



Elektromanyetik Dalga Kalkanlaması Üzerine Bir Derleme Çalışması

Buse ÖZKEN^{1*} , Mehmet Barış TABAKCIOĞLU¹ 

¹Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

Anahtar Kelimeler:

Elektromanyetik
kalkanlama,
Ekranlama,
Elektromanyetik
Uyumluluk,
Elektromanyetik
girişim

Özet

Elektromanyetik kalkanlama son zamanlarda en çok çalışılan konulardan birisi haline gelmiştir. Hassas elektronik cihazların elektromanyetik girişimden korunması ve elektromanyetik dalgaların zararlı etkisinden canlıların bilhassa insanların kurtulması için elektromanyetik dalga kalkanlaması çok önemlidir. Temelde kalkanlamada yansıma, soğurma ve çoklu yansıma başta olmak üzere 3 mekanizma vardır. Literatürde bu mekanizmaları temel alan birçok malzeme geliştirilmiştir. Genellikle literatürde; beton, ahşap, alçı levha, grafit, grafit çimento, çelik fiber çimento, EPS dolgululu çimento esaslı kompozit, ferrit tozu, kauçuk ferrit, iletken polipropil film, spinel ferrit, karbon siyahı çimento esaslı kompozit, metalik talaş, BFS içeren köpüklü beton, seramik kompozit, polimer, polimer kompozit, çimento esaslı malzeme, nikel, Ca-Si levha, sunta, pota fırını cürufu (LFS), yüksek fırın cürufu (BFS), tuğla, fosfor malzemeleri, pirinç, SS304 paslanmaz çelikten lifler ve nanopartiküller gibi malzemeler çalışılmıştır. Elektromanyetik kalkanlama verimliliğini ölçmek için ise, Multi-Channel-Coupling, Vektör ağ analizörü (VNA), dalga kılavuzu modeli ve Field generator-spektrum analizör çifti kullanılmıştır.

*e-posta: ozkenbuse.eem@gmail.com

Bu makaleye atıf yapmak için:

Buse ÖZKEN; Mehmet Barış TABAKCIOĞLU, "Elektromanyetik Dalga Kalkanlaması Üzerine Bir Derleme Çalışması", Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, C. 7, s 1, ss. 57-65

How to cite this article:

Buse ÖZKEN; Mehmet Barış TABAKCIOĞLU, "A Review Study on Electromagnetic Wave Shielding", Bayburt University Journal of Science, vol. 7, no 1, pp. 57-65

A Review Study on Electromagnetic Wave Shielding

Keywords:

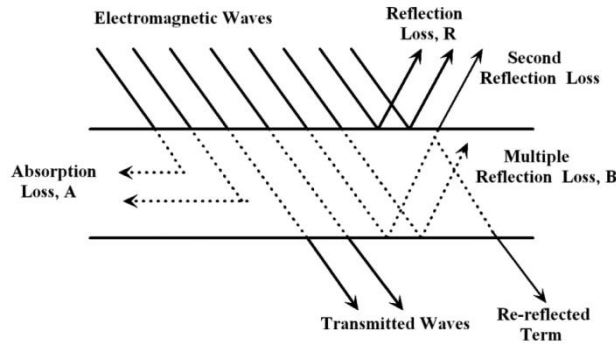
Electromagnetic shielding, Screening, Electromagnetic compatibility, Electromagnetic Interference

Abstract

Electromagnetic shielding has become one of the most studied topics recently. Electromagnetic wave shielding is very important to protect sensitive electronic devices from electromagnetic interference and to protect living beings, especially humans, from the harmful effects of electromagnetic waves. Basically, there are three mechanisms in shielding: reflection, absorption and multiple reflections. Many materials based on these mechanisms have been developed in the literature. Generally in the literature; concrete, wood, plasterboard, graphite, graphite cement, steel fiber cement, EPS filled cement-based composite, ferrite powder, rubber ferrite, conductive polypropyl film, spinel ferrite, carbon black cement-based composite, metallic sawdust, foamed concrete containing BFS, ceramics materials such as composite, polymer, polymer composite, cement-based material, nickel, Ca-Si plate, chipboard, ladle furnace slag (LFS), blast furnace slag (BFS), brick, phosphor materials, brass, SS304 stainless steel fibers and nanoparticles has been studied. To measure the electromagnetic shielding effectiveness, Multi-Channel-Coupling, Vector network analyzer (VNA), waveguide model and Field generator-spectrum analyzer pair are used.

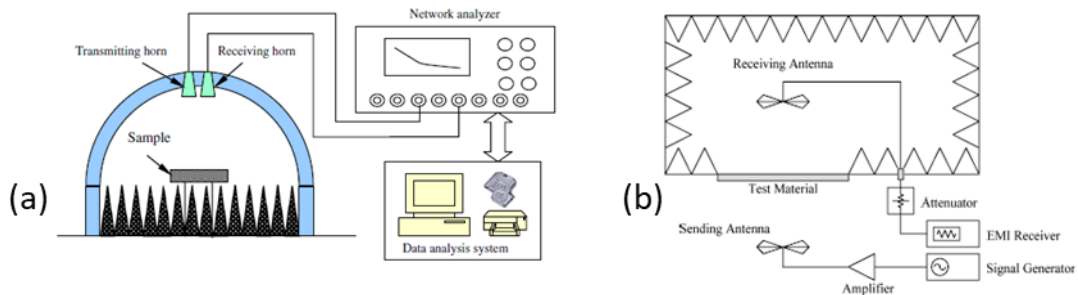
1 GİRİŞ

Elektromanyetik kirlilik gün geçtikçe etkisini artırmaktadır. Bu kirlilik canlıların sağlığına ve elektronik cihazların düzgün çalışmasına zarar vermektedir. Bu bağlamda elektromanyetik dalga kalkanlanması çok büyük bir öneme sahiptir. Elektromanyetik dalga kalkanlamasında Şekil 1'de gösterilen 3 mekanizma kullanılmaktadır.



