BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEŞİTLİ MALZEMELERİN YÜKSEK FREKANS SOĞURMA, GEÇİRGENLİK VE YANSITMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak DURSUN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2020

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEŞİTLİ MALZEMELERİN YÜKSEK FREKANS SOĞURMA, GEÇİRGENLİK VE YANSITMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak DURSUN
(171082313)
ORCID: 0000-0001-9547-5604

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Barış TABAKCIOĞLU
ORCID: 0000-0002-1607-355X

TEMMUZ 2020

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere göre uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi 182N17 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Ayrıca 217M431 numaralı TÜBİTAK projesinde üretilen yapı malzemelerinin ölçümleri de yapılmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Burak DURSUN

İmzası :

Aileme,

ÖNSÖZ

Bursa Teknik Üniversitesi'nde yapmış olduğum bu tezde, çeşitli yapı malzemelerinin yüksek frekans soğurma, geçirgenlik ve yansıtma özelliklerinin incelenmesi konulu tez çalışmalarım neticesinde saptanmış olan bilgileri ve araştırmalarımı ilgilerinize sunuyorum. Bu tezin hazırlanma sürecinde ve aldığım yüksek lisans eğitimi döneminde benden yardımlarını esirgemeyen, tanıştığım için onur duyduğum Sayın Doç. Dr. Mehmet Barış TABAKCIOĞLU başta olmak üzere Bursa Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisiliğindeki saygı değer hocalarıma, BURSAMNDT Genel Müdürü Sayın Doç. Dr. Yaver SAMEDOV'a, beni okutmak ve geliştirmek için maddi ve manevi her türlü çabayı sarfeden değerli aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2020 Burak DURSUN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **x**
SEMBOLLER ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvi**
1. GİRİŞ **1**
2. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA İÇİN YAPI MATERYALLERİ **3**
3. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA PRENSİPLERİ **10**
3.1 Elektromanyetik Kalkanlama Materyalleri 10
3.1.1 Metaller 10
3.1.2 Metal folyolar 11
3.1.3 Elektromanyetik kalkanlama kumaşları 11
3.1.4 Gözenekli materyaller 11
3.1.5 Elektromanyetik boya ve kaplamaları 12
3.2 Elektromanyetik Kalkanlamanın Matematiksel Açıklamaları 14
4. DENEY VE SİMÜLASYONLAR **22**
4.1 Deneysel Çalışmalar 22
4.2 Simülasyon Çalışmaları 38
5. SONUÇ VE ÖNERİLER **54**
KAYNAKLAR **56**
ÖZGEÇMİŞ **60**

KISALTMALAR

BT : Bluetooth
DKT : Dikey Kırınım Teorisi
DSÖ : Dünya Sağlık Örgütü
EK : Elektromanyetik Kalkanlama
EKE : Elektromanyetik Kalkanlama Etkisi
EMC : Elektromanyetik Uyumluluk (Electromagnetic Compability)
EMI : Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference)
EPS : Köpük Strafor (Expanded Polystyren Foam)
RF : Radyo Frekansı (Radio Frequency)
GO : Geometrik Optik (Geometric Optics)
LOS : Açık Görüş Hattı (Line Of Sight)
SAR : Özgül Soğurma Oranı (Specific Absorption Rate)
WLAN : Kablosuz İnternet (Wireless Local Network)

SEMBOLLER

$A_{(s)}$	: Yayılma Faktörü
A_{dB}	: Soğurma Kaybı
α	: Zayıflama Sabiti
B	: Bantgenişliği
β	: Faz Sabiti
$D_{(a)}$	: Kırınım Katsayısı
dB	: Desibel
δ	: Nüfuz Derinliği
E	: Elektrik Alan
E_{0I}, E_{0R}, E_{0T}	: Gelen, Yansıyan ve İletilen Elektrik Alan
ε	: Dielektrik Sabiti
F[x]	: Fresnel Fonksiyonu
f	: Frekans
GHz	: Giga Hertz
G_t, G_r	: Verici ve Alıcı Anten Kazançları
κ	: Dalga Vektörü
kT	: Gürültü Güç Yoğunluğu
L	: Sistem Kaybı
λ	: Dalga Boyu
MHz	: Mega Hertz
M_{dB}	: İç Çoklu Yansıma Kaybı
N_f	: Gürültü Katmanı
P_A	: İletilen Ortalama Güç
R	: Mega Hertz
R_{dB}	: Yansıma Kaybı
σ	: İletkenlik
SE_{dB}	: Kalkanlama Etkisi
μ	: Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
SNR	: İşaret Gürültü Oranı
t	: Kalınlık

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Bazı metallerin iletkenlikleri **10**
Çizelge 4.1 : 1 cm boşluk için zayıflama **26**
Çizelge 4.2 : 1 cm kalınlıktaki numuneler için zayıflama **28**
Çizelge 4.3 : 2 cm boş ölçüm ve kömür+alimünyum beton ölçümleri **31**
Çizelge 4.4 : 3 cm boş ve kömür+alimünyum+köpük strafor beton ölçümleri **33**
Çizelge 4.5 : 1.5 cm kalınlığında Bayburt taşının EKE'si **35**
Çizelge 4.6 : 1 cm kalınlığındaki paslanmaz çelik bloğunun EKE'si **37**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Taneciğe gelen dalganın durumu **5**
Şekil 2.2 : Malzeme içindeki dalga mekanizması **5**
Şekil 2.3 : Metal ızgarayla yapılan metal bloğu **6**
Şekil 3.1 : 9 µm çapında %5 paslanmaz çelik ipliği katkılı kompozit tekstil ipliğinin mikroskop altındaki görüntüsü **11**
Şekil 3.2 : 0.5-3.0 mm boyutlarında gözenekleri olan ve hacimce %86-%90 gözenekli titanyum köpük **12**
Şekil 3.3 : Gelen dalganın kaplamadaki karbon partiküllerinde çoklu yansıma yapması ve zayıflayarak soğurulması **13**
Şekil 3.4 : Yansıma mekanizması **14**
Şekil 3.5 : EMI önlemek için EK kapağı **17**
Şekil 3.6 : LOS, kırınan ve yansıyan elektrik alan **18**
Şekil 3.7 : Kırınım olayı **18**
Şekil 3.8 : Yansıma olayı **19**
Şekil 3.9 : Materyal içinde saçılma olayı **19**
Şekil 3.10 : Saçıcı partikül parçacık geometrileri **20**
Şekil 3.11 : Partiküldeki ışın mekanizmaları **20**
Şekil 3.12 : Silindirik partikülde ışın mekanizmaları **20**
Şekil 3.13 : (a) Silindirik partikül, (b) küresel partikül, (c) çoklu partikül kümesi elemanlarının saçılma paterni **21**
Şekil 4.1 : DFG 4060 dalga jenaratörü **23**
Şekil 4.2 : Spectran HF 60105 spektrum analizörü **23**
Şekil 4.3 : Oluşturulan beton kompozitleri kalıba dökülmüş halde **24**
Şekil 4.4 : Bayburt taşı deney düzeneği **24**
Şekil 4.5 : Çelik blok deney düzeneği **25**
Şekil 4.6 : 1 cm boşluk için zayıflama **27**
Şekil 4.7 : 1 cm kalınlığındaki numunelerin EKE'leri **29**
Şekil 4.8 : Frekansa göre dielektrik sabiti değişimi grafiği **30**
Şekil 4.9 : 2 cm boş ve kömür+alimünyum katkılı beton ölçümleri **32**
Şekil 4.10 : 3 cm boş ve kömür+alimünyum+köpük strafor katkılı beton ölçümleri **34**
Şekil 4.11 : 1.5 cm kalınlığında Bayburt taşının EKE'si **36**
Şekil 4.12 : 1 cm kalınlığındaki paslanmaz çelik bloğunun EKE'si **38**
Şekil 4.13 : Arada hiçbir materyal yoktur **39**
Şekil 4.14 : İki hava kütlesinin arasında cam varken **39**
Şekil 4.15 : İki hava kütlesinin arasında kuru tahta varken **40**
Şekil 4.16 : İki hava kütlesinin arasında kuru beton varken **40**
Şekil 4.17 : İki hava kütlesinin arasında su varken **40**
Şekil 4.18 : İki hava kütlesinin arasında deri dokusu varken **41**
Şekil 4.19 : İki hava kütlesinin arasında kas dokusu varken **42**
Şekil 4.20 : İki hava kütlesinin arasında kemik dokusu varken **43**

Şekil 4.21 : Gözenekli beton deneyi **43**
Şekil 4.22 : Gözenekli betonun içi **44**
Şekil 4.23 : 1.Adım katkılanmamış kuru beton **45**
Şekil 4.24 : 2.Adım kuru betonun iletkenliği*100 ..... **45**
Şekil 4.25 : 3.Adım kuru betonun iletkenliği*10000 ..... **46**
Şekil 4.26 : 4.Adım kuru betonun iletkenliği*1000000 ..... **46**
Şekil 4.27 : 24 GHz'de 4. adımın tekrarlanması **47**
Şekil 4.28 : Tasarlanan çelik blok ve üstünde eddy current tahribatsız muayene cihazı probu **47**
Şekil 4.29 : Cihazın numune üzerindeki çatlakların derinliğine göre çizdiği grafik . **48**
Şekil 4.30 : Alüminyum Gövdeli f-16 uçağı **48**
Şekil 4.31 : Germanyum Gövdeli f-16 uçağı **49**
Şekil 4.32 : F-16 uçağının önünde kaynak olması durumu **49**
Şekil 4.33 : F-117 uçağının önünde kaynak olması durumu **50**
Şekil 4.34 : F-16 uçağının arkasında kaynak olması durumu **50**
Şekil 4.35 : F-117 uçağının arkasında kaynak olması durumu **50**
Şekil 4.36 : F-16 uçağının önünde yerde kaynak olması durumu **51**
Şekil 4.37 : F-117 uçağının önünde yerde kaynak olması durumu **51**
Şekil 4.38 : İnsan kafası kesitinde elektromanyetik güç kaybı **52**
Şekil 4.39 : Erişkin, 10 yaş ve 5 yaş çocukta SAR değerleri **52**
Şekil 4.40 : LOS ve yerden yansıma durumunda kapsama alanı haritası **53**

ÇEŞİTLİ MALZEMELERİN YÜKSEK FREKANS SOĞURMA, GEÇİRGENLİK VE YANSITMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yapılan tez çalışmasında elektromanyetik kalkanlamanın (EK) özellikleri araştırılmış ve bazı maddelerin elektromanyetik kalkanlama etkileri (EKE) ölçülmüştür. Ölçüm işlemi Aaronia firmasının üretmiş olduğu DFG 4060 dalga jenaratörü ve HF 60105 spektrum analizörü kullanılarak yapılmıştır. Ölçümü yapılan maddeler; katkısız beton, kömür katkılı beton, köpük strafor katkılı beton, alüminyum folyo şeridi katkılı beton, gaz beton ve Bayburt taşından üretilen yapı malzemesi. Bayburt taşında 1.5 GHz'de 8 dB'e kadar kalkanlama elde edilmiştir. 1300 MHz'de gaz beton ile 9 dB kalkanlama etkisi elde edilmiştir. 5400 MHz frekansında ise alüminyum 5 dB kalkanlama etkisi göstermiştir. Ayrıca COMSOL Multiphysics yazılımında cam, tahta gibi diğer bazı yapı malzemelerin kalkanlama etkisi simüle edilmiştir ve 10 metre karelik bir binanın, kullanılan betonun iletkenliği kademeli artırılarak elektromanyetik kalkanlama etkisi gözlenmiştir. Dahası, kemik doku, kas doku, deri dokusu gibi dokularında elektromanyetik kalkanlama etkileri gözlenmiştir. Son olarak, hava araçlarının geometrik özellikleri ile ilgili kalkanlama etkileri ile ilgili bilgisayar ortamında geometrik optik (GO) benzetimi kullanılarak deney yapılmış ve geometrinin dalga saçılımında çok önemli olduğu saptanmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektromanyetik kalkanlama, materyallerin elektromanyetik kalkanlama etkileri, COMSOL

ANALYZING OF HIGH FREQUENCY ABSORBTION, TRANSMISSION AND REFLECTION PROPERTIES OF VARIOUS MATERIALS

SUMMARY

In this thesis study, the properties of electromagnetic shielding were investigated and the electromagnetic shielding effectiveness (ESE) of some materials were measured. Measurement was carried out using the DFG 4060 wave generator and HF 60105 spectrum analyzer produced by Aaronia Company. Substances measured; unadulterated concrete, coal added concrete, foam styrofoam added concrete, aluminum foil strip added concrete, gas concrete and Bayburt stone. Especially Bayburt stone has important findings in terms of being a substance whose electromagnetic properties have not been previously investigated. Bayburt stone shielding up to 8 dB at 1.5 GHz has been achieved. Shielding effectiveness of 9 dB was achieved with aerated concrete at 1300 MHz. At 5400 MHz frequency, aluminum showed 5 dB shielding efficiency. In addition, the shielding effectiveness of some other building materials, such as glass and wood, was simulated in the COMSOL Multiphysics software, and the electromagnetic shielding effectiveness of a 10 square meter building was gradually increased by increasing the conductivity of the concrete used. In addition, electromagnetic shielding effectiveness were observed in tissues such as bone tissue, muscle tissue, skin tissue. With computer aided simulation shielding efficiencies related to the geometric properties of aircrafts measured by an experiment was performed using the simulation of geometric optics (GO) and it was determined that geometry was very important in wave scattering.

Keywords: Electromagnetic shielding, electromagnetic effectiveness of materials, COMSOL

1. GİRİŞ

Günümüzde özellikle elektromanyetik kirliliğin artması, savunma sanayii ve casusuluk teknolijilerinin gelişmesiyle elektromanyetik kalkanlama oldukça önemli bir hale gelmiştir. Özellikle 5G teknolojisinin hayatımıza girmeye başlamasıyla halk sağlığı açısından endişeler oluşmuştur. 5G ve sağlık üzerine etkileriyle ilgili bazı araştırmalarda bu teknolojinin kansere neden olduğu ile ilgili bir bulguya rastlanmamıştır [1]. Elekromanyetik alanların vücudun kendi ürettiği ve dışarıdan da alınabilen serbest radikallerin hücreler üzerinde oluşturduğu oksidatif stresi artırdığı bunun ise kanser ve daha başka rahatsızlıklara neden olduğu ve Dünya Sağlık Örgütü'nün elektromanyetik alanları insan sağlığına kanserojen ihtimali olabilecek şekilde sınıflandırdığı bilinmektedir [2]. 5G alanın oluşturduğu endişler, alanın çok şiddetli olmasından yada 4 W/kg SAR değeri yani 1 °C doku ısınması değerini aştığından değil, çok yüksek puls etkisi oluşturduğundandır [3-4]. Tüm bu sağlık endişelerinden dolayı özellikle hastahane gibi yapıların sağlık açısından elektromanyetik kalkanlama uygulamalarıyla inşa edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Elektronik takip ve dinleme cihazları gibi bir takım karşı istihbarat çalışmalarının engellenmesi açısından elektromanyetik kalkanlama çalışmaları oldukça önemlidir. Nitekim, bazı çalışmalar dinlemeden de öteye geçmiş, duvar arkası görüntüleme noktasına gelmiştir [5].

Özellikle savunma ve stratejik öneme sahip yapıların elektromanyetik casusluk ve saldırılardan korunmasının yanı sıra hayalet uçak teknollojilerinde ve radar görünürlüğü düşük harp teknolojilerinde elektromanyetik kalkanlamanın çalışma sahasına girmektedir. Zira avcı uçaklar, bombardıman maksatlı hava araçları, multi rol hava araçları, insansız hava araçları için en kritik özellik gizliliktir [6]. Uçaklar, füzeler ve harp gemileri için radar görünmezliği; boyalar, kaplamalar ve kompozit malzemelerle sağlanabilir. İletken olmayan düşük yansıtıcılı dielektrik maddeler ve absorbe edici materyaller de radar görünmezliği konusunda kullanılmaktadır [7].

Ayrıca bu tür harp araçlarının fiziksel geometrik optik kurallarına göre dış tasarımının yapılması önem arz etmektedir. Dalganın frekansı yükseldikçe fiziksel olarak ışık benzetimi yapılmasıyla oluşturulan tasarımlar düşük radar izi konusunda oldukça önemlidir [8].

Yapılarda elektromanyetik kalkanlama, boyalarla, betona katkılama yapılarak veya saçıcılığı yüksek değişik materyallerle elde edilebilir. Özellikle yapılan deneyde ülkemizin önemli bir değeri olan Bayburt taşının kalkanlama özellikleri araştırılmıştır. Literatürde siyah karbonla katkılanmış beton, köpük straforla katkılanmış beton, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBFS) kullanarak yeni bir kompozit koruyucu malzeme, gözenekli maddelerle hazırlanan yapı malzemeleri, metal ızgara döşenmiş beton, grafit katkılı beton, çeşitli metal şerit katkılı beton gibi kompozitlerle çalışmalar bulunmaktadır.

Elektromanyetik kalkanlamanın en önemli alanlarından biri ise elektromanyetik girişim (EMI)'dir. Özellikle kritik haberleşme cihazları, uçaklar ve hassas elektronik ekipmanlarda elektromanyetik girişim önleme oldukça önemlidir. Kablosuz internet (WLAN) ile Bluetooh'un (BT) bir arada bulunduğu ev ve ofis ortamlarındaki girişim ise farklı bir çalışmaya konu olmuştur ve sonuç olarak BT ve WLAN arası uzaklık arttıkça sinyal iletim hızının arttığı saptanmıştır [9] ve bu yapılan çalışmadan da elektromanyetik kalkanlama yapılmış ev veya ofis ortamlarında birbirini etkilemeyen WLAN ve BT ağlarının daha iyi iletim yaptığı sonucu dolaylı olarak çıkarılabilir.

Elektromanyetik kalkanlama prensipleri, başta elektromanyetik girişimin engellenmesi, yapıların dinleme ve casusluk faaliyetlerine karşı korunması, ve özellikle Dünya Sağlık Örgütü'nün (DSÖ) ilan ettiği gibi kanserojen etkisi olabilme ihtimali olan elektromanyetiğin sağlığa karşı kötü etkilerinden insanları korumak amaçlı olmak üzere oldukça önemlidir. 5G teknolojisinin yaygınlaşması ile birlikte daha yüksek frekanslı dalgara maruz kalacak olan bütün canlılar için elektromanyetik kalkanlama oldukça önem arzetemektedir. Tezin amacı gün geçtikçe önemi daha artan elektromanyetik kalkanlama için kullanan malzemelerin etkisini saptamak, geometrik optik uygulaması ve diğer uygulamalarla bunu görselleştiren simülasyon uygulamaları yapmaktır.

2. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA İÇİN YAPI MALZEMELERİ

Literatürde birçok yapı malzemesinin kalkanlama etkiler incelenmiştir. İncelenen ilk makalede siyah karbonla katkılanmış çimentonun yansıtıcı etkisi ile kalkanlama etkisi ölçülmüştür [10]. Siyah karbonun kalkanlamada kullanılmasının nedenlerinden biri ucuz ve erişiminin kolay oluşudur. Bu çalışmada, karbon katkılama oranına göre kayıplar saptanmıştır. En iyi sonuç, %2.5 katkılama oranında -20 dB zayıflama olarak elde edilmiştir. %0.5 katkılama oranında en yüksek 18 GHz'de -15 dB zayıflama elde edilmiştir. %3 katkılama oranında ise en yüksek değer olarak 25 GHz'de -14 dB zayıflama elde edilmiştir. % 1.5 katkılama oranı ise en düşük kalkanlama performansını göstermiştir [10].

Başka bir çalışmada, EPS yani köpük straforla katkılama yapılan çalışmada kalkanlama etkisi ölçülmüştür [11]. Bu şekilde, kalkanlama etkisini artıran gözenekli bir yapı malzemesi elde edilmiştir. EPS köpük strafor katkılı kompozit gözenekli bir yapı oluşturduğu için gelen dalganın saçılmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda kütlece hafif olması bu malzemenin önemli bir özelliğidir. Örnek maddeler 20 mm kalınlıkta, EPS tanecikleri ise 1 mm büyüklüğünde olmak üzere katkısız beton, %40, %50 ve %60 EPS katkılama oranlarında çimento kompozitleri oluşturulmuştur. Ölçümler 8 GHz ve 18 GHz aralığında yapılmıştır. En yüksek kayıbı %60 katkılama oranı ile 18 GHz'de -16 dB olarak belirlenmiştir. En düşük değer katkısız betonda elde edilmiştir. 8 GHz ve 18 GHz aralığı boyunca -5 dB olmuştur. Frekans arttıkça katkılama oranı yüksek olan kompozitler daha iyi performansı göstermiştir [11].

Başka bir makalede, demir rafine işleminin bir yan ürünü olan öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBFS) kullanarak yapılan yeni bir kompozit üzerinde çalışılmıştır. Önerilen kompozit GGBFS malzemesinin imal edilmesinden sonra, önerilen yapının geçirgenliği, temel elektromanyetik malzeme özelliklerini elde etmek için rezonans boşluk yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Bir epoksi reçine kompozit malzemeye GGBFS eklendiğinde, geçirgenlik yaklaşık 1.5 oranında

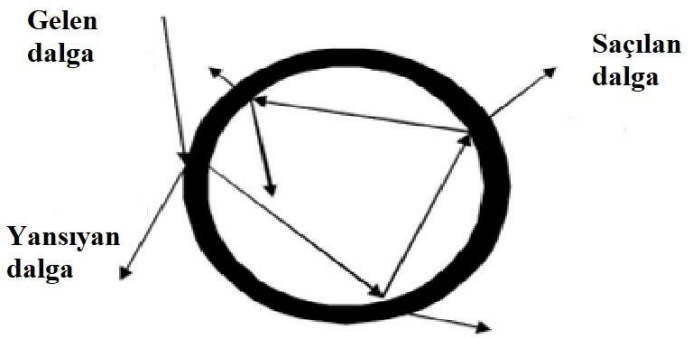
artmıştır. 6 ila 12 GHz arasındaki elektromanyetik iletim özelliklerini ölçülmüştür. Sonuçlar, % 30 GGBFS içeriği ve 2 mm kalınlık için numunenin kalkanlama etkisi seviyesinin 6 ila 12 GHz frekans aralığında yaklaşık 1.5 dB olduğunu göstermektedir. Ayrıca 5 mm kalınlığında bir örnek için 8.5 GHz'de 3 dB kalkanlama etkisi elde edilmiştir. Yapılan çalışma özellikle endüstriyel atık bir malzemenin geri dönüştürülerek kullanılması ve gelire dönüştürülmesi açısından önemlidir [12].

Granül yüksek fırın cürufu ile yapılan diğer bir çalışmada ise köpük beton cüruf ile katkılanmış ve katkılamaya doğru orantılı olarak kalkanlama etkisinin arttığı gözlenmiştir [13].

