

Düşük Karbonlu St52 Çeliğinin Elektromanyetik Kalkanlama Potansiyeli: 4900-6000 MHz Frekans Aralığında Performans İncelemesi

Uğur SORGUCU^{1,a}

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

^aORCID: 0000-0001-9227-1526

Makale Bilgileri

Geliş : 06.03.2024

Kabul : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560477

Sorumlu Yazar

Uğur SORGUCU

sorgucu@nevsehir.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Ekranlama

Kalkanlama

Elektromanyetik interferans

ST52

Atf şekli: SORGUCU, U., (2024). Düşük Karbonlu St52 Çeliğinin Elektromanyetik Kalkanlama Potansiyeli: 4900-6000 MHz Frekans Aralığında Performans İncelemesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 839-848.

ÖZ

Elektromanyetik alanların hayatın her alanında yaygınlaşmasıyla elektromanyetik kalkanlama da önemi artan bir disiplin olmuştur. Mühendislik, fizik ve malzeme bilimi gibi çeşitli disiplinleri bir araya getiren çok disiplinli araştırma yönüyle ve hızla gelişen teknolojilerle birlikte elektromanyetik kalkanlama, elektronik cihazların ve sistemlerin güvenliği için kritik bir öneme sahip olmaya devam etmektedir. Bu makale kapsamında, çok geniş bir kullanım sahasına sahip olan düşük karbonlu ST52 çeliğinin elektromanyetik kalkanlama potansiyeli 4900-6000 MHz frekans aralığında değerlendirilmiştir. ST52 çeliğinin kolay erişilebilir ve birçok emsaline göre fiyat/performans avantajları sebebiyle, elektromanyetik kalkanlama açısından kullanılabilirliği sorusuyla başlayan bu çalışma sonucunda, ST52 çeliğinin 4900-6000 MHz frekans aralığında 40-60 dB arasında etkili bir elektromanyetik kalkanlama performansına sahip olduğu görülmüştür. Bu değerler, ASTM düzenlemeleri tarafından belirlenen 40 dB'lik elektromanyetik kalkanlama kriterini başarıyla karşılamaktadır. Elde edilen bulgular, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak ST52 çeliğinin geniş bir frekans aralığında güçlü bir performans sergilediğini göstermektedir. ST52 çeliğinin elektromanyetik kalkanlama potansiyeli, özellikle 4900-6000 MHz frekans aralığında diğer malzemelerden ayrılmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen bilgiler, telekomünikasyon, savunma sanayi ve elektronik üretimi gibi sektörlerde güvenilir elektromanyetik kalkanlama çözümleri arayan profesyoneller için önemlidir.

Low Carbon St52 Steel Electromagnetic Shielding Potential: 4900-6000 MHz Frequency Range Performance Analysis

Article Info

Received : 06.03.2024

Accepted : 27.09.2024

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1560477

Corresponding Author

Uğur SORGUCU

sorgucu@nevsehir.edu.tr

Keywords

Shielding

Screening

Electromagnetic interference

ST52

How to cite: SORGUCU, U., (2024). Düşük Karbonlu St52 Çeliğinin Elektromanyetik Kalkanlama Potansiyeli: 4900-6000 MHz Frekans Aralığında Performans İncelemesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 839-848.

ABSTRACT

With the widespread use of electromagnetic fields in all areas of life, electromagnetic shielding has become an increasingly important discipline. With the multidisciplinary research direction that brings together various disciplines such as engineering, physics and materials science, and rapidly developing technologies, electromagnetic shielding continues to be of critical importance for the safety of electronic devices and systems. This paper evaluates the electromagnetic shielding potential of low carbon ST52 steel in the frequency range of 4900-6000 MHz. ST52 steel is widely used in various applications. The study aimed to investigate whether ST52 steel is a viable option for electromagnetic shielding, given its accessibility and cost-effectiveness compared to other materials. Results showed that ST52 steel is effective in shielding electromagnetic waves, with a range of 40-60 dB in the 4900-6000 MHz frequency range, meeting the 40 dB criterion set by ASTM regulations. Results showed that ST52 steel is effective in shielding electromagnetic waves, with a range of 40-60 dB in the 4900-6000 MHz frequency range, meeting the 40 dB criterion set by ASTM regulations. Results showed that ST52 steel is effective in shielding electromagnetic waves, with a range of 40-60 dB in the 4900-6000 MHz frequency range, meeting the 40 dB criterion set by ASTM regulations. The study demonstrates that ST52 steel performs exceptionally well across a broad frequency range, which distinguishes it from other materials. This is particularly evident in the 4900-6000 MHz frequency range, where ST52 steel exhibits superior electromagnetic shielding potential compared to other materials. The study's insights are valuable for professionals seeking dependable electromagnetic shielding solutions in sectors such as telecommunications, defense, and electronics manufacturing.

1. GİRİŞ

Son dönemde gelişen elektronik ekipman ve cihazlar, çeşitli frekans aralıklarında elektromanyetik enerji yaymaktadır. Bu nedenle dijital cihazları, veri sızıntısı, yanlış işlemler veya tamamen başarısızlık gibi etkilere karşı korumak son derece önemli bir hale gelmiştir [1]. Bununla birlikte elektromanyetik (EM) radyasyonunun özellikle 5. nesil (5G) iletişim sistemlerinden kaynaklanan insan sağlığına olan zararlı etkileri konusunda artan bir endişe de bulunmaktadır [2,3]. Elektromanyetik radyasyonun insan sağlığı üzerinde etkisi olduğuna dair ciddi bir literatür birikimi vardır ve EMI (Elektromanyetik İnterferans) önleyici malzemelerin kullanımı, bu sorunları etkili bir şekilde azaltmanın güçlü yöntemlerinden bir tanesi olmaktadır [4-6].