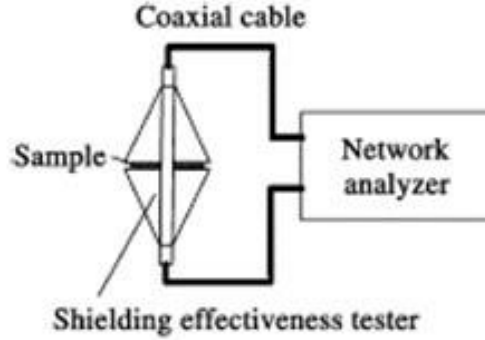
Şekil 1. Elektromanyetik kalkanlama mekanizmaları [1, 2]

Şekil 1'de görüldüğü üzere yansıma, soğurma ve çoklu yansıma kalkanlama mekanizmaları arasındadır. Çoklu yansıma mekanizması için çok katmanlı, yansıma için iletkenliği yüksek malzeme üretimi yapmak gerekmektedir. Üretilen malzemelerin elektromanyetik kalkanlama verimliliğini ölçmek için kullanılan yöntemlerden biri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Sinyal Jeneratörü-Spektrum analizör ölçümü [3, 4]

Şekil 2'den de görülebileceği üzere iki durum söz konusudur. Soldaki durumda sinyal jeneratörü ve spektrum analizörü aynı tarafta olup numuneden yansıyan dalga ölçülmektedir. Bunun aksine sağdaki durumda bu iki anten farklı taraflarda olup numuneyi aşan dalga ölçülmektedir. Diğer bir kalkanlama verimi ölçüm yönteminde Şekil 3'te görüldüğü üzere vektör network analizör kullanılmaktadır.



Şekil 3. Vektör network analizör ölçümü [5]

Şekil 3'ten görüldüğü üzere koaksiyel kablo yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde üretilen malzeme bir adaptör içerisine yerleştirilir ve ölçümler yapılır. Gelecek kısımda elektromanyetik dalga kalkanlamasında kullanılan malzemeler hakkında yapılan yayınlar için detaylı bir derleme verilecektir.

2 MATERYAL VE METOT

Bu kısımda literatürde elektromanyetik kalkanlama ile yapılan bir kısım çalışmalar özetlenecektir. Ferrit tozu ile kauçuktan elde edilen numunenin elektromanyetik soğuruculuğu incelenmiş ve kayıplı dielektrik malzemeye göre 7.5 GHz altındaki frekanslarda daha üstün olduğu görülmüştür [6]. Başka bir çalışmada metalik mahfazalardaki açıklıklardan yayılan emisyon problemi teorik ve deneysel olarak incelenmiş, açıklıktaki teğetsel elektrik alanı iki yöntemle değerlendirilmiştir [7]. Diğer bir çalışmada, Hexagonal (Y-Z tipi) ve spinel (NiZn ferrit ve NiZnCo) ferrit mikrodalga emicilerin kompleks geçirgenliği 200 MHz - 6 GHz aralığında ölçümü yapılmış [8]. Bir diğer çalışmada ise termoplastiklerin Tg'nin üzerindeki viskozitesinin, sıkıştırılarak kalıplanmasıyla elde edilen termoplastik kompozitlerin oda sıcaklığındaki elektriksel özelliklerini büyük ölçüde etkilendiği, buna karşın mekanik özelliklerin etkilenmediği görülmüş. Nikel parçacıklarından oluşan dolgu maddesi, poliimide siloksan ve polieter sülfon içine, ve farklı kompozitlerin kalıplama sıcaklıklarında elektriksel direncin azaldığı, elektromanyetik girişim koruma etkinliğinin arttığı tespit edilmiş [9].

1994'te yapılan bir çalışmada yarıklı metal bariyerlere çarpan düzlem dalgaların simülasyonlarına dayalı olarak koruma etkinliği için ampirik formüller türetmesi amaçlanmıştır. Bir yarık açıklığına sahip bir metal bariyere çarpan bir birim düzlem dalganın TLM simülasyonu, bir yarım dalga dipolünününe benzediğini göstermektedir [10]. Başka bir çalışmada, 300-2000MHZ aralığında galvanostatik olarak sentezlenen iletken polipirol filmlerin elektromanyetik kalkanlama etkinliği araştırılmıştır. Mikrodalga iletimi, yansıma, soğurma, koruma etkinliği, katkı maddesi konsantrasyonu, iletkenlik, sıcaklık ve frekansın fonksiyonu olmak üzere araştırılmış, yüksek katkılı numunelerin mikrodalga bölgesinde oldukça yansıtıcı olduğu gözlemlenmiştir [11].

1997'de yapılan bir çalışmada tipik duvarların, zeminin, tavanın, pencerenin ve bölmelerin yansıma ve iletim katsayıları 57.5 GHz'de ölçülmüş ve bu ölçülen yansıma özellikleri çok katmanlı dielektrik modeller tarafından tahmin edilen yansıma özellikleriyle karşılaştırılmış ve genel eğilimi, ölçümlerin eğilimi ile oldukça iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [12]. Diğer bir çalışmada yapının iç kısımlarının karmaşık yapılara sahip olsa bile dairesel polarizasyon kullanımının yansımayı azaltabileceği görülmüştür. Bunun yanı sıra verici anten ve alıcı anten aynı yönelimle dairesel olarak polarize edildiğinde, ters polarizasyonlu yansıyan dalga etkili bir şekilde azaltıldığı görülmüştür [13].

1998'de yapılan bir çalışmada, açıklığı olan dikdörtgen bir mahfazanın koruma etkinliği için analitik bir formülasyon geliştirilmiş ve hem manyetik hem de elektriksel koruma, frekansın, mahfaza boyutlarının, açıklık boyutlarının ve mahfaza içindeki konumun bir fonksiyonu olarak hesaplanabildiği gözlemlenmiştir. Böylece bir duvarda bir veya daha fazla açıklığa sahip dikdörtgen bir mahfazanın hem düşük frekanslarda hem de rezonansa elektrik ve manyetik koruma etkinliğini tahmin edilebilmektedir [14]. Diğer bir çalışmada, mikrodalga işleme tekniğine genel bir bakış atılmış olup işlemde enerji elektromanyetik alan ile doğrudan malzemeye sağlandığı görülmüştür [15]. Bir diğer çalışmada, 100-6000 MHz frekans aralığında betonarme bir duvar için hesaplanan

yansıma ve iletim katsayıları gösterilmektedir. Sonuçlara bakıldığında betonarme yapıların, çubuk kafesinden çok daha büyük dalga boylarına sahip sinyalleri ciddi şekilde zayıflattığını göstermiştir [16].

