

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**PRES KALIPLAMA PESTİLİNİN MEKANİK VE ELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NURAY CANBULAT

BALIKESİR, MAYIS-2019

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**



**PRES KALIPLAMA PESTİLİNİN MEKANİK VE ELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NURAY CANBULAT

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Tayfun UZUNOĞLU (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. Mehmet BAYIRLI

Dr. Öğr. Üyesi Sema ÇARIKÇI

BALIKESİR, MAYIS-2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

NURAY CANBULAT tarafından hazırlanan "PRES KALIPLAMA PESTİLİNİN MEKANİK VE ELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 31.05.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Tayfun UZUNOĞLU

Üye
Prof. Dr. Mehmet BAYIRLI

Üye
Dr. Öğretim Üyesi Sema ÇARIKÇI

.....

M. Bayırlı
.....

.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

**PRES KALIPLAMA PESTİLİNİN MEKANİK VE ELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
NURAY CANBULAT
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. TAYFUN UZUNOĞLU)

BALIKESİR, MAYIS - 2019

Bu çalışmada; standart, organik birleştirici madde katkılı ve tek duvarlı karbon nanotüp katkılı kompozit malzemelerin mukavemet ve elektriksel özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Malzemenin dayanıklılığı çekme testleri ile ölçülürken, elektrik özellikleri ise yüksek hızlı akım-voltaj ölçümleri ile belirlenmiştir. Birleştirici madde katkısı malzemenin mekanik özellikleri için önemli derecede iyileştirme sunarken, tek duvarlı karbon nanotüp katkısı malzemenin doğru akım iletkenliğini yalıtkanlık derecesinden yarıiletken seviyelerine arttırmıştır. Aynı zamanda elektrik iletkenliğinin perkolasyon teorisine uyduğu deneysel olarak ortaya konulmuştur. Malzemenin doğru akım iletkenliğinin yanında dielektrik sabiti, dielektrik kayıp faktörü ve kayıp tanjantı gibi özellikler de çeşitli frekans değerleri için elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Tek duvarlı karbon nanotüp, eğme-çekme testi, doğru akım iletkenliği, perkolasyon teorisi, dielektrik kayıp faktörü, kayıp tanjantı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF SHEET MOULDING COMPOUND

MSC THESIS

NURAY CANBULAT

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

PHYSICS

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. TAYFUN UZUNOĞLU)

BALIKESİR, MAY 2019

In this study, the strength and electrical properties of specially manufactured standard, organic coupling agent reinforced and single-wall carbon nanotubes modified composite materials were investigated comparatively. While the durability of the material was measured by tensile tests, the electrical properties were determined by high-speed current-voltage measurements. While the coupling agent contribution offers a significant improvement in the mechanical properties of the material, the single-wall carbon nanotubes contribution increases the direct current conductivity of the material from the degree of isolation to the semiconductor levels. It was also experimentally revealed that electrical conductivity conforms to the percolation theory. In addition to the direct current conductivity of the material, properties such as dielectric constant, dielectric loss factor and loss tangent were obtained for various frequency values.

KEYWORDS: Single walled carbon nanotube, bending-tensile test, direct current conductivity, percolation theory, dielectric loss factor, loss tangent.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER	3
2.1 Karbon Nanotüp ve Temel Özellikleri	3
2.2 Elektriksel Özellikler ve Ölçme Yöntemleri	10
2.3 Mekanik Özellikler	14
3. MATERYAL VE METOT	17
3.1 Materyal.....	17
3.2 Metot.....	18
4. BULGULAR VE SONUÇ	20
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	31
6. KAYNAKLAR.....	33

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Buckyball (Fulleren) yapıların bağ yapısı.	3
Şekil 2.2: Grafenden karbon nanotüp oluşumu.	4
Şekil 2.3: Çok duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi.	5
Şekil 2.4: Tek duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi.	6
Şekil 2.5: (A) koltuk, (B) zigzag ve (C) kiral nanotüpler.	7
Şekil 2.6: Koltuk ve zig-zag nanotüplerin vektörel yönelimleri.	8
Şekil 2.7: Perkolasyon teorisi.	11
Şekil 2.8: Akım-voltaj ölçümleri için kullanılan çubuk geometrisi	11
Şekil 2.9: Dielektrik ölçümler için kullanılan numune geometrisi.	13
Şekil 2.10: Çekme testinde kullanılan kompozit çubuklar	14
Şekil 2.11: Çekme testinde kullanılan test makinesi.	15
Şekil 3.1: Üretilen SMC numunelerin içerdiği bileşenler.	17
Şekil 4.1: Standart SMC numune için gerilme kuvveti-boyca uzama değişimi	20
Şekil 4.2: B8003 katkılı SMC numune için gerilme kuvveti-boyca uzama değişimi	21
Şekil 4.3: TDKNT ile güçlendirilmiş SMC numune için gerilme kuvveti-boyca uzama değişimi	22
Şekil 4.4: Üretilen SMC numunelerin içerdiği bileşenler.	24
Şekil 4.5: Standart malzeme için elektriksel iletkenliğin uygulanan DC voltajı ile değişimi	25
Şekil 4.6: B8003 ile katkılanan malzeme için elektriksel iletkenliğin uygulanan geometrisi	26
Şekil 4.7: TDKNT ile güçlendirilen malzeme için elektriksel iletkenliğin uygulanan DC voltajı ile değişimi	26
Şekil 4.8: Malzemelerin dielektrik sabitlerinin frekans ile değişimi.	27
Şekil 4.9: Malzemelerin dielektrik kayıp faktörlerinin frekans ile değişimi.	28
Şekil 4.10: Malzemelerin dielektrik dağılma faktörlerinin frekans ile değişimi.	30

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin karşılaştırılması.....	6
Tablo 4.1: Malzemelerin üç farklı bölgede hesaplanan Young modülleri.....	22
Tablo 4.2: Dielektrik sabiti-frekans değişimi için yapılan fitteki katsayılar.....	28
Tablo 4.3: Dielektrik kayıp faktörü-frekans değişimi için yapılan fitteki katsayılar.....	29
Tablo 4.4: Dielektrik dağılma faktörü- frekans değişimi için yapılan fitteki katsayılar.....	30

SEMBOL LİSTESİ

ρ : Özdirenç

R: Direnç

σ : Elektriksel iletkenlik

ϵ_0 : Boşluğun dielektrik sabiti

C: Kapasitans

ω : Açısal frekans

V: Gerilim

I: Akım

MPa: Mega Paskal

ÖNSÖZ

Bu çalışma boyunca bana desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. TAYFUN UZUNOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bugünlere gelmem de büyük pay sahibi olan sevgili annem Mücella CANBULAT'a teşekkürü bir borç bilirim.

1. GİRİŞ

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren tüm dünyada etkisini gösteren teknolojik ve bilimsel gelişmeler teknik alanda da gücünü göstermiştir. Bu yaşanan gelişmeler sanayi, endüstri, enerji, doğalgaz ve havacılık gibi birçok farklı alanda yeni atılımları beraberinde getirmiştir [1, 2]. Özellikle sanayide ucuz, uzun ömürlü ve dayanıklı malzemeye olan ihtiyaç, bilim insanlarını araştırmaya yöneltmiştir. Yapılan araştırma ve incelemeler sonucunda aranan bu özellikler, iki farklı malzemenin karıştırılması ve tek bir malzemenin elde edilmesi ile başarıya ulaşmıştır. Kompozit adı verilen bu yeni malzeme, kendisini oluşturan bileşenlerin uygun özelliklerini barındırabildiği gibi yeni bir özellik de ortaya koyabilmektedir. Pek çok üstün ve sıra dışı özelliklere sahip olan kompozitler otomotiv sektöründen boya sanayisine, rüzgâr enerjisinden gemi yapımına kadar birçok sektörde karşımıza çıkmaktadır [3, 4].

İlk örneklerine M.Ö. 2000'li yıllarda Mısır'da [5] rastlanan kompozit malzemelerin gelişim süreci esasen 1900'lü yılların başında hızlanmıştır [6]. Kompozitlerin en önemli bileşenlerinden biri olan cam elyafın bulunmasıyla [7] kompozit malzemeler, Kevlar [8] adı verilen bir aramid elyaf ile askeri uygulamalarda kendine yer bulmaya başlamıştır [9]. 21. yüzyıla gelindiğinde hafif ve dayanıklı olmaları sebebiyle otomobil ve uçak parçalarında [10] kullanılmaya kompozit malzemeler yapısı matris (ana faz) ve takviye fazı olmak üzere başlıca iki kısımdan oluşmaktadır [11]. Matris, kompozit malzemeyi bir arada tutan, tasarlanan madde formunu koruyan, malzemenin yüzey kalitesini belirleyen ve kompozit yapının çoğunluğunu oluşturan yapı olmasına rağmen kompozitin mekanik ve elektrik özelliklerini belirleyen kısım takviye fazıdır. Özel yapıları ve sahip oldukları benzersiz özellikler nedeniyle karbon nanotüpler, son yılların gözde takviye elemanları olarak dünya çapında büyük ilgi görmüştür [12-15]. 1993 yılında Iijima [16] tarafından keşfedilen tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT), karbon içerikli takviye ailesinin en dikkat çeken bileşenidir. Eşsiz elektrik ve elektronik özelliklere, elmadan daha yüksek termal iletkenliğe sahip olan TDKNT, aynı zamanda malzemenin mukavemetini de belirli ölçülerde arttıran özel bir maddedir [17].

Saf hali yalıtkan olan kompozitlerin elektriksel iletkenlikleri karbon nanotüp katkısıyla yarıiletken hatta yüksek nanotüp konsantrasyonlarında ise metal seviyelerine ulaşabilmektedir. Allaoui ve arkadaşları [18] çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) katkılı epoksi tabanlı kompozitlerin elektriksel iletkenliğini % 1'lik nanotüp konsantrasyonunda 10^{-4} S/cm ve % 4'lik nanotüp konsantrasyonda 10^{-3} S/cm olarak elde ederken, Ounaies ve arkadaşları [19] ise tek duvarlı karbon nanotüp takviyeli kompozitlerin doğru akım iletkenliğini % 1'lik nanotüp konsantrasyonunda 10^{-6} S/cm olarak elde etmiştir. Kingston ve arkadaşları ise % 0,2 gibi çok düşük TDKNT konsantrasyonunda 10^{-1} S/cm gibi yüksek iletken değerine ulaşmıştır [20]. Dinilovic ve Rasuo ise kompozitlerin dielektrik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında 100 kHz'lik frekans değerinde malzemenin dielektrik sabitinin 2,5 ve kayıp tanjant değerinin $45 \cdot 10^{-4}$ olduğunu bulmuşlardır [21].

TDKNT ile güçlendirilmiş kompozitlerde, mukavemeti ölçmek için yapılan çekme testinde çekme dayanımının 60 GPa ve elastik modülün 1 TPa olduğu Grujicic ve arkadaşları tarafından rapor edilmiştir [22]. TDKNT katkılı kompozitlerin incelendiği bir başka çalışmada ise 484 MPa'lık çekme dayanımına karşılık gelen elastisite modülü 76,87 GPa olarak hesaplanmıştır [23].

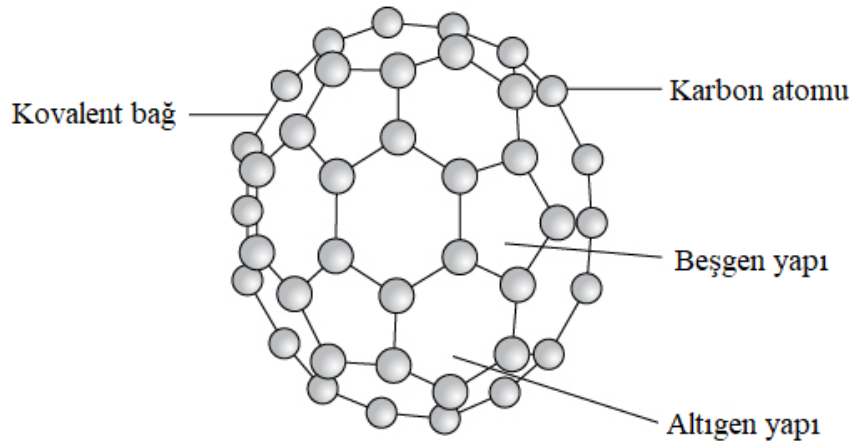
Çalışma kapsamında standart pres kalıplama pestili ya da ticari piyasada kullanılan adıyla sheet moulding compound (SMC) malzemeye B8003 kodlu amonyaktan türetilmiş organik bileşik ve tek duvarlı karbon nanotüp katkılanarak 3 farklı kompozit malzeme elde edilmiş ve bu malzemelerin karakterizasyonu için mekanik ve elektriksel ölçümler alınmıştır. Mekanik özelliklerini incelemek için çekme testleri numuneye uygulanırken her bir numune için Young modülü ve çekme dayanımı elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Elektrik özelliklerini belirlemek için ise yüksek hızlı akım voltaj ölçümleri kullanılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar literatürdeki değerler ile karşılaştırılıp yorumlanmıştır. Bunun yanı sıra numunelerin dielektrik karakterizasyonu da frekansa bağlı olarak incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1 Karbon Nanotüp ve Temel Özellikleri

Karbon atomunun elektronik konfigürasyonunda ikisi s kabuğunda ikisi de p kabuğunda olmak üzere 4 tane değerlik elektronu bulunur. Karbon atomunun 2s ve 2p seviyeleri arasındaki küçük enerji farkı, karbon atomunun farklı malzemelerdeki sp^1 , sp^2 ve sp^3 gibi birkaç hibridizasyon durumunda bulunmasına izin verir. Bu durum karbon atomlarının farklı boyutlardaki yapılarda çeşitli şekillerde düzenlenmelerini sağlamaktadır. 3 boyutta elmas, 2 boyutta grafit, 1 boyutta karbon nanotüp ve sıfır boyutta buckyball (fulleren) bu yapılara örnektir.