İyi kalkan malzemesinin elektriksel iletkenlik, iyi termal özellikler ve yüksek EMI kalkanlama verimliliği gibi özelliklere sahip olması beklenmektedir [7]. Son zamanlarda, EMI kalkanlama malzemeleriyle ilgili bu tür özelliklere yönelik çalışmalar devam etmektedir [8,9]. EM radyasyonunun emilimi ve yansıması, EMI kalkanlamanın ana mekanizmalarıdır ve mobil yük taşıyıcıları ile manyetik/elektrik dipollerin doğrudan etkileşiminden kaynaklanmaktadır [10]. Malzemelerin elektriksel iletkenliği, EMI kalkanlama özelliklerini kontrol etmek için temel bir parametre olarak bilinmektedir.

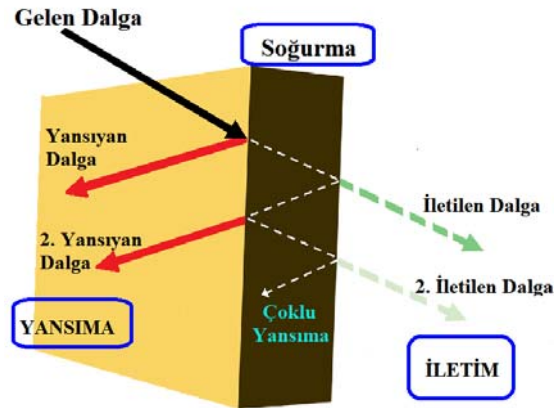
EMI kalkanlama için, metal pullar, metal teller, partiküller ve karbon fiber gibi kesikli iletken dolgular içeren kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır [11]. Özellikle metal bazlı kompozitler, mükemmel elektriksel iletkenlikleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür [12,13]. Ayrıca, gigahertz frekans bölgesinde EMI kalkanlama malzemeleri olarak potansiyel olarak kullanılmıştır [14]. Yüksek iletkenlik ve ayarlanabilir EMI kalkanlama performansı gibi özel özelliklere sahip iletken polimer kompozitleri de, EMI kalkanlama için sıklıkla kullanılmaktadır [15]. Polimer tabanlı elektrik iletken kompozitler, geleneksel metalik kompozit malzemelere göre hafif, maliyet etkili ve korozyona dayanıklı avantajlar sunmaktadır [16].

Özellikle son yıllarda, EMI kalkanlama performansını optimize etmeye yönelik nanoyapılı malzemeler ve hibrit yapılar üzerine önemli araştırmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda, çok katmanlı yapıların (örneğin, metal-polimer-metal kompozitleri) ve nano-dolgu katkılı polimer kompozitlerin kullanımı, kalkanlama etkinliğini artırmak için popüler yaklaşımlar arasında yer almaktadır [17,18]. Bununla birlikte, farklı uygulamalarda kullanılan bu malzemelerin kalkanlama performansını anlamak ve optimize etmek için, malzemelerin elektromanyetik alanlarla olan etkileşimlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir [19].

Görüldüğü gibi elektromanyetik kalkanlama için birçok malzeme farklı formlarda ve farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Farklı uygulama alanlarında kullanılan bu malzemelerin performansını anlamak ve optimize etmek için, malzemelerin elektromanyetik alanlarla etkileşimlerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir [20]. Malzemelerin elektriksel, manyetik ve dielektrik özellikleri, EMI kalkanlama mekanizmalarını (soğurma, yansıma, çoklu yansıma) belirlemektedir. Böylece, hedeflenen uygulamalar için en uygun malzeme ve tasarım seçenekleri belirlenebilir.

1.1. Elektromanyetik Alan – Malzeme Etkileşimi

Elektromanyetik alanların malzemelerle etkileşimi, bilimsel ve teknolojik birçok sorunun çözümünde kritik bir öneme sahiptir. Bu etkileşim, malzemelerin elektromanyetik dalgaları emmesi (absorption), yansıtması (reflection), iletmesi (transmission) veya kırması (refraction) gibi çeşitli şekillerde gerçekleşebilmektedir (Şekil 1) [21]. Elektromanyetik alanların malzemelerle olan bu kompleks etkileşimi, endüstriyel uygulamalarda, telekomünikasyon sistemlerinde ve daha birçok alanda kritik önemle dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Bu etkileşimde etkili iki unsur vardır, birinci elektromanyetik dalganın karakteri, ikincisi ise malzemenin karakteri. Elektromanyetik dalgayı değerlendirirken, frekansı ve gücü en belirli etkenler iken, elektromanyetik dalga ile etkileşim içinde olan malzemenin en önemli özelliği yüzey iletkenliği ve dielektrik katsayısı olmaktadır.

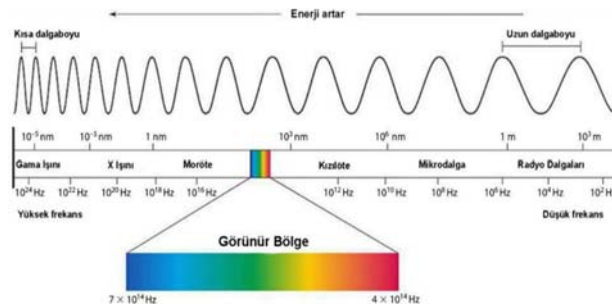


Şekil 1. Elektromanyetik dalga - malzeme etkileşimi [21]