2000'de yapılan bir çalışmada BT radyo ağı performansı incelenmiş. Kapasite gerektiren bir veri trafiği modeli için, 10 m x 20 m boyutunda tek bir odada ortalama olarak 100 eşzamanlı oturumun neden olduğu girişimin, toplam üretimde yalnızca %5'lik bir bozulmayla sonuçlandığı gözlemlenmiştir [17]. Başka bir çalışmada ise elektromanyetik nüfuz etme ve eşleşme problemlerine yeni bir hibrit MoM ve FDTD yaklaşım sunmaktadır [18].

2002' de yapılan çalışmada 15m x25m'lik apartmanda en az -70 dBm' lik alıcı hassasiyeti için kaç tane vericiye ihtiyaç olduğuna bakılmış ve sonrasında 433 MHz radyo dalga yayılması ile karşılaştırılmıştır. Vericiler 0.80 m yüksekliğe konulmuş. Bluetooth bağlantısı için BER %0.1 ile en az -70dBm olması gerekmektedir. Çok yönlü 0 dBm - 1mW verici kullanılmıştır [19]. Diğer bir çalışmada amacı WLAN vericisinin Bluetooth trafiğine ne kadar uzak ve hangi düzeyde müdahale edeceği ve bir diğer açıdan bluetooth cihazları arası mesafenin aktarım hızına etkisi incelenmiş. Kısa mesafelerde WLAN'dan kaçınılması gerektiği, genel performans için Bluetooth ve WLAN vericilerinin ayrılmasının verici ve alıcı arası mesafenin daha önemli olduğu görülmüş ve en büyük performans düşüşünün her iki sistem aynı görev için aynı anda çalıştığına olduğu tespit edilmiştir [20]. Diğer bir çalışmada, farklı duvar türlerinin 433 MHz, 868 MHz, 2.4 GHz ve 5.0 GHz' de elektromanyetik dalgaların zayıflamasını nasıl etkilediği incelenmiş. Beton ($\epsilon_r:4$, $\sigma:0.05$ S/m), Ahşap ($\epsilon_r:4.2$, $\sigma:1.0*10^{-5}$ S/m), Alçı levha ($\epsilon_r:2.3$, $\sigma:0.03$ S/m) kullanılmıştır. Ahşapta sinyal yansımasının düşük iletkenlikten ötürü yalnızca kullanılan frekansa bağlı olduğu görülmüştür. Beton ve alçı levhada hem frekans hem de duvar kalınlığı sinyalin zayıflamasını etkilemektedir. 0.15 m ve 0.20 m kalınlıktaki betonda duvar başına ortalama sinyal zayıflaması 10-15 dB ölçülmüştür. Alçı levhada da benzer etkiler görülmüş ama beton kadar etkili olmadığı tespit edilmiştir [21].

2003'te yapılan bir çalışmada, ortalama 0.8 mm boyutundaki grafit parçacıklarından oluşan su bazlı kolloidin koruma etkinliğini artırmak için etkili bir katkı maddesi olduğu belirlenmiştir. Farklı boyut ve materyaller üzerindeki etkisine bakılmıştır. Çimento katkı maddesi halinde iken ekranlama etkinliğini 4dB'den 22 dB'ye artırdığı, yansıma üzerinden zayıflamayı ise 5 dB'den 4 dB'ye düşürdüğü gözlemlenmiştir. Kaplama formunda da 14 dB'lik bir koruma etkinliği göstermiştir [5]. Diğer bir çalışmada dört yapı malzemesinin genlik ve faz bilgilerini içeren iletim katsayısı, her iki polarize dalga için 3.1 ila 10.6 GHz frekans bandında ölçülmüştür. Tam yansısız bir odaya bir boş uzay ölçüm sistemi kurulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde iki polarizasyon arasındaki iletim katsayısındaki değişimin %10.3 olduğu görülmüştür. Ayrıca iletim katsayılarının frekans değişikçe rastgele dalgalandığı, 3.1 GHz ila 10.6 GHz frekans bandında, ölçülen iletim katsayılarının büyüklüğü alçı levha için 0.894 ila 0.992, Ca-Si levha için 0.728 ila 0.870, sunta için 0.754 ila 0.935 aralığında değiştiği gözlemlenmiştir [22]. Diğer bir çalışmada, 8µm çaplı, 6mm uzunluğunda hacimce %0.72 paslanmaz çelik elyaf içeren çimento hamurunun 1.5 GHz'de 70 dB'lik elektromanyetik koruma sağladığı gözlemlenmiş. Karşılaştırma için katı paslanmaz çelik parçası ele alınmış olup koruma etkinliği aynı frekansta 78 dB'dir. Bunun sonucunda ekranlama etkinliği elyaf hacim oranına bağlı olduğu, kum veya çelik inşaat demirlerinden etkilenmediği gözlemlenmiştir [23].

2005'de yapılan çalışmada çimento bazlı elektromanyetik koruyucu ve emici yapı malzemeleri incelenmiştir. Elektromanyetik radyasyonları azaltmak için EMI koruma ve soğurma özelliklerine sahip çimento matris malzemeleri geliştirilmiştir [24]. Diğer bir çalışmada, dış aydınlatma altında açıklıklara sahip dikdörtgen iletken muhafazaların ekranlama etkinliğini tahmin etmek için frekans alanındaki sonlu fark (FD) yöntemini ve momentler yöntemini (MoM) birleştiren hibrit bir teknik önerilmiştir. Diğer geometrilere sahip muhafazaların, dielektriklerle yüklenen metalik boşluğun, keyfi şekilli açıklıklar yoluyla PCB'lerin koruma etkinliğini değerlendirmek için kolayca genişletilebileceğini göstermiştir [25]. Başka diğer bir çalışmada, EPS dolgulu çimento esaslı kompozitlerin elektromanyetik özellikleri incelenmiştir. Frekans aralığı 8-18 GHz olarak belirlenmiş olup EPS boncuk dolgunun düz çimento malzemesinin yansıma kaybını büyük oranda iyileştirebildiği, numune kalınlığının yansıma kaybını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir [26].

