



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

BİYOMÜHENDİSLİK VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ SEGREGÉ SAN/AYPE ÇOK
FONKSİYONLU NANOKOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE
ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA PERFORMANSLARININ
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ONUR DİVAN

Tez Danışmanı

DOÇ. DR. VOLKAN ESKİZEYBEK

ÇANAKKALE – 2023



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİYOMÜHENDİSLİK VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KARBON NANOTÜP TAKVİYELİ SEGREGÉ SAN/AYPE ÇOK
FONKSİYONLU NANOKOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ ve
ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA PERFORMANSLARININ
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ONUR DİVAN

Tez Danışmanı

DOÇ. DR. VOLKAN ESKİZEYBEK

Bu çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: FYL-2022-3841

ÇANAKKALE – 2023



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Onur DİVAN tarafından Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK yönetiminde hazırlanan ve 23/08/2023 tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Karbon Nanotüp Takviyeli Segrege San/Aype Çok Fonksiyonlu Nanokompozitlerin Geliştirilmesi Ve Elektromanyetik Kalkanlama Performanslarının Belirlenmesi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK
(Danışman)

Dr.Öğr.Üyesi Ferhat YILDIRIM

Dr. Öğr. Üyesi Murat KOYUNBAKAN

.....

.....

.....

Tez No :

Tez Savunma Tarihi : 23/08/2023

.....

Prof. Dr. Ahmet Evren ERGİNAL

Enstitü Müdürü

...../...../2023

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Onur DİVAN

23/08/2023

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca danımanlığını üstlenerek, tez çalışmalarında bilgi ve tecrübesi ile bana yardımcı olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen saygı değer hocam Sayın Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK'e sonsuz teşekkürler.

Çalışmamın deneysel bölümünde büyük emek harcayan ve destek olan hocam sayın Dr. Öğretim Üyesi Ferhat YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Çalışmamın hazırlık ve test sürecinde imkanlarını ve ekipmanlarını kullanıma açan İSKO Plastik ve Kalıp San. Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Çalışmam süresince manevi desteği ile her an yanımda olan sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Onur DİVAN
Çanakkale, Ağustos 2023

ÖZET

KARBON NANOTÜP TAKVİYLEİ SEGREGESAN/AYPE ÇOK FONKSİYONLU NANOKOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ ve ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ

Onur DİVAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK

23/08/2023, 68

Çeşitli ilave fonksiyonlara sahip yapısal polimer kompozitlerin geliştirilmesi, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde çok işlevli nanokompozitlerin uygulanmasını sağlamak için sıcak bir araştırma alanı haline gelmektedir. İki fazlı matrikse sahip nanokompozitler yenilikçi bir malzeme çözümü olarak kullanılabilir. Bu çalışmada, termoplastik matris olarak karbon nanotüp takviyeli düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve stiren akrilonitril (SAN) kompozisyonu ile nanokompozit yapı üretilmiştir. Nanokompozitlerin üretiminde enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılmıştır. Üretilen nanokompozitlerin termo-dinamik ve elektromanyetik kalkanlama özellikleri incelenmiştir. Saf SAN içerisine ilave edilen LDPE/MWCNT oranı arttıkça depolama modülü beklendiği gibi azalmış ve MB50 numunesi için ait depolama modülü %50 düşüş ile 1.24 GPa olarak belirlenmiştir. Çift fazlı termoplastik kompozit için perkolasyon eşiği bünyesinde ağırlıkça %10 karbon nanotüp içeren MB50 numunesinde elde edilmiştir. Ayrıca, bünyesinde ağırlıkça 10% karbon nanotü içeren MB75 numunesi 37 dB EMSE değerine ulaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: EMI, Elektromanyetik Kalkanlama, MWCNT, Polimer Matrisli Kompozit, Plastik Enjeksiyon

ABSTRACT

CARBON NANOTUBE REINFORCED LDPE/SAN THERMOPLASTIC NANOCOMPOSITES: THERMO-MECHANICAL AND ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SHIELDING PROPERTIES

Onur DİVAN

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Bioengineering and Material Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Volkan ESKİZEYBEK

23/08/2023, 68

The development of structural polymer composites with various additional functionalities is becoming a hot research area to achieve the application of multi-functional nanocomposites in the aerospace and automotive industries. An innovative material solution is two-phased nanocomposites with distinctive structural and electrical characteristics. This study produced a nanocomposite structure with carbon nanotube-reinforced low-density polyethylene (LDPE) and styrene acrylonitrile (SAN) as a thermoplastic matrix. The injection molding method was used in the production of nanocomposites. Thermo-dynamic and electromagnetic shielding properties of the nanocomposites were investigated. As the LDPE/MWCNT ratio added to pure SAN increased, the storage modulus decreased as expected, and the storage modulus for the MB50 sample was determined as 1.24 GPa with a 50% decrease. The percolation threshold for the two-phase thermoplastic composite was obtained for the MB50 sample containing 10 wt% carbon nanotubes. In addition, the MB75 sample containing 15 wt% carbon nanotubes reached an EMSE value of 37 dB.

Keywords: EMI, Electromagnetic Interference, multiwall carbon nanotube, plastic injection, polymer matrix composite

İÇİNDEKİLER

JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
TABLOLAR DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1

1.1. Elektromanyetik Girişim	1
------------------------------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

KURUMSAL CERCEVE/ONCEKİ CALIŞMALAR

4

2.1. Elektrik Alan.....	4
2.2. Manyetik Alan	6
2.3. Elektromanyetik Alan.....	7
2.3.1. Kuplaj	10
Işıma Yolu ile Kuplaj.....	10
Elektriksel İletkenlik ile Kuplaj	10
2.3.2. Elektromanyetik Spektrum	11
2.4. Elektromanyetik Kalkanlama	12
2.4.1. Elektromanyetik Kalkanlama Ölçüm Standartları.....	14
2.5. Polimerler	16
2.5.1. Termoplastikler.....	16
2.6. Kompozitler.....	17
2.6.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı.....	18
2.6.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	19
Polimer Matrisli Kompozitler.....	20
Metal Matrisli Kompozitler	21

Seramik Matrisli Kompozitler	21
Polimer Matrisli Kompozitler ve Elektromanyetik Kalkanlama	22
2.7. Dolgu (Takviye) Malzemeleri	23
2.7.1. Karbon Nanotüp.....	23
2.7.2. Karbon Nanotüp Üretim Yöntemleri	25
2.8. Polimer İşleme Teknikleri	25
2.8.1. Plastik Enjeksiyon	25
2.8.2. Plastik Ekstrüzyon	27

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL ve YÖNTEM

30

3.1. Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Takviyeli PE Masterbatch (Plasticly LDPE 1501)	29
3.2. Stiren Akrilonitril (SAN).....	29
3.3. Kompozit Üretimi.....	30
3.3.1. Numunelerin Hazırlanması.....	30
3.4. Analiz ve Deneyle	31
3.4.1. DMA Analizi	31
3.4.2. TGA Analizi	31
3.4.3. Elektriksel İletkenlik ve Direnç	32
3.4.4. Elektromanyetik Ölçümler.....	33
3.4.5. Çekme Testi	35
3.4.6. Üç Nokta Eğme Testi.....	37
3.4.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	38

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR ve TARTIŞMA

41

4.1. Çekme Testi.....	41
4.2. Üç Nokta Eğme Testi	43
4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	45
4.4. Dinamik Mekanik Analiz (DMA)	47
4.5. Termogravimetrik Analiz (TGA)	50
4.6. Elektriksel İletkenlik ve EMSE	51

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER

58

KAYNAKÇA59

ÖZGEÇMİŞ.....I



SİMGELER VE KISALTMALAR

EMG	Elektromanyetik Girişim
AYPE	Açık Yoğunluklu Polietilen
SAN	Stiren Akrilonitril
ÇDKNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
TDKNT	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
Mhz	Megahertz
Khz	Kiloherzt
UHF	Ultra Yüksek Frekans
ASTM	American Society for Testing Materials
PS	Polistiren
PE	Polietilen
PVC	Polivinil Klorür
PP	Polipropilen
PA	Poliamid
POM	Polioksimetilen
PTH	Politiyofen
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
CNT	Karbon Nanotüp
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
TGA	Termogravimetrik Analiz
TEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
GPa	Gigapascal

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Elektrik Alan – Manyetik Alan Farkı	4
Tablo 2	Elektromanyetik Dalga Kaynakları	7
Tablo 3	Ekranlama (Kalkanlama) Seviyeleri	14
Tablo 4	Hazırlanan kompozit numunelerinin bileşimleri	32
Tablo 5	DMA analizinden elde edilen depolama modülü ve camsı geçiş sıcaklığı değerlerinin karşılaştırılması	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Elektromanyetik Dalga	4
Şekil 2	Elektronun Spin ve Manyetik Momenti (Haken 2000)	6
Şekil 3	Elektromanyetik Alan Kuvvet Çizgileri	7
Şekil 4	Elektromanyetik Dalga Yayınimleri	8
Şekil 5	Işıma Yolu ile Kuplaj	10
Şekil 6	Elektromanyetik Dalga Spektrumu	11
Şekil 7	Amorf polimerlerin sıcaklığa bağlı davranışı	18
Şekil 8	Boeing 787 Yolcu Uçağının Malzeme Yapısı	19
Şekil 9	Kompozit Malzemelerin Genel Yapısı	20
Şekil 10	Kompozitlerin Matris Türüne Göre Sınıflandırması	21
Şekil 11	Karbon Nanotüp	24
Şekil 12	Tek Katmanlı CNT'lerin katlanışlarına göre çeşitleri	25
Şekil 13	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp	26
Şekil 14	Enjeksiyon Makinesi Temel Şeması	27
Şekil 15	Ekstrüder Genel Görüntüsü ve Elamanları	29
Şekil 16	Engel Spex Victory 80 Enjeksiyon Makinesi	31
Şekil 17	Elektromanyetik Kalkanlama (EMSE) Ölçüm Düzeneği	36
Şekil 18	Gerilme - Gerinim Grafiği Örneği	37

Şekil 19	Çekme Testi Cihazı - Zwick Z005	38
Şekil 20	Üç Nokta Eğme Kuvvet Diyagramı	39
Şekil 21	SEM Şeması ve Çalışma Prensibi	40
Şekil 22	Çekme Testi Sonrası Numuneler	41
Şekil 23	Çekme & Kopma Mukavemeti	42
Şekil 24	Çekme & Kopma Yüzde Uzama	42
Şekil 25	Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	43
Şekil 26	Üç Nokta Eğme Testi - Eğme Modülü	44
Şekil 27	Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları - Eğme Dayanımı	45
Şekil 28	MB100 SEM Fotoğrafları	46
Şekil 29	X20.000 Büyütme Karbon Nanotüp Dağılımı	47
Şekil 30	DMA Analizinden Elde Edilen Depolama Modülü	49
Şekil 31	TGA Sonuçları	51
Şekil 32	Elektriksel İletkenlik ve Direnç Sonuçları	52
Şekil 33	Malzemelerin EMSE Sonuçları	54
Şekil 34	SEA – SER Sonuçları	55
Şekil 35	EMSE, SEA, SER, ve İletkenlik İlişkisi	56
Şekil 36	Deri derinliği ve polimer kompozit kalınlığı ilişkisi	57

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1.Elektromanyetik Girişim

Elektromanyetik girişim (Electromagnetic Interference-EMI) cep telefonu, elektrikli ev aletleri, baz istasyonları vb. cihazlardan yayılan istenmeyen elektromanyetik dalga sinyalleridir. Konumu ne olursa olsun, elektronik ekipmanımız elektromanyetik girişim tehditlerinden her zaman korunamamaktadır. İletişim cihazlarından, yayın istasyonlarından, elektrik hatlarından ve diğer elektrikli ekipmanlardan gelen sınırsız radyo ve mikrodalga radyasyonu, sürekli olarak bizi ve hassas devre ekipmanımızı etkilemektedir. İnsanlar ve diğer canlı organizmaların DNA yapıları üzerindeki etkilerinin incelendiği araştırmalar ise olumsuz etkilerin varlığını ispat etmektedir (Carpenter, 2013).

Örneğin; uzun süreli elektromanyetik radyasyona maruz kalan insanlarda halsizlik, hafıza kaybı, kalp atışında hızlanma veya yavaşlama gibi birtakım sağlık sorunları ortaya çıkmaktadır (Park vd., 2009). Bununla beraber istenmeyen elektromanyetik radyasyonu azaltmak için koruyucu malzemelerin yani elektromanyetik kalkanlama malzemelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalarda her geçen gün artmaktadır (Jia vd., 2014; Tang vd., 2005). İlâveten askeri endüstrilerde radar gibi elektromanyetik dalgaların tespiti, soğurulması veya yansıtılması stratejik açıdan son derece önemli olup çok yoğun araştırmaların yapıldığı alanların başında gelmektedir.

Pawar vd. PC / SAN matrisli yapı ile sadece PC matristen oluşan kompozit yapıların elektromanyetik kalkanlama etkilerini inceleyerek bu konuya ilk ışık tutan kişiler olmuşlardır. Üç farklı tipte ÇDKNT kullanan araştırmacılar, saf ve amin ile fonksiyonelleştirilmiş ÇDKNT'lerin ağırlıkça 50/50 PC/SAN) karışımında yalnızca %1 oranında perkolasyon eşiği oluşturduğunu, oysa PC kompozitlerinin bu konsantrasyonda yalıtkan olduğunu bulmuşlardır (Pawar vd., 2015).

Rohini ve Bose, polimer karışımlarını hazırlamada enjeksiyon prosesi yerine çözelti karıştırma işlemini seçmelerine rağmen, bir PS/PMMA (50/50 w/w) karışımında saf, amin sonlu ve asit işlevselleştirilmiş ÇDKNT'leri kullanarak benzer sonuçlar elde ettiler (Rohini vd., 2014).

Gubbels vd., polietilen:polistiren/karbon siyahı (PE:PS/CB) karışım sisteminin elektriksel iletkenliği etkilediğini ve parçacıklar arayüzde lokalize olduğunda elektrik iletkenliğinin maksimumdan geçtiğini göstermiştir (Gubbels vd., 1998).

Rahaman vd., EVA / NBR sisteminde yaptıkları iletkenlik ve EM kalkanlama verimliliği çalışmasında iletkenlik ve EM Kalkanlama arasında doğrusal olmayan bir ilişki belirtilmiştir. Perkolasyon eşiği üzerinde bir iletken dolgu malzemesi ilavesinin iletkenlik üzerindeki etkisinin az olduğu ve buna karşın elektromanyetik kalkanlama üzerinde orana bağlı olarak bir artış gözlemlenmiştir (Rahaman vd., 2011).

Kar vd.. Heterojen ve sürekli PVDF/ABS (50/50 w/w) polimer karışımına PMMA ile fonksiyonelleştirilmiş ÇDKNT'lerin fiziksel özellikler üzerine etkisini incelemiştir. ÇDKNT'lerin polimer karışımı arayüzeyinde sürekli bir iletken ağ oluşturduğunu gösteren araştırmacılar bu karışım sisteminin mekanik, elektriksel ve EM kalkanlama özelliklerini aynı anda iyileştirdiler. Bu karışım için çok düşük bir perkolasyon eşik değeri (%0.5) belirlenmiş ve son olarak PVDF/ABS karışımında ağırlıkça %3 ÇDKNT ilavesiyle 32 dB ekranlama etkinliği elde etmişlerdir (Kar vd., 2015).

Xavier ve Bose, elektromanyetik kalkanlama için ÇDKNT'ler ile PS/PVME (70/30 ve 50/50 w/w) karışımlarını kullanmıştır. Ayrıca, tavlamanın bu karışımların iletkenlik ve elektromanyetik kalkanlama üzerindeki etkisini incelenmiştir. Nanokompozitlerin enjeksiyon ile üretimi sırasında tüm ÇDKNT'lerin seçici olarak PVME'de lokalize olduğunu belirlenmiş, bu da daha düşük miktarlarda ÇDKNT'lerin PVME matris içerisinde iletken ağ oluşumunu sağlamıştır. Aynı şekilde, karbon nanotüp takkviyeli bu PS/PVME karışımı, yalnızca 0,15 mm kalınlığında 15 dB elektromanyetik kalkanlama verimliliği sağlamıştır (Xavier ve Bose, 2014).

Mükemmel bir elektromanyetik kalkan malzeme arayışında çok sayıda araştırma çalışması yayınlanmıştır. Son on yılda yapılan çalışmalar, dielektrik seramiklerin, manyetik oksitler/ferritler/partiküller, yarı iletkenler, metal partiküller/köpükler, özünde iletken polimerler, iletken karbon siyahı/lifler/nanotüpler ve grafen vb. gibi diğer karbon türevlerinin geniş çapta araştırıldığını ortaya koymaktadır. Partiküller, etkili bir kalkan tasarlamak için ya bir vaks ortamına ya da bir termoplastik matrise gömülür. Bu amaçla, polimer bazlı nanokompozitler, teknolojiye uygun özellikleri, hafifliği, üretim ve adaptasyon kolaylığı, korozyon ve tasarım esnekliği nedeniyle çok tartışılmıştır. Bununla birlikte, etkili

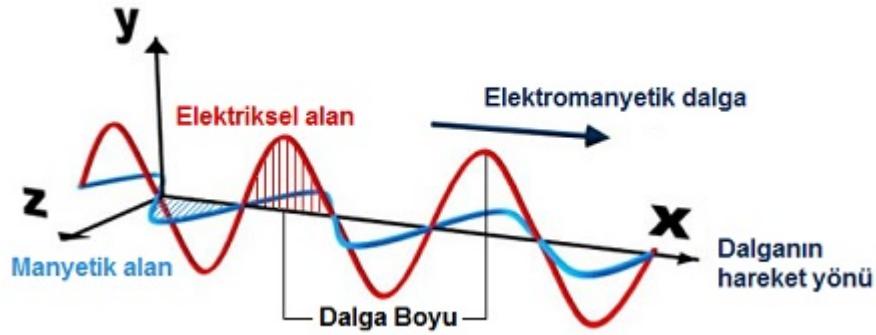
bir kalkanın gereksinimlerini karşılamak için gereken yüksek dozda nanodolgu maddeleri, birçok açıdan kullanımlarını engeller. Çift perkulasyon eşine sahip segregе polimer karışımları farklı açılardan araştırılmış olsa da, bunları mikrodalga ekranlama için bir şablon olarak kullanmak, tek polimer bazlı nanokompozitlere kıyasla şu anda büyük ilgi görmektedir. Bu sebeple literatürde endüstriyel olarak üretime en uygun olan yöntem olan plastik enjeksiyon ve plastik enjeksiyon yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen polimer matrisli kompozitler konusunda eksik bulunmaktadır. Bu sebeple, termoplastik matris olarak çift fazlı düşük yoğunluklu polietilen (AYPE) ve stiren akronitril (SAN) kompozisyonu ile hiyerarşik segregе bir yapı oluşturulacak olup elektrik iletkenliğini için çok cidarlı karbon nanotüplerin ilave edildiği hiyerarşik bir nanokompozit yapı üretilmesi amaçlanmıştır. Nanokompozit içerisine katılacak farklı oranlarda ÇDKNT'ler ile mekanik, elektriksel ve termal özellikleri kontrol edilebilir çok fonksiyonlu nanokompozitlerin üretimi ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi sistematik olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma ile nihai çok fonksiyonlu nanokompozit ait elde edilecek elektriksel ve elektromanyetik kalkanlama sonuçlarına bağlı olarak ticarileşme potansiyeli değerlendirilmesi ve sonucunda elektromanyetik kalkanlama için kullanılacak düşük maliyetli ancak fonksiyonel özelliklere sahip termoplastik nanokompozitler elde edilmesi amaçlanmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Elektrik Alan

Elektrik alan tanım olarak elektrik yükünün belirli bir bölgeye uyguladığı kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Şiddeti ise Volt / metre (V/M) cinsinden derecelendirilmektedir. Şekil 1’de elektrik alanın pozitif ve negatif yükteki vektörleri gösterilmektedir. Şekil 1’e göre elektrik alan vektörü pozitif yükse dışa, negatif yük için ise içe doğru yönelmektedir (Çınar, 2006).



Şekil 1. Elektromanyetik Dalga

Aşağıdaki Tablo 1’de ise elektrik alan ve manyetik alanın karşılaştırması bulunmaktadır.

Tablo 1.

Elektrik ve Manyetik Alan Arasındaki Farklar (Meskan, 2018)

ELEKTRİK ALAN	MANYETİK ALAN
1- Elektrik alan şiddeti voltaj ile doğru orantılıdır voltaj arttıkça artar.	1 – Şiddeti akım ile doğru orantılıdır. Arttıkça artar.
2- Büyüklüğü Volt/m cinsinden ifade edilir.	2 – Büyüklüğü genelde Amper/m cinsinden ifade edilir. Bunun yanında microtesla (μT) ve militesla (mT) birimleri de kullanılır.
3- Çevremizdeki cihazlar kapalı konumda dahi elektrik alan oluşturmaktadır.	3 – Manyetik alanın oluşabilmesi için öncelikle ortamda elektrik akımı olmalıdır. Yani cihazlar kapalı konumda manyetik alan oluşturmazlar.
4- Şiddeti kaynak ile arasındaki mesafe arttıkça azalır.	4- Şiddeti kaynak ile arasındaki mesafe ile ters orantılıdır arttıkça azalır.
5- Bina yalıtım malzemeleri elektrik alan açısından yalıtım özelliği gösterebilmektedir.	5 – Manyetik alan şiddetinin üzerinde azaltıcı etkisi olan malzemelerin nadirdir.

Elektrik yüklerinin hareketi sinüzoidal bir davranış olup buldukları ortamda sürekli devam eden, ardışık olarak tekrarlayan bir şekilde ilerleyerek elektromanyetik dalgayı oluştururlar. Her elektromanyetik alanın bir frekansı ve dalga boyu vardır. Bu dalga boyu Denklem 2.1 ile hesaplanmaktadır (Meskan, 2018).

λ : Dalga Boyu

f : Frekans

c : Işık Hızı (Boşlukta sabit 299792458 m/s)

$$C = \lambda \times f \quad (2.1)$$

Formülü dikkate aldığımızda frekans artması demek dalga boyu uzunluğu azalması anlamına gelmektedir. Bu sebeple ile dalga boyu ve frekans arasında ters orantılı bir ilişki

vardır. Elektromanyetik dalgalar farklı frekans ve dalga boylarına sahiptir fakat diğer özellikler yönünden birbirlerine benzerdir.

