

KATMANLI YAPILARIN EKSPANLAMA ETKİNLİK ANALİZİ

SHIELDING EFFECTIVENESS ANALYSIS OF MULTILAYERED STRUCTURES

ÖMER KOŞAN

PROF. DR. ÇİĞDEM SEÇKİN GÜREL

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2015

ÖMER KOŞAN'ın hazırladığı “**KATMANLI YAPILARIN EKRANLAMA ETKİNLİK ANALİZİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adnan KÖKSAL
Başkan

Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL
Danışman

Doç. Dr. Özlem ÖZGÜN
Üye

Doç. Dr. Ali KARA
Üye

Doç. Dr. Hamza KURT
Üye

Bu tez HACETTEPE Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

02/11/2015

ÖMER KOŞAN

ÖZET

KATMANLI YAPILARIN EKRANLAMA ETKİNLİK ANALİZİ

Ömer KOŞAN

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

Kasım 2015, 68 Sayfa

Bu çalışmada iyi iletken, dielektrik ve metamateryale içeren katmanlı yapı modelleri için ekranlama etkinliği analizi gerçekleştirilmiştir; malzeme türü, katman kalınlığı, polarizasyon ve elektromanyetik dalganın geliş açısının ekranlama etkinliğine etkisi incelenmiştir. Çok katmanlı yapılar için periyodik ve Fibonacci diziliimli yapılar oluşturularak ekranlama etkinliği değerleri hesaplanmıştır. Bu amaçla homojen olmayan yapı iletim hatları teorisi kullanılmış ve çok katmanlı yapılar için birbirini tekrarlayan yapıda eşitlikler elde edilerek ekranlama etkinliği analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son bölümünde katmanlı yapılar için elde edilen ekranlama etkinliği sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ekranlama etkinliği, Çok katmanlı yapılar, Elektromanyetik, Elektromanyetik uyumluluk, Metamateryale.

ABSTRACT

SHIELDING EFFECTIVENESS ANALYSIS OF MULTILAYERED STRUCUTURES

Ömer KOŞAN

**Master of Science, Department of Electrical Electronics
Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

November 2015, 68 pages

In this work, the shielding effectiveness of multilayered structures including different materials such as conductors, dielectrics and metamaterials are analyzed. The effects of parameters such as material type, thickness, number and sequence of layers, polarization, incident angle of electromagnetic wave on the shielding effectiveness are studied. The shielding effectiveness is calculated for periodic and Fibonacci multilayered structures. In this study, the shielding effectiveness calculations have been made by using nonuniform transmission line theory which provides recursive equations. At the end of the work, shielding effectiveness results of multilayered structures including different materials have been compared and interpreted.

Key words: Shielding effectiveness, Multilayered structures, Electromagnetic, Electromagnetic compatibility, Metamaterial.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Eğitimime başladığımdan bu yana ve tez çalışmam süresince anlayış ve hoşgörüsüyle bana her zaman yön gösteren değerli tez danışmanım Prof. Dr. Çiğdem Seçkin Gürel'e çok teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olan sevgili AİLE'me teşekkür ederim.

Verdiği desteklerden ötürü ASELSAN ailesine teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca benim için yapmış olduğu tüm fedakârlıklarından ve bana göstermiş olduğu hoşgörü ve sabrından dolayı eşim Özge'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER.....	viii
ÇİZELGELER.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTROMANYETİKTE TEMEL KAVRAMLAR	8
2.1. Maxwell Denklemleri	8
2.2. Yansıma ve İletim Katsayıları	9
2.2.1. İki Katmanlı Yapılar için Yansıma ve İletim Katsayıları.....	9
2.2.2. Çok Katmanlı Yapılar için Yansıma ve İletim Katsayıları.....	12
3. ELEKTROMANYETİK EKRANLAMA (PERDELEME)	17
3.1. Tek Katmanlı Yapılarda Dikey Polarizasyon İçin Ekranlama Etkinliği.....	18
3.2. Tek Katmanlı Yapılarda Yatay Polarizasyon İçin Ekranlama Etkinliği	22
3.3. Tek Katmanlı Yapılarda Dik Gelen Dalga İçin Ekranlama Etkinliği	23
3.4. Çok Katmanlı Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği	25
4. KATMANLI YAPILAR İÇİN EKRANLAMA ETKİNLİĞİ SONUÇLARI	30
4.1. İyi İletkenle Tasarlanan Yapıların Ekranlama Etkinliği.....	31
4.1.1. Tek Katmanlı Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği.....	32
4.1.2. Periyodik Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği	36
4.2. Dielektrik Malzeme İle Tasarlanan Yapıların Ekranlama Etkinliği.....	40
4.2.1. Tek Katmanlı Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği	42
4.2.2. Periyodik Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği	45
4.2.3. Fibonacci Serisi Şeklinde Modellenen Yapıların Ekranlama Etkinliği	46
4.3. Dielektrik ve Metamalzeme ile Tasarlanan Yapıların Ekranlama Etkinliği	53
4.3.1. Tek Katmanlı Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği	54

4.3.2. Periyodik Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği	58
4.3.3. Fibonacci Serisi Şeklinde Modellenen Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği ..	58
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ.....	68

ŞEKİLLER

Şekil 1-1 EMC probleminin unsurları.....	1
Şekil 1-2 Bağlaşım mekanizmaları	2
Şekil 1-3 Faraday kafesi örneği [8].....	3
Şekil 2-1 Dikey polarizasyon için elektromanyetik dalganın yansıması ve iletilmesi	10
Şekil 2-2 Yatay polarizasyon için elektromanyetik dalganın yansıması ve iletilmesi	11
Şekil 2-3 Dik gelen dalganın yansıması ve iletilmesi.....	12
Şekil 2-4 n katmanlı homojen ortam.....	13
Şekil 3-1 Elektromanyetik ekranlama.....	17
Şekil 3-2 Dikey polarizasyon ekranlama etkinliği	19
Şekil 3-3 Yatay polarizasyon ekranlama etkinliği	23
Şekil 3-4 Dik gelen dalga için ekranlama etkinliği	24
Şekil 3-5 İletim hattı devre parametreleri.....	26
Şekil 3-6 İletim hattı devre modeli	26
Şekil 4-1 n katmanlı yapı modeli	30
Şekil 4-2 Alüminyum ve bakırın frekansa bağlı empedans değerleri.....	31
Şekil 4-3 Çelik, demir ve nikelin frekansa bağlı empedans değerleri	32
Şekil 4-4 İyi iletken malzemelerin ekranlama etkinliği (a) $d_1=0.0001m$, (b) $d_1=0.0005m$, (c) $d_1=0.001m$	34
Şekil 4-5 İyi iletken malzemelerin ekranlama etkinliği ; (a) Dikey polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Dikey polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$	35
Şekil 4-6 İyi iletken malzemelerin ekranlama etkinliği; (a) Yatay polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Yatay polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$	36
Şekil 4-7 (a) $(AB)^1$, 2 katmanlı yapı, $d_A= d_B 0.0001m$ (b) $(AB)^2$, 4 katmanlı yapı $d_A= d_B 0.0001m$ (c) $(AB)^4$, 8 katmanlı yapı $d_A= d_B 0.00004m$	37
Şekil 4-8 (a) $(AB)^1$ şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği; (b) $(AB)^2$ şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği; (c) $(AB)^4$ şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği.....	38
Şekil 4-9 (a) $(ABCA)^1$ şeklinde modellenen 4 katmanlı yapı (b) $(ABCA)^2$ şeklinde modellenen 8 katmanlı yapı	39
Şekil 4-10 $(ABCA)^1$ ve $(ABCA)^2$ şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği	40

Şekil 4-11 Dielektrik ortamlar arası elektromanyetik dalganın kırılması	41
Şekil 4-12 Dielektrik malzemelerin ekranlama etkinliği; (a) $d_1=0.001m$ (b) $d_2=0.005m$	42
Şekil 4-13 Dielektrik malzemelerin ekranlama etkinliği ; (a) Dikey polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Dikey polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$	43
Şekil 4-14 Dielektrik malzemelerin ekranlama etkinliği; (a) Yatay polarizasyon $\theta_g=30^\circ$, (b) Yatay polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$	44
Şekil 4-15 (a) $(AB)^3$, 6 katmanlı yapı, $d_A= d_B 0.001m$ (b) $(AB)^5$, 10 katmanlı yapı, $d_A= d_B 0.001m$	45
Şekil 4-16 Dielektrik Malzeme ile $(AB)^1$, $(AB)^2$, $(AB)^3$, $(AB)^4$ ve $(AB)^5$ Şeklinde Modellenen Yapıların Ekranlama Etkinliği.....	46
Şekil 4-17 Fibonacci serisi kuralı 5. iterasyon ile oluşturulmuş çok katmanlı yapı	47
Şekil 4-18 Fibonacci serisi kuralı 5. iterasyon ile oluşturulmuş çok katmanlı olarak modellenen yapının ekranlama etkinliği	48
Şekil 4-19 Simetrik Fibonacci serisi kuralı ile oluşturulmuş çok katmanlı yapı .	48
Şekil 4-20 Dielektrik malzeme ile ABAABA şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği	49
Şekil 4-21 Azaltılmış Fibonacci serisi kuralı ile oluşturulmuş çok katmanlı yapı50	
Şekil 4-22 Dielektrik malzeme ile BAABBAAB ve AABBAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği.....	50
Şekil 4-23 Azaltılmış Fibonacci serisinin 4. iterasyonu ile oluşturulmuş yapının art arda iki kez eklenmesiyle oluşturulmuş çok katmanlı yapı, $d_A= d_B=0.001m$.	51
Şekil 4-24 Dielektrik malzeme ile ABAAB ABAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği	51
Şekil 4-25 Geciktirilmiş Fibonacci serisinin 1. iterasyonu ile oluşturulmuş çok katmanlı yapı, $d_A= d_B=0.001m$	52
Şekil 4-26 Dielektrik malzeme ile AABAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği	52
Şekil 4-27 Dielektrik-Metamalzeme ortamlar arası elektromanyetik dalganın kırılması	53
Şekil 4-28 Dielektrik-Metamalzemelerin ekranlama etkinliği; (a) $d_1=0.001m$ (b) $d_2=0.005m$	55
Şekil 4-29 Dielektrik ve metamalzemelerin ekranlama etkinliği ; (a) Dikey polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Dikey polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$	56

Şekil 4-30 Dielektrik malzemelerin ekranlama etkinliği; (a) Yatay polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Yatay polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$	57
Şekil 4-31 Dielektrik-Metamalzeme ile $(AB)^1$, $(AB)^2$, $(AB)^3$, $(AB)^4$ ve $(AB)^5$ şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği	58
Şekil 4-32 Dielektrik-Metamalzeme ile ABAABABA şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği.....	59
Şekil 4-33 Dielektrik-Metamalzeme ile ABAABA şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği	59
Şekil 4-34 Dielektrik-Metamalzeme ile BAABBAAB ve AABBAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği	60
Şekil 4-35 Dielektrik-Metamalzeme ile ABAAB ABAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği.....	61
Şekil 4-36 Dielektrik-Metamalzeme ile AABAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği	61

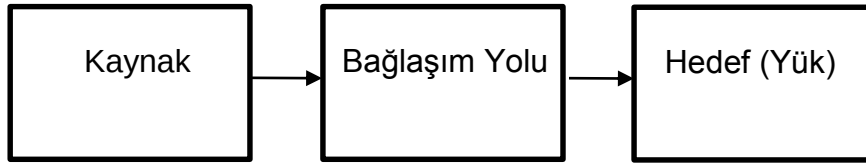
ÇİZELGELER

Tablo 4.1	5. İterasyona kadar oluşturulmuş Fibonacci sayıları ve yapısı	47
-----------	---	----

1. GİRİŞ

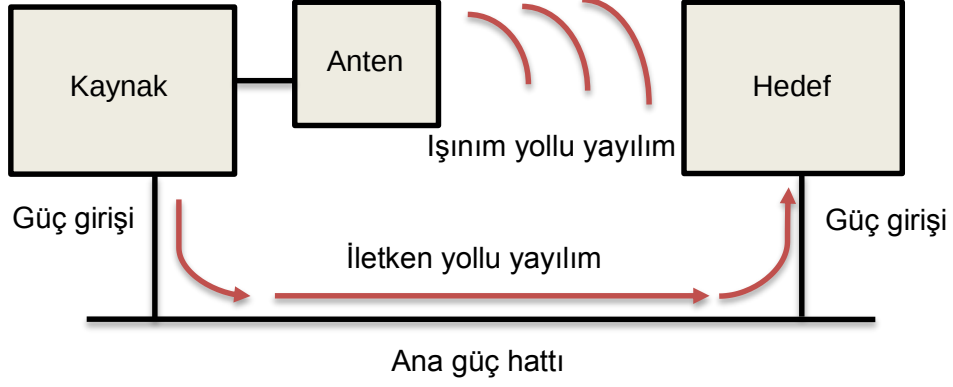
Teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesi sonucunda günlük hayatta elektronik cihazların kullanımı artmaktadır. Sıkça kullanılan cep telefonları, bilgisayarlar, haberleşme araçları, elektrikli ev araçları, televizyonlar, alıcı ve vericiler, uydu iletişim sistemleri ve pek çok benzer elektronik cihaz kontrollü veya kontrolsüz olarak çevrelerine elektromanyetik radyasyon yaymaktadır. Bu çeşitli frekans aralığındaki istemli veya istemsiz elektromanyetik ışınlar, elektronik cihazların performanslarını kısmen veya tamamen bozacak şekilde etkilemektedir. Diğer bir ifade ile elektromanyetik girişime (EMI) sebep olmaktadır [1]. Günlük hayatta rastlanabilecek bu sorun askeri sistemler için kritik bir öneme sahiptir. Bu sebeple askeri alanda kullanılan elektronik cihazların elektromanyetik uyumlu olması istenmektedir. Elektromanyetik uyumluluk (EMC), bir cihaz veya sistemin içinde bulunduğu elektromanyetik ortamda fonksiyonlarını, bu ortamdaki diğer cihaz veya sistemlerinin performanslarını etkileyecek düzeyde yayılım yapmadan yerine getirebilmesidir [1].

EMC probleminin oluşumunda üç temel unsur yer almaktadır. Bunlar kaynak, bağlaşım yolu ve hedeftir. Kaynak, elektromanyetik yayılımın olduğu bileşendir [2]. EMI gürültü kaynaklarına RF vericileri, anahtarlama elemanları, elektrik motorları, yıldırım, elektrostatik deşarj, floresan ve neon lambalar, güneş gürültüsü örnek olarak verilebilir.



Şekil 1-1 EMC probleminin unsurları

Hedef (yük) ise etkilenen sistem veya cihazdır [2]. Özellikle düşük güçlü elemanlar elektromanyetik gürültüye çok duyarlı olmaktadır. RF alıcılar, sensörler, mühimmat ve silah sistemleri hedef unsuruna örnek olarak verilebilir. Kaynağın hedefi (yükü) etkilemesi için ise aralarında bağlaşım yolu (kuplaj yolu) olması gerekmektedir. Bağlaşım yolu iletkenler üzerinden (conducted) veya ışınımsal (radiated) yayılım yoluyla ortaya çıkmaktadır. Şekil 1.2’de elektromanyetik girişime neden olan iletken ve ışıyım yolu bağlaşım yolları genel olarak gösterilmektedir.



Şekil 1-2 Bağlaşım mekanizmaları

EMI problemlerine ilişkin tarihte önemli olaylar yaşanmıştır. 1967 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ne ait uçak gemisinin güvertesinde bulunan radar, geminin füze sistemini etkilemiş ve arka arkaya patlamalar yaşanmasına neden olmuştur [3]. 1988 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ne ait beş adet helikopter RF vericilere yakın uçmaları sonucunda farklı zamanlarda kazaya uğramıştır. RF vericilerin helikopterin uçuş kontrol sistemini etkilediği farkedilmiştir [4]. İngiltere'ye ait savaş gemisi uydu haberleşmesi esnasında elektronik destek sistemlerinin kapanması üzerine o sırada Arjantin uçağından atılan radar güdümlü füzeyi algılayamamıştır [4].

EMI problemlerinin önüne geçilebilmesi için cihazlara veya sistemlere yönelik limit değerleri belirlenmiştir. Bu amaçla tanımlanan MIL-STD-461 ve MIL-STD-464 askeri standartları hazırlanmıştır. Ülkemizde de bu standartlar referans alınarak cihazlar veya sistemler tasarlanmaktadır.

MIL-STD-464 standardı sistem seviyesinde tanımlıyken, MIL-STD-461 standardı ise birim ve alt sistem seviyesi cihazlar için tanımlıdır. MIL-STD-461 standardında birçok test yer almaktadır. Bu testler dört ana başlık altında toplanabilir [5];

- İletkenlik Yollu Yayılım (CE)
- Işınım Yollu Yayılım (RE)
- İletkenlik Yollu Hassasiyet (CS)
- Işınım Yollu Hassasiyet (RS)

Cihaz veya sistemlerin elektromanyetik uyumluluk şartını sağlaması için birçok önlem mevcuttur. Bu önlemlerin en başında “Ekranlama” yöntemi gelmektedir. Belirli bir bölgenin dış ortamda var olan elektromanyetik yayılımdan veya dış ortamda var olan elektromanyetik yayılımın belirli bir bölgede bulunan

elektromanyetik yayılımdan etkilenmesini engellemek amacıyla kullanılan metal yapılara ekran denilmektedir [6]. Ekranlama ise bu bölgelerin birbirlerinden izole edilme işlemidir. Ekranlama etkinliği ise ekranlamanın ne derece etkili olduğu gösteren bir parametre olup, birimi desibeldir (dB). Ekranlama yöntemi kaynağa veya hedefe uygulanarak bağlaşım yolunun oluşmasını engellemektedir.

Ekran yapılarının tarihi “Faraday Kafesi” olarak bilinen yapılara dayanmaktadır. 1836 yılında İngiliz Fizikçi Micheal Faraday tarafından bulunduğu için “Faraday Kafesi” olarak bilinmektedir. Faraday kafesi, iletken malzemeler ile örülmüş olup kafes içerisini kafes dışarısında yer alan elektrik alandan koruyan yapılara denilmektedir [7]. Şekil 1.3’te Tesla bobini yardımıyla üretilen yüksek gerilimin boşalması olayı gösterilmiştir. Faraday kafesi sayesinde kafes içerisinde bulunan kişi zarar görmemektedir.



Şekil 1-3 Faraday kafesi örneği [8]

Ekranlar tek ve çok katmanlı yapılardan oluşabilmektedir. Bu çalışmada katmanlı ekran yapıların ekranlama etkinliği performansı incelenmiştir. Katmanlı yapılar farklı tür özelliklere sahiptir. En temel özelliği malzeme türüne bağlı elektromanyetik özelliklerdir. Her bir katman iyi iletken, yarı iletken, dielektrik ve metalmalzeme olabilmektedir. Çok katmanlı yapılar homojen ve homojen olmayan yapılar olarak ikiye ayrılmaktadır. Homojen çok katmanlı yapıların her bir katmanındaki elektromanyetik özellikler değişmemektedir. Homojen olmayan çok katmanlı yapılar için ise bu durumun tam tersi geçerlidir. Yani katmanlarda farklı tür malzemelerin yer aldığı modellerdir. Bir diğer özellik katmanlı ekran yapılarının katman kalınlığıdır.

Katman kalınlığı da ekranlama etkinliğini etkileyen parametrelerden biridir. Son olarak çok katmanlı yapılar için geçerli diğer özellik diziliş sırasıdır. Farklı tür dizilim modelleri mevcut olup, bu çalışmada periyodik ve Fibonacci serisi şeklinde özel dizilim modelleri kullanılmıştır.

Ekranlama etkinliği analizlerinde elektromanyetik teorelin temelini oluşturan Maxwell eşitlikleri kullanılmaktadır. 1860 yılında İskoç bilim adamı Clerk Maxwell tarafından ileri sürülmüş olduğu için “Maxwell eşitlikleri” olarak adlandırılmaktadır. Elektrik ve manyetizma arasındaki ilişkiyi açıklayan yasalardır [9, 10]. Bu eşitlikler yardımıyla katmanlı yapılar için sınır koşulları ifadeleri kullanılarak ekranlama etkinliği hesabı gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntem alan dağılım metodu olarak da bilinmektedir [11]. Maxwell eşitliklerinin diferansiyel formda olması sebebiyle, katman sayısının arttığı durumlarda her bir katmanda sınır koşullarının yazılması ve elektrik-manyetik alan ifadelerinin hesaplanması zor olmakta ve bu ifadelerin çözümü uzun süreler almaktadır. Bu sorunu gidermek için sonlu elemanlar, moment yöntemi ve sonlu fark yöntemleri gibi sayısal yöntemler kullanılmakta olup bu yöntemlere dayalı bilgisayar algoritmaları da hesaplamalarda kullanılmaktadır [12]. Bu çalışmada katmanlı yapıların incelenmesinde homojen olmayan iletim hatları yöntemine başvurulmuştur [13].

Ekranlama etkinliği uygulamalarında farklı türde malzemeler kullanılmaktadır. En çok kullanılanları iletkenliği yüksek olan bakır, alüminyum, nikel, çelik ve demir vb. malzemelerdir. Bu malzemelerden veya birleşimlerinden oluşan tek ve çok katmanlı ekran yapıları mevcuttur. Bu kapsamda gerçekleştirilmiş çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

C.D. Raj, vd. [14] tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada çok katmanlı iletken yapıların ekranlama etkinliğine ilişkin hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Çok katmanlı yapılar için düşük frekanslarda yansıma kaybının yutma kaybından daha baskın, yüksek frekans bölgesinde ise yutma kaybının yansıma kaybına göre daha baskın olduğunu gösterilmiştir.

C.D. Raj, vd. [15], alüminyum, gümüş, nikel ve bakır gibi iyi iletken malzemelerle tasarlanan tek katmanlı yapıların katman kalınlığını değiştirerek ekranlama performansları incelemiştir. Katman kalınlığı ile ekranlama etkinliğinin doğru orantılı olduğunu göstermiştir.

Alüminyum malzemesi ile tasarlanmış tek katmanlı yapılar için elektromanyetik dalganın geliş açısı yatay ve dikey polarizasyon durumlarında değiştirilerek ekranlama performansları S. Benhamou, vd. [16] tarafından 2015 yılında incelenmiştir. Geliş açısının artmasının dikey polarizasyon durumunda ekranlama etkinliğini azalttığı gösterilmiştir. Yatay polarizasyon durumunda geliş açısının artması ekranlama etkinliğine pozitif katkı sağlamıştır.

2009 yılında L. Sevgi [17] tarafından yapılan çalışmada iletken çok katmanlı yapı modelleri için sayısal yöntemler kullanılarak ekranlama etkinliği performansları incelenmiştir. Ekranlama etkinliğini belirleyen parametrelerin ekran üzerindeki açıklıklar ve kablo geçişleri olduğu sonucu gösterilmiştir.

D. Shi, vd. [18] tarafından yapılan çalışmada iletken tek katmanlı yapı modelleri için alan dağılım ve homojen olmayan iletim hatları teorisi kullanılarak ekranlama etkinliği performansları incelenmiştir. Alan dağılım ve homojen olmayan iletim hatları teorileri karşılaştırılarak çok katmanlı yapılarda homojen olmayan iletim hatları teorisinin kullanılabileceği sonucu gösterilmiştir.

İyi iletken metaller dışında kompozit, ince film, iletken camlar ve polimer malzemeleri ağırlık açısından avantaj sağladığı için ekranlama performansları incelenmiştir. Bu konuda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

H.N. Nhan, vd. [19] 2006 yılında iletken polimer malzemelerden oluşmuş çok katmanlı yapıların ekranlama performansları farklı katman kalınlıkları için incelenmiştir. Bu malzemelerin endüstriyel alanda ekranlama etkinliği uygulamalarında kullanılabileceğini öne sürmüştür.

C.D Raj ve P.H. Rao tarafından 2010 yılında gerçekleştirilen çalışmada farklı polimer malzemelerinden oluşmuş çok katmanlı yapılar için ekranlama etkinliği sonuçları X- bandında elde edilmiş, katman kalınlığı arttıkça ekranlama etkinliğinin de arttığı sonucu gösterilmiştir [20].

M. Hamouni, vd. 2014 yılında bakır ve farklı tür polimer malzemelerden oluşan yapıların kalınlığını değiştirerek ekranlama performanslarını incelemiştir. Elde edilen sonuçlar katman kalınlığının yutma kaybını arttırdığını göstermiştir [21].

P.D. Tosun, vd. 2013 yılında cam üzerine iyi iletken farklı tür malzemelerin kaplanmasıyla oluşturulan yapılar için ekranlama etkinliği çalışmalarını

gerçekleştirmiştir [22]. Elde edilen sonuçlar kaplama kalınlığının artmasının ekranlama etkinliğine pozitif katkı sağladığını göstermiştir.

C.Y. Lee, vd. 1999 yılında düşük ve yüksek iletken malzemeler içeren ince film yapıların ekranlama performanslarını karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlar yüksek iletken malzemeler içeren ince film yapılarının ekranlama performanslarının daha iyi olduğunu göstermiştir [23].

A. Mehdipour, vd. [24] tarafından yapılan çalışmada karbon-fiber kompozit malzemesi ile tasarlanan çok katmanlı yapıların katman sayısı değiştirilerek farklı polarizasyon durumları için ekranlama etkinliği incelenmiştir. Ekranlama etkinliğinin katman sayısının artması ile doğru orantılı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca yüksek frekans bölgesinde geliş açısının yatay polarizasyon durumunda ekranlama etkinliğini arttırdığı sonucu elde edilmiştir.

Günümüzde popüler olan malzeme türlerinden biri de metamalzemelerdir. Metamalzemeler doğal malzemelerin sağlayamadığı belirli elektromanyetik özelliklere sahip ortamlar oluşturmak için özel tasarlanmış malzeme türleridir [25]. Son on yılda, metamalzemeler negatif kırınım indeksi özelliklerinden dolayı çok sayıda bilim adamının dikkatini çekmiştir. Çalışma frekans aralıkları mikrodalga frekanslarından optik frekanslara kadar ulaşabilmektedir. Literatürde metamalzeme terminolojisi yerine “Sol Elli (Left- Handed)” malzemeler, “Geriye Yönelmiş Dalga (Backward-wave)” malzemeler, “Negatif İndisli (Negative-index)” ya da “Negatif kırınım İndisli (Negative-Refractive index)” malzemeler ve “Çift Negatif (Double Negative)” malzemeler kavramları kullanılmaktadır [4]. Metamalzemelerden oluşan yapılar, optik filtreler ve radar soğurucu yapılar vb. birçok alanda özellikle de yüksek frekans uygulamalarında kullanılmaktadır. Ekranlama etkinliği uygulamalarında metamalzemelerin kullanılabileceği değerlendirilmekte olup şu aşamaya kadar bu kapsamda herhangi bir çalışma gerçekleşmemiştir.

Z. Jaksic, vd. 2006 yılında Fibonacci serisi şeklinde dizilen metamalzemelerin yansıma ve iletim bant aralıklarını optik filtre uygulamalarında incelemiştir. Metamalzemelerin kullanımı ile farklı bantlarda filtreleme sağlanabileceğini göstermiştir [26].

M. Maksimoviç, vd. 2005 yılında anten yapılarında kullanılan ve metamalzemelerden oluşan filtre yapılarını incelemiştir. Metamalzemelerin yüksek frekans uygulamalarında kullanılabileceği sonucunu göstermiştir [27].

