

Farklı Tanecik Boyutu ve Ağırlık Fraksiyonlarında Karbon Nanotüp Kullanılarak Üretilen Radar Soğurucu Kompozit Malzemelerin İncelenmesi

Berkant Şentürk*¹, Gül Yılmaz Atay¹

*¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Çiğli, İzmir, TÜRKİYE

(Alınış / Received: 06.12.2023, Kabul / Accepted: 13.12.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Karbon Nanotüpler,
Radar Soğurma,
Savunma Teknolojileri

Öz: Karbon nanotüplerin, görünmezlik teknolojisinde radar soğurucu malzemeler (RAM) alanında kullanımı bilinmekle birlikte, az sayıda çalışmada hem parçacık boyutunun hem de ağırlık fraksiyonunun etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada, karbon nanotüplerle güçlendirilmiş polimerik bir kompozit yapı kullanarak elektromanyetik dalgaların yansımaları en aza indiren, düşük ağırlık/kalınlık ve uygun maliyetli gibi benzersiz özelliklere sahip radar soğurucu malzeme üretimi incelenmiştir. Bu amaçla takviye malzemesi olarak <8 nm, 8-18 nm ve 48-78 nm gibi farklı tanecik boyutlarına sahip karbon nanotüpler %1, %2 ve %3'lük farklı ağırlıklarda polyeşter ile karıştırılmıştır. Üretilen kompozitler 8 ile 12 GHz frekans aralığında Network Analizer kullanılarak karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tanecik boyutunun artmasıyla radar soğuruculuk özelliğinin arttığı görülmüştür. Kompozitlerde karbon nanotüplerin parçacık boyutlarının ve yükleme miktarının değiştirilmesiyle, soğurma performansının farklı frekans bantlarındaki uygulamalara uyacak şekilde ayarlanabileceği tespit edilmiştir.

Investigation of Radar Absorbing Composite Materials Using Carbon Nanotubes in Different Particle Sizes and Weight Fractions

Keywords

Carbon Nanotubes,
Radar Absorption,
Defense Technologies

Abstract: Although the use of carbon nanotubes in the field of radar absorbing materials (RAM) in stealth technology is known, few studies have examined the effects of both particle size and weight fraction. In this study, the production of radar absorber material with unique properties such as low weight/thickness and cost-effectiveness, which minimizes the reflection of electromagnetic waves using a polymeric composite structure reinforced with carbon nanotubes, was examined. For this purpose, carbon nanotubes with different particle sizes of <8 nm, 8-18 nm and 48-78 nm were mixed with polyester at different weight fractions of 1%, 2% and 3% as reinforcement material. The produced composites were characterized using a Network analyzer in the frequency range of 8 to 12 GHz. According to the results obtained, it was observed that radar absorption increased with increasing particle size. It has been determined that by changing the particle sizes and loading amounts of carbon nanotubes in composites, the absorption bands can be adjusted to suit different applications in different frequency bands.

1. Giriş

1930'larda, radar teknolojisinin ortaya çıkmasından kısa bir süre sonra Radar soğurucu malzemelerin (RAM) kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bu tür malzemelere yönelik ilk patent ise 1936'da Hollanda'da alınmıştır. Radar soğurucu malzemelerin geliştirilmesinde yaygın bir yaklaşım, farklı soğurma mekanizmalarına sahip maddelerin birleştirilmesiyle kompozit malzemeler oluşturmak olmuştur. Bu strateji, farklı bant genişliklerinde emilim özelliklerini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Dalga sinyallerini zayıflatmak için kullanılan malzemeler arasında karbon yüklü grafit, demir oksit, çelik yünü, toz demir, toz alüminyum, bakır gibi çeşitli maddeler bulunur.

İlk RAM malzemelere bakıldığında düşük elektrik direnci özellikleri nedeniyle karbon siyahı kullanıldığı görülmektedir [1-3].

Radarın çalışma mekanizmasına bakıldığında oldukça basit olduğu görülebilir. Mekanizmanın temel işlevi elektromanyetik dalgaların iletimi ve alımıdır. Tüm dalgalar gibi elektromanyetik dalgalar (radyo dalgaları ve mikrodalgalar) enerji taşır. Ses dalgaları ve okyanus dalgaları enerjiyi taşımak için maddeye ihtiyaç duyarken elektromanyetik dalgalar bunu madde olmadan da yapabilir. Bu nedenle uydular, Dünya atmosferinin dışındaki ve diğer gezegenlerdeki projelerde çalışmak için elektromanyetik dalgaları kullanabilirler. Elektromanyetik dalgalar hakkında bir diğer yararlı şey de, "c" harfiyle kısaltılan ışık hızı (saniyede 292.792.458 metre) adı verilen sabit bir hızda hareket etmeleridir. Mesafe hesaplamaları yaparken bu değer kullanılır. Radyo dalgalarının dalga boyları 10 cm üzerindeki mikrodalgaların dalga boyları 10 cm ile 1/10 mm arasındadır [4-5].