Başka bir çalışmada, elektromanyetik radyasyonu engellemek için gözenekli maddelerle bir çimento hazırlanmıştır. Bu çalışmada da gözenekli bir beton iç geometrisi elde edebilmek için köpük strafor kullanılmış ve 1.7 – 18 GHz arasında ölçümler yapılmıştır. Soğurma özelliklerinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Gözenekli maddenin geometrisi, katkılama oranı sonuçlara büyük ölçüde etki etmiştir. En düşük kayıp %10 köpük strafor katkılama oranı ile 5.6 GHz'de -22 dB olarak saptanmıştır [14].

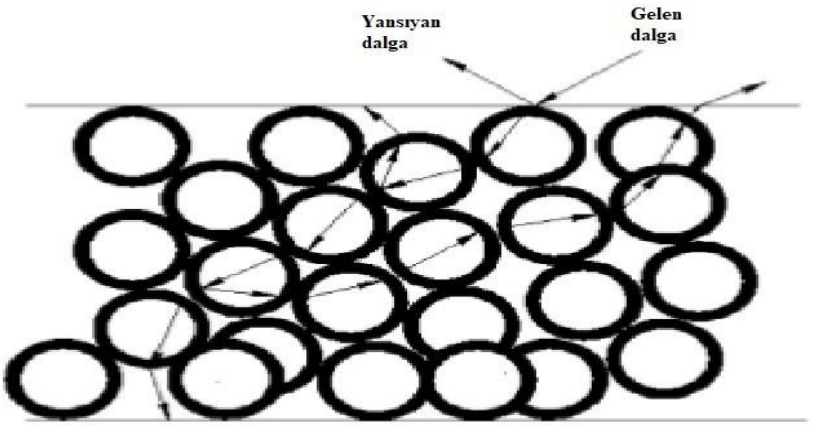
Kompozit beton hazırlanırken önce çimento ile su karıştırılmış daha sonra harcın içine srafor köpük katılmış daha sonra titreşim masasına alınmış ve sonrasında 28 gün kurutularak hazırlanmıştır. Beton kompozitlerinin hazırlanmasında kurutma aşamasının düzgün bir şekilde tamamlanması doğru sonuçlar alınabilmesi için oldukça önemli bir kilit noktadır [14].

Teorik olarak gelen dalganın karmaşık bir şekilde gözenekli madde içinde yansımalar ve saçılmalara uğrayarak zayıfladığı varsayılmakta ve gözenekli maddeler bu sebepten dolayı sıklıkla elektromanyetik kalkanlama uygulamalarında kullanılmaktadır [14]. Şekil 2.1'de tek bir taneciğe gelen dalganın yansıma, iç yansıma ve saçılma mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Taneciğe gelen dalganın durumu. [14]

Şekil 2.2'de birden çok tanecik yapılı kompozit bir malzeme içindeki dalganın çoklu yansıma mekanizması görülmektedir.

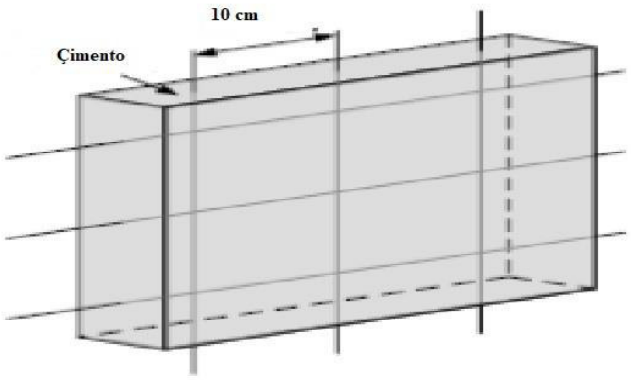


Şekil 2.2 : Malzeme içindeki dalga mekanizması. [14]

Şekil 2.2'den anlaşılacağı üzere gözenek sayısını artırmak veya kesit alanı sabitken gözenekleri küçülterek daha fazla gözenek sığdırmak çoklu saçılmalar ve yansımaları artıracak ve dalgayı zayıflatacaktır [14]. Ayrıca, çalışmada strafor köpük (EPS), perlit taşı ve kil taşı kullanılmıştır. Aynı katkılama oranı ve aynı tanecik çapında en iyi sonuç EPS strafor köpükten elde edildiği için köpük üzerine yoğunlaşılmıştır. Daha sonra soğurma özelliğini artırmak için çimento hem Strafor köpük hemde siyah karbonla katkılanmıştır. Oluşturulan 4 numune ile ölçümler yapılmıştır.Ölçümler 2 GHz ile 18 GHz arasında yapılmıştır. Her bir numune %50 EPS strafor köpük köpük katkılıdır ve 3mm kalınlıktadır. İlk numune sadece EPS strafor katkılıdır siyah karbon katkılama yapılmamıştır. İkinci numune %1 siyah karbon katkılı, üçüncü numune %2 siyah karbon katkılı, dördüncü numune ise %6 siyah karbon katkılıdır. En yüksek zayıflama performansı 5.6 GHz'de -22 dB olarak siyah karbon katkısız %50 EPS katkılı betonda elde edilmiştir. En yüksek karbon katkılı numune olan %50

EPS ve %6 siyah karbon katkılı numunede elde edilmiştir. Ayrıca gözeneklerin düzgün bir geometride olmasının soğurmayı artırdığı gözlemlenmiştir [14].

Metal ızgara yapısı için, 3D Moment Metodu MoM simülasyonları ve ölçümleri ile yapılan hesaplamaların sonuçları 30 MHz-1 GHz frekans aralığında karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Metal ızgara yapısı kalkanlama etkisi 200 MHz'in altındaki frekansta yaklaşık 20-40 dB aralığında bulunmuştur. 400 MHz'in altında 10-20 dB altında gözlemlenmiştir [15]. Yapılan çalışmada sembolik olarak metal ızgara ile çimentonun birleştirilmesinden oluşan kompozit beton Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 : Metal ızgarayla yapılan metal bloğu. [15]

Diğer bir çalışmada yapı malzemelerini genel manada incelemek amacıyla tuğla, klinker tuğlası, beton ve hücresel beton (Türkiye'de yaygın adıyla köpük beton) numunesi ile yapılmıştır. Ölçüm ekipmanı bir vektör network analizörü ve genişletilmiş tutucu ve kalibrasyon kitine sahip bir koaksiyel hat içerir. Numunelerin kalınlıkları: bir tuğla L = 7: 1 mm, bir klinker tuğla L = 8: 4 mm, bir beton L = 9 mm, bir hücresel beton L = 8: 3 mm olarak ölçümler yapılmıştır. 50 MHz ila 5 GHz frekans aralığı olarak seçilmiştir. Tuğla ve klinker tuğlanın bağıl geçirgenliği 3-5 arasında bulunmuştur. Imajiner kısım değerleri ise 0.3-0.5 arasındadır. Beton için ise en yüksek bağıl geçirgenlik değerlerinin gerçek kısım 5-8 arasında ve sanal kısım 0.4-0.65 olarak bulunmuştur. Ölçümler arasında hücresel beton en düşük değere sahip olmuştur [16].

Klinker tuğla, kırmızı tuğla, beton ve alçıpanı konu alan başka bir çalışma daha bulunmaktadır. 10 kHz-6 GHz arasında yapılan ölçümlerde düşük frekansta dalga

zayıflamasının az olduğu ve frekans yükseldikçe dalgaların daha fazla zayıfladığı görülmüştür. 1 GHz'de kayıp 1 dB civarındadır. 1 GHz'den 6 GHz'ye olan yüksek frekanslarda ise, kırmızı tuğla, klinker tuğla ve beton 3 dB civarında kayıba neden olmaktadır. Hücresel beton ve karton alçıda ise 2 dB ve altında kayıp oranları gerçekleşti [17].

İç mekanlarda bulunan değişik duvar ve kapı materyallerinin elektromanyetik dalgayı kalkanlaması ile ilgili çalışma da bulunmaktadır. 433 Mhz, 868 Mhz, 2.4 Ghz ve 5.0 Ghz'deki elektromanyetik dalganın ne kadar zayıfladığı araştırılmıştır. Araştırma bilgisayar ortamında yapılmış. Beton, tahta ve alçıpan duvar materyali olarak kullanılmıştır. Değişik duvar kalınlıklarında simülasyonlar yapılmıştır. (0.15m, 0.20m, 0.25m, 0.30m ve 0.40m). Beton için parametreler ε_r= 4 ve σ = 0.05 S/m, alçıpan için ε_r = 2.3 ve σ = 0.03 S/m. Nem içeriğinin etkisi nedeniyle odunun elektromanyetik özellikleri önemli ölçüde etkilenmekte ahşap için seçilen parametreler ε_r = 4.2 ve = 1.0 x 10^{-5} S/m' dir. Sonuç olarak duvarlar tahtadan yapılınca tahtanın düşük iletkenliğinden dolayı kalınlık önemsiz olmuştur ve sonuç sadece frekansa göre değişmiştir frekans arttıkça kayıp artmıştır. Duvar, betondan yapılınca hem kalınlık hemde frekans sonuçları etkilemiştir. Alçıpanda da sonuç betonla benzer olarak bulunmuştur. Ancak betonun etkisi daha çok olmuştur. Alçıpan ve betonun kalınlığını artırınca sinyalin zayıflamasının nedeni iletkenliklerinin tahtadan daha yüksek olmasıdır [18].

Biyolojik bir canlı olarak insanların iç mekanlarda dolaşmasından dolayı oluşan kalkanlama etkisini konu alan bir çalışma da yapılmıştır. Deney simülasyon ortamında yapılmış olup kullanılan vericiler tüm yönlü olarak belirlenmiştir. 2.45 GHz transmitter ve -70 dB hassaslıkta 15x25 m^2'lik bir apartman dairesi için deney yapılmıştır. Aynı deney 433 Mhz verici kullanılarak tekrarlanmıştır. 433 Mhz ile daireyi sadece 2 vericiyle kapsama alanına alabilirken 2.45 Ghz ile 5 verici kullanılmış ve 433 Mhz'de daha iyi sonuç alınmıştır. Bluetooth frekansı olan 2.45 GHz ile 5 transmitter -70 dB alıcı hassaslığı sağlanırken, 2 ve hatta 1 transmitterle radyo frekansında daha iyi sonuç alınmıştır. En önemli bulgu olarak iç mekan ortamlarında dolaşan insanların dalgaları zayıflattığı gözlemlenmiştir [19].

Atık çiplerle katkılanmış çimentonun soğurma kapasitesi ve elektromanyetik koruma özelliklerini gösteren bir çalışma da bulunmaktadır. Hazırlanan çimento harcında

inşaat kumu yerine geri dönüştürülmüş atık elektronik çipler kullanılmıştır ve üretilen maddelerin elektromanyetik kalkanlama etkisi, soğurma kapasiteleri ve dielektrik sabitleri ölçülmüştür. 7 farklı çimento kompoziti kullanılmıştır. Ezilmiş doğal kum %10, %30, %40 ve %60 oranlarında atık demir çiplerle değiştirilmiştir. Tüm hazırlıklar EN 196-1 avrupa standardına göre yapılmıştır. Harçların kuruması 24 saat beklenmiştir. Çalışmada referans numune olarak kullanılan katkılanmamış beton 7 dB elektromanyetik kalkanlama değerine sahipken (%60) metal çiple katkılanmış madde 18 dB elektromanyetik kalkanlama değerine sahip olarak bulunmuştur [20].

Submikron grafit partikülleri ile hazırlanmış ve bir çimento macunuyla yapılan bir çalışmadaysa 1 GHz frekansta %0.92 katkılama oranında 22 dB kadar kalkanlama etkisine ulaşılmıştır [21].

İletken fiber katkılamalar ile yapılan çalışmalar da oldukça önemlidir. Yapılan bir çalışmada %72 çelik fiber katkılamada 1.5 GHz'de 70 dB kalkanlama etkisi elde edilmiştir. Çelik fiberlerin eni 8 mikro metre ve boyu 6 mm'dir. Kalkanlama etkisi öncelikli olarak yansıma olarak geçekleşmiştir. Materyal 16 ohm direnç göstermiştir. Çimento harcındaki kum varlığının kalkanlama etkisini etkilemediği gözlemlenmiştir. Karşılaştırma olması açısından paslanmaz çelik bir parça 1.5 GHz'de 78 dB kalkanlama etkisine sahiptir. 8 mikro metre eninde 6 mm boyunda 304 paslanmaz fiber çelik %0.72 katkılama oranıyla 1.5 GHz'de 70 dB kalkanlama etkisine sahiptir. Materyalin 16 ohm/cm direnci var. Katkılama oranı %0.36 olduğunda bile 1.5 GHz'de 58 dB kalkanlama etkisine sahiptir. Direnci ise 57 ohm/ cm. 1 GHz'de kalkanlama etkisi daha düşüktür. %0.72 katkılama oranında kalkanlama etkisi 60 dB'dir [22].

Grafitle yapılmış deneylerde 10-40 dB kalkanlama etkisi elde edilmiştir. Esnek grafit denen bir maddeyle 101-129 dB kalkanlama etkisine ulaşılmış. Bakır ve nikelden bile iyi sonuçlar elde edilmiştir. Diğer maddelerden çok daha ucuz olan kömür de bir alternatif olarak gözükmektedir. 1-1.5 GHz aralığında 49-51 dB sonuçlar alınmıştır. Kalkanlamada, çimentoyu yaparken parçacık şeklinde iletken koymak yerine karbon fiber gibi lifli yapılar koymak, bir ağ oluşturduğu için daha etkilidir. %0.5 karbon fiber katkılamasıyla 28-30 dB kalkanlama etkisi elde edilmiş Metal fiber iletken bir ağ oluşturduğu için metal tozundan daha avantajlıdır. Chung'ın bir çalışmasında

metal kağıtlarla katkılanan çimento kullanılarak 20-40 dB kalkanlama etkisi elde edilmiştir. Elektromanyetik dalgayı soğuran maddeler elektrik, manyetik ve dielektrik kaybına göre üç gruba ayrılır. Çelik fiberle yapılmış çalışmada 9.8 dB tepe değeri elde edilmiş fakat külle yapılan çalışmalarda çok başarılı olunmamıştır [23].

Ayrıca bio kompozitlerlede ilgili çalışmalar da bulunmaktadır. Bu kompozitlerde epoksi reçine içine hapsedilmiş biyolojik materyallerle iletken materyaller belirli formüllerde harmanlanarak kompozitler oluşturulmuştur [24]. Özellikle bahçe ortamında tarımsal lifi için üretilen uzun boylu ve uyuşturucu çiçek çıkarmayan kenevir türlerinin elektromanyetik radyasyona karşı kullanılmaktadır.

3. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA PRENSİPLERİ

3.1 Elektromanyetik Kalkanlama Materyalleri

3.1.1 Metaller

Bu materyallerin kullanılmasının esas sebebi elektriği çok iyi iletmeleridir. İletkenliği yüksek maddelerin elektromanyetik dalgaları yansıtma özelliğinden yararlanılmaktadır. İletken materyaller yapılarda genellikle çimento ile harmanlanarak oluşturulan betonlarda kullanılmaktadır [25]. Çizelge 3.1'de bazı metallarin iletkenlikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 : Bazı metallerin iletkenlikleri. [25]

İletken Materyal	İletkenlik σ [S/m]
Gümüş	$6.3.\ 10^7$
Bakır	$5.9.\ 10^7$
Endüstriyel Bakır	$5.8.\ 10^7$
Altın	$4.5.\ 10^7$
Alüminyum	$3.8.\ 10^7$
Endüstriyel Alüminyum	$3.7.\ 10^7$
Kurşun	$4.8.\ 10^6$
Fosfor Bronz	$4.\ 10^6$
Alüminyum Nikel Bronz	$2.6.\ 10^6$
Kalay	$9.2.\ 10^6$
Pirinç	$1.5.\ 10^7 - 3.10^7$
Çelik	5.10^6 - 10^7

İletken materyal olarak metaller kullanılması durumunda özellikle nemli ortamlar ve deniz ortamlarında korozyonlara karşı dayanıksız olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Genellikle kalkanlamada kullanılan materyaller; demir, bakır, krom, nikel, kurşun, alüminyum, gümüş, paslanmaz çelik, magnezyum metal folyolar, karbon veya grafit kompozitleri. Ancak bu materyallerin kullanımında bazı sorunlarla karşılaşılabilir. Örneğin karbon/grafit oldukça kırılgan materyallerdir, bazı materyaller paslanmaya karşı dayanıksızdır, paslanmaz çelik gibi paslanmaya

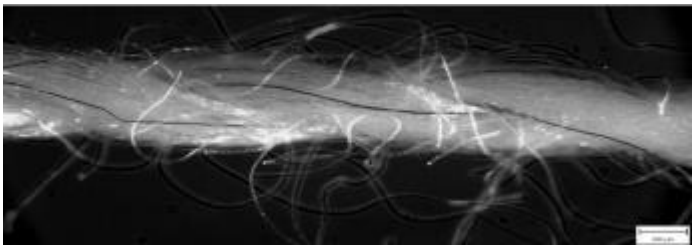
dayanıklı materyaller ise oldukça ağırdır. Magnezyum kullanımı oldukça hafif olduğu için avantajlıdır [26].

3.1.2 Metal folyolar

Folyoların bakır folyolar, alüminyum folyolar, nikel folyolar, paslanmaz çelik folyolar gibi çeşitleri kalkanlamada kullanılmaktadır. Dekoratif ve diğer alanlarda üretilen folyolar haricinde özel olarak elektromanyetik uyumluluk üzerine çalışan şirketlerin elektromanyetik kalkanlama (EK) amaçlı üretmiş oldukları folyolar da bulunmaktadır. Bu folyolar hafif oluşları, paslanmaya dayanıklı oluşlarıyla öne çıkmaktadırlar [27].

3.1.3 Elektromanyetik kalkanlama kumaşları

Metal folyolara benzer olarak özellikle elektromanyetiğe çok fazla maruz kalmanın kötü etkilerinden insanları korumak için veya endüstrinin değişik alanlarında kullanılmak için EK özelliği olan kumaşlarla ilgili bir çok çalışmada bulunmaktadır. Bu kumaşlar tamamen metal ipliklerle, metal-pamuk veya metal-diğer tekstil iplikleri ile örülme usulü ile üretilebilmektedir [28]. Yapılan bir çalışmada üretilen kompozit ipliğin mikroskoptaki görüntüsü Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : 9 µm çapında %5 paslanmaz çelik ipliği katkılı kompozit tekstil ipliğinin mikroskop altındaki görüntüsü. [28]

3.1.4 Gözenekli materyaller

Materyaller özellikle hem gözenekli hem de iletkenliği yüksek olursa gelen elektromanyetik dalgaya çoklu yansımalar yaptırarak gelen dalganın saçılıma uğramasına ve gözenekler içinde soğurulmasına neden olmaktadır. Bu tezde, gözenekli materyal olarak EPS strafor, gaz beton ve Bayburt taşı kullanılmıştır. Günümüzde siyah karbon katkılanmış köpük, nanoteknoloji mamülü özellikle radar gizliliği yani hayalet teknolojilerinde kullanılan soğurucu ve saçıcı teknolojiler

oldukça önemli çalışma sahalarıdır [29]. Şekil 3.2'de üretilen gözenekli materyal görülmektedir.



Şekil 3.2 : 0.5-3.0 mm boyutlarında gözenekleri olan ve hacimce %86-%90 gözenekli titanyum köpük. [29]

3.1.5 Elektromanyetik kalkanlama boya ve kaplamaları

Yüksek frekanslı ve alçak frekanslı elektromanyetik radyasyona karşı EK boyaları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu boyalar hem iç cephe hem de dış cephelere uygulanabilmektedir. Boyaların üretiminde insan sağlığına zararlı toksik maddelerin olmaması oldukça önemlidir. Bu boyalar telefonların yaydığı radyason, bilgisayarların yaydığı radyasyon, baz istasyonları, enerji nakil hatları ve trafolar, kablosuz internet modemleri ve diğer elektromanyetik radyasyon kaynaklarına karşı etkilidir.

Bu tarz boyaların yapılarda uygulanmasında dikkat edilecek olan duvarların her yerini açık bırakmadan eşit kalınlıkta boyama ve boyayı mekanik etkilerden korumak için tam bir gün kurumasını bekledikten sonra ikinci bir kat daha boya uygulamaktır. Bu boyalar herhangi bir su veya harici materyalle karıştırılmadan uygulanmalıdır.

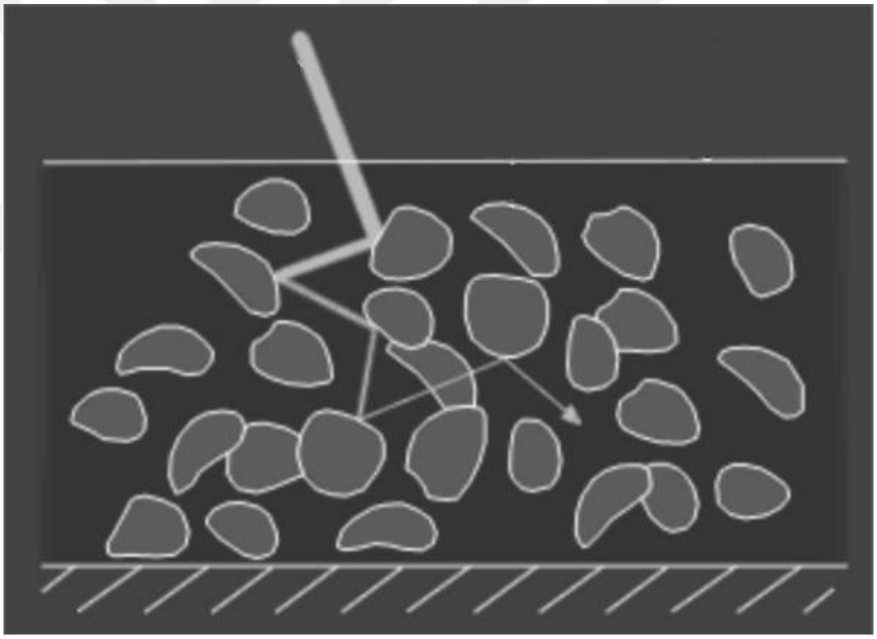
Boyanın üretici markasına göre değişmek üzere tek katman boyadan 30-40 dB EKE elde edilebilirken, iki katman yapılmış boya uygulamalarında 35-45 dB EKE değerlerine çıkılabilmektedir.