H. Yang, vd. [28] 2010 yılında farklı tür metamalzemelerle kaplanmış metal yapıların radar kesit alanlarını yatay ve dikey polarizasyon durumu için incelemiştir. Metamalzemelerin radar kesit alanlarını düşürdüğü öne sürülmüştür.

T. Liu, vd. [29] 2013 yılında yaptığı çalışmada, ince film metamalzemeli soğurucu yapıların gelen elektromanyetik dalgayı soğurduğu ve metamalzemelerin radar kesit alanlarının düşürülmesine fayda sağladığı sonucunu göstermiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde elektromanyetik teori ile ilgili temel kavramlar açıklanarak, düzlemsel elektromanyetik dalgaların ilerlemesi ve yansımayla ilgili literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Yansıma ve iletim katsayıları ile ilgili kavramlar açıklanmıştır.

Bu çalışmanın üçüncü bölümünde katmanlı yapılar için ekranlama etkinliği kavramı araştırılmıştır. Katmanlı yapılar, homojen olmayan iletim hattı teorisi kullanılarak modellenmiştir. Bu teori yardımıyla ekranlama etkinliği işlemleri parametresel olarak incelenebilmiştir. Katmanlı yapıların ekranlama etkinliği ifadeleri polarizasyon durumları için elde edilmiştir.

Bu çalışmanın dördüncü bölümünde tek katmanlı yapılarda farklı malzemelerin kullanımı, katman kalınlığı, elektromanyetik dalgaın geliş açısı ve polarizasyon parametrelerinin ekranlama etkinliğine etkisi incelenmiştir. Çok katmanlı yapılarda diziliş sırasının ve katman kalınlığının ekranlama performansına etkisi çalışılmıştır. Bu kapsamda iyi iletken, dielektrik ve metamalzemelerden oluşan farklı katmanlı yapılar modellenmiş, “MATLAB” programı kullanılarak ekranlama etkinliği analizi gerçekleştirilmiştir. Çok katmanlı yapıların diziliş sırasının ekranlama etkinliğine etkisini incelemek amacıyla periyodik ve Fibonacci serisi şeklinde katman dizilimleri modellenerek ekranlama performansları analiz edilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde katmanlı yapılar için elde edilen sonuçlar paylaşarak yorumlanmıştır. Periyodik ve Fibonacci serisi şeklinde modellenen çok katmanlı yapıların ekranlama etkinliği karşılaştırılmıştır. İlerleyen dönemlerde yapılabilecek çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

2. ELEKTROMANYETİKTE TEMEL KAVRAMLAR

Bu bölümde elektromanyetiğin temelini oluşturan Maxwell denklemleri açıklanmıştır. Elektromanyetikte yer alan temel kavramlardan birisi de yansıma ve iletim katsayılarıdır. Elektromanyetik dalga bir ortamdan diğer ortama ilerlerken gelen dalganın bir kısmı geri yansımakta ve geri kalan kısmı diğer ortama geçmektedir. Bu kapsamda iletim ve yansıma katsayıları katmanlı yapılar için incelenmiştir.

2.1. Maxwell Denklemleri

Elektromanyetiğin temeli Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Maxwell denklemleri elektrik ve manyetik alanların birbirlerini nasıl etkilediğini ve yükler, akımlar tarafından nasıl üretildiğini ve değiştirildiğini açıklamaktadır. Maxwell denklemleri dört temel denklemden ve tamamlayıcı denklemlerden oluşmaktadır. Maxwell denklemleri eşitlik 2.1, 2.2, 2.3 ve 2.4'te verilmektedir.

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Tamamlayıcı denklemler eşitlik 2.5, 2.6 ve 2.7'de gösterilmektedir.

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (2.5)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (2.6)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (2.7)$$

Burada,

$\bar{D}$: Elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/m²)

ρ : Elektrik yük yoğunluğu (Coulomb/m³)

$\bar{E}$: Elektrik alan şiddeti (Volt/m)

$\bar{B}$: Manyetik akı yoğunluğu (Tesla)

$\bar{H}$: Manyetik alan şiddeti (Amper/m)

ϵ : Elektriksel geçirgenlik katsayısı

μ : Manyetik geçirgenlik katsayısı

σ : İletkenlik katsayısı (Siemens/m)

J : İletkenlik akım yoğunluğu (Amper/m²)

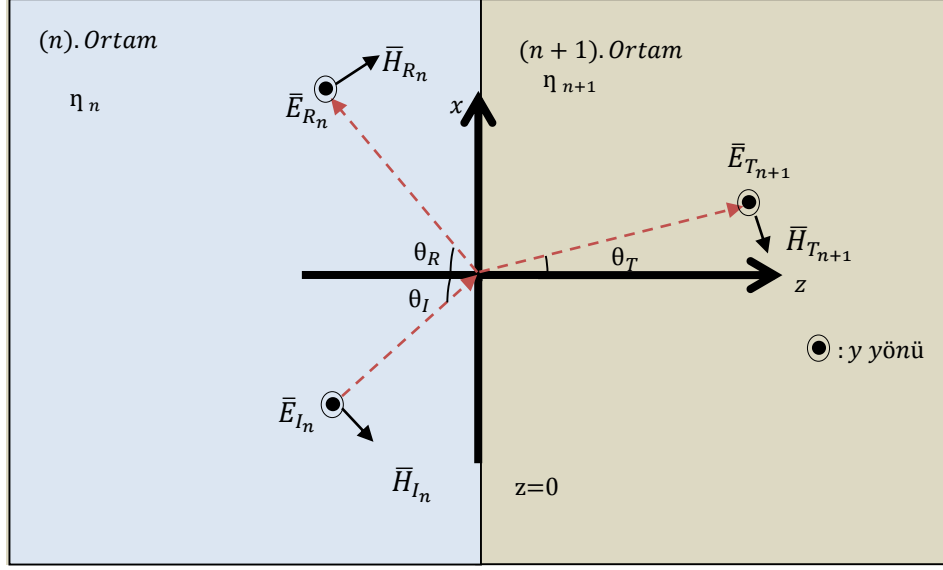
olarak tanımlıdır. Dalganın karakteristik empedansı ise $Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}$ ifadesi ile genel formda hesaplanmaktadır.

2.2. Yansımaya ve İletim Katsayıları

Genel ortamda elektromanyetik dalga bir ortamdan diğer ortama ilerlerken gelen dalganın bir kısmı yansır ve kalan kısmı diğer ortama geçer. Bu bölümde dikey ve yatay polarizasyon için iletim ve yansımaya katsayıları elde edilmiştir. Polarizasyon elektrik alanının zamanla çizdiği şekle göre tanımlanmaktadır. Elektromanyetik dalgaların iletimi boyunca elektrik alan eğer zemine dik ise dikey, paralel ise yatay polarizasyonlu dalga adını almaktadır [10]. Bu bölümde iki ve çok katmanlı yapıların iletim ve yansımaya katsayıları dikey ve yatay polarizasyon durumu ve düzlem dalganın sınır yüzeyine dik geldiği özel durumu için ayrı ayrı bulunmuştur.

2.2.1. İki Katmanlı Yapılar için Yansımaya ve İletim Katsayıları

İki katmanlı yapılar için dikey ve yatay polarizasyon durumunda yansımaya ve iletim katsayıları türetilmiştir. Şekil 2.1’de dikey polarizasyon durumu için elektromanyetik dalganın ilerlemesi gösterilmektedir. Burada y-z düzlemi dalganın geliş düzlemi olup, x-z düzlemi ise polarizasyon düzlemidir. “ η_n ” ve “ η_{n+1} ” indisleri iki farklı ortamın empedanslarını göstermektedir. “I”, “R” ve “T” alt indisleri sırasıyla gelen, yansıyan ve iletilen dalga anlamına gelmektedir. (n). ortam ve (n+1). ortam z=0 düzleminde birbirinden ayrılmaktadır. Elektrik alan vektörü y düzlemine paralel hareket etmektedir. Gelen dalga sınır yüzeyinin normali ile “ θ_I ” açısı yaparak (n). ortamdan (n+1). ortama doğru gelmektedir. Benzer şekilde yansıyan dalga sınır yüzeyinin normali ile “ θ_R ” açısı yaparak (n+1). ortama geçmeden (n). ortam içerisinde ilerlemekte, iletilen dalga ise sınır yüzeyinin normali ile “ θ_T ” açısı yaparak (n+1). ortam içerisinde ilerlemektedir. Kırmızı renkli ok ise dalganın ilerleme yönünü göstermektedir.



Şekil 2-1 Dikey polarizasyon için elektromanyetik dalganın yansıması ve iletilmesi

Burada,

$\bar{E}_{I_n}$: Gelen dalganın elektrik alan vektörü

$\bar{H}_{I_n}$: Gelen dalganın manyetik alan vektörü

$\bar{E}_{R_n}$: Yansıyan dalganın elektrik alan vektörü

$\bar{H}_{R_n}$: Yansıyan dalganın manyetik alan vektörü

$\bar{E}_{T_{n+1}}$: İletilen dalganın elektrik alan vektörü

$\bar{H}_{T_{n+1}}$: İletilen dalganın manyetik alan vektörü

θ_I : Gelme açısı

θ_R : Yansıma açısı

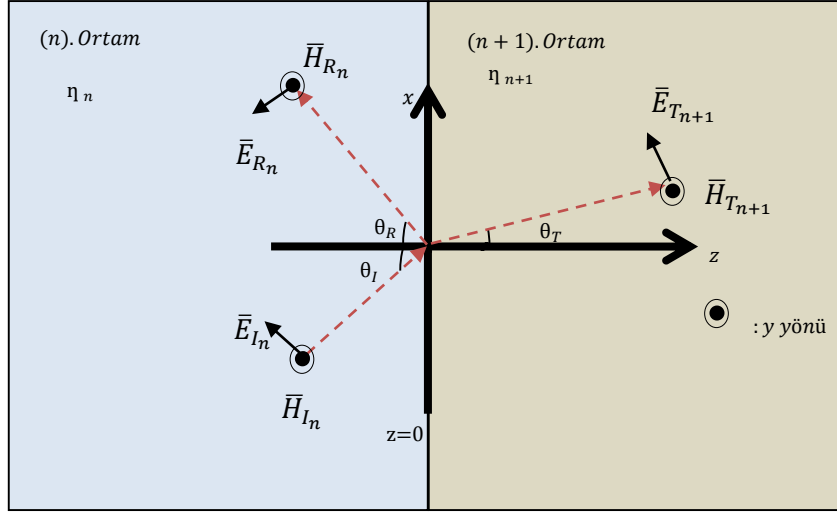
θ_T : İletim açısı

(n).ve (n+1). ortamdaki toplam elektrik ve manyetik alan, teğet bileşenlerinin genlikleri cinsinden yazılarak, elektrik ve manyetik alan için sınır koşullarının uygulanması ile yansıma ve iletim katsayıları elde edilmektedir. Dikey polarizasyon durumu için yansıma ve iletim katsayıları genel formda eşitlik 2.8 ve 2.9'te gösterilmektedir [30, 31].

$$\rho^\perp = \frac{E_{Rn}}{E_{I_n}} = \frac{\eta_{n+1} \cos \theta_{I_n} - \eta_n \cos \theta_{T_{n+1}}}{\eta_{n+1} \cos \theta_{I_n} + \eta_n \cos \theta_{T_{n+1}}} \quad (2.8)$$

$$\tau^{\perp} = \frac{E_{Tn}}{E_{In}} = \frac{2\eta_n \cos \theta_{In}}{\eta_n \cos \theta_{Tn+1} + \eta_{n+1} \cos \theta_{In}} \quad (2.9)$$

Şekil 2.2’de yatay polarizasyon durumu için elektromanyetik dalganın ilerlemesi gösterilmektedir. Burada x-z düzlemi dalganın polarizasyon düzlemidir. Yatay polarizasyon için elektrik ve manyetik alan vektörleri Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Manyetik alan vektörü y düzlemine paralel olarak hareket etmektedir. Elektrik alan ise x ve z yönünde hareket etmektedir.



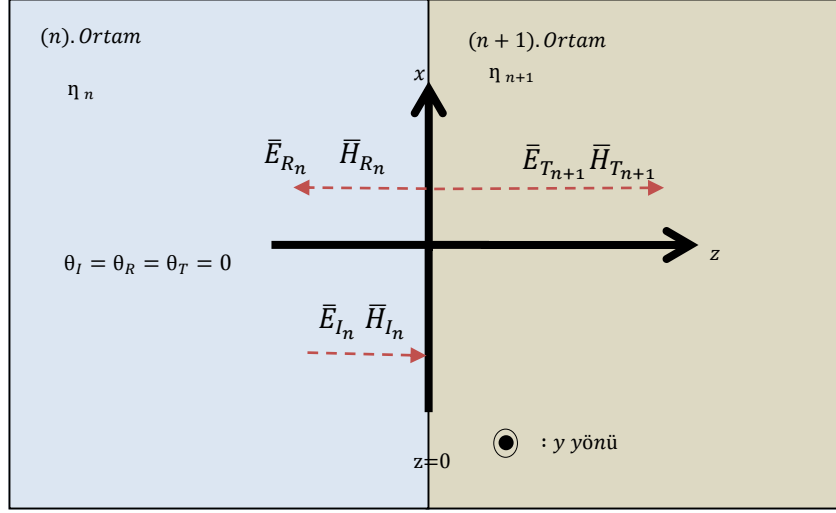
Şekil 2-2 Yatay polarizasyon için elektromanyetik dalganın yansıması ve iletilmesi

(n).ve (n+1). ortamdaki toplam elektrik ve manyetik alan, teğet bileşenlerinin genlikleri cinsinden yazılarak, elektrik ve manyetik alan için sınır koşullarının uygulanması ile yatay polarizasyon durumu için yansıma ve iletim katsayıları elde edilmektedir. Yansıma ve iletim katsayıları genel formda eşitlik 2.10 ve 2.11’de gösterilmektedir [31, 32].

$$\rho^{\parallel} = \frac{E_{Rn}}{E_{In}} = \frac{\eta_{n+1} \cos \theta_{Tn+1} - \eta_n \cos \theta_{In}}{\eta_{n+1} \cos \theta_{Tn+1} + \eta_n \cos \theta_{In}} \quad (2.10)$$

$$\tau^{\parallel} = \frac{E_{Tn}}{E_{In}} = \frac{2\eta_{n+1} \cos \theta_{In}}{\eta_{n+1} \cos \theta_{Tn+1} + \eta_n \cos \theta_{In}} \quad (2.11)$$

Şekil 2.3’te dik gelen düzlem dalga için elektromanyetik dalganın ilerlemesi gösterilmektedir. Gelen, yansıyan ve iletilen dalga z yönünde hareket etmektedir. Dalga η_n ve η_{n+1} ortamlarının sınır düzlemine dik gelmektedir. Yani $\theta_I = \theta_R = \theta_T = 0$ ’dir.



Şekil 2-3 Dik gelen dalganın yansıması ve iletilmesi

Dikey polarizyon durumu için elde edilen yansıma ve iletim katsayılarının elde edildiği eşitliklerde $\theta_I = \theta_R = \theta_T = 0$ ifadesi yerine konularak sadeleştirilerek açılardan bağımsız bir şekilde iletim ve yansıma katsayıları elde edilmektedir.

$$\rho = \frac{E_{Rn}}{E_{In}} = \frac{\eta_{n+1} - \eta_n}{\eta_n + \eta_{n+1}} \quad (2.12)$$

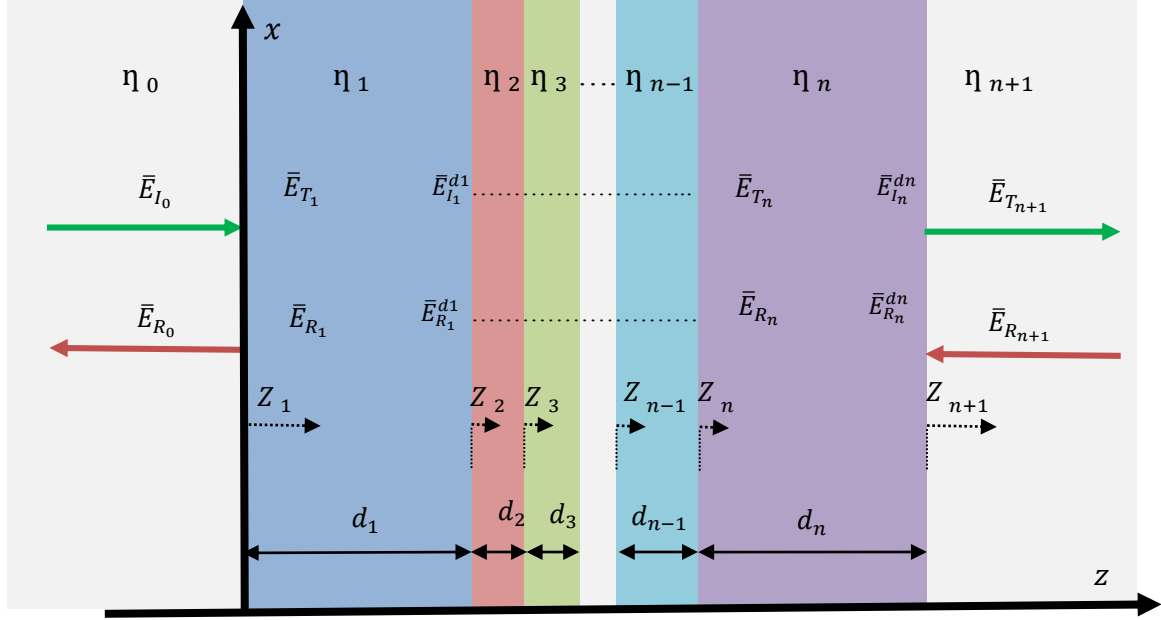
$$\tau = \frac{E_{Tn}}{E_{In}} = \frac{2\eta_n}{\eta_n + \eta_{n+1}} \quad (2.13)$$

Bu eşitlikler elektromanyetik dalganın dik geldiği durumda iki ortam arasındaki yansıma ve iletim katsayısı olarak adlandırılır [10].

2.2.2. Çok Katmanlı Yapılar için Yansıma ve İletim Katsayıları

Şekil 2.4'te n katmanlı homojen bir ortama gelen elektromanyetik dalganın ilerlemesi gösterilmektedir. Bu n katmanlı homojen ortamın n+1 sınır bölgesine sahip olmaktadır. Birinci sınır bölgesi dalganın geldiği ortam ile n katmanlı yapının birinci ortamı arasındaki sınır bölgeyi ifade ederken, n+1. sınır bölgesi n katmanlı yapının n. ortamı ile n+1. ortamı arasındaki sınır bölgeyi ifade etmektedir. n+1. ortam dalganın çıkış yaptığı ortamdır. Her sınır bölgesinde elektromanyetik dalganın bir kısmı geri yansırken kalan kısmı bir sonraki ortama geçmektedir. İletim ve yansıma katsayıları hesaplanırken çok katmanlı yapı iki katmanlı yapıya indirgenmiştir. Bunun sağlanması için de empedans aktarım yöntemi kullanılmıştır. Şekil 2.4'te gösterildiği üzere her bir katman farklı karakteristik empedans ve kalınlık değerlerine sahiptir. Bu değerler sırasıyla " η " ve " d " simgesiyle gösterilmektedir. Empedans

aktarım yöntemi ile her bir sınır bölgesinden bakıldığında (+z yönünde doğru) görülen eşdeğer empedans hesaplanabilmektedir. Bu eşdeğer empedans değeri "Z" simgesiyle gösterilmektedir. Eşdeğer empedans değeri hesaplandıktan sonra n katmanlı yapı için yansıma ve iletim katsayıları hesaplanabilmektedir.



Şekil 2-4 n katmanlı homojen ortam

Dikey polarizasyon durumu için n. ve n-1. ortamlar arasındaki yansıma ve iletim katsayıları 2.14 ve 2.15 eşitliklerinde sırasıyla verilmiştir.

$$\rho_{n-1}^{\perp} = \frac{Z_n^{\perp} \cos \theta_{I_{n-1}} - \eta_{n-1} \cos \theta_{T_n}}{Z_n^{\perp} \cos \theta_{I_{n-1}} + \eta_{n-1} \cos \theta_{T_n}} \quad (2.14)$$

$$\tau_{n-1}^{\perp} = \frac{2Z_n^{\perp} \cos \theta_{I_{n-1}}}{Z_n^{\perp} \cos \theta_{I_{n-1}} + \eta_{n-1} \cos \theta_{T_n}} \quad (2.15)$$

Yatay polarizasyon durumu için n. ve n-1. ortamlar arasındaki yansıma ve iletim katsayıları 2.16 ve 2.17 eşitliklerinde sırasıyla verilmiştir.

$$\rho_{n-1}^{\parallel} = \frac{Z_n^{\parallel} \cos \theta_{T_n} - \eta_{n-1} \cos \theta_{I_{n-1}}}{Z_n^{\parallel} \cos \theta_{T_n} + \eta_{n-1} \cos \theta_{I_{n-1}}} \quad (2.16)$$

$$\tau_{n-1}^{\parallel} = \frac{2Z_n^{\parallel} \cos \theta_{I_{n-1}}}{Z_n^{\parallel} \cos \theta_{T_n} + \eta_{n-1} \cos \theta_{I_{n-1}}} \quad (2.17)$$

Sınır yüzeyine dalganın dik geldiği durumu için n. ve n-1. ortamlar arasındaki yansıma ve iletim katsayıları 2.18 ve 2.19 eşitliklerinde sırasıyla verilmiştir.

$$\rho_{n-1} = \frac{Z_{n-\eta_{n-1}}}{Z_{n+\eta_{n-1}}} \quad (2.18)$$

$$\tau_{n-1} = \frac{2 Z_n}{Z_{n+\eta_{n-1}}} \quad (2.19)$$

Burada,

$Z_n^\perp$: Dikey polarizasyon durumu için n. ortamdan bakıldığında (z yönüne doğru) görülen eşdeğer empedans

$Z_n^\parallel$: Yatay polarizasyon durumu için n. ortamdan bakıldığında (z yönüne doğru) görülen eşdeğer empedans

Z_n : Sınır yüzeyine dalganın dik geldiği durumu için n. ortamdan bakıldığında (z yönüne doğru) görülen eşdeğer empedans

olarak tanımlıdır. Bu bölümde $Z_n^\perp$, $Z_n^\parallel$ ve Z_n değerleri elde edilmiştir.

Şekil 2.4’de gösterildiği üzere η_1 ortamı $z=0$ ve $z=d_1$ düzlemiyle ayrılan bölgede yer almaktadır. η_1 ortamının kalınlığı “ d_1 ” olarak gösterilmektedir. η_1 ortamında dikey polarizasyonlu elektromanyetik dalga ilerlediği düşünüldüğünde $z=0$ sınır düzleminde oluşan elektrik ve manyetik alan ile $z=d$ sınır düzleminde oluşan elektrik ve manyetik alan arasında ilişki bulunmaktadır.

η_1 ortamında toplam elektrik ve manyetik alanların genliklerinin teğet bileşenlerinin yazılması ve sınır koşullarının da uygulanması ertesinde E_{T_1} ve E_{R_1} ifadeleri $E_{I_1}^{d1}$ ve $E_{R_1}^{d1}$ ifadeleri cinsinden elde edilebilmektedir [30].

$$\begin{bmatrix} E_{T_1} \\ E_{R_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{jk_1 d_1} & 0 \\ 0 & e^{-jk_1 d_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{I_1}^{d1} \\ E_{R_1}^{d1} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Burada,

E_{T_1} : $z=0$ ’da η_1 ortamına iletilen elektrik alanın genliği

E_{R_1} : $z=0$ ’da η_1 ortamındaki yansıyan elektrik alanın genliği

$E_{I_1}^{d1}$: $z=d_1$ ’da η_1 ortamındaki gelen elektrik alanın genliği

$E_{R_1}^{d1}$: $z=d_1$ ’da η_1 ortamındaki yansıyan elektrik alanın genliği

olarak tanımlanmaktadır. Bu matris propagasyon matrisi olarak isimlendirilir [33].

" $k_1 d_1$ " ifadesi elektromanyetik dalganın birinci ortam boyunca ilerlediği yol

sonrasında oluşan fazı göstermektedir [30]. Birinci ortam için Φ_1 şeklinde gösterilebilir.

$$\Phi_1 = k_1 d_1 \quad (2.21)$$

Burada,

k_1 : 1. ortamın dalga vektörü

d_1 : 1. ortamın kalınlığı

Birkaç cebirsel adım ertesinde E_1 ve H_1 ifadelerin E_1^{d1} ve H_1^{d1} ifadeleri cinsinden matris şeklinde ifade edilebilmektedir [30]. E_i ve H_i ($i=1,2$) i. ortamda bulunan elektrik ve manyetik alanın genliğini ifade etmektedir. $E_{I_1}^{d1}$ ve $H_{I_1}^{d1}$ birinci ortamda $z=d_1$ sınırında bulunan elektrik ve manyetik alanın genliğini ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_1 d_1) & j \frac{\eta_1}{\cos \theta_1} \sin(k_1 d_1) \\ j \frac{\cos \theta_1}{\eta_1} \sin(k_1 d_1) & \cos(k_1 d_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^{d1} \\ H_1^{d1} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Bu matris yapı çok katmanlı yapılar için ekranlama etkinliği analizde de kullanılmıştır. Bu matris yapı yardımıyla elektromanyetik dalganın d_1 kadar yol aldığı anda elektrik ve manyetik alan değerlerinin nasıl değiştiği anlaşılmaktadır. Birkaç cebirsel işlem ertesinde dikey polarizasyon için genel formda empedans aktarım eşitliğine ulaşılır [34]. n . ortam için genel ifade 2.24'de verilmektedir.

$$Z_1^\perp = \eta_1 \frac{Z_2^\perp \cos(\theta_1) + j \eta_1 \tan(k_1 d_1)}{\eta_1 \cos(\theta_2) + j Z_2^\perp \cos(\theta_1) \tan(k_1 d_1)} \quad (2.23)$$

$$Z_n^\perp = \eta_n \frac{Z_{n+1}^\perp \cos(\theta_n) + j \eta_n \tan(k_n d_n)}{\eta_n \cos(\theta_{n+1}) + j Z_{n+1}^\perp \cos(\theta_n) \tan(k_n d_n)} \quad (2.24)$$

Dikey polarizasyona benzer adımlar uygulanması ertesinde yatay polarizasyon için empedans aktarım eşitliğine ulaşılır ve 2.25 eşitliğinde verilmiştir [34].

$$Z_n^\parallel = \left(\eta_n \frac{Z_{n+1}^\parallel \cos(\theta_{n+1}) + j \eta_n \cos(\theta_n) \tan(k_n d_n)}{\eta_n \cos(\theta_n) + j Z_{n+1}^\parallel \cos(\theta_{n+1}) \tan(k_n d_n)} \right) \quad (2.25)$$

Çok katmanlı yapılarda elektromanyetik dalganın sınır yüzeyinde dik gelme durumunda dalganın geliş açısı ($\theta_n = 0$) sıfır değerine eşit olmaktadır. Benzer şekilde her bir katmandaki iletim açıları değerleri de sıfır olmaktadır. 2.24 veya 2.25 eşitliğinde bu değerler yerine konulduğunda elektromanyetik dalganın sınır yüzeyine dik geldiği durum için empedans aktarım eşitliğine ulaşılır.

$$Z_n = \eta_n \frac{Z_{n+1} + j\eta_n \tan(k_n d_n)}{\eta_n + j Z_{n+1} \tan(k_n d_n)} \quad (2.26)$$

3. ELEKTROMANYETİK EKLANLAMA (PERDELEME)

Herhangi bir birimin veya sistemin bulunduğu ortamda istenmeyen elektromanyetik yayınlardan veya gürültüden etkilenmesini önlemek için ekranlar kullanılmaktadır [35]. Şekil 3.1’de ekran ortamına gelen istenmeyen elektromanyetik dalganın veya gürültünün ekran içerisinden geçerek üçüncü ortama ilerlemesi gösterilmektedir. Elektromanyetik dalga düzlemsel dalgadır. Genel formda elektrik ve manyetik alan ekranlama etkinliği hesabı sırasıyla 3.1 ve 3.2 eşitlikleri ile yapılmaktadır [35].

$$SE_{dB}^E = -20 \log \left| \frac{E_3}{E_1} \right| \quad (3.1)$$

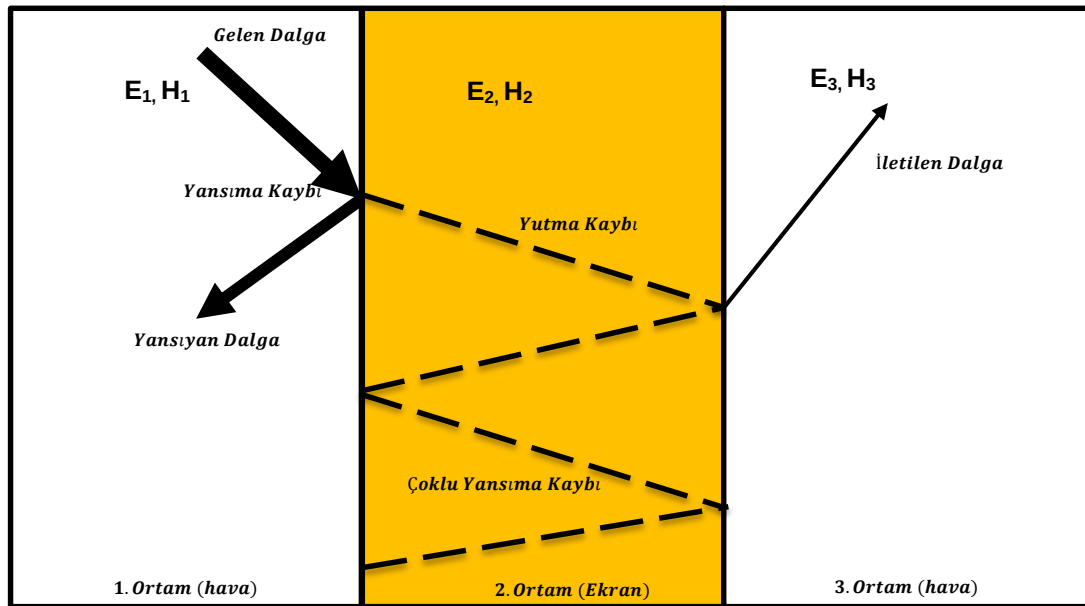
$$SE_{dB}^H = -20 \log \left| \frac{H_3}{H_1} \right| \quad (3.2)$$

E_3 : 3. ortamda yer alan elektrik alanının genliği

E_1 : 1. ortamda yer alan elektrik alanının genliği

H_3 : 3. ortamda yer alan manyetik alanının genliği

H_1 : 1. ortamda yer alan manyetik alanının genliği



Şekil 3-1 Elektromanyetik ekranlama

Burada ekran ortamı, bir cihazın metal kasası veya bir kablonun üzerinde kullanılan ekran malzemesi olarak düşünebilir. Birinci ortam istenmeyen elektromanyetik dalga ve gürültünün olduğu ortam, üçüncü ortam ise cihazın iç bölmesi veya kablo içerisinde yer alan veri/güç hatlarının bulunduğu ortam olarak düşünülebilir.