Radyo dalgaları bir nesneye çarptığında, bir kısmı yansır ve bir kısmı radar setine geri döner. Bu nesnelere hakkındaki konum ve diğer bilgiler, yansıyan enerjiden elde edilen verilerle hesaplanır. Bunlar yansıyan enerjinin alınması için geçen süre, geri dönen sinyalin gücü veya sinyalin frekansındaki değişim gibi verilerdir. Yansıma ve kırılma miktarı, yüzeyin özelliklerine ve dalganın başlangıçta içinden geçtiği maddenin özelliklerine bağlıdır. Bir radar sinyali tamamen düz bir yüzeye çarparsa, sinyal tek bir yönde yansır. Sinyal tamamen düz olmayan bir yüzeye çarparsa, tüm yönlerde yansır, orijinal sinyalin yalnızca çok küçük bir kısmı alıcı yönünde geri iletilir. Sinyal onu soğuran bir yüzeye çarptığında ise aynı şekilde ya hiç yansımaz, yada belli bir kısmı iletilir. Bu mekanizmaya sahip radar soğurucu malzemeler, uçak, gemi ve tank gibi büyük yapılardan gelen elektromanyetik yansımaları önlemek veya en aza indirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, ayrı veya geniş bant frekanslarında radar enerjisinin emilmesine izin vermek için elektriksel ve/veya manyetik özellikleri değiştirilmiş kaplamadan geliştirilmiştir. Belirli bir radar frekansındaki soğurma seviyesi kaplamanın bileşimine bağlı olarak değişir [4-5].

İkinci Dünya Savaşı sırasında Almanya, denizaltıları radarlardan gizlemek için yaklaşık 0,3 inç kalınlığında karbonil demir tozu içeren, 3 GHz rezonans frekansına sahip "Wesch" malzemesini geliştirdi. Aynı dönemde ABD, MIT Radyasyon Laboratuvarı'nda Halpern'in öncülüğünde "HARP" olarak bilinen malzemeleri geliştirdi. X bandı rezonansı için söz konusu radar soğurucu malzemenin kalınlığı 0,025 inç idi. Malzeme, düşük direnç özelliklerinin sağlanması amacıyla yönlendirilmiş alüminyum pulların karbon siyahı ile birlikte dağıtıldığı bir kauçuk matristen formüle edilmişti [1-4].

Her ne kadar savaş sonrası dönemde radar soğurucu malzemelerde farklı malzemelerin kullanılmaya başlandığı görülse de asıl gelişim Nanoteknolojinin ve dolayısıyla Nanomalzemelerin devreye girmesiyle gerçekleşti. Bunlardan en çok dikkat çeken buluşlarından birisi 1991'de bulunan karbon nanotüplerdir (KNT). Bu tarihten itibaren karbon nanotüpler, üzerinde en çok çalışma yapılan materyallerden biri haline gelmiştir. Karbon nanotüp, grafen olarak adlandırılan iki boyutlu (2D) örülü karbon yapının silindirik şeklinde sarılmış halidir. Grafenin tek katlı olarak sarılmasıyla elde edilen karbon nanotüp yapısı tek duvarlı karbon nanotüp olarak adlandırılmaktadır. Bunun yanında, birden fazla sarım yapılarak elde edilen çift katlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler de yaygın olarak görülmekte ve kullanılmaktadır [4,5].

Bu çalışmada, karbon nanotüpler kullanılarak elektromanyetik sinyalleri etkin bir şekilde soğuran kompozit malzemelerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Buna bağlı olarak takviye malzemesi olarak <8 nm, 8-18 nm ve 48-78 nm farklı tanecik boyutlarına sahip karbon nanotüpler %1, %2 ve %3'lük farklı ağırlıkta polyester ile karıştırıldı. Elde edilen kompozitler 8 ile 12 GHz frekans aralığında Network analizler kullanılarak karakterize edildi.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzemeler

Karbon nanotüpler (KNT'ler), Türkiye'de yer alan Nanografi firmasından temin edilmiştir. Bilindiği üzere KNT'ler saf haliyle metalik yapı sergiler ve hidrofobik özellik gösterirler. Ancak hücre ve hayvan deneylerinde kullanılabilirlik, sıvıda çözünürlük ve biyo-uyumluluk gibi özellikler kazandırmak amacıyla karbon nanotüpler işlevlendirme işlemlerine tabi tutulmaktadır. Bu işlemler KNT'lerin -COOH, -OH ve -NH₂ gibi fonksiyonel gruplarla işlenmesini içerir. Ayrıca, karbon nanotüplerin üretim yöntemlerinden kaynaklı olarak içlerinde amorf karbon ve metal bulunabilir, bu da saflıklarının değişken olmasına neden olur. Bu çalışmada kullanılan KNT'ler, yeni özellikler eklenmeden, %96 saflıkta ve üç farklı tanecik boyutuna sahip olarak temin edilmiştir; <8 nm, 8-18 nm ve 48-78 nm. Matris malzemesi olarak Verpoi marka döküm tipi polyester reçine tercih edilmiştir. Bu reçine,

sertleştirici malzeme ile %3 oranında karıştırıldığında 1-2 gün içerisinde oda sıcaklığında sertleşme göstermektedir.

