

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA UYGULAMALARINA YÖNELİK  
EPOKSİ MATRİSLİ NANOKOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE  
KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Begüm Beril İNCECİK**

**Mikro ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Z. Gökür BÜKE**

**NİSAN 2023**



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



Begüm Beril İNCECİK

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA UYGULAMALARINA YÖNELİK EPOKSİ MATRİSLİ NANOKOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Begüm Beril İNCECİK

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü

Mikro ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Z. Gökür BÜKE

Tarih: Nisan 2023

İkinci Dünya Savaşı süreci ve sonrasında gelişen teknoloji, elektronik cihazların kullanımı, artan radyo dalga yayınları, transistörler, mikroişlemci gibi sistem ve ekipmanlar frekans spektrumunu genişletmiş ve cihazların çalışmalarında beklenmedik problemler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu problemlerin istemli ve istem dışı olarak cihaz ve sistemlerden yayılan elektromanyetik alanların girişiminden kaynaklandığı öngörülmüştür. Bunlar üzerine Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), Elektromanyetik Girişim (EMG) problemi üzerinde çalışması için Uluslararası Radyo Girişimi Özel Komitesini (CISPR) görevlendirmiştir. 1979'da Federal İletişim Kurulu'nun (FCC) kurulmasıyla, Elektromanyetik Girişimin tanımlanması ve konu ile ilgili standartlar, regülasyonlar oluşmaya başlamış, Elektromanyetik Uyumluluk (EMU) ölçütlerinin belirlenmesi hızlanmıştır. Günümüzde ICNIRP, ANSI, IEEE, ASTM ve WHO gibi kuruluşların da üzerinde çalışmakta olduğu EMG Kalkanlama/EMU konusu hem cihaz ve ekipmanların servis süresi boyunca operasyonlarını başarılı bir şekilde yürütmesi açısından hem de insan ve diğer biyolojik türlerin sağlığının korunması açısından önem arz etmektedir. Bu sebeple, uluslararası standardizasyonlar ve yönetmeliklerle kontrol edilmektedir. Ülkemizde konu ile ilgili düzenlemeleri ve sınır değerleri Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTİK) yönetmeliklerle ve Milli Monitör Sistemi (MMS) ile takip etmektedir. BTİK

tanımına göre EMG terimi her türlü sistem/cihaz faaliyetini engelleyen, haberleşmede kesinti doğuran veya kalitesini bozan her türlü yayın veya elektromanyetik etkiyi ifade eder. EMU testleri ve testler sonucu cihazın ortamda herhangi bir girişime sebep olmaması konusunun belirlenmesi, CE sertifikasının bulunması gibi hususlar telekomünikasyon ürünleri başta olmak üzere cihaz, ekipmanlar ve sistemler için elzemdir. Havacılık, Uzay ve Savunma Sanayiinde ise Elektromanyetik Girişimi Kalkanlama hususu hayati önemdedir. Elektronik bileşenleri içeren ürünlerin, devrelerin, özellikle hassas güdüm sistemlerinin, algılayıcı ve eyleyicilerini doğal, yapay, dolaylı ya da uluslararası unsurlardan kaynaklanan kasti elektromanyetik etkileşimlere karşı korumak oldukça kritiktir. Bu kapsamda EMG Kalkanlama Etkinliği (EMG KE) yüksek kompozit malzemeler, katkı malzemeleri ve prosesler geliştirmek malzeme teknolojileri alanında temel hedeflerdendir. Bu tez çalışmasında Elektromanyetik Kalkanlama Uygulamalarına Yönelik Epoksi Matrisli Nanokompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu üzerinde çalışılmıştır. Materyal ve yöntem gelince, Grafen kapsüllü Nikel (GNi) parçacıklar Plazma Destekli Döner Aksamı Kimyasal Buhar Çöktürme (PDDAKBÇ) yöntemi ile sentezlenmiştir. Parçacıkların karakterizasyon süreçlerinden sonra, elde edilen GNi yapılar epoksi matrise katılanmıştır. Nanokompozit yapı elde edilmiş ve test kuponları imal edilmiştir. Farklı katkılama yüzdelerinde hazırlanan test kuponlarının Kalkanlama Etkinlikleri (KE) ölçülmüştür. Grafen kapsülasyonu sayesinde nikel tozların kalkanlama etkinliği aynı katkılama yüzdelerinde iyileşmiştir. KE ölçümleri 1,5 Ghz-10 GHz frekans aralığı için ASTM D4935 Düzlemsel Malzemelerin Elektromanyetik Ekranlama Etkinliği test yöntemi ile yapılmıştır. GNi tozların Savunma Sanayi uygulamaları için epoksi matrisli nanokompozit malzemelerde EMG Kalkanlama uygulamalarında kullanım potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir. Bu tez çalışması TÜBİTAK 1003 programı kapsamında 118F491 kodlu proje ve 118F492 kodlu alt proje ile desteklenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** Elektromanyetik girişim, Elektromanyetik girişimi kalkanlama, Elektromanyetik uyumluluk, Kimyasal buhar çöktürme, Grafen, Nikel, Nanokompozit, Epoksi

## **ABSTRACT**

Master of Science

### **DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF EPOXY MATRIX NANOCOMPOSITES FOR ELECTROMAGNETIC SHIELDING APPLICATIONS**

Begum Beril INCECIK

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences

Micro and Nanotechnology Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Z. Goknur BUKE

Date: April 2023

During and after the Second World War, the developing technology, the use of electronic devices, increasing radio wave broadcasts, transistors, systems and equipment such as microprocessors had expanded the frequency spectrum; and unexpected problems has started to occur in the operation of the devices. It was predicted that these problems were caused by the interference of electromagnetic fields that are intentionally and unintentionally emitted from devices and systems. Upon these, the International Electrotechnical Commission (IEC) assigned the International Radio Interference Special Committee (CISPR) to work on the Electromagnetic Interference (EMI) problem. With the establishment of the Federal Communications Commission (FCC) in 1979, the definition of Electromagnetic Interference and the standards and regulations on the subject began to be formed, and the determination of Electromagnetic Compatibility (EMC) criteria accelerated. Nowadays, EMI/EMC issue which is also studied by organizations such as ICNIRP, ANSI, IEEE, ASTM and WHO is important both for the successful operation of the devices and equipment during their service period and for the protection of the health of human and other biological species. Therefore, it is controlled via International Standardizations and regulations. In our country, the relevant regulations and limit

values are followed by the Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTİK) and the National Monitoring System (MMS). According to the definition of BTİK, the term EMI refers to any broadcast or electromagnetic effect that hinders any system/device activity, interrupts communication or impairs its quality. EMC tests and the issues such as determining whether the device does not cause any interference in the environment as a result of tests, and the presence of CE certificate are essential for devices, equipment and systems, especially telecommunication products. Electromagnetic Interference Shielding has vital importance in the Aerospace and Defense Industry. It is very critical to protect products containing electronic components, circuits, especially precision guidance systems, sensors and actuators against intentional electromagnetic interactions caused by natural, artificial, indirect or international factors. In this context, developing composite materials, additives and processes that have high EMI Shielding Efficiency (EMI SE) is one of the main goals in the material technologies field. In this thesis, the Development and Characterization of Epoxy Matrix Nanocomposites for Electromagnetic Shielding Applications has been studied. When it comes to materials and method, Graphene encapsulated Nickel (GNi) particles were synthesized by the Rotating Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (RPECVD) method. After the characterization processes of the particles, the obtained GNi structures were integrated into the epoxy matrices. The nanocomposite structure was obtained and the test coupons were produced. The Shielding Efficiency (SE) of test coupons prepared in different filling percentages was measured. Due to graphene encapsulation, the shielding efficiency of nickel powders improved at the same percentages. SE measurements were conducted in accordance with the ASTM D4935 Electromagnetic Shielding Efficiency test method of Planar Materials for the frequency range 1.5 Ghz-10 GHz. GNi powders have been shown to have potential for use in EMI Shielding applications in epoxy matrix nanocomposite materials for Defense Industry applications. This thesis study were supported by the 118F491 coded project and 118F492 coded subproject within the scope of TUBITAK 1003 program.

**Keywords:** Electromagnetic interference, Electromagnetic interference shielding, Electromagnetic compatibility, Chemical vapor deposition, Graphene, Nickel, Nanocomposite, Epoxy

## TEŞEKKÜR

Öncelikle lisans yıllarımdan itibaren akademik ve sosyal gelişimimi destekleyen, stajlarımdan itibaren başlayan süreçte sektörde de ilerlememi, yer edinmemi değerli yardım ve yönlendirmeleri ile sağlayan, yüksek lisans öğrencisi olarak beni kabul etme fırsatını bana veren çok değerli ve saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Gökür Bükre'ye,

Beni her zaman destekleyen canım ailem annem, babam, kardeşim, anneanneme ve bu tez yazım sürecinde gecelerce kemiğini kemirirken bana eşlik eden Dexterçığıma,

Bu tezin oluşmasına ve genel olarak akademik hayatıma çok fazla katkısı ve desteği olan; hayatta herhangi bir konuda hemen gözü kapalı danışabileceğim, TOBB ETÜ Nano Malzemeler Grubu'nun (NMG) bana kazandırdığı biricik dostum, destekçim ve hayat boyu mentörüm olarak gördüğüm Ömer'ciğime, onun tatlı eşi, kaliteli, düşünceli arkadaşım Özlem'e,

TOBB ETÜ Nano Malzemeler Grubu (NMG) değerli üyelerine, özel olarak kıymetli Eren, Deniz, Tarık ve tatlı Elif Okay'a,

Tezimin gerçekleşmesinde 118F491 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a,

Lisans hayatımdan beri mezunu olmaktan gurur duyduğum, akademik ortamı, eğitim ve burs olanaklarıyla sektörde çalışırken yüksek lisansımı yapmama imkan sunan yenilikçi üniversitem TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesine,

ARGE Mühendisi olarak bünyesinde çalışmakta olduğum ROKETSAN A.Ş ailesine, akademik çalışmalardaki destekleyici politikası için ROKETSAN Akademi'ye ve Birim Yöneticimiz Sn. Fatih GÜNER'e, ROKETSAN Elektromanyetik Laboratuvarı ekibine ve özel olarak Test Mühendisi değerli arkadaşım Hilal'e, ROKETSAN'da çalışırken tez sürecini ve daha birçok süreçleri birlikte yaşadığımız, yaşayacağımız Selen'ciğime, son süreçte bana verdiği tüm motivasyonu ve desteği için Ramona'ya, her daim yanımda olduklarını bildiğim TOBB ETÜ Makine'nin bana kazandırdığı kardeşlerim Batu'ya, Büşra'ya ve Meltem'e,

Teşekkürü borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xvi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>SEMBOLE LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ</b> .....	<b>7</b>
2.1. Elektromanyetik Girişim ve Temel Kavramlar .....	7
2.1.1. Elektrik alan .....	7
2.1.2. Manyetik alan.....	8
2.1.3. Elektromanyetizma .....	8
2.1.4. Elektromanyetik alan ve elektromanyetik (EM) dalga .....	9
2.1.5. Elektromanyetik spektrum .....	17
2.1.6. Elektromanyetik girişim (EMG), elektromanyetik uyumluluk (EMU) ve EMG kaynakları .....	21
2.2. Elektromanyetik Girişimi Kalkanlama .....	25
2.2.1. Elektromanyetik girişimi kalkanlama ve mekanizmaları.....	25
2.2.2. Elektromanyetik girişimi kalkanlama etkinliği (EMG KE) ölçümü ve standardizasyon .....	42
2.2.2.1. Koaksiyel tutucu metot (Coaxial holder method) .....	43
2.3. Elektromanyetik girişimi kalkanlamada kullanılan malzemeler ve metotlar 47	
2.3.1. Plastiklere iletken kaplama uygulanması .....	50
2.3.2. Metallerin kullanılması .....	51
2.3.2.1. Metal folyo, şerit, meş ve filamentlerin kullanılması .....	51
2.3.2.2. Metal tozlar (powder) ve pulların (flake) kullanılması .....	54
2.3.2.3. Metal ile kaplanmış küresel yapıların kullanılması .....	56
2.3.2.4. Metal ile kaplanmış fiberlerin kullanılması .....	58
2.3.2.5. Metal ile kaplanmış tül ve keçe yapıların kullanılması.....	59
2.3.2.6. Metal ve metal oksit nanokatıkların kullanılması .....	61
2.3.2.7. MXenelerin kullanılması.....	63
2.3.3. Kendinden iletken polimerlerin kullanılması.....	69
2.3.4. Karbon bazlı malzemelerin kullanılması .....	69
2.3.4.1. Karbon karası kullanılması .....	69
2.3.4.2. Grafit kullanılması .....	70
2.3.4.3. Karbon nanofiber kullanılması.....	71
2.3.4.4. Karbon nanotüp kullanılması .....	72
2.3.4.5. Grafen kullanılması.....	75
2.3.4.6. Dekore edilmiş yapıların kullanılması .....	79
2.3.5. Köpük, bal peteği ve çok katmanlı yapıların kullanılması.....	81
2.3.5.1. Köpük (foam) yapıların kullanılması.....	81

2.3.5.2.	Bal peteği (honeycomb) yapıların kullanılması .....	85
2.3.5.3.	Çok katmanlı yapıların kullanılması .....	87
2.4.	Tezin Amacı .....	89
<b>3.</b>	<b>MALZEMELER VE YÖNTEMLER.....</b>	<b>91</b>
3.1.	Malzemeler.....	91
3.1.1.	Nikel tozları.....	91
3.1.2.	Grafitik yapı kapsüllü nikel (GNi) tozları .....	91
3.1.3.	Epoksi reçine .....	92
3.2.	Yöntem.....	92
3.2.1.	Nikel toz üzerinde grafitik yapı sentezi.....	92
3.2.2.	Nikel toz üzerinde sentezlenen grafitik yapının karakterizasyonu.....	93
3.2.2.1.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	93
3.2.2.2.	Raman Spektroskopisi.....	94
3.2.2.3.	Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) .....	94
3.2.3.	Ni ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozitlerin üretilmesi .....	94
3.2.3.1.	Elde karıştırma (Hand mixing).....	95
3.2.3.2.	Vorteks ile karıştırma .....	97
3.2.3.3.	Ultrasonik prob tipi sonikatör ile karıştırma .....	98
3.2.4.	Ni ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozitlerin karakterizasyonları .....	99
3.2.4.1.	Optik mikroskop (OM).....	99
3.2.4.2.	Taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	99
3.2.4.3.	Elektromanyetik kalkanlama etkinliği ölçümleri .....	100
3.2.5.	Ni-EP ve GNi-EP kompozitlerin dört nokta prob ile yüzey direnci ölçümleri ve perkolasyon eşiklerinin teorik olarak hesaplanması .....	101
<b>4.</b>	<b>BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>107</b>
4.1.	Nikel Tozları Yüzeyinde Sentezlenen Grafitik Yapının Karakterizasyonu .....	107
4.2.	Ni-EP ve GNi-EP Kompozitlerin Perkolasyon Eşiklerinin Teorik Olarak Hesaplanması.....	108
4.3.	Ni ve GNi Katkılı Epoksi Matrisli Kompozitlerin Karakterizasyonları ..	112
4.3.1.	Mikroyapı analizleri .....	112
4.3.2.	Ni ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozit numunelerin EMG kalkanlama performansının incelenmesi .....	114
4.3.3.	Elde karıştırma yöntemi ile hazırlanmış Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelerin EMG KE performansları.....	115
4.3.3.1.	Elde karıştırma yönteminde belirli frekanslarda EMG KE performanslarının karşılaştırılması.....	117
4.3.4.	Vorteks ile Karıştırma Yöntemi ile Hazırlanmış Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelerin EMG KE performansları.....	118
4.3.4.1.	Kalkanlama mekanizmalarının Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelerde yüzdesel dağılımı ve baskın mekanizma (vorteks ile karıştırma) .....	119
4.3.5.	Prob sonikatör ile karıştırma yöntemi ile hazırlanmış Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelerin EMG KE performansları .....	120

4.3.6. Elde karıştırma, vorteks ile karıştırma ve prob sonikatör ile karıştırma yöntemlerinin EMG KE performansına etkisinin Ni ve GNi için karşılaştırılması .....	121
<b>5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMA ÖNERİLERİ .....</b>	<b>127</b>
5.1. Sonuçlar.....	127
5.2. Gelecek Çalışma Önerileri .....	129
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>131</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>Err</b>

or! Bookmark not defined.



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Elektrik alanları, pozitif elektrik yükünün alanı ve negatif elektrik yükünün alanı. ....	7
Şekil 2.2 : Eşit ve zıt yüklerden yayılan alan çizgileri. ....	7
Şekil 2.3: Manyetik alan kaynakları. ....	8
Şekil 2.4: Elektromanyetik dalga. ....	9
Şekil 2.5: Kaynaktan uzaklığa göre dalga empedansı değişimi. ....	14
Şekil 2.6: Düzlem EM dalga bileşenleri ve ilerleyişi. ....	15
Şekil 2.7: 18- 26,5 GHz frekanslarında çalışan bir dikdörtgen dalga kılavuzu ve kesiti. ....	16
Şekil 2.8: Bir dalga kılavuzundaki TE ve TM yayılma modları. ....	16
Şekil 2.9: Elektromanyetik spektrum. ....	18
Şekil 2.10: Test cihazında elektromanyetik girişim portları. ....	21
Şekil 2.11: Testlerden geçen ürünlerin kutusuna "CE" sembolü yapıştırılır. ....	22
Şekil 2.12: Çeşitli ortamlardan EMG'ye kaynakları ve ortamda maruziyet ihtimali taşıyan diğer cihazlar, insanlar. ....	26
Şekil 2.13: EMG kalkanlama mekanizmasının şematik gösterimi. ....	29
Şekil 2.14: Elektrik dipol(çift kutuplu) ve etrafında oluşan elektrik alan. ....	32
Şekil 2.15: Manyetik dipol ve etrafında oluşan manyetik alan. ....	33
Şekil 2.16: Elektrik alana gösterilen direnç elektrik geçirgenlik. ....	33
Şekil 2.17: (a) Dielektrik malzeme, (b) E alan altında elektronları belirli bir yönde kayması ve elektrik dipol oluşumu, (c) Elektrik dipollerin gelen EM dalga yönüne ters bir yönde elektrik alan oluşturması. ....	34
Şekil 2.18: Malzemenin manyetik davranışı ve dipol oluşturma kabiliyeti. ....	34
Şekil 2.19: Domenler, yönlendirilmiş domenler, atomlar ve elektron spini manyetik dipolleri sayesinde manyetizasyona katkıda bulunur. ....	35
Şekil 2.20: İki portlu bir network analizörde parametrelerin şematik gösterimi. ....	38
Şekil 2.21: MUT (Material Under Test) olmak üzere (a) network analizör cihazındaki mekanizmanın genel blok diyagramı (b) üç farklı dalga kılavuzu, koaksiyel tutucu, serbest uzay EMG KE ölçüm yöntemleri. ....	43
Şekil 2.22: Test ölçümü görünümü ASTM D4935-10'un sistem konfigürasyonu. ....	44
Şekil 2.23: ASTM D4935 test düzeneği. ....	44
Şekil 2.24: Yatay test konumunda 1,5 GHz-10 GHz'lik frekans aralığında ASTM D 4935 test fikstürü, fikstürün içi ve referans ve yük numuneleri. ....	45
Şekil 2.25: 30 MHz- 1,5 GHz frekans aralığı numune boyutları ve test fikstürü çalışma prensibi. ....	45
Şekil 2.26: 1,5 GHz-10 GHz aralığında çalışan fikstürde de numune boyutları (mm). ....	46
Şekil 2.27: EMG kalkanlama uygulamalarında kullanılan karbon malzemenin tarihsel süreci. ....	48
Şekil 2.28: EMG Kalkanlamada kullanılan bir bakır şerit (TBA Protective Solutions, Co.), EMG Kalkanlamada kullanılan bir alüminyum folyo (3M, Co.). ....	51
Şekil 2.29: Çeşitli örgü metal contalar ve metal meşler (Boegger Industrial Limited). ....	52

Şekil 2.30: Prepreg şeklinde bakır meş (3M™ Scotch-Weld) .....	52
Şekil 2.31: PET ve paslamaz çelikten dokunan metal kompozit yapı. ....	53
Şekil 2.32: Ni/ABS kompozitinden klorform ile çözülerek ayrıldıktan sonra nikel filamentler (hacimce %3). ....	53
Şekil 2.33: a) Al pul yapılar b) Yüzey pürüzlülüğü azaltılmış (öğütülmüş) Al pul yapılar. ....	54
Şekil 2.34: 0,7 m <sup>2</sup> /g BET yüzey alanına ve 2,2–2,8 mikron ortalama parçacık boyutuna sahip nikel tozu. ....	55
Şekil 2.35: Küresel (spherical -S), pulsu (flaky -F), birbirlerine bağlantısallı küresel (chain spherical -CS) geometrili nikel tozlar. ....	55
Şekil 2.36: Sırasıyla 10 MHz- 3 GHz ve 8.2- 12.4 GHz'de farklı morfolojide nikel silika jel ve epoksi matrislerde ölçülen kompozitlerin EMG KE'si. ....	56
Şekil 2.37: (a) Nikel kaplı kürecikler (200 µm), (b) Nikel kaplı bir küreciğin kesit alanı (20 µm) (Accumet Materials, Co.) .....	56
Şekil 2.38: Gümüş kaplı cam kürecikler 500x büyütme (Potter Industries Inc. Conduct-O-Fill S 3000 S3M). ....	57
Şekil 2.39: a) Alüminyum kaplı seramik içi boş yapılar 50x b) Kesit alanı 2000x büyütme. ....	57
Şekil 2.40: (a) Geleneksel elektrokaplama kaplanmış fiberler (b) CVD ile kaplanmış fiberler ve (c) Nikel kaplı karbon fiber fitilleri (Conductive Composites, Co.).	59
Şekil 2.41: Karbon ve metal kaplı karbon tül ve keçeler (Technical Fibre Products Ltd.) .....	60
Şekil 2.42: Karbon ve bakır ve nikel kaplı karbon keçeler ve yüzey tülleri 1-8,5 Ghz arasındaki EMG kalkanlama etkinlikleri (OPTIMAT OPTIVEIL ürünleri ). ....	60
Şekil 2.43: Nickel nanoparticles Ni, 99.7% 40-60 Nm SkySpring Nanomaterials, Inc. 9220XH. ....	61
Şekil 2.44: Ticari saf nikel tozu (%99,0 saflık, 2,3 mikrometre). ....	62
Şekil 2.45: Gümüş dağılımı gösteren SEM görüntüleri (a) 400 phr AgNP's/PVA, (b) 50 phr AgNw's/PVA, (c) 400 phr AgNP's/Epoxy,(d) 75 phr AgNw's/Epoxy. ....	63
Şekil 2.46: MXene sentezi şematik gösterim. ....	64
Şekil 2.47: MAX fazı ve MXenelerin yapısı. ....	64
Şekil 2.48: Periyodik tabloda M,A,X metalleri. ....	65
Şekil 2.49: MXenelerin EMG kalkanlama mekanizması. ....	66
Şekil 2.50: MXenelerin EM dalga soğurma ve yansıtmasının şematik gösterimi. ....	67
Şekil 2.51: SEM görüntüleri sırasıyla bir filtre üzerindeki bir Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> T <sub>x</sub> pulu, Saf Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> T <sub>x</sub> , 50 ağırlık % Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> T <sub>x</sub> +SA kompoziti. ....	67
Şekil 2.52: TEM görüntüleri (a)30 ağırlık % Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> T <sub>x</sub> +SA kompoziti ve (b)80 ağırlık % Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> T <sub>x</sub> + SA kompoziti. ....	68
Şekil 2.53: Kalınlığa karşı kalkanlama etkinliği. ....	68
Şekil 2.54: Keçe CNF'lerin SEM görüntüsü. ....	72
Şekil 2.55: (a) ağırlık %5 CNF katkılı PS kompozit, (b) ağırlık %5 MWCNT katkılı PS kompozit kesit alanları SEM görüntüleri. ....	73
Şekil 2.56: 10 Ghz'de ağırlıkça katkı yüzdesine karşılık EMG kalkanlama etkinliği (a) CNF (b) MWCNT PS matrisinde. ....	73
Şekil 2.57: Karbon bazlı dolgu malzemesi çeşidine karşı kalkanlama etkinliği değerleri. ....	74
Şekil 2.58: Fonksiyonelleştirme adımları diazoniumla fonksiyonelleştirilmiş grafen (DG)'nin epoksi nanokompozit yapısına katılması (a) H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,	

NaNO <sub>3</sub> , KMnO <sub>4</sub> ; (b1) hydrazine, (b2) Nitrobenzenediazonium tuzu; (c) DER 354 and Curing Agent. ....	76
Şekil 2.59: Porlu FGS/PS Kompozit Üretim Adımları. ....	77
Şekil 2.60: (ağ.%7 katkı oranı) Grafen/Epoksi Kompozit kesit alanı SEM görüntüleri. ....	78
Şekil 2.61: Frekansa karşın farklı yüzdelerde kalkanlama etkinlikleri. ....	78
Şekil 2.62: a) Grafen b) Ag@grafen c) Ni@grafen. ....	79
Şekil 2.63: Nikel ile dekore edilmiş grafen sentezi adımları. ....	80
Şekil 2.64: Fenolik reçine bazlı $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ile dekore edilmiş indirgenmiş grafen oksit ve karbon fiber kompozit hazırlama adımları. ....	80
Şekil 2.65: (a) İletken köpük, (b) İletken köpüğün elektronik devre kartlarında kullanımı (Conductive Foam 5570 Holland Shielding Systems BV) .....	81
Şekil 2.66: İletken köpük kesit alan görüntüsü (Conductive Foam 5570 Holland Shielding Systems BV). ....	82
Şekil 2.67: Karbon köpük (CFOAM LTD.).....	82
Şekil 2.68: P-SHIELD köpük (P-SHIELD Foam Tapes, Polymer Science Inc.). ....	83
Şekil 2.69: Nikel köpükten Grafen/PDMS nanokompozit eldesi adımları (500 mikron skalasında). ....	83
Şekil 2.70: (a-b) Grafen/PDMS köpüğün esnekliği, (c-d) Grafen/PDMS köpüğün porlu ve üç boyutlu ağ yapısı. ....	84
Şekil 2.71: PI/Grafen köpüklerin sırasıyla aynı anda-yerinde polimerizasyon, cam alttaşa döküm, faz ayırımı, termal imidizasyon ve termal dekompozisyon ile üretimi. ....	85
Şekil 2.72: Metalik bal beteği. ....	86
Şekil 2.73: Hava deliklerine kaplama (plating) uygulanması (Parker Co.). ....	86
Şekil 2.74: Çok katmanlı yapıdaki çoklu yansıtımlar. ....	87
Şekil 2.75: Çok katmanlı 3D G-CNT-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> yapısında kalkanlama mekanizmaları. ....	88
Şekil 2.76: SEM görselleri sırasıyla (a) Genişletilmiş birkaç katmanlı grafen (Expanded few layer graphene), (b) Çok katmanlı 3D G-CNT-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> heteroyapısı, (c) Grafen kağıt üstünde dikey yönelimde duran CNT ve grafene ve CNT'ye dekore edilmiş halde bulunan demir oksitler, (d) 3 boyutlu heteroyapı, (e) Yüksek yoğunluklu G-CNT-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kompozit yapısının üstten görünüşü, (f) İnce, esnek bükülebilir 3D G-CNT-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> heteroyapısı.....	89
Şekil 3.1: Ni tozlar üzerinden alınan SEM görüntüleri sırasıyla 600x, 5.000x, 15000x Büyütme. ....	91
Şekil 3.2: (a) GNi tozlara ait deney sonrasında alınan SEM görüntüsü, (b) büyütülen grafitik yapı Raman spektroskopisi analizi. ....	92
Şekil 3.3: Plazma Destekli Döner Aksamlı Kimyasal Buhar Çöktürme (PDDAKBÇ) cihazı (NMG'ye ait tasarım ve üretim. Patent bekliyor). ....	93
Şekil 3.4: Ni ve GNi tozların reçineye katılma süreci.....	95
Şekil 3.5: Ni-EP ve GNi- EP kompozitlerinin kalıptan ayrılma ve numune kesim süreçleri. ....	96
Şekil 3.6: Vorteks Mikser ile Karıştırma. ....	98
Şekil 3.7: Prob tipi sonikatör ile karıştırma. ....	99
Şekil 3.8: ASTM D4935 1,5 GHz-10GHz Frekans Aralığı Test Fikstürü referans ve yük numuneleri.....	100
Şekil 3.9: Epoksi matrisli kompozit numunelere Dört Nokta Prob ile ölçüm alma denemeleri. ....	102

Şekil 4.1: a) As-Rec Ni tozlarının SEM görüntüsü, (b) GNi tozlarının PDDAKBÇ prosesi sonrası SEM görüntüsü (T = 400 °C, P = 200 W, VCH <sub>4</sub> = 20 cm <sup>3</sup> /dk, VH <sub>2</sub> = 15 cm <sup>3</sup> /dk, VAr = 20 cm <sup>3</sup> /dk, t = 15 dk, mNi = 5 gram), (c) GNi tozlarının Raman Spektroskopisi Analizi, (d) GNi tozlarının TEM görüntüsü.....	107
Şekil 4.2: Ni ve GNi için Katkılama Yüzdesi ve Etkin İletkenlik Değeri Değişimi.....	111
Şekil 4.3: Logaritmik Skala'da Ni ve GNi için Katkılama Yüzdesi ve Etkin İletkenlik Değeri Değişimi ve Eğri Denklemi Oturtma.....	111
Şekil 4.4: (a-d) ağ. %30, 40, 50, 60) Elde karıştırma ile üretilen epoksi matrisli kompozit numunelerin OM görüntüleri, (e-h) SEM görüntüleri 500x büyütme, (i-l) SEM görüntüleri 2000x büyütme.....	113
Şekil 4.5: Elde Karıştırma yöntemi sırasıyla ağ. %30, 40, 50,60 Ni ve GNi katkılı epoksi kompozitlerin EMG KE (dB) değerleri.....	115
Şekil 4.6: Elde karıştırma yönteminde tüm katkılama oranları için (%30, 40, 50,60) Ni ve GNi katkılı epoksi kompozitlerin sırasıyla 1.5, 4, 8.5 ve 10 GHz frekanslarında EMG KE (dB) değerleri karşılaştırılması.....	117
Şekil 4.7: Epoksi matrise ağ. %40 Ni ve GNi katkılama EMG KE değeri (Vorteks ile karıştırma).....	118
Şekil 4.8: Ni-EP ve GNi-EP kompozitlerde frekansa karşın kalkanlama etkinliğinin mekanizmalara göre yüzdesel dağılımı (ağ. %40 katkılama oranı ve vorteks ile karıştırma yöntemi için icra edilmiştir).....	120
Şekil 4.9: Epoksi matrise ağ. %40 Ni ve GNi katkılama EMG KE değeri (Prob sonikatör ile karıştırma).....	121
Şekil 4.10: Ağ. %40 katkılama oranı için her üç karıştırma yönteminin EMG KE değerlerinin karşılaştırılması.....	122
Şekil 5.1: PEEK granüllerine GNi katkılama prosesleri.....	130

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2. 1: EM dalga tiplerinin frekansa karşın dalga boyları.....	18
Çizelge 2. 2: EM bantlarının farklı frekans bölgelerinde uygulamaları (VLF-Very low frequency, LF-Low frequency, MF-Medium frequency, HF-High frequency, VHF-Very high frequency, UHF-Ultra high frequency)..	20
Çizelge 2.3: Belirli başlı metallere ve iletkenlik değerleri .....	50
Çizelge 2.4: PES matrisli kompozitlerin 1-2 GHz aralığında farklı dolgu malzemeleri için kalkanlama etkinliği .....	58
Çizelge 3.1: Lazer kesim parametreleri .....	97
Çizelge 4.1: Ni ve GNi tozlarının elektriksel iletkenlik değerleri .....	108
Çizelge 4.2: Ni (yoğunluk: 8900 kg/m <sup>3</sup> ) için epoksi matrise (yoğunluk:1150 kg/m <sup>3</sup> ) hacimce % katkılamalar.....	109
Çizelge 4.3: GNi (yoğunluk 9790 kg/m <sup>3</sup> ) için epoksi matrise (yoğunluk 1150 kg/m <sup>3</sup> ) hacimce % katkılamalar.....	109
Çizelge 4.4: Ni-EP kompozitlerin etkin iletkenlik değerleri (nikelin elektriksel iletkenliği: 5,15x10 <sup>6</sup> S/m ve epoksinin elektriksel iletkenliği 1x10 <sup>-14</sup> S/m) .....	109
Çizelge 4.5: GNi-EP kompozitlerin etkin iletkenlik değerleri (nikelin elektriksel iletkenliği: 19,8 x10 <sup>6</sup> S/m ve epoksinin elektriksel iletkenliği 1x10 <sup>-14</sup> S/m)...	110



## KISALTMALAR

<b>ağ.%</b>	: Ağırlıkça Yüzde
<b>ANSI</b>	: American National Standards Institute
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing Materials
<b>BTİK</b>	: Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu
<b>CB</b>	: Karbon Karası (Carbon Black)
<b>CNT</b>	: Karbon Nanotüp (Carbon Nanotube)
<b>dB</b>	: Desibel
<b>EM</b>	: Elektromanyetik
<b>EMD</b>	: Elektromanyetik Dalga
<b>EMG</b>	: Elektromanyetik Girişim (EMI - Electromagnetic Interference)
<b>EMG KE</b>	: Elektromanyetik Girişimi Kalkanlama Etkinliği (EMI Shielding Effectiveness)
<b>EMU</b>	: Elektromanyetik Uyumluluk (EMC – Electromagnetic Compatibility)
<b>FCC</b>	: Federal Communication Commission
<b>FDA</b>	: ABD Gıda ve İlaç Dairesi (Food and Drug Administration)
<b>GNi</b>	: Grafen / Grafitik yapı kapsüllü nikel parçacık
<b>GNi-EP</b>	: Grafen / Grafitik yapı kapsüllü Nikel katkılı Epoksi matrisli kompozit
<b>GO</b>	: Grafen Oksit
<b>hac.%</b>	: Hacimce Yüzde
<b>ICNIRP</b>	: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
<b>IEEE</b>	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>KBÇ</b>	: Kimyasal Buhardan Çöktürme (CVD – Chemical Vapor Deposition)
<b>KE</b>	: Kalkanlama Etkinliği
<b>MMS</b>	: Milli Monitör Sistemi
<b>MWCNT</b>	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (Multi Walled Carbon Nanotube)
<b>Ni</b>	: Nikel parçacık
<b>Ni-EP</b>	: Nikel katkılı Epoksi matrisli kompozit
<b>OM</b>	: Optik Mikroskop
<b>PDDAKBÇ</b>	: Plazma Destekli Döner Aksamı Kimyasal Buhardan Çöktürme (RPECVD – Rotating Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)
<b>rGO</b>	: Redüklenmiş Grafen Oksit
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
<b>SWCNT</b>	: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp (Single Walled Carbon Nanotube)
<b>TDS</b>	: Teknik Veri Föyü (Technical Data Sheet)
<b>TEM</b>	: Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscopy)
<b>WHO</b>	: World Health Organization



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$c$	EM Dalganın hızı
$E$	Elektrik Alan
$H$	Manyetik alan
$\mu$	Manyetik Geçirgenlik
$\epsilon$	Dielektrik sabiti (Elektrik geçirgenlik)
$t$	Kalınlık
$T$	Sıcaklık
$\lambda$	Dalga boyu
$R_s$	Yüzey direnci (Sheet resistance, surface resistivity)
$\rho$	Özdirenç (Resistivity)
$\sigma$	İletkenlik (Conductivity)
$B$	Manyetik akı yoğunluğu
$D$	Elektrik akı yoğunluğu



## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerle birlikte elektronik sistemler, cihazlar ve ekipmanlar günlük hayatımızın hemen hemen her alanında yerini almıştır. Elektronik-haberleşme, telekomünikasyon ve ulaşım hizmetleri başta olmak üzere, cep telefonları, baz istasyonları, radyo ve televizyon yayınları, uydu iletişim sistemleri, radarlar, askeri hava savunma füze sistemleri, insansız hava araçları, uçaklar, trenler ve diğer taşıtlar, iş araç-gereçleri, evlerde bulunan tüketici elektronikleri, bilgisayarlar, tıbbi cihazlar gibi elektronik içeren akla gelebilecek tüm kullanımlardaki cihazlar ve sistemler çalışırken etraflarına Elektromanyetik Dalga (EMD) yaymaktadırlar. İkinci Dünya Savaşı süreci ve sonrasında hızla gelişen teknoloji ile birlikte elektronik cihazların kullanımının artışı [1], radyo-televizyon dalga yayınlarının yaygınlaşması, transistörler, mikroişlemciler gibi bileşenlerin yaydığı EM Dalgaların frekans spektrumunda yer edinmeye başlaması ile cihazların çalışmalarında beklenmedik problemler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu problemler, en temel anlamda cihazların oluşturdukları elektromanyetik alanların birbirlerini etkilemesinden yani Elektromanyetik Girişim (EMG)'den kaynaklı olup cihazların çalışmalarında istenmeyen karışımlar, arızalanmalar ve hatta bozulmalar olarak sıralanabilir [2,3]. Günlük hayatımızdan birkaç örnek vermek gerekirse; cep telefonu çalmadan önce bilgisayar hoparlöründe gürültü oluşması, radyo dinlerken sinyale karışan telsiz seslerinin de duyulması, ev elektrikli süpürgesi, saç kurutma makinesi gibi cihazları kullanırken özellikle eski tip televizyonlarda görüntüde bozulmalar olması, hava araçlarında özellikle iniş ve kalkış esnasında uçuş elektroniği ile EMG'ye sebep olabilecek her türlü cep telefonu gibi cihazların kullanımının kısıtlanması, baskı devre kartlarındaki EMG'den kaynaklı karışımlar ve sızıntılar, yıldırım düştüğünde telefonların ve ev elektroniği gibi sistemlerin de çalışamaz hale gelmesi gibi birçok örnek bulunmaktadır [4].

EMG problemlerinin en çok karşılaşıldığı alanlardan bir tanesi de tıbbi cihazlardır. ABD Gıda ve İlaç İdaresi (FDA)'e göre; 1979-2005 yılları arasında EMG

sorunlarından kaynaklanan tıbbi cihaz arızaları sonucunda suni solunum cihazlarında, kalp atış hızı ayar aletlerinde, kalp monitörlerinde problemler meydana gelmiştir. Kullanıcı hastaların sağlığını doğrudan etkileyen bu vakalarda can kayıpları ve yaralanmalar yaşanmıştır [Url-1].

Havacılık Uzak ve Savunma Sanayii alanında ise EMG'nin yol açtığı ve açabileceği problemler çok daha yıkıcı ve hayati olmaktadır. Tarihten bu konuda birkaç örnek vermek gerekirse:

1967'de Vietnam'da ABD Deniz Kuvvetleri'nin U.S.S. Forrestal uçak gemisinden kalkan F-4 Phantom savaş uçağından EMG'den kaynaklı karıştırma nedeniyle ateşlenen bir roket, güvertede bulunan A-4 Skyhawk uçağına isabet etmiştir. Uçak gemisinde meydana gelen olayda 134 personel hayatını kaybetmiştir.

1982'de Falkland Savaşı esnasında, İngiliz Kraliyet Donanması'nın H.M.S. Sheffield savaş gemisi, en gelişmiş elektronik harp ve füze karşı koyma sistemleri bulunduğu halde, bir Exocet füzesi tarafından isabet almıştır. Gemiye iniş kalkış yapan Harrier jetleri ile yapılan telsiz konuşmalarından ve gemideki elektronik harp karşı koyma sistemleri EMG kaynaklı karışıma maruz kaldığından, geminin elektronik harp karşı koyma sistemleri bir süre için devre dışı kalmış ve bu boşlukta bir Arjantin uçağından atılan Fransız yapımı Exocet füzesi tarafından savaş gemisi vurulmuştur.

1987'de Almanya'da bir radyo istasyonunun yakınından geçen UH-60 Sikorsky helikopterinde, pilotlar beklenmedik bir anda stabilatörde ikaz ışıkları ve sesleri aynı anda duyar. Stabilatör uçuş kumandaları ve uçuş parametrelerine göre pozisyonunu otomatik olarak ayarlamak için sayısal sinyaller kullanmaktadır. Bu sayısal sinyaller EMG'ye karşı oldukça duyarlıdır. Olay sonrası yapılan değerlendirmede helikopterin stabilatörünün EMG'den etkilendiği tespit edilmiştir. ABD ordusu, dünyanın her yerinde EMG'ye neden olabilecek birkaç 100 vericiyi tespit etmesine ve bütün UH-60 Sikorsky pilotlarını bu vericilerden uzak durmaları yönünde defalarca uyarmasına rağmen, 1981-1987 yılları arasında beş adet helikopter, kaza kırım geçirerek mürettebatın ölmesine ve yaralanmasına neden olmuştur. Oluşan kazaların tamamında helikopterlerin radyo vericilerine çok yakın uçtukları bilinmektedir.

AH-64 Apache bir taarruz helikopteri olup seyrüsefer ve uçuş parametrelerini düzenleyen birçok elektronik sistemi mevcuttur. Meydana gelen bir olayda EMG, motor devirlerinin aşırı hızlanmasına neden olmuştur. Helikopter üzerinde yapılan ayrıntılı incelemeler, evlerde kullanılan mikro dalga fırınları, televizyon yayını, hava alanlarındaki radarlar ve füze radarlarından yayılan düşük frekanslı dalga sinyallerine karşı helikopterin çok duyarlı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Helikopter ile ilgili yaşanan EMG sorunlarının artması üzerine sorun giderilinceye kadar helikopterin uçak gemilerinde dahi kullanımını yasaklanmıştır. İstenmeyen sinyallerin EMG'ye neden olarak devreleri etkilediğinin belirlenmesi sonrasında gerekli kalkanlama işlemleri yapılmıştır.

Bir başka vaka; Mayıs 1984'de Severmorsk'da bir Sovyet mühimmat deposu patlamıştır. Sovyetlere göre kazanın nedeni, depoyu EMG'den dolayı ateşleyen radar sinyaliydi.

Başka bir televizyon yayınından kaynaklı EMG vakası 1984'te Almanya'nın Münih yakınlarında meydana gelmiştir. Bir Batı Alman Tornado avcı uçağı, güçlü bir televizyon kanalı vericisine çok yakın uçtukten sonra düşmüştür. 1986'da ABD'nin Libya hava saldırısı sırasında, birkaç füze belirlenen hedefleri vuramamış ve bir F-111 savaş uçağı düşmüştür. Hava Kuvvetleri yetkilileri, ABD uçak iletimlerinin birbirine müdahale etmesinden kaynaklanan bu olaylardan EMG'yi sebep olarak göstermiştir [5].

23 Aralık 2011 günü Rusya'nın kuzeyinde bulunan Plesetsk Cosmodrome'dan kalkış yapan Soyuz 2-1B haberleşme uydusu yörüngesine ulaşmadan Sibiry'a da Tobolsk yakınlarına düşmüştür. Uzay Programında yaşanan problemleri milyonlarca dolar değerindeki uyduların kalkış sonrası düşmekte veya planlanan yörüngelerine ulaşamamasını Rusya Federasyonu, deniz veya hava kaynaklı harici bir EMG'den köken aldığını değerlendirmiştir.

20 Aralık 2011 tarihinde British Columbian taşıma şirketine ait gemi, Kanada, Duke Point iskelesine çarpmış, kazada yedi yolcu ile dokuz mürettebat yaralanmış, gemi 23 gün seferden ayrı kalmış, iskelenin onarımı ise üç ay sürmüştür. Kanada Ulaştırma

Güvenlik Kurulu tarafından yapılan incelemede, kazaya EMG testleri yapılmadan gemiye takılan bir sistemin neden olduğu saptanmıştır [Url-1].

Tüm örnek verilen vakalarda EMG ve EMG'yi Kalkanlamanın önemi anlaşılmaktadır. Cihaz, ekipman ve sistemlerin sorunsuz bir şekilde operasyonlarını yürütmesine engel olan, çevreye ve insan sağlığına da WHO tarafından açıklanan olumsuz etkileri [6, Url-2] bulunan EMG'nin tespiti, EMG'nin Kalkanlaması, EMU limitlerinin belirlenmesi, Kalkanlama Etkinliği (KE) ve uyumluluk testlerinin yapılması, standardizasyonların ve regülasyonların belirlenmesi gerekliliği zaman içerisinde oluşmuştur. FCC ve diğer kuruluşların öncülüğünde belirlenen limitler, oluşan askeri ve sivil standartlar sonucunda bir elektronik ürünün kullanılabilirliği açısından Elektromagnetik Uyumluluk (EMU) temel bir kriter haline gelmiştir [Url-3, Url 5]. EMU'nun temel şartı cihaz ve sistemlerin kendi elektromanyetik alanında ve diğer elektromanyetik alanlar maruziyetinde diğer başka sistemlerin operasyonlarını etkilemeden kendi işlevlerini yerine getirebilmesidir. Yani hiçbir elektrik-elektronik cihaz Elektromanyetik Girişim (EMG) ile diğer cihazların operasyonunu etkilememeli ve kendisi de EMG'den etkilenmemeli, ortamda bir EMG varlığında da çalışabilmelidir. Bu noktada Elektromanyetik Radyasyondan korunmada cihaz, ekipman ve sistemlerde kullanılan başlıca yöntemlerden birisi "Kalkanlama" diğer adı ile "Ekranlama"dır [7].

Elektromanyetik Girişimi Kalkanlama (EMI Shielding); cihaz, sistem, ekipman arızalarını önlemek, hem gelen hem de giden sinyallerin bütünlüğünü elektromanyetik karıştırmadan ve istenmeyen gürültüden korumak, operasyonları başarılı ile devam ettirmek açısından olmazsa olmazdır.

Radyo dalgası ve Mikrodalga frekanslarında çalışan cihazlar giderek artmakta olduğu için hem radyasyon kaynakları hem de elektronik cihazlar için Kalkanlama Malzemelerine giderek daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, EMG Kalkanlama Etkinliği olan ya da iyileştirilmiş malzemeleri geliştirmeye yönelik araştırmalar, son yirmi yılda hızla artmıştır [8].

EMG Kalkanlama sadece ekipmanların uygun çalışması için değil, bilgi güvenliği ve askeri güvenlik alanında da vazgeçilmezdir. Özellikle kablo ile veya bir ağ ile



bağlanmadan bilgisayarın yaydığı EM dalgaları yakalayıp kullanılabilir ve anlamlı veri haline dönüştürebilme teknolojisi (TEMPEST) geliştiğinden beri Kalkanlama konusu oldukça hassas bir konudur [Url-6]. İHA, Hassas GÜdümlü Füze Sistemleri, Hava Araçları gibi ürünlerin EMG kaynaklı karıştırma, etkisiz hale getirilme ve başka unsurların etkisine girmesinden korunma ihtiyacı vardır. Bu noktada da bahsi geçen ürünlerin yapısalında ve elektroniklerinde kullanılacak Kalkanlama Malzemeleri oldukça kritiktir.

Aynı zamanda insan sağlığı ve biyolojik türlerin sağlığı açısından da EMG'nin kalkanlanması önem taşır. Elektromanyetik dalgaya maruz kalan insanlarda halsizlik, tansiyon, baş ağrısı, bağışıklık sisteminde zayıflama, uzun süreli maruz kalmalarda ise kanser gibi hastalıklara zemin hazırladığı değerlendirilmektedir [Url-2].

Bahsedilen tüm bu sebeplerden EMG Kalkanlama Etkinliği olan malzemelerin geliştirilmesi elzemdir. Günümüzde kalkanlama malzemelerinde daha hafif, esnek ve maliyet etkin çözümlere yönelik eğilimler söz konusudur. Savunma Sanayi uygulamalarında ise Kalkanlama Malzemesine ile sağlanan çözümün etkinliği, özgünlüğü, yerli ve milli olması, tekrarlanabilirliği, yüksek mekanik performanslı, hafif ve operasyonel olması beklenir.

EMG Kalkanlama Etkinliği ROKETSAN'ın tüm roket ve füze sistemlerinde yer alan gereksinimler arasındadır. Günümüze kadar çoğunlukla iletken metal malzemelerle ve yine metal temelli iletken boya-kaplamalarla ilerlenmiş; ancak sistemlerdeki hafifleme ihtiyaçlarını karşılamak, metallerde korozyon problemi, kaplamaların aşınma-çizilme sorunları sebebiyle mevcut çözümlere alternatif olarak kompozit malzeme içeren çözümlere doğru eğilim başlamıştır. Bu bağlamda, EMG KE gereksinimi kompozit malzemeler özelinde yoğun olarak gündemdedir. Elektronik devreleri bünyesinde bulunduran elektronik kart kutuları, ateşleme sistemleri, fırlatma tüpleri ve kanisterler bu gereksinime sahip parçalar arasında yer almaktadır. Parçaların üretim yöntemine ve kompozit malzemenin türüne göre kullanılan katkılar/yardımcı malzemeler değişkenlik gösterebilmektedir.

Bu tez kapsamında da bir örneği çalışılan hafif ve aynı zamanda da EMG Kalkanlama kabiliyetine sahip çok işlevli nanokompozit malzemelerin geliştirilmesinin ve

ROKETSAN sistemlerine uyarlanmasının önem arz ettiği değerlendirilmektedir. Bu tez boyunca literatürdeki EMG Kalkanlama Teknolojisi kullanılan mekanizmalar ve malzemeler özelinde literatürden ve sektörden çalışmalar detaylandırılarak anlatılmıştır. EMG Kalkanlamada kullanılan metotlar Plastiklere İletken Kaplama Uygulanması, Metallerin Kullanılması, Kendinden İletken Olan Polimer Türlerinin Kullanılması, Karbon Bazlı İletken Dolgu Malzemeleri Kullanılması, Köpük, Bal Peteği ve Çok Katmanlı Yapılar Kullanılması olarak altı ana başlık altında incelenmiştir. Özellikle Karbon Bazlı İletken Dolgu Malzemeleri Kullanılması bölümünde CNT, grafen ve türevleri olan karbon bazlı nano katkıların kompozit yapılarda EMG Kalkanlama etkinliklerine; Metallerin Kullanılması bölümünde ise İki Boyutlu Geçiş Metali Nitrür, Karbür ve Karbonitrürleri olan MXene'lerin EMG Kalkanlama etkinliklerine tezin ikinci bölümünde genişçe yer verilmiştir. Mevcuttaki literatürdeki son teknolojiyi içeren çözümler ve sektör çözümlerinin detaylıca sunulmasının ardından bu tez kapsamında çalışılan EMG Kalkanlama malzemesi olarak polimer matrisli kompozitlerde matrise katkı malzemesi olarak önerilen yapı Grafen kapsüllü Nikel (GNi)'den bahsedilmiştir. GNi parçacıkların PDDAKBÇ prosesleri ile sentezi, karakterizasyon çalışmaları ve epoksi matrislere katkılanması, test kuponu imalatları, EMG Kalkanlama Etkinliği test süreçleri bu tez kapsamında çalışılmıştır.

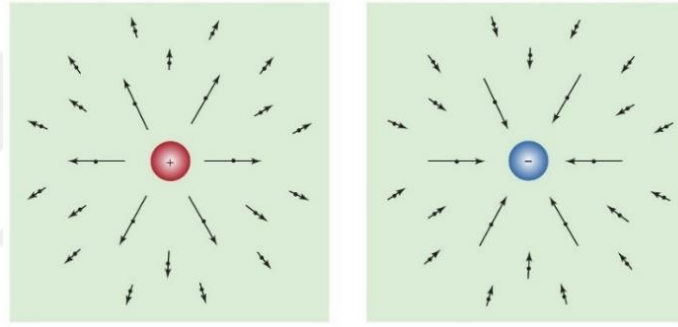
Grafen mevcutta mekanik, termal ve kimyasal özellikleri sayesinde birçok uygulamada kullanılmakta olduğu gibi EMG Kalkanlama uygulamalarında da ön plana çıkmaktadır [9,10]. Nikel tozlar, nikel fiberler, bakır meşler ve folyolar EMG Kalkanlama uygulamalarında mevcutta sektörde kullanılan yapılardır. Bu tez çalışmasının amacı nikel gibi bilinen ve çalışılan bir malzemenin tozlarını grafen ile kapsülleyerek özgün Grafen kapsüllü Nikel (GNi) parçacıklarını sentezlemek ve karakterize etmek, bu parçacıkları epoksi matrisli nanokompozitlerde katkı malzemesi olarak kullanmak ve üretilen nanokompozit yapıların EMG Kalkanlama Etkinliğini araştırmaktır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

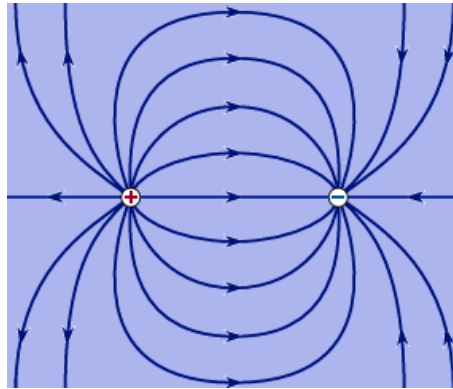
### 2.1. Elektromanyetik Girişim ve Temel Kavramlar

#### 2.1.1. Elektrik alan

Elektrik alan, uzayda bir noktada bir birimlik pozitif elektrik yüküne etki eden elektriksel kuvvet olarak tanımlanır. Vektörel bir büyüklüktür. E simgesi ile gösterilir. Elektrik alanının birimi Volt/metre (V/m)'dir. Eksi yük için elektrik alan vektörleri eksi yüke doğru yönelir (Şekil 2.1). Aynı zamanda bir elektrik yükün başka bir elektrik yük üzerinde yarattığı çekme veya itme kuvveti etkisine elektrik alanı olup, bu alan çizgileri artı yükten eksi yüke doğru (Şekil 2.2) ilerler [11].