Dalga birinci ortamdan ekran ortamına ilerlerken sınır yüzeyinde yansımaya uğramaktadır. Burada gelen elektromanyetik dalganın bir kısmı ikinci ortama geçerken bir kısmı ise ekran ortamından geri yansıyarak birinci ortama doğru ilerlemektedir. Burada gerçekleşen kayıp yansımaya kaybı olarak adlandırılmaktadır ve R_{dB} simgesi ile gösterilmektedir. İkinci ortamdan ilerleyen elektromanyetik dalga zayıflarak üçüncü ortam arası sınır yüzeyine ilerlemektedir. Burada dalganın zayıflaması yutma kaybı olarak isimlendirilmektedir ve A_{dB} simgesi ile gösterilmektedir. Zayıflayarak ilerleyen dalga benzer şekilde ikinci ortam ile üçüncü ortam arasındaki sınır yüzeyinde tekrar yansımaya uğrar. Bu dalganın bir kısmı da üçüncü ortama iletilmektedir. İkinci ortam içerisinde ilerleyen yansıyan dalga sınır yüzeylerinde birden çok yansımaya uğrar. Buradaki kayıp çoklu yansımaya kaybı olarak isimlendirilir ve M_{dB} simgesi ile gösterilmektedir.

Ekranlama etkinliği değeri yukarıda belirtilen yutma kaybı, yansımaya kaybı ve çoklu yansımaya kaybının toplamına eşittir [36, 37]. Genel formda ekranlama etkinliği 3.3 eşitliğinde gösterilmektedir.

$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + M_{dB} \quad (3.3)$$

3.1. Tek Katmanlı Yapılarda Dikey Polarizasyon İçin Ekranlama Etkinliği

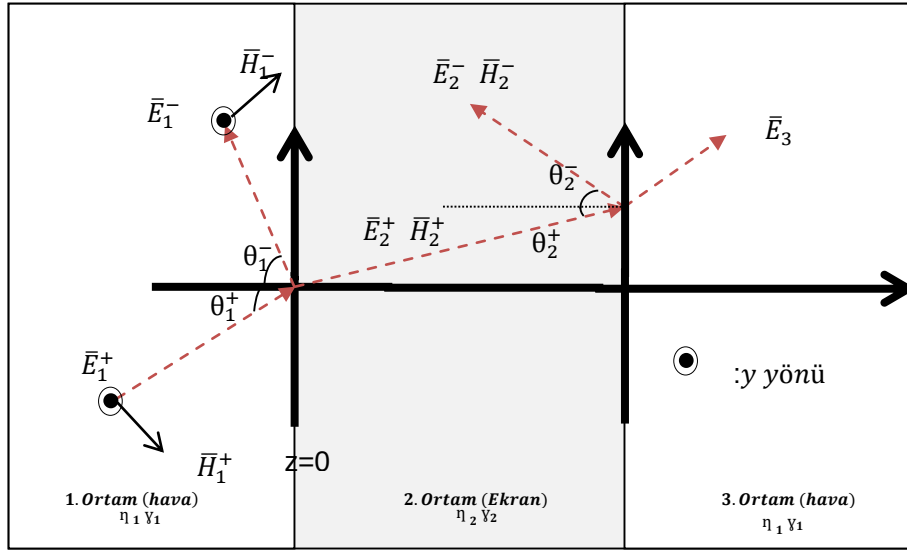
Bölüm 2'de dikey polarizasyon durumunda katmanlı yapılar için iletim ve yansımaya katsayıları elde edilmişti. Ekranlama etkinliği hesabında bu katsayılar da kullanılmaktadır. Şekil 3.2'de dikey polarizasyon durumunda ekran ortamında elektromanyetik dalganın ilerlemesi gösterilmiştir. Birinci ortamda gelen ve yansıyan elektrik ve manyetik alan vektör ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$\bar{E}_1^+ = \hat{a}_y E_1^+ e^{j_1 (x \sin \theta_1^+ + z \sin \theta_1^+)} \quad (3.4)$$

$$H_1^+ = \frac{E_1^+}{\eta_1} (-\hat{a}_x \cos \theta_1^+ + \hat{a}_z \sin \theta_1^+) e^{j_1 (x \sin \theta_1^+ + z \sin \theta_1^+)} \quad (3.5)$$

$$\bar{E}_1^- = \hat{a}_y E_1^- e^{-j_1 (x \sin \theta_1^- - z \sin \theta_1^-)} \quad (3.6)$$

$$\bar{H}_1^- = \frac{E_1^-}{\eta_1} (-\hat{a}_x \cos \theta_1^- + \hat{a}_z \sin \theta_1^-) e^{-j_1 (x \sin \theta_1^- - z \sin \theta_1^-)} \quad (3.7)$$



Şekil 3-2 Dikey polarizasyon ekranlama etkinliği

İkinci ortamda ilerleyen ve yansıyan elektrik ve manyetik alan vektör ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$\bar{E}_2^+ = \hat{a}_y E_2^+ e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2^+ + z \sin \theta_2^+)} \quad (3.8)$$

$$\bar{H}_2^+ = \frac{E_2^+}{\eta_2} (-\hat{a}_x \cos \theta_2^+ + \hat{a}_z \sin \theta_2^+) e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2^+ + z \sin \theta_2^+)} \quad (3.9)$$

$$\bar{E}_2^- = \hat{a}_y E_2^- e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2^- - z \cos \theta_2^-)} \quad (3.10)$$

$$\bar{H}_2^- = \frac{E_2^-}{\eta_2} (-\hat{a}_x \cos \theta_2^- + \hat{a}_z \sin \theta_2^-) e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2^- - z \cos \theta_2^-)} \quad (3.11)$$

Üçüncü ortamda ilerleyen elektrik ve manyetik alan vektör ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$\bar{E}_3 = \hat{a}_y E_3 e^{-\gamma_1 (x \sin \theta_3 + z \sin \theta_3)} \quad (3.12)$$

$$\bar{H}_3 = \frac{E_3}{\eta_1} (-\hat{a}_x \cos \theta_3 + \hat{a}_z \sin \theta_3) e^{-\gamma_1 (x \sin \theta_3 + z \sin \theta_3)} \quad (3.13)$$

Burada,

$\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$: Sırasıyla x, y ve z yönündeki birim vektörler

$\bar{E}_1^+, \bar{E}_2^+, \bar{E}_3$: Sırasıyla 1. ,2. ve 3. ortamdaki gelen elektrik alan vektörü

$\bar{H}_1^+, \bar{H}_2^+$: Sırasıyla 1. ve 2. ortamdaki gelen manyetik alan vektörü

$\bar{E}_1^-, \bar{E}_2^-$: Sırasıyla 1. ve 2. ortamdaki yansıyan elektrik alan vektörü

$\bar{H}_1^-, \bar{H}_2^-$: Sırasıyla 1. ve 2. ortamdaki yansıyan manyetik alan vektörü

E_1^+, E_2^+, E_3 : Sırasıyla 1. ,2. ve 3. ortamdaki gelen elektrik alan vektörün genliği

E_1^-, E_2^- : Sırasıyla 1. ve 2. ortamdaki yansıyan elektrik alan vektörün genliği

θ_1^+, θ_2^+ : Sırasıyla 1. ve 2. ortam için gelme açısı

θ_1^-, θ_2^- : Sırasıyla 1. ve 2. ortam için yansıma açısı

η_1, η_2 : Sırasıyla 1. ve 2. ortamın empedansları

γ_1, γ_2 : Sırasıyla 1. ve 2. ortamın yayılma sabitleri

olarak tanımlıdır. $z=0$ 'da elektrik alan için sınır koşulları kullanılarak 3.14 eşitliğine ulaşılır.

$$E_1^+ e^{-\gamma_1 (x \sin \theta_1^+)} + E_1^- e^{-\gamma_1 (x \sin \theta_1^-)} = E_2^+ e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2^+)} + E_2^- e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2^-)} \quad (3.14)$$

3.14 numaralı eşitliğin sağlanabilmesi için fazların ve genliklerin birbirlerine eşit olması gerekmektedir.

$$\gamma_1 (x \sin \theta_1^+) = \gamma_1 (x \sin \theta_1^-) = \gamma_2 (x \sin \theta_2^+) = \gamma_2 (x \sin \theta_2^-) \quad (3.15)$$

Bu eşitlik ancak,

$$\theta_1^+ = \theta_1^- = \theta_1 \quad (3.16)$$

$$\theta_2^+ = \theta_2^- = \theta_2 \quad (3.17)$$

$$E_1^+ + E_1^- = E_2^+ + E_2^- \quad (3.18)$$

eşitliklerinin sağlanması koşulu ile geçerlidir. $z=0$ sınır yüzeyinde manyetik alan için sınır koşulları kullanılarak 3.19 eşitliğine ulaşılır.

$$-\frac{E_1^+}{\eta_1} \cos \theta_1^+ e^{-\gamma_1 (x \sin \theta_1^+)} + \frac{E_1^-}{\eta_1} \cos \theta_1^- e^{-\gamma_1 (x \sin \theta_1^-)} = -\frac{E_2^+}{\eta_2} \cos \theta_2^+ e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2^+)} + \frac{E_2^-}{\eta_2} \cos \theta_2^- e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2^-)} \quad (3.19)$$

3.19 numaralı eşitliğin sağlanabilmesi için fazların ve genliklerin birbirlerine eşit olması gerekmektedir. Bu durum için 3.20 eşitliği elde edilmektedir.

$$-\frac{E_1^+}{\eta_1} \cos \theta_1 + \frac{E_1^-}{\eta_1} \cos \theta_1 = -\frac{E_2^+}{\eta_2} \cos \theta_2 + \frac{E_2^-}{\eta_2} \cos \theta_2 \quad (3.20)$$

$z=t$ 'de elektrik alan için sınır koşulları kullanılarak 3.21 eşitliğine ulaşılır.

$$E_2^+ e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2 + t \cos \theta_2)} + E_2^- e^{-\gamma_2 (x \sin \theta_2 + t \cos \theta_2)} = E_3 e^{-\gamma_1 (x \sin \theta_3 + t \cos \theta_3)} \quad (3.21)$$

3.21 numaralı eşitliğin sağlanabilmesi için fazların ve genliklerin birbirlerine eşit olması gerekmektedir. Bu durumda 3.22 ve 3.23 eşitlikleri yazılabilmektedir.

$$\gamma_2 (\sin \theta_2) = \gamma_1 (x \sin \theta_3) \quad (3.22)$$

$$E_2^+ e^{-\gamma_2 (t \cos \theta_2)} + E_2^- e^{-\gamma_2 (t \cos \theta_2)} = E_3 e^{-\gamma_1 (t \cos \theta_3)} \quad (3.23)$$

$z=t'$ 'de elektrik alan için sınır koşulları kullanılarak 3.24 eşitliğine ulaşılır.

$$-\frac{E_2^+}{\eta_2} \cos \theta_2 e^{-\gamma_2 (t \cos \theta_2)} + \frac{E_2^-}{\eta_2} \cos \theta_2 e^{\gamma_2 (t \cos \theta_2)} = -\frac{E_3}{\eta_1} \cos \theta_3 e^{-\gamma_1 (t \cos \theta_3)} \quad (3.24)$$

Birinci ve ikinci ortam arası iletim ve yansıma katsayıları 3.25 ve 3.26 eşitliklerinde verilmiştir [37].

$$\tau_1^\perp = \frac{2 \eta_1 \cos \theta_1}{(\eta_2 \cos \theta_1 + \eta_1 \cos \theta_2)} \quad (3.25)$$

$$\rho_1^\perp = \frac{(\eta_2 \cos \theta_1 - \eta_1 \cos \theta_2)}{(\eta_2 \cos \theta_1 + \eta_1 \cos \theta_2)} \quad (3.26)$$

İkinci ve üçüncü ortam arası iletim ve yansıma katsayıları 3.27 ve 3.28 eşitliklerinde verilmiştir [37].

$$\tau_2^\perp = \frac{2 \eta_2 \cos \theta_2}{(\eta_1 \cos \theta_2 + \eta_2 \cos \theta_3)} \quad (3.27)$$

$$\rho_2^\perp = \frac{(\eta_1 \cos \theta_2 - \eta_2 \cos \theta_3)}{(\eta_1 \cos \theta_2 + \eta_2 \cos \theta_3)} \quad (3.28)$$

3.15, 3.20, 3.23 ve 3.24 numaralı eşitlikler yardımıyla $\frac{E_3}{E_1^+}$ eşitliği elde edilir [37].

$$\frac{E_3}{E_1^+} = \frac{\tau_1^\perp \tau_2^\perp e^{\gamma_1 (t \cos \theta_3)}}{e^{\gamma_2 (t \cos \theta_2)} + e^{-\gamma_2 (t \cos \theta_2)} \rho_1^\perp \rho_2^\perp} \quad (3.29)$$

Dikey polarizasyon için ekranlama etkinliği 3.29 eşitliğinin logaritmasını alarak hesaplanmaktadır.

$$SE_{dB}^\perp = -20 \log \left| \frac{E_3}{E_1^+} \right| \quad (3.30)$$

Bu ifade açık bir şekilde yazıldığında,

$$SE_{dB}^\perp = -20 \log \left| \frac{\tau_1^\perp \tau_2^\perp e^{\gamma_1 (t \cos \theta_3)}}{e^{\gamma_2 (t \cos \theta_2)} + e^{-\gamma_2 (t \cos \theta_2)} \rho_1^\perp \rho_2^\perp} \right| \quad (3.31)$$

$$SE_{dB}^\perp = -20 \log \left| e^{\gamma_1 (t \cos \theta_3)} \right| - 20 \log \left| \tau_1^\perp \tau_2^\perp \right| - 20 \log \left| e^{-\gamma_2 (t \cos \theta_2)} \right| + 20 \log \left| 1 + \rho_1^\perp \rho_2^\perp e^{-2\gamma_2 (t \cos \theta_2)} \right| \quad (3.32)$$

eşitlikleri elde edilir. $\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$ eşitliği göz önüne alındığında ve birinci ortamın hava olduğu düşünüldüğünde $\alpha_1 = 0$ olur. Bu değer 3.32 eşitliğinde yerine konulursa 3.33 eşitliği elde edilir.

$$SE_{dB}^{\perp} = -20\log |e^{j\beta_1(t \cos \theta_3)}| - 20\log |\tau_1^{\perp} \tau_2^{\perp}| - 20\log |e^{-\gamma_2(t \cos \theta_2)}| + 20\log |1 + \rho_1^{\perp} \rho_2^{\perp} e^{-2(\alpha_2 + j\beta_2)(t \cos \theta_2)}| \quad (3.33)$$

" $e^{j\beta_1(t \cos \theta_3)}$ " mutlak değeri 1 değerine eşittir. Bu sebeple,

$$-20\log |e^{j\beta_1(t \cos \theta_3)}| = 0 \quad (3.34)$$

eşitliği elde edilir. Bu bilgiler ışığında 3.34 eşitliği tekrar düzenlenirse 3.35 eşitliğine ulaşılır. Bu eşitlik dikey polarizasyon için ekranlama etkinliği eşitliğidir.

$$SE_{dB}^{\perp} = 20\log |e^{\gamma_2(t \cos \theta_2)}| - 20\log |\tau_1^{\perp} \tau_2^{\perp}| + 20\log |1 + \rho_1^{\perp} \rho_2^{\perp} e^{-2\gamma_2(t \cos \theta_2)}| \quad (3.35)$$

Bu bölümün başında ekranlama etkinliğinin üç bileşeninin olduğu ve ekranlama etkinliğinin bu üç bileşenin toplamına eşit olduğu anlatılmıştı. 3.35 eşitliğinde,

$$A_{dB}^{\perp} = 20\log |e^{\gamma_2(t \cos \theta_2)}| \quad (3.36)$$

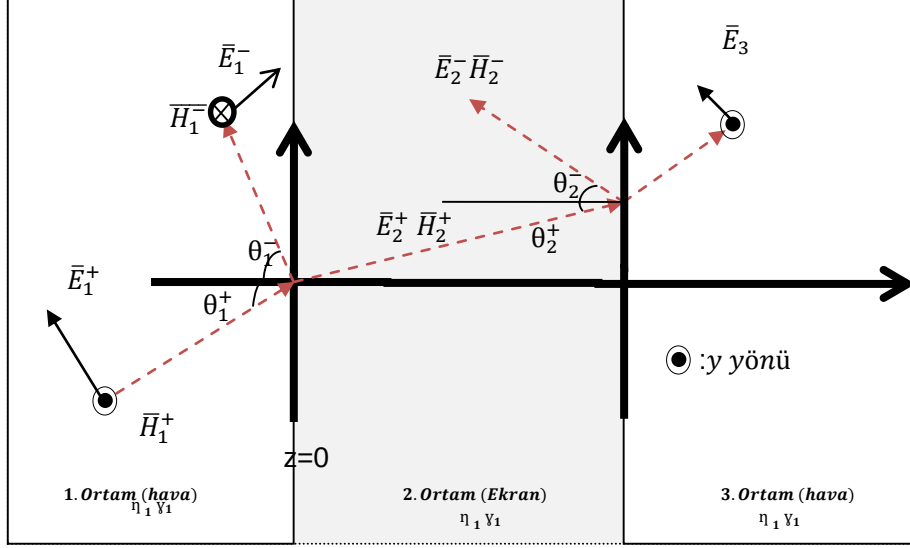
$$R_{dB}^{\perp} = -20\log |\tau_1^{\perp} \tau_2^{\perp}| \quad (3.37)$$

$$M_{dB}^{\perp} = 20\log |1 + \rho_1^{\perp} \rho_2^{\perp} e^{-2\gamma_2(t \cos \theta_2)}| \quad (3.38)$$

sırasıyla yutma, yansıma ve çoklu yansıma kaybı ifadeleridir [36, 37].

3.2. Tek Katmanlı Yapılarda Yatay Polarizasyon İçin Ekranlama Etkinliği

Şekil 3.3'te yatay polarizasyon durumunda ekran ortamında elektromanyetik dalganın ilerlemesi gösterilmiştir. Dikey polarizasyon durumu için ekranlama etkinliği ifadesi detaylı bir şekilde elde edilmişti. Yatay polarizasyon durumunda benzer yöntem kullanılarak birinci ve ikinci ortam arası, ikinci ve üçüncü ortam arası yansıma ve iletim katsayıları elde edilmektedir. Bu katsayılar 3.39, 3.40, 3.41 ve 3.42 eşitliklerinde verilmiştir.



Şekil 3-3 Yatay polarizasyon ekranlama etkinliği

$$\tau_1^{\parallel} = \frac{2 \eta_1 \cos \theta_1}{(\eta_2 \cos \theta_2 + \eta_1 \cos \theta_1)} \quad (3.39)$$

$$\rho_1^{\parallel} = \frac{(\eta_2 \cos \theta_2 - \eta_1 \cos \theta_1)}{(\eta_2 \cos \theta_2 + \eta_1 \cos \theta_1)} \quad (3.40)$$

$$\tau_2^{\parallel} = \frac{2 \eta_2 \cos \theta_2}{(\eta_1 \cos \theta_3 + \eta_2 \cos \theta_2)} \quad (3.41)$$

$$\rho_2^{\parallel} = \frac{(\eta_1 \cos \theta_3 - \eta_2 \cos \theta_2)}{(\eta_1 \cos \theta_3 + \eta_2 \cos \theta_2)} \quad (3.42)$$

Yatay polarizasyon durumu için ekranlama etkinliği 3.43 eşitliğinde verilmiştir.

$$SE_{dB}^{\parallel} = 20 \log |e^{\gamma_2 (t \cos \theta_2)}| - 20 \log |\tau_1^{\parallel} \tau_2^{\parallel}| + 20 \log |1 + \rho_1^{\parallel} \rho_2^{\parallel} e^{-2\gamma_2 (t \cos \theta_2)}| \quad (3.43)$$

Yutma kaybı, yansıma kaybı ve çoklu yansıma kaybı eşitlikleri sırasıyla 3.44, 3.45 ve 3.46 eşitliklerinde gösterilmiştir [37].

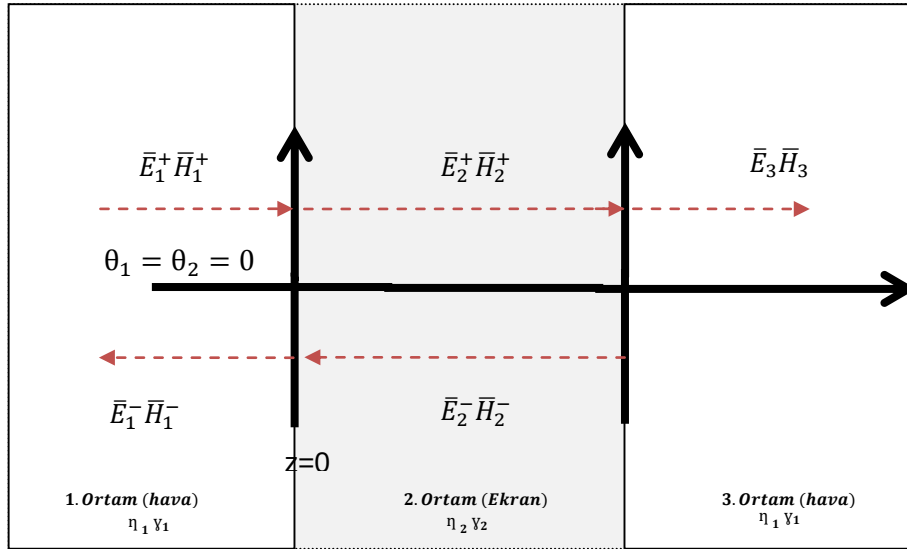
$$A_{dB}^{\parallel} = 20 \log |e^{\gamma_2 (t \cos \theta_2)}| \quad (3.44)$$

$$R_{dB}^{\parallel} = -20 \log |\tau_1^{\parallel} \tau_2^{\parallel}| \quad (3.45)$$

$$M_{dB}^{\parallel} = 20 \log |1 + \rho_1^{\parallel} \rho_2^{\parallel} e^{-2\gamma_2 (t \cos \theta_2)}| \quad (3.46)$$

3.3. Tek Katmanlı Yapılarda Dik Gelen Dalga İçin Ekranlama Etkinliği

Şekil 3.4'te düzlem dalga'nın sınır yüzeylerine dik geldiği durum için ekran ortamında elektromanyetik dalga'nın ilerlemesi gösterilmiştir. Elektromanyetik dalga'nın geliş, yansıma ve iletim açıları sıfır değerine eşittir.