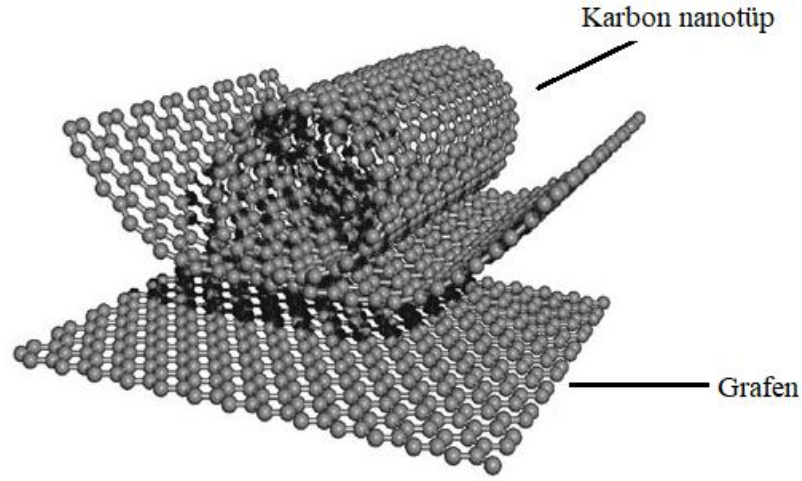
Şekil 2.1'de görülen Buckyball adı verilen bu yeni yapılar, karbon atomlarının beşgen (pentagon) ve altıgen (heksagon) yapılarda kovalent bağ ile bir araya gelmesi sonucu meydana gelmektedir [24]. Rick Smalley ve arkadaşları tarafından, 1984 yılında lazer ile grafiti buharlaştırarak yaptığı çalışmalarda ilk kez gözlemlenen bu yapıları bir arada tutan kovalent bağ yapıya dayanıklılık kazandırmaktadır [25].



Şekil 2.1: Buckyball (Fulleren) yapıların bağ yapısı.

Karbon nanotüpler ise 1990'ların başından itibaren öncü çalışmalar ile sürekli olarak araştırılmıştır [16]. Karbon nanotüpler, Şekil 2. 2'de de görüldüğü gibi silindirik

oluşturmak üzere sarılmış grafen tabakaları olarak düşünülebilir. Tek bir grafen tabakası sarıldığında tek duvarlı karbon nanotüp meydana gelirken iki veya daha fazla sayıda grafenin sarılması çok duvarlı karbon nanotübün oluşmasına neden olmaktadır.

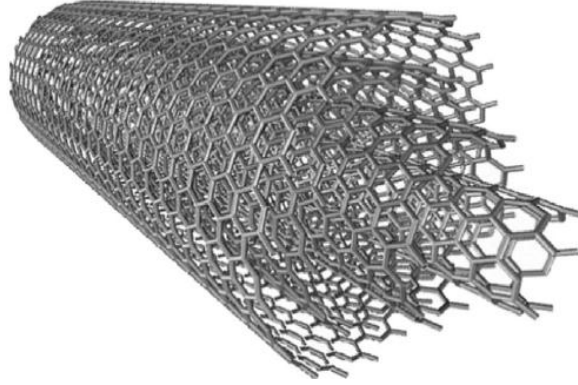


Şekil 2.2: Grafenden karbon nanotüp oluşumu [26].

Karbon nanotüpler yüksek esneklik modülüne sahip, kırılmaya karşı dayanıklı, çok hafif yapılardır [27]. Bir karbon nanotüp burkulabilir, düzleştirilebilir, küçük daireler şeklinde kıvrılabilmekte ve kırılma göstermeden yüksek oranlarda uzayabilmektedir. Uzunluk ve çap değerlerine göre bu yapıların fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullandıkları uygulamalara göre değiştirilebilmektedir. 50 bin tanesi yan yana geldiğinde ancak bir saç teli kadar kalınlığa sahip olabilen karbon nanotüpler sahip oldukları kimyasal bağın yapısı sayesinde kurşun geçirmez özelliği olan Kevlar malzemesinin mukavemet özellikleri dahi karbon nanotüpler ile kıyaslanamayacak derecede düşük kalmaktadır [28].

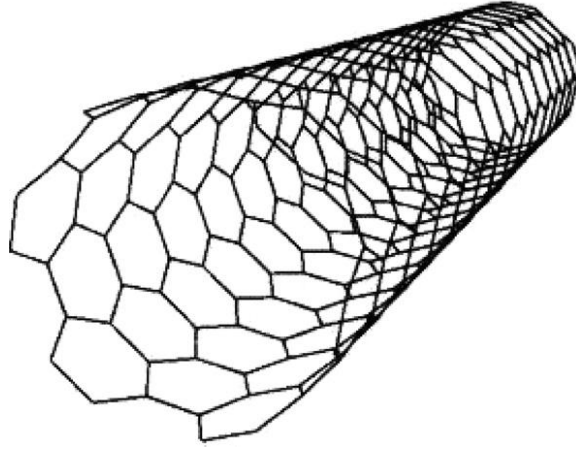
Karbon nanotüpler, içerdikleri grafen tabakası sayısına ve üretim yöntemine bağlı olarak çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) ve tek duvarlı karbon nanotüp (TDKNT) olmak üzere iki farklı grupta sınıflandırılmaktadırlar [29]. Şekil 2.3’de görülen çok duvarlı karbon nanotüpler, 1991 yılında bir karbon ark deşarjında yüksek çözünürlüklü bir transmisyon elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak Iijima ve arkadaşları tarafından keşfedilmişlerdir [16]. Çok katmanlı karbon nanotüpler üst üste birkaç grafitin konulup katlanmasıyla elde edilen iç içe geçmiş yapılardır.

Burada her iki katman arası mesafe yaklaşık 0,34 nm kadardır. Çok katmanlı karbon nanotüplerin yarıçapları 5-20 nm boyutları arasındadır.



Şekil 2.3: Çok duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi [30].

Tek katmanlı nanotüplerin gözlenmesi ise çok katmanlı karbon nanotüplerin keşfinden iki yıl sonra Bethune ve meslektaşları tarafından gerçekleştirilmiştir [31]. İlk geliştirilen nano kompozitlerde, malzemelerin mekanik, elektrik ve termal özelliklerini geliştirmek için karbon nano fiber, silika ve kil gibi nano ölçekteki katkı maddeleri kullanılmıştır. Yüksek esnekliğe, düşük kütle yoğunluğuna ve etkili homojen görünüş oranına sahip olan karbon nanotüpler alışlageldik katkı malzemelerinin eksikliklerini gidermek ve malzemeyi daha iyi bir hale getirmek için zamanla mükemmel birer aday haline gelmişlerdir. Şekil 2. 4’de görülen tek duvarlı karbon nanotüplerin teorik ve deneysel çalışmaları sonucunda yüksek gerilme modüllerine ve gerilme kuvvetlerine sahip oldukları ispatlanmıştır.

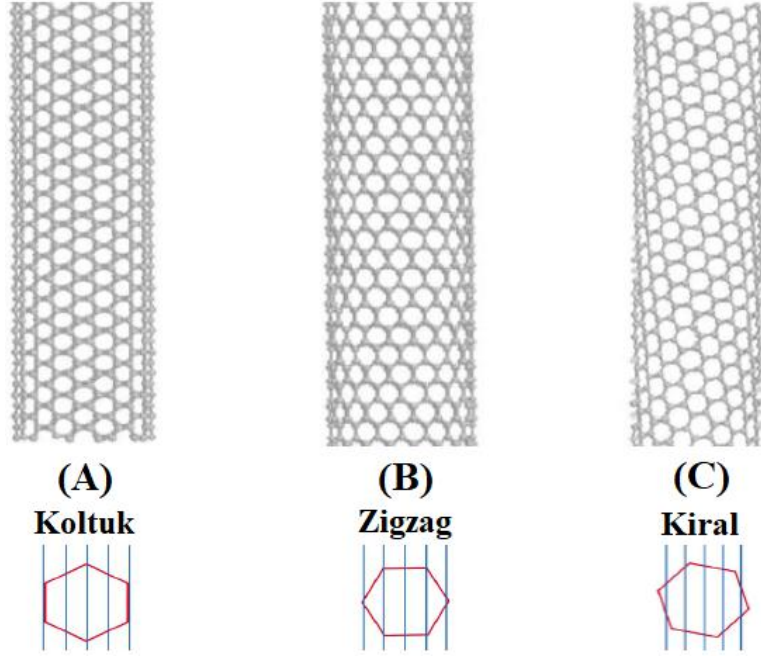


Şekil 2.4: Tek duvarlı karbon nanotüpün şematik gösterimi [32].

Tablo 2.1: Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüplerin karşılaştırılması.

Tek Duvarlı Karbon Nanotüp	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
Tekli grafen tabakası	Çoklu grafen tabakası
Katalizör olmadan üretilemez.	Katalizör olmadan da üretilbilir.
Üç boyutlu yapısını büyütmek zordur, büyüme esnasında uygun şartlar gerektirmektedir.	Üç boyutlu yapısını büyütmek kolaydır.
Saflık derecesi düşüktür.	Saflık derecesi yüksektir.
Karakterizasyon ve hesaplamaları kolaydır.	Karakterizasyon ve hesaplamaların karmaşık bir yapısı vardır.
Esnektir kolayca bükülebilir.	Bükülebilme yeteneği düşüktür.

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi zigzag, koltuk (armchair) ve kiral (chiral) olmak üzere üç şekilde sentezlenen tek duvarlı karbon nanotüpün ortalama çapı yaklaşık olarak 1,2-1,4 nm dir ve çapın değeri fabrikasyon sırasında istenilen şekilde ayarlanabilir [27]. Zigzag ve koltuk ve kiral terimleri, nanotüplerden alınan kesitlerin görünüşlerinden ortaya çıkmıştır. Zigzag ve koltuk yapısına sahip nanotüplerin aynadaki görüntüleri gerçek görüntüleri ile aynı iken kiral TDNT’lerin aynadaki yansımaları kendileri ile örtüşmemektedir [33].



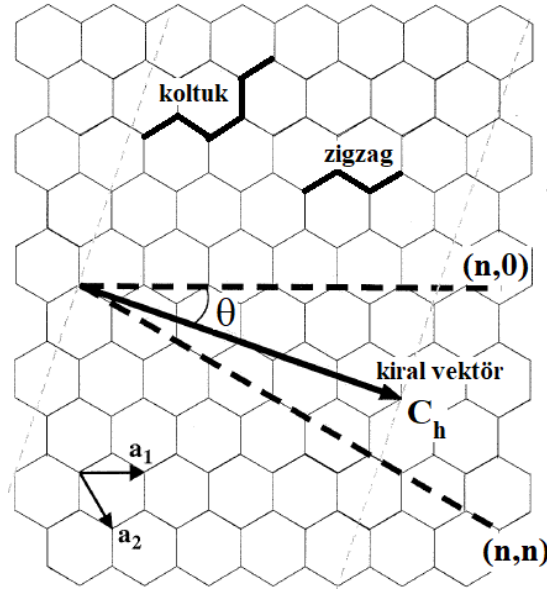
Şekil 2.5: (A) koltuk, (B) zigzag ve (C) kiral nanotüpler [34].

Nanotüplerin atomik yapısı, kiral vektör C_h ve kiral açı θ ile tanımlanan tüp kiralitesi veya sarmallığı ile tanımlanmaktadır. Kiral vektör C_h [35],

$$\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \quad (2.1)$$

şeklinde tanımlanır. Buradaki n ve m tamsayıları, altıgen şeklindeki örgünün zig-zag karbon bağları boyunca basamak sayılarıdır. a_1 ve a_2 ise birim vektörlerdir.

