

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KABLOLARDA MEYDANA GELEN ÇAPRAZ KARIŞMANIN TEMPEST
AÇISINDAN ANALİZİ VE SİMÜLASYONU**

VEYİS SOLAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. MUHAMMET GARİP**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOLARDA MEYDANA GELEN ÇAPRAZ KARIŞMANIN TEMPEST
AÇISINDAN ANALİZİ VE SİMÜLASYONU**

Veyis SOLAK tarafından hazırlanan tez çalışması 20.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Muhammet GARİP
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Muhammet GARİP
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman Hakan ÜNDİL
İstanbul Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mustafa BAYSAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde ve hazırlanmasında ilgi ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Muhammet GARİP'e, tez süresince bilgi ve tecrübelerini paylaşan Yrd. Doç. Dr. Bektaş ÇOLAK'a, tezin her aşamasında bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen değerli ekip arkadaşım Dr.Hasan Seçkin EFENDİOĞLU'na ve TÜBİTAK BİLGEM TEMPEST Laboratuvarı'ndaki çok kıymetli ekip arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca benim için çok değerli olan yardımları için Zeynep ÇAĞLAR'a ve tüm öğrenim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim canım aileme teşekkürü borç bilirim.

Aralık, 2017

Veyis SOLAK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
BÖLÜM 2	
ELEKTROMANYETİK ALAN VE TEMEL KAVRAMLAR	5
2.1 Vektörel Analiz	5
2.1.1 Koordinat Sistemleri	5
2.1.1.1 Kartezyen Koordinat Sistemi.....	5
2.1.1.2 Silindirik Koordinat Sistemi	6
2.1.1.3 Küresel Koordinat Sistemi	7
2.2 Elektrik Alan	8
2.3 Manyetik Alan	10
2.4 Elektromanyetik Alan.....	11
2.4.1 Maxwell Denklemleri.....	11
2.4.1.1 Yükün Korunumu Yasası.....	12
2.4.1.2 Faraday Yasası	13
2.4.1.3 Amper Yasası	13
2.4.1.4 Gauss Yasası	14

BÖLÜM 3

İLETİM HATLARI VE ÇAPRAZ KARIŞMA.....	15
3.1 İletim Hatları	15
3.1.1 İki iletkenli İletim Hatları	16
3.1.1.1 İletim Hattı Denklemleri.....	17
3.1.1.2 Dağılmış Parametreler	18
3.1.2 Üç iletkenli İletim Hatları	19
3.1.2.1 İletim Hattı Denklemleri.....	21
3.1.2.2 Dağılmış Parametreler	22
3.2 Endüktif-Kapasitif Kuplaj Modeli	23
3.2.1 Frekans Alanında Endüktif-Kapasitif Kuplaj Modeli	23
3.2.2 Ortak Empedans Kuplajı	25
3.2.3 Zaman Alanında Endüktif-Kapasitif Kuplaj Modeli	26
3.3 Çapraz Karışma Ve Ekranlama	27
3.3.1 Dağılmış Parametreler	28
3.3.2 Endüktif ve Kapasitif Kuplaj	29
3.4 Elektriksel Olarak Uzun Olan İletim Hatları İçin Maksimum Çapraz Karışma Seviyelerinin Matematiksel Eşitliklerinin Çıkarılması	33

BÖLÜM 4

TEMPEST	37
4.1 TEMPEST'in Tarihçesi	37
4.2 TEMPEST Nedir ?.....	40
4.2.1 TEMPEST İle ilgili Bazı Terimler.....	41
4.3 TEMPEST Problemi Ve Önlemleri.....	43
4.4 TEMPEST Tesifat	45
4.4.1 KIRMIZI ve SiYAH Kablo Ayrımı	46

BÖLÜM 5

ÇAPRAZ KARIŞMA DENEYLERİ VE SONUÇLARI	47
5.1 Çapraz Karışma Deney Düzenekleri	47
5.1.1 KIRMIZI Güç Kablosu Ve SiYAH Güç Kablosu	47
5.1.1.1 50 cm Uzunluk Ve 0 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları	48
5.1.1.2 50 cm Uzunluk 5 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları	49
5.1.1.3 50 cm Uzunluk 10 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları	50
5.1.1.4 50 cm Uzunluk İçin Yükseklik Karşılaştırmaları	51
5.1.1.5 250 cm Uzunluk Ve 0 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları	52
5.1.1.6 250 cm Uzunluk Ve 5 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları	53
5.1.1.7 250 cm Uzunluk Ve 10 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları	54
5.1.1.8 250 cm Uzunluk İçin Yükseklik Karşılaştırmaları	55
5.1.1.9 500 cm Uzunluk Ve 0 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları	56
5.1.1.10 500 cm Uzunluk Ve 5 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları	57
5.1.1.11 500 cm Uzunluk Ve 10 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları	58
5.1.1.12 500 cm Uzunluk İçin Yükseklik Karşılaştırmaları	59

5.1.1.13 Kablo Uzunluklarının Çapraz Karışma Seviyesine Etkisi	60
5.1.2 KIRMIZI Güç Kablosu Ve SİYAH Veri Kablosu	63
5.1.2.1 5 cm Yükseklik Ve 500 cm Uzunluk için Ölçüm Sonuçları	63

BÖLÜM 6

ÇAPRAZ KARIŞMA SİMÜLASYONU VE SONUÇLARI	67
6.1 CST Programı	67
6.2 KIRMIZI Güç Kablosu Ve SİYAH Güç Kablosu	68
6.2.1 0 cm Yükseklik için Simülasyon Sonuçları	69
6.2.2 5 cm Yükseklik için Simülasyon Sonuçları	70
6.2.3 10 cm Yükseklik için Simülasyon Sonuçları	71

BÖLÜM 7

ÇAPRAZ KARIŞMA ÖLÇÜM VE SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	72
7.1 50 cm Uzunluk için Sonuçların Karşılaştırılması	72
7.1.1 0 cm Yükseklik için Sonuçların Karşılaştırılması	72
7.1.2 5 cm Yükseklik için Sonuçların Karşılaştırılması	74
7.1.3 10 cm Yükseklik için Sonuçların Karşılaştırılması	77

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	85

SİMGE LİSTESİ

F	Elektrik kuvveti
k	Coulomb sabiti
Q	Elektrik yükü
ε_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ε_r	Ortamın dielektrik sabiti
E	Elektrik alan
D	Elektrik akı yoğunluğu
σ	Ortamın elektriksel iletkenliği
J	Akım yoğunluğu
v	Hız
B	Manyetik akı yoğunluğu
H	Manyetik alan şiddeti
μ	Ortamın manyetik geçirgenliği
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
S	Kapalı yüzey alanı
C	Kapalı yüzey alanını çevreleyen sınır uzunluğu
λ	Dalga boyu
I	Bir iletkenden geçen akım
V_S	Kaynak gerilimi
R_S	Kaynak direnci
R_L	Yük direnci
c	Kapasite
l	Endüktans
t	Zaman
f	Frekans
L	Hattın uzunluğu
R_{NE}	Yakın kenar sonlandırma direnci
R_{FE}	Uzak kenar sonlandırma direnci
V_G	Üretici devre gerilimi
I_G	Üretici devre akımı

V_R	Alıcı devre gerilimi
I_R	Alıcı devre akımı
V_{NE}	Yakın kenar sonlandırma direnci üzerindeki gerilim düşümü
V_{FE}	Uzak kenar sonlandırma direnci üzerindeki gerilim düşümü
l_G	Verici devrenin dağılmış endüktans parametre değeri
l_R	Alıcı devrenin dağılmış endüktans parametre değeri
l_C	Verici ve alıcı devrenin ortak dağılmış endüktans parametre değeri
c_G	Verici devrenin dağılmış kapasitans parametre değeri
c_R	Alıcı devrenin dağılmış kapasitans parametre değeri
c_M	Verici ve alıcının devrenin ortak dağılmış kapasitans parametre değeri
h_G	Üretici iletkenin toprak düzleminde yüksekliği
h_R	Alıcı iletkenin toprak düzleminde yüksekliği
s	İletkenler arası mesafe
r_{WG}	Üretici iletkenin yarıçapı
r_{WR}	Alıcı iletkenin yarıçapı
\mathcal{G}	Işık hızı
V_0	Referans iletkenin üzerindeki gerilim düşümü
R_0	Referans iletkenin direnci
r_{SH}	Ekranlı kablunun ekranının yarıçapı
t_{SH}	Ekranlı kablunun ekranının kalınlığı
f_{SH}	Ekranlı kısmın kesim frekansı
l_{GS}	Üretici iletken ile ekranlı alıcı kablunun ekranı arasındaki endüktans değeri
l_{RS}	Alıcı iletken ile ekranı arasındaki endüktans değeri
c_{GS}	Üretici iletken ile ekranlı alıcı kablunun ekranı arasındaki kapasitans değeri
c_{RS}	Alıcı iletken ile ekranı arasındaki kapasitans değeri
Z_{01}	Üretici devrenin karakteristik empedansı
Z_{02}	Alıcı devrenin karakteristik empedansı
Z_S	Kaynak empedansı
γ	Propagasyon sabiti
Z_{NE}	Alıcı hattın yakın kenar sonlandırma empedansını
Z_{FE}	Alıcı hattın uzak kenar sonlandırma empedansını
Z_L	Yük empedansı
Γ_L	Yük tarafındaki yansımaya katsayısı
Γ_S	Kaynak tarafındaki yansımaya katsayısı
Γ_{NE}	Alıcı hattın yakın kenarındaki yansımaya katsayısı
Γ_{FE}	Alıcı hattın uzak kenarındaki yansımaya katsayısı
dB	Desibel

KISALTMA LİSTESİ

PCB	Printed Circuit Board
MTLs	Multiconductor Transmission Lines
NSA	National Security Agency
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
TEM	Transverse Electromagnetic Mode
RF	Radio Frequency
CE	Conducted Emissions
RE	Radiated Emissions
NATO	North Atlantic Treaty Organization
TSK	Türk Silahlı Kuvvetleri
SDIP-27	NATO TEMPEST Requirements And Evaluation Procedures
SDIP-29	Facility Design Criteria and Installation of Equipment for the Processing of Classified Information
MST-401	Türk Silahlı Kuvvetleri TEMPEST Test Yönergesi
MY-401	Türk Silahlı Kuvvetleri TEMPEST yönergesi
CST	Computer Simulation Technology
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu
BİLGEM	Bilişim Ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Kartezyen koordinat sistemi 6
Şekil 2. 2	Silindirik koordinat sistemi..... 7
Şekil 2. 3	Küresel koordinat sistemi 8
Şekil 2. 4	Elektrik alan çizgileri..... 10
Şekil 2. 5	Manyetik alan çizgileri 10
Şekil 2. 6	Sağ el kuralı 11
Şekil 2. 7	Faraday yasası 13
Şekil 2. 8	Amper yasası 14
Şekil 2. 9	Gauss yasası 14
Şekil 3. 1	İki ayrı iletkenle oluşan iki iletkenli iletim hattı..... 16
Şekil 3. 2	Koaksiyel kablodan oluşan iki iletkenli iletim hattı..... 16
Şekil 3. 3	Bir toprak yüzeyi ve bir iletkenle oluşan iki iletkenli iletim hattı 17
Şekil 3. 4	İki iletkenli iletim hattı devre şeması 17
Şekil 3. 5	TEM modu..... 18
Şekil 3. 6	Üç iletkenli iletim hattı devre şeması 20
Şekil 3. 7	Dağılmış parametreler cinsinden üç iletkenli iletim hattı..... 21
Şekil 3. 8	Bir toprak yüzeyi üzerinde bulunan iki iletkenin kesit görünümü 22
Şekil 3. 9	Endüktif-kapasitif kuplaj modeli devre şeması 24
Şekil 3. 10	Ortak empedans kuplaj modeli devre şeması 25
Şekil 3. 11	Alıcı iletkeni ekranlı bir kablo olan iletim hattı devre şeması..... 27
Şekil 3. 12	İletim hattının kesit görünümü 27
Şekil 3. 13	Kapasitif kuplaj devre şeması..... 29
Şekil 3. 14	Endüktif kuplaj devre şeması 30
Şekil 3. 15	Üç iletkenli iletim hattı devre şeması 33
Şekil 4. 1	Denetlenebilir bölge ve kontrollü bölge 43
Şekil 4. 2	TEMPEST kaçakları 44
Şekil 4. 3	KIRMIZI-SİYAH kablo ayırımı kuralı 46
Şekil 5. 1	KIRMIZI ve SİYAH güç kablosu çapraz karışma deney düzeneği 48
Şekil 5. 2	0 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları... 48
Şekil 5. 3	0 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları.... 49
Şekil 5. 4	5 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları... 49
Şekil 5. 5	5 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları.... 50
Şekil 5. 6	10 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları. 50
Şekil 5. 7	10 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları.. 51

Şekil 5. 8	Yüksekliğin yakın kenar çapraz karışma seviyesine etkisi.....	51
Şekil 5. 9	Yüksekliğin uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisi	52
Şekil 5. 10	0 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları...	52
Şekil 5. 11	0 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları	53
Şekil 5. 12	5 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları...	53
Şekil 5. 13	5 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları	54
Şekil 5. 14	10 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları.	54
Şekil 5. 15	10 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları..	55
Şekil 5. 16	Yüksekliğin yakın kenar çapraz karışma seviyesine etkisi.....	55
Şekil 5. 17	Yüksekliğin uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisi	56
Şekil 5. 18	0 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları...	56
Şekil 5. 19	0 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları....	57
Şekil 5. 20	5 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları...	57
Şekil 5. 21	5 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları	58
Şekil 5. 22	10 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları.	58
Şekil 5. 23	10 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları..	59
Şekil 5. 24	Yüksekliğin yakın kenar çapraz karışma seviyesine etkisi.....	59
Şekil 5. 25	Yüksekliğin uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisi	60
Şekil 5. 26	0 cm yükseklik için uzunluğun yakın kenar çapraz karışma seviyesine	
	etkisinin karşılaştırma sonuçları.....	60
Şekil 5. 27	0 cm yükseklik için uzunluğun uzak kenar çapraz karışma seviyesine	
	etkisinin karşılaştırma sonuçları.....	61
Şekil 5. 28	5 cm yükseklik için uzunluğun uzak kenar çapraz karışma seviyesine	
	etkisinin karşılaştırma sonuçları.....	61
Şekil 5. 29	5 cm yükseklik için uzunluğun uzak kenar çapraz karışma seviyesine	
	etkisinin karşılaştırma sonuçları.....	62
Şekil 5. 30	10 cm yükseklik için uzunluğun yakın kenar çapraz karışma seviyesine	
	etkisinin karşılaştırma sonuçları.....	62
Şekil 5. 31	10 cm yükseklik için uzunluğun uzak kenar çapraz karışma seviyesine	
	etkisinin karşılaştırma sonuçları.....	63
Şekil 5. 32	KIRMIZI güç ve SİYAH ekransız veri kablosu çapraz karışma deney düzeneği.	
	64
Şekil 5. 33	KIRMIZI güç ve SİYAH ekranlı veri kablosu çapraz karışma deney düzeneği ...	
	65
Şekil 5. 34	Ekranlı ve ekransız veri kabloları için yakın kenar çapraz karışma seviyesinin	
	karşılaştırma sonuçları	65
Şekil 5. 35	Ekranlı ve ekransız veri kabloları için uzak kenar çapraz karışma seviyesinin .	
	karşılaştırma sonuçları	66
Şekil 6. 1	CST Cable Studio arayüzü.....	68
Şekil 6. 2	3 boyutlu çapraz karışma modeli.....	68
Şekil 6. 3	3 boyutlu çapraz karışma modeli için 0 cm yükseklikteki kabloların yakın	
	kenar çapraz karışma seviyeleri	69
Şekil 6. 4	3 boyutlu çapraz karışma modeli için 0 cm yükseklikteki kabloların yakın	
	kenar çapraz karışma seviyeleri	69
Şekil 6. 5	3 boyutlu çapraz karışma modeli için 5 cm yükseklikteki kabloların çeşitli.....	
	kablo ayrımlarındaki yakın kenar çapraz karışma seviyeleri.....	70

Şekil 6. 6	3 boyutlu çapraz karışma modeli için 5 cm yükseklikteki kabloların çeşitli.... kablo ayrımlarındaki uzak kenar çapraz karışma seviyeleri.....	70
Şekil 6. 7	3 boyutlu çapraz karışma modeli için 10 cm yükseklikteki kabloların çeşitli... kablo ayrımlarındaki yakın kenar çapraz karışma seviyeleri.....	71
Şekil 6. 8	3 boyutlu çapraz karışma modeli için 10 cm yükseklikteki kabloların çeşitli... kablo ayrımlarındaki uzak kenar çapraz karışma seviyeleri.....	71
Şekil 7. 1	0 cm yükseklikteki 0 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	72
Şekil 7. 2	0 cm yükseklikteki 0 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	73
Şekil 7. 3	0 cm yükseklikteki 5 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	73
Şekil 7. 4	0 cm yükseklikteki 5 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	73
Şekil 7. 5	0 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile ... elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	74
Şekil 7. 6	0 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile ... elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	74
Şekil 7. 7	5 cm yükseklikteki 0 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	75
Şekil 7. 8	5 cm yükseklikteki 0 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	75
Şekil 7. 9	5 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile ... elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	75
Şekil 7. 10	5 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile ... elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	76
Şekil 7. 11	5 cm yükseklikteki 20 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile ... elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	76
Şekil 7. 12	5 cm yükseklikteki 20 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile ... elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	76
Şekil 7. 13	10 cm yükseklikteki 2 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile ... elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	77
Şekil 7. 14	10 cm yükseklikteki 2 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile ... elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	77
Şekil 7. 15	10 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile . elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	78
Şekil 7. 16	10 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile . elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	78
Şekil 7. 17	10 cm yükseklikteki 15 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile . elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	78
Şekil 7. 18	10 cm yükseklikteki 15 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile . elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması.....	79

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Genel Maxwell denklemleri [17]	12
Çizelge 2. 2 Serbest uzay için Maxwell denklemleri [17]	12

KABLOLARDA MEYDANA GELEN ÇAPRAZ KARIŞMANIN TEMPEST AÇISINDAN ANALİZİ VE SİMÜLASYONU

Veyis SOLAK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Muhammet GARİP

Günümüzde elektrik, elektronik ve haberleşme teknolojilerindeki gelişmeler elektronik devre tasarımlarındaki boyutların giderek küçülmesine neden olmaktadır ve bu durum elektromanyetik uyumluluk (EMC), elektromanyetik girişim (EMI) ve çapraz karışma açısından sorunlar meydana getirebilmektedir. Ayrıca elektronik devre boyutunda meydana gelebilen bu sorunlar, tesislerdeki güç ve veri kablolarının taşınması esnasında da ortaya çıkabilmektedir. Özellikle tesislerinde elektronik ortamda gizli bilgi işleyen, ileten ve saklayan kurum ya da firmalar (Kamu kurumları, Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) vs.) için bu sorunlar büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle birçok standart ve yönerge çıkarılmıştır ve çıkarılmaya devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında; Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü'nün (NATO) SDIP-29 yönergesi ve Türk Silahlı Kuvvetleri'nin MY-401 yönergesinde belirtilen, KIRMIZI ve SİYAH olarak tanımlanan güç veya veri kablolarının tüm hat boyunca birbirinden en az 10 cm uzakta olması kuralı analiz edilecektir. İlk olarak, bu analizi yapabilmek için kablolar arasında meydana gelen çapraz karışmanın teorik altyapısı verilecektir. Sonra, TEMPEST kavramının nasıl ortaya çıktığından ve bununla birlikte TEMPEST tesisat kurallarından bahsedilecektir. Daha sonra, kablolarda meydana gelen çapraz karışmanın analizi için kurulan düzenekler ile deneyler yapılacak ve elde edilen ölçüm sonuçları yorumlanacaktır. Ayrıca CST programı ile çapraz karışmanın simülasyonu yapılacak ve

elde edilen sonuçlar verilecektir. Son olarak, ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak elde edilen sonuçlarının doğruluğu kontrol edilecektir ve tüm bu bulgular TEMPEST açısından yorumlanacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik uyumluluk, elektromanyetik girişim, çapraz karışma, TSK, NATO, TEMPEST, SDIP-29, MY-401, KIRMIZI kablo, SİYAH kablo, CST



CABLE CROSSTALK ANALYSIS AND SIMULATION IN TERMS OF TEMPEST

Veyis SOLAK

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Muhammet GARIP

Today, advances in electrical, electronic and communication technologies are causing the dimensions of electronic circuit designs to shrink gradually, which can lead to problems in terms of electromagnetic compatibility (EMC), electromagnetic interference (EMI) and crosstalk. These problems, which can occur during the design of electronic circuits, can also occur during the transport of power and data cables in installations. These problems are of great importance especially for institutions or companies (public institutions, Turkish Armed Forces (TSK) etc.) that process, transmit and store confidential information in their electronic environment. For this reason, many standards and directives have been published and continue to be published.