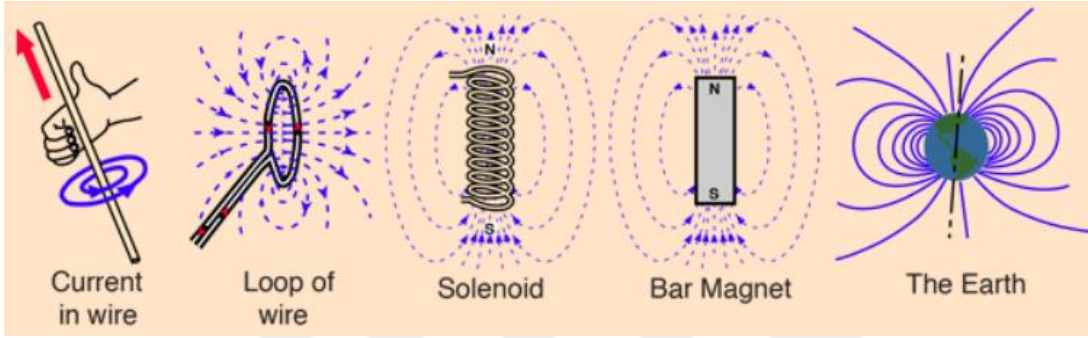
Şekil 2.1 : Elektrik alanları, pozitif elektrik yükünün alanı ve negatif elektrik yükünün alanı [Url-7].



Şekil 2.2 : Eşit ve zıt yüklerden yayılan alan çizgileri [Url-7].

### 2.1.2. Manyetik alan

Manyetik alan, manyetik bir malzemenin etrafında oluşan veya elektrik yüklerinin hareketi ile yani bir elektrik akımı varlığında oluşan vektörel bir niceliktir. Birimi Tesla'dır. Manyetik alan vektörü "B" simgesiyle gösterilir ve B manyetik alan vektörünün yönü, yüklerin hareket yönüne diktir. Üzerinden akım geçirebilen ve manyetik kutupları sayesinde mıknatıs özelliği gösteren her cisim etrafında bir manyetik alan oluşturur (Şekil 2.3) [11].



Şekil 2.3: Manyetik alan kaynakları [Url-8]

### 2.1.3. Elektromanyetizma

Elektromanyetizma temel olarak elektriklenme ile mıknatıslanmanın karşılıklı olarak etkileri sonucu ortaya çıkan tüm olayların genel adıdır. Fizikte elektromanyetizma, elektrikle yüklü parçacıklar arasındaki etkileşime neden olan fiziksel kuvvettir. Doğadaki dört temel kuvvetten biri, elektromanyetizmadır. Diğer üçü; güçlü etkileşim, zayıf etkileşim ve kütle çekim kuvvetidir. Elektromanyetizma, yerçekimi dışında, günlük yaşamda karşılaşılan hemen hemen tüm fenomenlerden sorumlu etkileşimdir. Elektromanyetizma, elektrik alanında da manyetik alanda da ortaya çıkar. Her iki alan da elektromanyetizmanın farklı sonuçlarıdır; ancak, öz itibarıyla birbirleriyle ilintilidirler. Bundan dolayı, değişen bir elektrik alan, bir manyetik alan üretir; değişen bir manyetik alan da elektrik alanı oluşturur [Url-9]

Elektrik akımı ile manyetik alan arasında ilişki ilk olarak Oersted tarafından 1820 yılında rastlantısal olarak bir telden akım geçtiğinde yakındaki bir pusulanın iğnesinin yönü de değişmesiyle gözlemlenmiştir [Url-10].

1826'da Ampere, manyetik kuvvetin manyetik yükün dipolleri yerine sürekli akan akım döngülerinden kaynaklandığı bir manyetizma modeli önerdi [12, Url-11].

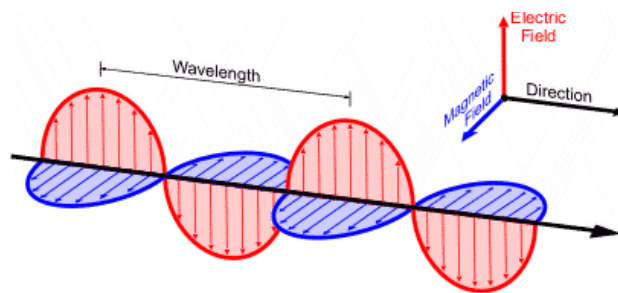
1831'de İngiliz Michael Faraday, değişen bir manyetik alanın çevreleyen bir elektrik alanı oluşturduğunu gösterdi. Günümüzde Faraday'ın indüksiyon yasası ile karakterize edilen elektromanyetik indüksiyonu keşfetti. Çalışmaları Maxwell'in daha sonra klasik elektromanyetizma teorisini geliştirmesine de temel hazırlamıştır [13-15].

1861 ve 1865 yılları arasında James Clerk Maxwell, ismiyle anılan elektrik ve manyetizma teorilerini yayınladı. Bu denklemler sadece elektrik ve manyetizma arasındaki karşılıklı ilişkiye işaret etmekle kalmadı, aynı zamanda ışığın kendisinin bir elektromanyetik dalga olduğunu gösterdi [16,17].

Elektromanyetizma, 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın sonlarında daha da gündeme oturdu. 1905'te Özel Görelilik Yasasını öneren Albert Einstein, elektrik ve manyetik alanların farklı referans çerçevelerinden bakıldığında aynı fenomenin parçaları olduğunu gösterdi. Kuantum mekaniğinin ortaya çıkışı aynı zamanda kuantum elektrodinamiğinin gelişmesine de yol açtı [18-20]

#### 2.1.4. Elektromanyetik alan ve elektromanyetik (EM) dalga

Faraday'ın ve Maxwell'in çalışmaları zamana bağlı olarak değişen manyetik alanın elektrik alan oluşturacağını, zamana bağlı olarak değişen elektrik alanın da benzer şekilde manyetik alan oluşturacağını ortaya koymuştur. Bu bağlamda elektromanyetik alan aslında manyetik alan ile elektrik alanın birleşmiş halidir. Birbirine dikey olarak, aynı fazda, sinüzoidal olarak ilerleyen elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri EM dalgayı oluşturur (Şekil 2.4). EM alan da aynı bu bileşenlerle yönedir [11].



Şekil 2.4: Elektromanyetik dalga [Url-12].

EM dalga boşlukta ışık hızı (yaklaşık  $3 \times 10^8$  m/s) ile yayılır ve ortam değiştirdiklerinde hızları değişir. Işık en temel anlamda spesifik bir frekansta olan elektromanyetik radyasyon olduğundan tüm elektromanyetik dalgalar da ışık gibi yansıma, kırılma, kırınım ve girişim yapabilirler. EM dalgalar polarize edilebilir ve absorplanabilirler. EM dalgaları absorplayan malzemeler ısınırlar [21-22].

EM dalgalar bir frekansa sahiptir. Frekans, EM dalganın saniye başına gerçekleştirdiği salınım adetidir. Frekansın birimi  $s^{-1}$  yani Hertz (Hz)'dir.

Dalga boyu ise frekansa bağlı olarak EM dalganın bir salınım yaptıkça aldığı yoldur ve metre (m) birimlidir. EM dalganın hızı (c), EM dalganın frekansı (f) dalga boyu ( $\lambda$ ) ile bağıntılıdır(2.1) [23].

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

EM dalganın boşluktaki hızı, vakum ortamının yani uzayın elektriksel geçirgenliği (dielektrik sabiti)  $\epsilon_0$  ve manyetik geçirgenliği  $\mu_0$  değerlerine bağlıdır (2.2) [24].

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad (2.2)$$

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m (Farad per meter) Farad = Amper . saniye . volt<sup>-1</sup>

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m (Henry per meter) Henry= Volt . saniye . amper<sup>-1</sup> [24].

$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Elektromanyetik dalga teorisinin temelini oluşturan dört Maxwell Denklemi mevcuttur. Bu dört denklem Faraday, Gauss (elektriksel ve manyetik yükler için) ve Amper denklemleri ile elde edilmiştir.

Birinci Maxwell denklemi Faraday Yasası yani elektrik dolanımıyla ilgili olup, birim zamanda manyetik alandaki değişimlerin elektrik alan oluşturduğunu söyler. Kapalı durağan bir devredeki elektriksel kuvvetin, devreden geçen manyetik akının zamana göre değişiminin negatifine eşit olduğunu ifade eder [22-24].

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

B: Manyetik akı yoğunluğu [T]

E: Elektrik alan şiddeti (Volt/m)

İkinci Maxwell denklemi Ampere Yasası'nı yani kapalı bir yüzeye ait manyetik alan ve toplam akım yoğunluğu arasındaki ilişkiyi ifade eder. Yasaya göre manyetik alanı iki unsur oluşturur: Bir iletkenin kesitinden geçen akım ve elektrik alanındaki değişim (2.4) [22-24].

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.4)$$

H: Manyetik alan şiddeti [Amper/m]

J: İletkenin birim kesitinden yüzey akım yoğunluğu [Amper/m<sup>2</sup>]

D: Elektrik akı yoğunluğu [Coulomb/m<sup>2</sup>]

Üçüncü Maxwell denklemi elektrik alan için Gauss Yasası'dır. Kapalı yüzeyden geçen elektrik akı ile yüzey içerisindeki elektrik yükü arasındaki ilişkiyi vermektedir. İçinde elektrik yükü olan bir hacmin duvarlarından geçen elektrik akısının toplamının elektriksel yüke eşit olduğunu gösterir. Denklemde  $\rho_v$  kapalı bir alandaki yük yoğunluğunu, D ise bu kapalı alanı çevreleyen hacimdeki elektrik akı yoğunluğunu (Coulomb/m<sup>2</sup>) göstermektedir (2.5) [22-24].

$$\nabla D = \rho_v \quad (2.5)$$

$\rho_v$ : Hacimsel Yük Yoğunluğu [Coulomb/m<sup>3</sup>]

Dördüncü Maxwell denklemi manyetik alan için Gauss Yasası'dır. Kapalı bir yüzeyden geçen toplam manyetik akı değişiminin (B) her zaman sıfıra eşit olduğunu ifade eder. Manyetik kutuplar daima çift halde bulunur (manyetik dipole), izole edilmiş manyetik kutup bulunmadığından herhangi bir hacim içerisinde zıt manyetik kutup etkileri birbirini ortadan kaldırır; böylece toplam hacimdeki manyetik alan değişimi her zaman sıfır olur (2.6) [22-24].

$$\nabla B = 0 \quad (2.6)$$

Maxwell denklemleri ve diğer eşitlikler arasındaki geçişler için aşağıdaki denklemler kullanılır.

Elektrik alan (E), elektrik akı yoğunluğuna (D) ve malzemenin dielektrik sabitine (elektrik geçirgenlik) ( $\epsilon$ ) bağlıdır. Akı yoğunluğu vektörü elektrik alan vektörü ile aynı yönde ve şiddeti elektrik alanı oluşturan yük ile orantılıdır (2.7) [25].

$$D = \epsilon \cdot E \quad (2.7)$$

D: Elektrik akı yoğunluğu [ $C/m^2$ ]

E: Elektrik alan şiddeti [ $V/m$ ]

$\epsilon$ : Ortamın/malzemenin elektriksel geçirgenliği [ $F/m$ ]

Malzemenin üzerinde yük depolayabilme özelliği dielektrik sabiti (elektriksel geçirgenliği) denilen bir katsayı ile ifade edilir. Birimi Farad/metre'dir ( $F/m$ ) ve “ $\epsilon$ ” ile gösterilir. Dielektrik sabiti, serbest uzayın dielektrik sabiti ( $\epsilon_0$ ) ve malzemenin bağlı dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ) ile doğru orantılıdır (2.8). Birimi  $F/m$ 'dir.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (2.8)$$

$\epsilon_0$ : Serbest uzayın elektriksel geçirgenlik sabiti ( $8,85419 \cdot 10^{-12} F/m$ )

$\epsilon_r$ : Ortamın bağlı elektriksel geçirgenlik katsayısı

Manyetik akı yoğunluğu “B” ile gösterilir. Birimi Tesla (T) veya Weber/metre-kare ( $Wb/m^2$ )'dir. Manyetik akı yoğunluğu, ortamın manyetik geçirgenliği ( $\mu$ ) ve manyetik alan şiddetinin (H) ile ilişkilidir (2.9) [26].

$$B = \mu \cdot H \quad (2.9)$$

B: Manyetik akı yoğunluğu [T]

H: Manyetik alan şiddeti [ $A/m$ ]

$\mu$ : Ortamın manyetik geçirgenliği (permeability) [ $H/m$ ]



Manyetik geçirgenliğin ( $\mu$ ) birimi Henry/metre (H/m) olup, serbest uzayın manyetik geçirgenlik sabiti ( $\mu_0$ ) ve bağıl manyetik geçirgenlik katsayısına ( $\mu_r$ ) bağlıdır (2.10) [26].

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.10)$$

$\mu_0$ : Serbest uzayın manyetik geçirgenlik sabiti ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m)

$\mu_r$ : Ortamın bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı

Akım yoğunluğunun (J) birimi Amper/metrekare ( $A/m^2$ )'dir. Akım yoğunluğu elektrik alan Şiddeti (E) ile öz iletkenlik değerinin ( $\sigma$ ) arpımına eşittir (2.11).

$$J = \sigma \cdot E \quad (2.11)$$

J: Akım yoğunluğu [ $A/m^2$ ]

E: Elektrik alan Şiddeti [ $V/m$ ]

$\sigma$ : Öz iletkenlik [ $S/m$ ]

Öz iletkenlik değeri ( $\sigma$ ), iletkenin elektron yoğunluğuna ve mobiliteye bağlıdır (2.12) [22-24].

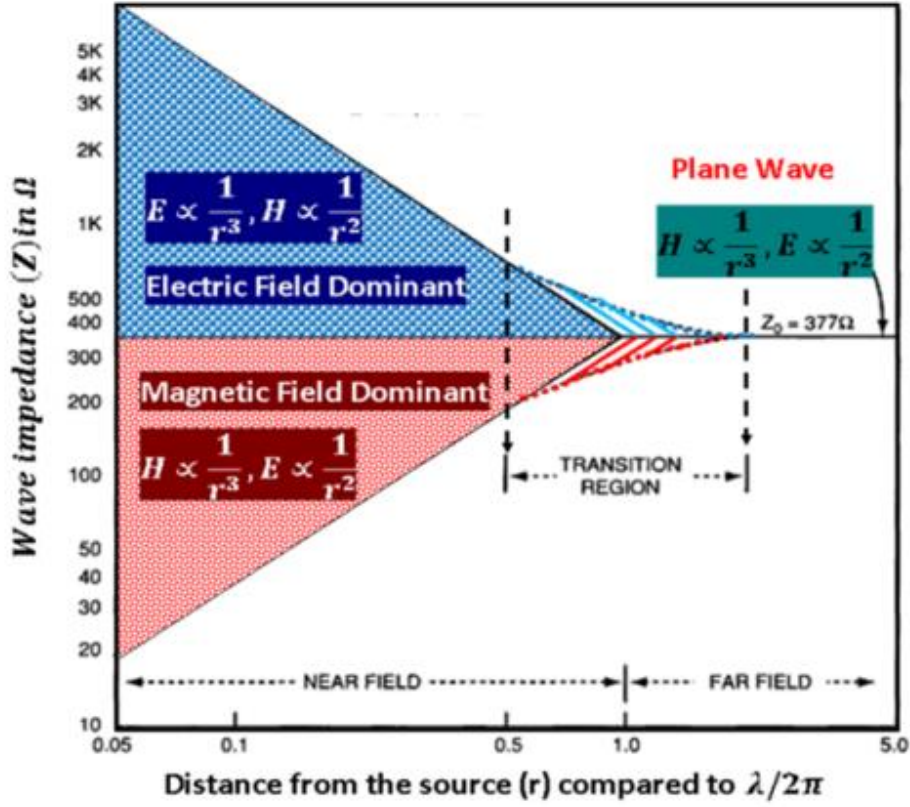
$$\sigma = \rho_e \cdot \mu_e \quad (2.12)$$

$\rho_e$  : serbest elektron yük yoğunluğu,

$\mu_e$  : elektronun mobilitesidir.

Elektrik alan Şiddetinin (E), manyetik alan Şiddetine (H) oranına dalga empedansı denir.

Bir elektromanyetik dalğanın empedansı EMG ve EMU incelemeleri için önemli bir parametredir. Belirli mesafeden uzak ise elektrik alan ve manyetik alan birlikte oluşturdukları elektromanyetik alan olarak incelenir. Yakın alan ve uzak alan birbirinden elektromanyetik dalğanın kaynağına olan  $\lambda/2\pi$  sınır mesafesi ile birbirinden ayrılır. Elektromanyetik dalğanın kaynaktan uzaklığına göre elektrik ve manyetik alanların değişimi aşağıdaki Şekilde gösterilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Kaynaktan uzaklığa göre dalga empedansı değişimi [27].

Kaynak ile ölçüm noktası arasındaki  $r$  mesafesine göre, bir elektromanyetik radyasyon içeren bölge, elektromanyetik dalganın dalga boyuna göre üç kısma ayrılabilir (Şekil 2.5).

$r < \lambda/2\pi$  mesafesi içindeki bölge yakın alandır,  $r > \lambda/2\pi$  mesafesi ise uzak alandır. İki bölge arasındaki mesafe  $r \sim \lambda/2r$  olarak geçiş bölgesidir [27].

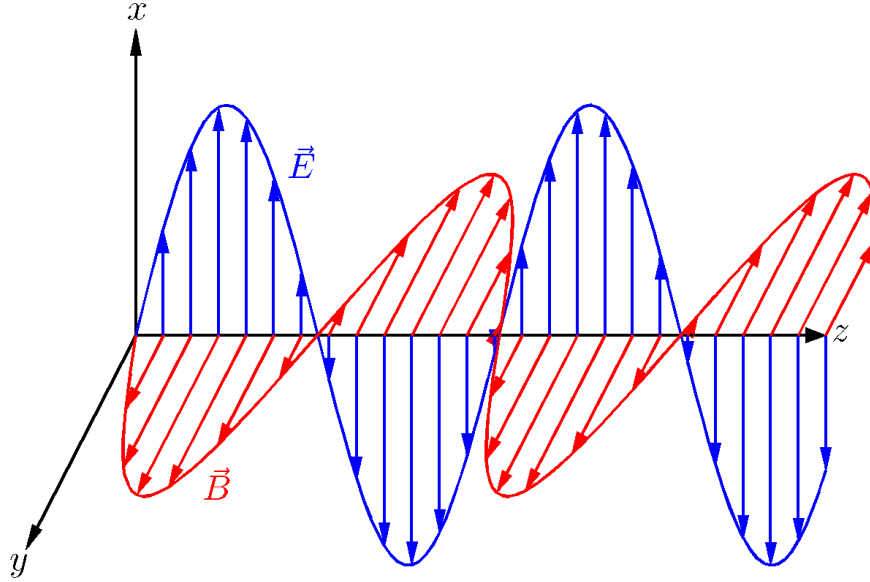
Dalga empedansı denklem (2.13) ile bulunur. Birimi  $\Omega$  ohm'dur.

$$Z_0 = \frac{E}{H} \quad (2.13)$$

$$Z_0 = \eta_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}}{8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}}} = \sqrt{\frac{400000\pi \Omega \cdot \text{sec}}{8.854 \Omega^{-1} \cdot \text{sec}}} = 120\pi \Omega = 377 \Omega$$

olduğu durumda ifade ortamın karakteristik empedansı adını alır ve uzak alan bölgesini tarif eder. Uzak alandaki bu yayılım düzlem dalga yayılımı halini alır. EM

dalgalar çok farklı kaynaklardan yayılabilir. Ancak EM dalgalar kaynaktan uzaklaştıkça küresel ve düzlemsel dalgalara dönüşürler. Düzlem EM dalga bileşenleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Düzlem EM dalga bileşenleri ve ilerleyişi [Url-13].

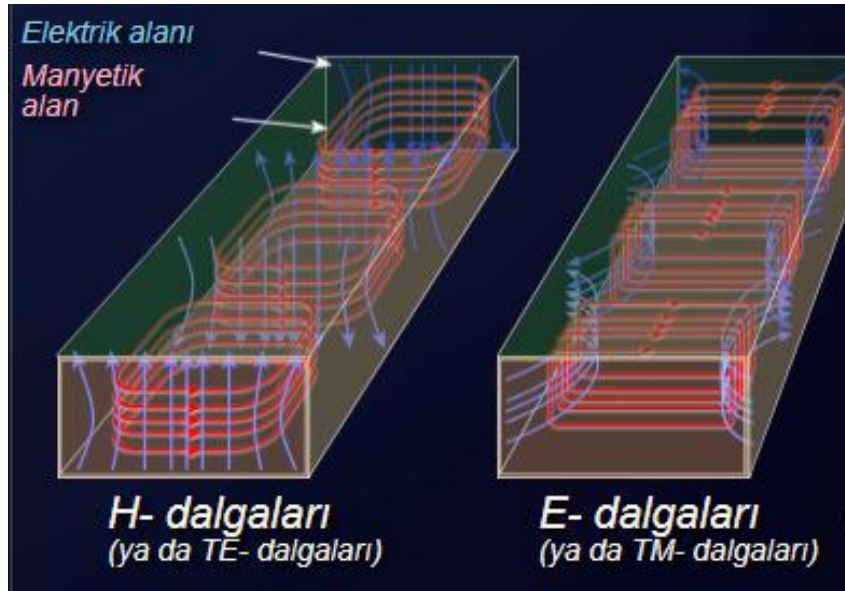
Düzlem elektromanyetik dalgalarda elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirine diktir. Aynı zamanda bu bileşenler dalganın ilerleme yönüne de diktir. Bu yüzden EM dalgalar enine dalgalardır. Şekil 2.6'daki düzlem EM dalgaya göre elektrik alan x-z düzleminde kalmaktadır. Buna göre Elektrik alan, x yönünde polarizedir. Manyetik alan y-z düzleminde kalmaktadır. Buna göre Manyetik alan, y yönünde polarizedir. Burada EM dalga z yönünde ilerlemektedir [Url-13,28].

Elektromanyetik dalgalar üç ana modda ilerlerler. TE modu: İlerleme yönünde elektrik alan içermeyenler, TM Modu: İlerleme yönünde manyetik alan içermeyenler, TEM Modu: İlerleme yönünde hem elektrik alan hem manyetik alan içermeyenlerdir. Serbest uzayda TEM (Transverse Electric Magnetic) dalgaları görülür. TE (Transverse Electric) ve TM (Transverse Magnetic) modu dalga yayılımı yalnızca kılavuzlanmış yapılarda görülür. Kılavuzlama işlemi, EM veya ses dalgalarının taşınması ve yönlendirilmesidir. Dalga kılavuzu (Şekil 2.7) genellikle yüksek frekanslı EM dalgaların iletilmesinde ve TE, TM gibi modlara göre

ayrılmasında kullanılır (Şekil 2.8). Dalga kılavuzuna enerji beslendiğinde, geniş a kenarının ortasında bir Elektrik alan oluşur. Elektrik alanın en yoğun olduğu yer dalga kılavuzunun ortasıdır ve b kenarına doğru kuvveti giderek azalır. Kesitte bu azalma bir sinüs biçiminde gerçekleşir. Oluşan elektrik alan bir manyetik alan da yaratır. Manyetik alan, bir metal iletkene dik konumlanamaz. Dalga kılavuzunun yönlendirdiği yönün dışında başka bir yayılma yönü kalmaz [Url-14].



Şekil 2.7: 18- 26,5 GHz frekanslarında çalışan bir dikdörtgen dalga kılavuzu ve kesiti [Url-14].



Şekil 2.8: Bir dalga kılavuzundaki TE ve TM yayılma modları [Url-14].

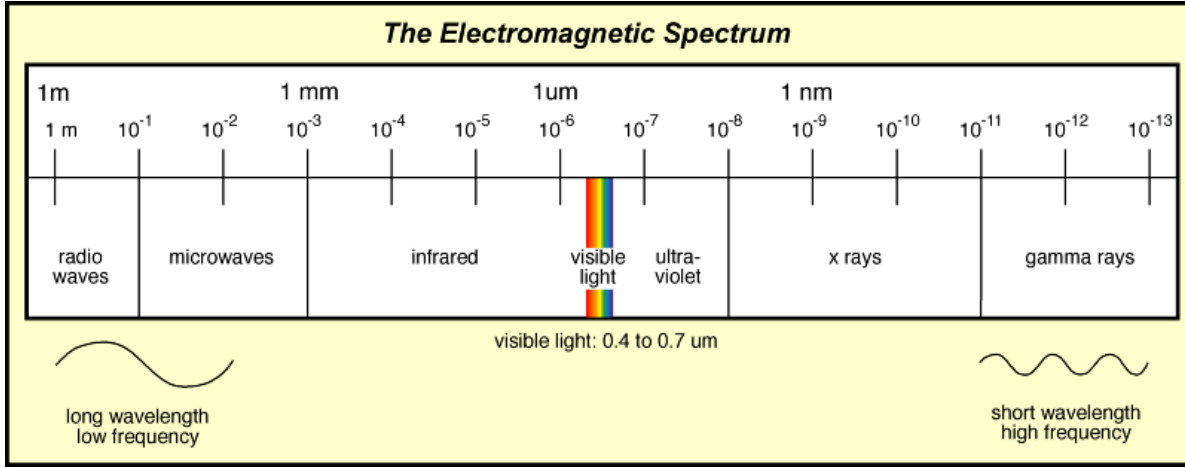
Elektrik alanı frekansla değişir ve dalga kılavuzu boyunca en büyük ve en küçük değerler arasındaki açıklık dalga boyunun yarısıdır. Bir dalga kılavuzuna beslenen yüksek frekanslı enerji, iç hacimde elektrik ve manyetik alanları birbirine dik olan bir Enine Elektromanyetik Dalga (Transverse Electric Magnetic Wave, TEM) yaratır. Elektrik alanı (E-alan) dalga kılavuzunun daha geniş iki duvarı arasında, manyetik alan (H-alan) ise her iki dar duvar arasında meydana gelir. Alanlar görelî mevcut durumlarını sürdürmezler, zaman ekseninden bakıldığında, giriş işaretime uygun olarak genliklerini ve polaritelerini değiştirirler. Bu elektromanyetik dalga, dalga kılavuzu içinde ışık hızına yakın bir hızda yayılır. Elektromanyetik dalgalarda elektrik ve manyetik alanlar birbirlerine daima diktir. Eğer elektrik alan yayılma yönünde ise buna E-dalga ya da TM-dalga (Transverse Magnetic) denir. Eğer manyetik alan yayılma yönünde ise buna H-dalga ya da TE-dalga (Transverse Electric) denir [Url-14].

Poynting vektörü adını Henry Poything'den alır. Elektromanyetik alanın enerji akısını tanımlar. Elektromanyetik dalgalar elektrik ve manyetik alan yardımı ile enerji taşırlar. Alanların çarpımı Poynting Vektörü denilen enerji akısını ifade eder. Poynting vektörü: S'in yönü dalganın yayılma doğrultusu boyuncadır. Şu şekilde ifade edilir (2.14) [29].

$$S = E \times H \quad (2.14)$$

### 2.1.5. Elektromanyetik spektrum

Elektromanyetik dalgalar frekansları veya dalga boylarıyla sınıflandırılırlar. Frekansa karşın üzerinde tüm elektromanyetik dalga türlerini bir arada bulunduran göstergeye elektromanyetik spektrum (Şekil 2.9) denir. Elektromanyetik dalganın dalga boyuyla frekansının çarpımı ışık hızına ( $c = \lambda.f$ ) eşittir. Bu bağıntının da ifade ettiği üzere frekans ile dalga boyu ters orantılı olup, frekans artıkça dalga boyu küçülür (Çizelge 2. 1).



Şekil 2.9: Elektromanyetik spektrum [Url-15].

Çizelge 2. 1: EM dalga tiplerinin frekansa karşın dalga boyları [Url-16].

Type of Radiation	Frequency Range (Hz)	Wavelength Range
gamma-rays	$10^{20} - 10^{24}$	$< 10^{-12}$ m
x-rays	$10^{17} - 10^{20}$	1 nm - 1 pm
ultraviolet	$10^{15} - 10^{17}$	400 nm - 1 nm
visible	$4 - 7.5 \cdot 10^{14}$	750 nm - 400 nm
near-infrared	$1 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{14}$	2.5 μm - 750 nm
infrared	$10^{13} - 10^{14}$	25 μm - 2.5 μm
microwaves	$3 \cdot 10^{11} - 10^{13}$	1 mm - 25 μm
radio waves	$< 3 \cdot 10^{11}$	$> 1$ mm

Spektrumun en solunda yer alan ve Heinrich Hertz tarafından indüksiyon bobininde üretilen dalgaların uzaktaki bir anten tarafından tespit edilmesi sonucu bulunan “radyo dalgaları”, kaynaklara göre değişiklik gösterse de genel olarak 1 metreden daha büyük dalga boyuna 300 MHz’den daha küçük frekansa sahip olan elektromanyetik dalgalar olarak tanımlanır. Radyo ve televizyonların yayınlarında kullanılan radyo dalgaları dalgalar binaları ve yapılarda bulunan çimento, tahta, köpük vb. iletken olmayan malzemelerin içerisinden geçebilmeleri ve gürültüye karşı görece düşük hassasiyetleri sayesinde uzun yıllardır radyo/televizyon yayıncılığında kullanılmaya devam etmektedir.

Mikrodalgalar ise 1 metre ile 1 mm arasında değişen dalga boyuna, 300 MHz ile 300 GHz arasında değişen frekansa sahip olan elektromanyetik dalgalardır. Geniş bir frekans aralığını kapsaması ve frekans aralığına göre çok farklı alanlarda kullanılması nedeniyle mikrodalgalar bantlara ayrılarak kategorize edilir. Bu kapsamda bantlara göre frekans aralıkları şu şekildedir: D bandı 110-170 GHz, F bandı 90-140 GHz, W bandı 75-110 GHz, V bandı 50-75 GHz, U bandı 40-60 GHz, Q bandı 33-50 GHz, Ka bandı 26.5-40 GHz, K bandı 18-26.5 GHz, Ku bandı 12.5-18 GHz, X bandı 8-12.5 GHz, C bandı 4-8 GHz, S bandı 2-4 GHz, L bandı 1-2 GHz, P bandı 0.3-1 GHz [Url-17].

Hava olaylarından ve muhalefetinden etkilenmemeleri, metallere üzerinden yansımaları ve hava ortamında kayıpsız bir şekilde ilerlemeleri sayesinde mikrodalgalar genel olarak televizyonların karasal yayınlarından başlayarak, cep telefonları, mikrodalga fırınlar, kablosuz modemler, GPS sistemleri, kablosuz iletişim aracının çalıştığı L ve S band frekans aralıklarını (1-4 GHz), askeri ve sivil radar sistemlerinin çalıştığı X ve Ka band aralıklarını (8.2-40 GHz), uydu, uzaktan kontrol cihazları F ve D bant aralıklarını kapsayarak günümüz elektromanyetik dalga uygulamalarında önemli bir yer kaplarlar [30].

Kızılötesi dalgalar ( $750 \text{ nm}^{-1}$  mm arası dalga boyuna ve/veya 300 GHz-400THz arası frekansa sahip), elektromanyetik spektrumun bir parçasıdır. Uzaktan kumanda, termal kamera, gece görüş kameralarında, çeşitli ekipmanlarında ve c spektroskopisi ve analiz cihazlarında yaygın şekilde kullanılmaktadır [Url-18].

Ultraviyole (UV) ışık, görünür ışıktan daha kısa dalga boylarına (10-400 nm) sahiptir. Güneş, genel olarak ultraviyole radyasyonun tam spektrumunun kaynağıdır. UV-C ışınları en zararlı olanıdır ve neredeyse tamamen atmosferimiz tarafından emilir. UV-B ışınları güneş yanığına neden olan zararlı ışınlardır. UV-B ışınlarına maruz kalma, canlı organizmalarda DNA ve diğer hüresel hasar riskini artırır. UV-B ışınlarının yaklaşık yüzde 95'i Dünya atmosferinde ozon tarafından emilir [Url-19].

Spektrumun en sağında bulunan (0.02-10 nm) X-ışınları ve (<10 pm) Gama ışınları ise oldukça yüksek enerjili ve biyolojik türlerin sağlığı açısından yüksek risk oluşturan elektromanyetik dalgalar sınıfına girmektedir. X-ışınları güvenlik kontrol noktalarında ve uygulamalarında ve biyomedikal uygulamalarında tıbbi görüntüleme amaçlı

kullanılırken, gama ışınları ise radyoaktif reaktörlerde ve nükleer yapılarda uygulama alanı bulur [Url-20].

Genel olarak EM bantlarının Radyo frekans ve Mikrodalga frekans bölgesindeki uygulamaları Çizelge 2. 2’de gösterilmiştir [31].

Çizelge 2. 2: EM bantlarının farklı frekans bölgelerinde uygulamaları (VLF-Very low frequency, LF-Low frequency, MF-Medium frequency, HF-High frequency, VHF-Very high frequency, UHF-Ultra high frequency) [31]

Type of EM wave	Band frequency (Hz)	Band name	Applications
RF wave	3 KHz–30 KHz	VLF	Beacon
	30 KHz–300 KHz	LF	Marine communication
	300 KHz–3 MHz	MF	AM radio broadcast
	3 MHz–30 MHz	HF	Shortwave broadcast, radiofrequency identifications (RFID)
	30 MHz–300 MHz	VHF	FM radio broadcast, television
MW	300 MHz–1 GHz	UHF	Television, microwave oven, mobile phones
	1 GHz–2 GHz	L band	Mobile phones, wireless LAN, RADARS, GPS.
	2 GHz–4 GHz	S band	Bluetooth, cordless phones, mobile phones, television
	4 GHz–8.2 GHz	C band, J band	Satellite communication, cordless telephone, wifi.
	8.2 GHz–12.4 GHz	X band	Satellite communication, weather monitoring, defence tracking, air traffic control.
	12.4 GHz–18 GHz	K <sub>u</sub> band	Satellite communication
	18 GHz–27 GHz	K band	Satellite communication
	27 GHz–40 GHz	K <sub>a</sub> band	Satellite communication
	40 GHz–75 GHz	V band	Military and research
	75 GHz–110 GHz	W band	Military and research



## 2.1.6. Elektromanyetik girişim (EMG), elektromanyetik uyumluluk (EMU) ve EMG kaynakları

Elektromanyetik Girişim en temel tanımı ile bir elektromanyetik alanın başka bir elektromanyetik alanla etkileşimidir [4]. Elektronik cihazlar hem EM dalgaları yayarlar hem de bu dalgalara birbirleri tarafından maruz kalırlar.

Kalkanlanmamış bir cihazdan yayılan elektromanyetik dalgalar diğer elektronik cihazlarla etkileşime girer. Bu olaya Elektromanyetik Girişim (EMG) (Electromagnetic Interference) denir [7].

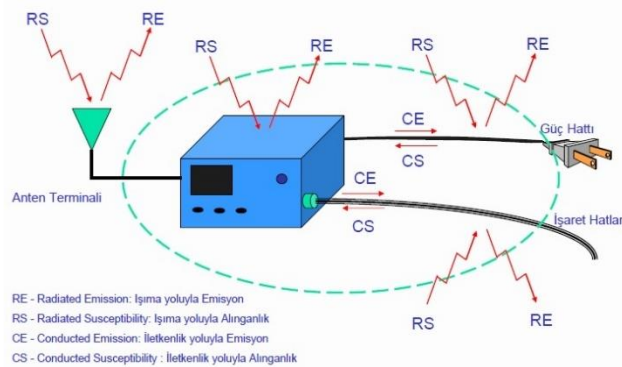
Elektromanyetik etkileşime maruz cihazlar doğru çalışmaktan uzaklaşmakta, canlılar ve biyolojik türlerde ise radyasyona bağlı hasarlar oluşmaktadır.

Bu sebeple cihazların hem çevreye elektromanyetik dalgaları yaymaması, hem de çevreden gelen elektromanyetik etkileşimler altında dahi çalışabilmesi yani Elektromanyetik Uyumlu (EMU) (Electromagnetic Compatibility) olması gerekmektedir. Elektromanyetik Uyumluluğu sağlamak için mutlaka cihazlara kalkanlama uygulamak gerekmektedir [3, 4, 8].

Elektromanyetik Girişim, Kaynağın etkisini azaltarak, transfer ortamını etkisiz hale getirerek, alıcı duyarlılığını azaltarak engellenebilir.

Bu yöntemler izlenirken bir sistemi Elektromanyetik olarak uyumlu hale getirmede en sık başvurulan yöntemlerden biri de Kalkanlama (Shielding), elektrik-elektronikteki tabiri ile Ekranlama yapmaktır.

Elektromagnetik Enerji Transferi bir sistemde Işınım (radiation) yolu emisyon ile ve İletim (conduction) yolu emisyon ile gerçekleşebilir. Genelde emisyonu yapan kaynak ve emisyonun etkilenen alınan (susceptible) eleman mevcut olur (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Test cihazında elektromanyetik girişim portları [Url-21].

Ancak zaman zaman cihazlar ve sistemler kendi alt sistemlerinin, bileşenlerinin yaptıkları emisyonlardan, gürültüden de EMG anlamında etkilenerek operasyonlarını sürdürmez hale gelebilmektedir. Bu sebeple de cihazların EMU uyumlu olması tüm tasarımcıları, imalatçıları ve tüm son kullanıcıları etkiler. Bir cihazın, sistemin elektromanyetik uyumluluğundan bahsedilmek için kendi içinde elektromanyetik girişime yol açmaması, diğer cihazlara girişimde bulunmaması ve diğer cihazlardan kaynaklanan girişime karşı bağımsız olması yani alınganlığının düşük olması beklenir [Url-21].

EMG/EMU konusunda hem ülkemizde hem de dünya genelinde sağlıktan, kullanıcı elektroniğine, sanayi ve askeriye kadar birçok farklı kategoride regülasyon ve standardizasyon mevcuttur.

International Electrotechnical Commission (IEC) 1933'de Paris'de yapılan toplantıda International Spectral Committee on Radio Interference (CISPR)'ın oluşturularak EMG problemleri üzerinde çalışması konusunda tavsiye kararı almıştır. CISPR 1946'da II. Dünya Savaşı sonrası yeniden yapılanmıştır [4].

1979 yılında Amerika'da Federal İletişim Komisyonu'nun (FCC) kurulması ile EMU hakkında çeşitli standartlar yayınlanmıştır. 1996 yılından itibaren EMC standartları elektronik cihazlar için zorunlu hale getirilmiştir. Standardizasyonlar sonucunda bir elektronik ürünün ticari olarak değer kazanabilmesi noktasında elektromanyetik uyumluluk elzem bir kriter haline gelmiştir. Eğer bir ürün herhangi bir ülkenin elektromanyetik uyumluluk regülasyonlarını sağlamıyorsa, ürün o ülkede satılamaz, kullanılamaz. Örneğin, Avrupa'da ve ülkemizde kullanılmak istenen tüm elektronik ürünler EMU testlerinden geçtikten sonra Avrupa'ya Uygunluk "Conformité Européenne-CE" (Şekil 2.11) işaretini alarak kullanılabilir [Url-21].



Şekil 2.11: Testlerden geçen ürünlerin kutusuna "CE" sembolü yapıştırılır [Url-22].

Günümüzde ICNIRP, ANSI, IEEE, ASTM gibi kuruluşların ve WHO'nun da üzerinde çalışmakta olduğu EMU konusu hem cihaz ve ekipmanların servis süresi boyunca operasyonlarını başarılı bir şekilde yürütmesi hem de biyolojik türlerin sağlığının korunması ve sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir. Uluslararası standardizasyonlar ve ulusal düzenlemeler, yönetmeliklerle konu takip edilmektedir. Ülkemizde konu ile ilgili düzenlemeleri ve sınır değerleri Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTİK) belirlemektedir [Url-23].

Elektromanyetik Girişim kaynakları Doğal EM kaynakları ve teknolojik birçok ekipman, cihaz, sistemin oluşturduğu Yapay EM Kaynakları olarak ikiye ayrılabilir. Doğal kaynaklar yıldırım, kozmik kaynaklar ve güneş olarak sıralanabilir [4]. Yıldırım bir başka deyişle yüklü bulutlarla yeryüzü arasında oluşan Elektriksel Deşarj (ESD) ciddi elektromanyetik girişimlere yol açabilir. Bu yüzden tasarımcıların, cihazların kullanılacağı bölgede yıldırım oluşma ihtimalini göz önüne almaları gerekir. Yıldırım düşmesi sonucu binalarda oluşan hasarlar için geliştirilmiş olan paratoner hattı, elektromanyetik problemleri bir noktaya kadar engellese de toprak altındaki su, doğal gaz kanalı gibi hatlarda gerilimlerin oluşmasına mümkündür. Yıldırım aslında bir geniş bantlı gürültü kaynağı olarak kabul edilmektedir. Gürültü, istenen sinyal dışında bir devrede bulunan herhangi bir elektrik sinyalidir. Yıldırım çarpması kaynaklı olarak telefon, güç sistemleri, uçaklar ve geniş yerleşim yerlerine dağılmış bilgisayar sistemlerinde problemler oluşabilmektedir. Bir uçağa yıldırım düştüğünde, uçak kablolarında elektrik akımı dalgalanmaları üreten ve bu da elektrikli ekipmanın arızalanmasına neden olan yüksek yoğunluklu yayılan elektromanyetik alanlara neden olur. Bu nedenle Yıldırım Çarpmasına karşı Koruma (Lightning Strike Protection-LSP) uçaklarda EMG Kalkanlama ve EMU'nun en önemli uygulamalarından biridir [32,33]. Kozmik kaynaklar ve güneşe gelince ise güneşteki ışımadan dolayı atmosferin tabakalarında yansıma nedeniyle oluşan 2-30 MHz frekans aralığı içindeki değişimler radyo iletişimde, 150-500 MHz frekans aralığı içinde değişimler ise uydu haberleşmesinde problemler doğurmaktadır. Diğer kozmik kaynakların ışıması 100-1000 MHz bandında etkisi fazla olmayan RF sinyalleri üretir [34]. Bir başka doğal EMG kaynağı da dünyanın kendi manyetik alanıdır. Değeri yaklaşık 19-54 A/m mertebelerindedir. Dünyanın elektrik alan değeri yaklaşık 20 mV/km olup bu değer

okyanuslarda daha da düşmektedir. Fakat elektromanyetik fırtınalar 10 V/m ile 500000 kere çarpılmış hali olabilir. Transatlantik kabloları üzerinde bu nedenle 1000 V ve üzerinde bir girişim oluşabilmektedir [32-35].

Yapay EMG Kaynaklarına bakıldığında ise elektrik elektronik içeren tüm yapı, sistem, cihaz ve komponentler (bilgisayarlar, donanımlar, dönüştürücüler, osilatörler, enerji hatları, makineler, kablosuz haberleşme cihazları, radyofrekans sinyaller üreten veriyi aktarıcıları, cep telefonu, tablet, bilgisayar, navigasyon, radyo ve TV gibi çok kullanılan haberleşme cihazları, bunların enerji nakil ve iletim hatları, güç kaynakları, elektrikli ev aletleri, aydınlatmalar, ısıtıcılar, motorlar ve jeneratörler) bir elektromanyetik alan yayarlar ve etrafındaki diğer cihazlara yönelik yada kendilerine yönelik bir EMG'den etkilenebilirler ya da kendileri ortamdaki yayılan EMG'den etkilenebilirler. Bu noktada cihazların birbirlerinden ve ortamdaki EMG'den etkilenmeyecek şekilde tasarlanmaları ve üretilmeleri önem taşır. Kalkanlama da bunu sağlamanın yöntemlerinden biridir [4]. Bir başka yapay EMG kaynağı da Elektrostatik Deşarj (ESD)'dir. Birbirleriyle temas eden ve biri diğerine göre hareket halinde olan cisimler diğerine yük yükleyecek şekilde elektron alışverişi yaparak deşarj etkisi oluşturabilir. Bu yüklerin boşalması, hızlı yükselen akım darbeleri oluşturur. Bu darbeler insanlara ve elektrikli cihazlara zarar verebilir. Kontrollü bir deşarj sistemlerde ekipmanlarda tercih edilirken, kontrolsüz bir elektrostatik deşarjdan kaçınılır.

Son olarak, Elektromanyetik Darbe (EMD) de bir yapay EMG kaynağıdır. Nükleer patlamalara bağlı olan gürültü kaynaklı olduğundan nükleer programı olan ülkeleri ve askeri uygulamaları ilgilendiriyor gibi görünse de nükleer programı olmayan ülkelerde sivil uygulamaları olması ve patlamanın birkaç yüz km çapındaki alanların, ısı veya patlama gibi hiçbir nükleer silah etkisiyle doğrudan temas etmemiş olsalar dahi EMD'ye karşı koruma tedbirleri alınması gerekliliği ile önem taşır. Elektromanyetik darbe (EMD), nükleer gama radyasyonu havada veya yerde emildiğinde meydana gelen ikincil reaksiyonlardan kaynaklanan radyo dalgalarına benzer bir elektromanyetik dalgadır. Normal radyo dalgalarından iki önemli şekilde farklıdır. İlk olarak, çok daha yüksek elektrik alan kuvvetleri yaratır. Bir radyo sinyali alıcı antende voltun binde biri veya daha azını üretebilirken, bir EMD darbesi binlerce

volt üretebilir. İkincisi, saniyenin küçük bir kesri içinde tamamen kaybolan tek bir enerji darbesidir. Bu anlamda, yıldırımdan gelen elektrik sinyaline oldukça benzer, ancak voltajdaki artış tipik olarak yüz kat daha hızlıdır. Bu, elektrik tesislerini yıldırımdan korumak için tasarlanan çoğu ekipmanın EMD'ye karşı etkili olamayacak kadar yavaş çalıştığı anlamına gelir. EMD'nin insanlar için fiziksel bir tehdit olduğuna dair hiçbir kanıt yoktur. Bununla birlikte, elektrik veya elektronik sistemler, özellikle güç hatları veya antenler gibi uzun kablolarla bağlı olanlar hasar görebilir. Elektrikli bir bileşende gerçek fiziksel hasar veya çalışmanın geçici olarak kesintiye uğraması olabilir [36, Url-24].

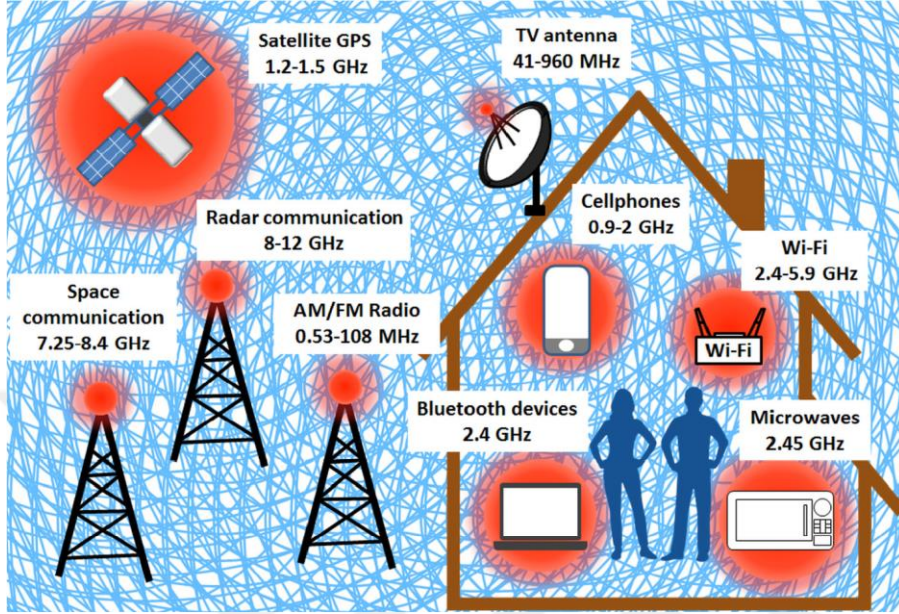
## **2.2.Elektromanyetik Girişimi Kalkanlama**

### **2.2.1. Elektromanyetik girişimi kalkanlama ve mekanizmaları**

EMG, bir önceki bölümlerde de tanımladığı üzere bir cihazın çalışmasını etkileyen elektromanyetik enerji olarak da ifade edilebilir. EMG kaynakları bazen doğal kaynaklar olurken çoğu zaman başka bir elektronik cihaz veya sistemdir. EMG sorunlarına karşı alınacak önlemler ve aksiyonlar (topraklama, izolasyon, kalkanlama vb.) çeşitlilik gösterebilmektedir. Işıma (radiation) yoluyla oluşan problemlerde temel çözüm uygun mesafe aralıklarını kullanma ve kalkanlama ya da bir diğer adı ile ekranlama (shielding) yapmaktır.

Elektromanyetik Girişimi Kalkanlama: EM radyasyonun (hatta spesifik olarak radyo dalgası veya mikrodalga radyasyonunun) ilgili malzemedan geçmemesi ya da malzeme içinde çeşitli kalkanlama mekanizmalarıyla bertaraf edilebileceği şekilde korunmasına denir. Kalkanlanmamış elektronik cihazlar hem EM dalgaları yayarlar hem de bu dalgalara birbirleri tarafından maruz kalırlar. Bu duruma yani Elektromanyetik Girişime (EMG)'ye maruz kalan cihazlar doğru çalışmaktan uzaklaşmakta, canlılar ve biyolojik türlerde ise radyasyona bağlı hasarlar oluşmaktadır (Şekil 2.12). Bu sebeple cihazların hem çevreye elektromanyetik dalgaları yaymaması hem de çevreden gelen elektromanyetik etkileşimler altında dahi çalışabilmesi yani Elektromanyetik olarak Uyumlu (EMU) olması gerekmektedir. EMU'yu sağlamak için cihazlara Kalkanlama yapmak en yaygın yöntemlerdendir. Özetle, Kalkanlama

mekanizmalarını çalıştırarak ve metotlarını uygulayarak Elektromanyetik Girişimin bertaraf edilmesine; bu sayede cihaz, sistem ve biyolojik türlerin korunmasına Elektromanyetik Girişimi Kalkanlama denir [7,8].



Şekil 2.12: Çeşitli ortamlardan EMG'ye kaynakları ve ortamda maruziyet ihtimali taşıyan diğer cihazlar, insanlar [61].

Elektromanyetik Girişimi Kalkanlamanın tarihi, Faraday'in sıfır elektrik alanlı kapalı bir iletken yol olan Faraday Kafesi'ni keşfettiği 1830'lara uzanır. 1900'lü yılların başından beri kalkanlamanın esas olarak yansıma mekanizmasıyla gerçekleştirildiği Faraday kafesi etkisini elde etmek için yaygın olarak iletken olmayan yüzeylere kimyasal kaplama, elektrokaplama, galvanik kaplama veya vakumlu biriktirme ile metalik malzemeler kaplamak veya tamamen metalik malzemelerin kullanımı çalışılmıştır. Ancak metaller ve metalik kaplamalar etkin EMG Kalkanlama performansları olsa da ağırlık, kaplamanın aşınma ve çizilme problemi, korozyona eğilim, kaplamanın yenilenme ihtiyacı ve kaplama ekipmanı ihtiyacı gibi kısıtlardan dolayı dezavantajlıdır [38].

Kalkanlama Mekanizmaları bölümünde de bahsedileceği üzere tamamen yansıma mekanizması baskın bir kalkan malzemesi; aslında gelen EM dalgaları tamamen etrafa yansıtır ortamda bir EM kirliliği oluşturacağı sebebiyle en ideal malzeme olarak

görülmez. Bu bilgiye rağmen yine de sektörde oldukça sıklıkla bu yansıtma mekanizması baskın çalışan malzemelere rastlanır. Son zamanlarda, absorplama mekanizmasının baskın olduğu EMG kalkanlama malzemeleri dikkat çekmeye başlamıştır [39]. Bu mekanizmada kalkan malzemesinin manyetik ya da elektrik dipol oluşturma kabiliyeti olması gerekir. Kalkan içinde gelen EM dalgaya ters yönde oluşan manyetik ve elektrik alanlar sayesinde EM dalga malzeme içerisinde dağılır (dissipate), aslında termal enerjiye dönüşerek malzeme içinde absorplanarak bertaraf edilir.

EMG, elektromanyetik enerjinin bir elektronik cihazdan diğerine ışıyım (radyasyon) veya iletim yolu ile veya her ikisi yolla iletildiği süreç olarak tariflenebilir. İletim her zaman bir miktar radyasyona eşlik eder ve bunun tersi de geçerlidir. EMG, bir ekipman tarafından yayılan elektromanyetik enerji, uzay (ortam) yoluyla alıcıya aktarıldığında meydana gelir. EMG Kalkanlama seviyesi temel olarak kalkan malzemesinin yapıya eklenmesi sayesinde bir verici ve alıcı arası alanlarda aktarılan EM dalganın enerjisi seviyesindeki azalma/sönümlenme (attenuation) miktarı olarak ölçülür. Bu sebeple Elektromanyetik kalkanlama malzemesinin, yayılan elektromanyetik enerjiyi azaltan, sönümleyen bir malzeme olması beklenir. Bir kalkanlama malzemesinin etkinliği ve ortaya çıkan EMG'nin zayıflaması; frekansa, kalkanın kaynağa olan mesafesine, kalkanın kalınlığına ve kalkan malzemesinin kendisine bağlıdır [31,39]. EMG kalkanlama malzemesinin EM dalgayı zayıflatma/sönümleme miktarını ifade eden bir değere EMG Kalkanlama Etkinliği (KE) adı verilir.