Kiral açı ise tüpteki "büküm" miktarını belirler. Kiral açının $\theta = 0^\circ$, $0^\circ < \theta < 30^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ olduğu durumlarda üç sınırlayıcı durum mevcuttur. Bu durumlar, nanotüp çevresindeki karbon bağlarının geometrisine dayanarak $\theta = 0^\circ$ durumunda zigzag ve $\theta = 30^\circ$ durumunda ise koltuk durumudur. Kiral açının 0° ve 30° arasındaki değerlerinde ise kiral nanotüp durumu meydana gelmektedir. Koltuk ve zigzag nanotüplerin yapıları arasındaki fark, Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Yapılardan $(n, 0)$ doğrultusu zigzag nanotüpü ifade ederken (n, n) doğrultusu koltuk nanotüpü tanımlamaktadır. Kiral nanotüp ise (n, m) doğrultusundadır. Zigzag şeklinde $n/3$ ifadesi tamsayı ise karbon nanotüpler metalik özellik gösterirken tamsayı olmaması durumunda ise yarıiletken özellik gösterirler. Kiral yapıda ise $(2n+m)/3$ değerinin tamsayı olma durumu yapıya metalik özellik kazandırır [36].



Şekil 2.6: Koltuk ve zig-zag nanotüplerin vektörel yönelimleri [36].

Karbon nanotüplerin farklı yarıçap ve uzunluklardaki düzensiz dağılımları ve van der Waals etkileşimleri nedeniyle malzeme içerisinde homojen bir dağılım oluşturulamaması bir problem olarak ortaya çıkmıştır [37]. Arayüzey bağlanmasını ve malzemedeki nanotüplerin dağılımını geliştirmek amacıyla, karbon nanotüplerin kimyasal fonksiyonizasyonları yaygın olarak kullanılmaktadır [38,39].

Kompozit malzemelerin mekanik, termal, manyetik vb. özelliklerini geliştirmek amacıyla kompozit malzemelere karbon nanotüp ekleme fikri kompozit malzeme sektörüne yeni bir bakış açısı getirmiştir [40]. Karbon nanotüpler, sahip oldukları benzersiz özellikler nedeniyle, çok fonksiyonlu nanokompozitlerin tasarımı için geleneksel takviye malzemelerini değiştirmek veya onlara yardımcı olmak için mükemmel bir aday haline gelmişlerdir. Karbon nanotüplerin katkı ve dolgu malzemesi olarak kullanıldığı ilk polimer kompozit malzeme Ajayan ve arkadaşları tarafından bildirilmiştir [41]. 2000’li yılların başından itibaren ise karbon nanotüplerin kompozitlerde kullanıldığını göstermekteyiz [42, 43]. Literatürde yapılan araştırmalar, karbon nanotüplerin kompozit malzemelere çeşitli oranlarda eklenmesinin, malzemenin esneklik modüllerini, elektrik iletkenliklerini, dielektrik özelliklerini, kimyasal direnç ve gerilme mukavemetlerini önemli biçimde etkilediğini ortaya koymuştur [44, 45].

Son zamanlarda karbon nanotüplerin iddialı olduğu ve sıklıkla kullanıldığı bir diğer alan da elektroniktir. Tek bir duvardaki bir karbon atomunun düzenlemesiyle doğrudan ilişkili olan kiralitenin (tabakaların yuvarlanma yönü) malzemenin mekanik özelliklerini [46, 47] önemli biçimde etkilemesinin yanı sıra karbon nanotüplerin iletkenlik özelliklerini üzerinde de ciddi bir etkisinin olduğu ortaya konulmuştur [48]. Karbon nanotüpler, elektronları önemli bir saçılmaya uğratmaksızın uzun yollar boyunca taşıyabilirler örneğin; metalik tek duvarlı karbon nanotüp için elektronik ortalama yol birkaç mikron basamağındadır. Benzer şekilde tek duvarlı karbon nanotüplerin ortalama fonon yol mesafeleri büyük olup yüksek termal iletkenliğe neden olmaktadır. Polimer kompozitlerde karbon nanotüpün iletken katkılama maddesi olarak kullanılması üzerine yapılan çalışmaların sayısı gittikçe artmaktadır yapılan bu çalışmalarda çok küçük katkılama yüzdelerinde bile elektriksel iletkenliğin birkaç basamak arttığı görülmüştür. Kompozit malzemelere karbon nanotüplerin eklenmesi ile bu malzemeler; elektro manyetik girişim koruma, elektrostatik boyama, yazdırılabilir devre kablolama ve şeffaf iletken kaplama gibi pek çok uygulama alanında kullanılabilir duruma gelmiştir.

Yarı iletken ya da metal doğasına uyabilen tek duvarlı karbon nanotüplerin sahip olduğu yüksek elektriksel iletkenlikleri, tek duvarlı karbon nanotüplerin her geçen gün ince film teknolojisinde daha çok söz sahibi olmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra ısıyı yüksek verimle iletebilme özelliğine sahip olmalarından dolayı güneş pili ve sensör gibi pek çok elektronik uygulamanın temelini oluşturmaktadırlar [49-50].

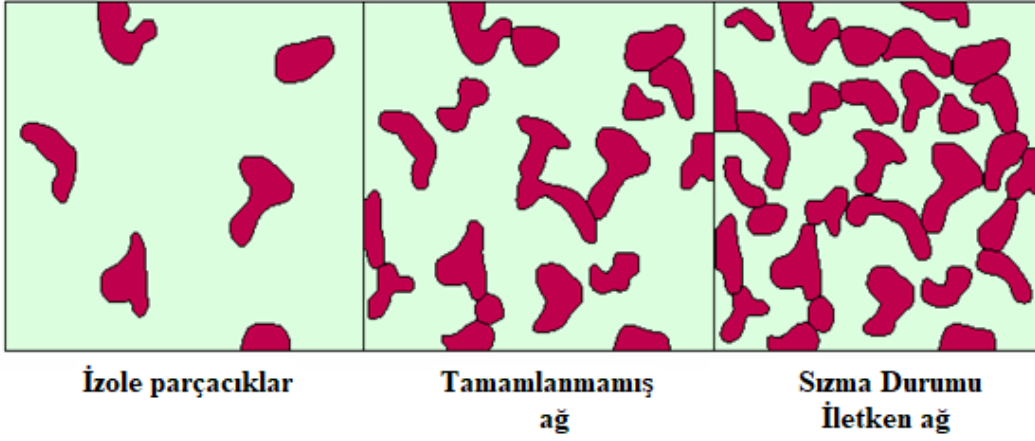
Karbon nanotüpler, yapısal parametrelerine bağlı olarak çeşitli uygulamalar için işlevsel hale getirilebilir. Genellikle oda sıcaklığında ve daha yüksek sıcaklıklardaki uygulamalarda kullanılan karbon nanotüpler, geniş yüzeyleri, küçük boyutları ve hızlı yanıt verme süreleri gibi özellikleri sayesinde yaygın biçimde sensör olarak kullanılmaktadırlar [49]. Bunun yanı sıra, telekomünikasyonda güç kesintisinden korunmaya yönelik durumlarda, yüksek dayanıklılıkları nedeniyle mikroskop uçlarında ve kimyasal seçiciliğinden dolayı seçilmiş görüntüler almak için kimyasal kuvvet mikroskoplarında kullanılmaktadırlar [51]. Işığı doğrudan elektrik akımına dönüştüren güneş hücreleri iki hücrelidir ve üzerine düşen ışığın bir kısmını geri yansıtılmaktadır. Karbon nanotüpten yararlanılarak yapılan güneş hücreleri üç

hücreli olmakla birlikte üzerlerine düşen ışığın neredeyse hepsini yakalayabilmektedir bu yüzden üç boyutlu güneş hücrelerinde karbon nanotüp kullanımı artmaya başlamıştır. Bilim insanları kansere sebep olan ve vücut için zararlı maddeleri tespit edebilen ve bunun yanı sıra kanser ilaçlarının sağlam hücrelerdeki etkisini de algılayabilen bir algılayıcıyı karbon nanotüplerden yararlanarak geliştirilmiştir [52].

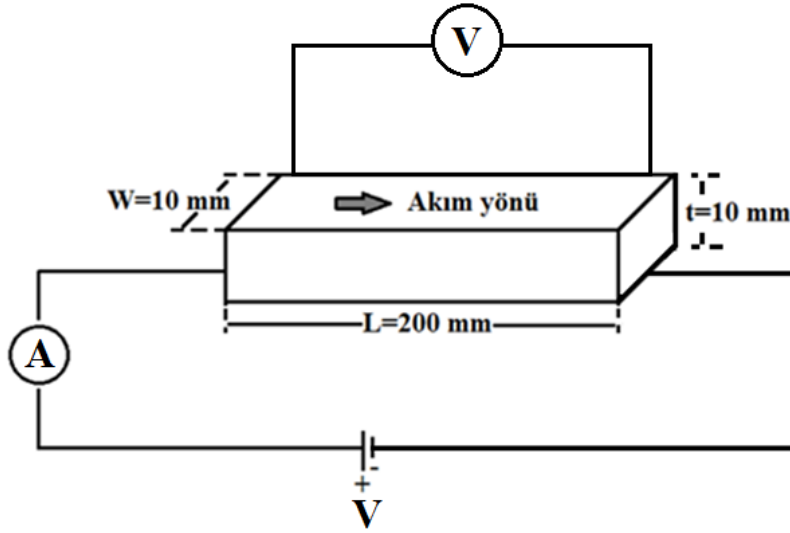
2.2 Elektriksel Özellikler ve Ölçme Yöntemleri

SMC kompozitler, kuvvetli mekanik özellikleri, termal kararlılığa sahip oluşu ve düşük maliyetleri nedeniyle pekçok uygulamada yaygın biçimde kullanılmaktadır [53]. Böyle özelliklerinin yanı sıra kompozitin elektrik özelliklerini bilmenin önemli ve gerekli olduğu birçok durum vardır. Standart üretilen kompozitler yalıtkan olmakla birlikte kullanıldıkları uygulama türüne göre elektrik özellikleri çeşitli maddelerin katkısı ile değiştirilebilir [54]. Katkılama maddesi ve polimer matrisi arasındaki etkileşim, katkılanan maddenin polimer içindeki dağılımı ve katkılama maddesinin özellikleri (çap, uzunluk, yüzey alanı, yüzey iletkenliği) kompozitlerin elektrik iletkenliğini önemli biçimde etkilemektedir.

Karbon nanotüp katkılı kompozitlerdeki elektrik iletkenliği açıklayan temel kuram Şekil 2.7’de basit bir anlatımla gösterilen sızma ya da perkolasyon teorisidir (Percolation theory). Çok düşük karbon nanotüp konsantrasyonlarında parçacıklar, izole parçacıklar veya kümeler halinde matris içinde dağılırlar. Bu durumda direnç azalsa da kompozit madde hala yalıtkan özelliğini devam ettirmektedir. Katkılama konsantrasyonu arttırılmaya başlayınca izole olan kümeler yavaş yavaş büyür. Sonunda matris içinde birbirine değen bölgeler oluşur ve iletken bir ağ meydana gelir. Polimerin yalıtkanlıktan iletkenliğe geçtiği bu nokta sızma eşiği (percolation threshold) veya kritik konsantrasyon olarak adlandırılır. Elektrik sızma eşiği değeri polimer matrisine, katkı yoğunluğuna ve kompozitin hazırlanma yöntemine bağlı olarak değişmektedir. ÇDKNT’lere göre daha üstün elektriksel özellikleri sahip TDKNT’lerin kompozitlere çok düşük oranlarda katkılanması sonucu bile bu sızma eşiği aşılır ve karbon nanotüpler kendilerine elektrik olarak iletken yollar meydana getirirler [55-57].



Şekil 2.7: Perkolasyon teorisi [58].



Şekil 2.8: Akım-voltaj ölçümleri için kullanılan çubuk geometrisi.

SMC numunelerin elektrik özelliklerini incelemek için numunelere yüksek hızlı akım-voltaj ölçümleri uygulanmıştır. Keithley 2400 marka akım-voltaj sağlayıcı kullanılan bu ölçümlerde, Şekil 2.8'de görülen boyu $L = 200$ mm, genişliği $W = 10$ mm ve kalınlığı $t = 10$ mm şekilde basit çubuk şeklindeki numuneler metal elektrotlar arasına yerleştirilir ve doğru akım (DC) voltajı her 500 ns'de bir numuneye uygulanarak küçük artışlar halinde 25 V değerine kadar arttırılır. Ölçüm sonunda akım-voltaj grafikleri elde edilir.