In this study; the rule of maintaining at least 10 cm separation along the entire wiring line between power or data cables defined as RED and BLACK, which is specified in SDIP-29 standard and MY-401 standard, will be analysed. Firstly, the theoretical background of the crosstalk between the cables will be given in order to perform this analysis. Then we will talk about how the TEMPEST concept emerged and together with TEMPEST installation rules. Then, experiments will be carried out with the devices set up for the analysis of the crosstalk between cables, and the obtained measurement results will be interpreted. In addition, the CST (Computer Simulation Technology) program will simulate the crosstalk and the results will be given. Finally, the accuracy of the results obtained by comparing measurement and simulation results will be checked and all these findings will be interpreted in terms of TEMPEST.

Keywords: Electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, crosstalk, TSK, NATO, TEMPEST, SDIP-29, MY-401, RED cable, BLACK cable



1.1 Literatür Özeti

Literatürde çapraz karışma ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar; kablo tipleri, kablo yükseklikleri ve kablolar arası mesafe gibi çeşitli parametrelerin değiştirilmesinin çapraz karışma üzerindeki etkisi hem teorik hem de deneysel ölçüm ve simülasyonlar ile araştırılmasına dayanmaktadır.

C.R. Paul yaptığı birçok çalışma ile [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] kablolarda meydana gelen yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışmanın hem teorik olarak hem de pratik olarak analizini yapmıştır. Günümüzde de birçok çalışma yapılan bu çalışmalardan esinlenmiştir.

C.R. Paul yaptığı çalışmada [1]; üç iletkenli bir iletim hattını çevreleyen ortamın homojen, lineer, kayıpsız ve hattaki iletkenlerinde aynı uzunlukta, kayıpsız ve paralel olduğu şartlar için iletim hattı denklemlerinin çözümünü ortaya koymuştur ve üç iletkenli iletim hattını dağılmış parametreler cinsinden ifade etmiştir. Bir diğer çalışmasında [2] C.R. Paul; üç iletkenli hatlar için çıkardığı iletim hattı ifadelerini çok iletkenli bir iletim hattı içinde ifade ederek, 20 iletkenli bir şerit kablo için yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışmanın teorik ve pratik sonuçlarını karşılaştırmıştır. Başka bir çalışmasında [3]; C.R. Paul ve J.W. McKnight burgulu çift kablolardaki yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışmanın analizi için iletim hattını dağılmış parametreler cinsinden ifade ederek bir model çıkarmıştır ve deneyler yaparak buldukları sonuçlar ile çıkardıkları modelle teorik olarak buldukları sonuçları karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak [4] C.R. Paul ve J.W. McKnight yine burgulu çift kablolar için düşük

frekanslarda yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışma ifadesini bir başka model (düşük frekans modeli) ile çıkartmışlardır. C.R. Paul çalışmalarına başka bir kablo çeşidi olan ekranlı kablolar ile devam etmiş ve bir başka çalışmasında [5]; bu kablolar içinde bir iletim hattı modeli ifade etmiştir. Bu çalışmasında üç çeşit model (ekransız kablodan-ekransız kabloya, ekranlı kablodan-ekransız kabloya ve ekranlı kablodan-ekranlı kabloya) için yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışma ifadesini çıkarmış, teoriden ve pratikte elde ettiği sonuçları karşılaştırarak çapraz karışma seviyesini analiz etmiştir. 1982 yılındaki bir başka çalışmasında [6] ise; C.R. Paul üç iletkenli iletim hatlarındaki yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışma seviyesinin tahmini için hattı toplu parametreler cinsinden iki parça halinde (kapasitif kuplaj modeli, endükti kuplaj modeli) düşünerek süperpozisyon teoremini kullanmış ve çapraz karışmanın frekans alanında matematiksel eşitliklerini göstermiştir. C.R. Paul 1984 yılındaki çalışmasında [7] ise; üç iletkenli iletim hatlarındaki yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışmanın gerilim transfer fonksiyonunu çıkartarak, bu fonksiyonun frekans cevabını göstermiştir. C.R. Paul 1982 yılında yaptığı çalışmaya [6] ek olarak 1992 yılındaki çalışmayı yapmıştır [8]. Bu çalışmada; üç iletkenli iletim hattındaki referans iletken üzerinde meydana gelen gerilim düşümünde yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışma seviyesine etki edeceğini göstermiştir.

N. Mora vd. yaptıkları çalışmada [9]; C.R. Paul tarafından yapılan çalışmalarla elde edilen düşük frekans modeli için yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışmanın matematiksel ifadesinden bulunan sonuçlarla, C.R. Paul'un deneysel ölçümler için verdiği deney düzeneğiyle yaptıkları ölçümlerle buldukları sonuçları ve simülasyon programında (CST) aynı düzeneği modelleyerek elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır.

Matthew S. Halligan vd. yaptıkları çalışmalarda [10],[11]; literatürde yapılan çapraz karışma çalışmalarının çoğunlukla elektriksel olarak kısa olan hatlar için yapıldığını göz önünde bulundurarak elektriksel olarak uzun olan hatlar için yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışmanın analitik çözümünü göstermişlerdir [11]. Ayrıca buldukları ifadeden elde ettikleri sonuç ile, simülasyon yaparak elde ettikleri sonucu karşılaştırmışlardır.

Kablolar da meydana gelen çapraz karışmanın varlığını gösteren bu çalışmalar neticesinde doğal olarak çoğu ülke, bazı standartlar yayımlamışlardır. Bu standartlar, kablolar arasında meydana gelen çapraz karışmayı önlemek için bazı sınıflandırmalar yaparak kurallar koymuştur. Bu kurallardan biri de; kablolar arasında minimum belirli bir ayırım mesafesinin olmasıdır. B.J.A.M. van Leersum vd. yaptıkları çalışmada [12]; bazı standartlarda geçen bu mesafelerin etkisini incelemek için çeşitli parametreleri değiştirmek (kablo uzunluğu, yükseliği gibi) kurdukları deney düzenekleri ile ölçümler almışlar ve simölasyon programında gerçekleyerek elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Çapraz karışma, kablonun olduğu her yerde meydana gelebileceğinden Fatih Ü. vd. yaptıkları çalışmada [13]; hava aracı kablolarında (güç kabloları, görüntü ve ses kabloları gibi) meydana gelebilecek yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışmanın analizi için kurdukları deney düzenekleri ile ölçümler yapmışlardır.

Arthur T. Bradley vd. ise yaptıkları iki çalışmada [14],[15]; yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışmanın analizi için çeşitli deney düzenekleri ile ölçümler almışlardır. İlk çalışmalarında [14]; bir toprak düzlemi üzerindeki kablolar da (burgulu çift kablolar ve düz kablolar) meydana gelen çapraz karışmayı incemişlerdir. İkinci çalışmalarında [15] ise; ekranlamasının etkisini görmek için deney düzenekleri hazırlamışlardır. Ayrıca bu iki çalışmada da deneyleri simölasyon programıyla gerçekleyerek elde ettikleri sonuçları (ölçüm ve simölasyon) karşılaştırmışlardır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında NATO ve TSK'nın yayımladığı TEMPEST tesisat yönergelerinde (MY-401 ve SDIP-29) geçen KIRMIZI ve SİYAH kabloların birbirinden minimum 10 cm uzakta olması maddesinin analizi amaçlanmaktadır. Bunun için kablolar arasında yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışmanın teorik olarak altyapısı incelenmiş ve ölçümler yapmak için çeşitli parametreler değiştirilerek deney düzenekleri hazırlanmıştır. Ayrıca ölçümlerden elde edilen sonuçlarının doğruluğunun kontrolü için CST programı ile simölasyonlar gerçeklenmiştir. Yapılan tüm çalışmalar sonucu elde edilen bulgular grafiksel olarak verilerek yorumlanmıştır.

1.3 Hipotez

Yapılan alışmalar sonucunda kablolar arası mesafenin çapraz karışmaya etkisi çeşitli parametreler değiştirilerek yapılan deney ve simülasyon çalışmaları ile incelenmiştir. Bu parametrelere bağlı olarak kablolar arası minimum 10 cm olan bir hatta yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışmanın seviyesinin nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Bununla birlikte kablolar arası mesafenin 10 cm'den farklı olması (daha az veya daha fazla) durumunda yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışmanın seviyesinde nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda kablolar arasındaki tüm ayırım mesafelerinde (0 cm, 2 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm ve 50 cm) apraz karışmanın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Fakat TEMPEST açısından meydana gelen bu çapraz karışmanın seviyesinin nasıl bir anlam ifade ettiği standartlarda belirtilmemektedir. Yapılacak yeni çalışmalar ile elde edilen seviyenin TEMPEST açısından nasıl bir tehdit oluşturduğu analiz edilmelidir.

ELEKTROMANYETİK ALAN VE TEMEL KAVRAMLAR

Elektromanyetik, durgun ya da hareket eden elektrik yüklerinin sebep olduğu elektrik ve manyetik olayların ele alındığı bir bilim alanıdır. Bu bilim alanını incelerken bazı nicelik ve kavramlar hakkında temel bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümde bunlardan kısaca bahsedilmektedir.

2.1 Vektörel Analiz

Elektromanyetikte birçok nicelik vektör olarak tanımlandığından, elektromanyetiğe başlamak için vektörler hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Elde edilen sonuçların üç boyutlu uzayda ifade edilebilmesi için uygun bir koordinat sisteminin seçilmesi gerekmektedir. Bu bölümde elektromanyetikte kullanılan üç adet koordinat sisteminden bahsedilecektir.

2.1.1 Koordinat Sistemleri

Kartezyen, silindirik ve küresel koordinat sistemlerinde bulunan bir P noktası, sırasıyla; (x,y,z) , (r,ϕ,z) ve (r,θ,ϕ) koordinatlarıyla tanımlanmaktadır [24].

2.1.1.1 Kartezyen Koordinat Sistemi

Kartezyen koordinat sisteminde Şekil 2.1'de gösterilen bir $P(x,y,z)$ noktası, $x=x_1$, $y=y_1$ ve $z=z_1$ düzlemlerinin kesiştiği noktadır [24]. Sağ el kuralına göre aşağıdaki bağlantılar elde edilmektedir:

$$a_x \times a_y = a_z \quad (2.1)$$

$$a_y \times a_z = a_x \quad (2.2)$$

$$a_z \times a_x = a_y \quad (2.3)$$

Bir \mathbf{A} vektörünün kartezyen koordinatlarda gösterimi aşağıda verilmektedir [24]:

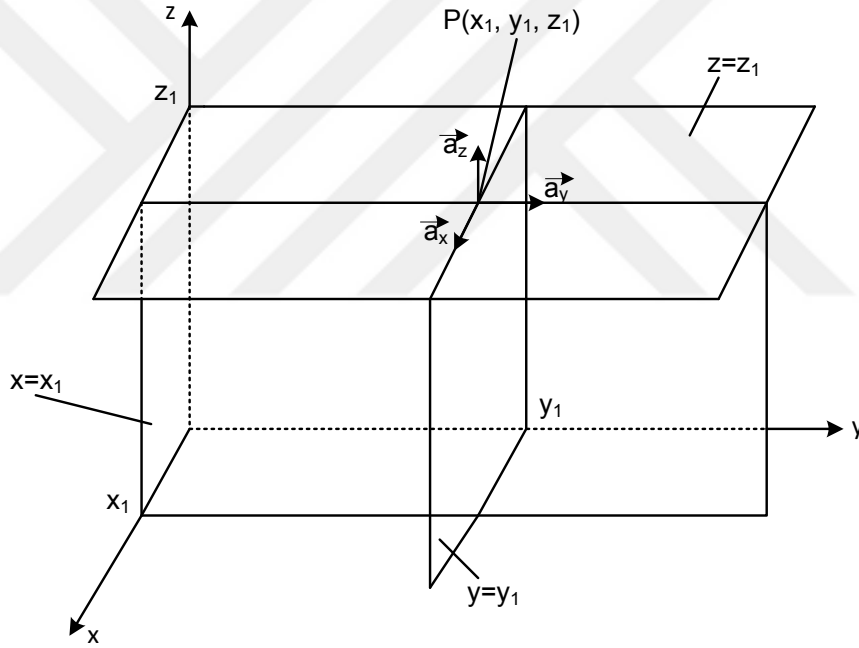
$$\mathbf{A} = a_x \mathbf{A}_x + a_y \mathbf{A}_y + a_z \mathbf{A}_z \quad (2.4)$$

Kartezyen koordinatlarda diferansiyel uzunluğun ifadesi aşağıda verilmektedir [24]:

$$dl = a_x dx + a_y dy + a_z dz \quad (2.5)$$

Kartezyen koordinatlarda diferansiyel hacmin ifadesi aşağıda verilmektedir [24]:

$$dv = dx dy dz \quad (2.6)$$



Şekil 2. 1 Kartezyen koordinat sistemi

2.1.1.2 Silindirik Koordinat Sistemi

Silindirik koordinat sisteminde Şekil 2.2’de gösterilen bir $P(r, \phi, z)$ noktası, $r=r_1$ silindirik yüzeyinin, kenarı z-ekseni olan ve xy-düzlemi ile $\phi=\phi_1$ açısını yapan düzlemin ve $z=z_1$ ’de xy-düzlemine paralel düzlemin kesiştiği noktadır [24]. Sağ el kuralına göre aşağıdaki bağlantılar elde edilmektedir:

$$a_r \times a_\phi = a_z \quad (2.7)$$

$$a_\phi \times a_z = a_r \quad (2.8)$$

$$a_z \times a_r = a_\phi \quad (2.9)$$

Bir \mathbf{A} vektörünün silindirik koordinatlarda gösterimi aşağıda verilmektedir [24]:

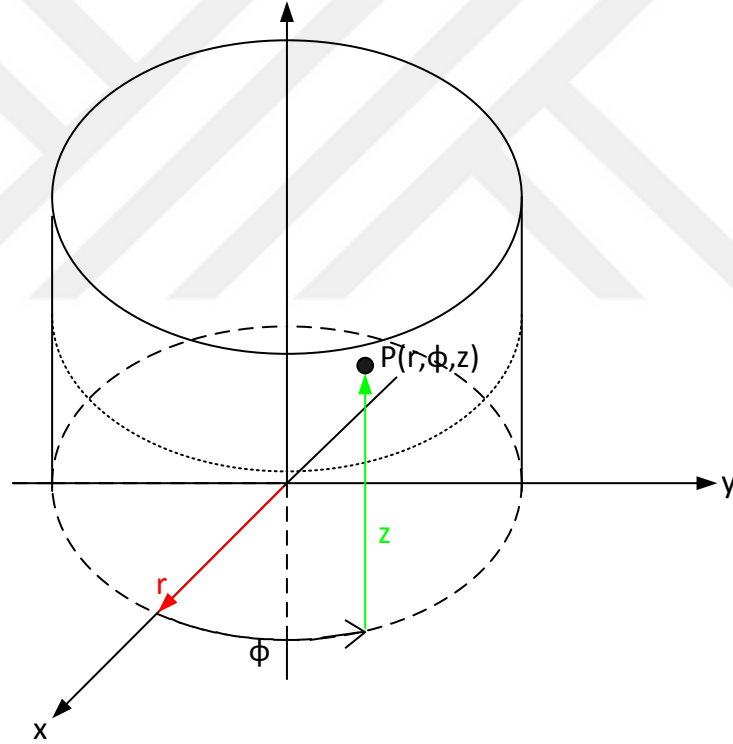
$$\mathbf{A} = a_r A_r + a_\phi A_\phi + a_z A_z \quad (2.10)$$

Silindirik koordinatlarda diferansiyel uzunluğun ifadesi aşağıda verilmektedir [24]:

$$dl = a_r dr + a_\phi r d\phi + a_z dz \quad (2.11)$$

Silindirik koordinatlarda diferansiyel hacmin ifadesi aşağıda verilmektedir [24]:

$$dv = r dr d\phi dz \quad (2.12)$$



Şekil 2. 2 Silindirik koordinat sistemi

2.1.1.3 Küresel Koordinat Sistemi

Küresel koordinat sisteminde Şekil 2.3'te gösterilen bir $P(r, \theta, \phi)$ noktası, üç yüzeyin kesiştiği noktadır [24]. Sağ el kuralına göre aşağıdaki bağlantılar elde edilmektedir:

$$a_r \times a_\theta = a_\phi \quad (2.13)$$

$$a_\theta \times a_\phi = a_r \quad (2.14)$$

$$a_\phi \times a_r = a_\theta \quad (2.15)$$

Bir \mathbf{A} vektörünün küresel koordinatlarda gösterimi aşağıda verilmektedir [24]:

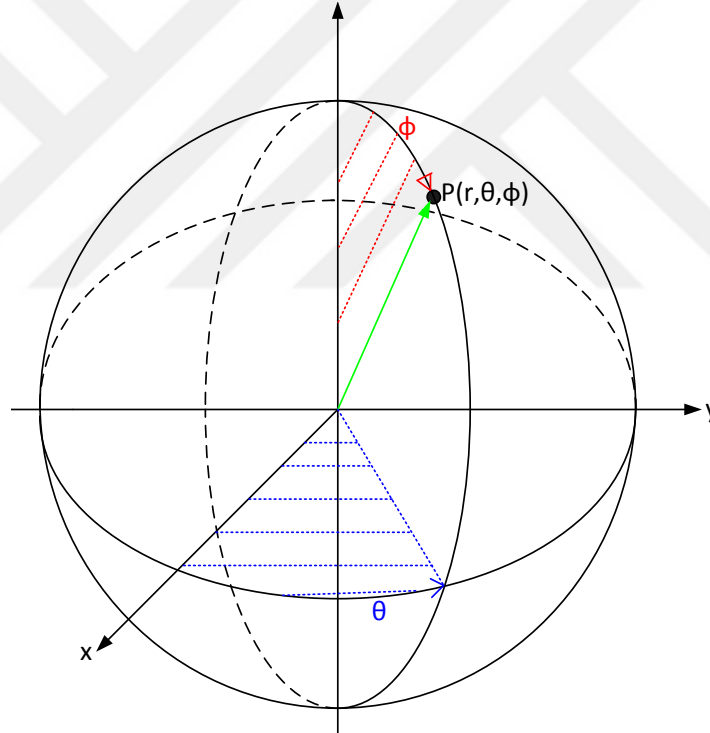
$$\mathbf{A} = a_r \mathbf{A}_r + a_\theta \mathbf{A}_\theta + a_\phi \mathbf{A}_\phi \quad (2.16)$$

Küresel koordinatlarda diferansiyel uzunluğun ifadesi aşağıda verilmektedir [24]:

$$dl = a_r dr + a_\theta r d\theta + a_\phi r \sin \theta d\phi \quad (2.17)$$

Küresel koordinatlarda diferansiyel hacmin ifadesi aşağıda verilmektedir [24]:

$$dv = r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi \quad (2.18)$$



Şekil 2. 3 Küresel koordinat sistemi

2.2 Elektrik Alan

İki yük arasında bir kuvvet oluştuğunu ve bu kuvvetin yüklerin büyüklüğü ile doğru, yüklerin aralarındaki uzaklığın karesi ile ters orantılı olduğunu Coulomb ortaya çıkarmıştır. Bu elektriksel kuvvetin birimi newton (N)'dur. Bu kuvvetin matematiksel ifadesi denklem (2.19)'da verilmektedir.

$$F = k \times \frac{Q_1 Q_2}{d^2} \text{ (N)} \quad (2.19)$$

Buradaki F harfi elektiriksel kuvveti, k harfi coulomb sabitini, Q_1 ve Q_2 ifadeleri yükleri, d harfi yükler arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Coulomb sabiti denklem (2.20)'de ifade edilmektedir.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.9875 \times 10^9 \left(\frac{Nm^2}{C^2} \right) \quad (2.20)$$

Buradaki ϵ_0 ifadesi boşluğun dielektrik geçirgenlik sabitidir ve değeri 8.8541×10^{-12} olarak verilir. Eğer ortam farklı ise denklem (2.21) ifadesi ortamın dielektrik geçirgenliğini bulmak için kullanılmaktadır. Buradaki ϵ_r ortamın dielektrik sabitini ifade etmektedir.

