

Elektromanyetik Ekranlama İşlemlerinde Kullanılan Çeşitli Malzemelerin Değerlendirilmesi

Uğur SORGUCU¹, Sema ATASEVER^{2*}

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir

² Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir

¹<https://orcid.org/0000-0001-9227-1526>

²<https://orcid.org/0000-0002-2295-7917>

*Sorumlu yazar: sema@nevsehir.edu.tr

Derleme

ÖZ

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 06.11.2023

Kabul tarihi:04.03.2024

Online Yayınlanma: 16.09.2024

Anahtar Kelimeler:

Elektromanyetik ekranlama

Elektromanyetik girişim

Ekranlama etkinliği

Kompozit

Polimer

Elektromanyetik ekranlama; günümüz teknolojik dünyasında büyük öneme sahip bir konudur. Elektromanyetik kirlilik, elektronik cihazlardan ve dış kaynaklardan yayılan elektromanyetik alanların istenmeyen etkilerine işaret eder. Bu tür etkiler, sağlık sorunlarından elektronik cihazların çalışma performansını etkileyen sorunlara kadar uzanabilir. Elektromanyetik ekranlama, bu olumsuz etkileri en aza indirmek için kullanılan yöntemler bütünüdür. Bu nedenle elektromanyetik ekranlayıcı malzemelerin özelliklerinin araştırılması, modern teknolojinin sürdürülebilirliği açısından da hayati öneme sahiptir. Bu derleme çalışması, farklı malzemelerin elektromanyetik ekranlama kapasitelerini incelemekte ve endüstri, tıp, savunma ve iletişim gibi birçok alanda uygulama potansiyeli taşıyan bu teknolojinin gelişimini ilerletmeyi amaçlamaktadır. Sonuç olarak, malzemelerin elektromanyetik ekranlama özelliklerini derleyen bu makale, elektromanyetik alanların kontrolünü sağlamak için bu malzemelerin nasıl kullanılabileceği konusunda bilimsel bir temel sunmaktadır.

Evaluation of Various Materials Used in Electromagnetic Shielding Processes

Reviews

ABSTRACT

Article History:

Received: 06.11.2023

Accepted: 04.03.2024

Published online: 16.09.2024

Keywords:

Electromagnetic shielding

Electromagnetic interference

Shielding effectiveness

Composite

Polymer

Electromagnetic shielding is a topic of major importance in today's technological world. Electromagnetic pollution refers to the undesirable effects of electromagnetic fields emitted from electronic devices and external sources. Such effects can range from health problems to problems affecting the operating performance of electronic devices. Electromagnetic shielding is a set of methods used to minimize these negative effects. For this reason, investigating the properties of electromagnetic shielding materials is of critical importance for the sustainable development of modern technology. This review study examines the electromagnetic shielding capacities of different materials and aims to advance the development of this technology, which has the potential for applications in many fields such as industry, medicine, defense, and communication. In conclusion, this article, which reviews the electromagnetic shielding properties of materials, provides a scientific basis on how these materials can be used to control electromagnetic fields.

To Cite: Sorgucu O., Atasever S. Elektromanyetik Ekranlama İşlemlerinde Kullanılan Çeşitli Malzemelerin Değerlendirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(4): 1860-1881.

1. Giriş

Günümüzün hızla ilerleyen teknolojik ortamı, elektromanyetik alanların her zamankinden daha yaygın bir şekilde kullanılmasına neden olmaktadır. Kablosuz iletişim, radyo frekanslı tanıma, elektrik enerjisi iletimi ve birçok diğer uygulama elektromanyetik alanların önemini vurgulamaktadır. Ancak bu elektromanyetik alanlar, bir taraftan cihazların performansını artırırken diğer taraftan çevresel ve insan sağlığıyla alakalı potansiyel riskler de taşıyabilmektedir (Jha, 2012). Bu bağlamda, elektromanyetik kirlilik ve elektromanyetik etkileşimlerle mücadele etme ihtiyacı daha önemli hale gelmektedir. Elektromanyetik ekranlama, bu zorluğun üstesinden gelmek için tasarlanan bir dizi teknik ve malzeme çeşitliliğinden faydalanır. Bu teknikler ve malzemeler, elektromanyetik alanların yayılmasını engelleyerek istenmeyen etkileri minimize etmeye yardımcı olur. Elektromanyetik kalkanlama ve ekranlama çalışmaları, birçok disiplini kapsamakta ve elektromanyetik alanlar ile malzemelerin etkileşimi bu konunun temelini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada; elektromanyetik alanlar ile malzemelerin etkileşimi derinlemesine incelenmiştir. Malzemelerin elektromanyetik alanlarla etkileşimi bu konunun anahtarıdır. Bahsedilen bu etkileşimler özel uygulamalara ve gereksinimlere bağlı olarak değişebilen malzeme seçimini ve tasarımını yönlendirmektedir. Elektromanyetik ekranlama malzemeleri, genellikle elektromanyetik dalgaları soğurma, yansıtma veya saçma özelliklerine sahip olurlar. Bu nedenle, bu özelliklerin anlaşılması ve optimize edilmesi, malzemelerin performansını belirlemek için kritik öneme sahiptir (Smith ve Pendry, 2006; Hamouni ve ark., 2014).

Elektromanyetik uyumluluk çalışmaları, askeri kalkanlama, tıbbi cihazlar ve elektromanyetik radyasyonun etkilerini azaltma gibi çok sayıda çalışma alanına sahiptir (Paul ve ark., 2022). Bu nedenle, elektromanyetik ekranlama çalışmalarının, teknolojik gelişmelere ayak uydurmayı ve çevresel etkilere karşı koruma sağlamayı amaçlayan araştırmacılara önemli bir potansiyel sunacağı düşünülmektedir.

Ekranlamada kullanılan malzemeler özel uygulamalara ve gereksinimlere bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. Gelişen günümüz teknolojisi, farklı geniş bant aralıklarındaki çalışmaları desteklediği gibi farklı frekansların aynı uygulamalarda çalışmasına da izin verebilmektedir. Bu sebeple kullanılan ekranlama malzemeleri de ilgili probleme göre seçilir hale gelmiştir. İletken özelliği yüksek metaller, farklı tekniklerle üretilen kompozitler ve polimerler en sık kullanılan malzeme çeşitleri olarak literatürde görülmektedir. Malzeme sınıfları ve detayları ile ilgili bölümler aşağıda detaylıca izah edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda ekranlama malzemesi seçilirken temel alınan iki anahtar özellik bulunmaktadır. Bunlar, yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek manyetik geçirgenliktir. Yüksek elektriksel iletkenlik; elektromanyetik dalganın ilgili malzeme ile etkileşimi halinde yüksek yansıtma sağlamaktadır. Yüksek manyetik geçirgenlik ise, malzeme ile elektromanyetik alanın etkileşimi durumunda manyetik enerjii ısıya çevirerek soğurma işlemini yapmaktadır (Yılmaz, 2014). Her malzemenin elektriksel ve manyetik özelliği birbirinden farklıdır. Malzemenin pürüzlü olup olmaması, kalınlığı ve saflığı ekranlama performansı üzerinde doğrudan etkilidir (Hariyawan ve ark., 2021). Bu sebeple ekranlama uygulamalarında probleme uygun malzeme seçimi önem arz etmektedir.

Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde, ekranlama uygulamalarında kullanılan malzemeler çeşitli başlıklar altında incelenecek ve ölçüm yöntemlerinden bahsedilecektir.

1.1. Ekranlamada Kullanılan Metaller

Elektromanyetik alanlar; modern teknolojinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Kablosuz iletişim, elektrik enerjisi iletimi, radyo yayınları ve bir dizi diğer uygulama, elektromanyetik dalgaların kullanımını içerir. Ancak bu elektromanyetik alanlar, elektronik sistemler, insan sağlığı ve diğer hassas cihazlar üzerinde istenmeyen etkilere neden olabilmektedir (Luo ve ark., 2020; Schuermann ve Mevissen, 2021; Markus ve ark., 2023). Elektromanyetik kirlilik ve elektromanyetik girişim, bu konulara karşı çeşitli endişeler oluşturmuştur. Elektromanyetik ekranlama, bu tür istenmeyen etkilere karşı koruma sağlamak amacıyla geliştirilen bir tasarım yaklaşımı olarak da kullanılabilir (Yu ve ark., 2023). Bu teknikler ve malzemeler, elektromanyetik alanların kontrolünü ele almaktadır ve bu alanların istenmeyen etkilerini minimize etmeyi amaçlar (Li ve ark., 2010; Los ve ark., 2016). Bu bağlamda, elektromanyetik alanlar ile malzemelerin etkileşimi ve metallerin bu bağlamdaki rolü oldukça kritik bir öneme sahiptir (Bachir ve ark., 2016). Elektromanyetik ekranlama uygulamalarında kullanılan metaller, elektromanyetik alanlara karşı koruyucu bariyerler oluşturmak için önemli bir bileşeni temsil eder. Bu metaller, elektromanyetik dalgalara karşı etkili bir şekilde direnç gösterir ve bu dalgaların yayılmasını engeller. Elektromanyetik kalkanlama ve ekranlama performansını belirleyen faktörler arasında metallerin seçimi ve özellikleri önemli bir rol oynar.