2006'da yapılan bir çalışmada, dış aydınlatma altında açıklıklara sahip iletken muhafazaların ekranlama etkinliğinin (SE) hesaplanması için basit bir metodoloji önerilmiştir. Buna göre muhafazanın dış ve iç bölgeleri, Bethe'nin küçük açıklık birleştirme teorisinin sınır koşulları kullanılarak ayrı ayrı analiz edilmiş, muhafazaların elektrik ve manyetik ekranlama etkinliği sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak ayrıştırılmıştır. Çalışma sonucunda dış ortamın simüle etme ihtiyacı ortadan kaldırılmış ancak muhafazayı ve içeriğini sonlu elemanlar elektromanyetik çözücüyle tamamen modelleyebildiği görülmüştür [27]. Diğer bir çalışmada merkezi olmayan açıklıklara sahip dikdörtgen bir muhafazanın koruma etkinliği için analitik bir formülasyon geliştirilmiştir. Mevcut analitik formülasyon, TE10'dan daha yüksek modları içerecek şekilde genişletilmiştir. Böylece elektrik koruma, frekansın, muhafaza boyutlarının, açıklık boyutlarının ve muhafaza içindeki konumun bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Gigahertz Enine Elektromanyetik (GTEM) hücrelerinde gerçekleştirilen ölçümler, teorik değerlerle iyi bir uyum

göstermektedir [28]. Yapılan diğer bir çalışmada ATO destekli STTW sistemlerin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Ordu Araştırma Laboratuvarı tarafından gerçekleştirilen modelleme ve simülasyonlardan öğrenilen dersler ve sonuçlar aracılığıyla, farklı uzaklık mesafelerindeki ve duvar tiplerindeki duvarların arkasını algılamayla ilgili tasarım zorlukları ve sorunları tartışılmıştır [29].

2009'da yapılan bir çalışmada, seramik kompozit çeşitleri (geleneksel, ileri, özel vb.), sıra polimer, polimer kompozitler için sinterleme adlı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem birleştirme; erime; elyaf çekme; seramiklerin reaksiyon sentezi; seramik tozu, fosfor malzemeleri, kıllar, mikrotüpler ve nanotüplerin sentezi; çinko oksit varistörlerin sinterlenmesi; Kaplama yüzeyinin parlatılması ve kaplama geliştirilmesi mikrodalga ısıtma kullanılarak gerçekleştirilmiştir [1]. Yapılan başka bir çalışmada karbon siyahı çimento esaslı kompozitlerin elektromanyetik dalga emici özellikleri, elektriksel direnci, basınç dayanımı incelenmiş, CBC eğrilerinin konsantrasyonuna karşı CBCC'nin direncinin süzülme fenomeninin tipik özelliklerine sahip olduğu görülmüştür. CBCC içeriği arttıkça basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. 8-26.5 GHz aralığında absorbe etmede iyi performans sergilediği gözlemlenmiş ve karbon siyahının doldurulması çimento malzemesinin dielektrik sabitini ve kayıp faktörünü önemli ölçüde iyileştirmiştir [3]. Diğer bir çalışmada mükemmel iletken düzlemsel bir kalkandaki kaplanmış bir açıklığın manyetik korumasının sayısal tahminine odaklanılmıştır. Herhangi bir şekil ve boyuttaki ince film kaplı açıklıkları analiz etmek için etkili sayısal ve devre yöntemleri önerilmiş, içlerinde dik manyetik alan yönleri için ve eşdeğer açıklık endüktansının hesaplanmasına yönelik orijinal bir yaklaşımla burada ilk kez önerildiği belirtilen devre yöntemi, alanın eşit olduğu varsayılarak çok karmaşık konfigürasyonları analiz etmek için kullanılmaya bile son derece hızlı ve doğru olduğu gözlemlenmiştir [30].

2011'de yapılan çalışmada duvarın kalkanlama etkinliği araştırılmış. 10x10 cm'lik bir metal ızgara yapılı duvar örneği için Schelkunoff modeli ile hesaplamalar yapılmış, 3 boyutlu MoM simülasyonu kullanılmıştır. 30 MHz-1 GHz frekans aralığı için alan dağılımının boşluk rezonansından güçlü bir şekilde etkilendiği ancak emiciler tarafından bu rezonans etkilerinin azalabileceği görülmüştür [31]. Diğer bir çalışmada, gözenekli malzemelerle doldurulmuş çimento esaslı kompozitlerin elektromanyetik dalga emme özellikleri incelenmiştir. Gözenekli boncukların dolgu oranının artmasıyla yansıma kayıplarının belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiş, gözenekli boncukların simetrik geometrilerinin dalga emilimine oldukça faydalı olduğu görülmüştür [32]. Yapılan diğer bir çalışmada, yeni tür tektronik iletim hatlarının alt katmanının en önemli parametresi olan dielektrik geçirgenliğin ölçüm yöntemleri açıklanmaktadır. Yüksek frekanslı sinyallerin geçirgenliğini ölçmek için rezonans yöntemi tercih edilmiştir. Diğer yüksek doğruluklu, standartlaştırılmış yöntem ise paralel plaka yöntemidir. Bu yöntemlerin en büyük dezavantajı ölçüm frekans aralığının dar olmasıdır. Bu dezavantajın yöntem kullanımlarını önemli ölçüde sınırlandırdığı gözlemlenmiş ve ön ölçümlerde pamuklu kumaşın en yüksek dielektrik sabiti ve kaybı değerleri ile karakterize edildiği saptanmıştır [33].