$$\epsilon = \epsilon_0 \times \epsilon_r \quad (2.21)$$

Durgun yükler etrafında elektrik alan oluşturur ve bu alan şiddeti, doğrultusu olan vektörel bir büyüklüktür. E harfi ile ifade edilmektedir ve birimi metre başına volt (V/m) olarak ifade edilmektedir. Bir F kuvvetinin oluşturduğu elektrik alanı bulurken denklem (2.22)'de verilen ifade kullanılmaktadır.

$$E = \frac{F}{Q} \text{ (V/m)} \quad (2.22)$$

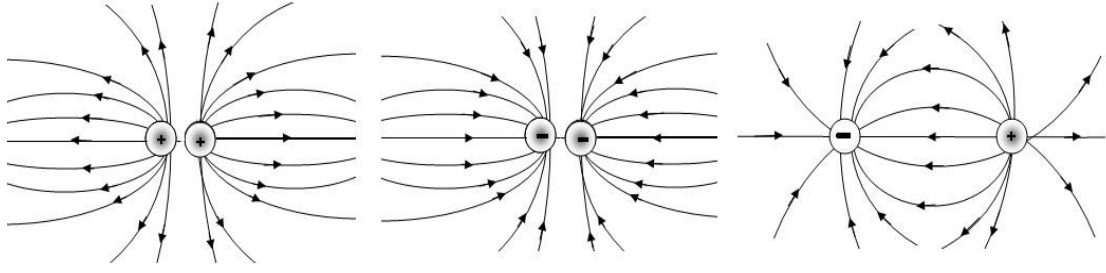
Ortamın dielektrik sabiti ile elektrik alan doğrudan ilişkilidir ve bu iki ifadenin matematiksel çarpımı bize elektrik akı yoğunluğunu verir. Akı yoğunluğunun ifadesi denklem (2.23)'te verilmektedir.

$$D = E \times \epsilon \text{ (C/m}^2\text{)} \quad (2.23)$$

Eğer iletken bir malzeme veya canlı bir doku elektrik alanın olduğu bir ortama girerse elektiriksel alan kuvvetinden dolayı bir akım oluşur. Bu akım yoğunluğunun matematiksel ifadesi denklem (2.24)'te verilmektedir. Buradaki σ ifadesi elektiriksel ortamın iletkenliğini göstermektedir.

$$J = \sigma \times E \text{ (A/m}^2\text{)} \quad (2.24)$$

İki yük arasındaki alan çizgilerinin durumu Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2. 4 Elektrik alan çizgileri

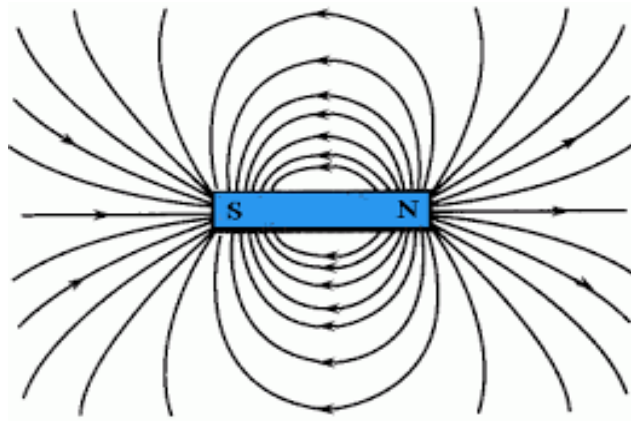
2.3 Manyetik Alan

Elektrik alan durgun yükler tarafından oluşturulurken, hareketli yükler tarafından oluşturulan alan manyetik alandır. Genel olarak manyetik alan hareket eden bir elektrik yüküne etki eden Lorentz kuvveti olarak ifade edilmektedir. Buradan v hızında hareket eden q yükünün B manyetik akı yoğunluğu ile üzerinde meydana gelen manyetik kuvvet denklem (2.25)'te verilmektedir.

$$F = qv \otimes B \quad (2.25)$$

Manyetik alan, elektrik alan gibi vektörel bir büyüklüktür. Manyetik alan vektörünün yönü her zaman yüklerin hareket yönüne diktir. Manyetik alan şiddetinin matematiksel ifadesi denklem (2.26)'da verilmektedir. Burada H harfi manyetik alan şiddetini göstermektedir.

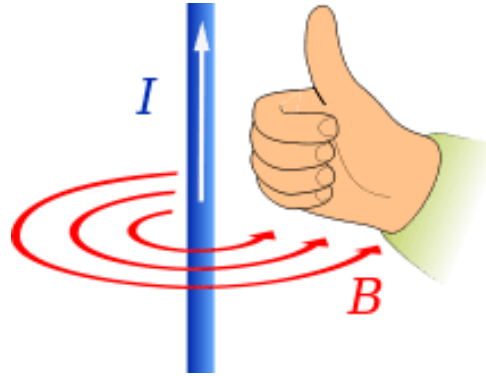
$$B = \mu H (\text{weber/ m}^2) \quad (2.26)$$



Şekil 2. 5 Manyetik alan çizgileri

Manyetik alan çizgileri elektrik alan çizgilerinden farklıdır ve Şekil 2.5'te gösterildiği gibi kendi üzerlerinde kapalı eğriler oluştururlar. Manyetik alan vektörünün yönü sağ el

kuralı ile bulunmaktadır. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi sağ el kuralına göre, başparmak akım yönünde olacak şekilde diğer parmaklar teli dolar ve avuç içinin gösterdiği yön manyetik alan vektörünün yönüdür.



Şekil 2. 6 Sağ el kuralı

2.4 Elektromanyetik Alan

Faraday ve Amper yasaları, manyetik alan ve elektrik alan ifadelerinin yüklerin hareketi ile bağlantılı olduğunu ve zamana göre değişen manyetik alanın elektrik alanı meydana getirdiğini, aynı şekilde zamana göre değişen elektrik alanın da manyetik alanı oluşturduğunu kanıtlamışlardır. Buradan elektromanyetik alanın, elektrik alan ve manyetik alanın birleşimi olduğu çıkarılabilir. Bu birleşimi en güzel Maxwell denklemleri ortaya koymaktadır. Bu denklemler tüm elektromanyetik alan teorisinin temelini oluşturmaktadır.

2.4.1 Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri Çizelge 2.1'de verilmektedir. Bu denklemler bu bölümde anlatılacak olan yasaların bir araya getirilmesinden meydana gelmektedir. Karşılaşılan problemlerde daha çok Maxwell denklemlerinin noktasal biçimi kullanılmaktadır. Herhangi bir yükün bulunmadığı ($\rho = 0$) ve hiçbir akımın bulunmadığı ($J_c = 0$) serbest uzay için Maxwell denklemleri Çizelge 2.2'de tekrar düzenlenerek verilmektedir.

Çizelge 2. 1 Genel Maxwell denklemleri [17]

Noktasal Biçim	İntegral Biçim
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint E \cdot dl = \int_s \left(-\frac{\partial B}{\partial t}\right) \cdot dS$ Faraday Yasası
$\nabla \times H = J_c + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint H \cdot dl = \int_s \left(J_c + \frac{\partial D}{\partial t}\right) \cdot dS$ Amper Yasası
$\nabla \times D = \rho$	$\int_s D \cdot dS = \int_v \rho dv$ Gauss Yasası
$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_s B \cdot dS = 0$

Çizelge 2. 2 Serbest uzay için Maxwell denklemleri [17]

Noktasal Biçim	İntegral Biçim
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint E \cdot dl = \int_s \left(-\frac{\partial B}{\partial t}\right) \cdot dS$ Faraday Yasası
$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint H \cdot dl = \int_s \left(\frac{\partial D}{\partial t}\right) \cdot dS$ Amper Yasası
$\nabla \times D = 0$	$\int_s D \cdot dS = 0$ Gauss Yasası
$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_s B \cdot dS = 0$

2.4.1.1 Yükün Korunumu Yasası

Yükler yoktan var edilemez ya da var olan bir yük yok edilemez. Yüklerin korunumu kanunu denklem (2.27)'de verilen matematiksel eşitlik ile ifade edilmektedir[16].

$$\oint_s \vec{J} \cdot \vec{ds} = -\frac{d}{dt} \int_v \rho_v dv \quad (2.27)$$

Bu denklem, kapalı bir S yüzeyinden ayrılan bir akımın hacmi v olan kapalı bir yüzey içindeki yükte meydana gelen azalmayı anlatmaktadır.

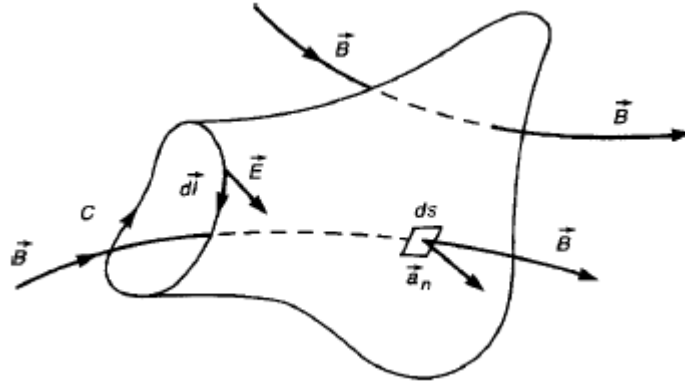
2.4.1.2 Faraday Yasası

Faraday yasası, elektromotor kuvvetin kapalı bir C konturu etrafında üretildiğini ve bu konturun sınırladığı S açık yüzeyi boyunca toplam manyetik akının zamana bağlı olarak değiştiğini belirtmektedir [16]. Şekil 2.7'de C konturu ve S kapalı yüzeyi gösterilmektedir. Faraday yasası kısaca (2.28)'de verilen matematiksel denklem ile ifade edilmektedir.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.28)$$

Burada \vec{E} harfi ile gösterilen ifade elektrik alan şiddeti vektörünü ve \vec{B} harfi ile gösterilen ifade ise manyetik akı yoğunluğu vektörünü göstermektedir.

Faraday yasası, aslında zamanla değişen bir manyetik alanın statik bir yük dağılımı ile aynı biçimde bir elektrik alanı oluşturacağını göstermektedir.



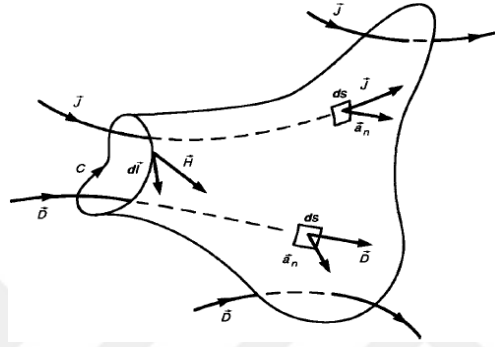
Şekil 2. 7 Faraday yasası [16]

2.4.1.3 Amper Yasası

Faraday yasası, zamanla değişen bir manyetik alanın elektrik alanı oluşturacağını göstermişti. Amper yasası ise tam tersinin de doğru olduğunu göstermektedir. Yani zamanla değişen bir elektrik alan manyetik alan oluşturmaktadır. Amper yasası kısaca denklem (2.29)'da verilen matematiksel ifade ile açıklanmaktadır.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s} \quad (2.29)$$

Burada \vec{H} manyetik alan şiddeti vektörünü, \vec{J} akım yoğunluğu vektörünü ve \vec{D} ise elektrik akı yoğunluğu vektörünü göstermektedir. Şekil 2.8'de C konturu ve S kapalı yüzeyi gösterilmektedir. Amper yasası aslında zamanla değişen bir elektrik akısının (\vec{D}), manyetik alan üretirken serbest akım (\vec{J}) ile aynı etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



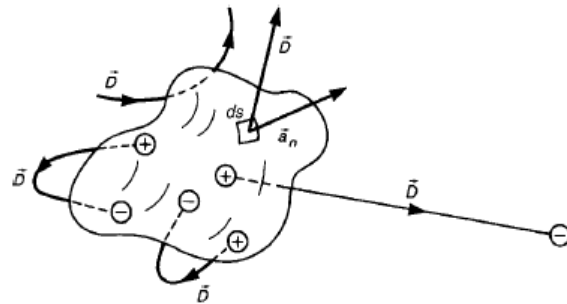
Şekil 2. 8 Amper yasası [16]

2.4.1.4 Gauss Yasası

Gauss yasası, kapalı bir yüzeyden çıkan toplam akının, kapalı yüzeyin içerisindeki net yük miktarına eşit olduğunu ifade etmektedir ve Şekil 2.9'da temsili olarak gösterilmektedir. Gauss yasası denklem (2.30)'da verilen matematiksel ifade ile açıklanmaktadır.

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho_v dv \quad (2.30)$$

Burada ρ_v v hacmindeki serbest yük yoğunluğu miktarını göstermektedir.



Şekil 2. 9 Gauss yasası [16]

İLETİM HATLARI VE ÇAPRAZ KARIŞMA

Her elektriksel, elektronik ve elektromekanik teçhizat işlevini yerine getirirken ortama elektromanyetik enerji yaymaktadır. Çapraz karışma aslında birbirine çok yakın olan kablolar veya elektronik devre kartları (PCB) üzerindeki hatlar arasında meydana gelen istenmeyen elektromanyetik girişim sonucu oluşmaktadır. Literatürde çapraz karışma “Crosstalk” olarak adlandırılmaktadır. Bu bölümde çapraz karışmanın matematiksel analizini yapmak için öncelikle iletim hattı modelleri incelenmektedir. Daha sonra çıkarılan iletim hattı denklemleri ile hatta meydana gelen çapraz karışmanın matematiksel ifadeleri elde edilmektedir.

3.1 İletim Hatları

Dijital ve analog sinyallerin iki nokta arasında iletilmesi, paralel iki iletken ile yapılmaktadır ve bu yapı iletim hattı olarak adlandırılır. Bazı yaygın olarak kullanılan iletim hatları temsili olarak Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmektedir[16].

Çapraz karışmanın nasıl modelleneceğini anlamak için, iki iletkenli iletim hattlarının analizini yapmak çok önemlidir. Fakat iki iletkenli iletim hatlarında çapraz karışma meydana gelmemektedir. Çapraz karışmanın meydana gelebilmesi için en az üç veya daha fazla iletken olmalıdır.

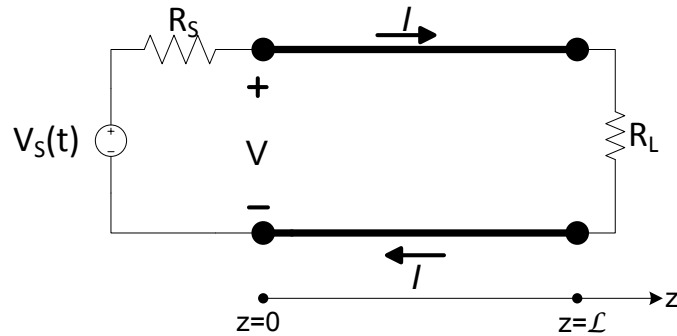
Bu bölümde üç iletkenli iletim hattı denklemlerinin çıkarılmasında kolaylık sağlaması açısından iki iletkenli iletim hattı denklemleri çıkartılarak, üç iletkenli iletim hatları için tekrardan düzenlenecek ve dağılmış parametreler ile ifade edilecektir.

İletim hatlarını modellemek için temsili olarak verilen devre şemalarının analizleri sonucu elde edilen matematiksel ifadeler; hat uzunluğunun hatta iletilen sinyalin dalga boyundan kısa olduğu durumlar için (elektriksel olarak kısa olan hatlar ($\ell \ll \lambda$)) verilmektedir.

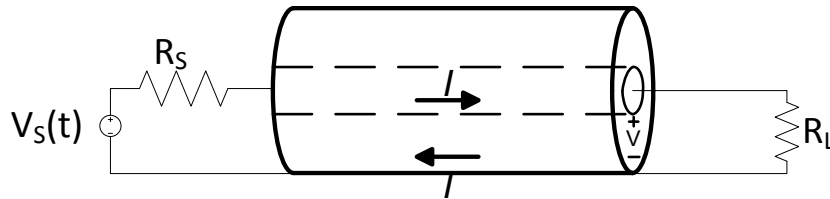
3.1.1 İki İletkenli İletim Hatları

Sinyal akımı (I) bir hattan yüke doğru giderek ve diğer hattan kaynağa geri dönmektedir. Bütün şekillerde kaynak gerilimi $V_S(t)$ harfi, kaynak direnci R_S harfi, yük direnci R_L harfi ve hattı uzunluğu ℓ harfi ile gösterilmektedir. Şekil 3.1'de verilen, iletkenlerin z-eksenine paralel olduğu iki iletkenli iletim hattı incelenirse [16]:

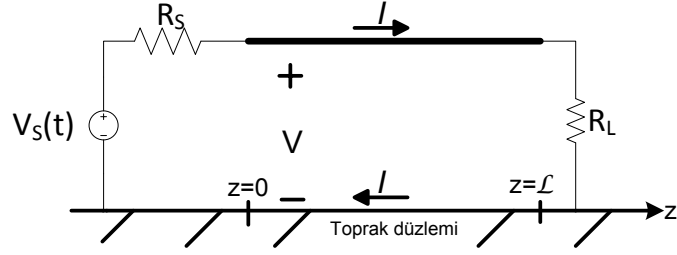
İki iletken arasına bir gerilim uygulandığında, bu gerilim iki iletken arasında xy-düzlemi boyunca bir elektrik alan oluşturacaktır. Oluşan elektrik alan sonucu hatta bir kapasite (c) oluşacaktır. Ayrıca hat boyunca akan I akımı da xy-düzlemi boyunca bir manyetik alan oluşturacaktır. Oluşan bu manyetik alan iki iletken arasında bir döngü oluşturacaktır ve bu da hatta bir endüktans (l) oluşturacaktır. Hatta oluşan bu kapasitans ve endüktans değerlerini bulmak için iletim hattı denklemleri kullanılmaktadır.



Şekil 3. 1 İki ayrı iletkenden oluşan iki iletkenli iletim hattı



Şekil 3. 2 Koaksiyel kablodan oluşan iki iletkenli iletim hattı



Şekil 3. 3 Bir toprak yüzeyi ve bir iletkenin oluşan iki iletkenli iletim hattı

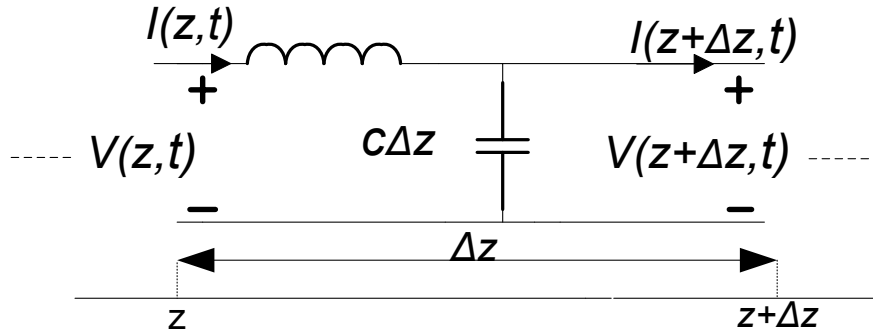
3.1.1.1 İletim Hattı Denklemleri

Bir Δz hattı boyunca, hattın gerilim ve akım değerleri zamana (t) ve z -eksenine bağlı fonksiyonlardır. Şekil 3.4'te verilen temsili devre üzerinde Kirchoff'un gerilim yasası uygulanırsa denklem (3.1)'de verilen eşitlik elde edilmektedir [16].

$$V(z + \Delta z, t) - V(z, t) = -l \Delta z \frac{\partial I(z, t)}{\partial t} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'in her iki tarafı Δz 'ye bölünür ve limit $\Delta z \rightarrow 0$ işlemi yapılarak denklem (3.2) elde edilmektedir. Elde edilen bu denklem iletim hattı denklemlerinin birincisidir.

$$\frac{\partial V(z, t)}{\partial z} = -l \frac{\partial I(z, t)}{\partial t} \quad (3.2)$$



Şekil 3. 4 İki iletkenli iletim hattı devre şeması

Benzer şekilde Şekil (3.4)'te verilen temsili devre üzerinde Kirchoff'un akım yasası uygulanırsa denklem (3.3) elde edilmektedir.

$$I(z + \Delta z, t) - I(z, t) = -c \Delta z \frac{\partial V(z + \Delta z, t)}{\partial t} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'ün her iki tarafı Δz 'ye bölünür ve limit $\Delta z \rightarrow 0$ işlemi yapılarak denklem (3.4) elde edilmektedir. Elde edilen bu denklem iletim hattı denklemlerinin ikincisidir.