Elektromanyetik dalga enerjilerinin frekans ile olan ilişkileri;

$$E = h \times f \quad (2.2)$$

Formülü ile açıklanır. Formüle göre; E: Enerji h: Planc sabiti f: frekans ifade eder. Elektromanyetik dalga ve dalga boyu arasındaki bağıntı;

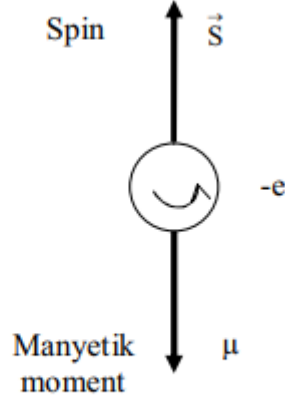
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.3)$$

Formülü ile açıklanır.

Farklı frekans ve dalga boylarına sahip elektromanyetik dalgalar elektromanyetik spektrumu oluşturur. Elektromanyetik dalgalar spektrumunda dalga boylarına göre.; radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızıl ötesi, görünür ışık , morötesi, x-ışını ve gama ışını (γ -ışını) olarak adlandırılıp sıralanırlar (Meskan, 2018).

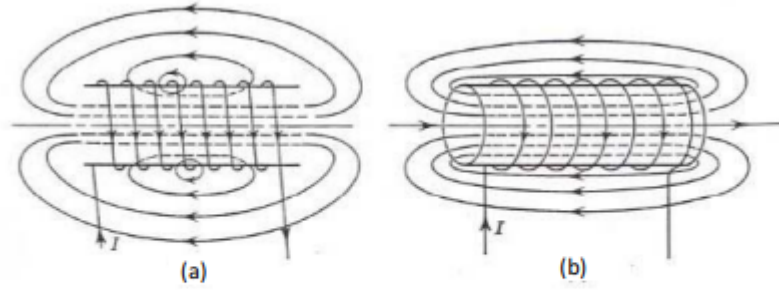
2.2. Manyetik Alan

Elektrik yüklerinin hareketi ile meydana gelen etki manyetik alan olarak adlandırılır. Manyetik bir yerdeki manyetik kuvvetin dağılımını ifade etmek için kullanılır. Atom içerisindeki negatif yüklü olan elektronlar hem yörüngesel hem de kendi etraflarında bir harekete sahiptirler (Şekil 2). Manyetik vektörel bir büyüklük olup; yönü, şiddeti ve doğrultusu vardır. Büyüklüğü Amper / m cinsinden belirlenir (Yan vd., 2012).



Şekil 2. Elektronun Spin ve Manyetik Momenti (Haken, 2000)

Bir ortamdaki manyetik alanı belirtmek amacı ile kuvvet – manyetik akı çizgilerinden yararlanılır (Şekil 3). Kuvvet kutupları N kutbundan çıkıp S kutbuna girecek şekilde olup kapalı bir döngü oluştururlar (Yan vd., 2012).



Şekil 3. Elektromanyetik Alan Kuvvet Çizgileri a) Hava çekirdekli solenoid b) Demir çekirdekli solenoidde manyetik alan kuvvet çizgileri (Yan vd., 2012)

2.3. Elektromanyetik Alan

Elektromanyetik alan, elektrik alan ve manyetik alanın yüklerinin hareketinden ortaya çıkması sebebi ile manyetik alan-elektrik alanın kombinasyonu olarak düşünülebilir. Hareket halindeki yükler sebebi ile ortamda hem elektrik alan hem de manyetik alanın etkileri hissedilir. Maxwell ve Faraday, elektromanyetik alan için yüklerin hareketlerinden

kaynaklandığını ve zamana bağlı olarak değişiklik gösteren elektrik alanın manyetik alan oluşturacağını bularak formüleştirdiler (Aile, 2020).

Doğa içerisinde de kendi kendine oluşan manyetik alanlar gözlemlenmektedir. Doğal olan elektromanyetik dalgalar gözle görülemeyen elektromanyetik dalgalardan oluşurlar, atmosferde meydana gelen şimşek, yıldırım gibi doğal olaylarda doğal – lokal elektrik alan meydana getirir (Aile, 2020).

Aşağıdaki tabloda günlük hayatımızda maruz kalabileceğimiz doğal ve doğal olmayan elektromanyetik kaynaklara örnekler verilmiştir.

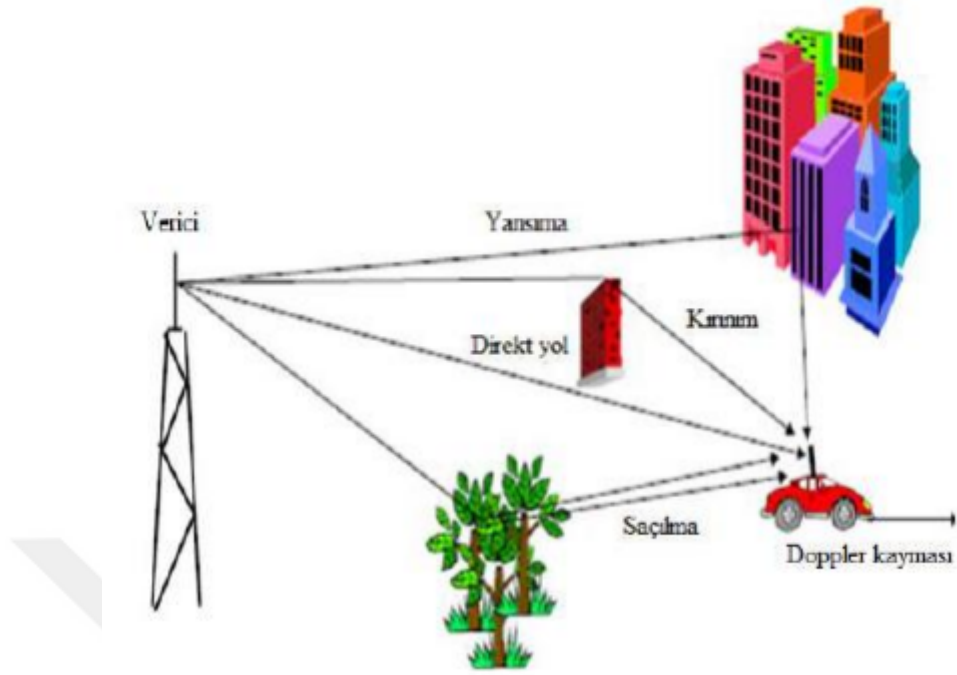
Tablo 2.

Elektromanyetik Dalga Kaynakları (Aile, 2020).

Doğal Elektromanyetik Kaynaklar	Doğal Olmayan Elektromanyetik Kaynaklar
Yıldırım	Bilgisayar
Güneş	Televizyon
	Elektrikli Ev Aletleri
	Elektrik Hatları
	TV – Radyo Vericileri
	Baz İstasyonları

2.3.1. Elektromanyetik Dalga ve Elektromanyetik Dalganın Yayınımı

Dalga, uzay zaman içerisindeki bir ortamda yayılarak bir konumdan diğer konuma giden enerji titreşimi olarak adlandırılabilir. Elektromanyetik dalgalar buldukları ortamlarda karşılarına çıkan engellerine rağmen hareketlerine devam etme eğilimindedir. Ancak karşılarına çıkan engeller ile aralarındaki etkileşim hareketlerinin durumunu değiştirebilir. Bu engeller saçılma, kırılma, kırınım ya da yansıma şeklinde dalganın hareketine devam etmesini sağlayabilir. Şekil 4’te elektromanyetik dalganın yayılım gösterimi verilmiştir (Yaman, 2011).



Şekil 4. Elektromanyetik dalganın yayınımları (Yaman, 2011)

Yansıma: Elektromanyetik dalgalarda anı ışığın ayna yüzeyinden geri yansımaya gibi karşılaştığı cisimlerden, engellerden geriye yansıtılabilir. Tam yansımanın gerçekleştiği durumlarda elektrik alanının şiddeti alıcı noktasında daha güçlü yayınımla ya da sönümlenme elde edilmesine sebep olur (Yaman, 2011).

Kırınım: Elektromanyetik dalganın karşılaştığı engelin ardından kırınımına uğraması ve belirli bir oranda güç kaybederek ilerler (Yaman, 2011).

Kırılma: Elektromanyetik dalgalar bulunduğu ortamın yoğunluğuna bağlı olarak yüzeye paralel olma eğilimindedir ve çok yoğun bir ortamdan az yoğun olan ortama geçmesi durumunda ilerleme yönünde uzaklaşır. Eğilme tam olarak yüzeye paralel olduğu durumda elektromanyetik dalganın artık yatay polarize durumdadır. Düşük frekanslı elektromanyetik dalgalarda bu eğilme daha az olması sebebi ile dalganın daha uzun yol kat edebilir (Yaman, 2011).

Saçılma: Bir elektromanyetik dalganın cisim ve yüzeylere çarpmasının ardından çok sayıda, rastgele yönlerde dağılıp ortamda kompleks bir yapı oluşmasıdır. Saçılmaya uğramanın ardından elektromanyetik dalganın gücünde zayıflar (Yaman, 2011).

2.3.2. Kuplaj

Kuplaj, kelime anlamı ile bir elektriksel sinyalin bir noktadan başka bir noktaya aktarılması amacı ile yapılan bağlantı anlamına gelmektedir. Elektromanyetik girişimin kaynağı ve bu girişimden etkilenen sistem arasında kuplaj iki yol ile sağlanmaktadır [54]. Bunlar;

Işıma Yolu ile Kuplaj: Atmosfer vasıtası ile gerçekleştirilen ışıma yolu ile kuplaj 30 MHz – 40 GHz aralığındadır. Kuplaj ortamda antenden antene, ortamdaki alandan kabloya, kablodan ortamdaki alana ya da kablodan kabloya gerçekleşebilir. Işıma yolu ile kuplajın örneği Şekil 5'te gösterilmektedir (Meskan, 2018).



Şekil 5. Işıma yolu ile kuplaj

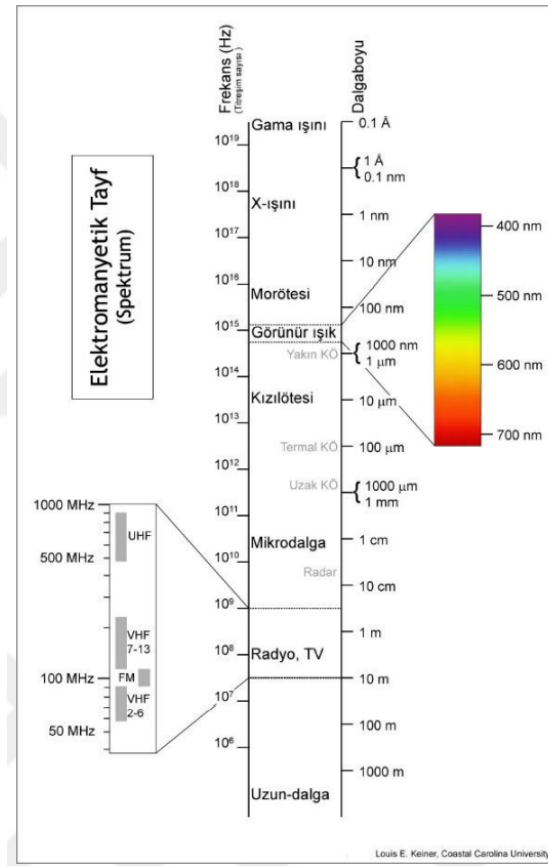
Elektriksel İletkenlik ile Kuplaj: Elektriksel iletkenlik yolu ile kuplajda, girişim kaynağı ile etkilenen sistem arasında bulunan elektriksel iletkenliğe sahip olan bir malzeme ile gerçekleşir. Güç hatları, ortak toprak empedansı elektriksel iletkenlik ile kuplaja örnek olabilir. Elektriksel iletkenlik ile kuplaj 150 KHz – 30 MHz aralığında görülebilmektedir (Meskan, 2018).

Elektromanyetik dalga kuplaj ile cihaza ulaşır ve dalganın frekansına, genliğine bağlı olarak cihazı etkileme büyüklüğüne bağlı olarak cihazın performansında bozulmalar meydana gelir (Meskan, 2018).

2.3.2. Elektromanyetik Spekturum

Bir elektromanyetik enerjinin dalga boyu ve frekansına bağılı olarak sınıflandırılması elektromanyetik spektrum olarak isimlendirilir. Spektrumda en yüksek frekansa sahip olan elektromanyetik dalgaların enerjisi de en büyüktür (Kılıç vd., 2007)

Dalga boyu ve frekanslarına bağılı olarak elektromanyetik dalgaların sınıflandırması Şekil 6'da ki gibidir.



Şekil 6. Elektromanyetik Dalga Spekturumu (Wikipedia, 2008)

Radyo Dalgaları: Dalga boyları 1 m'den büyük frekansları ise 10^9 Hz'e kadardır. Televizyon, telefon vb. cihazlara bağlanmak amacı ile titreşimli devreler ile üretilirler. Elektromanyetik dalga spektrumun büyük bir bölümünü radyo dalgaları oluşturmaktadır (Kılıç vd., 2007).

Mikrodalgalar: Boyları 3×10^{-1} ile 1×10^{-3} m arasında değişir ve radar, mikrodalga fırın ve kablosuz iletişim gibi yerlerde karşımıza çıkarlar. Spektrumda mikrodalgaların yer aldığı bölüme UHF bölgesi denir (Kılıç vd., 2007).

Kızılötesi Dalgalar: Dalga boyları 710 nm – 1mm arasındadır. Sıcak ve soğuk olan tüm maddeler tarafından üretilir. Kızılötesi dalgalar atomlar tarafından emildiğinde ortaya ısı çıkar. Bu nedenle ısı radyasyonu olarak da isimlendirilirler (Kılıç vd., 2007).

Görünür Işık Dalgaları: Göz retinası tarafından algılanabilen, boyları 7.8×10^{-3} – 3.8×10^{-7} frekansları ise 4×10^{14} – 8×10^{14} arasında değişen dalgalardır (Kılıç vd., 2007).

Morötesi dalgalar: Spektrum içerisinde görünür dalga boylarından daha yüksek ve daha düşük enerjili olan bölgesindedirler. Dalga boyları 3.8×10^{-7} - 6×10^{-10} frekansları ise 8×10^{14} - 3×10^{17} arasındadır. En büyük morötesi dalga kaynaklarından biri de güneştir (Kılıç vd., 2007).

X-Işınları: Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen tarafından ilk defa keşfedilen elektromanyetik spektrumun bu bölgesi, 10^{-9} – 6×10^{-12} m arasında dalga boyuna, 3×10^{17} - 5×10^{19} Hz arasında frekansa sahiptir. Atomik çekirdekleri ve elektronları saptırmaları sebebi ile kanser tedavisinde ve kristal yapı araştırmalarında kullanılırlar (Kılıç vd., 2007).

Gama Işınları: Spektrumdaki en yüksek frekansa ve enerjiye sahip olan gama ışınları, 10^{-10} - 10^{-14} m arasında boya 3×10^{18} – 3×10^{22} arasında frekansa sahiptirler. Canlılar üzerinde ölümcül etkilere sebep olabilen gama ışınları kanser tedavisinde kanserli hücrelerin öldürülmesi amacı ile kullanılmaktadırlar (Kılıç vd., 2007).

2.4. Elektromanyetik Kalkanlama

Kalkanlama ya da elektrik-elektronik alanında kullanılan ekranlama terimi, bir cihaz ya da devrenin elektromanyetik yönden izole hale getirilmesi olarak tanımlanabilir (Sevgi, 2000).

Elektromanyetik dalgalar belirli bir frekans çerçevesinde hareket etseler de şiddetleri kaynağa olan uzaklıklarının artmasına bağlı olarak azalma gösterirler. Bir elektromanyetik alandan korunmanın en etkili yolu ortamdaki uzak olmak olsa da pratikte pek mümkün değildir. Bu sebeple elektromanyetik dalgaların ortamdaki etkilerinin azaltılması, savunma

sanayii gibi alanlarda korunma vb. sebepler ile elektromanyetik kalkanlamaya ihtiyaç duyulmaktadır (Yılmaz, 2014).

Bir malzemenin elektromanyetik kalkanlama amacı ile kullanılabilmesi için sahip olabilmesi için öncelikle iyi bir elektrik iletkenliğine sahip olması gerekmektedir böylece elektromanyetik dalgaların malzeme içerisine nüfusu minimuma indirilebilir. Elektromanyetik kalkanlama amacı ile geçmişte daha çok metaller kullanılırken; günümüzde malzemelerin zayıf yönlerini dengelemek amacı ile geliştirilen kompozitlerden oluşan pek çok uygulama karşımıza çıkmaktadır (Yılmaz, 2014).

Kompozit malzemelere elektromanyetik kalkanlama özelliğini kazandırmak amacı ile iki metod kullanılmaktadır. Bunlar;

- 1 – Plastik yüzeyini iletken bir metal ile kaplamak
- 2 – Polimeri iletken bir dolgu maddesi ile karıştırmak

İletken dolgu maddesi kullanımı ile yapı içerisindeki iletkenler lifler sadece malzemeye elektrik iletkenliği kazandırmak ile kalmayıp, dayanımı üzerinde de olumlu etkiler göstermektedir (Zhai vd., 2018)

Elektromanyetik Kalkanlama, bir malzemeye giren elektromanyetik dalgaların yüzey tarafından yansıtılması ya da soğurulması mantığı ile elde edilmektedir. Aşağıda yer alan denklemlerde elektromanyetik kalkanlama etkinliği bileşenleri gösterilmektedir.

EMG'nin önüne geçilmesi amacı ile iletken malzemelerden elde edilen ekranlar kullanılarak gelen elektromanyetik dalgaların zayıflatılması sağlanmaktadır. Kalkanlama etkisi için de “koruyucu etkinlik” kavramı oluşturulmuştur. Koruyucu etkinlik kavramı bir ekrana gelen elektromanyetik dalgadaki azalma olarak ifade edilebilir ve büyüklüğü desibel (dB) cinsinden ifade edilir. Eşitlik 2.4-2.8 de kalkanlama etkinliğinin logaritmik olarak gösterimi yer almaktadır (Wang vd., 2020)

$$SE_{dB} = 10 \log \left(\frac{P^0}{P} \right) \quad (2.4)$$

$$P = I^2 R \quad (2.5)$$

$$\frac{P^0}{P} = (I^0)^2 R / I^2 R \quad (2.6)$$

$$10\log(P^0/P) = 10\log(I^0/I)^2 \quad (2.7)$$

$$SE_{dB} = 20\log\left(\frac{I^0}{I}\right) \quad (2.8)$$

Eşitlikte yer alan SE elektromanyetik dalganın kaynağı ile bu dalgalardan etkilenen sistem arasında kalkanlama malzemesi olmadan ve kalkanlama malzemesi yerleştirilmesinin ardından ölçülen elektrik alan şiddetinin birbirine olan oranıdır. SE değeri ne kadar yüksek ise kalkanlama malzemesinin kalkanlama özelliğinin o kadar iyi olduğu söylenebilir. Aşağıdaki tabloda kalkanlama seviyeleri için belirlemem sınırlar gösterilmektedir (Wang vd., 2020).

Tablo 3.

Kalkanlama Seviyeleri

SE (Db)	Açıklama
10	Kötü
20	Alt Sınır
30	Orta
60	İyi
90	Çok İyi
120	Olağan Üstü

2.4.1. Elektromanyetik Kalkanlama Ölçüm Standartları

Amerika Birleşik Devletleri tarafından 1956 yılında yayınlanan MIL-STD-285 standardı 100 kHz – 10 GHz frekans aralığını kapsamaktadır. MIL-STD-285 standartında elektromanyetik dalga kaynağı odanın içerisinde bulunurken ölçüm ekipmanları ise oda dışarında yer alır (Więckowski ve Janukiewicz, 2006). Bu standartın adı daha sonraki

yıllarda IEEE-STD-299 olarak değiştirilmiştir. SE değeri numuneli ve numunesiz yapılan ölçüm sonuçları üzerinden değerlendirilmektedir (Więckowski ve Janukiewicz, 2006).

Elektromanyetik kalkanlama amacı ile tasarlanan odaların EM zayıflama ölçümlerini belirlemek amacı ile ortaya çıkan MIL-STD-907B standardı tesislerin güvenilirliğini sağlamak amacı oluşturulmuştur (Więckowski ve Janukiewicz, 2006).

1989 Yılında American Society for Testing and Materials (ASTM) tarafından geliştirilen bu yöntem düzlemsel malzemelerin elektromanyetik kalkanlama performanslarını ölçmek amacı ile kullanılmaktadır. Ölçümü yapılan malzemenin kalkanlama performansı SE yansımalarının yanı sıra ek kayıplar dikkate alınarak test ve referans numune arasında yapılan karşılaştırılma ile belirlenir. İki adımlı bir prosedürü bulunan ASTM D4935’de ilk olarak referans numunenin test adaptörüne yerleştirilmesinin ardından kuplaj dengelemesi yapılır ve ikinci aşamada ölçüm numunesi ile iki değer arasındaki SE farkı tespit edilir (Więckowski ve Janukiewicz, 2006).

1969 yılındaki versiyonu hala daha yayında olan IEEE STD 299 standardında ölçümler;

- 9 kHz – 20 MHz aralığında (Manyetik alan bileşimini belirlemek için)
- 20 MHz – 300 MHz (elektriksel alan bileşimini belirlemek için)
- 300 MHz – 18 GHz (düz dalga gücünü belirlemek için)

Yapılır. Önceki versiyonlar ile yapılan SE ölçümlerinin belirsizliğini açıklamak için yetersiz kalmaktaydı (Więckowski ve Janukiewicz, 2006).

TS EN 50147-1 standardı 9 KHz – 40 GHz aralığında elektromanyetik olarak kalkanlanan odaların zayıflama etiklerini belirlemek amacı ile 1996 yılında yayınlanmıştır (Ersöz, 2022).

Standart kapsamında yapılacak olan deneyler için;

- 9 KHz - 4 GHz frekans aralığında dalga işaret kaynağı
- Halka anten (Manyetik alanların ölçülmesi için kullanılır)
- Ayarlanabilir iki kutuplu anten (Düzlem dalgaların ve elektrik alanın ölçülmesi için kullanılır)
- Boynuzlu antenler (mikrodalga frekanslarının ölçülmesi için)

- Hassas Alıcılar
- Ek yerlerinden meydana gelebilecek sızıntılar için sondalar (Ersöz, 2022).

