



**ELEKTROMANYETİK UYUMLULUKTA ÇEŞİTLİ AÇIKLIKLARA
SAHİP KAPALI METALİK KUTULARIN ELEKTRİK ALAN
EKRANLAMA ETKİNLİĞİNİN TAHMİNİ**

Hüseyin ÇOPUR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2019

Hüseyin ÇOPUR tarafından hazırlanan “ELEKTROMANYETİK UYUMLULUKTA ÇEŞİTLİ AÇIKLIKLARA SAHİP KAPALI METALİK KUTULARIN ELEKTRİK ALAN EKSPANLAMA ETKİNLİĞİNİN TAHMİNİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Erkan AFACAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, TED Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Nursel AKÇAM

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 18 / 02 / 2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hüseyin ÇOPUR

18 / 02 / 2019

ELEKTROMANYETİK UYUMLULUKTA
ÇEŞİTLİ AÇIKLIKLARA SAHİP KAPALI METALİK KUTULARIN
ELEKTRİK ALAN EKLANLAMA ETKİNLİĞİNİN TAHMİNİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Hüseyin ÇOPUR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2019

ÖZET

Ekranlama, elektrik ve elektronik sistemleri elektromanyetik kirlilikten korumak için kullanılan uygulamalardan birisidir. Ekranlama, ideal bir şekilde yapıldığı zaman, elektrik ve elektronik sistemleri çevredeki elektromanyetik kirlilikten koruduğu gibi bu sistemlerden kaynaklanan elektromanyetik kirliliğin de dış ortama yayılmasını engeller. Havalandırma, kablo giriş/çıkışı gibi zorunlu etkenlerden dolayı bir ekran üzerinde delikler açıldığında ekranın ekranlama performansı düşer. Ekran tasarımı yapılırken açıklıkların türüne ve sayısına dikkat edilmelidir. Bu tez çalışmasında çeşitli sayıda ve geometride açıklıklara sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan ekranlama etkinliği performansları 0,001 – 2 GHz arasında incelenmiştir. Hesaplamalar için iletim hattı yöntemi ve CST Microwave Studio programı kullanılmıştır.

Bilim Kodu : 90516

Anahtar Kelimeler : Elektromanyetik uyumluluk, ekranlama etkinliği

Sayfa Adedi : 54

Danışman : Prof. Dr. Erkan AFACAN

THE INVESTIGATION OF ELECTRIC FIELD SHIELDING EFFECTIVENESS OF
METALLIC ENCLOSURES WITH VARIOUS APERTURES AT
ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

(M. Sc. Thesis)

Hüseyin ÇOPUR

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2019

ABSTRACT

The shielding is one of the methods used for protecting electrical and electronics systems from electromagnetic pollution. When shielding is realized in an ideal manner, not only it protects the electrical and electronics systems from environmental electromagnetic pollution, but it also prevents the emission of electromagnetic pollution that is caused by these systems to the outside environment. The shielding performance of a screen decreases when holes on the screen are opened due to compulsory factors such as ventilation, cable entry/exits etc. During the design of the screen, the types and numbers of apertures must be taken into account. In this thesis, electric field shielding effectiveness performances of metallic enclosures with various numbers and geometry of apertures are investigated between the frequencies 0,001 – 2 GHz. Transmission line method and CST Microwave Studio program are used in the calculations.

Science Code : 90516

Key Words : Electromagnetic compatibility, shielding effectiveness

Page Number : 54

Supervisor : Prof. Dr. Erkan AFACAN

TEŐEKKÖR

Tez alıřmama katkılarından dolayı danıřmanım Prof. Dr. Erkan AFACAN'a teőekkür ederim. Tez projemi destekleyerek her tűrlű imkânlarından yararlanma fırsatı sunan TŪBİTAK SAGE'ye teőekkür ederim. Her zaman yanımda olan ve her kořulda desteklerini benden esirgemeyen deęerli aileme teőekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Elektromanyetik Girişim Nedir?	3
2.1.1. Elektromanyetik girişimin tarihçesi	3
2.1.2. Elektromanyetik girişimin unsurları.....	5
2.1.3. Elektromanyetik girişim yayılım çeşitleri	5
2.1.4. Elektromanyetik girişim kaynakları	6
2.2. Elektromanyetik Uyumluluk Nedir?	8
2.3. Temel Kavramlar	9
2.3.1. Elektrik ve manyetik alan.....	9
2.3.2. Maxwell Denklemleri.....	11
2.3.3. Genel dalga denklemleri.....	14
2.3.4. Düzlemsel dalgalar	15
2.3.4.1. Kayıpsız ortamda ($\sigma = 0$) düzlemsel dalgalar.....	17
2.3.4.2. İyi dielektrik ortamda (düşük kayıplı) düzlemsel dalgalar	18
2.3.4.3. İyi iletken ortamda düzlemsel dalgalar.....	19

	Sayfa
2.3.5. Yakın alan ve uzak alan.....	20
2.4. Ekranlama.....	22
2.4.1. Yansıma kayıpları (reflection losses)	24
2.4.1.1. Uzak alan bölgesinde yansıma kaybı.....	24
2.4.1.2. Yakın alan bölgesinde yansıma kaybı	25
2.4.2. Soğrulma kayıpları (absorption losses)	26
2.4.3. Çoklu yansıma kayıpları (multiple reflection loss)	27
2.4.4. Toplam ekranlama etkinliği ifadeleri	27
3. TEORİK YÖMTEMLER VE ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	29
3.1. Teorik Çözüm.....	29
3.1.1. Açıklıkların empedansı.....	31
3.1.2. Elektrik alan ve manyetik alan ekranlama etkinliği	32
3.1.3. Formülleri Genişletilmesi.....	33
3.2. Açıklık Geometrisi	34
3.3. Açıklık Sayısı	38
3.4. Açıklıkların Yükseklik / Genişlik Oranı	42
3.5. Ölçüm Sonuçları.....	44
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	53

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. EMU Test Kategorileri.....	9
Çizelge 2.2. Genel formda Maxwell Denklemleri	11
Çizelge 2.3. Harmonik alanlar için Maxwell Denklemleri	12
Çizelge 2.4. Bazı malzemelerin iletkenlik ve manyetik geçirgenlik sabitleri.....	13
Çizelge 2.5. Çeşitli malzemelerin deri kalınlığı.....	20
Çizelge 2.6. Ekranlama etkinliği ifadeleri	27
Çizelge 3.1. Kutuların rezonans frekansı değerleri.....	39
Çizelge 3.2. Açıklıkların yükseklik / genişlik oranına göre konfigürasyon türleri.....	42
Çizelge 3.3. Kutuların rezonans frekansı değerleri.....	43
Çizelge 3.4. Kutunun rezonans frekansı değerleri	46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. EMG unsurları	5
Şekil 2.2. EMG yayılım çeşitleri.....	6
Şekil 2.3. EMU test kategorileri	9
Şekil 2.4. Elektromanyetik alanlar	10
Şekil 2.5. Homojen bir düzlem dalganın gösterimi	17
Şekil 2.6. EM radyasyon kaynağı ve girişim alanları	20
Şekil 2.7. Kaynaktan uzaklığa bağlı olarak elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri ile dalga empedansının değişim	21
Şekil 2.8. Metal ekran modeli	22
Şekil 2.9. Ekranlama etkinliği tanımı	23
Şekil 2.10. Düzlemsel dalganın ekranlama etkinliği	28
Şekil 3.1. Üzerinde 1 tane açıklık bulunan kapalı metalik kutu	30
Şekil 3.2. Üzerinde 1 tane açıklık bulunan kapalı metalik kutunun eşdeğer devre modeli.....	30
Şekil 3.3. Birinci uygulamada açıklık geometrilerinin gösterimi	36
Şekil 3.4. Birinci uygulama için kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST).....	36
Şekil 3.5. İkinci uygulamada açıklık geometrilerinin gösterimi.....	37
Şekil 3.6. İkinci uygulama için kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST).....	37
Şekil 3.7. Kare (sol) ve daire (sağ) açıklıklara sahip kapalı metalik kutular (CST).....	39
Şekil 3.8. Farklı sayıda kare açıklığa sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (TLM).....	40
Şekil 3.9. Farklı sayıda kare açıklığa sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST).....	40

Şekil	Sayfa
Şekil 3.10. Farklı sayıda daire açıklığa sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (TLM).....	41
Şekil 3.11. Farklı sayıda daire açıklığa sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST).....	41
Şekil 3.12. TLM ve CST ile hesaplanan sonuçların karşılaştırılması.....	42
Şekil 3.13. w / l oranına göre kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (TLM).....	43
Şekil 3.14. w / l oranına göre kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST).....	44
Şekil 3.15. Test düzeneği.....	44
Şekil 3.16. Test cihazları.....	45
Şekil 3.17. Test ortamı.....	45
Şekil 3.18. Microstrip patch antenin S11 grafiği.....	46
Şekil 3.19. Belirleme yöntemine göre tek açıklığa sahip kapalı metalik kutunun elektrik alan EE değeri.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
B	Manyetik akı yoğunluğu
c	Işık hızı
C	Coulomb
D	Elektriksel akı yoğunluğu
dB	Desibel
E	Elektrik alan şiddeti
f	Frekans
F	Farad
G	Giga, 10^9
H	Manyetik alan şiddeti
Hz	Hertz
J	Joule
k	Kilo, 10^3
m	Metre
M	Mega, 10^6
Np	Neper
Q	Yük
p	Piko, 10^{-6}
rad	Radyan
s	saniye
S	Siemens
T	Tesla
v_p	Dalganın faz hızı
V	Volt
ϵ	Elektriksel geçirgenlik (permittivity)
μ	Manyetik geçirgenlik (permeability)

Simgeler**Açıklamalar**

σ	İletkenlik (conductivity)
γ	Yayıma sabiti
ω	Dalganın açısal frekansı
α	Zayıflama sabiti
β	Faz sabiti
λ	Dalga boyu
η	Ortam empedansı
δ	Deri kalınlığı
π	Pi sayısı
Ω	Ohm

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CE	Conducted Emission
CIPSR	International Spectral Committee on Radio Interference
CS	Conducted Susceptibility
EE	Ekranlama Etkinliği
EM	Elektromanyetik
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMD	Elektromanyetik Darbe
EMG	Elektromanyetik Girişim
EMI	Electromagnetic Interference
EMU	Elektromanyetik Uyumluluk
ESB	Elektrostatik Boşalma
FCC	Federal Communication Commission
IEC	International Electrotechnical Commission
RE	Raidated Emission
RFI	Radio Frequency Interference
RS	Radiated Susceptibility
SAGE	Savunma Sanayi Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü

Kısaltmalar**Açıklamalar****SE**

Shielding Effectiveness

TLM

Transmission Line Method

TÜBİTAK

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

TV

Televizyon

vd

ve diğer



1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar radyo, TV, cep telefonu ve anten gibi elektrik ve elektronik sistemlerin her alanda kullanılması insanoğlunun yaşantısını kolaylaştırmaya başlamıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte bu sistemlerin kullanım alanları ve sayıları da artmaya devam etmektedir. Bu sistemler çalıştıkları zaman etraflarına elektromanyetik alanlar yayarlar ve ortamda bir elektromanyetik alan kirliliği oluşur. Bu kirliliği önlemek için üretilip piyasaya sürülmeden önce sistemlerin elektromanyetik uyumluluk testlerinin yapılması ve testlerde belli bir seviyenin altında yayın yapmalarının sağlanması gerekmektedir. Ortamda doğal unsurlardan kaynaklı kirlilik durumlarında ise elektrik ve elektronik sistemler sorunsuz ve düzgün çalışmalıdır. Bunun için elektrik ve elektronik sistemleri ortamda var olan elektromanyetik kirlilikten korumak gerekir. Elektromanyetik kirlilikten dolayı sistemlerin çalışma performanslarındaki azalmaları önlemek için genelde 3 farklı yöntem izlenir. Bunlar; baskı devre kartlarının tasarımları, filtre devreleri ve ekranlamadır.

Bütün elektrik ve elektronik sistemlerin tasarımı yapılırken ekranlama mutlaka yapılmalıdır. Ekranlama, elektrik ve elektronik sistemlerin dış savunma hattıdır. Düzgün yapılan bir ekranlama uygulaması, elektrik ve elektronik sistemleri dışarıda var olan elektromanyetik kirlilikten koruduğu gibi bu sistemlerden kaynaklanan elektromanyetik kirliliğin de ortama yayılmasını engeller. Ekranlamanın bir diğer avantajı ise elektrik ve elektronik sistemlerde bulunan baskı devre kartlarını ve alt sistemleri toz, kum ve düşme sonucu oluşan darbeler gibi çevresel etmenlerden korumasıdır.

İdeal bir ekranlama uygulaması, üzerinde açıklık bulunmayan bir kapalı metalik kutu ile yapılır. Fakat sistemlerde bulunan havalandırma, monitör, tuş ve kablo giriş/çıkış yerlerinden dolayı kutu üzerinde açıklık bırakılması gerekmektedir. Bu durumda ise kapalı metalik kutunun ekranlama performansı düşmektedir. Bu sebepten dolayı kutu üzerinde mümkün olduğu kadar az açıklık bırakılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde elektromanyetik girişim, elektromanyetik uyumluluk, elektromanyetik alanlar, düzlemsel dalgalar ve ekranlama hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde kapalı metalik kutuların ekranlama etkinliği değerleri

incelenmiş ve teorik yöntem için literatürdeki formüller verilmiştir. Dördüncü bölümde ise elde edilen veriler karşılaştırılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

Bu tez çalışmasında ilk olarak; kapalı metalik kutular üzerinde bulunan üçgen, kare, beşgen, altıgen ve sekizgen açıklık geometrilerinin elektrik alan ekranlama etkinliği değerlerine olan etkisi CST programı kullanılarak 0 – 1 GHz frekansları arasında incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise açıklık sayısının kapalı metalik kutuların elektrik alan ekranlama etkinliğine olan etkisi 0 – 1 GHz frekansları arasında incelenmiştir. Hesaplamalar CST programı ve TLM ile yapılmıştır ve her iki yöntemle hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır.

Üçüncü kısımda 8 farklı yükseklik ve genişlik oranındaki açıklıklara sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan ekranlama etkinliği değerleri 0 – 2 GHz arasında incelenmiştir. Bu kısımda yapılan ölçümler ile teorik olarak hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır.

Son olarak ise tek açıklığa sahip kapalı metalik kutunun elektrik alan ekranlama etkinliği değeri test ölçümü yapılarak incelenmiştir. Bunun için TÜBİTAK SAGE'deki Elektromanyetik Uyumluluk Laboratuvarında bir test düzeneği kurulmuştur. Yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlar diğer yöntemlerde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Elektromanyetik Girişim Nedir?

Elektromanyetik Girişim (EMG) (Electromagnetic Interference, EMI), sistemlerin çalışmalarında istenmeyen durumlara sebep olabilecek kaynaklardan yayılan elektromanyetik enerjidir. Elektrik ile çalışan cihazların hepsi, antenler ve radarlar çevremizde olan EMG için potansiyel kaynak unsurudur. Ayrıca yıldırım, güneş ışınları, kozmik yayınlar, atmosferik olaylar ve elektrostatik boşalma (ESB) ise cihaz performanslarına etki eden doğal kaynaklardır. Günlük yaşantıda EMG örnekleri:

- Elektrik süpürgesi çalışırken TV'lerdeki bozulma
- Telefon çaldığı zaman hoparlörde cızırtı duyulması
- Polis telsizinin radyo frekansları ile karışması
- Yıldırım düşmesi sonucu evdeki cihazların bozulması
- Arabalarda bulunan ABS'lerin cep telefonu yayınlarından etkilenmesi

2.1.1. Elektromanyetik girişimin tarihçesi

EMG'nin tarihten günümüze gelişi aşağıda verildiği gibi olmuştur.

- Marconi'nin deneyleri ile (1800'lerin sonları) oluşan manyetik uyumluluk ve manyetik girişim terimleri, 1900'lerin başına gelindiğinde kablo yardımı ile Atlantik ötesi iletişim teknolojisinin önünü açtı.
- İlk teknik makaleler yayınlanmaya başlandı (1920'ler).
- Motorlar, demiryolları gibi sistem ve cihazlarda RFI (Radio Frequency Interference) önemli bir sorun haline gelmeye başladı (1930'lar).
- International Electrotechnical Commission (IEC) isimli komisyonun 1933 Paris'de yapılan toplantısında International Spectral Committee on Radio Interference (CISPR) oluşturularak EMG problemleri üzerinde çalışması konusunda tavsiye kararı alındı.
- II. Dünya Savaşı sırasında EMG önemli bir sorun haline geldi. Bu dönemlerde daha çok her sorun için ayrı ayrı çözüm aranmaya başlandı.
- CISPR 1946'da II. Dünya Savaşı sonrası yeniden yapılandırıldı.

- 1950'lerde transistörün, 1960'larda tümleşik devrelerin, 1970'lerde mikroişlemcilerin bulunuşu ve hızlı gelişimi sorunu daha çok ön plana çıkardı.
- Frekans bandı kalabalıklaştı ve frekans planlaması gereği ortaya çıktı.
- Sayısal işaret işleme uygulamalarının yaygınlaşması ve tümleşik devre teknolojisinin buna katkıları önemli bir elektromanyetik gürültü kaynağı yarattı. EMG problemleri hızla çoğaldı.
- ABD'de Federal Communication Commission (FCC) 1979'da elektronik cihazlardan kaynaklanan yayılıma ilişkin limitlerle ilgili standartlar yayınladı.
- Oluşan standartlar sonucunda bir elektronik ürünün pazarlanabilmesi açısından elektromanyetik uyumluluk çok önemli bir kriter haline geldi.
- Eğer bir ürün herhangi bir ülkenin Elektromanyetik Uyumluluk koşulunu sağlamıyorsa o ülkede satılamaz. Teknolojinin gelişimi sonucunda, elektronik cihaz/sistem tasarımında elektromanyetik uyumluluk, diğer bilindik tasarım kriterleri kadar önemli bir tasarım kriteri haline geldi [1].