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = -c \frac{\partial V(z, t)}{\partial t} \quad (3.4)$$

Sırasıyla denklem (3.2) ve (3.4)'te bulunan gerilim (V) ve akım (I) ifadeleri ile aslında bu iki denklem ile birbirine bağılırlar. Burada denklem (3.2) $\frac{\partial}{\partial z}$ ifadesi ve denklem (3.4) ise $\frac{\partial}{\partial t}$ ifadesi ile çarpılır ve sırasıyla denklem (3.5) ve (3.6) elde edilmektedir [16].

$$\frac{\partial^2 V(z, t)}{\partial z^2} = -l \frac{\partial^2 I(z, t)}{\partial t \partial z} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 I(z, t)}{\partial z \partial t} = -c \frac{\partial^2 V(z, t)}{\partial t^2} \quad (3.6)$$

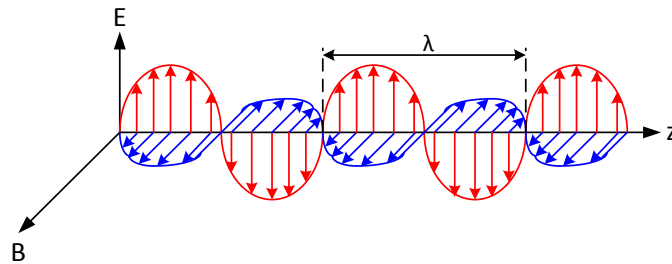
Denklem (3.5) ve (3.6)'da bulunan eşitlikler sadece gerilim ve akım ifadeleri olacak şekilde tekrardan düzenlenirse sırasıyla denklem (3.7) ve (3.8) elde edilmektedir. Elde edilen bu iki denklem iletim hattının dağılmış parametreler cinsinde ifade edilmesinde kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial^2 V(z, t)}{\partial z^2} = lc \frac{\partial^2 V(z, t)}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 I(z, t)}{\partial z^2} = lc \frac{\partial^2 I(z, t)}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

3.1.1.2 Dağılmış Parametreler

Bir iletim hattında propagasyon, boyuna bileşeni olmayan elektromanyetik dalga (TEM modu) ile taşınır [17]. Bu modda elektrik alan ve manyetik alan propagasyonun yönüne (z -eksenine) diktir ve Şekil 3.5'te temsili olarak gösterilmektedir. λ simgesi elektromanyetik dalganın dalga boyunu göstermektedir.



Şekil 3. 5 TEM modu

Şekil 3.5'te gösterilen TEM modundaki elektrik alan için Faraday ve manyetik alan için Amper yasaları uygulanırsa, sırasıyla denklem (3.9) ve (3.10) elde edilmektedir.

$$\oint_{C_{xy}} \vec{E}_T \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_{S_{xy}} \mu \vec{H}_z \cdot d\vec{s} = 0 \quad (3.9)$$

$$\oint_{C_{xy}} \vec{H}_T \cdot d\vec{l} = I + \frac{d}{dt} \int_{S_{xy}} \varepsilon \vec{E}_z \cdot d\vec{s} = I \quad (3.10)$$

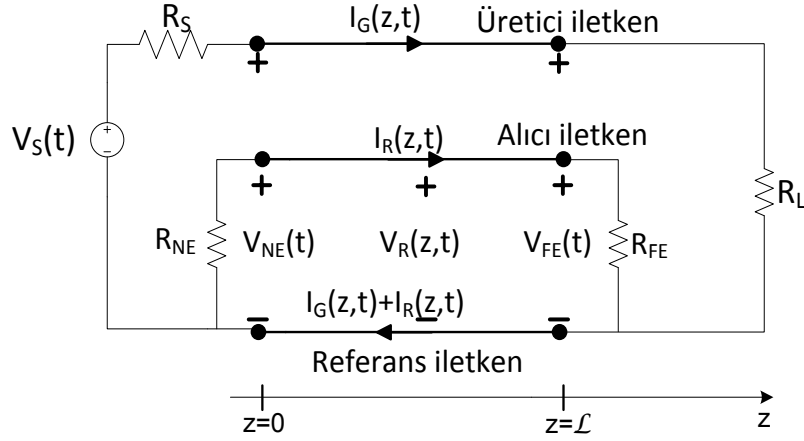
Denklem (3.9)'da S_{xy} ifadesi xy-düzleminde bulunan bir yüzeyi ve C_{xy} ifadesi ise bu yüzeyi çevreleyen kapalı konturu anlatmaktadır. Denklem (3.9)'un sonucu sıfırdır, çünkü alanların z-ekseninde bir bileşenleri yoktur ($E_z = H_z = 0$). Bu sonuç aslında statik (dc) alanların sonucu ile aynıdır. Bu nedenle iki iletken arasında endüklenen gerilim değerini, alanlar zamanla değişken olsa bile tanımlanabilir. Bu sonuç bize zamanla değişen bir alana sahip olsak bile dc alan hesaplamaları ile dağılmış parametre kapasitans (c) değerinin hesaplanabileceğini göstermektedir.

Benzer şekilde denklem (3.10) için Amper yasasını uygulanırsa elde edilen sonuç, iletkenlerden akan akım ve z-eksenindeki elektrik alandan dolayı oluşan deplasman akımının toplamıdır (I). Fakat $E_z = H_z = 0$ olduğu için deplasman akımının değeri sıfırdır. Bu nedenle iletkenler üzerinden akan akım, alanlar zamanla değişse bile tanımlanabilir ve bu sonuç statik alan sonuçları ile aynıdır. Bundan dolayı zamanla değişen bir alana sahip olsak bile statik alan hesaplamaları ile dağılmış parametre endüktans (l) değerinin hesaplanabileceğini göstermektedir.

3.1.2 Üç iletkenli İletim Hatları

İki iletkenli iletim hatları için kullanılan denklemler genişletilerek herhangi bir sayıdaki paralel iletkenli iletim hatları için kullanılabilir. Bu tarz iletim hatları çok iletkenli iletim hatları (MTLs) olarak adlandırılmaktadır.

İki iletkenli sistemlere üçüncü bir iletkenin ilave edilmesi sistemde bir elektromanyetik girişim üretilmesini sağlamaktadır ve bu da çapraz karışmaya (crosstalk) neden olur. Çapraz karışmayı daha iyi ifade etmek için Şekil 3.6'daki üç iletkenli iletim hattı analiz edilecektir. Şekil 3.6'da verilen devre şeması ile üç iletkenli bir iletim sistemi modellenmektedir [1].



Şekil 3. 6 Üç iletkenli iletim hattı devre şeması

Şekil 3.6'da verilen $V_S(t)$ ifadesi kaynak gerilimini, R_S ifadesi kaynak direncini ve R_L ifadesi yük direncini göstermektedir. $V_S(t)$ kaynak gerilimi üretici iletken ve referans iletken ile R_L yüküne bağlıdır. R_{NE} ve R_{FE} ile gösterilen sonlandırma dirençleri, alıcı iletken ile referans iletkene bağlıdır. "NE" ve "FE" ifadeleri sırasıyla, alıcı devrenin yakın kenar (near end) ve uzak kenarını (far end) temsil etmektedir. Bu ifadeler kaynağa olan yakınlık ve uzaklığı ifade etmektedir. Ayrıca, bütün iletkenler z-eksenine paralel kabul edilmektedir.

Buradaki üretici devre, üretici iletken ve referans iletken arasında akan akım $I_G(z,t)$ ve oluşan $V_G(z,t)$ gerilimden meydana gelmektedir. Bu üretici devrede oluşan akım ve gerilim, alıcı devre ile etkileşime sebep olan elektromanyetik alanı oluşturmaktadır. Alıcı devre, alıcı iletken ve referans iletkenden meydana gelmektedir. Bu iki devre arasındaki etkileşim alıcı devre üzerinde $I_R(z,t)$ akımı ve $V_R(z,t)$ gerilimini indüklemektedir. Bu oluşan akım ve gerilim alıcı devreye bağlı olan R_{NE} ve R_{FE} dirençleri üzerinde sırasıyla $V_{NE}(t)$ ve $V_{FE}(t)$ gerilimlerini oluşturmaktadır.

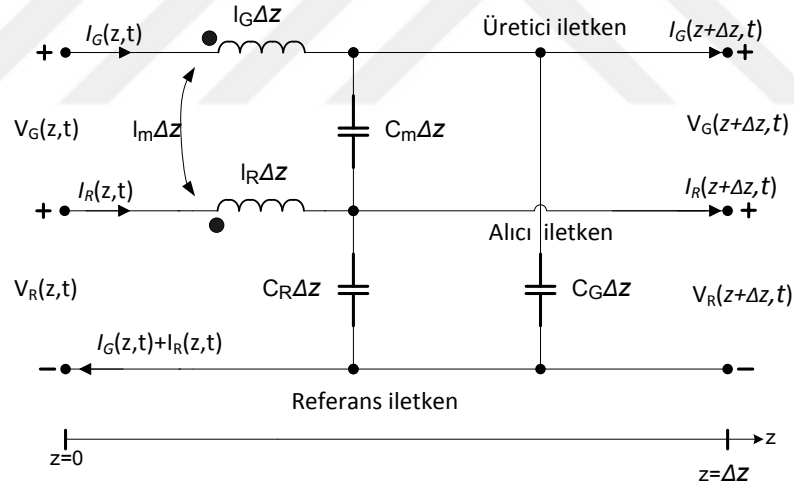
Çapraz karışmanın analizi, sistemdeki $V_S(t)$, R_S , R_L , R_{NE} ve R_{FE} gibi parametrelere bağlı olarak $V_{NE}(t)$ ve $V_{FE}(t)$ gerilimlerinin bulunması ile yapılmaktadır. Bu gerilimleri bulmak için frekans bölgesi analizi ve zaman bölgesi analizi olmak üzere iki çeşit analiz yöntemi kullanılmaktadır. Frekans bölgesi analizi, sinüzoidal bir kaynak gerilimi $V_S(t) = V_S \cos(\omega t + \varphi)$ için $V_{NE}(j\omega)$ ve $V_{FE}(j\omega)$ gerilimlerinin genliği ve fazının

belirlenmesi ile yapılmaktadır. Zaman bölgesi analizi ise, kaynak geriliminin genel zaman formu için alıcı devredeki gerilimler olan $V_{NE}(t)$ ve $V_{FE}(t)$ 'nin zaman bölgesi formunda ifade edilmesi ile yapılmaktadır.

3.1.2.1 İletim Hattı Denklemleri

iletim hattı denklemlerinin analizinin temelinde yatan varsayım hat boyunca propagasyonun, TEM modunda olduğunu varsaymaktır. Bu modda elektrik ve manyetik alan vektörleri xy-düzleminde iken, z-eksenine diktirler. Ayrıca z-ekseni boyunca bileşenleri de yoktur.

TEM modunda alanların statik (dc) alanlar ile benzer yapıyı gösterdiği Bölüm 3.1.1.2'de anlatılmaktadır. Bu benzerliği kullanarak iki iletkenli hatlar için dağılmış endüktans ve kapasitans parametre değerleri ifade edilmişti. Benzer şekilde üç iletkenli hatlar için de TEM modu geçerlidir. Şekil 3.7'de dağılmış parametreler cinsinden üç iletkenli iletim hattının eşdeğer devresi verilmektedir [1].



Şekil 3. 7 Dağılmış parametreler cinsinden üç iletkenli iletim hattı

Dağılmış parametreler için verilen eşdeğer devrenin analizi ile sırasıyla denklem (3.11) ve (3.14) arasındaki denklemler ile elde edilmektedir.

$$\frac{\partial V_G(z,t)}{\partial z} = -I_G \frac{\partial I_G(z,t)}{\partial t} - I_M \frac{\partial I_R(z,t)}{\partial t} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial V_R(z,t)}{\partial z} = -I_M \frac{\partial I_G(z,t)}{\partial t} - I_R \frac{\partial I_R(z,t)}{\partial t} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial I_G(z,t)}{\partial z} = -(c_G + c_M) \frac{\partial V_G(z,t)}{\partial t} + c_M \frac{\partial V_R(z,t)}{\partial t} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial I_R(z,t)}{\partial z} = c_M \frac{\partial V_G(z,t)}{\partial t} - (c_R + c_M) \frac{\partial V_R(z,t)}{\partial t} \quad (3.14)$$

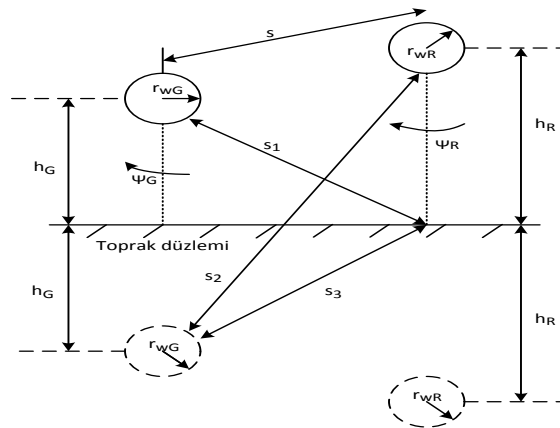
Yukarıda verilen denklemlerde bulunan l_G , l_R , l_M , c_G , c_R ve c_M dağılmış parametre ifadelerinin nasıl bulunacağı Bölüm 3.1.2.2’de anlatılmaktadır.

3.1.2.2 Dağılmış Parametreler

Üretici, alıcı devreler için dağılmış endüktans parametre değerleri sırasıyla l_G ve l_R olarak, bu iki devre arasında oluşan dağılmış ortak endüktans parametre değeri l_M olarak isimlendirilmektedir.

Üretici, alıcı devreler için dağılmış kapasitans parametre değerleri sırasıyla c_G ve c_R olarak, bu iki devre arasında oluşan dağılmış ortak kapasitans parametre değeri c_M olarak isimlendirilmektedir.

Dağılmış endüktans ve kapasitans parametre değerleri sırasıyla, denklem (3.15) ve (3.20) arasında verilmektedir [1]. Burada verilen denklemler Şekil 3.8’de temsili olarak gösterilen bir toprak yüzeyi üzerinde bulunan iki iletken için endüktans ve kapasitans değerlerini ifade etmektedir. Bunun nedeni; sonraki bölümlerde anlatılacak olan deneylerde kullanılacak düzeneklerin, bir toprak yüzeyi üzerinde bulunan iki iletkeni model olarak oluşturulmuş olmasıdır. Burada toprak yüzeyi üçüncü iletken olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3. 8 Bir toprak yüzeyi üzerinde bulunan iki iletkenin kesit görünümü

$$l_G = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_G}{r_{wG}}\right) \quad (3.15)$$

$$l_R = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_R}{r_{wR}}\right) \quad (3.16)$$

$$l_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln\left(1 + 4 \frac{h_G h_R}{s^2}\right) \quad (3.17)$$

$$c_M = \frac{l_M}{v^2(l_G l_R - l_M^2)} \quad (3.18)$$

$$c_G = \frac{l_R}{v^2(l_G l_R - l_M^2)} - c_M \quad (3.19)$$

$$c_R = \frac{l_G}{v^2(l_G l_R - l_M^2)} - c_M \quad (3.20)$$

Denklemlerde verilen h_i harfi iletkenlerin toprak yüzeyinden olan yüksekliğini, s harfi iletkenler arasındaki mesafeyi, r_{wi} iletkenlerin yarıçapını, v ışık hızını ve μ_0 boş uzayın manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.

3.2 Endüktif-Kapasitif Kuplaj Modeli

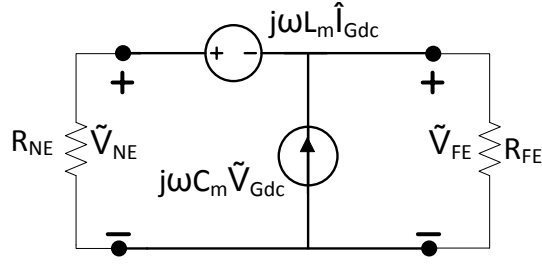
Bu bölüme kadar anlatılan kısımlarda çapraz karışma analizi için iletim hattı denklemleri; hat uzunluğunun hatta iletilen sinyalin dalga boyundan kısa olduğu durumlar için (elektriksel olarak kısa olan hatlar ($\mathcal{L} \ll \lambda$) dağılmış parametreler ile ifade edilmektedir. Bu bölümde de üç iletkenli iletim hattı denklemleri elektriksel olarak kısa olan hatlar için toplu parametreler ile ifade edilerek, çapraz karışmanın analizi frekans alanı ve zaman alanı için yapılmaktadır.

3.2.1 Frekans Alanında Endüktif-Kapasitif Kuplaj Modeli

Şekil 3.9'da endüktif-kapasitif kuplaj modeli temsili olarak toplu parametreler ile gösterilmektedir [6]. Burada ortak endüktans değeri l_M ve ortak kapasitans değeri c_M , sırasıyla hattın uzunluğu \mathcal{L} ile çarpılarak L_M ve C_M ifadeleri elde edilmektedir.

Şekil 3.9'da verilen gerilim kaynağı $V_{G_{dc}}$ elektromanyetik girişime neden olan kablodan, bu girişimden etkilenen kabloya gerçekleşen endüktif kuplajı ve akım kaynağı $\hat{I}_{G_{dc}}$ ise

elektromanyetik girişime neden olan kablodan, bu girişimden etkilenen kabloda meydana gelen kapasitif kuplajı ifade etmektedir.



Şekil 3. 9 Endüktif-kapasitif kuplaj modeli devre şeması

Şekil 3.9’da verilen devrenin analizi ile elde edilen çapraz karışma formülleri elektriksel olarak kısa olan hatlar için elde edilmiştir. Bu durumda $V_{G_{dc}}$ ve $\hat{I}_{G_{dc}}$ değerleri elektromanyetik girişime neden olan üretici devrenin kaynak gerilimi $V_S(t)$ ’ye bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\hat{I}_{G_{dc}} \cong \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S \quad (3.21)$$

$$V_{G_{dc}} \cong \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S \quad (3.22)$$

Süperpozisyon teoremi ile yakın kenardaki çapraz karışmayı ifade eden V_{NE} gerilimi ve uzak kenardaki çapraz karışmayı ifade eden V_{FE} gerilimi sırasıyla denklem (3.23) ve (3.24) ile ifade edilmektedir [6]. Bu denklemlerdeki ilk terim endüktif kuplajı ve ikinci terim ise kapasitif kuplajı ifade etmektedir.

$$V_{NE} = \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega L_M \hat{I}_{G_{dc}} + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega C_M V_{G_{dc}} \quad (3.23)$$

$$V_{FE} = -\frac{R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega L_M \hat{I}_{G_{dc}} + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega C_M V_{G_{dc}} \quad (3.24)$$

Elde edilen denklemler (3.23) ve (3.24)’te verilen $V_{G_{dc}}$ ve $\hat{I}_{G_{dc}}$ ifadeleri yerine, denklem (3.21) ve (3.22)’deki eşitlikler yazılarak aşağıda verilen denklem (3.25) ve (3.26) elde edilmektedir.

$$V_{NE} = \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega L_M \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega C_M \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S \quad (3.25)$$

$$V_{FE} = -\frac{R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega L_M \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega C_M \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S \quad (3.26)$$

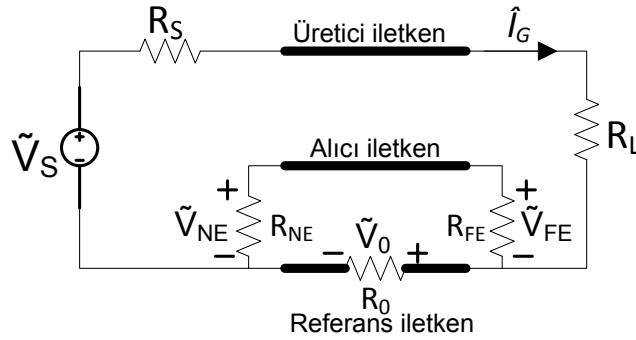
Yukarıda elde edilen denklemlerden yakın kenar (V_{NE}) ve uzak kenardaki (V_{FE}) çapraz karışmanın gerilim ifadeleri, elektromanyetik girişime neden olan üretici devrenin gerilim (V_S) değerine oranlanarak bir transfer fonksiyonu elde edilmektedir. Elde edilen bu transfer fonksiyonları sırasıyla denklem (3.27) ve (3.28)'de gösterilmektedir [6].

$$\frac{V_{NE}}{V_S} = \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega L_M \frac{R_L}{R_S + R_L} + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega C_M \frac{R_L}{R_S + R_L} \quad (3.27)$$

$$\frac{V_{FE}}{V_S} = -\frac{R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega L_M \frac{R_L}{R_S + R_L} + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega C_M \frac{R_L}{R_S + R_L} \quad (3.28)$$

3.2.2 Ortak Empedans Kuplajı

Klasik yükler ve düşük frekanslar için referans iletken direnci, genellikle yük direncinden daha küçüktür. Böylece akımın çoğunluğu referans iletken üzerinden devresini tamamlar. Bu, iletken boyunca bir gerilim düşümü (V_0) meydana getirir. Şekil 3.10'da ortak empedans kuplajı devre şematiği verilmektedir [8].