2013'te yapılan çalışmada, Robinson'un analitik formülasyonu, eksen dışı bir açıklığa sahip eksen dışı gözlem noktalarındaki bir koruma mahfazasının koruma etkinliğini hesaplamak için genişletilmiştir. Daha sonra genişletilmiş analitik formülasyonu doğrulamak için iletim hattı matris yöntemi (TLM) kullanılmıştır. Hesaplanan sonuçlar arasındaki iyi uyum, genişletilmiş analitik formülasyonun eksen dışı açıklığa sahip farklı gözlem noktalarında bir mahfazanın ekranlama etkinliğini tahmin etmede etkili olduğunu göstermiştir [34]. Başka bir çalışmada, koruyucu mahfazaların etkinliğini artırmak için yapı malzemeleri önerilmektedir. Alınan sonuçlardan yıllık betonun, bir yıldan daha eski beton ve diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında iyi bir koruma performansı sağladığı görülmüştür [35]. Diğer bir çalışmada ise, bağıl geçirgenlik, TEM temel moduyla koaksiyel hatta ölçülmüştür. Ölçüm ekipmanı, bir vektör ağ analizörü ve büyütülmüş tutucu ve kalibrasyon kitine sahip bir koaksiyel hat içermektedir. En yüksek geçirgenlik değerleri betonda gözlenmiş olup, bu yapı malzemesi için gerçek kısım 5-8 arasında, sanal kısım ise 0.4-0.65 arasındadır. En düşük değer ise hücresel betonda ölçülmüştür [36].

2014'te yapılan bir çalışmada, bina yapılarında kullanılan malzemelerin zayıflamasının belirlenmesine yönelik araştırma metodolojisi ve ölçüm konumu anlatılmıştır. Kullanılan malzemeler EM alanına taban tabana zıt reaksiyon özelliklerine sahip olup, metal, cam, plastik gibi malzemeler hava koşullarının değişmesi durumunda oldukça sağlam parametrelere sahipken, beton, tuğla, sıva veya alçıdan yapılmış duvarlar özellikle ortamın nem değişimlerine karşı çok hassas olduğu sonucuna varılmıştır [37]. Başka bir çalışmada, elektromanyetik (EM) dalgaların kullanılmasıyla, kumaşların nem içeriğinin belirlenmesi ve su girişi durumunun deneysel olarak değerlendirilmiştir. 6-12 GHz frekans aralığında çalışılmış olup her nesnenin, GUI aracılığıyla yakalanan, tanımlanan ve görüntülenen mikrodalga enerjisini emen ve yansıtan farklı dielektrik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [38]. Başka bir çalışmada koruyucu yapıların geçici analizi için basit, hızlı ve etkili bir TD-MFIE'ye dayalı teknik tanımlanmıştır. Yüzey eşdeğerlik ilkesine başvurularak, orijinal problem iki bağımsız daha basit eşdeğer probleme indirgenmiştir [39].

2014'te yapılan bir çalışmada koruma etkinliği değerlendirmesinde duvar boyutunun etkisini telafi etmek için geliştirilen geleneksel MoM yönteminde, dikdörtgen bir mahfazanın ekranlama etkinliği (SE) amaçlandığında, gelen dalganın sonsuz bir duvardan yansıdığı varsayılmaktadır. Bu varsayım, özellikle duvar boyutunun aydınlatma dalga boyuna göre büyük olmadığı düşük frekanslarda sonuçların hatalı olmasına neden olmaktadır. Söz konusu yansıyan dalga, herhangi bir açıklık bulunmayan bir kutudan gelen yansıma dikkate alınarak düzeltilmektedir. Kutudan yansıyan dalgayı elde etmek için metalik yüzey üzerinde indüklenen bir elektrik akımı olduğu varsayılmaktadır. Rao Wilton Glisson temel fonksiyonları ve boş uzay Green fonksiyonu kullanılarak bilinmeyen elektrik akımları ve dolayısıyla yansıyan dalga hesaplanmaktadır. Karşılaştırılan sonuçlar arasında çok iyi bir uyum gözlemlenmiştir ve daha düşük frekanslar için önerilen yöntemin, özellikle çok geniş açıklığa sahip bir mahfaza için modal MoM'nin kendisinden daha fazla doğruluğa sahip olduğu göstermiştir [40]. Diğer bir çalışmada manyetik vektör potansiyelinin analitik çözümünü elde etmek için Fourier dönüşümü ve mod eşleştirme tekniği kullanılmıştır. Ferrit levha ile kaplanmış iletken bir plaka üzerindeki bir yarığın yarı statik manyetik alan koruma özelliği, Fourier dönüşümü ve mod eşleştirme tekniği kullanılarak incelenmiştir. Bunun sonucunda ekranlanan bölgeye yerleştirilen ferrit levhanın en iyi ekranlama performansını sağladığı gözlemlenmiştir [41]. Diğer bir çalışmada bina duvarlarından kaynaklanan elektromanyetik (EM) dalga zayıflaması, 700 MHz–5 GHz frekans aralığına odaklanılarak araştırılmıştır. Ölçümler, iki hafif Vivaldi antenine bağlanan taşınabilir bir vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak elde edilmiş, EM bina duvarı zayıflamasının ölçümleri farklı bina topolojilerinde gerçekleştirilmiştir. EM koruma etkinliği (SE) ölçümleri 80 dB'den daha yüksek değerler olduğu gözlemlenmiş [42].