Elektromanyetik ekranlama ve kalkanlama uygulamalarında yaygın olarak kullanılan metaller arasında; bakır, alüminyum, nikel ve demir sayılabilir. Ancak bunlarla metalleri sınırlandırmak mümkün değildir. Nitekim ismi anılan metallerden çok daha fazlası hali hazırda kullanılmaktadır ve birçoğu ile ilgili çalışmalar da devam etmektedir. Ancak periyodik cetveldeki tüm metalleri bu çalışma kapsamında değerlendirmek pratik olarak mümkün değildir, bu sebeple burada en çok kullanılan birkaç metale değinilmiştir.

1.1.1. Bakır (Cu)

Bakır; yüksek elektriksel iletkenliği sayesinde elektromanyetik ekranlama ve kalkanlama uygulamalarında en sık tercih edilen metallerden biridir (Kaya ve Çifci, 2018). Ayrıca bakır, maliyet açısından da oldukça makul bir seçenektir (Chang ve ark., 2022). Bakır folyo veya kaplama malzemeler, elektronik cihazlar ve Radyo Frekansı (RF) ekranlamada kullanılır (Chen ve ark., 2015). Bakırın yansıtma özellikleri ve iletkenliği, elektromanyetik dalgaların soğurulmadan yansıtılmasına yardımcı olur (Inudo ve ark., 2013). Örneğin, Yeşildağ ve Kadoğlu'nun çalışması (2018), bakır özlü ipliklerin kullanılmasıyla daha iyi elektromanyetik ekranlama performansına erişilebileceğini vurgulamaktadır.

1.1.2. Alüminyum (Al)

Alüminyum; hafifliği ve düşük maliyeti nedeniyle elektromanyetik ekranlama uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir başka metaldir (Xu ve Hao, 2014). Alüminyum folyo veya kaplama malzemeler, birçok endüstriyel uygulama için idealdir (Wanasinghe ve Aslani, 2019). Alüminyum hem saf halde hem de alaşım olarak kullanılabilir. Literatürde alüminyumdan faydalanan birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Bulut ve ark., (2017) yaptıkları çalışmada birçok metali ev içindeki elektromanyetik alanın yansıtılmasında denemişlerdir ve bu çalışmada kullanılan metallerden birisi olan alüminyumun elektromanyetik ekranlama konusunda kullanılabilirliği görülmüştür. Yang ve ark., (2017) alüminyum köpüğün elektromanyetik ekranlama etkisinin değerlendirdikleri çalışmada, alüminyum köpüğün kompozit ile neredeyse aynı, ancak 304L paslanmaz çelikten biraz daha iyi ekranlama performansı gösterdiğini vurgulamışlardır.

1.1.3. Nikel (Ni)

Nikel; özellikle yüksek frekansta çalışan elektromanyetik dalgaları yansıtma yeteneği nedeniyle elektromanyetik ekranlama için kullanılmaktadır. RF ve mikrodalga ekranlama uygulamalarında tercih edilir. Testov ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada 2-18 GHz frekans bandındaki nikel ile ince film kaplama konusunu araştırmışlardır ve 35 dB'ye kadar ekranlama etkinliği sağlanmıştır. Bir diğer çalışmada ise, karbon fiber üzerine yapılan nikel kaplama ile çimentonun elektromanyetik girişim korumasının arttığı belirlenmiştir (Ozturk ve Chung, 2021a). Ekranlama performansındaki bu artışın, nikelin elektriksel özelliklerinden kaynaklandığı da yine aynı çalışmada vurgulanmıştır. İrgin (2022) çalışmasında, karbon fiber kumaşlar üzerine nikel kaplama yaparak 3 farklı frekans için ölçümler gerçekleştirmiştir. 300-1500 MHz, 2170-3300 MHz, 3300-4900 MHz nikel kaplamanın her frekans bölgesi için kalkanlama özelliklerini arttırdığı raporlanmıştır.

1.1.4. Demir / Çelik

Demir ve çeliğin; sahip olduğu özellikler nedeniyle elektromanyetik ekranlama ve kalkanlama uygulamalarında yaygın olarak kullanıldığına dair çeşitli araştırmalar mevcuttur. Fiziksel özellikleri sebebiyle sıklıkla tercih edilen bir malzemedir. Elektromanyetik alanların özellikle manyetik bileşenleri üzerinde etkili bir şekilde kontrol sağlamak için kullanılmaktadır. Manyetik kalkanlama gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Ozturk ve Chung, 2021b). Demir ve çelik ile yapılan çalışmalar inşaattan tekstile birçok alanda sürdürülmektedir. Örneğin; Yuan ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada beton içine çelik çürüfleri katarak 600-1000 MHz frekans bandında ölçümler yapmışlardır. Yapılan çalışmada çelik çürüf katılan numunelerin saf hallerine göre daha iyi ekranlama performansı gösterdiği bulunmuştur. Başka bir çalışmada (Jagatheesan ve ark., 2018) bir dizi iletken hibrit örme kumaş ve bunların kompozitleri, 50 MHz ila 1,5 GHz (düşük frekans) ve 4 ila 8 GHz (C-Bandı) frekans aralıklarında ekranlama etkinliği açısından incelenmiştir. Çelik katkılı ipliklerle hazırlanan numunelerin 20-45 dB daha iyi ekranlama performansı gösterdiği vurgulanmıştır.

Demir katkılı ürünlerden özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda faydalanılmaktadır. Nitekim, Singh ve ark., (2017) demir tozları ve demir cürufu ile numuneler hazırlamışlardır ve her iki katkı durumunda da daha iyi ekranlama performansı elde etmişlerdir. Bu çalışma gama radyasyon bölgesinde yapılmıştır. Bununla birlikte, saf uçucu kül ile karşılaştırılmış ve cürufun radyasyon kalkanlama konusunda da uçucu külden daha iyi bir agrega olduğu görülmüştür.

Görüldüğü gibi metallerin seçimi, uygulamanın ya da problemin ihtiyaçlarına ve elektromanyetik alanın frekansına bağlı olarak değişmektedir. Her metal, farklı frekansta çalışan elektromanyetik dalgaları etkili bir şekilde kalkanlayabilir. Elektromanyetik ekranlama uygulamaları, elektronik cihazlardan tıbbi ekipmanlara, askeri sistemlere ve daha fazlasına kadar geniş bir yelpazede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu metaller, elektromanyetik kalkanlama ve ekranlama performansını artırarak, uygulamaların güvenilirliğini ve işlevselliğini sağlamaya yardımcı olur.

1.2. Ekranlamada Kullanılan Kompozitler

Kompozitler veya kompozit malzemeler; farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşen malzemeden oluşan tasarlanmış malzemelerdir (Egbo, 2021). Elektromanyetik ekranlama uygulamalarında kullanılan kompozitler, genellikle metallerin ve dielektrik malzemelerin bir kombinasyonunu içermektedir (Los ve ark., 2016). Bu kombinasyon, elektromanyetik alanları etkili bir şekilde soğurma, yansıtma ve saçma yeteneğini barındırmaktadır. Kompozit malzemelerin elektromanyetik ekranlama performansı, içerdikleri malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Bu konuda yakın zamanda yürütülen çalışmaların sayısı oldukça fazladır. Metallerle karşılaştırıldığında; polimerler hafiflik, yüksek korozyon direnci, iyi işleme performansı ve maliyet rekabeti gibi benzersiz avantajlara sahiptir. Bu nedenle ekranlama davranışını sergileyen polimerler ve kompozitleri literatürde büyük ilgi görmüştür (Tian ve ark., 2023). Los ve ark., (2016) çalışmalarında elektromanyetik alan kalkanı için metalik dolgulu polimer kompozitlere artan ilgiyi vurgulamaktadır. Balan ve ark., (2016) bir polimer matris içine gömülü Ni ve Fe tozlarından oluşan kompozit malzemelerin elektromanyetik kalkanlama yeteneklerini araştırmış ve nikel ve demir tozlarına karbon matrislerin eklenmesi ile çok daha iyi ekranlama performansı gözlemlendiğini raporlamışlardır. Bu çalışma 0,9-4 GHz bandında yürütülmüştür, bu anlamda mikrodalga/haberleşme bandı için kullanılabilir yeni bir malzeme olduğu söylenebilir. Kompozit malzemeler aynı zamanda atık malzemelerden de oluşturulabilmektedir. Jakubas ve ark., (2023) elektromanyetik alan ekranlanması için geri dönüştürülmüş malzemelere dayalı polimer-metal kompozitlerin kullanımını araştırmışlardır. Özetle, metallerin avantajlarının yanı sıra birtakım dezavantajları da bulunmaktadır. Şöyle ki; metaller yoğun yapıları sebebiyle ağırlık, montaj ve taşıma yönünden ciddi zorluklar oluşturabilirler. Bununla birlikte, metallerin pahalı malzemeler olması muhafaza maliyetini genellikle arttırmaktadır. Ayrıca, korozyon ve iletkenlik gibi yapısal riskleri de bulunmaktadır. Tüm bu hususlar göz önünde alınarak işlemler yapılmalıdır. Bu bağlamda kompozitler birçok uygulama alanında başarılı sonuçlar üretmektedir (Barsukov ve ark., 2018). Ancak kompozitleri tek bir başlık altında incelemek, sistematik bir hata doğuracaktır ve anlam karmaşası oluşturacaktır. Bu

sebeple, aşağıda bazı kompozit malzeme türleri ve elektromanyetik ekranlama özellikleri sırasıyla sunulmuştur.

