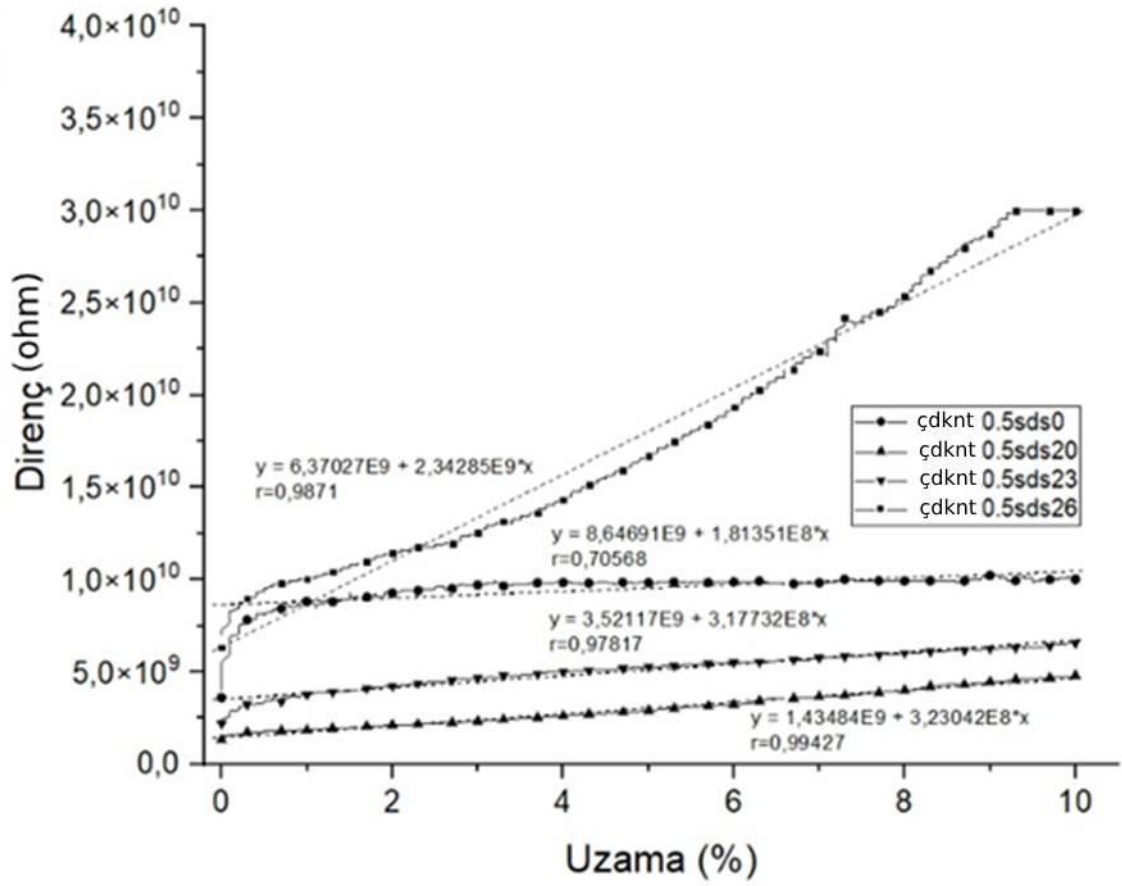
0,3 ÇDKNT ve değişen oranlarda SDS ilavesiyle elde edilmiş numunelerin uzama gerilimi altındaki testi altındaki direnç değişimleri Şekil 3.29'da verilmiştir.



Şekil 3.29 ÇDKNT 0.3 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında direnç değişimi

Şekil 3.29 incelendiğinde %2'lik uzamaya kadar 1/20 ÇDKNT:SDS oranına sahip numunede, uzama karşısında direnç değişimi belirgin olarak ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla 0,3 ÇDKNT katkılı numunelerde en iyi direnç değişimi davranışı gösteren numunenin 1/20 oranında ÇDKNT:SDS ilavesiyle oluşturulan numune olduğu görülmektedir. Bu numunenin direnç artışının, korelasyon katsayısından da ($r = 1$) anlaşılacağı gibi büyük oranda uzama artışına bağlı olduğu ve gerilim sensörü olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Diğer numunelerde gerilim artışına karşılık belirgin bir direnç değişiminin meydana gelmediği görülmektedir.

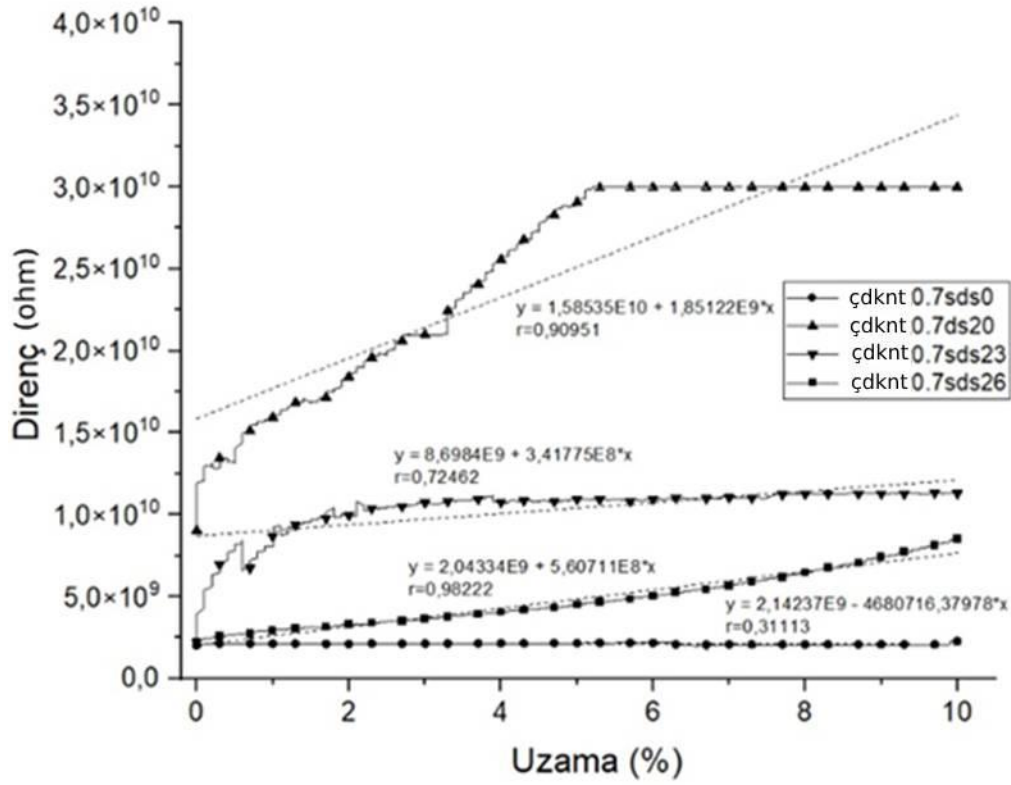
0,5 ÇDKNT ve değişen oranlarda SDS ilavesiyle elde edilmiş numunelerin gerilim testi altındaki direnç değişimleri Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.30 ÇDKNT 0,5 sabit değerinde 0,1/20, 1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında direnç değişimi

Şekil 3.30 incelendiğinde ÇDKNT:SDS 1/0 oranında elde edilen numune hariç diğer numunelerin hepsinde direnç değişimi özelliği olabileceği görülmektedir. ÇDKNT:SDS 1/0 oranında SDS ilavesiyle elde edilen numune %2'lik uzamaya kadar bir direnç değişimi davranışı gösterirken %2'nin üstünde bir uzama değerinde, direnç değişimi olmaması nedeniyle sensör davranışı göstermemektedir. ÇDKNT:SDS 1/20, 1/23 ve 1/26 oranında elde edilen numunelerde ise sensör davranışının mümkün olduğu, numunelerdeki direnç artışının uzama artışına bağlı olduğu ve bu artışın da her üç numune için istatistiki açıdan da ($r = 0.99$ 1/20 için, $r = 0.98$ 1/23 için, $r = 0.99$ 1/26 için) önemli olduğu tespit edilmiştir.

0,7 ÇDKNT ve değişen oranlarda SDS ilavesiyle elde edilmiş numunelerin gerilim testi altındaki direnç değişimleri Şekil 3.31'de verilmiştir.