2.2. Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretimi

Çalışma kapsamında kullanılan KNT'ler, yukarıda belirtilen boyutlarda saflıklarını koruyarak temin edilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan KNT'ler, her boyutta farklı yükleme seviyelerinde (%1, %2 ve %3) matris malzemesi olan polyester reçine ile önce manuel olarak, ardından 15 dakika boyunca mekanik olarak karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında homojen bir yapı elde edilmiştir. Akabinde karışıma matris malzemesi olarak reçine sertleştirici ile %3 oranında karıştırılmıştır. Elde edilen karışım Network Analiz cihazına uygun olarak üretilmiş olan 1,5 mm kalınlığa sahip Alüminyum holder içerisine dökülmüştür. Bu şekilde malzemenin 2 gün oda sıcaklığında sertleşmeye bırakılması suretiyle 1,5 mm kalınlığına sahip tek katmanlı kompozit numuneler üretilmiştir.

2.3. Kompozit Numunelerin Karakterizasyonu

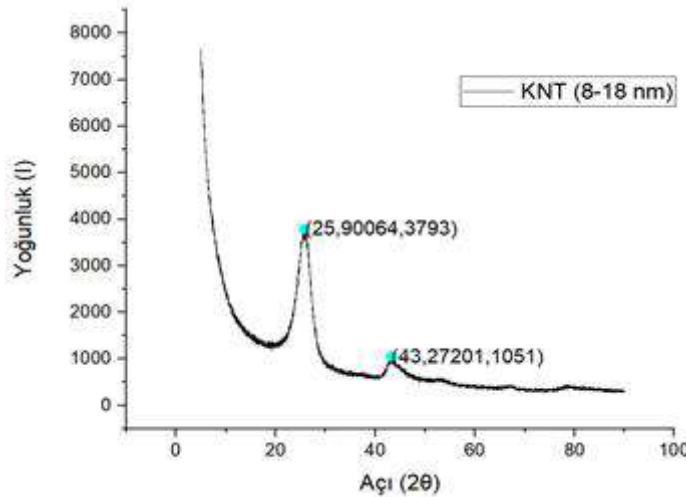
Tozların faz analizi, 20–90° aralığında ($\lambda = 1:540 \text{ \AA}$) Panalytical Empyrean X-ışını difraktometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin morfolojik görüntülerini elde etmek için Carl Zeiss Sigma 300 VP taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Radar soğurma özelliklerinin belirlenmesi 8-12 GHz frekans aralığında iletim/yansıma yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla koaksiyel hat kurulumuna sahip HP8720D Network Analizörü kullanılmıştır.

3. Bulgular

Karbon nanotüplerin faz analizi için yapılan XRD analizi sonuçları Şekil 1'de gösterilmektedir. Elde edilen XRD verileri Williams-Hall yöntemi (Eq.1) kullanılarak tanecik boyutu hesaplanmıştır.

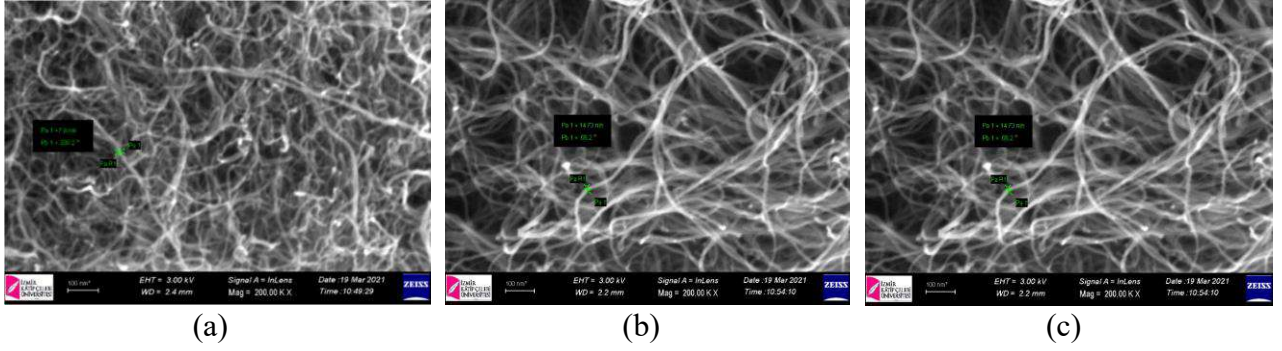
$$\Delta 2\theta \cos \theta / \lambda = 0,9/D + 2\varepsilon \sin \theta / \lambda \dots\dots\dots (Eq.1)$$

Denklemden, λ X-ışını dalga boyunu ifade eder (1.54056 Å), D numunenin kristal boyutunu (nm), ε kafes gerinimini, θ kırınım açısını ve $\Delta 2\theta$ pik yarı yüksekliğinde tam genişliği (FWHM) olarak ifade eder. Bu denklem kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, XRD analizi ile elde edilen verilere dayanarak numunenin yaklaşık 14.2 nm olarak kristal boyutu hesaplanmıştır.