Boyaların özelliği, uygulamadan önce çok iyi bir sıvı iletken olarak üretilmeleridir. Duvara uygulandıktan ve kuruduktan sonra da bu iletkenliği korurlar. Çok iyi iletken olmalarından yararlanılarak elektromanyetik dalgayı tamamen yansıtmaları

prensibinden yararlanılmaktadır. İçerik olarak gümüş, bakır ve nikel katkılı olmak üzere üç tip boya bulunmaktadır. Ayrıca bazı markaların sprey boyalarıda bulunmaktadır

Bazı elektromanyetik koruyucu kaplamalar ise elektromanyetik dalgayı sadece yansıtmayı amaç edinmez. Nanometre boyutunda iletken tanecikler ile kaplamanın içerisinde çoklu yansımalar yaparak saçılma ve soğurma prensibini kullanırlar. Bu teknoloji sıradan yapı boyalarına göre oldukça üstün bir teknolojidir ve savunma sanayiinde ve hayalet teknolojilerinde kullanılabilmektedir [30].

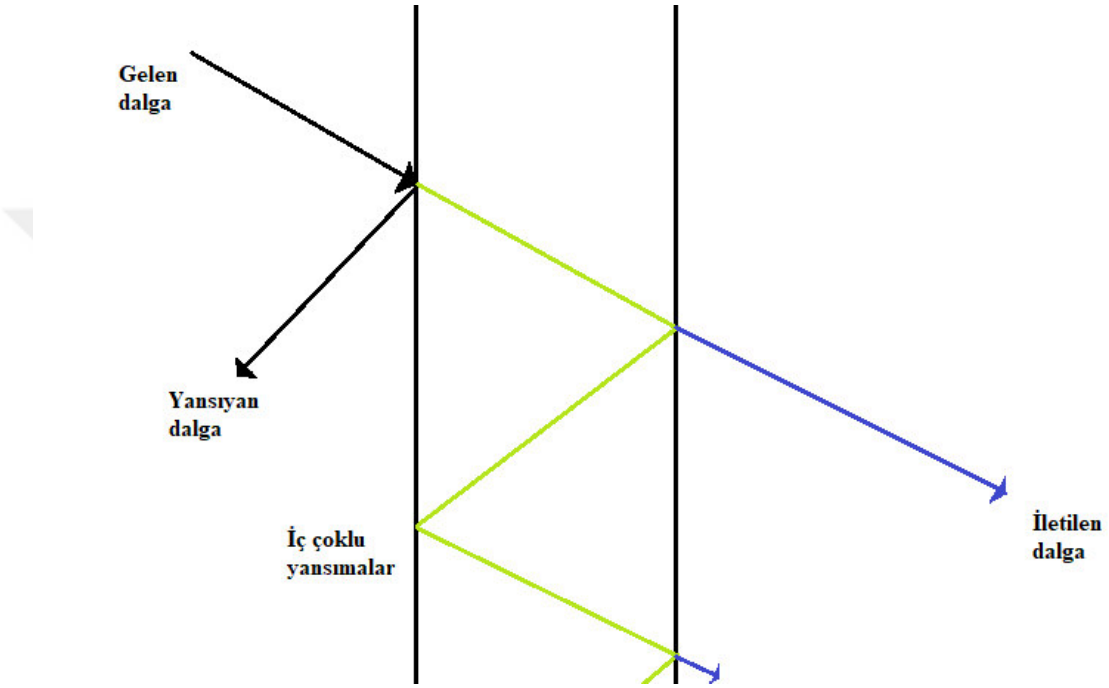
Çoklu yansımalar ile dalganın zayıflaması ve ısı enerjisine dönüşmesi bir kısmının ise saçılıma uğraması ana prensiptir [30]. Şekil 3.3'te içeriğinde karbon partikülleri bulunan kaplamada dalganın soğurulması gösterilmektedir.



Şekil 3.3 : Gelen dalganın kaplanmadaki karbon partiküllerinde çoklu yansıma yapması ve zayıflayarak soğurulması. [31]

3.2 Elektromanyetik Kalkanlamanın Matematiksel Açıklamaları

Elektromanyetik kalkanlama; yansıma, kırılma, çoklu iç yansımalar ve kırınım prensiplerine dayanır. Dalga enerjisi çoklu yansımalarla zayıflamaktadır. Bir miktarı ısı enerjisine dönüşmektedir. Kırınıma uğrayan dalgalar her kırınımda yol kaybına dolayısıyla zayıflamaya uğrar. İyi bir soğurucu materyal dalgayı sonsuz iç yansıma döngüsüne sokmaktadır. Şekil 3.4'te bu mekanizma görülmektedir.



Şekil 3.4 : Yansıma mekanizması.

Denklem 3.1'de gelen, yansıyan ve iletilen dalgaların durumları verilmiştir. 3.2 numaralı denklemde ise gelen ve yansıyan elektrik alanların denklemleri verilmiştir. 3.3 numaralı denklem κ dalga vektörünü göstermektedir. β faz sabiti değeri κ değerine bağlıdır.

$$E_{0I} + E_{0R} = E_{0T} \tag{3.1}$$

$$E_{0T} = \left(\frac{2}{1+\beta}\right) E_{0I} \tag{3.2}$$

$$\kappa^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon \tag{3.3}$$

$$\beta = \frac{\mu_1 \upsilon_1 \kappa_2}{\mu_2 \omega} \tag{3.4}$$

3.1 numaralı denklemde E_{0I} gelen elektrik alan, E_{0R} yansıyan elektrik alan ve E_{0T} iletilen elektrik alandır. 3.2 numaralı denklemde β faz sabitidir. 3.3 numaralı denklemde κ değeri dalga vektörüdür.

Mükemmel bir iletken için $\sigma \rightarrow \infty$ ise $\kappa \rightarrow \infty$ olur. Böylece β değerinin de sonsuza yaklaşmasıyla $(\frac{2}{1+\beta})$ ifadesi, sayı bölü sonsuza dönüşür ve bu da sıfıra eşittir. Böylece $E_{0T} = 0$ olur. Yani iletilen elektrik alan sıfır olur.

$E_{0I} = E_{0R}$ yani mükemmel iletken durumundayken optikteki ayna gibi davranır ve tamamen yansıtıcı olur [32].

3.5 numaralı denklemde deri kalınlığı formülü verilmiştir. 3.6 numaralı denklemse zayıflama sabitidir.

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{3.5}$$

Denklem 3.5'te α zayıflama sabiti, μ manyetik geçirgenlik katsayısı, σ değeri ise iletkenliktir.

$$\alpha = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \tag{3.6}$$

Denklem 3.6'da f frekans, μ manyetik geçirgenlik katsayısı, σ değeri ise iletkenliktir. δ uzaklığı iletkenin deri kalınlığı veya nüfuz derinliği olarak adlandırılır. Yüksek frekansta iyi iletkenlerin deri kalınlığı veya nüfuz derinliği sıfıra yaklaşır. Yani bir kalkanlama materyalinin aynı zamanda iyi bir soğurma yapabilmesi için önce gelen dalganın materyalin içine girmesi gerekir [33].

Shielding Effect yani kalkanlama etkisi yansıma, soğurma ve çoklu yansıma kaybı olmak üzere 3 kısımdan oluşur. Shielding effect yani kalkanlama etkisi SE_{dB} olarak ifade edilir. Denklem 3.7' de matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$SE_{dB} = 20\log|Ei/Et| = R_{dB} + A_{dB} + M_{dB} \tag{3.7}$$

3.7 numaralı denklem SE_{dB}'nin R_{dB} yani yansıma kaybı, A_{dB} soğurma kaybı ve M_{dB} çoklu yansıma kaybının toplamı olarak ifade edilmiştir ve denklemde E_i ve E_t gelen ve iletilen dalgaları ifade etmektedir.

R_{dB}, kalkanın yüzeyinde yansıma sebebiyle olan kayıptır. Deklem 3.8'de gösterilmiştir.

$$R_{dB} = 106 + 10\log(\frac{\sigma_r}{f\mu_r}) \tag{3.8}$$

Denklem 3.8'de σ_r yansıtıcı için iletkenlik ve μ_r manyetik geçirgenliktir.

A_{dB}, kalkanda soğurulan elektrik alan kaybını ifade etmektedir. Denklem 3.9'da gösterilmiştir.

$$A_{dB} = 20\log(\exp(\frac{-t}{\delta})) \tag{3.9}$$

Denklem 3.9'da t kalınlık, δ ise nüfuz derinliğidir.

M_{dB}, kalkanın içindeki çoklu yansımalardan oluşan kaybu ifade etmektedir. Denklem 3.10'da gösterilmiştir.

$$M_{dB} = 20\log(1 - \exp(\frac{-2t}{\delta})) \tag{3.10}$$

Denklem 3.10'da t kalınlık, δ ise nüfuz derinliğidir.

Denklem 3.11'de radar menzil formülünün duvar kaybı eklenmiş hali görülmektedir. Bu formül duvar arkası görüntüleme sisteminde kullanılmıştır [34].

$$R^4 = \frac{P_A G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 kTBN_f LW(SNR)} \tag{3.11}$$

Denklem 3.11'de P_A, Verici antenin gücü G_t, Verici anten kazancı G_r, Alıcı anten kazancı σ, Hedef radar kesit alanı λ, Dalga boyu L, Sistem kaybı W, Duvar kaybı kT, Gürültü gücü yoğunluğu N_f, Gürültü katmanı B, Bant genişliği SNR, Minimum tespit edilebilir sinyal gürültü oranını ifade etmektedir.W duvar kaybını da formüle dahil edilmiş bir halde alıcı anten ile verici antenin menzil hesabını göstermektedir [34].

Denklem 3.12'de SAR yani özgül soğurma oranının formülü verilmiştir.

$$\text{SAR} = \sigma \frac{|E|}{\rho} \tag{3.12}$$

Denklem 3.12'de σ materyalin iletkenliği, E elektrik alan, ρ ise özkütleyi göstermektedir. SAR'ın birimi (W/kg)'dir. SAR'ın İngilizce açılımı Spesific Absorbtion Rate yani özgül soğurma oranıdır. Cep telefonları ve MR cihazları gibi bazı elektromanyetik radyasyon kaynaklarının dokuda soğurulan miktarını kısıtlamak amacıyla ülkeler ve kurumlar tarafından belirli sınırlar arasında tutulması amaçlanmaktadır. Amerika Birleşik Devletlerinde SAR değeri 1 g için 1.6 W/kg iken Avrupa Birliği mevzuatına göre 10 g için 2.0 W/kg'dir.

Aşağıdaki denklemlerde R yatay ve dikey kutuplanma için yansıma katsayıları olup aşağıda verilmiştir;

$$R_s = \frac{\sin(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_r - cos^2(\varphi)}}{\sin(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_r - cos^2(\varphi)}} \tag{3.13}$$

$$R_h = \frac{\varepsilon_r \sin(\varphi) - \sqrt{\varepsilon_r - cos^2(\varphi)}}{\varepsilon_r \sin(\varphi) + \sqrt{\varepsilon_r - cos^2(\varphi)}} \quad (3.14)$$

Yukarıdaki denklemlerde geçen φ yansıma açısı, ε_r bağıl elektrik geçirgenlik sabiti, s yatay kutuplanma ve h dikey kutuplanmadır. Mükemmel iletken yüzeylerde φ ve s 1, h ise -1 kabul edilmektedir.

Yukarıdaki denklemlerde geçen $\widehat{\epsilon_r}$ bağıl elektrik geçirgenlik sabiti aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır.

$$\widehat{\epsilon_r} = \epsilon_r - j60\sigma\lambda \quad (3.15)$$

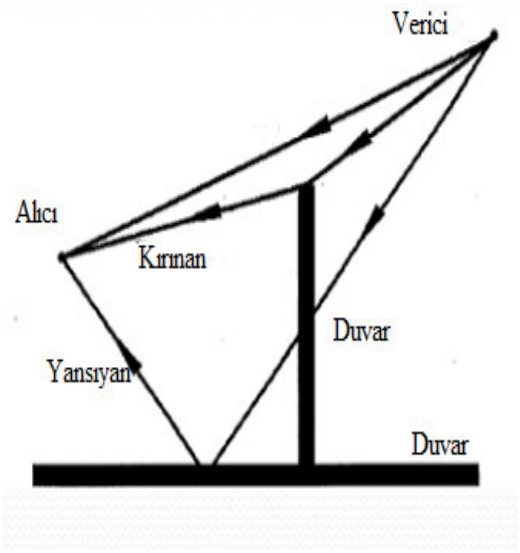
Yukarıdaki denklemde σ iletkenlik, λ ise dalga boyudur. σ arttıkça yansıma katsayıları 1 veya -1' yaklaşır ve gelen dalganın yansımasına sebep olur.
Aşağıdaki şekilde bu prensiplerden yola çıkarak yapılmış bir EK iletken kapağı görülmektedir.



Şekil 3.5 : EMI önlemek için EK kapağı.

EMI'yi önlemek için işlemci gibi hassas ekipmanlarda şekil 3.5'teki gibi EK kapakları kullanılır.

Şekil 3.6'te kapsama alanı modellenmesinde vericiden alıcıya giden kırınan ve yansıyan ve LOS durumunda giden elektrik alanlar görülmektedir.



Şekil 3.6 : LOS, kırınan, ve yansıyan elektrik alan.

Denklem 3.16'da engel arkasındaki elektrik alan formülü verilmiştir. Denklem 3.17'de kırınım katsayısı ve denklem 3.18'de yayılma faktörü formülleri verilmiştir.

$$E = [E_i D]A(s)e^{-jks} \tag{3.16}$$

Denklem 3.16'da A yayılma faktörü, D kırınım katsayısı, E_i gelen elektrik alandır.

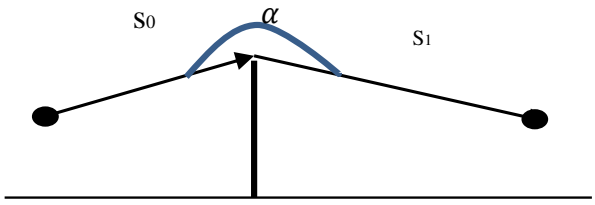
$$D(\alpha) = -\frac{e^{-j\pi/4}}{2\sqrt{2\pi k}\cos(\alpha/2)}F[x] \tag{3.17}$$

Denklem 3.17'de F fresnel fonksiyonu, α kırınım açısıdır.

$$A(s) = \sqrt{\frac{s_0}{s_1(s_1+s_0)}} \tag{3.18}$$

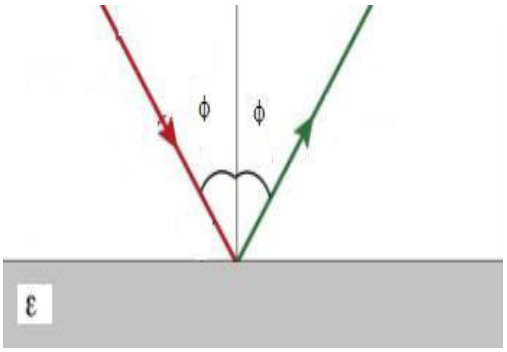
Denklem 3.18'de s'ler uzaklık parametreleridir.

Şekil 3.7'de kırınım olayı ve uzaklık parametreleri görünmektedir.



Şekil 3.7 : Kırınım olayı.

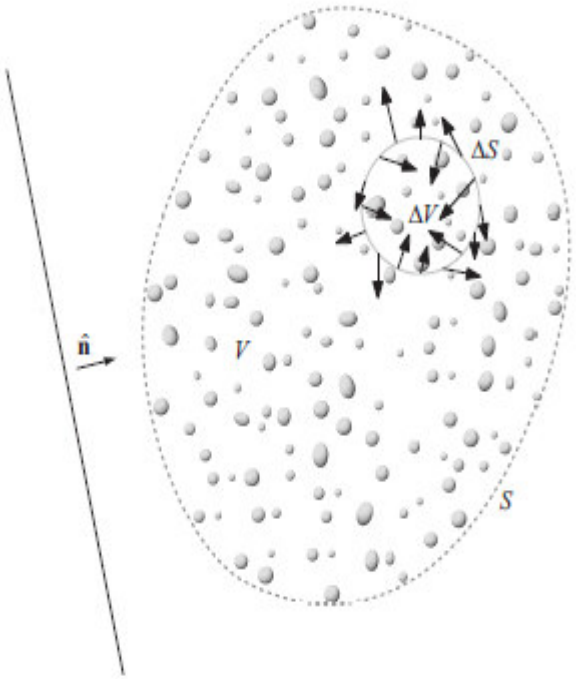
Şekil 3.8'de GO'e göre yansıma olayı görünmektedir. GO'de ayna gelen ışını geldiği açıyla yansıtır.



Şekil 3.8 : Yansıma olayı.

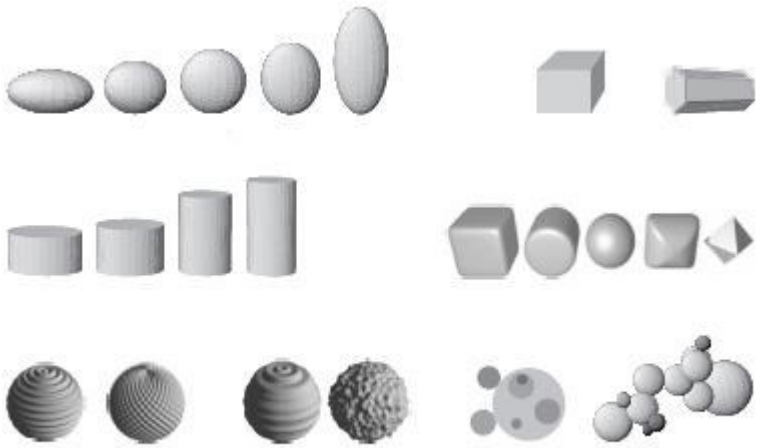
Kentsel haberleşme senaryolarında vericiden çıkıp alıcı üzerinde gelen, kırınan ve yansıyan tüm ışınlar saptanır. Bu ışınlar üzerinden gelen elektrik alan şiddetleri toplanarak alıcı üzerindeki toplam alan hesaplanır.

Şekil 3.9'de materyal içindeki yansıtıcı partiküllerin oluşturduğu saçılma görülmektedir.



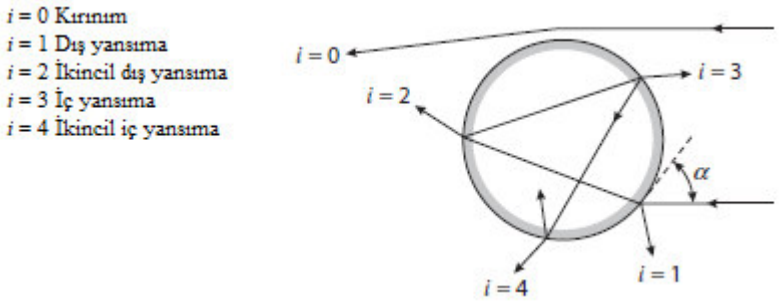
Şekil 3.9 : Materyal içinde saçılma olayı. [34]

Şekil 3.10'da çeşitli yansıtıcı partikül geometrileri verilmiştir. Her partikülün saçıcılığı kendi geometrisine göre değişmekte ve bu da soğurma etkisinde değişikliğe sebep olmaktadır. Özellikle piramit yapılı partiküller GO yansıma kurallarından dolayı yüksek saçıcılık performansı göstermektedir [35].



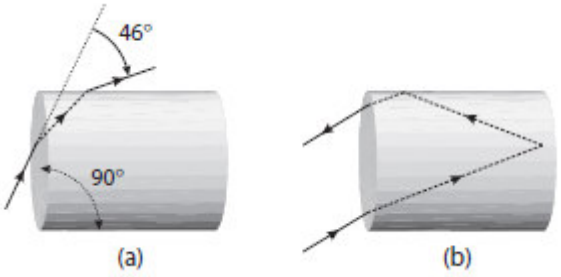
Şekil 3.10 : Saçıcı partikül parçacık geometrileri. [34]

Şekil 3.11'de küresel bir partiküle gelen ışın durumları görülmektedir. Işın 5 ayrı duruma uğramaktadır.



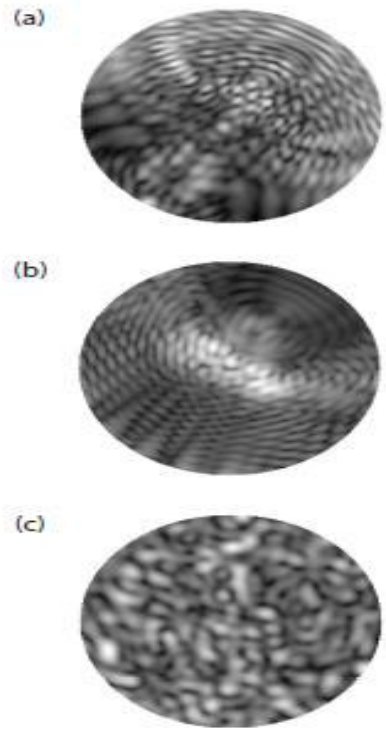
Şekil 3.11 : Partiküldeki ışın mekanizmaları. [34]

Şekil 3.12'de silindirik bir partiküle GO'ye göre gelen ışınınların izlediği yollar görülmektedir.



Şekil 3.12 : Silindirik partikülde ışın mekanizmaları. [34]

Şekil 3.13'de silindirik partikül, küresel partikül ve çoklu partikül kümesinini oluşturduğu saçılma paterni görülmektedir. Çoklu partiküllerin çok daha iyi performans gösterdiği saptanmıştır [35].



Şekil 3.13 : (a) Silindirik partikül, (b) küresel partikül, (c) çoklu partikül kümesi elemanlarının saçılma paterni. [35]

Şekil 3.13' te çoklu partiküllerin oluşturduğu saçılma paterninden ne kadar iyi bir soğurucu karakteristik sergileyeceği açıkça anlaşılmaktadır.

4. DENEY VE SİMÜLASYONLAR

Bu bölüm iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda kendi hazırladığımız numunelerin kalkanlama etkisi incelendi. İkinci kısımda ise Elektromanyetik simulasyon yazılımı ile elde ettiğimiz sonuçlar paylaşıldı.