Düşük voltaj (V) değerlerinde akımın (I) voltaj ile değişimi doğrusal olup Ohm yasasına uymaktadır.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Burada R kompozit malzemenin direnci olup Ohm bölgesinde sabittir. Ancak artan voltaj ile birlikte lineer davranış bozulmaktadır. Kompozit malzeme içinde belirli bölgelerde rastgele dağılmış olan dolgu malzemesi, elyaf gibi yalıtkan doğaya sahip parçacıkların oluşturduğu heterojen yapının, voltaj arttıkça ve dolayısıyla malzeme ısındıkça, malzeme içinde saçılma merkezi gibi davranarak akım taşıyıcıları ile etkileşmesi, direnci arttıracığından akımın doğrusal bir davranış sergileyememesine neden olarak gösterilebileceği düşünülmektedir.

Direnci (R) ve numune boyutları bilinen bir malzemenin öz direnci (ρ) materyalin ayırt edici özelliği olup aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir:

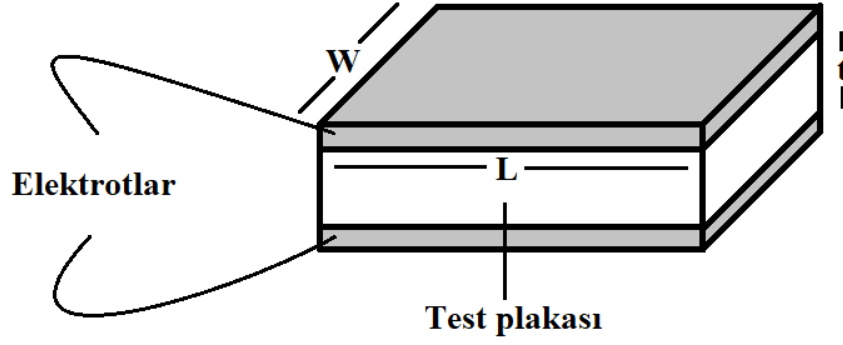
$$\rho = R \frac{t}{\left(\frac{L}{W}\right)} \quad (2.3)$$

Elektriksel iletkenlik (σ) ise, malzemenin içinden ne kadar akım geçtiğinin bir göstergesi olup öz direncin tersi şeklinde tanımlanabilir.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.4)$$

Yapılan çalışmada malzemelerin akım-voltaj karakteristikleri elde edilmiş ve mevcut denklemler yardımıyla elektriksel iletkenlik değerlerinin voltaj ile nasıl değiştiği hesaplanmıştır.

Bir kompozit malzemenin dielektrik özellikleri ise elektrik özelliklerinin temel bileşenlerinden biridir. Dielektrik sabiti, dielektrik kayıp faktörü ve dielektrik dağılma faktörü (kayıp tanjantı) gibi malzemenin dielektrik özelliklerini oda sıcaklığında değişen frekanslarda ölçmek için Şekil 2.9'da gösterilen boyu $L = 15$ mm, genişliği $W = 5$ mm ve kalınlığı $t = 2$ mm olan numuneler iki elektrot arasına sabitlenir ve paralel plakalı kondansatör elde edilir. Keysight U1733C bobin (L), kondansatör (C), direnç (R) ölçer (LCR metre) kullanılarak malzemenin sığası (C) doğrudan ölçülür.



Şekil 2.9: Dielektrik ölçümler için kullanılan numune geometrisi.

Ölçülen sığa değerini kullanarak denklem (2.5) yardımıyla kompozit malzemelerin bağıl geçirgenlikleri hesaplanır.

$$\epsilon = \frac{CL}{\epsilon_0 A} \quad (2.5)$$

Denklemden ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti olup değeri $8,85 \times 10^{-12}$ F/m dir.

Kompozit bir malzemeyi karakterize etmek için dielektrik kayıp faktörü ve kayıp tanjant değerlerini bilmek de gereklidir. Malzeme seçiminde önemli bir parametre olan dielektrik kayıp faktörü malzemeye verilen enerjinin malzeme içinde ne kadarının ısı olarak tüketildiğini veren bir parametre olup aşağıdaki gibi tanımlanabilir [59]:

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (2.6)$$

Burada σ , elektrik iletkenliği ve f , frekanstır.

Dielektrik kayıp faktörü veya kayıp tanjantı ise dielektrik kayıplardan dolayı elektromanyetik enerjinin ısı enerjisine dönüştüğünün ölçüsünü ifade eder ve dielektrik kayıp faktörünün dielektrik sabitine oranıdır.

$$\tan(\delta) = \epsilon'' / \epsilon \quad (2.7)$$

şeklinde verilir [60].

2.3 Mekanik Özellikler

Kompozit malzemeler kuvvet veya basınç altında formunu koruyan malzemelerden değildirler. Dolayısıyla dışarıdan bir kuvvet uygulanması durumunda biçim ve şekillerinde değişiklik göstererek deforme olmaya başlarlar. Polimer kompozitlerin mekanik özellikleri; numuneye uygulanan çekme, bükme, sıkıştırma gibi dış kuvvetlere verilen tepkisel davranışları kapsamaktadır.



Şekil 2.10: Çekme testinde kullanılan kompozit çubuklar.

Çekme testlerinin amacı, numunelerin uygulanan kuvvete göre davranışlarını ve elastisitetlerini tespit etmektir. Çekme testinin ilk aşamasında yani kuvvetin küçük olduğu bölgelerde gerilme kuvvetinin uzamaya göre değişimi lineer olup bu elastik bölgede malzemenin davranışı kompozit malzemeler için uyarlanan Hook yasasına uymaktadır [61].

$$s = E \cdot e \quad (2.8)$$

Burada E, malzemenin esnemeye karşı meydana getirdiği zorluğun ölçüsü olan elastisite modülü ya da diğer adıyla Young modülüdür. Denklemden s gerilmeyi ve e şekil değiştirme oranını temsil eder. Gerilme değeri bilgisayar yardımıyla elde edilirken şekil değiştirme oranı,

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.9)$$

şeklinde hesaplanır. Burada ΔL , malzemedeki uzama miktarı ve L_0 , malzemenin ilk boyudur.

Malzemeyi iki ucundan kavrayan çeneler birbirlerinden uzaklaştıkça yani gerilme kuvveti arttıkça malzeme plastik deformasyon bölgesine girer ve üzerinde bozulmalar meydana gelmeye başlar. Kuvvetin şiddeti iyice artırıldığında ise numune akma bölgesine girer ve nihayetinde de kopar.



Şekil 2.11: Çekme testinde kullanılan test makinesi.

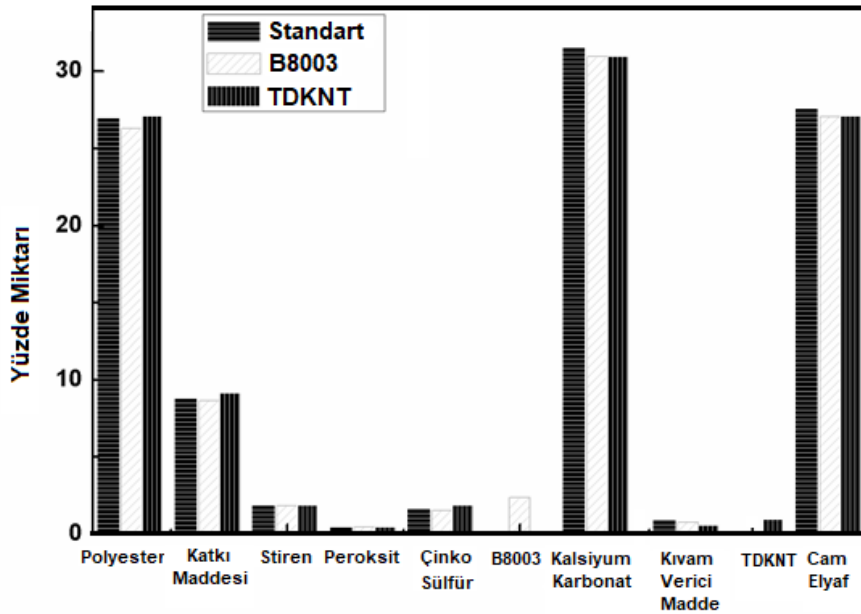
Standart çekme testleri, oda sıcaklığında (24 ± 1)°C'de Şekil 2.11'de görülen 250 kN kapasiteli Zwick Roell Z250 test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşağı ve yukarı hareket kabiliyeti olan iki kavrayıcı çene ve bunların hareketini sağlayan millerden oluşan çekme test ünitesinde çenelerin arasına numuneler yerleştirilmiştir. İki çeneye de tam oturtulduğundan emin olunduktan sonra çenelerin malzemeyi kavranması sağlanmıştır. Alttaki çene hareketsiz kalırken üstteki çene sabit test hızında yukarı doğru hareket ettirilerek malzemeye artan çekme kuvveti uygulanmaya başlamıştır. Ölçüm sistemine bağlı datalogger sayesinde çekme kuvvetine karşılık gelen uzama miktarları TestXpert yazılım programı ile tablolar halinde bilgisayara aktarılmıştır.

Elde edilen gerilme – boyca uzama grafikleri başlangıçtan malzeme kopana kadar bölge bölge incelenmiş olup dayanıklılıkları ve elastisitetleri yorumlanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Üretilen standart ve katkılı SMC numuneleri Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, % 26-27 doymamış polyester, % 8-9 katkı maddesi, % 1,8 stiren, % 0,4-0,5 peroksit, % 1,5-1,8 çinko sülfür, 31-31,5 kalsiyum karbonat, % 0,6-0,9 oranında kıvam verici madde ve % 27 oranında cam elyaf içermektedir. Katkı bileşenlerinden B8003 kodlu takviye elemanı Literatür Kimya şirketinden temin edilmiş olup uçucu organik bileşiklerden, 1-propilen glikol 2-metil eter asetat ve aromatik olmayan aminlerden sentezlenmiş olup aminler bir veya daha fazla hidrojen atomunun organik gruplar tarafından değiştirilmesiyle amonyaktan türetilmiş bir organik bileşik türüdür. Daha önce hiçbir SMC malzemede kullanılmayan bu bileşiğin malzemedeki oranı ağırlıkça % 3,2'dir. Diğer bileşen tek duvarlı karbon nanotüp de aynı şekilde Literatür Kimya şirketinden temin edilmiş olup malzemedeki oranı % 1 oranındadır.



Şekil 3.1: Üretilen SMC numunelerin içerdiği bileşenler.

Kompozitlerin üretim aşamasında ilk olarak termoset bir reçine olan doymamış polyester karıştırıcıda dolgu malzemeleri ile karıştırılmış ve kıvamlı bir

hamur halini almıştır. Daha sonra bu karışım, iki hareketli bıçak ile üstte ve altta bulunan hareketli taşıyıcı folyolara sürekli biçimde uygulanmıştır. Otomatik yapışmayı önlemek için malzeme hem üstte hem de alt kısımda bir polietilen film ile kaplanır. Hareketli bant üzerinde ilerleyen macunsu hamur üzerine kırılmış cam elyaflar gelişigüzel biçimde dökülmüştür. Elyafların malzeme içine tam anlamıyla gömülebilmesi ve dağılabilmesi için üzerlerine tekrar macun haline gelmiş olan hamur eklenmiştir. Polyesterin uçmasını engellemek için hazırlanan malzeme, taşıyıcı filmler arasına sıkıştırılmış ve sandviç haline gelmiştir. Hava boşluklarından sakınmak için rulolardan geçirilmiştir. Şekil vermek için fırına gönderilmiş ve sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur. Kıvamlı hale gelmeye başladığı an şekillendirme rulolarından geçirilmiştir ve nihai halini almıştır. Üretilen her numune için SMC bileşenleri, güvenilir ve gerçekçi sonuç için yaklaşık olarak aynı oranda kullanılmaya çalışılmıştır. Ayrıca oda sıcaklığı, cam elyaf oranı, karıştırma süresi ve matris sıcaklığı da karşılaştırmayı kolaylaştırmak için sabit tutulmuştur.

3.2 Metot

Bu çalışmada, kompozitlerin mekanik karakterizasyonu da çekme testleri ile incelenmiştir. Çekme testi için deneysel çubuklar Şekil 2.10'da gösterildiği gibi 10 mm x 200 mm boyutlarında kesilerek elde edilmiştir. Bu çubuklar, Zwick Roell Z250 test makinesinde bulunan çenelere yerleştirilir. Çeneler sabit hızla birbirinden ayrılırken malzemeye gerilme uygulanır ve malzeme uzamaya başlar. Ölçüm sonucunda gerilme-uzama grafiği elde edilir. Bu grafiklerin eğiminden malzemelerin Young modülleri elde edilir ve elastikiyetleri hesaplanır.