Elektromanyetik dalga ile herhangi bir malzeme karşılaştığında, Şekil 1’ de gösterildiği gibi, üç durum söz konusu olabilmektedir. Malzeme gelen dalgayı absorbe edebilir, gelen dalga malzemeden yansıyabilir ya da malzeme içinde çoklu yansımalara maruz kalabilir [22]. Bu etkileşim olurken, malzeme kadar gelen dalganın frekansı da önemlidir. Elektromanyetik dalgalar, frekansın artmasıyla, genellikle malzemede en az kayıpla geçerek ilerlemektedir [23]. Bu sebeple gelen elektromanyetik dalganın elektromanyetik spektrumun neresinde olduğuna dikkat edilmelidir. Nitekim Nobel ödüllü Fransız fizikçi De Broglie tarafından keşfedilen frekans ile dalgaboyu arasındaki matematiksel ilişki ($c=\lambda \cdot f$) de bu durumun önemini vurgulamaktadır [24]. Örnek bir elektromanyetik spektrum Şekil 2’ de sunulmuştur.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde yüksek frekanslı bileşenleri kalkanlamak için yüksek iletken özellikli malzemelerin seçilmesi gerektiği, düşük frekans bileşenli dalgaları kalkanlamak için ise yüksek dielektrik özelliğe sahip malzemelerin seçilmesi gerektiği görülmektedir [25]. En sık kullanılan malzemelerden biri olan metalik malzemeler, genellikle yüksek iletkenlikleri nedeniyle elektromanyetik kalkanlamada tercih edilmektedir. Özellikle bakır ve alüminyum, elektromanyetik alanları yüksek oranda absorbe edebilme ve yansıtılma yetenekleri ile bilinmektedir [26]. Elektromanyetik kalkanlamada kullanılan bir diğer malzeme grubu ferromanyetik malzemelerdir [27]. Demir, nikel ve kobalt gibi ferromanyetik malzemeler, manyetik alanlara karşı güçlü bir tepki göstermektedir. Bu özellikleri, elektromanyetik alanların absorbe edilmesine katkı sağlamaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte iletken polimer kompozitler de elektromanyetik kalkanlama için kullanılmaya başlamıştır. Polimer matrisine iletken dolgu maddeleri eklenerek oluşturulan bu malzemeler, karbon nanotüpler, grafen veya iletken polimerler içerebilirler. Bu kompozitler, hafif, esnek ve maliyet etkili kalkanlama çözümleri sunmaktadır [28, 29]. Metalik Folyo ve Şeritler gibi özel amaçlı malzemeler de elektromanyetik kalkanlama için kullanılmaktadır. Esnek yapıları sayesinde kablo bağlantılarını sarmakta veya elektronik cihazların iç kısımlarına entegre edilerek etkili bir kalkanlama sağlanmasında kullanılmaktadır [30].

Elektromanyetik kalkanlama problemlerinde, özellikle düşük frekans bölgesinde ferit malzemeler kullanılmaktadır: Ferritler, genellikle demir oksit bazlı malzemelerdir ve özellikle düşük frekansta elektromanyetik kalkanlamada etkilidirler. Ferrit malzemeler, manyetik alanları absorbe ederek etki göstermektedir [31]. En sık kullanılan malzemelerden biri de seramiklerdir. Seramikler özellikle radyo frekansları ve mikrodalga frekans bölgesinde elektromanyetik kalkanlamada kullanılmaktadır. Seramikler, ferroelektrik özelliklere sahip olması sebebiyle geniş bir kullanım sahasına sahiptirler [32,33].



Şekil 2. Elektromanyetik spektrum [24]

2. MALZEME VE YÖNTEM

Literatür göstermiştir ki, elektromanyetik alanlar çok geniş bir frekans spektrumunda etkili olmaya devam etmektedir. Bu sebeple hem çalışan sistemlerin birbirini etkilememesi hem de insan sağlığına olabilecek muhtemel zararların önüne geçebilmek için, elektromanyetik kalkanlama konusu ciddiyle irdelenmelidir. Yürütülen bu çalışma kapsamında, literatürde elektromanyetik kalkanlama konusunda sıklıkla değerlendirilmeyen ancak fiyat/performans açısından birçok sektörde sıklıkla kullanılan ST52 düşük karbonlu çeliği değerlendirilmiştir. Frekans bölgesi olarak ise 4900 – 6000 MHz bölgesi ele alınmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan ST52 metali 3 mm kalınlığındadır. Kumpas ile yapılan kalınlık ölçümü Şekil 3 ile sunulmuştur. Kullanılan malzemenin kalınlığı kalkanlama üzerinde doğrudan etkili bir parametre olmaktadır. Bu sebeple hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada değerlendirilen ST52, düşük karbonlu bir çelik türüdür ve genellikle yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çelik, dayanıklılık, mukavemet ve işlenebilirlik gibi avantajlarıyla bilinmektedir. İşlenmesi kolaydır ve çeşitli metalurjik işlemlere uygun bir malzemedir. ST52 çeliği, çeşitli endüstrilerde kullanılan yapısal boru, boru hatları, silindireler, makine parçaları ve diğer çeşitli inşaat bileşenleri için yaygın olarak tercih edilmektedir. Düşük karbon içeriği, kaynaklanabilirliği artırmakta ve kolay şekillendirilebilmesini sağlamaktadır. Bu çelik türü, özellikle mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve basınca maruz kaldığında stabil bir performans sergilemesi bir diğer önemli avantajı olarak sunulabilir [34,35]. Anlatılan avantajları sebebiyle inşaat ve makine mühendisliği gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılan ST52 çeliği, askeri ve medikal uygulamalarda da elektromanyetik kalkanlama amacıyla kullanılabilir bu çalışma ile gösterilmiştir.