1.2.1. Karbon Nanotüp Kompozitler

Karbon nanotüpler; mükemmel elektriksel iletkenlikleri nedeniyle elektromanyetik kalkanlama uygulamaları için idealdir. Bu nanotüpler, elektromanyetik dalgaları iyi bir şekilde absorbe edebilirler. Karbon nanotüp kompozitler, hafiflikleri ve mükemmel iletkenlikleri ile bilinmektedir. Bu sebeple birçok frekans bölgesinde tercih edilmektedir. Örneğin, Wan ve ark., (2020) 5 GHz frekans bölgesinde çalışmalar yürüterek, karbon-nano tüp ile yapılan film kaplamanın yeterli elektromanyetik ekranlama performansı gösterdiğini ve giyilebilir elektronik endüstri sektörü adına önemli sonuçlar elde edildiğini vurgulamışlardır. Ayrıca, karbon nano tüp kompozitlerin yüksek performanslı elektromanyetik parazit (EMI) koruyucu malzemelerin geliştirilmesinde de kullanılabileceği literatürde bahsedilen bir diğer husus olmuştur. Nitekim Poothanari ve ark., (2019) karbon nano tüpler de dahil olmak üzere çeşitli karbon nano yapıların kullanımını tartışmaktadır ve gelişmiş yeni teknikler ile yüksek ekranlama performanslarının elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Bir diğer çalışmada Zhang ve ark., (2019) elektromanyetik girişimin ekranlanması uygulamaları için karbon nano tüp tabanlı nanokompozitlerin önemini vurgulamakta ve belirli gereksinimleri karşılamak için özelliklerinin ayarlanabilirliğini tartışmaktadır. Kompozitlerin oluşturulma biçiminin ve kompoziti oluşturan malzemelerin değiştirilmesi ile farklı frekanslarda etkin kompozitlerin oluşturulabileceği söylenmiştir.

1.2.2. Karbon Fiber Kompozitler

Karbon fiber; yüksek mukavemet ve hafiflik kombinasyonu ile elektromanyetik ekranlama için kullanılmaktadır. Bu kompozitler genellikle elektromanyetik dalgaları iyi bir şekilde yansıtır ve saçar. Bu tip karbon fiber malzemelerle gerçekleştirilen pek çok çalışma bulunmaktadır. Wanasinghe ve ark., (2020) çalışmalarında 3,6 ve 12 mm boyutlarında karbon taneleri çimentoya farklı oranlarda (%0,1, %0,3, %0,5 ve %0,7) karıştırarak, her karışıma ilişkin elektriksel, mekaniksel ve ekranlamaya ilişkin ölçümler gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, karbon fiber eklenmesiyle, bükülme, elektriksel iletkenlik ve ekranlama özelliklerinde ciddi bir iyileşmenin olduğu yönündedir. Bir diğer çalışmada Zhang ve ark., (2013) karbon fiber takviyeli yeni bir köpük üreterek, geliştirilen bu yeni ürünün elektromanyetik ekranlama özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma 30-1200 MHz bandında gerçekleştirilmiştir. Hacimce %2'lik karbon fiber katkısının 25 dB'ye kadar daha iyi ekranlama performansı gösterdiği raporlanmıştır.

Literatürde karbon fiber katkılı malzemelerle ilgili yürütülen çalışmalar birçok frekans bölgesi için yürütülmüştür. Örneğin Khalid ve ark., (2017), 1 GHz'den 5 GHz'ye kadar olan bölgede yapılan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar yarı yankısız bir odada ve network analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak karbon fiber katkılı betonlar, katkısız eşleniklerine göre 50 dB'ye kadar daha iyi ekranlama özellikleri göstermiştir.

1.2.3. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler; metal matrisi içeren kompozitlerdir. Bu tür kompozitler, metallerin iletkenlik özelliklerini korurken, dielektrik malzemelerin elektromanyetik dalgaları yutma yeteneklerinden faydalanmaktadır (Mei ve ark., 2016). Farklı malzemelerin özelliklerinin bir araya getirilmesi ile ortaya çıkan bu birleşim yüksek performanslı elektromanyetik ekranlama sağlamaktadır. Ayrıca bu malzemeler yüksek çalışma sıcaklığı gerektiren durumlarda kullanmaya elverişlidir (Çelik, 2020).

Metal malzemeler pahalı olmanın yanı sıra, bu malzemelerle hazırlanan özellikle kutu formundaki yapıların bağlantı noktaları, elektromanyetik alan kaçakları için bir zayıflık oluşturmaktadır (Jia ve ark., 2020). Metal matris katkılı kompozitlerin hazırlanmasıyla bu dezavantajlar bertaraf edilerek, daha iyi korozyon dayanımı, daha düşük maliyet gibi avantajlar sağlanmaktadır (Zhang ve ark., 2020a; Zhao ve ark., 2020). Metalin iletkenlik ve fiziksel dayanım özellikleri ile katkı maddesinin özel özelliklerinin birleştirilmesi ile elde edilen bu kompozit malzemeler, sanayide ve endüstride pek çok alanda kullanım olanağı elde etmiştir. Örneğin Budumuru ve Anuradha (2021), bu malzemelerin havacılık alanındaki kullanımına yönelik bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışma 8-12 GHz frekans aralığında yürütülmüştür. Al_2O_3 ve SiC gibi katkılar sonucunda artan ekranlama performansı gözlemlenmiştir. Özellikle Al_2O_3 katkısı ile 93.48 dB'ye kadar ekranlama performansı ölçülmüştür. Bir diğer çalışmada ise nötron ve gama ışınlarına karşı ekranlama sağlamak üzere yeni bir tür metal matrisli kompozit koruyucu malzeme önerilmiştir (Zhou ve ark., 2022).

1.3. Ekranlamada Kullanılan Polimerler

Radyoaktif ve elektromanyetik elemanların kullanılmasının artmasıyla, bu anlamda bir kirlilik ve kontrol edilmesi gereken bir mesele ortaya çıkmıştır. Polimerler de esasen bu noktadaki problemlere çözüm olarak geliştirilmişlerdir. Nitekim polimerlerin, mekaniksel, termal, elektriksel ve çok fonksiyonlu özellikleri onları birçok alanda kullanılabilir kılmıştır. Elektromanyetik ekranlama uygulamaları da bu alanlardan birisidir. (Geesala ve ark., 2018)

Polimer malzemeler, elektromanyetik alanlara karşı direnç gösterme yetenekleri ve esnek yapıları sayesinde avantajlıdır. Bazı polimer malzeme türleri ve özellikleri sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

1.3.1. Elektriksel Polimerler

Elektriksel polimerler, yüksek dielektrik sabitlere sahiptirler ve elektromanyetik dalgaların yayılmasını etkili bir şekilde engellerler. Özellikle radyo frekans (RF) ve mikrodalga frekanslarında etkilidirler. Birçok elektriksel polimer tipinin güvenilir birer elektromanyetik gürültü önleyici olarak kullanılabileceği literatürde raporlanmıştır (Lyu ve ark., 2018).

1.3.2. Karbon Nanotüp Takviyeli Polimerler

Polimer hibritler; etkili bir yansıma/emilim kalkanı olarak kullanılacak yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olmalıdır. Bu özellik, polimer matrisine iletken dolgu maddeleri dahil edilerek kazandırılabilir. Karbon nanotüpler, polimer matrisine entegre edildiğinde mükemmel bir iletkenlik sağlayarak, iyi EMI koruma performansı sergilerler (Dassan ve ark., 2020). Bu tür kompozitler, elektromanyetik dalgaları yansıtmada yüksek performans gösterir. Küçük boyutları, geniş yüzey alanları ve kuantum tünel etkileri sebebiyle yüksek ekranlama özelliği gösterebilmektedir (He ve ark., 2014).

1.3.3. Ferrit Dolgulu Polimerler

Dar bant elektromanyetik dalga soğurucu sunan, ferrit-polimer kompozitlerin uygulama sahasını genişletmenin önündeki en büyük sınırlama, dielektrik geçirgenliğin ve manyetik geçirgenliğin oldukça farklı frekans dağılımına sahip olmasıdır. Bu durum malzemenin çalışma frekansı aralığını sınırlar. Bibikov ve Prokof'Ev (2011) çalışmalarında bahsedilen bu probleminin üstesinden gelmek için amorf alaşımlar kullanılarak yeni ince elektromanyetik dalga soğurucularının geliştirilmesini denemişlerdir.

1.3.4. Kaplama Polimerleri

Elektromanyetik dalgaların soğurulması edilmesi için yüzeylere uygulanan ince polimer kaplamalar, özellikle elektromanyetik radyasyon sızıntısını engelleme konusunda etkilidir.

1.3.5. Polimer Malzemelerin Uygulama Alanları

Elektromanyetik kalkanlama ve ekranlama uygulamalarında kullanılan polimer malzemeler, bir dizi uygulamada büyük öneme sahiptir. Bunlar arasında askeri teknolojiler gibi kritik alanlar, uzay ve havacılık endüstrisi, kablosuz iletişim ekipmanları, mikrodalga fırınlar, tıbbi cihazlar ve elektronik devreler bulunur. Polimerlerin hafifliği, esnekliği ve özelleştirilebilirliği, bu uygulamalarda kullanılmalarını ön plana çıkarmıştır. Ek olarak, metallerin yansıma egemen EMI korumasının aksine, polimer bazlı malzemeler, askeri teknoloji gibi birçok uygulamada giderek daha fazla tercih edilen elektromanyetik dalgaları öncelikle emilim yoluyla koruma yeteneği sergilemektedir (Kruželák ve ark., 2021). Güçlü soğurucu yetenekleri nedeniyle, bu malzemeler hem askeri teknoloji gibi kritik alanlarda kapsamlı uygulama alanları bulurken hem de elektromanyetik dalga yansımasının neden olduğu ikincil kirliliği önemli ölçüde azaltırlar (Wang ve ark., 2023).