Şekil 3-4 Dik gelen dalga için ekranlama etkinliği

Bu bilgiler ışığında,

$$\cos(\theta_1) = \cos(\theta_2) = 0 \quad (3.47)$$

olmaktadır. 3.39, 3.40, 3.41 ve 3.42 eşitliklerinde 3.47 eşitliği kullanıldığında 3.48 ve 3.49 eşitliğine ulaşılır.

$$\tau = \tau_1^{\parallel} \tau_2^{\parallel} = \tau_1^{\perp} \tau_2^{\perp} = \frac{4 \eta_2 \eta_1}{(\eta_2 + \eta_1)(\eta_2 + \eta_1)} \quad (3.48)$$

$$\rho = -\rho_1^{\parallel} \rho_2^{\parallel} = -\rho_1^{\perp} \rho_2^{\perp} = \frac{(\eta_2 - \eta_1)(\eta_2 - \eta_1)}{(\eta_2 + \eta_1)(\eta_2 + \eta_1)} \quad (3.49)$$

3.48 ve 3.49 eşitliklerinden de anlaşılacağı üzere iletim ve yansımaya katsayıları polarizasyondan bağımsız hale gelmektedir. 3.48 eşitliği kullanılarak 3.32 veya 3.44 eşitliklerinde yerine konularak ekranlama etkinliği hesaplanırsa 3.50 eşitliği elde edilir.

$$SE_{dB} = 20 \log |e^{\gamma_2 (t \cos \theta_2)}| - 20 \log |\tau| + 20 \log |1 + \rho e^{-2\gamma_2 (t \cos \theta_2)}| \quad (3.50)$$

Yutma, yansımaya ve çoklu yansımaya kayıpları da aşağıdaki eşitliklerde sırasıyla verilmiştir.

$$A_{dB} = 20 \log |e^{\gamma_2 (t \cos \theta_2)}| \quad (3.51)$$

$$R_{dB} = -20 \log |\tau| \quad (3.52)$$

$$M_{dB} = 20 \log |1 + \rho e^{-2\gamma_2 (t \cos \theta_2)}| \quad (3.53)$$

3.4. Çok Katmanlı Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği

Çok katmanlı yapılar için ekranlama etkinliği hesabında homojen olmayan iletim hatları teorisinden yararlanılmıştır. Homojen olmayan yapılar, birçok homojen katmana ayrılarak modellenenilmektedir [38]. Şekil 3.5'te n katmanlı bir yapının iletim hattı devre parametreleri gösterilmektedir. n katmanlı yapının girişinde (η_0 ortamında) E_0 ve H_0 değerinde elektrik ve manyetik alan genliği yer almaktadır. Bu elektrik ve manyetik alan genliği değerleri her bir katmandan diğer katmana iletilerek n katmanlı yapının çıkışında (η_{n+1} ortamında) E_{n+1} ve H_{n+1} değerine ulaşmaktadır. Elektrik ve manyetik alan genliği değerlerinin iletilmesi her katmana özel devre parametreleri ile sağlanmaktadır. Bu parametre değeri birinci ortam için A_1^1, A_2^1, A_3^1 ve A_4^1 simgeleriyle gösterilmektedir. Birinci ortam için devre parametreleri ile elektrik ve manyetik alan ifadesi arasındaki matematiksel ilişki 3.54 eşitliğinde verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^1 & A_2^1 \\ A_3^1 & A_4^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

E_1 ve H_1 ifadeleri E_3 ve H_3 ifadeleri cinsinden yazılırsa,

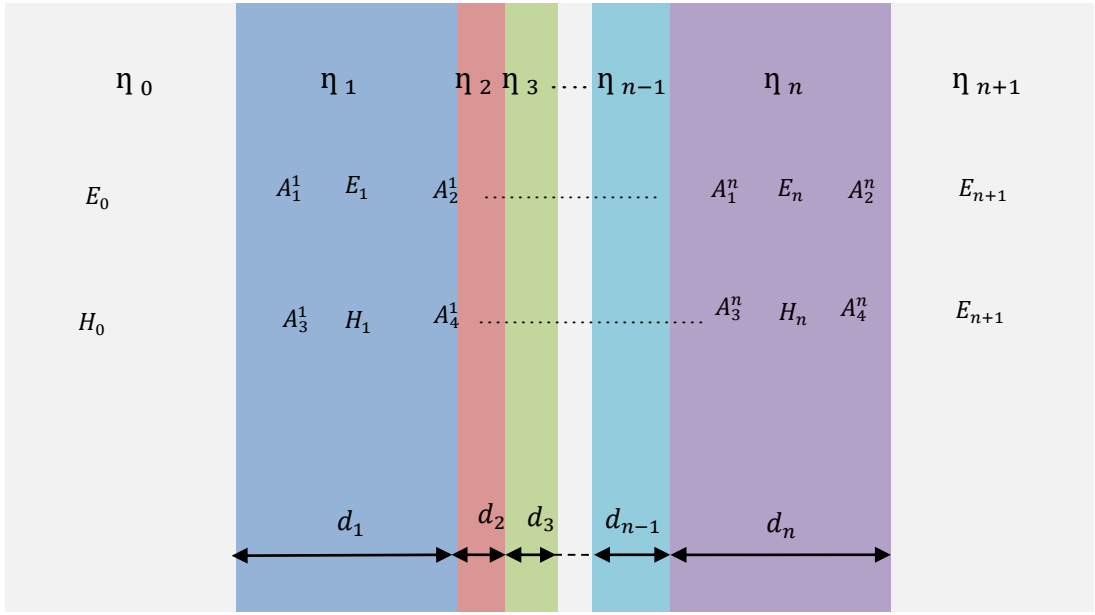
$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^1 & A_2^1 \\ A_3^1 & A_4^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1^2 & A_2^2 \\ A_3^2 & A_4^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

eşitliği elde edilmektedir. n katmanlı yapı için bu ifade genişletilebilir. E_0 ve H_0 ifadeleri E_{n+1} ve H_{n+1} ifadeleri cinsinden yazılırsa 3.56 eşitliği elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^1 & A_2^1 \\ A_3^1 & A_4^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1^2 & A_2^2 \\ A_3^2 & A_4^2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_1^{n-1} & A_2^{n-1} \\ A_3^{n-1} & A_4^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1^n & A_2^n \\ A_3^n & A_4^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{n+1} \\ H_{n+1} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

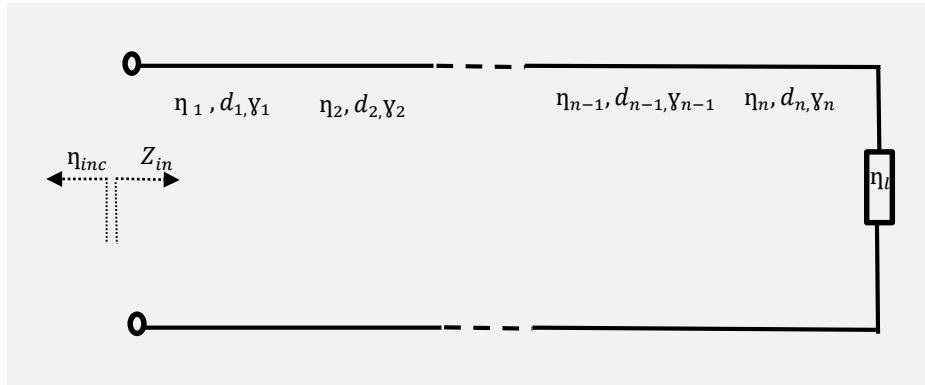
n katmanlı yapı için devre parametresi her bir katmandaki devre parametrelerinin matris çarpımına eşit olmaktadır.

$$[A] = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^1 & A_2^1 \\ A_3^1 & A_4^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1^2 & A_2^2 \\ A_3^2 & A_4^2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_1^{n-1} & A_2^{n-1} \\ A_3^{n-1} & A_4^{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1^n & A_2^n \\ A_3^n & A_4^n \end{bmatrix} \quad (3.57)$$



Şekil 3-5 İletim hattı devre parametreleri

Şekil 3.5'te belirtilen n katmanlı homojen ortam iletim hattı gibi modellenebilmektedir. Şekil 3.6'da bu çok katmanlı yapı için iletim hattı devre şeması gösterilmektedir. Z_{in} ifadesi birinci ortamdan bakıldığında görülen eşdeğer empedansı göstermektedir. η_g ise elektromanyetik dalganın geldiği ortamdaki (η_0 ortamı) dalga empedans değeridir. η_l ise Şekil 3.6'da iletim hattı devresinin yükü olarak belirtilmektedir. Yani dalganın iletildiği ortamdaki (η_{n+1} ortamı) dalga empedansı değerine eşittir.



Şekil 3-6 İletim hattı devre modeli

Ayrıca $i=1,2,..n-1$ ve n değerleri,

η_i : i .nci ortamdaki dalga empedansı

d_i : i .nci ortamda elektromanyetik dalganın aldığı yol

γ_i : i. nci ortamın yayılma katsayısı

olarak tanımlıdır. Çok katmanlı yapılarda yatay ve dikey polarizasyon için yayılma matrisleri 2.2.2 bölümünde verilmişti. 3.58 ve 3.59 eşitliklerinde sırasıyla dikey ve yatay polarizasyon durumu için yayılma matris ifadeleri verilmiştir [32, 39].

$$\begin{bmatrix} E_n \\ H_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_n d_n) & j \frac{\eta_n}{\cos \theta_n} \sin(k_n d_n) \\ j \frac{\cos \theta_n}{\eta_n} \sin(k_n d_n) & \cos(k_n d_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_n^d \\ H_n^d \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$\begin{bmatrix} E_n \\ H_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_n d_n) & j \eta_n \cos \theta_n \sin(k_n d_n) \\ j \frac{\sin(k_n d_n)}{\eta_n \cos \theta_n} & \cos(k_n d_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_n^d \\ H_n^d \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

Elektromanyetik dalganın düzleme dik geldiği durumda θ_n açısı sıfıra eşittir. Bu durumda yayılma matrisi 3.60 eşitliğine indirgenecektir.

$$\begin{bmatrix} E_n \\ H_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_n d_n) & j \eta_n \sin(k_n d_n) \\ j \frac{\sin(k_n d_n)}{\eta_n} & \cos(k_n d_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_n^d \\ H_n^d \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Yayılma matrisinde belirtilen katsayılar iletim hattı modelindeki devre parametrelerine eşit olacaktır. Bu durumda n. ortam için devre parametreleri 3.61 eşitliğinde gösterilmektedir.

$$[A^n] = \begin{bmatrix} A_1^n & A_2^n \\ A_3^n & A_4^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_n d_n) & jM \sin(k_n d_n) \\ j \frac{1}{M} \sin(k_n d_n) & \cos(k_n d_n) \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

Burada,

$$n = 1, 2, \dots, n-1, n$$

$$M = \begin{cases} \frac{\eta_n}{\cos \theta_n} & ; \text{Dikey Polarizasyon} \\ \eta_n \cos \theta_n & ; \text{Yatay Polarizasyon} \\ \eta_n & ; \text{Dik Gelen Dalga için} \end{cases}$$

olarak tanımlıdır. 3.61 eşitliği iyi iletken malzemeler için de yazılabilmektedir. Euler eşitliği de göz önüne alındığında 3.62 eşitliğine ulaşılır.

$$[A^n] = \begin{bmatrix} A_1^n & A_2^n \\ A_3^n & A_4^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_n d_n) & jM \sinh(\gamma_n d_n) \\ j \frac{1}{M} \sinh(\gamma_n d_n) & \cosh(\gamma_n d_n) \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

3.56 ve 3.57 eşitlikleri kullanılarak E_1, H_1 ile E_{n+1}, H_{n+1} arasındaki matematiksel ilişki matris formda yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{n+1} \\ H_{n+1} \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

eşitliği elde edilir. Ekranlama etkinliği katsayısı η_{n+1} ortamındaki elektrik alanın genlik değerinin η_0 ortamındaki elektrik alan değerinin oranına eşit olacaktır [39].

$$T = \frac{E_{n+1}}{E_0} \quad (3.64)$$

n katmanlı yapı için ekranlama ifadesi 3.65 eşitliğinde verilmektedir.

$$SE_{dB} = -20 \log |T| \quad (3.65)$$

E_0 genlikli gelen elektrik alan değeri E_1 elektrik alan değeri cinsinden yazılırsa, 3.66 eşitliğine ulaşılır [18].

$$E_1 = E_0 + RE_0 \quad (3.66)$$

"R" yansıma katsayısı olarak tanımlı olup,

$$R = \frac{Z_{in} - \eta_g}{Z_{in} + \eta_g} \quad (3.67)$$

ifadesine eşittir. " Z_{in} " ifadesi $\frac{E_1}{H_1}$ ifadesine eşit olup, 3.63 eşitliği kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Z_{in} = \frac{A_1 E_{n+1} + A_2 H_{n+1}}{A_3 E_{n+1} + A_4 H_{n+1}} \quad (3.68)$$

3.68 eşitliği " H_{n+1} " ifadesine bölünürse,

$$Z_{in} = \frac{A_1 \frac{E_{n+1}}{H_{n+1}} + A_2}{A_3 \frac{E_{n+1}}{H_{n+1}} + A_4} \quad (3.69)$$

Eşitliği elde edilir. $\frac{E_{n+1}}{H_{n+1}}$ ifadesi yük empedans değerine eşittir. $\eta_l = \frac{E_{n+1}}{H_{n+1}}$ eşitliği 3.69 eşitliğinde yerine konulursa 3.70 eşitliği elde edilir.

$$Z_{in} = \frac{A_1 \eta_l + A_2}{A_3 \eta_l + A_4} \quad (3.70)$$

3.64 eşitliği 3.66 eşitliğinde yerine konulursa 3.71 eşitliğine ulaşılır.

$$E_1 = E_0 (1 + R) \quad (3.71)$$

" E_0 " ifade ekranlama etkinliği katsayı cinsinden yazıldığına 3.71 eşitliği 3.72 eşitliğine dönüşür.

$$E_1 = \frac{E_{n+1}}{T} (1 + R) \quad (3.72)$$

"E₁" ifadesi 3.56 eşitliğinden de görüleceği üzere A₁E_{n+1} + A₂H_{n+1} değerine eşittir. 3.72 eşitliğinde bu değer yerine konulursa,

$$A_1 E_{n+1} + A_2 H_{n+1} = \frac{E_{n+1}}{T} (1 + R) \quad (3.73)$$

eşitliğine ulaşılır. H_{n+1} = $\frac{E_{n+1}}{\eta_l}$ eşitliği kullanılarak 3.73 eşitliği 3.74 eşitliğine dönüşür.

$$A_1 E_{n+1} + A_2 \frac{E_{n+1}}{\eta_l} = \frac{E_{n+1}}{T} (1 + R) \quad (3.74)$$

3.74 eşitliği "E_{n+1}" çarpanına ayrılarak sadeleştirilir. Ekranlama etkinliği katsayısı elde edilmektedir.

$$T = \frac{\eta_l + R\eta_l}{A_1\eta_l + A_2} \quad (3.75)$$

3.67 eşitliği 3.75 eşitliğinde yerine konulursa 3.76 eşitliğine varılır. Payda eşitleme ile 3.77 eşitliğine ulaşılır.

$$T = \frac{\eta_l + \frac{Z_{in-\eta_l} g}{Z_{in+\eta_l} g} \eta_l}{A_1\eta_l + A_2} \quad (3.76)$$

$$T = \frac{Z_{in\eta_l + \eta_l} g \eta_l + Z_{in\eta_l - \eta_l} g \eta_l}{(A_1\eta_l + A_2)(Z_{in+\eta_l} g)} = \frac{2Z_{in\eta_l}}{(A_1\eta_l + A_2)(Z_{in+\eta_l} g)} \quad (3.77)$$

3.70 eşitliği kullanılarak 3.77 ifadesi genişletilirse,

$$T = \frac{2 \frac{A_1\eta_l + A_2}{A_3\eta_l + A_4} \eta_l}{(A_1\eta_l + A_2) \left(\frac{A_1\eta_l + A_2}{A_3\eta_l + A_4} + \eta_l g \right)} \quad (3.78)$$

eşitliği elde edilir. Payda eşitleme ile 3.79 eşitliğine ulaşılır.

$$T = \frac{2\eta_l}{A_3\eta_l \eta_l g + A_4\eta_l g + A_1\eta_l + A_2} \quad (3.79)$$

Ekranlama etkinliği değeri ise 3.65 eşitliği kullanılarak,

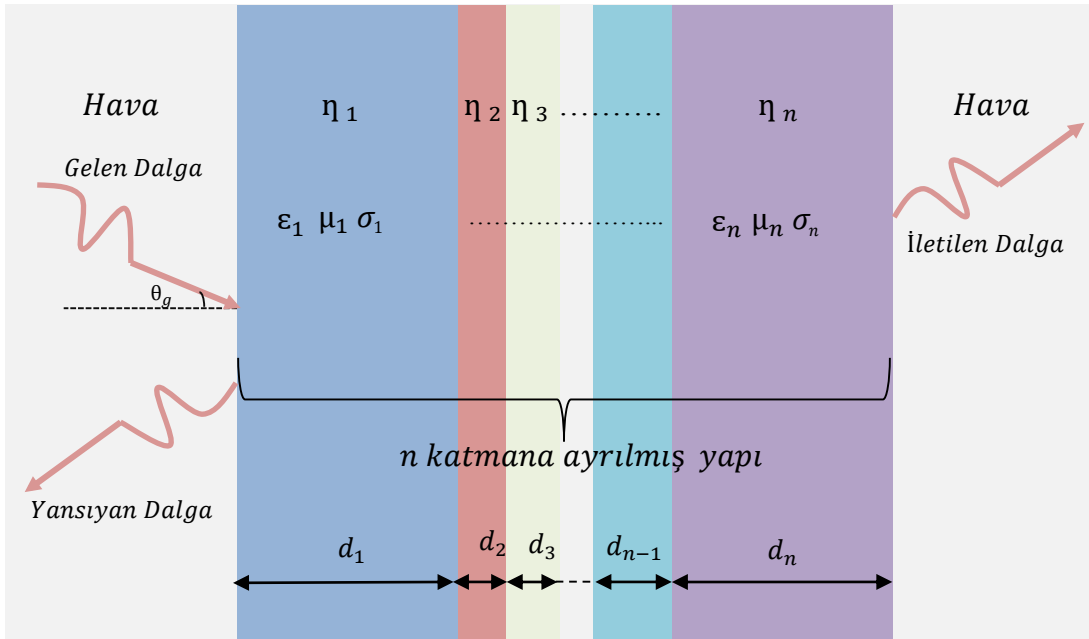
$$SE_{dB} = -20 \log |T| = -20 \log \left| \frac{2\eta_l}{A_3\eta_l \eta_l g + A_4\eta_l g + A_1\eta_l + A_2} \right| \quad (3.80)$$

eşitliği elde edilir [18]. İyi iletken malzemeli çok katmanlı yapıların ekranlama etkinliğinde kullanılan ifade edilmiştir. Dielektrik ve metamatmalzemeli çok katmanlı yapıların ekranlama etkinliği analizinde kullanılmış ifade, 3.81 eşitliğinde gösterilmektedir [19].

$$SE_{dB} = -20 \log |T| = -20 \log \left| \frac{2[A_4(A_1\eta_l g - A_2) + A_2(A_4 - A_3\eta_l g)]}{(A_1\eta_l g - A_2) + \eta_l (A_4 - A_3\eta_l g)} \right| \quad (3.81)$$

4. KATMANLI YAPILAR İÇİN EKRANLAMA ETKİNLİĞİ SONUÇLARI

Bu tez çalışmasında katmanlı yapıların ekranlama etkinliği incelenmiştir. Kalınlığın, elektromanyetik dalganın geliş açısının, polarizasyonun, malzeme türünün ve malzeme diziliş sırasının ekranlama etkinliğine etkisi araştırılmıştır. Çok katmanlı yapıların ekranlama etkinliği analizinde Bölüm 3'te detaylı olarak anlatılan eşitlikler kullanılmıştır. Bu eşitlikler, tekrarlayan yapıda olduğu için kalınlık, diziliş sırası ve farklı tip malzemelerin kullanımı vb. parametrelerin ekranlama etkinliğini nasıl etkilediğinin basit bir şekilde hesaplamasına olanak sağlamıştır. Bu bölümde sırasıyla iyi iletken, dielektrik ve metamateryal kullanılarak oluşturulmuş katmanlı yapılar modellenmiştir. Periyodik ve Fibonacci serisi şeklinde dizilen yapılara ilişkin ekranlama performansları karşılaştırılmıştır. Hava ortamında bulunan tek katmanlı ($n=1$ olduğu durum) ve çok katmanlı ($n>1$ olduğu durum) yapıların modeli Şekil 4.1'de verilmiştir. Tüm analizler bu modele göre gerçekleştirilmiştir.



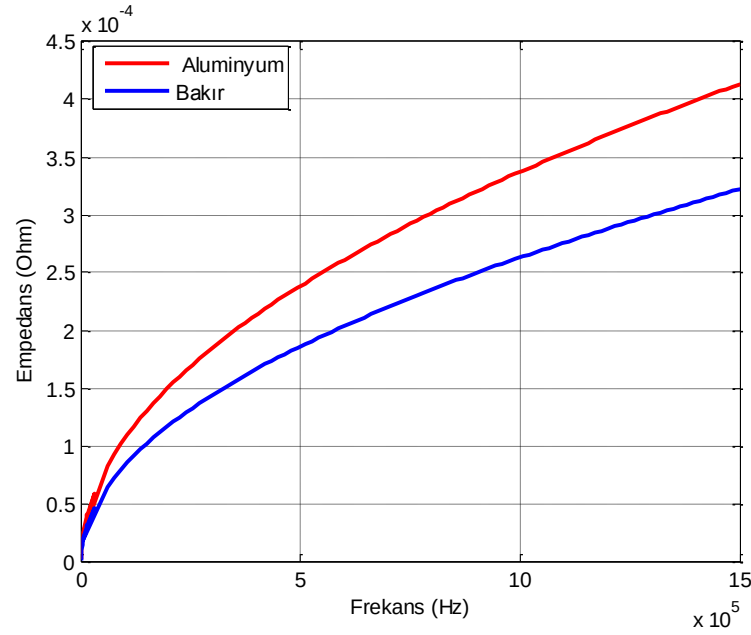
Şekil 4-1 n katmanlı yapı modeli

N katmana bölünmüş yapının her bir katmanının empedansı iletkenlik, dielektrik, manyetik geçirgenlik katsayıları $\eta_i, \sigma_i, \epsilon_i, \mu_i$ ve d_i ($i=1,2,..n$) simgeleriyle gösterilmiştir. θ_g ise elektromanyetik dalganın geliş açısını göstermektedir.

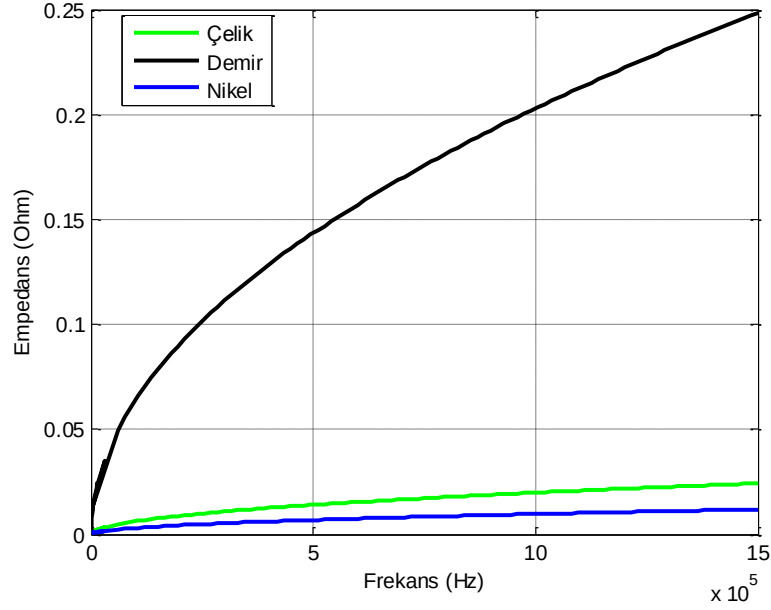
4.1. İyi İletkenle Tasarlanan Yapıların Ekranlama Etkinliği

İyi iletken malzeme denilince akla metaller gelmektedir. Bu bölümde de önce metal malzemeler kullanılmıştır. [18] ve [39] numaralı kaynaklarda yapılan çalışmalarda alüminyum, çelik, bakır, demir ve nikel iletken malzemelerinden oluşan tek ve dört katmanlı yapılar için ekranlama performansları incelenmiş ve bu bölümde ekranlama etkinliği ile ilgili bu kaynaklara ilişkin literatür doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca iki ve sekiz katmanlı yapılar incelenmiştir. Polarizasyon, elektromanyetik dalganın geliş açısı, katman kalınlığı parametreleri iletken malzemelerden oluşan tek katmanlı yapılar için ayrıca incelenmiş, çok katmanlı yapılar için ise diziliş sırası ve katman kalınlığının ekranlama etkinliğine etkisi araştırılmıştır.

Şekil 4.2 ve 4.3’de iyi iletken malzemelerin frekansa bağlı empedans değerleri gösterilmektedir. Malzeme karakteristiklerinden ötürü empedansı en yüksek iletken demir, en düşük olan ise bakırdır.



Şekil 4-2 Alüminyum ve bakırın frekansa bağlı empedans değerleri

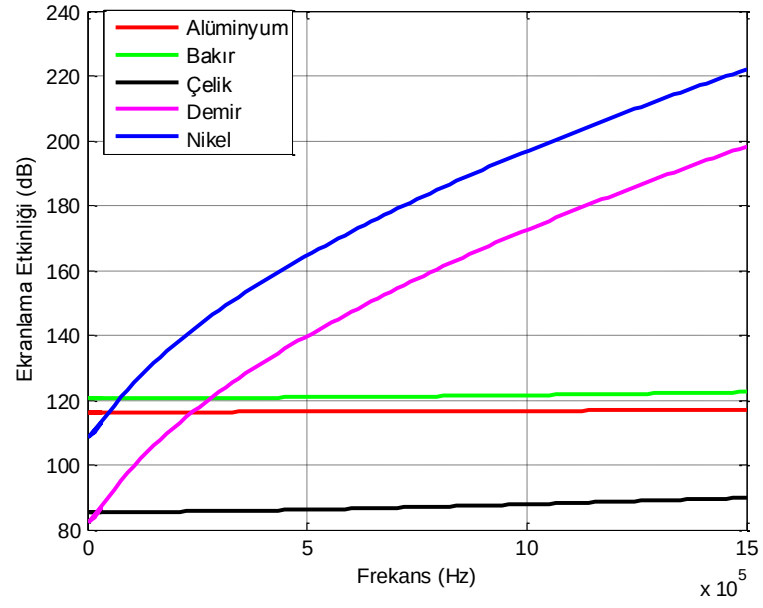


Şekil 4-3 Çelik, demir ve nikelin frekansa bağlı empedans değerleri

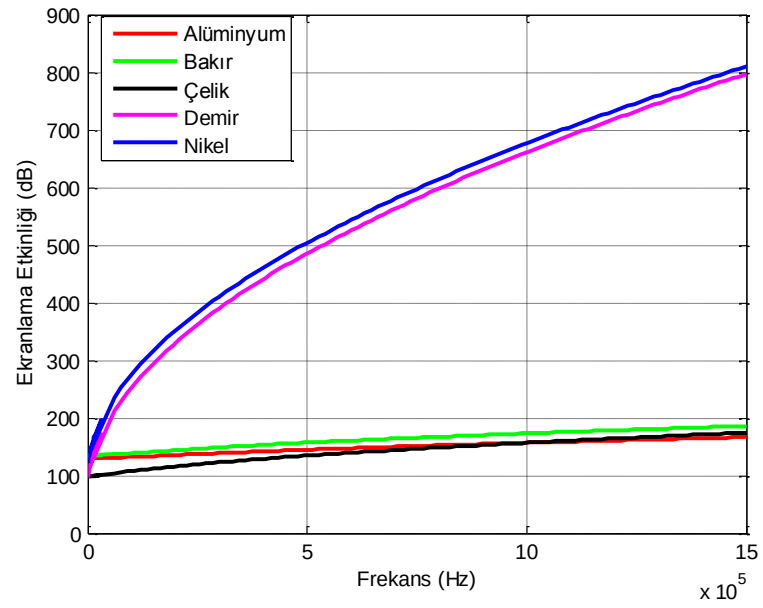
Hesaplamalar $\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}}$ eşitliği yardımıyla yapılmıştır. Alüminyum malzemesinin empedans hesabında $\sigma_{al} = 3.48 \times 10^7 (S/m)$, $\mu_{al} = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$ katsayıları kullanılmıştır. Bakır malzemesi için ise $\sigma_{ba} = 5.7 \times 10^7 (S/m)$, $\mu_{ba} = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$ katsayıları kullanılmıştır. Çelik için $\sigma_{\text{ç}} = 0.1 \times 10^7 (S/m)$, $\mu_{\text{ç}} = 100\pi \times 10^{-7} (H/m)$, demir için $\sigma_{de} = 10^7 (S/m)$, $\mu_{de} = 6.3 \times 10^{-3} (H/m)$ ve nikel için $\sigma_{ni} = 1.47 \times 10^7 (S/m)$, $\mu_{ni} = 4.25 \times 10^{-4} (H/m)$ katsayıları kullanılmıştır. Ekranlama etkinliğinin analiz edildiği frekans aralığı ise 0-15x10⁵ Hz'dir.