4.1 Deneysel Çalışmalar

Deneyde AKÇANSA fabrikasının üretmiş olduğu CEM I 42,5 R PORTLAND ÇİMENTOSU kullanılmıştır. Katkılamalar, köpük strafor, alüminyum folyo şeridi ve kömür tozu materyalleriyle yapılmıştır. Köpük strafor taneciklerinin her biri küresel ve 2.6 mm çapındadır. Alüminyum folyo şeritleri ise 3 mm en 10 cm uzunluktadır. Köpük strafor ve kömür tozunun katkılama oranları %30 olarak belirlenmiştir. Beton harcının formülü 1 ölçü çimento, 1 ölçü inşaat çakılı ve 3 ölçü inşaat kumudur. Katkılanan harçlar numunelerin hazırlanması için 10 cm * 10 cm * 1 cm' lik hazırlanan kalıplara dökülmüş ve betonun kurutulması için 3 gün boyunca güneşte bekletilmiştir. Ayrıca gaz beton, Bayburt taşı ve karşılaştırma yapmak açısından 1.5 cm kalınlıkta 10 cm * 10 cm ölçülerde paslanmaz çelik bir blok kullanılmıştır. Bayburt taşının ölçüleri ise 1.5 cm kalınlıkta ve 29 cm * 29 cm ölçülerindedir. Yeşil Bayburt taşı ~%80 aluminosilikat içeren, bunun yanı sıra az oranlarda CaO, Fe2O3, MgO gibi bileşenlere sahip bir volkanik tüftür. Üretilen kaplama malzemesi, %20 yeşil Bayburt taşı, %20 mikronize kireçtaşı ve alkali-aktivatör olarak bilinen NaOH ve Na2SiO3 ile ortam koşullarında üretilmiştir. Kaplama malzemesinde hacimce %2 polipropilen lif bulunmakta olup eğilme ve darbe etkilerine karşı güçlendirilmiştir. Yaklaşık 15 dk içinde katılaşabilen bu malzemenin 1 günlük basınç dayanımı 56 kg/cm2 (5.6 MPa) olarak ölçülmüştür. Ayrıca referans olması bakımında bir numunede katkısız beton bulunmaktadır. Numuneler Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 : Oluşturulan beton kompozitleri kalıba dökülmüş halde.

Ölçümlerde DFG 4060 RF dalga jenaratörü ve spectran HF 60105 spektrum analizörü kullanılmıştır. Şekil 4.2'de kullanılan dalga jenaratörü ve Şekil 4.3'de spektrum analizörü görülmektedir. Spektrum analizörünün frekans aralığı 900 MHz ile 9.4 GHz aralığındadır.Yapılan ölçüm frekans aralığı ise 900 MHz ile 6 GHz aralığındadır. Hem RF dalga jenaratörü hemde spektrum analizörünün antenleri directional antendir [36].



Şekil 4.2 : DFG 4060 dalga jenaratörü.

Şekil 4.2'de görülen spektrum analizörü seyyar bir analizördür. İstenilen tipte antenle bağlantısı yapılabilmektedir. Dalga jenaratörü ise aparat yardımıyla USB'den bilgisayara bağlanmış ve MCS Spectrum Analyzer yazılımı yardımıyla ölçümler alınmıştır.



Şekil 4.3 : Spectran HF 60105 spektrum analizörü.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te deney düzenekleri görülmektedir. Alıcı ve verici arasına numuneler koyularak ölçümler yapılmıştır. Alıcı USB kablo ile bilgisayara bağlanmış ve üretici firmanın yazılımı yardımıyla değerler okunmuştur.



Şekil 4.4 : Bayburt taşı deney düzeneği.



Şekil 4.5 : Çelik blok deney düzeneği.

Çalışmada 1 cm, 1.5 cm, 2 cm ve 3 cm kalınlıklı numuneler kullanılarak yüksek frekans elektromanyetik dalga kalkanlama etkileri araştırılmıştır. Öncelikle, alıcı ve verici antenler arası boş bırakılmış ve ölçümler yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Şekil 4.4 ve şekil 4.5'te görüldüğü gibi antenlerin dışı plastik aksam olduğu için materyalle temasında herhangi bir sakınca bulunmamaktadır.

Ayrıca ölçüm yapılan yüzeyler tamamen yalıtkandır.

Ölçümlerin yapıldığı ortamda herhangi bir faraday kafesi yoktur ve fabrika ortamı olduğu için yüksek akımla çalışan motorlar ve elektronik aletler fabrika içerisinde bulunmaktadır. Ayrıca ortamda cep telefonları ve civarda bulunan diğer telsiz ve baz istasyonlarıda mevcuttur.

Ölçümler yapılmadan önce cihazların düzgün çalışıp çalışmadığı dikkatlice kontrol edilmiştir. Spektrum analizörü ve sinyal jenaratörünün düzgün çalıştığı tespit edilmiştir. Daha sonra bilgisayara yükelenen ve ölçümlerin gözlendiği yazılımların düzgün çalışıp çalışmadığı tespit edilmiş ve düzgün çalıştığı saptanmıştır.

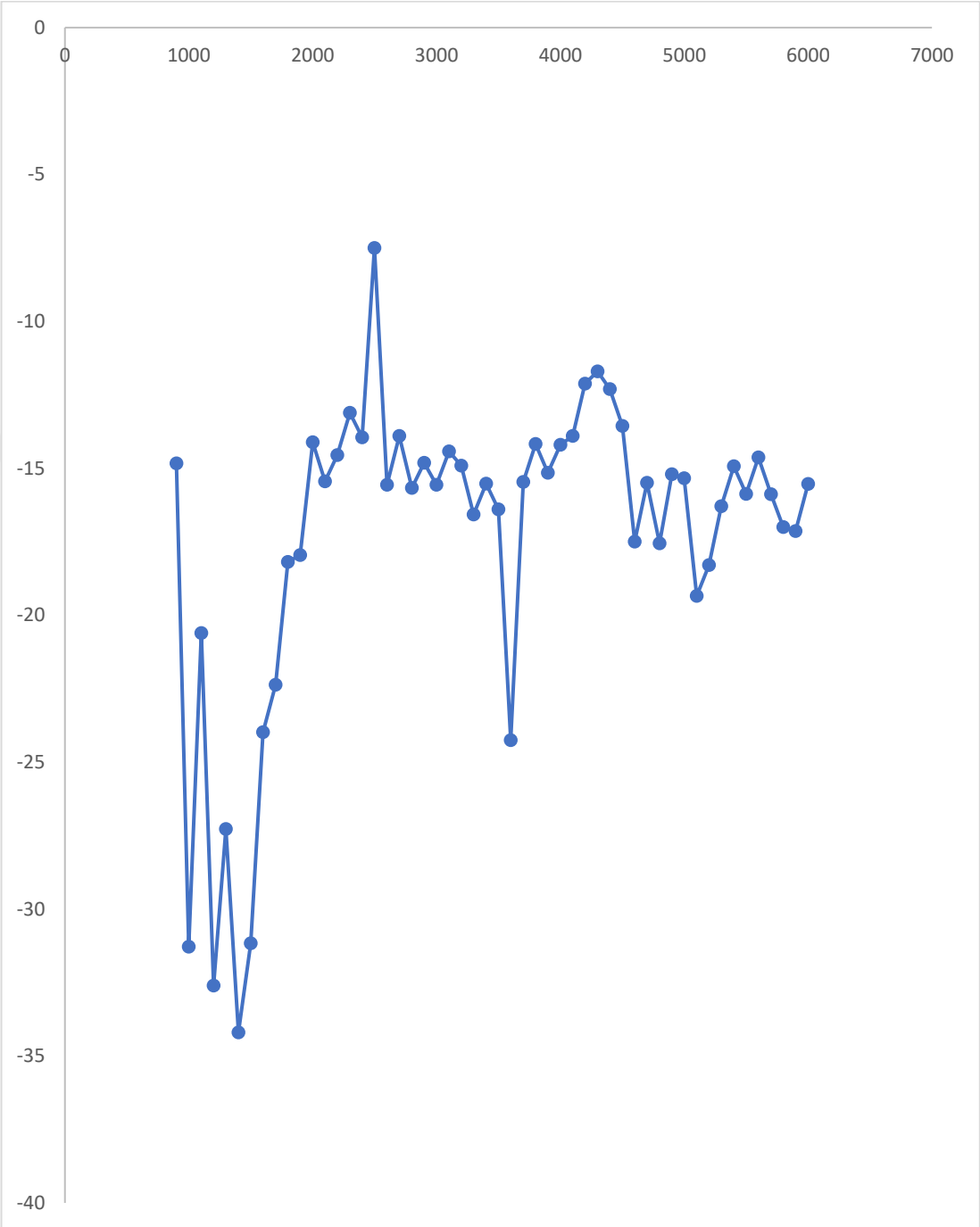
Çizelge 4.1 : 1 cm boşluk için zayıflama.

Frekans	Boşluk (1cm)	Frekans	Boşluk (1cm)
900	-14.83	4100	-13.9
1000	-31.28	4200	-12.12
1100	-20.61	4300	-11.7
1200	-32.6	4400	-12.3
1300	-27.28	4500	-13.56
1400	-34.2	4600	-17.5
1500	-31.17	4700	-15.49
1600	-23.98	4800	-17.55
1700	-22.37	4900	-15.2
1800	-18.19	5000	-15.34
1900	-17.95	5100	-19.34
2000	-14.11	5200	-18.29
2100	-15.44	5300	-16.29
2200	-14.55	5400	-14.93
2300	-13.11	5500	-15.87
2400	-13.95	5600	-14.63
2500	-7.5	5700	-15.88
2600	-15.56	5800	-17
2700	-13.9	5900	-17.14
2800	-15.67	6000	-15.53
2900	-14.81		
3000	-15.56		
3100	-14.42		
3200	-14.91		
3300	-16.57		
3400	-15.52		
3500	-16.4		
3600	-24.25		
3700	-15.46		
3800	-14.17		
3900	-15.15		
4000	-14.2		

Çizelge 4.1'de 1 cm boş durum görülmektedir. Ölçümler 900 MHz ike 6 GHz arasındadır. Deney düzeneğinin kurgulanmasında iki anten arası ilk önce cetvelle dikkatli bir şekilde ve hassasça ölçülmüştür.

1 cm boşluk saptandıktan sonra ancak ölçümler yapılmaya başlanmıştır. Herhangi bir vibrasyon ve titreşim hissedildiğinde ve düzenek bozulduğunda tekrar cetvelle 1 cm boşluk ayarlanmış, ve ölçümler öyle yapılmıştır.

Çizelge 4.1'de verilen ölçümlere göre, antenler arasında 1 cm boşluk bırakıldığında elektromanyetik dalganın frekansına göre zayıflama grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir.



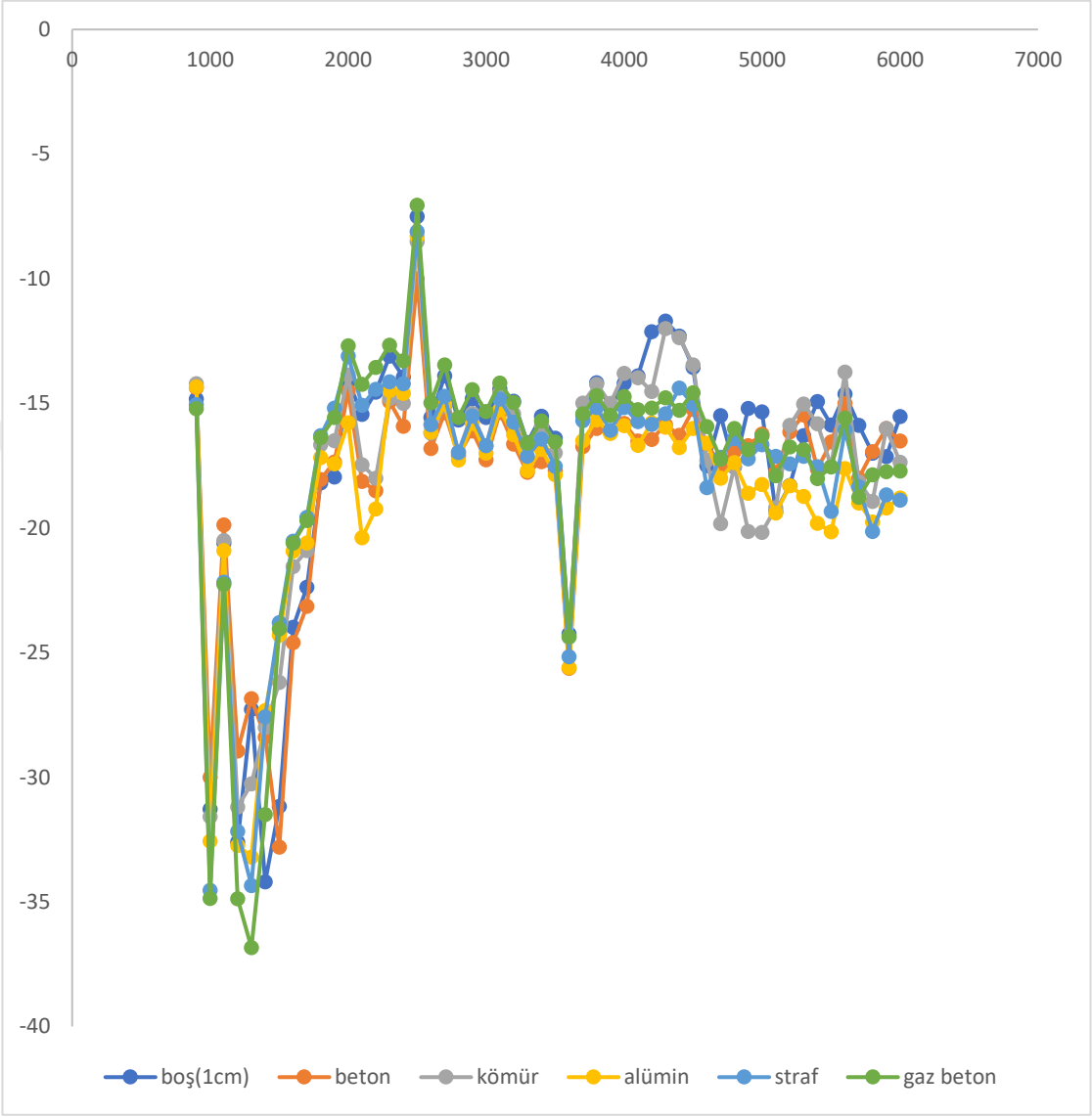
Şekil 4.6 : 1 cm boşluk için zayıflama.

Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere elektromanyetik dalganın frekansına göre yazıflama miktarı değişmektedir. Çizelge 4.2'de antenler arasına 1 cm kalınlığındaki numuneler konulduğu durum için zayıflama miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.2 : 1 cm kalınlıktaki numuneler için zayıflama.

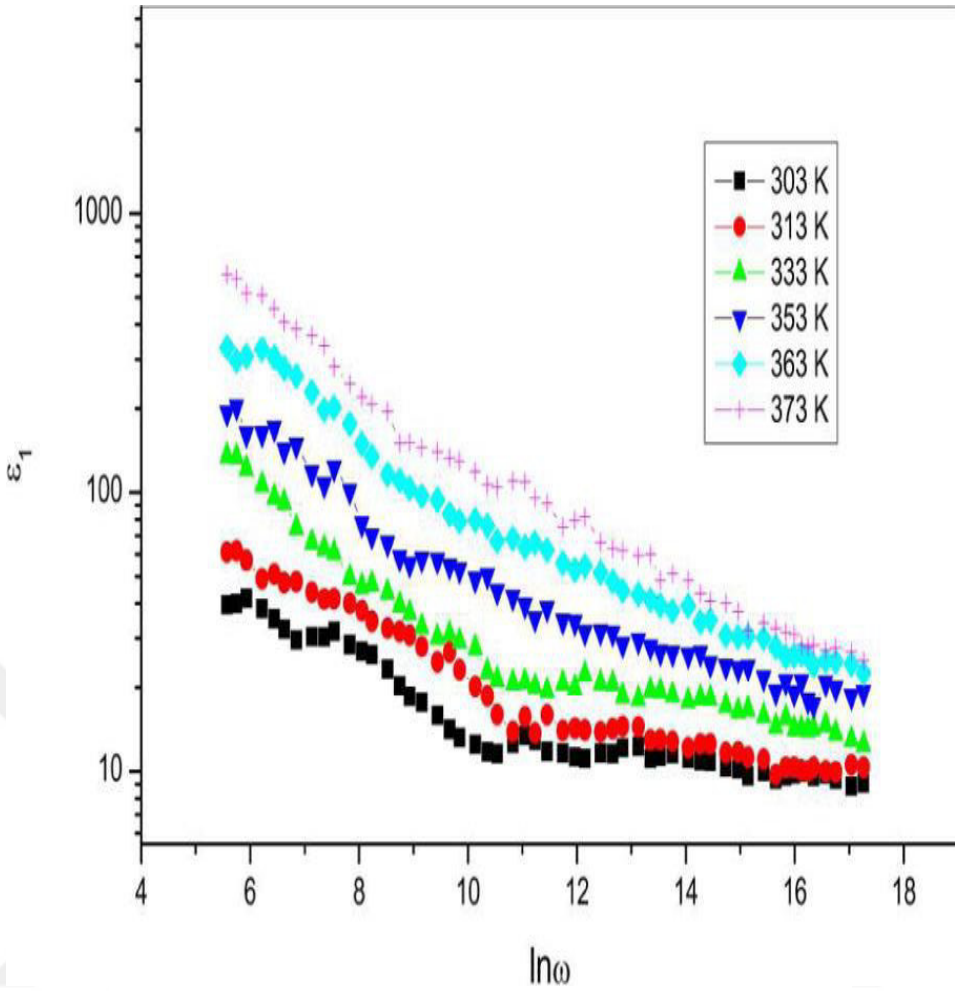
Frekans	Boşluk (1cm)	Beton	Beton Kömür	Beton Alüminyum	Beton Strafor	Gaz beton
900	-14.83	-14.37	-14.21	-14.33	-15.05	-15.21
1000	-31.28	-30	-31.59	-32.56	-34.54	-34.86
1100	-20.61	-19.87	-20.5	-20.91	-22.17	-22.26
1200	-32.6	-28.95	-31.2	-32.74	-32.18	-34.88
1300	-27.28	-26.85	-30.27	-33.2	-34.35	-36.84
1400	-34.2	-28.39	-28	-27.33	-27.58	-31.5
1500	-31.17	-32.8	-26.2	-24.3	-23.8	-24.04
1600	-23.98	-24.6	-21.55	-20.93	-20.53	-20.6
1700	-22.37	-23.14	-20.91	-20.6	-19.57	-19.7
1800	-18.19	-18.05	-16.66	-17.17	-16.3	-16.37
1900	-17.95	-17.35	-16.5	-17.42	-15.19	-15.57
2000	-14.11	-14.5	-13.86	-15.78	-13.1	-12.69
2100	-15.44	-18.13	-17.46	-20.39	-15.07	-14.23
2200	-14.55	-18.5	-18	-19.24	-14.44	-13.56
2300	-13.11	-14.92	-14.8	-14.48	-14.14	-12.67
2400	-13.95	-15.92	-15	-14.6	-14.21	-13.29
2500	-7.5	-10	-8.5	-8.3	-8.1	-7.05
2600	-15.56	-16.81	-16.2	-16.16	-15.86	-14.98
2700	-13.9	-15.38	-15.11	-15.03	-14.71	-13.45
2800	-15.67	-17.1	-16.95	-17.28	-16.97	-15.56
2900	-14.81	-16.11	-15.4	-15.81	-15.5	-14.45
3000	-15.56	-17.26	-16.71	-17	-16.7	-15.33
3100	-14.42	-15.37	-14.57	-15.27	-14.83	-14.18
3200	-14.91	-16.64	-15.42	-16.26	-15.76	-14.96
3300	-16.57	-17.77	-16.68	-17.7	-17.13	-16.6
3400	-15.52	-17.34	-15.9	-16.85	-16.43	-15.7
3500	-16.4	-17.69	-16.98	-17.87	-17.53	-16.55
3600	-24.25	-25.63	-24.38	-25.61	-25.16	-24.36
3700	-15.46	-16.73	-14.99	-16.5	-15.69	-15.42
3800	-14.17	-16	-14.24	-15.67	-15.17	-14.69
3900	-15.15	-16.17	-15	-16.21	-16.08	-15.48
4000	-14.2	-15.81	-13.79	-15.89	-15.17	-14.72
4100	-13.9	-16.51	-13.97	-16.68	-15.73	-15.25
4200	-12.12	-16.44	-14.52	-15.78	-15.84	-15.19
4300	-11.7	-15.85	-12	-15.95	-15.41	-14.77
4400	-12.3	-16.28	-12.36	-16.77	-14.38	-15.28
4500	-13.56	-15.24	-13.46	-16	-15.05	-14.57
4600	-17.5	-16.64	-17.29	-16.59	-18.38	-15.93
4700	-15.49	-17.48	-19.83	-18	-17.16	-17.24
4800	-17.55	-16.92	-17.54	-17.38	-16.41	-16
4900	-15.2	-16.7	-20.14	-18.61	-17.23	-16.86
5000	-15.34	-16.23	-20.18	-18.26	-16.66	-16.31
5100	-19.34	-17.77	-19.19	-19.4	-17.12	-17.9
5200	-18.29	-16.14	-15.88	-18.31	-17.42	-16.75
5300	-16.29	-15.47	-15.03	-18.73	-17.12	-16.86
5400	-14.93	-17.64	-15.82	-19.81	-17.54	-18.02
5500	-15.87	-16.55	-17.52	-20.15	-19.34	-17.55
5600	-14.63	-15	-13.74	-17.61	-16.05	-15.59
5700	-15.88	-18	-18.15	-19	-18.34	-18.77
5800	-17	-16.94	-18.93	-19.76	-20.14	-17.86
5900	-17.14	-16	-16.01	-19.2	-18.67	-17.74

Çizelge 4.2'de verilen ölçümlere göre, antenler arasında 1 cm boşluk ve malzeme bırakıldığında elektromanyetik dalganın frekansına göre zayıflama grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7 : 1 cm kalınlığındaki numunelerin EKE'leri.

Şekil 4.7'de ölçümü yapılan 1cm kalınlığındaki numunelerin EKE'leri görülmektedir. Yapılan ölçümlerde 100 MHz aralıklarla ölçüm yapıldı. Dielektrik sabiti şekil 4.8'deki gibi frekans değişmektedir. Dolayısıyla kalkanlama etkisi de frekansla birlikte değişmektedir. 100 MHz aralıklarla ölçüm yapıldı. Daha sık ölçüm yapılsaydı zik zak yerine daha düzgün geçişler olacaktı [37].