Şekil 3.31 ÇDKNT 0.7 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında direnç değişimi

Şekil 3.31 incelendiğinde, 1/0 oranında SDS ilavesiyle elde edilen numune hariç diğer numunelerin hepsinde uzama gerilimine karşı direnç değişimi olduğu görülmektedir. ÇDKNT:SDS 1/20 ve 1/23 oranında SDS ilavesiyle oluşturulan numunelerde %5'lik uzama artışına karşılık direnç artışı gerçekleştiğinden, bu uzama değerine kadar sensör özelliği görülsede, bu numuneler için korelasyon katsayılarının ($r = 0,91$ 1/20 için, $r = 0,72$ 1/23) önemli olmasına rağmen daha yüksek uzamalara karşı direnç değişimi gerçekleşmediğinden sensör davranışının olduğu söylenemez. ÇDKNT:SDS 1/26 oranında SDS ilavesiyle oluşturulan numunede ise korelasyon katsayısından da anlaşılacağı gibi ($r = 0,91$) uzama artışına karşı stabil bir direnç değişimi olduğu gözlemlendiği için sensör özelliği göstermektedir.

Gerilme sensörüne yük uygulandığında direnç değişimi olduğu gözlemlenmiştir. Bu değişimi anlamlandırabilmek için gauge faktör hesabı yapılmıştır. Gauge faktör aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

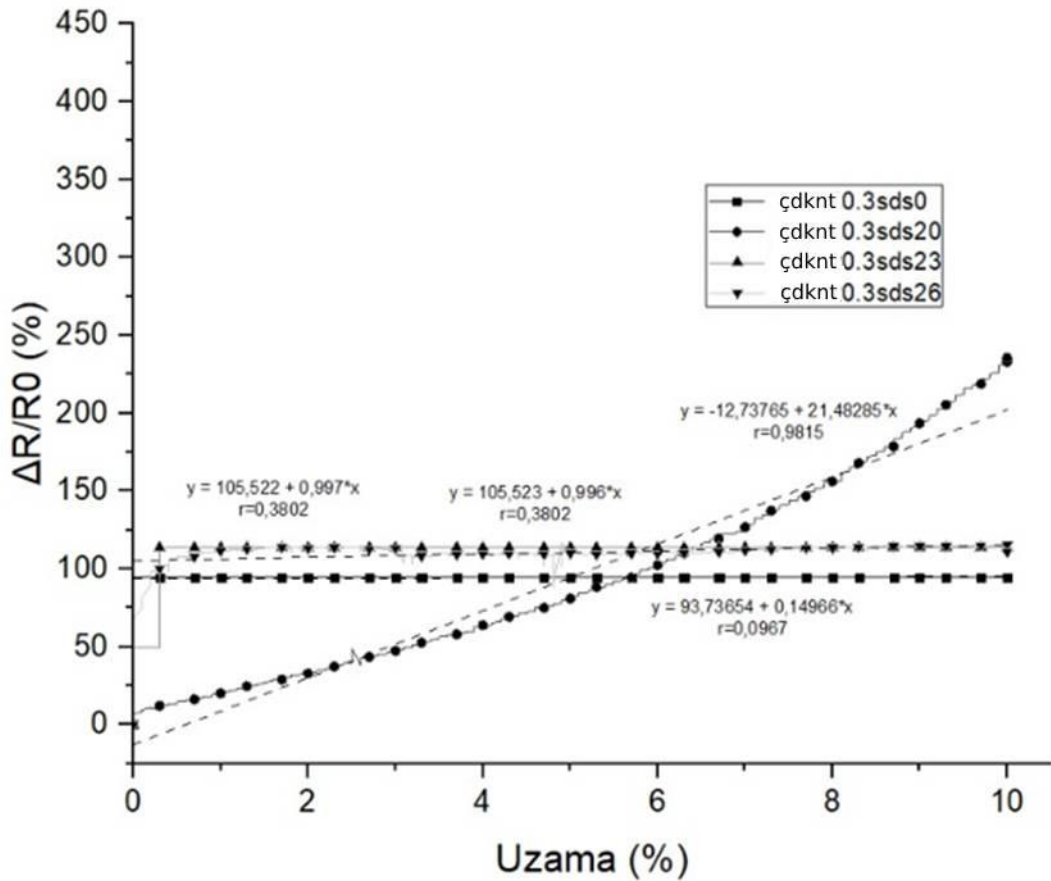
$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}$$

$\Delta R/R_0$ ise;

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right) = \frac{R_t - R_0}{R_0}$$

Formülü ile hesaplanmaktadır. Burada, ΔR dirençteki değişimi, R_0 , yük uygulanmadığı durumdaki sensör direncini, R_t ise yük altında sensörün gösterdiği direnci temsil etmektedir. ε , uygulanan gerilme miktarını temsil etmektedir.

Şekil 3.32’de 0.3 ÇDKNT konsantrasyonuna sahip 0, 1/20, 1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarına sahip numunenin uzama-gauge faktör grafiği görülmektedir.

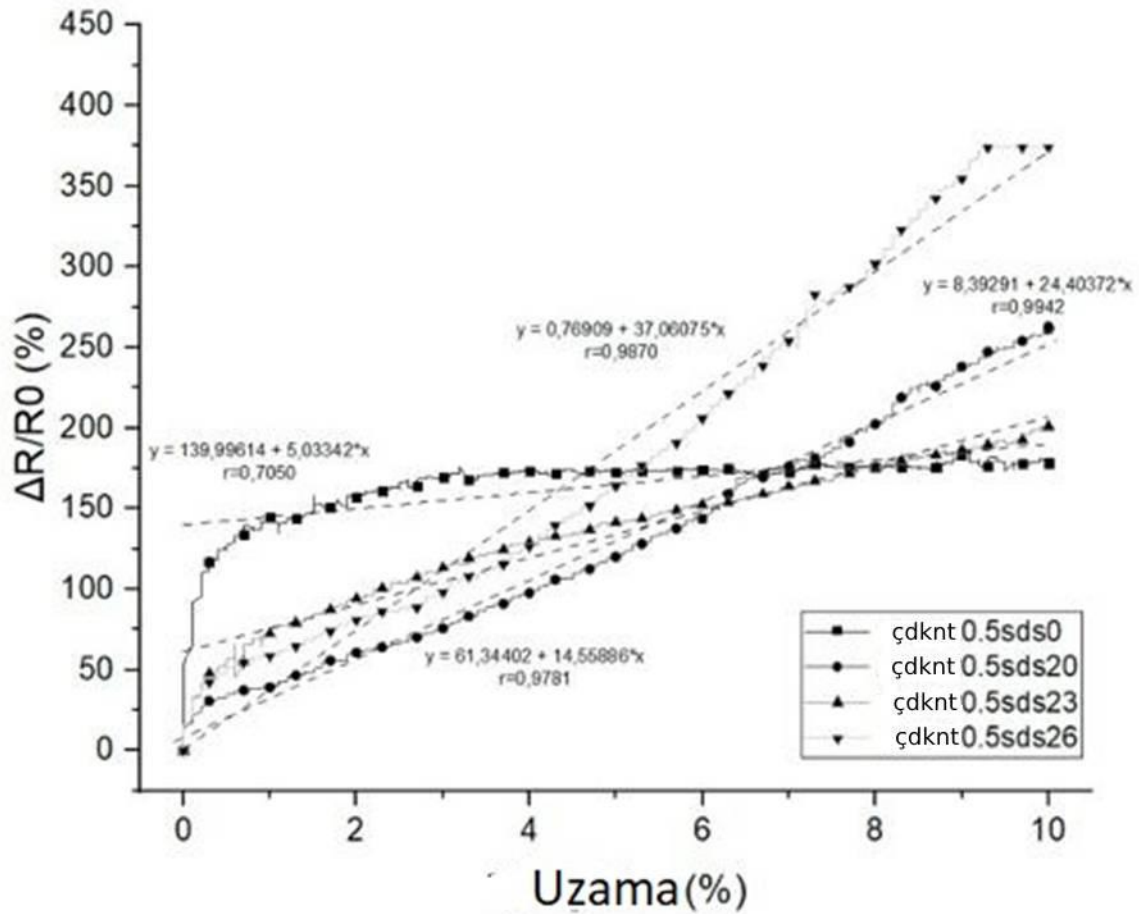


Şekil 3.32 ÇDKNT 0.3 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında $\Delta R/R_0$ değişimi

Şekil 3.32 incelendiğinde 1/20 oranında SDS ilavesiyle oluşturulan numunede uzama

gerilimine bağı neredeyse doğrusal bir direnç artışı gözlemlendiği için bu numunenin gerilim sensörü amaçlı kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Bu numunenin direnç artışının, korelasyon katsayısından da ($r = 0,98$) anlaşılacağı gibi büyük oranda uzama artışına bağı olduğu ve gerilim sensörü olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Diğer üç numunenin ise gauge faktör değerine bakıldığında herhangi bir değişim olmaması sebebiyle sensör özelliği göstermediği anlaşılmaktadır.