1.4. Diğer Malzemeler

Elektromanyetik kalkanlamada kullanılan tüm malzemelerin bir makale içinde detaylı incelenmesi pratik olarak mümkün değildir. Nitekim gün geçtikçe teknoloji gelişmekte ve gelişen teknoloji ile üretilen malzemeler de çeşitlenmektedir. Ayrıca, ekranlama konusunda çalışan bilim dalları da çeşitlenmektedir. Böylesi geniş bir başlık altında incelenen birçok ürüne karşın hala değinilmeyen bazı malzemeler aşağıda belirtilmiştir.

Metalik kumaşlar, elektromanyetik ekranlama amacıyla yaygın olarak kullanılan etkili malzemelerdir. Bu kumaşlar, metalik tellerle dokunmuş veya örülmüş yapılar şeklinde ifade edilmekte ve genellikle elektriksel iletkenlik sağlayan malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Elektromanyetik ekranlama için metalik kumaşlar kullanılmasının ana nedeni, tıpkı diğer uygulamalarda olduğu gibi elektromanyetik alanların geçişini engelleyerek elektronik cihazları dış etkenlerden korumaktır (Dağ, 2010). Ancak giyilebilir teknoloji ile bu konuda yeni bir ihtiyaç oluşmuş ve teknolojinin insan bedenine zarar vermemesi gibi yeni bir amaç da ortaya çıkmıştır. Metalik kumaşlar, özellikle RF ve mikrodalga frekansları gibi yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların etkili bir şekilde soğurulmasını veya yansıtılmasını sağlamaktadır (Jia ve ark., 2019). Bu özellikleri sayesinde, metalik kumaşlar birçok endüstriyel ve askeri uygulamada kullanılmaktadır. Örneğin, elektronik ekipmanların elektromanyetik parazitlenmeden korunması, tıbbi cihazların elektromanyetik uyumluluğu sağlanması ve askeri iletişim sistemlerinin güvenliği gibi alanlarda metalik kumaşlar önemli bir rol oynamaktadır. Literatürde metalik kumaşların elektromanyetik ekranlama performansı üzerine birçok çalışma bulunmaktadır (Jagatheesan ve ark., 2015; Yin ve ark., 2022). Bu çalışmalarda, farklı metalik kumaşların yapıları, malzeme bileşenleri, dokuma desenleri ve işleme yöntemleri üzerinde durulmuş ve bu faktörlerin elektromanyetik kalkanlama etkinliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, metalik kumaşların frekans bağımlılığı, iletkenlik özellikleri ve dayanıklılığı gibi konular da araştırmacılar tarafından ele alınmıştır.

Ayrıca, seramik, plastik ve cam gibi dielektrik malzemeler, elektromanyetik dalgaların geçişine dirençli olan malzemelerdir (Jang ve ark., 2020; Kittur ve ark., 2020; Zachariah ve ark., 2022). Ancak, bu malzemelerin yüzeylerine metal kaplama uygulamak suretiyle elektromanyetik ekranlama performansında ciddi miktarda artış sağlanabilmektedir. Metal kaplama işlemi, yüzeylerin üzerine bir metal tabaka uygulamak suretiyle gerçekleştirilmektedir (Chung, 2000). Bu metal tabaka genellikle nikel, bakır veya gümüş gibi yüksek iletkenlik özelliklerine sahip metallerden oluşmaktadır. Metal kaplama işlemi, yüzeyin elektriksel iletkenliğini artırarak elektromanyetik dalgaların yüzeyden yansımalarını sağlamaktadır. Dielektrik malzemelerin metal kaplama ile elektromanyetik ekranlama sağlanması, özellikle elektronik cihazların iç kısımlarını dış etkenlerden korumak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Cep telefonları, bilgisayarlar, radar sistemleri ve mikrodalga fırınlar gibi cihazlarda, iç bileşenlerin elektromanyetik parazitlenmeden korunması için metal kaplama ile üretilmektedir. Metal kaplamalı dielektrik yüzeylerin elektromanyetik ekranlama performansı, kullanılan metal malzemenin iletkenlik özellikleri, kaplama kalınlığı ve yüzeyin geometrisi gibi parametrelere bağlıdır. Bu nedenle, metal kaplamalı dielektrik yüzeylerin elektromanyetik ekranlama etkinliğini optimize etmek için dikkatli bir tasarım ve işleme süreci gerekli olmaktadır.

Elektromanyetik ekranlamada kullanılan bir diğer malzeme tipi metamalzemelerdir (Mishra ve ark., 2021; Zhao ve ark., 2022). Geleneksel elektromanyetik ekranlama malzemeleri genellikle metalik yapılar veya dielektrik malzemelerden oluşmaktadır ve belirli frekans aralıklarında etkili olabilirler. Ancak, metamalzemeler adı verilen malzeme sınıfı, elektromanyetik ekranlama performansını daha da geliştirmek için umut verici bir yaklaşım sunmaktadır. Metamalzemeler, geleneksel malzemelerin

özelliklerini manipüle ederek elektromanyetik dalgaları istenen şekilde yönlendirebilen özel yapılar olarak tanımlanabilirler. Bu malzemeler, nano ölçekte yapılanmış yapılardan oluşmakta ve benzersiz elektromanyetik özellikler sergileyebilmektedir. Metamalzemeler, özellikle frekans seçici ve çok yönlü elektromanyetik ekranlama gerektiren uygulamalarda önemli bir potansiyele sahiptir. Metamalzemelerin elektromanyetik ekranlama performansı, yapılarının geometrisine, malzeme bileşenlerine ve tasarım parametrelerine bağlıdır ve ciddi bir ARGE sonucu üretilmektedir (Jia ve ark., 2020; Li ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2020b).

Elektromanyetik ekranlama için nikel, bakır veya gümüş gibi iletken malzemeler içeren doğrudan yüzeylere uygulanan boyalar da son yıllarda kullanılmaya başlanmıştır (Karadakov ve VanVeller, 2021; Pavlik ve Medved, 2021). Elektromanyetik dalgaların geçişini engellemek ve elektronik cihazları dış etkenlerden korumak için özellikle inşaat sektöründe kullanılan etkili bir çözümdür. Bu tür boyalar, genellikle bir polimer matris içinde iletken parçacıkların dağılmasıyla elde edilmekte ve yüzeye uygulandığında elektriksel iletkenlik sağlamasıyla da ekranlama özelliği göstermektedir. Bu boyalar rulo fırça veya püskürtme ile birçok yüzey tipine uygulanabilmektedir. Uygulama sürecinin basitliği ve birçok malzeme tipi ile olan adaptasyonu, ekranlama boya malzemelerini birçok yerde tercih edilmesine vesile olmuştur. Ayrıca esnek polimer matrislerle oluşturulması sebebiyle, çeşitli yüzeylere uygulama imkânı da boyalarla mümkün olabilmektedir Hafiflik gibi çok büyük bir avantajı bulunmaktadır. Radar sistemlerinin kurulduğu binalarda özellikle tercih edilmektedir (Parmar ve ark., 2019).

Görüldüğü üzere elektromanyetik ekranlamada kullanılan malzemeleri birkaç basit başlık altında incelemek ve irdelemek mümkün değildir. Ancak bu konudaki geniş literatür, araştırmacılara yol gösterecek niteliktedir. Yürütülen bu çalışma ile de bu anlamdaki bilgi birikimine katkı da bulunulmuştur.

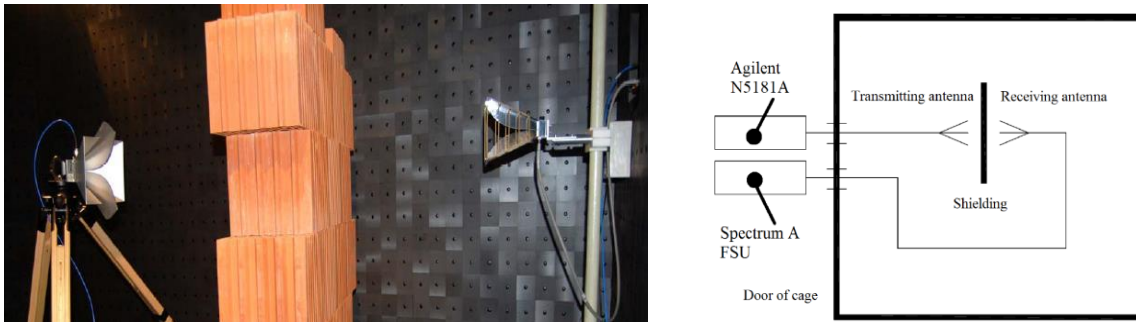
2. Elektromanyetik Ekranlama Ölçüm Yöntemleri