2.5. Polimerler

Yunancada çok anlamına gelen “poli” ve parça anlamına gelen “meros” kelimelerinin birleşiminden türetilen polimer kelimesi, adından da belli olduğu gibi birden fazla monomer zincirinin bir araya gelmesi ile oluşan kimyasal bir yapıdır. Polimerin yapısını oluşturan ve birbirlerine kimyasal bağlar ile bağlı olan monomerler aynı ya da farklı cins olabilir. Polimer zincirlerinin her halkası bir elementten oluşur. En çok görülenleri ise silisyum, hidrojen ve karbondur. Elementlerin bir araya gelmesi ile birleşir monomerleri, monomer zincirleri ise bir araya gelerek polimerleri oluşturur (Newmark, 2002)

2.5.1. Termoplastikler

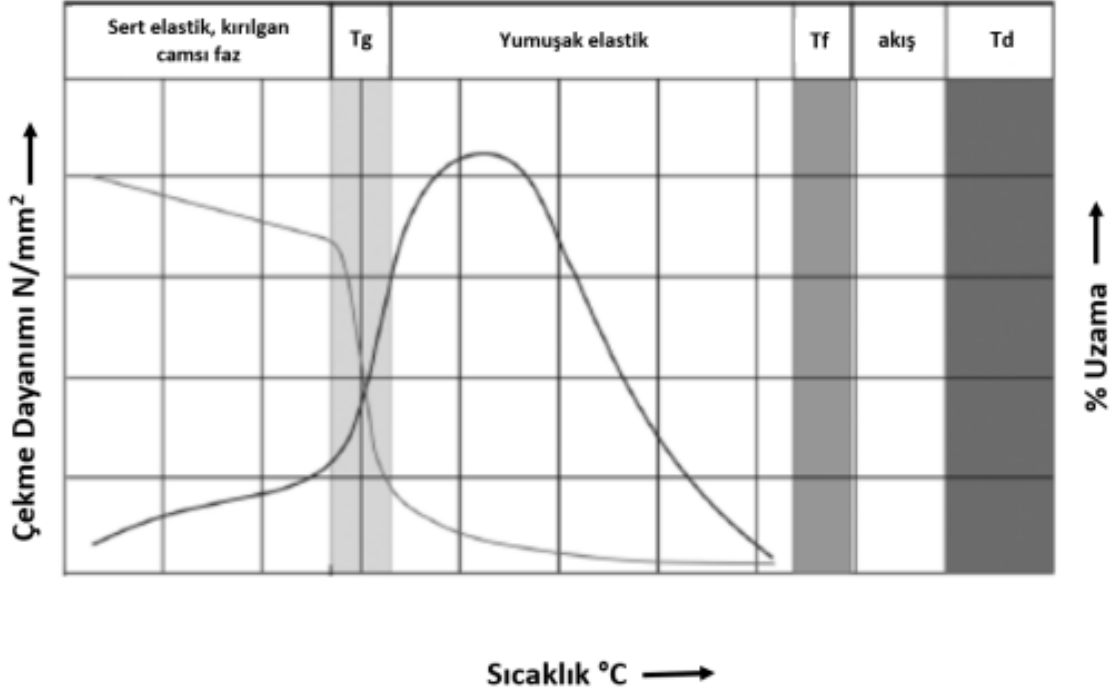
Termoplastikler tanım olarak zincirler arasında çapraz bağ bulundurmeyen yapılar olarak belirtilir. Yüksek kimyasallara, ultraviyole ışınlar ve çevresel etkilere karşı yüksek dirence sahip olan termoplastikler, yapısına bağlı olarak opak şeffaf ya da yarı şeffaf görünüme sahip olabilirler.

Isıtma ile eritilip soğutma ile şekillendirilebilmeleri olan termoplastiklerin en önemli özelliği bu işlemin yapılarında çok büyük değişiklikler olmadan tekrarlanabilir olmasıdır. Endüstride büyük bir üretim hacminde yer bulan termoplastik malzemeler enjeksiyon, ekstrüzyon vb. birçok üretim yöntemi ile proses edilebilmektedir. (Newmark, 2002)

Düzenli bir kristal yapısı bulunan amorf termoplastiklerin yapısı düzensiz birden fazla monomerin bir araya gelmesi ile oluşur. En önemli özellikleri gevrek ve şeffaf olmalarıdır. Polistiren (PS), Polivinil Klorür (PVC), Polikarbonat bu gruba ait en önemli üyelerdir.

Camsı geçiş sıcaklığının (Tg) altında şekil verilebilirliğini kaybeden amorf polimerler, Tg değerinin altında kırılındır. Tg değerinin üzerinde ise moleküllerin

hareketlerinin armasına bağı olarak yumuşamaya başlarlar ve şekil alabilir bir duruma gelirler. Malzemelerin üretim içindeki proses sıcaklıkları da Tg değerin üzerinde başlar.



Şekil 7. Amorf polimerlerin sıcaklığa bağı davranışı

Kristal yapısı amorf faz ile çevrili çok fazla monomerin bir araya gelmesi ile oluşan yarı düzenli yapılardır. Daha çok opak görümlü olup, tok ve elastik bir yapıya sahiptir. En bilinen yarı-kristal termoplastikler Polipropilen (PP), Poliamid (PA) ve Polioksümetilen (POM)'dur. İmalat sanayinde kullanım oranları oldukça yüksektir.

%100 Kristalleşmenin mümkün olmadığı polimer malzemelerde %80 oranındaki kristalleşme günümüzde maksimum seviye olarak kabul edilmektedir (Braun, 1985).

2.6. Kompozitler

Tanım olarak birden fazla homojen yapıda malzemenin kullanışlı özelliklerinin bir araya getirilmesi ile elde edilen heterojen bir karışım oluşturması ile elde edilen yapılardır.

Kompozit malzemenin ilk olarak ne zaman kullanılmaya başladığına ait net bir bilgi olmasa da yüzyıllardır kullanımının olduğu bilinmektedir. Örneğin mısırlıların tuğlaları güçlendirmek için yaptığı saman – çamur karışımı bilinen en eski örneklerdendir. Benzer bir yapıyı Maya ve İnka medeniyetlerinin de kullandığı bilinmektedir (Staab, 2015).

Ticari faaliyetlerde büyük ölçekli olarak kullanılmaya başlamaları ise 1940 – 1950’li yıllarda 2.dünya savaşında denizcilik faaliyetleri ile başlamıştır. Günümüzde ise havacılık, otomotiv, denizcilik, spor vb. birçok alanda kompozit malzemeler yer almaktadır. Üretim yöntemlerinin kolaylaşması, maliyetlerinin düşmesi endüstriyel alanda kompozitlerin kullanımının artmasını sağlamıştır. Örneğin Şekil 8’de Boeing markasına ait olan 787 model bir uçakta kullanılan malzemelerin sınıfları gösterilmiştir (Mazumdar, 2001).

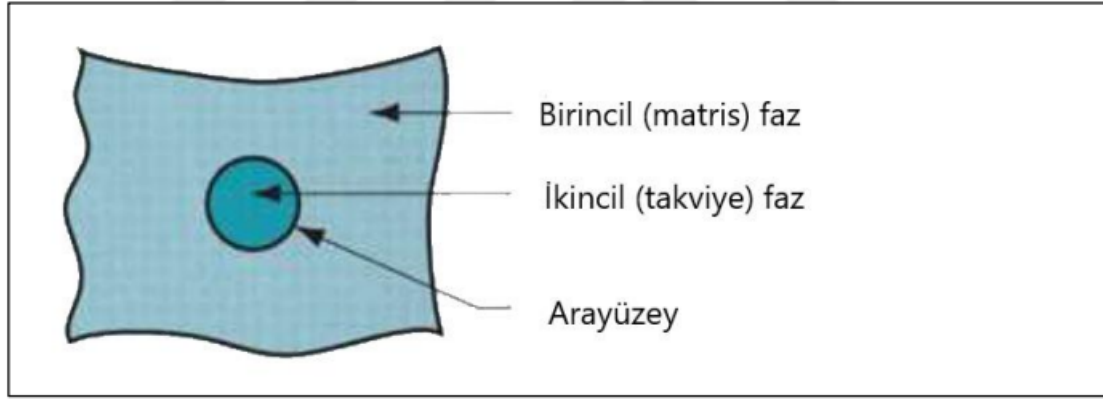


Şekil 8. Boeing 787 Yolcu Uçağının Malzeme Yapısı (Campell, 2010)

2.6.1. Kompozit Malzemelerin Yapısı

Daha çok bir veya daha fazla kesintili fazın sürekli bir faz içerisinde olması şeklinde olan kompozit malzemelerde sürekli faz matris, süreksiz faz ise takviye olarak adlandırılır. Genel olarak takviye malzeme matris fazın malzemesine göre çok daha güçlü ve sağlamdır.

Her iki bileşen de kompozit için gerekli olup ikisi de özel görevlerini yerine getirmelidir (Mazumdar, 2001).



Şekil 9. Kompozit malzemelerin genel yapısı (Mallick 2007)

Yapısındaki bulunan bileşenlerin özellikleri, geometrisi ve oranı kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemekte, performanslarını doğrudan etkilemektedir. Bir kompozit malzeme üretilirken – tasarlanırken kompozit malzemenin maruz kalacağı mekanik yükler, çalışma ortamı dikkate alınmalıdır (Mazumdar, 2001).

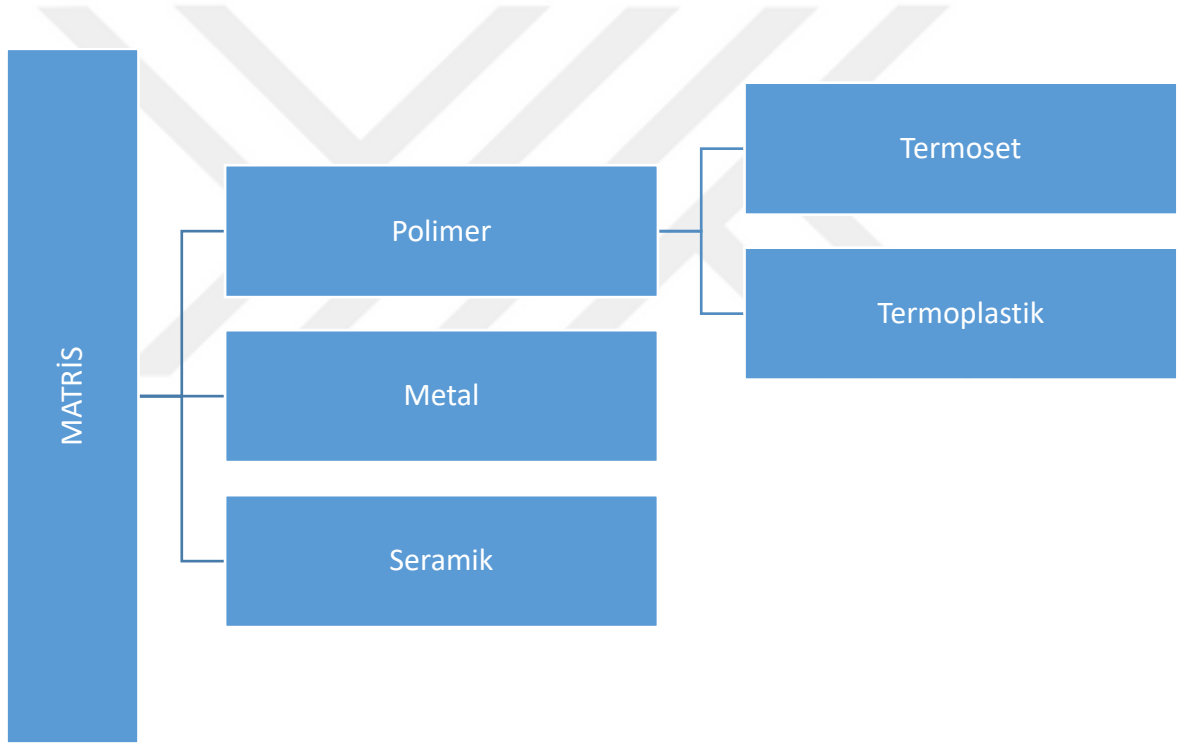
Kompozit malzemeye uygulanan kuvvet matris fazı tarafından ara yüzey yardımı ile takviye fazına iletilir. Böylece malzemedeki tahribatın önüne geçilmiş olur. Kompozit malzemelerin üretimi sırasında matris fazının tane büyüklüğü takviye fazı tarafından kontrol edilir. Bağlayıcılık görevi bulunan ara yüzey ise, kırılma bir yapıya sahip olmasına rağmen, uygulanan yükler karşısında herhangi bir kırılma ya çözünmeye uğramadan yükü takviye fazına iletir. Malzemenin elastikiyet modülünü en çok etkileyen faktör bu bölgedir. Kompozit malzemenin sağlamlığı ara yüzey bağının özelliğine doğrudan bağlıdır (Qu, 1993)

2.6.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzeme, İki veya daha fazla malzemenin zayıf yönlerinin dengelenmesi amacı ile makroskobik ölçekte birleştirilerek elde edilen malzemedir. Elde edilen kompozit malzeme bir araya getirilen malzemelerin güçlü özelliklerini gösterir. Malzemeler dayanım,

yorulma ömrü, sertlik, sıcaklığa bağlı olarak davranış, ısıl direnç, aşınma direnci, akustik yalıtım, ağırlık vb. yönlerden geliştirilebilir. Ana matris içerisine ilave edilen güçlendirici takviyeler ile elde edilen kompozit malzemelerde matris hem de takviye metal, polimer ya da seramik olabilir. Kompozit malzemeler genelde takviye malzemesine göre sınıflandırılır (Mazumdar, 2001).

Matris malzemesine bağlı olarak polimer, metal ya da seramik matrisli olabilen polimer matrisli kompozitlerde ticari amaçlı olarak en çok kullanılanlar polimer matrisli kompozitlerdir. Bunun yanında metal matrisli ve seramik matrisli kompozitlerde yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren alanlarda tercih edilmektedir (Mallick, 2007)



Şekil 10. Kompozitlerin Matris Türüne Göre Sınıflandırması

Polimer Matrisli Kompozitler

Polimerler birbirine kovalent bağlar ile bağlanan birden fazla monomerin bir araya gelmesi ile oluşan yapılardır. Düşük maliyet, yüksek mukavemet ve kolay proses edilebilirlikleri nedeni ile kullanımı çok yaygın olan polimer matrisli kompozitlerin en

büyük dezavantajları sıcaklık dayanımlarıdır. Polimer matrisli kompozitler termoset ve termoplastikler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar (Kaw, 2006)

Termoset polimerlerin zincirleri üç boyutlu bir yapıya sahiptirler ve kovalent bağlarla birbirine çapraz bağlıdırlar. Isıtma ile ayrışırlar. Çapraz bağlama işleminin ardından katılaşırlar ve tekrar şekillendirilemezler. Genelde oda sıcaklığında gerçekleştirilen serleştirme işlemi ısı ya da UV ışık yardımı ile gerçekleştirilir.

Doğrusal ya da dallanmış moleküllerden oluşan termoplastiklerin molekül içi bağları güçlü fakat moleküller arası bağları ise zayıftır. Yarı kristal ya da amorf turlar, ısı ve basınç yardımı ile şekillendirilebilirler. Endüstride oldukça büyük bir kullanım hacmine sahip olan termoplastiklerin en çok kullanılanları polietilen, polipropilen, polistiren, naylon vb. dir. (Kaw, 2006)

Metal Matrisli Kompozitler

Rijit takviyelerin metal ya da alaşım bir matris ile birleşiminden elde edilir. Takviyeler sürekli ya da kısa elyaf formunda olabilir. Yüksek tokluk, süneklik, sertlik ve modül gibi özellikleri bulunan metal matrisli kompozitler avantajlı fiziksel özellikleri sebebi ile havacılık ve otomotiv sektöründe oldukça yer bulmaktadır (Balasubramanian, 2013)

Ana metal malzemeye göre yüksek sıcaklık, düşük termal genişleme, yüksek mukavemet ve yüksek aşınma gibi özelliklerde avantajı bulunan metal matrisli kompozitlerin yüksek üretim maliyetleri en büyük dezavantajıdır (Campbell, 2010)

Seramik Matrisli Kompozitler

Oldukça sert ve kırılğan yapıya sahip olan seramik matrisli kompozitlerin güçlü iyonik ve kovalent bağları vardır. Düşük şekil değiştirme kabiliyetine sahip olan seramik matrisli kompozitlerin homojenlikleri de düşüktür. En büyük avantajları ise yüksek elastik modülü, düşük yoğunluk ve yüksek sıcaklık dayanımıdır (Chawla, 2012)

Uçak fren diskleri, roket nozulları, uzay mekiği iniş takımları, askeri uçak motor kaputları gibi birçok alanda kullanım yeri bulmaktadır.

Polimer Matrisli Kompozitler ve Elektromanyetik Kalkanlama

Polimer bazlı EMG koruyucu kompozitler, hafiflikleri, yüksek özgül mukavemetleri, korozyon dirençleri, kolay işlenmeleri ve mükemmel elektromanyetik koruma performansları nedeniyle giderek geleneksel metal bazlı elektromanyetik koruyucu malzemelerin yerini almaktadır. Polimer bazlı elektromanyetik koruyucu kompozitlerin elektromanyetik dalgalar üzerindeki koruyucu etkileri, esas olarak elektriksel/iletken ağ oluşturmak için polimer matrisine iletken dolgu maddeleri eklenerek gerçekleştirilir (Lee vd., 2016; Zhu vd., 2019)

Poliasetilen (PA), polipirol (PPY), polianilin (PANI) ve politiyofen (PTH) gibi birkaç içsel iletken polimerin yanı sıra, genel polimer matrisi iletken değildir. Bu nedenle, dielektrik ve manyetik kayıpları artırmak için matrise çok sayıda karbon nanotüp, grafen vb. iletken dolgu maddesi ve manyetik dolgu maddesi eklemek gerekir (Shi vd., 2018; Chen vd., 2020).

İletken dolgu maddeleri ve polimer matrisin doğrudan eritilerek karıştırılması, dolgu maddelerinin matris içinde eşit olarak dağılması için elektromanyetik parazit koruyucu kompozitlerin hazırlanmasında yaygın ve etkili bir yöntemdir (Saini vd., 2009; Kaushal vd., 2021). Bu tür kompozit malzeme, esnek matrisin ultra yüksek mekanik özelliklerini ve dolgu maddesinin iletkenliğini birleştirir. Üretimi basit ve maliyeti düşüktür; bu nedenle elektromanyetik parazit koruması alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhao vd., 2018; Chen vd., 2019) İletken dolgu maddeleri polimer matrisi içinde homojen bir şekilde dağıtılmalıdırlar. İletken dolgu maddelerinin artmasıyla, dolgu maddeleri polimer içinde süzülme davranışı sergiler. Kompozitin iletkenliği sıçramalarla artar ve dolgu içeriği belirli bir değere yükseldiğinde yalıtıktan iletkenliğe dönüşür. Burada dolgu maddesi içeriği perkolasyon değerini temsil etmektedir. Süzülme değeri ne kadar yüksekse, iletken dolgu maddesi içeriği de o kadar yüksek olacak ve bu da kompozitin maliyetini artıracaktır. Şu anda, tek tip bir yapıya sahip elektromanyetik koruyucu malzemelerin perkolasyon değeri

çok yüksektir ve elektromanyetik koruma etkinliği ticari koşulları karşılayan asgari 20-30 dB'dir (Zhu vd., 2020; Zhao vd., 2017)

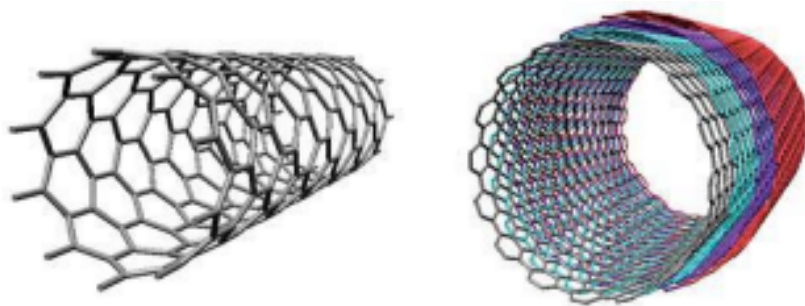
Bu nedenle, iletken polimerlerin yapısal tasarımı güncel bir araştırma odağıdır. İyi iletkenlik sağlamak için malzemenin süzülme değerini azaltabilir, üretim maliyetini düşürebilir ve iyi mekanik ve elektromanyetik kalkan özellikleri elde edebiliriz.

2.7. Dolgu (Takviye) Malzemeleri

2.7.1. Karbon Nanotüp

İlk olarak 1991 yılında Lijima tarafından keşfi yapılan karbon nanotüpler; nano boyuttaki karbon liflerdir. Uzunlukları birkaç mikron, çapları ise nanometre boyutlarında içi boş olan yapılardır. Yapısı, kimyasal bileşimleri grafit ile benzer olsa da onları diğer karbon yapılarından ayıran ve onlara eşsiz özelliklerini kazandıran ağırsı bir yapıya sahiptirler (Celep, 2007; Yüce, 2009)

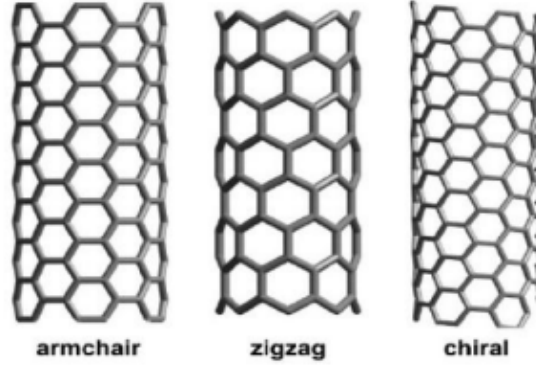
Tek duvarlı karbon nanotüp (TDKNT) ve çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT) olmak üzere iki farklı türü bulunmaktadır. Bu türler yapılarındaki silindirik grafit tabakasının sayısına göre belirlenir. Tek duvarlı karbon nanotüpte bir adet silindirik grafit tabaka bulunurken, çok duvarlı karbon nanotüpte bu tabaka birden fazladır. TDKNT yapılar 1 nm boyutlarında iken ÇDKNT yapıların boyutları 5 – 10 nm arasındadır.



Şekil 11. a) Tek Duvarlı Karbon Nanotüp b) Çok Duvarlı Karbon Nanotüp

TDKNT'ler sahip oldukları çap, boy ve geometrik yapılarına bağlı olarak dayanıklılık, esneklik ya da aksenal gerinimler altındaki kararlılıklarını koyabilen malzemelerdir.