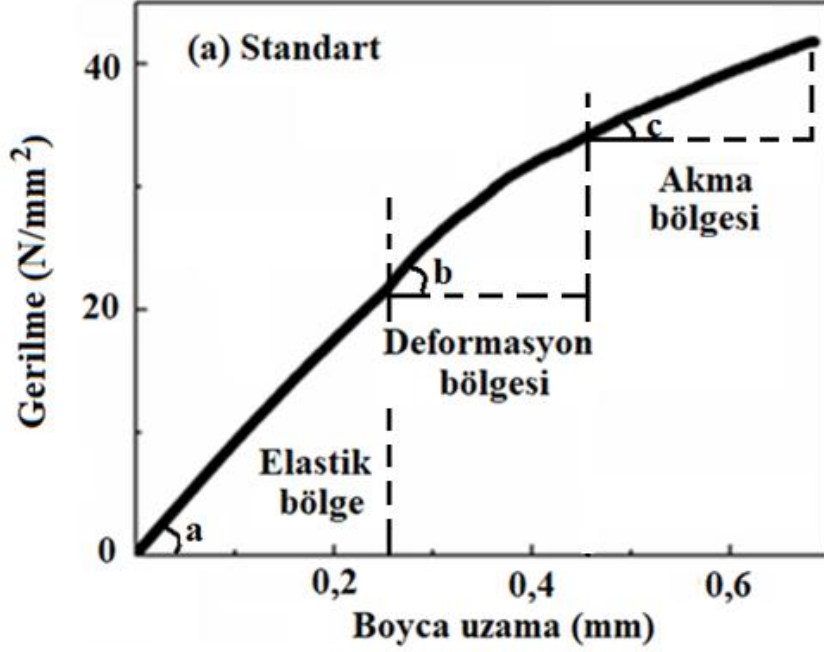
Elektrik özellikler ise akım-voltaj ölçümleri ile belirlenmiştir. Çubuk geometriye sahip numuneler, iki elektrot arasına yerleştirilmiş ve 25 Volt değerine kadar kademeli olarak artan voltaj değerine karşılık gelen akım değerlerinin grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğin eğiminin tersi direnci vermektedir. Direnç değerleri ve numunenin boyutları kullanılarak da malzemelerin özdirenç değerleri hesaplanmıştır. Özdirençin tersi alınarak elektrik iletkenliğin voltaja göre değişimi elde edilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında ilk olarak malzemelerin sığa değerleri LCR metre ile ölçülmüştür. Elde edilen sığa değerlerinden dielektrik sabitleri denklem (2.5)

yardımıyla hesaplanmıştır. Daha sonra elektrik iletkenlik ve değişen frekans değerleri kullanılarak denklem (2.6) yardımıyla dielektrik kayıp faktörü hesaplanmıştır. Bulunan iki niceliği yani dielektrik kayıp faktörünü ve malzemelerin dielektrik katsayılarını da birbirlerine oranlayarak kayıp tanjant oranları elde edilmiştir.

4. BULGULAR VE SONUÇ

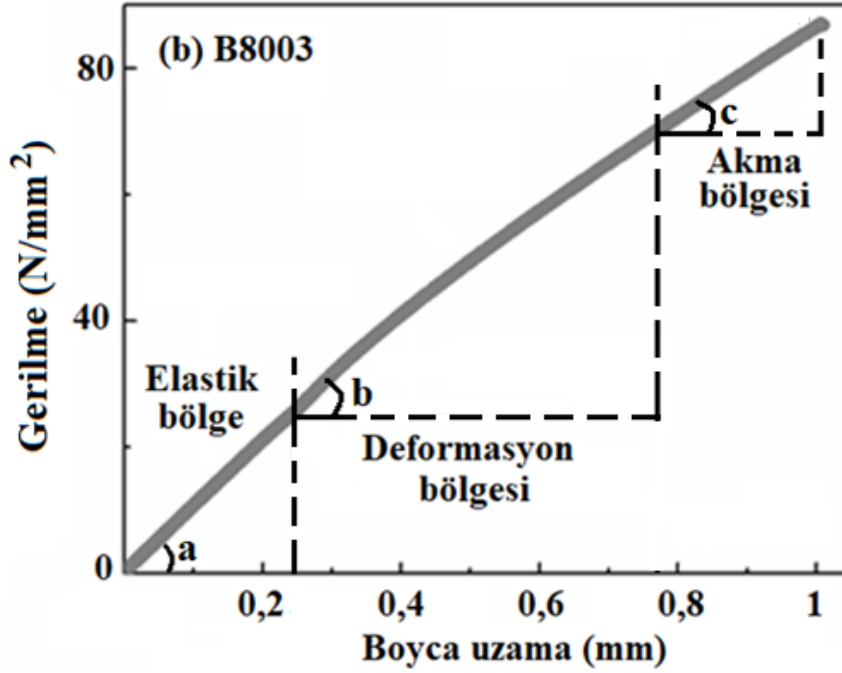
Kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan çekme testlerinde, dikdörtgenel boyutlarda kesilmiş numunelere tek boyutta aksel ve artan kuvvetler uygulanarak mukavemetleri test edilmiştir.



Şekil 4.1: Standart SMC numune için gerilme-boyca uzama değişimi.

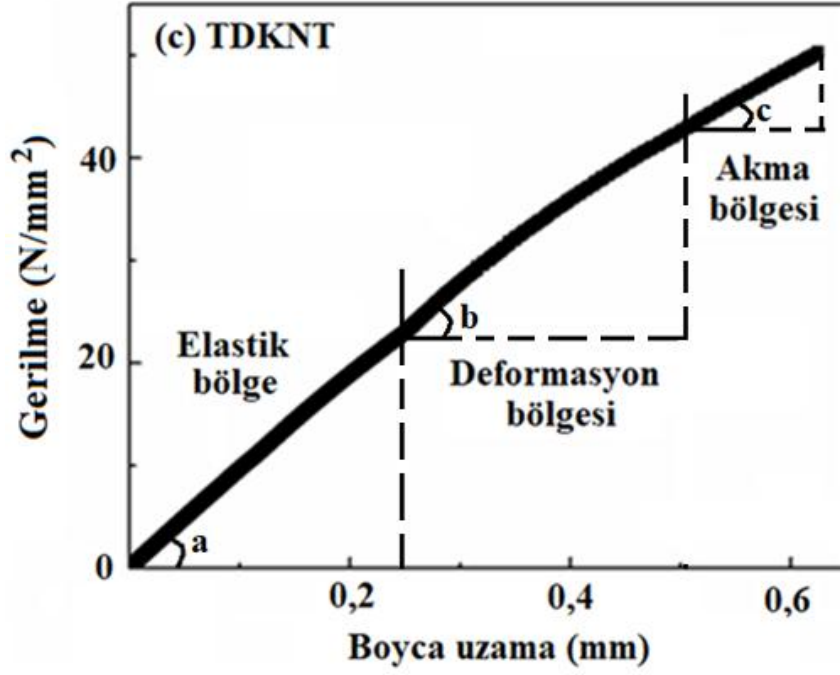
Şekil 4.1’de, standart olarak üretilen numune için uygulanan gerilmeye karşılık gelen boyca uzama grafiği verilmiştir. Testin başlangıç seviyelerinde yani kuvvetin küçük olduğu değerlerde numunede meydana gelen uzamalar, kuvvet ile doğru orantılı olup Hooke yasasını doğrular niteliktedir. Diğer bir deyişle kompozit bu bölgede elastik davranış gösterir ve uygulanan kuvvet kaldırıldığında madde eski haline geri gelir. Boyca uzamanın yaklaşık 0,25 mm olduğu değere kadar bu durum devam etmiştir. Bu noktadan sonra malzeme içinde kalıcı plastik deformasyonlar başlamış ve grafiğin eğimi değişmiştir. Fakat bu durumda bile kısmen elastiklik mevcuttur. Ancak artık bu durumda malzemeyi oluşturan atomlar birbirlerinin üzerine binmeye başlar ve malzemenin kimyasal yapısı bozulmaya başlar. Süreç tersinemez bir hal almıştır ve kalıcı hasarlar oluşmaya başlamıştır. 0,4 mm’lik uzamadan sonra da yine grafik fonksiyonu farklı bir şekilde ve eğimde ilerlemiştir.

Gerilmenin yaklaşık 41 MPa olarak uygulandığında ve uzama değerinin 0,68 mm olduğu değerde ise standart malzeme sünekliğini kaybetmiş ve kopmuştur. Standart numunenin gerilme-boyca uzama grafiğinde elastiklik, deformasyon ve akma bölgesindeki fonksiyonun eğimini ve denklem (2.8)'i kullanarak elde edilen elastisite modülü ya da diğer adıyla Young modülü değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.2: B8003 katkılı SMC numune için gerilme-boyca uzama değişimi.

Şekil 4.2'de ise B8003 kodlu organik bileşik katkılı malzemenin çekme testindeki performansı görülmektedir. Elastik bölge, uzamanın 0,4 mm olduğu değere kadar devam etmekte ve bu noktadan sonra yerini deformasyon bölgesine bırakmaktadır. Deformasyon bölgesinde numune içinde bulunan cam elyaf ve reçine malzemeyi bir arada tutmakta zorlanmaya başlamıştır. Standart malzemeye benzer biçimde bu kritik değerden sonra fonksiyonun eğimi değişmiş ve malzemenin belirli bölgelerinde yavaş yavaş deformasyonlar oluşmaya başlamıştır. 83 MPa değerindeki gerilmeye dayanan malzemenin uzaması 1 mm'yi bulmuştur. Ancak gerilme kuvvetinin daha fazla arttırılması, malzemenin önce akmasına sonra kopmasına neden olmuştur. B8003 organik bileşik katkılı kompozitin de her üç bölge için Young modülleri Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.3: TDKNT ile güçlendirilmiş SMC numune için gerilme-boyca uzama değişimi.

Karbon nanotüp ile güçlendirilen malzemede de standart malzemeye benzer süreçler gelişmiştir. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi malzeme yaklaşık 0,25 mm’lik uzama miktarına kadar Hooke yasasına uyarken bu değerden sonra malzemenin gerilme-uzama değişimi farklı bir hal almış ve malzemeyi oluşturan bileşenler arası bağlar deforme olmaya başlamıştır. Kuvvet arttıkça malzeme uzamaya devam etmiş ve sonuç olarak 50 MPa civarında malzemenin üst çeneye yakın kısmında akma meydana gelerek madde kopmuştur. TDKNT katkılı malzemenin Young modülleri de her bölgenin eğimi alınarak hesaplanmış ve Tablo 4.1’e kaydedilmiştir.

Tablo 4.1: Malzemelerin üç farklı bölgede hesaplanan Young modülleri.

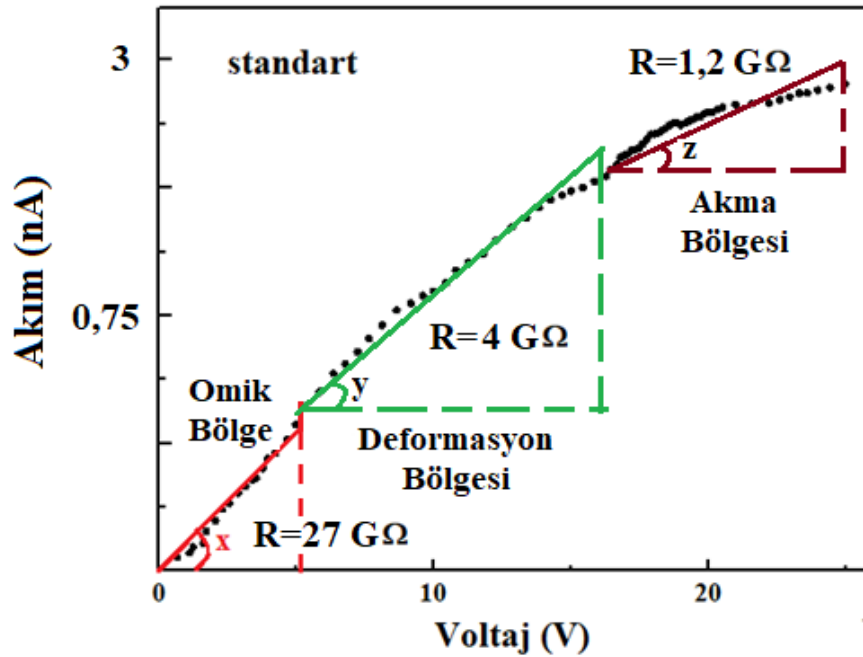
Numune	Elastik		Deformasyon		Akma	
	Young Modülü	Regresyon Sabiti	Young Modülü	Regresyon Sabiti	Young Modülü	Regresyon Sabiti
Standart	17120	99,2	10650	96,4	9865	95,8
B8003	18166	98,7	14452	96,2	13358	96,9
TDKNT	17666	99,1	11236	96,3	10056	94,5

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek ve katkılamamanın malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için yapılan çekme testinden elde edilen sonuçlar řu şekildedir: İlk olarak her üç numunenin de düşük kuvvet değerlerinde orantılı olarak küçük uzamalara sahip olduğu ve Hooke yasasına uyduğu görölmektedir. Bununla birlikte kuvvet artışı ile birlikte doğrusal fonksiyonun eğimi değişmiş ve malzemelerin elastik bölgeden çıkıp deformasyon bölgesine girmesine neden olmuştur. Malzemeler arasındaki bağların kuvvetini test eden bu bölgeden sonra ise cihazdaki çenelerin birbirinden uzaklaşmasıyla giderek artan gerilme kuvveti, belirli değerlerden sonra malzemeyi akma bölgesine sokmuş ve sonucunda da malzemeler kopmuştur. Dayanıklılık açısından bakıldığında en dikkat çeken nokta organik bileşik katkısının malzemenin mukavemetini % 100 ve TDKNT katkısının ise % 25 arttırdığıdır. Mukavemet, malzemeyi oluşturan bileşenler arasındaki kimyasal uyumla yakından ilgili olduğu için B8003 organik bileşiminin elyaf, reçine ve diğer bileşenlerle bu uyumu yakaladığı görölmektedir. Karbon nanotüpün katkısı da malzemenin dayanıklılığını etkilemiş fakat beklenen etkiyi yakalayamamıştır. Öngörüler ve deneysel sonuçlar arasındaki fark, malzeme içindeki kusurların dağılma düzeni, nanotüp konsantrasyonu, nanotüpler arasındaki van der Waals etkileşimlerinin şiddeti ve zayıf yük transferinden kaynaklanabileceği düşünölmektedir [42].