Şekil 3.33'te 0.5 ÇDKNT konsantrasyonuna sahip 1/0, 1/20, 1/23 ve 1/26 ÇDKNT:SDS oranlarına sahip nanokompozitlerin uzama-*gauge faktör* grafiği görülmektedir.

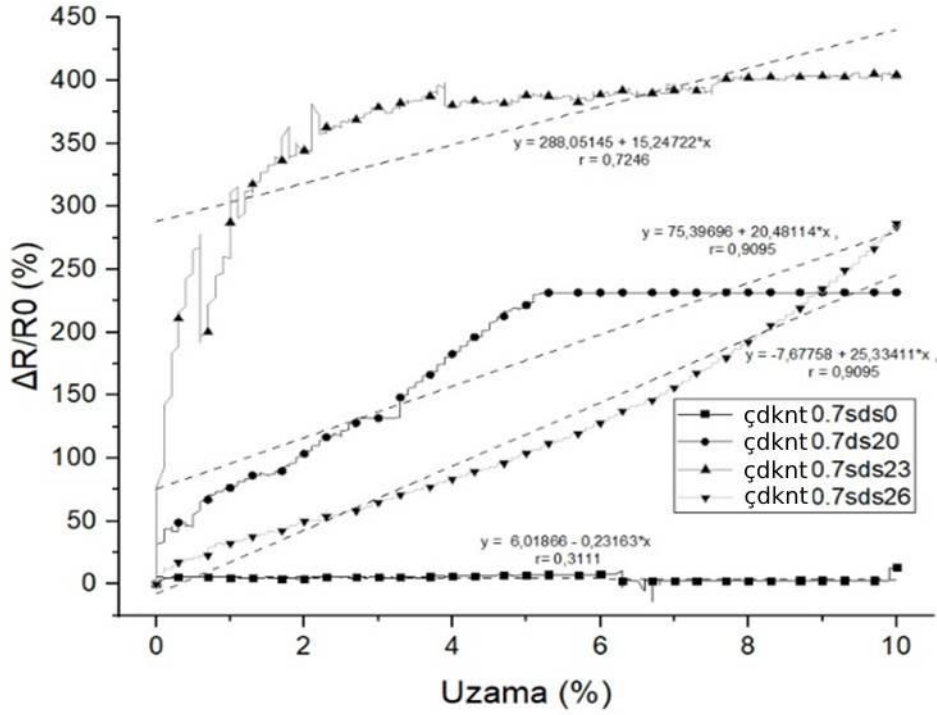


Şekil 3.33 ÇDKNT 0.5 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında $\Delta R/R_0$ değişimi

1/0 oranında SDS ilavesiyle oluşturulan numunede gauge faktör değerine bakıldığında

stabil bir sensör davranışı beklenemeyeceği ancak diğer oranlarda elde edilen numunelerin ise sensör davranışı gösterebileceği anlaşılmaktadır. 1/20, 1/23 ve 1/26 oranında ÇDKNT:SDS ilavesiyle sensör davranışının mümkün olduğu, numunelerdeki gauge faktördeki artışın uzama artışına bağlı olduğu ve bu artışın da her üç numune için istatistiki açıdan da tespit edilmiştir. 1/20 oranında ÇDKNT:SDS ilavesiyle elde edilen numunede %5 uzama değerine kadar stabil bir sensör davranışı gösterirken %5'in üstünde bir uzama değerinde sensör davranışı göstermesi mümkün değildir. Bu numunenin direnç artışının, korelasyon katsayısından da ($r = 0,99$) anlaşılabileceği gibi büyük oranda uzama artışına bağlı olduğu ve gerilim sensörü olarak kullanılabileceği, 1/23 oranında ÇDKNT:SDS ilavesiyle elde edilen numunede %4 uzama değerine kadar stabil bir sensör davranışı gözlemlenirken, uzamanın %4'ü aştığı andan itibaren sensör davranışının bozulduğu ve dolayısıyla sensör özelliğinin gerçekleşmediği görülmektedir. Bu numunenin direnç artışının, korelasyon katsayısında da ($r = 0,98$) anlaşılabileceği gibi büyük oranda uzamaya artışına bağlı olduğu ve gerilim sensörü olarak kullanılabileceği, 1/26 oranında ÇDKNT:SDS ilavesiyle elde edilen numunede gauge faktör değerindeki değişim uzama gerilimiyle doğrusal bir oranda artmakta ve ideale yakın bir sensör davranışı sergilemektedir. Bu numunenin direnç artışının, korelasyon katsayısından da ($r = 0,71$) anlaşılabileceği gibi büyük oranda uzama artışına bağlı olduğu ve gerilim sensörü olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Şekil 3.34'te 0.7 ÇDKNT konsantrasyonuna sahip 1/0, 1/20, 1/23 ve 1/26 ÇDKNT:SDS oranlarına sahip nanokompozitlerin uzama-*gauge faktör* grafiği görülmektedir.

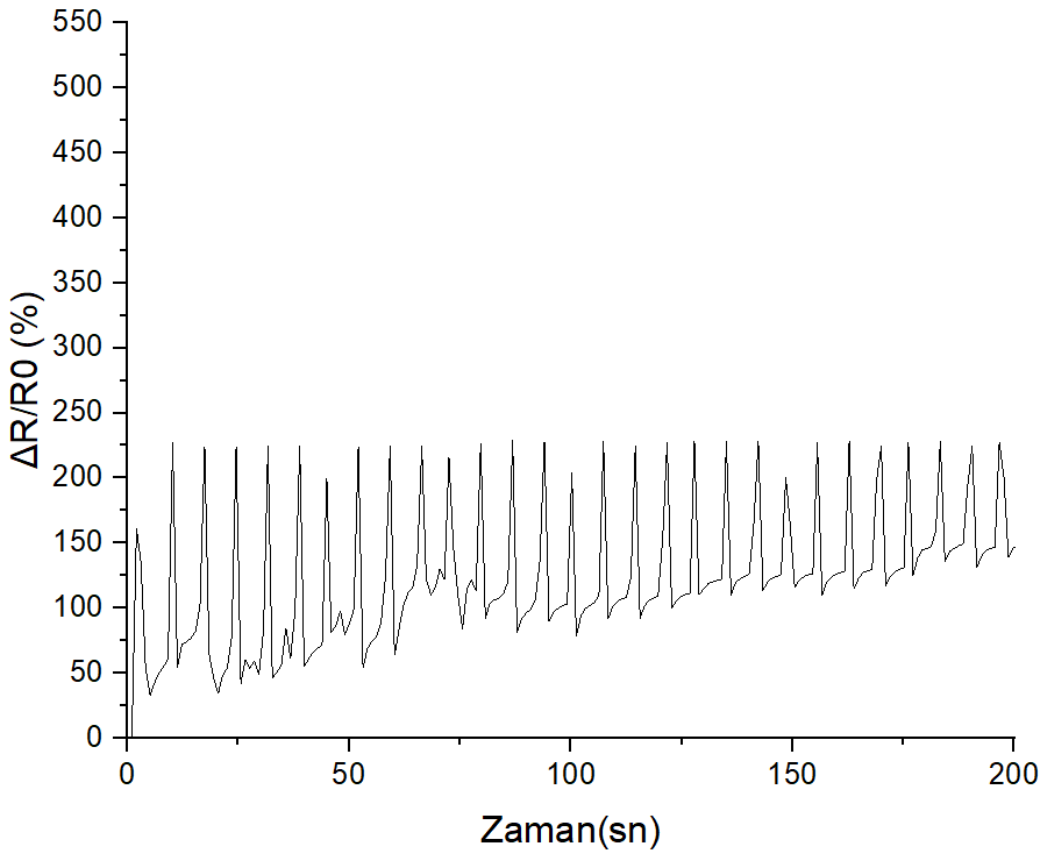


Şekil 3.34 ÇDKNT 0.7 sabit değerinde 0,1/20,1/23 ve 1/26 ÇDKNT/SDS oranlarında $\Delta R/R_0$ değişimi

1/0 oranında SDS ilavesiyle oluşturulan numunede gauge faktör değerine bakıldığında stabil bir sensör davranışı beklenemeyeceği ancak diğer oranlarda elde edilen numunelerin ise sensör davranışı gösterebileceği anlaşılmaktadır. 1/26 oranında ÇDKNT:SDS ilavesiyle elde edilen numunede %8 uzama değerine kadar stabil bir sensör davranışı gösterdiği, %8'in üstünde bir uzama değerinde sensör davranışı göstermesi mümkün değildir. Bu numunedeki direnç artışının uzama artışına bağlı olduğu ($r = 0,91$), 1/23 oranında SDS ilavesiyle elde edilen numunede %4 uzama değerine kadar stabil bir sensör davranışı gözlemlenirken, uzamanın %4'ü aştığı andan itibaren sensör davranışının bozulduğu dolayısıyla sensör davranışı göstermediği bulunmuştur. Bu numunedeki direnç artışının uzama artışına bağlı olduğu ($r = 0,72$), 1/20 oranında ÇDKNT:SDS ilavesiyle elde edilen numunede gauge faktör değerindeki değişim uzama gerilimiyle doğrusal bir oranda artmakta ve ideale yakın bir sensör davranışı sergilemektedir. Bu numunedeki direnç artışının uzama artışına bağlı olduğu ($r = 0,91$) tespit edilmiştir.