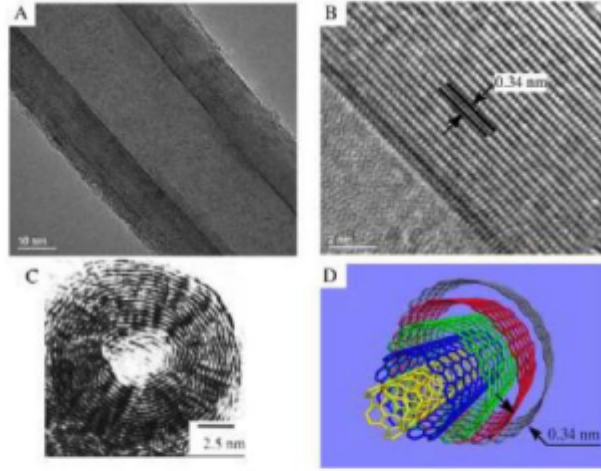
Yapılarını oluşturan grafen silindirlerin yönelimine göre kiral, zigzag ya da koltuk olarak adlandırılırlar. Genelde altıgen paketlenmiş kristalli demetler halindedirler ve demetler arasında van der Waals bağları bulunur (Yetim, 2011).



Şekil 12. Tek Katmanlı KNT'lerin katlanışlarına göre çeşitleri (Yetim, 2011)

Farklı çaplara sahip olan tek duvarlı karbon nanotüplerin iç içe geçmesi ile oluşan yapılardır. Yapılan kuramsal hesaplamalara göre duvarlar arası mesafe 0.339 nmdir. Ayrıca duvarlar arası zayıf van der Waals bağları bulunması nedeni ile duvarlar birbirinden bağımsız olarak dönme ya da öteleme hareketi yapabilir (Yuca, 2010).

ÇDKNT'de 0.14 nanometre uzunluğa sahip olan karbon karbon bağları, elmastaki karbon – karbon bağlarına göre daha kısadır. Kısa olan bu karbon – karbon bağları nanotüpün elmasa göre çok daha dayanıklı malzeme olduğunu göstermektedir. (Yuca, 2010).



Şekil 13. ÇDKNT A) Yanal TEM B) Yüksek Çözünürlüklü Yanal TEM C) TEM Ön Kesit D) MWCNT (Yuca, 2010).

2.7.2. Karbon Nanotüp Üretim Yöntemleri

Karbon nanotüpler genel olarak ark deşarj, lazer ablasyon ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) olmak üzere üç farklı yöntem ile üretilebilmektedir. Ark deşarj yönteminde katalizörlü ya da katalizörsüz iki karbon elektrot arasında oluşan karbon buharında nanotüp yapıları kendiliğinden elde edilir (Kingston vd., 2003)

Lazer ablasyon yönteminde iki güçlü lazer metan ya da karbon monoksit gibi karbon içeriğine sahip olan yapıya uygulanarak KNT'ler elde edilir.

CVD ile üretimde ise daha geniş bir çap aralığında üretime sahiptir. Buda kontrol edilebilirliği zorlaştırılır. Fakat ticari üretime uygunluğu sebebi ile de en çok tercih edilen yöntemdir.

2.8. Polimer İşleme Teknikleri

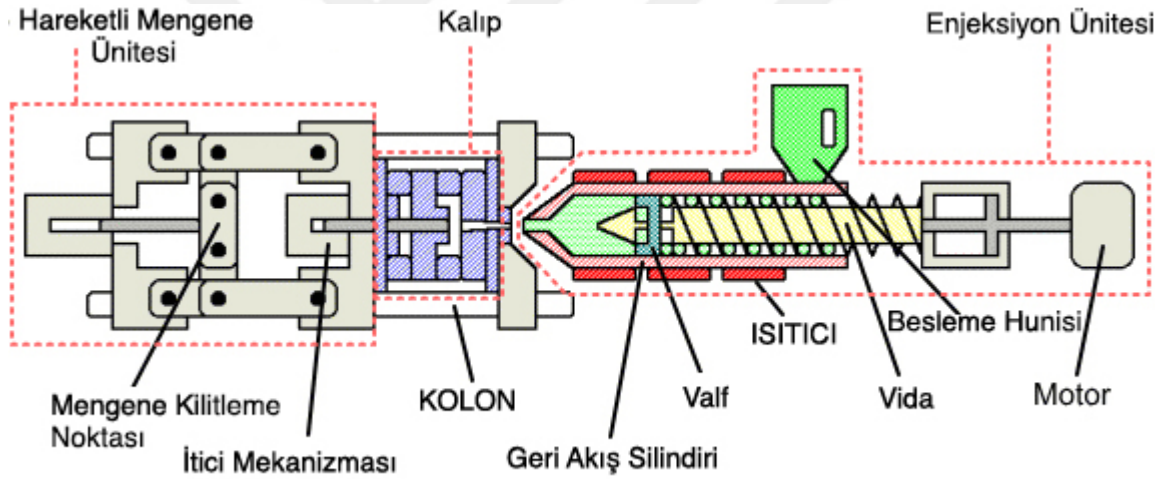
2.8.1. Plastik Enjeksiyon

Sıcaklık yardımı ile plastiğin eritilerek bir kalıp içerisine basınç yardımı ile doldurulması ve soğutulularak kalıptan çıkartılması işlemine plastik enjeksiyon denir. En

küçük parçalardan, bahçe mobilyası gibi büyük ölçekli ürünlere kadar çok geniş bir üretim yelpazesine sahip olan plastik enjeksiyon prosesinde;

- Kalıp kapama
- Hammadde Eritme
- Enjeksiyon
- Ütüleme
- Soğutma
- Kalıp Açma
- Çıkartma

Aşamaları bulunmaktadır.



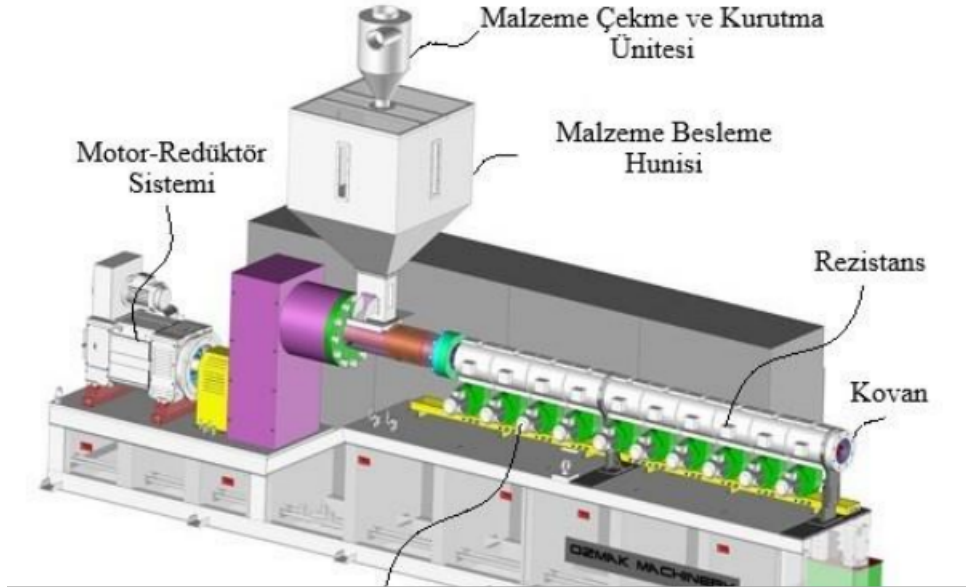
Şekil 14. Enjeksiyon Makinesi Temel Şeması

Enjeksiyon makineleri temel olarak mengene, enjeksiyon ünitesi ve kalıp olmak üzere üç ana bileşenden oluşurlar. Kapama ünitesi enjeksiyon anında yüksek basınca karşı kalıbın dişi ve erkek taraflarını birleştirerek kalıbı kapalı tutmaya yarayan ünedir (Former, 2023). Kovan üzerinde bulunan ısıtıcılar yardımı ile vida ve hammadde ısıtılır. Kovan içerisindeki vida dönerken vida hatveleri arasında sıkışan hammadde sürtünme ve kovan üzerindeki ısıtıcılar yardımı ile eritilir. Viskoziteli eriyik hamur kıvamındaki hammadde vidanın ön bölgesine giderek sıkışmanın olacağı bölgeye doğru hareket eder. Vida ön

bölgesindeki eriyik malzemeyi kalıbın yolluk deliklerinden yüksek basınç yardımı ile kalıp içerisine doldurur (Former, 2023). Parçanın elde edilmek istenen ölçülere ulaşmasının, kalıpta enjeksiyon anında oluşan boşlukların doldurulmasının ve çöküntülerin giderilmesinin sağlandığı aşamadır. Plastik kalıp içerisinde katı hale gelene kadar ütüleme işlemi devam eder (Former, 2023). Kalıp içerisinin doldurulmasının ardından plastik ürünün donmasının sağlandığı aşamadır (Former, 2023).

2.8.2. Plastik Ekstrüzyon

Latince kökenli bir kelime olan “ex – dışarı” ile “trude – itmek” kelimelerinin bir araya gelmesi ile oluşan ekstrüzyon adından da anlaşılacağı üzere malzemenin dönel hareket yapan vida, ısı ve basınç yardımı ile katıl haldeki malzemenin eriyerek kesintisiz olarak bir kalıptan dışarı çıkması ile oluşan prosestir. Proses esnasında malzemenin kimyasal yapısında bir değişiklik meydana gelmez (Ağbulut, 2018; Demiryürek, 2004; Bodur, 2010; Tadmor vd., 1970)



Şekil 15. Ekstrüder Genel Görüntüsü ve Elamanları (Funzel, 2019)

Ekstrüzyon prosesinde toz ya da granül haldeki hammadde ilk olarak besleme hunisini aktarılır. Daha sonra ise kovan bölümüne giren bu hammadde motor redüktör sisteminin tahrik alan taşıma etkisi ve sonsuz vidanın sıkıştırma özelliği ile huniden gelen granüllerin taşınması sağlanır. Bu taşıma sırasında hem kovan çevresinde bulunan ısıtıcılar hem de dönen vidanın sürtünmesinin etkisi ile toz ya da granül haldeki malzeme eriyeme başlar. Kalıp içerisinde çıkan şekillenmiş hammadde soğutma işleminin ardından nihai şeklini alır (Ağbulut, 2018). Şekil 15’de ekstrüderin genel bir görüntüsü verilmiştir



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada termoplastik polimer matris olarak stiren akronitril (SAN) ve ticari olarak masterbatch halinde elde edilen Nanocyl firması tarafından üretilen (Belçika) bir masterbatch Plasticyl LDPE 1501 kullanılmıştır. Masterbatch karbon nanotüp takviyeli olup ÇDKNT konsantrasyonu ağırlıkça 15 ± 1 olacak şekilde hazır olarak temin edilecektir. AYPE takviyesinde kullanılan çok cidarlı karbon nanotüpler katalitik kimyasal buhar biriktirme (CCVD) ile üretilmiş (NC7000 CNT), ortalama çapı 9.5 nm ve uzunluğu 1.5 um olan çok duvarlı karbon nanotüplerdir (ÇDKNT).

3.1. Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Takviyeli PE Masterbatch

Masterbatch karbon nanotüp takviyeli olup ÇDKNT konsantrasyonu ağırlıkça 15 ± 1 olacak şekilde hazır olarak temin edilecektir. AYPE takviyesinde kullanılan çok cidarlı karbon nanotüpler katalitik kimyasal buhar biriktirme (CCVD) ile üretilmiş (NC7000 CNT), ortalama çapı 9.5 nm ve uzunluğu 1.5 um olan çok duvarlı karbon nanotüplerdir (ÇDKNT).

3.2. Stiren Akrlonitril (SAN)

Bir kopolimer olan SAN bileşiminde ortalama %20-%20 arasında akrilonitril bulundurulur. İyi kimyasal direnç ve orta seviyede sıcaklık dayanımına sahip olan stiren akrilonitril saydam ve parlak bir yapıya sahiptir. Yüksek saydamlık, kimyasal direnç, parlak yüzey, boyutsal kararlılık ve şeffaflık başlıca avantajlarıdır.

3.3. Kompozit Üretimi

3.3.1. Numunelerin Hazırlanması

Kompozitler Tablo 4'de verilen oranlara göre 25 mm eş yönlü çift vidalı, 800 kN enjeksiyon kalıplama kuvvetine sahip olan Engel Spex Victory 80 plastik enjeksiyon makine ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 16. Engel Spex Victory 80 Enjeksiyon Makinesi

Numunelerin üretiminde tüm ısıtma bölgelerinde eşit 200 ° C sıcaklık profili izlenmiş olup, çekme testi numuneleri üretimi gerçekleştirilmiştir. Diğer analizler için gerekli olan test numuneleri çekme testi numuneleri üzerinden ihtiyaç olan ölçülerde kesimler yapılması ile elde edilmiştir

Tablo 4.
Hazırlanan kompozit numunelerinin bileşimleri

Numune	AYPE (%)	SAN (%)	ÇDKNT (%)
MB0	0	100	0
MB25	20	75	5
MB50	40	50	10
MB75	60	25	15
MB100	80	0	20

3.4. Analiz ve Deneyler

3.4.1. DMA Analizi

DMA analizlerin ile tabakalı kompozitlerin dinamik yorulma yükü etkisi altında, değişen frekans ve sıcaklıklarda depolama modüllerindeki değişim ve camsı geçiş sıcaklıklarının belirlenmesi amacı ile yapılmıştır. ASTM D7028-07'ye göre bir Mettler Toledo DMA/SDTA861e analiz cihazı kullanarak dikdörtgen numuneler ($80 \times 13 \times 3 \pm 0.3$ mm³) üzerinde üç nokta bükme modunda dinamik mekanik analiz (DMA) gerçekleştirdik. DMA'yı 30 ila 130°C arasında değişen sıcaklık tarama modunda, 1.0 Hz sabit salınım frekansında 5.0°C/dak ısıtma hızıyla gerçekleştirdi ve her bir numune için ise 5 tekrar yapılmıştır.

3.4.2. TGA Analizi

Termal stabilite bir Termogravimetrik analiz (TGA) cihazı (Perkin-Elmer 8000) kullanılarak incelenmiştir. Analiz, azot atmosferinde 10 °C/dak ısıtma hızında gerçekleştirilmiş ve sıcaklık aralığı 30 ila 600 °C arasında olmuştur.

3.4.3. Elektriksel İletkenlik ve Direnç

Düzlem dışı elektrik iletkenliği ölçmek için ASTM D4496-13'e göre OGSM 830B model multimetre kullanılarak iki prob yöntemi uygulanmıştır. Direnç, öz direnç ve iletkenlik değerleri sırası ile Denklem 1, Denklem 2 ve Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır (Yıldırım vd., 2022; Damnalı vd., 2019; Dashan Mi vd., 2021).

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

$$\rho = \frac{(R \times A)}{l} \quad (3.2)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

Burada, ρ öz direnç, R direnç (ohm), V elektrik potansiyel farkı (Voltaj) A kesit alanı (cm²), I temas uzunluğu (cm) ve σ elektriksel iletkenliktir (S/cm). X-bandında (8.2-12.4 GHz) Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliği (EMKE) ölçümü için bir vektör ağ analizörü (ANRITSU VNA MS2028C) ve iki WR-90 dalga kılavuzu kullanılmıştır. 10×19×3 mm boyutlarındaki numuneler, bir numune tutucu kullanılarak dalga kılavuzları arasında merkezleştirilmiştir. Saçılma parametreleri, yansımaya katsayısı (S11) ve iletim katsayısı (S21) ölçülmüştür (Yıldırım vd., 2022; Oraby vd., 2021; Jia vd., 2022).

Toplam EMSE (SETotal), SER (SE yansımaya), SEA (SE absorpsiyonu) ve SEM (SE çoklu iç yansımaya) toplamından denklem (4) takip edilerek hesaplanabilir (Yıldırım vd., 2022; Oraby vd., 2022).

$$SE_{Total} (dB) = SE_R + SE_A + SE_M = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_i} \right) \quad (3.4)$$

Burada, P_i gelen ve P_t iletilen EM dalgalarının gücüdür. SETotal ±10 dB'den büyük olduğunda, SEM ihmal edilebilir. S parametreleri açısından SEA (dB), SET (dB) ve SER (dB) parametreleri aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilebilir (Denklem (3.5), (3.6) ve (3.7) (Yılmaz, 2014; Kaushal ve Singh, 2021; Saini vd., 2009).

$$SE_A(dB) = 10 \log\left(\frac{1-S_{11}^2}{S_{12}^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1-S_{22}^2}{S_{21}^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1-R}{T}\right) \quad (3.5)$$

$$SE_T(dB) = 10 \log\left(\frac{1}{S_{12}^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{S_{21}^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{T}\right) \quad (3.6)$$

$$SE_R(dB) = 10 \log\left(\frac{1}{1-S_{11}^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{1-S_{22}^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{1-R}\right) \quad (3.7)$$

Burada, A absorbans, T geçirgenlik ve R yansıma değeridir. Yansıtma (R), geçirgenlik (T) ve absorbansın (A) toplamı her zaman 1'e eşittir (Yılmaz, 2014; Kaushal ve Singh, 2021; Saini vd., 2009).

Yüksek frekansa sahip elektromanyetik radyasyon, iletken (elektriksel) bir malzemenin sadece yüzey bölgesinin yakınına nüfuz eder. Bu durum deri etkisi olarak bilinir ve alanın gelen değerin 1/e'sine düştüğü derinliğe deri derinliği denir (Jia vd., 2022; Kumar vd., 2013). Soğurma kaybı, malzemenin deri derinliği ile ters orantılıdır. Absorbans ve deri derinliği arasındaki ilişki aşağıdaki denklem (Denklem 8) kullanılarak hesaplanmıştır (Kim vd., 2014; Yılmaz, 2014).

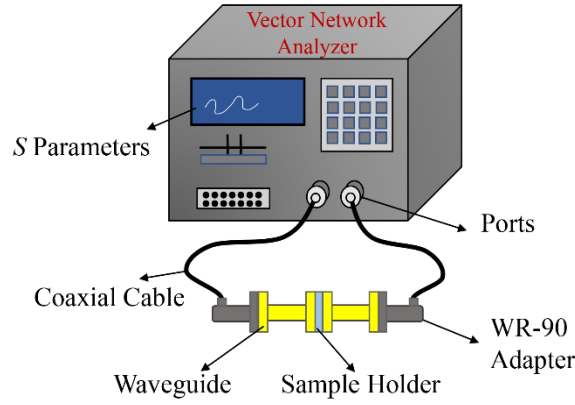
$$\delta = -8.68 \left[\frac{t}{SE_A} \right] \quad (3.8)$$

Burada δ deri derinliği, t numune kalınlığıdır (mm).

3.4.4. Elektromanyetik Ölçümler

Kompozitlerin elektromanyetik kalkanlama verimleri, Anritsu MS2028C VNA master vektör network analizörü (20 GHz) ile ölçülmüştür. EMSE ölçümleri genelde ASTM-D 4935 standardını esas alan koaksiyel tutucu metodu ile yapılır. Bununla birlikte bu ölçüm yönteminin frekans bölgesi 1.5 GHz'ye kadar sınırlıdır. Düzlemsel malzemelerin performansını analiz etmek için kullanılan 18 GHz'e kadar daha yüksek frekans için diğer ölçüm teknikleri IEEE 299 standardına dayanmaktadır. Ancak IEEE 299 standardının malzemelere uygulanabilmesi için minimum numune uzunluğu gereksinimi 2 metredir. Böyle bir malzemenin üretilmesinin genellikle oldukça zor olduğu belirtilmiştir. Belirli bir boyut ve şekle sahip muhafaza kullanılarak ekranlanması gereken çok çeşitli uygulamalar

nedeniyle, düzlemsel malzemeler genellikle farklı alan koşulları göz önünde bulundurularak karakterize edilir. Bu nedenle, frekans aralığına ve numune özelliklerine bağlı olarak, ilgilenilen tüm frekans aralığını kapsamak için farklı ölçüm teknikleri kullanılabilir. Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü standart dokümanı Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü standart dokümanı IEEE 2715-2023'e göre EMSE ölçümleri ile ilgili 3 ana kategori listelenmiştir; 1) Standartlaştırılmış SE ölçüm teknikleri, 2) Standartlaştırılmış tekniklerden türetilmiş teknikler ve 3) Standartlaştırılmamış teknikler. Dalga kılavuzu yöntemi ile SE ölçümü standartlaştırılmamış teknikler grubuna dahildir. Teknik olarak ASTM D-4935 ve IEEE 299 standartlarının bir kombinasyonudur. Kolay uygulanabilmesi, küçük numune boyutu gerektirmesi ve 8,2-12,4 GHz gibi yüksek frekansları ölçebilmesi sayesinde oldukça popüler ve yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Elektromanyetik dalgaların bir parçası olan X-Band frekans aralığı (8.2-12.4 GHz), uydu haberleşmesi, radar, navigasyon, hava trafik kontrolü, denizcilik fonksiyonları ve meteoroloji istasyonları gibi çeşitli uygulamalara sahiptir. Bu nedenle, X-Band'ının yaygın kullanımı, çalışmada ölçülecek hedef frekans aralığı olarak seçilmesini sağlamıştır. Tercih edilen çalışma frekansı, ASTM D-4935 standardının doğrudan kullanımını imkansız kılmaktadır. Bu nedenle henüz standardize edilmemiş ancak literatürde kabul gören dalga kılavuzu SE ölçüm tekniği kullanılmış ve metin içerisinde herhangi bir standart bilgisi verilmemiştir (Yıldırım vd., 2020; Mutlu vd., 2023; Zaroushai vd., 2016). Numuneler Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü tarafından dalga kılavuzu yöntemi ile, 8.2-12.4 GHz frekans bandında, bir dalga kılavuzu arasına konulup, giriş ve çıkış sinyallerinin network analizör tarafından alınıp verildiği bir sistemde test edilmiştir. S parametrelerinin ölçümüyle (S11-yansıma ve S21-araya girme kayıpları) toplam kalkanlama etkinliği içerisinde yansıma ve soğurmanın katkılarına içeren değer (S21) belirlenmiştir.



Şekil 17. Elektromanyetik Kalkanlama (EMSE) Ölçüm Düzenegi (Yıldırım vd., 2020)

3.4.5. Çekme Testi

Malzemenin kırılana kadar tek bir yönde maruz kaldığı bir test olan çekme testi, malzemenin belirli koşullar altındaki davranışının incelenmesini sağlar. Test sonucunda çekme mukavemeti ve kopma uzaması ile ilgili doğrudan bir veri elde edilir.