Şekil 1. %96 Saflıkta, 8-18nm tanecik boyutuna sahip ÇDKNT'ün XRD deseni

Malzemenin morfolojik olarak incelenebilmesi için yapılan SEM analizlerinde, %96 saflıkta ve sırasıyla <8nm, 8-18nm ve 48-78 nm tanecik boyutlarına sahip olan, herhangi bir işlevlendirme yapılmamış Çok Duvarlı Karbon Nanotüplerin (ÇDKNT) görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 2.a, 2.b ve 2.c'de görülen SEM görüntüleri, her bir tanecik için elde edilen sonuçları yansıtmaktadır. Görüntülerden elde edilen sonuçlar, satın alınan ÇDKNT'lerin boyutsal tutarlılığının istenen düzeyde olduğunu doğrulamaktadır. Bu durum, çalışmanın temel materyalini oluşturan ÇDKNT'lerin homojen ve istikrarlı bir yapıda olduğunu göstermektedir.



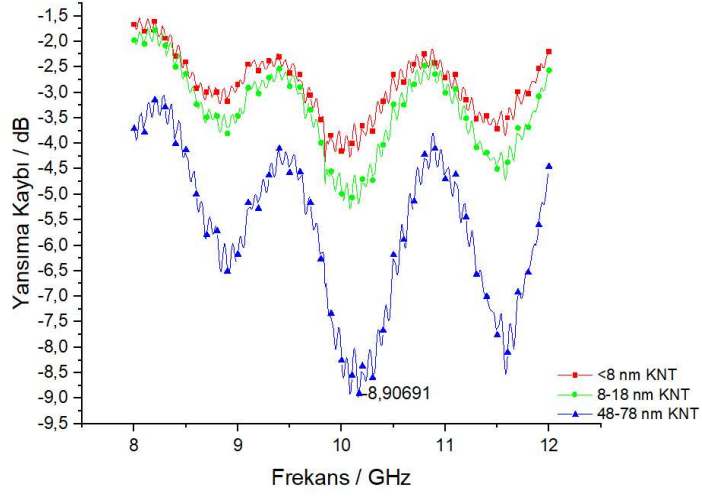
Şekil 2. %96 Safılıkta, a) <8nm, b)8-18 nm ve c) 48-78 nm tane boyutuna sahip ÇDKNT'ün SEM görüntüleri

Tablo 1'de yer alan VSM analiz sonuçları, çalışmanın temel materyali olan üç farklı boyutta çok duvarlı karbon nanotüplerin (ÇDKNT'ler) manyetik özelliklerini göstermektedir. Buna göre 300 K sıcaklık değerinde elde edilen histeresis eğrilerinden çıkarılan koersivite ve doyum manyetizasyon değerleri verilmiştir. Tanecik boyutları arttıkça doyum manyetizasyon ve koersivite değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, tanecik boyutlarının artmasıyla birlikte yüzey hacim oranının azalması ve aglomerasyonun artması gibi faktörlerin dielektrik kaybını azaltarak bu sonuca neden olabileceğini düşündürmektedir.

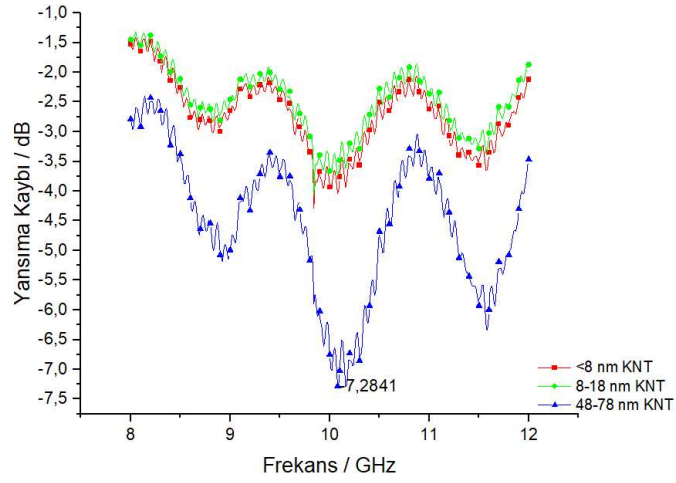
Tablo 1. 3 farklı boyutta ÇDKNT'ün VSM sonuçları