2015'te yapılan çalışmada Avrupa radyo frekansı alanlarındaki elektromanyetik alan etkisi 10MHz ile 6GHz aralığında incelenmiştir. AB'de noktasal veya uzun vadeli RF EMF ölçüm sonuçlarına bakıldığında 0.08 V/m ile 1.8 V/m arasında değer tespit edilmiştir. Radyo ve televizyon yayın kulelerinin sinyallerinden kaynaklanan popülasyon sebeplerinin çoğunun zayıf olduğu gözlemlenmiştir [43]. Diğer bir çalışmada, delikli metalik mahfazaların manyetik koruma etkinlikleri incelenmiş olup, analitik formülasyonda uzun ince açıklıkların aynı alandaki yuvarlak ya da kare açıklıklardan daha kötü olduğunu göstermiştir. Teoride bir yuvarkın uzunluğunu iki katına çıkarmanın manyetik koruma etkinliğini yaklaşık 12 dB azalttığını, genişliği iki katına çıkarmanın ise yalnızca manyetik koruma etkinliğini yaklaşık 2 dB azalttığını öngörülmüştür [44]. Yapılan diğer bir çalışmada, atık metal talaşların elektromanyetik koruma, dalga soğurma aktiviteleri ve malzemenin elektriksel özellikleri açısından bileşen olarak kullanılmasına odaklanılmıştır. Çimentolu kompozit üretiminde farklı alanlardan sağlanan hacimlerde doğal kum değiştirilmiş ve bu malzemenin elektromanyetik yetenekleri incelenmiştir [45].

2017'de yapılan bir çalışmada, yapı malzemesi olarak BFS içeren köpüklü betonun iletimi dikkate alınarak yeni bir formül uygulanmıştır. Uygulanan modelleme ile hesaplanan geçirgenlik ile gerçek arasındaki farkın %0.2 ila %2.6 arasında değiştiği, iki değerinde yaklaşık olarak aynı olduğu saptanmıştır. Gözenekli malzemeler için ise mevcut dielektrik modelleme formülü değiştirilmiş, köpük ve BFS' in içeriğine göre geçirgenliğini ve kayıp tanjantını tahmin etmeye yönelik modelleme formülü önerilmiştir [46]. Başka bir çalışmada, çevre kirliliğini azaltmak ve ekonomik olarak bina duvarlarında uygulamak amacıyla üretilen köpük betonun malzeme bileşimine göre elektromanyetik perdeleme özellikleri araştırılmıştır. Hafiflik, ısı yalıtımı ve ses yalıtımı gibi gelişmiş işlevlere sahip köpüklü beton üretimi için pota fırını cürufu (LFS), alçıtaşı ve yüksek fırın cürufu (BFS) gibi endüstriyel yan ürünler eklenmiştir. Gerçekte üretilen köpüklü betonun elektromanyetik koruma özelliklerini ölçmek için boş alan ölçümü kullanılmıştır [47]. Başka bir çalışmada, çimentolu kompozit üretiminde farklı endüstriyel alanlardan sağlanan hacimlerde doğal kum değiştirilmiş ve bu malzemelerin elektromanyetik kalkanlama, soğurma yetenekleri ve dielektrik sabitleri incelenmiştir. Sonuç olarak, referans numune yaklaşık 7 dB ekranlama verimliliğine sahip olmasına rağmen, demir talaşlı numune (%60 oranda) iyi ekranlama malzemesi özellik değeri olarak bilinen 18 dB ekranlama verimliliğine sahip olduğu görülmüştür. Atıkların pratik ve ekonomik bir şekilde bertaraf edilmesi ve daha iyi elektromanyetik SE ve dalga soğurma fonksiyonlarının elde edilmesi için çimento esaslı yapı malzemelerinde katkı maddesi olarak metalik talaşların kullanılması önerilmiştir [48].

2022'de yapılan bir çalışmada morfoloji, kimyasal, faz bileşimi ölçümleri yapılmıştır. Koruma etkinliğini doğrulamak için polimer-demir kompozitleri kullanılmıştır. Elektriksel direnç, darbe dayanım, manyetik özelliklerine bakılmış ve sonrasında mekanik termal analiz ve çekme testleri yapılmıştır. HDPE polimer ile birleştirildiğinde ekolojiye destek sağlayan boya veya alüminyum gibi iletken katmanlarla kaplı ekranlara ve plastik maddelere bir alternatif bir malzeme elde edilmiştir [49]. Başka bir çalışmada, Hematitli karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin elektromanyetik kalkanlama etkinliği 700 MHz-6 GHz arasında incelenmiştir. Yüksek frekanslara çıkıldıkça kalkanlama verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir [50].

2023' te yapılan bir çalışmada, metal mahfazanın elektromanyetik etkinliği (SE) araştırılmış, mahfazaların açıklığının EMI sızıntısının elektronik devreleri etkilemesine izin vererek SE'yi zayıflattığı gözlemlenmiştir.

Mahfaza boyutları sabit kalırken açıklık konumunun SE üzerindeki etkisi araştırılmış ve SE'nin açıklık konumlarına bağlı olarak değiştiği ve açıklık ön panel köşelerine yaklaştıkça iyileştiği tespit edilmiştir [51]. Başka bir çalışmada, %5, %10 ve %15 oranda katkılı hematit ve götüt katkılı karbon fiber kompozit plakalar üretilmiş ve kalkanlama verimliliği gözlemlenmiştir. % 10 katkılı götüt diğerlerine göre daha fazla kalkanlama verimliliği sağlamıştır [52].

3 SONUÇLAR

Elektromanyetik dalgaların zararlı etkilerinden korunmak için son zamanlarda çok fazla malzeme geliştirilmesi çalışılmaktadır. Hassas elektronik cihazların ve canlıların bu dalgalardan korunması için kalkanlama çok önemlidir. Elektromanyetik dalga kalkanlaması yansıma, soğurma ve çoklu yansımayla sağlanmaktadır. Bu bağlamda çok fazla malzeme geliştirilmiştir. Yansıma mekanizmasının çalışması için malzemenin iletkenliğinin artırılması yoluna gidilmiştir. Soğurma mekanizmasında malzemenin kalınlığını ve manyetik geçirgenliği artırma çözümü ileri sürülmüştür. Çoklu yansıma mekanizmasında ise çok katmanlı numuneler üretilip katmanlar arası yansıma artırılması öngörülmektedir. Son zamanlarda partikül takviyeli karbon fiber esaslı, çok katmanlı numuneler üretilmeye başlanmıştır. Çalışmalarda, kalkanlama verimliliğinin ölçülmesinde Vektör ağ analizörü (VNA) ve sinyal jeneratörü-spektrum analizör çifti kullanılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 222M403 proje numarası altında desteklenmiştir.