4.1.1. Tek Katmanlı Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği

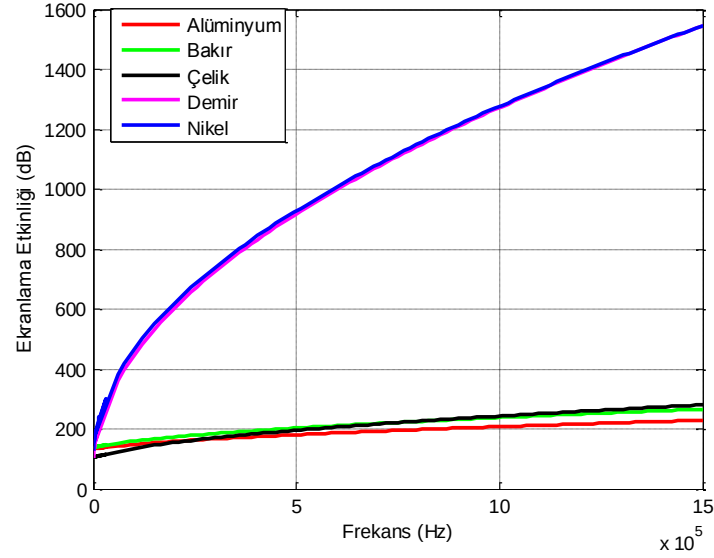
Şekil 4.4'te demir, çelik, bakır, alüminyum ve nikel malzemelerinin oluşturduğu yapılar için katman kalınlığı değiştirilerek (sırasıyla $d_1=0.0001m$, $d_2=0.0005m$, $d_3=0.001m$) ekranlama etkinliği elde edilmiştir. Hesaplamalar yüzeye dik gelen düzlem dalga için yapılmıştır ($\theta_g=0^\circ$). Katman kalınlığı arttıkça ekranlama etkinliği değeri de artmaktadır. Ekranlama etkinliği en yüksek malzeme, yutma kaybı en yüksek değere sahip olan nikel'dir.



(a)



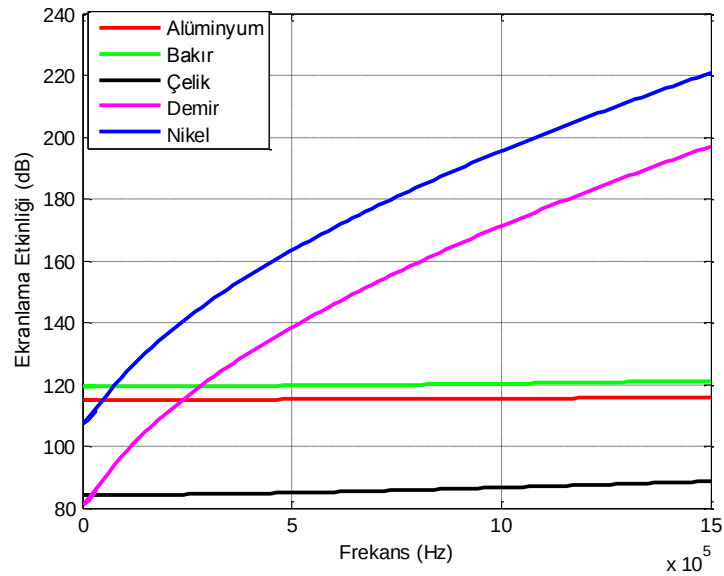
(b)



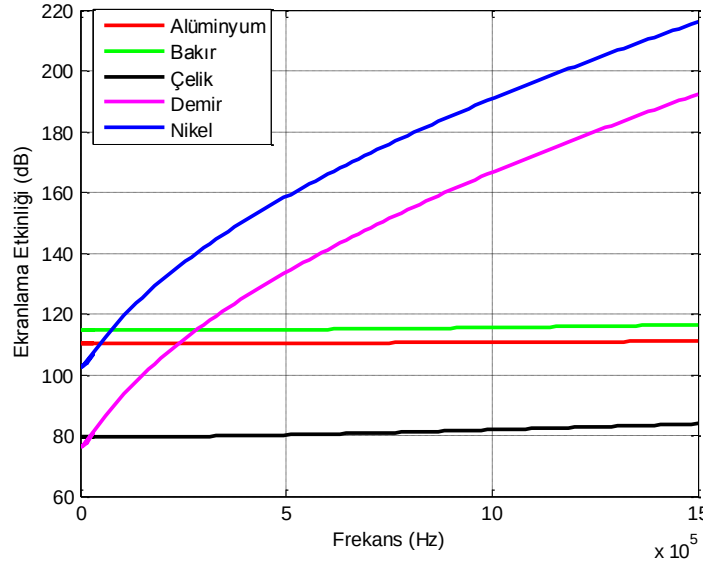
(c)

Şekil 4-4 İyi iletken malzemelerin ekranlama etkinliği (a) $d_1=0.0001\text{m}$, (b) $d_1=0.0005\text{m}$, (c) $d_1=0.001\text{m}$

Şekil 4.5'te demir, çelik, bakır, alüminyum ve nikel malzemelerinin ekranlama etkinliği katman kalınlığı sabit tutularak ($d_1=0.0001\text{m}$) dikey polarizasyonda θ_g parametresi değiştirilerek hesaplanmıştır. θ_g açısı arttıkça ekranlama etkinliği 1-2 dB mertebesinde düşmüştür.



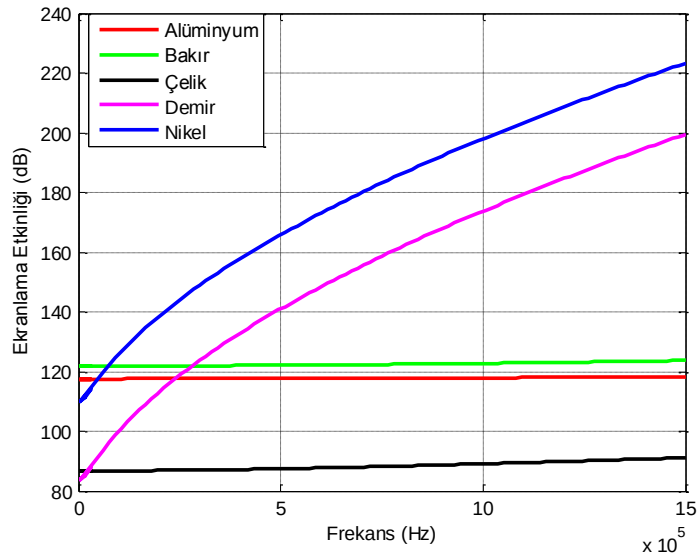
(a)



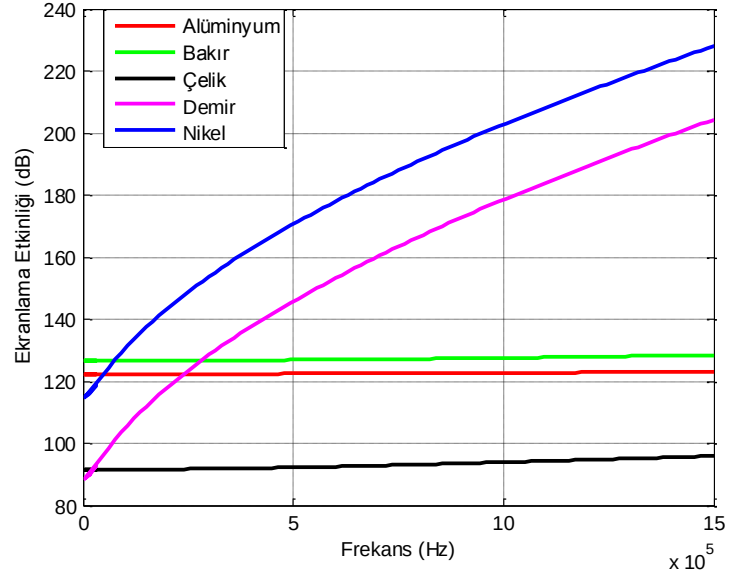
(b)

Şekil 4-5 İyi iletken malzemelerin ekranlama etkinliği ; (a) Dikey polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Dikey polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$

Şekil 4.6'da demir, çelik, bakır, alüminyum ve nikel malzemelerinin ekranlama etkinliği katman kalınlığı sabit tutularak ($d_1=0.0001\text{m}$) yatay polarizasyonda θ_g parametresi değiştirilerek hesaplanmıştır. Şekil 4.5 ile kıyaslandığında tam tersi durum geçerli olup açı parametresi arttıkça ekranlama etkinliği artmaktadır.



(a)

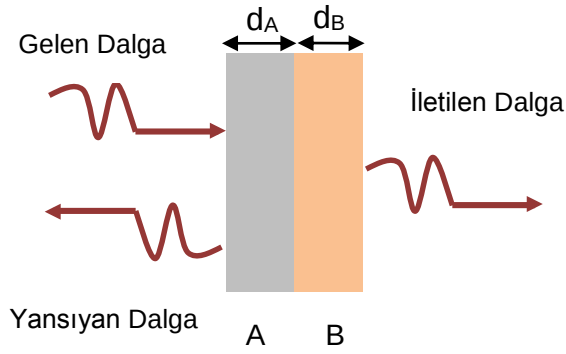


(b)

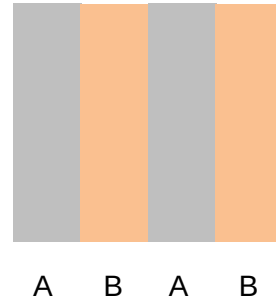
Şekil 4-6 İyi iletken malzemelerin ekranlama etkinliği; (a) Yatay polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Yatay polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$

4.1.2. Periyodik Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği

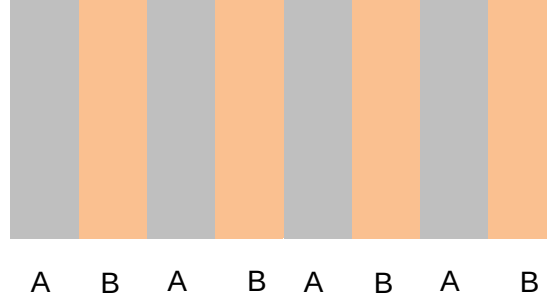
Bu bölümde katman sayısı artırılarak iki, dört ve sekiz katmanlı periyodik yapılar için ekranlama etkinliği analizi gerçekleştirilmiştir. $(AB)^N$ şeklinde çok katmanlı yapılar Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



(a)



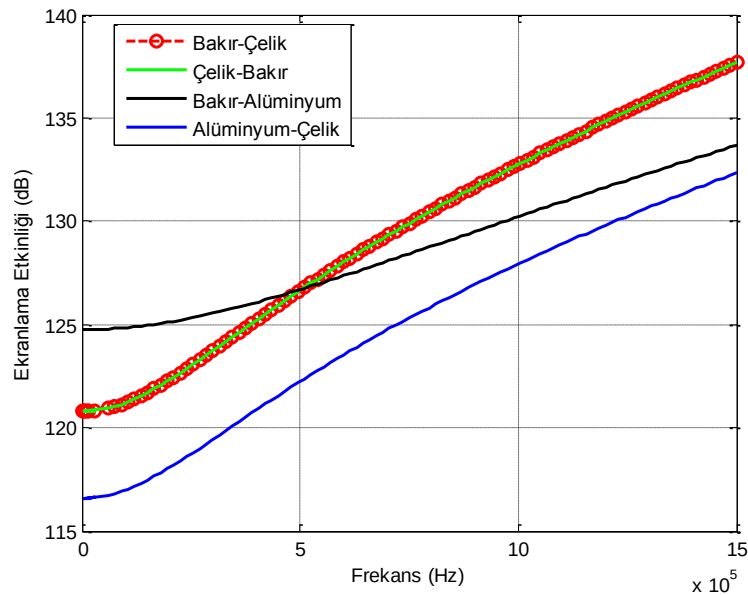
(b)



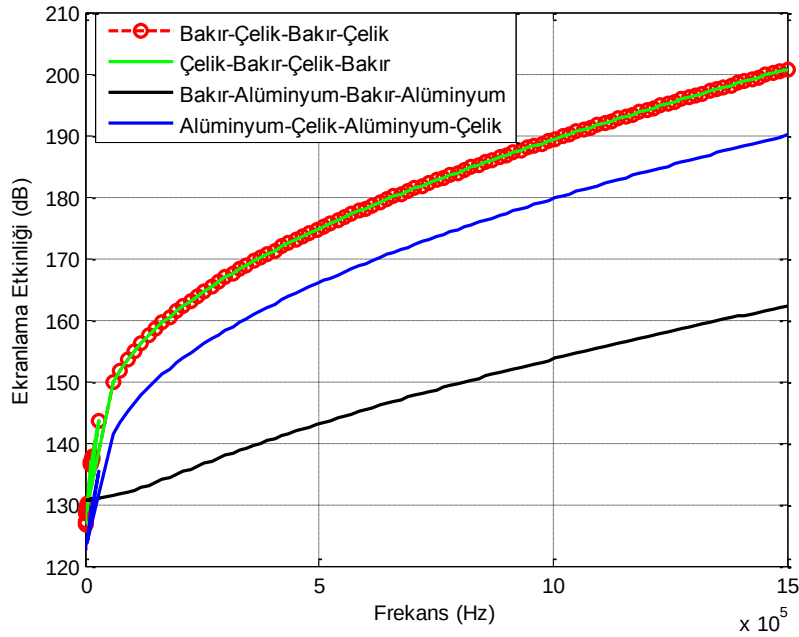
(c)

Şekil 4-7 (a) $(AB)^1$, 2 katmanlı yapı, $d_A = d_B$ 0.0001m (b) $(AB)^2$, 4 katmanlı yapı $d_A = d_B$ 0.0001m (c) $(AB)^4$, 8 katmanlı yapı $d_A = d_B$ 0.00004m

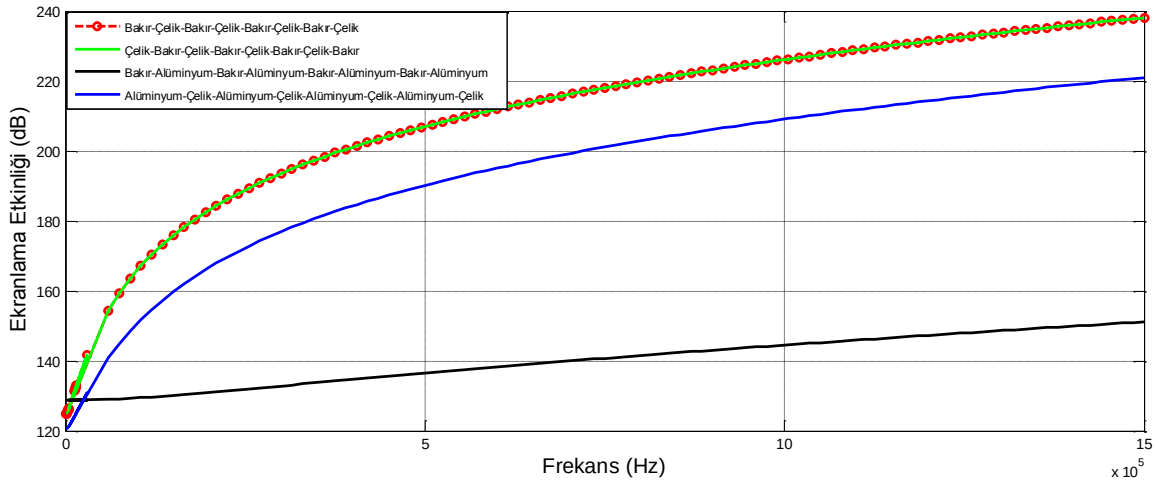
$(AB)^1$, $(AB)^2$ ve $(AB)^4$ şeklinde modellenen ve bakır, çelik ve alüminyum malzemelerin birleşimlerinden oluşan yapılar için elektromanyetik dalganın dik geldiği durumda ($\theta_g = 0^\circ$) ekranlama etkinliği değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.8 (a)'da kırmızı ve yeşil renkli olarak gösterilen ekranlama etkinliği sırasıyla “Bakır-Çelik” ve “Çelik-Bakır” çok katmanlı yapı modeline aittir. Görüldüğü üzere ekranlama etkinliğinde değişiklik olmamıştır. “Bakır-Alüminyum” ve “Alüminyum-Çelik” çok katmanlı yapının ekranlama etkinliği “Bakır-Çelik” ve “Çelik-Bakır” çok katmanlı yapı modeline göre daha düşük seviyededir.



(a)



(b)



(c)

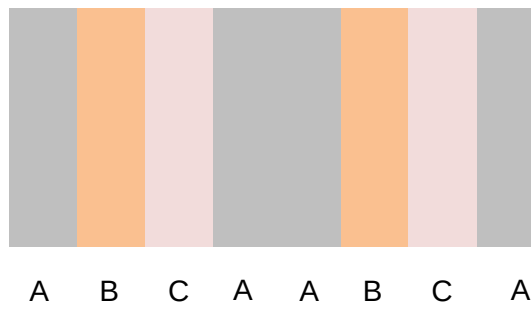
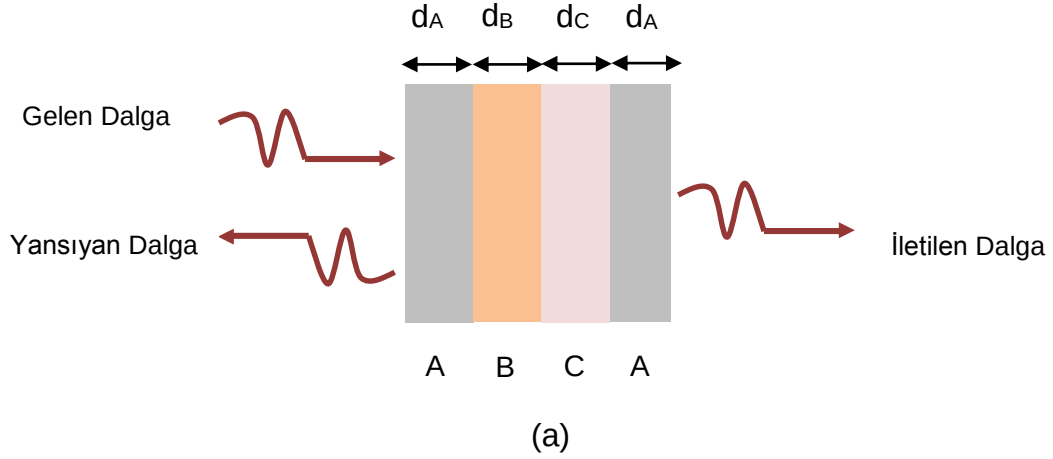
Şekil 4-8 (a) $(AB)^1$ şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği; (b) $(AB)^2$ şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği; (c) $(AB)^4$ şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

Şekil 4.8 (b)'de dört katmanlı olarak modellenen ve bakır, çelik ve alüminyum malzemelerin birleşimlerinden oluşan yapılar için ekranlama etkinliği değerleri elde edilmiştir. İki katmanlı yapılara benzer şekilde diziliş sırası değişmesine rağmen “Bakır-Çelik-Bakır-Çelik” ve “Çelik-Bakır-Çelik-Bakır” çok katmanlı yapı modellerine ait ekranlama etkinliği değerleri aynıdır. Ekranlama etkinliği en düşük olan çok

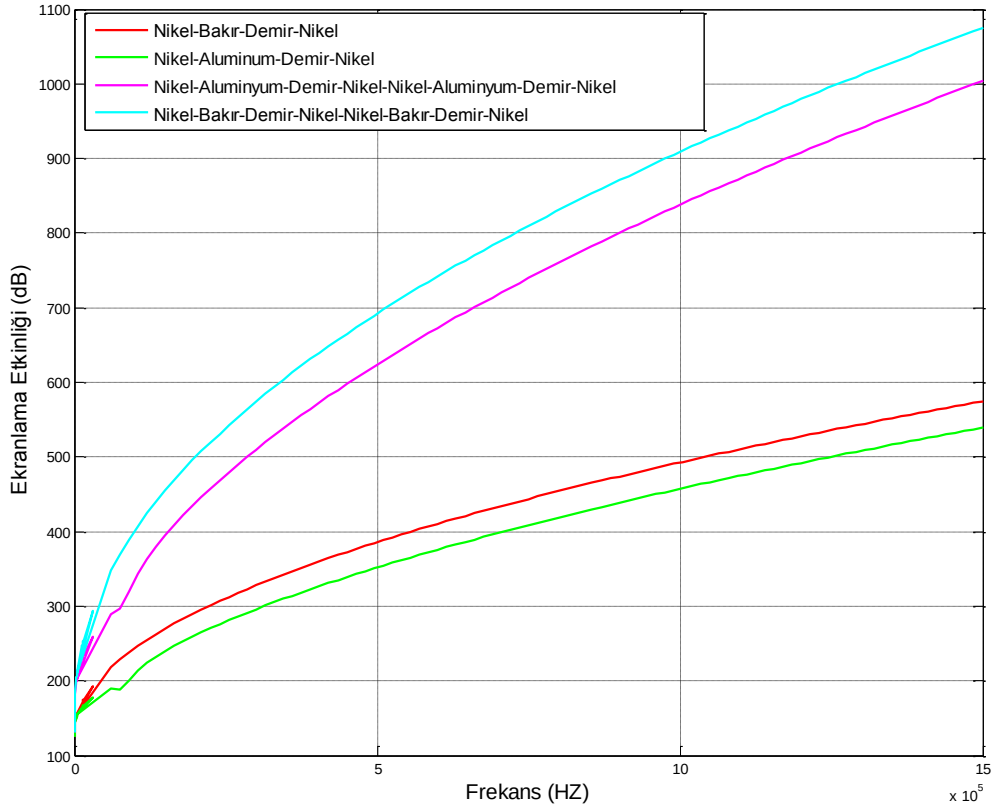
katmanlı yapı modeli ise “Bakır-Alüminyum-Bakır-Alüminyum” malzemelerinden oluşan yapıdır.

Şekil 4.8 (c)’de görüldüğü gibi sekiz katmanlı yapıların toplam kalınlığı dört katmanlı yapıların toplam kalınlığından daha az olmasına rağmen sekiz katmanlı yapıların ekranlama etkinliği daha yüksek elde edilmiştir. Ekranlama etkinliği en düşük olan bakır ve alüminyum malzemelerinden oluşan çok katmanlı yapı, ekranlama etkinliği en yüksek olan ise çelik ve bakır malzemelerinden oluşan yapılardır.

Şekil 4.9’da $(ABCA)^1$ ve $(ABCA)^2$ şeklinde modellenen periyodik yapılar verilmiştir. bakır, demir, alüminyum ve nikel malzemelerin birleşimlerinden oluşan yapılar modellenmiştir. Tüm katmanların kalınlığı aynı olup 0.0001m değerine eşittir. Elektromanyetik dalganın dik geldiği durum için ($\theta_g=0^\circ$) hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4-9 (a) $(ABCA)^1$ şeklinde modellenen 4 katmanlı yapı (b) $(ABCA)^2$ şeklinde modellenen 8 katmanlı yapı



Şekil 4-10 (ABCA)¹ ve (ABCA)² şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

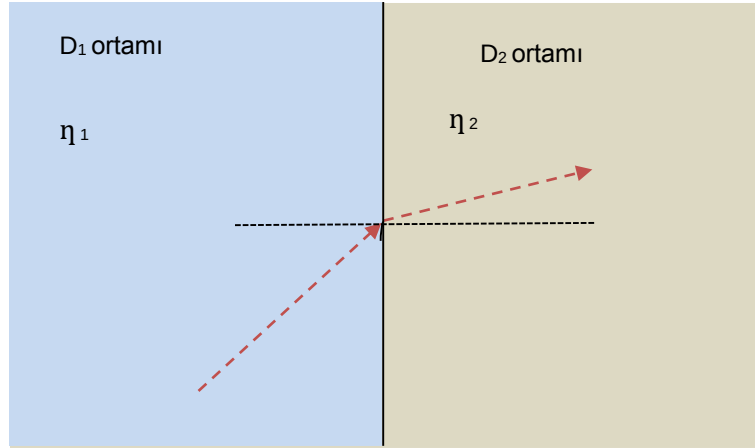
Şekil 4.10’da kırmızı ve yeşil renkli olarak gösterilen ekranlama etkinliği sırasıyla “Nikel-Bakır-Demir-Nikel” ve “Nikel-Alüminyum-Demir-Nikel” çok katmanlı yapı modellerine aittir. Bu yapılarda tek değişen ortam bakır ve alüminyum malzemeleridir. Şekil 4.4 (a)’da görüldüğü üzere alüminyum ve bakır malzemelerinin ekranlama etkinliği değerleri hemen hemen birbirine eşittir. Ekranlama etkinliğini belirleyen, katmanlar arasında oluşan yansıma kayıplarıdır. Bakır malzemesinin empedansı alüminyum malzemesine göre daha düşüktür. Komşu katmanlarını oluşturan malzemelerin empedansları arasındaki fark daha fazla olduğu için “Nikel-Bakır-Demir-Nikel” modelinin ekranlama etkinliği daha yüksek elde edilmiştir. Benzer durum sekiz katmanlı yapılar için de elde edilmiştir.

4.2. Dielektrik Malzeme İle Tasarlanan Yapıların Ekranlama Etkinliği

Dielektrik malzemeler, $\sigma \ll \omega \epsilon$ ifadesini sağlayan malzeme türleridir. İletkenlik katsayısı, $\sigma = 1/\rho$ eşitliği ile hesaplanmaktadır [40]. ρ malzemenin öz direnci olup

$\rho = RA/l$ eşitliği ile hesaplanmaktadır [40]. “R” malzemenin ölçülen direnç değeri, “A” malzemenin yüzey alanı ve “l” ise malzemenin uzunluğunu göstermektedir.

Manyetik geçirgenlik ($\mu > 0$) ve dielektrik katsayısı ($\epsilon > 0$) pozitif işaretli olan malzemeler sağ el kuralını sağladıkları için “Sağ Elli Malzemeler” olarak adlandırılmaktadır [41]. Dielektrik malzemelerde sağ elli malzemelerdir. $\eta_1 > 0$ ve $\eta_2 > 0$ kırınım indisli dielektrik ortamlar arası elektromanyetik dalganın kırılması Şekil 4.11’de gösterilmektedir.