Çekme testi cihazı temel olarak birbirine hizalı olarak duran biri hareketli, diğeri sabit olan iki çeneden oluşur. Çekme testi standartları malzemenin türüne göre farklılıklar gösterse de plastikler ve fiber takviyeli kompozitler için ISO 527-1 ve ISO 527-4 standartları uygulanmaktadır.

Mühendislik gerilmesi σ Denklem (3.9) 'ile hesaplanabilmektedir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.9)$$

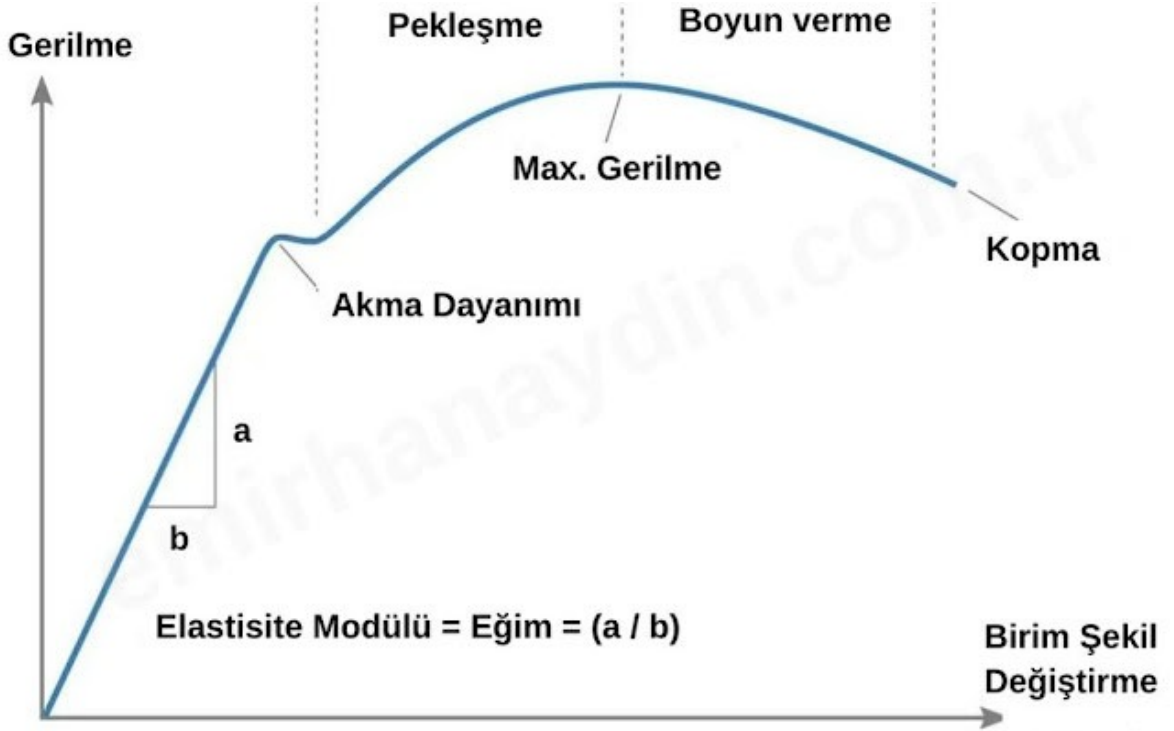
Denklem (3.9)'da F çeneler tarafından uygulanan kuvvet, A ise numunenin kesit alanıdır.

Mühendislik gerinimi ε ise Denklem (3.10) ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3.10)$$

Denklem 10'da L numunenin kopmadan hemen önceki uzunluğu, L₀ numunenin test öncesi uzunluğu ve ΔL ise numunenin ilk ve son uzunlukları arasındaki farktır. Tipik gerilme – gerinim grafiği Şekil 18'de verilmiştir. Elde edilen bu gerilme – gerinim grafiği ile

numuneye ait çekme mukavemeti, çekme modülü, Young's modülü ve uzama yüzdesi verileri elde edilebilir.



Şekil 18. Gerilme - Gerinim Grafiği Örneği

Enjeksiyon kalıplama yöntemi ile hazırlanan MB0, MB25, MB50, MB75 ve MB100 kodlu numunelerimiz ISO 527-2 standardı esaslarına bağlı olarak hazırlanan test numuneleri 50 mm/dk test hızı ile, 24 °C oda sıcaklığında, ölçüm doğrulu kalibrasyon belgesi ile teyit edilmiş olan Zwick Z-005 model çekme testi cihazı ile gerçekleştirilmiştir. (Şekil 19)



Şekil 19. Çekme Testi Cihazı - Zwick Z005

3.4.6. Üç Nokta Eğme Testi

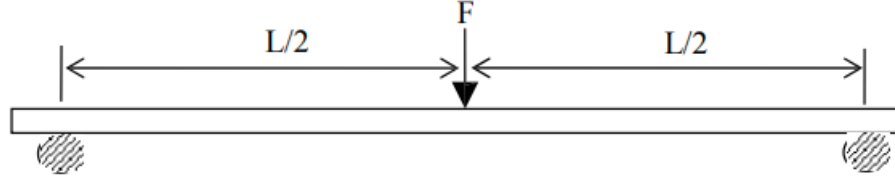
Üç nokta eğme testleri Yalova Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı (YUMERLAB) bünyesinde bulunan Zwick marka Z020 model 3 nokta eğme test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme testleri 6.4 cm destek açıklığında ve 2 mm/dk parametreleri ile DIN EN ISO 178 standardı esasları ile gerçekleştirilmiştir.

Üç nokta eğme testi ile elde edilen veriler;

Eğilme Mukavemeti ya da diğer adı ile bükme mukavemeti, metaller ve polimerler için kalıcı şekil değişiminin olduğu, seramik gibi gevrek malzemelerde ise malzemenin kırılıma uğradığı noktadaki kuvvet malzemenin eğilme mukavemetini gösterir.

Eğme Modülü malzemede elastik şekil değişiminin meydana geldiği esnada malzemenin üzerine uygulanan kuvvetin şekil değişimine oranlanması ile elde edilir.

Üç nokta eğme deneyinin temel prensibinde malzeme basit kriş olarak kabul edilir. Hazırlanan numune yatay bir pozisyonda iki uçtaki destekler üzerine yerleştirilir ve tam orta noktadan kuvvet uygulanır.



Şekil 20. Üç Nokta Eğme Kuvvet Diyagramı

Üç Nokta Eğilme testlerinde kirişin dış yüzeyinin ortasında meydana gelen maksimum eğilme gerilmesi Denklem 3.11' ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.11)$$

σ = Maksimum Eğilme Gerilmesi (N/mm²)

P = Yük sehim eğrisinde bir noktadaki kuvvet (N)

L = Destekler arası mesafe (mm)

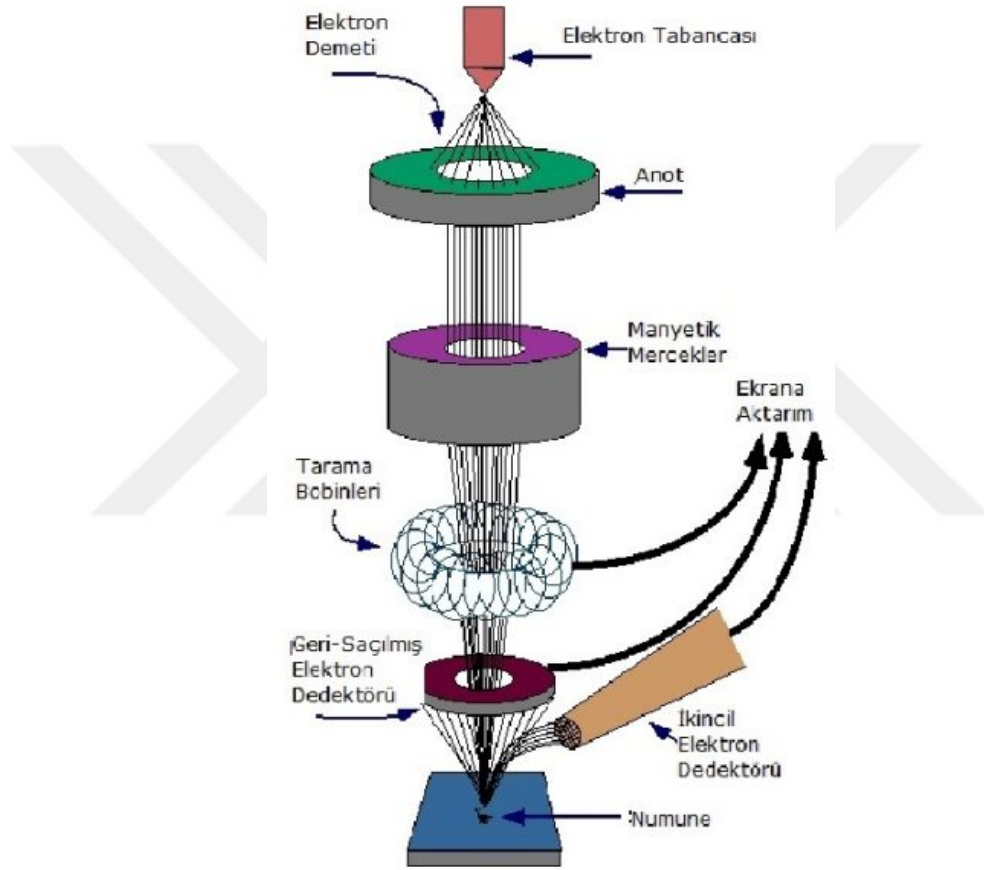
b = Kirişin genişliği (mm)

d = Kirişin yüksekliği (mm)

3.4.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Numunelerin yüzey incelemeleri JEOL JSM-7100-F model taramalı elektron mikroskopu ile x5000, x10000, x20000, x40000 büyütme ile yapılmış ve karbon nanotüp, SAN ve PE fazları gözlemlenmiştir.

Bir yüzey görüntüleme tekniği olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemelerinde malzeme yüzeyine yüksek enerjili elektronlar gönderilir. Gönderilen bu yüksek enerjili elektronlar yüzeye çarparak, çarptığı yüzeyden düşük enerjili ikincil elektronları koparır. Yüzeyden kopan bu düşük enerjili ikincil elektronların emisyonu ölçülerek inceleme yapılır (Krishnamoorti vd., 1996; Wang vd., 2005).



Şekil 21. SEM Şeması ve Çalışma Prensibi (Yaman, 2011)

İstenilen büyütme oranlarındaki görüntüler bir bilgisayar sisteminde toplanır. SEM cihazları özellikle kompozit malzemelerin kırılma yüzeyleri, takviye dağılımları ve matris takviye arasındaki etkileşim hakkında bilgi verir (Ersöz, 2022). Taramalı elektron mikroskoplarında elektron kaynağı yaklaşık 5 nm büyüklüktedir ve 100 keV ile 300 keV enerji aralığındaki bir ışın numune yüzeyine yansır. Daha sonra yüzeyden yansıyan

elektronlar toplanarak, sinyal güçlendiriciden geçer ve katot ışınları tüpü üzerinde istenen bölgenin görüntüsü oluşur (Aile, 2020)



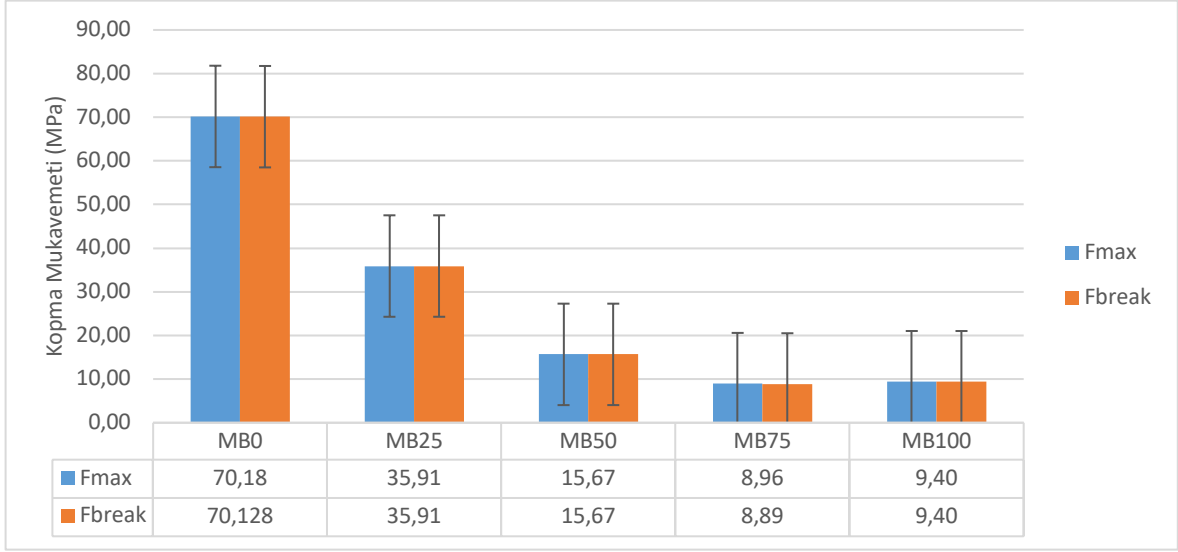
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Çekme Testi

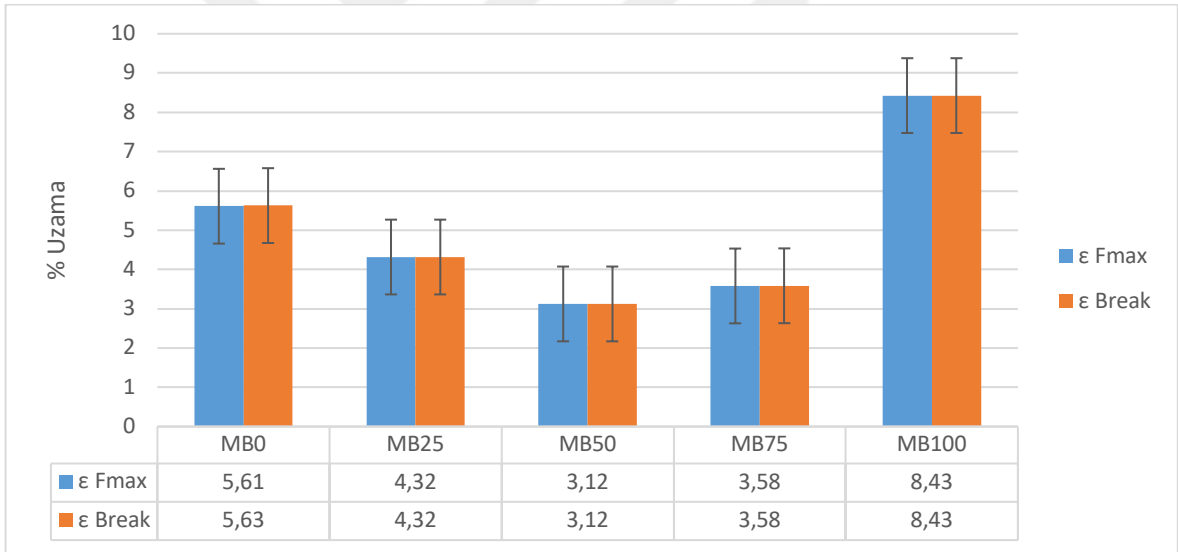


Şekil 22. Çekme Testi Sonrası Numuneler

Her numune türü için 5 tekrarlı olarak gerçekleştirilen numunelerin kopma mukavemetleri Şekil 22’da verilmiştir.



Şekil 22. Çekme & Kopma Mukavemeti



Şekil 23. Çekme & Kopma Yüzde Uzama

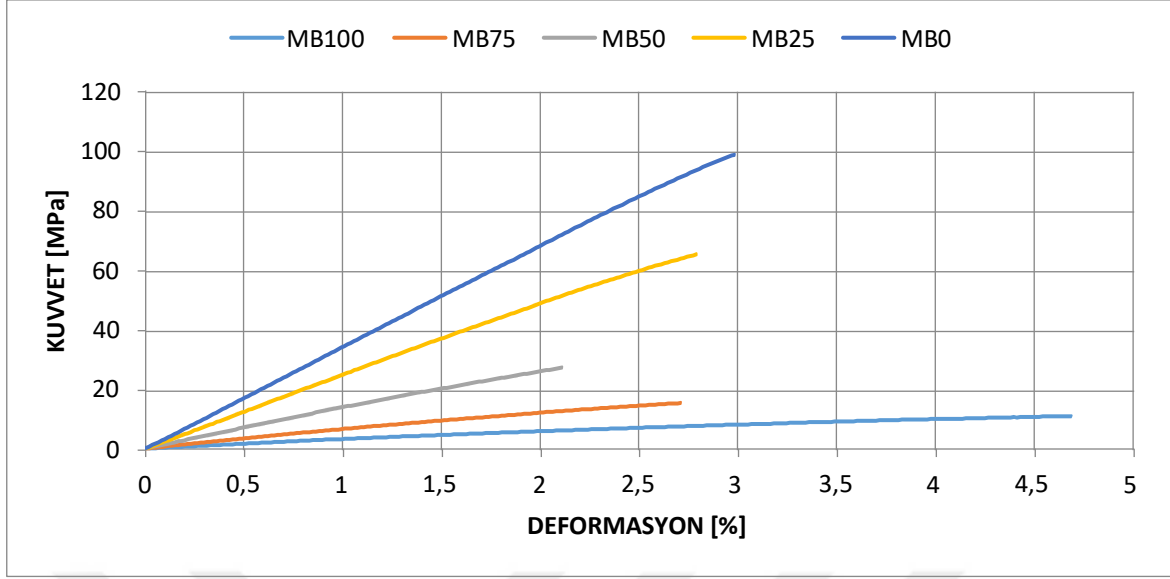
Şekil 23'te numunelerin çekme mukavemeti ve kopma mukavemeti değerleri gösterilmiştir. Sonuçlara göre en yüksek kopma değeri mukavemeti kompozisyonunda hiç masterbatch (ÇDKNT ve AYPE) bulundurmayan saf SAN numunesi verirken, numune kompozisyonlarında masterbatch yani içerisindeki PE + ÇDKNT oranı arttıkça maksimum çekme ve kopma mukavemetinde düşüş olmaktadır. Referans olarak seçilen MB0 numunesine maksimum çekme mukavemetlerindeki düşüş Şekil 23'de verilmiştir.

MB100 numunesi yüzde uzama oranı açısından en başarılı numune olurken aynı numuneyi kopma mukavemeti yönünden incelediğimizde MB75 ile birlikte oldukça yakın sonuçlara sahip olarak 9.40 MPa gibi bir değere sahip olmuştur. MB50’de bu kuvvet 15.67 MPa, MB25’te 35.91 MPa, %100 SAN numunesinde ise 70.18 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuçlara göre MB50’ye kadar uzamada bir azalış meydana gelirken MB75 ve MB100 numunelerinde uzamada artış olmaktadır. Bu durumun sebebi SAN ve AYPE arasında yarı uyumlu bir birleşimin olmasıdır. İki polimerin birbirine yarı uyumlu olması sebebi ile sonuçlar ilk %50 orana kadar SAN, %50 oranı sonrasında da AYPE özelliklerine yaklaşmaktadır. MB50 burada iki polimerinde oransal olarak eşit olduğu yer olması sebebi ile birbiri ile yarı uyumlu olan bölgelerin maksimum olduğu numunedir. (Faker vd., 2008)

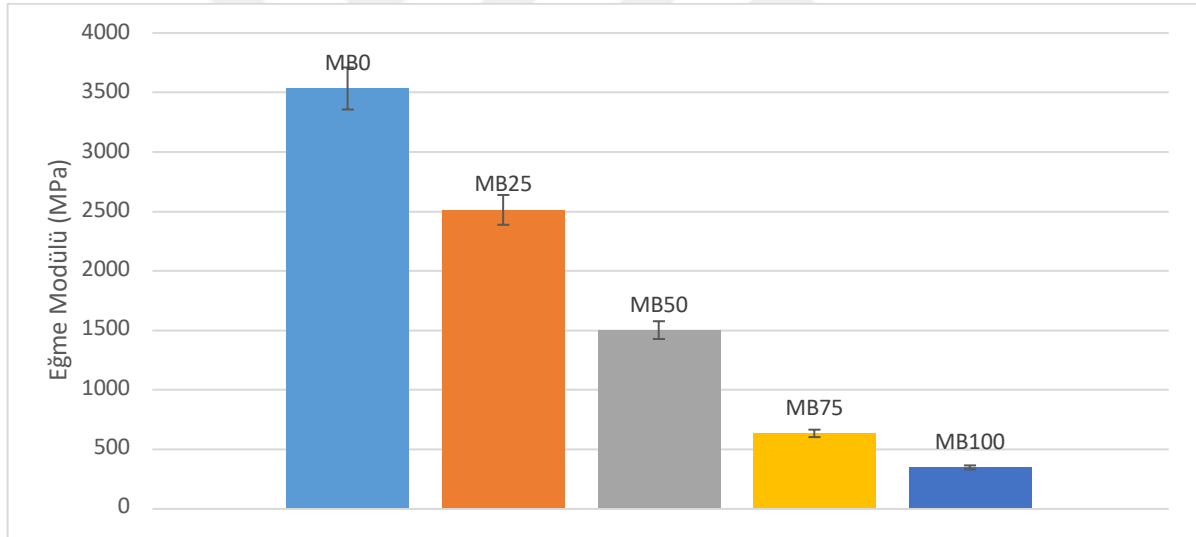
Kompozisyonlarda SAN içerisine PE + ÇDKNT masterbatch ilavesinin mekanik dayanımda düşüşe sebep olduğu ve ilave oranı ile düşüşün paralel olarak devam ettiği tespit edilmiştir. Bu düşüşün sebebinin kompozisyon içerisinde artan ÇDKNT oranına bağlı olarak aglomerasyonundan kaynaklanmaktadır. Polimer matrisli nanokompozitlerde nanotüp içeriği ve karıştırma protokolü mekanik performans üzerinde kritik ödeme sahiptir (Wegrzyn vd., 2015; Zare, 2016).