Elektromanyetik ekranlama özelliklerini ölçmek; malzemelerin performansını anlamak ve karşılaştırmak için kritik öneme sahiptir. Bu özellikler, elektromanyetik dalgaların malzeme üzerindeki etkisini değerlendirmede önemli bir ölçüttür. Ölçüm sonuçları, mühendislerin ve tasarımcıların daha iyi kalkanlama malzemeleri geliştirmelerine rehberlik etmektedir. Elektromanyetik kalkanlama/ekranlama özelliklerini ölçme yöntemlerine ilişkin birçok metot bulunmaktadır. Planar (Düzlemsel) malzemelerin ekranlama etkinliğini ölçmek için en yaygın olarak kullanılan standart ASTM D4935-18'dir (Amaro ve ark., 2023). Düzlemsel malzemelerin kenarlarında saçılan enerjiyi emerek kenar sonlandırma sorunlarını aşan bir yöntemdir. Ancak ekranlama ölçüm metotlarını bununla sınırlandırmak mümkün değildir. Çünkü problemin tipi, uygulanacağı saha ölçüm yöntemi üzerinde etkilidir (Karaman ve ark., 2016). Diğer ölçüm yöntemleri sırasıyla aşağıda açıklanmıştır:

2.1. Yansıma Kaybı Ölçümleri

Yansıma kaybı ölçüm yöntemi; elektromanyetik ekranlama etkinliğinin ölçümü için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, malzemenin yüzeyine düşen elektromanyetik dalgaların bir kısmı malzeme tarafından yansıtılır ve bir kısmı malzeme tarafından emilir. Yansıyan dalgaların gücü, malzemenin yüzeyindeki yansıma kaybına bağlıdır. Yansıma kaybı, malzemenin yüzeyindeki elektromanyetik dalgaların ne kadarının yansıtıldığını gösterir. Yansıma kaybının ölçümü, elektromanyetik uyumluluk tasarımının önemli bir bileşenidir ve malzemelerin elektromanyetik alanları ne kadar iyi engellediğini belirlemek için kullanılır. Malzemelerin ekranlama etkinliği frekansla değişebilir ve bu nedenle farklı frekans aralıklarında ölçülmelidir. Yansıma kaybının ölçümü için çeşitli yöntemler vardır. Planar malzemelerin ekranlama etkinliğini ölçmek için en yaygın olarak kullanılan standart yukarıda da izah edilen ASTM D4935-18'dir. Bir diğer yöntem ise yankı odasıdır. Yankı odası; elektromanyetik dalgaların rastgele yönlerde yansıtılmasıyla homojen bir alan oluşturur. Bu yöntemde, malzeme örneği odanın içine yerleştirilir ve örneğe farklı açılardan elektromanyetik dalgalar gönderilir. Yansıyan dalgaların gücü ölçülür ve bu değerler kullanarak yansıma kaybı hesaplanır (Doğan ve ark., 2014). Diğer bir yöntem ise tek modlu boşluk yöntemidir. Bu yöntemde, malzeme örneği tek modlu boşluğa yerleştirilir ve boşluğa gönderilen elektromanyetik dalgaların gücü ölçülür. Yansıyan dalgaların gücü hesaplanarak yansıma kaybı hesaplanır (Yetik ve Mehmetcan, 2021). Altı çizilmesi gereken bir diğer yöntem ise, mikrodalga bant geçiş yöntemidir. Bu yöntemde, malzeme örneği iki adet mikrodalga anten arasına yerleştirilir ve antenler arasındaki bant genişliği ölçülür. Malzemenin yüzeyindeki yansımanın gücü hesaplanarak yansıma kaybı hesaplanır (Dökmetaş, 2021).

Yansıma kaybı yöntemi literatürde pek çok çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmalardan birinde 1-9 GHz frekans bandında ölçümler yapılmıştır. 0,25 m kalınlığında ve 2x2 m yüzey alanına sahip bir tuğla duvar ölçüm nesnesi olarak kullanılmıştır. IEEE Standartlarına göre gerçekleştirilen ölçümlerde, elektromanyetik ekranlama muhafazalarının etkinliğini ölçme yöntemi (Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures) olarak bilinen yöntem uygulanmıştır. Ölçümler dış etkilerden kaçınmak amacıyla yansıma yapmayan bir odada gerçekleştirilmiştir. Özellikle iletişim bandındaki yansıma ölçümleri dikkat çekicidir. 1.8 GHz' de 6.93 dB, 2.1 GHz' de 6.3 dB ve 2.4 GHz' de - 7.3 dB ekranlama performansı elde edilmiştir. Ölçüm düzeneği Şekil 1' de sunulmuştur (Pavlik ve ark., 2015).



Şekil 1. Yansıma kaybı ölçümü. Örnek bir düzenek (Pavlik ve ark., 2015).

2.2. S-parametreleri Ölçümü

Elektromanyetik ekranlama için en sık kullanılan yöntemlerden bir tanesi de S-parametre ölçümüdür. S-parametreleri; elektromanyetik dalgaların bir malzeme tarafından nasıl yansıtıldığını ve iletildiğini analiz etmek için kullanılmaktadır. Yansıma kaybı ölçümleri, malzemenin elektromanyetik kalkanlama performansını anlamak, optimize etmek ve karşılaştırmak için temel bir araçtır. Araştırmacılar, bu ölçümleri kullanarak kalkanlama malzemelerini tasarlarırken, elektromanyetik uyumluluk (EMU) gereksinimlerini karşılamak için gelişmiş çözümler üretebilmektedirler.

Bir malzeme ve elektromanyetik alan karşılaştığında, yansıma, çoklu yansıma ve soğurma gibi temel davranışların genellikle farklı oranlarda sergilenmesi beklenir. Bazen soğurma fazla, bazen yansıma fazla olabilir. Burada gelen manyetik dalğanın frekansı kadar malzemenin özellikleri de belirleyici olabilmektedir. Bu sebeple bir malzeme ile bir elektromanyetik dalga karşılaştığında, yansıma, çoklu yansıma ve soğurma özellikleri ayrı ayrı ölçümlenir ve malzemenin ekranlama performansı toplam olarak ifade edilir. Desibel olarak ifade edilen ve SE (Shielding Effectiveness – Ekranlama Performansı) kısaltmasıyla matematiksel olarak da eşitlik 1’de sunulmuştur (Van Deventer ve ark., 1989; Yudidistra, 2019).

$$SE = \underbrace{20\log(|\eta_w|/4|\eta_s|)}_{SE_R} + \underbrace{20\log(e^{d/\delta})}_{SE_A} + \underbrace{20\log(1 - e^{-2d/\delta})}_{SE_{MR}} \quad (1)$$

SE_R malzemenin yansıma özelliklerini, SE_A malzemenin soğurma özelliklerini, SE_{MR} malzemenin çoklu yansıma özelliklerini ifade etmektedir. Bu katsayıları hesaplamak için de network analizör yardımıyla hesaplanan S parametrelerinden faydalanılmaktadır. 4 tane temel S parametresi bulunmaktadır. Bu parametreler Şekil 2’de sunulmaktadır:



Şekil 2. S Parametreleri

Şekil 2’de sunulan S parametreleri matrisi, yansıma katsayılarını ve iletim kazançlarını iki portlu bir ağın her iki tarafından belirlemek için kullanılabilir. Bu kavram daha sonra çoklu portlu bir ağın S parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Bu kavramlar, kazanç, geri dönüş kaybı, VSWR ve Insertion Loss (araya girme kaybı)’un belirlenmesinde kullanılabilir. S parametrelerinin dört türü vardır: S_{11} , S_{12} , S_{21} ve S_{22} . S_{11} , giriş portu gerilim yansıma katsayısıdır. S_{12} , ters gerilim kazancını ifade eder. S_{21} , ileri gerilim kazancını ifade eder. S_{22} ise çıkış portu gerilim yansıma katsayısıdır (Erdei ve ark., 2020). Network analizör yardımıyla ölçümlenen S parametreleri kullanılarak SE_R , SE_A ve SE_{MR} katsayıları hesaplanabilmektedir. Eşitlik 2 ve 3 ile S parametrelerinin nasıl hesaplandığı sunulmuştur.

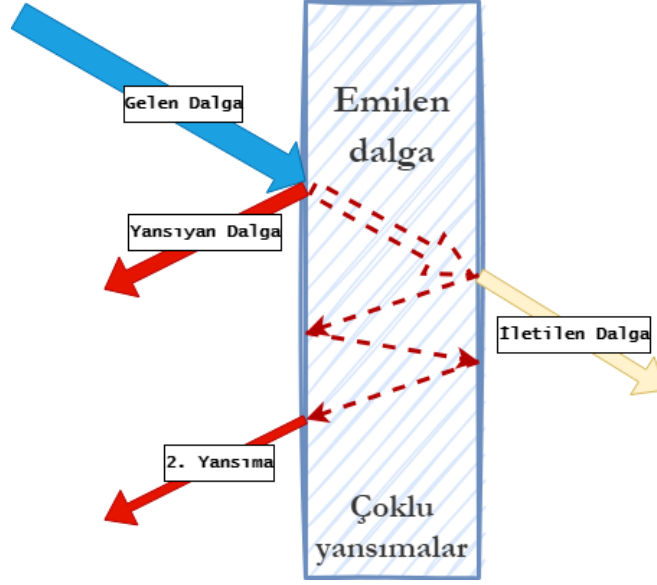
$$SE_R = -10\log(1 - |S_{11}|^2) \quad (2)$$

$$SE_A = -10\log\left(\frac{|S_{21}|^2}{1 - |S_{11}|^2}\right) \quad (3)$$

S parametrelerini tespit edebilmek için 1 adet network analizör ve dalga kılavuzlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Örnek bir S parametre ölçüm sistemi Şekil 3’ de sunulmuştur. Bu S parametre ölçüm sistemi ile de Şekil 4’ te ifade edilen gelen dalga, yansıyan dalga ve iletilen dalga arasındaki matematiksel ilişki hesaplanmaktadır.