Numune	Ms (emu/g)	Koersivite (Oe)	Mr/Ms
<8 nm	2,63	112,63	0,106
8-18 nm	2,19	111,71	0,122
48-78 nm	2,12	97,75	0,153

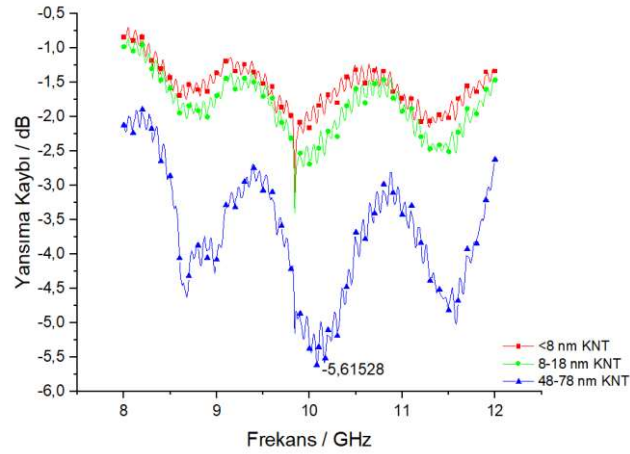
Üretilen kompozitlerin, koaksiyel hat kurulumu yapılmış olan Network Analizörü kullanılarak 8 ila 12 GHz frekans aralığında alınan ölçümleri alınmıştır (Şekil 3). Şekil 3.a, farklı tanecik boyutuna sahip karbon nanotüplerin %1 yükleme oranında eklenmiş olduğu kompozit malzemenin Network Analiz ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara göre, en iyi değer 48-78 nm aralığında boyuta sahip kompozitlerde gözlemlenmiş olup, minimum yansıma kaybı değeri -8.91 dB ve etkin bant genişliği 10,17 GHz olarak belirlenmiştir. Nanotüplerin %2 oranında eklendiği kompozitlerin sonuçları Şekil 3.b'de görülmektedir. Buna göre, en iyi sonuç yine 48-78 nm aralığında boyuta sahip nanotüp içeren kompozitlerde elde edilmiştir. Değer olarak ise minimum yansıma kaybı değeri -7.28 dB ve etkin bant genişliği 10,08 GHz olarak belirlenmiştir. Şekil 3.c ise, %3 yükleme oranında nanotüp eklenmiş kompozitlerin network analiz sonuçlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere en iyi sonuç aynı şekilde, minimum yansıma kaybı değerininin -5.61 dB olarak ve etkin bant genişliğininin de 10.06 GHz olarak bulunduğu 48-78 nm aralığında boyutta nanotüp içeren kompozitlerden elde edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3. Farklı boyutlarda ÇDKNT nanotüplerin %1, %2 ve %3 yükleme seviyelerinde ölçümlerin değerleri

4. Tartışma ve Sonuç

Fan ve arkadaşlarının [6] yaptığı çalışmada, elektromanyetik ve mikrodalga soğurma özellikleri bakımından Karbon Nanotüp (KNT)/polimer (PET, PP, Vernik) kompozitleri incelemiştir. Çalışmada artan KNT konsantrasyonuyla yansıtma frekansı düşmüş ve kompozitlerin kayıp faktörleri artmıştır. %4'ten yüksek KNT konsantrasyonunda kayıp faktöründe belirgin bir artış gözlenmiş, özellikle %4 KNT/PET ve %8 KNT/Vernik kompozitler önemli mikrodalga soğurma göstermiştir. KNT/polimer kompozitleri, 13 GHz, 10 GHz ve 6 GHz frekanslarında etkili mikrodalga soğurma göstermiştir. Bu bakımdan Fan'ın araştırmasında elde ettiği sonuçlar bizim çalışmamız ile farklılık göstermektedir. Zira bu çalışmada katkı miktarının artırılmasıyla yansıma kaybının azaltıldığı görülmüştür. Bunun ise fazla katkı maddesi yüklenmesiyle meydana gelen aglomerasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir. Aglomerasyon dielektrik kaybını düşürerek soğuruculuk yeteneğini olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca mikrodalga emilimi, manyetik kaybın ötesinde özellikle dielektrik kaybına bağlanabilir bir nitelik taşımaktadır. Zhang ve arkadaşlarının [7] yaptığı çalışmada 2 ila 6 GHz frekans aralığında Karbon Nanotüp (KNT)/epoksi kompozitlerin elektromanyetik özelliklerini ve mikrodalga soğuruculuk performansını incelemiştir. %15 yükleme oranına sahip tek katmanlı KNT/epoksi kaplama, S ve C1 bantlarında etkili mikrodalga soğuruculuk sergilemiştir. Özellikle, 2 mm kalınlığı ve %15 yükleme oranıyla 3,85 GHz'de maksimum -10,5 dB güçlü bir yansıtma sahiptir. İleri adımlarda, yansıtma zirvesini genişletmek amacıyla iki katmanlı bir kaplama tasarlanmıştır. Bu tasarım, 5,52 GHz'de -20,79 dB'ye ulaşan yüksek soğurma değeri sunmaktadır. Çalışma, KNT'lerin mikrodalga soğurucu malzemelerin tasarımında ve üretiminde potansiyelini vurgulayarak, özgün kaplama tasarımlarının S ve C1 bantlarında etkili elektromanyetik dalga soğuruculuk sağlayabileceğini göstermektedir. Bu çalışma bizim çalışmamızla oldukça paralel sonuçlar ortaya konmuştur.