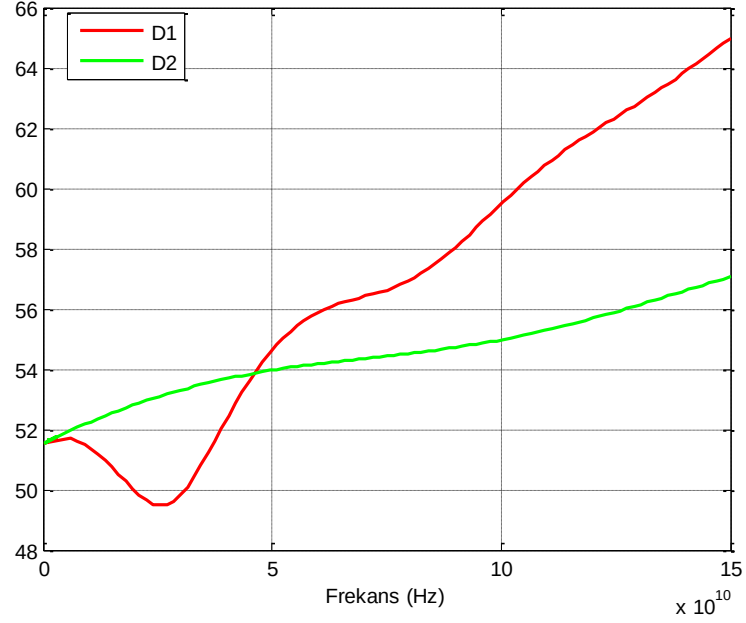


Şekil 4-11 Dielektrik ortamlar arası elektromanyetik dalganın kırılması

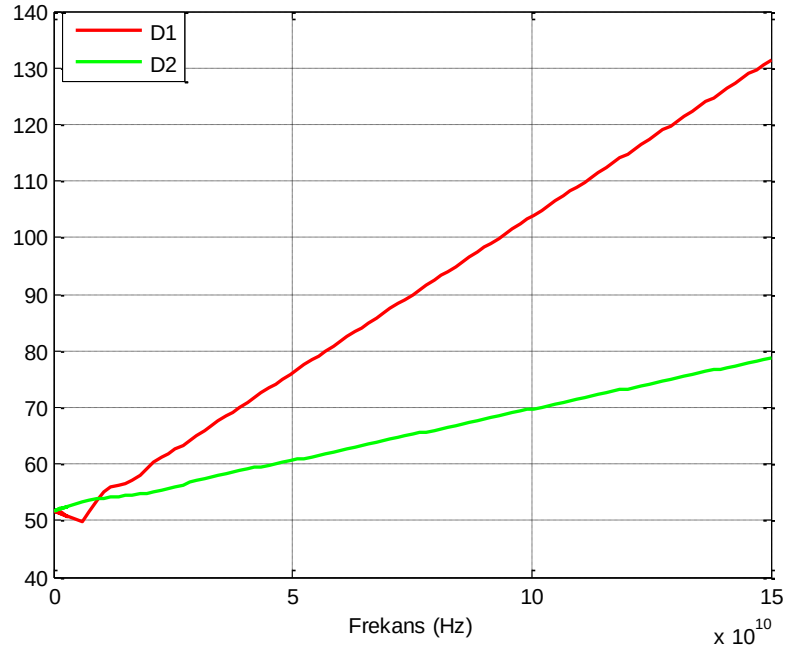
İletkenlik katsayıları dielektrik katsayılarına göre çok küçük olmasından ötürü iletkenlik katsayıları empedans hesabında ihmal edilmiştir. Hesaplamalar $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ eşitliği yardımıyla yapılmıştır. D₁ malzemesinin empedans hesabında $\epsilon_{d1} = 6.65 - j0.024$, $\mu_{d1} = 1 - j0.48$ katsayıları kullanılmıştır. D₁ malzemesinin empedans hesabında $\epsilon_{d2} = 1 - j0.004$, $\mu_{d2} = 1 - j0.04$ katsayıları kullanılmıştır. Bu katsayılar ortamların bağıl manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabitleridir. D₁ ve D₂ malzemelerin empedans genliği sabit olup frekanstan bağımsızdır. D₁ ve D₂ malzemelerin empedans genliği sırasıyla 154 ve 391 ohm değerlerine eşittir. Ekranlama etkinliğinin analiz edildiği frekans aralığı ise 0-15x10¹⁰ Hz’dir.

4.2.1. Tek Katmanlı Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği

Şekil 4.12’te D₁ veya D₂ malzemelerinden oluşan tek katmanlı yapılar için katman kalınlığı değiştirilerek (sırasıyla d₁=0.001m, d₂=0.005m) ekranlama etkinliği elde edilmiştir.



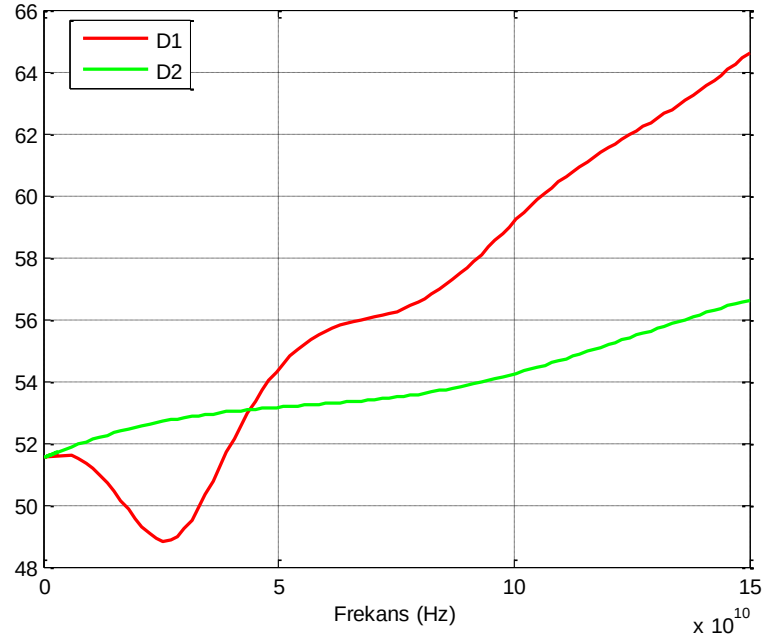
(a)



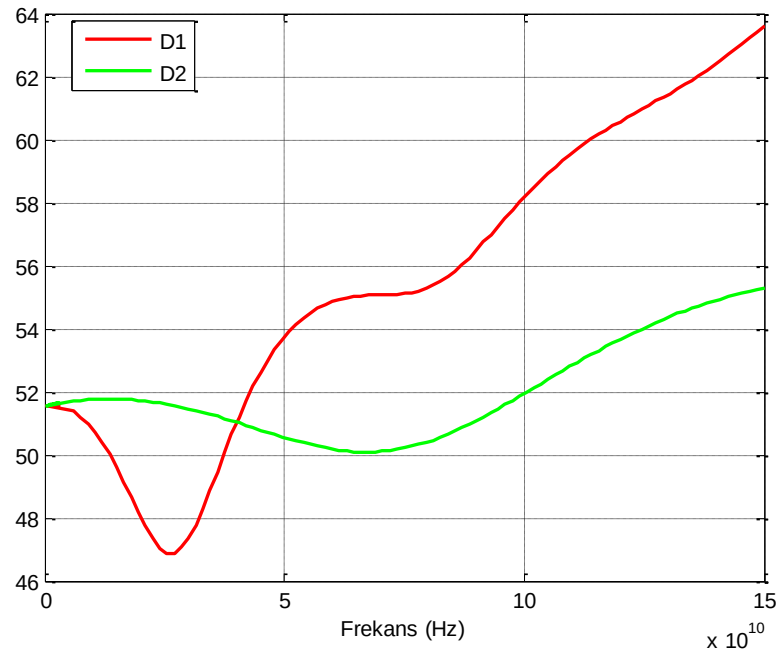
(b)

Şekil 4-12 Dielektrik malzemelerin ekranlama etkinliği; (a) d₁=0.001m (b) d₂=0.005m

Hesaplamalar yüzeye dik gelen düzlem elektromanyetik dalga için yapılmıştır ($\theta_g=0^\circ$). Katman kalınlığı arttıkça ekranlama etkinliği değeri de artmaktadır.



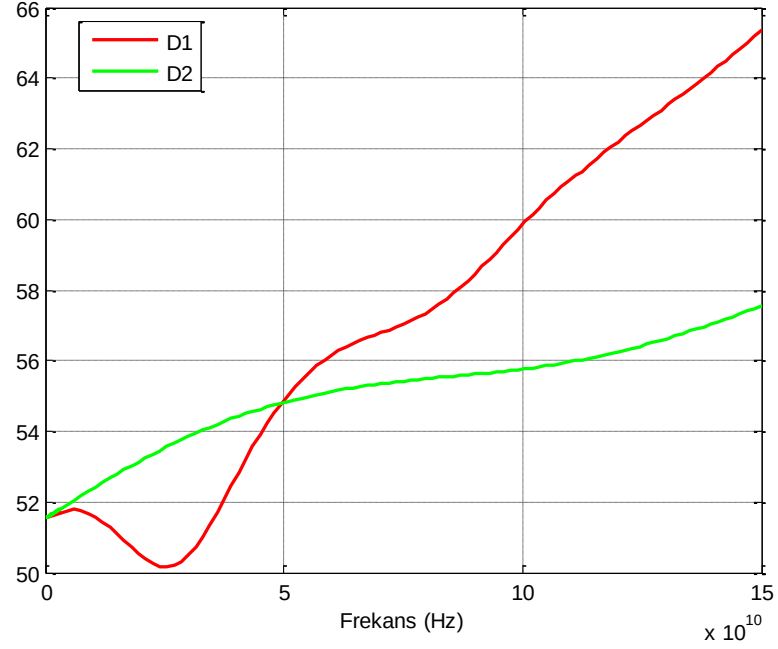
(a)



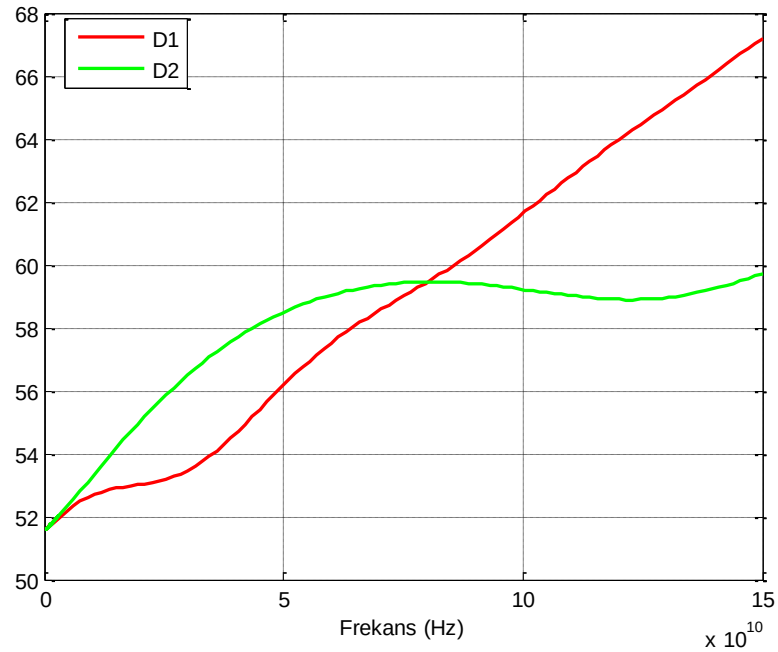
(b)

Şekil 4-13 Dielektrik malzemelerin ekranlama etkinliği ; (a) Dikey polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Dikey polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$

Şekil 4.13'te D_1 ve D_2 dielektrik malzemelerinin ekranlama etkinliği katman kalınlığı sabit tutularak ($d_1=0.001m$) dikey polarizasyonda θ_g parametresi değiştirilerek hesaplanmıştır. θ_g açısı arttıkça ekranlama etkinliğinin düştüğü görülmektedir.



(a)



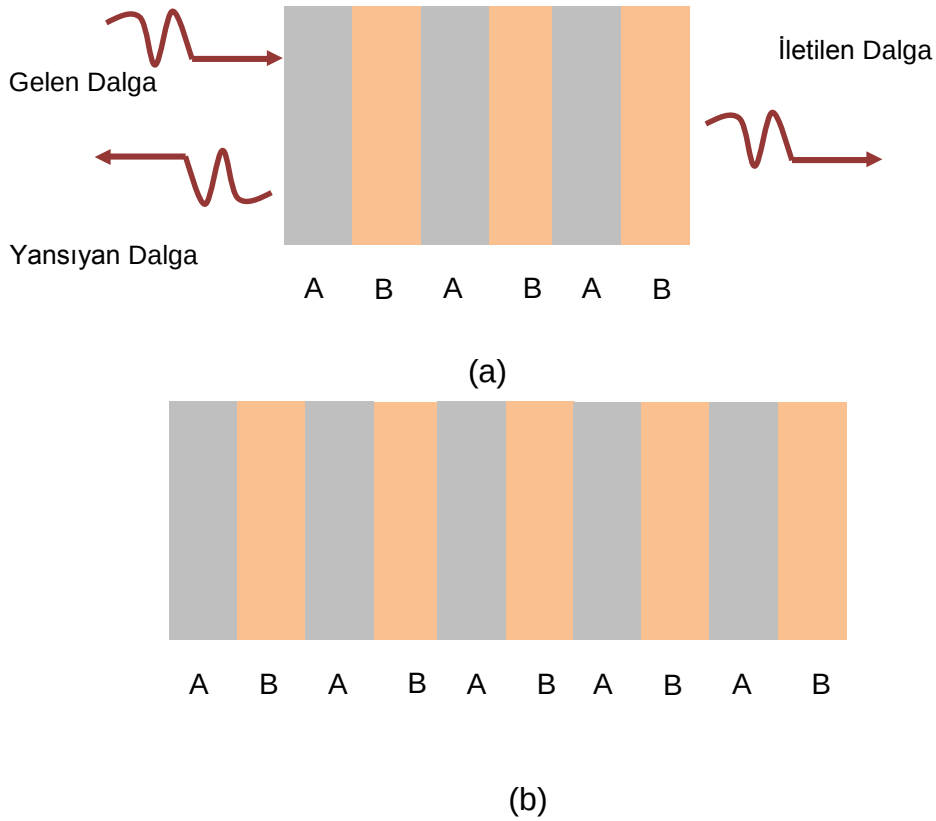
(b)

Şekil 4-14 Dielektrik malzemelerin ekranlama etkinliği; (a) Yatay polarizasyon $\theta_g=30^\circ$, (b) Yatay polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$

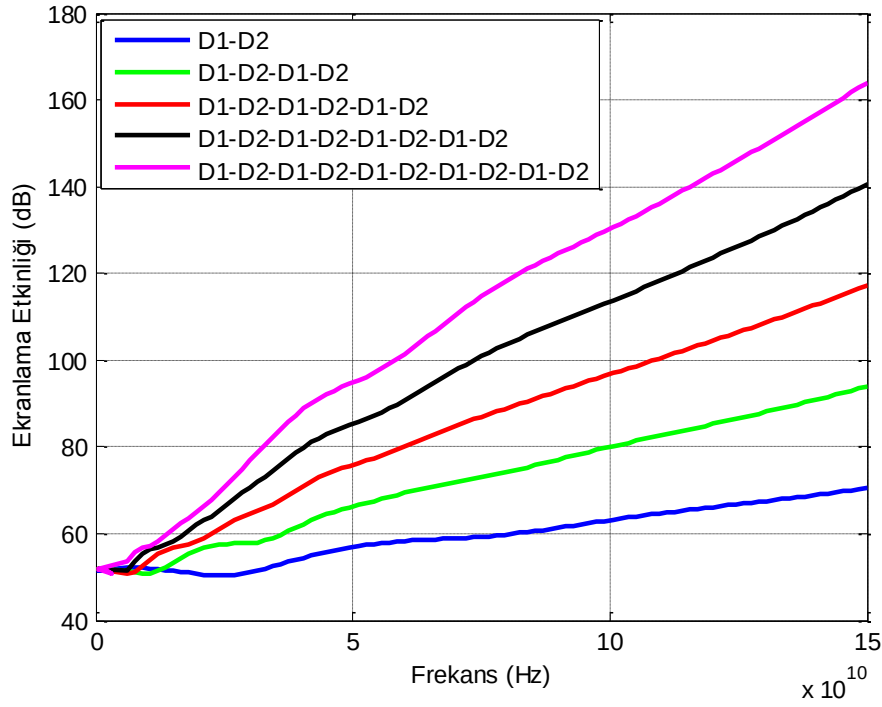
Şekil 4.14'te D_1 ve D_2 dielektrik malzemelerinin ekranlama etkinliği katman kalınlığı sabit tutularak ($d_1=0.001m$) dikey polarizasyonda θ_g parametresi değiştirilerek hesaplanmıştır. Şekil 4.13 ile kıyaslandığında tam tersi durum geçerlidir. Açı parametresi arttıkça ekranlama etkinliği artmaktadır. 3.61 numaralı eşitliğine göre elde edilen sonuç beklenen bir durumdur.

4.2.2. Periyodik Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği

Dielektrik malzemelerden tasarlanan ve Fibonacci serisi şeklinde modellenen çok katmanlı yapılar ile ekranlama performanslarını karşılaştırabilmek için dielektrik malzemelerden oluşan çok katmanlı yapılar Şekil 4.7 ve Şekil 4.16'da verilen modellere göre oluşturulmuştur.



Şekil 4-15 (a) $(AB)^3$, 6 katmanlı yapı, $d_A = d_B = 0.001m$ (b) $(AB)^5$, 10 katmanlı yapı, $d_A = d_B = 0.001m$



Şekil 4-16 Dielektrik Malzeme ile (AB)¹, (AB)², (AB)³, (AB)⁴ ve (AB)⁵ Şeklinde Modellenen Yapıların Ekranlama Etkinliği

Şekil 4.16'da (AB)¹, (AB)², (AB)³, (AB)⁴ ve (AB)⁵ şeklinde modellenen ve D₁ ve D₂ dielektrik malzemelerin birleşimlerinden oluşan yapılar için elektromanyetik dalganın dik geldiği durumda ($\theta_g=0^\circ$) ekranlama etkinliği değerleri gösterilmektedir. Katman sayısı arttıkça ekranlama performansı da artmaktadır.

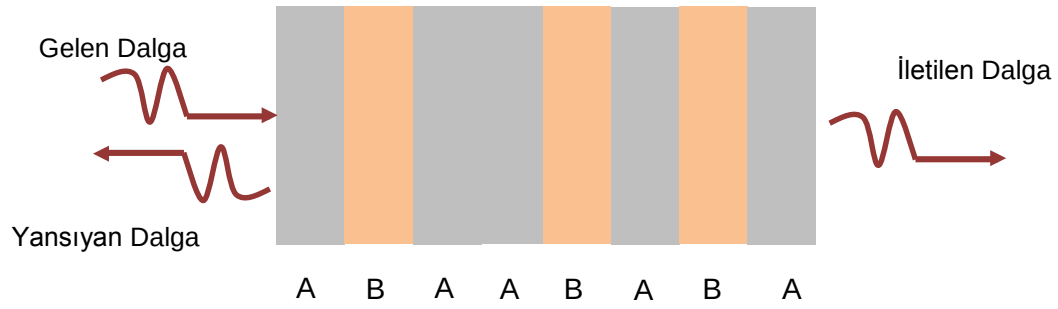
4.2.3. Fibonacci Serisi Şeklinde Modellenen Yapıların Ekranlama Etkinliği

Fibonacci serisi, İtalyan Leonardo Fibonacci tarafından ileri sürülmüş ve matematik vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Fibonacci serisi, serideki her bir sayının bir önceki sayı ile toplanmasıyla elde edilmektedir. Seri ilerledikçe sayılar arasındaki oran altın orana yaklaşmaktadır [42]. Özellikle Fibonacci serisi şeklinde dizilen metamatizemeli çok katmanlı yapılar optik filtre vb. farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Fibonacci yapısı olarak $F_n=F_{n-2}+F_{n-1}$ ($F_0=F_1=1$) kuralı kullanılmaktadır [43]. Bu çalışmada Fibonacci serisi şeklinde dizilen dielektrik ve metamatizeme içeren çok katmanlı yapıların ekranlama performansları incelenmiştir. Tablo 4.1'de 5. iterasyona kadar oluşturulmuş Fibonacci sayıları ve yapıları gösterilmektedir.

Tablo 4.1 5. İterasyona kadar oluşturulmuş Fibonacci sayıları ve yapısı

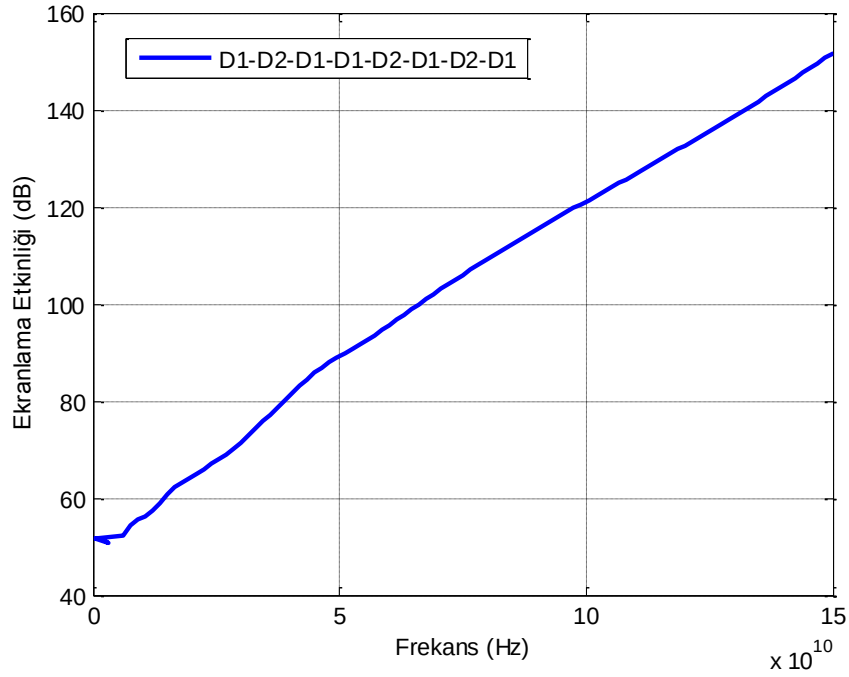
Fibonacci Sayıları	Fibonacci Yapısı
F_0	B
F_1	A
F_2	AB
F_3	ABA
F_4	ABAAB
F_5	ABAABABA

D_1 ve D_2 malzemelerinden oluşmuş sekiz katmanlı yapılar Şekil 4.17’de gösterilen yapıda modellenmiştir. Her bir katmanın kalınlığı aynı ve 0.001m değerine eşittir. Elektromanyetik dalganın dik geldiği durum için inceleme gerçekleştirilmiştir.



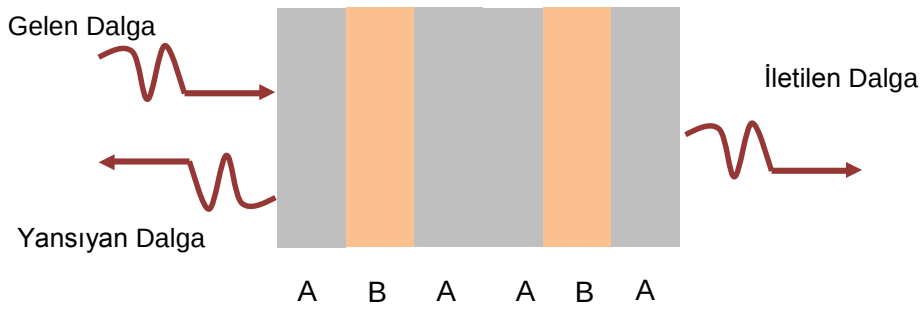
Şekil 4-17 Fibonacci serisi kuralı 5. iterasyon ile oluşturulmuş çok katmanlı yapı

Fibonacci serisi kuralı beşinci iterasyon ile oluşturulmuş çok katmanlı yapı için ekranlama etkinliği Şekil 4. 18’te elde edilmiştir. Şekil 4.16’da gösterilen periyodik yapılar ile kıyaslandığında katman kalınlıkları aynı olmasına rağmen ekranlama etkinliği performansı daha yüksek elde edilmiştir.



Şekil 4-18 Fibonacci serisi kuralı 5. iterasyon ile oluşturulmuş çok katmanlı olarak modellenen yapının ekranlama etkinliği

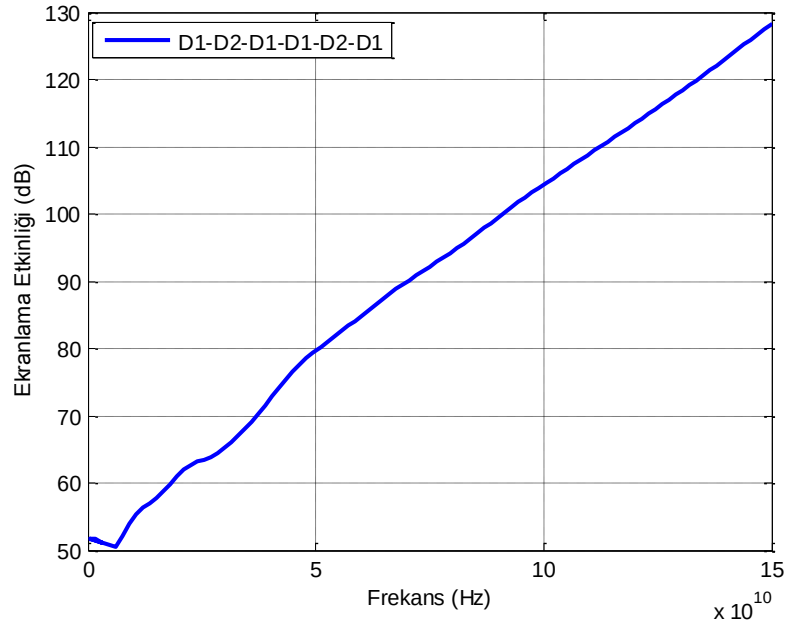
Bu çalışmada dizilimin ekranlama etkinliğine etkisini incelemek için farklı Fibonacci dizilimli yapılar modellenmiştir. Simetrik Fibonacci kuralı, Fibonacci diziliminin simetrisinin dizinin sonuna eklenmesini ifade etmektedir. Tablo 4.5'te verildiği üzere $F_3=ABA$ 'yi temsil etmektedir. Bu yapıya simetrik Fibonacci kuralı uygulanırsa "ABAABA" şeklinde yeni bir yapı oluşmaktadır.