Malzemelere bir kuvvet uygulandığında elastik şekilde esnemeye karşı verdikleri tepkinin bir ölçüsü olan Young modülleri incelendiğinde ise organik bileşik ile katkılamamanın karbon nanotüp ile güçlendirmeye oranla Young modülü üzerinde daha etkili olduğu görölmektedir. Diğer numunelere göre daha yüksek bir Young modülüne sahip olması, bu malzemenin sahip olduğu rijit yapı nedeniyle esnemesinin zor olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte deformasyon ve akma bölgelerine gidildikçe Young modülü değerlerinin azaldığı ve malzemenin mukavemetinin azaldığı elde edilen değerlerle ispatlanmıştır. Grafikten elde edilen diğer nicelik olan regresyon sabitlerinin de 1'e yakın olması deneysel sonuçlarla modelin uyumlu olduğunu göstermektedir.

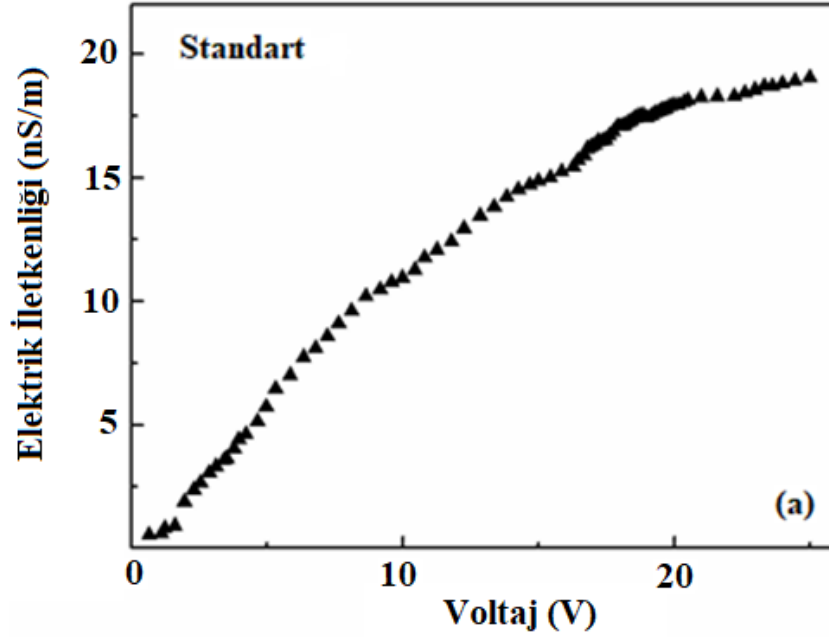
Gerilme kuvveti - boyca uzama grafiklerinden malzemenin tokluğu hakkında bilgiler de edinilir. Kompoziti bir arada tutan matrisin ve reçinenin hasar uzaması arttıkça tokluğu da artış gösterir. Tam tersi durumda reçine gevrek hale gelir ve kompozit kırılmanlaşır. Dolayısıyla katkı maddesi, cam elyaf ve reçinenin uyumu kompozitin tokluğu için çok önemlidir. Grafiklerden de görüldüğü gibi B8003 organik bileşiminin, cam elyaf ve doymamış polyester reçine ile sağladığı kimyasal uyum diğer numunelere göre daha üstün olup bu malzemenin tokluğu standart ve TDKNT katkılı SMC'den daha yüksektir.

Akım-voltaj ölçümlerinden elde edilen karakteristik standart numune için Şekil 4.4'de verilmiştir. Düşük voltaj değerlerinde Ohm yasasına uyan fonksiyon artan voltaj değerlerinde lineerlikten sapar. Akımın artış hızı azalarak devam etse de özellikle standart ve organik bileşik katkılı numuneler için akım nanoamper seviyelerindedir. TDKNT katkılı malzemeler için maksimum voltaj değerinde akım miliamper seviyesindedir. Bütün numuneler için elde edilen bu akım-voltaj grafiklerinin eğimleri hesaplanmış ve eğimlerin tersinden malzemelerin dirençleri elde edilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi voltaj artışı akımı arttırmış dolayısıyla direnci azaltmıştır. Denklemler yardımıyla da malzemelerin elektrik iletkenlikleri hesaplanmıştır.

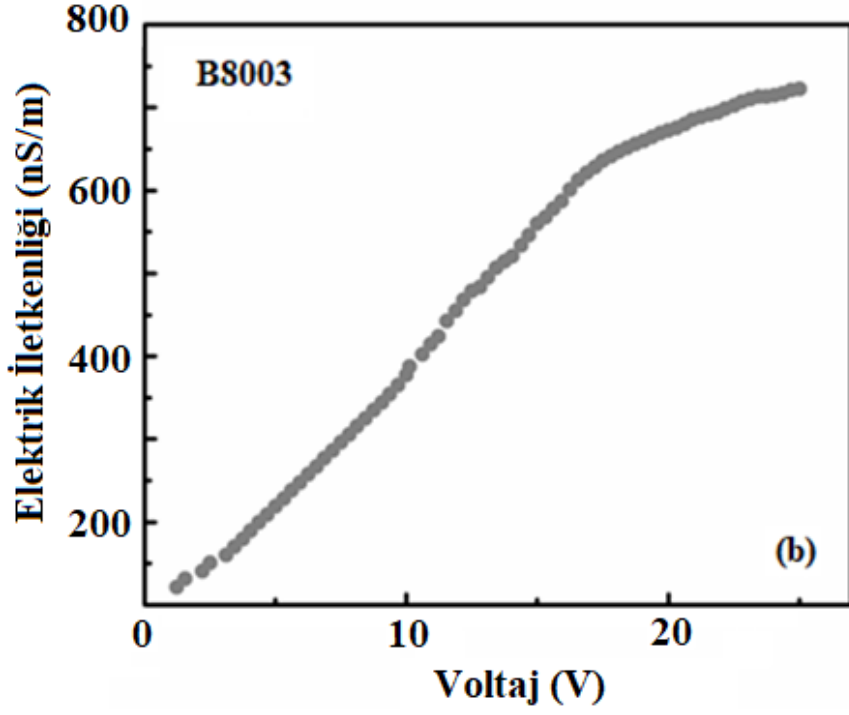


Şekil 4.4: Standart numune için akım-voltaj değişimi.

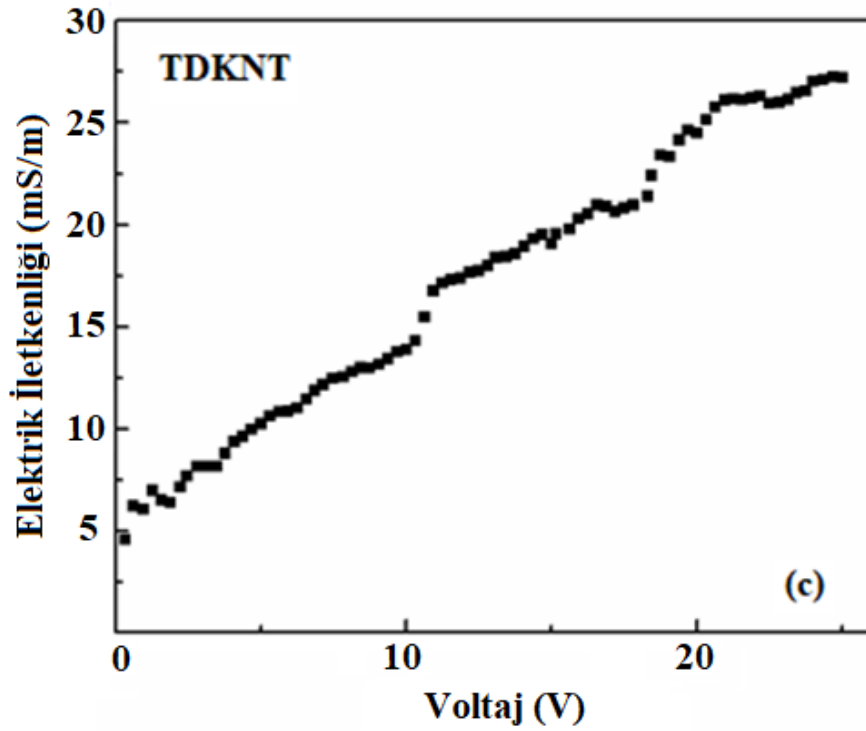
Uygulanan gerilim ile elektrik iletkenliğin değişimi, üç numune için Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir. Standart numune ile B8003 katkılı numune arasında elektrik iletkenlik bakımından önemli bir farkın olmadığı görölmektedir. TDKNT ile güçlendirilmiş malzemenin ise elektrik iletkenliğinin önemli ölçüde arttığı ve yarıiletkenlerin iletkenlik seviyesine ulaştığı gözlenmiştir. Katkılanan TDKNT'lerin SMC'lerin iletkenlik özelliklerini kontrol etmede ve ayarlama da en önemli adaylardan biri olduğu ispatlanmıştır. Bunun yanı sıra TDKNT ile takviye edilmiş polimer kompozitin elektromanyetik girişim (EMI) ve elektrostatik deşarj (ESD) koruma gibi iletken polimer kompozitler için ana uygulamalarda da kullanılabileceği ortaya konulmuştur.



Şekil 4.5: Standart malzeme için elektriksel iletkenliğin uygulanan DC voltajı ile değişimi.

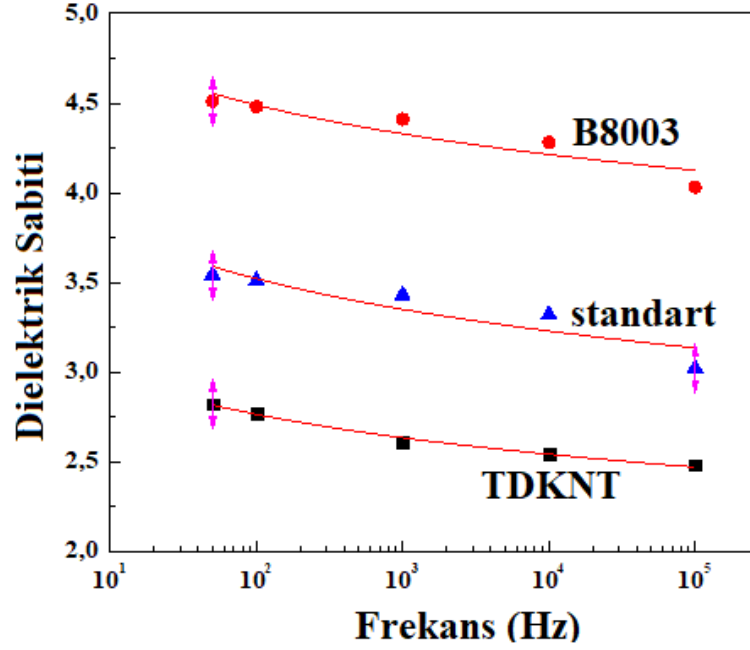


Şekil 4.6: B8003 ile katkılanan malzeme için elektriksel iletkenliğin uygulanan DC voltajı ile değişimi.



Şekil 4.7: TDKNT ile güçlendirilen malzeme için elektriksel iletkenliğin uygulanan DC voltajı ile değişimi.

Frekanstaki değişimler, malzemenin dielektrik özelliklerini etkileyen en önemli faktördür. Bu nedenle, numunelerin dielektrik ölçümleri 50 Hz ve 100 kHz frekans aralığında 5 farklı değer için gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında üç malzeme türü için de dielektrik sabitlerin frekansa bağlı değişimleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Malzemelerin dielektrik sabitlerinin frekans ile değişimi.