Tarihte karşılaşılan EMG ile ilgili bazı örnekler aşağıda verilmiştir:

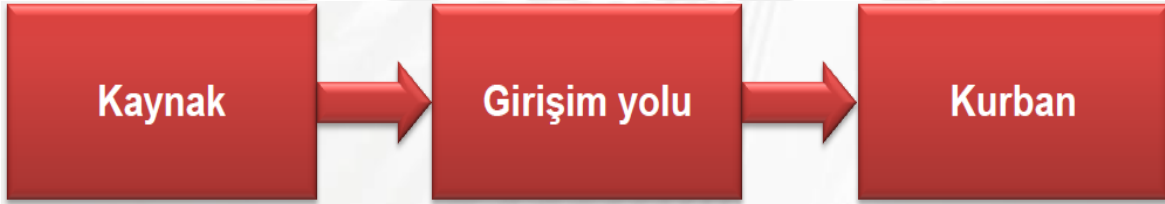
- Falkland Savaşı: İngiliz savaş gemisi HMS Sheffield, uydu haberleşme sisteminde girişime neden olduğu için füze uyarı radarını kapattı ve Arjantin'e ait Exocet füzesi tarafından batırıldı. Gemide bulunan 20 mürettebat hayatını kaybetti ve 26'sı yaralandı [2].
- 1980'li yıllarda ABD Kara Kuvvetlerine ait 5 adet Black Hawk UH-60 tipi helikopter, çevrede bulunan vericilerin uçuş kontrol sisteminde yol açtığı girişim sonucu kazaya uğradı ve bu kazalar sonucunda 22 kişi hayatını kaybetti.
- Pan American havayollarına ait bir B-707 uçağa 1963'te Philadelphia havalimanına iniş sırasında beklerken yıldırım çarptı. Uçağın sol kanadının ucunda yer alan yakıt deposundaki yakıt buharı ateşlendi ve uçak düştü. Olayda 81 kişi hayatını kaybetti [3].
- 1967 yılında USS Forrestal uçak gemisinin güvertesinde bulunan bir uçakta, harici güçten dâhili güce transfer sırasında oluşan geçici kabarma etkisi (surge) uçağa takılı roketin istem dışı ateşlenmesine yol açtı. Ateşlenen roketin diğer uçağa çarpması sonucu zincirleme patlamalar meydana geldi. Olayda 21 uçak kullanılamaz hale geldi ve 134 kişi hayatını kaybetti [4].

2.1.2. Elektromanyetik girişimin unsurları

EMG konusunda 3 unsur bulunur. Bunlar:

- Kurban (Victim/Receptor): Gürültüye maruz kalan ve girişimi alan unsur
- İletim (Coupling) Yolu: Kaynak ile kurban arasındaki gürültünün taşındığı yol
- Kaynak (Source): Gürültü kaynağı

EMG sorunlarına çözüm olarak 3 farklı yöntem izlenebilir. 1.si gürültü kaynağı tespit edilip uygun yöntemler kullanılarak ortadan kaldırılabilir. 2.si kurban girişime karşı daha dayanıklı hale getirilebilir. 3.sü ise kaynak ile kurban arasındaki girişim yolları uygun yöntemler kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Örneğin, iletkenlik yolu girişimde ferrit süzgeç kullanarak gürültüler engellenebilir. Işınım yolu girişimde ise ekranlama yöntemi kullanılarak gürültüler ortadan kaldırılabilir.



Şekil 2.1. EMG unsurları

2.1.3. Elektromanyetik girişim yayılım çeşitleri

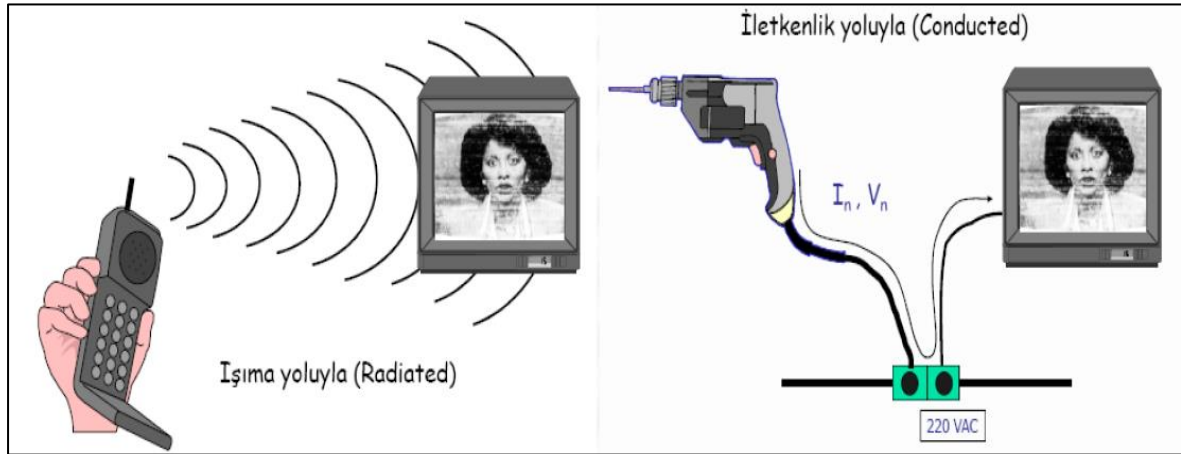
EMG'de ışınım yoluyla ve iletkenlik yoluyla olmak üzere iki tür yayılım yolu vardır.

1) Işınım Yoluyla Yayılım (Radiated Emission):

- İşaret hatları, toprak iletkenlikleri, işaret kabloları, anten sürücülerini vs. (düşük empedanslı yollar) üzerinden gider.
- Çoğunlukla 30 MHz'in üstündeki frekanslarda etkilidir. Çünkü 30 MHz altındaki frekanslarda ışınım çok az düzeydedir.
- Farksal (differential mode) veya ortak (common mode) moda olabilir.

2) İletkenlik Yoluyla Yayılım (Conducted Emission):

- İşaret hatları, toprak iletkenlikleri, işaret kabloları, anten sürücülerini vs. (düşük empedanslı yollar) üzerinden gider.
- Çoğunlukla 30 MHz altındaki frekanslarda etkilidir.
- Farksal (differential mode) veya ortak modda (common mode) olabilir.



Şekil 2.2. EMG yayılım çeşitleri

2.1.4. Elektromanyetik girişim kaynakları

Elektromanyetik girişim kaynakları gözden geçirildiği zaman küçük bir bölümü ön plana çıkmasına rağmen tüm elektromanyetik girişim kaynaklarının gözden geçirilmesi, bir elektromanyetik tehdit altında doğru soruların sorulmasına imkân verecektir. Her uygulamanın kendine has özellikleri olduğu için EMG kaynaklarını teşhis etmek kolay değildir. Birçok uygulamada benzer tehditler olmasına rağmen, tasarım ve işlevsellik faktörlerinden dolayı farklılıklar olabilmektedir.

EMG kaynakları çeşitli başlıklar altında sınıflandırılabilir. İlk olarak doğal girişim ve insan yapımı girişim kaynakları olarak ikiye ayrılabilir. Doğal girişim kaynağına örnek olarak yıldırım örneği verilebilir. İnsan yapımı girişim kaynaklarından biri ise radyo yayını yapan radyo vericileridir.

Girişim kaynakları dâhili ve harici olmak üzere de ikiye ayrılabilir. Enerji sistemlerinde açma-kapama işlemi ile meydana gelen girişim dâhili girişim kaynağıdır. Güneşten gelen

zararlı ışınlar ve uzayın derinliklerinden gelen kozmik ışınlar ise harici girişim kaynaklarına örnek verilebilir.

Son olarak girişim kaynakları bant genişliğine göre dar bant ve geniş bant olarak sınıflandırılabilir. Elektromanyetik girişim kaynakları sınıflandırılırken farklı etkenler de göz önünde bulundurulabilir. Fakat biz burada girişim kaynaklarını doğal ve insan yapımı elektromanyetik girişim kaynakları olmak üzere iki ana başlık altında inceleyeceğiz. Elektromanyetik girişim kaynaklarına örnekler aşağıda verilmiştir:

- Doğal Elektromanyetik Girişim Kaynakları

- Yıldırım
- Güneş
- Uzak Yıldızlar

- İnsan Yapımı Elektromanyetik Girişim Kaynakları

- Elektrik akımı taşıyan yeraltı ve yerüstü elektrik hatları
- TV ve bilgisayarlar
- Elektrikli ev aletleri
- Radyo ve TV vericileri
- Mikrodalga fırınlar
- Hüresel telefon sistemleri (GSM baz istasyonları)
- Elektrostatik Boşalma (ESB)
- Elektromanyetik Darbe (EMD)

Yıldırım, tüm elektromanyetik olaylar içerisinde en güçlü olanıdır. Yıldırım, basit olarak toprak ile elektrik yüklü bir bulut arasındaki elektrik boşalması olarak tanımlanabilir. Eğer bu elektrik boşalması iki bulut arasında gerçekleşirse şimşek meydana gelir. Yıldırım boşalması esnasında yer ve bulutlar arasındaki potansiyel farkı 100 MV ve yük değişimi 20 C düzeyine kadar çıkmaktadır. Elektrik fırtınaları esnasında, 10^{10} J mertebesindeki enerjiler söz konusudur. Yıldırım boşalması sırasında oluşan ana boşalma kanalındaki akımlar çok yüksek olabilir. Tüm yıldırımların yaklaşık % 10'unda 40 kA'den büyük,

% 1'inde 100 kA'den büyük boşalma akımı gözlenir. Akım darbeleri 1 μ s yükselme, 50 μ s sönme süresine sahiptir.

Yıldırım etkileri, doğrudan etkiler ve dolaylı etkiler olmak üzere ikiye ayrılır. Yıldırımın, bina, uçak veya herhangi bir yapıya direkt teması sonucu meydana gelen yanma, patlama veya mekanik hasarlar gibi etkilere doğrudan etkiler denir. Dolaylı etkilerde ise yıldırım ile yapı arasında hiçbir ilinti noktası yoktur. Yapının uzağına düşen yıldırım, manyetik alan kuplajı, elektrik alan kuplajı ve topraklama akımlarından dolayı yapı üzerinde önemli bir indükleme akımı meydana getirir. Bu akım sonucu meydana gelen hasarlara ise dolaylı etkiler adı verilir. Yapılmış ölçümler, uçak üzerinde 600 A/m, 50 kV/m civarında alan şiddetlerinin ve 150 kA/ μ s mertebesinde akım yükselme oranının meydana geldiğini göstermektedir [5-7].

İnsan kaynaklı EMG örneklerinden birisi de elektrostatik boşalmadır. İnsan vücudu 25 kV'a kadar gerilim ile yüklenebilir. İnsan vücudunun elektronik cihazlar ile doğrudan teması sonucu cihazların işlevlerinde bozukluk meydana gelebilir veya cihazlar tamamen bozulabilir. Bu etkilerin önüne geçilebilmesi için cihaz tasarımları yapılırken kullanılan ekranlama yöntemleri büyük önem kazanmaktadır [6,7].

2.2. Elektromanyetik Uyumluluk Nedir?

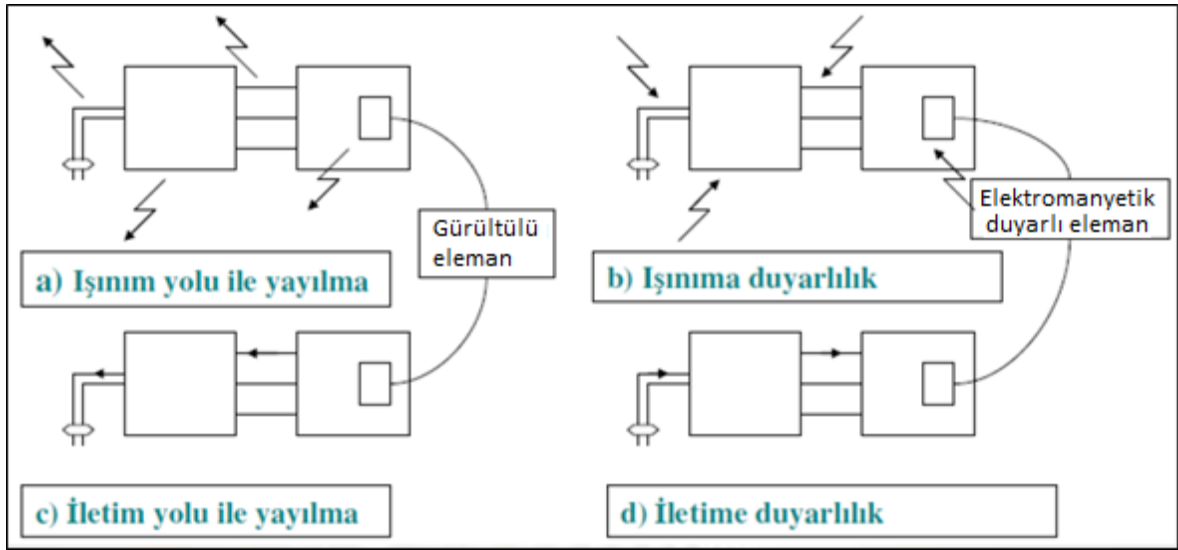
Elektromanyetik Uyumluluk (EMU) (Electromagnetic Compatibility, EMC), sistem veya cihazların birlikte çalışırken birbirlerini etkilememeleri ve içinde buldukları elektromanyetik ortamdan etkilenmeden işlevlerini telafi edilemez bir bozulma olmaksızın yerine getirebilme yeteneğidir. EMU iki ayrı şekilde incelenir:

- Alınganlık (susceptibility): Alınganlık, bir sistem veya cihazın bulunduğu elektromanyetik ortama karşı ne kadar direnebildiğidir. Bağışıklık (immunity) ise alınganlığın tam tersidir ve alınganlığın sivil uygulamalardaki karşılığıdır. Alınganlığı yüksek bir cihazın bağışıklığı düşüktür.
- Yayılım (emission): Yayılım, bir sistem veya cihazın istenmeyen, bozucu etkiye sahip bir yayın yapmasıdır.

Emisyon ölçülür, bağışıklık test edilir. EMU kaynaklar, kuplaj yolları ve kurbanlar şeklinde bir döngüdür. EMG ortamına göre test kategorileri Çizelge 2.1 ve Şekil 2.3 ile gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. EMU test kategorileri

	Yayımla (Emission)	Alıngalık (Susceptibility)
Işınım yoluyla (Radiated)	RE (a)	RS (b)
İletim yoluyla (Conducted)	CE (c)	CS (d)



Şekil 2.3. EMU test kategorileri

2.3. Temel Kavramlar

2.3.1. Elektrik ve manyetik alan

İletkenler üzerindeki gerilim ve akım değerlerinin zamana bağlı değişmesi sonucu elektrik ve manyetik alan oluşur. Küresel koordinat sisteminin merkezindeki bir Q yükü için, herhangi bir P noktasındaki elektrik alan şiddeti aşağıdaki formül ile verilir:

$$\bar{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \hat{a}_r \text{ [V/m]} \quad (2.1)$$

\bar{E} : Elektrik alan şiddeti [V/m]

Q : Q yükü [C]

r : P noktası ile Q yükü arasındaki mesafe [m]

ϵ_0 : Boşluğun elektriksel geçirgenlik (permittivity) sabiti [F/m]

Bir yük hareketi bir elektrik akımı oluşturur ve böylece bir manyetik alan meydana gelir. Manyetik alanın yönü ile akım yönü arasındaki ilişki sağ el kuralı ile açıklanır. Manyetik alan şiddeti \bar{H} [A/m], yalnız hareketli yüklere bağlı olup ortamdan bağımsızdır. Bu durumda manyetik alan şiddeti aşağıdaki gibi yazılabilir [8]:

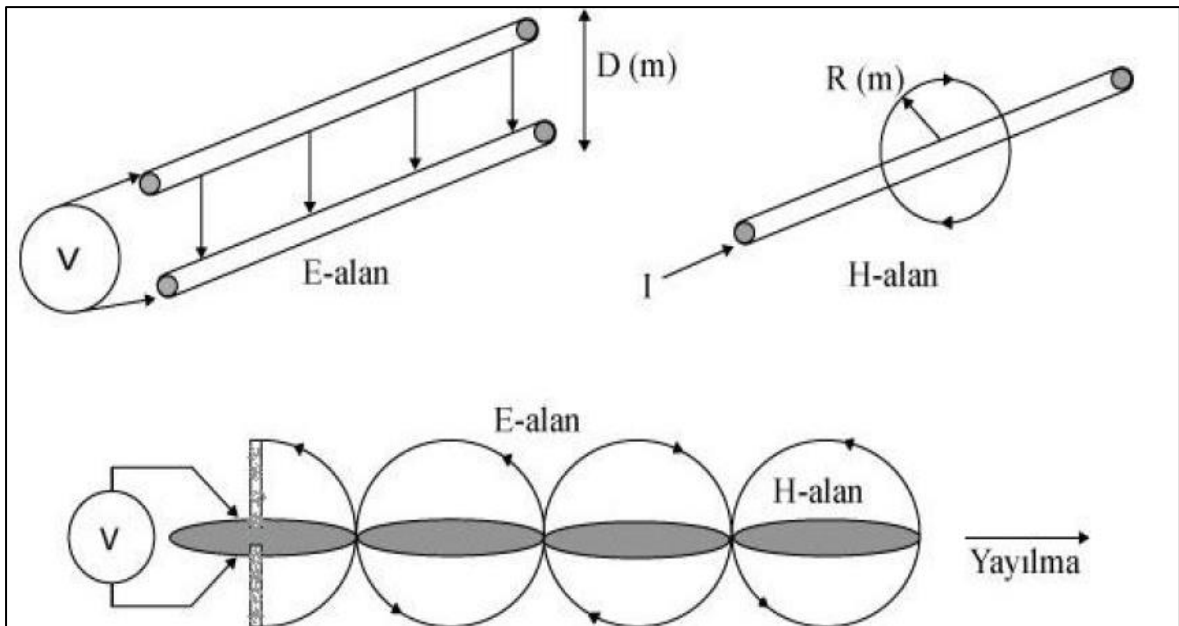
$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu} \text{ [A/m]} \quad (2.2)$$

\bar{H} : Manyetik alan şiddeti [A/m]

\bar{B} : Manyetik akı yoğunluğu [T]

μ : Ortamın manyetik geçirgenliği (permeability) [H/m]

Durgun yükler elektrik alanı, hareket eden yükler ise manyetik alanı oluştururlar. Elektrik ve manyetik alanın oluşturduğu yapıya ise elektromanyetik dalga denir. Şekil 2.4 ile elektromanyetik dalganın yapısı gösterilmiştir. Elektromanyetik dalgada, elektrik ve manyetik alan birbirine ve hareket yönüne dik şekildedir.