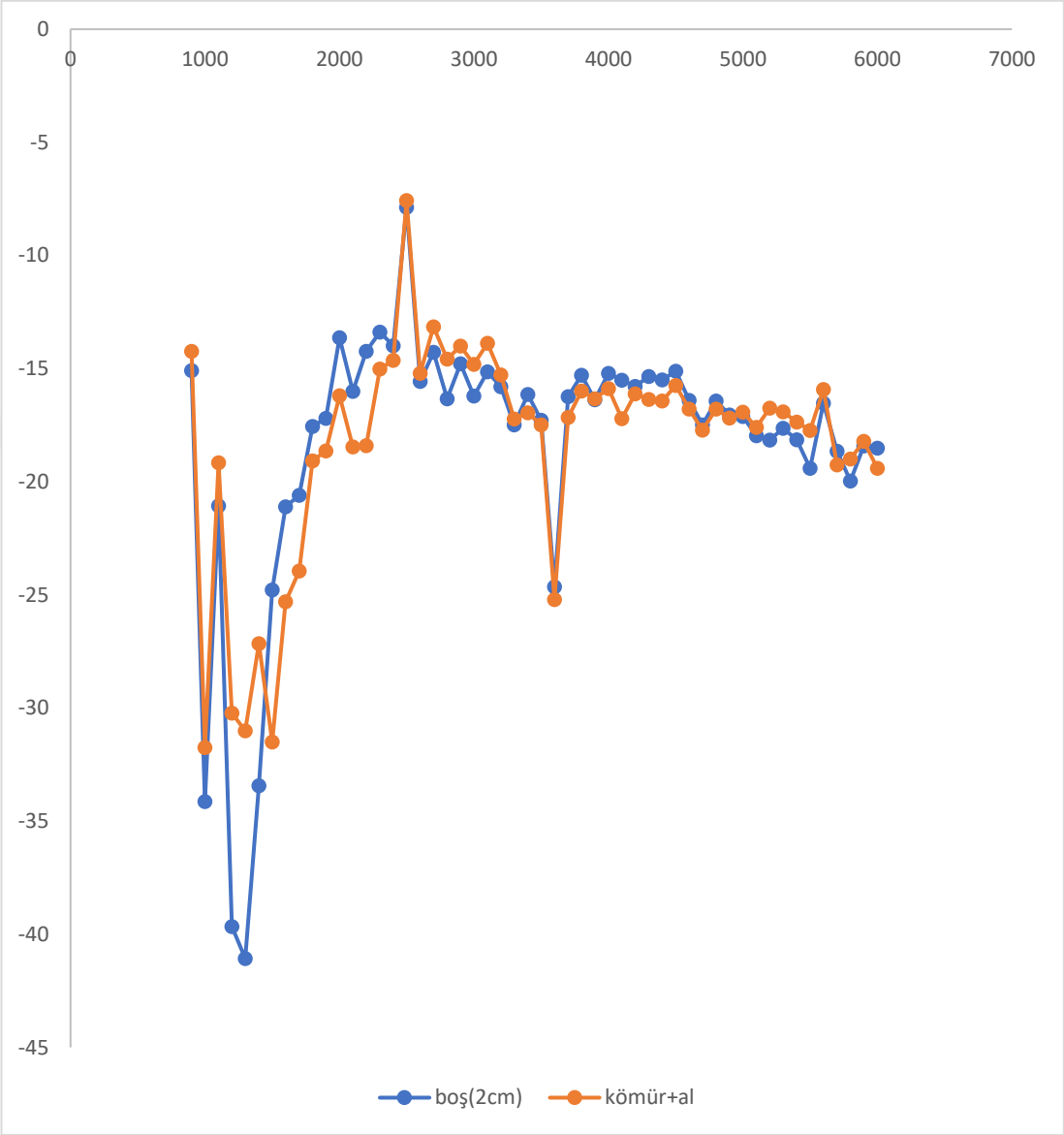
Şekil 4.8 : Frekansa göre dielektrik sabiti değişimi grafiği

Şekil 4.8'de görülen frekans arttıkça düşüşe geçen dielektrik sabiti ilişkisi, aynı şekilde yapılan deneyde özellikle çelik blokta açıkça görülmektedir. Ayrıca 1 cm kalınlığındaki numunelerle yapılan deneylerdede frekans arttıkça düşüş eğilimi genel trendde görülmektedir. Yansıma kaybı ve soğurma kaybı bağıntılarına göre frekans arttıkça kayıp artmaktadır. Şekil 4.8'de verilen grafikte bunu doğrular niteliktedir. 1300 MHz'de gaz beton ile 9 dB kalkanlama etkisi elde edilirken 5400 MHz frekansında ise alüminyum folyo katkılı beton 5 dB kalkanlama etkisi elde edilmiştir. Çizelge 4.3'te antenler arasına 2 cm boşluk ve toplamda 2 cm kalınlığında kömür katkılı beton ve alüminyum katkılı beton için ölçüm sonuçları verilmiştir. Kömür ve alüminyum katkılı betonları kombine ederek 2 cm kalınlığında bir numuneyle ölçüm oluşturmaktaki amaç, hem kömür hem alüminyumun yansıtıcı etkisinden yararlanarak yüksek bir elektromanyetik kalkanlama etkisi elde etmek olmuştur.

Çizelge 4.3 : 2 cm boş ölçüm ve kömür alüminyum beton ölçümleri.

Frekans	Boşluk (2cm)	Beton Kömür+Alüminyum
900	-15.09	-14.24
1000	-34.14	-31.75
1100	-21.07	-19.16
1200	-39.66	-30.22
1300	-41.07	-31
1400	-33.43	-27.15
1500	-24.78	-31.5
1600	-21.1	-25.3
1700	-20.6	-23.94
1800	-17.55	-19.08
1900	-17.2	-18.64
2000	-13.63	-16.2
2100	-16	-18.46
2200	-14.24	-18.4
2300	-13.39	-15.02
2400	-13.99	-14.63
2500	-7.87	-7.577
2600	-15.57	-15.21
2700	-14.28	-13.15
2800	-16.33	-14.58
2900	-14.78	-14
3000	-16.21	-14.81
3100	-15.14	-13.88
3200	-15.8	-15.28
3300	-17.49	-17.22
3400	-16.14	-16.95
3500	-17.28	-17.49
3600	-24.64	-25.2
3700	-16.24	-17.15
3800	-15.29	-15.99
3900	-16.38	-16.34
4000	-15.21	-15.88
4100	-15.51	-17.21
4200	-15.79	-16.12
4300	-15.35	-16.36
4400	-15.5	-16.43
4500	-15.11	-15.74
4600	-16.4	-16.79
4700	-17.48	-17.72
4800	-16.43	-16.79
4900	-17.04	-17.19
5000	-17.12	-16.92
5100	-17.97	-17.6
5200	-18.16	-16.75
5300	-17.63	-16.91
5400	-18.15	-17.36
5500	-19.4	-17.73
5600	-16.53	-15.92
5700	-18.65	-19.26
5800	-19.97	-19
5900	-18.42	-18.21

Çizelge 4.3'te verilen ölçümlere göre, antenler arasında 2 cm boşluk ve/veya kömür ve alüminyum katkılı beton malzeme bırakıldığında elektromanyetik dalganın frekansına göre zayıflama grafiği Şekil 4.9'de verilmiştir.



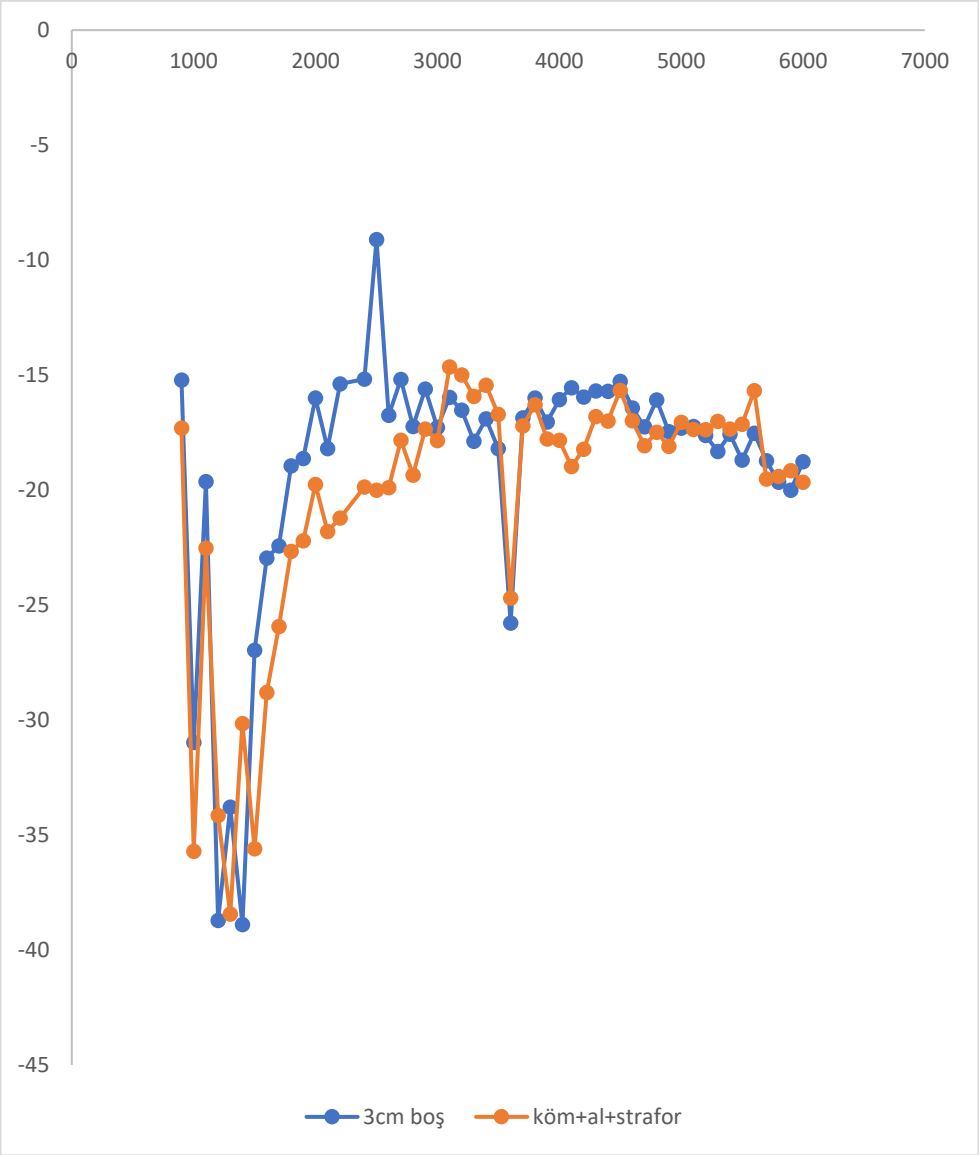
Şekil 4.9 : 2 cm boş ve kömür-Alimünyum katkılaması.

Şekil 4.9'de ölçümü yapılan 2 cm kalınlığındaki kömür ve alüminyum katkılı beton numunenin EKE'si görülmektedir. 1500 MHz - 2200 MHz aralığında materyal iyi bir KE göstermiştir. En yüksek 7 dB civarı 1500 MHz'de KE elde edilmiştir. Çizelge 4.4'te antenler arasına 3 cm boşluk ve toplamda 3 cm kalınlığında kömür katkılı beton, alüminyum katkılı beton ve strafor katkılı beton için ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.4 : 3 cm boş ve kömür+alimünyum+köpük strafor ölçümleri.

Frekans	Boşluk (3 cm)	Beton kömür+aluminyum+strafor
900	-15.21	-17.31
1000	-30.98	-35.7
1100	-19.63	-22.53
1200	-38.71	-34.15
1300	-33.78	-38.44
1400	-38.89	-30.15
1500	-26.96	-35.6
1600	-22.96	-28.8
1700	-22.43	-25.93
1800	-18.95	-22.66
1900	-18.62	-22.2
2000	-16	-19.75
2100	-18.2	-21.8
2200	-15.38	-21.21
2400	-15.18	-19.87
2500	-9.11	-20
2600	-16.74	-19.89
2700	-15.19	-17.83
2800	-17.23	-19.35
2900	-15.6	-17.35
3000	-17.28	-17.85
3100	-15.97	-14.65
3200	-16.53	-14.99
3300	-17.87	-15.93
3400	-16.9	-15.44
3500	-18.2	-16.7
3600	-25.78	-24.7
3700	-16.86	-17.2
3800	-16	-16.29
3900	-17.04	-17.77
4000	-16.07	-17.83
4100	-15.55	-18.97
4200	-15.95	-18.22
4300	-15.69	-16.8
4400	-15.7	-17
4500	-15.27	-15.66
4600	-16.42	-16.99
4700	-17.25	-18.07
4800	-16.08	-17.48
4900	-17.45	-18.09
5000	-17.3	-17.05
5100	-17.24	-17.36
5200	-17.63	-17.38
5300	-18.32	-17.01
5400	-17.57	-17.35
5500	-18.7	-17.14
5600	-17.52	-15.67
5700	-18.72	-19.52
5800	-19.65	-19.4
5900	-20	-19.15
6000	-18.77	-19.66

Çizelge 4.4'te verilen ölçümlere göre, antenler arasında 3 cm boşluk ve/veya kömür, alüminyum ve strafor katkılı beton malzeme bırakıldığında elektromanyetik dalganın frekansına göre zayıflama grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.



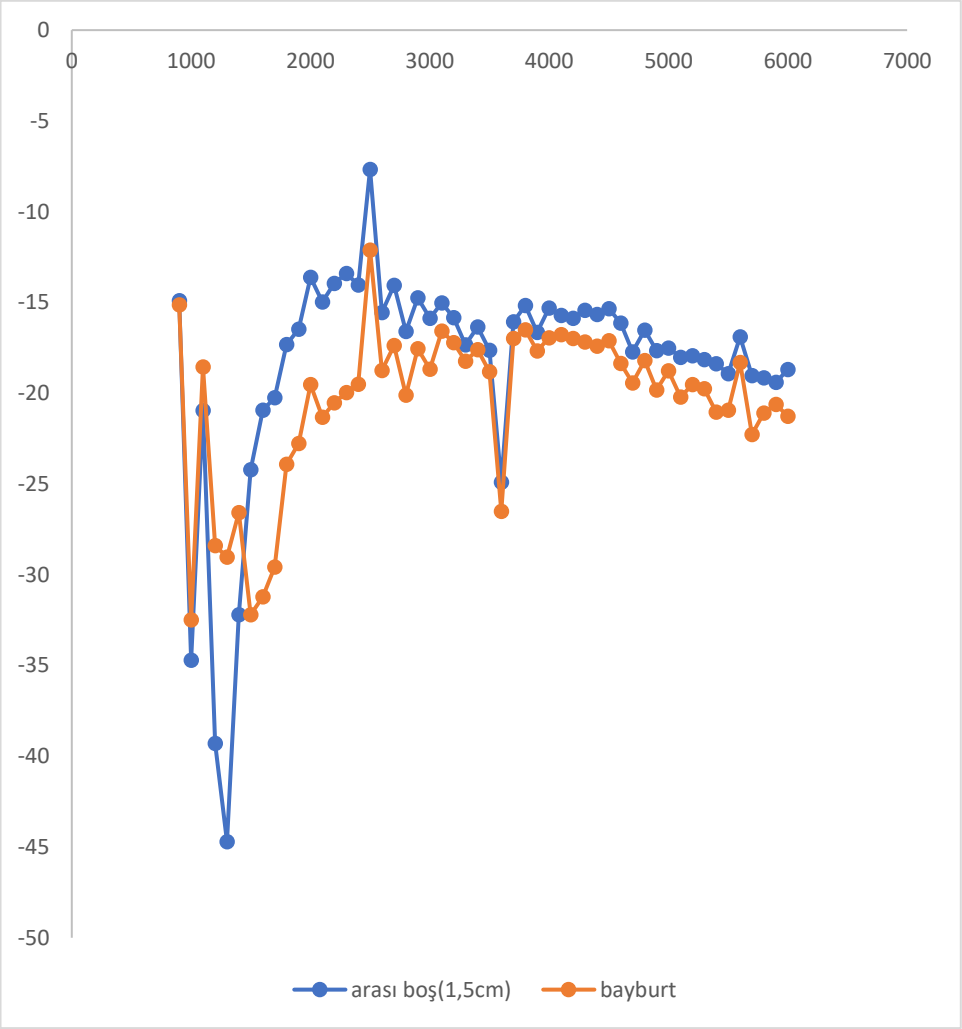
Şekil 4.10 : 3 cm boş ve kömür+alimünyum+köpük strafor ölçümleri.

Şekil 4.10'da ölçümü yapılan 3 cm kalınlığındaki kömür, alüminyum ve strafor katkılı beton numunenin EKE'si görülmektedir. 1500 MHz ve 2800 MHz aralığında yüksek bir EKE gözlenmiştir. Çizelge 4.5'te antenler arasına 1.5 cm boşluk ve/veya 1.5 cm kalınlığında Bayburt taşı için ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.5 : 1.5 cm kalınlığında Bayburt taşının EKE'si.

Frekans	Boşluk (1.5cm)	Bayburt Taşı
900	-14.91	-15.14
1000	-34.7	-32.48
1100	-20.96	-18.55
1200	-39.3	-28.39
1300	-44.7	-29.02
1400	-32.21	-26.58
1500	-24.22	-32.21
1600	-20.94	-31.22
1700	-20.25	-29.57
1800	-17.32	-23.92
1900	-16.47	-22.76
2000	-13.61	-19.52
2100	-14.98	-21.32
2200	-13.95	-20.53
2300	-13.4	-19.97
2400	-14.04	-19.51
2500	-7.665	-12.11
2600	-15.55	-18.74
2700	-14.06	-17.37
2800	-16.6	-20.1
2900	-14.75	-17.54
3000	-15.88	-18.68
3100	-15.03	-16.58
3200	-15.83	-17.21
3300	-17.33	-18.23
3400	-16.34	-17.6
3500	-17.63	-18.82
3600	-24.9	-26.51
3700	-16.07	-16.98
3800	-15.16	-16.5
3900	-16.64	-17.68
4000	-15.3	-16.95
4100	-15.72	-16.78
4200	-15.87	-16.98
4300	-15.43	-17.17
4400	-15.66	-17.4
4500	-15.34	-17.11
4600	-16.14	-18.36
4700	-17.73	-19.44
4800	-16.53	-18.2
4900	-17.66	-19.82
5000	-17.51	-18.76
5100	-18.03	-20.21
5200	-17.94	-19.52
5300	-18.14	-19.76
5400	-18.37	-21.04
5500	-18.92	-20.93
5600	-16.89	-18.3
5700	-19.03	-22.27
5800	-19.16	-21.1
5900	-19.4	-20.61
6000	-18.7	-21.27

Çizelge 4.5'te verilen ölçümlere göre, antenler arasında 1.5 cm boşluk ve/veya Bayburt taşı bırakıldığında elektromanyetik dalganın frekansına göre zayıflama grafiği Şekil 4.11'da verilmiştir.



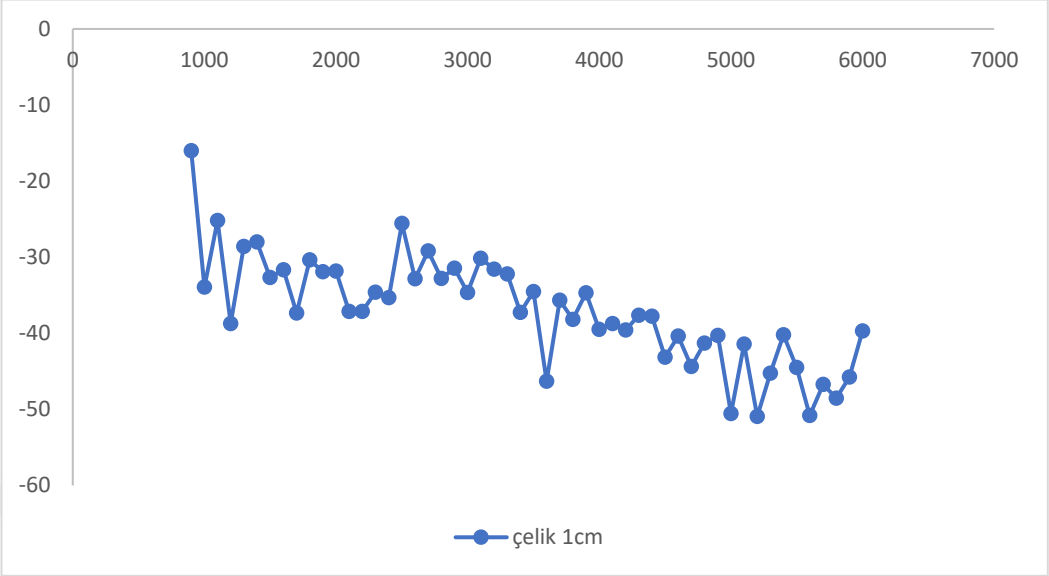
Şekil 4.11 : 1.5 cm kalınlığında Bayburt taşının EKE'si.

Şekil 4.11'da ölçümü yapılan 1.5 cm kalınlığındaki Bayburt taşı numunesinin EKE'si görülmektedir. Ülkemiz için elektromanyetik kalkanlama materyali olması açısından önemli bir kazanım olabilecek ve katma değer oluşturabilecek olan Bayburt taşında ise 1600 MHz – 2400 MHz aralığında 5 dB civarında bir elektromanyetik kalkanlama etkisi elde edilmiştir. Çizelge 4.6'da antenler arasına 1 cm kalınlığında çelik blok için ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.6 : 1 cm kalınlığındaki paslanmaz çelik bloğunun EKE'si.

Frekans	Çelik
900	-16
1000	-33.94
1100	-25.17
1200	-38.71
1300	-28.57
1400	-28
1500	-32.67
1600	-31.66
1700	-37.33
1800	-30.37
1900	-31.92
2000	-31.85
2100	-37.13
2200	-37.13
2300	-34.6
2400	-35.31
2500	-25.55
2600	-32.85
2700	-29.18
2800	-32.8
2900	-31.47
3000	-34.64
3100	-30.13
3200	-31.59
3300	-32.23
3400	-37.27
3500	-34.51
3600	-46.3
3700	-35.66
3800	-38.17
3900	-34.69
4000	-39.47
4100	-38.71
4200	-39.57
4300	-37.62
4400	-37.75
4500	-43.13
4600	-40.36
4700	-44.35
4800	-41.28
4900	-40.3
5000	-50.55
5100	-41.42
5200	-50.94
5300	-45.25
5400	-40.19
5500	-44.5
5600	-50.82
5700	-46.72
5800	-48.53
5900	-45.75
6000	-39.71

Çizelge 4.6'da verilen ölçümlere göre, antenler arasında 1 cm çelik bırakıldığında elektromanyetik dalganın frekansına göre zayıflama grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 : 1 cm kalınlığındaki paslanmaz çelik bloğunun EKE'si.

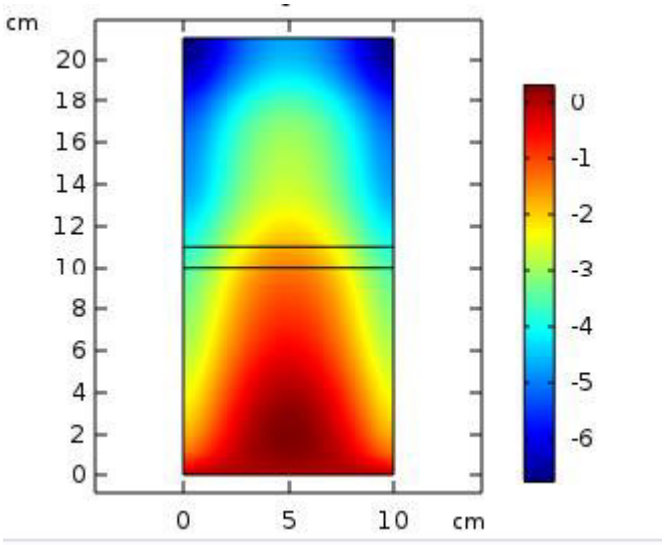
Şekil 4.12'de ölçümü yapılan 1 cm kalınlığındaki çelik bloğun EKE'si görülmektedir. En yüksek kalkanlama etkisi paslanmaz çelik bloktan elde edilmiş olup, 5200 MHz'de -50.94 dB olarak bulunmuştur.