Elde edilen nanokompozit numunelerden 3 cm x 1 cm boyutunda 3'er adet dikey

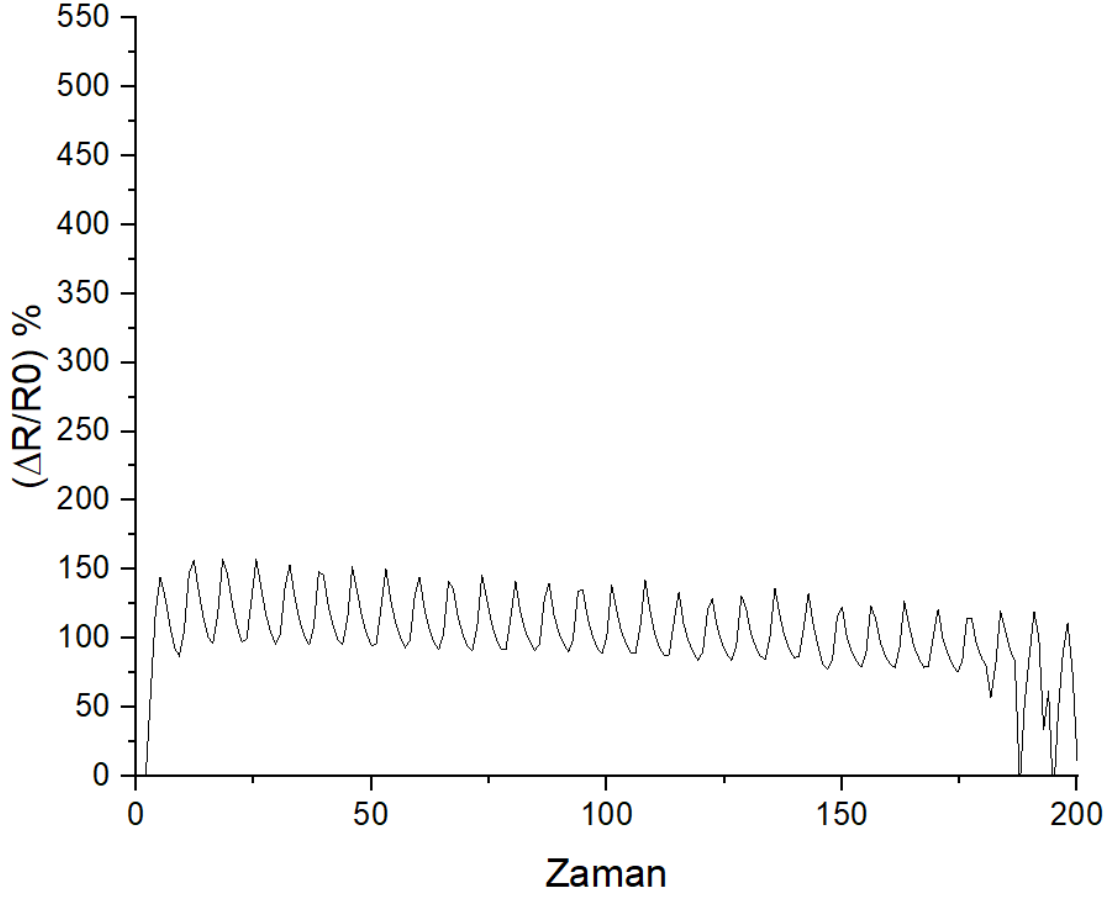
yönde 3'er adet yatay yönde test numunesi hazırlanmış ve bu numuneler Instron cihazında teste tabii tutulmuştur. Bu ölçüm esnasında Keithley direnç ölçüm cihaz problemleri numuneye üstten ve alttan tutturularak gerilim altındaki direnç değişimleri 400 sn'lik süre boyunca ve 100 döngüyle ölçülmüştür. Uygulanan çevrimler neticesinde meydana gelen direnç değişimleri gözlemlenmiş ve grafiksel biçimde sunulmuştur (Şekil 3.35).



Şekil 3.35 0,3 ÇDKNT konsantrasyonunda ve 1/20 ÇDKNT:SDS konsantrasyonda yapılan gerilim-döngü testi

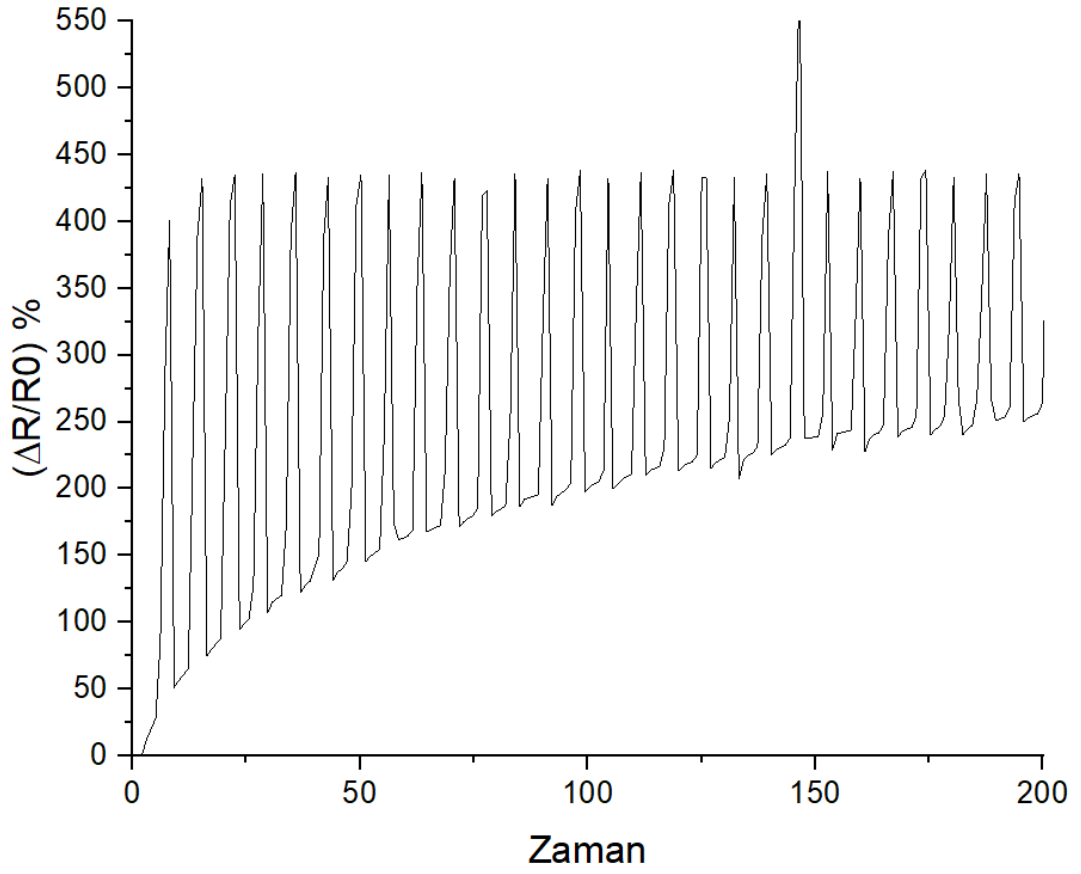
Şekil 3.35 incelendiğinde 0,3 ÇDKNT konsantrasyonda yapılan gerilim-döngü testi görülmektedir. Döngü testi %5 uzama-gerilim altında yapılmıştır ve her döngü sonunda numunelerin direnç değişimleri incelenmiştir. Şekil 3.35 incelendiğinde her döngü sonunda direnç değişiminin devam ettiği tespit edilmiştir. Üst tepe noktasında elde edilen direnç değerlerinin aynı olması gerilim altında stabil bir sensör davranışı

gösterebileceğinin bir kanıtıdır. Şekil 3.36'da 0,5 ÇDKNT konsantrasyonunda ve 1/20 ÇDKNT:SDS oranında yapılan gerilim-döngü testi grafiği görülmektedir.