Şekil 2.4. Elektromanyetik alanlar

2.3.2. Maxwell Denklemleri

Maxwell Denklemleri'nin birincisi Faraday Yasası'dır. Bu yasaya göre elektrik alan şiddetinin herhangi bir yüzeyin çevresi boyunca sınır integrali, bu yüzeydeki manyetik indüksiyon akısının değişimine eşittir. İkinci yasası olan Ampere Yasası ise kapalı bir yüzey için manyetik alan ve toplam akım yoğunluğu arasındaki ilişki ile tanımlanmıştır. Bu yasaya göre manyetik alan şiddetinin herhangi bir yüzeyin çevresi boyunca sınır integrali, bu yüzeydeki toplam akım yoğunluğu vektörünün akısına eşittir [8]. Üçüncü olarak Gauss Yasası ise, herhangi bir kapalı yüzeyden geçen elektrik akısı ile yüzey içerisinde kalan elektrik yükü arasındaki bağıntıyı tanımlar. Son olarak ise Manyetik Alan için Gauss Yasası kapalı bir yüzeyden geçen toplam manyetik akının her zaman sıfıra eşit olduğunu, yani manyetik yükün olmadığını ifade eder. Özet olarak Maxwell Denklemleri'nin diferansiyel ve integral haldeki genel formları Çizelge 2.2 ile verilmiştir.

Çizelge 2.2. Genel formda Maxwell Denklemleri

Diferansiyel Form	İntegral Form	Denklemler Adı
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_S -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{d\Phi}{dt}$	Faraday Yasası
$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$	Ampere Devre Yasası
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dv = Q$	Gauss Yasası
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	Manyetik alan için Gauss Yasası (Manyetik yükler izole edilemez)
$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$		Süreklilik Eşitliği

Fazör formu dikkate alırsak, harmonik alanlar için Maxwell Denklemleri Çizelge 2.3 ile verilmiştir [8].

Çizelge 2.3. Harmonik alanlar için Maxwell Denklemleri

Diferansiyel Form	İntegral Form	Denklem Adı
$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H}$	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -j\omega\mu \int_S \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S}$	Faraday Yasası
$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\varepsilon)\mathbf{E}$	$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = (\sigma + j\omega\varepsilon) \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$	Ampere Devre Yasası
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dv = Q$	Gauss Yasası
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$	Manyetik alan için Gauss Yasası (Manyetik yükler izole edilemez)
$\nabla \cdot \mathbf{J} = -j\omega\rho$		Süreklilik Eşitliği

Bu denklemlerde kullanılan eşitlikler arasındaki ilişkiler aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \text{ [C/m}^2\text{]} \quad (2.3)$$

\mathbf{D} : Elektrik akı yoğunluğu [C/m²]

\mathbf{E} : Elektrik alan şiddeti [V/m]

ε : Ortamın elektriksel geçirgenliği (permittivity) [F/m]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \text{ [F/m]} \quad (2.4)$$

ε_0 : Serbest uzayın elektriksel geçirgenlik sabiti ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m)

ε_r : Ortamın bağıl elektriksel geçirgenlik katsayısı

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \text{ [T]} \quad (2.5)$$

\mathbf{B} : Manyetik akı yoğunluğu [T]

\mathbf{H} : Manyetik alan şiddeti [A/m]

μ : Ortamın manyetik geçirgenliği (permeability) [H/m]

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right] \quad (2.6)$$

μ_0 : Serbest uzayın manyetik geçirgenlik sabiti ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)

μ : Ortamın bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı

$$J = \sigma \cdot E \text{ [A/m}^2\text{]} \quad (2.7)$$

J : Akım yoğunluğu [A/m^2]

E : Elektrik alan şiddeti [V/m]

σ : İletkenlik (conductivity) [S/m]

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \sigma_r \text{ [S/m]} \quad (2.8)$$

σ_0 : Bakırın iletkenlik değeri ($5,8 \cdot 10^7$ S/m)

σ_r : Bakıra göre bağıl iletkenlik sabiti

Çizelge 2.4 ile bazı malzemelerin bağıl iletkenlik ve bağıl manyetik geçirgenlik sabitleri verilmiştir:

Çizelge 2.4. Bazı malzemelerin bağıl iletkenlik ve bağıl manyetik geçirgenlik sabitleri

Malzeme	İletkenlik Sabiti, σ_r	Manyetik Geçirgenlik Sabiti, μ_r
Gümüş	1,05	1
Bakır	1	1
Altın	0,7	1
Alüminyum	0,61	1
Pirinç	0,26	1
Bronz	0,18	1
Teneke	0,15	1
Kurşun	0,08	1
Nikel	0,2	1
Paslanmaz Çelik (430)	0,02	500
Çelik (SAE 1045)	0,1	1000

2.3.3. Genel dalga denklemleri

Eş. 2.9 ve 2.10 ile dalga denklemleri ya da diğer bilinen adıyla vektör Helmholtz eşitlikleri verilmiştir.

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = \mu\sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

Kaynağın olmadığı ($\rho = 0$) ve iletken olmayan ($\sigma = 0$) bir uzay ortamı için homojen elektrik alan (E) ve manyetik alan (H) eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\nabla^2 \bar{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla^2 \bar{H} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.12)$$

c : Işık hızı [m/s]

Serbest uzayda ışık hızı aşağıdaki formül ile bulunur:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \cong 3 \times 10^8 \text{ [m/s]} \quad (2.13)$$

Kaynak içeren ortamlarda ise Helmholtz eşitlikleri fazör ($e^{j\omega t}$) formda aşağıdaki gibi verilir:

$$\nabla^2 \hat{E} = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\hat{E} = \hat{\gamma}^2 \hat{E} \quad (2.14)$$

$$\nabla^2 \hat{H} = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)\hat{H} = \hat{\gamma}^2 \hat{H} \quad (2.15)$$

Burada $\hat{\gamma}$ yayılma sabiti olup aşağıdaki formül ile tanımlanır:

$$\hat{\gamma} = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad (2.16)$$

$\hat{\gamma}$: Yayılma sabiti
ω	: Dalganın açısal frekansı ($\omega=2\pi f$) [Hz]
α	: Zayıflama sabiti [Np/m]
β	: Faz sabiti [rad/m]
ε	: Elektriksel geçirgenlik (permittivity) [F/m]
μ	: Manyetik geçirgenlik (permeability) [H/m]
σ	: İletkenlik (conductivity) [S/m]

Bu eşitlikte her iki tarafın karesi alınıp gerçel ve sanal kısımlar eşitlenirse α ve β ifadeleri şu şekilde bulunur:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]} \text{ [Np/m]} \quad (2.17)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]} \text{ [rad/m]} \quad (2.18)$$

Yayımla doğrultusu boyunca dalganın faz hızı v_p ve dalga boyu λ aşağıdaki gibi tanımlanır [8]:

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \text{ [m/s]} \quad (2.19)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \text{ [m]} \quad (2.20)$$

2.3.4. Düzlemsel dalgalar

Eş. 2.14, kartezyen koordinat sisteminde 3 farklı skaler eşitlik ile ifade edilebilir. E_x bileşeni aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \hat{\gamma}^2 \right) E_x = 0 \quad (2.21)$$

Düzlemsel dalgalar, elektrik ve manyetik alan bileşenleri yayılma doğrultusuna dik olan dalgalardır. Şekil 2.5 ile elektrik alan vektörü x ekseninde, manyetik alan vektörü y ekseninde ve yayılma yönü z ekseninde olan bir homojen düzlemsel dalga gösterilmiştir. Bu dalganın elektrik alanını sadece z ile değiştirmeyi kabul edersek elektrik alan aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$\frac{\partial^2 E_x(z)}{\partial z^2} - \hat{\gamma}^2 E_x(z) = 0 \quad (2.22)$$

Alan vektörlerinin x ve y düzleminde homojen olmasının anlamı, x ve y den bağımsız olmaları anlamına gelir. Bu durumda aşağıdaki ifade yazılır:

$$\frac{\partial^2 E_x(z)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 E_x(z)}{\partial y^2} = 0 \quad (2.23)$$

Eş. 2.22 ile verilen dalga eşitliği sadece z ile değiştiğinden Eş. 2.24 ile verilen genel çözümü verir:

$$\hat{E}_x(z) = E_x^+(z) + E_x^-(z) = E_0^+ e^{-\hat{\gamma}z} + E_0^- e^{+\hat{\gamma}z} \quad (2.24)$$

Burada E_0^+ ve E_0^- genelde kompleks sabitler olup sınır şartlarından belirlenirler. Elektrik alanın zamana bağlı anlık ifadesi ise şu şekilde yazılabilir [9]:

$$\bar{E}(z, t) = \bar{E}_x = E_0^+ e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \hat{a}_x + E_0^- e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z) \hat{a}_x \quad (2.25)$$

Elektrik alan ifadesi \hat{E} bilindiğine göre, Faraday Yasası kullanılarak manyetik alan \hat{H} aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\nabla \times \hat{E} = -j\omega\mu\hat{H} \quad (2.26)$$

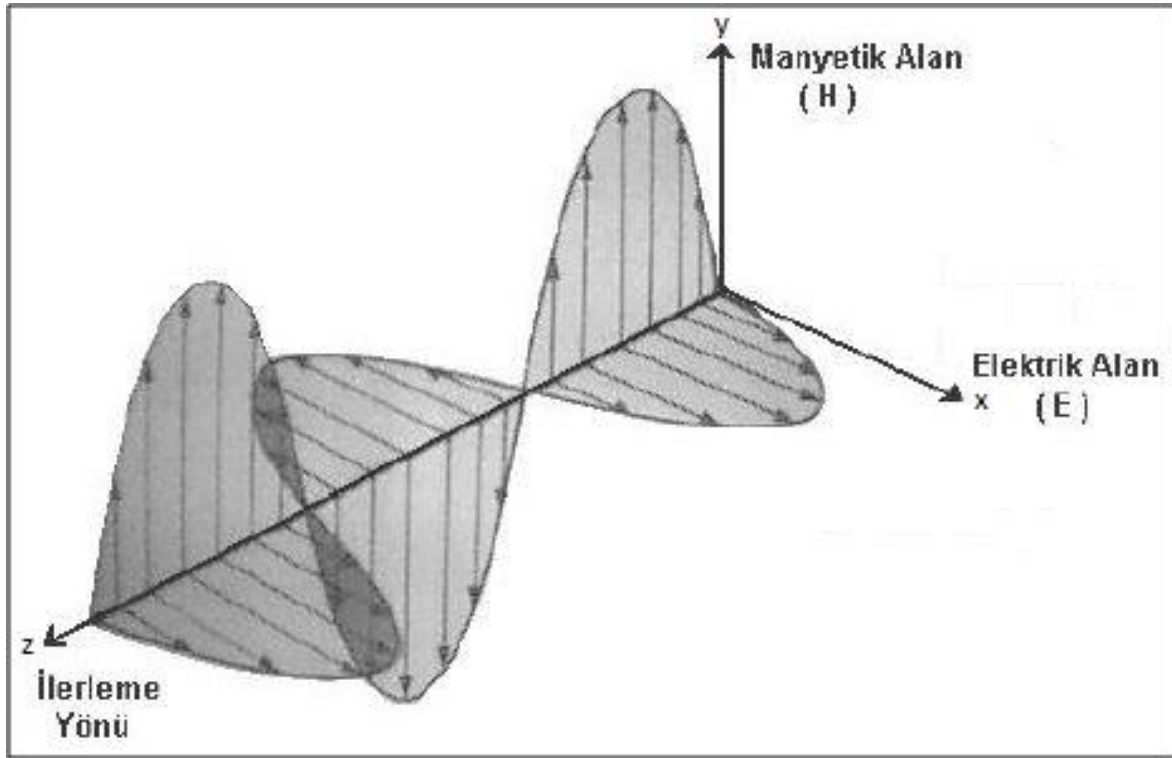
$$\hat{H} = H_y(z)\hat{a}_y = H_y^+(z) + H_y^-(z) = H_0^+ e^{-\hat{\gamma}z} + H_0^- e^{+\hat{\gamma}z} \quad (2.27)$$

Elektrik alanın, manyetik alana oranı ise ortamın karakteristik empedansını verir. Ortamın karakteristik empedansı ise aşağıdaki formül ile bulunur:

$$\frac{E_0^+}{H_0^+} = \frac{j\omega\mu}{\hat{\gamma}} \text{ ve } \frac{E_0^-}{H_0^-} = -\frac{j\omega\mu}{\hat{\gamma}} \quad (2.28)$$

$$\hat{\eta} = \frac{j\omega\mu}{\hat{\gamma}} = \frac{j\omega\mu}{\sqrt{j\omega\mu(\sigma+j\omega\varepsilon)}} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma+j\omega\varepsilon}} \quad [\Omega] \quad (2.29)$$

$$\hat{\eta} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma+j\omega\varepsilon}} = \eta \angle \theta_\eta \quad [\Omega] \quad (2.30)$$



Şekil 2.5. Homojen bir düzlem dalganın gösterimi

2.3.4.1. Kayıpsız ortamda ($\sigma = 0$) düzlemsel dalgalar

Mükemmel dielektrik ortamlarda iletkenlik sabiti sıfıra eşittir. Bu ortamlarda yayılma sabiti, zayıflama sabiti, faz sabiti, faz hızı, dalga boyu ve ortam empedansı sırasıyla aşağıdaki ifadeler ile tanımlanır:

$$\hat{\gamma} = \sqrt{j\omega\mu(\sigma+j\omega\varepsilon)} \Big|_{\sigma=0} = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \alpha + j\beta \quad (2.31)$$

$$\alpha = 0 \quad [\text{Np/m}] \quad (2.32)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \text{ [rad/m]} \quad (2.33)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \text{ [m/s]} \quad (2.34)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \text{ [m]} \quad (2.35)$$

$$\hat{\eta} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \Big|_{\sigma=0} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \theta_{\eta} = 0 \text{ [}\Omega\text{]} \quad (2.36)$$

$$\hat{\eta} = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}, (\eta_0 = 120\pi \Omega) \quad (2.37)$$

Kayıpsız ortamdaki elektrik alan ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\bar{E}_x(z, t) = (E_0^+ \cos(\omega t - \beta z) + E_0^- \cos(\omega t + \beta z)) \hat{a}_x \quad (2.38)$$

2.3.4.2. İyi dielektrik ortamda (düşük kayıplı) düzlemsel dalgalar

İyi dielektrik ortamlar $\sigma \neq 0$ ve $\sigma \ll \omega\varepsilon$ ile tanımlanır. Bu ortamlarda yayılma sabiti, zayıflama sabiti, faz sabiti, faz hızı, dalga boyu ve ortam empedansı aşağıdaki ifadeler ile tanımlanır:

$$\hat{\gamma} = \pm j\omega\sqrt{\omega\varepsilon} \left[1 - j\frac{\sigma}{2\omega\varepsilon} \right] = \pm \left(\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} + j\omega\sqrt{\mu\varepsilon} \right) = \alpha + j\beta \quad (2.39)$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2.40)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad (2.41)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \approx \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (2.42)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \approx \frac{1}{f\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (2.43)$$

$$\hat{\eta} \approx \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2.44)$$

2.3.4.3. İyi iletken ortamda düzlemsel dalgalar

İyi iletken ortamlar $\sigma \neq 0$ ve $\sigma \gg \varepsilon$ ile tanımlanır. Bu ortamlarda yayılma sabiti, zayıflama sabiti, faz sabiti, faz hızı, dalga boyu ve ortam empedansı aşağıdaki ifadeler ile tanımlanır:

$$\hat{\gamma} = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \alpha + j\beta \quad (2.45)$$

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.46)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \approx \sqrt{\frac{4\pi f}{\mu\sigma}} \quad (2.47)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \approx \sqrt{\frac{4\pi}{f\mu\sigma}} \quad (2.48)$$

$$\hat{\eta} = (1 + j) \sqrt{\frac{\pi f \mu}{2\sigma}} \quad (2.49)$$

Elektromanyetik dalgalar ekran malzemesinin içerisinde zayıflayarak ilerler. Deri kalınlığı, elektromanyetik dalganın bir ekranlama malzemesi içerisindeki nüfuz etme derinliğidir. Diğer bir ifadeyle elektromanyetik dalganın genliğinin başlangıçtaki değerinin e^{-1} veya 0,368'ine düştüğü mesafeye nüfuz derinliği veya deri kalınlığı denir. Deri kalınlığı aşağıdaki formül ile bulunur:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} [m] \quad (2.50)$$

δ : Deri kalınlığı [m]

Çizelge 2.5 ile çeşitli malzemelerin farklı frekanslardaki deri kalınlığı değerleri verilmiştir:

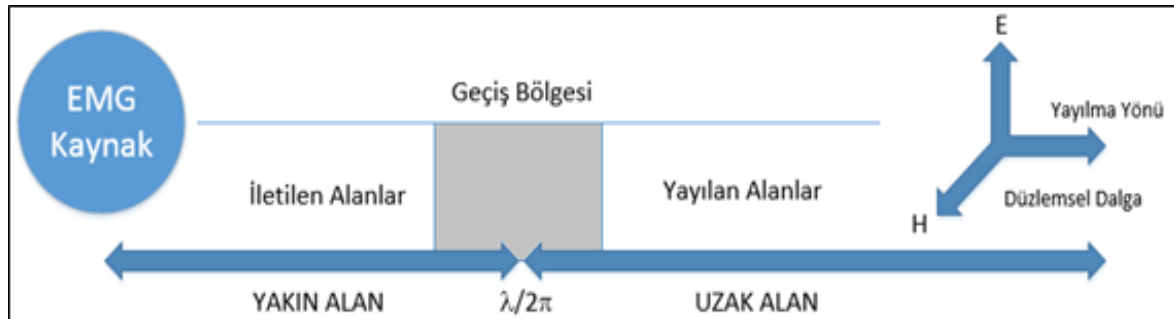
Çizelge 2.5. Çeşitli malzemelerin deri kalınlıkları

Malzeme	σ [S/m]	Deri Kalınlığı [mm]		
		60 Hz	1 MHz	1 GHz
Gümüş	$6,17 \times 10^7$	8,27	0,064	0,0020
Bakır	$5,80 \times 10^7$	8,53	0,066	0,0021
Altın	$4,10 \times 10^7$	10,14	0,079	0,0025
Alüminyum	$3,54 \times 10^7$	10,92	0,084	0,0027
Demir	$1,00 \times 10^7$	0,65	0,005	0,00016
Deniz suyu	4	32 000	250	*

* Deniz suyunun elektriksel geçirgenliği yaklaşık $72\epsilon_0$ ve 1 GHz'de $\sigma/\omega\epsilon \cong 1$ olmaktadır. Bu durumda deniz suyu çok iyi bir iletken değildir.