Zhao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, bilyeli öğütme ve ıslak öğütme yöntemlerinin Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (ÇDKNT) dağılımı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Elektromanyetik dalga soğurma özelliği, öğütme koşullarının önemli bir belirleyeni olarak ortaya çıkmış, kuru öğütme yöntemi kullanılan numunelerin en üst düzey performans sergilediği vurgulanmıştır. En düşük yansıma kaybı, 3 mm kalınlığındaki örneklerde ve 6,1 GHz bant genişliğinde, kalınlığın 2-5 mm arasında değiştiği örneklerde ise 6,8 GHz bant aralığında -37,3 dB olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, ÇDKNT kompozitlerin elektromanyetik dalga soğuruculuk özelliklerini optimize etmede öğütme koşullarının kritik bir faktör olduğunu göstermektedir [8]. Diğer yandan, Kong ve arkadaşlarının çalışması, hafif, güçlü ve geniş bir soğurma bant genişliğine sahip potansiyel bir elektromanyetik soğurucu malzeme üretme amacını taşımaktadır. Karbon Nanotüp (KNT) ve grafinin kovalent C-C bağı ile büyüyen düzlemleri, daha iyi dağılım ve düşük arayüzey teması elektrik direnci sağlayarak elektromanyetik parametrelerin etkili bir şekilde optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen KNT/Grafen hibritleri, düşük Radyasyon Kaybı Katsayısı (RKA) ve etkili bir soğurma bant genişliği ile dikkat çekmektedir. Özellikle, %5 dolgu yükü ağırlığı ve 2,75 mm soğurucu kalınlığı durumunda, RKA minimum -55dB'ye ulaşmış ve geniş bir soğurma bant genişliğiyle etkin elektromanyetik soğurma kapasitesine sahip potansiyel bir malzeme elde edilmiştir [9].

Melvin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, sol-jel yöntemiyle üretilen Baryum titanat/karbon nanotüp (BTO/KNT) hibrit nanokompozitlerin elektromanyetik dalga soğuruculuk özelliklerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Farklı ağırlık yüzdeleriyle parafin mumuna yüklenmiş olan bu nanokompozitler, vektör ağ analizörü kullanılarak 1mm kalınlığında toroidal şekilde üretilerek geçirgenlikleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, BTO/KNT ağırlıkça %60 hibrit nanokompozit numunesi 1mm kalınlığında, 13,6 GHz'de minimum yansıma kaybının 29,6 dB'ye ulaştığı ve geniş bir bant genişliği sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, aynı malzemeden üretilen 1,1 mm kalınlığındaki BTO/KNT ağırlıkça %60 hibrit nanokompozit numunesi, 13,2 GHz'de -56,5 dB'lik minimum yansıma kaybı ile en iyi soğurucu olarak tespit edilmiştir. Yansıma kaybı tepe noktasının düşük frekansta kaydırılabilmesi ve numunelerin kalınlığının arttıkça daha geniş yanıt bant genişliği elde edilebilmesi, hibrit nanokompozitlerin soğurma bandını farklı frekans bantlarına modüle etme yeteneğini göstermektedir [10]. Öte yandan Wang ve arkadaşlarının çalışmasında, çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT)/çimento kompozitlerin elektromanyetik dalga soğurma özelliklerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Farklı ÇDKNT içeriğine sahip çimento harcı numuneleri üretilmiş ve elektromanyetik dalga soğurma özellikleri analiz edilmiştir. Çalışma, ağırlıkça %0,6 ÇDKNT içeren 25 mm kalınlığındaki çimento harcı numunesinin, 2-8 GHz bant aralığında -28 dB yansıtıcılığa sahip en güçlü tepe noktasını 2,9 GHz'de elde ettiğini göstermektedir. Ayrıca, 35 mm kalınlığındaki çimento harcı numunesi, 8-18 GHz bant aralığında ağırlıkça %0,9 ÇDKNT ilavesi ile çimento harcının dalga soğurma performansını önemli ölçüde artırmış ve -10 dB'nin altındaki bant genişliğini 8-18 GHz frekans aralığında 7,1 GHz'e çıkarmıştır [11].