Şekil 3.36 0,5 ÇDKNT konsantrasyonunda ve 1/20 ÇDKNT:SDS konsantrasyonunda yapılan gerilim-döngü testi

Burada her döngü sonunda direnç değişiminin devam ettiği tespit edilmiştir. Döngü testinde Üst ve alt tepe noktalarında elde edilen direnç değerlerinin birbirine yakın olması gerilim altında stabil bir sensör davranışı gösterebileceği anlamına gelmektedir. Şekil 3.37'de 0,7 ÇDKNT konsantrasyonunda yapılan döngü testi görülmektedir. Scale testi %5 uzama-gerilim altında yapılmıştır ve her döngü sonunda numunelerin direnç değişimleri incelenmiştir.



Şekil 3.37 0,7 ÇDKNT ,ÇDKNT:SDS 1/26 konsantrasyonda yapılan gerilim-döngü testi

Şekil 3.37 incelendiğinde her döngü sonunda direnç değişiminin devam ettiği tespit edilmiştir. Üst tepe noktasında elde edilen direnç değerlerinin aynı olması gerilim altında stabil bir sensör davranışı gösterebileceğinin bir kanıtıdır.

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında gerilim sensörü olarak kullanılabilecek nanokompozit sensör üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın giyilebilir sensör uygulamalarına ışık tutacak bir çalışma olması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, esnek bir polimer olan TPU çözeltisine iletkenlik katmak için ÇDKNT ve çözeltinin homojen bir şekilde dağılması için de SDS eklenmiştir. Elde edilen çözeltilerden elektro eğirme yöntemiyle nanokompozitler elde edilmiştir.

Eklenen ÇDKNT ve SDS oranlarının sensör özelliklerine etkisini tespit edebilmek amacıyla farklı konsantrasyonlar ve SDS oranlarında on iki adet nanokompozit üretilmiştir. Nanokompozit elde ederken uygulaması kolay ve yaygın bir yöntem olan elektroegirme işlemi seçilmiştir. Çalışmada ÇDKNT konsantrasyonları 0.3, 0.5 ve 0.7 olarak ÇDKNT:SDS oranları ise 1/0, 1/20, 1/23 ve 1/26 olarak seçilmiştir.

SDS; nanokompozit numunelerin elektroegirme işleminde homojen bir şekilde üretilmesi için eklenmiştir. Özellikle ÇDKNT oranının artmasıyla SDS katılmayan çözeltilerin homojen bir şekilde dağılmadığı ve bunun da elektroegirme işleminde tıkanmalara ve aksamalara neden olduğu gözlemlenmiştir.

TPU ‘nun içerisine ÇDKNT katılmasıyla çözelti iletkenliği ve viskozite değerleri arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç sonikasyon ile TPU çözeltisine katılan ÇDKNT’lerin daha iyi dağıldığı ve daha yüksek viskozite ile iletkenlik değerine sahip olması ile ilişkilendirilmiştir.

SDS kullanımıyla homojen dağılım sağlanan kompozit çözeltilerin nanokompozit yüzey haline getirildikten sonraki yüzey morfolojilerinde de düzgün bir yapılanma gözlenmiştir. Sürfaktan (SDS) katkısıyla SEM görüntülerinde elde edilen homojen dağılım iletkenlik artışıyla uyumlu sonuçlar göstermiştir [109].

Elde edilen nanokompozitlerin FTIR sonuçları incelendiğinde;

- Kullanılan herbir maddenin kompozit yapıyla piklerinin örtüştüğü tespit edilmiştir.
- KNT katkısı ile SDS ve TPU pik şiddetlerinde azalma gözlemlenmiş ve konumları kaymıştır. Bu sonuç ise iyi bir kompozit yapı elde edildiğinin göstergesidir.

- SDS madde ilavesi TPU matrisinin pik şiddetlerini arttırırken, KNT katkısı TPU ve SDS pik şiddetlerini azaltmıştır.

Elde edilen nanokompozitlerin SEM sonuçları incelendiğinde;

- SDS katılmayan numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelendiğinde; elde edilen yüzeylerde aşırı boncuklanma ve aglomerasyon (topaklanmaların) olduğu görülmektedir
- SDS oranı arttıkça bu topaklanmaların azaldığı gözlemlenmektedir. Dolayısıyla SDS oranın ÇDKNT'lerin TPU içerisindeki dağılım düzgünlüğünü sağladığı ve aglomerasyonu engellediği anlaşılmaktadır. Buna bağlı olarak direnç ölçümlerinde aglomerasyonun olduğu numunelerde direnç değişiminin olmadığı ve böylece numunelere gerilim uygulandığında direnç değişiminin gerçekleşmediği görülmüştür.
- Saf TPU'dan elde edilen nanolif yapılanmanın ÇDKNT kullanılan yapıya göre daha kalın olduğu bir başka deyişle ÇDKNT varlığının daha ince nanolif çaplarını oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu lif çaplarındaki azalma, polimer çözeltisindeki ÇDKNT'lerin varlığının elektriksel iletkenliğe neden olması ve buna bağlı olarak da şırınga ucundaki yüklenmenin artışıyla daha küçük nanolif yapılanmasına yol açmıştır
- Elde edilen nanokompozitlerin lif çapı aralıkları 103,58 – 284.125 arasında değişmekte olduğu görülmüştür.

Elde edilen nanokompozitlerin elektromekanik sonuçları incelendiğinde;

- Numunelerin direnç değişimleri incelendiğinde 0,3 ve 0,5 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS 1/20 oranı en iyi sensör özelliği gösteren oran, 0,7 ÇDKNT konsantrasyonda ÇDKNT:SDS 1/ 26 oranı en iyi sensör özelliği gösteren oran olarak belirlenmiştir.
- Numunelerin gauge faktör grafikleri incelendiğinde doğrusala yakın bir davranış gösteren numunelerin %5 uzama-gerilim altında döngü testleri yapılmıştır ve bu döngü testlerinde numunelerin her döngü sonunda direnç değişiminin devam ettiği tespit edilmiştir. Üst tepe noktasında elde edilen direnç değerlerinin aynı

olması gerilim altında stabil bir sensör davranışı gösterebileceğinin bir kanıtıdır.

Yapılan bu çalışma kapsamında; karbon nanotüp konsantrasyonu 0,3, 0,5 ve 0,7 arasında seçilmiş, ÇDKNT:SDS oranı 1/0, 1/20, 1/23 ve 1/26 arasında belirlenmiş ve sonuçta sensör özelliği gösteren elastik bir yapı elde edilmiştir. Daha ileriki çalışmalarda; karbon nanotüp konsantrasyon aralıklarının daha dar seçilerek çalışmalar yapılarak sensör özelliklerinin incelenmesi önerilmektedir. Yine bu çalışmada aglomerasyonu engellemek için kullanılan SDS miktarlarının da daha fazla oranda kullanılması ve bunun çözelti karakterine ve nano yüzeye etkisinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılması tavsiye edilmektedir.



KAYNAKLAR/REFERENCES

- [1] C. M. Choi, S.-N. Kwon, and S.-I. Na, "Conductive PEDOT: PSS-coated poly-paraphenylene terephthalamide thread for highly durable electronic textiles," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 50, pp. 155-161, 2017.
- [2] N. A. Choudhry, L. Arnold, A. Rasheed, I. A. Khan, and L. Wang, "Textronics—a review of textile- based wearable electronics," *Advanced Engineering Materials*, vol. 23, no. 12, p. 2100469, 2021.
- [3] A. Hatamie *et al.*, "Textile based chemical and physical sensors for healthcare monitoring," *Journal of the electrochemical society*, vol. 167, no. 3, p. 037546, 2020.
- [4] M. G. Robbani, "Future of Textiles with Nanotechnology." [Online]. Available: <https://textilefocus.com/future-of-textiles-with-nanotechnology/>
- [5] Y. Lu, M. C. Biswas, Z. Guo, J.-W. Jeon, and E. K. Wujcik, "Recent developments in bio-monitoring via advanced polymer nanocomposite-based wearable strain sensors," *Biosensors and bioelectronics*, vol. 123, pp. 167-177, 2019.
- [6] H. Souri *et al.*, "Wearable and stretchable strain sensors: materials, sensing mechanisms, and applications," *Advanced Intelligent Systems*, vol. 2, no. 8, p. 2000039, 2020.
- [7] K. Singh, S. Sharma, S. Shriwastava, P. Singla, M. Gupta, and C. Tripathi, "Significance of nano-materials, designs consideration and fabrication techniques on performances of strain sensors-A review," *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 123, p. 105581, 2021.
- [8] M. Amjadi, K. U. Kyung, I. Park, and M. Sitti, "Stretchable, skin- mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: a review," *Advanced Functional Materials*, vol. 26, no. 11, pp. 1678-1698, 2016.
- [9] S. Seyedin *et al.*, "Textile strain sensors: A review of the fabrication technologies, performance evaluation and applications," *Materials Horizons*, vol. 6, no. 2, pp. 219-249, 2019.
- [10] R. Wang *et al.*, "Carbon nanotube- based strain sensors: Structures, fabrication, and applications," *Advanced Materials Technologies*, vol. 8, no. 1, p. 2200855, 2023.
- [11] J. Chen *et al.*, "An overview of stretchable strain sensors from conductive polymer nanocomposites," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 7, no. 38, pp. 11710-11730, 2019.
- [12] S. J. Park, J. Kim, M. Chu, and M. Khine, "Highly flexible wrinkled carbon nanotube thin film strain sensor to monitor human movement," *Advanced Materials Technologies*, vol. 1, no. 5, p. 1600053, 2016.
- [13] S. Zhao *et al.*, "Recent advancements in flexible and stretchable electrodes for electromechanical sensors: strategies, materials, and features," *ACS applied*