EMG farkındalığının artmasıyla 1933 yılında CISPR (International Special Committee on Radio Interference) tarafından bir alt komite olarak Uluslararası Elektroteknik Komisyonu'nun (IEC) kuruldu. CISPR'in 1934 yılında radyo frekans emisyonları ve elektronik sistemler için uyumluluk (EMU) seviyeleri hakkında düzenlemeleri ciddi bir etki yarattı. 1960–1980'lerde, araştırmacılar EMG'nin elektronik sistemler, canlılar üzerindeki etkileri konusunda uyarılar vermeye başladı. 1967'de ABD ordusu, askeri uygulamalardaki elektronik sistemlerin emisyon sınırlarını test etmek ve doğrulamak amacıyla MIL-STD-461A Military Standard: Electromagnetic Interference Characteristics Requirements For Equipment'ı yayınladı. 1979'da ABD Federal İletişim Komisyonu (FCC) günümüzde hala geçerli olmak üzere tüm elektronik cihazlar için EMG yasal sınırlarını çizdi. Araştırmacılar ve mühendisler oluşan

emisyonlar hakkında bilgi edinmek için EMG tabanlı sorunları analiz ederek, iletilen emisyonu azaltmak için yeni tasarımlar üretmenin yollarını arayarak, başlangıçta çoğu şirket hızlı çözüm ancak hantal metal ağırlıklı kalkanlama malzemeleri ile ilerlemeyi tercih etti. Bir yandan da araştırmacılar, daha özgün, yenilikçi kalkanlama malzemeleri üretmenin ve yapılarda kullanmanın çalışmalarını yapmaya başladılar [31, Url-21].

EMG KE, kalkan malzemesinin EM dalgayı zayıflatma mertebesi olup;

- Gelen EM alanın yapılan frekansına,
- Kalkanın kaynaktan uzaklığına,
- Kalkan malzemesinin türüne (iletkenlik, manyetik geçirgenlik, dielektrik sabiti),
- Kalkanın kalınlığına,
- EM alan kaynağının tipine (düzlem dalga, elektrik alan, manyetik alan),
- Herhangi bir kalkan açıklığından kaynaklanan kayıplara
- Kaplama veya yapıştırma gibi kalkan çözümlerde bağ, arayüz mukavemeti gibi faktörlere bağlı olduğu bilinmektedir [40].

KE, manyetik (ve elektrik) alandaki zayıflama (attenuation) veya düzlem dalga şiddetindeki zayıflama olarak ifade edilebilir.

KE temel anlamda gelen (incident) enerjinin kalkandan geçen (transmitted) enerjiye oranıdır. KE, genelde iletilen elektrik alanın şiddetinin (E), manyetik alanın şiddetinin (H) veya düzlem dalga (P) alan şiddetine oranının logaritmik bir fonksiyonu olarak desibel (dB) cinsinden ifade edilir (2.15-2.17).

$$KE = 20 \log \left( \frac{E_t}{E_i} \right) \quad (2.15)$$

$$KE = 20 \log \left( \frac{H_t}{H_i} \right) \quad (2.16)$$

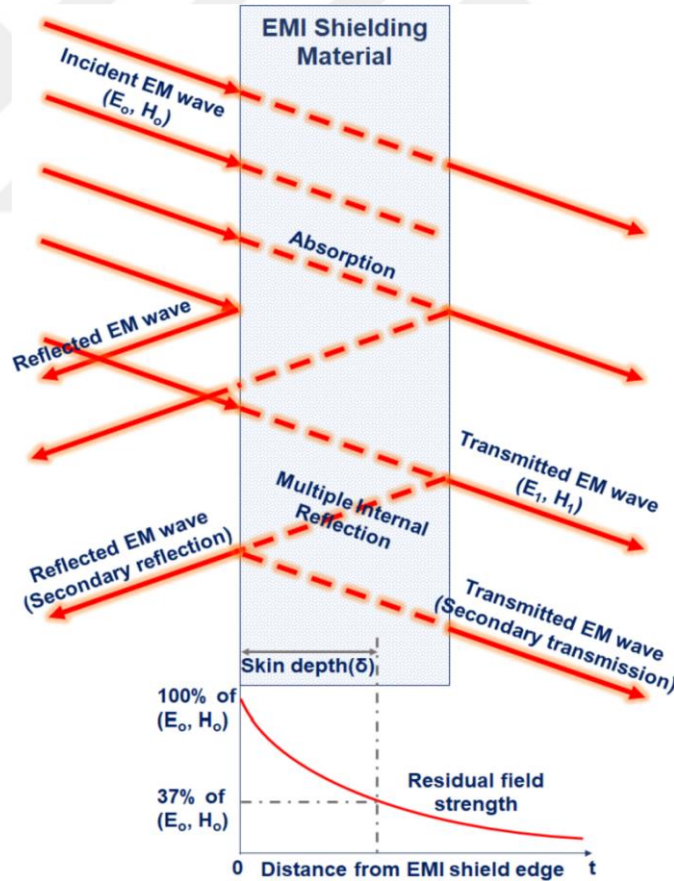
$$KE = 20 \log \left( \frac{P_t}{P_i} \right) \quad (2.17)$$

E: Elektrik Alanın Şiddeti, H: Manyetik Alanın Şiddeti, P: Düzlem Dalga Alan Şiddeti,  
t: geçen (transmitted wave) dalga, i: gelen (incident wave) dalga



Bölüm 2.1.4 ve Şekil 2.5’de bahsedildiği üzere EM dalganın  $\lambda$  dalga boyuna göre, EM dalga kaynağı ile Kalkan malzemesi ( $r$ ) arasındaki mesafe, yakın alan bölgesi (Reaktif Alan veya Fresnel Bölgesi), geçiş bölgesi ve uzak alan bölgesi (Radyasyon Alanı veya Fraunhofer Bölgesi), olmak üzere üç bölgeye ayrılabilir. Yakın alanda ( $r < \lambda/2\pi$ ) elektromanyetik sinyal, kaynağın yapısına bağlı olarak ağırlıklı olarak bir elektrik vektörü veya bir manyetik vektör olabilir. Uzak alanda ( $r > \lambda/2\pi$ ) EM dalga düzlem dalga olarak davranıp elektrik ve manyetik vektörler fazda eşit bir orana sahip ve birbirine diktir. Bu sebeple uzak alanda P Düzlem Dalga Alan Şiddeti formülasyonu kullanılabilir. Kalkanlama Etkinliği belirlemesinde genellikle (uzak alan) düzlem dalga şiddetlerinin oranı kullanılır [41].

Her türlü EMG için, kalkanlama etkinliğine üç mekanizma katkıda bulunur. Gelen dalganın bir kısmı kalkanın ön kısmından yansıtılır, bir kısmı kalkan malzemesi tarafından absorplanır ve kalan kısmı da kalkanın arka yüzeyinden ön tarafına yansıtılarak çoklu iç yansımalar ile bertaraf edilir (Şekil 2.13) [39-42].



Şekil 2.13: EMG kalkanlama mekanizmasının şematik gösterimi [39].

EMG Kalkanlama malzemesinin toplam etkinliği ( $KE_T$ ), aşağıdaki denklemde (2.18) gösterildiği üzere yansımaya mekanizması ile oluşan kayıpların ( $KE_R$ ), absorblama ile oluşan kayıpların ( $KE_A$ ) ve kalkan içi çoklu yansıtmalardan gelen kayıpların ( $KE_M$ ) toplamına eşittir.

$$KE_T = KE_R + KE_A + KE_M \quad (2.18)$$

Absorbsiyondan gelen Kalkanlama Etkinliği 10 dB'den büyükse çoklu iç yansımaya mekanizması kalkanlamada ihmal edilebilecek kadar düşük rol oynar. Genelde pratik bir hesaplamada, elektrik alanlar ve düzlem dalgalar için çoklu iç yansıtma ihmal edilebilir. Yansıtma mekanizması ile sönümlenme miktarı, elektromanyetik dalganın ve kalkanın empedansına oldukça bağlıdır. Bir elektromanyetik dalga bir kalkanla karşılaştığında, dalganın bir miktarının ilk olarak geri yansıtılması beklenir. Ancak; dalga empedansı ve kalkan empedansı birbirine çok yakınsa (impedance match), EM dalga kalkandan minimum yansımaya ile büyük lde yapı boyunca penetre ederek (transmit) geçecektir [39].

EMG Kalkanlama mekanizmalarından hangilerinin rol alacağı kalkan malzemesinin özelliklerine ve ayrıca girişim yapan EM dalgalarının doğasına da bağlıdır.

EMG Kalkanlama mekanizmalarından en temel ve bilinen, yapılara uygulaması kolay olan mekanizma yansıtma mekanizmasıdır. Yansıtma mekanizmasının çalışabilmesi için kalkan malzemesi, gelen EM dalganın oluşturduğu alanlar ile etkileşime girmek ve böylece onları yansıtma için hareketli yük taşıyıcılar olan elektronlar ve hollere sahip olmalıdır.

Yansıtma mekanizmasını tetiklemek için kullanılan kalkan malzemeleri doğası gereği elektriksel olarak iletken olduğu bilinir, minimum 1 S/cm'lik bir iletkenliğe sahip olması beklenir. İletkenlik için iletken yolun (conductive path) oluşması için bağlantısallık (connectivity) gerekmektedir. Bu sebeple kalkanlama etkisi tamamen iletkenliğe bağlı olmasa da (yansıtma mekanizmasını tetiklemek için) iletkenlik ve iletim yolunda bağlantısallık, ekranlama malzemesinin EMG KE'sini artırmak için önemli bir faktördür. Özetle, iletkenliği yüksek olan malzemeler, EM dalgalarının

yansıtılması için iyi bir kalkanlama malzemesi tercihidir. Düşük iletkenlik değerine sahip kalkanlama malzemeleri, EM dalgalarının malzemedan geçmesini engelleyemeyebilir. Bu nedenle genellikle kalkan malzemesinin iletken üretilmeye çalışması şeklinde bir eğilim vardır. Yansıtma mekanizması ile kalkanlama özelliği baskın kalkan malzemesinde EMG KE değeri gelen EM dalgasının frekansın ve malzemenin  $\sigma$  (iletkenlik) değerine bağlıdır.

Metaller, içlerinde serbest elektronların bulunması nedeniyle (mobil yük taşıyıcıların etkin hareket ettirilebildiği) yansıtma mekanizmasının baskın olduğu EMG Kalkanlama uygulamaları için kullanılan en yaygın malzemedir.

Doğrudan sac metallerin yapılarda kullanılması genellikle ekstra hacim ve ağırlık oluşturur. Yüksek iletkenlik değerine sahip altın, gümüş, bakır ve alüminyum gibi malzemeler yansıtma mekanizması için uygundur. Bu nedenle vakumlu biriktirme, galvanik kaplama ve elektriksiz kaplama ile hazırlanan metal kaplamalar, hassas elektronik cihazların korunması için sektörde yaygın olarak tercih edilir. Metal kaplamalar çeşitli yüzeylere, liflere, kumaşlara, partiküllere veya kalıplanan çeşitli malzemelere uygulanabilmektedir. Daha önceki bölümlerde de kısaca değinildiği üzere metal kaplamaların en temel dezavantajı, çizilme veya aşınma riskleridir [43].

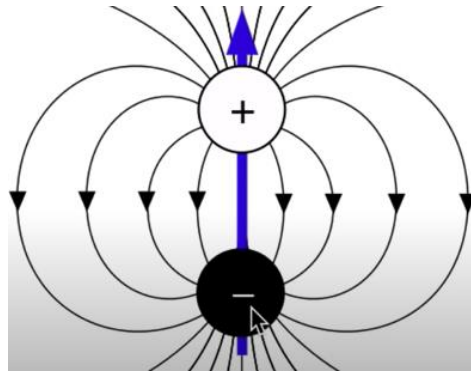
Yansıtma mekanizması, kalkan malzemesine çarpıp geri sıçrayan EM dalga ile sonuçlandığından yansıtılan radyasyon çevre için, özellikle orada bulunan biyolojik türler ve diğer cihazlar için istenmiyor olabilir. Özellikle sağlık, güvenlik ve düşük görünürlük (low observable) uygulamaları için EMG kalkanlamada absorplama mekanizması tercih edilir. Görünmezlik (Stealth) uygulamaları için havacılık ve savunmada yansıyan radyasyon radara ulaşırsa ve dolayısıyla hava aracı ya da sistem algılanması ihtimaline karşın yansıtma mekanizması ile kalkanlama başarılı olsa dahi bu tip uygulamalarda tercih edilmez. Bu noktada malzeme ile çevreleyen ortam arasındaki empedans uyumsuzluğunu (impedance mismatch) azaltmak, yansıtmayı azaltmak için etkin bir yöntemdir. Fakat, genellikle EMG kalkanlama malzemeleri, empedans uyumsuzluğunun önemli olma eğiliminde olduğu metaller ve karbon bazlı yapılar gibi iletken malzemelerdir. Nano skalada katkılama ve oryantasyon yoluyla malzeme yansıtmayı azaltmak için bir malzemeyi uyarlanabilmektedir [8].

EMG Kalkanlama uygulamalarında baskın olan mekanizmalardan bir diğeri de absorplama mekanizmasıdır. Bu mekanizmada kalkan malzemesinin, gelen EM

dalganın alanlarıyla etkileşime girmek ve böylece onları sönümlmek, zayıflatmak için elektrik ve/veya manyetik dipoller oluşturma kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Dielektrik sabiti (electric permittivity-  $\epsilon$ ) yüksek olan malzemeler absorplama mekanizmasının çalışması için gerekli elektrik dipollerini sağlayabilir: örnek baryum titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ).

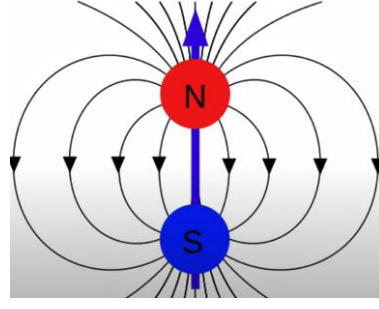
Manyetik geçirgenliği ( $\mu$ ) yüksek olan demir, nikel, kobalt ve nadir toprak elementleri gibi malzemeler veya orta derecede olan demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) gibi malzemeler içeren malzemeler yine absorplama mekanizmasının çalışması için gerekli manyetik dipolleri sağlayabilir. Mumetal (çok yüksek geçirgenliğe sahip bir nikel-demir yumuşak ferromanyetik alaşım) ve süper permalloy (%80 nikel ve %20 demir içeriğine sahip bir nikel-demir manyetik alaşım) gibi yüksek ( $\mu$ ) manyetik geçirgenliği bulunan malzemeler de absorplama mekanizması için inanılmaz avantajlıdır; ancak yüksek maliyetlidirler.

Bu noktada elektrik ve manyetik dipoller yardımı ile nasıl absorplama mekanizmasının tetiklendiğinden bahsetmekte fayda vardır. Dipol aslında en temel anlamı ile çift yük, çift kutup demektir. Elektrik bir dipol için Şekil 2.14'ya bakıldığında pozitif bir yük ve negatif bir yük, negatif yükten pozitif yüke doğru bir akım ve elektrik dipollerinin etrafında akıma eşlik eden bir E alan çizgileri mevcuttur.



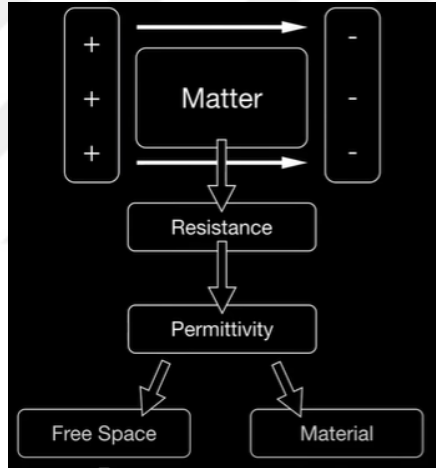
Şekil 2.14: Elektrik dipol (çift kutuplu) ve etrafında oluşan elektrik alan [Url-25].

Manyetik dipolde de aslında benzer bir durum söz konusudur. Çift kutup Kuzey (N) ve güney (S) kutupları ve bunlara eşlik eden manyetik alan çizgileri mevcuttur (Şekil 2.15).



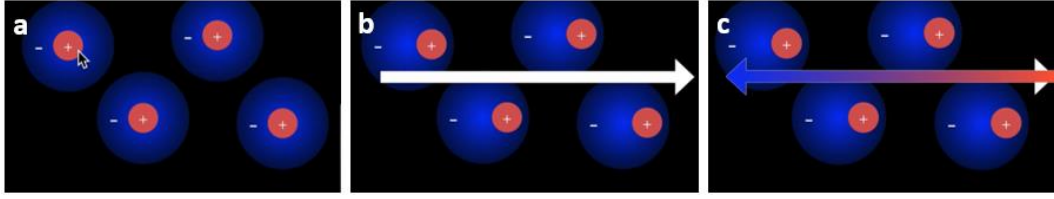
Şekil 2.15: Manyetik dipol ve etrafında oluşan manyetik alan [Url-25].

En temel anlamda elektrik alana gösterilen direnç elektrik geçirgenlik yani bir diğer adı ile dielektrik sabitidir.  $\epsilon_0$  dielektrik sabiti, vakum ortamının yani serbest uzayın geçirgenlik değeridir.  $\epsilon_r$ , bağıl geçirgenlik (relative permittivity) ise malzemenin elektriksel geçirgenliğidir.  $\epsilon$  elektriksel geçirgenlik değeri ise önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere bu her iki değere bağlıdır (Şekil 2.16).



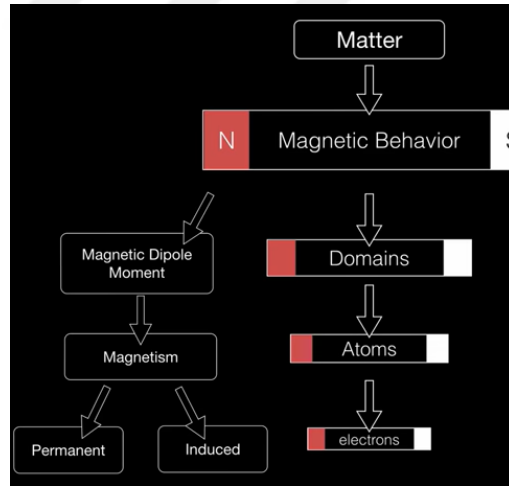
Şekil 2.16: Elektrik alana gösterilen direnç elektrik geçirgenlik [Url-26].

Kalkan yapısına, elektriksel geçirgenliği yüksek malzeme eklemek en temel anlamda yeni atomlar yani proton ve elektronlar eklemek demektir. EM dalganın oluşturduğu alan dielektrik malzemenin içinden geçerken malzemedeki elektronları belirli bir yönde kaydırır (shift) (Şekil 2.17 b). Elektrik dipoller (çift kutuplar) gelen EM dalga yönüne ters bir yönde elektrik alan oluşturur (Şekil 2.17 c). Malzeme içinde oluşan bu zıt yönlü E alan gelen EM dalganın oluşturdu E alanı sönmeler. EM dalgasının E bileşeni, kalkan malzemesindeki elektrik dipolleri tarafından sönmelererek ısıya dönüştürülmüş olur [43, Url-26].



Şekil 2.17: (a) Dielektrik malzeme, (b) E alan altında elektronları belirli bir yönde kayması ve elektrik dipol oluşumu, (c) Elektrik dipollerin gelen EM dalga yönüne ters bir yönde elektrik alan oluşturması [Url-26].

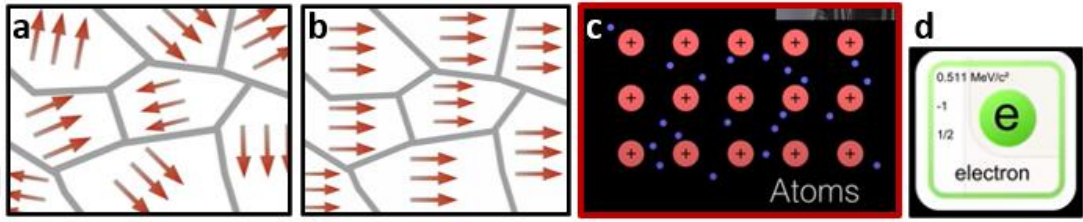
Manyetik davranışı olan malzemeler manyetik dipol oluşturabilen malzemelerdir. Manyetik alana maruz kaldıklarında, bırakıldıklarında bu dipolleri sayesinde bir manyetik dipol momenti de oluşur. Manyetik dipol oluşturma kabiliyeti malzemenin domenleri (domain) seviyesinde olabildiği gibi atomları seviyesinde ve elektronları seviyesinde de söz konusudur. Elektronların spinleri sayesinde manyetik dipol momenti oluşturma potansiyeli taşır. Elektron seviyesi, atomik seviye ve domen seviyesindeki tüm manyetik dipol oluşturma kabiliyeti bir malzemenin toplam manyetiklenme davranışını belirler (Şekil 2.18) [Url-25].



Şekil 2.18: Malzemenin manyetik davranışı ve dipol oluşturma kabiliyeti [Url-25].

Kalıcı ve indüklenmiş bir manyetik malzemede temelde olan fenomen yapıdaki bahsedilen tüm seviyelerdeki dipolleri yönlendirmektir, böylece tüm malzeme N ve S kutupları olan bir dipole (çift kutuplu) dönüşüp magnet özelliği gösterir. Domenlerin

içinde manyetik dipoller mevcuttur, ancak çeşitli oryantasyonlarda olabilir ve birbirilerini nötrleyebilirler (Şekil 2.19a). Domenlerdeki tüm dipollerin yönlendirilmesi ile kalıcı manyetizasyon oluşur (Şekil 2.19 b). Ancak malzemedeki tüm manyetizasyonun kaynağı sadece domenler değildir. Atomlar ve elektronlar da manyetizasyona katkı sağlar. Atomlara bakıldığında atomlar yüklerden oluşur, ki yükler arasında oluşan akımdan manyetik dipoller oluşur. Elektronlara bakıldığında da elektronlar spinlerinden dolayı manyetik dipol momenti oluşturur.



Şekil 2.19: Domenler, yönlendirilmiş domenler, atomlar ve elektron spini manyetik dipollerini sayesinde manyetizasyona katkıda bulunur [Url-25].

Domen, atom ve elektron seviyesinde tüm manyetik dipol oluşumları malzemenin toplam manyetiklenebilirliğine katkı sağlar. Kalıcı bir manyetik malzemede, malzeme bu dipol oluşumlarından kaynaklı olarak zaten kutupludur ve manyetik alanı sürekli olarak kendi içinde yaratır, dolayısıyla bir manyetik alana bırakıldığında bir tork (manyetik dipol momenti) oluşur. Malzemelerin manyetiklenebilmesi yani manyetik dipol oluşturma kabiliyeti gösterebilmesi atomik ve moleküler iç yapılarına bağlıdır. Manyetik alana konulan çeşitli malzemeler de alan altında domenleri anlık olarak yönlenmesiyle indüklenmiş magnetler olarak davranabilir [Url-25].

Manyetik dipol oluşumuna ve detaylarına değindikten sonra EMG Kalkanlamada manyetik geçirgenliğin önemine gelinecek olursa manyetik geçirgenliği yüksek yani manyetik dipol oluşturma, iç manyetik alan oluşturma kabiliyeti bulunan malzemeler bir EM alana maruz kaldıklarında gelen EM dalgayı oluşturdukları iç manyetik alanla yönelimini bozar ve sönümler, zayıflatır. Bu şekilde manyetik dipol oluşturma kabiliyeti olan malzemelerde yine absorplama mekanizması çalışmış, malzeme içinde EM enerji sönümlenerek ısı enerjisine dönüşmüş olur [2,44].

Manyetik kayıplar ve elektrik kayıplar oluşturma absorplama ile kalkanlama mekanizmasının çalışması için önem arz eder. Bu noktada da bu iki tür güç kaybı

power loss), malzemenin dielektrik ve manyetik karakterine bağlıdır. Manyetik güç kaybı oluşturabilme, manyetik bir malzeme için önemli iken manyetik olmayan bir malzeme için önemsizdir. Dielektrik karakteristiği yüksek olan bir malzeme için de elektrik dipoller ile gelen EM dalgaya zıt yönde alan oluşturarak sönümlenme yapmak önemli olacaktır. Tüm bu iki tür güç kaybı da gelen EM dalgaya oldukça elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerine frekans ve genliklerine de oldukça fazla bağlıdır [8].

Bu sebeple ideal bir malzemedeki hangi frekans aralığında çalışacağını hangi çeşit EM dalgalara maruz kalabileceğini bilmek (uygulamaya göre) malzeme ve kalkan yapısının tasarımı için önemlidir. Bunu yanında oldukça geniş bir aralıkta spektrum boyunca belirli bir seviyede kalkanlama yapması istenilen bulunan malzemeler yapılarında ise tüm kalkanlama mekanizmalarını tetikleyici ham malzemeler sisteme dahil edilmeye çalışılır ki en fazla fayda kalkandan elde edilebilsin geniş bir bant aralığı boyunca malzeme çalışabilsin.

Bir başka kalkanlama mekanizması, koruyucu malzeme içindeki çeşitli yüzeylerde (porlarda, katmanlarda) veya arayüzlerde yansıtma süreci olarak adlandırılan çoklu iç yansıtmalardır. Bu tür bir mekanizma için kalkanlama malzemesinde, geniş bir yüzey alanı veya arayüz alanı gerektirir. Köpük gibi porlu malzemeler ve geniş bir yüzeye ve/veya geniş arayüz alanına sahip dolgu malzemeleri içeren kompozitler, katmanlı yapılar ve katmanlı nanoyapılar içeren kompozit malzemeler çoklu iç yansıtma mekanizmasının tetiklenebileceği yapılara örnek olarak verilebilir. Yansıtıcı yüzeyler veya arayüzler arasındaki mesafe yüzey derinliğinden ( $skin\ dept-\delta$ ) daha büyük olduğunda çoklu iç yansıtma mekanizması ile oluşacak kayıplar ihmal edilebilir. Elektromanyetik dalgalar kalkan malzemesinden herhangi bir zayıflama olmaksızın geçtiklerinde doğrudan iletim (transmission) gerçekleşmiş olur. Polyester, polipropilen (PP), epoksi gibi çeşitli katkısız termoset ve termoplastik polimer matrisler ve cam gibi iletken olmayan malzemelerden EM dalgaları kolaylıkla geçebilir [43].

Yansıtma ile kayıplar, absorplama ile kayıplar veya çoklu yansıtma ile ilişkili kayıpların tümü total KE olarak desibel (dB) cinsinden belirtilir. Absorplama kaybının kalkan malzemesinin kalınlığı (yüzey derinliği) ile doğru orantılı olduğu bulunmuştur. Yüzey etkisi (skin effect), yüksek frekanslı EM dalgalarının elektriksel olarak iletken bir malzemedeki yalnızca yüzeyin yakın kısımlarına penetre edebilmesi olayıdır.



Elektriksel olarak iletken bir malzemeye penetre eden bir düzlem dalganın E- elektrik alan bileşeni, iletkenin derinliği arttıkça üstel olarak azalır.

$\delta$ -yüzey derinliği, ise EM alanının başlangıç değerinin 1/e veya ilk değerinin %37'sine düştüğü derinliği ifade eder. Yüzey derinliği aşağıdaki denklem (2.19) ile temel olarak ifade edilebilir.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}} \quad (2.19)$$

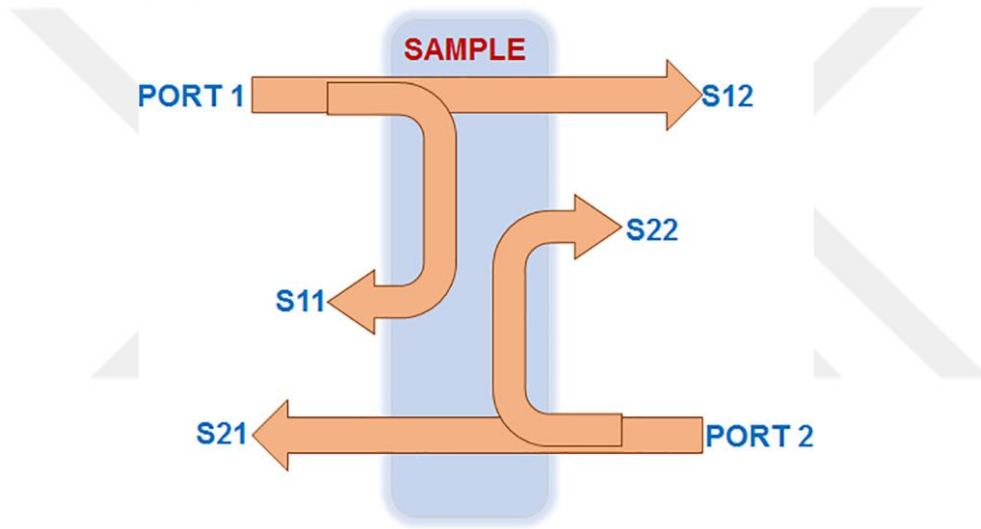
f:frekans,  $\mu_0:4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$  vakumun geçirgenliği,  $\mu_r$ :kalkanlama malzemesinin bağlı geçirgenliği [43].

$\delta$ , EMG kalkanlama malzemesinin frekansı ve iletkenliği ve manyetik geçirgenliği arttıkça ters yönde azalacaktır. Bir EMG kalkanlama malzemesinin kalkanlama mekanizması ile ilgili,  $\delta$  ve kalınlığa göre aşağıdaki gibi çıkarımlar yapılabilir:

- Bir EMG kalkanlama malzemesinin kalınlığı  $t \ll \delta$  yüzey derinliğinden çok daha az olduğunda, sönümlenme yalnızca yansıtma mekanizması ile gerçekleşir. Bu durum ya düşük frekanslarda ya da elektriksel olarak iletken ince numune durumunda meydana gelir. Bu durumda, toplam kalkanlama fenomeni frekanstan bağımsızdır.
- Bir EMG kalkanlama malzemesinin kalınlığı yüzey derinliğinden  $t \gg \delta$  çok daha büyük olduğunda iyi iletkenler için yansıtma, absorplama ve çoklu iç yansımalar yoluyla sönümlenmeler gerçekleşir. Bu durumda, toplam kalkanlama etkinliği frekansa bağlıdır. Bu durum ya yüksek frekanslarda ya da elektriksel olarak iletken kalın numune olması durumunda meydana gelir [27,43].

Örneğin, en yaygın olarak kullanılan metalik malzemelerden bakırın  $\delta$ 'sı 1 GHz frekansta  $2,09 \mu\text{m}$ ,  $\mu_r = 100$  ve  $\sigma = 5,8 \times 10^7 \text{ S/m}$  civarındadır. Nikel'in ise  $\delta$ 'sının 1GHz frekansında  $0,47 \mu\text{m}$ ,  $\mu_r = 100$  ve  $\sigma = 1,15 \times 10^7 \text{ S/m}$  mertebelerindedir. Nikelin ferromanyetik doğasından kaynaklı manyetik dipol oluşturma kabiliyeti, bakırın  $\delta$ 'sı ile karşılaştırıldığında  $\delta$  değerinin daha düşük olmasının ana nedenidir [43].

EMG Kalkanlama malzemesinin toplam etkinliğinin ( $KE_T$ ), yansıma mekanizması ile oluşan kayıpların ( $KE_R$ ), absorplama ile oluşan kayıpların ( $KE_A$ ) ve kalkan içi çoklu yansıtmalardan gelen kayıpların ( $KE_M$ ) toplamına eşit olduğu (2.22)'de gösterilmiştir. Bu mekanizmalarla oluşan kayıpların analitik formülasyonları incelendiğinde; S-parametreleri temel anlamda kayıpları ifade eder. N portlu bir network analizöre bir veya daha fazla porta gelen sinyallerin yanıtları olarak da tanımlanabilir. S parametrelerinin kısaltmasında, alt simgedeki ilk sayı gelen EM dalgaya yanıt veren portu ifade ederken, ikinci altsimge sayısı da gelen EM dalgayı taşıyan portu belirtir. Bu nedenle,  $S_{21}$  kısaltması, port 1'den gelen bir sinyalin kaynaklanan port 2'deki yanıtını ifade eder (Şekil 2.20).



Şekil 2.20: İki portlu bir network analizörde parametrelerin şematik gösterimi [39].

$$KE_T = -10 \log(T) = -10 \log |S_{21}|^2 \quad (2.20)$$

$$KE_R = -10 \log(1 - R) = -10 \log (1 - |S_{11}|^2) \quad (2.21)$$

$$KE_A = KE_T - KE_R - KE_M \quad (2.22)$$

$KE_T$  : Toplam Kalkanlama Etkinliğini

$KE_R$  : Yansıma mekanizması ile oluşan kayıpları

$KE_A$  : Absorplama ile oluşan kayıpları

$KE_M$  : Kalkan içi çoklu yansıtmalardan gelen kayıpları ifade eder.

T: giriş gücünün (Input Power) numune içine giren kısmını ifade eden iletim katsayısıdır.

R: giriş gücünün numune yüzeyinden yansıtılan kısmını ifade eden yansıma katsayısıdır.

Hem T hem de R yüzdesel olarak ifade edildiğinde (2.23)'deki absorblamaya geçiş yapılabilmektedir. Total KE, dB biriminde ifade edildiğinde bu yüzdesel dönüşüm yapılamamaktadır.

Kalkanlama Etkinliğinin gücü 15 dB üstünde olduğu zaman çoklu yansıtılardan gelen kayıplar ihmal edilebilir. Bu durumda;

$$KE_A = KE_T - KE_R = -10 \log(T/(1 - R)) \quad (2.23)$$

Absorpsiyon katkısı A,  $KE_A$  'nın  $KE_T$ 'ye oranını ifade eder.

$KE_A$ , denklem (2.24)'e göre elektromanyetik teori tarafından belirtildiği gibi, frekans arttıkça artar.

$$KE_A = 131,4. t. \sqrt{\mu_r \sigma_r f} = 131,4. t. \sqrt{f \mu \sigma / (\mu_0 \cdot \sigma_{Cu})} \quad (2.24)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \text{olduğundan} \quad \mu_0 = 4. \pi. 10^{-7} \quad \text{H/m}$$

$$8,68. t. \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.25)$$

iletken malzemeler için eşitlik (2.25)'deki haline gelir [8].

t: numunenin metre cinsinden kalınlığı,

f: Hz cinsinden frekans,

$\mu_r$ : bakıra göre bağıl manyetik geçirgenlik,

$\sigma_r$ : bakıra göre elektriksel iletkenlik,

$\sigma$ : elektriksel iletkenlik

$\mu$ : manyetik geçirgenlik

$\mu_r$  ve  $\sigma_r$  artan frekansla azalmıyorsa,  $KE_A$ 'nın artan frekansla arttığını gösterir. Ayrıca, belirli bir frekansta  $KE_A$ 'nın hem geçirgenlik hem de iletkenlik ile arttığını gösterir [8]. Bir kalkanlama malzemesinin gelen EM Dalganın manyetik ve elektrik alanları ile etkileşime girmesi EMG Kalkanlama fenomeninin temelidir. EMG Kalkanlama Malzemelerinin geliştirilmesinde temel oluşturmaktadır.

EMG Kalkanlama malzemesinin manyetik karakterinin bulunması, malzemedeki manyetik dipollerin gelen EM dalganın manyetik alanı ile etkileşimi nedeniyle EM dalganın absorpsiyonunu tetikler. Manyetik dipol momenti (artan frekansla artar ve manyetik alanların boyutuna ve alan sınırlarının hareketliliğine bağlıdır), dipol-dipol etkileşimini, manyetik duyarlılığı (susceptibility) ve manyetik sürekliliği (continuity) içerir. Kalkanlama malzemesinin elektriksel olarak kutuplanabilirliği malzemedeki elektrik dipollerin EM Dalganın elektrik alanıyla etkileşime girmesi de absorplama mekanizması tetiklenir. Elektrik dipol oluşumu (artan frekansla artar), dipol-dipol etkileşimi, dielektrik bağlantısallık (connectivity) ve elektrik duyarlılık (susceptibility) gibi unsurlar malzemenin dielektrik davranışını oluşturur.

Dielektrik davranış, aslında iletim (conduction) davranışıyla ilgilidir. İletkenlik ve geçirgenlik değerleri gerçek ve imajiner bileşenlerle karmaşık sayı olarak ifade edilebilmektedir. Örneğin, farklı sıcaklıklarda ısı iletilen elde edilen karbon malzemeler arasında, iletkenlik ve geçirgenliğin gerçek ve imajiner kısımlarının tümü, artan ısı iletilen sıcaklığıyla (yani, artan kristalografik düzen derecesi ile) artar. İletim davranışı ayrıca (karmaşık geçirgenliğin imajiner kısmı tarafından ifade edilen) dielektrik kayıplara da katkıda bulunur [45].

Sanayide genellikle yüksek iletkenliği olan malzemeler ile Faraday kafesi oluşturarak kalkanlama çözümü sunmak yüksek desibelde koruma sağlayan bir kalkan geliştirilmesinin en temel ve doğrudan yaklaşımı olarak görülür. İletken ağı yüzeyde oluşturmak yansıtma mekanizmasını tetiklediği için kolay ve doğrudan bir çözümdür. Bunun yanında, manyetik olmayan malzemelerde kalkanlama çözümleri için yüksek iletkenlik olmazsa olmaz unsur değildir. Bu unsurlardan bazıları kalkan malzemesinin yüzey alanı veya kalkan malzemesindeki arayüz alanı ile ilgilidir.

Yüzey Etkisi nedeniyle, yüksek yüzey/arayüz alanı oranı numunenin EM dalga ile etkileşime giren kısmının hacmini artırır ve böylece kalkanlama etkinliği iyileşmiş olur. Burada arayüzden kasıt, malzemedeki dolgu ya da katkı maddesi ile matris

arasındaki arayüzü ifade eder. Katkısız bir polimer matris ya da malzemelerin matris kısmı, EM dalga ile düşük etkileşim oluşturabilmesi sebebiyle genelde tüm EM dalgayı geçirme eğilimindedir. Porlu bir malzemede daha yüksek yüzey alanı/hacim oranı EMG KE'de avantaj sağlar. Bir kompozitte belirli bir katkılama yüzdesi için, katkı malzemesinin daha küçük bir birim boyutu, daha yüksek bir arayüzey/hacim alanı sağlar. Örneğin, nanokatıklar yüksek boy-en oranları (aspect ratio) sebebiyle kompozit matrislere entegre edilerek EMG Kalkanlama uygulamalarında ön plana çıkmaktadır [8].

Diğer bir unsur da elektriksel bağlantısallık (electrical connectivity)'dır. Malzemedeki elektrik alan çizgilerinin sürekliliğinden (continuity) dolayı EMG Kalkanlamayı elektriksel bağlantısallık iyileştirir. Malzemedeki elektrik alan çizgilerinin sürekliliği aynı zamanda manyetik alan tarafından indüklenen Eddy Current oluşumuna izin verir, böylece manyetik kayıpları teşvik eder. Bu sebeplerden ötürü, iletken bir dolgu maddesi ve iletken olmayan bir matris içeren bir kompozit yapıda elektriksel olarak perkolasyonu yani bağlantısallığı (electrical connectivity) sağlayabilmek kalkanlama için avantajlıdır. Matrise katkılanan dolgu, katkı maddesinin en-boy oranı daha yüksek olduğunda elektriksel bağlantısallığın yapıda sağlanması için gerekli perkolasyon eşiği daha düşük olacaktır. Bu yönden nanokatıklar ön plana çıkmaktadır.

Perkolasyon eşiği temel anlamda tanımlanacak olursa; polimer matrisli kompozit yapıda iletken ağ (conductive network) oluşturabilen minimum dolgu malzemesi yüzdesidir. Bir başka deyişle, yapıya en düşük ağırlıkça yüzde kaç dolgu malzemesi konulursa elektriksel iletkenliğinin onun katları oranında arttığı (daha sonra ise ne kadar dolgu malzemesi eklenirse eklensin fazla değişmediği) eşik değeridir. Dolgu maddesinin en-boy oranı daha yüksek olduğunda perkolasyon eşiği daha düşüktür.

Manyetik özelliği olan bir EMG Kalkanlama malzemesi için manyetik alan çizgileri sürekli olduğundan manyetik bileşenin manyetik sürekliliği (magnetic continuity) gereklidir. Yani manyetik karakterli dolgu ve manyetik karakteri olmayan bir matristen oluşan kompozit malzemede manyetik perkolasyonun sağlanabiliyor olması da EMG kalkanlama için önemlidir [46].

Özetle, bir EMG Kalkanlama malzemesinin kalkanlama etkinliğine malzemenin manyetik ve dielektrik karakteristiği ve iletim davranışı ve yüzey/arayüz alanı katkıda bulunur.

EMG Kalkanlama malzemelerinin manyetik ve dielektrik karakteristiği ve iletim davranışının her biri frekansa ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilmektedir. Belirli bir malzeme için baskın çalışan kalkanlama mekanizmasının frekans ve sıcaklık kombinasyonlarına bağlı olarak da değişebilmektedir.

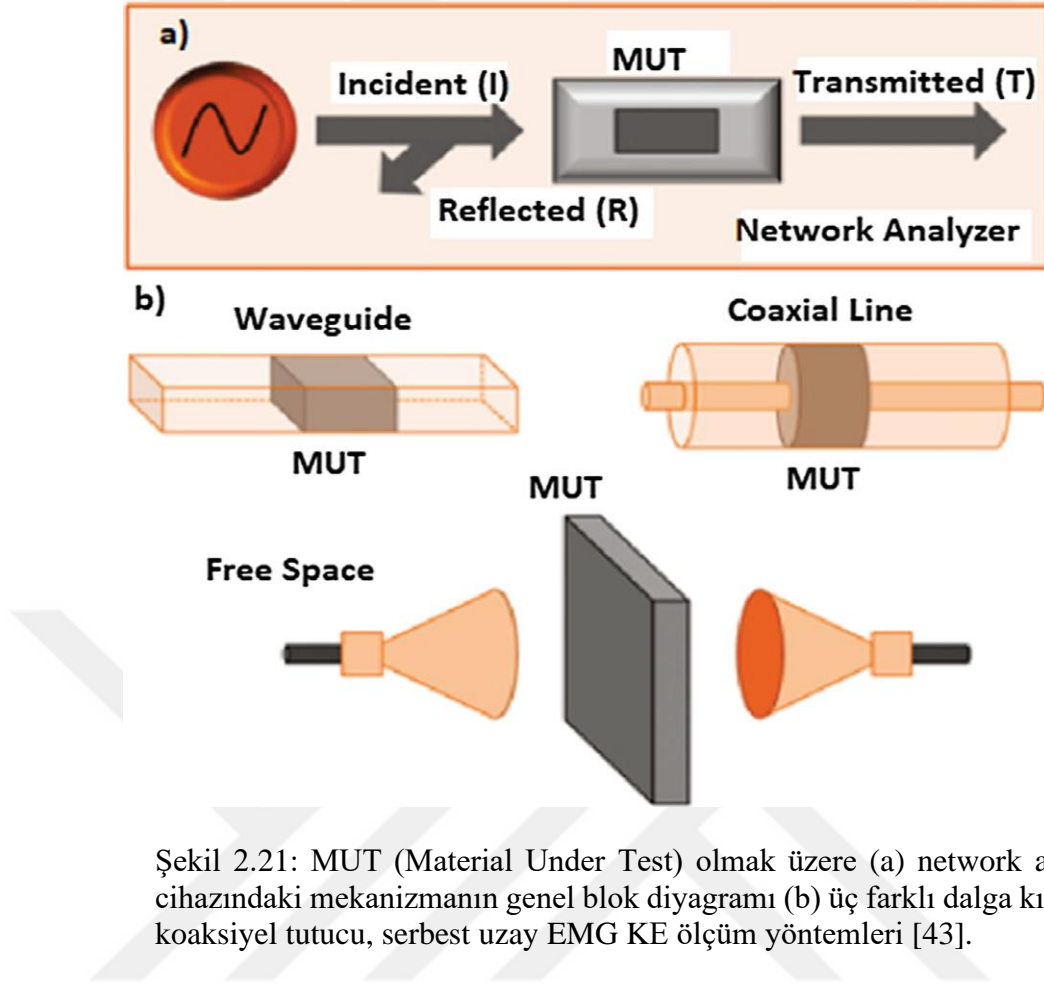
Örneğin, düşük frekanslarda manyetik dipol oluşumu ile absorblama baskınken yüksek frekanslarda elektrik dipol oluşumu baskın olma eğilimindedir. Bu nedenle frekansa bağlı olarak da kalkanlama etkinliği ve mekanizmaların tetiklenmesi değişebilmektedir. Genelde uygulamada, kalkanlama etkinliğinin frekansla birlikte çok değişken olması tercih edilmez, kalkan malzemesinin spektrum boyunca belirli bir seviyede kalkanlama yapması beklenir. Spektrum boyunca geniş bir frekans aralığında yüksek ekranlama etkinliğinin elde edilmesi, EMG kalkanlama malzemeleri üzerine yapılan geliştirme çalışmalarının ana odak noktasıdır [1,13].

### **2.2.2. Elektromanyetik girişimi kalkanlama etkinliği (EMG KE) ölçümü ve standardizasyon**

EMG KE, skaler network analizörü (SNA) ve vektör network analizörü (VNA) olarak sınıflandırılan, network analizörleri (NA) olarak bilinen ve yaygın olarak kullanılan araçlar aracılığıyla deneysel olarak ölçülebilir.

Genel olarak EMG KE kontrollü test ortamlarında ya da serbest uzayda ölçülmelidir. Kontrollü test ortamlarından kasıt, ölçüm esnasında EM ortamın kontrol edilebildiği ve istenmeyen yansımaların istenen yansımalarından ayrılabilirdiği ortamlardır.

Bu ortam testlerine dalga kılavuzu ile ölçüm metodu, koaksiyel tutucu metodu, çift-TEM hücre metodu, yankısız oda metodu örnek verilebilir (Şekil 2.21). Kompozit malzemelerin testlerinde bu ölçüm yöntemleri aktif olarak kullanılabilir [43].



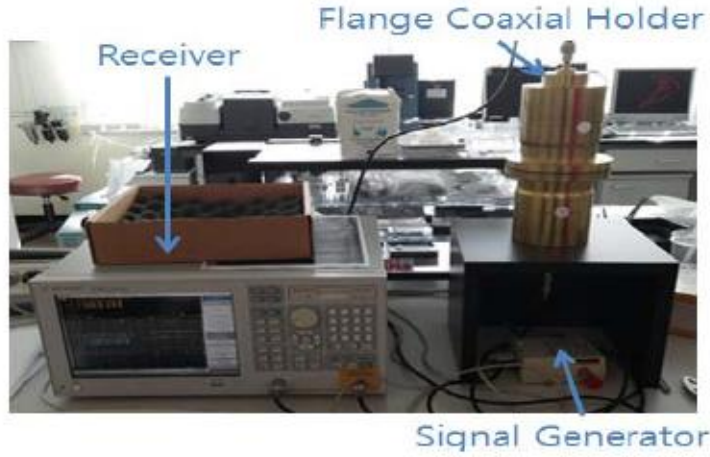
Şekil 2.21: MUT (Material Under Test) olmak üzere (a) network analizör cihazındaki mekanizmanın genel blok diyagramı (b) üç farklı dalga kılavuzu, koaksiyel tutucu, serbest uzay EMG KE ölçüm yöntemleri [43].

Kontrollü ortam testleri dışında da Serbest Uzay testleri de uygulamaya ve malzemenin çalışacağı frekans aralığına göre kompozit malzemelerin testlerinde kullanılabilir. Serbest uzay ölçüm metotları ile kontrollü test alanlarında yapılan ölçümlere göre daha geniş frekans aralığında ölçüm ve bu serbest uzay ölçüm yöntemleri ile kontrollü test ortamlarındakilere göre daha büyük numune boyutları için SE ölçümleri yapmak mümkündür [47].

#### 2.2.2.1. Koaksiyel tutucu metot (Coaxial holder method)

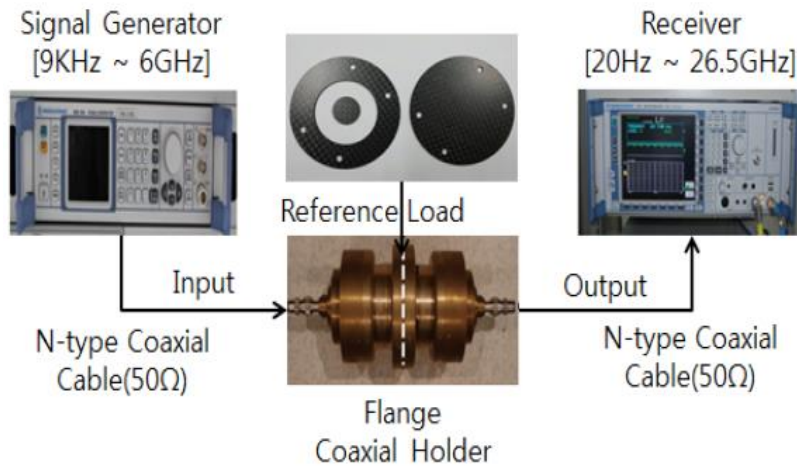
Koaksiyel tutucu metodu, ASTM D4935 standardına 1989'da düzlemsel numunelerin EMG KE'sini ölçmek için geliştirilmiş bir test metodudur (Şekil 2.22). Bu metot yaygın olarak düzlem dalga için kompozit malzemelerin, tekstil malzemelerinin KE'lerinin ölçümünde kullanılmaktadır [48].

Şekil 2.22 ve Şekil 2.23’de 30 MHz-1,5 GHz frekans aralığında KE ölçümleri yapılabilen ölçüm sisteminin flanşlı bir koaksiyel tutucu ve S parametrelerini (S11 ve S21) ölçebilen bir network analizör bulunmaktadır. Taranan frekansının artışı test aparatı ve beraberinde numune boyutlarının azalışına neden olur. 1,5 GHz-10 GHz için aynı mantıkla çalışan daha küçük bir fikstür bulunmaktadır.



Şekil 2.22: Test ölçümü görünümü ASTM D4935-10'un sistem konfigürasyonu [49].

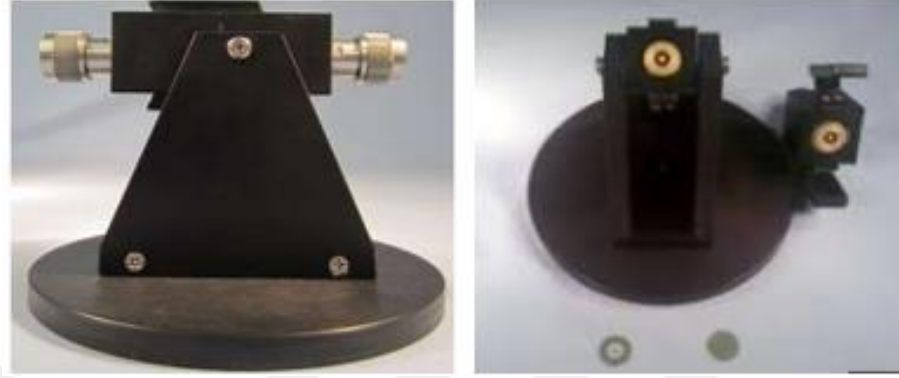
30 MHz-1,5 GHz aralığından çalışan test fikstürünün iç çapı 76.2 mm ve dış çapı 133 mm’dir. Test fikstürünün orta kısmında 33 mm’lik kısım bulunmaktadır. Numune kalınlıkların 2 ya da 3 mm olması önerilmektedir. ASTM D 4935 test standardı için kullanılan test adaptörü, referans ve test numunesi görülmektedir.



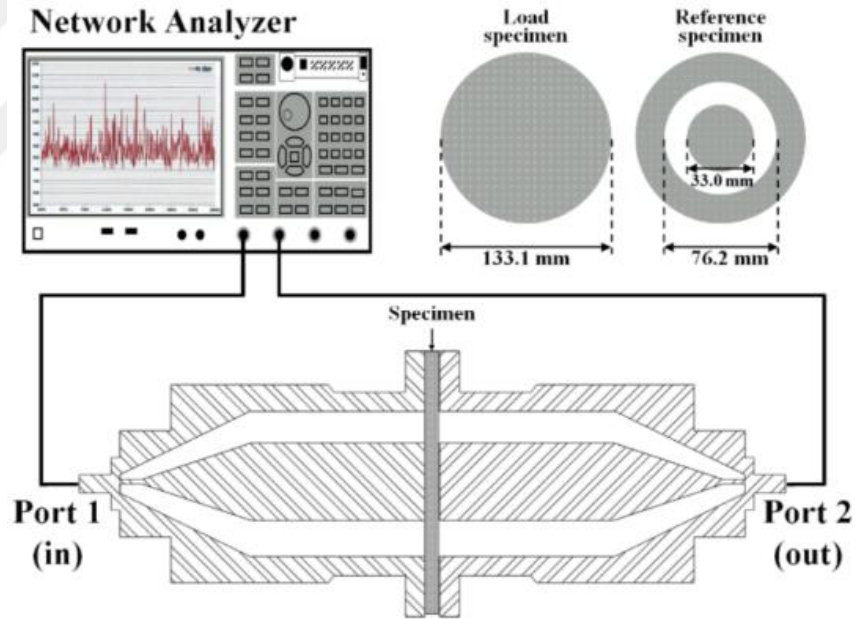
Şekil 2.23: ASTM D4935 test düzeneği [49].



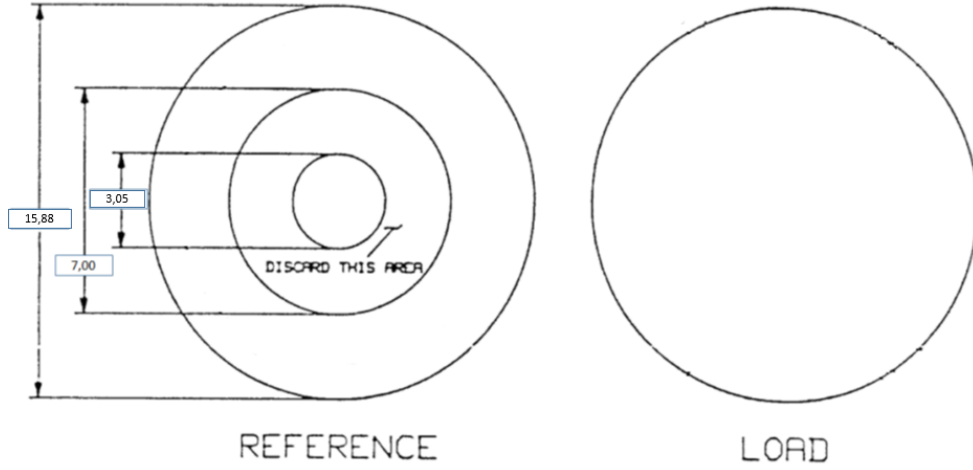
Aynı prensiple 1,5 GHz-10 GHz aralığında çalışan fikstürde de milimetre olarak numune boyutları frekansa bağlı olarak oldukça küçülmektedir (Şekil 2.24, Şekil 2.25 ve Şekil 2.26).