4.2 Simulasyon Çalışmaları

4G bir baz istasyonunun vericisinden çıkan sinyal -120 dBm den sonra sinyal yok olarak görülür ve telefon çekmez. – 90 dBm'e kadar ise mükemmel çekim gücü elde edilir. Bu çekim gücü cep telefonlarında genellikle sağ üst köşede bulunan 4 dişin hepsininde yeşil olmasıyla ifade edilir. Yani bu çelik blokla mükemmel çekim gücüne sahip 4G bir cep telefonu için tamamen şebeke yok durumuna geçmek anlamına gelmektedir.

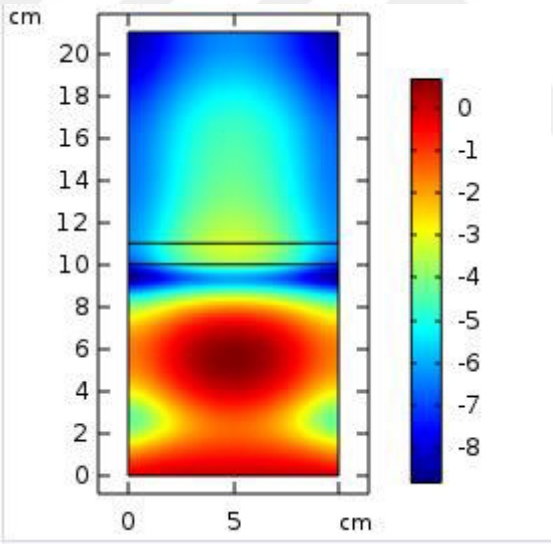
Etrafımızı çevreleyen hava, binlarda yapı malzemesi olarak kullanılan cam, tahta ve kuru beton ve ayrıca suyun elektromanyetik kalkanlama etkisi COMSOL yazılımının RF modülüyle simüle edilerek ölçümlenmiştir. Bütün numunelerin kalınlığı 1 cm olarak iki hava kütlesinin arasına konumlandırılmış ve alttaki kenardan bir elektrik alana maruz bırakılmıştır.

Şekil 4.12'de arada hiçbir materyal yokken referans olması açısından bir deney yapılmıştır. 0 cm seviyesinde alt kenardan elektrik alan şiddeti uygulanmış ve 2.4 GHz frekansta ölçümler yapılmıştır.



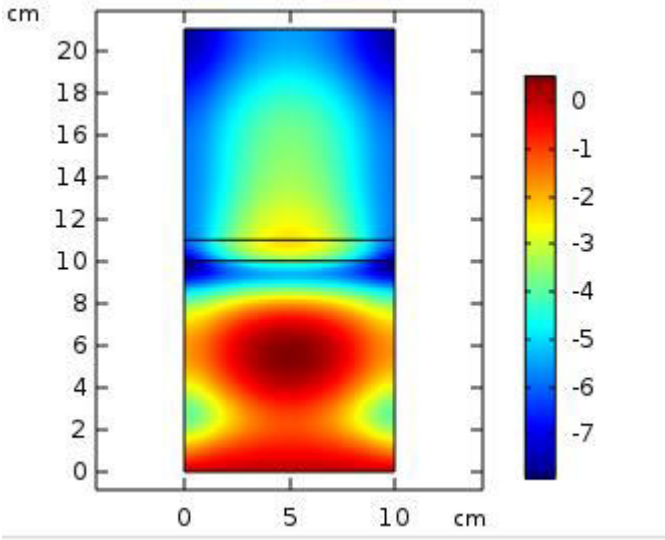
Şekil 4.13 : Arada hiçbir materyal yoktur.

Şekil 4.13'den görülebileceği gibi, 20 cm'e kadar 4 dB civarında zayıflama görülmektedir. Şekil 4.14'de iki hava kütlesinin arasına cam koyularak ölçüm yapılmıştır.



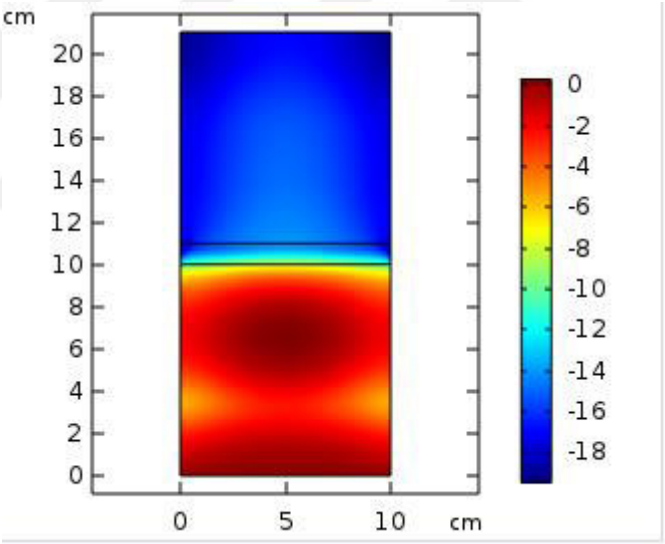
Şekil 4.14 : İki hava kütlesinin arasında cam varken.

Şekil 4.14'ten görülebileceği gibi, değerler hiçbir materyal olmamasına göre çok fazla değişmemekle birlikte çok az bir miktar EKE sağlanmıştır. Şekil 4.15 iki hava kütlesinin arasında kuru tahta varken yapılan deneyi göstermektedir.



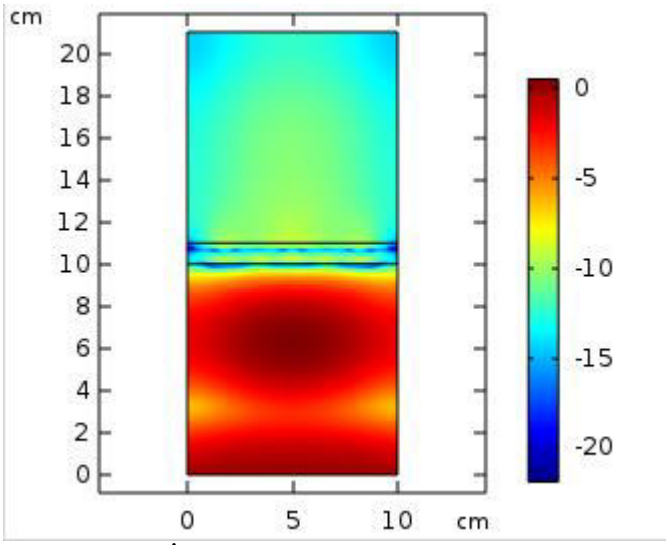
Şekil 4.15 : İki hava kütlesinin arasında kuru tahta varken.

Şekil 4.15'te görüldüğü üzere, tahta da cam gibi iletkenliği veya saçıcılığı yüksek olan bir materyal değildir dolayısı ile benzer şekilde davranış göstermiştir. Şekil 4.16 kuru betonun EKE'sini göstermektedir.



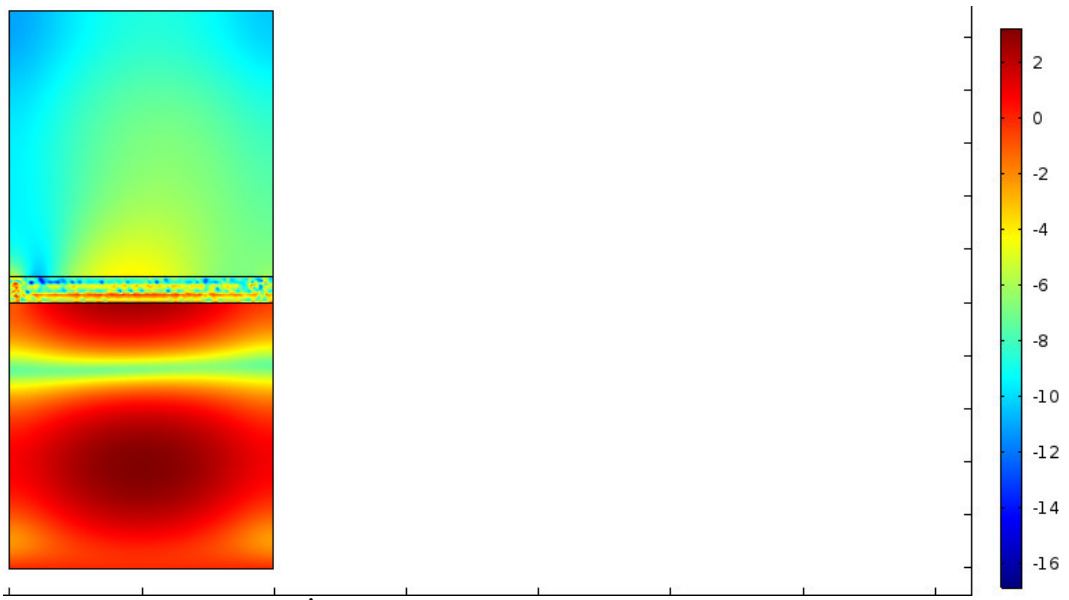
Şekil 4.16 : İki hava kütlesinin arasında kuru beton varken.

Şekil 4.16'da görülebileceği üzere, cam ve tahtaya göre iletkenliği ve dolayısı ile yansıtıcılığı çok yüksek olan kuru beton çok daha iyi bir performans göstermiştir. Kuru beton 10 cm ve 11 cm arasında 6 dB civarında bir EKE sonucu vermiştir. Şekil 4.17'de iki hava kütlesinin arasına 1*10 cm su engel olarak konulmuştur.



Şekil 4.17 : İki hava kütlesinin arasında su varken.

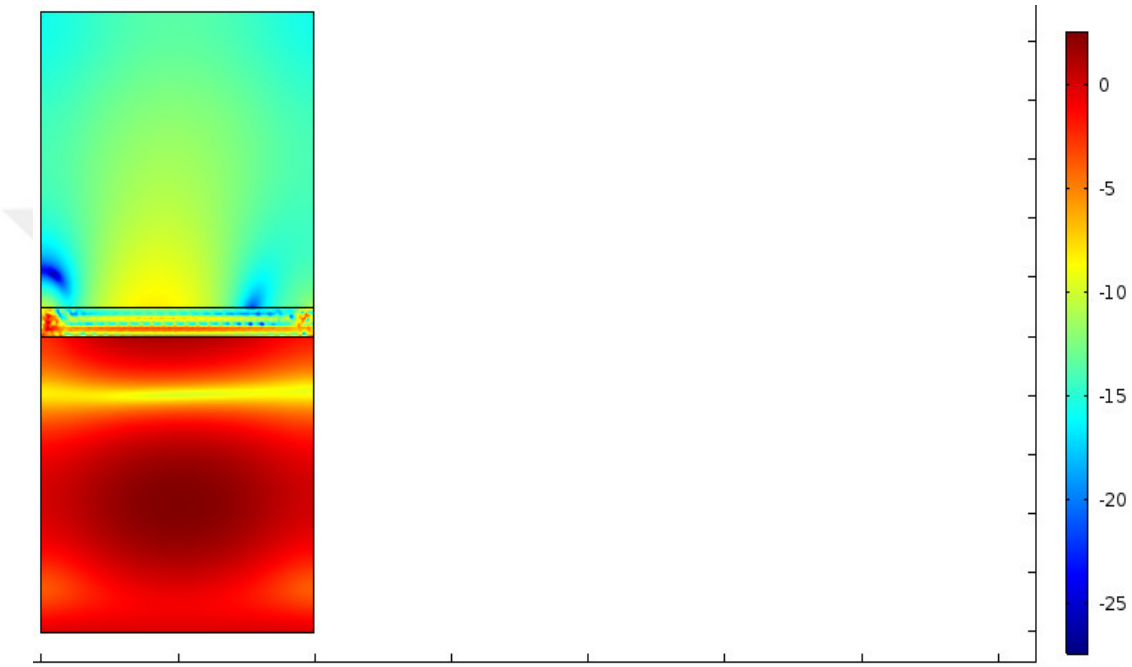
Yapı malzemelerinin yanında canlı dokularınında KE'leri canlı sağlığı için önemlidir. Bu yüzden ikinci tip simülasyon olarak canlı dokularının elektromanyetik kalkanlama etkilerileri COMSOL yazılımında gözlemlenmiştir. En az kalkanlama etkisi kemik dokudan elde edilirken, Deri dokusu kas dokusundan daha fazla kalkanlamaya sahip olmuştur. Bu da deri dokuda yoğun maruz kalma sonucu sağlık açısından daha fazla etkilenme ihtimalini ortaya koymaktadır. Ölçümler 2.4 GHz frekansta yapılmıştır. Elektromanyetik radyasyonla vücudumuzda ilk karşılan doku olduğu için deri dokunun tepkisi önemlidir. Şekil 4.18, deri dokusuyla ilgili yapılan deneyi göstermektedir.



Şekil 4.18 : İki hava kütlesinin arasında deri dokusu varken.

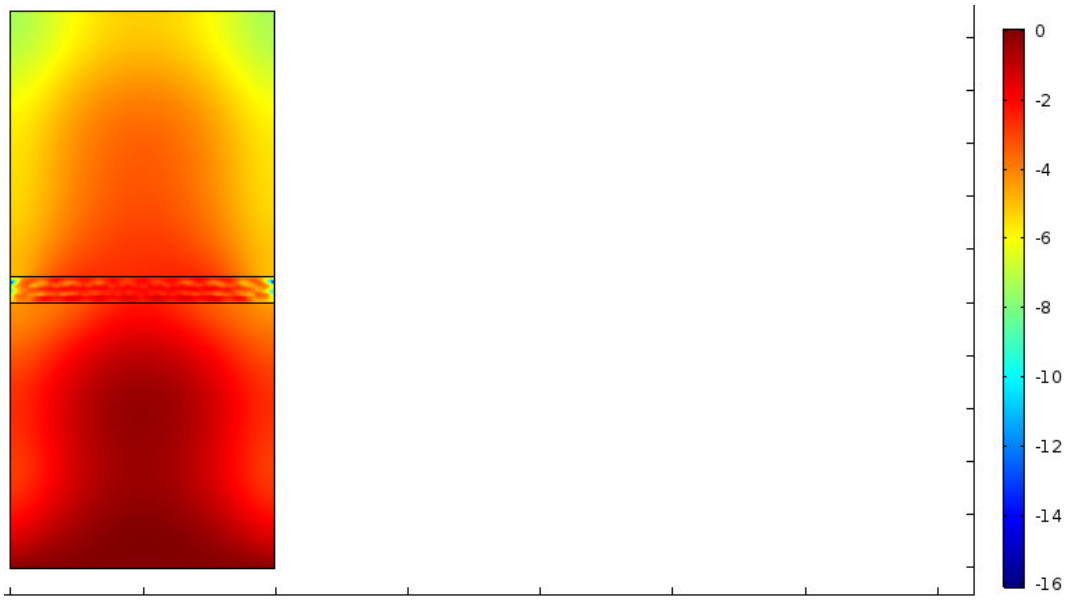
Şekil 4.18'den görüleceği üzere, yapılan deneyde deri dokunun gelen alana karşı belirli bir miktar yansıtıcı olduğu görülmekle beraber bir miktar deride ısınma oluşacağı açıktır. Yapılan deneyde 1 cm deri kullanılmıştır. Bunun sebebi deri, kas ve kemiği üç dokuyuda aynı kalınlıkta alarak kıyaslamaktır. Bununla beraber insan derisi milimetre düzeylerinden çok daha incedir.

Şekil 4.19'da, 1 cm kalınlığında kas dokusu görülmektedir.



Şekil 4.19 : İki hava kütlesinin arasında kas dokusu varken.

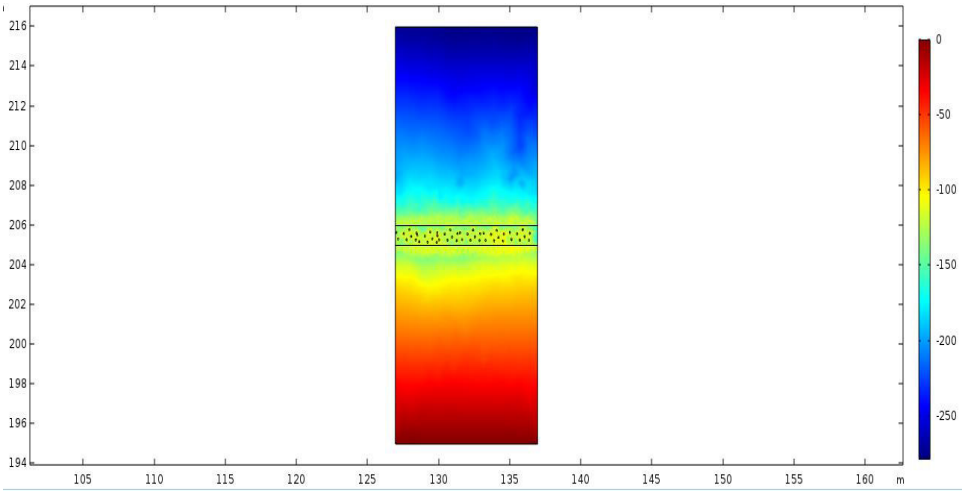
Şekil 4.19'da gösterildiği gibi, kas dokunun EKE'si aynı kalınlıkta deri dokuya göre 2 kata kadar daha yüksek olarak saptanmıştır. Şekil 4.20'de kemik dokusunun EKE'si görülmektedir. Kemik dokusunun simülasyon yapılmadan önce de geçirgen olacağı tahmin edilmekteydi. Zira kemik iletkenliği deri ve kasa nazaran daha düşük olduğu için düşük bir EKE elde edileceği tahmin edilmiştir. Ancak kemik dokusu homojen bir yapıya sahip değildir. Çünkü içerisinde gözenekler barındırmaktadır. Ayrıca ortasında süngerimsi bir yapıya sahip ilik dokusuda bulunmaktadır. Bu yapılar yapılan simülasyonda göz ardı edilmiştir. Gözeneksiz ve ortasında süngerimsi ilik dokusu barındırmadığı varsayılan kuru bir kemik blok üzerine yapılan simülasyondan sonuç elde edilmiştir.



Şekil 4.20 : İki hava kütlesinin arasında kemik dokusu varken..

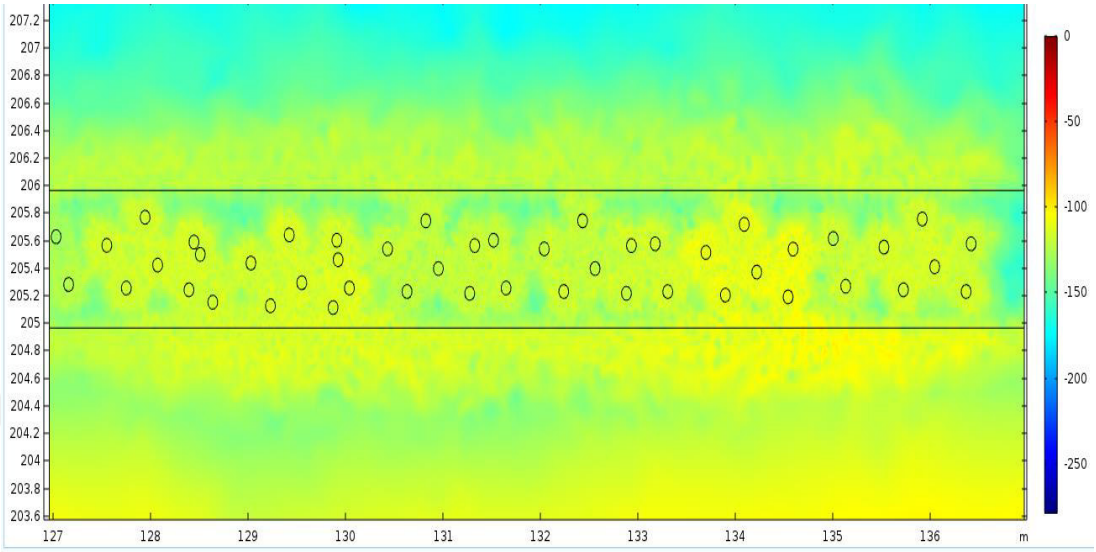
Şekil 4.20'de görülebileceği üzere, yapılan deneyde kemik dokusunun gözenekli ve saçıcı bir doku olmasından kaynaklanacak kayıplar deney ortamına yansıtılmadığı halde sonuçlar ortadadır. Diğer 2 dokuya göre kemik doku çok daha geçirgen bir özellik göstermektedir.

Comsol RF modülü gözenek saçılmalarını hesaba katmamaktadır bu yüzden üçüncü tip simulasyon olarak, düzgün kırınım teorisi ve saçılma özelliklerini barındıran elektromanyetik dalgalar modülünde gözenekli betonun bulunduğu 2.4 GHz frekans için bir simülasyon daha hazırlanmıştır ve sonuçlar Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21 : Gözenekli beton deneyi.

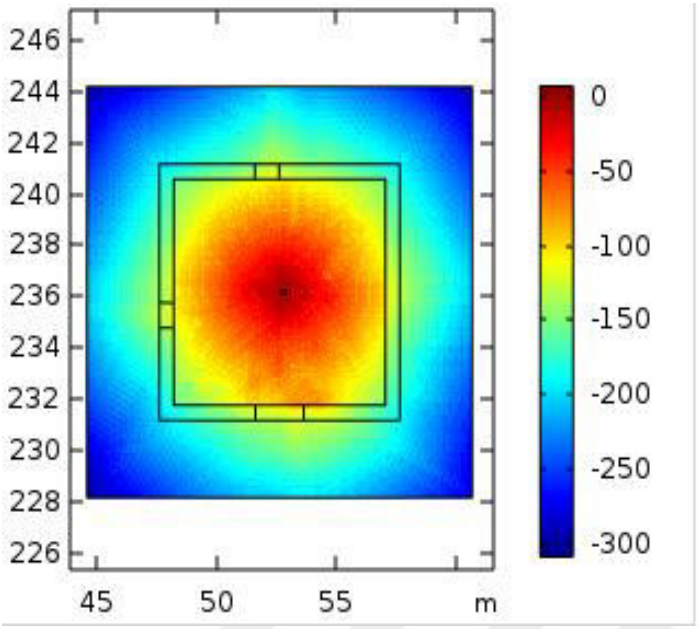
Şekil 4.21'de gözenekli betonun dalgayı saçılıma uğrattığı görülmektedir. RF modül yerine elektromanyetik dalgalar modülünün tercih edilmesi numune içindeki kırınım ve saçılmaların dikkate alınmasını sağlamaktır. Şekil 4.22'de gözenekli betonun içi daha iyi bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.22 : Gözenekli betonun içi.