- materials & interfaces*, vol. 9, no. 14, pp. 12147-12164, 2017.
- [14] M. A. U. Khalid and S. H. Chang, "Flexible strain sensors for wearable applications fabricated using novel functional nanocomposites: a review," *Composite Structures*, vol. 284, p. 115214, 2022.
 - [15] N. Afsarimanesh, A. Nag, S. Sarkar, G. S. Sabet, T. Han, and S. C. Mukhopadhyay, "A review on fabrication, characterization and implementation of wearable strain sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 315, p. 112355, 2020.
 - [16] Y. Yang and Z. D. Deng, "Stretchable sensors for environmental monitoring," *Applied Physics Reviews*, vol. 6, no. 1, 2019.
 - [17] H. Chen *et al.*, "Fibrous mats based skin sensor with ultra-sensitivity and anti-overshooting dynamic stability enhanced with artificial intelligence," *Chemical Engineering Journal*, vol. 473, p. 145054, 2023.
 - [18] X. Liu *et al.*, "Recent progress on smart fiber and textile based wearable strain sensors: materials, fabrications and applications," *Advanced Fiber Materials*, vol. 4, no. 3, pp. 361-389, 2022.
 - [19] X. Tang *et al.*, "Recent advances on the fabrication methods of nanocomposite yarn-based strain sensor," *Nanotechnology Reviews*, vol. 10, no. 1, pp. 221-236, 2021.
 - [20] H. Guo *et al.*, "Preparation of Thermoplastic Polyurethane/Multi-Walled Carbon Nanotubes Composite Foam with High Resilience Performance via Fused Filament Fabrication and CO₂ Foaming Technique," *Polymers*, vol. 15, no. 6, p. 1535, 2023.
 - [21] X. Wang, Q. Gao, D. W. Schubert, and X. Liu, "Review on Electrospun Conductive Polymer Composites Strain Sensors," *Advanced Materials Technologies*, p. 2300293, 2023.
 - [22] A. Aqel, K. M. Abou El-Nour, R. A. Ammar, and A. Al-Warthan, "Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 5, no. 1, pp. 1-23, 2012.
 - [23] M. Paradise and T. Goswami, "Carbon nanotubes—production and industrial applications," *Materials & design*, vol. 28, no. 5, pp. 1477-1489, 2007.
 - [24] E. T. Thostenson, Z. Ren, and T.-W. Chou, "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review," *Composites science and technology*, vol. 61, no. 13, pp. 1899-1912, 2001.
 - [25] H. Dai, "Carbon nanotubes: opportunities and challenges," *Surface science*, vol. 500, no. 1-3, pp. 218-241, 2002.
 - [26] V. Lordi, S. Ma, and N. Yao, "Towards probing pentagons on carbon nanotube tips," *Surface science*, vol. 421, no. 1-2, pp. L150-L155, 1999.
 - [27] N. Gupta, S. M. Gupta, and S. Sharma, "Carbon nanotubes: Synthesis, properties and engineering applications," *Carbon Letters*, vol. 29, pp. 419-447, 2019.
 - [28] X.-M. Liu *et al.*, "Carbon nanotube (CNT)-based composites as electrode material for rechargeable Li-ion batteries: A review," *Composites Science and Technology*, vol. 72, no. 2, pp. 121-144, 2012.
 - [29] S. Mallakpour and S. Soltanian, "Surface functionalization of carbon nanotubes: fabrication and applications," *RSC advances*, vol. 6, no. 111, pp. 109916-109935, 2016.
 - [30] N. Kaynak, "Functional multiwalled carbon nanotubes/Fonksiyonel çok katmanlı karbon nanotüpler," Yüksek Lisans, Polimer Bilim ve Teknolojisi Ana

- Bilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [31] P. Chen, J. Lin, and K. Tan, "Carbon nanotubes: a future material of life," *IUBMB life*, vol. 49, no. 2, pp. 105-108, 2000.
 - [32] P. L. McEuen, M. S. Fuhrer, and H. Park, "Single-walled carbon nanotube electronics," *IEEE transactions on nanotechnology*, vol. 1, no. 1, pp. 78-85, 2002.
 - [33] M. J. Yee *et al.*, "Carbon nanomaterials based films for strain sensing application—A review," *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 18, p. 100312, 2019.
 - [34] A. Mamalis, L. Vogtländer, and A. Markopoulos, "Nanotechnology and nanostructured materials: trends in carbon nanotubes," *Precision Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 16-30, 2004.
 - [35] M. Büyük, "Karbon nanotüp üretiminde metal katalizörün taban malzemeye tutunma etkileri," Yüksek Lisans, Ankara Üniversitesi, 2017.
 - [36] B. Kutucu, "Nanoteknoloji ve çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi," Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2010.
 - [37] S. Rathinavel, K. Priyadharshini, and D. Panda, "A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 268, p. 115095, 2021.
 - [38] F. Göktepe, "Eğrilebilir Karbon Nanotüpler ve Bu Özel Liflerden Üretilen Teknik İplikler," *Tekstil ve Mühendis*, vol. 22, no. 100, pp. 1-12, 2015.
 - [39] X. Zhang *et al.*, "Ultrastrong, stiff, and lightweight carbon- nanotube fibers," *Advanced materials*, vol. 19, no. 23, pp. 4198-4201, 2007.
 - [40] J. Bernholc, D. Brenner, M. Buongiorno Nardelli, V. Meunier, and C. Roland, "Mechanical and electrical properties of nanotubes," *Annual Review of Materials Research*, vol. 32, no. 1, pp. 347-375, 2002.
 - [41] M. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and A. Jorio, "Unusual properties and structure of carbon nanotubes," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 34, pp. 247-278, 2004.
 - [42] R. Shoukat and M. I. Khan, "Carbon nanotubes: a review on properties, synthesis methods and applications in micro and nanotechnology," *Microsystem Technologies*, pp. 1-10, 2021.
 - [43] V. N. Popov, "Carbon nanotubes: properties and application," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 43, no. 3, pp. 61-102, 2004.
 - [44] M. Terrones, "Science and technology of the twenty-first century: synthesis, properties, and applications of carbon nanotubes," *Annual review of materials research*, vol. 33, no. 1, pp. 419-501, 2003.
 - [45] N. Choudhary, S. Hwang, and W. Choi, "Carbon nanomaterials: a review," *Handbook of nanomaterials properties*, pp. 709-769, 2014.
 - [46] M. I. Sajid, U. Jamshaid, T. Jamshaid, N. Zafar, H. Fessi, and A. Elaissari, "Carbon nanotubes from synthesis to in vivo biomedical applications," *International journal of pharmaceutics*, vol. 501, no. 1-2, pp. 278-299, 2016.
 - [47] A. Örs, "Karbon nanotüplerin polimerler ile fonksiyonlaştırılması," Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2009.
 - [48] M. M. A. Rafique and J. Iqbal, "Production of carbon nanotubes by different routes-a review," *Journal of encapsulation and adsorption sciences*, vol. 1, no. 02, p. 29, 2011.
 - [49] B. Bhushan, *Springer handbook of nanotechnology*. Springer, 2017.
 - [50] N. Mubarak, E. Abdullah, N. Jayakumar, and J. Sahu, "An overview on methods