İncelenen tüm örneklerin dielektrik sabitlerinin düşük frekanslarda daha yüksek değere sahip olduğu gözlenmiştir. SMC kompozitlerinin heterojenliğinden kaynaklanan ara yüz polarizasyonu, malzemenin dielektrik özelliklerini etkiler ve artan frekans değerleri için dielektrik sabitinin değeri de azalır. Daha düşük frekanslarda dielektrik sabitine katkıda bulunan ara yüzey, dipol, iyonik veya elektronik polarizasyon meydana geldiği zaman, bu polarizasyon türlerinden sadece iyonik ve elektronik polarizasyonlar yüksek frekanslarda azalan dielektrik sabit değere katkıda bulunurlar [63-65]. B8003 ile katkılamamanın malzemenin dielektrik sabitini arttırdığı görülürken, TDKNT ile güçlendirmenin standart malzemeye kıyasla yalıtımı azaltarak dielektrik sabitini azalttığı görülmüştür. Dolayısıyla yalıtım gerektiren uygulamalar için organik bileşik katkılı malzemenin ideal olduğu görülmüştür.

Dielektrik sabitlerinin frekansla değişimini tanımlamak için,

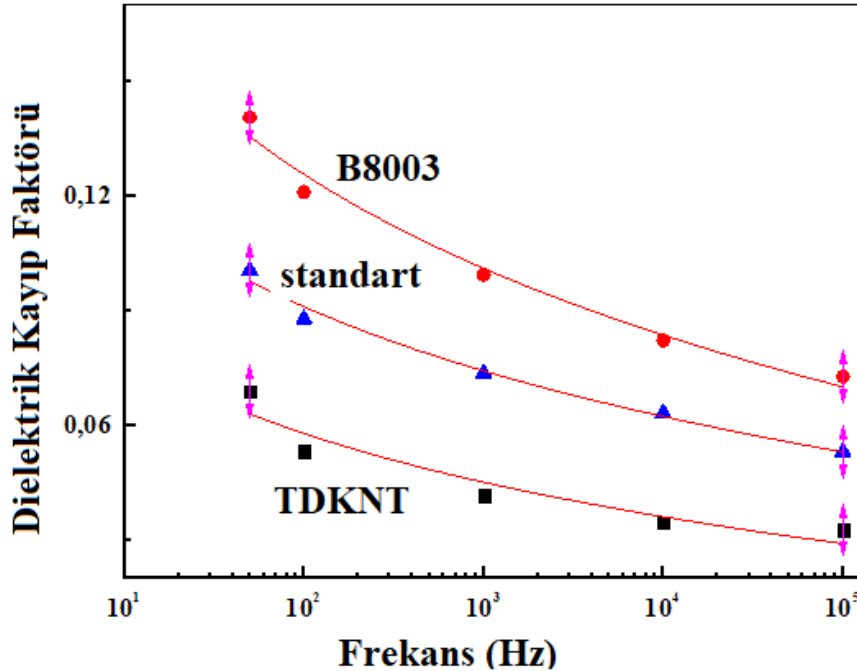
$$y = A \cdot \ln(-b \cdot \ln x)$$

şeklinde logaritmik bir fonksiyon tanımlanmıştır. Denklemdaki A ve b fit için hesaplanan katsayıları göstermektedir ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Dielektrik sabiti-frekans değişimi için yapılan fitteki katsayılar.

Numeler	A	b	Regresyon Sabiti
standart	-0,42	$-5,1 \cdot 10^{-5}$	94,5
B8003	-0,39	$-2,7 \cdot 10^{-6}$	94,2
TDKNT	-0,32	$-3,9 \cdot 10^{-5}$	99,1

Dielektrik sabitlerinin frekans ile davranışının üç numune için de benzer olduğu grafikten görülmektedir. Bunun yanında B8003 katkısının malzeme içinde ekstradan arayüzey polarizasyonlarına yol açtığı ve doymamış polyesterin yavaş dielektrik gevşemeye sahip olması nedeniyle diğer numunelere göre dielektrik sabitini arttırdığı söylenebilir.



Şekil 4.9: Malzemelerin dielektrik kayıp faktörlerinin frekans ile değişimi.

Malzeme içindeki enerjinin ısıya dönüşme miktarını tanımlayan dielektrik kayıp faktörlerinin frekans ile değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. Dielektrik kayıp faktörü malzemenin içyapısına sıkıca bağlıdır. Malzeme içinde meydana gelen dielektrik kayıplar numune içinde ısı kaynakları gibi davranırlar. Bu durum, termal olarak kararlı olması istenen kompozitlerde termal gerilimi indükleyerek malzemenin özelliklerini etkilemektedir. Grafiklerden TDKNT katkılı kompozitin termal indüklemelerden en az etkilenen numune olduğu ve malzemeye aktarılan enerjinin en verimli şekilde bu numunede aktarıldığı ortaya konulmuştur. Organik bileşik katkılı numunenin ise her frekans değerinde dielektrik kayıp faktörünün diğer numunelerden daha yüksek olduğu yani numunenin çok fazla ısınarak enerji kaybına yol açtığı tespit edilmiştir.

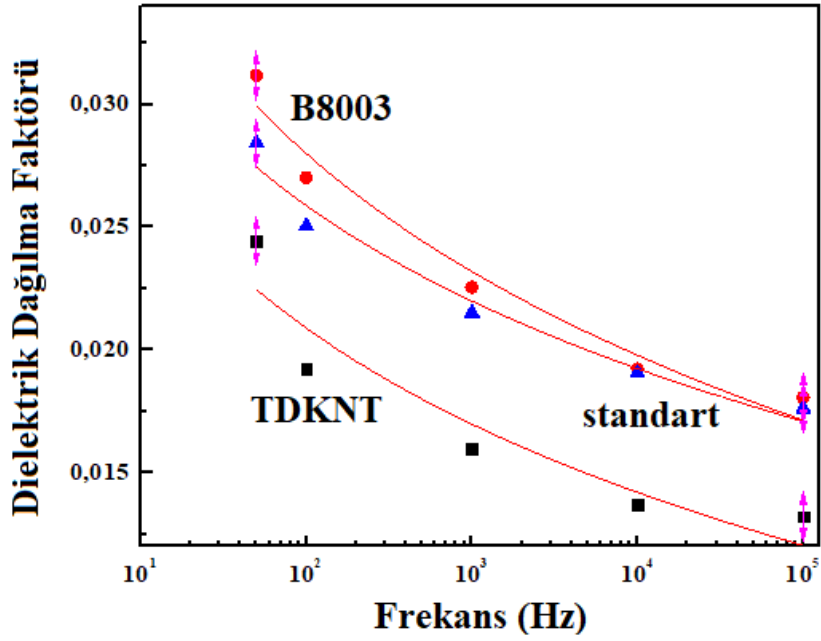
Yapılan fit sonucu bu değişimler için bir fonksiyon üretilmiş olup aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$y = A \cdot \ln(-b \cdot \ln x)$$

şeklinde verilmektedir. Denklemdaki A ve b fit için hesaplanan katsayıları göstermektedir ve Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3: Dielektrik kayıp faktörünün-frekans değişimi için yapılan fitteki katsayılar.

Numuneler	A	b	Regresyon Sabiti
standart	-0,04	-0,024	98,9
B8003	-0,06	-0,027	95,5
TDKNT	-0,031	-0,034	93,8



Şekil 4.10: Malzemelerin dielektrik dağılıma faktörlerinin frekans ile değişimi.

Dielektrik dağılıma faktörü ya da diğer adıyla kayıp tanjant değeri ise materyale gelen enerjinin ısı olarak tüketilme miktarını ifade etmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi bu oran B8003 ve standart numunede yakın iken TDKNT katkılı malzemede enerjinin ısı olarak tüketilme oranı düşüktür.

Frekans ile değişim logaritmik bir fonksiyon ile tanımlanmış olup:

$$y = A \cdot \ln(-b \cdot \ln x)$$

şeklinde verilmektedir. Denklemdeki A ve b fit için hesaplanan katsayıları göstermektedir ve Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4: Dielektrik dağılıma faktörünün-frekans değişimi için yapılan fitteki katsayılar.

Numuneler	A	b	Regresyon Sabiti
standart	-0,0095	-0,014	98,2
B8003	-0,012	-0,02	94,4
TDKNT	-0,0096	-0,025	94,2

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada standart, B8003 organik bileşik katkılı ve TDKNT takviyeli SMC kompozit malzemelerin mekanik ve elektriksel özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Üretim sıcaklığı, üretim yöntemi ve matris sıcaklığı da karşılaştırmayı kolaylaştırmak için sabit tutulmuştur. Aynı şekilde her üç numune, % 27 oranında cam elyaf içerecek şekilde üretilmiştir. İlk olarak katkılamının kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre organik bileşik katkısı malzemenin mukavemetini neredeyse iki kat arttırmış ve TDKNT katkısı ise dörtte bir oranında arttırmıştır. B8003 organik bileşiğinin matris ve takviye elemanları ile kurmuş olduğu bağın diğer numunelere göre çok kuvvetli olduğu ortaya çıkmıştır.

Malzemelerin elektriksel karakteristikleri, yüksek hızlı akım-voltaj (I-V) ölçümleri kullanılarak araştırılmıştır. Kiral vektörlerine ve yarıçaplarına bağlı olarak yarıiletken veya metal doğaya sahip tek duvarlı karbon nanotüpler, yalıtkan olan kompozit malzemenin elektriksel iletkenliğini yarıiletken seviyesine taşımıştır. Bu durum, % 1 oranında katkılanan karbon nanotübün elektriksel süzülme eşiğini aştığını ve perkolasyon teorisine göre karbon nanotüplerin malzeme içinde iletken bir ağ oluşturduklarını göstermektedir. Bundan dolayı TDKNT'lerin, SMC'lerin iletkenlik özelliklerini kontrol etme ve ayarlama önemli adaylardan biri olduğu ortaya konulmuştur. TDKNT ile güçlendirilmiş materyallerin elektromanyetik girişim (EMI) ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) uygulamaları için ideal malzemeler olduğu kanıtlanmıştır. B8003 takviyesinin ise malzemenin doğru akım iletkenliğini önemli biçimde etkilemediği gözlenmiştir.

Endüstri ve sanayide kullanılan kompozit malzemelerin elektriksel karakteristiğini belirleyen en önemli parametrelerden biri de dielektrik özellikleridir. Bu çalışma için üretilen numunelerin dielektrik ölçümleri, 50 Hz ve 100 kHz frekans aralığında 5 farklı değer için tamamlanmıştır. Ölçümler düşük frekans değerlerinde malzemelerin dielektrik sabitlerinin daha yüksek değere sahip olduğunu göstermiştir. Kompozitlerin tamamen homojen olmayan yapıları sonucu ortaya çıkan ara yüz polarizasyonu, malzemelerin dielektrik özelliklerini etkiler ve frekansın artmasıyla

bağıl geçirgenlik değerleri azalır. Düşük frekans değerlerinde dielektrik sabitine gelen katkı ara yüzey, dipol, iyonik veya elektronik polarizasyon durumlarından gelirken yüksek frekanslarda sadece iyonik ve elektronik polarizasyonlar azalan dielektrik sabit değere katkıda bulunurlar. Standart kompozit malzemeye B8003 takviyesinin malzemenin dielektrik sabitini arttırdığı görülürken, TDKNT ile güçlendirmenin standart malzemeye kıyasla yalıtımı azaltarak dielektrik sabitini azalttığı görülmüştür.

Dielektrik kayıp faktörü ve kayıp tanjantı değerleri de her üç numune için frekans ile aynı davranışı sergilemiştir. Düşük frekanslarda dielektrik kayıplar, malzeme içinde ısı üreten bir merkez gibi davranarak kompozitlerin özelliklerini etkilerken, frekans arttıkça malzemede oluşan termal gerilim azalır ve dolayısıyla dielektrik kayıplar da her üç malzeme için azalarak malzemeyi termal yönden kararlı hale getirir. Malzemeler arasında en az ısınan ve enerji kaybı yaratan malzemenin TDKNT katkılı malzeme olduğu ortaya konulmuştur.

Özet olarak katkı maddesi olarak seçilen B8003 organik bileşiğinin malzemenin dayanımını arttırarak mukavemet özelliklerini iyileştirdiği gözlenirken düşük oranlarda katkılanan tek duvarlı karbon nanotübün perkolasyon teorisine uyacak biçimde davranıp iletkenlik özelliklerini kuvvetli biçimde etkilediği ortaya konulmuştur.

Gittikçe gelişen üretim yöntemleri, üretim şartları, analiz metotları sayesinde karbon nanotüplerin viskozite, kimyasal, mekanik, elektrik gibi pek çok özelliği ortaya konulmuştur. Keşfedilen bu farklı özellikleri sayesinde karbon nanotüpler, günümüzde özellikle ileri teknoloji ürünlerinde kendilerine önemli bir alan yaratmaya başlamışlardır. Bunun yanı sıra özellikleri ve kullanım alanları açısından hala pek çok soruyu içerisinde barındıran karbon nanotüpleri ileriki yıllarda günlük yaşamın pek çok alanında göreceğimiz açıktır.