Şekil 3. 10 Ortak empedans kuplaj modeli devre şeması

Meydana gelen gerilim düşümünün ifadesi denklem (3.30)'da verilmektedir [8].

$$V_0 = \frac{R_0}{R_S + R_L} V_S \quad (3.30)$$

Referans iletken üzerinde meydana gelen gerilim düşümünün etkisi göz önünde bulundurularak denklem (3.28) ve (3.29) yeniden düzenlenmektedir. Bu düzenleme

sonucunda denklem (3.31) ve (3.32) elde edilmektedir [8]. Elde edilen denklemler aşağıda sırasıyla verilmektedir.

$$\frac{V_{NE}}{V_S} = \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega L_M \frac{R_L}{R_S + R_L} + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega C_M \frac{R_L}{R_S + R_L} + \frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{R_0}{R_S + R_L} \quad (3.31)$$

$$\frac{V_{FE}}{V_S} = -\frac{R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega L_M \frac{R_L}{R_S + R_L} + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} j\omega C_M \frac{R_L}{R_S + R_L} - \frac{R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{R_0}{R_S + R_L} \quad (3.32)$$

Elde edilen bu denklemler yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen toplam çapraz karışmanın matematiksel eşitliklerini ifade etmektedir.

3.2.3 Zaman Alanında Endüktif-Kapasitif Kuplaj Modeli

Zaman alanında çapraz karışmanın analizi için bir önceki bölümde frekans alanı için bulunan denklemler zaman alanı için tekrardan düzenlenmektedir. Bu düzenlemeyi yapmak için frekans alanı denklemleri (3.31) ve (3.32)'deki $j\omega$ ifadesine $\frac{d}{dt}$ dönüşümü yapılmaktadır. Yapılan bu dönüşüm sonrası zaman alanı için elde edilen yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma ifadeleri sırasıyla, denklem (3.33) ve (3.34)'te gösterilmektedir [6].

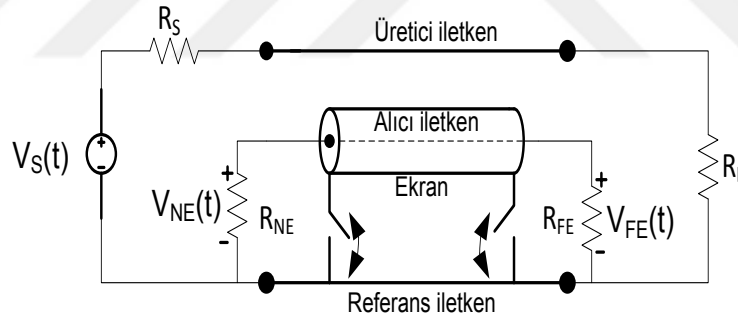
$$V_{NE}(t) = \frac{dV_S(t)}{dt} \left[\frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{L_M}{R_S + R_L} + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{R_L C_M}{R_S + R_L} \right] + V_S(t) \left[\frac{R_{NE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{R_0}{R_S + R_L} \right] \quad (3.33)$$

$$V_{FE}(t) = \frac{dV_S(t)}{dt} \left[-\frac{R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{L_M}{R_S + R_L} + \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{R_L C_M}{R_S + R_L} \right] + V_S(t) \left[-\frac{R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{R_0}{R_S + R_L} \right] \quad (3.34)$$

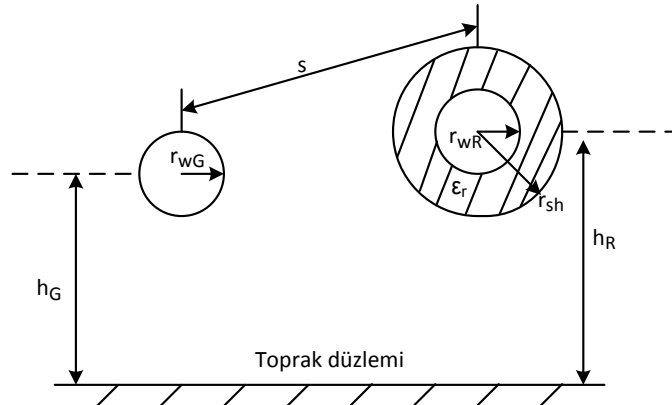
3.3 Çapraz Karışma Ve Ekranlama

Önceki bölümlerde üç iletkenli iletim hatları için, yakın kenar ve uzak kenarda elektromanyetik girişimden dolayı çapraz karışma meydana geldiği anlatılmaktadır. Bu bölümde ise ekranlı kablo kullanmanın üç iletkenli iletim hatlarında yakın ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışma üzerindeki etkisinden bahsedilmektedir. Ayrıca, bu etkinin matematiksel eşitlikler üzerinde meydana getirdiği değişikliklerde incelenmektedir.

Bir üç iletkenli iletim hattında yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışmanın olması istenen seviyenin üzerinde olduğunu kabul edilmektedir. Burada çapraz karışmayı azaltmak için genellikle kabul edilen iki yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden ilki üretici veya alıcı kabloyu ekranlı bir kablo ile değiştirmek, ikincisi ise üretici veya alıcı kabloyu burgulu bir kablo ile değiştirmektir. Şekil 3.11 ekranlı olmayan alıcı kablonun ekranlı bir kablo ile değiştirildiği durumu temsili olarak göstermektedir. Bu devrede referans iletken yerine toprak yüzeyi alınmaktadır. Şekil 3.12’de de devrenin kesit görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3. 11 Alıcı iletkeni ekranlı bir kablo olan iletim hattı devre şeması



Şekil 3. 12 İletim hattının kesit görünümü

3.3.1 Dağılmış Parametreler

Şekil 3.11’de verilen devredeki üretici ve alıcı kabloların dağılmış direnç parametre değerleri sırasıyla r_G ve r_R olarak ifade edilmektedir. Ayrıca kablonun ekranın dağılmış direnç parametre değeri r_S olarak ifade edilmektedir. Denklem (3.35)’te r_S ’nin matematiksel eşitliği verilmektedir.

$$r_S = \frac{1}{\sigma 2\pi r_{SH} t_{SH}} \quad (3.35)$$

Burada verilen r_{SH} ekranlı kısmın yarıçapını ve t_{SH} ise ekranlı kısmın kalınlığını ifade etmektedir. Bölüm 3.1.2.2’de bir referans toprak yüzeyi üzerindeki üretici ve alıcı hatlar için dağılmış endüktans ve kapasitans parametre değerlerinin matematiksel ifadeleri verilmektedir [16].

Bölüm 3.1.2.2’de verilen denklemler ekranlı kablo için tekrardan düzenlenir. Denklem (3.36)’da ekranlı bir kablo için ekranlı kısım ile referans iletken arasında oluşan dağılmış parametre endüktans (l_S) ifadesi verilmektedir.

$$l_S = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_R}{r_{SH} + t_{SH}}\right) \quad (3.36)$$

Denklem (3.37)’de alıcı iletken ile referans toprak yüzeyi arasında oluşan endüktans değeri (l_R) verilmektedir.

$$l_R = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_R}{r_{wR}}\right) \quad (3.37)$$

Denklem (3.38)’de üretici iletken ile alıcı ekranlı kablonun ekranlı kısmı arasında oluşan endüktans değeri (l_{GS}) verilmektedir.

$$l_{GS} = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln\left(1 + 4 \frac{2h_G h_R}{s^2}\right) \quad (3.38)$$

Denklem (3.39)’da alıcı kablonun ekranlı kısmı ile canlı ucu arasında oluşan endüktans değeri (l_{RS}) verilmektedir.

$$l_{RS} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_R}{r_{SH} + t_{SH}}\right) \quad (3.39)$$

Denklem (3.40)'ta alıcı kablonun ekranlı kısmı ve canlı ucu arasındaki kapasitans değeri verilmektedir.

$$C_{RS} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_R}{\ln\left(\frac{r_{SH}}{r_{wR}}\right)} \quad (3.40)$$

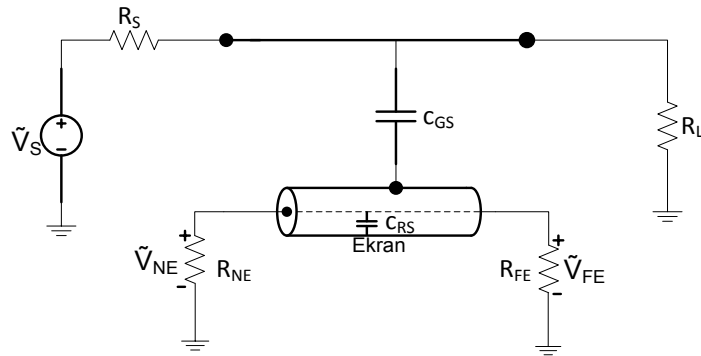
İletim hattında oluşan diğer kapasitans değerleri denklem (3.41)'de matris formunda verilmektedir [16]. Burada verilen c_G ifadesi üretici iletken ile referans yüzey arasındaki, c_{GS} ifadesi üretici iletken ile alıcı iletkenin ekranlı kısmı arasındaki ve c_S ifadesi alıcı iletkenin ekranlı kısmı ile referans iletken arasındaki kapasitansı göstermektedir.

$$\begin{pmatrix} c_G + c_{GS} & -c_{GS} \\ -c_{GS} & c_S + c_{GS} \end{pmatrix} = \mu_0\epsilon_0 \begin{pmatrix} l_G & l_{GS} \\ l_{GS} & l_S \end{pmatrix}^{-1} \quad (3.41)$$

Endüktans değerleri bulunduğundan sonra matris formunda verilen denklemde yerine koyularak çözülmesi ile kapasitans değerleri elde edilmektedir.

3.3.2 Endüktif ve Kapasitif Kuplej

Çapraz karışma, ortak endüktanstan dolayı oluşan endüktif kuplej ve ortak kapasitans nedeni ile oluşan kapasitif kuplejin matematiksel ifadelerinin toplamı ile hesaplanmaktadır. Şekil 3.13'te verilen devre şeması kapasitif kuplejı göstermektedir.



Şekil 3. 13 Kapasitif kuplej devre şeması

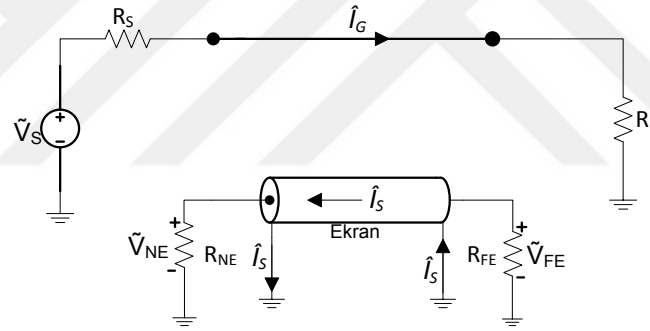
Şekil 3.13'te verilen devre şemasının analizi ile yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışmanın matematiksel ifadeleri bulunmaktadır. Denklem (3.42) çapraz karışmanın matematiksel ifadesini göstermektedir [16].

$$V_{NE} = V_{FE} = j\omega \frac{R_{NE} R_{FE}}{R_{NE} + R_{FE}} \frac{C_{RS} C_{GS}}{C_{RS} + C_{GS}} \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S \quad (3.42)$$

Denklem (3.42)'de verilen kapasitans değerleri Bölüm 3.3.1'de bulunan kapasitans değerlerinin hattın uzunluğu ile (\mathcal{L}) çarpılması sonucu elde edilmiştir.

Genel olarak çapraz karışmayı azaltmak için, Şekil 3.11'de verilen devre şemasındaki iletkenin ekranlı kısmı tek kenarından veya iki kenarından referans iletken (toprak) ile irtibatlandırılarak yapılmaktadır. Eğer ekranlı kablounun ekranlı kısmı iki kenarın herhangi birinden referans iletken ile irtibatlandırılırsa ekranlı kısım üzerindeki gerilim değeri sıfır olmaktadır ve bu nedenle kapasitif kuplaj değeri de sıfır olmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere ekranlı kablounun ekranlı kısmını topraklamak iletim hattı üzerinde oluşan kapasitif kuplajın etkisini ortadan kaldırmaktadır.

Şekil 3.13'te verilen devre şeması ile kapasitif kuplajın analizi yapılmıştır. Endüktif kuplajın analizi için Şekil 3.14'te verilen devrenin analizi yapılmaktadır.



Şekil 3. 14 Endüktif kuplaj devre şeması

Şekil 3.14'te verilen devre şemasının analizi ile herhangi bir kenar ya da iki kenardan da referans iletken ile irtibatlandırılan ekranlı kablodan oluşan iletim hattında, yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışmanın matematiksel ifadesi denklem (3.43) ve (3.44)'te verilmektedir [16].

$$V_{NE} = \frac{R_{NE}}{R_{FE} + R_{NE}} j\omega L_{GR} \hat{I}_G \frac{R_{SH}}{R_{SH} + j\omega L_{SH}} \quad (3.43)$$

$$V_{FE} = -\frac{R_{FE}}{R_{FE} + R_{NE}} j\omega L_{GR} \hat{I}_G \frac{R_{SH}}{R_{SH} + j\omega L_{SH}} \quad (3.44)$$

Denklem (3.43) ve (3.44)'te verilen endüktans değerleri Bölüm 3.3.1'de bulunan endüktans değerlerinin hattın uzunluğu ile (\mathcal{L}) çarpılması sonucu elde edilmektedir. Ayrıca denklem (3.43) ve (3.44)'te verilen \hat{I}_G 'nin matematiksel ifadesi denklem (3.45)'te verilmektedir.

$$\hat{I}_G = \frac{1}{R_s + R_L} V_s \quad (3.45)$$

Kapatif kuplajı engellemek için ekranlı kablonun en az bir kenarından referans iletken (toprak) ile irtibatlandırılması gerektiğinden bahsedilmiştir. Fakat endüktif kuplajı engellemek için ekranlı kablonun ekranlı kısmının iki kenarından da topraklanması gerekmektedir. Ayrıca iletim hattındaki sinyalin frekansının ekranlı kısmın kesim frekansından küçük veya büyük olması endüktif kuplaj oranını etkilemektedir. Bu oran aşağıda verilen denklemler ile analiz edilmektedir. Denklem (3.46)'da verilen matematiksel eşitlik ekranlı kısmın ekranlama faktörünü vermektedir [16]. Burada verilen f ifadesi iletilen sinyalin frekansını ve f_{SH} ekranlı kısmın kesim frekansını göstermektedir.

$$EF = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{SH}}} \quad (3.46)$$

Denklem (3.47)'de ekranın kesim frekansının matematiksel ifadesini göstermektedir.

$$f_{SH} = \frac{R_{SH}}{2\pi L_{SH}} \quad (3.47)$$

Ekranlı kısmın kesim frekansı ve iletilen sinyalin frekansı arasındaki ilişki aşağıda verilen denklem (3.48) ve (3.53) arasındaki denklemler ile açıklanmaktadır.

Ekranlı alıcı kablonun iki kenarının da referans iletken (toprak) ile irtibatlandırılmadığı durumda elde edilen yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışmanın ifadesi denklem (3.48) ve (3.49)'da verilmektedir [16].

$$V_{NE}^{IND} = j\omega \left(\frac{R_{NE}}{R_{FE} + R_{NE}} \frac{L_{GR}}{R_s + R_L} \right) V_s \quad (3.48)$$

$$V_{FE}^{IND} = j\omega \left(-\frac{R_{FE}}{R_{FE} + R_{NE}} \frac{L_{GR}}{R_S + R_L} \right) V_S \quad (3.49)$$

Ekranlı alıcı kablonun ekranlı kısmının iki kenarının da toprak ile irtibatlandırıldığı ve $f < f_{SH}$ olduğu durumdaki yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışmanın ifadesi denklem (3.50) ve (3.51)'de verilmektedir [16].

$$V_{NE}^{IND} = j\omega \left(\frac{R_{NE}}{R_{FE} + R_{NE}} \frac{L_{GR}}{R_S + R_L} \right) V_S \quad (3.50)$$

$$V_{FE}^{IND} = j\omega \left(-\frac{R_{FE}}{R_{FE} + R_{NE}} \frac{L_{GR}}{R_S + R_L} \right) V_S \quad (3.51)$$

Ekranlı alıcı kablonun iki kenarının da toprak ile irtibatlandırıldığı ve $f > f_{SH}$ olduğu durumdaki yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışmanın ifadesi sırasıyla, denklem (3.50) ve (3.51)'de verilmektedir [16].

$$V_{NE}^{IND} = \frac{R_{NE}}{R_{FE} + R_{NE}} \frac{L_{GR}}{R_S + R_L} \frac{R_{SH}}{L_{SH}} V_S \quad (3.52)$$

$$V_{FE}^{IND} = -\frac{R_{FE}}{R_{FE} + R_{NE}} \frac{L_{GR}}{R_S + R_L} \frac{R_{SH}}{L_{SH}} V_S \quad (3.53)$$

Yakın kenar ve uzak kenar için, ayrı ayrı elde edilen kapasitif ve endüktif kuplaj ifadelerinin toplanması ile çapraz karışmanın yakın kenar ve uzak kenar için toplam etkisi ifade edilmektedir. Denklem (3.54) ve (3.55)'te çapraz karışmanın toplam matematiksel ifadesi verilmektedir.

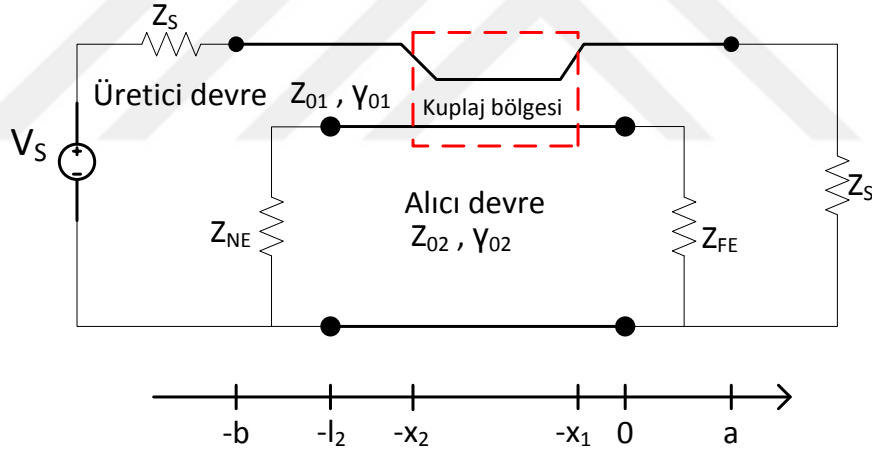
$$\frac{V_{NE}}{V_S} = \frac{V_{NE}^{IND}}{V_S} + \frac{V_{NE}^{CAP}}{V_S} \quad (3.54)$$

$$\frac{V_{FE}}{V_S} = \frac{V_{FE}^{IND}}{V_S} + \frac{V_{FE}^{CAP}}{V_S} \quad (3.55)$$

Sonuç olarak eğer ekranlı kablonun ekranlı kısmı en az bir kenarından topraklanırsa, kapasitif kuplaj sıfır olmaktadır. Fakat ekranlı kablo kullanmanın endüktif kuplajı azaltması için; ekranlı kablonun ekranlı kısmının iki kenarından da topraklanması ve aynı zamanda da $f > f_{SH}$ olması gerekmektedir.