Başka bir çalışmada Qi ve arkadaşları, H-HCNT'ler, L-HCNT'ler ve solucan benzeri KNT'ler, asetilenin katalitik ayrışması yoluyla Fe nano parçacıkların katalizörü olarak kullanılmasyla üretilmiştir. Bu süreç, kombine bir birlikte çökeltme/hidrojen indirgeme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kompozitteki KNT'lerin kütle fraksiyonunun düşük olmasına rağmen (ağırlıkça %30), malzemelerin iyi bir mikrodalga soğurma yeteneği

sergilediği belirlenmiştir. Solucan benzeri KNT kompozitleri, maksimum yansıma kaybı ve -20 dB'nin altındaki yansıma kaybına karşılık gelen bant genişliği sırasıyla -26,39 dB ve 3,2 GHz değerlerine sahiptir [12]. Liu ve arkadaşlarının çalışmasında ise, metal-organik çerçevelerden türetilen gözenekli ve içi boş CoNi@C (CNC) mikrokürelerin solvothermal yöntem ve tavlama işlemiyle üretildiği bir araştırmadır. Çalışmada, morfoloji, yapı, mikrodalga soğuruculuk özellikleri ve iç ilişkiler sistematik olarak araştırılmıştır. Gözenekli ve içi boş CNC mikroküreler, minimum yansıma kaybının 10,7 GHz'de -44,8 dB'ye ulaşabildiği ve ultra geniş etkili soğuruculuk bant genişliğinin 1,6-4,0 mm kalınlıkta 13,3 GHz'e (4,7-18,0 GHz) kadar ulaşabildiği belirtilmiştir. CNC mikrokürelerin, gelişmiş empedans uyumu ve zayıflama yeteneğine bağlı olarak üstün mikrodalga soğuruculuk performansı sergilediği vurgulanmıştır. İçi boş yapının, arayüzey polarizasyonu, CoNi alaşımı ve grafitleştirilmiş karbon arasındaki sinerjik etkinin, mikrodalga soğuruculuk mekanizmalarını aynı anda hesaba kattığı ifade edilmiştir. Bu çalışma, ayarlanabilir bileşen ve özel morfolojiye sahip, hafif ve yüksek verimli mikrodalga soğurucuların tasarımı ve hazırlanması konusunda umut verici seçenekler sunmaktadır [13].

Tiwari ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, pirolün 'kimyasal oksidatif polimerizasyonu' ile sentezlenen PPy/TiO₂(np)/CNT nanokompozitler X-bandında (8-12 GHz bant aralığında) mikrodalga ölçümleri ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, TiO₂(np) partikül boyutunun 60 ila 150 nm arasında olduğu belirlenmiş ve ortalama kristalit boyutu Scherrer formülü ile hesaplanarak 26 nm olarak tespit edilmiştir. Mikrodalğanın minimum yansıma kaybının, nanokompozitlerdeki dielektrik kayıptan kaynaklandığı ifade edilmiş ve 3 mm kalınlığındaki numune (PPy/TiO₂(np)/CNT) için 8,64 GHz'de -51,11 dB (%99,99) olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, PPy/TiO₂(np)/CNT nanokompozit malzemenin, mikrodalgaları soğurabilmesi için etkili bir seçenek olabileceğini göstermektedir [14]. Hussein ve arkadaşlarının yaptığı çalışması ise, poliüretan polimerlerde işlevselleştirilmiş KNT kullanılarak mikrodalga soğurucu malzeme tasarımı ve geliştirme sürecine odaklanmaktadır. KNT, farklı konsantrasyonlarda (%5, %10 ve %20) karıştırılarak kompozitler elde edilmiştir. Yapılan ölçümlerde, KNT'deki işlevselleştirici eleman içeriği arttıkça geliştirilen kompozitlerin önemli dielektrik kayıplarına sahip olduğunu göstermektedir. Üç farklı metal alaşımı, %10 ve %20 konsantrasyonla geliştirilen kompozitlerde belirgin yansıma kaybı sergilemektedir. -10 dB'lik bir soğuruculuk seviyesine ulaşmak için, daha düşük konsantrasyonda 3 mm ve daha yüksek konsantrasyonlarda ise 0,8 mm kalınlığındaki bir kompozit tabaka kullanılmıştır. Bu bulgular, doğru kompozit kalınlığına sahip bir malzemenin soğuruculuk verimliliğini artırabileceğini ve geliştirebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, işlevselleştirilmiş KNT kullanımının havacılık uygulamalarında önemli bir gelişme oluşturduğu, ancak ekstra ağırlık artışına neden olabileceği belirtilmiştir [15].