2.3.5. Yakın alan ve uzak alan

Işıma yolu ile kuplaj, bir kaynağın yaydığı elektrik alanın E ışınımı ve manyetik alanın H ışınımı ile kurban üzerinde girişimde bulunması sonucu oluşur. Eğer kurban yakın alan bölgesinde ise elektrik ve manyetik alan ayrı ayrı incelenir. Fakat kurban uzak alanda ise elektrik ve manyetik alan birleşimi olarak elektromanyetik ışımaya olarak incelenir. Yakın ve uzak alan için sınır değer $\lambda/2\pi$ 'dir. Bir EMG kaynak için yakın ve uzak alan Şekil 2.6 ile gösterilmiştir.



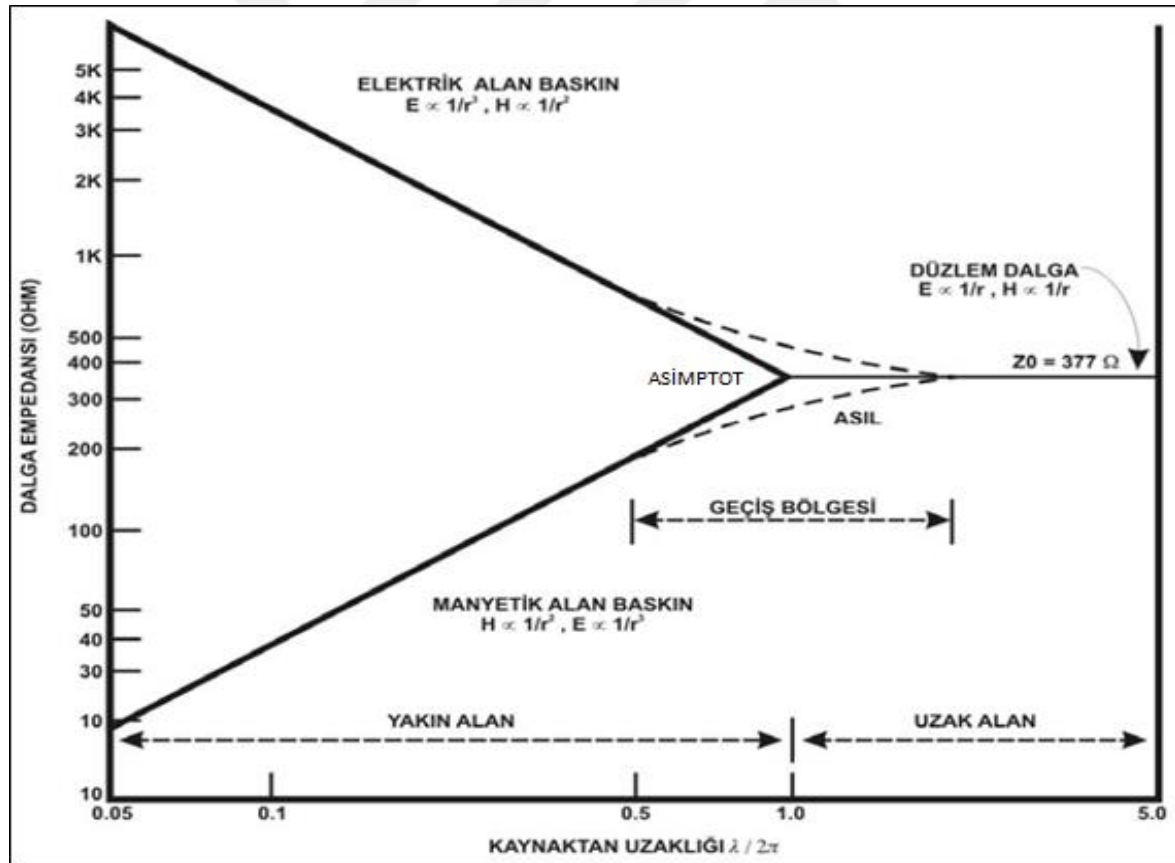
Şekil 2.6. EM radyasyon kaynağı ve girişim alanları

Yakın alan bölgesinde E/H oranı kaynağın özelliklerine bağlı olarak değişim gösterir. Yakın alan için dalga empedansı:

- Eğer kaynak yüksek akım ve düşük gerilim özelliklerine sahip ise ($E/H < 377\Omega$) manyetik alan baskın olur. Kaynaktan uzaklaştıkça $H \sim 1/r^3$ ve $E \sim 1/r^2$ ile orantılı olarak azalır.
- Eğer kaynak düşük akım ve yüksek gerilim özelliklerine sahip ise ($E/H > 377\Omega$) elektrik alan baskın olur. Kaynaktan uzaklaştıkça $H \sim 1/r^2$ ve $E \sim 1/r^3$ ile orantılı olarak azalır.

Uzak alan için dalga empedansı:

- Ortamın karakteristik empedansına eşittir. Kaynaktan çok uzaklarda dalga, düzlemsel dalgaya dönüşür ve serbest uzaydaki dalga empedansı $E/H = Z_0 = 120\pi = 377\Omega$ olur [10].

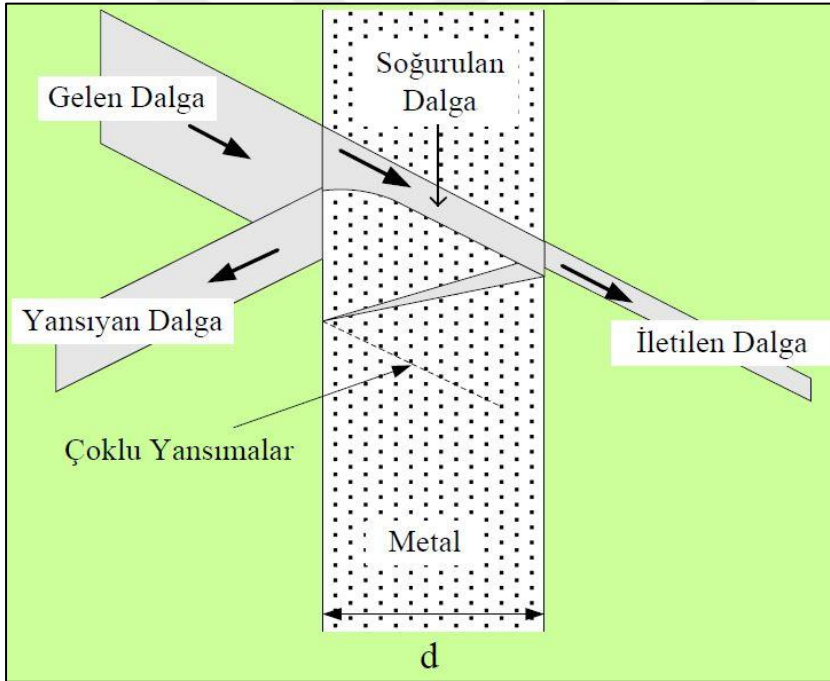


Şekil 2.7. Kaynaktan uzaklığa bağlı olarak elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri ile dalga empedansının değişimi

2.4. Ekranlama

Ekranlama, elektromanyetik girişimi önlemek için başvurulan en temel yöntemlerden biridir. Ekranlamanın temel amacı, elektromanyetik alanın belli bir bölge sınırları içerisinde kalmasını sağlamak veya belli bir bölge içerisine girmesini engellemektir.

Ekranlama malzemesi olarak genelde çok iyi iletken malzemeler kullanılır. Ekrana gelen elektromanyetik dalga 3 aşamada zayıflar. İlk olarak, gelen dalganın bir kısmı ekran yüzeyinden geriye yansır. İkinci olarak ekran içine iletilen dalganın bir kısmı ekran tarafından soğurulur. Üçüncü olarak ise elektromanyetik dalga ekran içinde çoklu yansımalara uğrar [10].



Şekil 2.8. Metal ekran modeli

Ekranlama için kullanılacak malzemenin belli bir ekranlama etkinliği vardır. Ekranlama etkinliği (EE) (shielding effectiveness, SE), girişim kaynağı ile kurban arasında ekran yokken oluşan elektromanyetik alan şiddetinin, ekran varken oluşan elektromanyetik alan şiddetine desibel (dB) cinsinden oranıdır. EE değeri ne kadar yüksek ise ekranlama o kadar iyidir. Ekranlama etkinliğinin negatif olmasına ise çınlama (rezonans) denir. Bu durumda girişime neden olan elektromanyetik alanın engellenmesinden ziyade kuvvetlenmesi söz konusudur.

Ekranlama etkinliği;

- Ekranlama malzemesinin özelliklerine,
- Ekran üzerindeki sürekliliğe (açıklıkların sayısı ve şekli),
- Ekranın geometrisine,
- Elektromanyetik dalganın frekansına,
- Elektromanyetik dalganın yönüne ve kutuplanmasına bağlıdır.

Elektrik ve manyetik alan ekranlama etkinlikleri aşağıdaki formüller kullanılarak elde edilir:

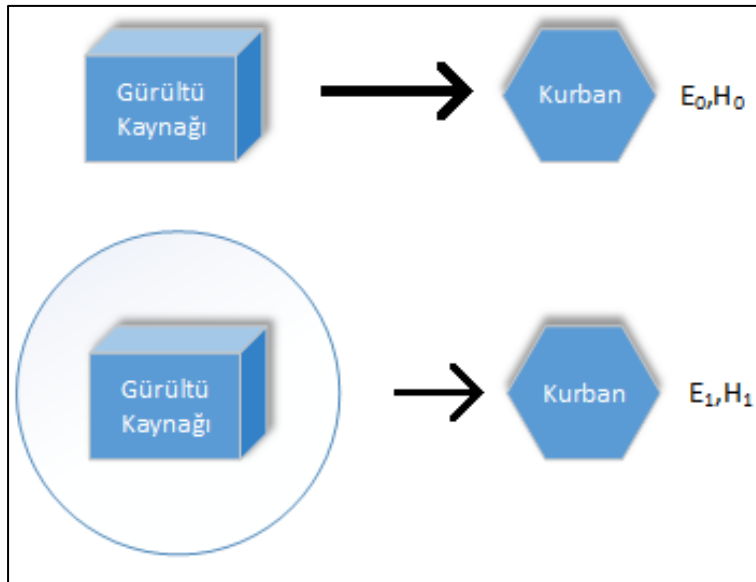
$$EE = 20 \log \frac{E_0(f)}{E_1(f)} = 20 \log \frac{H_0(f)}{H_1(f)} \quad (2.51)$$

$E_0(f)$: Ekranlama yokken kurban üzerinde oluşan elektrik alan şiddeti [V/m]

$E_1(f)$: Ekranlama varken kurban üzerinde oluşan elektrik alan şiddeti [V/m]

$H_0(f)$: Ekranlama yokken kurban üzerinde oluşan manyetik alan şiddeti [A/m]

$H_1(f)$: Ekranlama varken kurban üzerinde oluşan manyetik alan şiddeti [A/m]



şekil 2.9. Ekranlama etkinliği tanımı

Bir malzemenin ekranlama etkinliği 3 kaybın toplamı olarak bulunabilir:

$$EE = A + R + B \quad (2.52)$$

- A : Yutulma kaybı (absorption loss)
 R : Yansıma kaybı (reflection loss)
 B : Çoklu yansıma kaybı (multiple reflection loss)

2.4.1. Yansıma kayıpları (reflection losses)

Yansıma ekranlamanın ilk kısmıdır. Gelen dalganın ekranlama ile geri yansıması için, ekran üzerinde birbirini etkileyen serbest elektronların olması gerekir. Bu serbest elektronlar ekranlama malzemesine iletkenlik özelliği verir ve bu yüzden en çok kullanılan ekranlama malzemesi metallerdir.

İki ortam arasındaki empedans farklılığı dalgaların üzerinde farklı etkilere neden olurlar ve bu yüzden yansıma iki ortam arasındaki empedans farklılığına dayanır. Şimdi yansıma kaybını uzak alan ve yakın alan bölgesinde inceleyelim.

2.4.1.1. Uzak alan bölgesinde yansıma kaybı

Uzak alan bölgesinde yansıma kaybı gelen ve iletilen dalga arasındaki iletim katsayıları kullanılarak hesaplanabilir:

$$\frac{\hat{E}_1}{\hat{E}_i} \cong \frac{2\hat{\eta}}{\eta_0 + \hat{\eta}} \quad (2.53)$$

\hat{E}_1 : Ekran içine iletilen ilk dalga

\hat{E}_i : 1. ortama gelen ilk dalga

$\hat{\eta}$: Ekran empedansı

η_0 : Ortam empedansı

$$\frac{\hat{E}_t}{\hat{E}_1} \cong \frac{2\eta_0}{\eta_0 + \hat{\eta}} \quad (2.54)$$

\hat{E}_1 : Ekran içine iletilen ilk dalga

\hat{E}_t : 2. ortama iletilen ilk dalga

$\hat{\eta}$: Ekran empedansı

η_0 : Ortam empedansı

$$\frac{\hat{E}_t}{\hat{E}_i} = \frac{\hat{E}_1}{\hat{E}_i} \cdot \frac{\hat{E}_t}{\hat{E}_1} = \frac{2\hat{\eta}}{\eta_0 + \hat{\eta}} \cdot \frac{2\eta_0}{\eta_0 + \hat{\eta}} = \frac{4\eta_0\hat{\eta}}{(\eta_0 + \hat{\eta})^2} \quad (2.55)$$

$$\frac{\hat{E}_i}{\hat{E}_t} = \frac{(\eta_0 + \hat{\eta})^2}{4\eta_0\hat{\eta}} \quad (2.56)$$

Ortam ve dalga empedansı arasında $\hat{\eta} \ll \eta_0$ yaklaşımı yapılırsa

$$\frac{\hat{E}_i}{\hat{E}_t} = \frac{\eta_0}{4\hat{\eta}} \quad (2.57)$$

bulunur. Bu durumda uzak alan bölgesi için yansımaya kaybı aşağıdaki formül ile bulunabilir:

$$R = 20 \log \left| \frac{\hat{E}_i}{\hat{E}_t} \right| = 20 \log \left| \frac{(\eta_0 + \hat{\eta})^2}{4\eta_0\hat{\eta}} \right| = 20 \log \left| \frac{\eta_0}{4\hat{\eta}} \right| [dB] \quad (2.58)$$

$$R = 20 \log \left| \frac{120\pi}{4\hat{\eta}} \right| = 168,2 + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{f \cdot \mu_r} \right) [dB] \quad (2.59)$$

2.4.1.2. Yakın alan bölgesinde yansımaya kaybı

Yakın alan bölgesinde noktasal bir elektrik alan kaynağının dalga empedansı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$|\eta_W|_E = \eta_0 \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right) [\Omega] \quad (2.60)$$

Bu durumda yakın alan bölgesinde elektrik alan için yansımaya kaybı aşağıdaki gibi bulunur:

$$R = 20 \log \frac{|\eta_W|_E}{|4\hat{\eta}|} = 20 \log \left(\frac{\eta_0 \cdot c}{8\pi f r |\hat{\eta}|} \right) [dB] \quad (2.61)$$

$$R = 321,74 + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r r^2 f^3} \right) [dB] \quad (2.62)$$

Yakın alan bölgesinde noktasal bir manyetik alan kaynağının dalga empedansı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$|\eta_W|_H = \eta_0 \left(\frac{2\pi r}{\lambda} \right) [\Omega] \quad (2.63)$$

Bu durumda yakın alan bölgesinde elektrik alan için yansıma kaybı aşağıdaki gibi bulunur:

$$R = 20 \log \frac{|\eta_W|_H}{|4\hat{\eta}|} = 20 \log \left(\frac{\eta_0 \cdot \pi f r}{2c|\hat{\eta}|} \right) [dB] \quad (2.64)$$

$$R = 14,6 + 10 \log \left(\frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r} \right) [dB] \quad (2.65)$$

2.4.2. Soğrulma kayıpları (absorption losses)

Ekranlamanın ikinci aşamasıdır. Elektromanyetik bir dalga empedansı farklı bir ortamda ilerlediği zaman zayıflamaya başlar. Bu zayıflama elektrik ve manyetik alan için aşağıdaki formüller ile bulunur:

$$E_1 = E_0 e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (2.66)$$

$$H_1 = H_0 e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (2.67)$$

t : Ortam içerisindeki mesafe

δ : Deri kalınlığı

İyi iletken metaller için deri kalınlığı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{0,066}{\sqrt{f \mu_r \sigma_r}} [m] \quad (2.68)$$

Bu durumda soğrulma kaybı aşağıdaki gibi bulunur:

$$A = 20 \log e^{-\frac{t}{\delta}} = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log e = 8,69 \left(\frac{t}{\delta} \right) = 131,8t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} [dB] \quad (2.69)$$

2.4.3. Çoklu yansımaya kayıpları (multiple reflection losses)

Ekranlama etkinliğinin son bileşeni çoklu yansımaya kaybıdır. Çoklu yansımaya kayıpları ince ekranların kullanıldığı durumlar için geçerlidir. Eğer ki kalın levha kullanılırsa ekran içerisinde yüksek soğrulma kaybı oluşacağından dolayı çoklu yansımaya kaybı ihmal edilebilir. Eğer soğrulma kaybı ile çoklu yansımaya kaybı arasındaki fark 15 dB'den fazla ise çoklu yansımaya kaybı ihmal edilebilir. Çoklu yansımaya kaybı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$B = 20 \log \left| 1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} \right| \approx 29,6 + 10 \log(f \mu_r \sigma_r t^2) \quad (2.70)$$