3.4 Elektriksel Olarak Uzun Olan İletim Hatları İçin Maksimum Çapraz Karışma Seviyelerinin Matematiksel Eşitliklerinin Çıkarılması

Bu bölüme kadar yakın kenar ve uzak kenar için elde edilen çapraz karışmanın matematiksel ifadeleri elektriksel olarak kısa olan iletim hatları ($\mathcal{L} \ll \lambda$) için verilmektedir. Şekil 3.15'te verilen üç iletkenli iletim hattının devre şemasının analiz edilmesi ile elektriksel olarak uzun olan ($\mathcal{L} \gg \lambda$) iletim hatları için yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen maksimum çapraz karışma seviyesinin matematiksel ifadeleri çıkarılmaktadır [10]. Burada verilen Z_S kaynak empedansını, Z_{01} üretici hattın karakteristik empedansını, Z_{02} alıcı hattın karakteristik empedansını, γ propagasyon sabitini, Z_{NE} alıcı hattın yakın kenar sonlandırma empedansını, Z_{FE} alıcı hattın uzak kenar sonlandırma empedansını ve Z_L yük empedansını ifade etmektedir. Ayrıca b ve a ifadeleri üretici hattın uzunluğunu, l_2 ifadesi alıcı hattın uzunluğunu ve x_i ifadeleri ise kuplajın (çapraz karışma) meydana geldiği bölgenin uzunluğunu ifade etmektedir.



Şekil 3. 15 Üç iletkenli iletim hattı devre şeması

Denklem (3.52) ve (3.53) sırasıyla $(a+b) \leq \frac{\lambda}{10}$ için, yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışma seviyelerinin matematiksel eşitliklerini göstermektedir [10].

$$\begin{aligned}
V_{NE} &\approx \left| \frac{V_S}{2} \frac{1}{Z_{01} + Z_S} (x_2 - x_1) \frac{e^{-\gamma l_1}}{1 - \Gamma_L \Gamma_S e^{-2\gamma l_1}} \frac{1 + \Gamma_{NE}}{1 - \Gamma_{NE} \Gamma_{FE} e^{-2\gamma l_2}} e^{\gamma(x_0 - l_2)} \right| \\
&\times \left| (R_{12} + j\omega L_{12})(e^{\gamma(x_0+a)} - \Gamma_L e^{-\gamma(x_0+a)})(1 - \Gamma_{FE} e^{-2\gamma x_0}) \right. \\
&\left. - Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12})(e^{\gamma(x_0+a)} + \Gamma_L e^{-\gamma(x_0+a)})(1 + \Gamma_{FE} e^{-2\gamma x_0}) \right| \quad (3.52)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_{FE} &\approx \left| \frac{V_S}{2} \frac{1}{Z_{01} + Z_S} (x_2 - x_1) \frac{e^{-\gamma l_1}}{1 - \Gamma_L \Gamma_S e^{-2\gamma l_1}} \frac{1 + \Gamma_{FE}}{1 - \Gamma_{NE} \Gamma_{FE} e^{-2\gamma l_2}} e^{-\gamma x_0} \right| \\
&\times \left| (R_{12} + j\omega L_{12})(e^{\gamma(x_0+a)} - \Gamma_L e^{-\gamma(x_0+a)})(1 - \Gamma_{NE} e^{-2\gamma(l_2 - x_0)}) \right. \\
&\left. - Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12})(e^{\gamma(x_0+a)} + \Gamma_L e^{-\gamma(x_0+a)})(1 + \Gamma_{NE} e^{-2\gamma(l_2 - x_0)}) \right| \quad (3.53)
\end{aligned}$$

Denklem (3.54) ve (3.55) sırasıyla $(a+b) > \frac{\lambda}{10}$ ve $x_2 - x_1 < \frac{\lambda}{4}$ için, yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışma seviyelerinin matematiksel eşitliklerini göstermektedir [10].

$$\begin{aligned}
V_{NE} &\approx \frac{|V_S|}{2} \frac{1}{|Z_{01} + Z_S|} \frac{e^{-\alpha l_1}}{|1 - \Gamma_L| |\Gamma_S| e^{-2\alpha l_1}} \frac{|1 + \Gamma_{NE}|}{|1 - \Gamma_{NE}| |\Gamma_{FE}| e^{-2\alpha l_2}} e^{\alpha(a-l_2)} \\
&\times \left\{ |R_{12} + j\omega L_{12} + Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12})| \left[(x_2 - x_1) (|\Gamma_{FE}| + |\Gamma_L| e^{-2\alpha a}) \right] \right. \\
&\left. + |R_{12} + j\omega L_{12} - Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12})| \right. \\
&\left. \times \left[\frac{1}{2|\gamma|} (1 + |\Gamma_L| |\Gamma_{FE}| e^{-2\alpha(x_1+x_2+a)}) |e^{-2\gamma x_2} - e^{-2\gamma x_1}| \right] \right\} \quad (3.54)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_{FE} &\approx \frac{|V_S|}{2} \frac{1}{|Z_{01} + Z_S|} \frac{e^{-\alpha l_1}}{|1 - \Gamma_L| |\Gamma_S| e^{-2\alpha l_1}} \frac{|1 + \Gamma_{FE}|}{|1 - \Gamma_{NE}| |\Gamma_{FE}| e^{-2\alpha l_2}} e^{\alpha a} \\
&\times \left\{ |R_{12} + j\omega L_{12} + Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12})| \left[(x_2 - x_1) (1 + |\Gamma_L| |\Gamma_{NE}| e^{-2\alpha(a+l_2)}) \right] \right. \\
&\left. + |R_{12} + j\omega L_{12} - Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12})| \right. \\
&\left. \times \left[\frac{1}{2|\gamma|} (|\Gamma_L| e^{-2\alpha(x_1+x_2+a)} + |\Gamma_{NE}| e^{-\alpha l_2}) e^{2\alpha x_1} (e^{n\lambda\alpha/2} + 1) \right] \right\} \quad (3.55)
\end{aligned}$$

Denklem (3.56) ve (3.57) sırasıyla $x_2 - x_1 = \frac{n\lambda}{4}$ ve $x_2 - x_1 \geq \frac{\lambda}{4}$ için, yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışma seviyelerinin matematiksel eşitliklerini göstermektedir [10].

$$\begin{aligned}
V_{NE} &\approx \frac{|V_S|}{2} \frac{1}{|Z_{01} + Z_S|} \frac{e^{-\alpha l_1}}{1 - |\Gamma_L| |\Gamma_S| e^{-2\alpha l_1}} \frac{|1 + \Gamma_{NE}|}{1 - |\Gamma_{NE}| |\Gamma_{FE}| e^{-2\alpha l_2}} e^{\alpha(a-l_2)} \\
&\times \left\{ \left| R_{12} + j\omega L_{12} + Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12}) \right| \left[(x_2 - x_1) (|\Gamma_{FE}| + |\Gamma_L| e^{-2\alpha a}) \right] \right. \\
&+ \left| R_{12} + j\omega L_{12} - Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12}) \right| \\
&\times \left. \left[\frac{1}{2|\gamma|} (1 + |\Gamma_L| |\Gamma_{FE}| e^{-2\alpha(x_1+x_2+a)}) e^{-2\alpha x_1} (e^{n\lambda\alpha/2} + 1) \right] \right\} \quad (3.56)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_{FE} &\approx \frac{|V_S|}{2} \frac{1}{|Z_{01} + Z_S|} \frac{e^{-\alpha l_1}}{1 - |\Gamma_L| |\Gamma_S| e^{-2\alpha l_1}} \frac{|1 + \Gamma_{FE}|}{1 - |\Gamma_{NE}| |\Gamma_{FE}| e^{-2\alpha l_2}} e^{\alpha a} \\
&\times \left\{ \left| R_{12} + j\omega L_{12} + Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12}) \right| \left[(x_2 - x_1) (1 + |\Gamma_L| |\Gamma_{NE}| e^{-2\alpha(a+l_2)}) \right] \right. \\
&+ \left| R_{12} + j\omega L_{12} - Z_{01} Z_{02} (G_{12} + j\omega C_{12}) \right| \\
&\times \left. \left[\frac{1}{2|\gamma|} (1 + |\Gamma_L| e^{-2\alpha(x_1+x_2+a)} + |\Gamma_{NE}| e^{-2\alpha l_2}) e^{2\alpha x_1} (e^{n\lambda\alpha/2} + 1) \right] \right\} \quad (3.57)
\end{aligned}$$

Denklemlerdeki γ ifadesinin matematiksel eşitliği denklem (3.58)'de verilmektedir [11].

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.58)$$

Denklemlerdeki l_1 ifadesinin matematiksel eşitliği denklem (3.59)'da verilmektedir [11].

$$l_1 = a + b \quad (3.59)$$

Denklemlerdeki Γ_L ifadesinin matematiksel eşitliği denklem (3.60)'ta verilmektedir [11].

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_{01}}{Z_L + Z_{01}} \quad (3.60)$$

Denklemlerdeki Γ_S ifadesinin matematiksel eşitliği denklem (3.61)'de verilmektedir [11].

$$\Gamma_S = \frac{Z_S - Z_{01}}{Z_S + Z_{01}} \quad (3.61)$$

Denklemlerdeki Γ_{NE} ifadesinin matematiksel eşitliği denklem (3.62)'de verilmektedir [11].

$$\Gamma_{NE} = \frac{Z_{NE} - Z_{02}}{Z_{NE} + Z_{02}} \quad (3.62)$$

Denklemlerdeki Γ_{FE} ifadesinin matematiksel eşitliği denklem (3.63)'te verilmektedir [11].

$$\Gamma_{FE} = \frac{Z_{FE} - Z_{02}}{Z_{FE} + Z_{02}} \quad (3.63)$$

Ayrıca yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma denklemlerindeki R_{21} , L_{21} , G_{21} ve C_{21} ifadeleri Şekil 3.15'te verilen üç iletkenli iletim hattının dağılmış parametrelerini göstermektedir. Bu ifadeleri bulmak için Bölüm 3.1.2.2'de üç iletkenli iletim hatları için dağılmış parametre ifadeleri detaylı bir şekilde verilmektedir.



TEMPEST

TEMPEST'in ilk olarak Birinci Dünya savaşında Alman ve İngilizler tarafından ortaya çıkarıldığı ve İkinci Dünya savaşında da Amerikalılar tarafından geliştirildiği söylenmektedir [25]. Tarih olarak dünya ilk kez TEMPEST kavramı ile 2007 yılında NSA (Amerikan Ulusal Güvenlik Ajansı) tarafından gizliliği kaldırılan ve NSA içerisinde 1972 yılında yayımlanmış "Cryptologic Spectrum" dergisinde bulunan "TEMPEST: A Signal Problem" makalesinde öğrenmiştir [25].

4.1 TEMPEST'in Tarihçesi

Birinci Dünya savaşında ülkeler tarafından yürütülen çalışmalarının tam olarak TEMPEST kapsamında olduğu söylenememektedir. Ayrıca bu çalışmalar resmi bir kurum tarafından açıklanmadığı için sadece söylenti olarak kalmaktadır. Bu nedenle TEMPEST'in ortaya çıkışının Amerikalılar tarafından 1943 yılında yapıldığı düşünülmektedir.

İkinci Dünya savaşı sırasında kara ve deniz gizli teleks haberleşme sistemlerinin temelini tek kullanımlık şeritler ve basit kriptoloji cihazları (SIGTOT) meydana getirmekteydi [25]. Bu sistemler kriptoloji işlemini 131-B2 olarak adlandırılan Bell-telefon karıştırıcı cihazını kullanarak yapmaktaydı [25]. 1943 yılında, bu karıştırıcılardan bir tanesi Bell laboratuvarında test edilirken bir araştırmacı laboratuvar içerisindeki uzak bir noktada bulunan bir osiloskobun ekranında, salt raslantısal olarak, her işlem adımında bir darbe işaretinin oluştuğunu fark etti [25]. Araştırmacı bu darbe işaretlerini dikkatlice incelediğinde, açık bilgiyi elde edebildiğini anladı ve böylece ilk TEMPEST kaçağı belirlenmiş oldu. Bu nedenle, Bell ciddi bir açmaz ile karşı karşıya kalmıştı. Bu cihazları

askerlere güvenlik garantisi ile satmışlardı, fakat cihazlar artık güvenli değillerdi. Bu olaydan sonra yapabilecekleri tek şey, ilgili Muhabere Birliğini uyarmaktı ve bunu yaptılar. Fakat askerler böyle garip ve kesin olmayan bir laboratuvar bulgusu sonucunda kript o işlemlerini durduramayacaklarını söylediler ve bu durumu kanıtlamalarını istediler. Böylece Bell araştırmacıları Muhabere Birliğinin kript o merkezinin 25 metre uzağındaki binaya yerleştirildiler. Araştırmacılar bir saat kadar kript o merkezinde kullanılan kript o cihazından yayılan elektromanyetik dalgaların kaydını yaptılar ve dört saatlik inceleme sonunda açık bilginin %75'ini elde etmeyi başardılar [25]. Muhabere Birliği, bu durumdan çok etkilendi ve bu durumun daha da ayrıntılı bir şekilde araştırılmasını ve 131-B2 karıştırıcılarındaki bu yayılımların giderilmesini istedi. Bunun neticesinde altı aylık bir çalışma sonunda yayılımı önleyici üç temel yöntem önerildi [25]:

- Işıma yoluyla oluşacak kaçaklara yönelik ekranlama (shielding),
- Güç ve işaret hatlarındaki kaçaklara yönelik filtreleme (filtering) ve
- Hem ışımaya hem de iletken hatlara yönelik maskeleyme (masking).

Daha sonra, Bell daha da ileri giderek yeni bir karıştırıcı tasarladı ve 131-A-1 isimli yeni bir cihaz üretti. Bu cihazda filtreleme ve ekranlama yöntemlerininide uyguladılar, ancak yeni sorunlar ortaya çıktı. Bell'den beklenen, bu sorunu gidermek için oluşturulacak bir tamir setinin kullanım yerlerinde uygulanması ve istenmeyen yayılım kaynaklarının kafes içerisine alınarak bastırılmasıydı [25]. Ancak önerilen çözümlerin uygulanabilmesi için cihazların toplanıp Bell laboratuvarlarına getirilmesi gerekiyordu. Ayrıca cihazlara uygulanan ek kafesleme aşırı ısınmaya neden oldu ve bu da cihazların denetim ve bakımını oldukça zorlaştırdı [25]. Muhabere Birliği bu cihazın yenisini almaktansa acil bir çözüm olarak görevli komutanlarını bu konuda uyarıp, onlardan haberleşme merkezleri çevresinde 30 metre yarıçaplı bir güvenlik bölgesi oluşturmalarını istedi [25]. Bu sorun, 131-B2 karıştırıcılarını denetleyen CIA ekipleri tarafından 1951 yılında tekrar tespit edildi [25]: Cihazdan 400 metre uzaklıkta bir hattan açık bilginin elde edildiğini gördüler ve NSA'ya bildirdiler. NSA bazı işaret hattı ve güç hattı filtreleri önererek işaret ve güç hattı kaçaklarının temizlenmesini sağladı. Ancak ışımaya

kaçaklarına engel olunamadığından, önlem olarak birliklerden, aşağıdaki kurallardan en az birine uyulması istendi [25]:

- Kripto merkezleri çevresinde 60 metre yarıçaplı güvenlik bölgesi kurulması,
- Aynı anda en az 10 tane teleks yazıcıyı çalıştırarak maskeleye yapılması ve
- Operasyonel gereksinimlere göre feragat belgesi alınması.

SIGINT (Signal Intelligence) görevlileri bu kısıtlamalara büyük ölçüde uydular. Ancak bilinmelidir ki, o zamanki radyo frekans alıcılarının yeteneğine göre seçilen 60 metre kuralı bugün çok yetersiz kalmaktadır. 131-B2 karıştırıcı ile ilgili çalışmalar sürerken, diğer kripto cihazlarının TEMPEST yapılarının incelenmesine başlandı. Test edilen bütün cihazların oldukça yüksek seviyede kaçaklara sebep olduğu belirlendi. Rotorlu cihazlarda, rotorun dönme sayısı ile ilişkili işaretler cihazların güç hatlarında tespit edildi. Böylece güç hattı modülasyonu adıyla yeni bir TEMPEST kavramı ortaya çıktı [25]. Cihazların incelenmesi ve yayılımı bastırma önlemleri çok yavaş ilerliyordu. 1955 yılına kadar birkaç önlem denendi fakat, filtreleme teknikleri çok geliştirilemedi. Bir karakteri basarken, teleks cihazlarının farklı rotorları farklı anlarda hareket ediyor ve herbiri kendi özel işaretlerini meydana getirerek kolay elde edilebilir TEMPEST kaçaklarına neden oluyorlardı. Bunu önlemek için, bir karakter için bütün rotorların aynı anda hareket etmesi sağlanarak tek bir darbe kaçağının oluşması sağlandı. Bunun sonucunda; beş rotorlu bir cihazda beş tane küçük darbe yerine, tek ama yüksek genlikli bir darbe meydana gelmekteydi [25]. Ancak problem yine devam ediyordu ve güç hattındaki bu darbenin genliği gönderilen karakter ile değişim gösteriyordu. Bütün bu süreçler devam ederken, yeni TEMPEST tehlikelerinin belirlenmesi, çözümleme yöntemlerinin bulunması, sinyal kayıt ve ölçme cihazlarının geliştirilmesi konusunda, yayılımların bastırılmasına göre daha büyük ilerlemeler meydana geldi. Bunun sebebi ise, saldırı yapıp gizli bilgilerin ele geçirmenin, yüksek seviyeli darbe yayılımlarını yoğun uğraşlara rağmen düşürmeye çalışmaktan daha kolay olmasıydı [25].

1962 yılında, Japonya'da küçük bir askeri birlikte bir Amerikan subayı olağan bir görev olarak kripto merkezini denetliyordu. Güvenli olması gereken 60 metre çaplı bir alanda gizli bir teknik gözetleme olup olmadığını inceliyordu. Yaklaşık 30 metre uzaklıkta, Japon hükümeti denetiminde bir hastane vardı. Dikkatlice bakınca binada çok iyi

gizlenmiş yatay polarizeli bir dipol anteni farkettili. Durumu hemen karşı haber alma birimine ve NSA'ya bildirdi. O gün antenin daha detaylı incelenmesini isteyen yanıt geldi. Ertesi gün yapılan incelemelerde antenin kaldırılmış olduğu görüldü. Ancak şu belirlendi: Hastanenin çatısında çok sayıda Yağı TV anteni vardı ve Amerikan kripto merkezine yönelmiş biri dışında hepsi Tokyo'ya yönelenmiş durumda idi.

1964 yılında, Moskova'daki Amerikan elçiliğinde 40'tan fazla gizlice yerleştirilmiş mikrofon ele geçirildi. Hemen herkes bu mikrofonlarla, elçilikte konuşulan gizlilik dereceli bilgi ve planların çalındığını düşünüyordu. Ancak haber alma elemanları bu mikrofonların kripto makinelerine karşı nasıl kullanılabileceğini araştırmaya başladılar. Ayrıca, haberleşme bölümünün tavanı içerisinde gizlice yerleştirilmiş saç teli inceliğindeki tellerin sonlandırılarak dışarıya bir metal örgü olarak çıkaran amacı anlaşılamayan bir sistem bulundu.

4.2 TEMPEST Nedir ?

TEMPEST kavramını iyi analiz edebilmek için ilk olarak Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference-EMI) ve Elektromanyetik Uyumluluk (Electromagnetic Compatibility-EMC) konularından da kısaca bahsetmek gerekmektedir [18].

Tüm elektronik cihazlar çalışma esnasında ortama elektromanyetik enerji yaymaktadırlar. Bu enerji ortamda bulunan diğeri cihazların çalışması üzerinde bozucu bir etki ortaya çıkarabilmektedir. Ayrıca kullanılan bir cihaz ortamda bulunan elektromanyetik enerjiden de etkilenebilmektedir. Bu etkileme ve etkilenme olayları sonucunda cihaz veya herhangi bir sistem çalışmasında meydana gelen bozulma EMI olarak adlandırılmaktadır. EMC ise cihazların EMI nedeni ile ortamda bulunan enerjiden etkilenmeden ya da ortamda bulunan başka bir cihazı etkilemeden işlevini olağan şekilde yürütebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır.