4.2. Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testinde numunelerin kuvvete bağlı yüzde deformasyon miktarları Şekil 25’te verilmiştir. Grafiğe göre %1.5 deformasyon miktarını baz alarak malzemeleri kendi içlerinde karşılaştırsak MB0 51 MPa, MB25 37 MPa, MB50 20 MPa, MB75 9,5 MPa ve MB100 numesi ise 4,65 MPa’lık bir kuvvet ile %1.5’lik deformasyon gösteriyor. %80 PE ve %20 ÇDKNT’den oluşan masterbatch içerisine SAN ilavesi ile malzemenin mukavemetinde artış meydana gelmektedir. Elektromanyetik kalkanlama testlerinde elde edilen sonuçlarda göz önüne alındığında MB50 numunesi bizim için optimum değerleri sağlayan numune olmaktadır. MB50 numunesine ilave edilen %50 oranındaki SAN ile malzemenin mukavemetinde %330’luk bir artış elde edilmiştir.

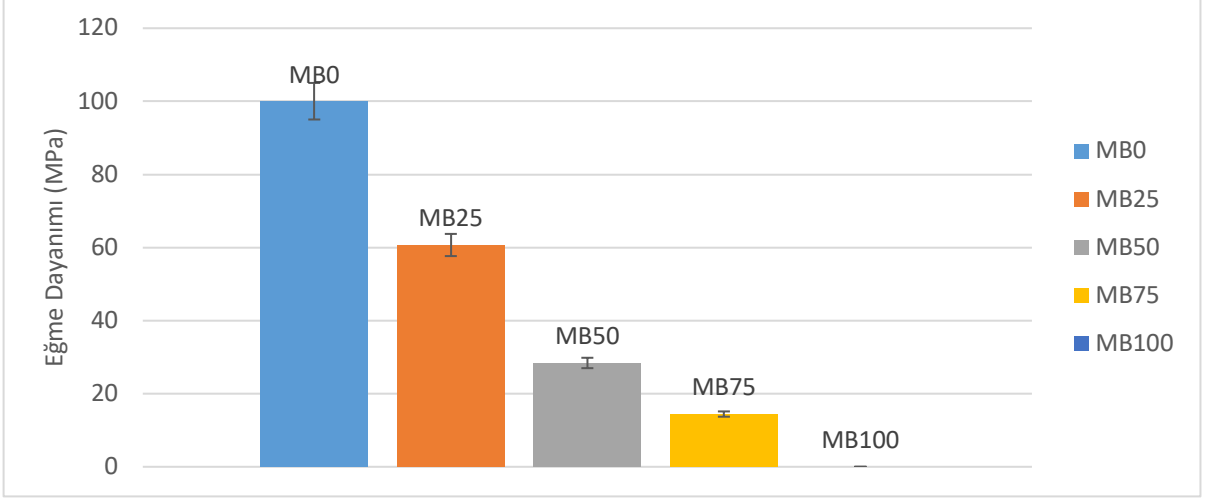


Şekil 24. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları – (Kuvvet - % Deformasyon)



Şekil 25. Üç Nokta Eğme Testi - Eğme Modülü

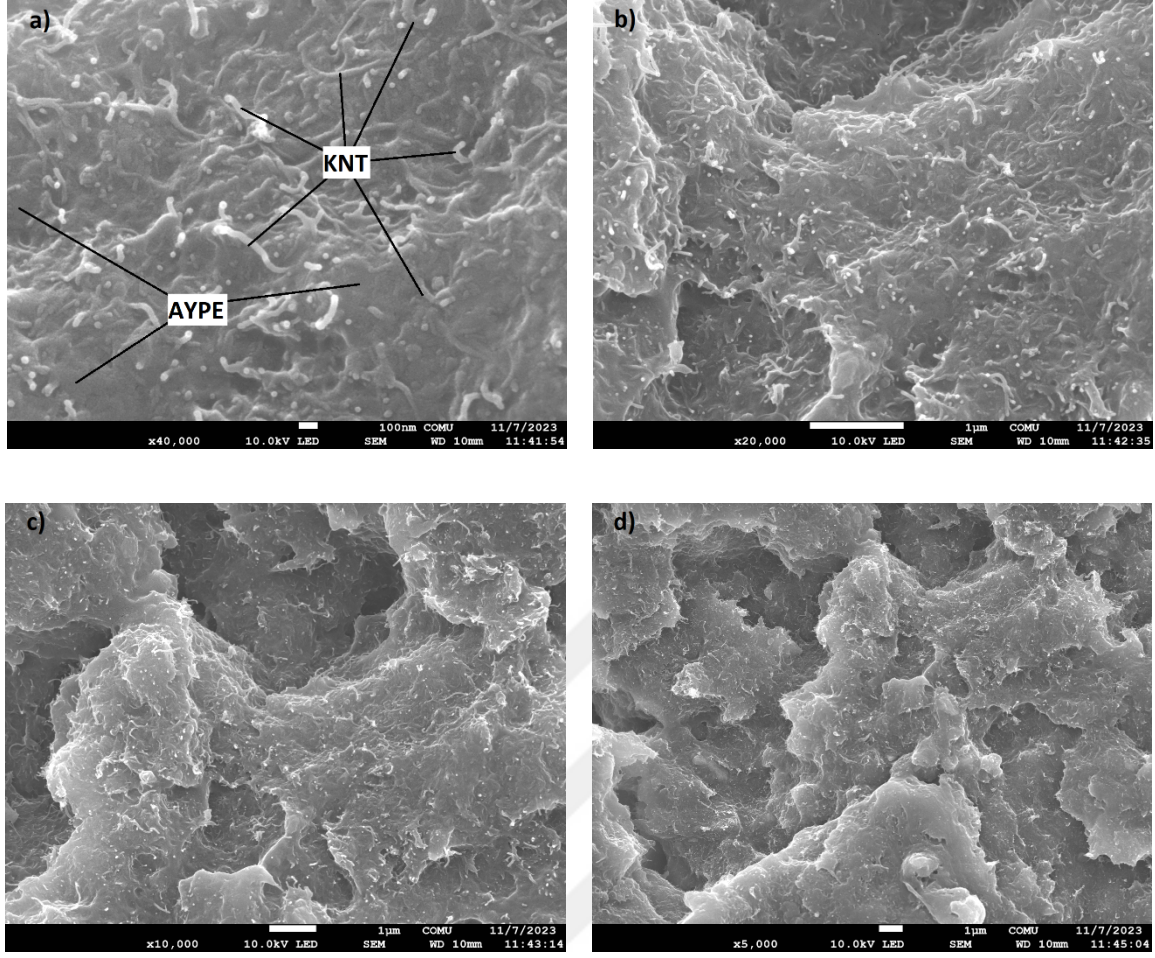
MB100 numunesinin eğilme modülü 338 MPa ölçülürken kompozisyona SAN ilavesi ile eğilme modüllerinde artış gözlemlenmiştir. Elde edilen verilere göre MB75 numunesinde 624 MPa, MB50 numunesinde 1495 MPa, MB25 numunesinde 2509 MPa elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında EMSE ticari sınırı olan -30 dB üzeri sonuç elde edilen ve perkülasyon eşliğine en yakın değer olan MB50 numunesinde MB0 numunesine göre kompozisyona yapılan SAN ilavesi ile yaklaşık olarak %340'lık bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 26. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları - Eğme Dayanımı

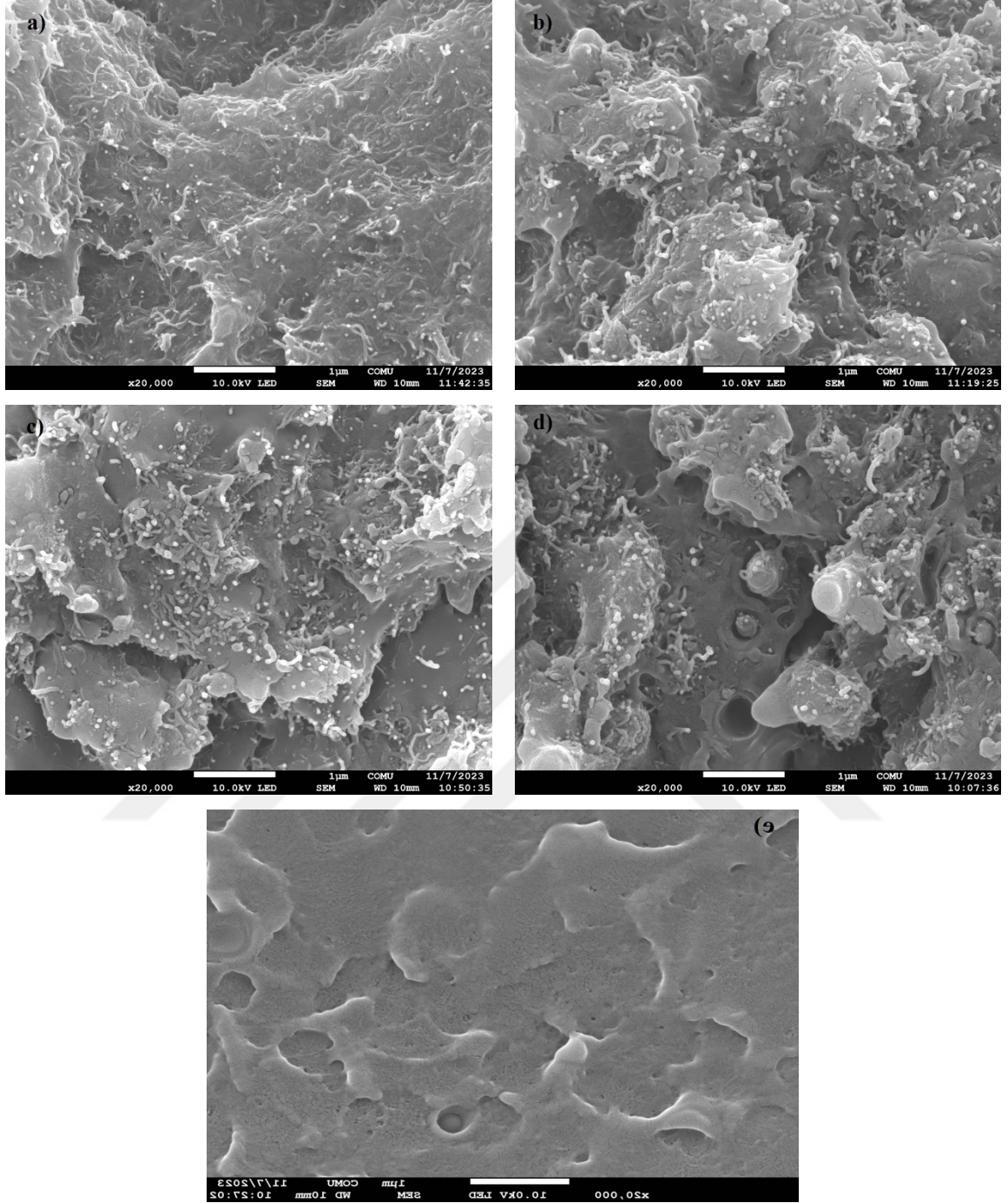
4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

MWCNT'lerin matris içerisindeki dağılımını gözlemlemek amacı ile SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Polimer nanokompozitlerin yapısı ve morfolojisi üretim yöntemleri ile doğrudan ilişkilidir. Genel olarak karbon nanotüpleri polimer matris içerisine dağıtmak için in-situ polimerizasyon, çözelti karıştırma ve eriyik karıştırma yöntemleri kullanılır. İlk iki yöntemde iyi dağılım görülürken, eriyik karıştırma yöntemi zayıf dağılıma neden olur (Tang vd., 2005). Bunun yanında in-situ polimerizasyon ve çözelti karıştırma metotlarında organik çözeltilere ihtiyaç duyulması sebebi ile zehirli ve endüstriyel işleme uygun değildir (Peng-Cheng Ma vd., 2010).



Şekil 27. MB100 SEM Fotoğrafları a) x40.000 Büyütme b) x20.000 Büyütme c) x10.000 Büyütme d) x5000 Büyütme

%80 AYPE ve %20 ÇDKNT kompozisyonuna sahip olan MB100 numunesinin SEM görüntüleri Şekil 28’de gösterilmektedir. Kompozisyon içerisinde Tablo 4’de belirtilen oranlarda SAN bulunan MB75, MB50, MB25 numunelerine göre AYPE matris içerisinde ÇDKNT’ler nispeten daha homojen bir dağılım sergilemiştir.

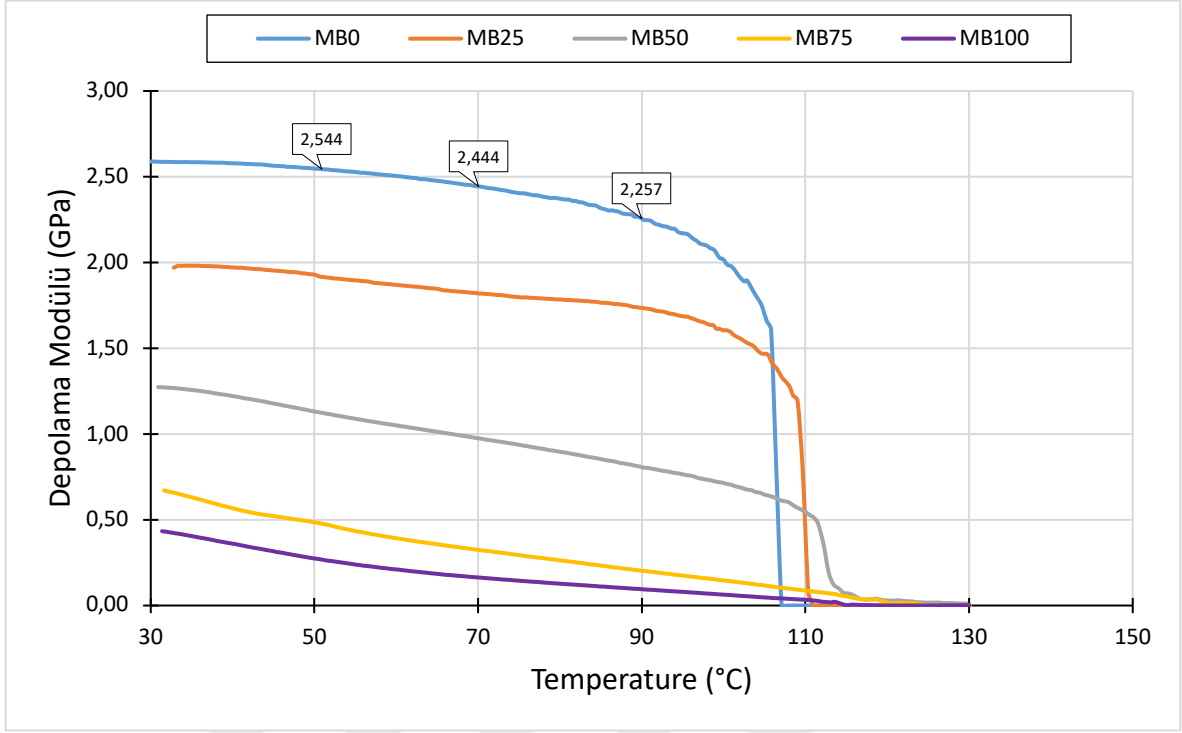


Şekil 28. X20.000 Büyütme Karbon Nanotüp Dağılımı a)MB100 b)MB75 c) MB50 d) MB25 e)MB0

4.4. Dinamik Mekanik Analiz (DMA)

ÇDKNT takviyeli SAN/AYPE nanokompozitlerinin viskoelastik davranışını araştırmak için DMA analizleri gerçekleştirilmiştir. Bir salınım döngüsü için bir malzemede

depolanan maksimum enerji, depolama modülü (E') olarak bilinir. Aynı zamanda malzemenin sertlik-sıcaklık ilişkisi ve yük taşıma kapasitesi hakkında bilgi sağlar. SAN/AYPE/ÇDKNT kompozitlerinin farklı frekans seviyelerindeki depolama modülü-sıcaklık eğrisi Şekil 30'de sunulmuştur. Sıcaklık arttıkça modül değerleri düşmektedir. E' deki azalma, termoplastik matrisin daha yüksek sıcaklıklarda yumuşaması ile ilişkilidir (Yıldırım, 2022). Katkısız SAN (MB0) polimeri 2,54 GPa ile oda sıcaklığında en yüksek depolama modülünü sergilemiştir. MB25 nanokompozitinin depolama modülü, saf SAN numunesine kıyasla %22,4'lük bir düşüş sergilemiş ve 1,97 GPa olarak belirlenmiştir. Depolama modülündeki düşüş, saf SAN'a eklenen AYPE/ÇDKNT oranı arttıkça devam etmiştir. MB50 numunesinin depolama modülü %50'lik bir düşüşle 1,24 GPa ve MB75 numunesinin depolama modülü %73,6'lık bir düşüşle 0,67 GPa olarak ölçülmüştür. MB100 numunesinin depolama modülü 0,43 GPa'dır. Elde edilen depolama modülü değerleri, karıştırma kuralına göre yapılan teorik hesaplamalarla örtüşmektedir. Farklı oranlarda hazırlanan SAN / PE / ÇDKNT karışımlarının elastik modülü değerleri Saf LDPE ve Saf SAN değerleri arasında kalmaktadır. İçerikteği LDPE oranının artması ile birlikte elastik modül değerleri düşüş göstermektedir. Farklı bir ifade ile karışım içerisindeki yumuşak SAN karışımı içerisindeki sünek – yumuşak polietilen artışı kompozitin tokluğunda artış görülmesini sağlar (Bajsić, E.G vd., 2007; Jia vd., 2014).



Şekil 29. DMA Analizinden Elde Edilen Depolama Modülü

DMA analiz sonuçları Tablo 5'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Camı geçiş sıcaklıkları karşılaştırıldığında, SAN numunesinin camı geçiş sıcaklığı 107 °C olarak belirlenmiştir. MB0 numunesine eklenen AYPE/ÇDKNT nanokompozit miktarı arttıkça camı geçiş sıcaklığı da artmış ve MB50 numunesi için 130 °C'ye ulaşmıştır. Bu fenomenin ana nedeni, ÇDKNT'lerle etkileşimin neden olduğu polimer zincirlerinin hareketliliği üzerindeki kısıtlayıcı etkiydi (Newmark, 2002). İlginç bir şekilde, MB75 ve MB100 numunelerinin camı geçiş sıcaklıkları MB50 numunesininkine benzer bulunmuş ve ÇDKNT oranının ağırlıkça %10'un üzerine çıkarılmasının termal kararlılığı artırmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 5.

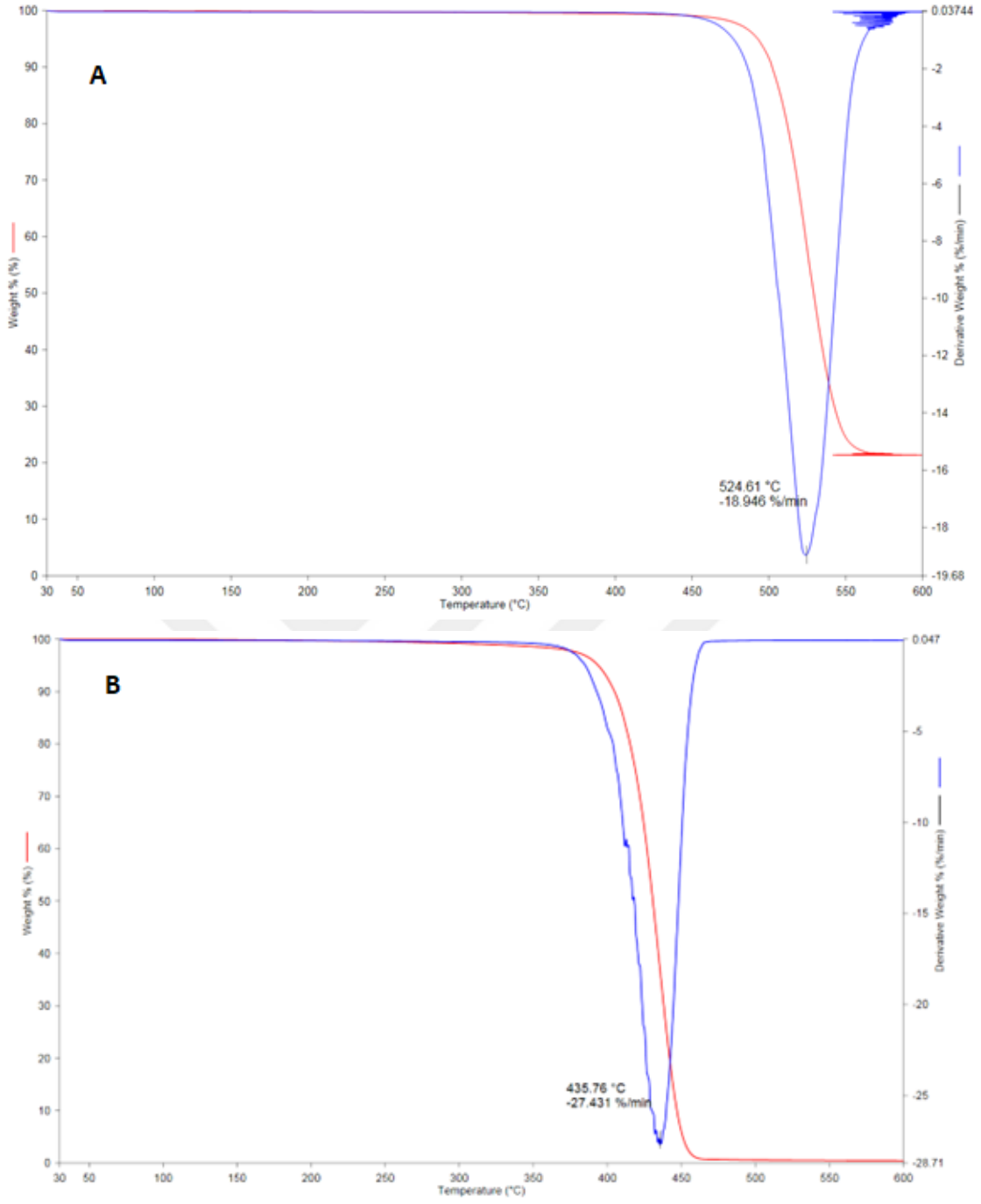
DMA analizinden elde edilen depolama modülü ve camsı geçiş sıcaklığı değerlerinin karşılaştırılması

Numune	T _g (°C)	Değişim (%)	Depolama Mod. (GPa)	Değişim (%)
MB0	107	-	2.54	-
MB25	111	3.73	1.97	22.44
MB50	130	17.11	1.24	37.05
MB75	130	0	0.67	45.96
MB100	130	0	0.43	35.82

4.6. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz, numunenin ağırlık değişimi ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi göstermek için kullanılmış ve piroliz sırasında termal ayrışma ve reaksiyon mekanizmasının anlaşılmasını sağlamıştır. Şekil 31, MB0 ve MB100 numunelerinin TGA analizi sonuçlarını göstermektedir. MB100 numunesinde AYPE'nin bozunması 450 °C'de başlamış ve 530 °C'de sona ermiştir. 20'lik ÇDKNT içeren MB100 numunesinde termal bozunmadan sonra kalan kütle karbon nanotüplerin varlığını kanıtlamaktadır (Şekil 31a).