Yazar Katkıları

Buse ÖZKEN: Literatür Taranması, Okuma ve Yazım

Mehmet Barış TABAKCIOĞLU: Metodoloji, Değerlendirme & Düzenleme, Süpervizyon, Proje yönetimi

Yazarlar makalenin son halini okuyup onaylamışlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynakça

- [1] S. Das, A. K. Mukhopadhyay, S. Datta, D. Basu, "Prospects of microwave processing: An overview. Bulletin of materials science", 32, 1-13, 2009.
- [2] S. Tzeng, F.-Y. Chang, Mater. Sci. Eng., 302, 258, A 2001.
- [3] Y. Dai, M. Sun, C. Liu, Z. Li, "Electromagnetic wave absorbing characteristics of carbon black cement-based composites." Cement and Concrete Composites, 32(7), 508-513, 2010.
- [4] V. Shukla, "Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients". Nanoscale Advances, 1, 1640-1671, 2019
- [5] J. Cao, D. D. L. Chung, "Colloidal graphite as an admixture in cement and as a coating on cement for electromagnetic interference shielding." Cement and Concrete Research 33.11: 1737-1740, 2003.
- [6] Y. Naito, K. Suetake, "Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 19(1), 65-72, 1971.
- [7] G. Cerri, R. Deleo, V.M. Primiani, "Theoretical and experimental evaluation of the electromagnetic radiation from apertures in shielded enclosure.", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 34(4), 423-432, 1971.
- [8] J. Y. Shin, J. H. Oh, "The microwave absorbing phenomena of ferrite microwave absorbers.", IEEE Transactions on Magnetism, 29(6), 3437-3439, 1993.
- [9] L. Li, D. D. L. Chung, "Effect of viscosity on the electrical properties of conducting thermoplastic composites made by compression molding of a powder mixture.", Polymer Composites, 14(6), 467-472, 1993.
- [10] C.H. Kraft, "Modeling leakage through finite apertures with TLM." Proceedings of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility; 22-26 August 1994, pp. 73-76, Chicago, IL, USA.
- [11] A. Kaynak, "Electromagnetic shielding effectiveness of galvanostatically synthesized conducting polypyrrole films in the 300–2000 MHz frequency range.", Materials Research Bulletin, 31(7), 845-860,

- (1996).
- [12] K. Sato, T. Manabe, T. Ihara, H. Saito, S. Ito, T. Tanaka, T. Kimura, "Measurements of reflection and transmission characteristics of interior structures of office building in the 60-GHz band.", *IEEE transactions on antennas and propagation*, 45(12), 1783-1792, (1997).
 - [13] K. Sato, T. Manabe, T. Ihara, H. Saito, S. Ito, T. Tanaka, T. Kimura, "Measurements of reflection and transmission characteristics of interior structures of office building in the 60-GHz band.", *IEEE transactions on antennas and propagation*, 45(12), 1783-1792, (1997).
 - [14] M.P. Robinson, T.M. Benson, C. Christopoulos, J.F. Dawson, M.D. Ganley, A.C. Marvin, S.J. Porter, D.W.P. Thomas, "Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*; 40(3): 240- 248, 1998.
 - [15] E. T. Thostenson, T. W. Chou, "Microwave processing: fundamentals and applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 30(9), 1055-1071.
 - [16] R. Dalke, C. L. Holloway, P. McKenna, "Reflection and transmission properties of reinforced concrete walls.", In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1999 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No. 99CH37010) (Vol. 3, pp. 1502-1505), (1999, July).*
 - [17] S. Zurbes, W. Stahl, K. Matheus, J. Haartsen, "Radio network performance of Bluetooth.", In *2000 IEEE International Conference on Communications. ICC 2000. Global Convergence Through Communications. Conference Record (Vol. 3, pp. 1563-1567), (2000, June).*
 - [18] G. Cerri, S. Chiarandini, P. Russo, A. Schiavoni, "Electromagnetic coupling between arbitrarily bent wires and scatters analysed by a hybrid MoMTD/FDTD approach." *IEE Proceedings – Microwave, Antennas and Propagation* 2000; 147(4): 261-266.
 - [19] P. Ali-Rantala, L. Sydanheimo, M. Keskilammi, M. Kivikoski, "Indoor propagation comparison between 2.45 GHz and 433 MHz transmissions.", In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (IEEE Cat. No. 02CH37313) (Vol. 1, pp. 240-243, (2002, June).*
 - [20] O. Karjalainen, S. Rantala, M. Kivikoski, "The performance of Bluetooth system in the presence of WLAN interference in an office environment.", In *The 8th International Conference on Communication Systems, 2002. ICCS 2002. (Vol. 2, pp. 628-631), (2002, November).*
 - [21] P. Ali-Rantala, L. Ukkonen, L. Sydanheimo, M. Keskilammi, M. Kivikoski, (2003, June). Different kinds of walls and their effect on the attenuation of radiowaves indoors. In *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No. 03CH37450) (Vol. 3, pp. 1020-1023). IEEE*
 - [22] R. R. Lao, J. H. Tarng, C. Hsiao, (2003, April). Transmission coefficients measurement of building materials for UWB systems in 3-10 GHz. In *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. (Vol. 1, pp. 11-14). IEEE.*
 - [23] S. Wen, D. D. L. Chung, "Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement." *Cement and Concrete Research* 34.2 (2004): 329-332.
 - [24] H. Guan, S. Liu, Y. Duan, J. Cheng, "Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials." *Cement and Concrete Composites*, 28(5), 468-474, (2006).
 - [25] C. Feng, Z. Shen, "A hybrid FD-MoM technique for predicting shielding effectiveness of metallic enclosures with apertures." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2005; 47(3): 456-462.
 - [26] H. Guan, S. Liu, Y. Duan, Y. Zhao, "Investigation of the electromagnetic characteristics of cement based composites filled with EPS.", *Cement and concrete composites*, 29(1), 49-54, (2007).
 - [27] M. Edrisi, A. Khodabakhshian, "Simple methodology for electric and magnetic shielding effectiveness computation of enclosures for electromagnetic compatibility use." *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 2006; 20(8): 1051-1060.
 - [28] F.A. Po'ad, M.Z.M. Jenu, C. Christopoulos, D.W.P. Thomas, "Analytical and experimental study of the shielding effectiveness of a metallic enclosure with off-centered apertures." *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility; 27 February-03 March 2006, Singapore, Singapore.*
 - [29] M. Farwell, J. Ross, R. Luttrell, D. Cohen, W. Chin, T. Dogaru, "Sense through the wall system development and design considerations.", *Journal of the Franklin Institute*, 345(6), 570-591, (2008).