Şekil 3. ST52 çeliği - kumpas ölçümü

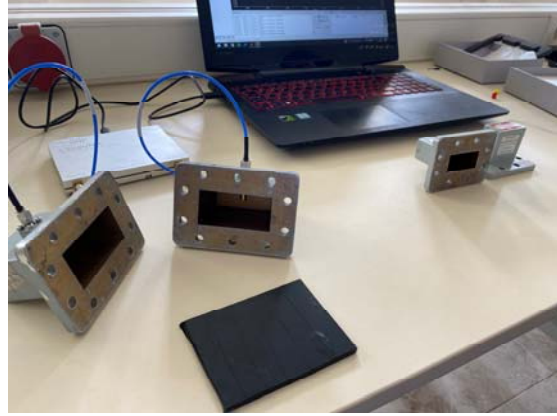
Yürütülen çalışma 4.9-6GHz frekans bölgesinde yürütülmüştür. Çünkü bu frekans bölgesinde, Wi-Fi 5 ve Wi-Fi 6 Ağları, 5G Mobil İletişim, Yüksek Hızlı Kablosuz Bağlantılar (Point-to-Point Bağlantılar), Radyo Frekansı Tanımlı Radyo (SDR) Uygulamaları ve Yüksek Performanslı Endüstriyel Kablosuz Kontrol Sistemleri gibi önemli işlemler yürütülmektedir. Yapılan çalışmaya ilişkin detaylar Çizelge 1 ile sunulmuştur.

Çizelge 1. Deneysel Çalışmaya İlişkin Detaylar

Parametre	Değer
Malzeme	Düşük Karbonlu ST52
Frekans Aralığı	4900-6000MHz
Ölçüm cihazı	Libre VNA
Numune Kalınlığı	3 mm
Numune Boyutları	10mm*10mm

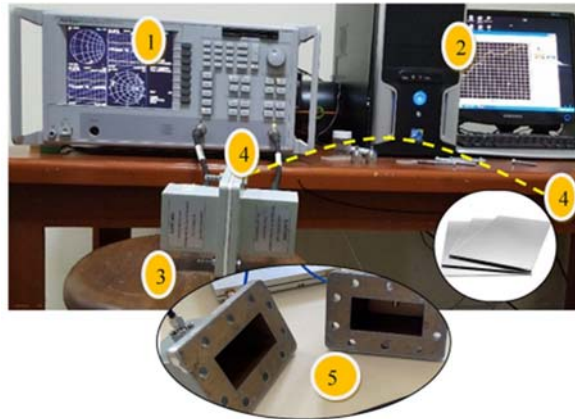
3. TARTIŞMA

Elektromanyetik kalkanlama, modern teknolojinin hızla ilerlediği günümüzde, malzemelerin elektromanyetik alanlara karşı direnç gösterme kabiliyetini anlamak ve optimize etmek için kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, bu çalışma kapsamında, ST52 metalinin elektromanyetik kalkanlama özellikleri derinlemesine incelenmiş ve elektromanyetik kalkanlama noktasındaki potansiyeli ortaya konulmuştur. Özellikle, vektör network analizör kullanılarak gerçekleştirilen ölçümler, ASTM standartlarına uygun bir şekilde tasarlanmış deneyler ve belirli bir frekans bandında yapılan ölçümlerle malzemenin elektromanyetik kalkanlama etkinliği analiz edilmiştir [36]. Hazırlanan ölçüm düzeneği Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Kalkanlama ölçüm sistemi

Elektromanyetik kalkanlama ölçümleri, taşınabilir vektör network analizör (VNA), bilgisayar, dalga kılavuzları ve koaksiyel kablolarla ile gerçekleştirilmiştir. Vektör network analizör, geniş bir frekans aralığında yüksek hassasiyetli ölçümler yapabilme kabiliyetiyle bu tür çalışmalarda sıkça tercih edilmektedir. Laboratuvar imkânları kapsamında bulunan dalga kılavuzları da 4.9-6GHz frekans bandında ölçümler almak için kullanılmıştır. Bu sistem, elektromanyetik alanın frekansa bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemek ve malzemenin elektromanyetik özelliklerini çeşitli frekanslarda analiz etmek için etkili bir çözüm sunmuştur. Bu ölçüm sistemi yazarların bir önceki makalelerinde kullanılan ölçüm sisteminin benzeridir [33].



Şekil 5. Örnek ölçüm sistemi [37]

Şekil 5te gösterilen ölçüm sistemi dört ana bileşenden oluşmaktadır. 1 numara ile gösterilen eleman masa tipi bir network analizörü göstermektedir ve bu eleman ile kalkanlama etkinliği ölçümleri bilgisayar aktarılmaktadır. 2 numara ile gösterilen bilgisayarın burada kullanım amacı, network analizörden alınan S parametre bilgilerini görselleştirmek ve anlaşılır bir halde sunulmasını sağlamak içindir. 3 ve 5 numaralarla gösterilen dalga kılavuzları ve koaksiyel kablolar ise çalışılmak istenilen frekansa göre özel olarak üretilmiş elemanlardır. Nitekim kalkanlama etkinliği ölçülecek olan ST52 bu dalga kılavuzlarının arasına yerleştirilmektedir. 4 numara ile ölçümü yapılacak elemanın levha şeklinde olması gerektiği gösterilmiştir. Kalkanlama etkinliği ölçülecek eleman, levha formunda olmazsa dalga kılavuzlarından kaçaklar oluşabilecek bu da ölçüm güvenilirliğini saptıracaktır.

Ölçümlerin doğru sonuçlanabilmesi için taşınabilir VNA ve kalkanlama ölçümlerinde kullanılan dalga kılavuzlarının doğru seçilmesi son derece önemlidir. Nitekim bu çalışma kapsamında kullanılan Libre firmasına ait cihaz 100kHz-6GHz bandında ölçümler alabilmektedir. Ayrıca bu cihazla beraber kullanılan dalga kılavuzları da bu frekans bandında doğru sonuçlar üretebilmelidir. Bu bağlamda A-info firmasına ait 159WCAS model dalga kılavuzları kullanılmıştır. Yakından görülmesi adına Şekil 6 da VNA ve dalga kılavuzları eklenmiştir. Kullanılan dalga kılavuzuna ait detaylar [38]' den elde edilebilir.