Bilgi işleyen herhangi bir cihaz işlevi esnasında ortama yaydığı elektromanyetik enerji nedeniyle sanki cihazın içerisinde bir üretici varmış gibi çevreye yayın yapabilmektedir ve bu çevreye yayılan kaçak yayınlar metrelerce uzaktan ele geçirilebilmektedir. Ayrıca bu kaçaklar sadece havada yayılmazlar, etrafta bulunan rasgele iletken olarak tanımlanan güç kabloları, telefon hatları, metal borular ve veri hatları gibi iletkenler

üzerinden de metrelerce uzağa gidebilmektedirler. Bir kripto cihazının çevreye kaçak işaret yayması, cihazın içinde işlenen açık bilgilerin yayılmasına neden olabilmektedir. Bu kaçak kaydedilip çözümlendiğinde cihazın işlediği gizli bilgiler elde edilebilir. Bu tehlike yalnızca kripto cihazları için değil, gizli bilgi işleyen bilgisayar, monitör, yazıcı, tarayıcı, faks, telefon ve fotokopi gibi cihazlar için de geçerlidir. Ancak kripto cihazları için özel olarak dikkat edilmesi gereken konular vardır. Özellikle anahtar yönetimi ile ilgili olabilecek kaçaklar ciddi güvenlik ihlallerine sebep olabilmektedir. Bu tanımı detaylandırarak olursak:

- TEMPEST kaçakları istem dışı olarak oluşur. Kripto cihazının içinde işlenmekte olan açık bilgiler, cihazın normal çalışma fonksiyonu dışında yaptığı yayını dışarı kaçabilir,
- TEMPEST kaçakları belli bir frekansta bilgi taşıyan işaretlerdir,
- TEMPEST kaçakları kablo üzerinden veya havadan yayılırlar. Bu işaretlerin ele geçirilip değerlendirilebilmesi için anten ile havadan veya bir prob kullanarak kablodan elde edilmesi gerekmektedir ve
- TEMPEST kaçakları ilk ele geçirildiğinde anlamlı görünmeyebilirler, bu nedenle çözümlenmeleri gerekmektedir.

Bu bilgiler ışığında TEMPEST; gizlilik dereceli bilgi işleyen, ileten ve bulunduran elektriksel ve elektronik teçhizattan kaynaklanan istenmeyen elektromanyetik enerji yayılımlarını ve bu istenmeyen kaçak yayılımların araştırılmasını, incelenmesini ve istenilen seviyeye düşürülerek kontrol altına alınmasını inceleyen bir terim olarak tanımlanmaktadır [18]. TEMPEST kelimesinin bir kısaltmayı ifade edip etmediği, ediyorsa hangi kelimelerin kısaltması olduğu da oldukça tartışılan bir konudur. Ancak Amerikan Hava Kuvvetleri'nin gizliliğini kaldırarak yayınladığı bir dökümanda TEMPEST, "Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard" ifadesini oluşturan kelimelerin baş harfleri olarak tanımlanmıştır.

4.2.1 TEMPEST İle ilgili Bazı Terimler

TEMPEST konusunu daha iyi analiz edebilmek için konuya özgün olan bazı terimleri kısaca açıklamak gerekmektedir. Bu terimler aşağıda verilmektedir [18]:

Gizlilik Dereceleri: Tasnif Dışı (Unclassified), Hizmete Özel (Restricted), Özel (Confidential), Gizli (Secret), Çok Gizli (Top Secret), Kozmik Çok Gizli (Cosmic Top Secret) olarak sıralanmaktadır.

KIRMIZI: Kriptolanmamış veya gizlilik dereceli bilgiyi saklayan, işleyen cihazları, sistemleri, elemanları, bilgiyi ileten kabloları ve bu cihazların bulunduğu alanları tanımlayan bir terimdir. Örnek vermek gerekirse, gizlilik dereceli bir bilgiyi işleyen bilgisayarlar ve bu bilgisayarlara bağlı tüm ağın bileşenleri KIRMIZI olmaktadır.

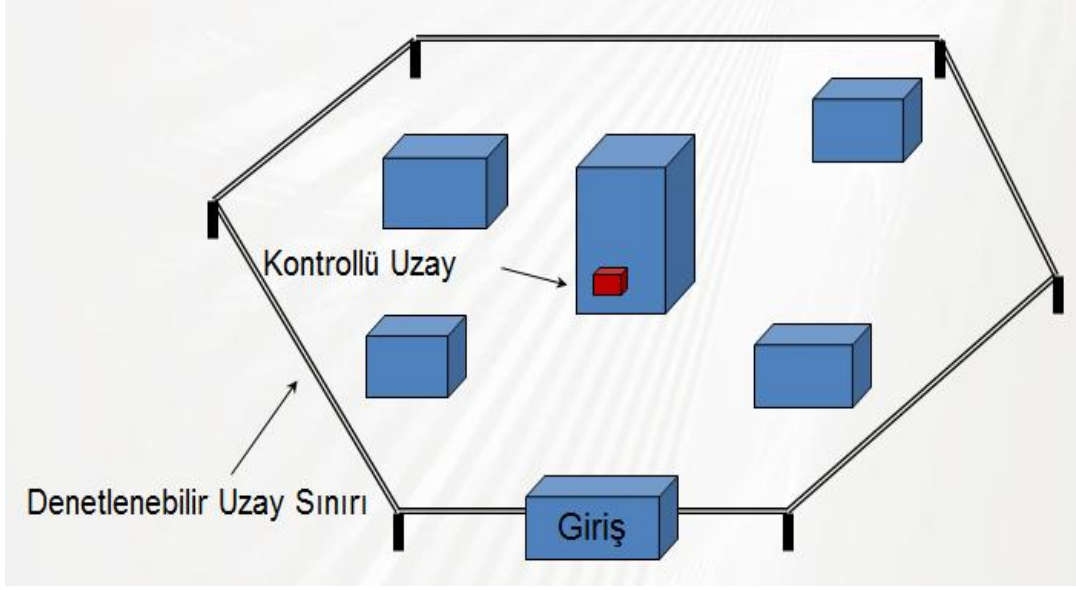
SİYAH: Gizlilik dereceli bilgi içermeyen elemanları, cihazları, sistemleri, bu gizli olmayan bilgiyi ileten kabloları ve hiçbir KIRMIZI sistemin olmadığı alanı tanımlayan bir terimdir. Örneğin, internete bağlanan herhangi bir bilgisayar ve bu bilgisayarın bağlı olduğu tüm ağın bileşenleri SİYAH olarak tanımlanmaktadır.

Kontrollü bölge (uzay): Özel ve üstü gizlilik dereceli bilgi işleyen teçhizatı veya birimleri çevreleyen, bütün giriş-çıkışların kontrol edildiği iyi tanımlanmış korumalı çevresi olan, sadece yetkili giriş izni taşıyanların ve yetkili geçiş izni taşıyan personel tarafından refakat edilen kişilerin girişine izin verilen, geçiş izni olanların dışındakilerin ise hareket ve faaliyetlerinin sürekli olarak kontrol altında tutulduğu üç boyutlu bölgelerdir. Kontrollü bölge genellikle bir bina veya bir bina içerisindeki bir kat veya ofis olabilmektedir.

Denetlenebilir bölge (uzay): Gizlilik dereceli bilgi içeren kaçakların istenmeyen kişiler tarafından ele geçirilmesinin mümkün olmadığı veya olası bir durum halinde ise bunu fark ederek ortadan kaldıracabilecek bir otoritenin bulunduğu, gizlilik dereceli bilgilerin işlendiği teçhizatı çevreleyen üç boyutlu uzay olarak tanımlanmaktadır.

TEMPEST cihaz seviyeleri: A,B ve C olmak üzere üç farklı cihaz seviyesi vardır. TEMPEST bakımından A en iyi seviye cihaz, C en kötü cihazdır. Üzerinde CE veya FCC onayı olan tüm piyasa cihazları C olarak tanımlanmaktadır. Bir cihazın A veya B seviyesi olabilmesi için TEMPEST cihaz testini geçmiş olması gerekmektedir.

TEMPEST tesis/bina seviyeleri: A,B ve C olmak üzere üç farklı bina seviyesi vardır. Cihazdakinin tam tersi olmak üzere TEMPEST açısından C en iyi seviye bina, A seviye ise en kötü seviye bina olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4. 1 Denetlenebilir bölge ve kontrollü bölge

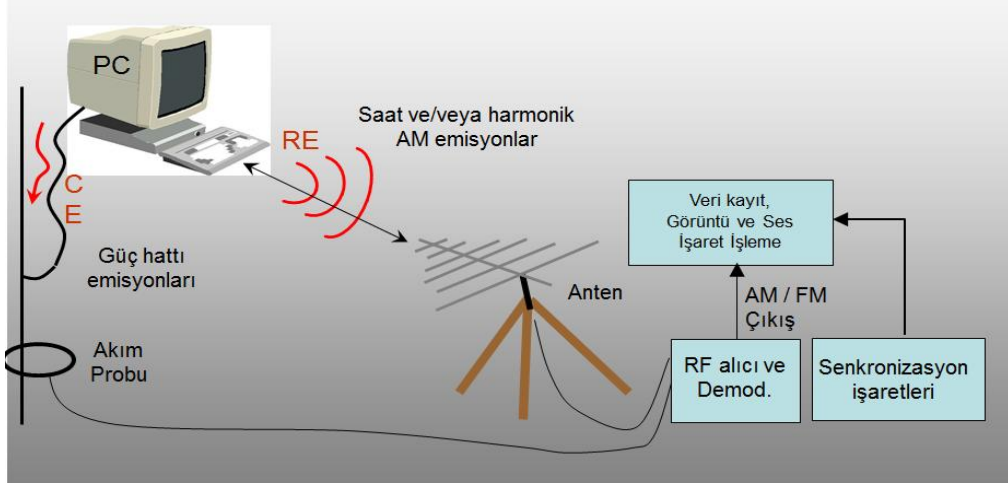
4.3 TEMPEST Problemi Ve Önlemleri

Başkaları tarafından ele geçirilmesi istenmeyen gizli bilgileri saklayan, ileten ve işleyen cihazlardan ortama yayılan kontrol edemediğimiz elektromanyetik enerji, bu gizli bilgileri içeren sinyalleri içerebilmektedir. Bu sinyaller başkaları tarafından ele geçirilip, içerdiği gizli bilgi çözülebilir ve bu nedenle de bir bilgi güvenliği problemi ortaya çıkabilmektedir. Dolayısıyla bu bir TEMPEST problemi ve bu problemin çözümünde TEMPEST çalışmaları ile sağlanmaktadır.

TEMPEST için alınacak önlemlerin belirlenebilmesi için öncelikle gizlilik dereceli bilginin hangi yollar ile istenmeyen bölgelere ulaştığını belirlemek gerekmektedir. Bilgi içeren bu istenmeyen kaçaklar iki türlü istenmeyen bölgelere ulaşabilmektedir. Bunlar: Uzaysal ışıma "RE" (Radiated Emission) ve elektriksel iletkenlik yolu "CE" (Conducted Emission) ile olmaktadır. Şekil 4.2'de bu kaçaklar temsili olarak gösterilmektedir.

Uzaysal ışıma: Bilgi içeren kaçakların havadan enerji yolu ile yayılması sonucu oluşmaktadır.

Elektriksel iletkenlik: Bir cihazın bilgi içeren yayılım yapması sonucunda bu bilginin cihazın güç veya veri kabloları yoluyla, ya da cihazın en yakınında bulunan raslantısal bir iletken (metal borular, telefon hatları vs.) vasıtasıyla iletilmesi olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4. 2 TEMPEST kaçakları

Uzaysal ışıma yolu ile oluşan kaçaklar alıcı antenler vasıtasıyla, elektriksel iletkenlik yolu ile yayılan kaçaklar ise bir akım probu yardımıyla tersine mühendislik yapılarak incelenebilmektedir. Bu kaçakların engellenebilmesi için alınması gereken bazı önlemler bulunmaktadır. Bu önlemlerin tamamı KIRMIZI ve SİYAH sistemlerin, cihazların ve kabloların belli kurallar çerçevesinde birbirinden ayırt edilmesi ve meydana gelebilecek tüm kaçış yollarının azaltılmasını içermektedir. Bu ayrımı yaparken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar bulunmaktadır. Bu hususlar aşağıda verilmektedir;

- Binaların olası bilgi kaçaklarına karşı ne kadar bir koruma sağladığını belirlemek,
- Gerek duyulursa KIRMIZI bölgeleri elektromanyetik olarak izole etmek,
- Sistemin topraklamasını doğru yapmak,
- Güç ve veri kablolarını doğru tipte kullanarak uygun bir şekilde hatları çekmek,
- Gerekteğinde güç ve işaret hatları için filtre kullanmak ve
- Cihazları test ederek uygun bölgelerde kullanmak olarak sıralanabilmektedir.

Yukarıda verilen hususlar Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO) tarafından SDIP-27 [19] (NATO TEMPEST Requirements And Evaluation Procedures) ve SDIP-29 [20] (Facility Design Criteria and Installation of Equipment for the Processing of Classified Information) olmak üzere, TEMPEST standartları başlığı altında anlatılmaktadırlar. Bu standartlar Genelkurmay Başkanlığı tarafından Türk Silahlı Kuvvetleri TEMPEST Test

Yönergesi (MST-401) [21] ve Türk Silahlı Kuvvetleri TEMPEST yönergesi (MY-401) [22] standartları ile millileştirilerek yayımlanmaktadır.

Yayımlanan bu standartlardan SDIP-29'un milli eşdeğeri olan MY-401 dokümanında gizli bilgi bulunduralacak tesisler için genel tesisat kuralları anlatılmaktadır. Bu kurallar çerçevesinde; tesislerinde Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) için özel ve üstü gizlilik dereceli anlam ifade eden bilgiyi işlemek isteyen kurumlar veya firmalar, Genelkurmay Başkanlığı'nın Türkiye'de tek olarak yetkilendirdiği kurum olan TÜBİTAK BİLGEM Test ve Değerlendirme Başkan Yardımcılığı altında bulunan TEMPEST Test Ve Değerlendirme Laboratuvarı tarafından verilen TEMPEST Tesis Değerlendirme Sonuç Ve Uygunluk Raporu'nu almak zorundadırlar.

4.4 TEMPEST Tesisat

Ortama elektromanyetik enerji yayan cihazlar ve sistemlerin daha önce de bahsedilen çeşitli yollarla istenmeyen kaçaklar meydana getirebilmektedirler. Bu cihazların bağlı oldukları güç ve veri kabloları, etraflarından bulunan ve tesisten dış ortama bağlantısı olan cihazlar, metal kalorifer ve su boruları gibi iletkenlik yolları oluşturabilecek elemanlar TEMPEST açısından kaçaklar meydana getirebilmektedirler. Bazen bina değeri iyi olan tesislerde iletkenlik yolu ile kaçak meydana gelme riski kimi yollar için düşüktür, fakat bazı iletkenlik yolları içinse tesis ne kadar güvenli olursa olsun TEMPEST riskleri oldukça yüksek olabilmektedir. Bu nedenle tesisin bina değerinin ne kadar iyi olduğuna bakılmaksızın gizli bilgileri işleyen cihazların bağlı olduğu bir tesisatta standartta belirlitilen kurallara uyulması gerekmektedir.

Genelkurmay Başkanlığı tarafından yayımlanan MY-401 yönergesinde gizlilik dereceli bilgileri işlemede kullanılan cihazların, tesis içerisinde bulunan diğer cihazlardan, kablolardan, üreticilerden, metal iletkenlerden ne kadar uzakta olmaları gerektiği anlatılmaktadır. Ayrıca kullanılacak güç ve veri kablolarının, kablo kanallarının nasıl olması gerektiği yine bu yönergede anlatılmaktadır.

Bina değerinin istenilen seviyede olmadığı durumlarda gizlilik dereceli bilgilerin işlendiği alanlarda bina değerinin istenilen seviyeye gelmesi için ekranlı yapıların kullanılması gerekebilmektedir. Bu durumlarda bu yapıların sağlaması gereken

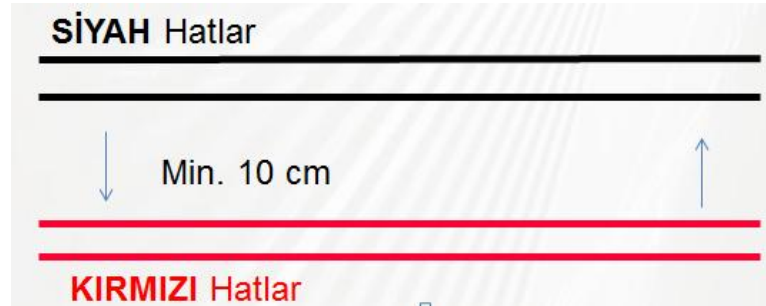
kurallarda bu yönergede anlatılmaktadır. MY-401 yönergesinde belirtilen tesisat kurallarına göre inşa edilen tesislerde TEMPEST konusunda oluşabilecek risklerin en aza indirilmesi sağlanmaktadır.

4.4.1 KIRMIZI ve SİYAH Kablo Ayrımı

Gizlilik dereceli bir bilgi işleyecek olan tesislerde, TEMPEST tesisat önlemleri kapsamında güç ve veri kablolarının kurulumunun nasıl yapılması gerektiği MY-401 yönergesinde anlatılmaktadır. Bu kurulum ile ilgili yönergede olan bazı kurallar aşağıda verilmektedir [22].

- Tesiste KIRMIZI ve SİYAH güç/veri hatları birbirinden en az 10 cm uzakta olmalıdırlar (Şekil 4.3). KIRMIZI hattın SİYAH hat ile kesişmesinin zorunlu olduğu durumlarda hatlar birbirini dik açıyla kesecek şekilde çekilmelidirler,
- KIRMIZI cihazların SİYAH cihaz ve kablolarına uzaklığı en az 1 metre olmalıdır ve
- Her KIRMIZI işlemci ile RF üreticiler ve bunlara bağlı kablolar arasında en az 2 m mesafe bırakılmalıdır.

Ayrıca, KIRMIZI veri hatlarının fiber optik veya tüm KIRMIZI hatların da yapılabiliyorsa ekranlı (shielded) kablo olması TEMPEST açısından alınabilecek güvenli önlemlerden bir tanesi olarak tavsiye edilmektedir.



Şekil 4. 3 KIRMIZI-SİYAH kablo ayrımı kuralı

ÇAPRAZ KARIŞMA DENEYLERİ VE SONUÇLARI

Yapılan deneyler ile TEMPEST Tesisat yönergesinde (MY-401) bulunan KIRMIZI ve SİYAH kablo ayırımının minimum 10 cm olması kuralı incelenmektedir. Bunun için çeşitli deney düzenekleri kurularak ölçümler yapılmaktadır. Deneylerde elde edilen yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışma ölçüm sonuçları grafik olarak verilmektedir. Ayrıca, bu grafiklerde verilen “NEXT” ve “FEXT” ifadeleri sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenardaki çapraz karışmanın seviyesini temsil etmektedir.

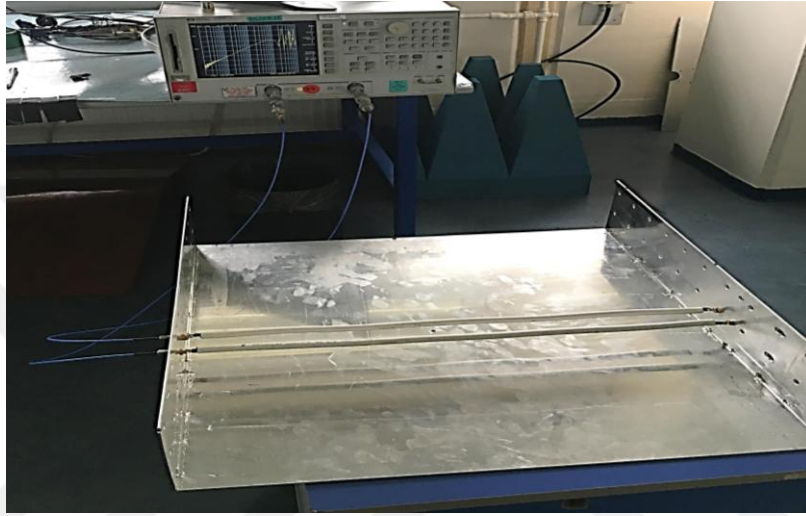
5.1 Çapraz Karışma Deney Düzenekleri

Yapılan tüm deneylerde HP8753E Network analizörü kullanılarak 100 kHz-1 GHz frekans aralığında ölçümler alınmaktadır ve bu aralıktaki frekanslarda cihazdan üretilen sinyaller “0 dBm” gücündedir.