Sonraki çalışmalarda katkılamının malzemelerin viskozite özellikleri üzerine etkileri çalışılabilir. Bunun yanı sıra karbon nanotüp miktarı arttırılarak malzemenin elektriksel özelliklerinin TDKNT oranı ile değişimi incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Relekar, B.P., Fulari A.V., Lohar, G.M. and Fulari V.J., “Development of PorousManganese Oxide/Polyaniline Composite Using Electrochemical Route for Electrochemical Supercapacitor”, *Journal of Elec. Mat.*, 48, 4, (2019).
- [2] Çelep, Ş., Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2007).
- [3] Ersoy, H.Y., *Kompozit Malzeme*, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama, İstanbul, 11-15, 95-105, 110-116 (2001).
- [4] Borrachero, B. O., Caballero, S. S., Fenollar, O., Selles, M. A., “Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites for Automotive Parts Manufacturing”, *Key Engineering Materials*, 793, 9-16, (2019).
- [5] Demirel, A., “ Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, (2007).
- [6] Cassis, F. A. and Talbot, R. C., Polyester and Vinyl Ester Resins, *Handbook of Composites*, 34-37,(1998).
- [7] Seventekin, N., *Kimyasal Lifler*, E.Ü. Teks. ve Konf. Araş. Uyg. Merk., 128-134, (2001).
- [8] Kabir, R. B. And Ferdous, N., “Kevlar-The Super Tough Fiber”, *International Journal of Textile Science*, 1(6): 78-83, (2012).
- [9] Goldsworthy, W. B., Pultrusion Machine and Method, US3556888A Patented Jan. 19, (1971).
- [10] Barr, S. M. and Jaworski, J. W., “Optimization of tow-steered composite wind turbine blades for static aeroelastic performance”, *Renewable Energy*, 139, 859-872, (2019).

- [11] Kelly, A., *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, Pergamon, Elsevier Science Ltd., Oxford, (1994).
- [12] Zhang, J., Mine, M., Zhu, D., Matsuo, M., “Electrical and dielectric behaviors and their origins in the three-dimensional polyvinyl alcohol/MWCNT composites with low percolation threshold”, *Carbon*, 47(5), 1311–1320, (2009).
- [13] Grady, B. P., “Recent developments concerning the dispersion of carbon nanotubes in polymers”, *Macromol. Rapid Commun.*, 31(3), 247–257, (2010).
- [14] Ruan, Y., Han, B., Yu, X., Zhang, W., Wang, D., “Carbon nanotubes reinforced reactive powder concrete”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 112, 371-382, (2018).
- [15] Liu, J., Xiong, D. B., Tan, Z., Fan, G., Guo, Q., Su Y., Li, Z., Zhang, D., “Enhanced mechanical properties and high electrical conductivity in multiwalled carbon nanotubes reinforced copper matrix nanolaminated composites”, *Materials Science and Engineering: A*, 729, 452-457, (2018).
- [16] Iijima, S., “Helical microtubules of graphitic carbon”, *Nature*, 354 , 56–58, (1991).
- [17] Roya, N., Sengupta, R., Bhowmick, A. K., “Modifications of carbon for polymer composites and nanocomposites”, *Progress in Polymer Science*, 37, 781– 819, (2012).
- [18] Allaoui, A., Bai, S., Cheng, H. M., Bai, J. B., “Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite”, *Composites Science and Technology*, 62, 1993–1998, (2002).
- [19] Ounaies, Z., Park, C., Wise, K. E., Siochi, E. J., Harrison, J. S., “Electrical properties of single wall carbon nanotube reinforced polyimide composites”, *Composites Science and Technology*, 63, 1637-1646, (2003).
- [20] Kingston, C., Zepp, R., Andrady, A., Boverhof, D., Fehir, R., Hawkins, D., Roberts, J., Sayre, P., Shelton, B., Sultan, Y., Vejins, V., Wohlleben, W.,

- “Release characteristics of selected carbon nanotube polymer composites”, *Carbon*, 68, 33–57, (2014).
- [21] Dinulovic, M. and Rasuo, B., “Dielectric Properties Modeling of Composite Materials”, *FME Transactions*, 37, 117-122, (2009).
- [22] Grujicic, M., Sun, Y. P., Koudela, K. L., “The effect of covalent functionalization of carbon nanotube reinforcements on the atomic-level mechanical properties of poly-vinyl-ester-epoxy”, *Applied Surface Science*, 253, 3009–3021, (2007).
- [23] Korkmaz, N., Çakmak, E., Dayık, M., “Dokuma Karbon Elyaf Takviyeli Karbon Nano Tüp-Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Karakterizasyonu”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (2), 338-353, (2016).
- [24] Noon, H. W., Kong, Y. And Ma, J., “Molecular dynamics analysis of a buckyball–antibody complex”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, (2002).
- [25] Kroto, H. W., Heath, J. R., O’Brien, S. C., Curl, R. F., Smalley, R. E., “C60: Buckminsterfullerene”, *Nature*, 318, 162–163, (1985).
- [26] Vidu, R., Rahman, M., Mahmoudi, M., Enachescu, M., “Nanostructures: A Platform for Brain Repair and Augmentation”, *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8 (91), (2014).
- [27] Chen, P., Lin, J. and Tan, K. L., “Carbon Nanotubes: A Future Material of Life”, *Life*, 49, 105-108, (2000).
- [28] Mutlay İ., Karbon Nanotüpler: Özellikler ve Uygulamalar, Grafen Chem. Ind. Co., Ankara, (2014).
- [29] Arslan, F., “Karbon Nanotüp Takviyeli Polimer Nanokompozit Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, (2011).

- [30] Demirbay, B., “Film formation, morphological, optical and electrical percolation behaviors of PS/MWCNT and PS/GO nanocomposite films”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, (2017).
- [31] Bethune, D. S., Klang, C. H., de Vries, M. S., Gorman, G., Savoy, R., Vazquez, J. and Beyers, R., “Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls”, *Nature*, 363, (6430), 605 – 607, (1993).
- [32] Saeed, K., Khan, I., “Carbon nanotubes—properties and applications: a review”, *Carbon Letters*, 14 (3), 131-144, (2013).
- [33] Kuchibhatla, S. V. N. T., Karakoti, A. S., Bera, D., Seal, S., “One dimensional nanostructured materials”, *Progress in Materials Science*, 52, 699-913. (2007).
- [34] Dai, H., “Carbon nanotubes: opportunities and challenges”, *Surface Science*, 500, 218–241, (2002).
- [35] Thostenson, E. T., Ren, Z. F., Chou, T.W., “Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review”, *Comp. Sci Technol.*, 61(13), 1899–1912, (2001).
- [36] Odom, T. W., Huang, J. L. and Lieber, C. M., *Single-Walled Carbon Nanotubes*, Ann. N. Y. Acad. Sci., 960, 203–215, (2002).
- [37] Nanda, G. S., Sravendra, R., Jae, W. C., Lin, L. and Siew, H. C., “Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes”, *Progress in Polymer Science*, 35, 7, 837–867, (2010).
- [38] Kim, K. S. and Park, S. J., “Influence of amine-grafted multiwalled carbon nanotubes on physical and rheological properties of PMMA-based nanocomposites”, *Journal of Solid State Chemistry*, 184, 11, 3021–3027, (2011).
- [39] Cui, L. J., Geng, H. Z., Wang, W. Y., Chen, L. T. and Gao, J., “Functionalization of multi-wall carbon nanotubes to reduce the coefficient of

- the friction and improve the wear resistance of multi-wall carbon nanotube/epoxy composites”, *Carbon*, 54, 277–282, (2013).
- [40] Chou, T. W., *Microstructural design of fiber composites*, Cambridge University Press, (1992).
- [41] Ajayan, P. M., Stephan, O., Colliex, C., Trauth, D., “Aligned carbon nanotube arrays formed by cutting a polymer resin–nanotube composite”, *Science*, 265, 1212–1214, (1994).
- [42] Moniruzzaman, M. and Winey, K. I., “Polymer Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes”, *Macromolecules*, 39, 5194-5205, (2006).
- [43] Sahoo, N. G., Rana, S., Cho, J. W., Li, L., Chan, S. H., “Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes”, *Progress in Polymer Science*, 35, 837-867, (2010).
- [44] Xiong, J., Zheng, Z., Qin, X., Li, M., Li, H., Wang, X., “The thermal and mechanical properties of a polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite”, *Carbon*, 44, 2701-2707, (2006).
- [45] Chen, W., Tao, X., Liu, Y., “Carbon nanotube-reinforced polyurethane composite fibers”, *Composites Science and Technology*, 66, 3029-3034, (2006).
- [46] Yakobson, B. I., Brabec, C. J., Bernholc, J., “Nanomechanics of carbon tubes: instabilities beyond linear range”, *Physical Review Letters*, 76 (14), 2511–2514, (1996).
- [47] Yakobson, B. I., Samsonidze, G., “Atomistic theory of mechanical relaxation in fullerene nanotubes”, *Carbon*, 38 (11-12), 1675–1680, (2000).
- [48] Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G., Eklund, P. C., *Science of fullerenes and carbon nanotubes*, San Diego: Academic Press, (1996).

- [49] Barone, P. W., Baik, S., Heller, D. A., Strano, M. S., “Near-infrared optical sensors based on single-walled carbon nanotubes”, *Nature Materials*, 4, 86–92, (2005).
- [50] Brown, P., Takechi, K., Kamat, P. V., “Single-Walled Carbon Nanotube Scaffolds for Dye-Sensitized Solar Cells”, *J. Phys. Chem. C*, 112 (12), 4776–4782, (2008).
- [51] Wong, S. S., Wooley, A. T., Joselevich, E., Cheung C. L., Lieber C. M., “Covalently-Functionalized Single-Walled Carbon Nanotube Probe Tips for Chemical Force Microscopy”, *J. Am. Chem. Soc.*, 120 (33), 8557–8558, (1998).
- [52] Sarkar, A., Maity, S., Chakraborty, P., Chakraborty, S. K., “Characterization of Carbon Nanotubes and Its Application in Biomedical Sensor for Prostate Cancer Detection”, *Sensor Letters*, 17 (1), 17–24, (2019).
- [53] Dana, D., *Sheet Moulding Compound*, Int. Enc. of Comp., New York: VCH Publishers (ed: S. M. Lee), 93, (1991).
- [54] Kirkpatrick, S., “Percolation and conduction”, *Rev. Mod. Phys.*, 45 (4), 574–588, (1973).
- [55] Dang, Z. M., Shehzad, K., Zha, J. W., Hussain, T., Jun, N. and Bai, J., “On refining the relationship between aspect ratio and percolation threshold of practical carbon nanotubes/polymer nanocomposites”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 50 (8), (2011).
- [56] Coleman, J. N., Curran, S., Dalton, A. B., Davey, A. P., McCarthy, B., Blau, W., “Percolation-dominated conductivity in a conjugated-polymer–carbon nanotube composite”, *Phys. Rev. B – Condens. Matter Phys.*, 58 (12), 7492–7495, (1998).
- [57] Chen, Y., Wang, S., Pan, F. and Zhang, J., “A numerical study on electrical percolation of polymer-matrix composites with hybrid fillers of carbon nanotubes and carbon black”, *Journal of Nanomaterials*, (2014).

- [58] Yuan X., “Experimental study of Electrical conductivity of carbon nanotube, nanofiber buckypapers and their composites”, A Thesis submitted to the *Department of Industrial & Manufacturing Engineering*, (2007).
- [59] Akram, M., Javed, A., Rizvi, T. Z., “Dielectric Properties of Industrial Polymer Composite Materials”, *Turk. J. Phys.*, 29, 355-362, (2005).
- [60] Pathania, D. and Singh, D., “A review on electrical properties of fiber reinforced polymer composites”, *International Journal of Theoretical & Applied Sciences*, 1(2), 34-37, (2009).
- [61] Hosford, W.F., “Overview of Tensile Testing, Tensile Testing”, *ASM International*, 1–24, (1992).
- [62] Mallick, P. K., *Fiber-Reinforced Composites*, New York: Marcel Dekker, (1993).
- [63] Onimisi, M. Y., Ikyumbur, J. T., “Comparative Analysis of Dielectric Constant and Loss Factor of Pure Butan-1-ol and Ethanol”, *American Journal of Condensed Matter Physics*, 5 (3), 69-75, (2015).
- [64] Li, Y., Cordovez, M., Karbhari, V. M., “Dielectric and mechanical characterization of processing and moisture uptake effects in E-glass/epoxy composites”, *Composites Part B*, 34, 383–390, (2003).
- [65] Pethrick, R.A., Hayward D., “Real time dielectric relaxation studies of dynamic polymeric systems”, *Progress in Polymer Science*, 27, 1983–2017, (2002).