Şekil 2.24: Yatay test konumunda 1,5 GHz-10 GHz'lik frekans aralığında ASTM D 4935 test fikstürü, fikstürün içi ve referans ve yük numuneleri [50].



Şekil 2.25: 30 MHz- 1,5 GHz frekans aralığı numune boyutları ve test fikstürü çalışma prensibi.



Şekil 2.26: 1,5 GHz-10 GHz aralığında çalışan fikstürde de numune boyutları (mm).

ASTM D4935'e göre EMG KE ölçümü iki kısımla icra edilir. Öncelikle referans numune kapasitif kuplajı (yani aslında iletkenlerin birbirleri üzerinde yarattığı gürültü akımlarını) dengelemek ve bir baseline almak için test fikstürüne yerleştirilir ve ölçüm gerçekleştirilir. Referans numunesi bir halka içinde bir diskten oluşmaktadır.

İkinci aşamada ise gerçek ölçüm numunesi “yükü” koaksiyel tutucunun fikstürün içine yerleştirilir ve sabitlenir. İki ölçüm arasındaki fark KE olarak belirlenmektedir. Numunelerin Kalkanlama Etkinliği değerleri belirlenirken (2.26) kullanılır [51].

$$KE (dB) = \text{Referans ölçüm sonucu (dB)} - \text{Yük ölçüm sonucu (dB)} \quad (2.26)$$

Koaksiyel tutucu ölçüm sisteminin avantajları direkt, kompakt, network analizöre bağlı ve bilgisayar kontrollü olması ham veri almaya ve işlemeye olanak sağlaması, ölçüm süresi kısalığı ve ölçümün ortamdaki bağımsız olmasıdır. Ancak bu metot için numune hazırlama aşaması oldukça kritiktir. Numune muhtevasında homojenite, kalınlık bakımından uygunluk ve numune boyunca benzerlik olması, yüzey pürüzlülüğü gibi faktörler önem arz etmektedir. Bu ölçüm yöntemi kupon seviyesi malzeme testi olarak da değerlendirilebileceğinden diğer yöntemlere görece daha küçük boyutlu numuneler kullanılmaktadır. Özellikle yüksek frekans ölçümlerinde numunenin dış çap boyutları 1,5 cm civarında neredeyse küçük bir pul boyutuna iner kalınlıklar  $1 \pm 0,5$  mm'dir. Numune hazırlamak ve her numunede (referans ve yük

dahil) homojenliği, düzlemselliği ve kalınlık dengesini yakalamak oldukça zahmetlidir. Ayrıca oldukça ince numuneler ile çalışıldığından koaksiyel tutucu ve numune arasındaki kontak direnci de oluşabilir [47,48].

Bu tez çalışması kapsamında da koaksiyel tutucu metodu 1,5-10 GHzlik fikstürde ASTM D4935'e göre EMG KE ölçümleri yapıldığından bu metodun detaylarına değinilmiştir. Numuneler şekil 2.26'deki boyutlarda hazırlanmıştır. Numune hazırlama detayları da bölüm 3'de sunulmuştur.

### **2.3.Elektromanyetik girişimi kalkanlamada kullanılan malzemeler ve metotlar**

Bir EMG kalkanlama malzemesinin güçlü absorplama, geniş bantta çalışma kabiliyeti (spektrum boyunca benzer seviyede kalkanlama), daha az kalınlıkta kullanılabilme, boyutsal ve termal kararlılık, proses edilebilirlik, maliyet etkinlik ve uzun çalışma operasyon süresi olması en ideal senaryodur [39].

Örneğin, mikrodalga radyasyonunu manyetik dipol oluşturma kabiliyeti ile absorplayan demir, nikel, kobalt ve nadir toprak elementleri gibi manyetik metaller de yüksek yoğunlukludur ve dar bant genişliğinde etkin kalkanlama yapabilirler.

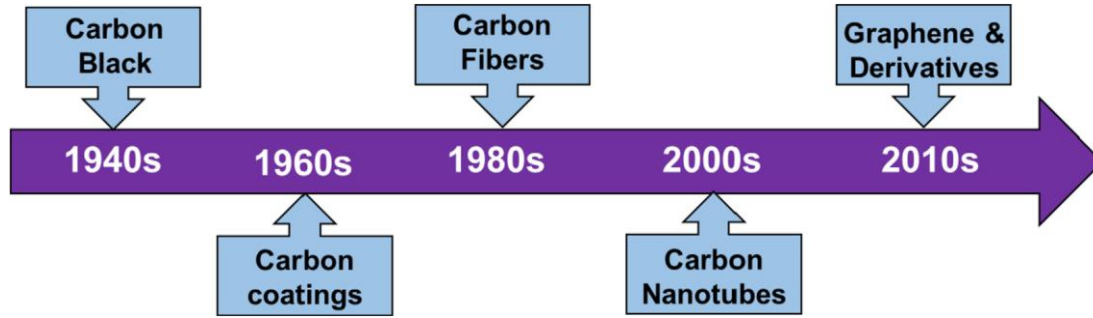
Kendinden iletken polimerler hafiftir, esnektir. Ancak proses edilebilirlik ve mekanik özellikler anlamında zayıftırlar. Konvansiyonel polimerlerle blend edilerek kullanılabilmektedirler.

EMG kalkanlama malzemeleri bölümünde de detaylıca bahsedildiği üzere EMG kalkanlama uygulamaları için hafif, yüksek verimli, büyük ölçekli üretime uygun, özgün ve maliyet etkin malzemelere yönelik için bir arayış vardır. Bu noktada karbon bazlı malzemeler ve nanomalzemeler; hafiflik, proses edilebilme avantajları, esneklik, korozyona karşı direnç, üstün elektriksel özelliklerle iletken yol oluşturabilme kabiliyetleri, mekanik ve termal özellikleri nedeniyle çeşitli alanlarda EMG kalkanlama uygulamalarında da kompozit matrislerde değeriendirilmektedir.

EMG kalkanlama için karbon malzemeleri esas olarak karbon siyahı (CB), karbon fiberler (CF), karbon nanotüpler (CNT), grafit, grafen nano tabakalar, grafen oksit (GO) ve indirgenmiş grafen oksit (RGO) içerir.

EMG kalkanlama tarihine bakıldığında (şekil 2.27) karbon malzemelerin kullanımı 1936 yılına dayanmaktadır. Hollanda-Belçika firması Naamlooze Vennootschap

Machinerieen'in karbon karası ve ve TiO<sub>2</sub> içeren 2 GHz bölgesi için EM dalga absorplayıcı ürettiğini bildirmesi ile başlamıştır [52].



Şekil 2.27: EMG kalkanlama uygulamalarında kullanılan karbon malzemenin tarihsel süreci [39].

İkinci Dünya Savaşı sırasında, denizaltı şnorkellerinin ve periskoplarının kamufle edilmesi, karbon karası içeren malzemeler tarafından sağlandı. Karbon karası ve alüminyum parçacıkları dolgulu kauçuk içeren “HARP” (Halpern-Anti-Radar-Boya) olarak bilinen malzemeler, X-bandında 15-20 desibel (dB) kalkanlama 1941-1945 döneminde ABD projesi Halpern'den elde edilmiştir [52].

Grafit ve karbon karası, 1990'larda CNT'lerin icadına kadar EMG Kalkanlama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. 2010'dan beri ise grafen ve yine karbon bazlı çeşitli nanoyapılar iki boyutlu malzemeler (örn. MXene'ler) EMG Kalkanlama malzemeleri olarak revaçtadır ve daha yaygın kullanım potansiyeli taşımaktadır [39]. Metalik malzemeler içeren kaplama, boya ve kalkanlama malzemelerin dezavantajları değerlendirildiğinde uygulamaya göre kalkanlama performans isterlerini karşılayan yenilikçi, özgün, maliyet etkin yapılar üretme gayreti sektörde ve akademide sürmektedir.

Bir yapıda EMG Kalkanlamanın tüm isterleri (kalkanlama etkinliği dB değeri, yenilikçi, özgün, maliyet etkin, spektrum boyunca geniş bir bant aralığında stabil kalkanlama, hafiflik, proses edilebilirlik, uzun servis ömrü gibi.) genellikle tek bir malzeme grubu çalışılarak sağlanamamaktadır.

Karbon bazlı malzemeler ve nanomalzemeler; polimerler ve seramikler gibi yalıtkan matrisler için iletken dolgu/katkı olarak kullanılabildiği gibi dielektrik malzemeler ve manyetik malzemeler ile nanohibrit yapılar oluşturularak da yapı içerisinde

kullanılabilirler. Nano ölçekte farklı konfigürasyonlarda kullanılabilme, bir başka malzeme/yapı üzerinde büyütülebilme, matrislere entegre edilebilme kabiliyeti sayesinde karbon bazlı nanomalzemeler çok yönlü bir alternatif olarak EMG Kalkanlama uygulamalarında kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında önerilen yapı da bu tip bir alternatif olup nikel parçacıktan gelen manyetik dipol oluşturma kabiliyeti ve nikelin üzerinde grafen büyütülerek grafenin üstün elektriksel özelliklerinden gelen iletken yol oluşturma kabiliyetini temel alır. Grafeni, bireysel nikel parçacıkları üzerinde sinterlenmeden büyütebilmek; grafen kapsüllü nikel yapılar oluşturabilmek amaçlanır. En dış katmanda olan grafen iletkenliği sayesinde matriste iletken yol oluşturarak elektron ve hollerin hareketi ile Faraday kafesine benzer mantıkla yansıtma mekanizmasını çalıştıracaktır. İç katmandaki nikel parçacıklar ise manyetik dipol oluşturma kabiliyetine sahiptir. Manyetik dipoller sayesinde kalkan malzemesi içinde bir iç manyetik alan (internal magnetic field) oluşturur.

Bu alan gelen EM dalgaya genelde zıt yönde olur ya da gelen EM dalganın şiddetini sönmüleyerek azaltıcı dalga penetrasyonunu manyetik komponentin yönelimini bozacak şekilde engelleyerek azaltır. Bu durum yani sönmüleme genelde EM enerjinin kalkan malzemesinde absorplama mekanizması çalışırken ısı olarak dağılması ile son bulur. Önerilen grafen kapsüllü nikel yapısında hem manyetik dipol oluşturma kabiliyetli nikel ile manyetik kayıplar yaratarak yani absorplama mekanizmasının tetiklenmesi; hem de grafenin üstün iletkenlik özelliği ile gelen dalganın elektron ve hol hareketi ile faraday kafesi mantığıyla iletken yol boyunca ilerlemesiyle yani yansıtma mekanizmasını tetiklenmesi beklenmektedir.

Literatürde ve sektörde genel olarak kullanılan tüm malzeme ve metotlar bu bölümde çeşitli örneklerle sunulmuştur. Örneğin metaller elektriksel olarak iletken olduklarından EMG'yi bertaraf etme konusunda oldukça avantajlıdır. Aşağıda çeşitli metaller ve iletkenlik değerleri verilmektedir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3: Belirli başlı metaller ve iletkenlik değerleri [2]

Metals	Conductivity (S/cm)
Silver	$6.8 \times 10^5$
Copper	$6.4 \times 10^5$
Aluminum	$4.0 \times 10^5$
Brass	$1.7 \times 10^5$
Nickel	$9.7 \times 10^4$
Steel	$6.3 \times 10^4$
Stainless steel	$1.8 \times 10^4$
Electroless Nickel	$1.8 \times 10^4$
Graphite	$5.0 \times 10^2$

Polimer ve kauçuk türevi malzemeler metallerin aksine yalıtkan ve elektromanyetik dalgalara karşı geçirgendir. Bu sebeple plastikleri ve polimer matrisli kompozitleri EMG'ye karşı korumak için literatürde aşağıdaki malzemeler kullanılmakta ve yöntemler izlenmektedir:

- Plastiklere İletken Kaplama Uygulanması
- Metallerin Kullanılması
- Kendinden İletken Olan Polimer Türlerinin Kullanılması
- Karbon Bazlı İletken Dolgu Malzemeleri Kullanılması
- Köpük, Bal Peteği ve Çok Katmanlı Yapılar Kullanılması

### 2.3.1. Plastiklere iletken kaplama uygulanması

EMG Kalkanlama için plastik yüzeylere metalik kaplama işlemleri oldukça yaygındır.

Bu kapsamda uygulanan kaplama prosesleri:

- Folyo Laminasyonu
- İyon Kaplama (Ion plating)
- Vakumda Metal Kaplama (Vacuum Metallization)
- Çinko Alev Püskürtme (Zinc Flame Spraying)
- Çinko Ark Spreyleme (Zinc Ark Spraying)
- Katot Tonlaması (Cathode Sputtering)
- İletken Boyalar
- Elektriksiz Kaplama (Electroless plating)
- Elektrokaplama (Electroplating) gibi proseslerdir.

Tüm bu kaplama prosesleri ikincil operasyonlar olduklarından, ekstra yüzey hazırlama işlemleri için iş gücü, ekipman, zaman ve maliyet gerekmektedir. Ayrıca kaplamanın zamanla yüzeyden sökülmesi, aşınması ve çizilmesi gibi dezavantajlar da bu prosesler için söz konusu olabilmektedir [2,7].

### 2.3.2. Metallerin kullanılması

Metaller, metal oksit, karbür ve nitrürler EMG kalkanlamada birçok biçimde kullanılmaktadır. Bunlardan en temel olanlarına bu bölümde ayrıntılı yer verilmektedir.

#### 2.3.2.1. Metal folyo, şerit, meş ve filamentlerin kullanılması

Endüstride EMG Kalkanlamada kullanılan folyolar, şeritler ve meşler alüminyum ve bakırdan elde edilmektedir. Genelde folyo ve şeritlerin arka kısmında yapıştırıcısı (adhesive backing) bulunup istenilen yüzeye kolayca tatbik edilebilmektedir. Bu şerit veya folyoların arka yapıştırıcısının iletken olanları (conductive adhesive) da mevcuttur. İletken yapıştırıcılı folyo ve şeritler EMG kalkanlamada daha iyi bir performans sergilemektedirler. Bakır ve alüminyum folyo/şeritler geniş bir frekans aralığında (200KHz-1GHz) Elektromanyetik Uyumluluk (EMC: Electromagnetic Compatibility) sağlayabilmektedir. Şekil 2.28'da bakır ve alüminyum folyo/şerit örnekleri görülmektedir [Url-27, Url-28].



Şekil 2.28: EMG Kalkanlamada kullanılan bir bakır şerit (TBA Protective Solutions, Co.), EMG Kalkanlamada kullanılan bir alüminyum folyo (3M, Co.) [Url-27, Url-28].

Metal meşler ise iletken bir ağ örgüsü oluşturarak, etkin bir Faraday Kafesi mantığıyla malzemeyi EMG'den korur. Metal meşler Şekil 2.29'te görüldüğü üzere genellikle bakır, paslanmaz çelik ve bronzdan üretilmektedir [Url-29].



Şekil 2.29: Çeşitli örgü metal contalar ve metal meşler (Boegger Industrial Limited) [Url-29].

Bunun yanında prepeg şeklinde reçine emdirilmiş olarak bulunan metal meşler de mevcuttur (Şekil 2.30). Bu tip meşler genellikle ATL (Automated Tape Layup) proseslerinde tercih edilmektedir. Havacılıkta Yıldırım Çarpmasına karşı hava aracını korumak amacıyla da kullanıldıklarından isimleri endüstride “Yıldırım Çarpması için Prepeg” (Lightning Strike Prepeg)” olarak da geçmektedir [Url-30].

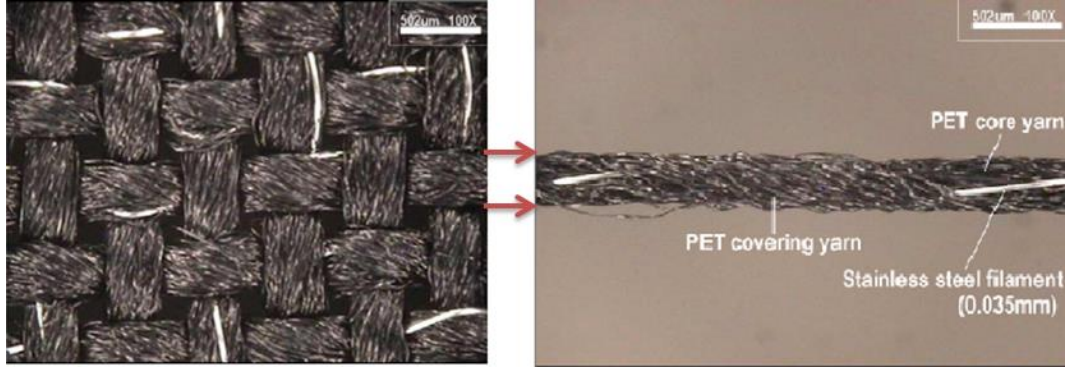


Şekil 2.30: Prepeg şeklinde bakır meş (3M™ Scotch-Weld) [Url-29].

Aynı zamanda; bakır, paslanmaz çelik, alüminyum, titanyum, pirinç, nikel gibi metal filamentler ise iletken olmayan diğer fiberlerle birlikte dokunarak kompozit yapıya

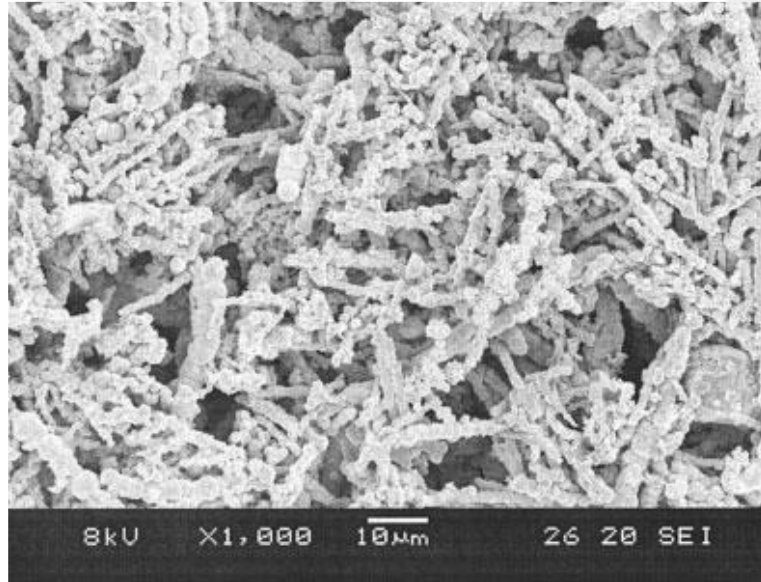


boylu boyunca (continuous filament) entegre edilebilir ya da kırık olarak (chopped) kullanılabilir. Örneğin, Şekil 2.31’de boylu boyunca paslanmaz çelik filamentler üzerine PET fiber demetleri sarılarak bu yapının dokunduğu görülmektedir [53].



Şekil 2.31: PET ve paslanmaz çelikten dokunan metal kompozit yapı [53].

Nikel filamentlerin de çeşitli matrislerde EMG Kalkanlama uygulamaları için kullanımına rastlanmaktadır. ABS matrisine hacimce yaklaşık %3 nikel filament katkılı olduğunda (Şekil 2.32) 36 dB’lik EMG KE elde edildiği Chou ve diğerleri tarafından gösterilmiştir [54].



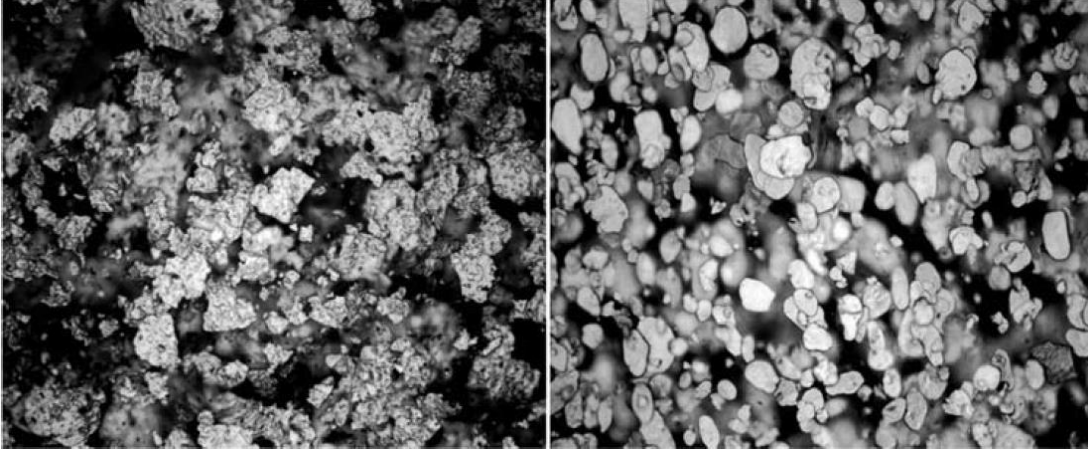
Şekil 2.32: Ni/ABS kompozitinden klorform ile çözülerek ayrıldıktan sonra nikel filamentler (hacimce %3) [54].

### 2.3.2.2.Metal tozlar (powder) ve pulların (flake) kullanılması

Tozlar ve pul yapılı metalik parçacıklardan EMG kalkanlamada kullanılanları alüminyum, nikel, bakır, gümüş, altın, platin şeklinde sayılabilir. Bu metal parçacıklardan her birinin birbirine göre avantajları dezavantajları vardır. Örneğin, altın, gümüş ve platin tozları yüksek maliyetleri sebebiyle sınırlı kullanımdadır. Öte yandan fiyat açısından daha avantajlı olan bakır, nikel ve alüminyum tozları aynı zamanda polimer matrisi içine katkılандığında alüminyum tozlara göre oksidasyondan daha az etkilenmektedir [55].

Alüminyum pullar (Al flakes) PES matrisli bir kompozit yapının içerisinde iyi bir bağlanma arayüzeyi oluşturarak hem mekanik dayanım hem de elektriksel iletkenlik açısından oldukça iyi bir performans gösterirler. Örneğin, PES matrisi içinde ağırlık %40 katkılanan Al pullar yaklaşık 50 dB kalkanlama etkinliği gösterebilirken (1-2 Ghz aralığında), çekme mukavemetleri 67 MPa civarındadır [1].

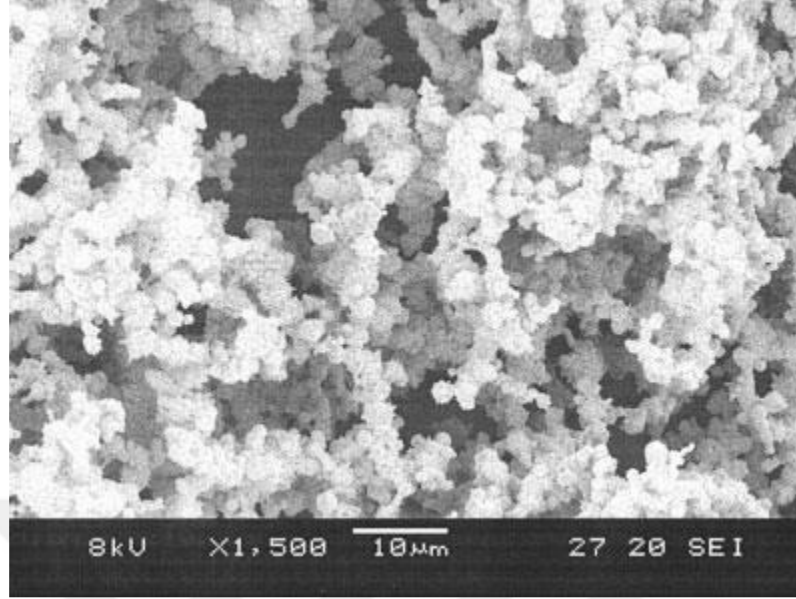
Alüminyum pul yapıların Şekil 2.33'de görüldüğü gibi öğütülmüş ve pürüzsüzlüğü artırılmış olanları da mevcuttur. Bu tip yapılar öğütme (milling) işlemi ile elde edilmektedir.



Şekil 2.33: a) Al pul yapıları b) Yüzey pürüzlülüğü azaltılmış (öğütülmüş) Al pul yapıları [1].

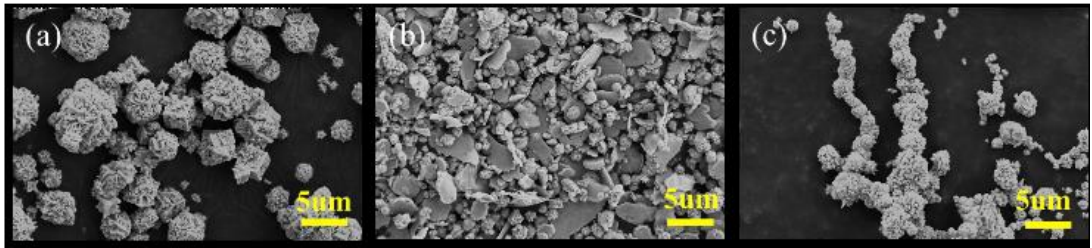
Nikel tozu (Şekil 2.34), ABS gibi bir termoplastik matrisine katkılандığında EMG KE değeri elde edebilmek için hacimce en az %20 nikel tozuna ihtiyaç bulunmaktadır.

Nikel seviyesi hacimce %20'nin üzerinde olduğunda EMG KE görülmeye başlamıştır [54].



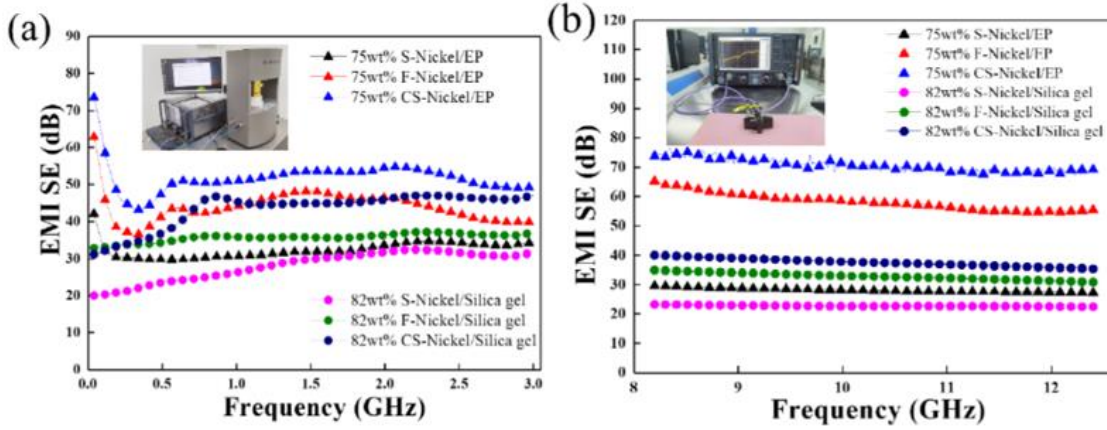
Şekil 2.34: 0,7 m<sup>2</sup>/g BET yüzey alanına ve 2,2–2,8 mikron ortalama parçacık boyutuna sahip nikel tozu [54].

Kompozit yapılara katılan nikel tozlarının morfolojilerine göre yapılan bir EMG KE karşılaştırma çalışmasında Wang ve diğerleri küresel (spherical-S), pulsu (flaky-F), birbirlerine bağlantısallı küresel (chain spherical-CS) geometrili tozlar silika jel matrise (82 ağırlık %) ve epoksi matrise (75 ağırlık %) katılanmıştır (Şekil 2.35).



Şekil 2.35: Küresel (spherical -S), pulsu (flaky -F), birbirlerine bağlantısallı küresel (chain spherical -CS) geometrili nikel tozlar [56].

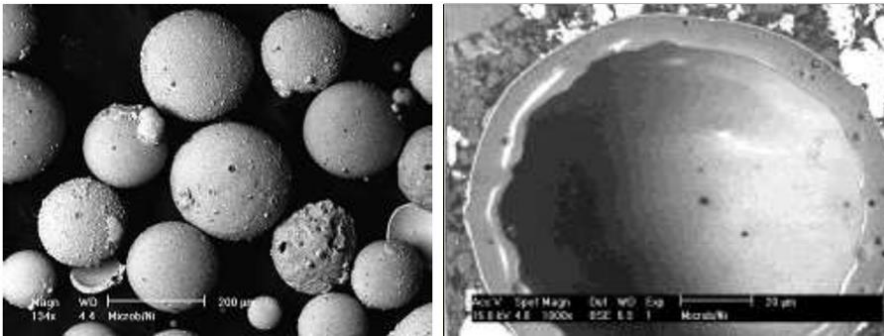
Katkılama sonrası oluşturulan kompozit yapılardan EMG KE değerleri ölçülmüştür. En iyi sonuçlar bağlantısallı küresel nikel tozları içeren kafileden alınmıştır (Şekil 2.36) [56].



Şekil 2.36: Sırasıyla 10 MHz- 3 GHz ve 8.2- 12.4 GHz'de farklı morfolojide nikel silika jel ve epoksi matrislerde ölçülen kompozitlerin EMG KE'si [56].

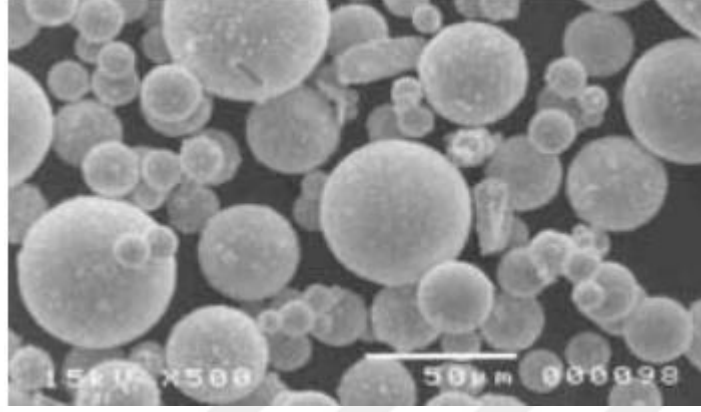
### 2.3.2.3. Metal ile kaplanmış küresel yapıların kullanılması

Metal kaplı içi boş seramik kürecikler mekanik dayanımı ve hafifliği bir arada sağlayıp kompozit yapının termal genişmesini de kontrol altında tutma imkanı verdiği için tercih edilen metotlar arasındadır. 1-400 mikron çapında kürecikler, 50 ila 800 nm kalınlığında bir metal (alüminyum, nikel ya da gümüş) ile kaplanmış halleriyle ticari ürün olarak EMG kalkanlama etkinliklerinde kullanılmak üzere piyasada bulunmaktadır (Şekil 2.37 ve Şekil 2.38). Bu metal kaplı küreciklerin aynı zamanda Mg, Al, Ni, Ti, Fe gibi metalik matrislerin içinde de dağılımı sağlanarak kullanılabilir, preslenebilir ve dövülebilir [Url-31].



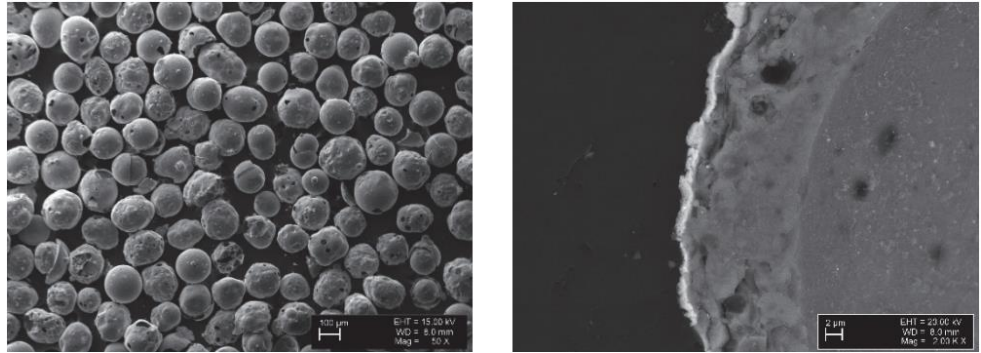
Şekil 2.37: (a) Nikel kaplı kürecikler (200 µm), (b) Nikel kaplı bir küreciğin kesit alanı (20 µm) (Accumet Materials, Co.) [Url-32].

Ayrıca, cam kürecikler gümüş ile kaplanarak iletken yapılar oluşturulup, hem termal olarak stabil hem de kimyasal olarak inert, EMG kalkanlamada kullanılmak üzere ticari ürünler elde edilebilmektedir [Url-33].



Şekil 2.38: Gümüş kaplı cam kürecikler 500x büyütme (Potter Industries Inc. Conduct-O-Fill S 3000 S3M) [Url-33].

Literatürde yine paramanyetik metal (genellikle bakır ve alüminyum) kaplı seramik içi boş küreciklerin de EMG kalkanlama uygulamalarında kullanıldığı görülmektedir. Bu kürecikler kömür yakan termik santrallerin uçucu tozlarından elde edilmiş 50-250 µm çaplı küreciklerdir (Şekil 2.39). Manyetron kaplama (magnetron sputtering) ile 0,5-1,3 µm kalınlığında bakır kaplanmakta, oluşturulan bu metal kaplı kürelerin kompozit yapı içerisinde EM dalgaları soğurduğu saptanmaktadır [57].



Şekil 2.39: a) Alüminyum kaplı seramik içi boş yapılar 50x b) Kesit alanı 2000x büyütme [57].

#### 2.3.2.4.Metal ile kaplanmış fiberlerin kullanılması

Metal fiberler, metal pullara (flakes) göre sürekli (continuous) bir yapı gösterdiklerinden EMG kalkanlama uygulamalarında daha çok tercih edilmektedirler. Karbon fiberlere göre de metal fiberler elektriksel iletkenliklerinden dolayı EMG kalkanlamada daha etkindirler. Ancak, karbon fiberler ise oksitlenme direnci ve termal stabiliteleri nedeniyle tercih edilmektedirler. Hem metallerin hem de karbon fiberlerin özelliklerinden yararlanmak adına, karbon fiberlerin üzerine 1 mikronun altındaki kalınlıklarda metal kaplamak uygun bir çözüm olacaktır. Örneğin, literatürde 0,1 mikronluk karbon filamentlerin üzerine 0,3 mikron kalınlığında nikel elektrokaplama uygulanarak nikel kaplı karbon filamentler üretildiği çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda karbon oranı nikel oranından çok daha az olduğundan bu yapı “nikel filament” olarak adlandırılmaktadır. Çizelge 2.4’de görüldüğü üzere nikel filamentlerin mevcut olduğu durumda kompozitin kalkanlama etkinliği 87 dB ile en büyük değere ulaşmıştır [44].

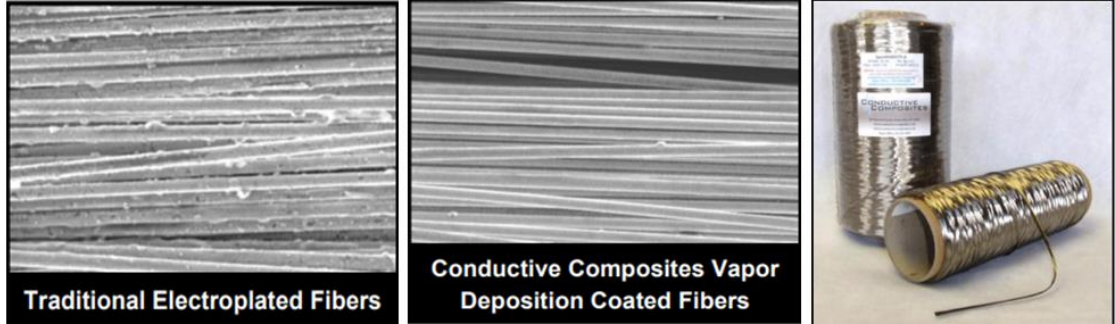
Fiberi metal ile kaplama uygulamalarında ağırlıklı olarak nikel tercih edilmesinin sebebi nikelin, bakır ya da diğer iletkenlere göre oksitlenme direncinin çok daha yüksek olmasıdır. Herhangi bir şekilde oksitlenen bir kaplama iletkenliği düşürerek kompozit parçasındaki iletken yolu (conductive path) bozacağından tercih edilmemektedir.

Çizelge 2.4: PES matrisli kompozitlerin 1-2 GHz aralığında farklı dolgu malzemeleri için kalkanlama etkinliği [44].

Filler	Vol.%	EMI shielding effectiveness (dB)
Al flakes (15×15×0.5 μm)	20	26
Steel fibers (1.6 μm dia.×30~56 μm)	20	42
Carbon fibers (10 μm dia.×400 μm)	20	19
Ni particles (1~5 μm dia.)	9.4	23
Ni fibers (20 μm dia.×1 mm)	19	5
Ni fibers (2 μm dia.×2 mm)	7	58
Carbon filaments (0.1 μm dia.×>100 μm)	7	32
Ni filaments (0.4 μm dia.×>100 μm)	7	87

Karbon fiberleri metal ile kaplama işleminin dezavantajları; metal kaplamadan kaynaklanan fiberdeki ağırlık artışı ve Elektrokaplama (Electroplating) ya da Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD-Chemical Vapor Deposition) gibi ikincil bir proses

gerektirmesidir. Şekil 2.40’da görüldüğü gibi piyasada her iki yöntemle de üretilmiş nikel kaplı karbon fiberler mevcuttur ve EMG kalkanlama uygulamalarında kullanılmaktadırlar [Url-34].

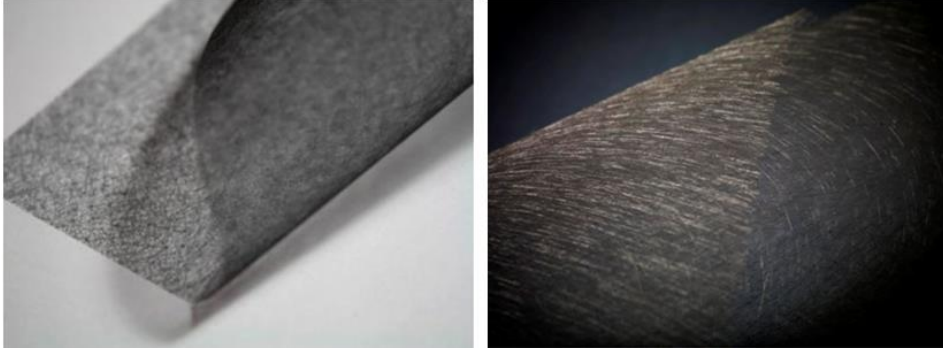


Şekil 2.40: (a) Geleneksel elektrokaplama kaplanmış fiberler (b) CVD ile kaplanmış fiberler ve (c) Nikel kaplı karbon fiber fitilleri (Conductive Composites, Co.) [Url-35].

Ayrıca literatürde metal ile kaplanmış polimer fiberler de mevcuttur. Bunların arasından en aktif olarak kullanılanlarından biri nikel ve bakır kaplı polyester fiberlerdir. Bu tip fiberlerden üretilen kumaş (fabric) yapının kalkanlama etkinliği yalnızca karbon fiberlerden dokunmuş kumaşlara veya metal kaplı karbon fiberlerden dokunmuş kumaşlara göre iyileşmektedir [58].

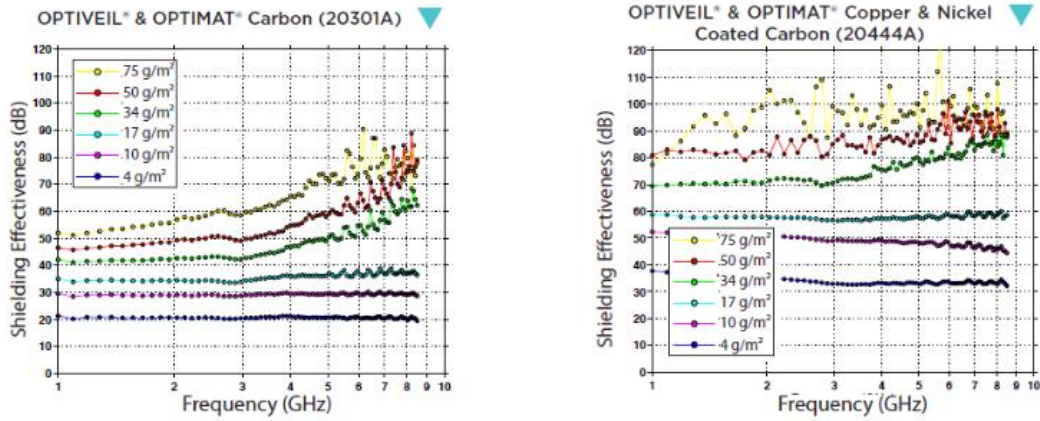
### 2.3.2.5. Metal ile kaplanmış tül ve keçe yapıların kullanılması

Karbon fiberlerin kısa-kırpık (short chopped) ve dokunmamış (non-woven) olanlarının bir organik birleştirici (organic binder) ile biraraya getirilmesiyle elde edilen yapılar keçe (mat) denilmektedir. Keçelerin (mat) birim alana düşen ağırlıkları daha az ve kalınlık bakımından daha ince olanları tül (veil) olarak adlandırılmaktadır. Endüstride ticari ürün olarak bulunan tüllerin birim alana düşen ağırlıkları 2-34 g/m<sup>2</sup> iken keçelerin 35-400 g/m<sup>2</sup> aralığındadır. Şekil 2.41’de görülen keçe ve tüller, yalnızca karbondan, nikel kaplı karbondan, nikel+bakır kaplı karbondan formlarıyla üretilerek EMG kalkanlama operasyonlarında kullanılmak üzere piyasada bulunmaktadır.



Şekil 2.41: Karbon ve metal kaplı karbon tül ve keçeler (Technical Fibre Products Ltd.) [Url-36].

EMG KE, fiberin çeşidi, kaplamanın muhtevası ve alansal ağırlığa göre uygulamaya özel hale getirilebilir. Şekil 2.42’de ticari karbon ve bakır ve nikel kaplı karbon keçeler ve yüzey tülleri gibi ürünlerin 1-8,5 Ghz arasındaki EMG kalkanlama etkinlikleri verilmiştir. Karbon ve bakır ve nikel kaplı karbon keçeler ve yüzey tülleri hafiflik, çeşitli kompozit imalat proseslerine uygunluk, ticari hazır raf ürünü olarak temin edilebilirlik gibi avantajları sayesinde EMG kalkanlama uygulamalarında tercih edilirler [Url-37].



Şekil 2.42: Karbon ve bakır ve nikel kaplı karbon keçeler ve yüzey tülleri 1-8,5 Ghz arasındaki EMG kalkanlama etkinlikleri (OPTIMAT OPTIVEIL ürünleri ) [Url-37].



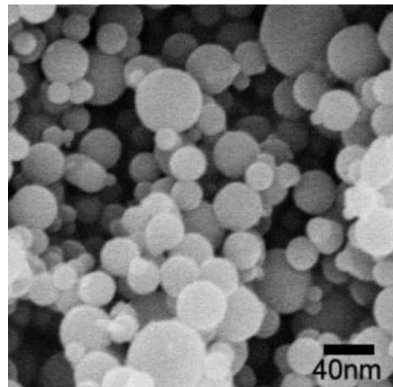
### 2.3.2.6.Metal ve metal oksit nanokatıkların kullanılması

Manyetik metal nanoparçacıklar küçük boyutları, geniş yüzey alanları, yüksek yüzey atomu yüzdeleri ile EMG kalkanlama uygulamalarında kullanılmak için oldukça uygundur. Özellikle demir, nikel ve kobalt, yüksek manyetizasyon değerlerine sahip olduklarından Gigahertz aralıklarındaki frekanslarda bile EM dalga absorplayıcı malzemeler olarak kullanılmaya en uygun adaylardır [59].

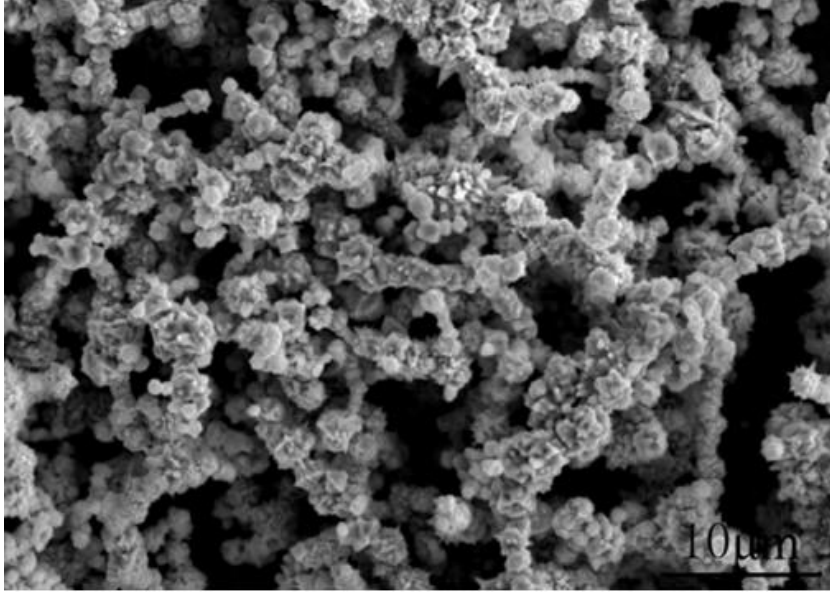
Demir oksit nanoparçacıkların kendinden iletken polimer olan Polipirol (Polypyrole-PPy) kapsülleri içine oksidatif polimerizasyon ile alınıp epoksi matrisi içinde karıştırılarak manyetik nanokompozitlerin sentezlendiği çalışmalar da literatürde mevcuttur [60].

Titanyum dioksit nanoparçacıkları da nanoferritlerle birlikte kendinden iletken polimer olan polianilin matrisi içinde ferrimanyetik nanokompozitler oluşturmak amacıyla mikro-emülsiyon polimerizasyonu ile sentezlenmektedir [61].  $TiO_2$  nanoparçacıklarının karakteristik özelliği yüksek dielektrik katsayılarından dolayı EM dalgalarını arayüzey polarizasyonu (interfacial polarization) ile absorblayabilmeleridir.  $TiO_2 + \gamma-Fe_2O_3 +$  polianilin tarafından oluşturulan kompozit yapı hem manyetik hem de dielektrik kayıplar oluşturarak EMG kalkanlama etkinliğini üst seviyelere çıkarmaktadır [62].

Öte yandan nikel de manyetik kayıplar yardımıyla EM dalgalarını absorblamada kullanılmaktadır. Piyasada ticari olarak EMG kalkanlamada kullanılmak üzere bulunan nikel nanoparçacıkları küresel ve dentritik olarak çeşitli boyut ve saflıklarda (Şekil 2.43 ve Şekil 2.44) temin edilebilmektedir [Url-38,63].



Şekil 2.43: Nickel nanoparticles Ni, 99.7% 40-60 Nm SkySpring Nanomaterials, Inc. 9220XH [Url-38].

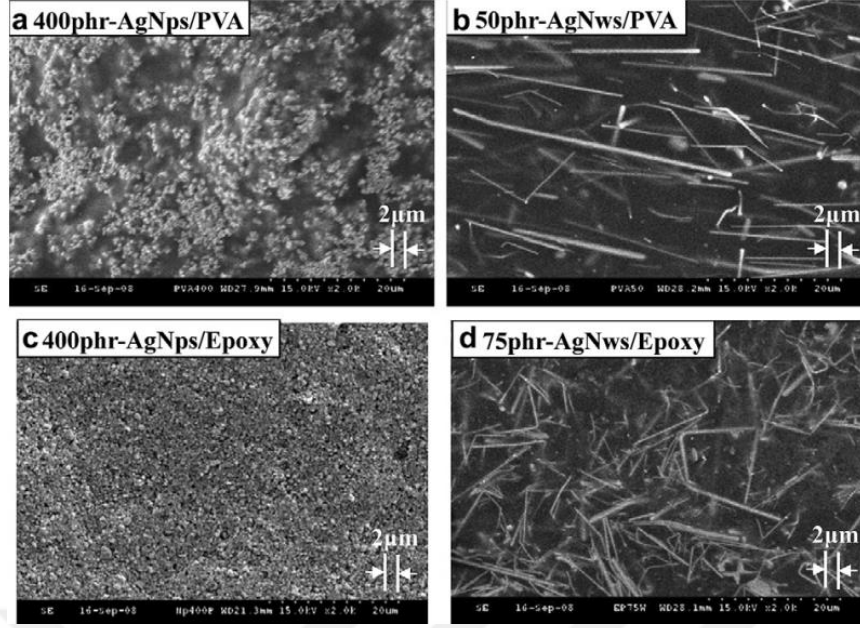


Şekil 2.44: Ticari saf nikel tozu (%99,0 saflık, 2,3 mikrometre) [63].

Gümüş nanoparçacıklar ve gümüş nanoteller (nanowires) de EMG kalkanlama operasyonlarında iletken film hazırlayarak ya da polimer matrislerin içine karıştırarak kullanılmaktadır. Bu tip uygulamalarda Gümüş Nanoteller (AgNw's) yüksek boy/en oranları (aspect ratio) sayesinde daha geniş ve stabil bir bağlanma yüzey alanı oluşturarak nanoparçacıklara göre daha düşük perkolasyon eşiklerinde benzer elektriksel iletkenlik değerleri verebilmektedirler [64].

Şekil 2.45'deki SEM görüntülerinde gümüş nanoparçacıkların ve nanotellerin PVA ve epoksi reçinelerde dağılımı çeşitli oranlarda gösterilmektedir. Alınan sonuçlara göre 50 phr (per hundred parts of resin) AgNw'nin PVA matrisinin içindeki hacimsel özdirenç değeri ve 400 phr (per hundred parts of resin) AgNP'nin PVA matrisinin hacimsel özdirenç değeri  $1.2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$  civarındadır. Yine aynı şekilde 75 phr (per hundred parts of resin) AgNw'nin epoksi matrisinin içindeki hacimsel özdirenç değeri ve 400 phr (per hundred parts of resin) AgNP'nin epoksi matrisinin hacimsel özdirenç değeri  $2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$  civarındadır [64].

Ayrıca antimon dope edilmiş kalay oksit nanoparçacıkları da (Antimony Doped Tin oxide- ATO) elektriksel iletkenliği artırıp iletken yol (conductive path) oluşturmak amacıyla PET gibi termoplastik polimerlere katılarak EMG kalkanlama uygulamalarında kullanılabilmektedir [65].



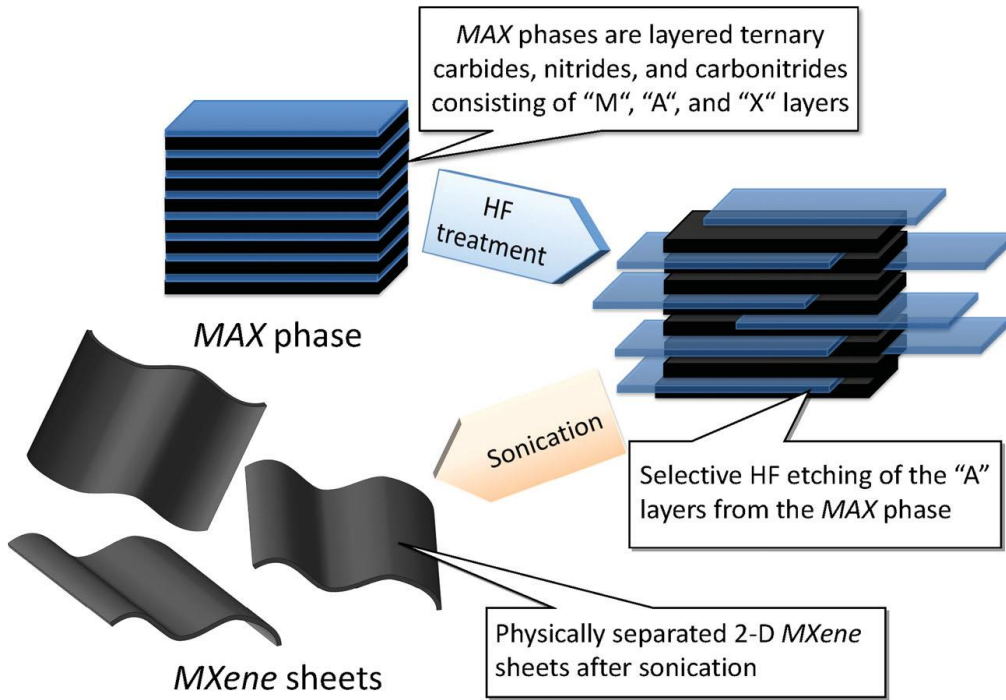
Şekil 2.45: Gümüş dağılımı gösteren SEM görüntüleri (a) 400 phr AgNP's/PVA, (b) 50 phr AgNw's/PVA, (c) 400 phr AgNP's/Epoxy, (d) 75 phr AgNw's/Epoxy [64].

Metal ve metal oksit nanokatıklar EMG kalkanlamada birçok polimer matrisi içinde kullanılabilirdiği gibi matris içinde homojen dağılımları ve perkolasyon eşik (percolation threshold) değerleri bu tip malzemelerin yapıda kullanılmasında önemli faktörlerdir.