MB0 (saf SAN) numunesinin TGA eğrisi Şekil 31b'de gösterilmiştir. Bozunma 370 °C'de başlamış ve 530 °C'de sona ermiştir. Aromatiklerin dönüşümü 370 °C'de başlar ve 405 °C'de monomerik akronitril ortaya çıkmaya başlayana kadar devam eder. Aromatik türlerin C-H titreşimleri nitril titreşiminden çok daha güçlüdür. Hem alifatik hem de aromatik -H titreşimlerine zayıf nitril absorpsiyonu eşlik eder. Bu durum bozunma tamamlanana kadar devam eder (Suzuki ve Wilkie, 1995).

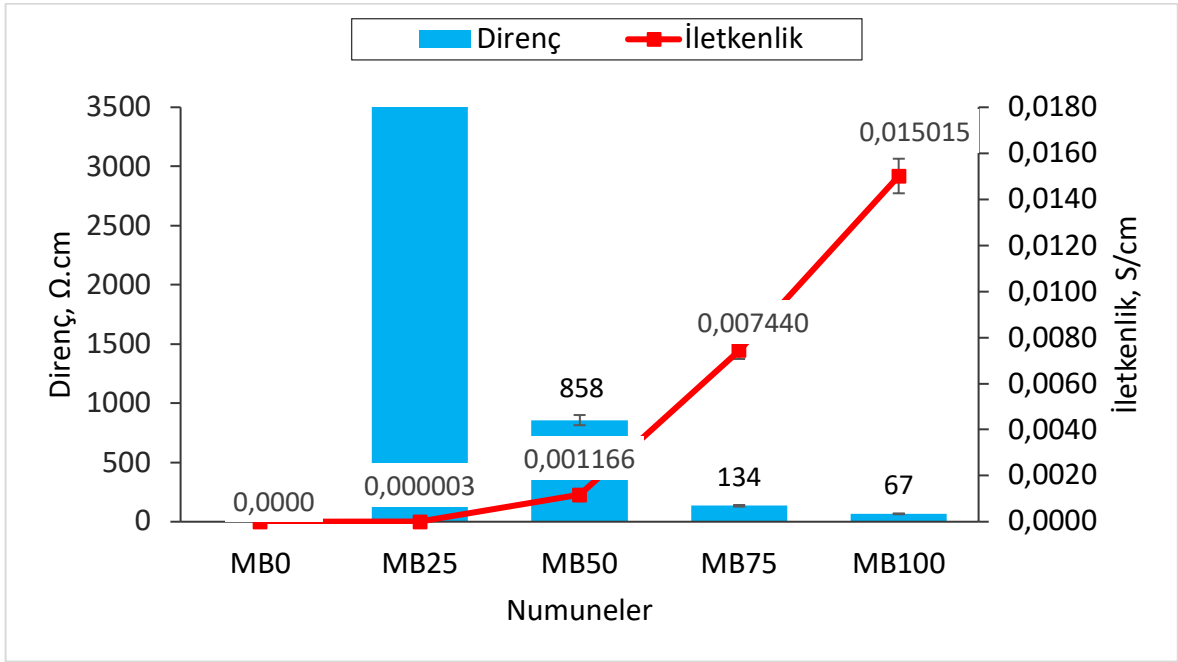


Şekil 30. TGA Sonuçları a) masterbatch (20% ÇDKNT + 80% AYPE), (b) Stiren Akrlonitril

4.7. Elektriksel İletkenlik ve EMSE

Elektriksel iletkenlik ve öz direnç test sonuçları Şekil 32’de verilmiştir. Üretilen malzemeler, yapılarındaki katkı oranlarına ve karıştırma parametrelerine göre çeşitli

iletkenlik (ve tersine direnç) değerleri sunmaktadır. Beklendiği gibi, MB0 numunesi sonsuz büyük direnç ve sıfır iletkenlik değerleri ile tamamen yalıtkan özellik göstermektedir. Diğerleri ise değişen MB miktarı ile dengeli bir özellik ortaya koymaktadır. Buna göre, MB25, MB50, MB75 ve MB100 numunelerinin direnç değerleri sırasıyla 3.48×10^5 , 858, 134 ve 67 Ωcm 'dir. Ayrıca, MB25, MB50, MB75 ve MB100 numunelerinin iletkenlik değerleri sırasıyla 0.3×10^{-6} , 0.11×10^{-3} , 0.74×10^{-3} ve 0.15×10^{-2} S/cm'dir. Grafikler, MB oranının artmasının öz direncin artması ve iletkenliğin tersine azalması ile sonuçlandığını göstermiştir.

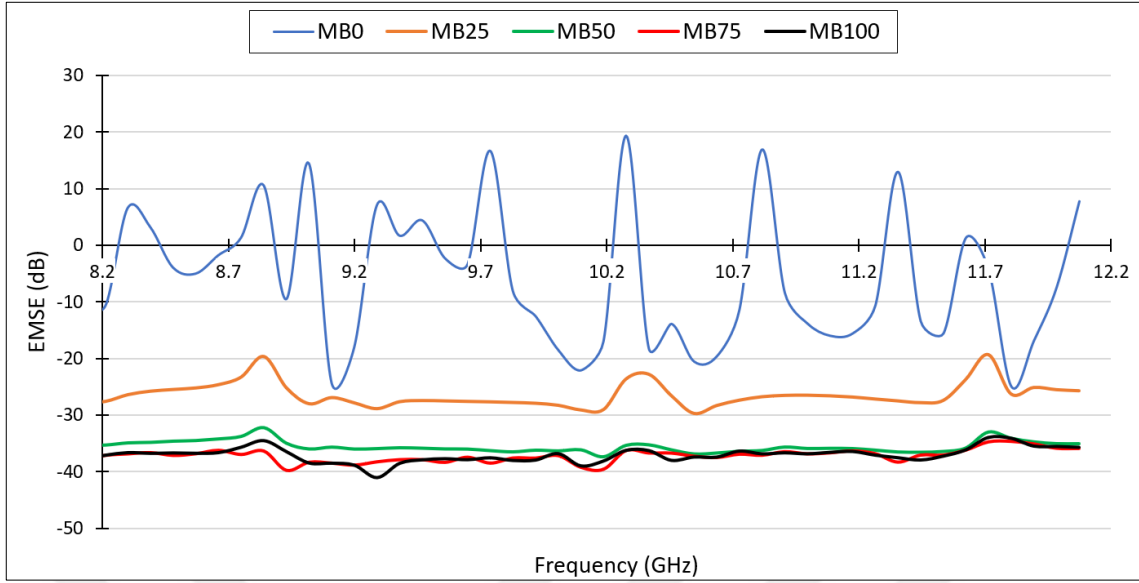


Şekil 32. Elektriksel İletkenlik ve Direnç Sonuçları

MB oranı %25'ten %100'e yükseldikçe, KNT oranı artmakta ve SAN oranları toplam numune yüzdesine kıyasla azalmaktadır. Böylece öz direncin azalma eğilimi (aynı zamanda iletkenliğin artma eğilimi) hızlanmıştır. İletkenlik %0 ile %50 oran seviyeleri arasında hafifçe artarken, MB50 ile MB100 numunesi arasında ani bir artış meydana gelmektedir. Bu nedenle %50 oran seviyeleri kompozitlerin iletkenlik karakteristiğini değiştirmek için perkolasyon eşik seviyesi olarak adlandırılabilir (Jagatheesan, 2014; Chen vd., 2020). İletkenlikteki artış oranı MB25'ten MB50'ye 1000 kat ve MB50'den MB100'e 10 kat olarak hesaplanmıştır. Birim hacimdeki KNT miktarının artması, malzemedeki elektron yükü taşınımının iyileşmesini teşvik etmektedir (Yıldırım, 2022; Liang vd., 2020; Zeng vd., 2016).

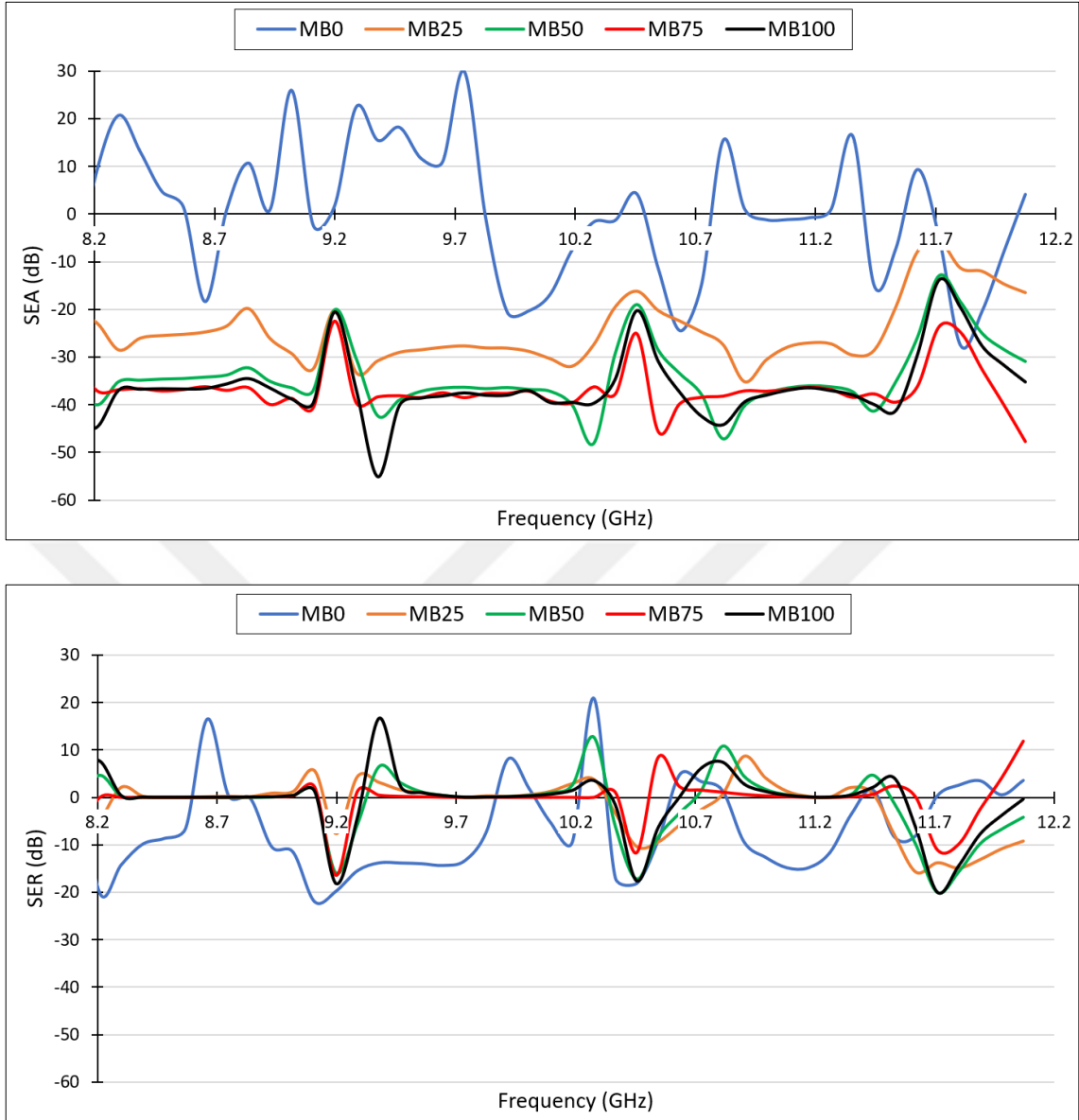
Elde edilen kazanç, elektron yükü taşınımının CNT'ler tarafından kompozitte oluşturulan geniş iletken ağ aracılığıyla gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Böylece, elektromanyetik kalkanlama için bir ön koşul olan gerekli minimum iletkenlik seviyesi sağlanmıştır.

Frekansın bir fonksiyonu olarak EMSE sonuçları Şekil 33'de sunulmuştur. MB0 numunesi, diğer bir deyişle saf PAN, -6,08 dB EMSE değeri vermektedir. Malzeme özünde yalıtkan olduğu ve ölçümde iletkenlik tespit edilmediği için bu değer normaldir. Diğer numuneler birbirlerine benzer EMSE özellikleri gösterir ve MB25 numunesi hariç tüm numuneler ticari olarak gerekli -30 dB EMSE değerlerine ulaşır (Munalli vd., 2019; Bigg, 1987; Peng vd., 2022). MB25, MB50, MB75 ve MB100 örneklerinin hesaplanan EMSE değerleri sırasıyla -26.44, -35.52, -37.17 ve -36.99 dB'dir. EMSE değerleri, elektriksel iletkenlik artışlarına bağlı olarak MB ilavesiyle artmıştır. MB25, MB50, MB75 ve MB100 için iyileştirme oranları MB0'a kıyasla sırasıyla %334, %484, %511 ve %506 olarak hesaplanmıştır. Elektrik iletkenliği, malzeme üzerindeki EM dalgalarının zayıflatılmasında önemli bir rol oynar (Yıldırım, 2022; Liang vd., 2020; Zeng vd., 2016). MB oranının artması elektriksel olarak iletken zincir oluşumunu teşvik eder ve yüksek iletkenlik malzeme yüzeyi ile hava arasındaki empedans uyumsuzluğunu iyileştirir (Liang vd., 2020; Jia vd., 2022; Chen vd., 2020; Ravindren vd., 2019; Munalli vd., 2019). İletkenlik sonuçları bölümünde belirtildiği gibi, MB oranı %50 eşik seviyesine yaklaştığında elektrik iletkenliği artmakta ve EMSE yükselmektedir. Literatürde belirtildiği gibi, yaklaşık 0,01 S/cm elektriksel iletkenlik seviyesi potansiyel elektromanyetik uygulamaları için yeterlidir (Yıldırım, 2022; Liang vd., 2020; Zeng vd., 2016). MB50, MB75 ve MB100 örneklerinin ticari olarak gerekli elektromanyetik kalkanlama seviyesini aşması da bu durumu desteklemektedir. Her üç örnek de birbirine yakın performans göstermesine rağmen, MB75'in en verimli örnek olduğu söylenebilir.



Şekil 33. Malzemelerin EMSE Sonuçları

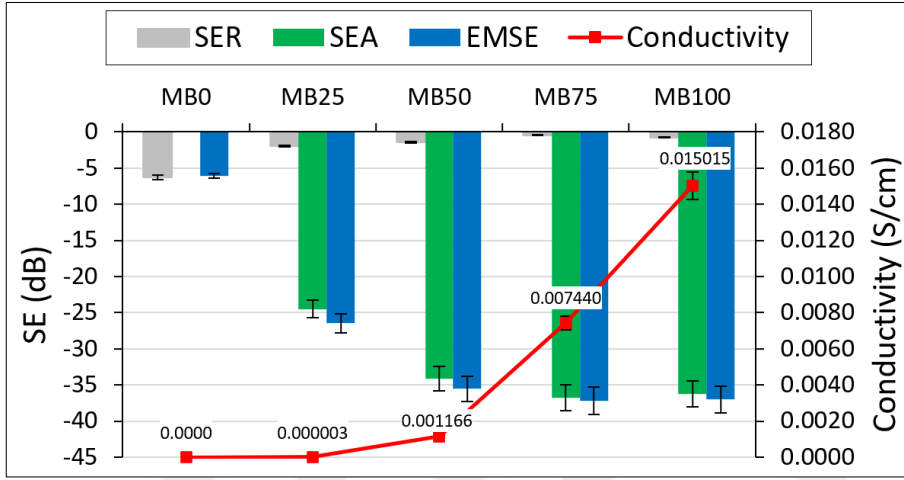
Şekil 34a ve 34b numunelerin SEA ve SER sonuçlarını vermektedir. Elde edilen eğriler, üretilen malzemenin EM kalkanlaşmasının ana mekanizmasını ortaya koymaktadır. SEA eğrileri, elde edilen EMSE yanıtları ile benzer bir eğilim göstermektedir. Absorbans eğrileri -35 dB civarında kümelenirken, yansıma eğrileri sıfır çizgisi üzerinde yer almaktadır. MB0 numunesinin SEA ve SER eğrilerinin her ikisi de toplam EMSE değerinin çok düşük hesaplanması nedeniyle sıfır bölgesinde konumlandırılmıştır. MB0 numunesinin SEA ve SER değerleri sırasıyla +0,19 ve -6,28 dB olarak hesaplanmıştır. Bu değerler MB0'ın gösterdiği çok düşük EMSE değerinin yansıma mekanizmasından kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Yansımanın malzemenin parlak dış yüzeyinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü değerler EM dalgalarının malzemenin iç kısmına nüfuz etmediğini göstermektedir. Bulgular, MB0'ın EM kalkanlama açısından hiçbir anlam ifade etmediğini ve oldukça geçirgen olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 34. a) SEA, b) SER sonuçları

SEA değerleri MB25, MB50, MB75 ve MB100 örnekleri için sırasıyla -24.48, -34.11, -36.75 ve -36.23 dB olarak hesaplanmıştır. Bulgulara göre, SEA değerlerinin toplam EMSE'ye kıyasla yüzdesi MB25, MB50, MB75 ve MB100 örnekleri için sırasıyla %92.4, 95.9, 98.8 ve 97.9 olarak hesaplanmıştır. SER değerleri MB25, MB50, MB75 ve MB100 örnekleri için sırasıyla -1.96, -1.41, -0.41 ve -0.75 dB olarak bulunmuştur. Hesaplanan değerler, numunelerin kalkanlama performansının %95'inden fazlasının soğurma mekanizması olduğunu ortaya koymaktadır. Bu, numunelerin EM dalgalarının ana zayıflatma mekanizmasının soğurma olduğunu kanıtlamaktadır. Bulgular, üretilen

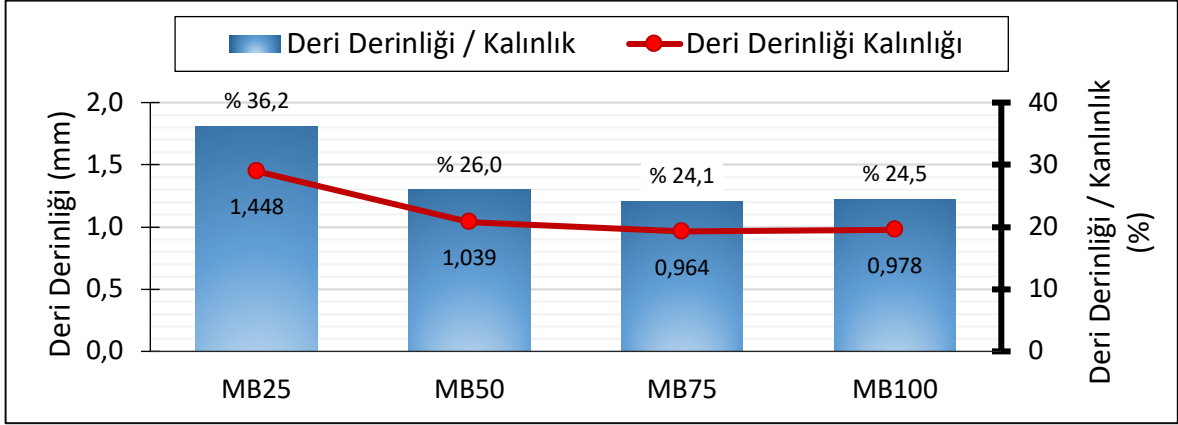
kompozitin havacılık, savunma vb. gibi bazı sektörlerde öncelikli olarak ihtiyaç duyulan emilim ağırlıklı elektromanyetik malzemelerine iyi bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Ayrıca bu, malzemelerde elektrik iletkenliğinin geliştiğinin bir başka kanıtıdır. SE ve elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki Şekil 35'te verilmiştir. Elektriksel iletkenlik arttıkça EMSE performansı da artmaktadır. Grafik ayrıca MB50 numunesinin eşik seviye değeri olduğunu göstermektedir.



Şekil 35. EMSE, SEA, SER, ve İletkenlik ilişkisi

Elektromanyetik dalgalar soğurulurken malzeme içindeki iletken ağırları takip eder ve düşük değerli ısıya dönüşerek yok olur (Munalli vd., 2019; H. Lv. Vd., 2015; Wang vd., 2015). Yapıdaki iletken ağırlığının büyüklüğü soğurma kapasitesini doğrudan etkiler.

Elektromanyetik kalkanlama malzemenin kalınlığından etkilenir. Bu nedenle, etkin deri derinliği değerinin belirlenmesi, koruyucu malzeme tasarımı hakkında değerli bilgiler verir (Hong vd., 2021). Yutma mekanizmasına göre hesaplanan deri derinliği değerleri Şekil 36'da verilmiştir. İletken parçacık miktarının artmasına bağlı olarak MB oranının artmasıyla deri derinliği azalma eğilimindedir. Tüm numunelerin plastik enjeksiyon üretim süreciyle aynı kalıpta üretilmesi nedeniyle malzeme kalınlığının sabit olduğuna dikkat edin. Deri derinliği değerleri MB25, MB50, MB75 ve MB100 numuneleri için sırasıyla 1.448, 1.039, 0.964 ve 0.978 mm olarak hesaplanmıştır. MB oranının artırılmasının iletkenliği artırdığı ve EM dalgalarının zayıflatıldığı kalınlığı azalttığı görülmektedir. MB0 numunesi, yaklaşık olarak sıfır absorban göstermesi nedeniyle deri derinliği hesabına alınmamıştır.



Şekil 36. Deri derinliği ve polimer kompozit kalınlığı ilişkisi

Bir malzemenin deri derinliği şu üç değişkenle ilişkilidir: frekans, geçirgenlik ve iletkenlik (Kumar vd., 2013). Frekans tüm numuneler için aynı olduğundan, bu kompozitler için geçirgenlik ve iletkenliğin MB ilavesine göre değiştiğini söylemek mümkündür. Absorbansın artması, malzeme geçirgenliğinin azalması ve iletkenliğin artması anlamına gelmektedir. Bu durumun MB oranı ile artan CENT miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 36 ayrıca deri derinliği-malzeme kalınlığı ilişkisini de göstermektedir. Numune kalınlığı sabit olduğu için spesifik değerler deri derinliği değerinin numune kalınlığına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Buna göre MB25 malzemesinin deri derinliği toplam kalınlığın %36.2'sine karşılık gelmektedir. Benzer yaklaşımla MB50, MB75 VE MB100 numunelerinin deri derinliği ana malzeme kalınlığının %26.0, 24.1 ve 24.5'ine denk gelmektedir. Böylece, deri derinliğinin malzeme kalınlığına oranı MB oranının artmasıyla açıkça azalmaktadır. Buna göre, malzeme tasarlanırken teorik olarak daha ince numunelerle aynı kalkanlama performansı elde edilebilmektedir. Bu da malzeme, enerji tasarrufu ve ekonomik kazanç sağlamaktadır.