Şekil 6. Dalga kılavuzları ve mobil VNA

Deneyler, ASTM standartlarına uygun olarak tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. ASTM standartları, ölçüm süreçlerinin standartlaştırılmasını sağlayarak, elde edilen verilerin güvenilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini artırmaktadır. Bu standartlar çerçevesinde dalga kılavuzları kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Dalga kılavuzları, özellikle yüksek frekanslarda daha kesin ölçümler yapabilme kabiliyetiyle bilinmektedir. Bu çalışma, 4.9 - 6 GHz frekans bandında gerçekleştirilen ölçümleri içermektedir. Bu frekans bandı birçok uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir. İlgili frekans bandının kullanıldığı bazı uygulamalar ve nedenleri Çizelge 2 ile sunulmuştur.

Yapılan ölçümler sonucunda, ST52 metalinin elektromanyetik kalkanlama etkinliğinin 45-60 dB arasında olduğu belirlenmiştir. Bu değerler, malzemenin elektromanyetik alanlara karşı yüksek direnç gösterdiğini ve etkili bir kalkanlama sağladığını göstermektedir. Bu, özellikle elektronik cihazların ve iletişim sistemlerinin gelişmiş güvenilirlik ve performansını sağlamak adına önemli bir özelliktir. Elektromanyetik kalkanlama özellikleri üzerine yapılan bu çalışma, sadece ST52 metalinin belirli bir frekans bandında değil, aynı zamanda malzemenin genel kullanılabilirliği ve çeşitli uygulama alanları üzerine de ışık tutmaktadır. Yüksek elektromanyetik kalkanlama etkinliği, endüstriyel ve askeri uygulamalardan medikal cihazlara kadar bir dizi farklı sektörde potansiyel kullanımlarını açığa çıkarmaktadır. Şekil 7’de ST52 çeliğinin 4.9-6 GHz frekans bandındaki elektromanyetik kalkanlama performansı sunulmuştur.

Çizelge 2. 4.9-6 GHz bandındaki bazı uygulamalar

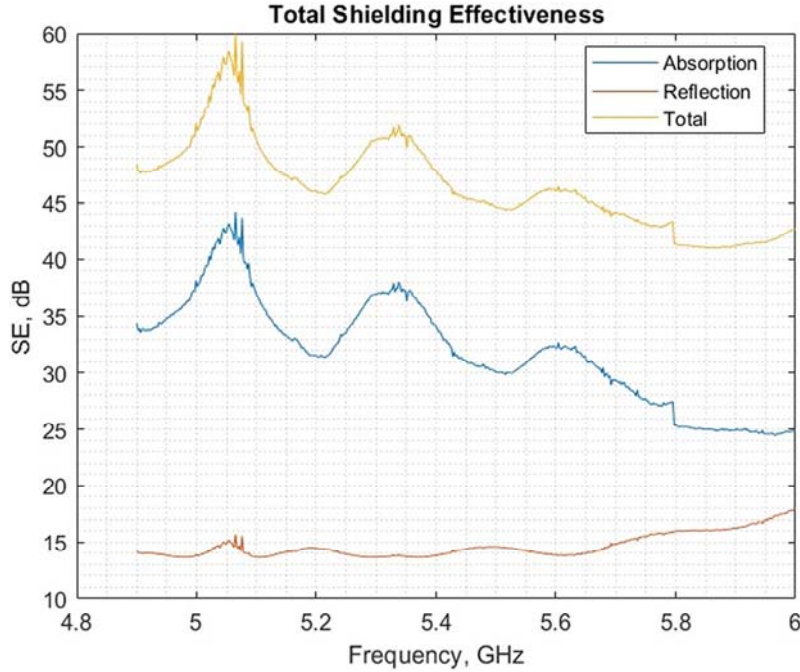
Radar Sistemleri	Hem sivil hem de askeri radar sistemleri, nesne tespiti ve izleme gibi görevler için bu frekans bandını kullanılmaktadır.
Wi-fi (Kablosuz internet)	Özellikle 5 GHz bandı, yüksek bant genişliği ve daha düşük girişim nedeniyle Wi-Fi iletişiminde tercih edilen bir frekans bandıdır.
Mikrodalga Bağlantılar	Uzun mesafe iletişim bağlantıları için yaygın olarak kullanılmaktadır.
Mobil İletişim (5G)	Yüksek hızlı veri iletimi için bu frekans bandı kullanılmaktadır. 5G, daha geniş bant genişliği ve daha düşük gecikme süreleri sunarak daha hızlı ve güvenilir kablosuz bağlantılar sağlar.
Kablosuz Sensör Ağları:	Endüstriyel otomasyon ve İnternet of Things (IoT) uygulamalarında kullanılan kablosuz sensör ağları, bu frekans bandını kullanabilmektedir.
Ağ Ekipmanları ve Radyo Bağlantıları	Kablosuz ağ ekipmanları ve bağlantılar, bu frekans bandını kullanarak veri iletimi sağlamaktadır.

Şekil 7’de dikey sütun kalkanlama performansı (shielding effectiveness – SE), yatay sütun ise frekans (frequency – GHz) olarak sunulmuştur. Kırmızıçizgi ile yansıma (reflection), mavi çizgi ile emilim (absorption), sarı ile ise toptam etki (total) sunulmuştur. ST52 nin 4.9 – 6 GHz frekans bandındaki elektromanyetik kalkanlama karakteristiği birkaç açıdan farklı bir karakteristik sunmaktadır. Şöyle ki;

- ST 52 çeliğinin yansıtma özelliği, artan frekansla birlikte artmaktadır. Nitekim 4.9-5GHz bandında 14-15dB civarındayken, 6 GHz bölgesinde yansıma etkinliği 20 dB ye yaklaşmıştır.