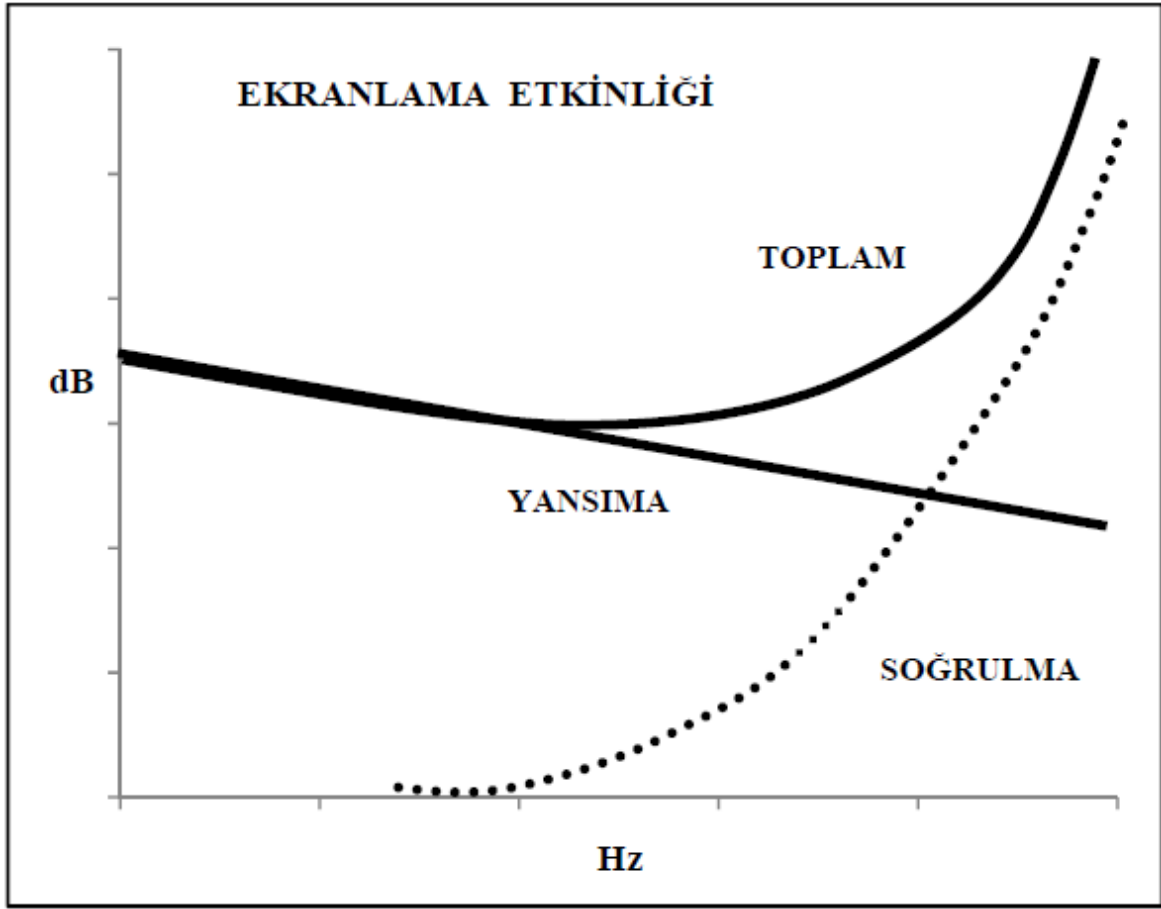
t : Ortam içerisindeki mesafe

2.4.4. Toplam ekranlama etkinliği ifadeleri

Tüm bu kayıpların toplamı malzemenin ekranlama etkinliğini verir. Uzak alanda düzlemsel dalganın toplam kayıpları Şekil 2.10 ile verilmiştir. Frekans arttıkça yansımaya kaybı azalır ve soğrulma kaybı artar. Sonuç olarak ise toplam kayıp artar. Yakın alan ve uzak alan bölgelerinde ekranlama etkinliği değerleri kolaylık olması açısından Çizelge 2.6 ile verilmiştir:

Çizelge 2.6. Ekranlanma etkinliği ifadeleri

Uzak Alan	Yakın Alan	
Düzlemsel Dalga $\eta = 377\Omega$	Elektrik Alan Baskın $\eta > 377\Omega$	Manyetik Alan Baskın $\eta < 377\Omega$
$A = 131,8t \sqrt{f \sigma_r \mu_r}$	$A = 131,8t \sqrt{f \sigma_r \mu_r}$	$A = 131,8t \sqrt{f \sigma_r \mu_r}$
$R = 168,2 + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{f \cdot \mu_r} \right)$	$R = 321,74 + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r r^2 f^3} \right)$	$R = 14,6 + 10 \log \left(\frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r} \right)$
$B = 0$	$B = 0$	$B \approx 29,6 + 10 \log(f \mu_r \sigma_r t^2)$
$EE = A + R$	$EE = A + R$	$EE = A + R + B$



Şekil 2.10. Düzlemsel dalganın ekranlama etkinliği

3. TEORİK YÖNTEMLER VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

3.1. Teorik Çözüm

Üzerinde dikdörtgen geometrisinde açıklık bulunan kapalı metalik bir kutunun ekranlama etkinliği analitik yöntem kullanılarak hesaplanabilir. Bu kutu Şekil 3.1 ile ve kutunun eşdeğer devre modeli Şekil 3.2 ile gösterilmiştir. Kutunun yüksekliği b , genişliği a ve derinliği d olarak ifade edilmektedir. Açıklığın genişliği l ve yüksekliği w ile ifade edilmektedir. Açıklığın derinliği kutunun kalınlığı olan t değerine eşittir. Açıklıktan p kadar uzakta bulunan P noktasında oluşan gerilim değeri elektrik alan ekranlama etkinliğini ve akım değeri manyetik alan ekranlama etkinliğini bulmak için kullanılır. Kaynağın gerilimi V_0 ve empedansı $Z_0 \approx 377 \Omega$ 'dur. Kutu ile ilgili olarak kısa devre dalga kılavuzunun karakteristik empedansı Z_g ve yayılım sabiti k_g 'dir. İlk önce açıklığın eşdeğer empedansı bulunup daha sonra basit iletim hattı dönüşümü uygulanarak P noktasındaki gerilim ve empedans değerleri bulunur [11].

Açıklığa sahip olmayan kapalı metalik kutunun rezonans frekansı aşağıda verildiği gibi bulunur:

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{q}{d}\right)^2} \quad (3.1)$$

m	: Tamsayı
n	: Tamsayı
q	: Tamsayı
μ	: Tamsayı
ε	: Tamsayı

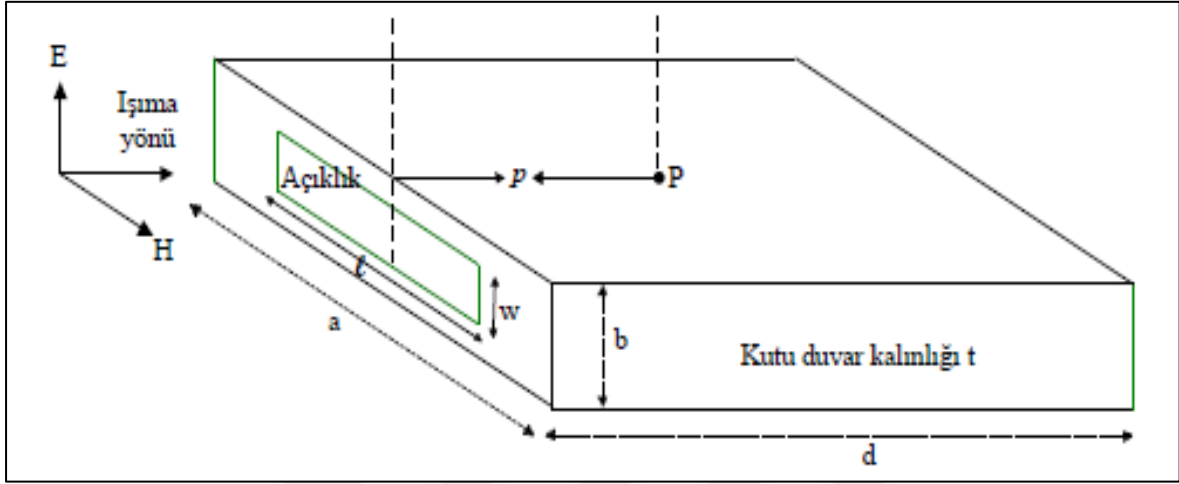
Bizim kutumuzda $a > b$ ve $d > b$ olduğu için TE_{101} dominant mod geçerlidir ve açıklığa sahip olmayan kapalı kutunun rezonans frekansı 0,707 GHz'dir [12].

Elektrik alan ekranlama etkinliği değeri, P noktasındaki gerilim değeri hesaplanarak aşağıdaki formül ile bulunur:

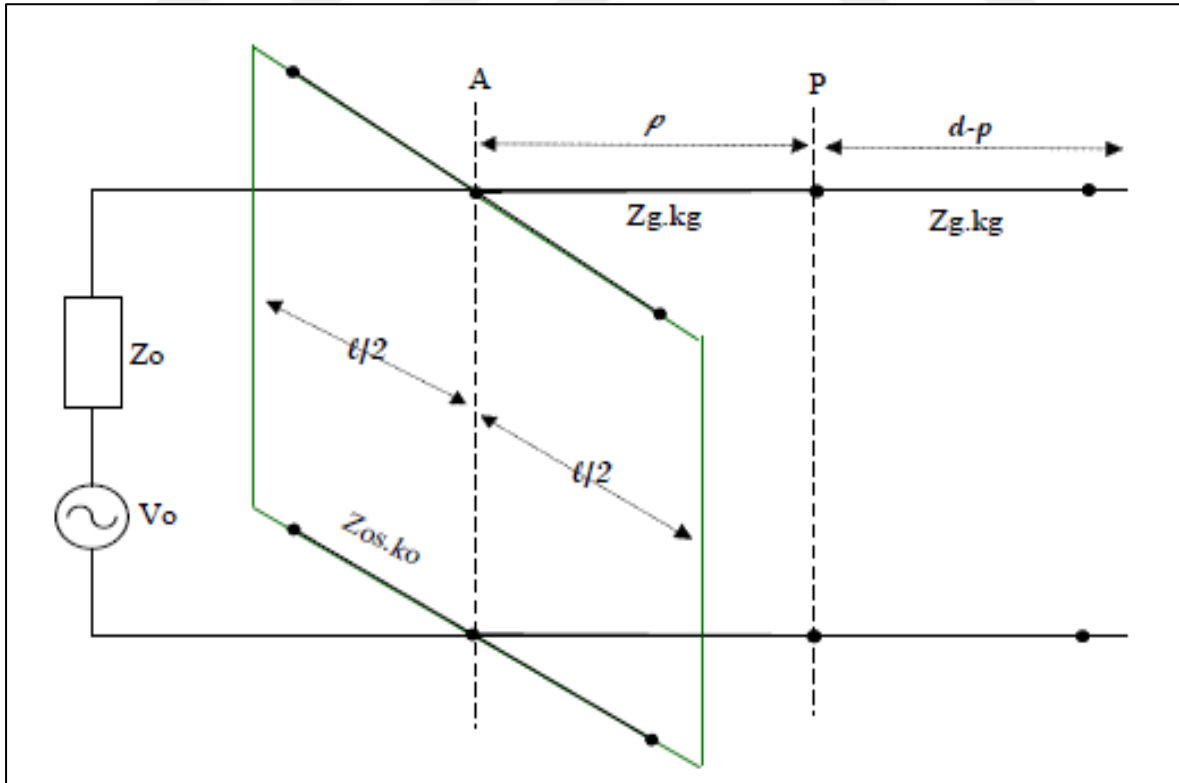
$$EE = 20 \log \left| \frac{E_0(P)}{E_1(P)} \right| \text{ dB} \quad (3.2)$$

$E_0(P)$: Ekranlama yok iken P noktasında oluşan gerilim değeri

$E_1(P)$: Ekranlama var iken P noktasında oluşan gerilim değeri



Şekil 3.1. Üzerinde 1 tane açıklık bulunan kapalı metalik kutu



Şekil 3.2. Üzerinde 1 tane açıklık bulunan kapalı metalik kutunun eşdeğer devre modeli

3.1.1. Açıklık empedansı

Kapalı metalik kutu üzerinde bulunan açıklık, her bir uçta kısa devre olacak şekilde, düzlemsel şerit iletim hattı devresinin bir parçasını temsil etmektedir. Çünkü sadece kutunun ön yüzeyindeki iletim hattı akımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kutunun yükseklik değeri b , iletim hattının toplam enine eşittir. Ayrıca açıklığın yükseklik değeri w ise yarığın enine eşittir. Gupta vd. tarafından iletim hattı karakteristik empedansı Z_{0s} aşağıdaki gibi belirlenmiştir [13]:

$$Z_{0s} = 120\pi \frac{K(w_e/b)}{K'(w_e/b)} [\Omega] \quad (3.3)$$

K : Eliptik integral
 K' : Eliptik integral
 w_e : Efektif yükseklik

Efektif yükseklik ise:

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \left(\frac{4\pi w}{t} \right) \right) \quad (3.4)$$

t : Kutunun duvar kalınlığı
 w : Açıklığın yüksekliği

şeklinde tanımlanır. Eğer $w_e < b/\sqrt{2}$ varsayımı yapılır ise açıklığın karakteristik empedansı aşağıdaki formül ile bulunur:

$$Z_{0s} = 120\pi^2 \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_e/b)^2}} \right) \right]^{-1} [\Omega] \quad (3.5)$$

Açıklığın empedansını Z_{ap} hesaplamak için açıklığın merkezinden $l/2$ kadar mesafe uzağına kısa devre uygulanır. Bu durum Şekil 3.2 ile verilen eşdeğer devrede A noktasındadır. Açıklığın empedansı ise:

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} j Z_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} [\Omega] \quad (3.6)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.7)$$

- λ : Dalga boyu [m]
 l : Açıklığın genişliği [m]
 a : Kutunun genişliği [m]

ile tanımlanır. Buradaki l/a faktörü kutu ile açıklık arasındaki kuplajı izah etmek için eklenmiştir. Bu formüller iletim hattı ile dalga kılavuzu arasındaki bağlantıları göstermektedir [11].

3.1.2. Elektrik alan ve manyetik alan ekranlama etkinliği

Thevenin Teoremi kullanıldığı zaman, Z_{ap} üzerindeki gerilim V_1 olarak bulunur. Z_1 , kaynağın gördüğü eşdeğer empedanstır. V_1 , Z_1 , Z_0 , Z_{ap} ve V_0 ifadeleri arasında aşağıdaki bağıntılar bulunur:

$$V_1 = V_0 \left(\frac{Z_{ap}}{Z_{ap} + Z_0} \right) [V] \quad (3.8)$$

$$Z_1 = \left(\frac{Z_0 \times Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}} \right) [\Omega] \quad (3.9)$$

TE₁₀₁ yayılımı için, dalga kılavuzunun karakteristik empedansı Z_g ve yayılım sabiti k_g sırasıyla aşağıda verilmiştir:

$$Z_g = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \lambda(2a)^2}} [\Omega] \quad (3.10)$$

$$k_g = k_0 \sqrt{1 - \lambda(2a)^2} \quad (3.11)$$

V_1 , Z_1 ve dalga kılavuzunun P noktasına kısa devre dönüşümü uygulanırsa eşdeğer gerilimi V_2 , kaynak empedansı Z_2 , ve yük empedansı Z_3 sırasıyla aşağıdaki gibi bulunur:

$$V_2 = \frac{V_1}{\cos(k_g p) + j(Z_1/Z_g) \sin(k_g p)} [V] \quad (3.12)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_g \tan(k_g p)}{1 + j(Z_1/Z_g) \tan(k_g p)} [\Omega] \quad (3.13)$$

$$Z_3 = jZ_g \tan(k_g (d - p)) [\Omega] \quad (3.14)$$

Kutunun olduğu hesaplamada P noktasındaki gerilim V_p ve akım I_p değerleri sırasıyla:

$$V_p = \frac{V_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} [V] \quad (3.15)$$

$$I_p = \frac{V_2}{Z_2 + Z_3} [A] \quad (3.16)$$

şeklinde tanımlanır. Kutunun olmadığı referans hesaplamasının yapıldığı durumda P noktasındaki yük empedansı Z_0 'a eşit olduğundan P noktasındaki gerilim V'_p ve akım I'_p değerleri sırasıyla:

$$V'_p = \frac{V_0}{2} [V] \quad (3.17)$$

$$I'_p = \frac{V_0}{2Z_0} [A] \quad (3.18)$$

şeklinde tanımlanır. Bu durumda elektrik alan ve manyetik alan ekranlama etkinliği Eş. 3.19 ve 3.20 ile verildiği gibi bulunur [11].

$$EE_E = -20 \log \left| \frac{V_p}{V'_p} \right| = -20 \log \left| 2 \frac{V_p}{V_0} \right| [dBm] \quad (3.19)$$

$$EE_M = -20 \log \left| \frac{I_p}{I'_p} \right| = -20 \log \left| 2 \frac{I_p \cdot Z_0}{V_0} \right| [dBm] \quad (3.20)$$

3.1.3. Formüllerin genişletilmesi

Sırasıyla Eş. 3.19 ve 3.20 ile verilen elektrik alan ve manyetik alan EE formüllerine elektromanyetik kayıpların, dairesel açıklıkların ve çoklu açıklık durumlarının etkisi de eklenecek analitik çözümlerin kapsamı genişletilebilir.

Dairesel kartlar, güç kaynakları ve diğer birçok ürün kapalı kutu içerisinde elektromanyetik kayıplara neden olmaktadır. Ekranlama etkinliğini etkileyen bu durum özellikle rezonans frekanslarında görülür [14]. İlk yaklaşımımıza göre kutu içerisinde bu kayıpların düzgün dağıldığı varsayılmıştır. Eş eksenli çizgilerde dağılmış kayıplar karakteristik empedans ve yayılım sabiti için bir düzeltme faktörü ζ eklenerek modellenebilir [15]. Bu pratik yaklaşımda ekranlama etkinliğindeki yeni karakteristik empedans Z'_g ve k'_g yayılım sabiti aşağıdaki formüller ile ifade edilir:

$$Z'_g = (1 + \zeta - j\zeta)Z_g \quad (3.21)$$

$$k'_g = (1 + \zeta - j\zeta)k_g \quad (3.22)$$

Turner vd'leri, dairesele bir açıklığın ekranlama etkinliğinin, aynı alana sahip kare açıklığın ekranlama etkinliğiyle yaklaşık olarak aynı olduğunu bulmuştur [16]. Bu nedenle formüle dairesele açıklık eklenmek istenirse d_h açıklığın çapı olmak üzere:

$$l = w = \frac{\sqrt{\pi}}{2}d_h \quad (3.23)$$

şeklinde tanımlanır. Eğer kutu üzerinde n tane benzer açıklık var ise her bir açıklığın empedansı tüm açıklıkların empedanslarına eklenmelidir. Seri olarak ise toplam açıklık empedansı aşağıdaki formül ile bulunur [11]:

$$Z_{ap} = n \frac{1}{2} \frac{l}{a} jZ_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} [\Omega] \quad (3.24)$$

Açıklıkların birbirlerine çok yakın oldukları durumda karşılıklı kuplajlardan kaynaklanan etkiyi teorik olarak formüle eklemek uygulanabilir bir yaklaşım olmadığından karşılıklı kuplaj etkisi bu durumda ihmal edilmiştir.