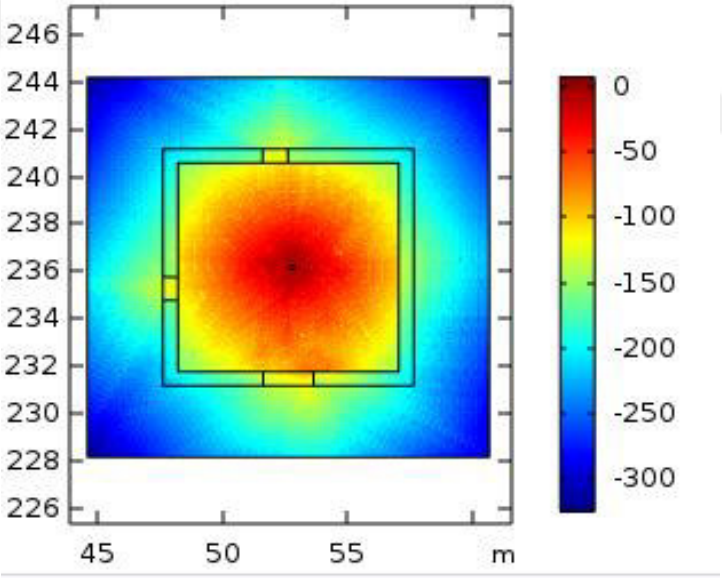
Şekil 4.22'de görüldüğü üzere, gözeneklerin etrafında saçılma ve kırınım etkileri olduğu açık bir şekilde saptanmıştır.

Parça olarak yapılarda kullanılan materyallerin KE'lerine bakıldıktan sonra bunlar bir binada birleştirilmiş ve üçüncü tip simulasyonlara ikinci örnek olarak 10 m^2 lik, 2 adet cam penceresi ve ön tarafında tahta kapısı bulunan beton duvarlı bir binada duvarlara iletken madde katkılaması yapıldığı varsayılarak adım adım duvar iletkenliği her adımda 100 kat artırılmış ve yansımaya bağlı elekromanyetik kalkanlama etkisi görsel olarak COMSOL yazılımında simüle edilmiştir. Deneyde RF modülü kullanılmıştır ve frekans 2.4 GHz'dir. Şekil 4.23'de katkılanmamış kuru beton simülasyon sonucu verilmiştir. Bu simülasyonlardaki amaç, iletkenliğin EKE'ne etkisini görmektir. Yansıma kaybı formülüne göre ilketkenlikle yansıma kaybı doğru orantılıdır. Yalnızca iletkenliğin yansıma kaybına etkisini görmek için frekans sabit tutulmuştur.



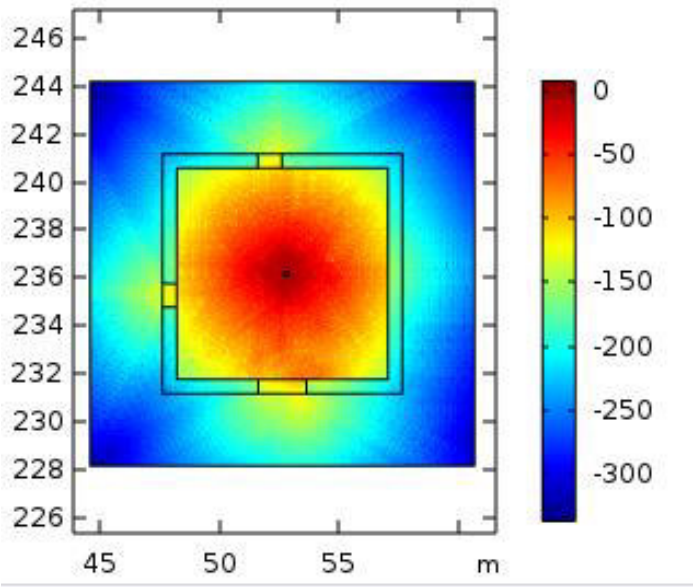
Şekil 4.23 : 1.Adım katkılanmamış kuru beton.

Şekil 4.24'de kuru beton iletkenliği 100 kat artırılmasıyla oluşan yapının simülasyon sonucu verilmiştir.



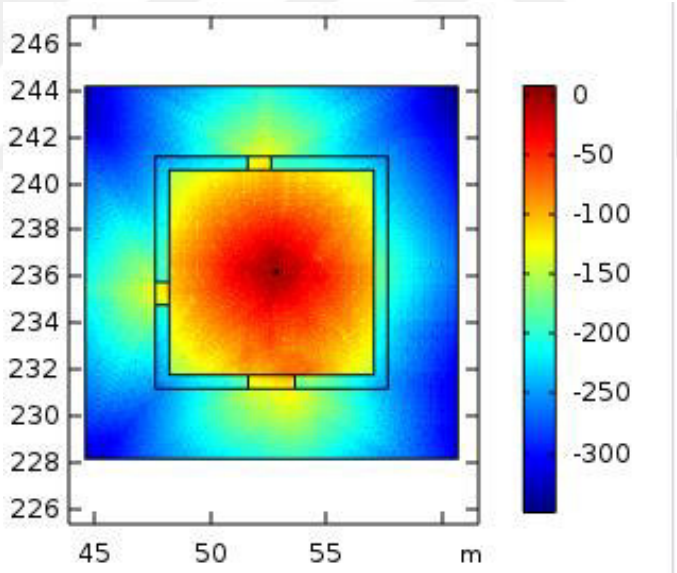
Şekil 4.24 : 2.Adım kuru betonun iletkenliği*100.

Şekil 2.24'te görüldüğü gibi iletkenliğin artmasıyla KE artmaktadır. Şekil 4.25'de kuru beton iletkenliği 10000 kat artırılmasıyla oluşan yapının simülasyon sonucu verilmiştir.



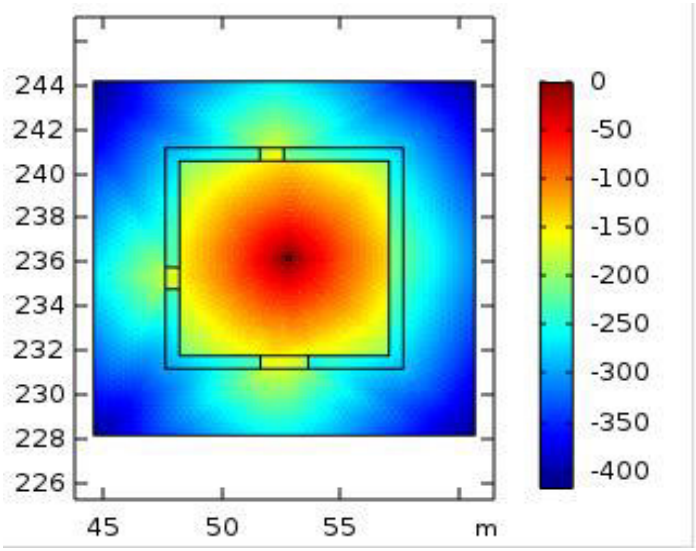
Şekil 4.25 : 3.Adım kuru betonun iletkenliği*10000.

Şekil 4.26'da kuru beton iletkenliği 1000000 kat artırılmasıyla oluşan yapının simülasyon sonucu verilmiştir.



Şekil 4.26 : 4.Adım kuru betonun iletkenliği*1000000.

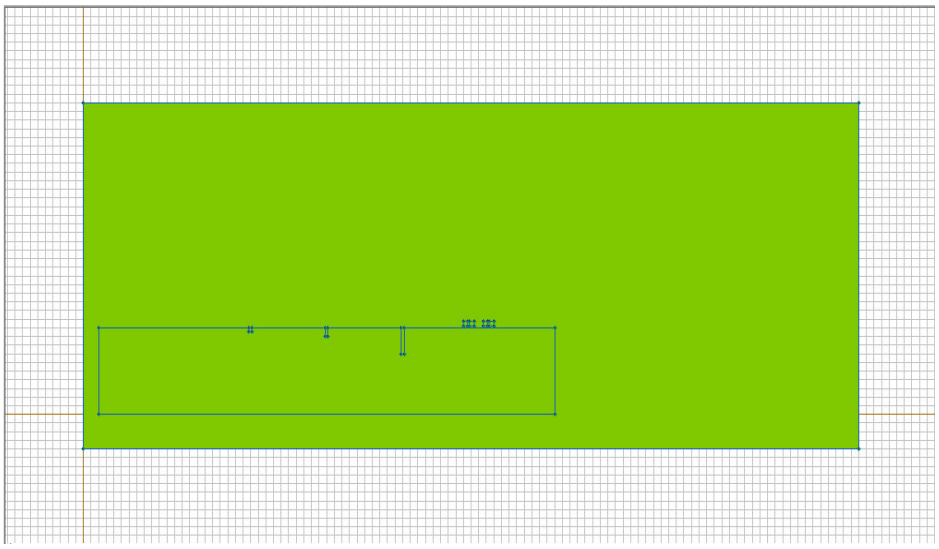
Şekil 4.23 ve Şekil 4.26 arasındaki farka bakarsak betona iletken katkılamanın ne kadar fark ettirdiği görülmektedir. Şekil 4.23'de duvarın hemen arkasında -110 dB değerleri görülürken şekil 4.26'te -200 dB değerlere kadar düşüş olmuştur. Şekil 4.26'daki 4. Adım 5G frekansı olan 24 GHz'de bir daha tekrarlanmış ve Şekil 4.27'deki sonuç elde edilmiştir.



Şekil 4.27 : 24 GHz'de 4. adımın tekrarlanması.

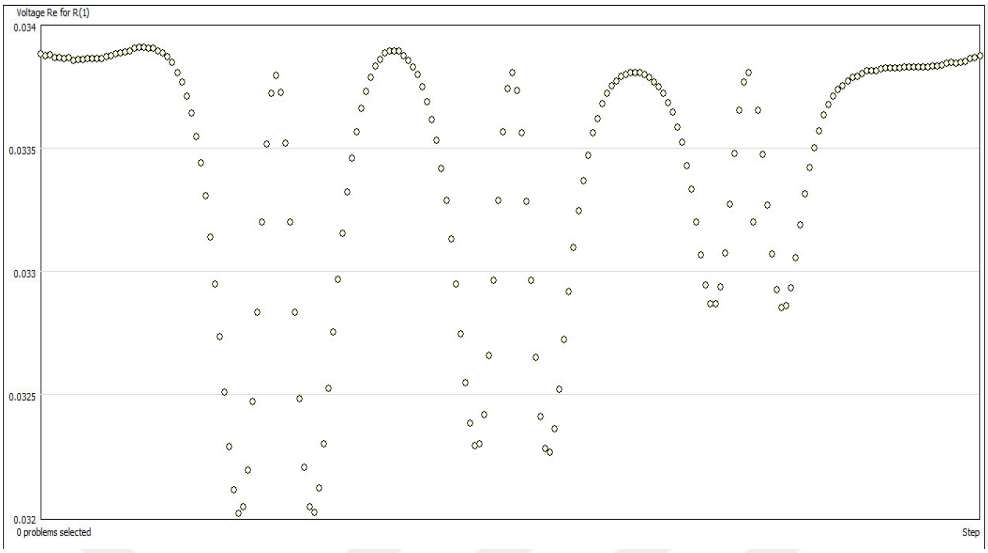
Şekil 4.27'den de görülebileceği gibi, duvarın hemen arkasında 50 dB kadar daha fazla zayıflama 5G frekansında gözlemlenmiştir.

Yapıların KE'lerine pratik olarak ölçebilecek bir test aleti KE sağlamak için çok büyük avantaj sağlayacaktır. Bu yüzden dördüncü tip simulasyon olarak tahribatsız muayene sistemi simüle edilmiştir. Yapıların özellikle duvarların elektromanyetik kalkanlama etkisini pratik olarak test edebilmek için eddy current tahribatsız muayene cihazlarını test aracı olarak kullanabilinmesi açısından hiçbir engel bulunmamaktadır [37]. Şekil 4.28'de hazırlanan bir çelik blok değişik derinliklerde deformasyonlar içermektedir ve Quickfield yazılımıyla hazırlanan eddy current tahribatsız muayene cihazı bu çatlakları tespit edebilmektedir.



Şekil 4.28 : Tasarlanan çelik blok ve üstünde eddy current tahribatsız muayene cihazı probu.

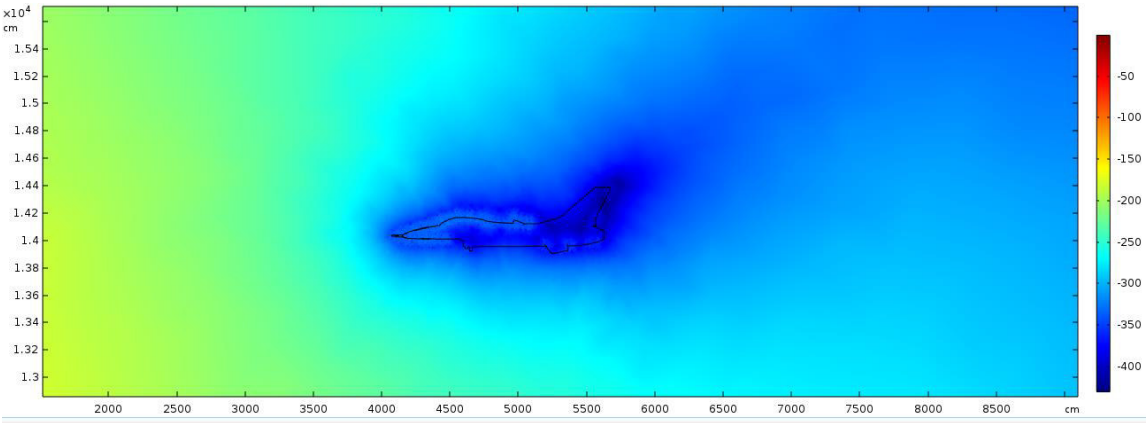
Bu yapı için Şekil 4.29'da simulasyon sonuçları verilmiştir.



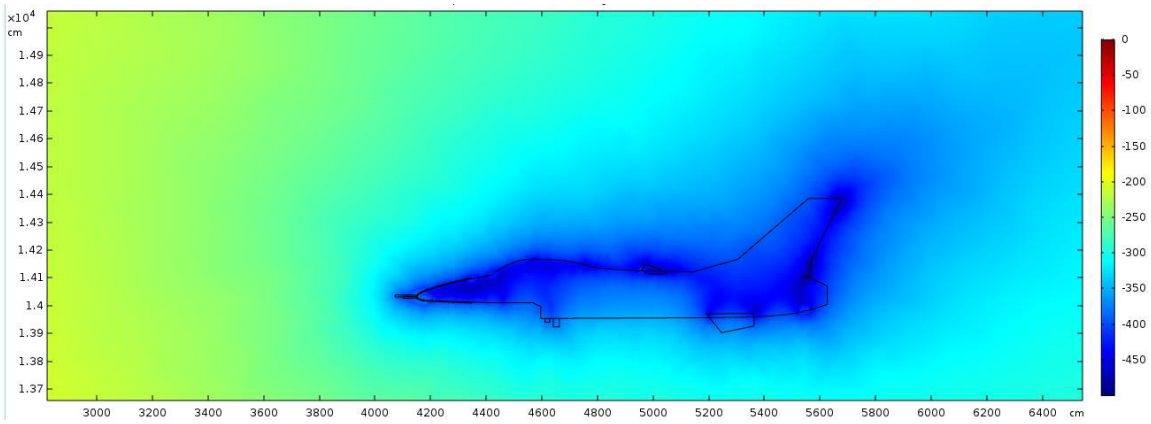
Şekil 4.29 : Cihazın numune üzerindeki çatlakların derinliğine göre çizdiği grafik.

Şekil 4.29'dan anlaşılacağı gibi tasarlanan eddy current cihazı bir metaldeki çatlakları tespit edebilmektedir. Bu cihazların çalışma prensibi çatlaklar üzerinde eddy akımlarının oluşturduğu potansiyel farkın çatlağın büyüklüğüne göre farklılık göstermesidir.

KE sadece yapılar ve canlılar için değil, savunma sanayii ürünleri içinde kritik öneme sahiptir. Bu yüzden beşinci tip simulasyon savunma sanayisi problemleri için yapılmıştır. Öncelikle, simülasyonda tamamen alüminyum kaplama F-16 uçağı (Şekil 4.30) ve kırıcılık indisi alüminyumun 4 katı olan germanyum gövdeli F-16 uçağının (Şekil 4.31) karşılaştırması yapılmıştır.



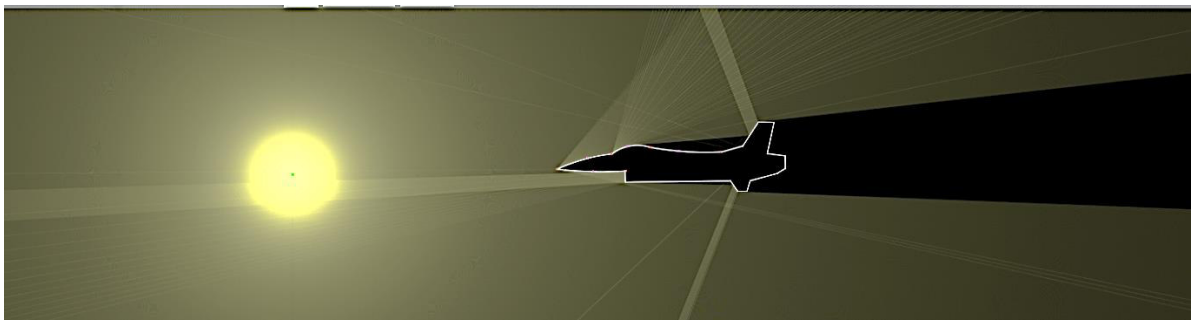
Şekil 4.30 : Alüminyum Gövdeli F-16 uçağı.



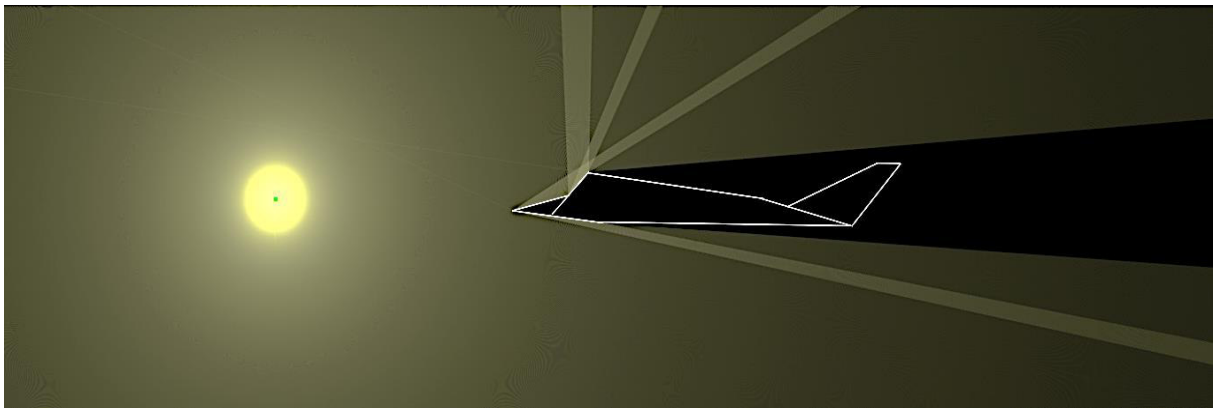
Şekil 4.31 : Germanyum Gövdeli F-16 uçağı.

Şekil 4.30 ve 4.31'da görülebileceği gibi, Germanyum gövdeli uçağın etrafını daha çok aydınlattığı açıkça görülmektedir. Yani uçak çok verimli bir şekilde üzerine gelen dalgaları saçılıma uğratmıştır. Metalurjik olarak bir uçağın germanyum ile kaplanması hiç verimli olmayacaktır. Germanyum oldukça sert bir metaloiddir bu yüzden şekillendirmesi oldukça zordur. Aynı zamanda alüminyuma göre atom ağırlığı yaklaşık olarak 3 kat daha fazladır. Bu nedenle uçağı çok daha fazla ağır yapacaktır.

İkinci olarak, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların hesaplanmasında geometrik optik benzetimleri kullanılmaktadır. Bu prensibe dayanarak tasarımında hayalet karakteristiği düşünülmemiş konvansiyonel çok rollü savaş uçağı F-16 ile geometrik olarak hayalet karakteristiği gözetilerek tasarlanmış ve radar izi düşük F-117 uçağının geometrik optik kurallarına uygun olarak tasarımlarının yansıtıcılık özellikleri simüle edilmiştir. 3 senaryo üzerine her iki uçak GO kurallarına göre karşılaştırılmıştır. Uçakların yüzeyleri %100 yansıtıcılı mükemmel aynalardır. Böylece mükemmel iletken yüzeyin elektromanyetik dalgaya davranışı deneye konu edilebilmiştir. İlk senaryo olarak havadan havaya uçağın önünde kaynak Şekil 4.32 ve 4.33'de görülmektedir.

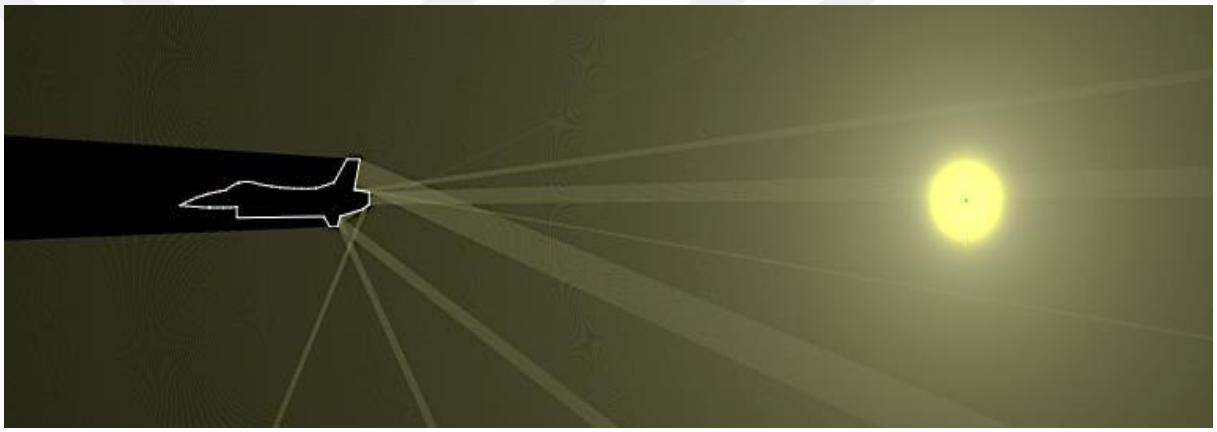


Şekil 4.32 : F-16 uçağının önünde kaynak olması durumu.