Tüm bu araştırmaların ışığında yapılan bu çalışmada, çok duvarlı karbon nanotüplerin (ÇDKNT) mikrodalga soğurma özelliklerini araştırılmış ve bu özelliklerin optimize edilmesi sağlanmıştır. Kompozit malzemelerin elektromanyetik dalga soğurma yeteneklerinin, yüklem miktarı ve tanecik boyutu gibi faktörlere bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. İlk olarak tanecik boyutunun artmasıyla yansıma kaybı değerlerinin arttığını gözlemlenmiştir. Bu durum, genellikle dielektrik kaybı ile ilişkilendirilir. Bu durum kompozit malzemelerin elektromanyetik dalgalarla etkileşime girerek bu dalgaların zayıflamasına neden olur. Bu da mikrodalga soğurma kabiliyetini artırır. Öte yandan, artan katkı malzemesinin aglomerasiyona yol açmasına bağlı olarak soğuruculuk yeteneği olumsuz etkilenmiştir. Bu nedenle, optimal mikrodalga soğurma performansı için katman sayısı, tanecik boyutu ve yüklem seviyeleri dikkatle seçilmelidir. Çalışma ilerleyen teknoloji ile ÇDKNT'lerin, gizlilik teknolojisi, sağlık, telekomünikasyon gibi birçok uygulama alanında etkin bir şekilde kullanılabilmesini göstermiştir. Özellikle katkı maddelerinin boyutsal olarak değerlendirildiği bir çalışma olması sebebiyle, gelecekteki araştırmacılara mikrodalga soğurma özelliklerini optimize etmek ve çeşitli uygulamalarda kullanmak için bir yön gösterici olacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

- [1] Ren, M., Li, F. 2020. Preparation And Electromagnetic Wave Absorption Properties Of Carbon Nanotubes Loaded Fe₃O₄ Composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. (2020) 2, 513
- [2] Shoukat, R., Khan, M.I. 2021. Carbon Nanotubes: A Review on Properties, Synthesis Methods and Applications in Micro and Nanotechnology. *Microsystem Technologies*. (2021) 2, 1-10
- [3] Hussein, M.I., Jehangir, S.S. 2020. Microwave Soğurucu Properties Of Metal Functionalized-CNT-Polymer Composite For Stealth Applications. *Scientific Reports*. (2020) 2, 10.
- [4] Yılmaz Atay H., Çelik E. (2014). Barium Hexaferrite Reinforced Polymeric Dye Composite Coatings for Radar Soğurucu Applications, *Polymer Composites*. Volume 35, Issue 3, pages 602–610, March 2014
- [5] Karbon Nanotüpler ve Nanoteknoloji İle Gelecek, 2023. <https://shop.nanografi.com.tr/blografi/karbon-nanotupler-ve-nanoteknoloji-ile-gelecek/> pdf (Erişim Tarihi: 21.01.2007).
- [6] Fan, Z., Luo, G., Zhang, Z., Zhou, L., Wei, F. 2006. 3- Electromagnetic and Microwave Soğurucu Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes/Polymer Composites. *Materials Science and Engineering: B*. 132 (1-2) (2006) p. 85-89.
- [7] Zhang, H., Zeng, G. 2009. Electromagnetic Characteristic And Microwave Absorption Properties Of Carbon Nanotubes/Epoxy Composites In The Frequency Range From 2 To 6 Ghz. *Journal of Applied Physics*. 105 (2009) 5.
- [8] Zhao, T., Wang, X. 2019. Electromagnetic Wave Absorption Properties Of Multi-Walled Carbon Nanotubes-Anatase Composites in 1–18 Ghz Frequency *Ceramics International*. 45 (2019) 17.
- [9] Kong, L., Yin, X., Yuan, X., Zhang, Y., Liu, X., Cheng, L. 2014. 2- Electromagnetic Wave Absorption Properties of Graphene Modified with Carbon Nanotube/Poly(Dimethyl Siloxane) Composites. *Carbon*. 73 (2014) p. 185-193.
- [10] Melvin, J.H., Ni, Q.Q., Natsuki, T. 2014. Electromagnetic Wave Absorption Properties of Barium Titanate/Carbon Nanotube Hybrid Nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 615 (2014) 84-90.
- [11] Wang, B., Guo, Z., Han, Y. 2013. Electromagnetic Wave Soğurucu Properties of Multi- Walled Carbon Nanotube/Csoğurucu Composites. *Construction and Building Materials*. 46 (2013) 98-103.
- [12] Qi, X., Yang, Y. 2009. Large-Scale Synthesis, Characterization And Microwave Absorption Properties Of Carbon Nanotubes Of Different Helicities. *Journal of Solid State Chemistry*. 182(10) (2009) 2691-2697.
- [13] Liu, Y., Chen, Z. 2019. Enhanced Microwave Absorption Performance Of Porous And Hollow Coni@C Microspheres With Controlled Component And Morphology. *Journal of Alloys and Compounds*. (2019) 809.
- [14] Tiwari, D.C., Dipak, P. 2018. Ppy/Tio₂(Np)/CNT Polymer Nanocomposite Material For Microwave Absorption. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 29 (2018) 1643-1650.
- [15] Hussein, M.I., Jehangir, S.S. 2020. Microwave Soğurucu Properties Of Metal Functionalized-CNT-Polymer Composite For Stealth Applications. *Scientific Reports*. (2020) 10.