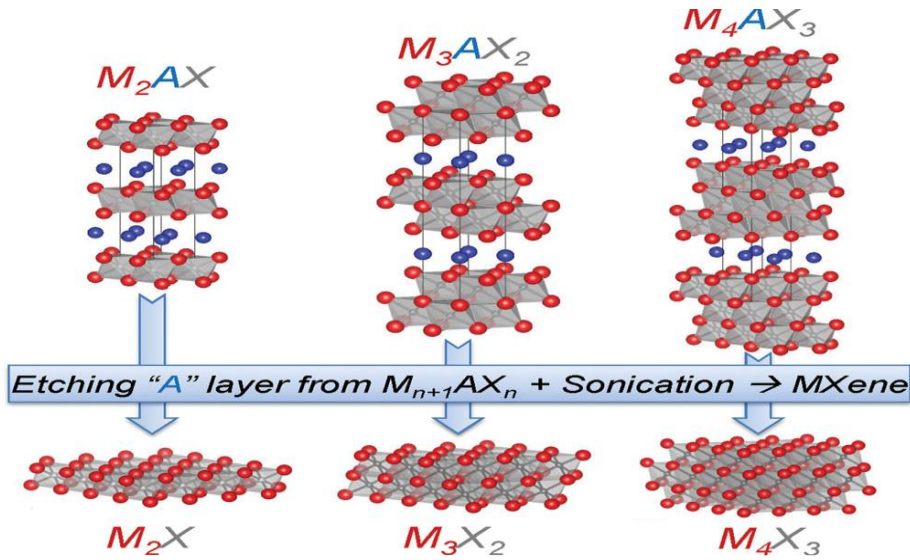
### 2.3.2.7.MXenelerin kullanılması

EMG kalkanlama teknolojisinde en güncel ve yenilikçi malzeme grubu olarak, “İki boyutlu metal karbürler, nitrürler ve karbonitrürler” yani ‘MXene’ olarak adlandırılan nanomalzemelerden bahsetmek gerekir [66]. MXene 2011 yılında Drexel Üniversitesi’ndeki Prof. Dr. Yury Gogotsi ve Prof. Dr. Michel W. Barsaun’un çalışma grupları işbirliğinde keşfedilmiştir [66, Url-39]. MXeneler çok iletken geçiş metali karbür ya da geçiş metal nitrürlerden (transition metalcarbides/nitrides) ve -O,-OH, -F gibi fonksiyonel gruplardan oluşan bir yapıya sahiptirler. Hidroksil ya da oksijenle biten fonksiyonel gruplarla sonlandıklarından hidrofilik özelliğe sahiptirler. Bu bağlamda MXeneler katyon transferi ve eklenmesinin çok kolay olduğu ‘iletken kil’ olarak adlandırılabilir [67].

MAX fazından A elementinin seçimli asitle aşındırılması (selective etching) ve sonikasyonun ardından MXene elde edilmiş olur (Şekil 2.46 ve Şekil 2.47).



Şekil 2.46: MXene sentezi şematik gösterim [67].



Şekil 2.47: MAX fazı ve MXenelerin yapısı [67].

MAX fazı ile kastedilen Şekil 2.48'deki periyodik tabloda belirtildiği üzere; M: İlk kısım geçiş elementleri, A: A grubu elementleri ve X: Karbon ya da nitrojendir. Genel formülleri  $M_{n+1}AX_n$  olup  $n=1,2$  veya  $3$ 'tür. Katmanlı üçlü metal karbür ve nitürler (layered ternary metal carbides and nitrides) MAX fazı olarak bilinir [68].

																		M early transition metal		A group A element		X carbon or nitrogen										
1 H Hydrogen																	2 He Helium															
3 Li Lithium	4 Be Beryllium																	5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon									
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium																	13 Al Aluminium	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon									
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton															
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Rhodium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon															
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57-71 Lanthanum series	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon															
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89-103 Actinide series	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Uut Ununtrium	114 Fl Flerovium	115 Uup Ununpentium	116 Lv Livermorium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium															
																		57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
																		80 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

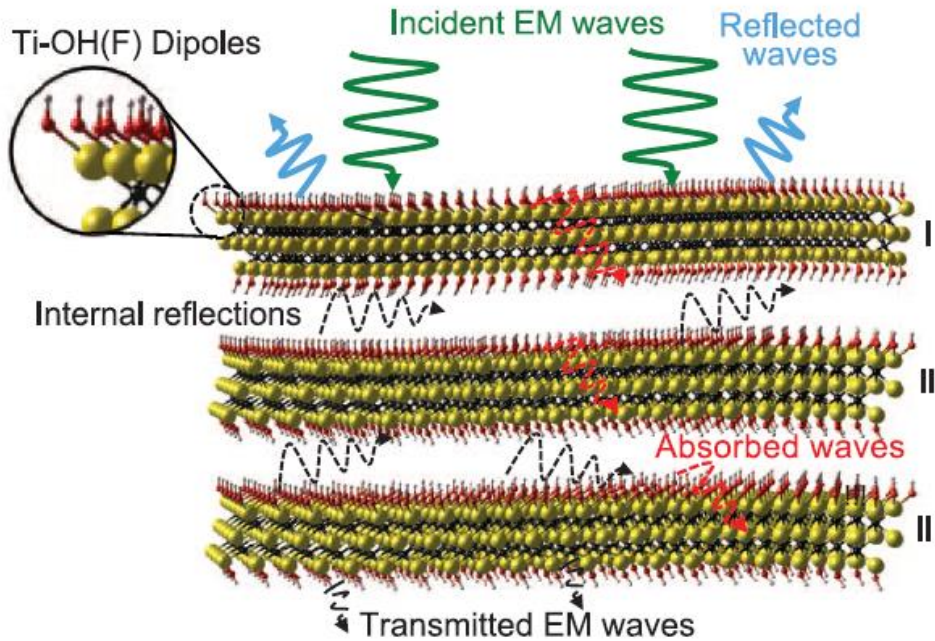
Şekil 2.48: Periyodik tabloda M,A,X metalleri [Url-40].

MXene'lerin başka bir iki boyutlu malzeme olan grafene göre avantajları mevcuttur. Grafen katmanları arasındaki Van der Waals etkileşimleri mekanik olarak (mechanical exfoliation) ayrılabilen zayıf etkileşimleridir.  $M_{n+1}AX_n$  katmanları arasındaki etkileşimler ise güçlü etkileşimlerdir. Güçlü etkileşimler mekanik etkilerle ayrılamazlar ancak güçlü etkileşimler barındıran bir yapıyı seçimli ayırmak (selective etching) mümkündür. MAX fazındaki A katmanları, tüm yapıya göre nispeten daha az güçlü olduğundan yapıdan seçimli olarak asit yardımıyla ayrılabilir. Böylece istenilen  $M_{n+1}X_n$  yapısı elde edilebilmektedir.

Ayrıca, grafen kompozisyon bakımından sadece karbonla sınırlı iken bilinen altmışın üzerinde farklı MAX fazı vardır. MXenelerdeki birden fazla element kompozisyonu, birçok yeni özellik ve çeşitliliği beraberinde getirebilmektedir. Bu bağlamda MXeneler enerji depolama, Li-iyon batarya, şeffaf iletken filmler, çevresel iyileştirmeler, süperkapasitörler, elektrokimyasal depolama sistemleri ve EMG Kalkanlama gibi uygulama alanlarında kullanılmakta ve ileri süreçte de daha aktif kullanılmak için muhtemel aday olarak görülmektedirler [69].

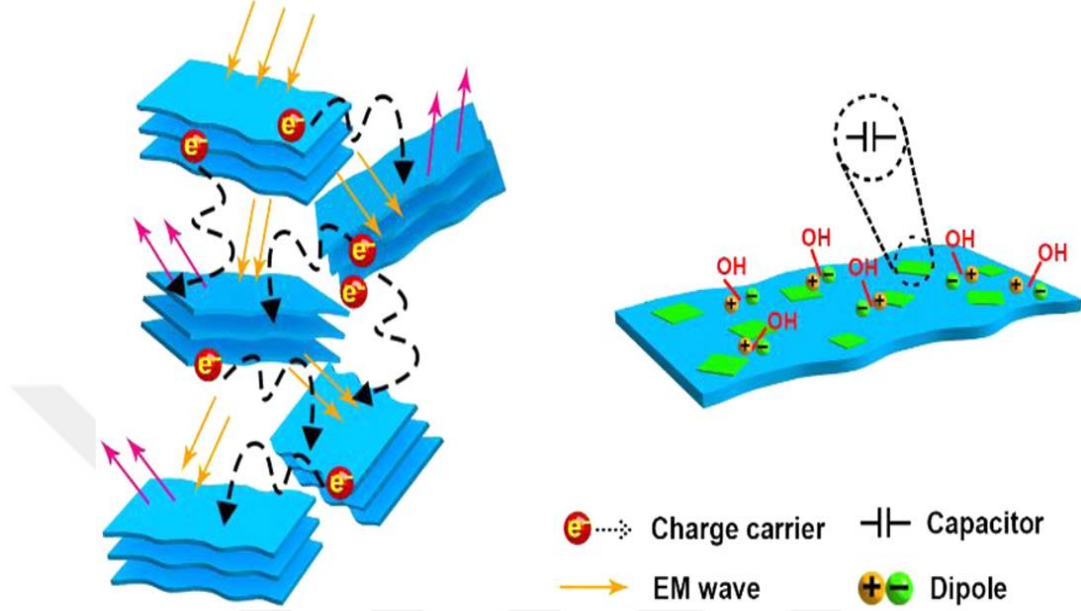
EMG Kalkanlama alanında MXenelerin kullanımına gelinecek olursa, yüksek iletkenliği ve esnekliği olan bu iki boyutlu yapıların potansiyeli oldukça yüksektir. Metalik iletkenliği ve hidrofilikliği yapısında barındıran MXeneler, polimer matrisli kompozitlerde EMG kalkanlama için kullanılmak üzere en uygun adaylardandır. Örneğin 45 mikronluk bir  $Ti_3C_2T_x$  film, 92 dB kalkanlama etkinliği göstermektedir, ki bu değer geçmişten günümüze üretilmiş olan benzer kalınlıktaki sentetik malzemelerle karşılaştırıldığında en yüksek değerdir. Bu yüksek performansın sebebi  $Ti_3C_2T_x$  filmlerin cm başına 4600 Siemens civarındaki elektriksel iletkenliği ve serbest halde bulunan  $Ti_3C_2T_x$  filmlerinin yapmakta olduğu çoklu iç yansımalarıdır (multiple internal reflections) [70].

Şekil 2.49'de de görüldüğü üzere MXene pullarına (flake) gelen EM dalgalarının bir kısmı yüzeyin yüksek oranda iletken olmasından ötürü birçok yük taşıyıcı (charge carrier) tarafından hızla taşınıp yüzeyden yansımaktadır (Şekil 2.49 mavi oklar). Yüzeydeki fonksiyonel gruplardan kaynaklanan dipol oluşumu da soğurma mekanizmasını tetiklemektedir (Şekil 2.49 turuncu oklar). Son olarak, geçebilen dalgalar da bir sonraki MXene puluna çarparak çoklu iç yansımalarla bertaraf edilir (Şekil 2.49 siyah oklar). Her MXene puluna çarptıkça EM dalganın şiddeti azalmaktadır [70].



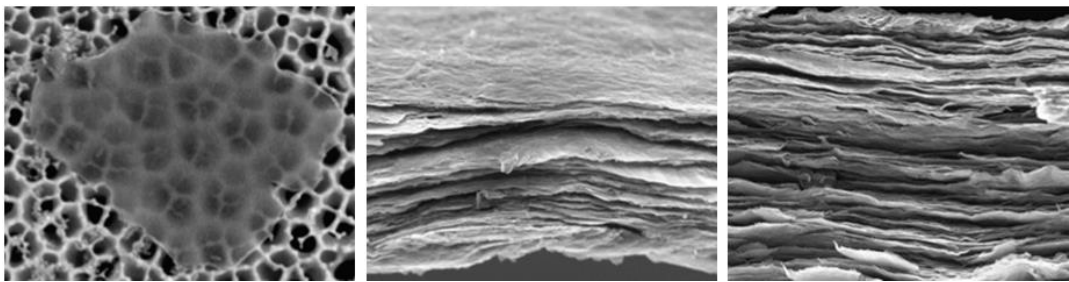
Şekil 2.49: MXenelerin EMG kalkanlama mekanizması [70].

Yüzeydeki hidrofilikliğı sağlayan –OH grupların aynı zamanda dipol polarizasyonunu tetiklemesiyle soğurma mekanizmasının devreye girmesi; yük taşıyıcıların gelen EM dalganın taşınması için iletken yol oluşturmaları ile yansıtma mekanizmasının devreye girmesi Şekil 2.50’deki görselde daha net bir şekilde sergilenmektedir [69].

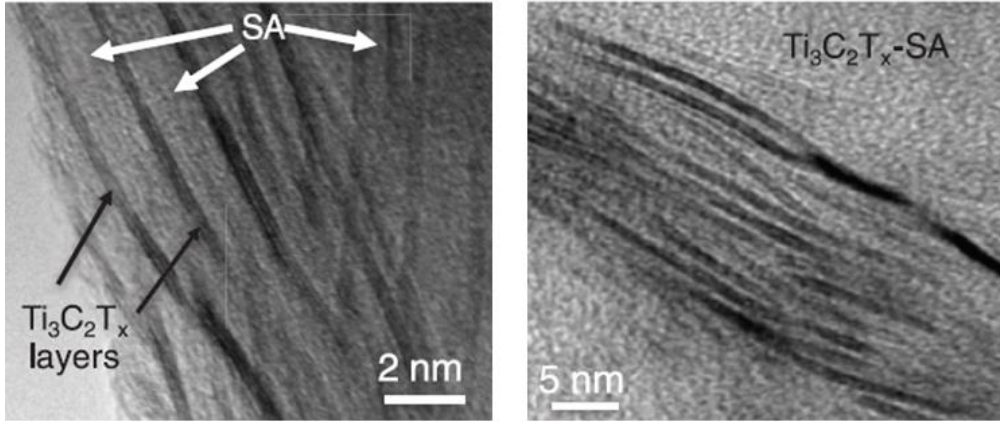


Şekil 2.50: MXenelerin EM dalgası soğurma ve yansıtmasının şematik gösterimi [69].

Polimer matrisli kompozitlere katılanıp kompozit film haline getirilince de MXeneler yüksek kalkanlama etkinliklerini devam ettirmektedirler. Şekil 2.51’te doğal bir biyopolimer olan sodyum alginat (SA) matrisine katılan MXenelerin SEM görüntüleri, Şekil 2.52’te ise TEM görüntüleri verilmiştir [70].

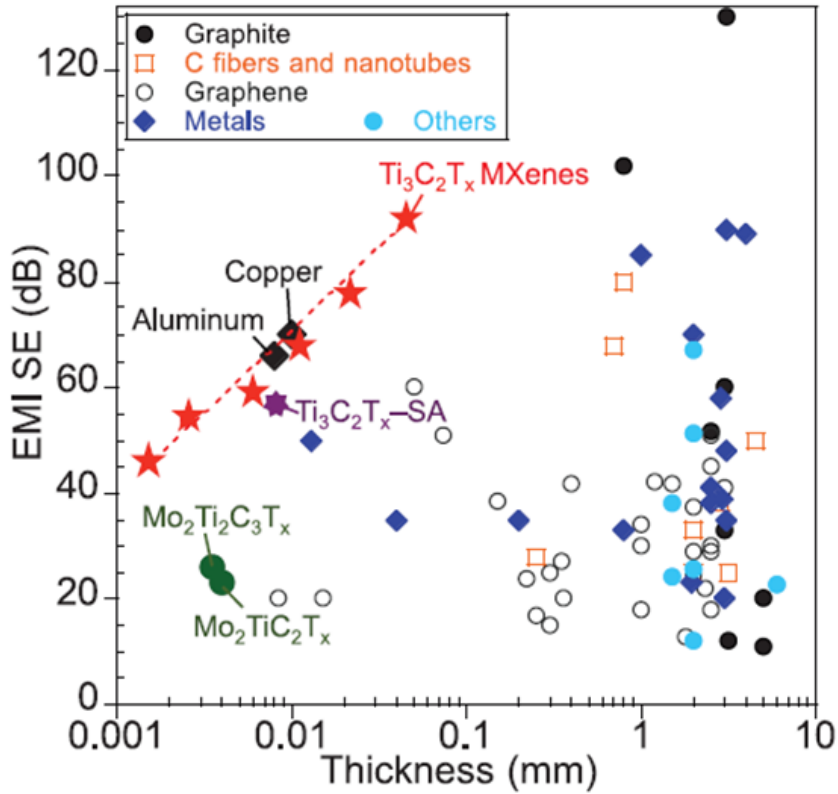


Şekil 2.51: SEM görüntüleri sırasıyla bir filtre üzerindeki bir  $Ti_3C_2T_x$  pulu, Saf  $Ti_3C_2T_x$ , 50 ağırlık %  $Ti_3C_2T_x$  +SA kompoziti [70].



Şekil 2.52: TEM görüntüleri (a)30 ağırlık %  $Ti_3C_2T_x$  +SA kompoziti ve (b)80 ağırlık %  $Ti_3C_2T_x$  + SA kompoziti [70].

Kalınlığa karşı kalkanlama etkinliği grafiğine bakıldığı zaman (Şekil 2.53) MXenelerin ince film yapılarında bile metallere, grafit, karbon fiber, karbon nanotüp ve grafene göre daha yüksek kalkanlama etkinliği gösterdikleri görülmektedir.



Şekil 2.53: Kalınlığa karşı kalkanlama etkinliği [70].



### **2.3.3. Kendinden iletken polimerlerin kullanılması**

Kendinden iletken polimerler (KİP) (intrinsically conductive polymers-ICP) hafif olmaları, korozyona karşı dayanıklı olmaları, kolay proses edilebilmeleri ve ayarlanabilir elektriksel iletkenlik değerleriyle EMG kalkanlama operasyonları için metallere göre avantajlıdır. En önemlisi KİP'lerde baskın olan mekanizma EM dalgayı soğurma, metallerde yansıtma olduğundan metallere göre sadece EM dalgayı kalkanlama değil EM dalgaya maruz kalınca düşük görünürlük (low observable) gerektiren uygulamalarda –hava aracı gibi- tercih edilmektedirler [71]. Ancak KİP'lerin mekanik özellikleri konvansiyonel polimerlere göre oldukça düşük olduğundan genelde konvansiyonel polimerlerle karıştırılarak kullanılmaktadır. Bu sayede istenen mekanik dayanım konvansiyonel polimerden gelirken, EMG kalkanlama özelliği de KİP'den gelmektedir. Kendinden iletken polimerlere literatürde bakılacak olursa, polipirol (PPY) ve polianilin (PANI) en yaygınları olmakla birlikte polifenilenvinilin (PPV) ve poli-3-oktioflin (poly-3-octylthiophene) de kullanan çalışmalar mevcuttur. Kalkanlama etkinliği karışıma eklenen KİP miktarı ile artmaktadır. Ancak, KİP'lerin mekanik özellikleri ve proses edilebilirlikleri konvansiyonel polimerler göre düşüktür. Yeterli bir kalkanlama etkinliği elde edebilmek adına karışıma eklenmesi gereken KİP miktarını arttırmak karışımın proses edilebilirliğini azaltmaktadır. Bu sebeple, polimerlerin karışım oranının dengeli ayarlanması bu tip çalışmalar için kritiktir [46].

### **2.3.4. Karbon bazlı malzemelerin kullanılması**

Özellikle polimer matrisli kompozitlerde dolgu malzemesi olarak karbon bazlı birçok çeşit katkı, hafiflik, korozyona karşı dayanım, esneklik ve proses edilebilirlik gibi sebeplerden ötürü kullanılabilir. Bu katkıların çeşitleri aşağıdaki alt başlıklarda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

#### **2.3.4.1. Karbon karası kullanılması**

Hidrokarbonların gaz fazda termal dekompozisyonu ile üretilmiş küçük boyutlardaki karbon pigmentlerine karbon karası (Carbon Black- CB) denir. Genellikle kauçuk içeren yapılarda mekanik özelliklerde mukavemet yönünden olumlu artış

sağladığından bu yapılarda yoğun olarak kullanılan bir dolgu malzemesidir. EPDM, SBR, siloksan, etilen akrilik ve kauçuk bazlı karışımlar (EVA/NBR, NR/BR, BR/LDPE) karbon karasının EMG kalkanlamada en çok kullanıldıkları matrislerdir. Ancak bu tip kompozit yapılarda en önemli nokta karbon karalarının birbirleri ile elektriksel iletkenliği yapı boyunca sağlayacak temas noktalarının mevcut olmasıdır. Karbon karası pigmentlerinin matristeki homojen dağılımı da kritiktir. Karbon karası düşük yoğunluklu polietilen, klorlanmış polietilen, polipropilen, polistiren gibi termoplastik polimer matrislerde ya da epoksi gibi termoset reçine sistemlerinde de kullanılabilir [46].

#### **2.3.4.2.Grafit kullanılması**

Temel olarak karbon karası ile grafitin yapıları birbirine oldukça benzerdir (hexagonal ring). Aralarındaki asıl fark katmanların (layer) dizilimidir. Grafitte katmanlar birbirlerinin üzerine oldukça düzenli bir şekilde yığılmıştır. Her bir karbon atomu üç boyutlu yapıda bir üstteki ve bir alttaki karbon atomunun tam altına gelecek şekilde bulunmaktadır.

Karbon karasının da katmanları grafitte benzer yapıdadır ancak karbon atomları tam olarak alt alta gelmemektedir ve hatta konsantrik iç katmanlar oluşturmaktadırlar. Grafitin bir diğer avantajı, dolgu malzemesi olarak kompozitlere katkılандığında ani ısı değişimlerine karşı karbon karası katkılanan kompozitlere göre daha geç reaksiyon göstermesidir [55].

EMG kalkanlamada kullanılan grafit genelde koloidal grafit ve esnek grafit olarak ayrılır. Koloidal grafit, su ya da alkol gibi bir sıvının içinde askıda kalmış halde bulunan ince grafit tozlarının polimerik bir bağlayıcı ile bir arada durduğu grafit tipidir. Koloidal grafit bir yüzeye sürülerek ya da çeşitli yöntemlerle uygulandığında içinde bulunduğu sıvı zamanla buharlaşarak grafit parçacıklarının kendileri arasında ve uygulanan yüzey arasında direkt temas yaratır ve EM dalgalarından kalkanlamış bir yüzey oluşturur. Bu tip uygulama genellikle televizyon faaliyet alanlarında kullanılan bir uygulamadır. Esnek grafit ise genellikle EMG'ye karşı dayanımlı conta (gasket) uygulamalarında kullanılmaktadır. Katman katman ayrılmış (exfoliated) grafit pullarının bir bağlayıcı olmadan basınçla bir arada tutulduğu yapıya esnek grafit

denilmektedir. Basınç etkisiyle iç içe geçen mekanik pullar bir bağlayıcı gerektirmeden birbirine kenetlenmiş halde kağıt (sheet) formunda durmakta ve yüksek bir mekanik dayanım sağlamaktadır. Yüksek yüzey alanı, düşük termal genleşme katsayısı (CTE), elektriksel iletkenliği, kimyasal ve termal dayanımı sayesinde esnek grafit yapısı EMG kalkanlama uygulamalarında etkindir [44].

#### **2.3.4.3. Karbon nanofiber kullanılması**

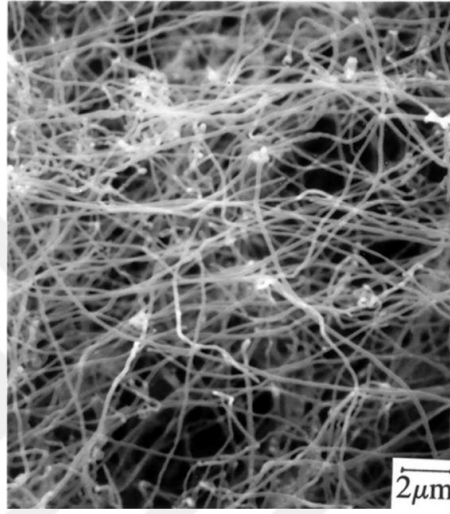
Karbon fiberler aslında PAN ya da pitch'in grafitizasyonu ile üretilmektedir. Grafitizasyon proseslerine göre daha ekonomik oldukları için nanofiber üretiminde genellikle hidrokarbonlardan buhar geçirilerek büyütme işlemi (Vapor Grown Carbon Nanofibers=VGCNF) aktif olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemle üretilmiş karbon nanofiberlerin morfolojisi katalizör tipine ve karbon kaynağına bağımlı olarak oldukça değişkendir. Genellikle katalizör kaynakları nikel, demir, bakır ve alaşımları iken karbon kaynakları propan, asetilen ve etilendir. Yapıları lineer, helis ve bükülmüş (twisted) olabilmekle beraber 50 ila 200 nm arasında değişen çapları ve 50 mikronu aşabilen boyları ile yaklaşık boy/en oranları (L/D aspect ratio) 250 civarındadır. Bu bağlamda karbon nanofiberler, yüksek aspect ratioları ile hem polimerik matrisler içinde dağılım açısından hem de yapıda iletken bir yol oluşturabilme açısından EMG kalkanlama uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. EMG kalkanlama uygulamalarında CNF'lerden istenilen performansı alabilmek için boy/en oranlarının bozulmasını yani fiberlerin proses sırasında kopmasını önlemek kritiktir. Bunlar sağlandığı takdirde karbon nanofiberlerin yapıda homojen dağılımlarını sağlayacak uygun bir dispersiyon metodu seçilmesi de oldukça önemlidir. Söz konusu metodlar; eriyik karıştırma (melt mixing), merdaneli öğütme (roll-milling), solüsyon karıştırma (solution blending) ve solüsyon kaplama (solution coating), plastik enjeksiyon (injection molding) yöntemlerini içerebilmektedir. Bu yöntemleri seçerken ve uygularken kritik olan nokta CNF'lerin iletken ağ (conductive network) yapı içerisinde iyi dağıtılmış (topaklanmamış) ve boy/en oranı (aspect ratio) bozulmamış olmasıdır.

Boy/en oranının korunması konusunda yenilikçi birçok yöntem uygulanabilmektedir. Örneğin, merdaneli öğütme (roll-milling) öncesinde polimer granüllerine ve CNF'lere bir solventte önceden bir süre ön dispersiyon uygulamak merdaneli öğütmede gereken

öğütme zamanını azaltacak, CNF'lerin öğütme esnasında kırılarak kısalmalarını önleyecektir. Ancak öğütme, karıştırma sürelerinin kısa tutulması da dispersiyon kalitesini azaltıp topaklanmaları (agglomeration) arttırabilmektedir.

Özetle, dolgu malzemesi olarak CNF kullanılan çalışmalarda tüm parametreler kalkanlama etkinliğine doğrudan etki ettiğinden çok dikkatli ayarlanmalıdır [46].

Özel olarak değinilmek gerekirse CNF'ler (Şekil 2.54) aynı zamanda çelik kalıplarda preslenerek keçe (mat) formunda da kullanılabilir [72].

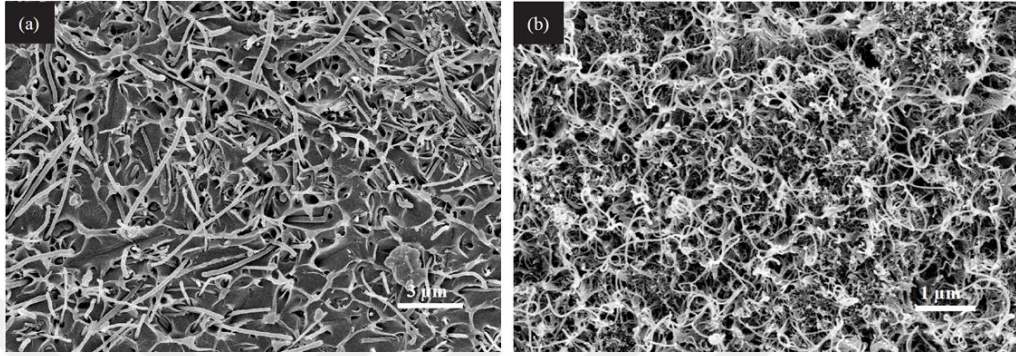


Şekil 2.54: Keçe CNF'lerin SEM görüntüsü [72].

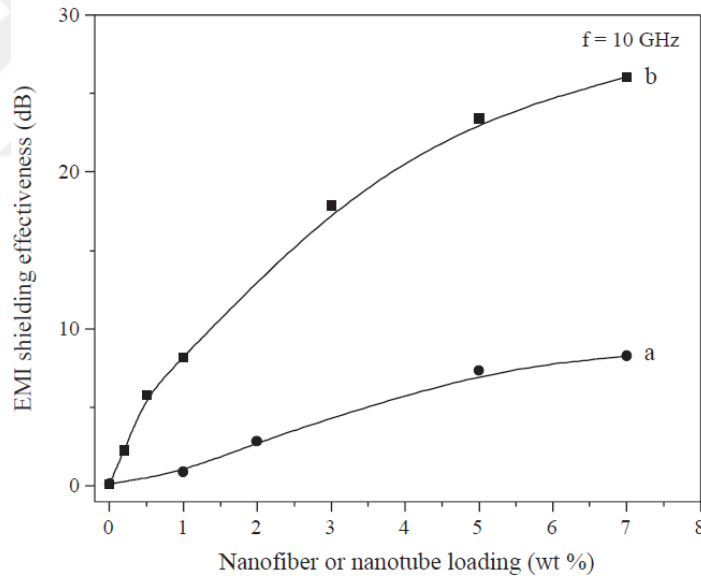
#### 2.3.4.4. Karbon nanotüp kullanılması

Karbon nanotüpler, grafen tabakalarının yuvarlanıp içi boş silindirler yani tüpler haline gelmiş formudur. Tek bir grafen katmanı yuvarlandıysa tek duvarlı (SWCNT-Single-Walled Carbon Nanotubes), birden çok grafen katmanı yuvarlandıysa çok duvarlı (MWCNT-Multi-Walled Carbon Nanotubes) karbon nanotüp olarak adlandırılırlar. Üretimlerinde temel olarak üç metot vardır. Bunlar; elektrik ark deşarjı (electric arc discharge), lazer ablasyonu (laser ablation) ve kimyasal buhar biriktirmedir (chemical vapor deposition). CNT'lerin diğer karbon bazlı malzemelere göre en büyük avantajı tübüler yapıdan kaynaklı yüksek yüzey alanı ve yüksek boy/en oranıdır (aspect ratio). Kullanılmak istenen matriste homojen dağılımları sağlanabildiği takdirde ağırlıkça %2'nin altı katkılama oranlarında dahi perkolasyon sağlanabilmektedir [46]. Ancak CNF'lerin dispersiyonu konusunda geçerli kritik olan noktalar, CNT'ler için de

geçerlidir. CNF ve CNT'leri EMG kalkanlama etkinliğini karşılaştıran bir çalışmada aynı katkı yüzdesinde CNT'lerin kalkanlama etkinliğinin daha yüksek olduğu sonucu alınmıştır (Şekil 2.56 ve Şekil 2.57) [73]. Katkı malzemesi olarak kullanılan MWCNT'lerde kalkanlama mekanizmalarından yansıtma mekanizması baskındır (Şekil 2.55 ve Şekil 2.56).



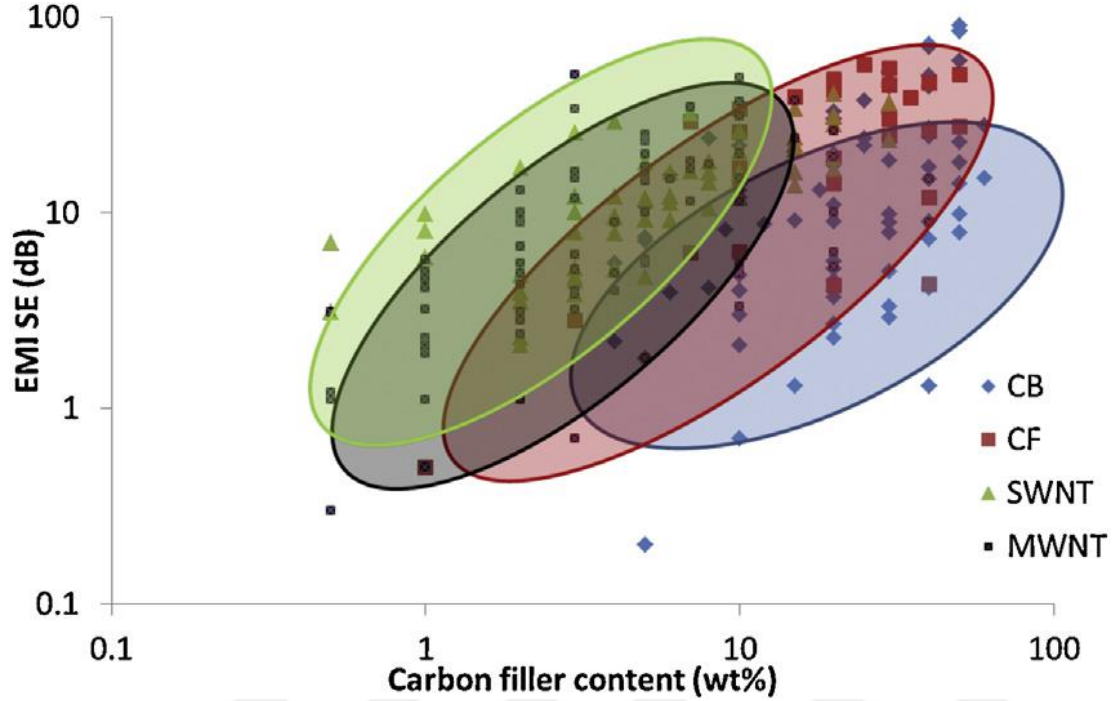
Şekil 2.55: (a) ağırlıkça %5 CNF katkılı PS kompozit, (b) ağırlıkça %5 MWCNT katkılı PS kompozit kesit alanları SEM görüntüleri [73].



Şekil 2.56: 10 Ghz'de ağırlıkça katkı yüzdesine karşılık EMG kalkanlama etkinliği (a) CNF (b) MWCNT PS matrisinde [73].

Aslında, karbon dolgu/katkı malzemelerinin kalkanlama etkinlikleri arasında bir karşılaştırma yapmak oldukça güçtür. Çünkü literatür çalışmaları farklı frekans aralıklarında yapılan testleri ve farklı kalınlıklardaki numuneleri içermektedir. Şekil 2.57'de katkı yüzdesine karşılık kalkanlama etkinliği grafiğinde dağılımlar

gösterilmektedir. Sonuçları göz önünde bulundurup genel eğilime bakılacak olursa polimer matris içinde karbon bazlı dolgu malzemelerinin kalkanlama etkinlikleri şu şekilde sıralanabilir: SWCNT>MWCNT> CF>CB (Şekil 2.57) [46].



Şekil 2.57: Karbon bazlı dolgu malzemesi çeşidine karşı kalkanlama etkinliği değerleri [46].

Elde edilen bu sıralama dolgu malzemelerinin boy/en oranları (aspect ratio) ile tutarlı bir sonuçtur. O halde diyebiliriz ki, yüksek aspect ratio'yu koruyarak ve düşük perkolasyon eşiğinde iyi bir dispersiyon sağlandığında yüksek değerlerde EMG kalkanlama etkinliği elde etmek mümkündür.

CNT'ler bu anlamda %5 in altındaki perkolasyon eşikleri ile bir kere iyi dispersiyon sağlandığı takdirde EMG kalkanlama uygulamaları için biçilmiş kaftandır. Ancak, CNT'lerdeki yüksek yüzey alanlarının getirdiği yüksek yüzey enerjilerini ve yoğun Van der Waals etkileşimlerini yenmek için etkili dispersiyon yöntemleri uygulamak elzemdir [59]. Eriyik birleştirme (melt compounding) bazlı dispersiyon metotlarından ziyade solüsyon karıştırma (solution blending) bazlı dispersiyon metotları tercih edilmelidir. Solüsyon bazlı dispersiyon yöntemleri zaman ve maliyet açısından eriyik

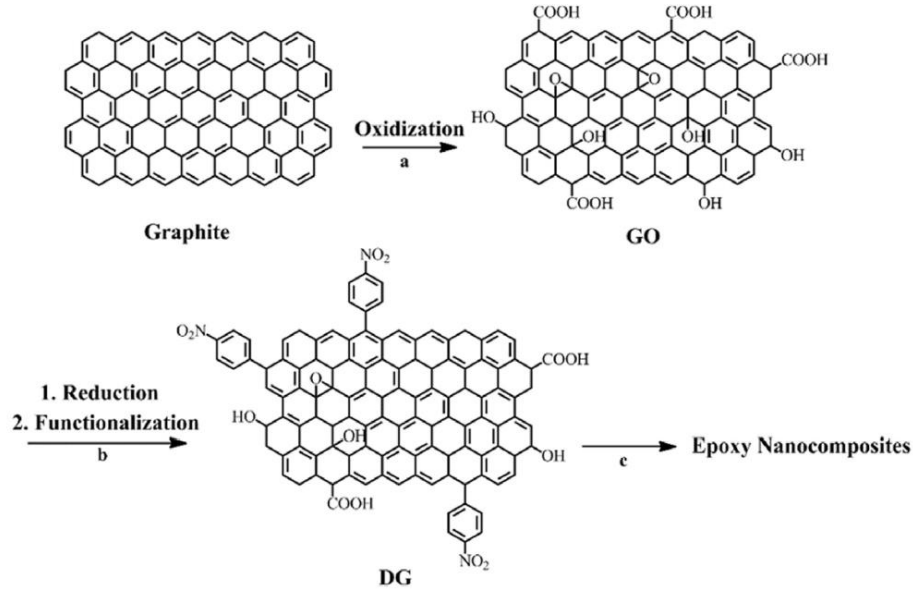
birleştirme yöntemlerine göre daha külfetli olsalar da kalkanlama performansı açısından solüsyon bazlı dispersiyon yöntemleri daha homojen dağılımlar sağlar ve bu sayede daha düşük perkolasyon eşiklerinde çalışma imkanları vermektedir.

#### **2.3.4.5.Grafen kullanılması**

Grafen sahip olduğu mekanik, termal ve kimyasal özellikleri sayesinde birçok uygulamada kullanılmakta olduğu gibi EMG kalkanlama uygulamalarında da kullanılmaktadır. Grafen, tek atom kalınlığında kesintisiz hegzagonal karbon atomlarından oluşan bir ince kağıt (sheet) olarak düşünülebilir. Bir başka deyişle milyonlarca grafen tabakası Van der Waals etkileşimleri sayesinde üstü üste geldiğinde grafit yapısını oluşturur. Grafenin hafif, esnek, korozyona dayanıklı ve elektriksel olarak iletken olmasının yanında EMG kalkanlama uygulamalarında üstün özellikler taşıma sebebi iki boyutlu tek atom kalınlığındaki yapısıyla düşük perkolasyon eşiklerinde dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesidir. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) ile üretilmiş bir grafen aynı kalınlıktaki bir altın kağıda (gold sheet) göre 7 kat daha fazla kalkanlama etkinliği değerine sahiptir [74].

Grafen, grafen oksitin aksine fonksiyonel grupları bulunmadığından inerttir. Grafenin matrislerde dispersiyonu ve arayüzey etkileşimlerini arttırmak için fonksiyonel gruplarla bağlanarak yüzey modifikasyonu sağlanmalıdır. Bu fonksiyonelleştirmenin genellikle ilk adımı oksitleme ve sonikasyon işlemleriyle grafitten grafen oksit yapısına geçişi içerir (Şekil 2.58). Daha sonrasında kullanılacak matris tipine göre fonksiyonel gruplar seçilir ve yapıya katılır.

Fonksiyonelleştirilen ya da ticari grafitten katman katman ayrılarak (well-exfoliated) elde edilen grafenler, polimer matrislerde oldukça iyi dispersiyon gösterirler. Bununla birlikte grafenin mekanik, termal, kimyasal özelliklerinin diğer karbon bazlı dolgu malzemelerine göre daha üstün olması da iyi performansında etkindir [55].

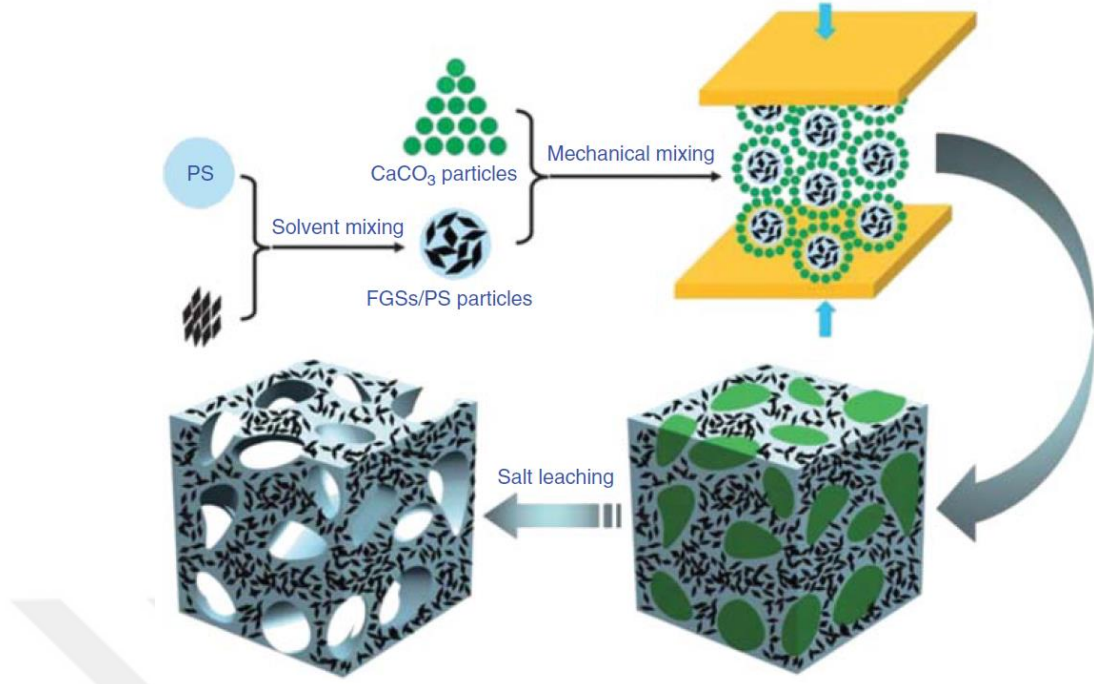


Şekil 2.58: Fonksiyonelleştirme adımları diazoniumla fonksiyonelleştirilmiş grafen (DG)'nin epoksi nanokompozit yapısına katılması (a)  $H_2SO_4$ ,  $NaNO_3$ ,  $KMnO_4$ ; (b1) hidrazine, (b2) Nitrobenzenediazonium tuzu; (c) DER 354 and Curing Agent [115].

Fonksiyonelleştirilmiş Grafen Katmanlarının (FGS Functionalized Graphene Sheets) matris içerisinde iyi dispersiyonunu sağlamak çok kritiktir. Bu bağlamda solvent döküm (solvent casting), solvent karışıma (solvent mixing), mekanik karıştırma, sonikasyon gibi dispersiyon yöntemleri uygulanabilmektedir.

Aynı zamanda bu yöntemler birbirini takip eden şekillerde birçok yöntemin kombinasyonu olarak da uygulanabilir. Örneğin Şekil 2.59'de adımları görülen çalışmada Polistiren ve FGS'ler solvent ile karıştırılmış, FGS+PS granülleri haline getirilince yapıya kalsiyum karbonat eklenmiş, bir kez de mekanik karıştırmaya tabi tutulan sistem basınçla kalıplanmıştır (compression molding). Son olarak, yapıdaki kalsiyum karbonatlar tuz özütme (salt leaching) işlemiyle yapıdan alınmış, hem porlu hem de homojen dağılmış bir FGS/PS kompoziti oluşturulmuştur [76].

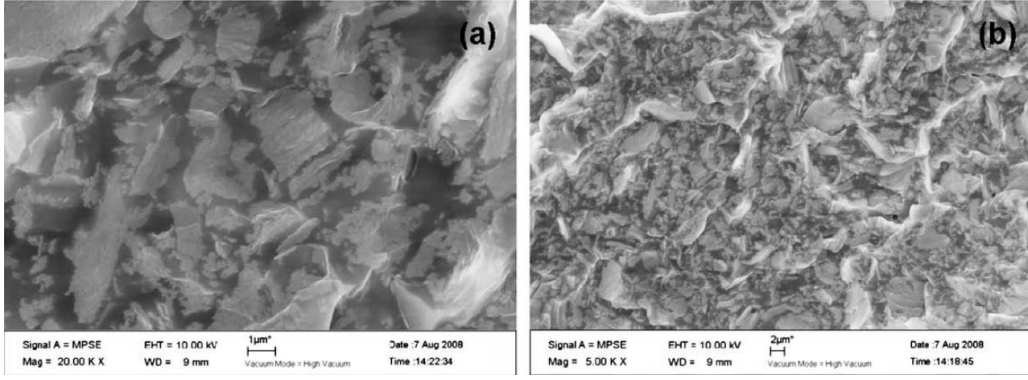




Şekil 2.59: Porlu FGS/PS Kompozit Üretim Adımları [76].

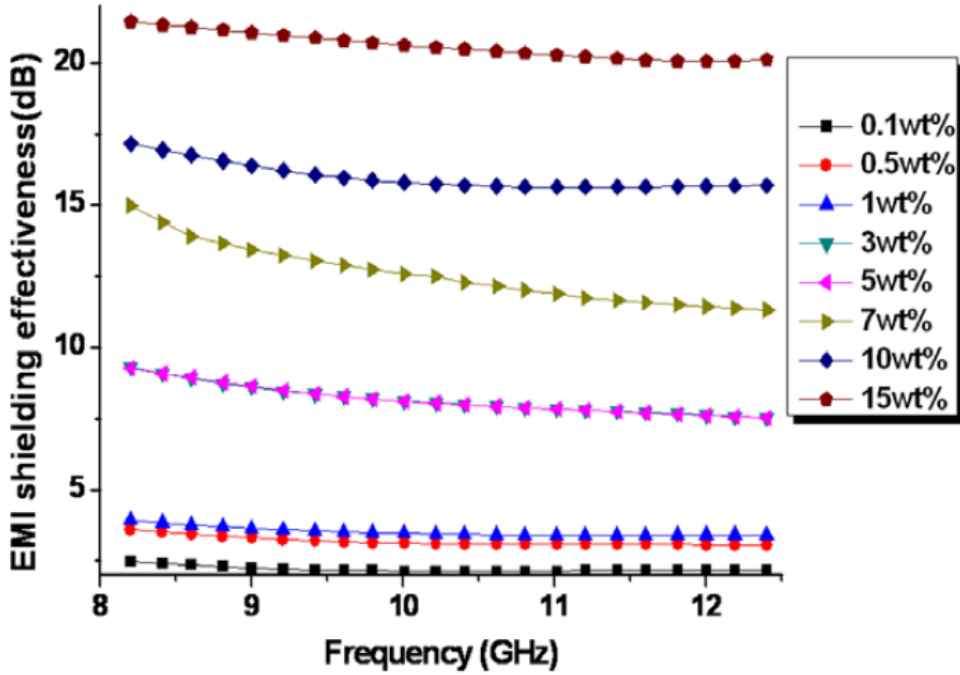
EMG kalkanlamada grafen kullanılması konusunda yapılan çalışmalar genellikle solvent dökümü (solvent casting) işlemini içerir. Liang ve ekibinin 2008 yılında grafen/epoksi kompozitler sentezi üzerine yaptıkları çalışma sonucunda hacimce %0,52 perkolasyon eşiği gözlemlenmiştir. Solvent olarak aseton kullanılmıştır. Epoksi sertleştiricisi asetonla çözülüp ardından redüklenmiş grafen kağıtları bu karışıma eklenmiştir.

Redüklenmiş grafenlerin epoksi reçine içerisinde sonikasyonu ve karıştırılmasının ardından karışımın kalıba dökülmesi işlemi gelmektedir. Film haline getirilen karışımın 60 C’de solventi uçurulur. Oluşturulan kompozitten istenilen boyutlarda numuneler kesilir ve 250 C’de 2 saat azot gazı altında numuneler tavllanır. Bu tavlama işleminin amacı grafen katmanlarının tamamen redüklemek (fully reduced graphene sheets) ve en yüksek elektriksel iletkenlik performansını elde etmektir. Şekil 2.60’deki SEM görüntüsünde bu çalışma sonucu elde edilen kompozit yapılardan %7 katkılamada numunelerin kesit alan görüntüleri verilmiştir [77].



Şekil 2.60: (ağ.%7 katkı oranı) Grafen/Epoksi Kompozit kesit alanı SEM görüntüleri [77].

Farklı katkılama yüzdelerinde kalkanlama etkinliği araştırılmış olup en iyi sonuçlar 21 dB ile %15 katkı oranında alınmıştır (Şekil 2.61).



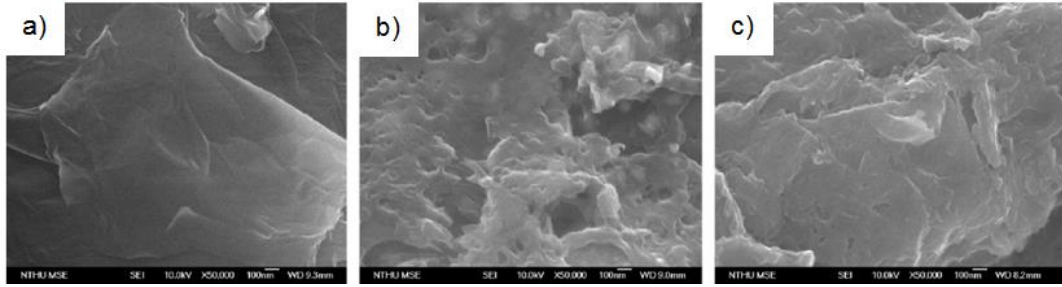
Şekil 2.61: Frekansa karşın farklı yüzdelerde kalkanlama etkinlikleri [77].

Özetle, karbon bazlı dolgu malzemeleri içerisinde yüksek EMG kalkanlama performansına sahip başlıca katkılardan olan grafen; hafif, esnek, korozyona dayanıklı, mukavim ve elektriksel olarak iletken olmasının yanında düşük perkolasyon eşiklerinde yüksek performanslar verebildiğinden tercih sebebidir. Boy/en oranının anahtar parametre olduğu katkı malzemesi seçiminde farklı katkı kalkanma

etkinliklerine göre göreceli olarak sıralandığında karbon karası<karbon fiber<CNT<grafen sıralaması yapılabilir. Ancak bu sıralama, katkı malzemelerinin uygun dispersiyonu sağlandığında ve polimer matris ile 3 boyutlu ağ (3D network) yapısı oluşturulduğunda geçerlidir.

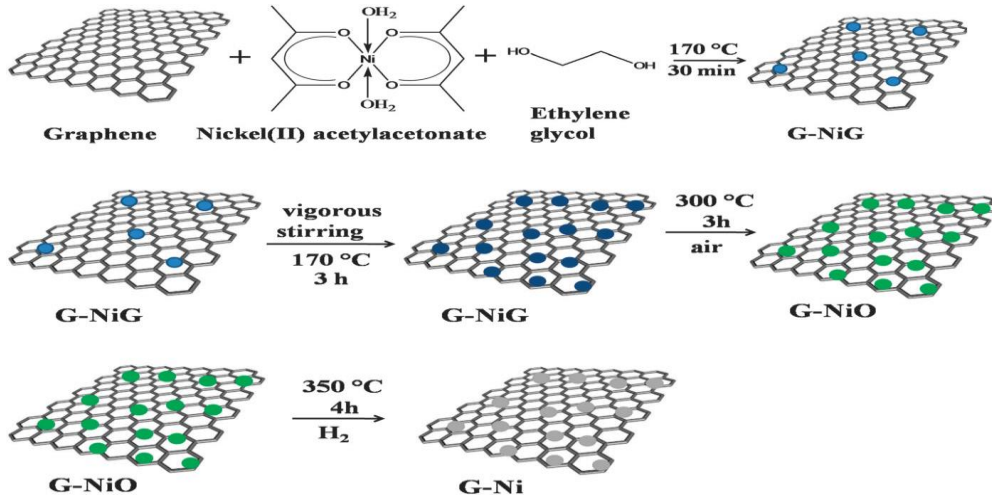
#### 2.3.4.6. Dekore edilmiş yapıların kullanılması

Bu bölümde EMG kalkanlama performansını arttırmak amacıyla metal ya da metal oksit parçacıklarla dekore edilmiş karbon bazlı nanokatklardan bahsedilmiştir. Bu kapsamda, Chen ve ekibi grafen katkılı polianilin kompozitlerdeki grafenleri gümüş ve nikel nanoparçacıklarla dekore ederek EMG kalkanlama etkinliklerini arttırmayı hedeflemektedirler (Şekil 2.62). %0,5, %1, %3 ve %5 gibi farklı katkılama yüzdeleri için kalkanlama etkinlikleri, elektriksel iletkenlik değerleri, kompozitlerin mikroyapı ve morfolojileri analiz edilmiştir. Alınan sonuçlara göre EMG kalkanlama etkinliği 29.33 dB ile en büyük olan ve 20,32 S/cm ile en iyi elektriksel iletkenlik değerine sahip olan gümüş nanoparçacıkla dekore edilmiş grafendir (Ag@graphene) [78].



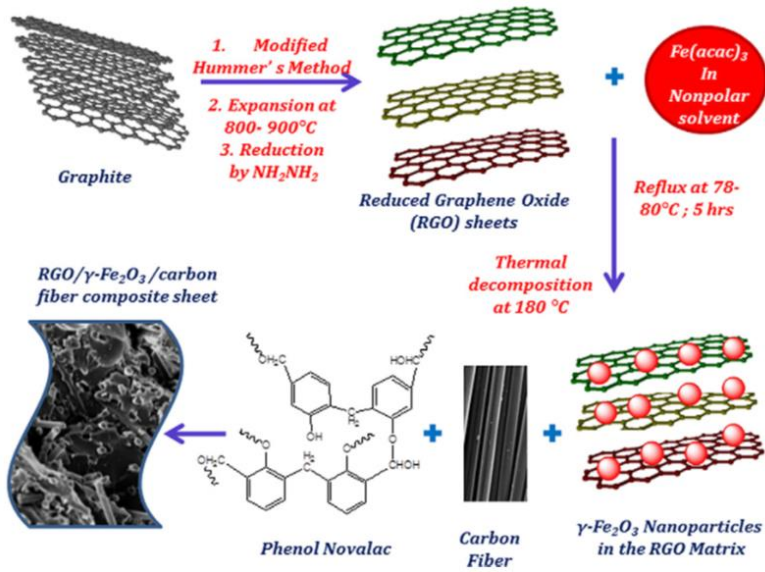
Şekil 2.62: a) Grafen b) Ag@grafen c) Ni@grafen [78].