- for the production of carbon nanotubes," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 20, no. 4, pp. 1186-1197, 2014.
- [51] L. Camilli and M. Passacantando, "Advances on sensors based on carbon nanotubes," *Chemosensors*, vol. 6, no. 4, p. 62, 2018.
 - [52] Y. Ando, X. Zhao, T. Sugai, and M. Kumar, "Growing carbon nanotubes," *Materials today*, vol. 7, no. 10, pp. 22-29, 2004.
 - [53] H. Meskher *et al.*, "A review on CNTs-based electrochemical sensors and biosensors: unique properties and potential applications," *Critical reviews in analytical chemistry*, pp. 1-24, 2023.
 - [54] G. O. Aydın, "CVD Yöntemiyle Karbon Nanotüp Üretimi, Karakterizasyonu, Modifikasyonu ve Kullanım Alanlarının Araştırılması," Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi, 2010.
 - [55] Y. R. Poudel and W. Li, "Synthesis, properties, and applications of carbon nanotubes filled with foreign materials: A review," *Materials Today Physics*, vol. 7, pp. 7-34, 2018.
 - [56] K. S. Ibrahim, "Carbon nanotubes? properties and applications: A review," *Carbon letters*, vol. 14, no. 3, pp. 131-144, 2013.
 - [57] M. Meyyappan, *Carbon nanotubes: science and applications*. CRC press, 2004.
 - [58] J. M. Schnorr and T. M. Swager, "Emerging applications of carbon nanotubes," *Chemistry of Materials*, vol. 23, no. 3, pp. 646-657, 2011.
 - [59] R. Maheswaran and B. P. Shanmugavel, "A critical review of the role of carbon nanotubes in the progress of next-generation electronic applications," *Journal of Electronic Materials*, vol. 51, no. 6, pp. 2786-2800, 2022.
 - [60] G. N. Islam, A. Ali, and S. Collie, "Textile sensors for wearable applications: A comprehensive review," *Cellulose*, vol. 27, pp. 6103-6131, 2020.
 - [61] I. V. Zaporotskova, N. P. Boroznina, Y. N. Parkhomenko, and L. V. Kozhitov, "Carbon nanotubes: Sensor properties. A review," *Modern Electronic Materials*, vol. 2, no. 4, pp. 95-105, 2016.
 - [62] M. Zhou, Z. Wang, and X. Wang, "Carbon nanotubes for sensing applications," in *Industrial applications of carbon nanotubes*: Elsevier, 2017, pp. 129-150.
 - [63] M. Trojanowicz, "Analytical applications of carbon nanotubes: a review," *TrAC trends in analytical chemistry*, vol. 25, no. 5, pp. 480-489, 2006.
 - [64] M. Majumder, N. Chopra, R. Andrews, and B. J. Hinds, "Enhanced flow in carbon nanotubes," *Nature*, vol. 438, no. 7064, pp. 44-44, 2005.
 - [65] G. L. Goh, S. Agarwala, Y. J. Tan, and W. Y. Yeong, "A low cost and flexible carbon nanotube pH sensor fabricated using aerosol jet technology for live cell applications," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 260, pp. 227-235, 2018.
 - [66] L. Liu *et al.*, "High performance flexible pH sensor based on carboxyl-functionalized and DEP aligned SWNTs," *Applied Surface Science*, vol. 386, pp. 405-411, 2016.
 - [67] G. Stojanović *et al.*, "Flexible sensors based on two conductive electrodes and MWCNTs coating for efficient pH value measurement," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 794, pp. 76-83, 2019.
 - [68] T. Basu, P. R. Solanki, and B. Malhotra, "Recent advances in carbon nanotubes based biosensors," *Sensors*, vol. 8, no. s 2, 2008.
 - [69] N. Yang, X. Chen, T. Ren, P. Zhang, and D. Yang, "Carbon nanotube based biosensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 207, pp. 690-715, 2015.
 - [70] F. Ji *et al.*, "Flexible piezoresistive pressure sensors based on nanocellulose

- aerogels for human motion monitoring: A review," *Composites Communications*, p. 101351, 2022.
- [71] T. Q. Trung and N. E. Lee, "Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human- activity monitoring and personal healthcare," *Advanced materials*, vol. 28, no. 22, pp. 4338-4372, 2016.
 - [72] Z. Zhang *et al.*, "Simple and efficient pressure sensor based on PDMS wrapped CNT arrays," *Carbon*, vol. 155, pp. 71-76, 2019.
 - [73] D. Hu *et al.*, "Highly stretchable strain sensors using an electrospun polyurethane nanofiber/graphene composite," *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 16, no. 6, pp. 5839-5842, 2016.
 - [74] P. Zhan *et al.*, "Stretchable strain sensor with high sensitivity, large workable range and excellent breathability for wearable electronic skins," *Composites Science and Technology*, vol. 229, p. 109720, 2022.
 - [75] J. Wang, C. Lu, and K. Zhang, "Textile- based strain sensor for human motion detection," *Energy & Environmental Materials*, vol. 3, no. 1, pp. 80-100, 2020.
 - [76] S. Bharadwaj *et al.*, "Long Length MWCNT/TPU Composite Materials for Stretchable and Wearable Strain Sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 357, p. 114364, 2023.
 - [77] Y. Ding, J. Yang, C. R. Tolle, and Z. Zhu, "A highly stretchable strain sensor based on electrospun carbon nanofibers for human motion monitoring," *RSC advances*, vol. 6, no. 82, pp. 79114-79120, 2016.
 - [78] R. Zhang *et al.*, "Strain sensing behaviour of elastomeric composite films containing carbon nanotubes under cyclic loading," *Composites Science and Technology*, vol. 74, pp. 1-5, 2013.
 - [79] C. Li *et al.*, "Carbon nanotube coated fibrous tubes for highly stretchable strain sensors having high linearity," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 14, p. 2458, 2022.
 - [80] A. ŞANLI, "Farklı Dispersiyon Tekniklerinin Elektro geçirilmiş Karbon Nanotüp/Termoplastik Poliüretan Nanokompozitlerin Elektromekanik Özelliklerine Etkisinin Deneysel İncelenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 10, no. 4, pp. 2039-2051, 2022.
 - [81] Z. Sang, K. Ke, and I. Manas-Zloczower, "Effect of carbon nanotube morphology on properties in thermoplastic elastomer composites for strain sensors," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 121, pp. 207-212, 2019.
 - [82] X. Wang *et al.*, "A highly stretchable carbon nanotubes/thermoplastic polyurethane fiber-shaped strain sensor with porous structure for human motion monitoring," *Composites Science and Technology*, vol. 168, pp. 126-132, 2018.
 - [83] J. Sun *et al.*, "Highly stretchable and ultrathin nanopaper composites for epidermal strain sensors," *Nanotechnology*, vol. 29, no. 35, p. 355304, 2018.
 - [84] Z. He *et al.*, "Effect of MWCNT content on the mechanical and strain-sensing performance of Thermoplastic Polyurethane composite fibers," *Carbon*, vol. 146, pp. 701-708, 2019.
 - [85] G. Sui, D. Liu, Y. Liu, W. Ji, Q. Zhang, and Q. Fu, "The dispersion of CNT in TPU matrix with different preparation methods: solution mixing vs melt mixing," *Polymer*, vol. 182, p. 121838, 2019.
 - [86] X. Fu, M. Ramos, A. M. Al-Jumaily, A. Meshkinzar, and X. Huang, "Stretchable strain sensor facilely fabricated based on multi-wall carbon nanotube composites with excellent performance," *Journal of Materials Science*,