Şekil 4-19 Simetrik Fibonacci serisi kuralı ile oluşturulmuş çok katmanlı yapı

D_1 ve D_2 malzemelerinin yer aldığı altı katmanlı yapılar Şekil 4.19'da gösterilen kurala göre oluşturulmuştur. Bu katmanlı yapının ekranlama etkinliği Şekil 4. 20'de verilmiştir. Tüm katmanların kalınlığı sabit ve 0.001m'dir. Altı katmanlı periyodik

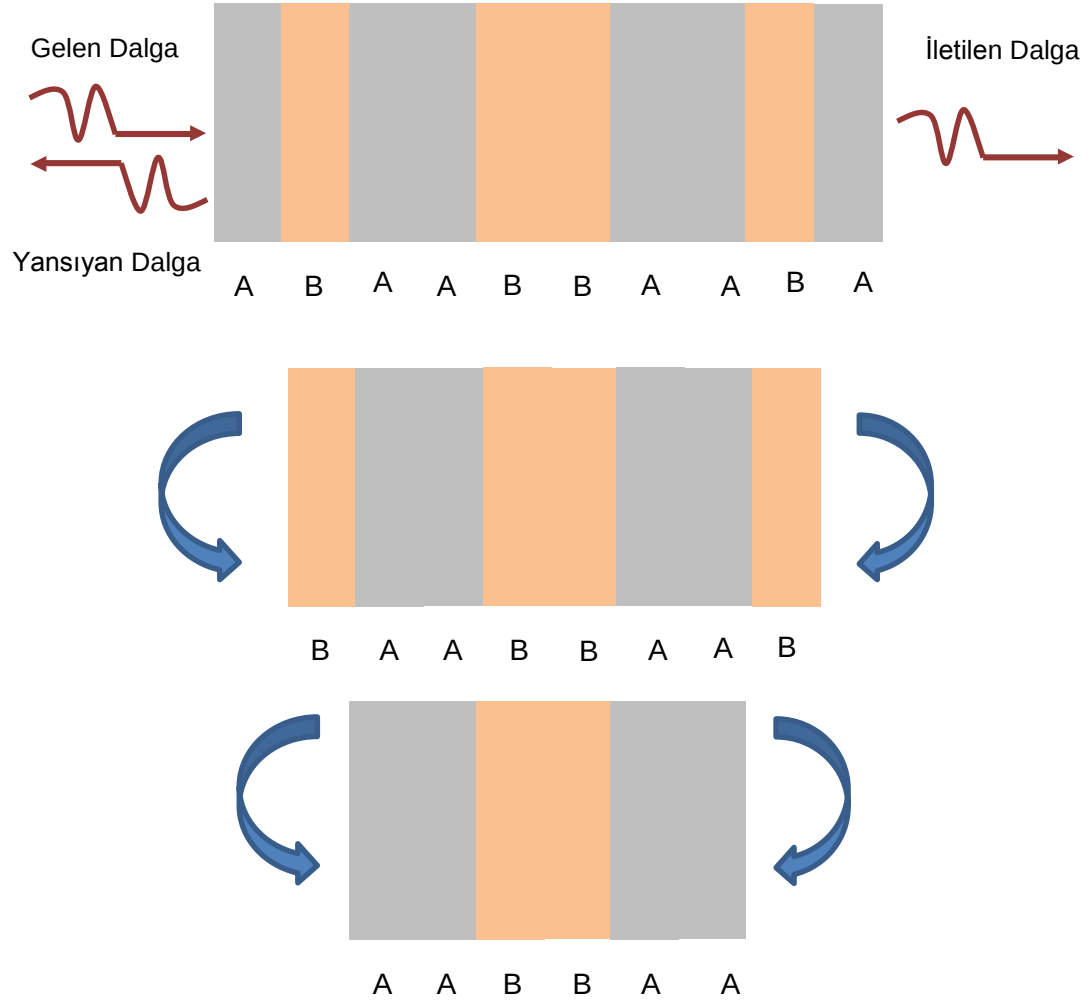
yapılar ile kıyaslandığında katman kalınlıkları aynı olmasına rağmen ekranlama etkinliği performansı daha yüksek seviyede elde edilmiştir.



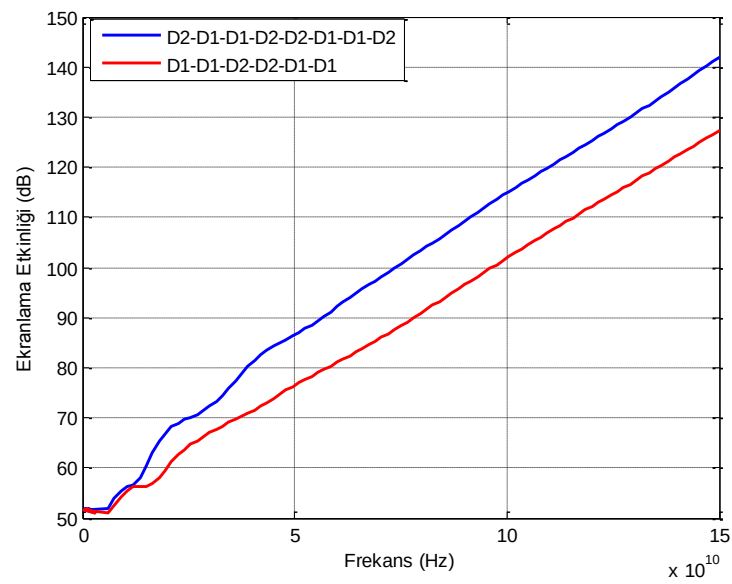
şekil 4-20 Dielektrik malzeme ile ABAABA şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

Azaltılmış simetrik Fibonacci kuralı, simetrik Fibonacci diziliminin simetrisini bozmadan katman sayısının azaltılmasıdır. Örneğin F4=ABAAB'yi temsil etmektedir. Bu yapıya simetrik Fibonacci kuralı uygulandığında “ABAAB BAABA” şeklinde bir yapı ortaya çıkmaktadır. Yapının simetrisini bozmadan katman sayısı azaltıldığında “BAAB BAAB” ve “AAB BAA” yapılarına ulaşılır. şekil 4.21’de örnek model verilmiştir. Bu modele göre D₁ ve D₂ malzemelerinden oluşan çok katmanlı yapılar katman kalınlıkları değiştirilmeden elektromanyetik dalganın dik geldiği durum için incelenmiştir.

Bu kurala göre oluşturulmuş çok katmanlı yapının ekranlama etkinliği şekil 4.22’te elde edilmiştir. Altı katman simetrik Fibonacci diziliimli yapıların ekranlama etkinliğinde olduğu gibi ekranlama etkinliği performansında değişiklik olmamıştır. Sekiz katmanlı periyodik yapıların ekranlama etkinliği bu modelde altı katmanlı yapı ile elde edilmiştir.

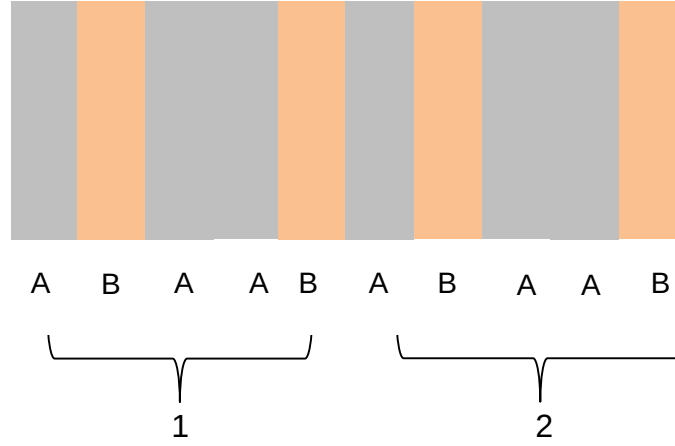


Şekil 4-21 Azaltılmış Fibonacci serisi kuralı ile oluşturulmuş çok katmanlı yapı

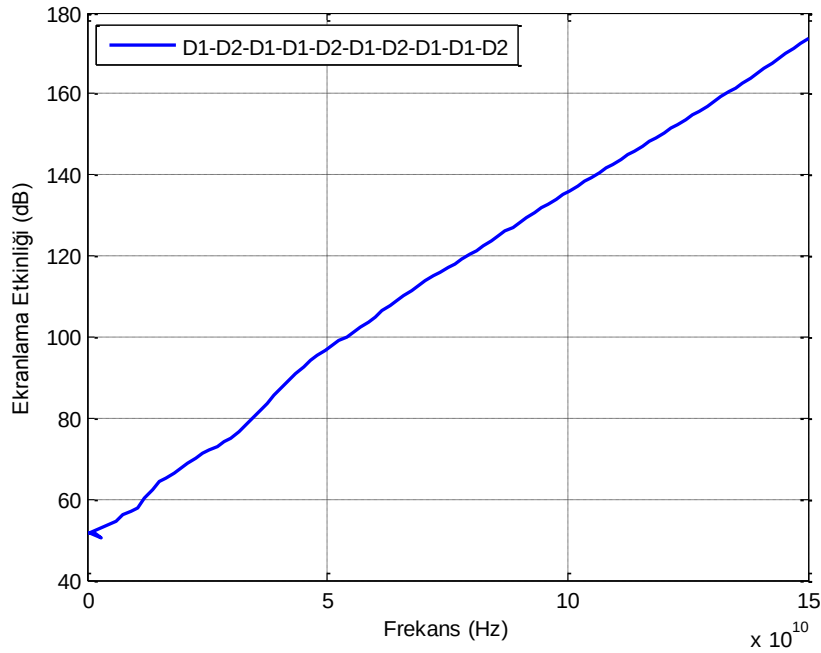


Şekil 4-22 Dielektrik malzeme ile BAABBAAB ve AABBAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

Tekrarlanmış simetrik Fibonacci kuralı Fibonacci diziliminin art arda eklenmesidir. Örneğin $F_4=ABAAB$ 'yi temsil etmektedir. Bu yapıya tekrarlanmış Fibonacci kuralı uygulanırsa “ABAAB ABAAB” şeklinde bir yapı ortaya çıkacaktır. Şekil 4.23'te örnek model verilmiştir.



Şekil 4-23 Azaltılmış Fibonacci serisinin 4. iterasyonu ile oluşturulmuş yapının art arda iki kez eklenmesiyle oluşturulmuş çok katmanlı yapı, $d_A = d_B = 0.001m$

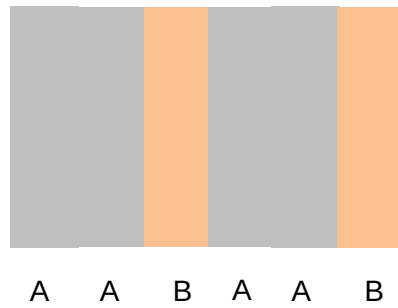


Şekil 4-24 Dielektrik malzeme ile ABAAB ABAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

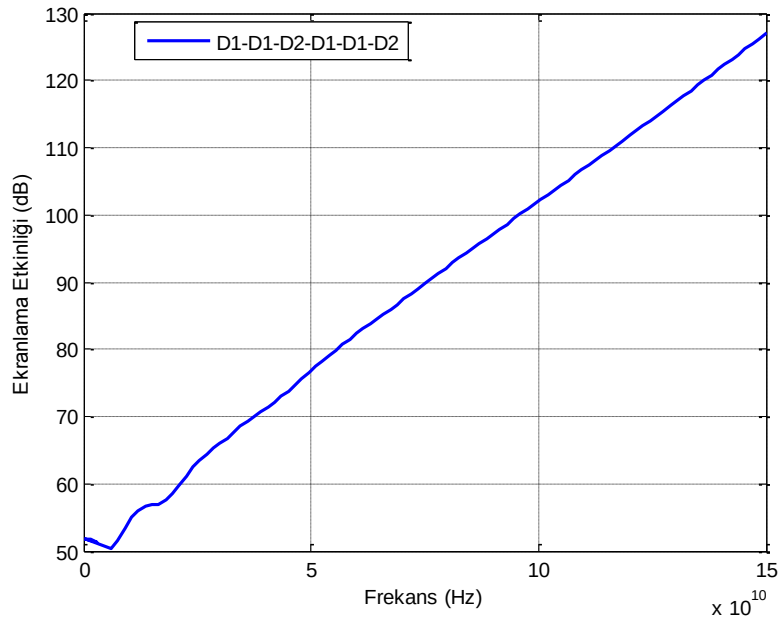
Bu kurala göre oluşturulmuş çok katmanlı yapının ekranlama etkinliği Şekil 4. 24'te elde edilmiştir. D_1 ve D_2 malzemeleri ile oluşturulan on katmanlı yapıların ekranlama etkinliği katman sayısının artmasından dolayı yüksek çıkmıştır. Katman sayısı

artması çok katmanlı yapının kalınlığının artmasına neden olmuştur. On katmanlı periyodik yapılara göre ekranlama performansı daha yüksektir.

Fibonacci kuralı Tablo 4.1’de gösterildiği gibi son iki serinin art arda eklemesiyle oluşturulmuştur. Bu kural modifiye edilerek geciktirilmiş Fibonacci yapıları elde edilmiştir. Bu yapıda kural, serinin son iki elemanı yerine, son eleman ile sondan dördü önceki elemanın biraraya gelmesi şeklindedir. Fiboacci serisinin ilk elemanı $F_1=A$ ve dördüncü elemanı $F_4=ABAAB$ şeklindedir. Bu yapıya geciktirilmiş Fibonacci kuralı uygulanırsa F_1F_4 yani “AABAAB” şeklinde bir yapı ortaya çıkacaktır. Şekil 4.25’te örnek model verilmiştir.



Şekil 4-25 Geciktirilmiş Fibonacci serisinin 1. iterasyonu ile oluşturulmuş çok katmanlı yapı, $d_A = d_B = 0.001m$

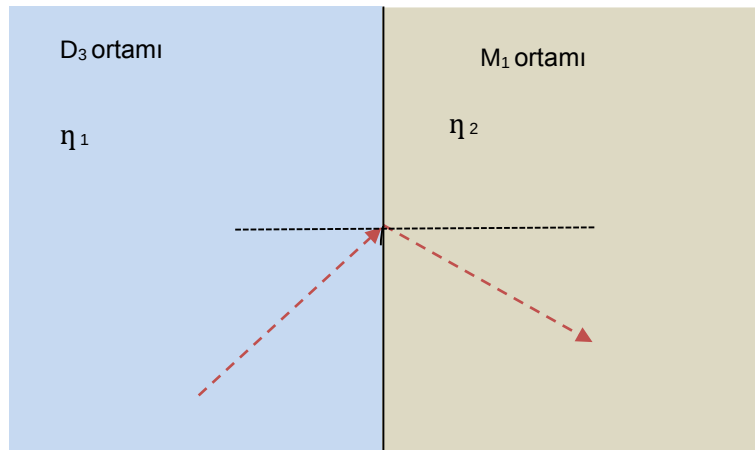


Şekil 4-26 Dielektrik malzeme ile AABAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

Bu kurala göre oluşturulmuş çok katmanlı yapının ekranlama etkinliği Şekil 4.26’da elde edilmiştir. Şekil 4.22’de elde edilen sonuçlara yakın değerler elde edilmiştir. Altı katmanlı periyodik yapılara göre ekranlama performansı daha yüksek elde edilmiştir.

4.3. Dielektrik ve Metamalzeme ile Tasarlanan Yapıların Ekranlama Etkinliği

Metamalzemelerin dielektrik ve/veya geçirgenlik katsayısı eksi işaretli olabilmektedir. Metamalzemeler negatif indeksli malzemeler olarak da adlandırılmaktadır [42]. Metamalzeme sol el kuralını sağladığı için “Sol elli malzeme” olarak adlandırılmaktadır [43]. $\eta_1 > 0$ ve $\eta_2 < 0$ kırınım indisli dielektrik ve metamalzemeli ortamlar arası elektromanyetik dalganın kırılması Şekil 4.27’de gösterilmektedir. Metamalzemenin negatif kırınım indisine sahip olmasından dolayı gelen dalga, normalin öbür tarafına geçmeyip aynı tarafta kalmaktadır.



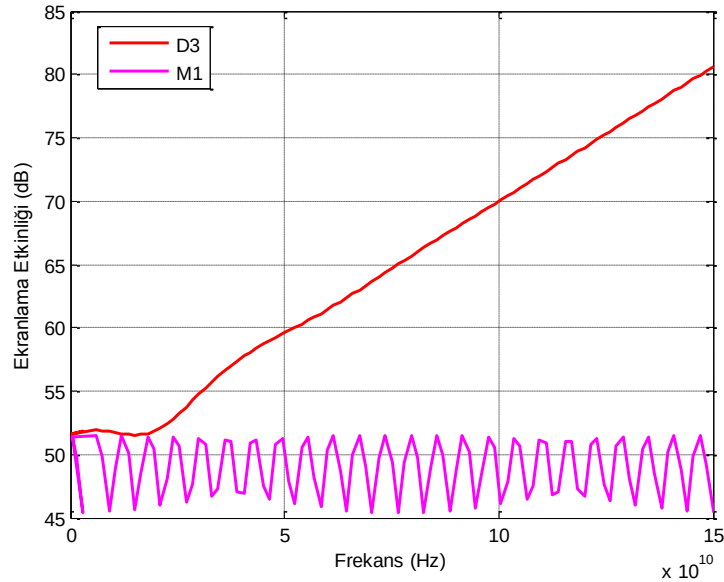
Şekil 4-27 Dielektrik-Metamalzeme ortamlar arası elektromanyetik dalganın kırılması

Hesaplamalar $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ eşitliği yardımıyla yapılmıştır. İletkenlik katsayıları dielektrik katsayılarına göre çok küçük olmasından ötürü iletkenlik katsayıları empedans hesabında ihmal edilmiştir. D_3 malzemesinin empedans hesabında $\epsilon_{d3} = 7.75 - j0.969$, $\mu_{d3} = 1.47 - j0.853$ katsayıları kullanılmıştır. D_1 malzemesinin empedans hesabında $\epsilon_{m1} = -50 - j0.00001$, $\mu_{m1} = -12 - j0.00001$ katsayıları kullanılmıştır. Bu katsayılar ortamların bağıl manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabitleridir. D_3 ve M_1 malzemesinin empedansının genliği sabit olmakta ve frekanstan bağımsızdır. D_3 ve

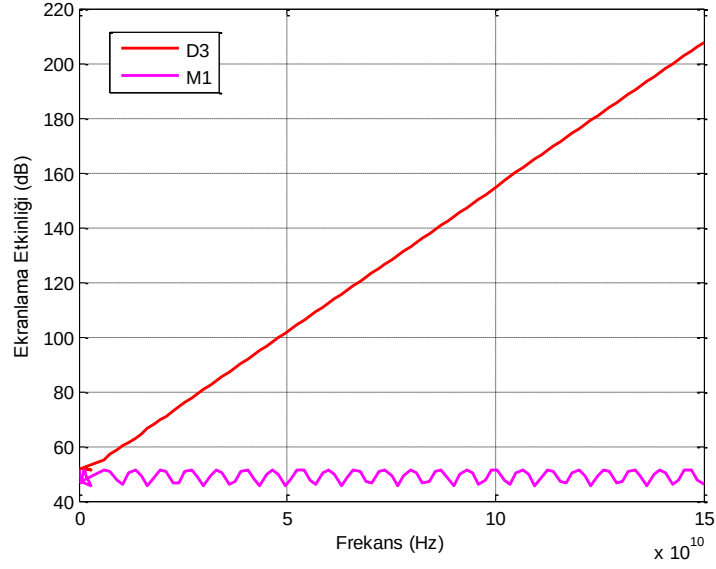
M₁ malzemelerin empedans genliği sırasıyla 178 ve 185 ohm değerlerine eşittir. Ekranlama etkinliği analizinde çalışma frekans aralığı 0-15x10¹⁰ Hz kullanılmıştır.

4.3.1. Tek Katmanlı Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği

şekil 4.28'ta D₃ veya M₁ malzemelerinden oluşan tek katmanlı yapılar için katman kalınlığı değiştirilerek (sırasıyla d₁=0.001m, d₂=0.005m) ekranlama etkinliği elde edilmiştir. Hesaplamalar yüzeye dik gelen düzlem elektromanyetik dalga için yapılmıştır ($\theta_g=0^0$). Dielektrik malzemenin ekranlama performansı katman kalınlığı ile doğru orantılı olmasına rağmen metamatzeme için bu durum geçerli olmamaktadır.



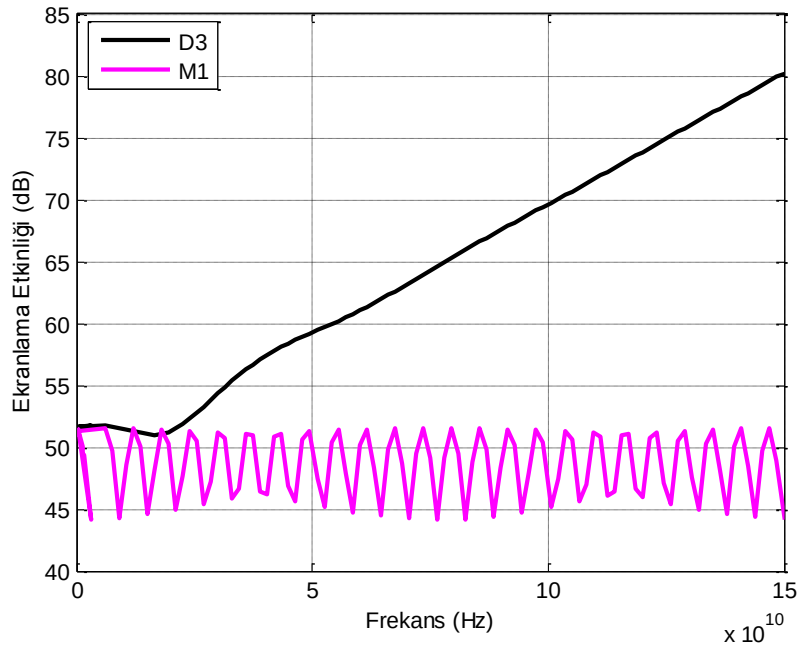
(a)



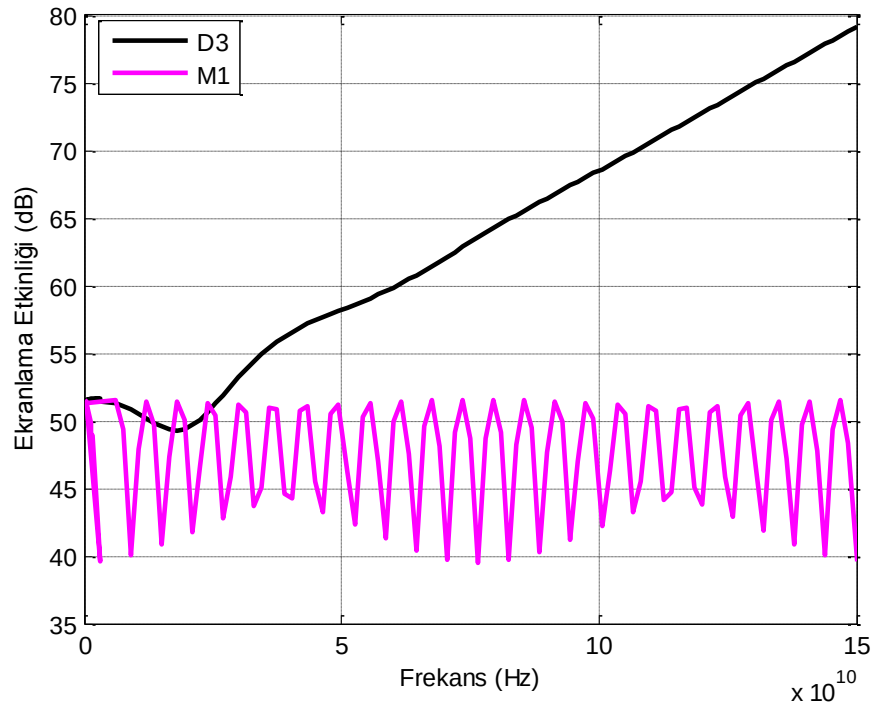
(b)

Şekil 4-28 Dielektrik-Metamalzemelerin ekranlama etkinliği; (a) $d_1=0.001\text{m}$ (b) $d_2=0.005\text{m}$

Şekil 4.29’da D_3 ve M_1 dielektrik ve metamalzemelerin ekranlama etkinliği katman kalınlığı sabit tutularak ($d_1=0.001\text{m}$) dikey polarizasyonda θ_g parametresi değiştirilerek hesaplanmıştır. θ_g açısı arttıkça ekranlama etkinliğinin düştüğü görülmektedir.



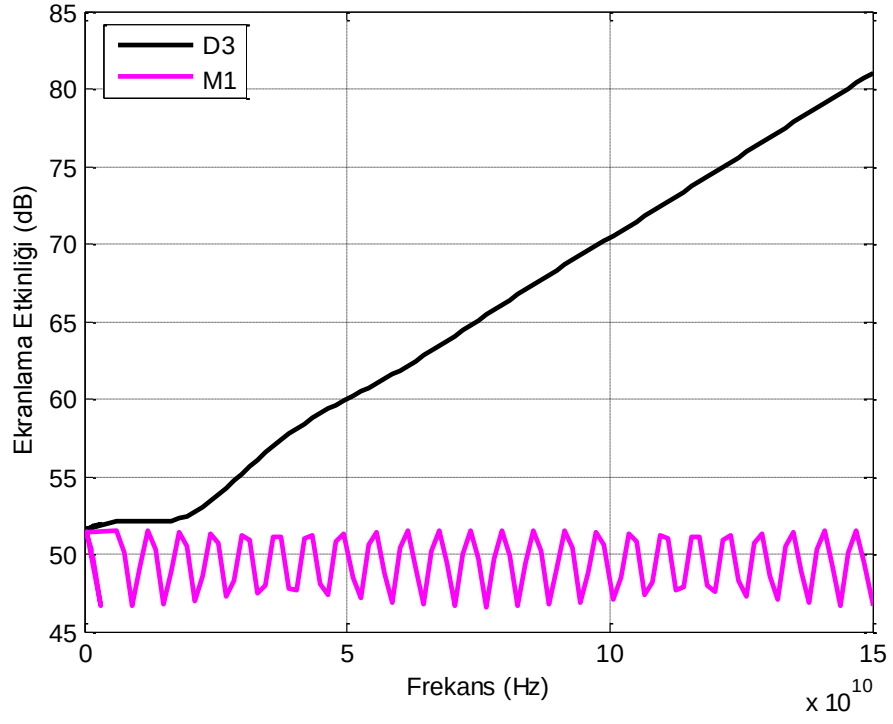
(a)



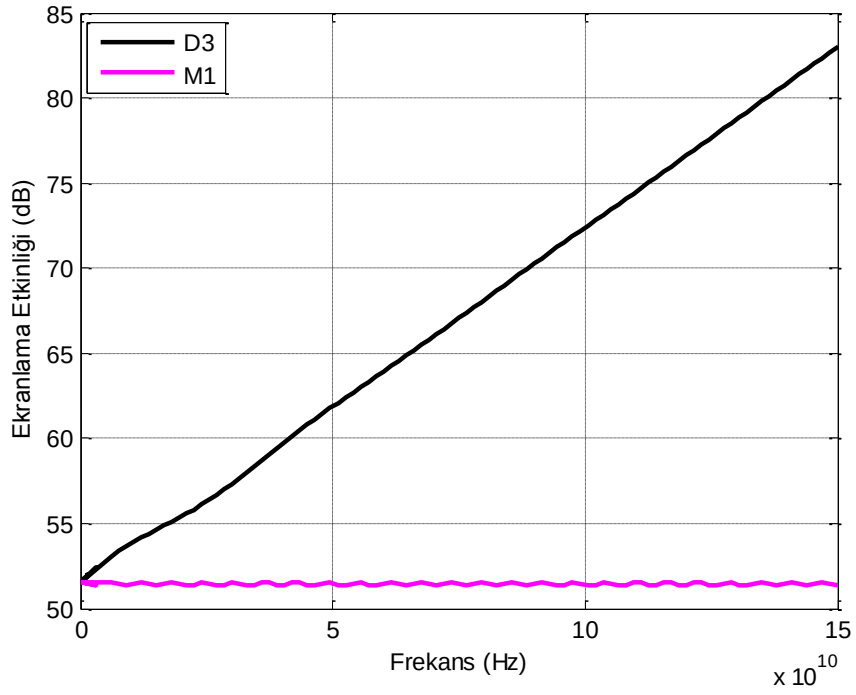
(b)

Şekil 4-29 Dielektrik ve metamateryallerin ekranlama etkinliği ; (a) Dikey polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Dikey polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$

Şekil 4.30'de D_3 ve M_1 dielektrik ve metamateryallerinin ekranlama etkinliği katman kalınlığı sabit tutularak ($d_1=0.001\text{m}$) yatay polarizasyonda θ_g parametresi değiştirilerek hesaplanmıştır. Şekil 4.29 ile kıyaslandığında tam tersi durum geçerli olup açılma parametresi arttıkça ekranlama etkinliği artmaktadır.