Bir başka çalışmada ise Pawar ve ekibi polikarbonat ve SAN karışımı içerisinde kullanılacak olan grafen nanokatmanlarının nikel ile dekore edilmesini çalışmışlardır. Şekil 2.63’de nikel ile dekore edilmiş grafen sentezi adımları özetlenmiştir. Çalışmalar sonucunda kalkanlama etkinliği 29,4 dB’ye çıkmıştır. Aynı zamanda termal iletkenlik değerleri %276 artmıştır. Elastik modül de polikarbonat/SAN karışımının nanokatksız haline göre %29.2 artmıştır [79].



Şekil 2.63: Nikel ile dekore edilmiş grafen sentezi adımları [79].

Singh ve ekibinin çalışmasında ise fenolik reçinede Redüklenmiş grafen oksit,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve karbon fiberler kullanılmış en mükemmel EMG Kalkanlama performansı elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 2.64’de fenolik reçine,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile dekore edilmiş indirgenmiş grafen oksit ve karbon fiberlerin kompozit yapı haline getirilmesinin adımları gösterilmektedir [80].



Şekil 2.64: Fenolik reçine bazlı  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile dekore edilmiş indirgenmiş grafen oksit ve karbon fiber kompozit hazırlama adımları [80].

Bu çalışma sonucunda alınan maksimum kalkanlama etkinliği değeri 45.26 dB’dir. Alınan sonuç  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’ den kaynaklı dielektrik kayıplara ve indirgenmiş grafen oksit

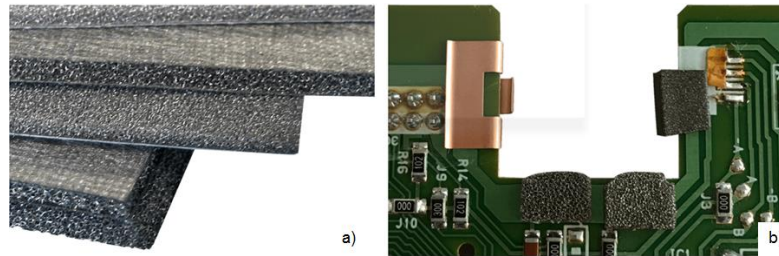
matrisi içindeki  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  oranına bağlanmaktadır [80]. Özetle, tüm dekore yapılarda temel mantık dielektrik ya da manyetik dipoller oluşturacak malzemelerle karbon bazlı yapıların modifiye edilmesi kalkanlama etkinliğinin dielektrik ve/veya manyetik kayıplar aracılığıyla artırılmasıdır.

### 2.3.5. Köpük, bal peteği ve çok katmanlı yapıların kullanılması

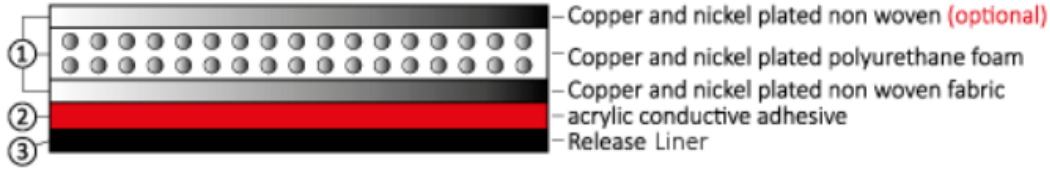
Köpük (foam), bal peteği (honeycomb) ve çok katmanlı yapıların (multilayers) EMG kalkanlama uygulamalarında kullanılmalarının temel mantığı kalkanlama performansını yüksek tutarken aynı zamanda malzeme yüzeyinden ortama olan yansımaları önlemektir [46].

#### 2.3.5.1. Köpük (foam) yapıların kullanılması

Köpük yapıların EMG kalkanlama uygulamalarında aktif olarak kullanılmasının asıl sebebi mikrodalga boyunda soğurmalarında başarılı olmalarıdır [46]. Bir diğer sebebi ise köpük yapıların endüstride rahatça son üründe uygulanabilmesidir. Bu kapsamda birçok markanın EMG kalkanlama için üretilmiş köpük yapı malzemelerine rastlamak mümkündür. Şekil 2.65’de görülen farklı kalınlıklardaki iletken köpük poliüretan köpüğün farklı kalınlıklarda bakır ve nikel ile kaplanmasından elde edilmiştir. EMG kalkanlamanın endüstriyel uygulamalarından, elektronik devre kart kutularında (Şekil 2.65), telefonlarda, ses filtrelerinde, kablo tava sistemlerinde, kalkanlanmış odalarda aktifçe kullanılabilen bu köpük kesit alanından Şekil 2.66’deki gibi bir dizilime sahiptir. Söz konusu iletken köpük 100 Mhz-1 Ghz aralığında değişken kalınlıklarında (1.5-3.5 cm) 80 ila 103 dB aralığında kalkanlama etkinliğine sahiptir [Url-41].

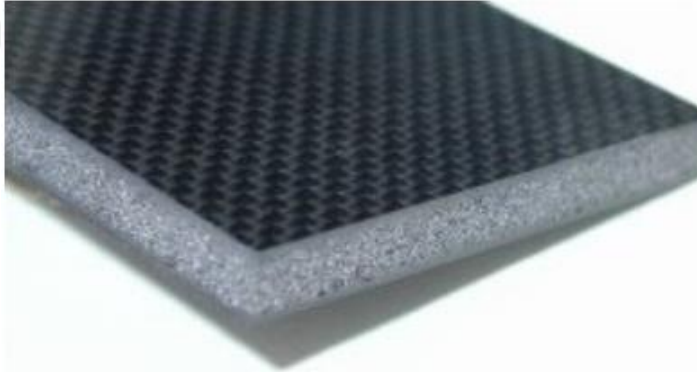


Şekil 2.65: (a) İletken köpük, (b) İletken köpüğün elektronik devre kartlarında kullanımı (Conductive Foam 5570 Holland Shielding Systems BV) [Url-41].



Şekil 2.66: İletken köpük kesit alan görüntüsü (Conductive Foam 5570 Holland Shielding Systems BV) [Url-41].

CFOAM markası (Şekil 2.67) gemilerden, sabit yerleşimli korumalıklara (fixed site shelter), taktik korumalıklara (tactical shelters) ve diğer birçok elektronik kutulara kadar değişken EMG kalkanlama uygulamalarında kullanılmaktadır. CFOAM markasının muadillerinden farkı çok işlevli bir endüstriyel malzeme olmasıdır. Kompozit yapılarda 60 dB'ye kadar kalkanlama etkinliği sağlamasının yanısıra, ara malzeme olarak da yapısal dayanım verme amaçlı kullanılmaktadır. Bu sayede metal gerektiren komponentler elimine edilerek yapısal dayanım sağlanmakta, yapıdaki ağırlık azalmakta, korozyon dayanımı artmakta ve aynı zamanda bu markaya özel olmak üzere alev dayanıklılık özelliği bulunmaktadır.



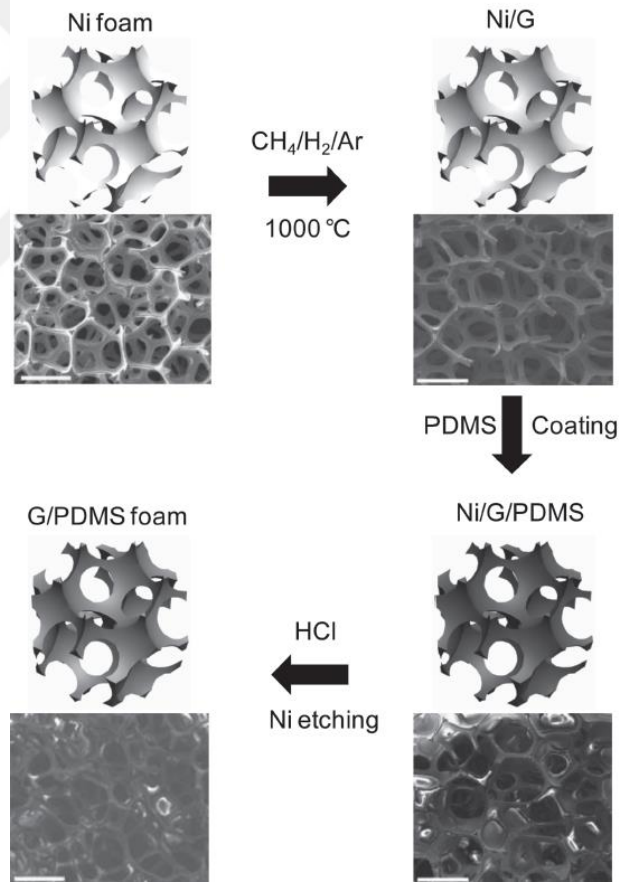
Şekil 2.67: Karbon köpük (CFOAM LTD.) [Url-42].

P-SHIELD markası (Şekil 2.68) da poliüretan ve poliolefin köpüklerden oluşan, basınca karşı duyarlı iletken akrilik yapıştırıcılarla birleştirilmiş, bakır ve nikel kaplı katmanlardan oluşur. Bu katmanlarda x, y ve z eksenlerinin üçü de iletkenidir. P-SHIELD'in köpükleri boşluk doldurucu ve darbe soğurucu olarak da kullanılmaktadır [81].



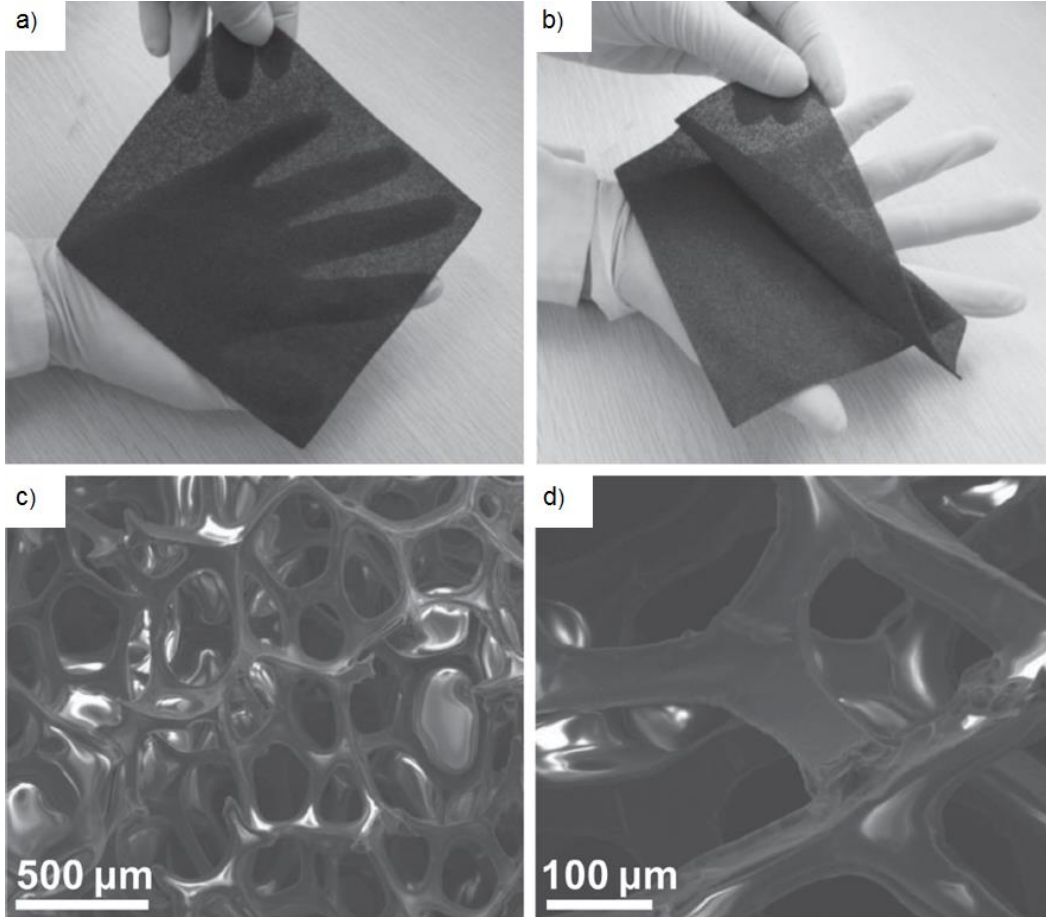
Şekil 2.68: P-SHIELD köpük (P-SHIELD Foam Tapes, Polymer Science Inc.) [81].

Literatürde nikel köpüklerin üzerinde (CVD) Kimyasal Buhar Biriktirme yöntemiyle grafen büyütülüp ardından ince bir PDMS tabakasının da bu yapı üzerine kaplandığı, son olarak da nikel tabakasının Hidroklorik asit (HCl) ile aşındırılarak Grafen/PDMS köpük elde edildiği çalışmalar mevcuttur (Şekil 2.69) [82].



Şekil 2.69: Nikel köpükten Grafen/PDMS nanokompozit eldesi adımları (500 mikron skalasında) [82].

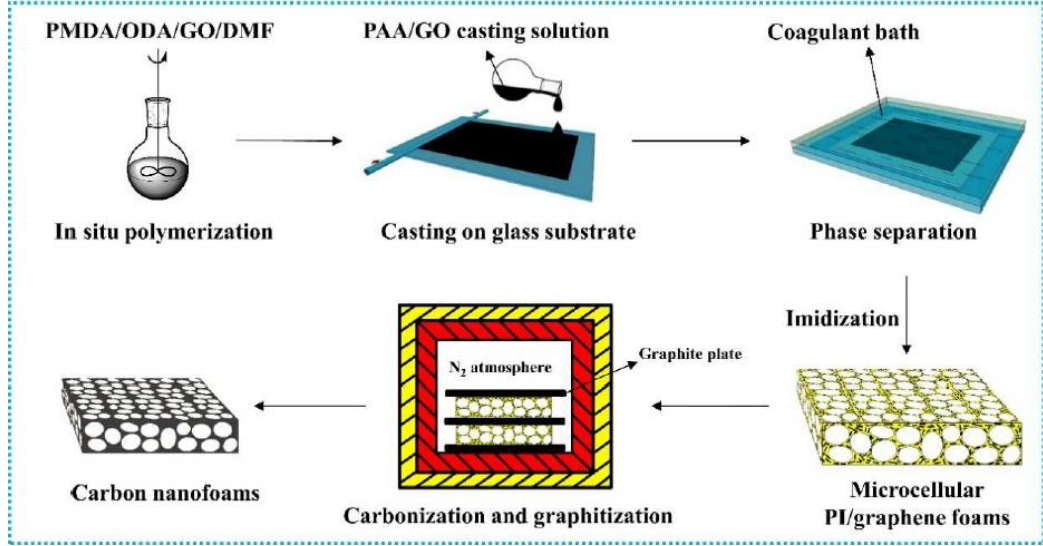
Grafen/PDMS köpük yapısı yüksek oranda porlu, hafif, esnek ve üç boyutlu ağ yapısındadır. Tüm bu özellikler, EMG kalkanlama etkinliği için aranan özelliklerdir. Esnekliği ve üç boyutlu ağ (3D interconnected network) yapısı Şekil 2.70'deki görüntülerde gözlemlenebilmektedir [82].



Şekil 2.70: (a-b) Grafen/PDMS köpüğün esnekliği, (c-d) Grafen/PDMS köpüğün porlu ve üç boyutlu ağ yapısı [82].

Termal stabilitesi olan ultra ince karbon köpükler de EMG kalkanlama uygulamalarında çalışılmaktadır. Poliimid/grafen köpüklerin pirolizi ile üretilen karbon köpüklerin üretim aşamaları aşağıdaki Şekil 2.71'de gösterilmiştir.



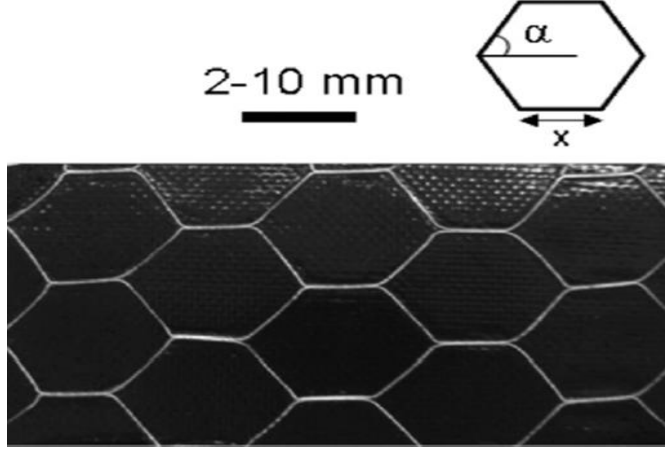


Şekil 2.71: PI/Grafen köpüklerin sırasıyla aynı anda-yerinde polimerizasyon, cam altına döküm, faz ayırımı, termal imidizasyon ve termal dekompozisyon ile üretimi [Url-43]

Bu çalışmada üretilen karbon köpük 24 mikron kalınlığında ve termal olarak stabilitesi yüksek bir ürün olup, EMG kalkanlama etkinliği muadilleri olan köpük yapılara göre daha yüksektir (24 dB). Kalınlık 73 mikronlara doğru gittikçe kalkanlama etkinliği 51dB'ye kadar artırılabilir. Aynı zamanda, bu karbon köpüğün termal olarak zorlu koşullar altında da bu kalkanlama etkinliğini devam ettirebilmesi de bir diğer avantajıdır [Url-43].

### 2.3.5.2. Bal peteği (honeycomb) yapıların kullanılması

Bal peteği formları hem mekanik özelliklerinden hem de EMG kalkanlama özelliklerinden dolayı dikkat çekmektedir. Yapısal takviye malzemesi olarak sandviç panellerde, soğurma malzemesi olarak çok katmanlı panellerde ya da dalga yönlendirme özelliklerinden ötürü EMG uygulamalarında kullanılır. Bal peteği formları özellikle metalik olanları (Şekil 2.72) hem mekanik performans hem de EMG kalkanlama performansı açısından yararlanabildiğimiz yapılardır [46].



Şekil 2.72: Metalik bal beteği [46].

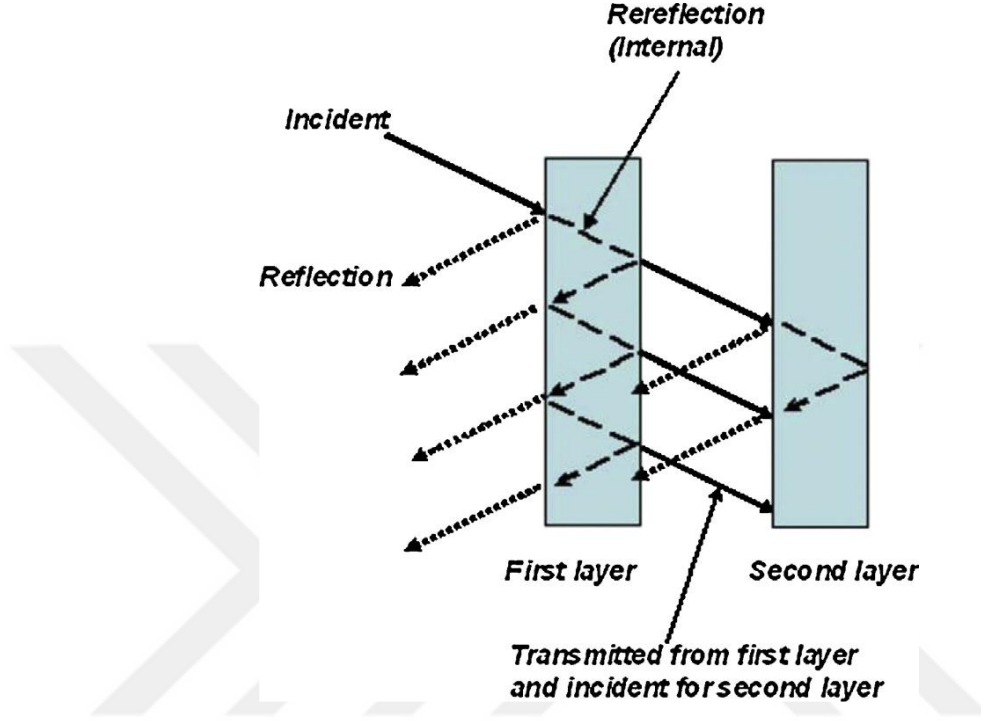
Özellikle endüstrideki uygulama alanı olarak hava delikleri, menfezler (air vents) olarak kullanılan metalik bal peteği yapılar EM dalgaların geçişini önlerken, hava akışını ve ısının konveksiyonunu engellemez. Aynı zamanda hava filtresi gibi ekstra özellikler de eklenebilen bu hava delikleri alüminyum, pirinç ve paslanmaz çelikten üretilir (Şekil 2.73) Hava deliklerine kalkanlama etkinliğini arttırmak ve korozyon dayanımını sağlamak için bir iletken kaplama (plating) da yapılabilir (Şekil 2.73) [Url-43].



Şekil 2.73: Hava deliklerine kaplama (plating) uygulanması (Parker Co.) [Url-43].

### 2.3.5.3. Çok katmanlı yapıların kullanılması

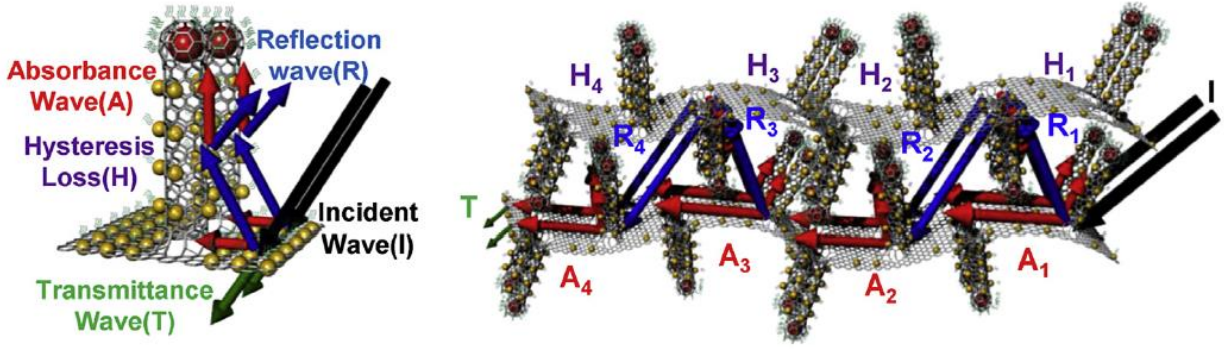
Çok katmanlı yapılar özellikle radar absorplama özelliklerinden ötürü değişik geometrilere kullanılmaktadır. Temel amaç ilk katmandan geçebilen EM dalgaları da çoklu yansıtımlarla bertaraf etmektir (Şekil 2.74) [46].



Şekil 2.74: Çok katmanlı yapıdaki çoklu yansıtımlar [46].

Sadece çoklu yansıtımlar değil, diğer EMG kalkanlama mekanizmalarının da etken olduğu çok katmanlı yapılar oluşturma çabaları literatürde devam etmektedir. Lee ve ekibinin 2016 yılındaki çalışmasında çok katmanlı, birbirleriyle bağlantılı, üç boyutlu bir grafen-karbon nanotüp-demir oksit (3D G-CNT-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) “hetero-nano yapı” oluşturulmuştur. Bu yapının oluşturulmasındaki amaç en yüksek kalkanlama performansını almaktır [83].

Şekil 2.75’de görüldüğü üzere çok katmanlı yapıda bulunan karbon nanotüpler, grafen ve demir oksit nanoparçacıklar çoklu seviyelerde soğurma, yansıtma ve dağıtma sağladığından bu yapının (3D G-CNT-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) katkılı olduğu polimerlerin Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) ve poly(4-styrenesulfonate) (PEDOT: PSS) 0,6 mm kalınlıkta olanları ile bile 133.2 dB kalkanlama etkinliği göstermişlerdir.

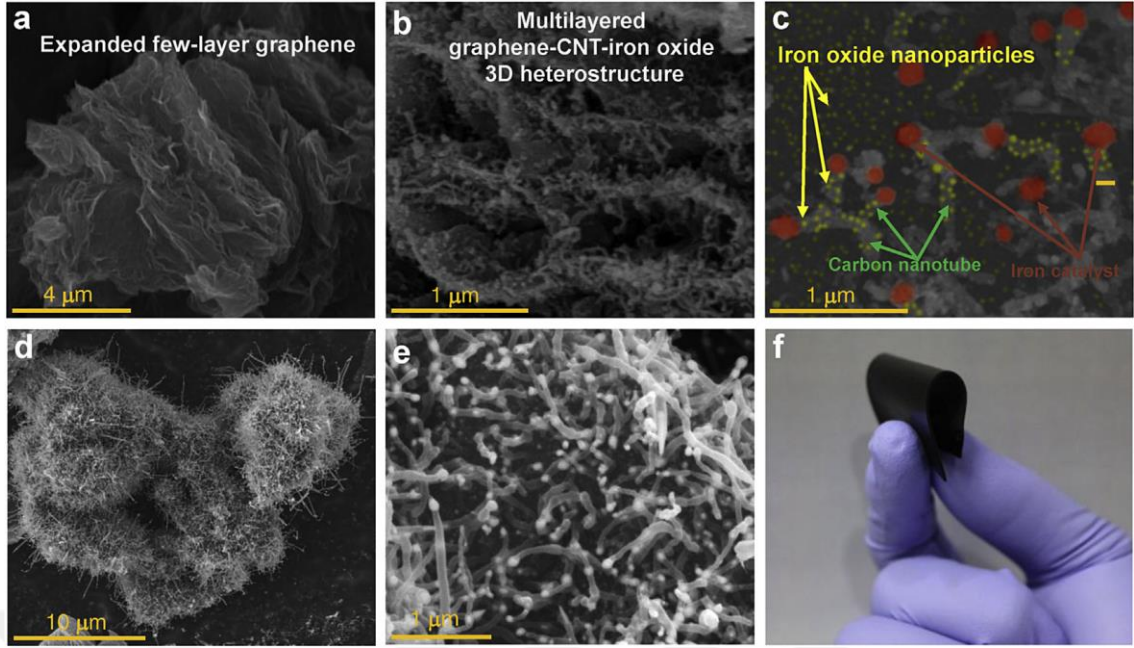


Şekil 2.75: Çok katmanlı 3D G-CNT-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yapısında kalkanlama mekanizmaları [83]

Aynı zamanda esnek ve uzun ömürlü olan bu yapı yaklaşık binlerce eğilme testine (bending test) tabi tutulmasına rağmen ciddi sayılabacak bir bozunmaya (degradation) uğramamıştır. Bu bağlamda bu polimer matrisli nanokompozit yapı EMG kalkanlama uygulamalarında rahatlıkla film, kaplama olarak kullanılabilirliği ve çok katmanlı grafen-karbon nanotüp-demir oksit üç boyutlu hetero-yapısının morfolojisi ve esnek film özelliği gösterilmiştir.

Bu çok katmanlı heteroyapının sentezi ve film haline getirilişi ise birçok adımdan oluşmaktadır. Genişletilmiş grafit oksit Modifiye Hummers Metodu ile sentezlenmiştir. Ferrocene, azodikarbonamide (ACD) ve genişletilmiş grafit oksit asetonitrilde yarım saat boyunca ultrasonik banyoda tutulmuştur.

Ardından bu karışım 700 Wattta 180 saniye boyunca mikrodalga reaktöründe tutulmuştur (Şekil 2.76). Nanokompozit film haline getirme aşamasında ise PEDOT:PSS polimerleri dimethyl sulfoxide (DMSO) 98/2 oranında ile karıştırılmıştır. Ardından, 9/1 oranında PEDOT:PSS ile 3D G-CNT-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karıştırılarak 30 dakika boyunca ultrasonik banyoda tutulmuştur. Sonrasında, iyi bir dispersiyona uğramış karışım petri kabına dökülmüş 40 C'de 12 saat boyunca kürlenerek film haline getirilmiştir [83].



Şekil 2.76: SEM görselleri sırasıyla (a) Genişletilmiş birkaç katmanlı grafen (Expanded few layer graphene), (b) Çok katmanlı 3D G-CNT-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heteroyapısı, (c) Grafen kağıt üstünde dikey yönelimde duran CNT ve grafene ve CNT'ye dekore edilmiş halde bulunan demir oksitler, (d) 3 boyutlu heteroyapı, (e) Yüksek yoğunluklu G-CNT-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit yapısının üstten görünüşü, (f) İnce, esnek bükülebilir 3D G-CNT-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heteroyapısı [83].

#### 2.4. Tezin Amacı

Havacılık, Uzay ve Savunma Sanayii'nde Elektromanyetik Girişimi Kalkanlama hususu kritik önem arz eder. EMG Kalkanlama Etkinliği ROKETSAN'ın tüm roket ve füze sistemlerinde yer alan gereksinimler arasındadır. Günümüze kadar çoğunlukla iletken metal malzemelerle ve yine metal temelli iletken boya-kaplamalarla ilerlenmiş; ancak sistemlerdeki hafifleme ihtiyaçlarını karşılamak, metallerde korozyon problemi, kaplamaların aşınma-çizilme sorunları sebebiyle mevcut çözümlere alternatif olarak kompozit malzemelerde EMG Kalkanlama etkinliği içeren çözümlere doğru eğilim başlamıştır. Bu bağlamda, EMG KE gereksinimi kompozit malzemeler özelinde yoğun olarak sektörde gündemdedir. EMG Kalkanlama Etkinliği bulunan, yenilikçi, yerli, özgün, maliyet etkin, büyük ölçeğe adapte edilebilir EMG kalkanlama malzemeleri ve prosesleri geliştirmek her daim hedeflenmektedir. ROKETSAN altyapısındaki

kompozit malzeme geliştirme ve seri üretim faaliyetlerinde epoksi reçine matrisi yoğun olarak kullanılmaktadır. Kompozit parça imalatında çeşitli termoplastik matrislere yönelimler de başlamıştır.

Bu bağlamda tezin ana amacı epoksi matrisli kompozitlerde katkı malzemesi olarak kullanılmak üzere Grafen Kapsüllü Nikel parçacıkların (GNi) geliştirilmesi ve EMG kalkanlama performansına etkilerinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda aşağıda belirtilen çalışmaların yapılması hedeflenmiştir:

- Plazma Destekli Döner Aksamlı Kimyasal Buhar Çöktürme (PDDAKBÇ) yöntemi ile Ni parçacıklarının Grafitik yapı ile homojen bir şekilde enkapsüle edilmesi ve oluşturulan yapıların yapısal karakterizasyonu
- Farklı oranlarda Ni ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozitlerin üretilmesi, yapısal karakterizasyonları ve EMG Kalkanlama performanslarının belirlenmesi

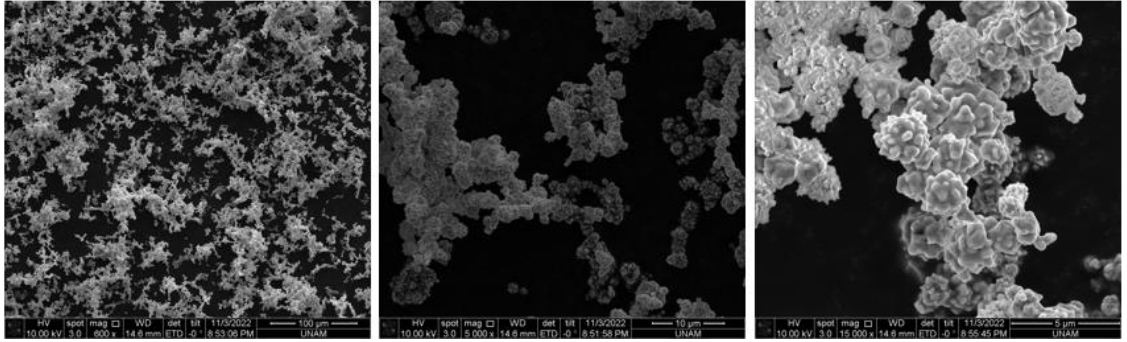
### 3. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Bu tez kapsamında EMG Kalkanlama uygulamalarına yönelik epoksi matrisli kompozit yapılar epoksi reçine ve Ni tozları, GNi tozları kullanılarak üretilmiş ve bu yapıların EMG Kalkanlama performansları incelenmiştir.

#### 3.1.Malzemeler

##### 3.1.1. Nikel tozları

Nanokar firmasının %99,5 saflıkta MOLCHEM NK276 kodlu dendritik Ni tozları Ni-EP kompozit numune imalatlarında ve GNi-EP kompozit numune imalatlarında kullanılmıştır. Tozlardan üzerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 3.1’de verilmiştir.

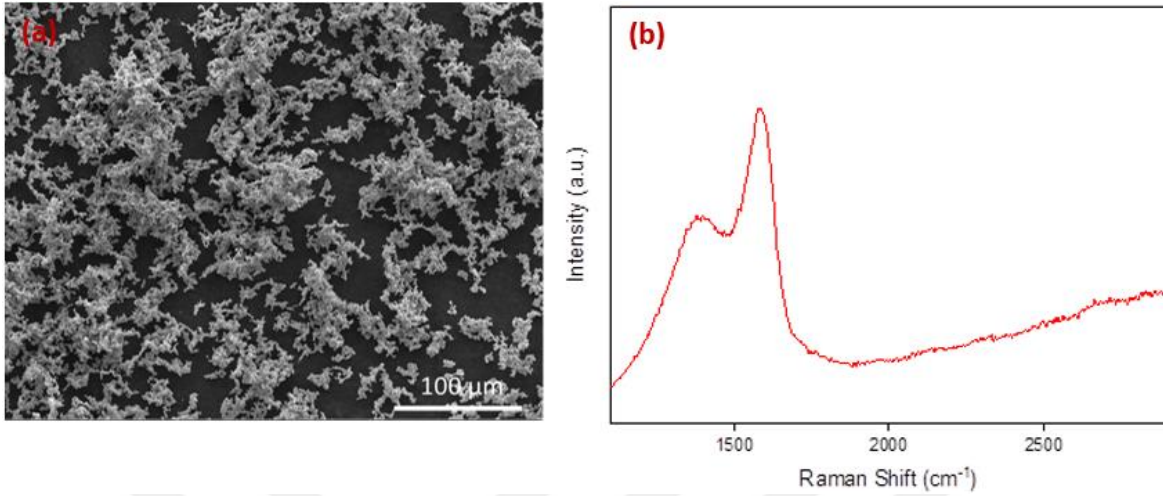


Şekil 3.1: Ni tozlar üzerinden alınan SEM görüntüleri sırasıyla 600x, 5.000x, 15000x Büyütme.

##### 3.1.2. Grafitik yapı kapsüllü nikel (GNi) tozları

GNi tozları Plazma Destekli Döner Aksamı Kimyasal Buhar Çöktürme (PDDAKBÇ) sisteminde geliştirilmiştir. Yüksek miktarlarda, endüstriyel uygulamalara yönelik olarak GNi toz elde edilebilmesi ve bu tozların PDDAKBÇ’de grafitik yapı ile kaplanma proseslerinde sinterlenmemiş olması epoksi matriste dispersiyonları açısından kritiktir. Ni tozlarından proses sonrasında alınmış olan SEM görüntüleri ve Raman Spektroskopi analizleri Şekil 3.2 ’de verilmiştir. Ni tozların 400 °C’de

sinterlenmediği ve tozlar üzerinde grafitik yapı büyütülebildiği görülmüştür. Bu sebeple prosesin icra edilebildiği minimum sıcaklık olan 400 °C ile devam edilmiştir.



Şekil 3.2: (a) GNi tozlara ait deney sonrasında alınan SEM görüntüsü, (b) büyütülen grafitik yapı Raman spektroskopisi analizi.

### 3.1.3. Epoksi reçine

Halihazırda ROKETSAN'ın çeşitli proseslerinde de kullanılan Duratek 2400 serisi orta viskoziteli laminasyon reçinesi kullanılmıştır. Duratek 2400 reçine sistemi epoksi baz reçine (DTE 1000) ve sertleştiricisinden (DTS 4004) oluşur [Url-44].

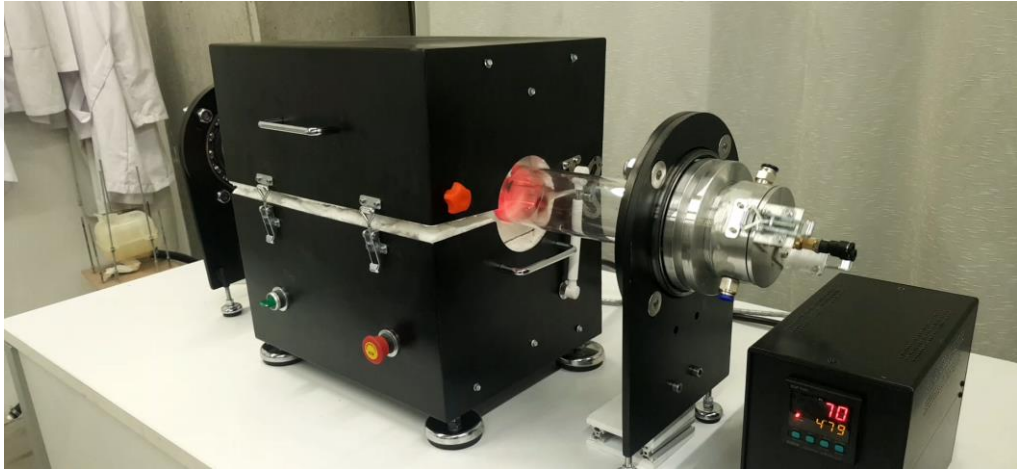
## 3.2.Yöntem

### 3.2.1. Nikel toz üzerinde grafitik yapı sentezi

TOBB ETÜ NMG bünyesindeki PDDAKBÇ (Şekil 3.3) ile Nikel tozlar üzerinde Grafitik yapı sentezlenmiştir. Bu sistem TOBB ETÜ Nanomaterials Group (NMG) tarafından tasarlanmış ve üretilmiştir. (TÜBİTAK Proje numarası:118F491. Patent süreci devam etmektedir.) Ni tozların 400 °C' de sinterlenmediği görülmüş, fırın sıcaklığı 400 °C' de sabit olarak tutulmuştur. Nikel tozlar PDDAKBÇ sistemine konulur. PDDAKBÇ sistemi önce vakuma alınır, ardından Argon ile beslenerek inert hale getirilir. Çemberdeki tüm gazları temizlemek için tekrar vakum işlemi uygulanır. Sonrasında ısıtma prosesi başlatılarak ısıtma süresince sistemde bulunması istenilen



Argon ( $20 \text{ cm}^3/\text{dk}$ ) ve  $\text{H}_2$  ( $20 \text{ cm}^3/\text{dk}$ ) gazları sırasıyla sisteme beslenir. Fırın sıcaklığı  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye geldiğinde plazma açılır. 30 dakika boyunca plazma gücü 200 W (yine Argon ve  $\text{H}_2$  gazları sırasıyla  $20 \text{ cm}^3/\text{dk}$  ve  $20 \text{ cm}^3/\text{dk}$ ) olacak şekilde plazma çalıştırılır. Hidrojen plazma temizlik işlemi için kullanılmış olur. Nikel parçacıklar üzerinde grafitik yapı büyütme aşamasına geldiğinde ise Argon  $20 \text{ cm}^3/\text{dk}$  ve  $\text{H}_2$   $15 \text{ cm}^3/\text{dk}$  ve  $\text{CH}_4$   $20 \text{ cm}^3/\text{dk}$  olacak şekilde çembere beslenir. Bu gazlar akarken plazma gücü yine 200 W olup, büyütme süresi 15 dk'dır. 15 dk sonrasında gazlar kapatılır. Soğuma aşamasında geldiğinde Argon ( $20 \text{ cm}^3/\text{dk}$ ) ve  $\text{H}_2$  ( $20 \text{ cm}^3/\text{dk}$ ) gazları beslenir. Sistem  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye geldiğinde sentezlenen yapı fırından çıkarılabilir.



Şekil 3.3: Plazma Destekli Döner Aksamı Kimyasal Buhar Çöktürme (PDDAKBÇ) cihazı (NMG'ye ait tasarım ve üretim. Patent bekliyor).

### 3.2.2. Nikel toz üzerinde sentezlenen grafitik yapının karakterizasyonu

#### 3.2.2.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Nikel tozlarının grafitik sentez prosesi sonrasında yapısal karakterizasyonları taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Quanta 200 FEG, FEI) kullanılarak yapılmıştır. UNAM Bilkent bünyesindeki SEM cihazı kullanılmış, görüntüler alınırken genellikle yüzey bilgisini alabilmek için 5 kV voltaj kullanılmıştır.

### **3.2.2.2.Raman Spektroskopisi**

Nikel tozlarının üzerinde büyütülen grafitik yapı, Raman Spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Analizler Bilkent Unam bünyesindeki Witec Alpha 300S cihazında 532 nm dalga boyundaki lazer ile yapılmıştır. Alınan sonuçlar ile PDDAKBÇ yöntemiyle üretilmiş grafitik yapının varlığı yani kapsülleme işleminin başarılı olup olmadığı değerlendirilmiştir.

### **3.2.2.3.Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)**

Nikel tozlarının üzerinde büyütülen grafitik yapının yapısal analizi Bilkent UNAM'daki Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) kullanılmıştır.

### **3.2.3. Ni ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozitlerin üretilmesi**

Ni-EP ve GNi-EP kompozitlerin üretilmesi için epoksi reçineye Ni ve GNi tozları katkılanmıştır. Katkılama yüzdeleri literatürden, tecrübe değerlerinden ve perkolasyon eşiği teorik hesaplamalarında temel alınarak belirlenmiştir.

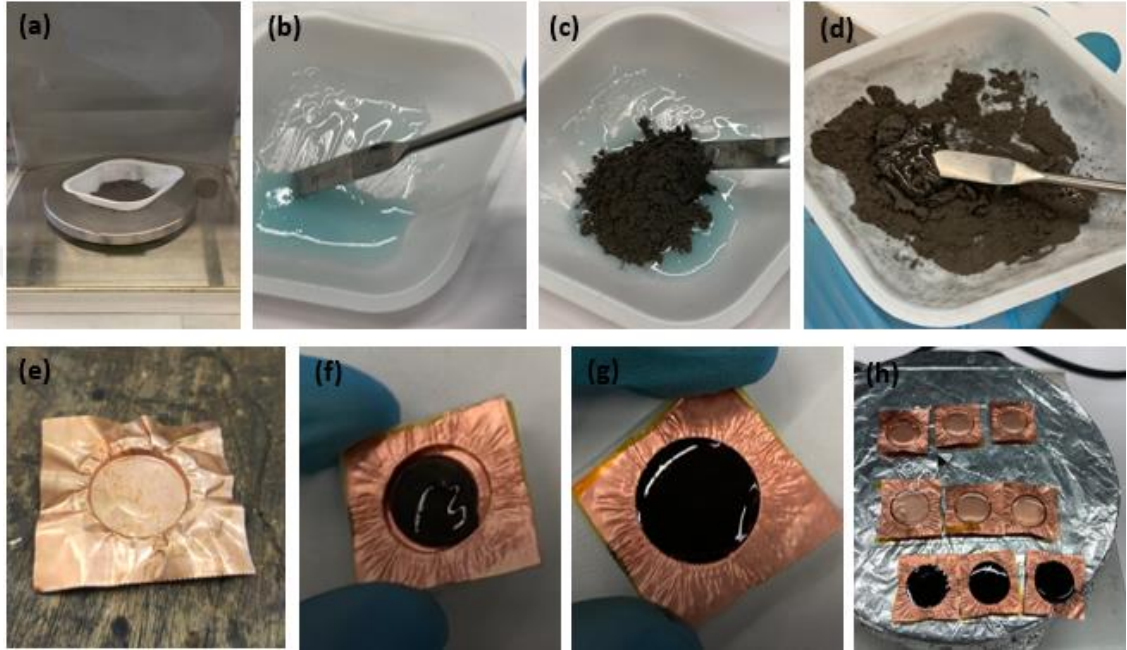
Farklı katkılama yüzdeleri çalışılmış olup başlangıç yüzdesi olarak ağ. %30 tecrübe değeri ile başlanmıştır. Bu tecrübe değerinin altında yapılan katkılamalarda neredeyse komple geçirim (transmission) ya da cihazın tolerans aralığı içerisinde ( $\pm 2$  dB mertebesinde) bir kalkanlama etkinliği elde edildiği bilindiğinden ağ.%30 değeri üstü katkılama yüzdeleri çalışılmıştır. Literatürdeki nikel özelinde olan çalışmalar incelendiğinde de bu mertebede yüksek katkı yüzdelerinin kullanıldığı görülmüştür [54-56].

Bu kapsamda ağ. %30, %40, %50 ve %60 oranları belirlenmiştir. Bu katkılama yüzdelerinde öncelikle elde karıştırma yöntemi ile numuneler üretilmiş, yapısal karakterizasyonlar ve elektromanyetik kalkanlama etkinliği ölçümleri numunelere yapılmıştır.

Sonrasında karıştırma yönteminin etkisini de belirlemek amacıyla seçilen bir yüzdede ağ.%40 Vorteks ve Ultrasonik Prob Tipi Sonikatör ile karıştırma yöntemleri çalışılmıştır. Tüm bu yöntemlerin EMG KE sonuçlarına etkisi ölçüm sonuçları ile birlikte Bölüm 4'de tartışılmıştır.

### 3.2.3.1.Elde karıştırma (Hand mixing)

Elde karıştırma yöntemiyle Ni ve GNi tozları ile katkılanan reçinenin kalıplar içine dökülmesine karar verilmiştir. Bu amaçla üç boyutlu yazıcıda kalıplar basılmış, bu kalıplar içerisine yerleştirilen Cu folyolardan pres yardımıyla Cu döküm kalıpları elde edilmiştir. Bu sürece ait işlemler Şekil 3.4’de özetlenmiştir.

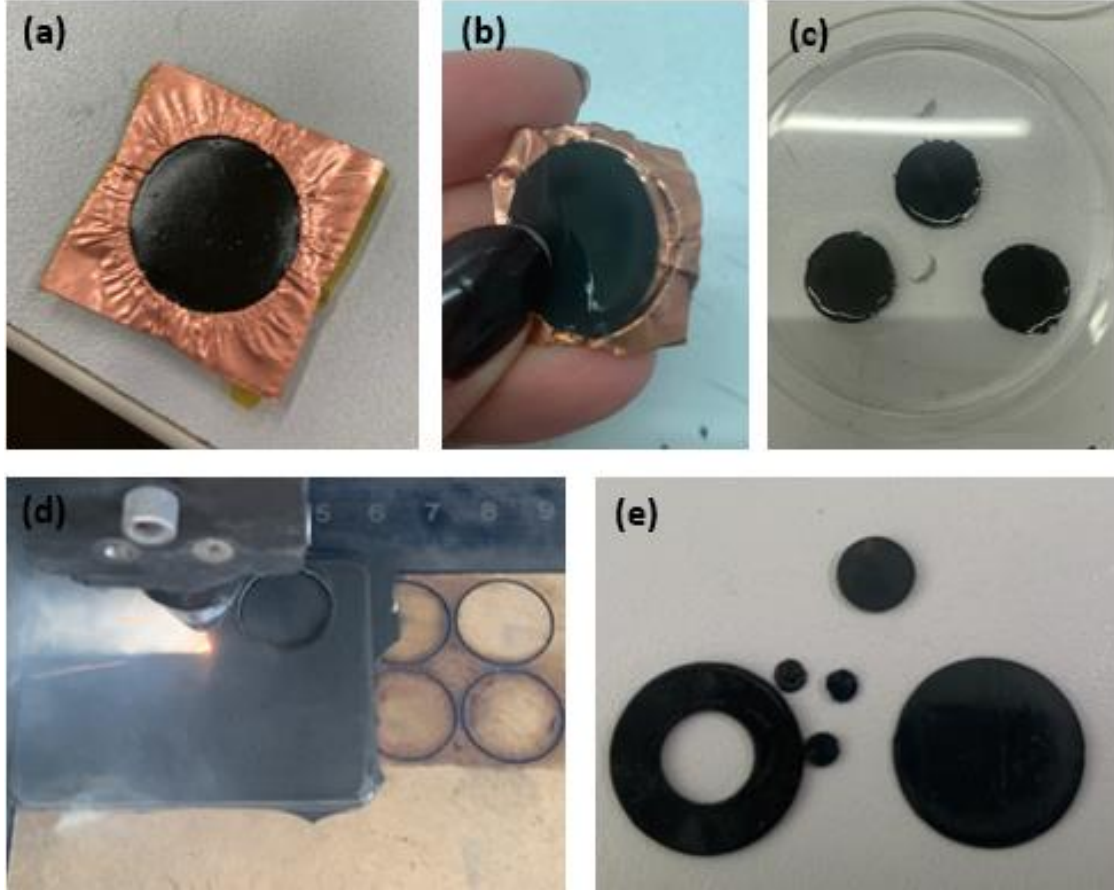


Şekil 3.4: Ni ve GNi tozların reçineye katkılanma süreci.

Şekil 3.4’de sırasıyla gösterildiği gibi öncelikle Ni ve GNi tozlar tartım kaplarında tartılır. İstenilen ağırlıkta reçine de tartılır. Baz reçine ile tozlar spatula yardımıyla karıştırılır. Sertleştiricinin reçineye uygun oranda eklenmesinden sonra karışım elde spatula yardımıyla tekrar en az 2 dakika boyunca karıştırılır. Bu oran DURATEK 2400 reçinesinin TDS verilerinden elde edilmiş ağırlıkça karışım oranı olup 79 birim %ağ. baz reçine epoksi 21 birim %ağ. sertleştiricidir. Ardından karışım hazırlanan Cu folyo döküm kalıplarına dökülür. Karışımın kalıp içinde yayılması beklenir ve kalıplar 70 °C’de 2 saat ısıtıcı tabla üzerinde kürlenmeye bırakılır.

Kürleme işlemi sonrasında numuneler ısıtıcı plakadan alınır ve Cu folyo içindeki kompozitler Cu folyo soyularak çıkarılır (Şekil 3.5). Cu kalıptan çıkarılan numuneler lazerde kesilerek fikstür geometrisinde referans ve yük çiftleri haline getirilir. Benzer

bir şekilde kare, dikdörtgen Cu folyo kalıplara reçine dökümü yapıp tek seferde lazer kesimle istenen disk (referans ve yük) çiftleri olarak numuneler kesilerek çıkartılabilmektedir (Şekil 3.5 d).



Şekil 3.5: Ni-EP ve GNi- EP kompozitlerinin kalıptan ayrılma ve numune kesim süreçleri.

Lazer kesim prosesi, proses parametreleri oturtulduktan sonra en sağlıklı numune kesim yöntemi olmuştur (Şekil 3.5 e). Bu parametreler de tez çalışması boyunca çalışılmış, numune kenar kısımlarında yanık vs. aşınan kısımlar oluşmayacak şekilde iterasyonlar sonucu belirlenmiştir. Lazer kesim parametreleri Katkısız epoksi için, %30, %40, %50 ve %60 katkılı Ni-EP ve GNi-EP numuneler için Çizelge 3.1’de listelenmiştir.

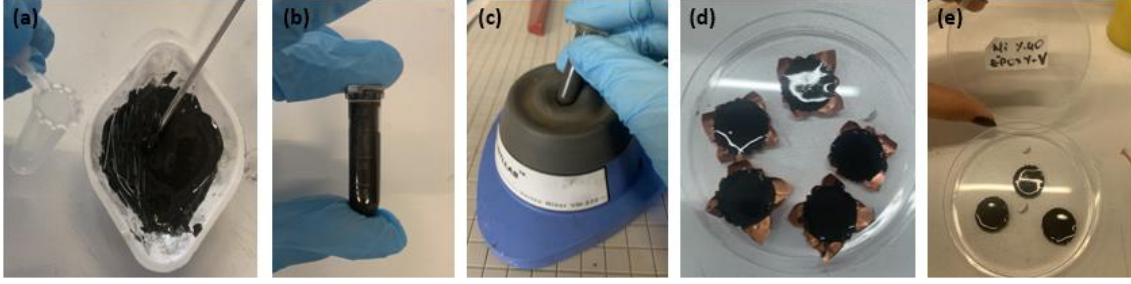
Çizelge 3.1: Lazer kesim parametreleri

Numune İçeriği	Lazer Gücü (%)	Kesim Hızı (mm/dk)	Lazer Geçiş Sayısı
Katkısız Epoksi	90	5	1
%30 ağ. Ni ve GNi katkılı Epoksi	95	5	2
%40 ağ. Ni ve GNi katkılı Epoksi	95	5	2
%50 ağ. Ni ve GNi katkılı Epoksi	100	3	2
%60 ağ. Ni ve GNi katkılı Epoksi	100	3	2

### 3.2.3.2.Vorteks ile karıştırma

Tez çalışması kapsamında karıştırma yönteminin etkisinin de incelenmesi amacıyla Vorteks Mikser ile de karıştırma yöntemi seçilen bir adet katkı yüzdesi için (%40) Ni-EP ve GNi-EP kompozit numuneler hazırlanarak çalışılmıştır. Vorteks ile karıştırma yönteminin seçilmesinin nedeni sanayide uygulama olarak karşılığı olan, endüstriyel ölçüğe adapte edilebilir bir karıştırma yöntemi olmasıdır.

Bu kapsamda tartım ve katılama işlemlerinde elde karıştırma yöntemine benzer şekilde karışımlar hazırlanmış (Şekil 3.6 a); ancak elde ön karışırmaya ek olarak numune kabına alınan karışımlar lab tipi INTLLAB VM-370 Vorteks Mikser ile 2 dk boyunca 2800 rpm olarak vorteksten gelen titreşime ile karışırmaya tabi tutulmuştur. Sonrasında yine elde karıştırma yöntemine benzer bir şekilde Cu folyo kalıplara döküm ve ısıtıcı tabakada 70 °C'de 2 saat ısıtıcı tabla üzerinde kürlenmeye bırakılır ve numuneler Cu folyolar soyularak çıkarılmıştır. Net şekilde numunelerin çıkarımı için lazer kesim işlemleri Çizelge 3.1'e benzer parametrelerle yapılmıştır.