- ST 52 çeliğinin soğurma (emilim) özelliği ise artan frekans ile birlikte azalan bir eğilim göstermektedir.
- Bazı özel frekanslarda (5.1, 5.3 ve 5.6 GHz) alt ve üst frekans komşuluklarına göre daha belirgin bir kalkanlama özelliği göstermektedir. Nitekim en yüksek kalkanlamayı da 5.1 GHz bölgesinde göstermektedir.

Toplam elektromanyetik alan kalkanlama özelliği ise, artan frekansla birlikte azalmaktadır. Yani, emilimdeki düşüş, yansıtmadaki artıştan çok daha fazla olmaktadır.



Şekil 7. ST52 çeliğinin elektromanyetik kalkanlama performansı

Ölçüm yapılan frekans bölgesinde oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Nitekim bazı özel frekanslar için elde edilen yüksek kalkanlama performanslarının hangi uygulamalarda kullanıldığına ilişkin hazırlanan Çizelge 3 aşağıda sunulmuştur. Çizelge 3 incelendiğinde, sabit kablosuz erişim, lisanssız spektrum uygulamaları, 5G NR, Wi-Fi 6E gibi birçok uygulamanın çalışma sahasında oldukça başarılı kalkanlama etkinliği sağlandığı görülecektir. Elektromanyetik kalkanlama malzemeleri üzerine yapılan çalışmalar, günümüzde hızla gelişen elektronik cihazların yaydığı elektromanyetik radyasyonun kontrol altına alınması gerekliliğiyle ortaya çıktığı önceki bölümlerde belirtilmiştir. Son yıllarda, özellikle düşük karbonlu çelikler gibi maliyet açısından avantajlı ve yüksek performans gösteren malzemelerin elektromanyetik kalkanlama potansiyeli üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiştir [39-41]. ST52 çeliği, düşük karbon içeriği ve yapısal mukavemeti ile bilinen bir malzeme olup, son çalışmalarda bu malzemenin elektromanyetik kalkanlama performansı incelenmiştir [42].

Çizelge 3. Bazı özel kalkanlama gereksinimleri

Frekans	SE(dB)	Kullanılan uygulama
5.1 GHz	58	Wi-Fi 6 (802.11ax), 5G NR (New Radio)
5.3 GHz	52	Wi-Fi 5 (802.11ac), U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure), Sabit kablosuz erişim
6 GHz	44	Wi-Fi 6E, Fixed Wireless Access (FWA), Lisanssız spektrum uygulamaları

Güncel çalışmalar, özellikle 5G gibi yüksek frekanslı uygulamalarda ST52 gibi metal bazlı malzemelerin yüksek kalkanlama performansı sergilediğini göstermektedir [43]. Örneğin, Mostafavi ve arkadaşlarının çalışmasında polimerlerin yüzeylerini çinko ve alüminyum kaplamışlardır. Bu işlem sonucunda

polimerlerin kalkanlama performansı artmıştır. Ayrıca, metal bazlı malzemelerin, özellikle maliyet avantajları ve yüksek yansıtma oranları nedeniyle, gigahertz frekans aralığında tercih edildiği belirtilmiştir [44]. Aynı şekilde, Jiao ve ekibinin 2021 tarihli araştırması da ST52 gibi düşük karbonlu çeliklerin özellikle telekomünikasyon ve savunma sanayisinde giderek daha fazla kullanım alanı bulunduğunu vurgulamaktadır [45]. Bu araştırmalar, düşük karbonlu çeliklerin elektriksel iletkenliklerinin yanı sıra mekanik dayanımlarının da yüksek frekanslı uygulamalarda önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymuştur. Nitekim 40 dB üzerindeki kalkanlama performanslarının telekomünikasyon uygulamaları için yeterli olduğu bu konudaki önemli literatür kaynaklarında belirtilmiştir [46].

Bu makale kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, 4900-6000 MHz frekans aralığında ST52 çeliğinin 40-60 dB arasında değişen bir kalkanlama etkinliği sunduğunu göstermiştir. Bu kalkanlama performansı da ASTM ve MIL-STD 'de belirtilen minimum kalkanlama etkinliğini karşılamakta ve ST52'nin, maliyet performansı açısından uygun bir elektromanyetik kalkanlama malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürdeki diğer araştırmalarla karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçlar ST52 çeliğinin özellikle gigahertz frekans bandında yüksek bir kalkanlama performansı sunduğunu ve bu özelliğiyle alternatif malzemelerden biri olduğunu da doğrulamaktadır [47,48].

Sonuç olarak, bu çalışma, literatürde yer alan mevcut bulguları destekleyerek ST52 çeliğinin yüksek frekanslı uygulamalar için uygun bir elektromanyetik kalkanlama malzemesi olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, ST52 çeliğinin geniş bir uygulama alanına sahip olduğu ve telekomünikasyon, savunma sanayi gibi sektörlerde kullanımı açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu söylenebilmektedir.