(a)

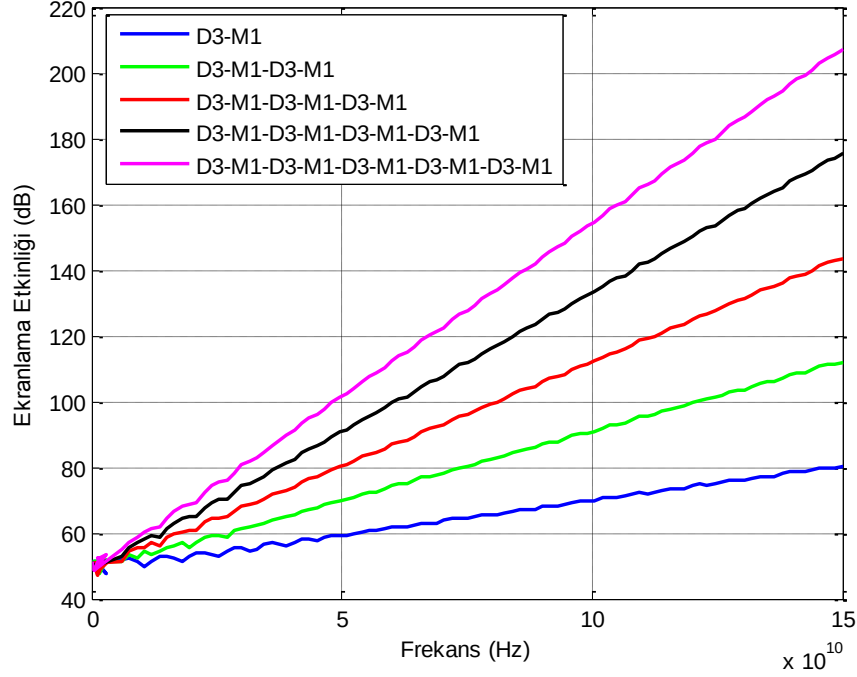


(b)

Şekil 4-30 Dielektrik malzemelerin ekranlama etkinliği; (a) Yatay polarizasyon, $\theta_g=30^\circ$, (b) Yatay polarizasyon, $\theta_g=60^\circ$

4.3.2. Periyodik Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği

Dielektrik ve metalmalzemeler Şekil 4.7 ve 4.15'te verilen modele göre dizilerek çok katmanlı yapılar oluşturulmuş ve bu yapıların ekranlama performansları incelenmiştir.



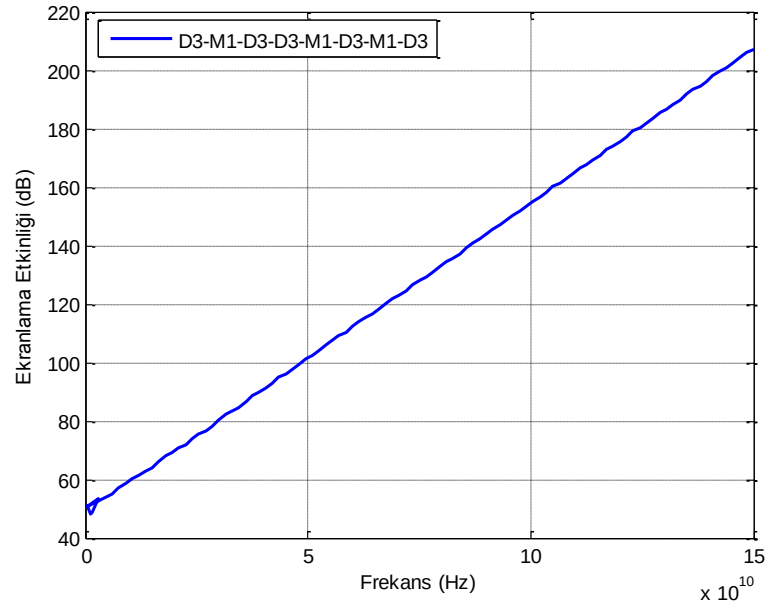
Şekil 4-31 Dielektrik-Metalmalzeme ile $(AB)^1$, $(AB)^2$, $(AB)^3$, $(AB)^4$ ve $(AB)^5$ şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

Şekil 4.31'de $(AB)^1$, $(AB)^2$, $(AB)^3$, $(AB)^4$ ve $(AB)^5$ şeklinde modellenen ve D_3 ve M_1 dielektrik ve metalmalzemelerin birleşimlerinden oluşan yapılar için elektromanyetik dalganın dik geldiği durumda ($\theta_g=0^\circ$) ekranlama etkinliği değerleri gösterilmektedir. D_3 ve M_1 malzemelerinin katman kalınlığı birbirine eşit olup 0.001m uzunluğundadır. Katman sayısı arttıkça ekranlama performansı da artmaktadır. Dielektrik ve metalmalzemeli çok katmanlı yapılar dielektrik malzemelerinden oluşan çok katmanlı yapılara göre daha yüksek ekranlama performansı sağlamaktadır. Şekil 4.16 ile kıyaslandığında bu durum açıkça görülmektedir.

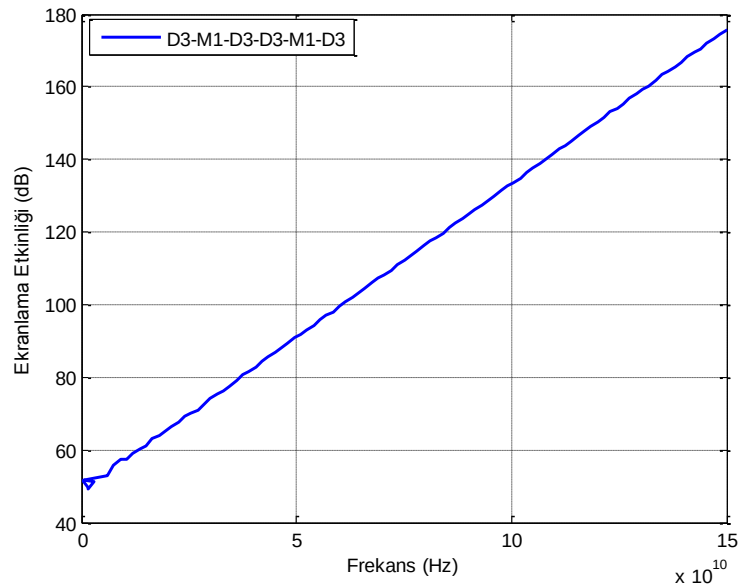
4.3.3. Fibonacci Serisi Şeklinde Modellenen Yapılar İçin Ekranlama Etkinliği

Şekil 4.17'de verilen modele göre D_3 ve M_1 dielektrik ve metalmalzemelerinden oluşan çok katmanlı yapı için ekranlama etkinliği değerleri Şekil 4.32'de verilmektedir. Her bir katmanın kalınlığı aynı ve 0.001m değerine eşittir.

Elektromanyetik dalganın dik geldiği durum için analiz gerçekleştirilmiştir. Periyodik yapılar ile kıyaslandığında katman kalınlıkları aynı olmasına rağmen ekranlama etkinliği performansı daha yüksek elde edilmiştir. Şekil 4.18'te verilen ve dielektrik malzemelerden oluşan yapıya göre ekranlama performansı daha yüksek elde edilmiştir.



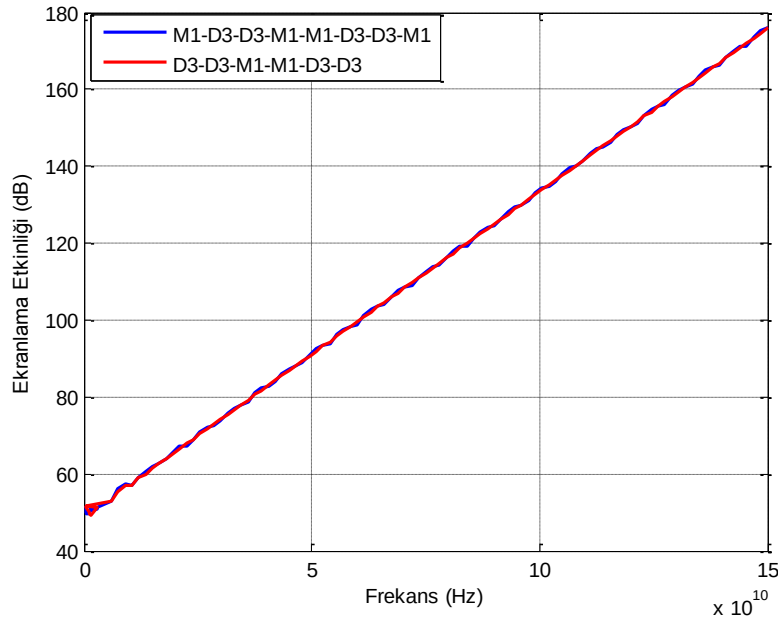
Şekil 4-32 Dielektrik-Metamalzeme ile ABAABABA şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği



Şekil 4-33 Dielektrik-Metamalzeme ile ABAABA şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

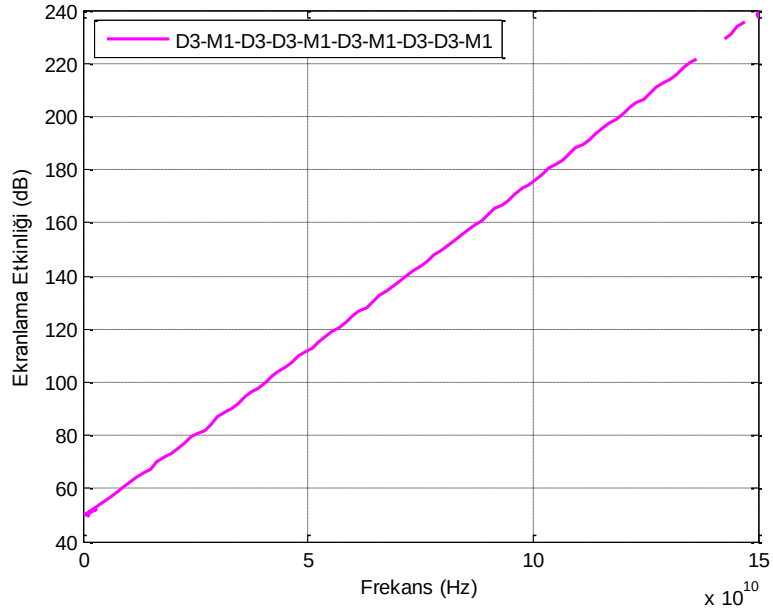
Şekil 4.19’da verilen modele göre D3 ve M1 dielektrik ve metamateryallerinden oluşan çok katmanlı yapı için ekranlama etkinliği Şekil 4.33’te elde edilmiştir. Her bir katmanın kalınlığı aynı ve 0.001m değerine eşittir. Elektromanyetik dalganın dik geldiği durum için analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.16, 4.20 ve 4.22 ile kıyaslandığında katman kalınlıkları aynı olmasına rağmen ekranlama etkinliği performansı daha yüksek elde edilmiştir.

Şekil 4.21’de verilen modele göre D3 ve M1 dielektrik ve metamateryallerinden oluşan çok katmanlı yapı için ekranlama etkinliği Şekil 4. 34’de elde edilmiştir. Her bir katmanın kalınlığı aynı ve 0.001m değerine eşittir. Elektromanyetik dalganın dik geldiği durum için inceleme gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.16, 4.22 ve 4.26 ile kıyaslandığında katman kalınlıkları aynı olmasına rağmen D3 malzemesinin yutma kaybının fazla olmasından dolayı ekranlama etkinliği performansı daha yüksek elde edilmiştir.



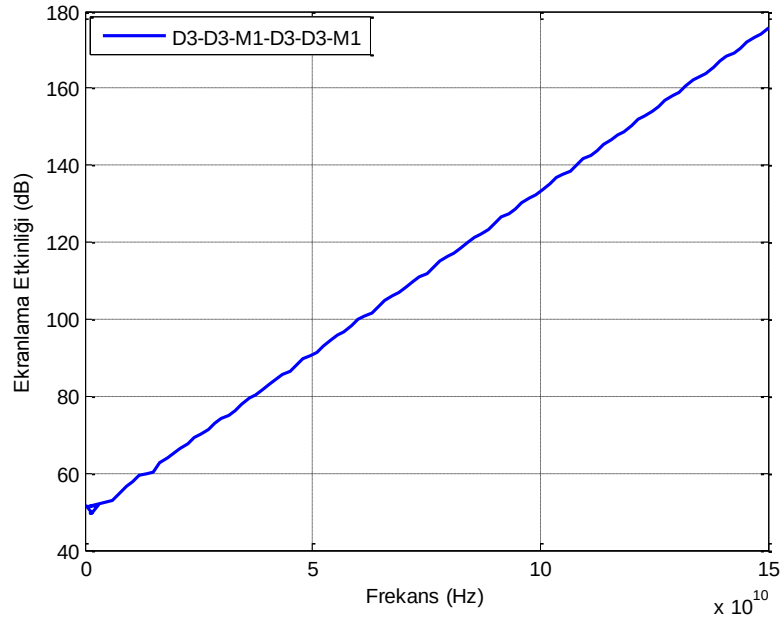
Şekil 4-34 Dielektrik-Metamateryale ile BAABBAAB ve AABBAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

Şekil 4.23’de verilen kurala göre oluşturulmuş çok katmanlı yapının ekranlama etkinliği Şekil 4.35’te elde edilmiştir. D₃ ve M₁ malzemeleri ile oluşturulan altı ve sekiz katmanlı yapıların ekranlama etkinliği yaklaşık aynı bulunmuştur. Şekil 4.16 ve 4.24 ile kıyaslandığında ekranlama performansında artış görülmektedir.



Şekil 4-35 Dielektrik-Metamalzeme ile ABAAB ABAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

Şekil 4.25’de verilen kurala göre oluşturulmuş yapının ekranlama etkinliği Şekil 36’de elde edilmiştir. D₃ ve M₁ malzemeleri ile oluşturulan altı katmanlı yapının ekranlama etkinliği Şekil 4.16 ve 4.26 ile kıyaslandığında ekranlama performansında artış görülmektedir.



Şekil 4-36 Dielektrik-Metamalzeme ile AABAAB şeklinde modellenen yapıların ekranlama etkinliği

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında iyi iletken, dielektrik ve metamateryaller kullanılarak farklı dizilimlerle oluşturulan katmanlı yapılar modellenmiş, ekranlama etkinliğinin analizinde düzgün olmayan iletim hattı teorisi kullanılmıştır. Bu teori yardımıyla birbirini tekrarlayan yapıda eşitlikler kullanılarak katmanlı yapılar için ekranlama etkinliği hesaplamaları yapılmıştır. Ayrıca bu teori ekranlama etkinliği hesabında parametresel çalışmaya olanak sağlamış, aynı zamanda ekranlama etkinliği hesabı işlemlerinde de kolaylık sağlamıştır.

Tek katmanlı yapılar için malzeme türü, katman kalınlığı, polarizasyon ve elektromanyetik dalganın geliş açısı parametreleri değiştirilerek ekranlama etkinliğine etkisi incelenmiştir. İyi iletken ve dielektrik malzemelerden oluşan yapılarda katman kalınlığı ve yatay polarizasyonda geliş açısı değeri arttıkça ekranlama performansında artış olduğu gözlemlenmiştir. Metamateryalin ekranlama etkinliğinin, dielektrik ve iyi iletken malzemelerden farklı olarak malzeme özelliklerinden dolayı belli bir yutma kaybı etrafında salınım yaptığı gözlemlenmiştir. İyi iletken malzemelerin ekranlama etkinliği değeri dielektrik ve metamateryallere göre çok daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Çok katmanlı yapılarda malzeme türünün, diziliş sırasının ve kalınlığın ekranlama etkinliğine etkisi de araştırılmıştır. Bu amaçla iyi iletken malzemelerin oluşturduğu periyodik dizilişli yapılar modellenmiştir. Dielektrik-metamateryale ve dielektrik-dielektrik malzemeli çok katmanlı yapılar içinde periyodik ve Fibonacci serisi şeklinde dizilişli yapılar modellenmiştir. Aynı katman kalınlığına ve diziliş sırasına sahip çok katmanlı yapı modellerinde, yutma ve yansıma kayıplarının değişmemesinden ötürü ekranlama etkinliği değişiklik göstermemektedir. Bu nedenle katman kalınlığının sabit kaldığı durumlarda ekranlama etkinliği çok katmanlı yapılarda diziliş sırasından bağımsız hale gelmektedir. Çok katmanlı yapı modelini oluşturan malzemelerin aynı olduğu (tek materyalin değiştiği durum), malzemelerin kalınlığının değişmediği ve değişen materyalin yutma kaybının aynı olduğu durumlarda ekranlama etkinliğini katmanlar arası yansıma kaybı belirlemektedir. Komşu katmanları ile empedansları uyumlu olan çok katmanlı yapıların ekranlama etkinliği daha düşük elde edilmiştir.

Şekil 4.8 (a) ve (b) grafikleri kıyaslandığında, aynı malzemelerden aynı diziliş sırasında olan çok katmanlı yapılarda katman kalınlığı %60 azaldığında ve katman sayısı iki katına çıktığında, ekranlama etkinliğinin ortalama 25 dB seviyesinde arttığı görülmektedir. Ekranlama etkinliğinin ve ağırlık parametrelerinin kritik olduğu uygulamalarda katman sayısının artırılmasının avantaj sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Dielektrik-dielektrik malzemelerin oluşturduğu yapıların dielektrik-metamalzemelerden oluşan yapılara göre ekranlama etkinliği performansı daha düşük olarak gözlemlenmiştir. Dielektrik-dielektrik ve dielektrik-metamalzeme tasarımı çok katmanlı yapılarda, farklı Fibonacci serisi şeklinde dizilen modellerin periyodik olarak dizilen çok katmanlı modellere göre ekranlama performansı daha fazla olmaktadır. Katman kalınlıkları ve malzemeler aynı olmasına rağmen Fibonacci serisi şeklinde dizilen dielektrik ve metamalzemeler daha yüksek ekranlama etkinliği sağlamaktadır.

İlerleyen dönem çalışmalarında farklı tür malzemeler ve bu malzemelerin farklı birleşimleri ile oluşturulan farklı kalınlıklardaki modeller için ekranlama etkinliği analiz çalışmaları gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bağıcı, H. A., Yılmaz, J.M., Jin, E., Michielssen Fast and Rigorous Analysis of EMC/EMI Phenomena of Electrically Large and Complex Cable-Loaded Structures, *IEEE*, **2007**.
- [2] Öztürk. M.B., EMI ve EMC, www.emo.org.tr/ekler/418dfee21acdadbek.pdf (Mart, **2015**).
- [3] Üstüner, F., Elektromanyetik Girişim ve uyumluluk, www.eee.metu.edu.tr/~design/lib/exe/fetch.php?media=lecture_notes:emi_emc_2011.pdf (Mart, **2015**).
- [4] Paul, R.C., *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Second Edition, John Wiley&Sons , New Jersey, **2006**.
- [5] MIL-STD-461F, *Department of Defense Interface Standart, Requirements for the Control of Electromagnetics Interference Characteristics of Subsystems and Equipment*, Department of Defense USA, **2007**.
- [6] Kılıç, G. H., Örtlek, Ö., Saraçoğlu Elektromanyetik Radyasyona Karşı Koruyucu Tekstillerin Ekranlama Etkinliği (SE) Ölçüm Yöntemleri, *The Journal of Textiles and Engineer*, **2015**.
- [7] Joyce, H. J., Scholvin, J., Alemo and K., Jenkins A Faraday Cage Isolation Structure for Substrate Crosstalk Suppression, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 1, No.10, **2001**.
- [8] Wikipedia., Faraday Kafesi, https://tr.wikipedia.org/wiki/Faraday_kafesi (Eylül, **2015**).
- [9] Sarkar, K. T., Palma, S. M., Sengupta, L. D., James Clerk Maxwell: The Founder of Electrical Engineering, *IEEE Telecommunications Conference (HISTELCON)*, **2010**.
- [10] Pozar, M. D., *Microwave Engineering*, Third Edition, John Wiley&Sons, USA, **2005**.
- [11] Cheng, C. J., Tsen, Y., Lin, C., Fu, C., Liao, K., and Wu., T., Transmission-Line Based Modeling for Conformal Shielding in Advance System-in-Package, *IEEE Electromagnetic Compatibility*, **2015**.
- [12] Ferreira, D. B., Planar Multilayer Structure Analysis: an Educational Approach, *Journal of Microwaves Optoelectronics and Electromagnetics Applications*, Vol.11, No.1, **2004**
- [13] Oraizi, H., Abdolali, A., Several Theorems for Reflection and Transmission Coefficients of Plane Wave Incidence on Planar Multilayer Metamaterial Structure, *IET Microwaves, Antennas&Propagation*, Vol. 4, pp. 1870-1879, **2010**.
- [14] Raj, C. D., Rao, P. H., Saradhi, D. V., Development of Multilayer Conductor Electromagnetic Shield for Optimum Shielding Performance, *International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology*, 25-26 Şubat, India, **2011**.

- [15] Raj, C. D., Rao, P. H., Saradhi, D. V., Rao, P. H., Sekhar, P. C., Optimazation of Layer Thickness to Yield Predetermined Shield Performance of Multilayer Conductor Electromagnetic Shield, *International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies*, **2011**.
- [16] Benhamou, S. M., Hamouni, M., Khaldi, S., Theoretical Approach of Electromagnetic Shielding of Multilayer Conductive Sheets, *Progress in Electromagnetic Research*, Vol. 41, pp. 167-175, **2015**.
- [17] Sevgi, L., Electromagnetic Screening and Shielding-Effectiveness (SE) Modeling, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 51, No.1, **2009**.
- [18] Shi, D., Shen, Y., Gao, Y., Shielding Effectiveness Formulation Based on Nonuniform Transmission Line Theory and Its Applications, *International Union of Radio Science*, **2009**.
- [19] Hoang, N. N., Miane, J.J., Workkiewicz, J.L., Modeling of Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multilayer Conducting Composites in the Microwave Band, *IEEE Communications and Electronics*, **2006**.
- [20] Raj, C. D., Rao, G.S., Estimation of Reflectivity and Shielding Effectiveness of Three Layered Laminate Electromagnetic Shield at X-Band, *Progress In Electromagnetic Research B*, Vol. 20, 205-223, **2010**.
- [21] Hamouni, M., Ansri, A., Khaldi, S., Reflection and Absorption Contribution to the Multilayers Electromagnetic Shielding Effectiveness, *Plastic and Ploymer Technology (PAPT)*, Vol. 3, **2014**.
- [22] Tosun, P. D., Ozen, S., Helhel, S., Shielding Effectiveness of Plasma Coated Multi-Layered Shield, *Progress In Electromagnetic Research Symposiom Proceedings*, 12-15 Ağustos, Stockholm, Sweden, **2013**.
- [23] Lee, C. Y., Song, H.G., Jang, K.S., Oh, E.J., Epstein, A.J.,Joo, J., Electromagnetic Interference Shielding Efficacy of Polyaniline Mixtures and Multilayer Films, *Synthetic Metals*, Vol. 102, 1346-1349, **1999**.
- [24] Mehdi pour, A., Trueman, C.W., Sebak, A.R., Rosca, I.D., Hoa, S.V., Shielding Effectiveness Analysis of Multilayer Carbon Fiber Composite Materials, *International Union of Radio Science*, **2008**.
- [25] Faulis, P., Rizza, C., Ciattoni A., Palange. E., Orlandi, A., Dynamically Reconfigurable Metamaterials for Shielding and Absorption in the Ghz Range, *IEEE Electromagnetic Compatibility*, **2015**.
- [26] Jaksic, Z., Dalarsson, N., Maksimović, M., Negative Refractive Index Metamaterials: Principles and Applications, *Microwave Review*, **2006**.
- [27] Maksimović, M., Jaksic, Z., Fibonacci-Type Quasi-Periodic Nanocomposite Filters Containing Negative Index Materials for Emittance Tailoring, *Proc. 1st International Workshop on Nanoscience&Nanotechnology IWON*, 15-18 Eylül, Belgrade, Serbia and Montenegro, **2005**.

- [28] Yang, H., Xiao, T., Cheng Y., Li. M., Xiao, B., Zhang, G., EM Scattering by Conductor Plate Coated with Multilayered Medium Having Metamaterials, *IEEE Microwave and Millimeter Wave Technology* , **2010**.
- [29] Liu, T., Cao, X., Gao, J., Zheng, Q., Li, W., Yang, H., RCS Reduction of Waveguide Slot Antenna With Metamaterial Absorber, *IEEE Antennas and Propagation, IEEE Transactions*, Vol. 61, No.3, **2013**.
- [30] Orfanidis, J. S., *Electromagnetic Wave and Antennas*, Rutgers University, **2002**.
- [31] Kadlec, R., Kroutilova, E., Fiala., P., Radar Multiple Reflection From Layered Media, *Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Vol. 7, No.7 China , **2011**.
- [32] Cheng, K. D., *Field and Wave Electromagnetics*, Second Edition, Addison- Wesley, Canada, **1983**.
- [33] Balanis, C. A., *Advanced Engineering Electromagnetics*, Second Edition, John Wiley&Sons, New York, **1989**.
- [34] Vinoy, K. J., Jha M., *Radar Absorbing Materials From Theory to Design and Characterization*, Kluwer Academic Publishers, Boston, **1996**.
- [35] Yılmaz, R., *Elektromanyetik Kalkanlama Özelliği Olan Malzemeler, Electronic Journal of Vocational Colleges*, **2014**.
- [36] Celozzi, S., Araneo R., Lovat G., *Electromagnetic Shielding*, John Wiley&Sons , New Jersey, **2008**.
- [37] Saka, B., *Elektromanyetik Uyumluluk Ders Notları*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, **2014**.
- [38] Junfa, M., Zhengfan, L., Analysis of the Time Response of Noneuniform Multiconductor Transmission Lines With a Method of Equivalent Cascaded Network Chain, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 40, 948-954, **1992**.
- [39] Dan, S., Yougang G., Yuanmao, S., Determination of Shielding Effectiveness of Multilayer Shield by Making Use of Transmission Line Theory, *IEEE Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*, **2007**.
- [40] Rhodes, R., Moeller T., Keefer, D., Electrical Conductivity Measurements via a Low-Voltage Conductivity Channel, *IEEE Plasma Science*, Vol. 40, 972-979, **2012**.
- [41] Engheta, N., Ziolkowski, R., *Metamaterials Physics and Engineering Explorations*, Second Edition, John Wiley&Sons, USA, **2006**.
- [42] Yang, H., Xiao, T., Cheng Y., Li. M., Xiao, B., Zhang, G., EM Scattering by Conductor Plate Coated with Multilayered Medium Having Metamaterials, *IEEE Microwave and Millimeter Wave Technology*, **2010**.

- [43] Caloz, C., Itoh, T., Transmission Line Approach of Left-Handed (LH) Materials and Microstrip Implementation of an Artificial LH Transmission Line, *IEEE Antennas and Propagation*, Vol. 52, 1159-1166, **2004**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Ömer KOŞAN
Doğum Yeri : Kırıkkale
Medeni Hal : Evli
E-posta : omerkosan@aselsan.com.tr
Adresi : ASELSAN A.Ş. Gölbaşı Yerleşkesi

Eğitim

Lisans : İTÜ Elektronik Mühendisliği, İstanbul (2010)
İTÜ Elektrik Mühendisliği, İstanbul (2010)
(Çift Anadal Programı)

Yüksek Lisans : --

Doktora : --

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İleri

İş Deneyimi

Ziraat Teknoloji, İstanbul, Network Mühendisi (2010-2011)

Aselsan, Ankara, Güç Sistemleri Tasarım Mühendisi, (2011-2015)

Deneyim Alanları

Haberleşme Sistemleri, Güç Elektroniği, Elektromanyetik

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

--

Tezden Üretilmiş Yayınlar

--

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

--