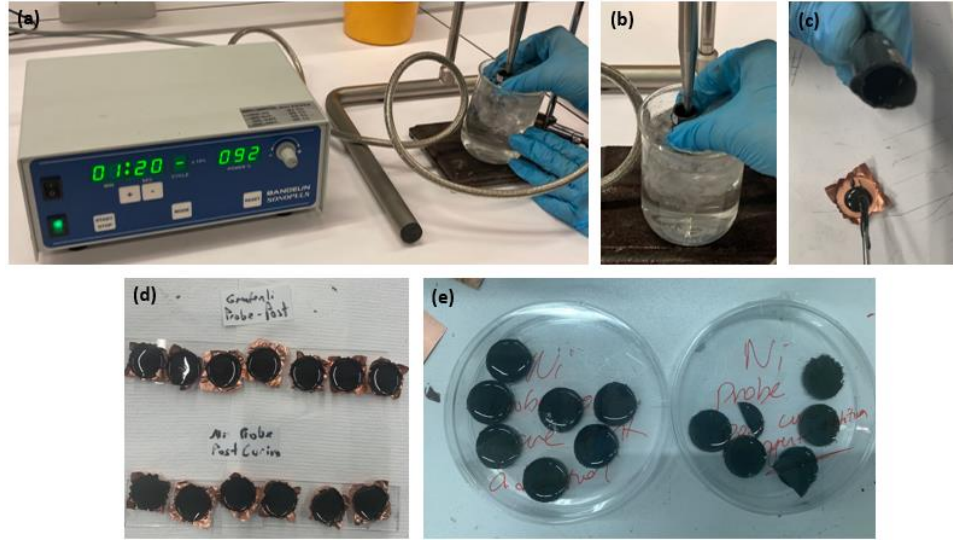
Şekil 3.6: Vorteks Mikser ile Karıştırma.

### 3.2.3.3. Ultrasonik prob tipi sonikatör ile karıştırma

Tez çalışması kapsamında bir diğer karıştırma yöntemi olarak de Ultrasonik Prob Tipi Sonikatör ile karıştırma yine seçilen bir adet katkı yüzdesi için (%40) Ni-EP ve GNi-EP kompozit numuneler hazırlanarak çalışılmıştır.

Ultrasonik Prob Tipi Sonikatör ile karıştırma yönteminin seçilmesinin nedeni ses dalgalarının etkisiyle kullanıcıya özel problemler ile karışım hazırlamanın hem sanayide hem de akademide rastlanılan yöntemlerden biri olmasıdır. Prob tipine ve cihaz tasarımına göre lab ölçekli, endüstriyel ölçekli birçok cihaza uygulama tipine göre rastlanabilmektedir. Bu karıştırma yönteminin dezavantajlarından biri sistemin çok kısa sürelerde çok fazlaca ısınmasıdır. Bu sebeple numune kabını buz dolu bir beher içine oturtma ya da çift cidarlı kap ve soğutma ünitesi (chiller) ile soğutulan kaplar kullanma gibi yöntemler ROKETSAN'da da mevcuttur. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada buz dolu behere numune tüpü daldırılarak sistemin soğuması sağlanmaya çalışılmıştır.

Numunelerin hazırlanmasında tartım ve katkılama işlemlerinde elde karıştırma yöntemine benzer şekilde karışımlar hazırlanmış; ancak elde ön karıştırmaya ek olarak numune kabına alınan karışımlar titanyum problu lab tipi Bandelin Sonopuls HD 2070 adlı cihazı ile (70 watt, 20 kHz) sonike edilmiştir. Cihaz kullanıcı arayüzünde gönderilen ses dalgasının genliği ve süre ekranları mevcuttur. Bu çalışmada %92 genlikle 2 dakika boyunca sonikasyon yapılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Prob tipi sonikatör ile karıştırma.

Sonikasyon sonrasında elde karıştırma yöntemindekine benzer bir şekilde Cu folyo kalıplara karışımın dökümü ve ısıtıcı tabakada 70 °C’de 2 saat ısıtıcı tabla üzerinde kürlenmeye bırakılma ve numunelerin Cu folyolar soyularak çıkarılması, net şekilde numunelerin çıkarımı için lazer kesim işlemleri Çizelge 3.1’e göre yapılmıştır.

### 3.2.4. Ni ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozitlerin karakterizasyonları

#### 3.2.4.1. Optik mikroskop (OM)

Hazırlanan GNi-EP kompozit numunelere kesit alanları boyunca katkılama yüzdesi artışına göre yapıdaki dağılımı görmek amacıyla mikroyapı analizleri yapılmıştır. Tüm katkılama yüzdesinde elde karıştırma yöntemi ile üretilen GNi-Epoksi kompozit numunelere kesit alanından TOBB ETÜ Teknoloji Merkezi’ndeki optik mikroskop (Eclipse LV150N, Nikon) ile mikroyapı analizleri yapılmıştır. Numuneler kesit alanı boyunca mozaik oluşturularak incelenmiştir.

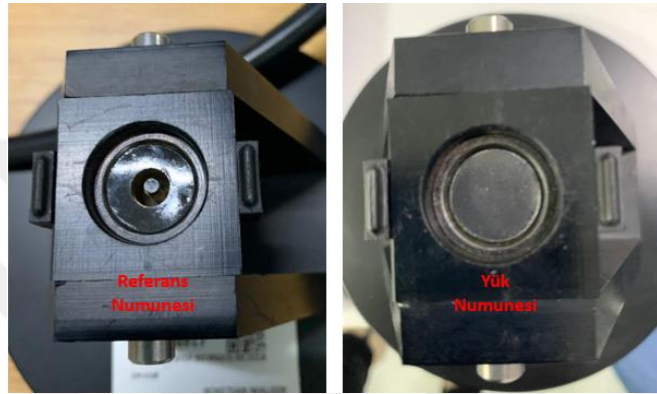
#### 3.2.4.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

OM’de olduğu gibi SEM analizlerinde de TOBB ETÜ Teknoloji Merkezi’ndeki taramalı elektron mikroskobu (Phenom XL, Termofisher Scientific) ile numunelerkesit alanından 500x ve 2000x büyütmelemlerde incelenmiştir.

### 3.2.4.3. Elektromanyetik kalkanlama etkinliği ölçümleri

ASTM D4935'e EM2108 fikstürüne (Şekil 3.8) göre hazırlanan Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelere 1,5 GHz-10 GHz frekans spektrumu aralığında EMG KE ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar toplam KE olarak dB cinsinden ROKETSAN EM Laboratuvarından alınmıştır.

Ölçümlerde 1,5 GHz-10 GHz frekans aralığı seçilmiş olmasının sebebi ROKETSAN EM Lab'ındaki fikstürün çalışma aralığı ile sınırlı olunmasıdır.



Şekil 3.8: ASTM D4935 1,5 GHz-10GHz Frekans Aralığı Test Fikstürü referans ve yük numuneleri.

ROKETSAN ölçüm kabiliyeti olarak bu frekans aralığın alınmasının kök nedeni; çeşitli malzemelerin EMG Kalkanlama Etkinliklerini belirleme süreçlerinde yani kupon seviyesi testlerde mümkün olduğunca ROKETSAN ürünlerinin karşılaşılabileceği EMG senaryolarına (cep telefonu sinyalleri ile girişim, WLAN-GPS ile girişim, bluetooth ile girişim, radar ve uydu haberleşmesi ile girişim, hava trafik kontrol sistemleri ile girişim, savunma takip sistemleri ile girişim gibi.) göre ilgili frekans aralığını seçerek malzemeleri bu aralıkta kalkanlama etkinliği testine almaktır. EMG Senaryoları olarak ROKETSAN ürünlerinin maruz kalabileceği cihazların, sistemlerin çalışırken yayın yaptığı frekans aralıkları ve bantlar ele alınır.

Örneğın;

- Cep telefonları, kablosuz yerel ağlar (WLAN), Radar sinyalleri, Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) 1,5-2 Ghz aralığında L bandında çalışır.



- Bluetooth, uydu telefonu ve cep telefonu, televizyon yayınının bir kısmı 2-4 Ghz aralığında S bandında çalışır.
- Uydu haberleşmesi, kablosuz telefon ve Wifi 4 - 8,2 Ghz aralığında C ve J bantlarında çalışır.
- Yine uydu haberleşmesinin bir kısmı, hava trafik kontrol sistemleri, savunma takip sistemleri 8,2 Ghz – 12 Ghz aralığında X bandında çalışır.

Bahsedilen bu uygulamalardan gelen Elektromanyetik Girişimden ROKETSAN ürün ve sistemlerini EMG'ye karşı kalkanlamak gerekli olduğundan EMG KE testleri mümkün olduğunca bu geniş bir aralığı kapsayacak şekilde yapılır. Özel olarak ise 1,5 ve 4 Ghz için ve 8,5 ve 10 Ghz noktasal frekansları L bandından, S bandından ve X bandından noktasal veri alabilmek ve katkılama yüzdesine göre karşılaştırma yapabilmek için de incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında karıştırma yönteminin etkisinin de incelenmesi amacıyla seçilen bir adet katkı yüzdesi için (ağ. %40), Vorteks Mikser ve Prob Sonikatör ile karıştırma yöntemleri ile katkılamalar yapılarak Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelerin de EMG KE ölçümleri alınmıştır.

### **3.2.5. Ni-EP ve GNi-EP kompozitlerin dört nokta prob ile yüzey direnci ölçümleri ve perkolasyon eşiklerinin teorik olarak hesaplanması**

GNi-EP ve Ni-EP kompozitlerin 30,40,50 ve 60 ağ. katkılama yüzdelerinde iletkenlik değerleri perkolasyon eşiği saptanması için Dört Nokta Prob ile ölçülmesi denenmiştir; ancak epoksi matrise gömülen problar sebebiyle sağlıklı bir ölçüm alınamamıştır. Yüzeyden epoksinin zımparalanması ve yüzey direnci ölçüm denenmiş bu senaryoda da probun dört noktası da aynı anda eşit bir seviyede yüzeye değemediğinden tekrarlanabilir iletkenlik değeri ölçümü alınamamıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Epoksi matrisli kompozit numunelere Dört Nokta Prob ile ölçüm alma denemeleri.

Ni ve GNi tozlarının iletkenlik değerlerinin belirlenebilmesi için yüzey dirençleri Dört Nokta Prob ile ölçümleri yapılmıştır. Tozlardan Dört Nokta Prob numuneleri hazırlamak için Ni ve GNi tozlar preslenmiş ve sinterlenmiştir. Hazırlanan numuneler Dört Nokta Prob 1A akım altında ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları tekrarlanabilir ve anlamlı olmuştur.

Dört Nokta Prob ile kompozit malzemelerin elektriksel özelliklerin karakterizasyonunda akımın iki dış probdan beslenmesi ve voltajın iç iki problardan ölçülmesi yöntemi ile yüzey direnci (*sheet-surface resistance*) belirlenir [Url-145]. Yüzey direnci hesabı literatürde Dört Nokta Prob için temel anlamda voltaj ve akımın birbirine oranını içeren (3.1) bağıntısı ile yapılmıştır [84,85].

$$Rs = \frac{\pi}{\ln 2} x \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

$$Rs = 4,53236 x \frac{V}{I}$$

Ölçülen malzemenin kalınlığı biliniyorsa, malzemenin özdirencini (resistivity) hesaplamak için yüzey direnci de kalınlık ile çarpılarak kullanılabilir. Özdirencin tersi ile de iletkenliğe geçiş yapılabilir (3.3).

$$g = Rs \cdot t \quad (3.2)$$

$$\sigma = \frac{1}{9} \quad (3.3)$$

GNi-EP ve Ni-EP kompozit yapıların iletkenlik değerleri epoksi matrisli yapıdan dolayı ölçülememiştir. Ni ve GNi tozlarının iletkenlik değerleri tozlar preslenerek ve sinterlenerek Dört Nokta Prob ile ölçülebilmmiştir. Epoksi reçine yalıtkan olarak sınıflandırıldığı için Dört Nokta Prob ile karakterize edilememekte, epoksi numunelerle ölçüm alınmaya çalışıldığında çıktılar cihazın ölçüm toleransı sınırları dışında kalmaktadır. Ancak epoksi reçinenin iletkenlik değerleri ( $\sigma_{\text{epoxy}} = 1 \times 10^{-4}$  S/m) literatürden bilinmektedir [85].

Bu veriler ışığında Karışımlar Kuralı kullanılarak GNi-EP ve Ni-EP kompozitlerin etkin iletkenlik değerleri hesaplanmıştır [87,88]. Sonrasında da teorik perkolasyon eşikleri hesaplanmıştır. Bölüm 4'de sunulmuştur. Teorik olarak hesaplanan perkolasyon eşğine göre GNi-EP ve Ni-EP kompozit numunelerde realitede perkolasyonun hangi eşiklerde sağlandığı EMG Kalkanlama Etkinliği Performansı değişimi üzerinden Bölüm 4'de tartışılacaktır.

Perkolasyon teorisine göre, kompozitte malzemenin bir yalıtkindan iletkene dönüşmesine neden olan iletken bir yolun oluştuğu, perkolasyon eşği adı verilen kritik bir konsantrasyon vardır. Bu konsantrasyonun üstünde kompozit yapıya ne kadar yükleme yapılırsa yapılısın elektriksel iletkenliği ve buna bağlı olan özellikleri daha da iyileşmemektedir [89,90].

Bu tez çalışması kapsamında üretilen Ni ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozitlerin perkolasyon eşiklerinin saptanması için analitik olarak aşağıda bahsedilen hesaplamalar yapılmıştır.

Perkolasyon eşği hesabında Kuvvet Kanunu (Power Law) kullanılmıştır [91].

$$\sigma = \alpha (f - f_c)^t \quad (3.4)$$

$\sigma$  = kompozitin hacimsel iletkenliği

f= katkı malzemesinin ağ. katkılanma yüzdesi

f<sub>c</sub>= kritik katkılama yüzdesi (perkolasyon eşiği)

α, t = sabitler

Bu kapsamda öncelikle %30, %40, %50 ve %60 ağ. katkılama yüzdelerinde kompozitin etkin elektriksel iletkenliği (σ<sub>e</sub>) karışımlar kanunu ile hesaplanmıştır.

Karışımlar kanununa ve bu kanunun çeşitli modellerine göre kompozit malzemenin etkin elektriksel iletkenliği, yalnızca yapıyı oluşturulan iki malzemenin elektriksel iletkenliklerine ve hacim oranlarına bağlı olmamakta, aynı zamanda bu iki bileşenin kompozitte nasıl karıştığı ve yapılandırıldığına da bağlıdır. Genel bir yaklaşım geliştirildiğinde ise bir bileşenin homojen bir ortam oluşturduğunu ve diğer bileşenin bu ortamda homojen bir şekilde karıştığını varsayılır. Kompozitin etkin elektriksel iletkenliğini hesaplamak için karışımlar kanunun birçok yaklaşım kullanılabilir [86-92]. Paralel, seri ve küresel modeller yaygın olarak σ<sub>e</sub> hesabı için kullanılır. Bu çalışmada küresel model kullanılmıştır [86]. Karışımlar kuralında küresel modele göre, kompozitin etkin elektriksel iletkenliği şu şekildedir:

$$\sigma_e = \frac{(2V_m \cdot \sigma_m^2 + (3V_i + V_m) \sigma_i \cdot \sigma_m)}{(3V_i + 2V_m) \sigma_m + V_m \cdot \sigma_i} \quad (3.5)$$

$$\sigma_e = \frac{(2V_i \cdot \sigma_i^2 + (3V_m + V_i) \sigma_i \cdot \sigma_m)}{(3V_m + 2V_i) \sigma_i + V_i \cdot \sigma_m} \quad (3.6)$$

σ<sub>i</sub> ve V<sub>i</sub>: katkı malzemesinin (inclusion) elektriksel iletkenliği ve hacim oranı

σ<sub>m</sub> ve V<sub>m</sub>: matrisin elektriksel iletkenliği ve hacim oranı

Katkı malzemesinin hacimce yüzdesel oranı matrise yakın ya da matris oranından yüksekse ilk bağıntı; matristen oldukça düşük ise 2. Bağıntının kullanılması önerilir.

Ağ. %30, %40, %50 ve %60 Ni ve GNi katkılama yüzdelerinde kompozitin etkin elektriksel iletkenliğini bulmak için öncelikle hacimce yüzdesel oranlar bağıntısına (3.7) göre hesaplanır [86].

$$V_i = \frac{m_i \cdot g_m}{m_i \cdot g_m + (1 - m_i) \cdot g_i} \quad (3.7)$$

$V_i$ : katkı malzemesinin (inclusion) hacim oranı

$\sigma_m$ : matrisin yoğunluğu

$m_i$ : katkı malzemesinin (inclusion) ağırlıkça oranı

$\rho_i$ : katkı malzemesinin (inclusion) yoğunluğu

Katkılı kompozitler için etkin elektriksel iletkenlik (3.8) yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_e = \frac{(2Vm.\sigma_m^2)+(3Vi+Vm)\sigma_i.\sigma_m}{(3Vi+2Vm)\sigma_m+Vm.\sigma_i} \quad (3.8)$$

Hesaplanan etkin iletkenlik değerleri kuvvet kanununda yerine konulup  $f_c$  perkolasyon eşiği bulunur.

$$\sigma = a (f - f_c)^t$$

Ni-EP kompozitler için ve GNi-EP kompozitler için yazılan kuvvet kanunu eşitlikleri grafik eğrilerine oturtulur (curve fitting). Bu işlem yapılırken hem denklem (3.4) hem de denklem (3.4)'ün lineerleştirilmesi için her iki tarafının logaritması alınmış versiyonu kullanılır. Literatürde de bu yaklaşımla kuvvet kanuna eğri denklemini oturtma ve  $a, t$  sabitlerini eğriden saptama,  $f_c$  perkolasyon eşiğini de hesaplama yaklaşımına sıkça rastlanmaktadır [91,93].

$\sigma = a (f - f_c)^t$  bağıntısının her iki tarafının logaritması alındığında;

$$\log \frac{\sigma}{a} = \log (f - f_c)^t \quad (3.9)$$

$$\log \sigma - \log a = t \cdot \log (f - f_c) \quad (3.10)$$

$$\log \sigma = t \cdot \log (f - f_c) + \log a \quad (3.11)$$

$$y = m \cdot x + b \quad (3.12)$$

(3.11) denklemini lineer birinci dereceden bir bağıntıya benzetilecek olursa;

$x = \log (f - f_c)$  ,  $y = \log \sigma$  , eğim= $t$  sabiti ve son olarak  $b = \log a$  olarak düşünülebilir [94].

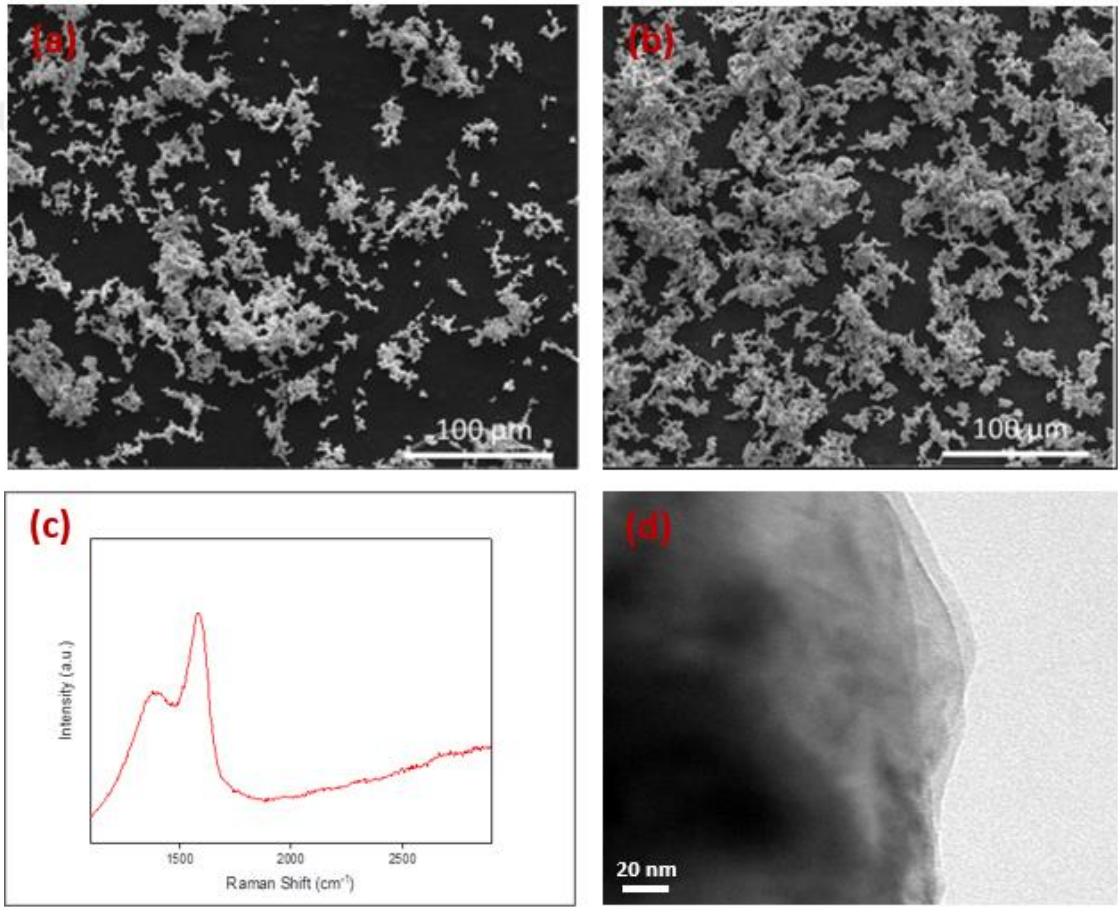
Bu durumda Ni-EP ve GNi-EP kompozitlerde tüm katkılama oranları için hem üssel hem de logaritmik eğriler çizdirilmiştir. Logaritmik skalaya geçilirken  $f-f_c$  yani x ekseninde hacimce katkılama yüzdeleri kullanılmıştır. Lineer eğri denklemleri çıkarılmıştır. Sonuçlar Bölüm 4'de Bulgular kısmında sunulmuştur.



## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Nikel Tozları Üzerinde Sentezlenen Grafitik Yapının Karakterizasyonu

Ni ve GNi tozlarının karşılaştırmalı SEM'leri, Raman Spektroskopisi pikleri ve TEM görüntüsüne bakıldığında yüzeyde bir grafitik yapı oluşumu olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.1(a)'da Ni tozlarının hiçbir işlemde geçmeden olduğu gibi SEM görüntüsü alınmıştır.



Şekil 4.1: a) As-Rec Ni tozlarının SEM görüntüsü, (b) GNi tozlarının PDDAKBÇ prosesi sonrası SEM görüntüsü ( $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 200\text{ W}$ ,  $V\text{CH}_4 = 20\text{ cm}^3/\text{dk}$ ,  $V\text{H}_2 = 15\text{ cm}^3/\text{dk}$ ,  $V\text{Ar} = 20\text{ cm}^3/\text{dk}$ ,  $t = 15\text{ dk}$ ,  $m\text{Ni} = 5\text{ gram}$ ), (c) GNi tozlarının Raman Spektroskopisi Analizi, (d) GNi tozlarının TEM görüntüsü.

Şekil 4.1’de parametreleri verilen Bölüm 3’de tariflenen PDDAKBÇ yöntemi ile sentezlenen GNi tozlarının SEM görüntüsü verilmiştir.

Buradaki en önemli nokta 400 °C’de PDDAKBÇ’de grafitik yapı ile kaplanma proseslerinin ardından SEM analizleri GNi tozlarının sinterlenmediği göstermektedir. Bu durum GNi tozların matriste dispersiyonları için önemlidir.

Raman pikleri Şekil 4.1(c)’de yapıda 1580 cm’lerdeki G piki grafitik yapı oluşumunu ve 1400 cm’lerdeki D piki yüzeyde defektif bir yapı oluştuğunu göstermektedir. TEM görüntüsüne göre Şekil 4.1(d)’de nikel toz üzerinde yaklaşık 20 nm’lik bir grafitik yapı oluşumu mevcuttur.

#### 4.2.Ni-EP ve GNi-EP Kompozitlerin Perkolasyon Eşiklerinin Teorik Olarak Hesaplanması

Bölüm 3.2.5’de detayları anlatılan yöntem ile Ni ve GNi tozlarının elektriksel iletkenlik değerleri 4 ölçüm alınarak ölçüm sonuçlarının ortalaması şeklinde Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1: Ni ve GNi tozlarının elektriksel iletkenlik değerleri

	Ni tozlarının Elektriksel İletkenliği	GNi tozlarının Elektriksel İletkenliği
Ölçüm 1	5,97x10 <sup>6</sup> S/m	20,07x10 <sup>6</sup> S/m
Ölçüm 2	4,91x10 <sup>6</sup> S/m	22,08x10 <sup>6</sup> S/m
Ölçüm 3	4,80x10 <sup>6</sup> S/m	16,98x10 <sup>6</sup> S/m
Ölçüm 4	4,91x10 <sup>6</sup> S/m	20,07x10 <sup>6</sup> S/m
<b>Ortalama</b>	<b>5,15x10<sup>6</sup> S/m</b>	<b>19,80x10<sup>6</sup> S/m</b>

Ağ. %30, %40, %50 ve %60 Ni ve GNi katkılama yüzdelerinde kompozitin etkin elektriksel iletkenliğini bulmak için öncelikle hacimce yüzdesel oranlar bağıntısına (3.7) göre hesaplanır.



Nikel için (Denklem 3.7)'ye göre hacimce % değerleri hesabı Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: Ni (yoğunluk: 8900 kg/m<sup>3</sup>) için epoksi matrise (yoğunluk:1150 kg/m<sup>3</sup>) hacimce % katkılar

Ağ. % Ni	Hac. % Ni
30	5,25
40	7,93
50	11,44
60	16,24

Grafen Kapsüllü Nikel için Denklem (3.7)'ye göre hacimce % değerleri hesabı Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3: GNi (yoğunluk 9790 kg/m<sup>3</sup>) için epoksi matrise (yoğunluk 1150 kg/m<sup>3</sup>) hacimce % katkılar

Ağ. % GNi	Hac. % GNi
30	4,80
40	7,27
50	10,51
60	14,98

Nikel ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozitler için etkin elektriksel iletkenlik (3.8) yardımıyla hesaplanmış Çizelge 4.4' ve Çizelge 4.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4: Ni-EP kompozitlerin etkin iletkenlik değerleri (nikelin elektriksel iletkenliği: 5,15x10<sup>6</sup> S/m ve epoksinin elektriksel iletkenliği 1x10<sup>-14</sup> S/m)

Ağ. % Ni	İletkenlik ( $\sigma_{Ni}$ )
30	181624 S/m
40	277052 S/m
50	404602 S/m
60	583731 S/m

Çizelge 4.5: GNi-EP kompozitlerin etkin iletkenlik değerleri (nikelin elektriksel iletkenliği:  $19,8 \times 10^6$  S/m ve epoksinin elektriksel iletkenliği  $1 \times 10^{-14}$  S/m)

Ağ. % GNi	İletkenlik ( $\sigma_{GNi}$ )
30	636778 S/m
40	972937 S/m
50	1424172 S/m
60	2061458 S/m

Etkin iletkenlik değerleri ve hacimce yüzdeler kuvvet kanunu Denklem (3.4)'de yerine yazılıp üssel ve lineer grafikler Bölüm 3.2.5'de tariflendiği gibi çizdirilir (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3).

Sabitler eğriden edinilir ve perkolasyon eşiği Denklem (3.11)'den hesaplanır.

Ni-EP kompozitler için sırasıyla;

$$181624 = a. (0,0525-fc)^t$$

$$277052 = a. (0,0793-fc)^t$$

$$404602 = a. (0,1144-fc)^t$$

$$583731 = a. (0,1624-fc)^t$$

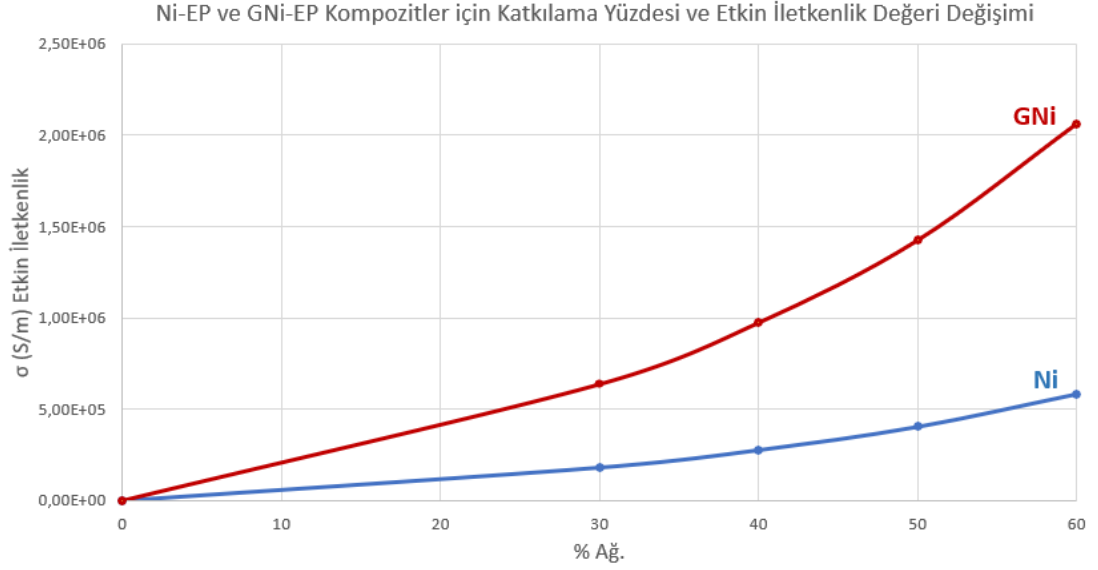
GNi-EP kompozitler için:

$$636778 = a. (0,048-fc)^t$$

$$972937 = a. (0,0727-fc)^t$$

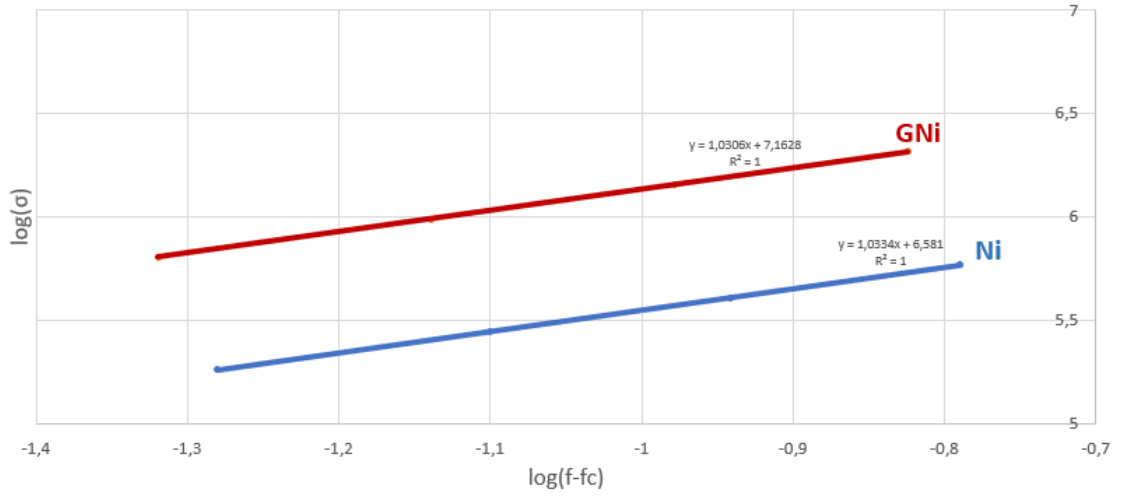
$$1424172 = a. (0,1051-fc)^t$$

$$2061458 = a. (0,1498-fc)^t$$



Şekil 4.2: Ni ve GNi için Katkılama Yüzdesi ve Etkin İletkenlik Değeri Değişimi.

GNi-EP Kompozitler için Katkılama Yüzdesi ve Etkin İletkenlik Değeri Değişimi  
(Logaritmik)



Şekil 4.3: Logaritmik Skala'da Ni ve GNi için Katkılama Yüzdesi ve Etkin İletkenlik Değeri Değişimi ve Eğri Denklemi Oturtma.

Ni için eğri denkleminde bakıldığında  $t=1.0334$  ve  $6,581 = \log a$  olup  $a=3,812 \times 10^6$ 'dır. Kuvvet kanununda (3.4) yerine yazarsak

$$\log \sigma = t \cdot \log(f - f_c) + \log a \quad (3.11)$$

$$5,60703 = 1,0334 \cdot \log(0,11443 - fc) + 6,581$$

$$fc=0,104598$$

fc=0,104598 hac.% 10,4598 Ni perkolasyon eşiği

Ni-EP kompozit için perkolasyonun gerçekleştiği hacimce %Ni miktarı Ağırlıkça % Ni olarak (3.7)'de yerine yazılarak çevirilirse;

Mi=0,4748 yaklaşık 47% ağırlıkça. Nikel için epoksi matriste perkolasyon eşiği olarak hesaplanmıştır.

GNi için eğri denkleminde (3.11) bakıldığında t=1.0306 ve 7,1628= loga olup a=14,548x10<sup>6</sup> dir.

$$\log \sigma = t \cdot \log(f - fc) + \log a$$

$$6,15356 = 1,0306 \cdot \log(0,10512 - fc) + 7,1628$$

fc=2,33933x10<sup>-2</sup> hac.% 2,34 GNi perkolasyon eşiği

Hacimce %'den ağırlıkça %'ye geçiş için (3.7)'de yerine yazıldığında;

Mi=0,1694 yaklaşık 17% ağırlıkça. Grafen Kapsüllü Nikel için epoksi matriste perkolasyon eşiği olarak hesaplanmıştır.

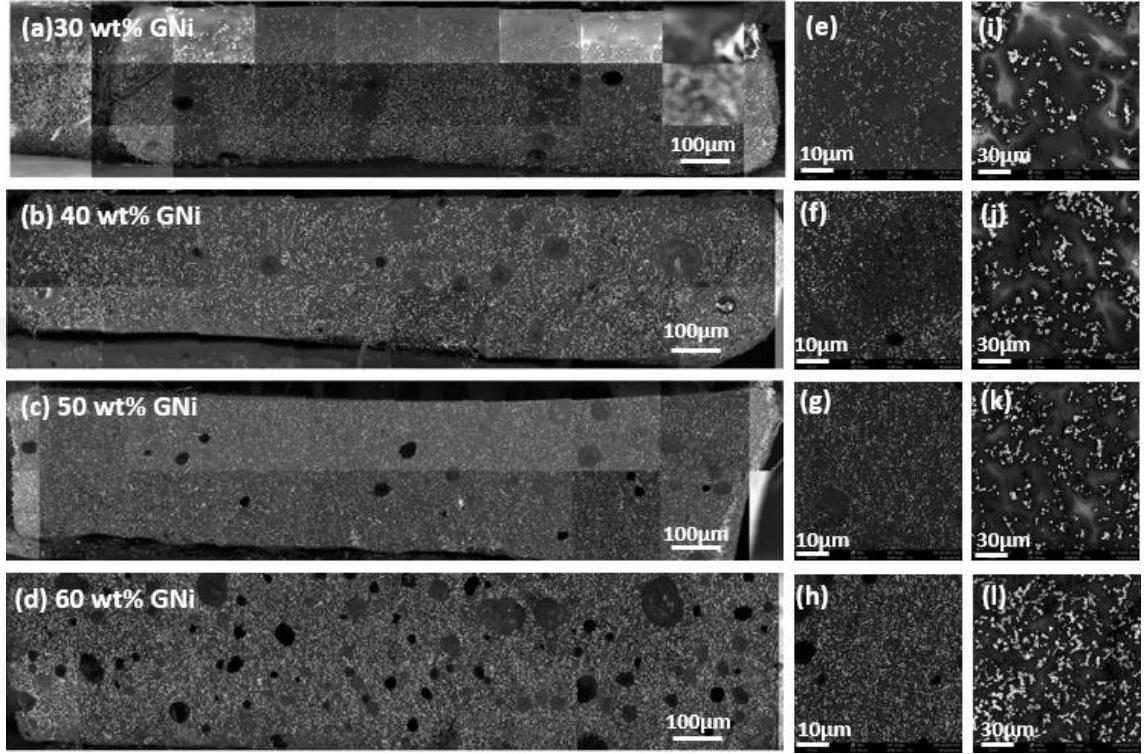
### 4.3. Ni ve GNi Katkılı Epoksi Matrisli Kompozitlerin Karakterizasyonları

Ni ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozit numunelerin mikroyapısal analizi OM ve SEM ile yapılmış ve Elektromanyetik Kalkanlama Etkinlikleri ölçülmüştür.

#### 4.3.1. Mikroyapı analizleri

Bölüm 3'de yöntem bölümünde belirtilen katkılama oranlarında (ağırlıkça %30, 40, 50, 60) Elde Karıştırma ile üretilen epoksi matrisli kompozit numunelerin mikroyapısal analizi OM ve SEM ile yapılmıştır. Bu analizlere önce Optik Mikroskop ile numune kesit alanı boyunca haritalama yapıp mozaik oluşturularak başlanmıştır (Şekil 4.4 a-d).

Aynı GNi-Epoksi kompozit numunelere kesit alanından morfolojik analiz taramalı elektron mikroskobu ile 500x ve 2000x büyütmelerde gerçekleştirilmiştir. Kesit alanından yapılan morfolojik analizde katkılama yüzdesi arttıkça %30'dan %60'a doğru birim alandaki GNi miktarının arttığı hem 500x'lik büyütmelerde (Şekil 4.4 e-h) ve 2000x'lik büyütmelerde görülmektedir (Şekil 4.4 i-l).



Şekil 4.4: (a-d) ağ. %30, 40, 50, 60) Elde karıştırma ile üretilen epoksi matrisli kompozit numunelerin OM görüntüleri, (e-h) SEM görüntüleri 500x büyütme, (i-l) SEM görüntüleri 2000x büyütme.

Kesitlerden alınan optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu görüntülerine bakıldığında GNi parçacıklarının numune boyunca homojene yaklaşan bir dağılım sergilediğini söylenebilir. Lokalize GNi topları ya da reçine zengin GNi'siz bölgeler de mevcuttur; ancak yine de numune kesiti boyunca katkı malzemesi bir dağılım gösterebilmiştir (Şekil 4.4).

Ağ. %30 GNi-EP numunesinden %60 GNi'ye doğru sırayla incelenerek gidildikçe yapıdaki katkı miktarının yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Dikkat çekici bir şekilde katkı miktarı arttıkça porozitenin de arttığı OM ve SEM görüntülerindeki siyah dairesel boşluklu kısımlardan anlaşılmaktadır. Bu porozitelerin numune hazırlanırken,

kürlenirken yapıda sıkışmış olarak kalan hava baloncuklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıvı azot ile numune kesitten analiz için kırılınca da bu boş (reçine ve katkı malzemesi bakımından fakir) olan kısımlar OM'de ve SEM'de boşluk (void) olarak görünmektedir.

Duratek 2400 reçinesi kürlenirken özellikle volatile gaz çıkışı oluşturan bir reçine olduğu bilinmektedir. Katkı miktarı arttıkça hem epoksi matris yapısına katılanan tozların entegre etme prosesi zorlaşmakta, hem de bu esnada karıştırma kütleme gibi süreçlerde hava boşluklarının çıkışının da güçleştiği değerlendirilmektedir. Katkılı karışım hazırlandıktan sonra karışıma bir degas işleminin yapılması ya da vakumlu fırında kütleme yapılmasının numune muhtevastaki sıkışmış hava kabarcıklarını azaltacağı, bu sebeple ileriki aşamalarda numune üretimlerine yönelik olarak alınması gereken aksiyonlardan olduğu değerlendirilmektedir.

#### **4.3.2. Ni ve GNi katkılı epoksi matrisli kompozit numunelerin EMG kalkanlama performansının incelenmesi**

Ni-EP ve GNi-EP için ağı. %30'dan ağı. %60 mertebesine kadar katkı malzemesi Ni ve GNi epoksi matrise elde karıştırma yöntemi ile katılanmıştır.

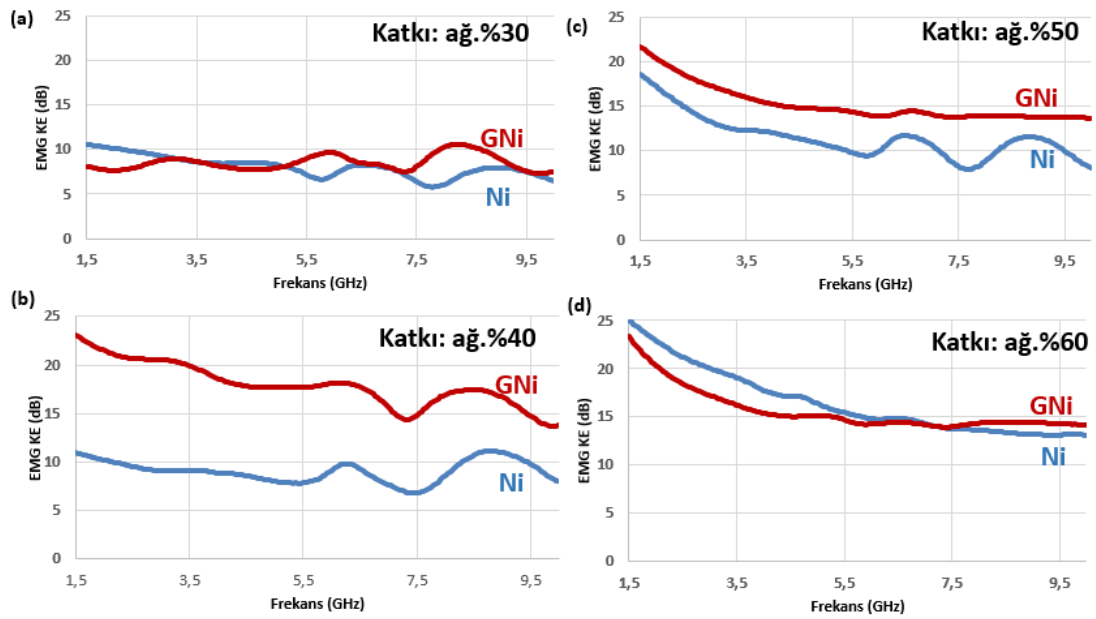
Ek olarak tez çalışması kapsamında karıştırma yönteminin etkisinin de incelenmesi amacıyla seçilen bir adet katkı yüzdesi için (ağı. %40), Vorteks Mikser ve Prob Sonikatör ile karıştırma yöntemleri ile katkılama yapılarak Ni-EP ve GNi-EP kompozit numuneler hazırlanmış, bunların da EMG KE ölçümleri alınmıştır.

Üç karıştırma yönteminin EMG KE performanslarına etkisi de bu bölümde tartışılmıştır. Sonuçlar her yöntem için aşağıdaki ilgili bölümlerde taranan spektrum boyunca (1,5-10 GHz) sunulmuştur.

GNi katkılı epoksi matrisli kompozitlerin aynı katkılama yüzdesindeki Ni katkılılara göre EMG KE değerlerinde özellikle ağı.%40 ve ağı.%50 katkılama oranlarından belirgin iyileşmeler görülmüştür. İyileşmeler tıpkı EMG KE değerleri gibi frekans spektrumu boyunca değişkenlik gösterebilmektedir.

### 4.3.3. Elde karıştırma yöntemi ile hazırlanmış Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelerin EMG KE performansları

Bu tez çalışması kapsamında öncelikli olarak elde karıştırma yöntemi ile kompozit numune üretilmesi süreçleri çalışılmıştır. Bu yöntemin Ni-EP ve GNi-EP kompozit numune üretimlerinde öncelikli ve ana yöntem olarak tercih edilmesinin sebebi ROKETSAN süreçlerinde özellikle büyük ölçekli imalat proseslerinde epoksi matrise kat karıştır yönteminin (yani elde karıştırma yönteminin) sıkça kullanılıyor olmasıdır. Elde karıştırma ile numune üretim sürecinin Bölüm 3.2.3’de detayları tariflenmiştir. Bu yöntemle üretilmiş numunelerin 1,5 GHz-10 GHz frekans spektrumu boyunca EMG KE’leri ölçülmüştür. Ni-EP ve GNi-EP’lerin EMG KE performansları tüm katkılama yüzdeleri için spektrum boyunca karşılaştırılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: Elde Karıştırma yöntemi sırasıyla ağ. %30, 40, 50,60 Ni ve GNi katkılı epoksi kompozitlerin EMG KE (dB) değerleri.

Sonuçlar elde karıştırma yöntemi için değerlendirilecek olursa %30'luk katkılamada 5 GHz'den sonra GNi-EP'lerin Ni-EP'lere göre üstün bir kalkanlama performansı gösterdiği söylenebilir.

Ağ.%30 ve ağ.%60 katkılama yüzdelerinde de belirli frekans aralıklarında yine GNi'lerin üstün olduğu durumlar mevcuttur. Ağ.%30 katkılama oranı için 5 GHz'den sonra 10 GHz'lik taranan bölgeye doğru GNi katkılıların Ni katkılılara göre üstünlüğü başlamıştır. Benzer şekilde ağ.%60 katkılama oranı için 7,5 GHz'den sonra 10 GHz'e kadar GNi'liler daha yüksek performans göstermektedir. Grafitik yapı ilavesinin yüksek frekans bölgesinde kalkanlamaya daha etkin bir katkı verdiği değerlendirilebilir.

GNi-EP kompozitlerde ağ.%40 için, ağ.%50 ve ağ.%60 için benzer mertebede sonuçlar alınmaya başladığı spektrum boyunca gözlemlenebilmektedir.

Bu bağlamda ağ.%40 katkılama oranı için GNi katkılı epoksi matrisli kompozitlerde perkolasyonun sağlanmaya başladığı EMG KE sonuçları ağ.%50 ve ağ.%60'da da benzer mertebede çıkmaya başladığından dolayı söylenebilmektedir.

Ni katkılılar için ise ağ.%60da EMG KE artışı devam ettiğinden perkolasyon ağ.%60da da henüz sağlanmamış olduğu değerlendirilebilir (Şekil 4.5 d). Perkolasyon eşiğinin, grafitik bir yapı ile nikel tozlarını kapsülleme/kaplama etkisiyle (GNi'li kompozitlerde) aşağıya düşmesi önemli bir avantajdır.

Bu sayede GNi kullanımı ile Ni kullanımına göre daha düşük katkılama yüzdelerinde benzer kalkanlama etkinliği değerleri alınmaya başlanabilmektedir.

Yüksek frekans aralığında (1,5GHz-10GHz) numuneye gönderilen dalga boyu da çok düşük ve numune kalınlığı da oldukça az (1mm) olduğundan yüzeyden yansımaların baskın olduğu; aktif olarak çalışıyor olan kalkanlama mekanizmasının yansıtma olduğu düşünülmektedir. Grafitik bir kapsülleme/kaplama ile yapının iletkenliğinin artırılması yansıtma ile olan kayıplara ve dolayısıyla kalkanlama etkinliğine olumlu etki etmiştir. GNi'li yapıda iletken networkü ve bağlantısallığı sağlamak Ni'li yapıdakine göre daha kolay olmuştur.

Bu sebeple harcıalem, ticari nikel tozlarına yapılan grafitik yapıda bir kaplamanın dahi saf nikelere göre epoksi matrislerde perkolasyon eşiğini düşürmeye başladığı değerlendirilmektedir. Daha saf, kusuruz, tek katmanlı bir grafen kaplamasının



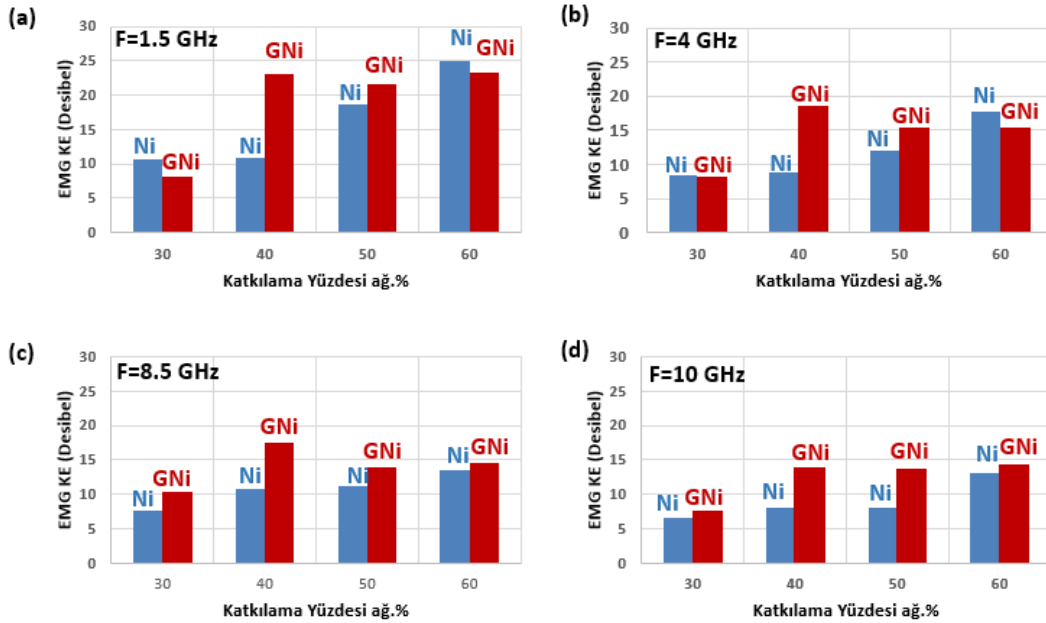
mümkün olması halinde yapının çok daha iletken hale geleceği, çok daha düşük katkılama yüzdelerinde perkolasyonun sağlanabileceği değerlendirilmektedir. Ancak bu mertebede iyileşmeler dahi günümüz sanayi uygulamaları için umut vaad edicidir.

#### 4.3.3.1.Elde karıştırma yönteminde belirli frekanslarda EMG KE performanslarının karşılaştırılması

Savunma Sanayii uygulamaları için televizyonların karasal yayınları, cep telefonları, radarlar, kablosuz modemler, GPS sistemleri, bluetooth, kablosuz iletişim aracının çalıştığı L ve S bant frekans aralıklarını (1-4 GHz) özel olarak önem arz etmektedir.

Askeri ve sivil radar sistemlerinin, uydu iletişimi, hava trafiği kontrolünün, hava tahminlerinin ve savunma takip izleme sistemlerinin çalıştığı X bant frekans aralıkları (8.2-12,4 GHz) yine kritik önem arz etmektedir.

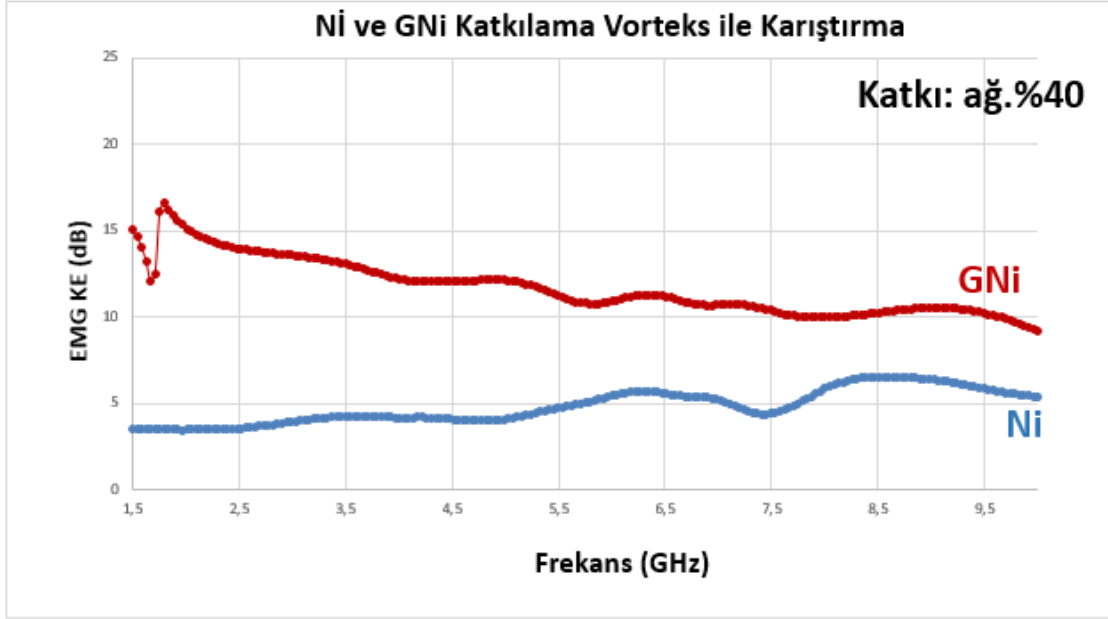
Bu aralıklarda özel olarak 1,5 ve 4 Ghz için ve 8,5 ve 10 Ghz katkılama yüzdelerine göre EMG KE grafikleri çizdirilmiştir. GNi katkılı epoksi matrisli kompozit numuneler seçilen bu frekanslarda Ni katkılılara göre genel anlamda üstün bir Kalkanlama Etkinliği oluşturma eğiliminde olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: Elde karıştırma yönteminde tüm katkılama oranları için (%30, 40, 50,60) Ni ve GNi katkılı epoksi kompozitlerin sırasıyla 1.5, 4, 8.5 ve 10 GHz frekanslarında EMG KE (dB) değerleri karşılaştırılması.

#### 4.3.4. Vorteks ile Karıştırma Yöntemi ile Hazırlanmış Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelerin EMG KE performansları

Bu tez çalışması kapsamında karıştırma yönteminin etkisinin de incelenmesi amacıyla seçilen bir adet katkı yüzdesi için (ağ. %40), Vorteks Mikser ve Prob Sonikatör ile karıştırma yöntemleri ile katkılar yapılarak Ni-EP ve GNi-EP kompozit numuneler hazırlanmış, bunların da EMG KE ölçümleri alınmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Epoksi matrise ağ. %40 Ni ve GNi katkılama EMG KE değeri (Vorteks ile karıştırma).