Şekil 4.33 : F-117 uçağının önünde kaynak olması durumu.

İkinci senaryo havadan havaya uçağın arkasında kaynak Şekil 4.34 ve 4.35'te görülmektedir.

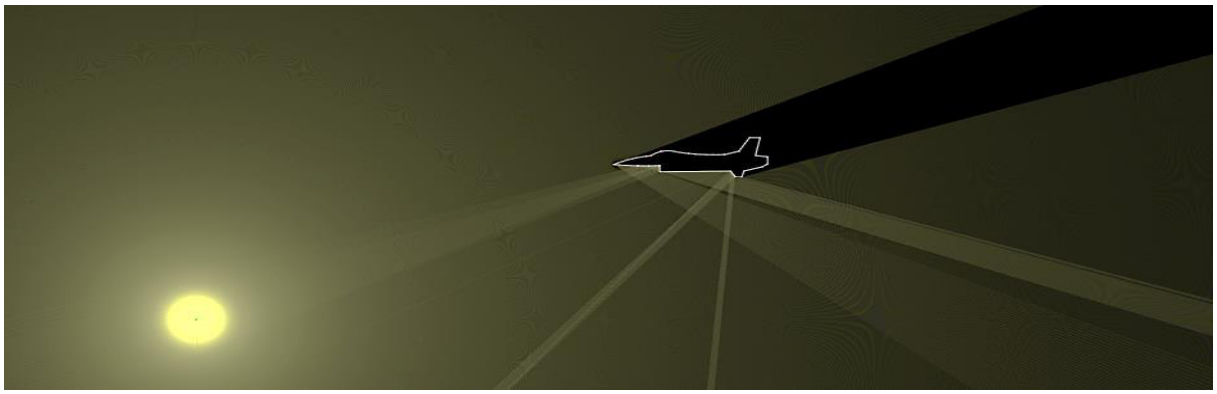


Şekil 4.34 : F-16 uçağının arkasında kaynak olması durumu.



Şekil 4.35 : F-117 uçağının arkasında kaynak olması durumu.

Son senaryo olarak karadan havaya uçağın önünde kaynak Şekil 4.36 ve 4.37'de görülmektedir.



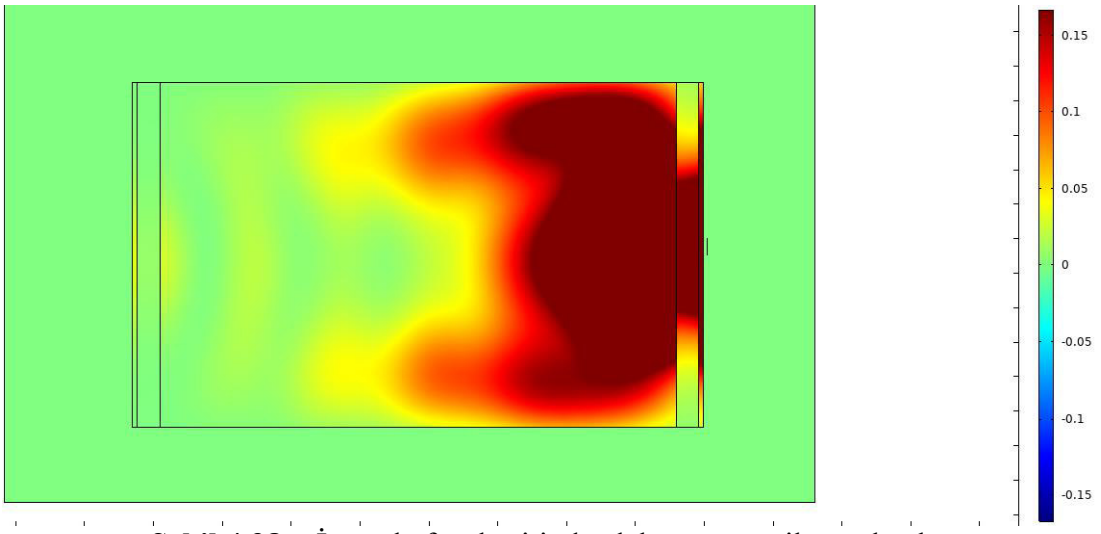
Şekil 4.36 : F-16 uçağının önünde yerde kaynak olması durumu.



Şekil 4.37 : F-117 uçağının önünde yerde kaynak olması durumu.

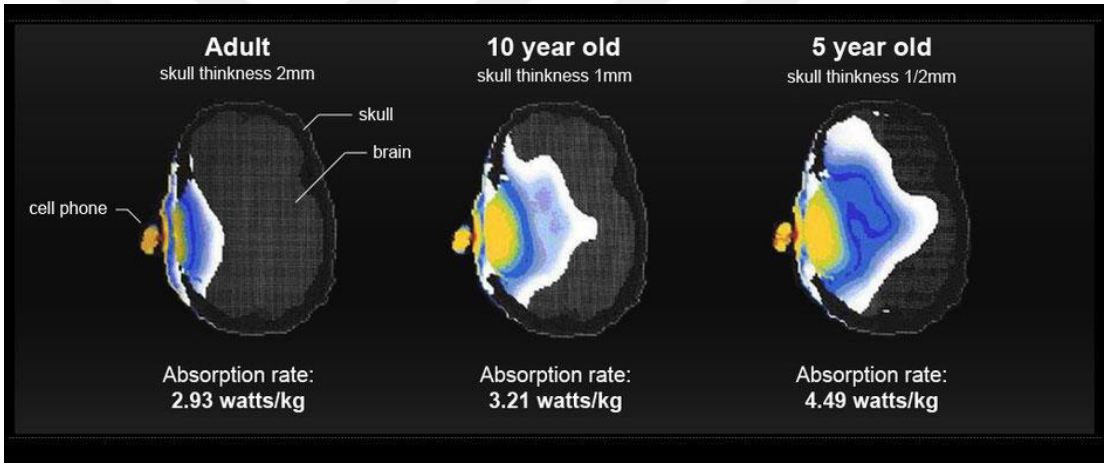
Şekil 4.32-4.37'den görülebileceği gibi, her 3 senaryoda da F-117 uçağının kaynağa çok daha az ışın yansıttığı açıkça görülmektedir. Üç senaryoda da geometrik tasarımın elektromanyetik kalkanlama etkisine ne kadar büyük katkı sağladığı özellikle savunma sanayiinin en hayati ve değerli özelliklerinden olan hayalet teknolojilerinde gözlemlenmiştir.

Canlı dokularıyla yapılan simülasyondan sonra, telefonla konuşurken en çok radyasyona maruz kalan en kritik organımız için bir simülasyon hazırlanmıştır. Altıncı tip simulasyon olarak, Şekil 4.38'de gösterildiği gibi, insan kafası kesitine 800 MHz 6 V/m elektrik alan şiddeti uygulandı ve elektromanyetik güç kaybı yoğunluğu gözlendi. Elektrik alan sağdan uygulandı. En dışta deri,derinin altında kafa tası kemiği, içte ise beyin bulunmaktadır. Kafa derisi kalınlığı 1.48 mm, kafa tası kemiği kalınlığı 6.5 mm, beyin ise 15 cm boyutundadır. Beynin içine giren güç mikrodalga fırın gibi karşı duvardan yansıdı. Bu dokularda oluşan güç kaybı ısıya neden olmaktadır. Derinin ilk başta ısıyı karşılayarak yansıtması ve ısıyı deride yaymasının beyinin korunması için oldukça önemli olduğu görüldü. Cep telefonları ile konuşuraken hoparlör kullanmanın önemi saptandı.



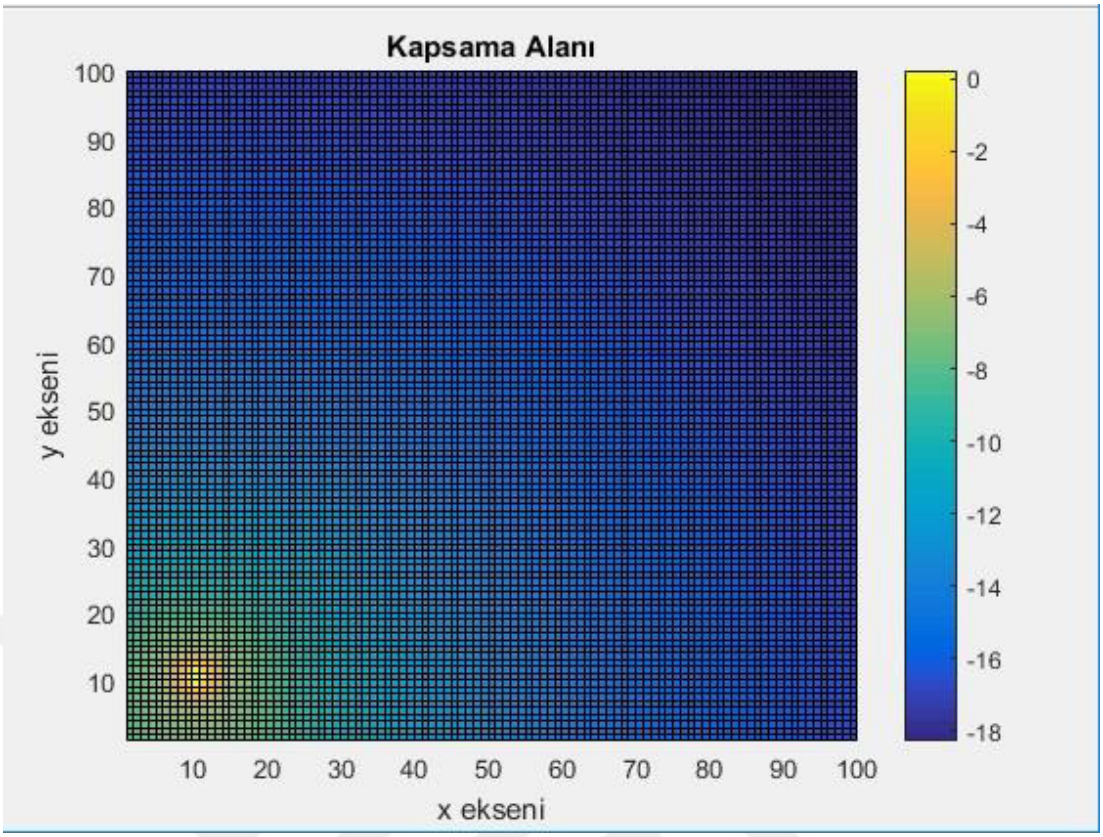
Şekil 4.38 : İnsan kafası kesitinde elektromanyetik güç kaybı.

Şekil 4.39'de sırasıyla erişkin, 10 yaşında ve 5 yaşındaki çocuklar üzerindeki SAR değerleri kıyaslanmıştır [43].



Şekil 4.39 : Erişkin, 10 yaş ve 5 yaş çocukta SAR değerleri. [43]

Şekil 4.39'dan görülebileceği gibi 5 yaşındaki çocuğun beyninde oluşan SAR değeri erişkin bireye göre iki katına çıkmıştır. Bunun sebebi kafa tası kemiği ve derinin daha ince oluşu ve EKE'de erişkin bireye göre daha az etki göstermesidir [43]. Son olarak, Şekil 4.40'da LOS ve yerden yansımaların toplamıyla MATLAB programında hazırlanmış kapsama alanı haritası gösterilmektedir.



Şekil 4.40 : LOS ve yerden yansıma durumunda kapsama alanı haritası.

Şekil 4.40'da boş ve yükseltisiz bir sahada yapılan kapsama alanı haritalaması başarılmıştır. İleriki aşamada, bu yapılan programa değişik materyallerden yapılan binalar eklenebilir, KE gözlemlenebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektromanyetik dalgalar günümüzde tamamıyla etrafımızı sarmaktadır. Uydu haberleşmesi, BT, WLAN, radarlar, radyolar, MR cihazları, mikrodalga fırınlar kısaca elektrik akımı barındıran birçok alet buna örnek teşkil etmektedir. Bilhassa mobil haberleşmede kullanılan frekansların gitgide artmasıyla birlikte insanlarda elektromanyetik radyasyonun oluşturabileceği olumsuz sağlık etkilerinden ciddi endişe duyulmaktadır. Haberleşmenin yaşamımızın her alanına girmesiyle dinleme ve casusluk faaliyetleri sıradan insanların dahi kaygı duymasına sebep olmaktadır. Tüm bu sebepler elektromanyetik kalkanlamanın ne kadar önemli bir konu olarak günümüzde ve gelecekte rol alacağını alenen göstermektedir. Yapılan çalışmada 900-6000 MHz arasında elektromanyetik dalganın üretilen 10x10 1cm kalınlıklı beton, gaz beton, kömür katkılı beton, alüminyum katkılı beton, köpük strafor katkılı beton ve çelik blok malzemelerle karşılaştığında ne kadar zayıflayacağını göstermektedir. 1300 MHz'de gaz beton ile 9 dB kalkanlama etkisi elde edilmiştir. 5400 MHz frekansında ise alüminyum 5 dB kalkanlama etkisi göstermiştir. Ülkemiz için elektromanyetik kalkanlama materyali olması açısından önemli bir kazanım olabilecek ve katma değer oluşturabilecek olan Bayburt taşında ise 1600 MHz – 2400 MHz aralığında 5 dB civarında bir elektromanyetik kalkanlama etkisi elde edilmiştir. En yüksek kalkanlama etkisi paslanmaz çelik blokta ölçülmüş olup, 5200 MHz'de -50.94 dB olarak bulunmuştur.

Canlı dokularıyla yapılan deneylerde deri dokunun kas dokuya göre daha yansıtıcı olduğu ve elektromanyetik radyasyonla ilk karşılaşan deri ve kas dokunun iyi bir yansıtma yaptığı saptanmıştır. İç organlara elektromanyetik radyasyonun ulaşmaması için bu oldukça önemlidir.

Uçaklarla ilgili yapılan deneylerde alüminyum gövdeli uçağa karşılık ve kırıcılık indisi yüksek bir materyal olan germanyum gövdeliği uçakta saçıcılığın arttığı, GO'in yansıyan dalgaları yönlendirme ve radarlara karşı hayelet teknolojilerinde kritik öneme sahip olduğu tespit edilmiştir.

Pratik olarak eddy akımı cihazlarının modifiye edilerek inşaa edilmiş yapıların kalkanlama özelliklerini saptamada kullanılabileceği görülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Chiaraviglio, L., Fiore, M., & Rossi, E.** 5G Technology: Which Risks From the Health Perspective?.

[2] **Di Ciaula, A.** (2018). Towards 5G communication systems: Are there health implications?. *International journal of hygiene and environmental health*, *221*(3), 367- 375.

[3] **Simkó, M., & Mattsson, M. O.** (2019). 5G Wireless Communication and Health Effects— A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz. *International journal of environmental research and public health*, *16*(18), 3406.

[4] **Policy Department for Economic**, Scientific and Quality of Life Policies, Directorate- General for Internal Policies, European Parliament, *5G Deployment: State of Play in Europe, USA and Asia,* June 2019

[5] **Baranoski, E. J.** (2008). Through-wall imaging: Historical perspective and future directions. *Journal of the Franklin Institute*, *345*(6), 556-569.

[6] **Chao, G. A. O., & Yang, B. A. I.** (2015). Aircraft radar stealth test and evaluation technology and progress. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, *41*(10), 1873-1879.

[7] **Gac, F. D., Young Jr, A. T., & Migliori, A.** (1996). *Technical evaluation of Russian aircraft stealth coating and structural materials* (No. LA-UR-96-3227). Los Alamos National Lab., NM (United States).

[8] **Liangliang, C., Kuizhi, Y., Weigang, G., & Dazhao, Y.** (2016). Integration Analysis of Conceptual Design and Stealth-Aerodynamic Characteristics of Combat Aircraft. *Journal of Aerospace Technology and Management*, *8*(1), 40-48.

[9] **Karjalainen, O., Rantala, S., & Kivikoski, M.** (2002, November). 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). IEEE.

[10] **Dai, Y., Sun, M., Liu, C., & Li, Z.** (2010). Electromagnetic wave absorbing characteristics of carbon black cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, *32*(7), 508-513.

[11] **Guan, H., Liu, S., Duan, Y., & Zhao, Y.** (2007). Investigation of the electromagnetic characteristics of cement based composites filled with EPS. *Cement and concrete composites*, *29*(1), 49-54

[12] **Jeong, Y. R., Hong, I. P., Chun, H. J., & Yook, J. G.** (2013). Transmission characteristics of a composite made with ground granulated blast furnace slag. *IEICE Electronics Express*, 10-20130855.

[13] **Cho, S. S., Yoo, J. S., Kim, J. M., & Hong, I. P.** (2017). Prediction of electromagnetic transmission properties using dielectric property modeling of foamed concrete containing BFS. *Construction and Building Materials*, *151*, 650-660.

[14] **Baoyi, L., Yuping, D., Yuefang, Z., & Shunhua, L.** (2011). Electromagnetic wave absorption properties of cement-based composites filled with porous materials. *Materials & Design*, *32*(5), 3017-3020.

[15] **Pruksanubal, A.** (2011, March). Study on electromagnetic properties of reinforced concrete construction wall. In *PIER Symposium Proceedings* (pp. 201-204).

[16] **Kubacki, R.** (2014, August). New Attempt to Building Materials Permittivity Measurements. In *PIERS Proceedings*.

[17] **Bugaj, M.** (2014, August). Attenuation Measurements of Materials Used in Construction of Buildings. In *PIERS Proceedings*.

[18] **Ali-Rantala, P., Ukkonen, L., Sydanheimo, L., 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.

[19] **Ali-Rantala, P., Sydanheimo, L., Keskilammi, M., & Kivikoski, M.** Indoor Propagation Comparison Between 2.45 GHz and 433MHz Transmissions, 2002 IEEE Antennas & Propagat. In *Soc. Int. Symposium* (pp. 240-243).

[20] **Cakir, M., Kockal, N. U., Ozen, S., Kocakusak, A., & Helhel, S.** (2017). 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.

[21] **Cao, J., & Chung, D. D. L.** (2003). 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.

[22] **Wen, S., & Chung, D. D. L.** (2004). Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement. *Cement and Concrete Research*, *34*(2), 329-332.

[23] **Guan, H., Liu, S., Duan, Y., & Cheng, J.** (2006). Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials. *Cement and Concrete Composites*, *28*(5), 468-474.

[24] **Tserpes, K., Tzatzadakis, V., & Bachmann, J.** (2020). Electrical Conductivity and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Bio-Composites. *Journal of Composites Science*, *4*(1), 28.

[25] **Celozzi, S., & Araneo, R.** (2005). Electromagnetic shielding. *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*.

[26] **Geetha, S., Satheesh Kumar, K. K., Rao, C. R., Vijayan, M., & Trivedi, D. C.** (2009). EMI shielding: Methods and materials—A review. *Journal of applied polymer science*, *112*(4), 2073-2086.

[27] **Bozzetti, M., Pisu, L., Sarto, M. S., & Greco, S.** (2011, September). Shielding performance of an expanded copper foil over a wide frequency range. In *10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (pp. 46-51). IEEE.

[28] **Safarova, V., & Militky, J.** (2011, August). Development of a hybrid electromagnetic shielding fabric. In *18th international conference on composite materials* (pp. 21-26).

[29] **Liu, P. S., & Cui, G.** (2015). Characterization of the electromagnetic shielding and compressive behavior of a highly porous titanium foam with spherical pores. *Journal of Materials Research*, *30*(22), 3510-3517.

[30] **Arora, S., & Kaur, R.** (2013). Stealth technology and counter stealth radars: a review. *Research Inventy: International Journal Of Engineering And Science*, *3*(12),15-19.

[31] **Stealth Technology**. (2017). In *ScienceAid*. Retrieved Apr 12, 2020, from https://scienceaid.net/Stealth_Technology

[32] **Griffiths, D. J.** (1962). *Introduction to electrodynamics*. New Jersey: Prentice Hall.

[33] **Cheng, D. K.** (1993). Fundamentals of engineering electromagnetics.

[34] **Farwell, M., Ross, J., Luttrell, R., Cohen, D., Chin, W., & Dogaru, T.** (2008). Sense through the wall system development and design considerations. *Journal of the Franklin Institute*, *345*(6), 570-591.

[35] **Mishchenko, M. I.** (2014). *Electromagnetic scattering by particles and particle groups: an introduction*. Cambridge University Press.

[36] **Url-1 <**https://aaronia.com/>, erişim tarihi 18.05.2020

[37] **Ali, H. A. M., & Ibrahim, M. A.** (2016). Analysis of X-ray structure, dielectric properties and AC conductivity of (4E)-2-amino-3-cyanobenzo [b] oxocin-6-one. *Materials Science-Poland*, *34*(2), 386-392.

[38] **Takahashi, N., Fujiwara, K., & Takehara, J.** (2001). Basic study on characteristics of magnetic shielding and electromagnetic shielding. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, *31*.

[39] **Arık, E.** (2018). İki Kırınım İçeren Senaryolar İçin Kapsama Alanı Haritalanması. (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[40] **Arık, E. and Tabakcioglu, M.B.** (2019). A Tool: Coverage Mapping with Direct and Reflected Rays from Lossy and Lossless Surfaces. *PIERS*, Rome, Italy.

[41] **Multiphysics**, C. O. M. S. O. L. (1998). Introduction to COMSOL multiphysics®. *COMSOL Multiphysics, Burlington, MA, accessed Feb*, *9*, 2018.

[42] **User'Guide**, Q. version 5.8. *WEB http://www. quickfield. com.*

[43] **Uzunoğlu, M., & ONAR, Ö. Ç.** (2003). *Her Yönü ile Matlab* (Vol. 109). Ali KIZIL.

[44] **Kaur, B., Singh, S., & Kumar, J.** (2015, December). A Study of SAR pattern in biological tissues due to RF exposure. In *2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)* (pp. 1-5). IEEE.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Burak Dursun

Doğum Tarihi ve Yeri : 28.02.1993 Çorum

E-posta : burakdursun970@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Karabük Üniversitesi , Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği İngilizce
- **Yüksek Lisans** : 2020, Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Çorbacıoğlu Elektrik-Proje
- Halk Enerji
- BURSAMNDT
- YEDAŞ (Staj)

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Daş, M., Zorlu, A., Dursun, B., Tabakcioglu, M.B., "Rasgele Dağıtılmış Binalar İçeren Bir Senaryo İçin En Uygun Baz İstasyon Konumunu Tespiti", Akademik Bilişim Konferansı, Ordu,13-15 Şubat 2019
- Recepoğlu, S., Dursun, B., Tekin, İ., Tabakcıoğlu, M.B., " Çeşitli Malzemelerinin Elektromanyetik Kalkanlama Verimlilikleri, URSI 2020 X. Bilimsel Kongresi, Gebze (Gönderildi)