- [30] M. D'Amore, V. De Santis, M. Feliziani, "Magnetic shielding of apertures loaded by resistive coating." *IEEE Transactions on Magnetics* 2010; 46(8): 3341-3344.
- [31] A. Pruksanubal, "Study on electromagnetic properties of reinforced concrete construction wall.", (2011, March). In *PIER Symposium Proceedings* (pp. 201-204).
- [32] L. Baoyi, D. Yuping, Z. Yuefang, L. Shunhua, (2011). Electromagnetic wave absorption properties of cement-based composites filled with porous materials. *Materials & Design*, 32(5), 3017-3020.
- [33] J. Lesnikowski, "Dielectric permittivity measurement methods of textile substrate of textile transmission lines.", (2012). *Przeład Elektrotechniczny*, 88(3A), 148-151.
- [34] E. Liu, P. A. Du, B. Nie, "An extended analytical formulation for fast prediction of shielding effectiveness of an enclosure at different observation points with an off-axis aperture." *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 56(3), 589-598, (2013).
- [35] N. S. Kumar, L. Andal, P. Rajeswari, A. Gobinath, B. Parthiban, "Analysis of EMI shielding effectiveness of building materials.", *Electrical Engineering: An International Journal (EEIJ)*, 1(1), 11-19, (2014).
- [36] R. Kubacki, "New Attempt to Building Materials Permittivity Measurements.", In *PIERS Proceedings*, (2014, August).
- [37] M. Bugaj, "Attenuation Measurements of Materials Used in Construction of Buildings.", In *PIERS Proceedings*, (2014, August).
- [38] P. Kot, A. Shaw, K. Jones, O. Cullen, J. D. Mason, I. A. AlShamma'a, "The feasibility of using electromagnetic waves in determining the moisture content of building fabrics and the cause of the water ingress.", (2014). *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 7(5), 1-5.
- [39] H. Karami, R. Moini, S.H.H. Sadeghi, H. Maftooli, M. Mattes, J.R. Mosig, "Efficient analysis of shielding effectiveness of metallic rectangular enclosures using unconditionally stable time-domain integral equations. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 2014; 56(6): 1412-1419.
- [40] M. Nobakhti, P. Dehkoda, A. Tavakoli, "Improved modal method of moments technique to compensate the effect of wall dimension in shielding effectiveness evaluation.", *IET Science, Measurement & Technology* 2014; 8: 17-22.
- [41] H.H. Park, J.H. Kwon, S. Ahn, "Magnetic Shielding Analysis of a Slit on a Conducting Plate Coated With a Ferrite Sheet.": Transverse Incidence. *IEEE Transactions on Magnetics* 2014; 50(9): Article# 5000506.
- [42] D. Micheli, A. Delfini, F. Santoni, F. Volpini, M. Marchetti, "Measurement of electromagnetic field attenuation by building walls in the mobile phone and satellite navigation frequency bands.", (2014). *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 14, 698-702.
- [43] P. Gajšek, P. Ravazzani, J. Wiart, J. Grellier, T. Samaras, G. Thuróczy, "Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz-6 GHz).", *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 25(1), 37-44, (2015).
- [44] I. B. Basyigit, M. F. Caglar, S. Helhel, "Magnetic shielding effectiveness and simulation analysis of metallic enclosures with apertures.", (2015, November). In *2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (pp. 328-331).
- [45] M. Cakir, N. U. Kockal, S. Ozen, A. Kocakusak, S. Helhel, "Investigation of electromagnetic shielding and absorbing capabilities of cementitious composites with waste metallic chips.", *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 51(1), 31-42, (2017).
- [46] S. S. Cho, J. S. Yoo, J. M. Kim, I. P. Hong, "Prediction of electromagnetic transmission properties using dielectric property modeling of foamed concrete containing BFS.", *Construction and Building Materials*, 151, 650-660, (2017).
- [47] S. S. Cho, J. M. Kim, I. P. Hong, (2017). *Electromagnetic Shielding Characteristics of Eco-Friendly Foamed Concrete Wall. International Journal of Antennas and Propagation*, 2017.
- [48] M. Cakir, N. U. Kockal, S. Ozen, A. Kocakusak, S. Helhel, "Investigation of electromagnetic shielding and absorbing capabilities of cementitious composites with waste metallic chips." *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 51(1), 31-42, (2017).
- [49] A. Jakubas, E. Łada-Tondyra, M. Makówka, Ł. Suchecki, (2022). "A study on the possibility of using iron scale in the construction of electromagnetic field shields." *Energies*, 15(4), 1332.

- [50] C. Kaykılarlı, T.Y. Eken, B. Küçükelyas, M. B. Tabakcioğlu, "Electromagnetic shielding effectiveness of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) composites with Hematite", 2nd International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies, ISSRIS 2022, Bandırma.
- [51] S. Güler, "An investigation on electromagnetic shielding effectiveness of metallic enclosure depending on aperture position. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy", 57(2), 129-145, 2023.
- [52] T. Y. Eken, C. Kaykılarlı, B. Küçükelyas, M.B. Tabakcioglu, " Electromagnetic Shielding Effectiveness and Impact Test Performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites with Hematite and Goethite", Macromolecular Materials and Engineering , 2023, 10.1002/mame.202300271