Vorteks mikser ile ağ %40'lık bir katkılama ile yapılan karışırmada üretilen Ni-EP ve GNi-EP kompozitlerin EMG KE performansları incelendiğinde GNi-EP kompozitlerin grafen/grafitik kapsül yapısının yapıya ekstra iletkenlik katkısı sağlayarak yansıtma mekanizması ile kalkanlamayı tetiklemesi öngörülmekteydi. Öngörüldüğü gibi Ni-EP kompozitlere göre GNi-EP'ler spektrum boyunca 5 ila 12 dB kadar üstün bir kalkanlama sağlamıştır. Kalkanlama mekanizmalarının yüzdesel olarak total kalkanlamaya katkısının belirlenmesi çalışması da Vorteks ile üretilmiş bu numuneler için yapılmıştır. Bölüm 4.3.4.1'de detay sonuçlar ve yorumlar sunulmuş

olup, sonuçlar öngörüyü (GNi'lerde yansıtma mekanizmasının daha baskın olduğunu ve total kalkanlamanın iyileşmesine katkı sağladığını) doğrular niteliktedir.

Vorteks ile karıştırma yönteminde her iki katkı malzemesinde de (Ni ve GNi) aynı yüzdelere için (ağ. %40) elde karıştırma ile elde edilen Kalkanlama etkinliklerine ulaşamamıştır. Elde karıştırmada Ni'ler spektrum boyunca 8 ila 18 dB arası, GNi'ler 13 ila 21 dB arası seyrederken; vorteks ile karıştırmada bu mertebeler Ni için 3 ila 6 dB arası, GNi için 9 ila 16 dB arasına düşmüştür.

Bu durumun sebebi ilerleyen bölümlerde de açıklanacağı üzere; reçine matrislerinde karıştırma yöntemi ile mikro ölçekte değil de makro ölçekte bir karışım ve homojenlik durumu sağladığında daha üstün EMG Kalkanlama etkinliği elde edilebilir olmasıdır [54].

#### **4.3.4.1.Kalkanlama mekanizmalarının Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelerde yüzdesel dağılımı ve baskın mekanizma (vorteks ile karıştırma)**

Bir kalkan malzemesinin toplam EMG KE performansının Yansıtma, Absorplama ve Geçirim değerlerinin yüzdesel bir dağılımı olması gerekmektedir.  $A+R+T=1$  olmalıdır.

Baskın kalkanlama mekanizmasının daha yüksek yüzdede kalkanlama katkı vermesi prensibine göre bu komponentlere göre dağılımın belirlenmesi için EMG KE performansı ölçümü esnasında bir portlandırma çalışması yapılarak sadece total SE değeri değil  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  ve  $S_{22}$  sinyalleri de toplanır. Ölçüm sayısı 4 katına çıkar, bu sebeple her zaman tercih edilen bir yöntem olamamakla birlikte yapıdaki baskın mekanizmayı anlayabilmek için icra edilen bir analizdir.

Bu noktada;

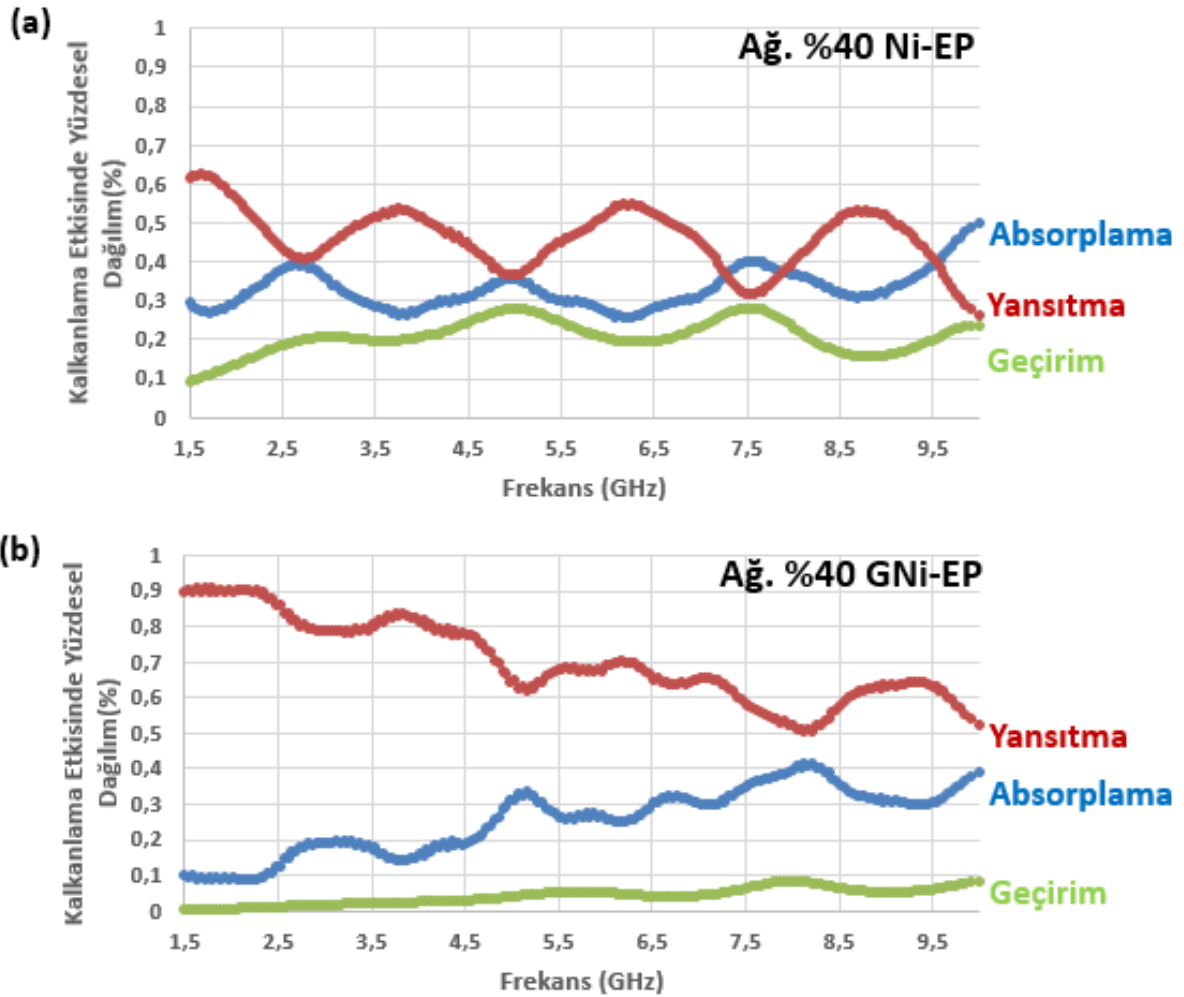
$$S_{11}/R_1 \text{ (Gönderilen Sinyal)} = \text{Yansıtma}$$

$$S_{21}/R_1 \text{ (Gönderilen Sinyal)} = \text{Geçirim verir.}$$

$$1 - \text{Yansıtma} - \text{Geçirim} = \text{Absorplama'yı}$$

vereceği bilindiğinden yüzdesel komponentlere göre mekanizmaların KE'ye katkısının dağılımı yapılır ve sonuçlar grafiksel olarak çizdirilerek sunulabilir (Şekil

4.8). Burada beklendiği üzere GNi-EP kompozitlerdeki grafen/grafitik kapsül yapısı, kompozit yapıda iletkenlik artışı sağlayarak yansıtma mekanizması ile kalkanlama performansını artırmıştır.

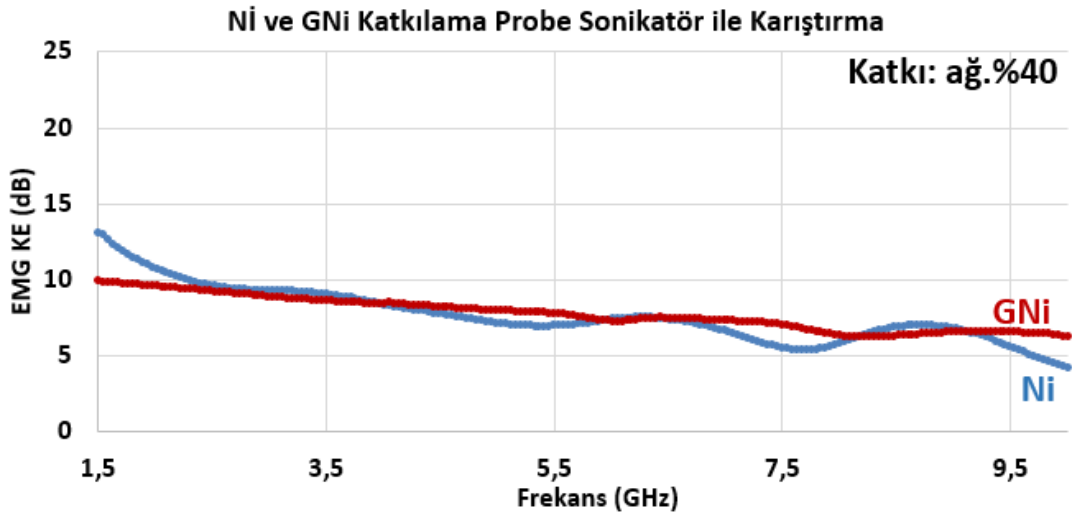


Şekil 4.8: Ni-EP ve GNi-EP kompozitlerde frekansa karşın kalkanlama etkinliğinin mekanizmalara göre yüzdesele dağılımı (ağ. %40 katkılama oranı ve vorteks ile karıştırma yöntemi için icra edilmiştir).

#### 4.3.5. Prob sonikatör ile karıştırma yöntemi ile hazırlanmış Ni-EP ve GNi-EP kompozit numunelerin EMG KE performansları

Prob sonikatöre ile ağ %40'lık bir katkılama ile yapılan karıştırmada üretilen Ni-EP ve GNi-EP kompozitlerin EMG KE performansları incelendiğinde GNi-EP

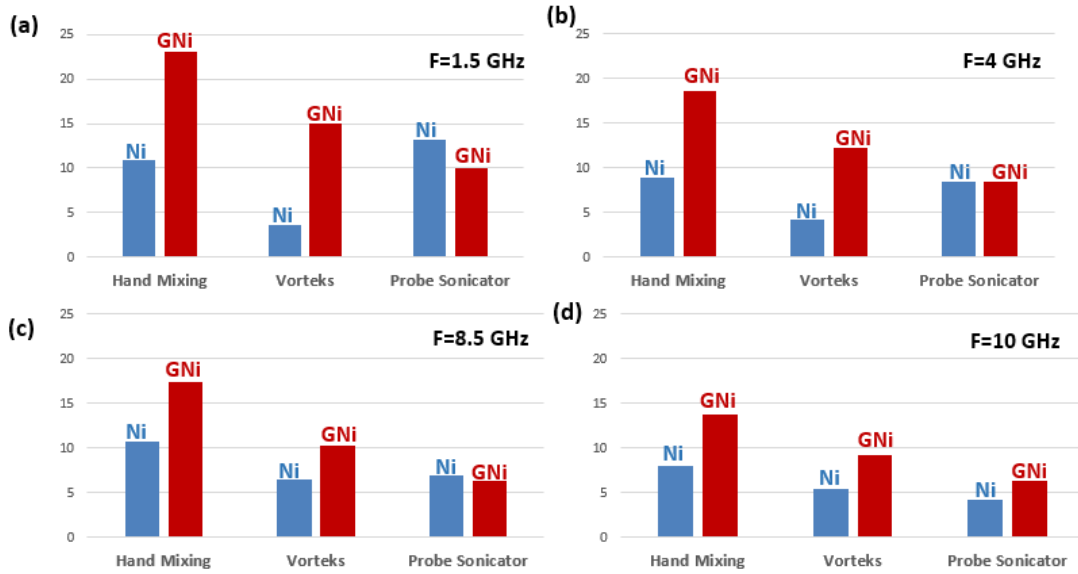
kompozitlerin 4.5-8 GHz bölgelerinde Ni-EP'lere göre üstün olduğu; bu bölge dışında genel anlamda kalkanlama performansının Ni-EP'de ve GNi-EP'de birbirine çok benzer mertebede olduğu görülmüştür (Şekil 4.9). Bölüm 4.3.4 sonunda da detaylıca tartışıldığı üzere mikro skalada daha homojen bir karışımın yaratılması EMG KE uygulamaları için çoğu zaman avantaj sağlamamakta; GNi parçacıkların yalıtkan epoksi matris ile daha çok kaplanması, grafen kapsülasyonundan gelen ekstra iletkenliğin (parçacıkların birbirleri ile bağlantısallığı ve iletken ağ oluşturma kabiliyeti koştuğu için) nikelere göre etkin bir fark yaratmamasına sebep olmuştur. Bu noktada prop sonikatör ile karıştırmanın EMG KE uygulamaları için bir avantaj sağlamadığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.9: Epoksi matrise ağ. %40 Ni ve GNi katkılama EMG KE değeri (Prob sonikatör ile karıştırma).

#### **4.3.6. Elde karıştırma, vorteks ile karıştırma ve prob sonikatör ile karıştırma yöntemlerinin EMG KE performansına etkisinin Ni ve GNi için karşılaştırılması**

Elde karıştırma, vorteks ile karıştırma ve prob sonikatör ile karıştırma yöntemlerinin EMG KE performansı çıktıları Şekil 4.10'de ağ. %40 katkılama oranı için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.10: Ağ. %40 katkılama oranı için her üç karıştırma yönteminin EMG KE değerlerinin karşılaştırılması.

1,5 Ghz, 4 Ghz, 8,5 Ghz ve 10 Ghz frekansları için yüzey derinliği Ni-EP ve GNi-EP özelinde literatür değerleri denklem (2.19) kullanılarak hesaplandığında;

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}}$$

$\mu_0$ :  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$  vakumun geçirgenliğidir.

Ni-EP (ağ. %40) için  $\sigma = 2,7 \times 10^5 \text{ S/m}$  mertebelerinde olduğu

GNi-EP (ağ. %40) için  $\sigma = 9,7 \times 10^5 \text{ S/m}$  mertebelerinde olduğu Bölüm 4.2’de hesaplanmıştır.

$\mu_r=100$  literatürden alınmıştır [43].

(2.19)’da tüm bunlar yerine yazıldığında;

Ni-EP için;

@1,5 GHz için yüzey derinliği

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 1,5 \text{ GHz} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \text{ } \Omega \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 100 \cdot 2,7 \times 10^5 \text{ 1}/\Omega \text{m}}} = 2,47 \text{ mikron}$$

@4 GHz için yüzey derinliği

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 4 \text{ GHz} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 100 \cdot 2,7 \times 10^5 \text{ 1}/\Omega \text{m}}} = 1,51 \text{ mikron}$$

@8,5 GHz için yüzey derinliği

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 8,5 \text{ GHz} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 100 \cdot 2,7 \times 10^5 \text{ 1}/\Omega \text{m}}} = 1,04 \text{ mikron}$$

@10 GHz için yüzey derinliği

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 10 \text{ GHz} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 100 \cdot 2,7 \times 10^5 \text{ 1}/\Omega \text{m}}} = 0,956 \text{ mikron}$$

GNi-EP için;

@1,5 GHz için yüzey derinliği

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 1,5 \text{ GHz} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 100 \cdot 9,7 \times 10^5 \text{ 1}/\Omega \text{m}}} = 1,32 \text{ mikron}$$

@4 GHz için yüzey derinliği

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 4 \text{ GHz} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 100 \cdot 9,7 \times 10^5 \text{ 1}/\Omega \text{m}}} = 0,807 \text{ mikron}$$

@8,5 GHz için yüzey derinliği

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 8,5 \text{ GHz} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 100 \cdot 9,7 \times 10^5 \text{ 1}/\Omega \text{m}}} = 0,553 \text{ mikron}$$

@10 GHz için yüzey derinliği

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 10 \text{ GHz} \cdot 4\pi \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 100 \cdot 9,7 \times 10^5 \text{ 1}/\Omega \text{m}}} = 0,510 \text{ mikron}$$

Frekans arttıkça yüzey derinliğinin azalması beklenen bir durumdur. Bir EMG kalkanlama malzemesinin kalınlığı  $t \ll \delta$  yüzey derinliğinden çok daha az olduğunda, sönümleme tamamen yansıtma mekanizması ile gerçekleşir. Bu durum ya düşük frekanslarda ya da elektriksel olarak iletken ince bir numune kullanılması durumunda meydana gelir. Bu durumda, toplam kalkanlama fenomeni frekanstan bağımsızdır.

Bir EMG kalkanlama malzemesinin kalınlığı yüzey derinliğinden  $t \gg \delta$  çok daha büyük olduğunda ise iyi iletkenler için yansıtma, absorplama ve çoklu iç yansıtma yoluyla sönümlenmeler gerçekleşir [43]. Bu tez kapsamında numune hazırlama ve ölçüm yaptığımız senaryo budur.

Bu bağlamda bu çalışmada, milimetre skalasında bir yüzey derinliği olan epoksi matrisli kompozit yapıda 1 mm'lik EMG Kalkanlama uygulamaları için ince sayılabilecek bir test numunesi ile; ancak yüksek frekanslarda (1,5-10 GHz) test icra edilmektedir. Yansıtma mekanizmasının daha etkin olması diğer mekanizmaların da kalkanlamaya mertebesel olarak katkı sağlaması beklenmektedir.

GNi-EP'ler Ni-EP'lere göre neredeyse tüm karıştırma yöntemleri ve katkı yüzdelerinde spektrumun geneli boyunca daha üstün EMG KE performansı göstermiştir. Bu durum grafen kapsülasyonundan gelen iletkenlik etkisi sayesinde GNi EP'lerde sönümlenmenin baskın olarak yansıtma mekanizması ile gerçekleşmesinin; ancak diğer mekanizmaların da sönümlemede katkısı olduğunun bir başka göstergesidir.

Vorteks ve prob sonikatör ile karıştırmanın elde karıştırmaya göre mikroskalada daha başarılı bir dispersiyon oluşturacağı beklenen bir gerçektir ki öyle olmuştur. Ancak dispersiyonun çok başarılı ve homojen olması durumu, yapının EMG KE performansına doğrudan olumlu etki yapacağı anlamına gelmemektedir.

İdeal bir dispersiyon senaryosunda katkı malzemesindeki lokal aglomeratlar dispersiyon esnasında yok olup, iletken parçacıklar önce birbirinden tamamen ayrılıp, sonra parçacıklar tamamen yalıtkan reçine ile çepeçevre sarılmaktadır. Bu durumda iletken yola (conductive network) olan katkı ve parçacıkların birbirleri ile bağlantısallıkları (connectivity) da azaldığından yansıtma mekanizmasından gelen kayıplar doğrudan azalacaktır.

Bir de yansıtma mekanizması yüzeyde daha çok çalıştığından aslında katkı malzemelerinin kompozit yapıya tamamen entegre olup gömülmesindenense yüzeye yakın konumlanmış olması bu tip yapılar için daha avantajlıdır. Bu tür uygulamalarda mükemmel homojen bir dispersiyon EMG KE performansı için bir dezavantajdır [54]. Sektörde kaplama ve yığın aglomerat içeren parçacıklar kullanımı eğilimi de aslında bir miktar bu sebeptir. Lokal aglomerasyonların katkı malzemeleri arasında



bağlantısallığı sağladığı, mikro ölçekte yığınların tamamen (yalıtkan reçine ile sarılamayarak) aslında iletken yola katkıda bulunduğu bu sebeple lokal aglomeratların tamamen yok edilmeye çalışılmasının bu EMG Kalkanlama uygulamaları için fayda sağlamayacağı değerlendirilmektedir.

Bu bağlamda elde karıştırma yöntemi bu tez özelinde sunulduğu üzere diğer karıştırma yöntemlerine göre en üstün EMG KE performansı çıktılarını verdiğiinden (Şekil 4.10), sanayiye büyük ölçekte üretime kolaylıkla uygulanmakta olduğundan ön plana çıkmıştır. İleriki süreçlerdeki endüstriyel ve laboratuvar ölçekli uygulamalarda da tercih edilebilir.





## 5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMA ÖNERİLERİ

### 5.1. Sonuçlar

- Ticari dentritik nikel tozlarından PDDAKBÇ prosesleri ile GNi tozları büyük ölçekli üretime uygun olarak geliştirilmiştir.
- PDDAKBÇ prosesleri ile ticari nikel tozların grafitik yapı ile kaplanmasının ardından yapılan SEM analizleri GNi tozlarının proses esnasında sinterlenmediği görülmektedir.
- GNi tozların sinterlenmemiş bireysel olarak bulunabilmesi epoksi gibi matrislerde disperse edilebilmeleri için önemli bir husustur.
- Ni-EP ve GNi-EP kompozitleri elde karıştırma (hand mixing) ve reçine kupon dökümü (resin casting) prosesleri ile üretilmiş, numune çıkarma, kalıplama ve lazer kesim parametreleri EMG KE test fikstürüne göre sabitlenmiştir.
- Ni-EP ve GNi-EP kompozitlerin EMG KE değerleri %ağ. 30,40,50 ve %60 katkılama oranları için 1,5GHz-10GHz frekans aralığında ASTMD4935 standardı EM2108 test fikstürüne göre desibel olarak ölçülmüştür.
- Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde nikel tozların grafitik yapı ile kaplanmasının ardından oluşan GNi tozlarının epoksi matrisli kompozit yapılarda EMG KE performansını iyileştirdiği ve grafen kapsüllemesinin perkolasyon eşiğini düşürdüğü hem teorik olarak hesaplamalarda hem de EMG KE ölçüm sonuçlarında görülmüştür.
- Nikel tozları grafitik ile kapsülleme kompozit yapıda yansıtma mekanizmasını tetiklemiştir. GNi katkılı kompozitlerde yansıtma mekanizmasının toplam kalkanlama etkinliğine katkısı artmıştır.
- EMG KE ölçümlerine göre GNi'liler için yaklaşık ağ. %40'da perkolasyonun oluştuğu değerlendirilmektedir. Teorik olarak karışımlar kuralı ile etkin iletkenlik değeri üzerinden yapılan hesaplamalarda bu oran yaklaşık %17 olarak hesaplanmıştır. Teorik perkolasyon ile realite elde edilen perkolasyon arasındaki farkın literatürde rastlanan ve öngörülen sebepleri katkı

malzemesinin geometrisi, boy/en oranı (aspect ratio), katkı malzemesinin yapıda dispersiyon yöntemi ve kalitesi, katkı malzemesinin yapıda oryantasyonu, numune hazırlama ve kürlenme süreçleri gibi sıcaklık basınç, hava kabarcığı gibi tüm etkilerin yapıda iletken yol oluşumuna doğrudan etki etmesidir. İletken yol oluşamadıkça da realitede yapıya eklenmesi gereken malzemesinin artmak durumundadır. Bu sebeple GNi katkılmalarda teoriden daha yüksek yüzdelerde perkolasyon sağlanabilmektedir. Temelde yatan sebeplerden biri de teorideki gibi GNi kapsüllü parçacıklarda nikel parçacıkların tamamının aynı kalitede grafen/grafitik kaplama ile kapsüllenmeyeceğidir.

- Geliştirilen GNi kapsüllü yapı sayesinde epoksi matrislerde Ni katkılama ile sağlanan perkolasyon eşiği %60'lardan %40'lara düşürülebilmiş, hafiflik, özgünlük ve EMG KE performansı anlamında avantaj sağlanmıştır.
- EMG KE performans incelemesi sonucunda GNi yapıların (grafen benzeri ve bölgesel olarak grafitik olsa dahi) sadece Ni olan senaryoya göre kalkanlama etkinliği bakımından genel anlamda üstün olduğu görülmektedir.
- Elde karıştırma yöntemi diğer karıştırma yöntemlerine göre en üstün EMG KE performansını vermiştir. Sanayiye büyük ölçekle üretime kolaylıkla uygulanmakta olduğundan bu tez kapsamında ön plana çıkmıştır. İleriki süreçlerdeki endüstriyel ve lab ölçekli uygulamalarda da tercih edilebilir.
- Elde karıştırma yöntemi diğer karıştırma yöntemlerine göre en üstün EMG KE performansının sebebi: lokal aglomerasyonların katkı malzemeleri arasında bağlantısallığı sağladığı, mikro ölçekte yığınların tamamen yalıtkan reçine ile sarılamamasının aslında iletken yola katkı sağlamış olmasıdır.
- Grafen Kapsüllü Nikel parçacıklar gibi, matrise entegre edilecek yenilikçi, büyük ölçekli üretime uygun, yerli ve milli katkı malzemelerinin; kaplama, boya gibi zamanla yüzeyden aşınabilecek EMG kalkanlama çözümlerine göre sanayide öne çıkmakta olduğu değerlendirilmektedir.
- Tamamen metal kullanımı gibi kalkanlama çözümlerine göre de ağırlık anlamında da kompozit yapıya katkılama çözümleri ve özgün katkı

malzemeleri kullanımı ROKETSAN dahil birçok sanayi kuruluşu için ihtiyaçlar doğrultusunda tercih edilebilecektir.

## 5.2. Gelecek Çalışma Önerileri

- Nikelin karbonu çözdüğü bu sebeple tek katmanlı, sürekli bir grafen tabakasının nikel üzerinde oluşturmanın zorluğu bilinmektedir; ancak ileriki süreçte PDDAKBÇ’te bu husus üzerinde parametre çalışması yapılabilir.
- EMG KE özellikleri bilinen bu kompozit yapının mekanik ve termal özellikleri de araştırılabilir.
- Termoset bir polimerde oda koşullarında sıvı formda bulunan epoksi reçinede yapılan bu katkılama çalışmasının, oda koşullarında granül formda bulunan ve prosesi daha zorlu olan termoplastik polimerlerde yapılması yine Tübitak 1003 projesi kapsamında ROKETSAN- TOBB ETÜ iş birliğinde çalışılmaktadır. Buradaki Tübitak kurgusunda mekanik ve termal özellikler de incelenecektir.

### 5.2.1. Termoplastik matrisli GNi katkılı kompozitlerin ön imalatları

Bu tez çalışmasında gelecekte çalışma önerileri kapsamında bulunan, aynı zamanda Tübitak 1003 projesi kapsamında yapılan, granül formundaki yüksek performans termoplastiklerine ekstrüderde GNi katkılama proseslerinin ön denemeleri ve metodolojisi sunulmuştur (Şekil 5.1).

Metodoloji şu şekildedir: Öncelikle hedeflenen ağ. katkılama yüzdesini sağlayacak miktarda PEEK granülleri ve GNi tozları tartım kabında tartılarak bir spatula yardımıyla harmanlanır. Eriyik karıştırma işlemi için haznedeki ekstrüdere harman beslenir. Tüm ekstrüder paramaterleri (sıcak bölgelerin derecesi, vidaların dönüş hızı gibi.) ilgili termoplastiğin TDS verilerine göre ayarlanır.

PEEK termoplastiği için genellikle erime sıcaklığı olan 350 °C ve üzeri sıcaklıklarda çalışılmaktadır. Çift vidalı lab tipi eriyik karıştırıcıda yapılan katkılama işleminden sonra GNi katkılı PEEK (GNi-PEEK) filamentleri elde edilir.



Şekil 5.1: PEEK granüllerine GNi kakılama prosesleri.

Bu filament bir granülatör yardımıyla kesilerek GNi-PEEK granülleri elde edilir (Şekil 5.1) Bu katkıli granüller uygulamaya ya da teste göre istenilen geometride test kuponu ya da parça imalatı için enjeksiyon kalıplama ya da pres ile şekillendirme proseslerine tabi tutulmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] **D. D. L. Chung**, (1995). "Overview of materials for electronic packaging, Electromagnetic interference shielding", *Materials for Electronic Packaging*
- [2] **S. Geetha, K. K. Satheesh Kumar, C. R. K. Rao, M. Vijayan, D. C. Trivedi**, (2009). "EMI shielding: methods and materials-A review", *J. Appl. Polym. Sci.*, 112, 2073-2086
- [3] **S. B. Kondawar, P. R. Modak**, (2020). "Theory of EMI shielding", *Materials for Potential EMI Shielding Applications*, 2, 9-25.
- [4] **Dural G.**, (2008). "EMC/EMI Prof. Dr. Gülbin Dural Ders Notları", ODTÜ, *Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü*
- [5] **R. D. Leach, M. B. Alexander**, (1995). "Electronic systems failures and anomalies attributed to electromagnetic interference", *NASA Marshall Space Flight Center*
- [6] **Yağmur, F., Bozbiyık, A., Hancı, İ. H.**, (2003). Elektromanyetik dalgaların insan biyokimyası üzerine etkileri, *Sted Dergisi*, 12, 296-297.
- [7] **C. Huang**, (1995). "EMI shielding plastics: A review", *Adv. Polym. Technol.*, 14, 137-150
- [8] **D. D. L. Chung**, (2020). "Materials for electromagnetic interference shielding", *Mater. Chem. Phys.*, 255, 123587
- [9] **Yousefi, Nariman, Xinying Sun, Xiuyi Lin, Xi Shen, Jingjing Jia, Biao Zhang, Benzhong Tang, Mansun Chan, Jang-Kyo Kim.**, (2014). "Highly aligned graphene/polymer nanocomposites with excellent dielectric properties for high-performance electromagnetic interference shielding." *Advanced Materials*, 31, 5480-5487.
- [10] **B. Santhosi, K. Ramji, M. Rao**, (2020). "Design and development of polymeric nanocomposite reinforced with graphene for effective EMI shielding in X band", *Phys. B Condens. Matter*, 586, 412144
- [11] **S. Raymond A., J. John W.**, (2004). "Electricity and Magnetism", *Physics for Scientists and Engineers*, 6, 23-46
- [12] **André-Marie Ampère**, (1826). "Théorie des phénomènes électro-dynamiques, uniquement déduite de l'expérience", Méquignon-Marvis
- [13] **J. Al-Khalili**, (2015) "The birth of the electric machines: a commentary on Faraday (1832) 'Experimental researches in electricity'", *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, 2039, 20140208
- [14] **Faraday, M.**, (1832). "Experimental researches in electricity". *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 122, 125-162
- [15] **Anderson, R.** (1993). "The referees' assessment of Faraday's electromagnetic induction paper of 1831". *Notes and Records of the Royal Society of London*, 47, 243-256.
- [16] **Maxwell J. C.**, "A dynamical theory of the electromagnetic field", *Phil. Trans. R. Soc.A.*, 155,459-512
- [17] **Longair, M.**, (2015). "... a paper... I hold to be great guns': a commentary on Maxwell (1865), 'A dynamical theory of the electromagnetic field". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373, 20140473.

- [18] **Einstein, A.**, (1905). “On the electrodynamics of moving bodies”. *Annalen der physik*, 17, 891-921.
- [19] **Einstein A.**, (1916) “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie”, *Ann. Phys.*,354, 769-822
- [20] **Einstein A.**, (1920). “Relativity: The Special and General Theory”, *Henry Holt Co.*,184
- [21] **Williams, T.**, (2016). “EMC for product designers”. *Newnes*.
- [22] **Kong J.A.** (1986). “Electromagnetic Wave Theory”, *Wiley*
- [23] **Purcell, E. M., Morin, D. J.**, (2013). “Electricity and magnetism”, *Cambridge University Press*.
- [24] **Morin D.**, (2018). “Electromagnetic waves-Chapter 8 Lecture Notes”. Harvard University, *Department of Physics*.
- [25] **Nalwa, H. S.**, (1999). “Handbook of low and high dielectric constant materials and their applications”, *Elsevier*.
- [26] **Coey, J. M.**, (2010). “Magnetism and magnetic materials.” *Cambridge University Press*.
- [27] **Saini, P., Arora, M.**, (2012). “Microwave absorption and EMI shielding behavior of nanocomposites based on intrinsically conducting polymers, graphene and carbon nanotubes”. *New polymers for special applications*, 3, 73-112.
- [28] **Ida, N.**, (2015). “Electromagnetic Waves and Propagation. Engineering Electromagnetics”, 597-663.
- [29] **Serway R. A., Beichner R. J.**, (2008). “Physics for Scientists and Engineers”, *Volume II. Cengage Learning*.
- [30] **Kaşgöz A.**, (2017). “Elektromanyetik dalga kalkanlama özelliğine sahip polimer kompozitlerin geliştirilmesi ve yapı performans ilişkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [31] **Abbasi, H., Antunes, M., Velasco, J. I.**, (2019). “Recent advances in carbon-based polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding.” *Progress in Materials Science*, 103, 319-373.
- [32] **Scott, J., Van Zyl, C.**, (1997). “Introduction to EMC”, *Butterworth-Heinemann*.
- [33] **Wilson A.**, (2004). “General Aviation Lightning Strike Report and Protection Level Study”, *National Technical Information Service-US Office of Aviation Research*, Washington, DC.
- [34] **Şeker, Ş. S., Çerezci, O.**, (2002). “Elektromagnetik alanlar ve mühendislik Uygulamaları”., *Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi*
- [35] **Işık F.**, (2008). “Elektromanyetik darbelerden korunma”, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi
- [36] **Üner İ. D.**, (2008). “Güç elektroniği sistemlerinde elektromanyetik uyumluluğun incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi
- [37] **Gupta, S., Tai, N. H.**, (2019). “Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X band”. *Carbon*, 152,159 187.
- [38] **Liu, Q., Liu, H., Han, M., Zhu, J., Liang, Y., Xu, Z., Song, Y.**, (2005). “Nanometer-sized nickel hollow spheres”., *Advanced Materials*, 17, 1995-1999.



- [39] Wang, C., Murugadoss, V., Kong, J., He, Z., Mai, X., Shao, Q., Chen, Y., Guo, L., Liu, C., Angaiah, S., Guo, Z., (2018). "Overview of carbon nanostructures and nanocomposites for electromagnetic wave shielding". *Carbon*, 140, 696-733.
- [40] Gooch, J. W., Daher, J. K., (2007). "Electromagnetic shielding and corrosion protection for aerospace vehicles", *Springer*, 1-70
- [41] Christopoulos, C., (2022). "Principles and techniques of electromagnetic compatibility"., *CRC press*.
- [42] Wanasinghe, D., Aslani, F., (2019). "A review on recent advancement of electromagnetic interference shielding novel metallic materials and processes". *Composites Part B: Engineering*, 176, 107207.
- [43] Sankaran, S., Deshmukh, K., Ahamed, M. B., Pasha, S. K., (2018). "Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: a review". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 114, 49-71.
- [44] Chung, D. D. L., (2001). "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials". *Carbon*, 39, 279-285.
- [45] Du, Y., Liu, T., Yu, B., Gao, H., Xu, P., Wang, J., Wang, X., Han, X., (2012). "The electromagnetic properties and microwave absorption of mesoporous carbon". *Materials Chemistry and Physics*, 13,884-891.
- [46] Thomassin, J. M., Jerome, C., Pardoen, T., Bailly, C., Huynen, I., Detrembleur, C., (2013). "Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials". *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74, 211-232.
- [47] Kılıç, G., Örtlek, H. G., Saraçoğlu, Ö. G., (2008). "Elektromanyetik radyasyona karşı koruyucu tekstillerin ekranlama etkinliği (SE) ölçüm yöntemleri"., *Tekstil ve Mühendis*, 15,72.
- [48] Wiğckowski, T. W., Janukiewicz, J. M., (2006). "Methods for evaluating the shielding effectiveness of textiles". *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 5,18-22.
- [49] Lee, M.S., Shin, H.J., Cha, I.P., Yoon, H.K., Hong, S.W., Yu, M.J., Kim, H.G., Kwac, L.K., (2015). "Electromagnetic interference shielding characteristics for stainless wire mesh and number of plies of carbon fiber reinforced plastic". *Int J Mech Mechatron Eng*, 9,137-141.
- [50] Sikora P. A., Kelley T. P., (2019). "EM-2108 Test Fixture; Shielding Effectiveness, *Product Data Sheet*
- [51] D09 Committee, (2018). "Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials", *ASTM International*.
- [52] Kotsuka, Y., (2019). "Electromagnetic wave absorbers: Detailed theories and applications", *John Wiley & Sons*.
- [53] Roh, J. S., Chi, Y. S., Kang, T. J., (2009). "Thermal insulation properties of multifunctional metal composite fabrics". *Smart materials and structures*, 18, 025018.
- [54] Chou, K. S., Huang, K. C., Shih, Z. H., (2005). "Effect of mixing process on electromagnetic interference shielding effectiveness of nickel/acrylonitrile-butadiene-styrene composites". *Journal of applied polymer science*, 97, 128-135.
- [55] Wypych, G., (2016). "Chemical Properties of Fillers & Filled Materials". *Handbook of fillers*, 373-413.

- [56] Wang, Y., Tian, D., Xu, Y., Zhang, B., Zhao, T., Hu, Y., Sun, R. (2021). “A Comparative Study on the Influences of Various Nickel Powders on the EMI Shielding Performance of Conductive Polymer Composites”. *22<sup>nd</sup> International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, 1-4
- [57] Koppel, T., Shiskin, A., Hussainova, I., Haldre, H., Tint, P., (2016). “Electromagnetic shielding properties of ceramic spheres coated with paramagnetic metal”. *Agron. Res*, 14, 1015-1022.
- [58] Zeng, W., Tan, S. T., (2006). “Preparation and EMI shielding properties of nickel-coated PET fiber filled epoxy composites”. *Polymer composites*, 27, 24-29.
- [59] Guo, Z., Chen, Y., Lu, N. L., (2018). “Multifunctional nanocomposites for energy and environmental applications”, *John Wiley & Sons*.
- [60] Azadmanjiri, J., Hojati-Talemi, P., Simon, G. P., Suzuki, K., Selomulya, C., (2011). “Synthesis and electromagnetic interference shielding properties of iron oxide/polypyrrole nanocomposites”. *Polymer Engineering & Science*, 51, 247-253.
- [61] Dhawan, S. K., Singh, K., Bakhshi, A. K., Ohlan, A., (2009). “Conducting polymer embedded with nanoferrite and titanium dioxide nanoparticles for microwave absorption”. *Synthetic Metals*, 159, 2259-2262.
- [62] Yoo, T. W., Lee, Y. K., Lim, S. J., Yoon, H. G., Kim, W. N., (2014). “Effects of hybrid fillers on the electromagnetic interference shielding effectiveness of polyamide 6/conductive filler composites”. *Journal of Materials Science*, 49, 1701-1708.
- [63] Ke, L., Huang, C., Xing, L., Huang, K., (2010). “Al–Ni intermetallic composites produced in situ by friction stir processing”. *Journal of Alloys and Compounds*, 503, 494-499.
- [64] Yu, Y. H., Ma, C. C. M., Teng, C. C., Huang, Y. L., Lee, S. H., Wang, I., Wei, M., H., (2012). “Electrical, morphological, and electromagnetic interference shielding properties of silver nanowires and nanoparticles conductive composites”. *Materials Chemistry and Physics*, 136, 334-340.
- [65] Chen, X., Li, C., Shao, W., He, J., (2007). “Preparation and properties of poly (ethylene terephthalate)/ATO nanocomposites. *Journal of applied polymer science*”, 105, 2783-2790.
- [66] Urbankowski, P., Anasori, B., Makaryan, T., Er, D., Kota, S., Walsh, P.L., Zhao, M., Shenoy, V.B., Barsoum, M.W. and Gogotsi, Y., (2016). “Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti<sub>4</sub>N<sub>3</sub> (MXene)”, *Nanoscale*, 8, 11385-11391.
- [67] Naguib, M., Mochalin, V. N., Barsoum, M. W., Gogotsi, Y., (2014). “25th anniversary article: MXenes: a new family of two-dimensional materials”. *Advanced materials*, 26, 992-1005.
- [68] Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., Hultman, L., Gogotsi, Y., Barsoum, M.W., (2011). “Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>. *Advanced materials*”, 23, 4248-4253.

- [69] **Han, Meikang, Xiaowei Yin, Heng Wu, Zexin Hou, Changqing Song, Xinliang Li, Litong Zhang, Laifei Cheng.**, (2016). "Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> MXenes with modified surface for high-performance electromagnetic absorption and shielding in the X-band." *ACS applied materials & interfaces*, 32, 21011-21019.
- [70] **Shahzad, F., Alhabeab, M., Hatter, C. B., Anasori, B., Man Hong, S., Koo, C. M., Gogotsi, Y.**, (2016). "Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)". *Science*, 6304, 1137-1140.
- [71] **Wang, Y., Jing, X.**, (2005). "Intrinsically conducting polymers for electromagnetic interference shielding". *Polymers for advanced technologies*, 16, 344-351.
- [72] **Hong, X., Chung, D. D. L.**, (2017). "Carbon nanofiber mats for electromagnetic interference shielding". *Carbon*, 111, 529-537.
- [73] **Yang, Y., Gupta, M. C., Dudley, K. L., Lawrence, R. W.**, (2005). "A comparative study of EMI shielding properties of carbon nanofiber and multi-walled carbon nanotube filled polymer composites.", *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 5, 927-931.
- [74] **Hong, S. K., Kim, K. Y., Kim, T. Y., Kim, J. H., Park, S. W., Kim, J. H., Cho, B. J.**, (2012). "Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer graphene". *Nanotechnology*, 23(45), 455704.
- [75] **Yao, H., Hawkins, S. A., Sue, H. J.**, (2017). "Preparation of epoxy nanocomposites containing well-dispersed graphene nanosheets". *Composites Science and Technology*, 146, 161-168.
- [76] **Yan, D. X., Ren, P. G., Pang, H., Fu, Q., Yang, M. B., Li, Z. M.**, (2012). "Efficient electromagnetic interference shielding of lightweight graphene/polystyrene composite"., *Journal of Materials Chemistry*, 22, 18772-18774.
- [77] **Liang, J., Wang, Y., Huang, Y., Ma, Y., Liu, Z., Cai, J., Zhang, C., Gao, H., Chen, Y.**, (2009). "Electromagnetic interference shielding of graphene/epoxy composites". *Carbon*, 47, 922-925.
- [78] **Chen, Y., Li, Y., Yip, M., Tai, N.**, (2013). "Electromagnetic interference shielding efficiency of polyaniline composites filled with graphene decorated with metallic nanoparticles"., *Composites Science and Technology*, 80, 80-86.
- [79] **Pawar, S. P., Stephen, S., Bose, S., Mittal, V.**, (2015). "Tailored electrical conductivity, electromagnetic shielding and thermal transport in polymeric blends with graphene sheets decorated with nickel nanoparticles". *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22, 14922-14930.
- [80] **Singh, A.P., Garg, P., Alam, F., Singh, K., Mathur, R.B., Tandon, R.P., Chandra, A., Dhawan, S.K.**, (2012). "Phenolic resin-based composite sheets filled with mixtures of reduced graphene oxide,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and carbon fibers for excellent electromagnetic interference shielding in the X-band"., *Carbon*, 50, 3868-3875.
- [81] **Chen, Z., Xu, C., Ma, C., Ren, W., Cheng, H. M.**, (2013). "Lightweight and flexible graphene foam composites for high-performance electromagnetic interference shielding". *Advanced materials*, 25, 1296-1300.

- [82] **Li, Y., Shen, B., Pei, X., Zhang, Y., Yi, D., Zhai, W., Zhang, L., Wei, X., Zheng, W.,** (2016). “Ultrathin carbon foams for effective electromagnetic interference shielding”. *Carbon*, 100, 375-385.
- [83] **Lee, S. H., Kang, D., Oh, I. K.,** (2017). “Multilayered graphene-carbon nanotube-iron oxide three-dimensional heterostructure for flexible electromagnetic interference shielding film”. *Carbon*, 111, 248-257.
- [84] **Smits, F. M.,** (1958). “Measurement of sheet resistivities with the four-point probe”. *Bell System Technical Journal*, 37(3), 711-718.
- [85] **Miccoli, I., Edler, F., Pfnür, H., Tegenkamp, C.,** (2015). “The 100<sup>th</sup> anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems.” *Journal of Physics: Condensed Matter*, 27, 223201.
- [86] **Fang, Y., Li, L. Y., Jang, S. H.,** (2020). “Calculation of electrical conductivity of self- sensing carbon nanotube composites”. *Composites Part B: Engineering*, 199, 108314.
- [87] **Uvarov, N. F.,** (2000). “Estimation of composites conductivity using a general mixing rule”, *Solid state ionics*, 136, 1267-1272.
- [88] **Uvarov, N. F.,** (2017). “Estimation of electrical properties of composite solid electrolytes of different morphologies”. *Solid state ionics*, 302, 19-24.
- [89] **Karippal, J. J., Narasimha Murthy, H. N., Rai, K. S., Krishna, M., Sreejith, M.,** (2010). “Effect of amine functionalization of CNF on electrical, thermal, and mechanical properties of epoxy/CNF composites”. *Polymer Bulletin*, 65, 849-861.
- [90] **Bigalke, J.,** (1999). “Investigation of the conductivity of random networks”. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 272, 281-293.
- [91] **Aziz, I., Duran, H., Saleem, M., Yameen, B., Arshad, S. N.,** (2021). “The role of interface on dynamic mechanical properties, dielectric performance, conductivity, and thermal stability of electrospun carbon nanofibers reinforced epoxy”. *Polymer Composites*, 42, 4366-4379.
- [92] **Giraud, A., Sevostianov, I., Kushch, V. I., Cosenza, P., Prêt, D., Barthélémy, J. F., Trofimov, A.,** (2019). “Effective electrical conductivity of transversely isotropic rocks with arbitrarily oriented ellipsoidal inclusions”. *Mechanics of Materials*, 133, 174-192.
- [93] **Gao, C., Liu, P., Ding, Y., Li, T., Wang, F., Chen, J., Zhang, S., Li, Z., Yang, M.,** (2018). “Non-contact percolation of unstable graphene networks in poly (styrene-co-acrylonitrile) nanocomposites: Electrical and rheological properties.” *Composites Science and Technology*, 155, 41-49.
- [94] **Rahaman, M., Aldalbahi, A., Govindasami, P., Khanam, N. P., Bhandari, S., Feng, P., Altalhi, T.,** (2017). “A new insight in determining the percolation threshold of electrical conductivity for extrinsically conducting polymer composites through different sigmoidal models. *Polymers*, 9, 527.
- Url-1 <https://www.sunsavunma.net/hava-araclari-emcemi-problemleri/>  
alındığı tarih: 14.07.2022
- Url-2 <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-electromagnetic-fields#> alındığı tarih: 04.08.2022
- Url-3 <https://4emi.com/the-history-of-emi/beginning-emi-field/>  
alındığı tarih: 29.09.2022

- Url-4 <https://www.fcc.gov/general/electromagnetic-compatibility-division> alındığı tarih: 05.09.2022
- Url-5 <https://www.fcc.gov/engineering-technology/electromagnetic-compatibility-division/radio-frequency-safety/faq/rf-safety#Q10> alındığı tarih: 15.12.2022
- Url-6 <https://www.aysamakses.com/tr/category/teknik-yazilar/> alındığı tarih: 14.07.2022).
- Url-7 <https://www.britannica.com/science/electric-field> alındığı tarih: 19.06.2022
- Url-8 <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magfie.html> alındığı tarih: 21.08.2022
- Url-9 <https://www.britannica.com/science/electromagnetism> alındığı tarih: 09.12.2022
- Url-10 <https://www.universetoday.com/76515/magnetic-field/> alındığı tarih: 29.03.2022
- Url-11 <http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique/loiscourants/ampere-electrodynamique/eng> alındığı tarih: 31.03.2022
- Url-12 <https://www.weather.gov/jetstream/electro> alındığı tarih: 01.03.2022
- Url-13 <https://cds.cern.ch/record/1400571/plots> alındığı tarih: 05.11.2022
- Url-14 <https://www.radartutorial.eu/03.linetheory/Dalga%20K%C4%B1lavuzu.tr.html> alındığı tarih: 06.12.2022
- Url-15 [http://www.columbia.edu/~vjd1/electromag\\_spectrum.htm](http://www.columbia.edu/~vjd1/electromag_spectrum.htm) alındığı tarih: 25.06.2022
- Url-16 <http://labman.phys.utk.edu/phys222core/modules/m6/The%20EM%20spectrum.html> alındığı tarih: 07.11.2022
- Url-17 <https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/em.htm> alındığı tarih: 16.10.2022
- Url-18 [https://science.nasa.gov/ems/07\\_infraredwaves](https://science.nasa.gov/ems/07_infraredwaves) alındığı tarih: 03.09.2022
- Url-19 [https://science.nasa.gov/ems/10\\_ultravioletwaves](https://science.nasa.gov/ems/10_ultravioletwaves) alındığı tarih: 13.05.2022
- Url-20 <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html> alındığı tarih: 23.03.2022
- Url-21 [https://www.elektrikport.com/universite/elektromanyetik-girisim-\(emi\)-ve-uyumluluk-\(emc\)-nedir/10063#ad-image-0](https://www.elektrikport.com/universite/elektromanyetik-girisim-(emi)-ve-uyumluluk-(emc)-nedir/10063#ad-image-0) alındığı tarih: 12.08.2022
- Url-22 <https://cgstestmerkezi.com/ce-belgesi-nedir-ne-ise-yarar/> alındığı tarih: 08.11.2022
- Url-23 <https://btk.gov.tr/elektromanyetik-girisim-enterferans> alındığı tarih: 18.09.2022
- Url-24 <https://www.atomicarchive.com/science/effects/emp.html> alındığı tarih: 09.08.2022
- Url-25 <https://www.youtube.com/watch?v=H1I9-VjCc-Y> alındığı tarih: 16.09.2022
- Url-26 <https://www.youtube.com/watch?v=5x8kj02ar34> alındığı tarih: 16.09.2022
- Url-27 <https://www.tbaps.com/products/emi-shielding/metal-foil-tapes.html> alındığı tarih: 18.07.2022

- Url-28 [https://www.3m.com/3M/en\\_US/p/c/tapes/foil/copper/i/electronics/](https://www.3m.com/3M/en_US/p/c/tapes/foil/copper/i/electronics/) alındığı tarih: 07.05.2022
- Url-29 <https://www.knitted-mesh.com/products/knitted-wire-mesh-shielding.html> alındığı tarih: 04.07.2022
- Url-30 [https://www.3m.com/3M/en\\_US/p/d/b40066410/](https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b40066410/) alındığı tarih: 23.07.2022
- Url-31 <https://www.accumetmaterials.com/composite-ceramics.html> alındığı tarih: 02.07.2022
- Url-32 <https://www.accumetmaterials.com/files/125592081.pdf> alındığı tarih: 02.07.2022
- Url-33 <https://www.dzsc.com/uploadfile/company/89406/2012221154356680.pdf> alındığı tarih: 02.07.2022
- Url-34 <https://www.conductivecomposites.com/AdvancedMaterials/Fibers> alındığı tarih: 09.07.2022
- Url-35 [https://www.conductivecomposites.com/pdf/M005\\_FIBERS\\_7\\_22.pdf](https://www.conductivecomposites.com/pdf/M005_FIBERS_7_22.pdf) alındığı tarih: 11.07.2022
- Url-36 <https://www.reinforcedplastics.com/content/products/technical-fibre-products-at-jec-americas/> alındığı tarih: 15.07.2022
- Url-37 <https://www.tfpglobal.com/products/composite-materials/emi-shielding> alındığı tarih: 25.07.2022
- Url-38 [https://ssnano.com/inc/sdetail/nickel\\_nanoparticles/269](https://ssnano.com/inc/sdetail/nickel_nanoparticles/269) alındığı tarih: 27.08.2022
- Url-39 <https://exelmagazine.org/article/mxene-a-2d-star-is-born/> alındığı tarih: 29.08.2022
- Url-40 <https://max.materials.drexel.edu/research-areas/max-phases/> alındığı tarih: 30.08.2022
- Url-41 <https://www.cfoam.com/emishielding/> alındığı tarih: 05.09.2022
- Url-42 <https://polymerscience.com/technology/p-shield-emi-shielding-and-grounding-materials/p-shield-foam-tapes/> alındığı tarih: 05.09.2022
- Url-43 <https://www.parker.com/Literature/Chomerics/Catalogs/Application%20and%20Design%20Guide%20to%20EMI%20Shielding%20Honeycomb%20Vents.pdf> alındığı tarih: 25.09.2022
- Url-44 <http://www.duratek.com.tr/tr/urunler/kompozit-icin-urunler> alındığı tarih: 08.11.2022
- Url-45 <https://www.ossila.com/pages/sheet-resistance-theory> alındığı tarih: 17.11.2022

## TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- \*Okay E, Caylan O, Atli E., **Incecik B.**, Buke G. C., The Synthesis and Characterization of  $\text{Mo}_2\text{CT}_x$  Mxene by Hydrothermal Etching with Different Fluoride Salts for EMI Shielding Applications, Materials Research Society Fall Meeting Poster Presentation, November 27 to December 2, 2022, Boston, USA
- Okay E., Caylan O., **Incecik B.**, Buke G. C., The Synthesis and Characterization of  $\text{Mo}_2\text{CT}_x$  Mxene by Hydrothermal Etching with Different Fluoride Salts for EMI Shielding Applications, 21<sup>st</sup> International Metallurgy and Materials Congress, October 6 to 8, 2022, Oral Presentation, Istanbul, Turkey
- **Incecik, B.**, Atli E., Caylan O., Turkoglu T., Cakir D., Genelioglu S., Yurdusever B., Dogan B., Buke G. C., “Investigation of EMI Shielding Effectiveness of Graphene Encapsulated Nickel/Epoxy Composites, “16th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NANOTR16)”, Oral Presentation, September 05-08, 2022, Ankara Turkey
- Okay E., Caylan O., **Incecik B.**, Buke G. C., Synthesis and Characterization of  $\text{Mo}_2\text{CT}_x$  MXene by Hydrothermal Etching Using Different Fluoride Salts, 16th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NANOTR16), Poster Presentation, September 05-08, 2022, Ankara, Turkey
- **Incecik, B.**, Caylan O., Turkoglu T., Cakir D., Atli E., Buke G. C., “Synthesis, Characterization and EMI Shielding Effectiveness of Graphene Encapsulated Nickel/Epoxy Composites”, 4rd International Engineering Research Symposium (INERS’22), Oral Presentation, March 4 to 6, 2022, Düzce, Turkey