Şekil 3. Örnek S parametre Ölçüm Sistemi



Şekil 4. Elektromanyetik dalga yüzey etkileşimi (Ekranlama Performansı) (Wu ve ark., 2014).

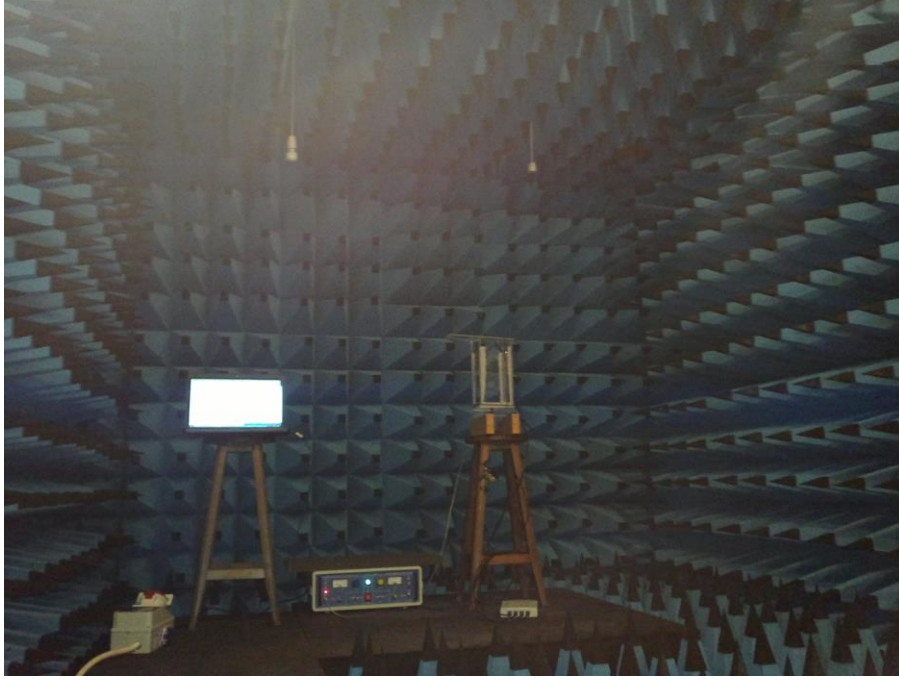
2.3. Yüzey Empedans Ölçümleri

Yüzey empedansı; bir malzemenin elektromanyetik alanlara karşı direncini ölçer. Bu, malzemenin yüzeyinin elektromanyetik dalgalarla nasıl etkileştiğini belirler. Yüzey empedansı, genellikle yüzey empedans analizörleri kullanılarak ölçülür (Warembra ve Betaubun, 2018). Yüzey empedansı, bir malzemenin elektromanyetik alanlara karşı direncini veya empedansını tanımlayan bir ölçümdür. Bu empedans, malzemenin yüzeyindeki elektriksel ve manyetik alanlara karşı tepkisini ifade eder. Yüzey empedansı, genellikle ohm cinsinden ifade edilir ve malzemenin elektromanyetik alanlara karşı ne kadar etkili bir şekilde direnç gösterdiğini yansıtır. Elektromanyetik ekranlama malzemelerinin yüzey empedansı ölçümleri, malzemenin elektromanyetik performansını anlamak ve optimize etmek için kullanılır. Zhao ve ark., (2015) yaptıkları çalışmada, karbon nanofiber yapraklar karbon nano tüplerle geliştirilmiştir. Çalışmada yüzey empedans ölçümleri gerçekleştirilerek malzeme karakterizasyonu yapılmıştır.

2.4. Elektromanyetik Yankısız Oda Testleri

EMU testleri; tam ölçekli elektromanyetik ekranlama performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bu tür testler, Şekil 5’ de iki ayrı örneği sunulduğu üzere, tam yankısız ve yarı yankısız odalarda veya laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Yarı yankısız odaların tabanında, elektromanyetik sönümleyici konik köpüklerden bulunmaz, bunun yerine epoksi kaplanmış yalıtımlı malzemeler tercih edilirken, tam yankısız odaların tüm iç yüzeylerinde farklı geometrilerde konik elektromanyetik sönümleyiciler bulunmaktadır. Elektromanyetik sönümleyiciler, oda içinde bir elektromanyetik alan karmaşasını önlemek üzere özel olarak belirlenen geometrilerde üretilmektedir. EMI odası testleri, bir dizi uygulama için kullanılmaktadır ve elektromanyetik kalkanlama

malzemelerinin performansını değerlendirmek için de sıklıkla başvurulan ölçüm alanlarıdır. Aşağıda bazı yaygın EMI testleri ve uygulamaları verilmiştir:



Şekil 5. Örnek EMI Test Odası (Tam yankısız oda)

EMU Testleri; EMI odaları, elektronik ürünlerin EMU gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını değerlendirmek için kullanılır. Bu testler, ürünlerin elektromanyetik gürültüyü engelleme yeteneklerini belirlemek için yapılır.

Elektromanyetik Karşıt Testler; EMI odaları, elektromanyetik karşıt (TEMPEST) testlerini gerçekleştirmek için kullanılır. Bu testler, elektronik cihazların elektromanyetik sızıntılarını ve gürültülerini sınırlamak için yapılır. Kalkan Malzeme Performans Testleri; EMI odaları, elektromanyetik kalkanlama malzemelerinin performansını ölçmek için kullanılır. Bu testler, malzemelerin yüzey empedansı, yansıma kaybı ve geçirgenlik gibi özelliklerini değerlendirir. Anten Testleri; Elektromanyetik kalkanlama ile ilgili araştırmalarda, antenlerin performansı da incelenir. EMI odaları, anten testlerinin kontrollü bir ortamda gerçekleştirilmesine olanak tanır. EMI odası testleri, elektromanyetik kalkanlama malzemelerinin tasarımını ve performansını geliştirmek için kritik bir araçtır. Araştırmacılar, bu testler aracılığıyla malzemelerin elektromanyetik uyumluluk gereksinimlerini karşılayacak şekilde optimize edilmesini sağlar.

2.5. Maliyet ve Erişilebilirlik

Elektromanyetik ekranlama uygulamalarında kullanılan malzemeler makalenin önceki bölümlerinde tanıtılmıştır. Ancak bu malzemelerin maliyetleri ve erişilebilirlikleri ile ilgili de bilgi sunulması gerekmektedir. Çünkü olası bir tasarım durumunda, hangi malzemelere nasıl bir bütçe ayrılacağı önemli bir parametre olmaktadır. Bununla birlikte, ilgili malzemeye erişim imkanları da değerlendirilmelidir.

Bu bağlamda uygulama gereksinimleri ve performans beklentilerine göre değişiklik gösteren malzeme seçimleri için maliyet ve erişilebilirlik perspektifinin ortaya konulması önemlidir.

Metallerin elektromanyetik ekranlama tasarımlarında sıklıkla tercih edildiği vurgulanmıştır. Özellikle bakır, alüminyum, krom gibi metaller, endüstrisinin birçok alanında sık kullanılan malzemeler olması sebebiyle kolaylıkla bulunabilmektedir ve bu gruptaki malzemeler genellikle düşük maliyetlidir. Ancak, bazı yüksek performanslı metallerin, özellikle gümüş ve titanyum gibi özel alaşımların maliyeti yüksek olabilir (Wanasinghe ve Aslani, 2019; Kittur ve ark., 2020). Nitekim bu yüksek maliyet sebebiyle, askeri, tıbbi ya da haberleşmeye yönelik uygulamalarda tercih edilmektedir. Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin birleşimiyle oluşturulması sebebiyle maliyet kontrollü ürünler geliştirilmesine imkân tanımaktadır (Bozkurt ve ark., 2022). Bu yönüyle ciddi avantajlar sunmaktadır. Genellikle ucuz bir taban malzemesini iletken başka bir malzeme ile destekleyerek, ekranlama performansı yüksek ürün geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ancak bunun aksi de mümkün olabilmektedir. Örneğin, karbon fiber kompozitler, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gibi avantajlar sunarken, maliyetleri genellikle yüksektir ve işlenmeleri daha zordur. Bir diğer ürün grubu olan seramikler, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnç ve düşük dielektrik kaybı gibi özellikler sunmaktadır ve bu sebeple özel uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak bazı seramik malzemeler, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda etkili bir şekilde çalışabilirken, diğerlerinin maliyetleri ve işlenebilirlikleri konusunda zorluklar olabilir. Diğer ürün grubu olarak makale kapsamında bahsedilen polimerler genellikle düşük maliyetli, hafif ve esnek malzemelerdir. Elektriksel yalıtım ve kimyasal süreçlere olan dayanıklılıkları özel uygulamalarda polimerleri tercih sebebi kılmıştır. Son olarak, meta malzemeleri değerlendirmek gerekirse, geleneksel malzemelerin özelliklerini manipüle ederek benzersiz elektromanyetik özellikler elde etmek için tasarlanan bu gruptaki malzemeler karmaşık üretim süreçleri gerektirmesi sebebiyle yüksek maliyetlidir ve ARGE sonucu oluşması yönüyle de erişilebilirliği de düşük denilebilir. Sonuç olarak, elektromanyetik ekranlama uygulamalarında kullanılan malzemelerin seçimi, performans, maliyet ve işlenebilirlik gibi birçok faktörü dikkate almayı gerektirir. Her bir malzemenin avantajları ve dezavantajları, spesifik uygulama gereksinimleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir (Zachariah ve ark., 2022).