İletkenlik ve EMSE sonuçlarına göre, sadece MB oranının değil, aynı zamanda yüksek basınçlı enjeksiyon üretim sürecinin de MB'deki CNT'ler arasındaki temas yoğunluğunu artırmaya yardımcı olduğu düşünülmektedir. Açıkçası, yüksek basınçlı kalıplama işlemi yapıyı sıkıştırır ve iletken dolgu maddelerinin yapı içindeki temas noktalarının artmasıyla iletkenlik artar (Damnalı vd., 2019; Wei vd., 2022; Ravindren vd., 2019; Fan vd., 2019).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, iki farklı termoplastik matris fazı (SAN ve LDPE) içeren karbon nanotüp takviyeli kompozitler, yan ürün mühendisliği süreçleri kullanılarak üretilmiştir. Nanokompozitlerin termo-dinamik ve elektromanyetik kalkanlama özellikleri incelenmiştir. Saf SAN'a eklenen AYPE/MWCNT oranı arttıkça, depolama modülü beklendiği gibi azalmış ve MB50 numunesi için depolama modülü %50'lik bir düşüşle 1,24 GPa olarak belirlenmiştir. İki fazlı termoplastik kompozit için perkolasyon eşiği ağırlıkça %10 karbon nanotüp içeren MB50 numunesi için elde edilmiştir. Ayrıca, MB75 numunesi 37 dB'lik bir EMSE değerine ulaşarak ticari uygulamalarda kullanılma potansiyeli sunmaktadır.



KAYNAKÇA

- A. Andrea, A. Suarez, J. Torres, P. A. Martinez, R. Herraiz, A. Alcarria, A. Benedito, R. Ruiz, P. Galvez, and A. Penades, "Shielding Effectiveness Measurement Method for Planar Nanomaterial Samples Based on CNT Materials up to 18 GHz", *Magnetochemistry*, vol. 9, pp. 114, 2023.
- Ağbulut, Ü. (2018). Karbondioksit hücresi üretimine yönelik polipropilen malzemenin karakterizasyonu. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Ağbulut, Ü. (2018). Karbondioksit hücresi üretimine yönelik polipropilen malzemenin karakterizasyonu. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Appl. Phys. Lett.* 94 (24) (2009) 279–459.
- Aqel, A.; Abou El-Nour K.M.M.; Ammar, R.A.A.; Al-Warthan, A., (2012) ,“Carbon Nanotubes, Science And Technology Part (I) Structure, Synthesis And Characterisation”, *Arabian Journal of Chemistry*, 5, 1-23
- Arief, S. Biswas, S. Bose (2016), *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 26285.
- Arief, S. Biswas, S. Bose (2017), *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 19202.
- Ashish Kaushal, Vishal Singh, (2021), Electromagnetic interference shielding response of multiwall carbon nanotube/polypropylene nanocomposites prepared via melt processing technique. *Polymer Composites*, 42:1148–1154. <https://doi.org/10.1002/pc.25889>
- B. Clarke, A. Gregory, D. Cannel, M. Patrick, S. Wylie, I. Youngs, and H. Hill, “A Guide to Characterization of Dielectric Materials at RF and Microwave Frequencies”, London: NPL, 2003. ISBN:0904457389.
- B. Zhao, C. Zhao, R. Li, S. M. Hamidinejad, C. B. Park (2017), *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 20873.

- Bajsić, E.G., Šmit, I., Leskovac, M., 2007. Blends of thermoplastic polyurethane and polypropylene. I. Mechanical and phase behavior. *Journal of Applied Polymer Science*, 104, 3980–3985.
- Bigg D. (1987), The effect of chemical exposure on the EMI shielding of conductive plastics. *Polym Compos*, 8(1):1–7.
- Bodur, M. S. (2010). Geri dönüşüm işleminin tekstil atığı takviyeli polimer matrisli karma malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Braun, D. (1985). *Kunststoffe: Kunststoff-Kompendium*. Von A. Franck und K.-H. Biederbick. Vogel-Buchverlag Würzburg 1984. 1. Aufl., 346 S., 100 Abb., 54 Tab., DM 48,-. ISBN 3-8023-0135-8, in *Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium*. p. 414-417
- C. Fan, B. Wu, R. Song, Y. Zhao, Y. Zhang, D. He (2019), Electromagnetic shielding and multi-beam radiation with high conductivity multilayer graphene film, *Carbon*, 155, 506-513.
- C. Liang, M. Hamidinejad, L. Ma, Z. Wang, C. B. Park (2020), Lightweight and flexible graphene/SiC-nanowires/ poly(vinylidene fluoride) composites for electromagnetic interference shielding and thermal management, *Carbon*, 156, 58-66, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.09.044>.
- C. Wang, Y. Ding, Y. Yuan, X. He, S. Wu, S. Hu, M. Zou, W. Zhao, L. Yang, A. Cao, Y. Li. (2015), Graphene aerogel composites derived from recycled cigarette filters for electromagnetic wave absorption, *J. Mater. Chem. C*, 3, 11893–11901.
- Campbell, F.C. (2010) *Introduction to Composite Material. Structural Composite Materials*
- Celep, Ş. (2007), “Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları”, Yüksek Lisans Tezi Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Chawla, (2012). *Composite materials: Science and Engineering*
- Çınar, K. (2006), Elektromanyetik Alan, *Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi*, sayı.465,s80-81

- D. Munalli, G. Dimitrakis, D. Chronopoulos, S. Greedy, A. Long (2019), Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced Composites, *Compos. Part B: Eng.* 173, 106906. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106906>
- D.X. Yan, P.G. Ren, H. Pang, Q. Fu, M.B. Yang, Z.M. Li (2012), Efficient electromagnetic interference shielding of lightweight graphene/polystyrene composite, *J. Mater. Chem.* 22 FF(36) 18772–18774.
- Damnalı, O.F., Eskizeybek, V. (2019), Synergistic impact of graphene and carbon nanotubes on waste paper for hybrid nanocomposite substrates. *Cellulose*, 26, 3935–3954. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02339-7>
- Dashan Mi, Xiaoyue Li, Zhongguo Zhao, Zhiyong Jia, Wenli Zhu (2021), Effect of dispersion and orientation of dispersed phase on mechanical and electrical conductivity, *Polymer Composites*, 42(9), 4277. <https://doi.org/10.1002/pc.26145>
- David O. Carpenter (2013), Human disease resulting from exposure to electromagnetic fields, *Reviews on Environmental Health*, <https://doi.org/10.1515/reveh-2013-0016>
- Demiryürek, O. (2004). Sentetik Lif Üretiminde Kullanılan Ekstrüderler ve Ekstrüder Pompa Sisteminin Tasarım Esasları. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Dereli. G. (2003), “Gerinin Altındaki Karbon Nanotüplerin Elektronik Yapıları”, İtü Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Seminer Notu, 20 Mart 2003
- Durdu Meskan (2018), Polietilentereftalat / Polopirrol Kompozit Malzeme Hazırlanması ve Elektromanyetik Girişim Ekranlama Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi
- Ersöz N. (2022), Tekstil Materyallerinin Elektromanyetik Kalkanlama Özelliklerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı
- F. Yıldırım, E. Kabakçı, H. S. Şaş, and V. Eskizeybek, “Multi-walled carbon nanotube grafted 3D spacer multi-scale composites for electromagnetic interference shielding”, *Polymer Composite*, vol. 43, pp. 5690, 2020.

- Faker M., Aghjeh M.K.R., Ghaffari M., Seyyedi S.A. Rheology, morphology and mechanical properties of polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (PE/EVA) blends. *Eur. Polym. J.* 2008;44:1834–1842. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2008.04.002.
- G. Mutlu, F. Yıldırım, H. Ulus, and V. Eskizeybek, “Coating graphene nanoplatelets onto carbon fabric with controlled thickness for improved mechanical performance and EMI shielding effectiveness of carbon/epoxy composites”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 284, pp. 109271, 2023
- Goutam Prasanna Kar. (2015), Sourav Biswas† , Rani Rohini and Suryasarathi Bose, Tailoring the dispersion of multiwall carbon nanotubes in co-continuous PVDF/ABS blends to design materials with enhanced electromagnetic interference shielding, *J. Mater. Chem. A*, 3, 7974-7985
- Gubbels, F.; Jérôme, R.; Vanlathem, E.; Deltour, R.; Blacher, S.; Brouers, F. (1998), Kinetic and thermodynamic control of the selective localization of carbon black at the interface of immiscible polymer blends. *Chem. Mater.*, 10, 1227–1235.
- H. Lv, X. Liang, G. Ji, H. Zhang, Y. Du (2015), Porous three-dimensional flower-like Co/CoO and its excellent electromagnetic absorption properties, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7, 9776–9783.
- H. Oraby, I. Naeem, M. Darwish, M. H. Senna, H. R. Tantawy (2021), Effective electromagnetic interference shielding using foamy polyurethane composites, *Polym. Compos.*, 42, 3077. <https://doi.org/10.1002/pc.26040>
- H. Tang, J.H. Chen, S.Z. Yao, L.H. Nie, Y.F. Kuang, Z.P. Huang, D.Z. Wang, Z.F. Ren, (2005), Deposition and electrocatalytic properties of platinum on well-aligned carbon nanotube, *Materials Chemistry and Physics*, 548-553
- H. Zhao, L. Chen, J. Yun, L. Tang, Z. Wen, X. Zhang, J. Gu (2018) Improved Thermal Stabilities, Ablation and Mechanical Properties for Carbon Fibers/Phenolic Resins Laminated Composites Modified by Silicon-containing Polyborazine, *Eng. Sci.*, 8, 2, 57.
- H. Zhu, Y. Yang, A. Sheng, H. Duan, G. Zhao et al. (2019) Layered structural design of flexible waterborne polyurethane conductive film for excellent electromagnetic

interference shielding and low microwave reflectivity. *Appl. Surf. Sci.* 469, 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.007>

http://www.funzel.com.tr/product_ekstruzyon_ekipmanlari.html Son Eriřim Tarihi: 15.07.2023

<https://www.former.com.tr/plastik-enjeksiyon-nedir/> Son Eriřim: 15.07.2023

IEEE Standards Association, IEEE Std 2715-2023, “IEEE Guide for the Characterization of the Shielding Effectiveness of Planar Materials”, IEEE Electromagnetic Compatibility Society Approved 15 February 2023.

IEEE Standards Association, IEEE Std 521-2019, “IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands”, IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, Approved 7 November 2019.

J. Baker-Jarvis, “Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Permittivity Measurements”, NIST Technical Note 1341, published by the National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, CO, USA, 1990.

J. Chen, Y. Zhu, Z. Guo, A. G. Nasibulin (2020) Recent Progress on Thermo-electrical Properties of Conductive Polymer Composites and Their Application in Temperature Sensors *Eng. Sci.*, 12, 13.

J. Jia, X. Sun, X. Lin, X. Shen, Y.W. Mai, J.K. Kim (2014), Exceptional electrical conductivity and fracture resistance of 3D interconnected graphene foam/epoxy composites, *ACS Nano* 8(6), 5774–5783.

Jia, S., Zhu Y., Wang, Z., Chen, L., Fu, L., 2015. Influences of PP-g-MA on the surface free energy, morphologies and mechanical properties of thermoplastic polyurethane / polypropylene blends. *Journal of Polymer Research*, 22, 159.

Kaw, A.K. (2006) *Mechanics of Composite Materials*. 2nd Edition, Taylor & Francis, Boca Raton.

Kılıç, G.; Örtlek H.G.; Saraçođlu, Ö.G. (2007), “Elektromanyetik Çevre Kirliliđi ve Bu Kirlilikten Korunmada Tekstil Çözümleri”, *Tekstil ve Mühendis*, 64, 17.

Kingston, C.T.; Simard, B.: “Fabrication of Carbon Nanotubes”, *Analytical Letters*, 36, (2003) 3119–3145.

- Krishnamoorti, R., Vaia, A.R., Giannelis, E.P. (1996), Structure and Dynamics of Polymer Layered Silicate Nanocomposites. *Chemistry of Materials*, 8, 1728-1734.
- Krishnasamy Jagatheesan, Alagirusamy Ramasamy, Apurba Das, Ananjan Basu (2014), Electromagnetic shielding behaviour of conductive filler composites and conductive fabrics – A review, *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 39, 329-342
- Ling Wei, Nan Li, Gong-Dong Wang, Xi liang Liu, Ya Xu Liu, Yi Chao Shen, M. Balasubramanian, (2013), The effect of rolling process on the mechanical and electrical properties of CNTs-enhanced GFRP, *Materials Today Communications*, 2022, 32, 103998, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103998>.
- M. Rahaman, T. K. Chaki & D. Khastgir (2011), Development of high performance EMI shielding material from EVA, NBR, and their blends: effect of carbon black structure, *Journal of Materials Science*, volume 46, 3989–3999
- M. Wegrzyn, O. Sahuquillo, A. Benedito, E. Gimenez (2015), Morphology, mechanical performance, and nanoindentation behavior of injection molded PC/ABS-MWCNT nanocomposites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 132.
- Ma, P.-C.; Siddiqui, N.A.; Marom, G.; Kim, J.-K. (2010), Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 41, 1345–1367.
- Mallick, P.K. (2007), *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press, Boca Raton.
- Masanori Suzuki* & Charles A. Wilkle (1995), The thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer as studied by TGA/FTIR, *Volume Polymer Degradation and Stability* 47, Issue 2,
- Mazumdar, S. (2001), *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. U.S: CRC Press
- Newmark A. (2002), “Kimyanın Öyküsü”, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, Ankara
- Parveen Saini, Veena Choudhary, B.P. Singh, R.B. Mathur (2009), S.K. Dhawan, *Polyaniline–MWCNT nanocomposites for microwave absorption and EMI*

- shielding, *Materials Chemistry and Physics*, 113 (2–3), 919-926, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.08.065>.
- Potts, J.R.; Dreyer, D.R.; Bielawski, C.W.; Ruoff, R.S. (2011), Graphene-based polymer nanocomposites. *Polymer*, 52, 5–25.
- Priti Xaviera and Suryasarathi Bose (2014), Non-equilibrium segmental dynamics driven by multiwall carbon nanotubes in PS/PVME blends, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20
- Qu, J. (1993). The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials. *Mechanics of Materials*, 14(4), 269-281
- R. Ravindren, S. Mondal, K. Nath, N.C. Das (2019), Investigation of electrical conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness of preferentially distributed conductive filler in highly flexible polymer blends nanocomposites, *Compos. Appl. Sci. Manuf.*, 118, 75-89.
- Rajeev Kumar, Sanjay R. Dhakate, Tejendra Gupta, Parveen Saini, Bhanu P. Singh, Rakesh B. Mathur (2013), Effective improvement of the properties of light Weight carbon foam by decoration with multi-wall carbon nanotubes *J. Mater. Chem. A* ,1, 5727-5735.
- Rana Yılmaz (2014), Elektromanyetik Kalkanlama Özelliği Olan Malzemeler, *Electronic Journal of Vocational Colleges*
- Rani Rohini and Suryasarathi Bose (2014), Electromagnetic Interference Shielding Materials Derived from Gelation of Multiwall Carbon Nanotubes in Polystyrene/Poly(methyl methacrylate) Blends, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 6, 14, 11302–11310
- Rishi Pal , Sneh Lata Goyal , Ishpal Rawal , Anil Kumar Gupta, Tailoring of EMI shielding properties of polyaniline with MWCNTs embedment in X-band (8.2–12.4 GHz), *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2022, 169, 110867
- S. Kim, J.S. Oh, M.G. Kim, W. Jang, M. Wang, Y. Kim, H.W. Seo, Y.C. Kim, J.H. Lee, Y. Lee, J.D. Nam (2014), Electromagnetic interference (EMI) transparent shielding of reduced graphene oxide (RGO) interleaved structure fabricated by electrophoretic

- deposition, *Appl. Mater. Interfaces*, 6, 17647–17653, <https://doi.org/10.1021/am503893v>.
- S. Zhu, Q. Cheng, C. Yu, X. Pan, X. Zuo, J. Liu, M. Chen, W. Li, Q. Li, L. Liu. (2020), *Compos. Sci. Technol.*, 189, 108012.
- S.H. Park, P. Thielemann, P. Asbeck, P.R. Bandaru (2009), Enhanced dielectric constants and shielding effectiveness of uniformly dispersed, functionalized carbon nanotube composites, *Applied Physics Letters*, 94, 24
- Sevgi L. (2000). Elektromanyetik uyumluluk elektromanyetik kirlilik EMO İstanbul Tübitak-Mam Teknolojik işbirliği dergisi, Nisan 2000
- Shital Patangrao Pawar,^a Dhruva A. Marathe,^a K. Pattabha and Suryasarathi Bose (2015), Electromagnetic interference shielding through MWNT grafted Fe₃O₄ nanoparticles in PC/SAN blends, *Journal of Materials Chemistry A*, 2
- Staab, G. H. (2015), *Laminar Composites* (2nd ed.). USA: Elsevier Inc., 294-295.
- T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı, Elektromanyetik Alanlara İlişkin Genel Bilgiler – Seri 1, 2020
- T.W. Lee, S.E. Lee, Y.G. Jeong (2016), Highly effective electromagnetic interference shielding materials based on silver nanowire/cellulose papers. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8(20), 13123–13132, <https://doi.org/10.1021/acsami.6b02218>
- Tadmor, Z., and Klein, I. (1970). *Engineering principles of plasticating extrusion* (1. Baskı). New York: Van Nostrand Reinhold Publications, 100-400.
- Tianshu Peng, Shanchi Wang, Zhiguang Xu, Tingting Tang, and Yan Zhao (2022), Multifunctional MXene/Aramid Nanofiber Composite Films for Efficient Electromagnetic Interference Shielding and Repeatable Early Fire Detection, *ACS Omega*, 7 (33), 29161-29170
- V. Shukla (2019), Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients *Nanoscale Adv.* 2019, 1, 1640. DOI: 10.1039/C9NA00108E
- V. Zaroushani, A. Khavanin, S. B. Mortazavi, and A. J. Jafari, “Efficacy of Net Epoxy Resin for Electromagnetic Shielding in X-Band Frequency Range”, *Health Scope*, vol. 5(3), pp. e30203, 2016.

- Verdejo, R.; Bernal, M.M.; Romasanta, L.J.; Lopez-Manchado, M.A. (2011), Graphene filled polymer nanocomposites. *J. Mater. Chem.*, 21, 3301–3310.
- Wang, K., Chen, C., Wu, K., Toh, M.L., He, C., Yee, A.F. (2005). Epoxy nanocomposites with highly exfoliated clay: mechanical properties and fracture mechanisms. *Macromolecules*, 38, 788-800
- Wang, R.; Zheng, Y. Y.; Chen, L. H.; Chen, S. Y.; Zhuo, D. X.; Wu, L. X. (2020), Fabrication of high mechanical performance UHMWPE nanocomposites with high-loading multiwalled carbon nanotubes. *J. Appl. Polym. Sci.*, 137, 48667
- Więckowski, T. W., Janukiewicz, J. M. (2006), Methods for Evaluating the Shielding Effectiveness of Textiles, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* January / December, Vol. 14, No. 5 (59)
- X. Jia, Y. Li, B. Shen, W. Zheng (2022), Evaluation, fabrication and dynamic performance regulation of green EMI-shielding materials with low reflectivity: A review, *Composites Part B: Engineering*, 233, 109652, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109652>.
- Xinghua Hong, Tao Peng, Chengyan Zhu, Junmin Wan, Yongqiang Li (2021), Electromagnetic shielding, resistance temperature-sensitive behavior, and decoupling of interfacial electricity for reduced graphene oxide paper, *Journal of Alloys and Compounds*, 882, 160756, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160756>.
- Y. Chen, Y. Wang, T. Su, J. Chen, C. Zhang, X. Lai, D. Jiang, Z. Wu, C. Sun, B. Li, Z. Guo, *ES Mater. Manuf.* (2019), 4, 31. 49 J. Wang, [22] Z. Shi, X. Wang, X. Mai, R. Fan, H. Liu, X. Wang, Z. Guo, *Eng. Sci.* 2018, 4,
- Y. Zare (2016), The roles of nanoparticles accumulation and interphase properties in properties of polymer particulate nanocomposites by a multi-step methodology *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 91, 127.
- Yaman, E. (2011). Hastane Ortamında Elektromanyetik Alan Etkilerinin Ölçüm Yoluyla Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2-3, 6-7, 11-13.

- Yetim, A.: “Karbon Nano Tüpler”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2011
- Yıldırım, F., Kabakçı, E., Şaş, H. S., Eskizeybek, V. (2022), Multi-walled carbon nanotube grafted 3D spacer multi-scale composites for electromagnetic interference shielding, *Polym. Compos.*, 43(8), 5690. <https://doi.org/10.1002/pc.26885>
- Yiming Chen, Liang Pang, Yang Li, Heng Luo, Gaigai Duan, Changtong Mei, Wenhui Xu, Wei Zhou, Kunming Liu, Shaohua Jiang (2020), Ultra-thin and highly flexible cellulose nanofiber/silver nanowire conductive paper for effective electromagnetic interference shielding, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 135, 105960, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105960>.
- Yuca, N. (2010), “Karbon Nanotüplerin Çeşitli Yöntemlerle Saflaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
- Yüce, G. (2009), “Karbon Nanotüplerin Polimerler ile Fonksiyonlaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
- Z. Zeng, M. Chen, H. Jin, W. Li, X. Xue, L. Zhou, Y. Pei, H. Zhang, Z. Zhang (2016), Thin and flexible multi-walled carbon nanotube waterborne polyurethane composites with high-performance electromagnetic interference shielding, *Carbon*. 96, 768. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.10.004>
- Zhai, W.; Zhao, S. G.; Wang, Y.; Zheng, G. Q.; Dai, K.; Liu, C. T.; Shen, C. Y. (2018), Segregated conductive polymer composite with synergistically electrical and mechanical properties. *Composites, Part A*, 105, 68–77.