4. SONUÇLAR

Sonuç olarak, bu çalışma, ST52 metalinin elektromanyetik kalkanlama özelliklerini detaylı bir şekilde inceleyerek, malzemenin yüksek etkinlik gösterdiği bir frekans bandında önemli bir direnç sağladığını göstermiştir. Bu bulgular, malzemenin gelecekteki elektromanyetik kalkanlama uygulamalarında güvenle kullanılabileceğini ve endüstrinin ihtiyaçlarına uygun çözümler sunabileceğini göstermektedir. Ayrıca, ST52 çeliğinin düşük karbonlu olup işlemeye elverişli olması kullanım sahasının geniş bir yelpazede olmasına imkân tanımıştır. Bununla birlikte başka malzemelerle nano düzeyde etkileşime geçebilecek yüzey özellikleri sebebiyle, gelecek çalışmalarda bu yönüyle araştırmalar devam edecektir.

5. KAYNAKLAR

1. Ertekin, Z., Secmen, M., Erol, M., 2023. Electromagnetic shielding effectiveness and microwave properties of expanded graphite-ionic liquid co-doped PVDF. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(1), 43.
2. Kim, K., Lee, Y.S., Kim, N., Choi, H.D., Kang, D.J., Kim, H.R., Lim, K.M., 2021. Effects of electromagnetic waves with LTE and 5G bandwidth on the skin pigmentation in vitro. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 170.
3. Bushberg, J.T., Chou, C.K., Foster, K.R., Kavet, R., Maxson, D.P., Tell, R.A., Ziskin, M.C. 2020. IEEE committee on man and radiation-COMAR technical information statement: health and safety issues concerning exposure of the general public to electromagnetic energy from 5G wireless communications networks. *Health Physics*, 119(2), 236-246.
4. Mathur, P., Raman, S., 2020. Electromagnetic interference (EMI): measurement and reduction techniques. *Journal of Electronic Materials*, 49, 2975-2998.
5. Zhan, Y., Wang, J., Zhang, K., Li, Y., Meng, Y., Yan, N., Xia, H., 2018. Fabrication of a flexible electromagnetic interference shielding Fe3O4@ reduced graphene oxide/natural rubber composite with segregated network. *Chemical Engineering Journal*, 344, 184-193.
6. Bi, S., Zhang, L., Mu, C., Liu, M., Hu, X., 2017. Electromagnetic interference shielding properties and mechanisms of chemically reduced graphene aerogels. *Applied Surface Science*, 412, 529-536.
7. Thomassin, J.M., Jérôme, C., Pardoën, T., Bailly, C., Huynen, I., Detrembleur, C., 2013. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(7), 211-232.
8. Wu, N., Hu, Q., Wei, R., Mai, X., Naik, N., Pan, D., Shi, Z., 2021. Review on the electromagnetic interference shielding properties of carbon based materials and their novel composites: Recent progress, challenges and prospects. *Carbon*, 176, 88-105.

9. Wang, G., Zhao, G., Wang, S., Zhang, L., Park, C.B., 2018. Injection-molded microcellular PLA/graphite nanocomposites with dramatically enhanced mechanical and electrical properties for ultra-efficient EMI shielding applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(25), 6847-6859.
10. Lakshmi, K., John, H., Mathew, K.T., Joseph, R., George, K.E., 2009. Microwave absorption, reflection and EMI shielding of PU-PANI composite. *Acta Materialia*, 57(2), 371-375.
11. Abbasi, H., Antunes, M., Velasco, J.I., 2019. Recent advances in carbon-based polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding. *Progress in Materials Science*, 103, 319-373.
12. Khan, M., Tahir, M.N., Adil, S.F., Khan, H.U., Siddiqui, M.R.H., Al-Warthan, A.A., Tremel, W., 2015. Graphene based metal and metal oxide nanocomposites: synthesis, properties and their applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(37), 18753-18808.
13. Zhang, X., Zhang, S., Tang, Y., Huang, X., Pang, H., 2022. Recent advances and challenges of metal-organic framework/graphene-based composites. *Composites Part B: Engineering*, 230, 109532.
14. Ren, Y., Wang, X., Ma, J., Zheng, Q., Wang, L., Jiang, W., 2023. Metal-organic framework-derived carbon-based composites for electromagnetic wave absorption: dimension design and morphology regulation. *Journal of Materials Science & Technology*, 132, 223-251.
15. Kruželák, J., Kvasničáková, A., Hložeková, K., Hudec, I., 2021. Progress in polymers and polymer composites used as efficient materials for EMI shielding. *Nanoscale Advances*, 3(1), 123-172.
16. Sharma, S., Sudhakara, P., Omran, A.A.B., Singh, J., Ilyas, R.A., 2021. Recent trends and developments in conducting polymer nanocomposites for multifunctional applications. *Polymers*, 13(17), 2898.
17. Sorgucu, U., 2024. Enhancing the electromagnetic shielding effectiveness of alumina (AL₂O₄) by coating with nano gold (AuNp). *Optical Materials*, 148, 114795.
18. Sorgucu, U., Kariper, I.A., 2024. Shielding performance of nano palladium-coated stainless steels against electromagnetic interference in 5G networks. *Waves in Random and Complex Media*, 1-19
19. Hou, X., Feng, X.R., Jiang, K., Zheng, Y.C., Liu, J.T., Wang, M., 2024. Recent progress in smart electromagnetic interference shielding materials. *Journal of Materials Science & Technology*, 186, 256-271.
20. Piersanti, S., Orlandi, A., de Paulis, F., 2018. Electromagnetic absorbing materials design by optimization using a machine learning approach. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1-8.
21. Liu, C., Wang, L., Liu, S., Tong, L., Liu, X., 2020. Fabrication strategies of polymer-based electromagnetic interference shielding materials. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(4), 149-159.
22. Gülmez, N., Koçkal, N.U., Özen, Ş., Ateş, K., 2022. Corrosion potential and electromagnetic shielding effectiveness of geopolymer tiles produced with waste metal particles. *Sādhanā*, 47(3), 115.
23. Lv, H., Yang, Z., Pan, H., Wu, R., 2022. Electromagnetic absorption materials: current progress and new frontiers. *Progress in Materials Science*, 127, 100946.
24. Döner, D., İçier, F., 2018. Gıdaların elektriksel yöntemlerle işlenmesinde uygulanan farklı frekans ve dalga şekillerinin proses etkinliği üzerine etkisi. *Akademik Gıda*, 16(4), 470-482.
25. Kimmel, W.D., Gerke, D., 2018. *Electromagnetic compatibility in medical equipment: a guide for designers and installers*. CRC Press, 46(3), 276-288.
26. Wanasinghe, D., Aslani, F., 2019. A review on recent advancement of electromagnetic interference shielding novel metallic materials and processes. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107207.
27. Di Fraia, S., Marracci, M., Tellini, B., Zappacosta, C., 2008. Shielding effectiveness measurements for ferromagnetic shields. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 58(1), 115-121.
28. Wang, M., Tang, X.H., Cai, J.H., Wu, H., Shen, J.B., Guo, S.Y., 2021. Construction, mechanism and prospective of conductive polymer composites with multiple interfaces for electromagnetic interference shielding: A review. *Carbon*, 177, 377-402.
29. Fox, R.T., Wani, V., Howard, K.E., Bogle, A., Kempel, L., 2008. Conductive polymer composite materials and their utility in electromagnetic shielding applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(4), 2558-2566.
30. Palanisamy, S., Tunakova, V., Militky, J., 2018. Fiber-based structures for electromagnetic shielding-comparison of different materials and textile structures. *Textile Research Journal*, 88(17), 1992-2012.
31. Rayar, A., Naveen, C.S., Onkarappa, H.S., Betageri, V.S., Prasanna, G.D., 2023. EMI shielding applications of PANI-Ferrite nanocomposite materials: a review. *Synthetic Metals*, 295, 117338.
32. Shi, S.L., Liang, J., 2008. The effect of multi-wall carbon nanotubes on electromagnetic interference shielding of ceramic composites. *Nanotechnology*, 19(25), 255707.
33. Kumari, P., Tripathi, P., Singh, S.P., Kumar, D., 2020. Electromagnetic shielding using ceramic materials. In *Materials For Potential Emi Shielding Applications*, 315-331, Elsevier.