- vol. 54, pp. 2170-2180, 2019.
- [87] M. Ren *et al.*, "Highly stretchable and durable strain sensor based on carbon nanotubes decorated thermoplastic polyurethane fibrous network with aligned wave-like structure," *Chemical Engineering Journal*, vol. 360, pp. 762-777, 2019.
 - [88] M. Nankali, N. Nouri, N. Geran Malek, and M. Sanjari Shahrezaei, "Electrical properties of stretchable and skin-mountable PDMS/MWCNT hybrid composite films for flexible strain sensors," *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 21, pp. 3047-3060, 2019.
 - [89] S. Xu, Z. Fan, C. Li, P. Wang, K. A. Sammed, and L. Pan, "Investigation of strain sensing mechanisms on ultra-thin carbon nanotube networks with different densities," *Carbon*, vol. 155, pp. 421-431, 2019.
 - [90] B. Hao, L. Mu, Q. Ma, S. Yang, and P.-C. Ma, "Stretchable and compressible strain sensor based on carbon nanotube foam/polymer nanocomposites with three-dimensional networks," *Composites Science and Technology*, vol. 163, pp. 162-170, 2018.
 - [91] Y. Zheng *et al.*, "Conductive thermoplastic polyurethane composites with tunable piezoresistivity by modulating the filler dimensionality for flexible strain sensors," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 101, pp. 41-49, 2017.
 - [92] X. Cao *et al.*, "Strain sensing behaviors of epoxy nanocomposites with carbon nanotubes under cyclic deformation," *Polymer*, vol. 112, pp. 1-9, 2017.
 - [93] A. Bouhamed, C. Müller, S. Choura, and O. Kanoun, "Processing and characterization of MWCNTs/epoxy nanocomposites thin films for strain sensing applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 257, pp. 65-72, 2017.
 - [94] Q. Li *et al.*, "Engineering of carbon nanotube/polydimethylsiloxane nanocomposites with enhanced sensitivity for wearable motion sensors," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 5, no. 42, pp. 11092-11099, 2017.
 - [95] K. Ke, V. S. Bonab, D. Yuan, and I. Manas-Zloczower, "Piezoresistive thermoplastic polyurethane nanocomposites with carbon nanostructures," *Carbon*, vol. 139, pp. 52-58, 2018.
 - [96] G. Spinelli, P. Lamberti, V. Tucci, L. Vertuccio, and L. Guadagno, "Experimental and theoretical study on piezoresistive properties of a structural resin reinforced with carbon nanotubes for strain sensing and damage monitoring," *Composites Part B: Engineering*, vol. 145, pp. 90-99, 2018.
 - [97] C.-G. Zhou *et al.*, "Highly stretchable and sensitive strain sensor with porous segregated conductive network," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 11, no. 40, pp. 37094-37102, 2019.
 - [98] S. Kumar, T. K. Gupta, and K. Varadarajan, "Strong, stretchable and ultrasensitive MWCNT/TPU nanocomposites for piezoresistive strain sensing," *Composites Part B: Engineering*, vol. 177, p. 107285, 2019.
 - [99] X. Zhang *et al.*, "Flexible and high-performance piezoresistive strain sensors based on carbon nanoparticles@ polyurethane sponges," *Composites Science and Technology*, vol. 200, p. 108437, 2020.
 - [100] Z. He *et al.*, "Highly stretchable multi-walled carbon nanotube/thermoplastic polyurethane composite fibers for ultrasensitive, wearable strain sensors," *Nanoscale*, vol. 11, no. 13, pp. 5884-5890, 2019.

- [101] B. Liang *et al.*, "Ultra-stretchable and highly sensitive strain sensor based on gradient structure carbon nanotubes," *Nanoscale*, vol. 10, no. 28, pp. 13599-13606, 2018.
- [102] D.-H. Joo, M.-S. Kang, S. J. Park, A. Y. Se, and W.-T. Park, "Fabrication method of flexible strain sensors with CNTs and solvents," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 345, p. 113775, 2022.
- [103] X. Wang *et al.*, "Strain and stress sensing properties of the MWCNT/TPU nanofiber film," *Surfaces and Interfaces*, vol. 32, p. 102132, 2022.
- [104] A. Sanli, K. Yildiz, and M. Uzun, "Experimental study of the impact of electrospinning parameters on the electromechanical properties of strain sensitive electrospun multiwalled carbon nanotubes/thermoplastic polyurethane nanofibers," *Advanced Composite Materials*, vol. 31, no. 3, pp. 335-350, 2022.
- [105] G. Georgousis *et al.*, "Strain sensing in polymer/carbon nanotube composites by electrical resistance measurement," *Composites Part B: Engineering*, vol. 68, pp. 162-169, 2015.
- [106] X. Wang, M. Qu, K. Wu, D. W. Schubert, and X. Liu, "High sensitive electrospun thermoplastic polyurethane/carbon nanotubes strain sensor fitting by a novel optimization empirical model," *Advanced Composites and Hybrid Materials*, vol. 6, no. 2, p. 63, 2023.
- [107] J. Muñoz-Chilito *et al.*, "Morphological Electrical and Hardness Characterization of Carbon Nanotube-Reinforced Thermoplastic Polyurethane (TPU) Nanocomposite Plates," *Molecules*, vol. 28, no. 8, p. 3598, 2023.
- [108] O. Saligheh, M. Forouharshad, R. Arasteh, R. Eslami-Farsani, R. Khajavi, and B. Yadollah Roudbari, "The effect of multi-walled carbon nanotubes on morphology, crystallinity and mechanical properties of PBT/MWCNT composite nanofibers," *Journal of Polymer Research*, vol. 20, pp. 1-6, 2013.
- [109] M. A. Saleemi, P. V. C. Yong, and E. H. Wong, "Investigation of antimicrobial activity and cytotoxicity of synthesized surfactant-modified carbon nanotubes/polyurethane electrospun nanofibers," *Nano-Structures & Nano-Objects*, vol. 24, p. 100612, 2020.
- [110] A. Arıcı, "Elektrospin metodu ile hazırlanan polimer/MWCNT nanofiberlerin özelliklerine MWCNT çapının ve uzunluğunun etkisinin araştırılması," Necmettin Erbakan University (Turkey), 2018.
- [111] K. Nasouri, A. M. Shoushtari, A. Kafilou, H. Bahrambeygi, and A. Rabbi, "Single- wall carbon nanotubes dispersion behavior and its effects on the morphological and mechanical properties of the electrospun nanofibers," *Polymer Composites*, vol. 33, no. 11, pp. 1951-1959, 2012.
- [112] İ. YILGÖR and E. YILGÖR, "Polyurethanes: Design, synthesis and structure-property behavior of versatile materials," *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, vol. 48, no. 5, pp. 425-445, 2020.
- [113] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, R. Saito, and A. Jorio, "Raman spectroscopy of carbon nanotubes," *Physics reports*, vol. 409, no. 2, pp. 47-99, 2005.
- [114] D. R. Scheuing and J. G. Weers, "A Fourier transform infrared spectroscopic study of dodecyltrimethylammonium chloride/sodium dodecyl sulfate surfactant mixtures," *Langmuir*, vol. 6, no. 3, pp. 665-671, 1990.

ÖZGEÇMİŞ

RUŞEN İNAN

Öğrenim Bilgisi

Doktora (2017-2024)	Marmara Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi/Tekstil Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans (2009-2011)	Marmara Üniversitesi/ Teknik Eğitim Fakültesi/Tekstil Eğitimi Anabilim Dalı Tez Adı: Elektro çekim yöntemi işlem parametrelerinin polivinilalkol (PVA) nanoliflerin yapısal özelliklerine etkileri (2011) Tez Danışmanı:Doç.Dr.İsmail Usta
Lisans (1998-2002)	Marmara Üniversitesi/Teknik Eğitim Fakültesi/Tekstil Eğitimi Bölümü/Tekstil Öğretmenliği Pr.

İş Deneyimi

Öğretim Görevlisi (2008-Halen)	İstanbul Arel Üniversitesi/ Meslek Yüksekokulu /Tasarım Bölümü/Moda Tasarımı Programı
Planlama Uzmanı (2006-2008)	Y Momentum Tekstil
Planlama Uzmanı (2005-2006)	Günkar Tekstil
Planlama Uzmanı (2003-2005)	Örma Tekstil
Planlama Uzmanı (2002-2003)	Hansel tekstil

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings)

basılan bildiriler :

- İNAN RUŞEN,Oz Ceviz Nuray (2019). Denim Ürünlerde Yapılan Yenilikler

- Vekullanıcılar Üzerine Bir Araştırma. 6. Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Kongresi, 1(1), 329-339. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5063863) 1. İNAN RUŞEN,Oz Ceviz Nuray (2019).
2. Spor Teknik Tekstilleri Ve Üniversite Öğrencileri arasında Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. 6. Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Kongresi, 1(1), 271-280. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5063857) CEVİZ NURAY,İNAN RUŞEN (2018). Examination Of Sound Absorption Properties Of Fibers Used İntransportation Technical Textiles. 1. INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENTTRANSPORTATION SYSTEMS BANU – ITSC’ 18, 441-442. (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4264955)
3. İNAN RUŞEN,CEVİZ NURAY (2018). Investigation Of The Properties Of Fibers Used İn Automotivetechical Textiles. 1. INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS BANU – ITSC’ 18, 417-432. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4264952)
4. İNAN RUŞEN,YÜKSEK METİN,TEZCAN ERDEM,SALTIK DERYA,USTA İSMAİL,ÖZEN MUSTAFA SABRİ,YOLAY ONUR,UZUN MUHAMMET (2018). Investigation Of Antibacterial Properties Of Polyurethane-Chlorhex Microfibers Obtained By Elektroegirme Method. 8th International Istanbul Textile Conference: Evaluation Of Technical Textiles (ETT2018) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4293198).

D. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler :

1. İnan Ruşen, Oz Ceviz Nuray, Tektaş Necla (2021). Çevre Bilinci Işığında Denim Ürünlerin Üniversite Öğrencileri Açısından Değerlendirilmesi. Social Sciences Studies Journal, 7(92), 5624- 5634.
2. İsmail Usta, Ruşen Parlak, Özgür Coşkun (2003). Pamuklu Siro Spun ve Konvansiyonel İpliklerin Fiziksel Özelliklerinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi. Tekstil ve Teknik, 220(220), 194-200.