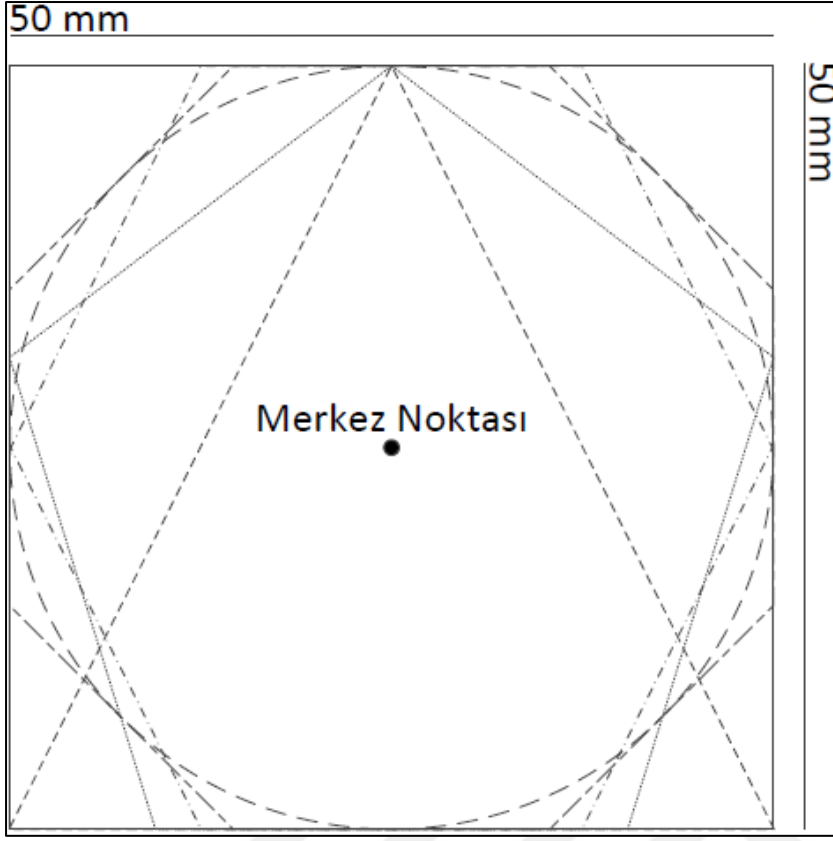
3.2. Açıklık Geometrisi

Şekil 3.1 ile verilen alüminyumdan yapılmış ve içi hava dolu kutunun a , b , d ve t değerleri sırasıyla 300 mm, 120 mm, 300 mm ve 1,5 mm alınmıştır. Açıklık türleri daire, üçgen, kare, beşgen, altıgen ve sekizgen seçilmiştir. Bu bölümde iki uygulama yapılmıştır. Birinci

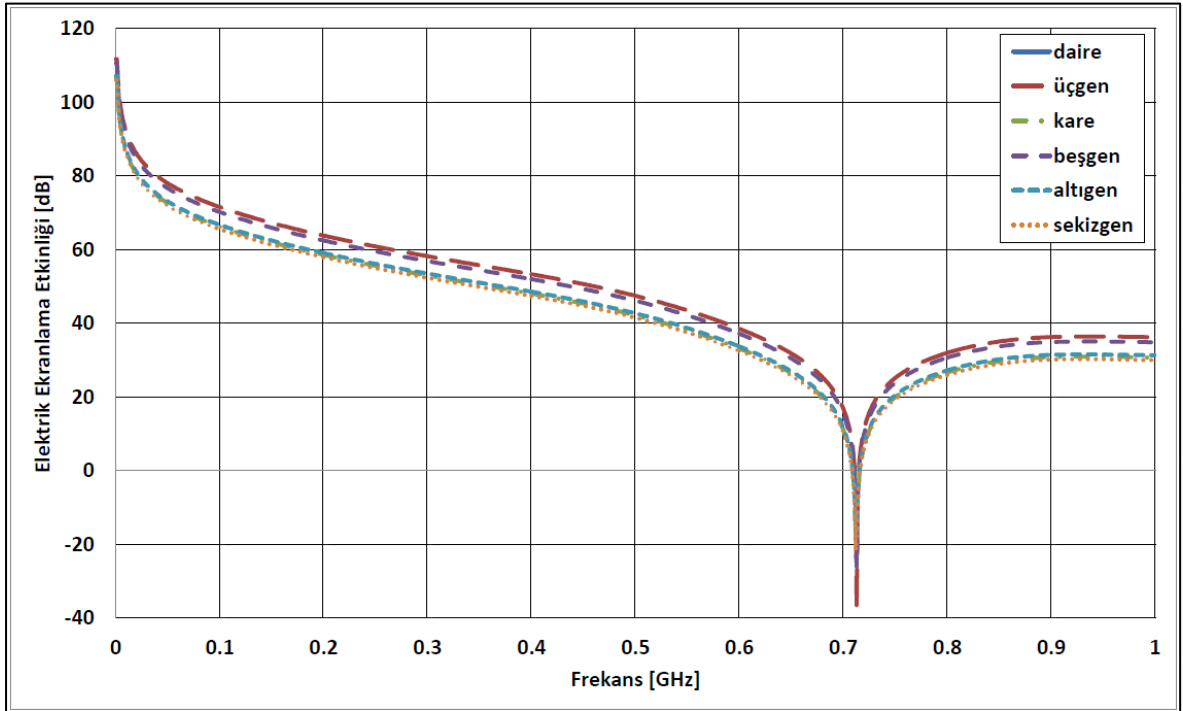
uygulamada elde ettiğimiz sonuçları daha önce yapılan sonuçlara göre kıyaslamak için kare açıklığın w ve l değerleri 50 mm alınmıştır. Daire, üçgen, beşgen, altıgen ve sekizgen açıklıkların kenarları, kare açıklığın kenarlarına içten degecek şekilde ayarlanmıştır [12]. İkincisinde ise bütün açıklıkların alanı 2500 mm^2 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre en iyi performansı gösteren açıklık geometrisi hakkında çıkarımlar yapılmıştır.

Birinci uygulamada Şekil 3.3 ile verildiği gibi bütün açıklıkların kenarı karenin kenarlarına içten teğet ve bütün açıklıklar eşmerkezli olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3.4 ile kutuların elektrik alan EE değerleri gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en iyi performansı üçgen açıklık göstermiştir. Üçgen ile kare açıklıklar arasındaki elektrik alan EE değeri farkı yaklaşık 10 dB'dir. Üçgen açıklığa benzer olarak en iyi performansı gösteren ikinci açıklık beşgendir. İki açıklık geometrisi arasında yaklaşık 1 dB'lik fark bulunmaktadır. Üçgen ve beşgen açıklıkların rezonans frekansı 0,713 GHz, diğer açıklıkların rezonans frekansı ise 0,712 GHz'dir.

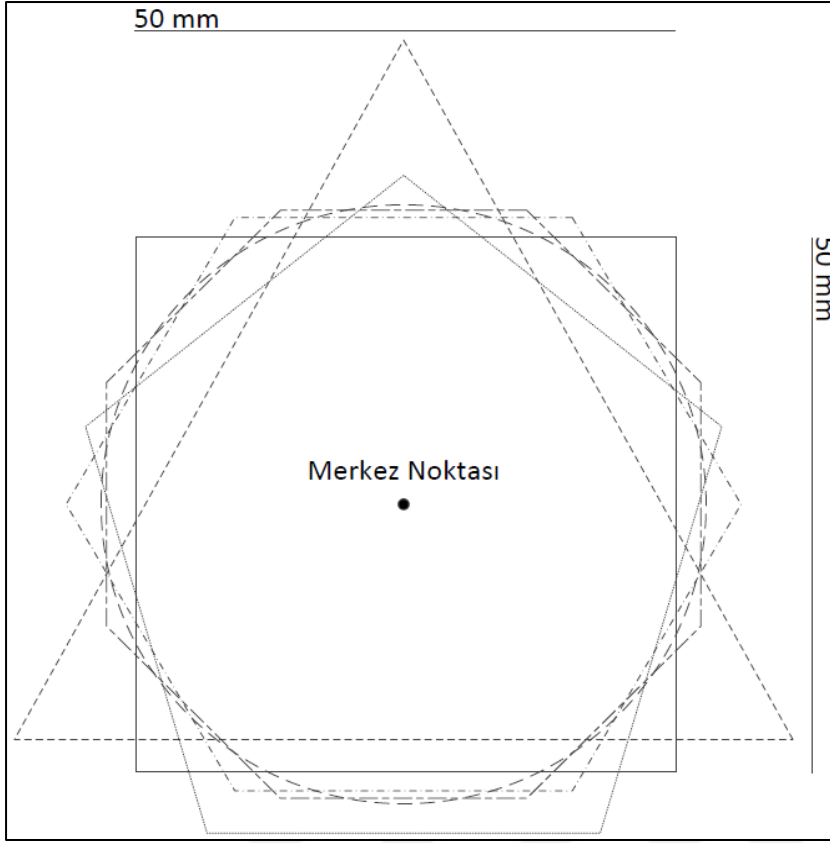
İkinci uygulamada ise bütün açıklıkların alanı 2500 mm^2 olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.5 ile verildiği gibi bütün açıklıklar eşmerkezlidir. Şekil 3.6 ile kutuların elektrik alan EE değerleri gösterilmiştir. Çıkan sonuçlara göre en kötü performansı üçgen açıklık göstermiştir. Daire, kare, beşgen, altıgen ve sekizgen açıklık geometrilerinin elektrik alan EE değerleri hemen hemen aynı çıkmıştır. Üçgen açıklık ile diğerleri arasında yaklaşık olarak 2 dB'lik fark bulunmaktadır. Üçgen açıklığın rezonans frekansı 0,711 GHz iken diğer açıklıkların rezonans frekansları 0,712 GHz'dir.



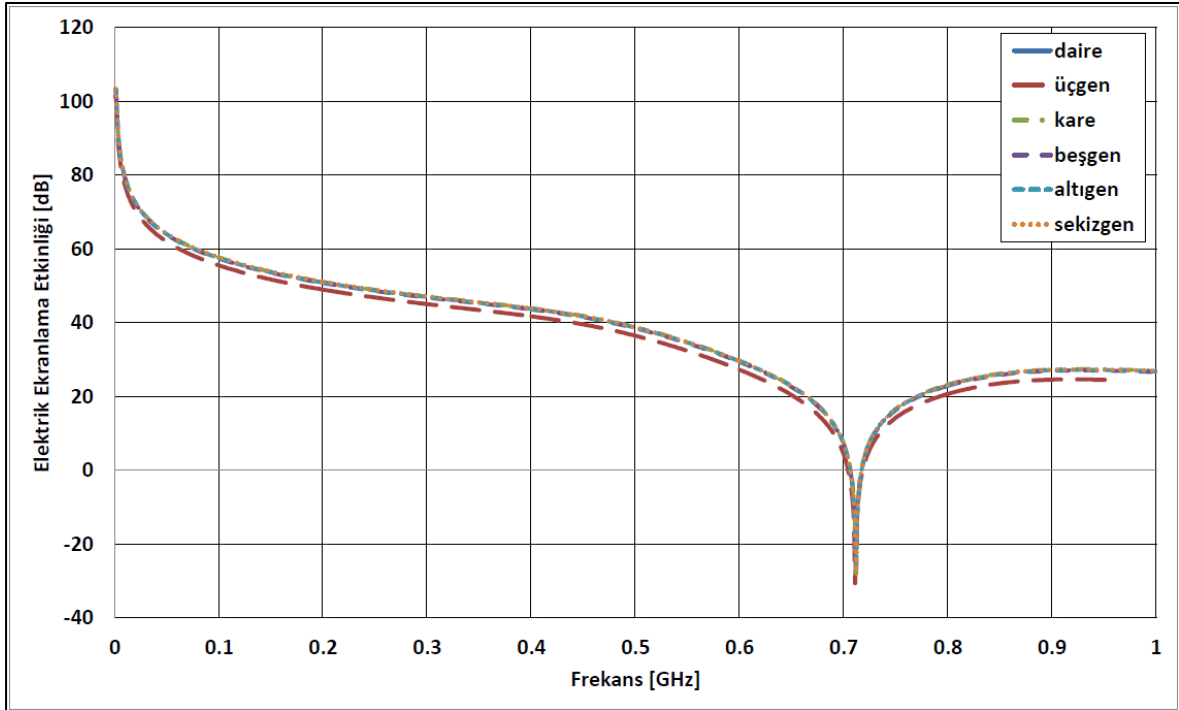
Şekil 3.3. Birinci uygulamada açıklık geometrilerinin gösterimi



Şekil 3.4. Birinci uygulama için kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST)



Şekil 3.5. İkinci uygulamada açıklık geometrilerinin gösterimi



Şekil 3.6. İkinci uygulama için kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST)

Kapalı metalik bir kutunun ekranlama performansının çok iyi olabilmesi için kutunun sürekliliğinin sağlanması gerekir. Diğer bir deyişle kutu üzerinde herhangi bir açıklığın olmaması gerekir. Fakat elektronik sistemlerin tasarımını yaparken havalandırma, ekran, giriş/çıkış portları, düğme yerleri, vb. gibi sebeplerden dolayı kapalı metalik kutular üzerinde delikler açılması durumunda kalınabilir. Sonuç olarak ise bu açıklıklar metalik yapıların ekranlama performansının düşmesine neden olur. Birinci uygulamada elde ettiğimiz sonuçlara göre özellikle havalandırmadan dolayı kutu üzerinde belirli sınırlar içerisinde delik açmak gerekirse en iyi seçenekler üçgen ve beşgen geometrilere dir. Fakat havalandırmada havanın rahat giriş çıkışı için açıklığın geniş olması da gerekmektedir. Bu durum da göz önüne alındığı zaman en iyi tercih edilebilecek açıklık geometrisinin beşgen olduğu çıkarımı yapılabilir. İkinci uygulamada ise aynı alana sahip açıklıkların elektrik alan EE üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Bu durumda en iyi tercih edilebilecek açıklık geometrisi karedir diyebiliriz. Çünkü kare açıklık, diğer geometrilere göre daha küçük sınırlar içerisinde kalmaktadır.

3.3. Açıklık Sayısı

Kapalı metalik kutuların üzerindeki açıklık sayısı arttıkça elektrik alan EE değeri azalmaktadır. Turner vd'leri bu azalmayı " $-10 \log_{10} n$ " olarak ifade etmiştir. Bu ifadedeki n değeri toplam açıklık sayısını temsil etmektedir [16].

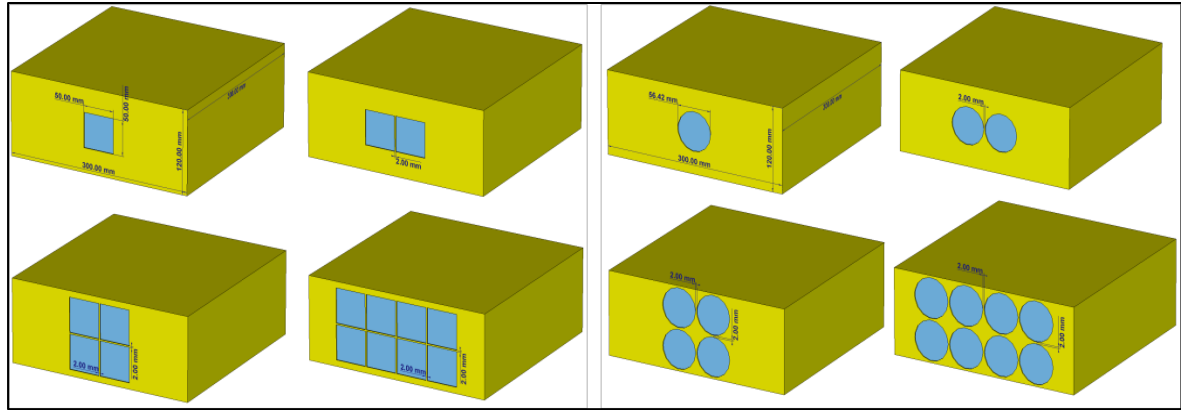
Çalışmanın bu kısmında Şekil 3.7 ile gösterilen kare ve dairesel geometrideki 1, 2, 4 ve 8 açıklığa sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri hesaplanmıştır. Açıklıklar arası mesafe 2 mm olarak ayarlanmıştır. Hesaplamalar TLM ve CST kullanılarak yapılmıştır.

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 ile kare açıklıklara sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri verilmiştir. Kutular üzerindeki açıklık sayısı arttıkça elektrik alan EE ve rezonans frekansı değerleri düşmektedir. Benzer durum dairesel açıklıklar için de geçerlidir. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 ile dairesel açıklıklara sahip kutuların elektrik alan EE değerleri verilmiştir. Dairesel açıklıkların rezonans frekansı değerlerinin kareye göre daha az değişiklik gösterdiği görülmüştür. Çizelge 3.1 ile kutuların rezonans frekansı değerleri verilmiştir. Elektrik alan EE değerleri rezonans frekanslarında minimum olmaktadır.