3. Sonuç

Elektronik cihazlar arasındaki elektromanyetik etkileşimleri engelleyerek ve dış elektromanyetik girişimleri azaltarak cihazların düzgün bir şekilde çalışmasını sağlayan elektromanyetik ekranlama veya kalkanlama, günümüzün hızla gelişen teknolojik ortamında büyük bir öneme sahiptir. Bu öneme dikkat çekmek için hazırlanan bu makalede, literatürdeki güncel çalışmalar incelenerek, ekranlamada kullanılan malzemeler, elektromanyetik alanların malzemelerle etkileşimi, elektromanyetik alanların malzemeler üzerindeki etkileri, malzemelerin elektromanyetik ekranlama özellikleri konularına değinilmiştir. Bu etkileşimlerin derinlemesine anlaşılması, daha iyi ekranlayıcı malzemelerinin tasarımı ve geliştirilmesi için temel bir gerekliliktir. Elektromanyetik kalkanlama ve ekranlama özelliklerini

değerlendirmek için EMU testleri ve elektromanyetik girişim ölçümleri gibi bir dizi yöntem ve standart geliştirilmiştir. Bu testler, malzemelerin elektromanyetik performansını değerlendirmek ve tasarımlarını optimize etmek için kullanılan kritik araçlardır.

Ayrıca, bu makalede elektromanyetik alanların yüzey empedansı, yansıma kaybı ve geçirgenlik gibi önemli özelliklerini ölçmek için kullanılan yöntemlere de yer verilmiştir. Bu ölçümler, kalkanlama malzemelerinin elektromanyetik performansını anlamak ve iyileştirmek için hayati öneme sahiptir. Sonuç olarak, elektromanyetik kalkanlama ve ekranlama, modern elektronik sistemlerin güvenilirliği ve elektromanyetik uyumluluğu için kritik bir rol oynar. Bu alandaki araştırmaların, gelecekteki daha karmaşık ve yüksek frekansta çalışan cihazların gereksinimlerini karşılayacak yeni malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlayacağına inanıyoruz. Elektromanyetik kalkanlama ve ekranlama konusundaki çalışmaların devam etmesi, güvenilir ve elektromanyetik uyumlu teknolojilerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Göz önünde bulundurulması gereken birçok karmaşık faktör olmasına rağmen, elektromanyetik kalkanlama ve ekranlama alanındaki araştırmaların gelecekte daha fazla ilerleme kaydetmesini bekliyoruz. Bu ilerlemeler, modern teknolojinin elektromanyetik uyumluluk ve güvenilirlik, sağlık ve çevresel etkilerin azaltılması, yasal ve endüstri standartlarına uygunluk gibi gereksinimlerin karşılanmasına yardımcı olacaktır.

Çıkar Çatışma Beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemişlerdir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- Amaro A., Suarez A., Torres J., Martinez P.A., Herraiz R., Alcarria A., Benedito A., Ruiz R., Galvez P., Penades A. Shielding effectiveness measurement method for planar nanomaterial samples based on CNT materials up to 18 GHz. *Magnetochemistry* 2023; 9(5): 114.
- Bachir G., Abdechafik H., Mecheri K. Comparison electromagnetic shielding effectiveness between single layer and multilayer shields. 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC) 2016; 1-5.
- Balan I., Morari C., Patroi AE. Composite materials for electromagnetic shielding. *UPB Scientific Bulletin, Series B* 2016; 78(2): 233-238.
- Barsukov V., Senyk I., Kryukova O., Butenko O. Composite carbon-polymer materials for electromagnetic radiation shielding. *Materials Today: Proceedings* 2018; 5(8): 15909-15914.
- Bibikov S., Prokof'Ev M. Composite materials for some radiophysics applications. In *Metal, Ceramic and Polymeric Composites for Various Uses* 2011; IntechOpen.

- Bozkurt M., Şahin N., Karabul Y., Kılıç M., Özdemir, ZG. Radiation shielding performances of Na₂SiO₃ based low-cost micro and nano composites for diagnostic imaging. *Progress in Nuclear Energy* 2022; 143: 104058.
- Budumuru S., Anuradha MS. Electromagnetic shielding and mechanical properties of al6061 metal matrix composite at x-band for oblique incidence. *Advanced Composites and Hybrid Materials* 2021; 4: 1113-1121.
- Bulut F., Efendođlu HS., Solak V., Yabulođlu M., Özer H. Electromagnetic shielding behavior of different metallic wire-meshes and thin metal plate. 2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Türkiye) 2017; 1-3.
- Chang J., Zhai H., Hu Z., Li J. Ultra-thin metal composites for electromagnetic interference shielding. *Composites Part B: Engineering* 2022; 110269.
- Chen X., Liu L., Liu J., Pan F. Microstructure, electromagnetic shielding effectiveness and mechanical properties of Mg–Zn–Y–Zr alloys. *Materials ve Design (1980-2015)*; 65: 360-369.
- Chung DDL. Materials for electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Engineering and performance* 2000; 9: 350-354.
- Çelik ME. Karbon kompozit çarpışma kutularında metal takviyesinin çarpışma performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi. Bursa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bursa, Türkiye, 2020.
- Dağ N. İletken tekstil yüzeylerinde elektromanyetik kalkanlama özelliğinin araştırılması. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Denizli, Türkiye, 2010.
- Dassan EGB., Anjang Ab Rahman A., Abidin MSZ., Akil HM. Carbon nanotube–reinforced polymer composite for electromagnetic interference application: A review. *Nanotechnology Reviews* 2020; 9(1): 768-788.
- Chang J., Zhai H., Hu Z., Li J. Ultra-thin metal composites for electromagnetic interference shielding. *Composites Part B: Engineering* 2022; 110269.
- Doğan AK., Celep M., Sefa O. Sar ölçümlerinde kullanılmak üzere dipol anten yapımı ve karakterizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2014; 20(8): 310-313.
- Dökmetaş B. S-bant mikroşerit wilkonson güç bölücü tasarımı. *Journal of Scientific Reports-B* 2021; 004: 8-18.
- Egbo MK. A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 2021; 33(8): 557-568.
- Geesala S., Pukkala SK., Gottapu AN. Modeling & simulation analysis for evaluation of electromagnetic sheilding effectiveness of conductive fabrics using flanged co-axial transmission line holder as per ASTM D4935-10 standard.15th International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC) 2018; 1-4.
- Hamouni M., Ansri A., Khaldi S. Reflection and absorption contribution to the multilayers electromagnetic shielding effectiveness. *Plast. Polym. Technol* 2014; 3: 19-25.

- Hariyawan MY., Darwis RS., Posma SN. Pengaruh ketebalan material terhadap shielding effectiveness pada frekuensi rendah. *Jurnal Elektro dan Mesin Terapan* 2021; 7(2): 18-24.
- He Q., Yuan T., Yan X., Luo Z., Haldolaarachchige N., Young DP., Wei S., Guo Z. One-pot synthesis of size-and morphology-controlled 1-D iron oxide nanochains with manipulated magnetic properties. *Chemical Communications* 2014; 50(2): 201-203.
- Inudo S., Miyake M., Hirato T. Electrical properties of Cu I films prepared by spin coating. *Physica Status Solidi (a)* 2013; 210(11): 2395-2398.
- Jagatheesan K., Ramasamy A., Das A., Basu A. Fabrics and their composites for electromagnetic shielding applications. *Textile Progress* 2015; 47(2): 87-161.
- Jagatheesan K., Ramasamy A., Das A., Basu A. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon/stainless steel/polypropylene hybrid yarn-based knitted fabrics and their composites. *The Journal of the Textile Institute* 2018; 109(11): 1445-1457.
- Jang JM., Lee HS., Singh JK. Electromagnetic shielding performance of different metallic coatings deposited by arc thermal spray process. *Materials* 2020; 13(24): 5776.
- Jha BK. Effects of electromagnetic fields on human beings and electronic devices. *Himalayan Physics* 2012; 3: 38-39.
- Jia LC., Ding KQ., Ma RJ., Wang HL., Sun WJ., Yan DX., Li B., Li ZM. Highly conductive and machine-washable textiles for efficient electromagnetic interference shielding. *Advanced Materials Technologies* 2019; 4(2): 1800503.
- Jia Z., Zhang M., Liu B., Wang F., Wei G., Su Z. Graphene foams for electromagnetic interference shielding: a review. *ACS Applied Nano Materials* 2020; 3(7): 6140-6155.
- Karadakov PB., VanVeller B. Magnetic shielding paints an accurate and easy-to-visualize portrait of aromaticity. *Chemical Communications* 2021; 57(75): 9504-9513.
- Karaman ÖF., Çeven EK., Dırık AE. Metal iplikli dokuma kumaşlarının elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin mobil cihazlar ile tespiti. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2016; 21(2): 85-94.
- Kaya Aİ., Çifci A. Bakır folyo kaplı yönlendirilmiş yonga levhanın elektromanyetik girişimi soğurma etkinliği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2018; 9(1): 279-284.
- Khalid T., Albasha L., Qaddoumi N., Yehia S. Feasibility study of using electrically conductive concrete for electromagnetic shielding applications as a substitute for carbon-laced polyurethane absorbers in anechoic chambers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2017; 65(5): 2428-2435.
- Kittur J., Desai B., Chaudhari R., Loharkar PK. A comparative study of EMI shielding effectiveness of metals, metal coatings and carbon-based materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020; 810(1): 12019.
- Kruželák J., Kvasničáková A., Hložeková K., Hudec I. Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding. *Nanoscale Advances* 2021; 3(1): 123-172.