34. Küçükömeroğlu, T., Aktarer, S.M., İpekoğlu, G., Çam, G., 2018. Microstructure and mechanical properties of friction-stir welded St52 steel joints. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 25, 1457-1464.
35. Aydın, Ş.I.K., 2006. Yapı çeliğinin (St52-3) Mig/Mag kaynağında gaz karışımlarının çekme dayanımı özelliklerine etkisi. *Trakya Univ J Sci*, 7(1), 9-15.
36. Park, H.H., 2022. Electromagnetic shielding analysis of planar materials using ASTM D4935 standard fixture. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 64(5), 1767-1778.
37. Sorgucu, U., 2023. Electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE) of pure aluminum: an experimental assessment for 5G (SUB 6GHZ). *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 34(2325), 1-15.
38. <https://www.ainfoinc.us/159wcas-right-angle-rectangular-waveguide-to-coaxial-adapter-4-9-7-05-ghz-wr159-to-sma-female-fdp58-udr58>, Erişim tarihi: 18/09/2024
39. Yang, Y., Wang, J., Liu, Z., Wang, Z., 2021. A new study on the influencing factors and mechanism of shielding effectiveness of woven fabrics containing stainless steel fibers. *Journal of Industrial Textiles*. 50(6), 830-846.
40. Alım, B., Şakar, E., Baltakesmez, A., Han, İ., Sayyed, M.I., Demir, L., 2020. Experimental investigation of radiation shielding performances of some important AISI-coded stainless steels: Part I. *Radiation Physics and Chemistry*. 166, 108455.
41. Kim, S., Jang, Y.S., Oh, T., Lee, S.K., Yoo, D.Y., 2022. Effect of crack width on electromagnetic interference shielding effectiveness of high-performance cementitious composites containing steel and carbon fibers. *Journal of Materials Research and Technology*. 20, 359-372.
42. Mikinka, E., Siwak, M., 2021. Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of carbon-fibre-reinforced polymer composites-a topical review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 32(20), 24585-24643.
43. Pandey, R., Tekumalla, S., Gupta, M., 2020. EMI shielding of metals, alloys, and composites. In *Materials for Potential EMI Shielding Applications*, 341-355, Elsevier.
44. Mostafavi Yazdi, S.J., Lisitski, A., Pack, S., Hiziroglu, H.R., Baqersad, J., 2023. Analysis of shielding effectiveness against electromagnetic interference (EMI) for metal-coated polymeric materials. *Polymers*. 15(8), 1911.
45. Jiao, C., Xu, Y., Li, X., Zhang, X., Zhao, Z., Pang, C., 2021. Electromagnetic shielding techniques in the wireless power transfer system for charging inspection robot application. *International Journal of Antennas and Propagation*, 9984595
46. Adamczyk, B., 2023. *Principles of electromagnetic compatibility: Laboratory Exercises and Lectures* Wiley-IEEE Press, 592.
47. Sorgucu, U., 2024. Enhancing the electromagnetic shielding effectiveness of alumina (AL₂O₃) by coating with nano gold (AuNp). *Opt Mater (Amst)*, 148(2024), 114795.
48. Martinez, P.A., Victoria, J., Torres, J., Suarez, A., Alcarria, A., Amaro, A., Galindo-Galiana, B., Losada-Fernandez, C., Ramirez-Monsell, V., Lopez-Ruis, B., 2021. Analysis of EMI shielding effectiveness for plastic fiber composites in the 5G sub-6 GHz band. 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium, Raleigh, NC, USA, 278-283.