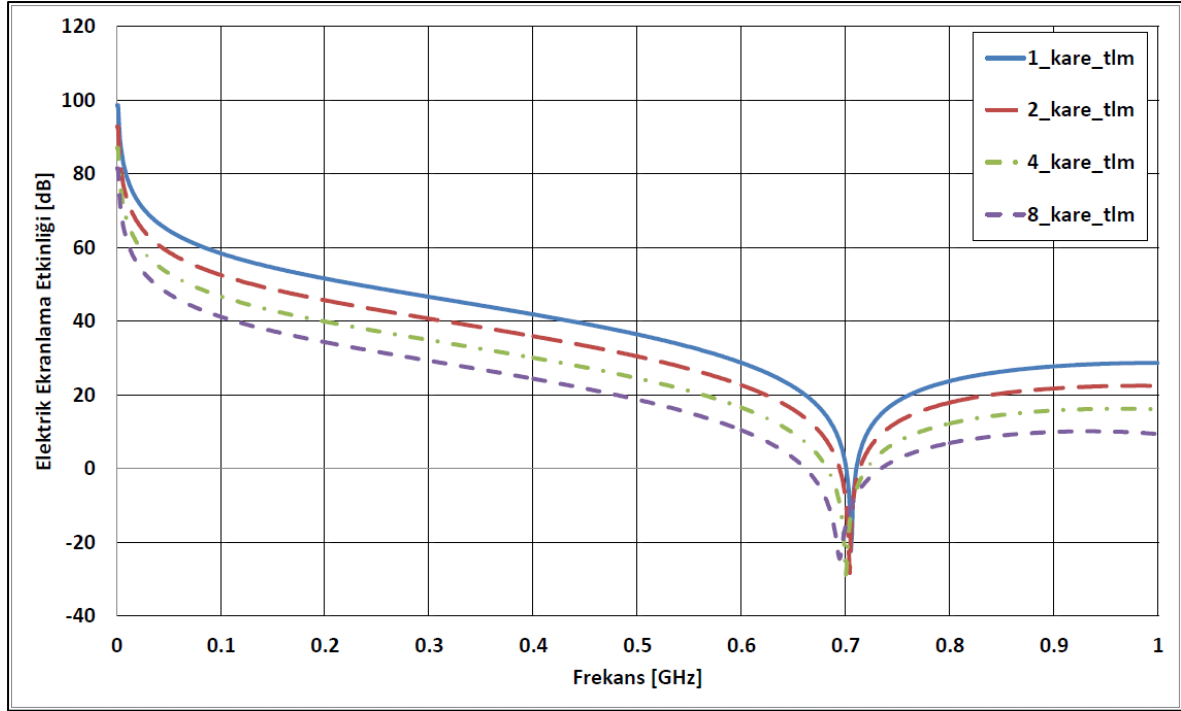
TLM ve CST ile hesaplanan sonuçlar karşılaştırıldığı zaman kutuların rezonans frekanslarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. 1 kare açıklık için rezonans frekansı değerleri TLM ile 0,705 GHz ve CST ile 0,712 GHz olarak hesaplanmıştır. Açıklık sayısı arttıkça sonuçların birbirlerine daha çok yaklaştığı görülmüştür. TLM ve CST ile hesaplanan rezonans frekansı değerleri arasında 8 kare açıklık için 2 MHz'lik ve 8 daire açıklık için 6 MHz'lik fark bulunmaktadır. Şekil 3.12 ile de örnek olması açısından 1 ve 8 kare açıklıklar için CST ve TLM ile hesaplanan elektrik alan EE değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen grafiklere göre her iki yöntemle hesaplanan değerler birbirine çok yakın çıkmıştır.

Çizelge 3.1. Kutuların rezonans frekansı değerleri

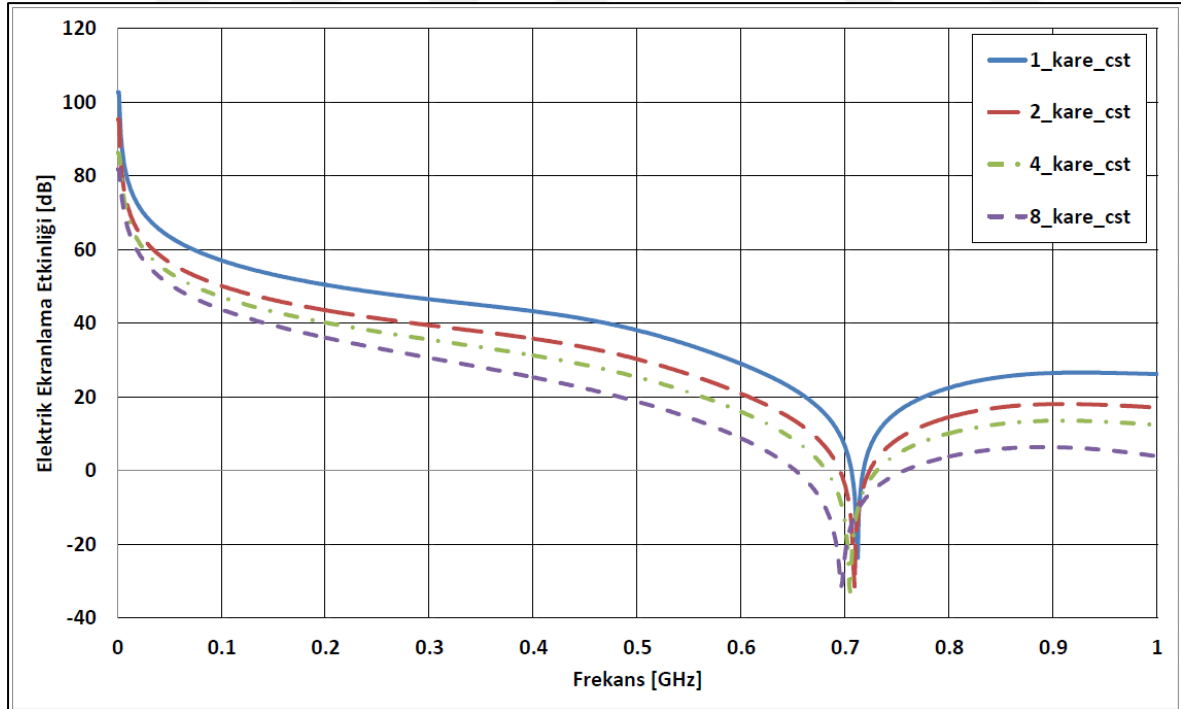
Açıklık Sayısı	Rezonans Frekansı Değeri [GHz]			
	Kare Açıklık		Daire Açıklık	
	TLM	CST	TLM	CST
1	0,705	0,712	0,705	0,712
2	0,704	0,709	0,704	0,709
4	0,700	0,705	0,700	0,706
8	0,694	0,696	0,694	0,700



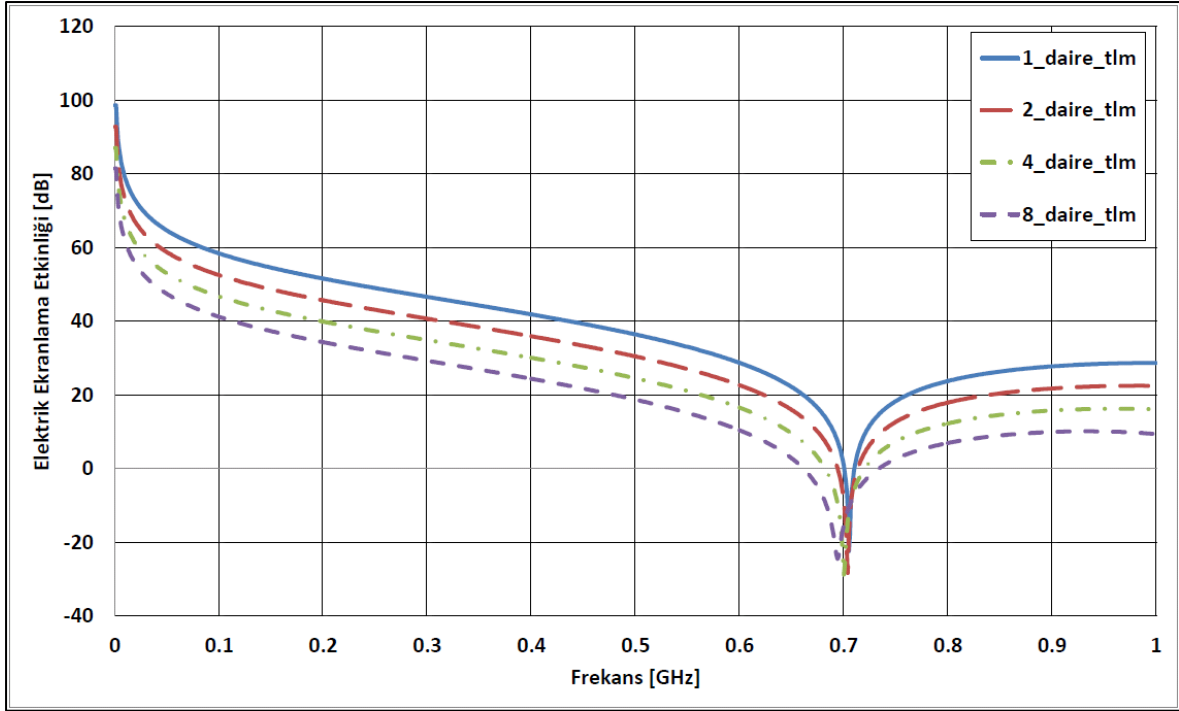
Şekil 3.7. Kare (sol) ve daire (sağ) açıklıklara sahip kapalı metalik kutular (CST)



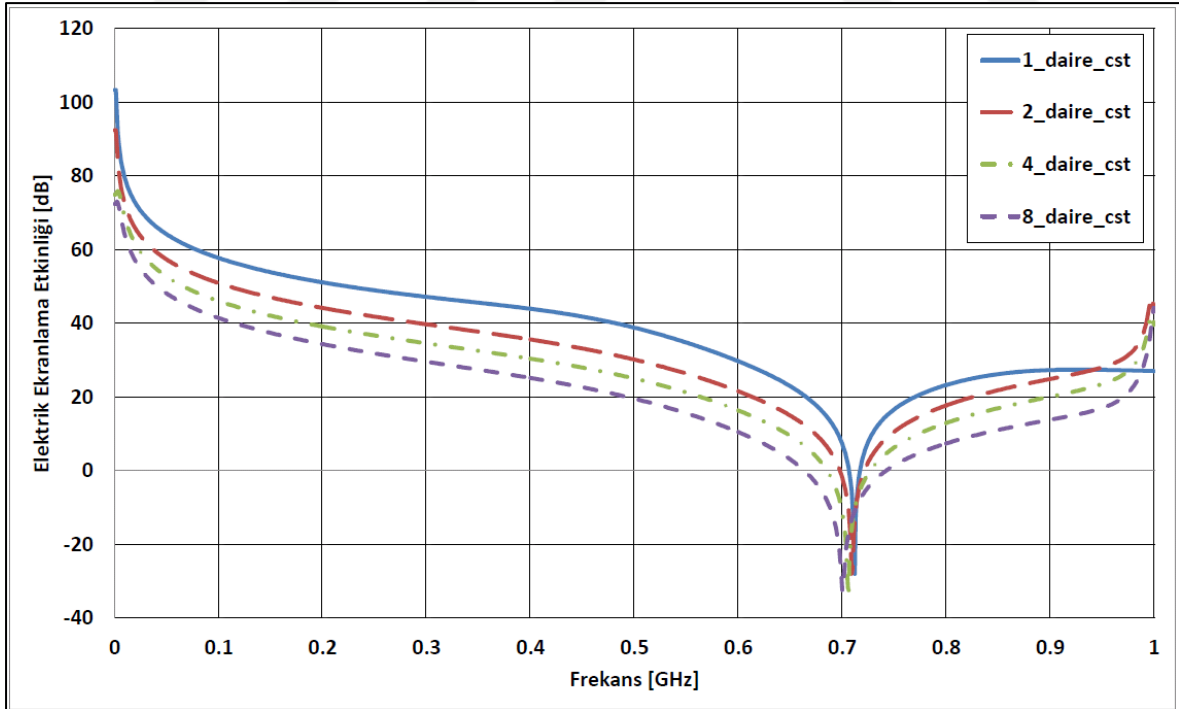
Şekil 3.8. Farklı sayıda kare açıklığa sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (TLM)



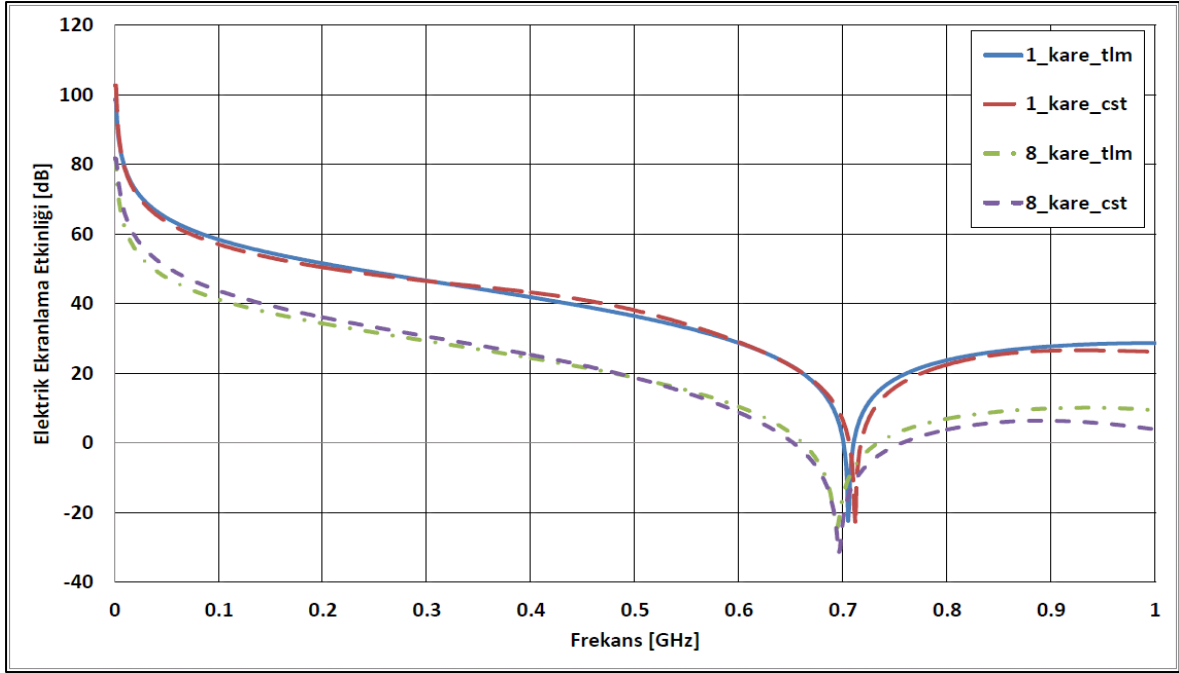
Şekil 3.9. Farklı sayıda kare açıklığa sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST)



Şekil 3.10. Farklı sayıda daire açıklığa sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (TLM)



Şekil 3.11. Farklı sayıda daire açıklığa sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST)



Şekil 3.12. TLM ve CST ile hesaplanan sonuçların karşılaştırılması

3.4. Açıklıkların Yükseklik / Genişlik Oranı

Bu çalışmada ise dikdörtgen açıklığın alanı sabit tutularak genişlik / yükseklik oranının elektrik alan EE değerine olan etkisi TLM ve CST kullanılarak incelenmiştir. 8 farklı konfigürasyondaki w (yükseklik) ve l (genişlik) değerleri Çizelge 3.2 ile verilmiştir. Bütün açıklıkların alanı 2500 mm^2 'dir.

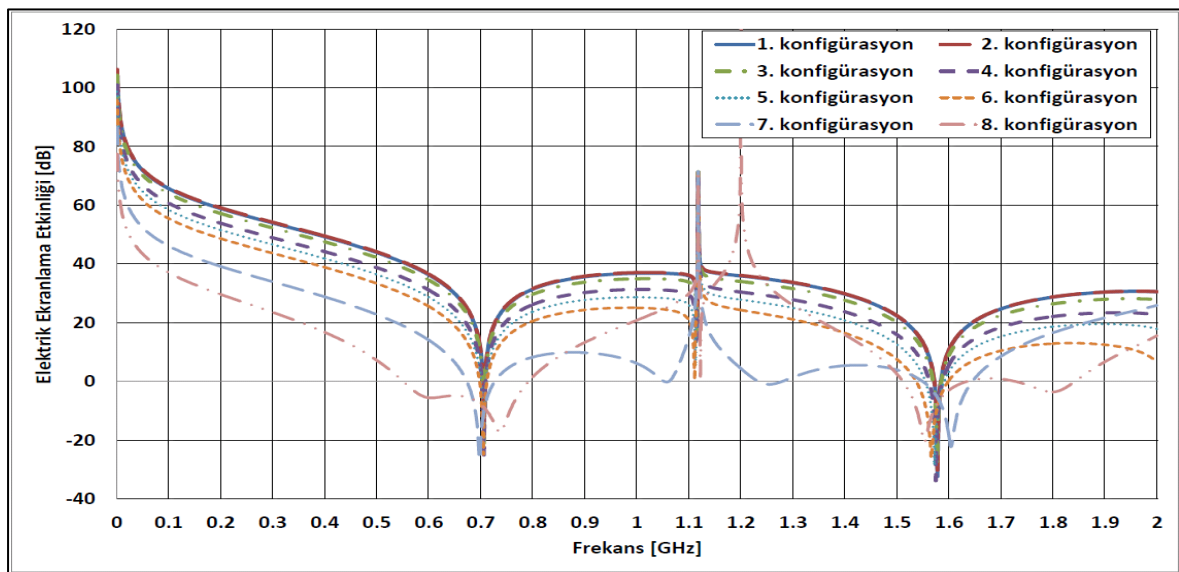
Çizelge 3.2. Açıklıkların yükseklik / genişlik oranına göre konfigürasyon türleri

Konfigürasyon Türü	w [mm]	l [mm]	w/l Oranı
1	120	20,83	5,76
2	100	25	4
3	80	31,25	2,56
4	60	41,667	1,44
5	50	50	1
6	40	62,5	0,64
7	20	125	0,16
8	10	250	0,04

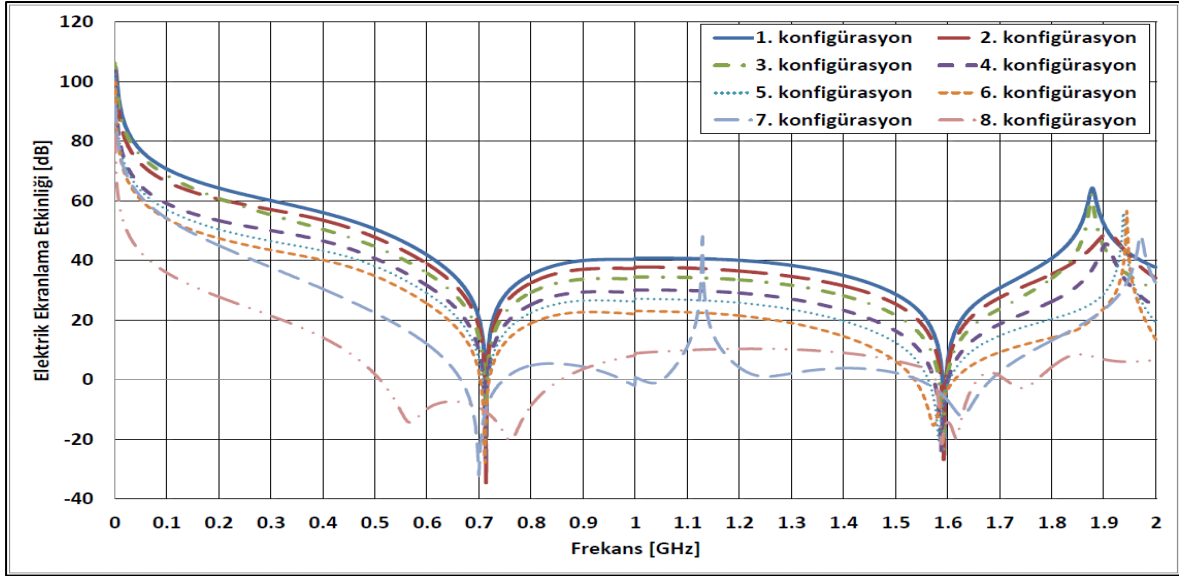
Şekil 3.13 ve Şekil 3.14 ile verilen sonuçlara göre en iyi performansı 1. ve 2. konfigürasyon göstermiştir. 1. ile 2. konfigürasyon arasında TLM ile hesaplanan sonuçlara göre 0,3 dB'lik fark bulunmaktadır. w / l oranı azaldıkça kutunun elektrik alan EE performansı da düşmektedir. Elde edilen sonuçlara göre en kötü performansı 8. konfigürasyon göstermiştir. Bu konfigürasyonda kutunun rezonans frekansı 2 tanedir ve kutunun her iki metot ile hesaplanan elektrik alan EE değeri yaklaşık 0,5 GHz'den sonra sıfırın altına düşmektedir [17].