- Li L., Dong S., Dong X., Yu X., Han B. Electromagnetic wave shielding/absorption performances of cementitious composites incorporating carbon nanotube metamaterial with helical chirality. *Journal of Composite Materials* 2020; 54(25): 3857-3870.
- Li P., Shan Y., Deng J., Xijiang Y. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon-nanotubes based coatings. 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2010; 969-972.
- Los P., Lukomska A., Jeziorska R. Metal-polymer composites for electromagnetic interference shielding applications. *Polimery* 2016; 61(10): 663-669.
- Luo J., Huo L., Wang L., Huang X., Li J., Guo Z., Gao Q., Hu M., Xue H., Gao J. Superhydrophobic and multi-responsive fabric composite with excellent electro-photo-thermal effect and electromagnetic interference shielding performance. *Chemical Engineering Journal* 2020; 391: 123537.
- Lyu L., Liu J., Liu H., Liu C., Lu Y., Sun K., Fan R., Wang N., Lu N., Guo Z., Wujcik EK. An overview of electrically conductive polymer nanocomposites toward electromagnetic interference shielding. *Engineered Science* 2018; 2(59): 26-42.
- Markus I., Ohayon E., Constantini K., Geva-Kleinberger K., Ibrahim R., Ruban A., Gene Y. The effect of extremely low-frequency electromagnetic fields on inflammation and performance-related indices in trained athletes: A double-blinded crossover study. *International Journal of Molecular Sciences* 2023; 24(17): 13463.
- Mei H., Han D., Xiao S., Ji T., Tang J., Cheng L. Improvement of the electromagnetic shielding properties of C/SiC composites by electrophoretic deposition of carbon nanotube on carbon fibers. *Carbon* 2016; 109: 149-153.
- Mishra RK., Gupta RD., Datar S. Metamaterial microwave absorber (MMA) for electromagnetic interference (EMI) shielding in X-band. *Plasmonics* 2021; 16(6): 2061-2071.
- Ozturk M., Chung DDL. Enhancing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon-fiber reinforced cement paste by coating the carbon fiber with nickel. *Journal of Building Engineering* 2021a; 41: 102757.
- Ozturk M., Chung DDL. Radio-wave shielding behavior of steel structures. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 2021b; 35(11): 1407-1419.
- Parmar S., Ray B., Date K., Datar S. Modified graphene as a conducting ink for electromagnetic interference shielding. *Journal of Physics D: Applied Physics* 2019; 52(37): 375302.
- Paul CR., Scully RC., Steffka MA. Introduction to electromagnetic compatibility. John Wiley ve Sons 2022.
- Pavlik M., Kolcunova I., Lukáš L. Measuring the shielding effectiveness and reflection of electromagnetic field of building material. 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) 2015; 56-59.

- Pavlik M., Medved D. Measuring shielding effectiveness of electromagnetic field for degradation shielding paint. *Przeglad Elektrotechniczny* 2021; 97(12).
- Poothanari MA., Pottathara YB., Thomas S. Carbon nanostructures for electromagnetic shielding applications. *Industrial Applications of Nanomaterials* 2019; 205-223.
- Schuermann D., Mevissen M. Manmade electromagnetic fields and oxidative stress-biological effects and consequences for health. *International Journal of Molecular Sciences* 2021; 22(7): 3772.
- Singh R., Singh S., Singh G., Thind KS. Gamma radiation shielding properties of steel and iron slags. *New Journal of Glass and Ceramics* 2017; 7(01): 1.
- Smith DR., Pendry JB. Homogenization of metamaterials by field averaging. *JOSA B* 2006; 23(3): 391-403.
- Testov OA., Komlev AE., Gareev KG., Khmel'nikskiy IK., Luchinin VV., Sevost'yanov EN., Testov IO. Providing a specified level of electromagnetic shielding with nickel thin films formed by DC magnetron sputtering. *Coatings* 2021; 11(12): 1455.
- Tian K., Hu D., Wei Q., Fu Q., Deng H. Recent progress on multifunctional electromagnetic interference shielding polymer composites. *Journal of Materials Science & Technology* 2023; 134: 106-131.
- Van Deventer TE., Katehi PB., Cangellaris AC. High frequency conductor and dielectric losses in shielded microstrip. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* 1989; 919-922.
- Wan YJ., Wang XY., Li XM., Liao SY., Lin ZQ., Hu YG., Zhao T., Zeng XL., Li CH., Yu SH., Zhu PL., Sun R., Wong CP. Ultrathin densified carbon nanotube film with "metal-like" conductivity, superior mechanical strength, and ultrahigh electromagnetic interference shielding effectiveness. *ACS Nano* 2020; 14(10): 14134-14145.
- Wanasinghe D., Aslani, F. A review on recent advancement of electromagnetic interference shielding novel metallic materials and processes. *Composites Part B: Engineering* 2019; 176: 107207.
- Wanasinghe D., Aslani F., Ma G. Electromagnetic shielding properties of carbon fibre reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials* 2020; 260: 120439.
- Wang Y., Zhao W., Tan L., Li Y., Qin L., Li, S. Review of polymer-based composites for electromagnetic shielding application. *Molecules* 2023; 28(15): 5628.
- Waremra RS., Betaubun P. Analysis of electrical properties using the four point probe method. *E3S Web of Conferences* 2018; 73: 13019.
- Wu F., Xu Z., Wang Y., Wang M. Electromagnetic interference shielding properties of solid-state polymerization conducting polymer. *Rsc Advances* 2014; 4(73): 38797-38803.
- Xu Z., Hao H. Electromagnetic interference shielding effectiveness of aluminum foams with different porosity. *Journal of Alloys and Compounds* 2014; 617: 207-213.
- Yang QQ., Qian WX., Liu JY., Chen M., Li H., Zhang Y. Electromagnetic shielding effect of aluminum foam in 10~ 500 kV electrical substations. *Materials Science Forum* 2017; 898: 2378-2383.
- Yetik AK., Mehmetcan A. Toprak nem içeriğinin izlenmesi ve tayininde kullanılan yöntemler. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2021; 8(1): 484-496.

- Yılmaz R. Elektromanyetik kalkanlama özelliği olan malzemeler. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)* 2014; 4(1): 136-150.
- Yin J., Ma W., Gao Z., Lei X., Jia C. A review of electromagnetic shielding fabric, wave-absorbing fabric and wave-transparent fabric. *Polymers* 2022; 14(3): 377.
- Yu F., Jia P., Song L., Hu Y., Wang B., Wu R. Multifunctional fabrics based on copper sulfide with excellent electromagnetic interference shielding performance for medical electronics and physical therapy. *Chemical Engineering Journal* 2023; 472: 145091.
- Yudistira HT. Tailoring multiple reflections by using graphene as background for tunable terahertz metamaterial absorber. *Materials Research Express* 2019; 6(7): 75804.
- Zachariah S. M., Grohens Y., Kalarikkal N., Thomas S. Hybrid materials for electromagnetic shielding: A review. *Polymer Composites* 2022; 43(5): 2507-2544.
- Zhang L., Wang LB., See KY., Ma J. Effect of carbon nanofiber reinforcement on electromagnetic interference shielding effectiveness of syntactic foam. *Journal of Materials Science* 2013; 48: 7757-7763.
- Zhang S., Nguyen N., Park JG., Hao A., Liang R. Carbon nanotubes and their assemblies: Applications in electromagnetic interference shielding. *Nanotube Superfiber Materials* 2019; 335-357.
- Zhang X., Zhao N., He C. The superior mechanical and physical properties of nanocarbon reinforced bulk composites achieved by architecture design—a review. *Progress in Materials Science* 2020a; 113: 100672.
- Zhang Y., Dong H., Mou N., Chen L., Li R., Zhang L. High-performance broadband electromagnetic interference shielding optical window based on a metamaterial absorber. *Optics Express* 2020b; 28(18): 26836-26849.
- Zhao J., Zhang J., Wang L., Li J., Feng T., Fan J., Chen L., Gu J. Superior wave-absorbing performances of silicone rubber composites via introducing covalently bonded SnO₂@ MWCNT absorbent with encapsulation structure. *Composites Communications* 2020; 22: 100486.
- Zhao Y., Hao L., Zhang X., Tan S., Li H., Zheng J., Ji G. A novel strategy in electromagnetic wave absorbing and shielding materials design: multi-responsive field effect. *Small Science* 2022; 2(2): 2100077.
- Zhao Z., Zhou Y., Zhang C., Wang Z. Thermoset composites functionalized with carbon nanofiber sheets for EMI shielding. *Journal of Applied Polymer Science* 2015; 132(17).
- Zhou J., Zeng Q., Xiong Y., Xu J., Zhang F., Wang D., Zheng J. Research on the shielding performance and optimization of new type foam metal matrix composite shielding materials. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 2022; 516: 31-37.