Çizelge 3.3. Kutuların rezonans frekansı değerleri

Konfigürasyon Türü	Rezonans Frekansı Değeri [GHz]	
	TLM	CST
1	0,706	0,713
2	0,706	0,713
3	0,706	0,713
4	0,706	0,712
5	0,705	0,712
6	0,705	0,711
7	0,697	0,699
8	0,605 ve 0,737	0,567 ve 0,760



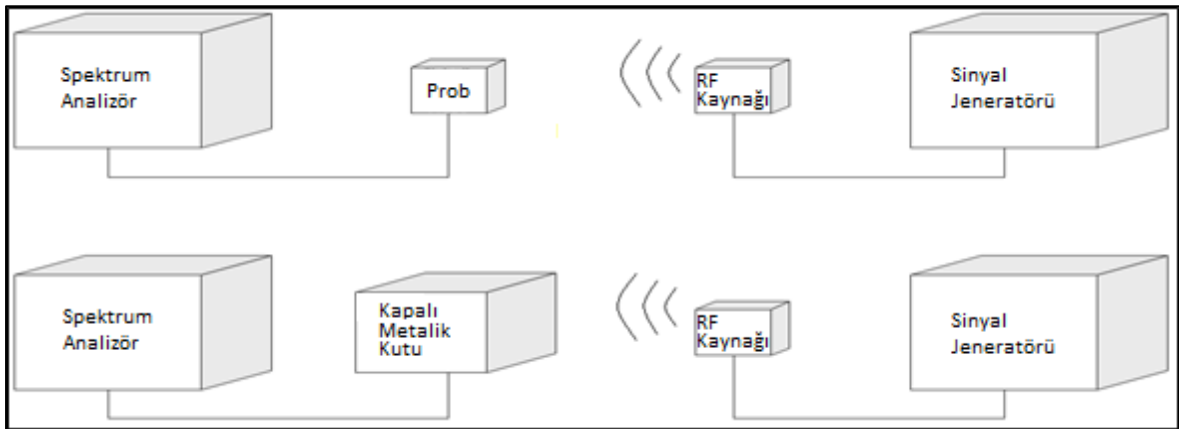
Şekil 3.13. w / l oranına göre kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (TLM)



Şekil 3.14. w/l oranına göre kapalı metalik kutuların elektrik alan EE değerleri (CST)

3.5. Ölçüm Sonuçları

Tezin bu bölümünde tek açıklığın kapalı metalik kutunun elektrik alan EE'ne olan etkisi 0,700 – 0,720 GHz aralığında ölçüm yapılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için TÜBİTAK SAGE'deki Elektromanyetik Uyumluluk Laboratuvarı'nda bir test düzeneği kurulup kapalı kutunun rezonans frekansı belirlenmiştir. Test düzeneği Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 ile verilmiştir. Bu düzenekte Keysight EXG Analog Signal Generator N5173B, Keysight N9322C Spectrum Analyzer ve elektrik alan probları kullanılmıştır. RF kaynağı olarak bir tane microstrip patch anten tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Antenin 0,700 – 0,720 GHz aralığındaki S11 değerleri Şekil 3.18 ile verilmiştir.



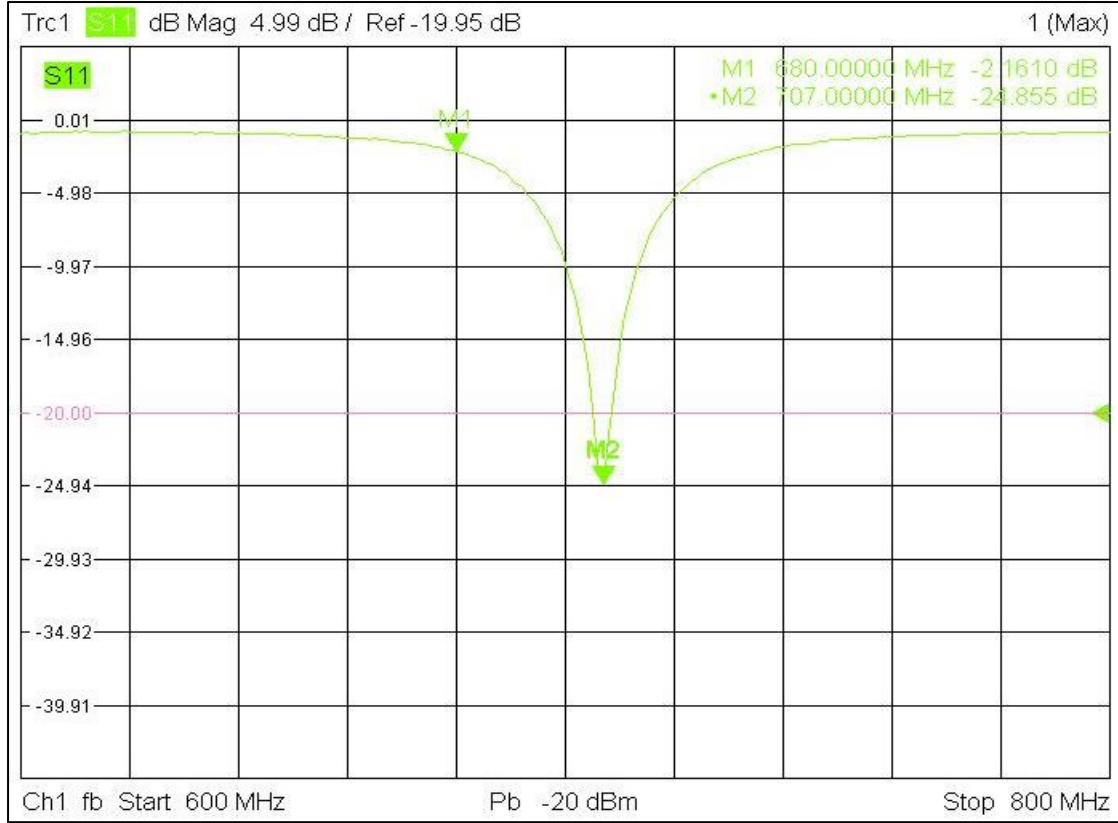
Şekil 3.15. Test düzeneği



Şekil 3.16. Test cihazları



Şekil 3.17. Test ortamı

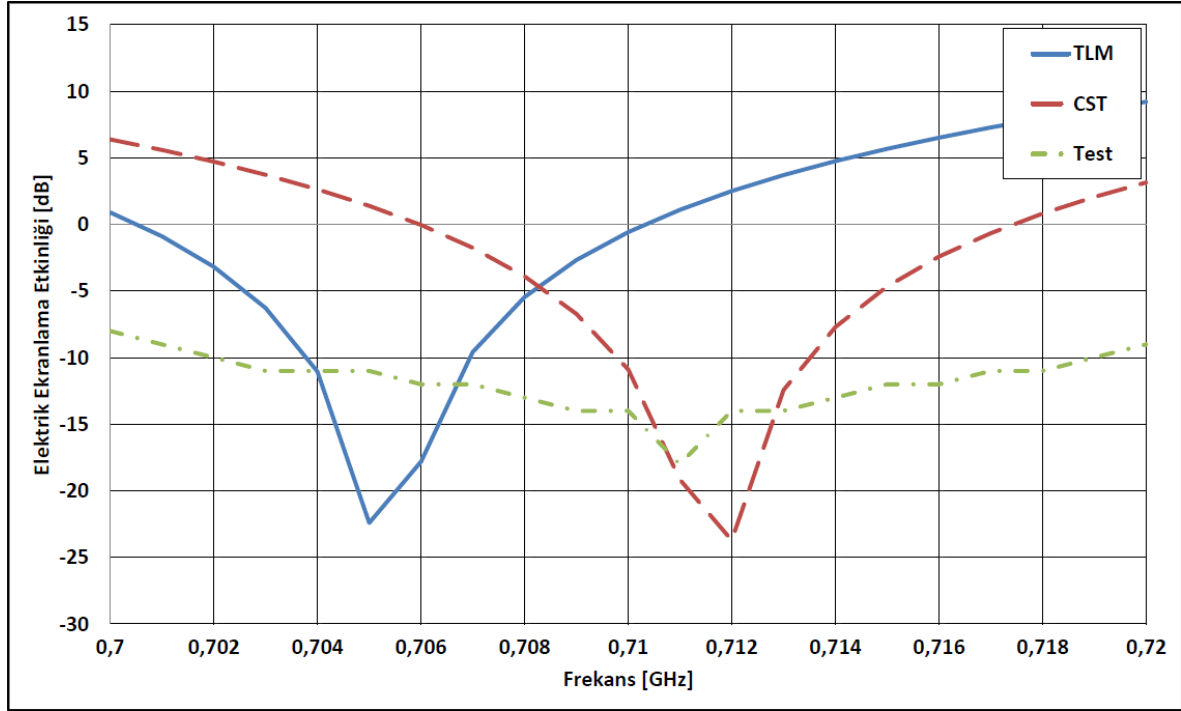


Şekil 3.18. Microstrip patch antenin S11 grafiği

Ölçüm yapılırken ilk başta kutu olmadan ortamda bulunan elektrik alan değeri ölçülmüştür. Daha sonra elektrik alan probu kutunun içine yerleştirilerek kutunun içindeki elektrik alan değeri ölçülmüştür. İlk durumda ölçülen elektrik alan değerinden ikinci durumda ölçülen değer çıkartılarak kutunun elektrik alan EE değeri hesaplanmıştır. Ölçümler frekanslar her seferinde 1 MHz artırılarak yapılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kutunun rezonans frekansı 0,711 GHz çıkmıştır. Kutunun rezonans frekansı değeri TLM ile hesaplandığında 0,705 GHz ve CST ile analiz edildiğinde 0,712 GHz çıkmıştır. Bütün sonuçlar Şekil 3.19 ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Kutunun rezonans frekansı değerleri

Yöntem	Rezonans Frekansı Değeri [GHz]
TLM	0,705
CST	0,712
Test	0,711



Şekil 3.19. Belirleme yöntemine göre tek açıklığa sahip kapalı metalik kutunun elektrik alan EE değeri



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında çeşitli sayıda ve geometride açıklıklara sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan ekranlama etkinliği değerleri teorik çözümler ve simülasyon programı CST ile hesaplanmıştır.

Bölüm 3.2’de daire, üçgen, beşgen, altıgen ve sekizgen açıklık türlerinin kapalı metalik kutuların elektrik alan ekranlama etkinliği değerleri üzerindeki etkisi 0,001 – 1 GHz aralığında incelenmiştir. Bu bölümde yapılan iki uygulamanın birincisinde bütün açıklıkların kenarı karenin kenarına degecek şekilde ayarlanmıştır. Çıkan sonuçlara göre en iyi performansı üçgen ve beşgen açıklıklar göstermiştir. Bu sonuçlara göre eğer kutu üzerindeki belli bir alan içerisinde özellikle havalandırma amaçlı delik açmak gerekirse beşgen tercih edilebilir. İkinci uygulamada ise bütün açıklıkların alanı sabit tutulmuştur. Bu durumda ise daire, kare, beşgen ve altıgen açıklıkların elektrik alan ekranlama etkinliği değerleri hemen hemen aynı çıkmıştır. Bu durumda ise en iyi tercih edilebilecek açıklık türü karedir, çünkü kare açıklığın sınırları diğer açıklıkların içinde kalmaktadır.

Bölüm 3.3’te açıklık sayılarının elektrik alan ekranlama etkinliği değerlerine olan etkisi 0,001 – 1 GHz aralığında incelenmiştir. Açıklık sayısı arttıkça elektrik alan ekranlama etkinliği değerlerinin ve rezonans frekanslarının düştüğü görülmüştür. Dairesel açıklıkların rezonans frekansı değerleri, kareninkilere göre daha az değişiklik göstermiştir. Bu bölümdeki çalışmalar TLM ve CST kullanılarak yapılmıştır. Her iki yönetime göre yapılan hesaplamalar karşılaştırıldığı zaman sonuçların birbirine çok yakın çıktığı görülmüştür.

Bölüm 3.4’te açıklıkların alanı sabit tutularak açıklıkların yükseklik / genişlik oranlarına göre elektrik alan ekranlama etkinliği değerleri 0,001 – 2 GHz aralığında incelenmiştir. Yükseklik / genişlik oranı azaldıkça kutunun elektrik alan ekranlama etkinliği performansı da düşmektedir. Gelen dalganın kutuplanma yönü açıklığın yükseklik / genişlik oranı bakımından önemlidir. Eğer elektrik alanın kutuplanma yönü yatay ekseninde olacak şekilde çalışmalar yapılsaydı bu sefer elektrik alan ekranlama etkinliği değerinin yükseklik / genişlik oranı azaldıkça daha iyi olması beklenirdi. Bu sebepten dolayı bu çalışmalar yapılırken açıklığın elektrik alanın polarizasyon yönüne dikkat edilmelidir.

Bölüm 3.5'te ise tek açıklığa sahip kapalı metalik kutunun elektrik alan ekranlama etkinliği değeri 0,700 – 0,720 GHz aralığında ölçüm yapılarak incelenmiştir. Bunun için bir test düzeneği kurulup kutunun rezonans frekansı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu frekans aralığında kutunun rezonans frekansı değeri 0,711 GHz çıkmıştır.

Bütün çalışmalarda kutuların rezonans frekanslarında elektrik alan ekranlama etkinliği değerlerinin minimum olduğu ve sıfır ekseninin altına düştüğü görülmüştür. Bu sebepten dolayı elektrik ve elektronik sistemler için ekranlama yaparken rezonans frekansı değerlerine mutlaka dikkat edilmesi gerekmektedir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda benzer ve yüksek frekanslar için manyetik alan ekranlama etkinliği değerleri için incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Dural, G. (2008). *EMI / EMC*. ODTÜ, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara.
2. İnternet: Cobain, I. (15 Ekim 2017). URL: <https://www.theguardian.com/uk-news/2017/oct/15/revealed-full-story-behind-sinking-of-falklands-warship-hms-sheffield>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2019
3. Üstüner, F. (2010). *Elektromanyetik Uyumluluğa Giriş ve Temel Kavramlar*. TÜBİTAK, UEKAE, Kocaeli.
4. İnternet: Naval History and Heritage Command URL: <https://www.history.navy.mil/browse-by-topic/disasters-and-phenomena/forrestal-fire.html>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2019
5. Derman, K (2006). *Şebeke frekanslı magnetik alan ekranlaması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, p. 14-15.
6. NATO International Staff - Defence Investment Division (2011). *AECTP-500, Electromagnetic environmental effects test and verification (Edition 4)*, p. Leaflet 508/4-4 – 508/4-H7.
7. Department of Defense (2015). *MIL-STD-461G, Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment*, p. 88.
8. Arı, N. ve Özen, Ş. (2008). *Elektromanyetik Alanlar*. Türkiye: Palme Yayıncılık. p. 33, 51-53, 109.
9. Cheng, D. K. (1989). *Field and Wave Electromagnetics*. Syracuse, NY, UK: Addison Wesley Publishing Company. ch. 8.
10. Arı, N. ve Özen, Ş. (2008). *Elektromanyetik Uyumluluk*. Türkiye: Palme Yayıncılık. p. 38-40,
11. Robinson, M. P., Benson, T. M., Christopoulos, C., Dawson, J. F., Ganley, M. D., Martin, A. C., Porter, S. J. ve Thomas, D. W. P. (Ağustos 1998). Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, cilt 40, no:3 p. 240-248.
12. Ilgar, T. M., Bulut, M. ve Saka, B. (2015). Shielding effectiveness for metallic enclosures with various aperture shapes. *URSI AT-RASC Conference*.
13. Gupta, K. C., Garg, R., ve Bahl, I. J. (1979). *Microstrip Lines and Slotlines*. Norwood, Massachusetts: Artech House, ch. 7.
14. Dawson, J. F., Ahmadi, J., ve Marvin, A. C. (Eylül 1992). Reduction of radiated emissions from apertures in resonant enclosures by the use of absorptive materials. Edinburgh, U.K. *in 8th Int. Conf. Electromagn. Compat, Edinburgh, p 207-212*.

15. Woods, I. D. (1971). Admittance transformation using precision air-dielectric coaxial lines and connectors. *Proc. Inst. Elect. Eng, cilt 118, p. 1667-1674.*
16. Turner, J. D., Benson, T. M., Christopoulos, C., Thomas, D. W. P., Robinson, M. P., Dawson, J. F., Ganley, M. D., Marvin, A. C., ve Porter, S. J. (Eylül 1996). Characterization of the shielding effectiveness of equipment cabinets containing apertures. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, p. 574-578. Rome, Italy.*
17. Çopur, H. ve Afacan, E (2018). Çeşitli açıklıklara sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan ekranlama etkinliğinin tahmini. *BİLMES, p. 769-776.*
18. Ott, H. W. (2011). *Electromagnetic Compatibility Engineering*. John Wiley & Sons Yayıncılık. p. 694-697



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇOPUR, Hüseyin
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 07.08.1992, Gaziantep
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (549) 641 44 29
 Faks : -
 e-mail : huseyin.copur@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	Devam ediyor
Lisans	Hacettepe Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	2015
Lise	Tokat Anadolu Lisesi	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015 – Halen	TÜBİTAK – SAGE	Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Çopur, H. ve Afacan, E (2018). Çeşitli açıklıklara sahip kapalı metalik kutuların elektrik alan ekranlama etkinliğinin tahmini. *BİLMES*, p. 769-776.

Hobiler

Kitap okuma, maraton koşuları, dağcılık, kampçılık, tırmanış, fitness, yüzme, tiyatro, sinema





GAZİ GELECEKTİR..