5.1.1 KIRMIZI Güç Kablosu Ve SİYAH Güç Kablosu

Kurulan bu deney düzeneği ile elektriksel iletkenlik yoluyla kaçak yapan KIRMIZI bir cihazın güç kablosu ile bu kabloyla aynı kanalla taşınan veya herhangi bir şekilde yanyana giden rasgele bir SİYAH güç kablosu arasında meydana gelen çapraz karışma modellenmektedir. Şekil 5.1’de kurulan deney düzeneği gösterilmektedir. Verilen düzenekte kullanılan güç kabloları elektrik iç tesisatlarında en sık kullanılan $3 \times 2.5 \text{ mm}^2$ H05VV-F TTR tipi kablodur. Toprak yüzeyi için galvaniz kaplı alüminyum plaka kullanılmaktadır. 100 kHz-1 GHz frekans aralığındaki sinyaller network analizörün birinci kanalından üretilerek KIRMIZI güç kablosuna giriş yapılmaktadır ve bu hat 50

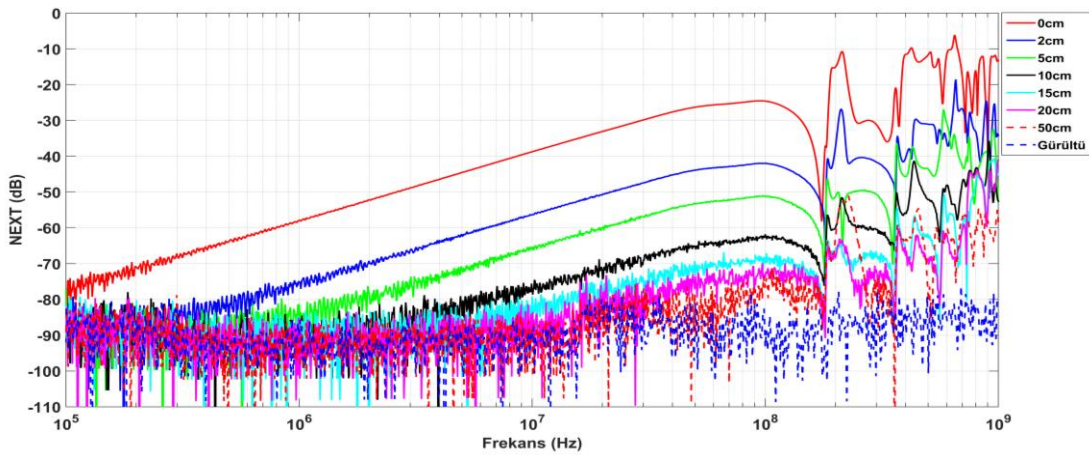
ohm'luk direnç ile sonlandırılmaktadır. Network analizörün ikinci portu ise SİYAH güç kablosunun yakın ve uzak kenarına sırayla takılarak 50 ohm direnç ile sonlandırılmaktadır. Bu işlemlerden sonra KIRMIZI-SİYAH kablo arası ayrımlar 0 cm, 2 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 50 cm ve kabloların toprak düzleminde yüksekliği ise 0 cm, 5 cm, 10 cm olacak şekilde ayarlanmaktadır. Ayrıca her bir KIRMIZI-SİYAH kablo ayrımı ve yükseliği için kabloların uzunlukları 50 cm, 250 cm ve 500 cm olacak şekilde değiştirilmektedir. Oluşacak tüm bu kombinasyonlar ile ölçümler yapılmaktadır.



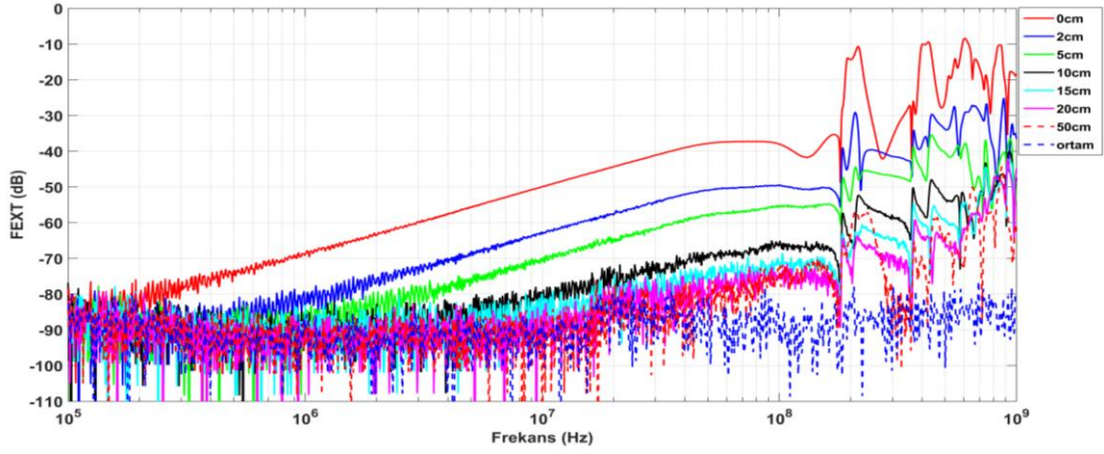
Şekil 5. 1 KIRMIZI ve SİYAH güç kablosu çapraz karışma deney düzeneği

5.1.1.1 50 cm Uzunluk Ve 0 cm Yükseklik için Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.2 ve 5.3'te 0 cm yükseklikte her bir KIRMIZI-SİYAH ayrım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda ölçülen çapraz karışma seviyesi sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 2 0 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

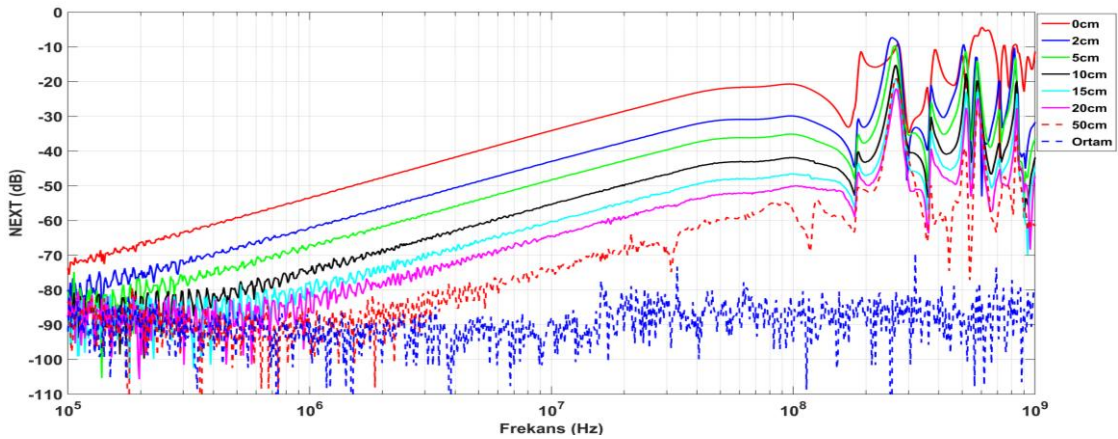


Şekil 5. 3 0 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

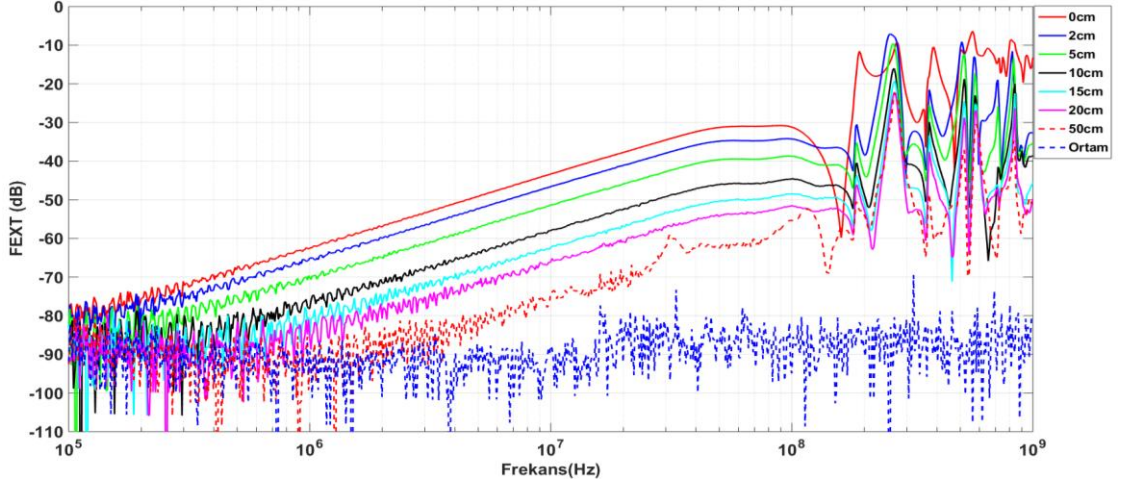
Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenar ve uzak kenarda yaklaşık olarak 30 dB'lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise, kablolar arası mesafe 0 cm'den 10 cm'ye çıktığında maksimum çapraz karışma seviyesinin yakın ve uzak kenarda yaklaşık olarak 30 dB azaldığı görülmektedir. Ayrıca rezonans bölgesindeki bazı frekanslarda, maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayırımından bağımsız bir şekilde aynı seviyede ölçüldüğü görülmektedir.

5.1.1.2 50 cm Uzunluk 5 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te 5 cm yükseklikte her bir KIRMIZI-SİYAH ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda ölçülen çapraz karışma seviyesi sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 4 5 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

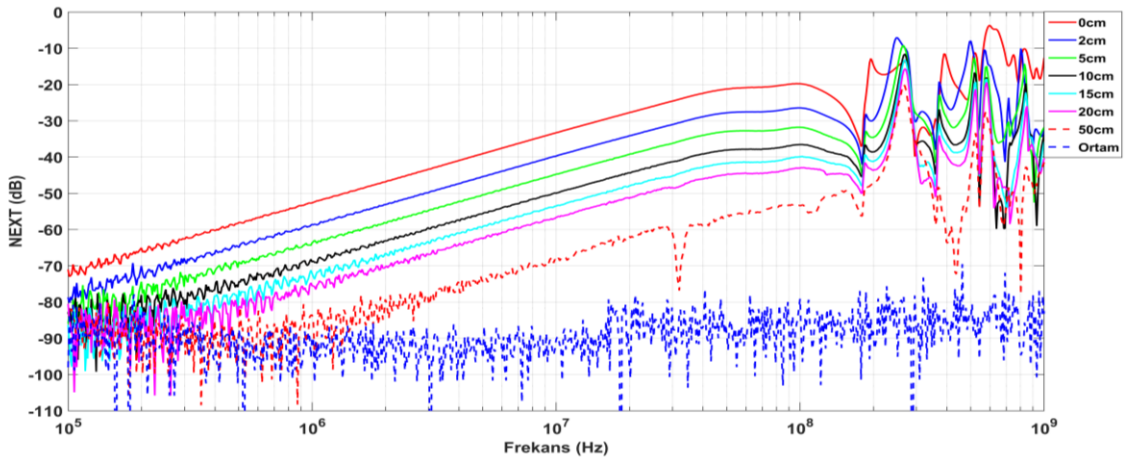


Şekil 5. 5 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

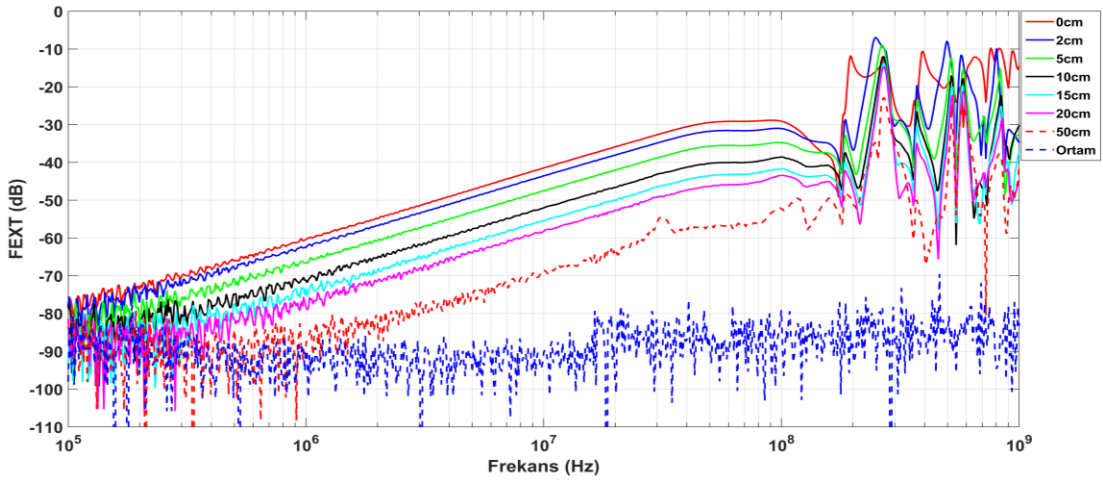
Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 20 dB'lik, uzak kenarda ise yaklaşık olarak 15 dB'lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablolar arası mesafenin çapraz karışmaya etkisi görülememektedir ve ayrıca rezonans bölgesinde maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayırımından bağımsız olduğu da görülmektedir.

5.1.1.3 50 cm Uzunluk 10 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'te 10 cm yükseklikte her bir KIRMIZI-SİYAH ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda ölçülen çapraz karışma seviyesi sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 6 10 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

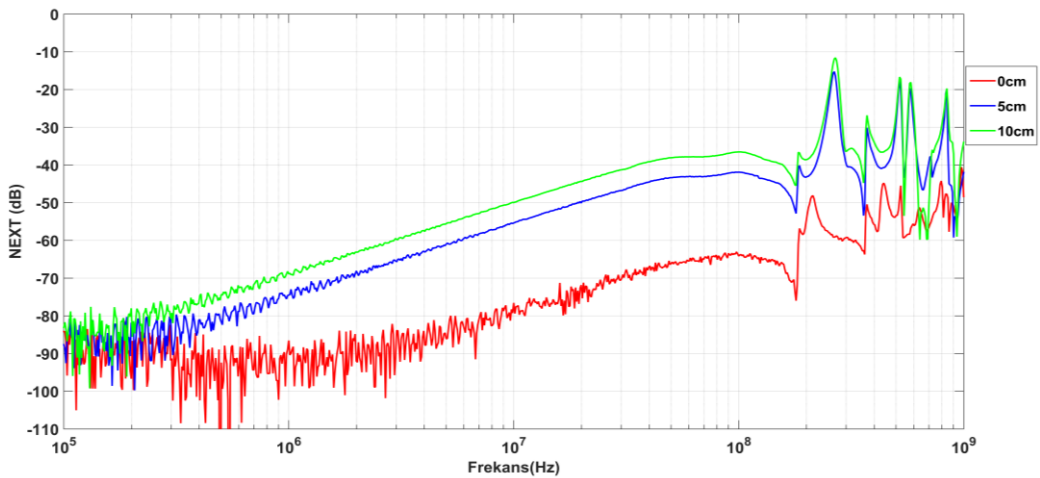


Şekil 5. 7 10 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

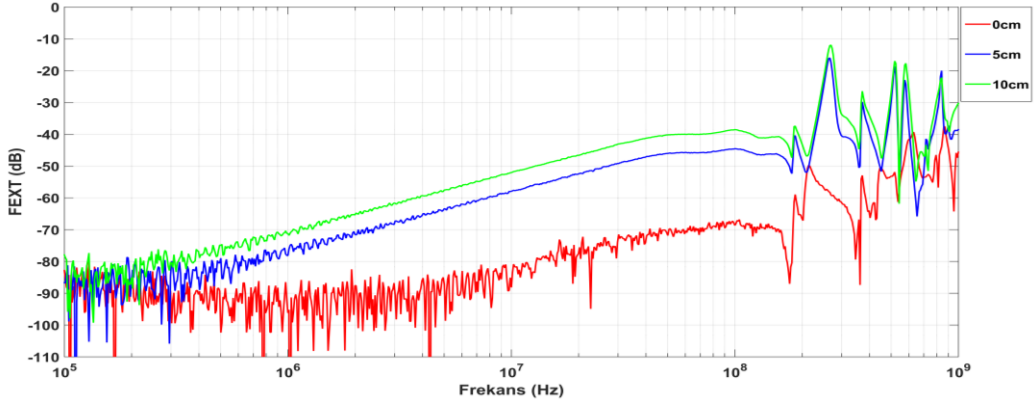
Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 20 dB'lik, uzak kenarda ise yaklaşık olarak 10 dB'lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablolar arası mesafenin çapraz karışmaya etkisi görülememektedir ve ayrıca rezonans bölgesinde maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayırımından bağımsız olduğu da görülmektedir.

5.1.1.4 50 cm Uzunluk İçin Yükseklik Karşılaştırmaları

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da 0 cm, 5 cm ve 10 cm yükseklik ve 10 cm kablolar arası mesafe için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar için alınan çapraz karışma seviyesi karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 8 Yüksekliğin yakın kenar çapraz karışma seviyesine etkisi

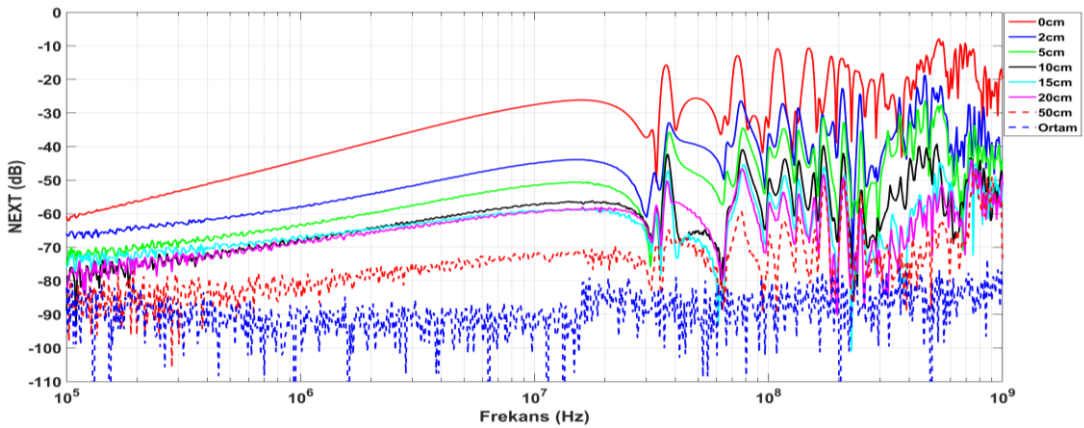


Şekil 5. 9 Yüksekliğin uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisi

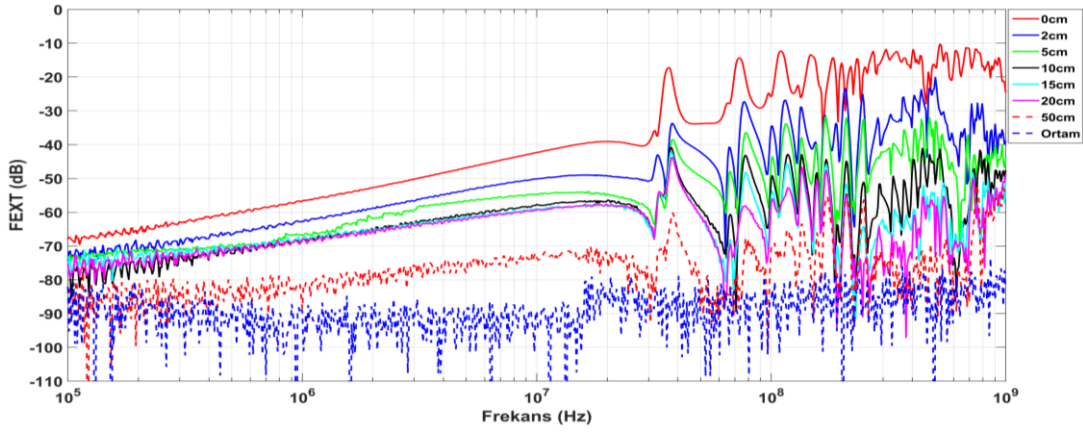
Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kabloların toprak düzlemine olan yüksekliği arttıkça çapraz karışmanın seviyesi de artmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 30 dB'lik, uzak kenarda da yine yaklaşık olarak 30 dB'lik artış görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise yüksekliğin özellikle 5 cm'den ve 10 cm'ye çıkarılmasının çapraz karışmanın seviyesini çok değiştirmedeği görülmektedir. Fakat yüksekliğin 0 cm'den 10 cm'e çıkarılması durumunda ise rezonans frekansı bölgesindeki maksimum çapraz karışmanın seviyesinin yaklaşık olarak 40 dB arttığı görülmektedir.

5.1.1.5 250 cm Uzunluk Ve 0 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.10 ve 5.11'de 0 cm yükseklikte her bir KIRMIZI-SİYAH ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda ölçülen çapraz karışma seviyesi sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 10 0 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

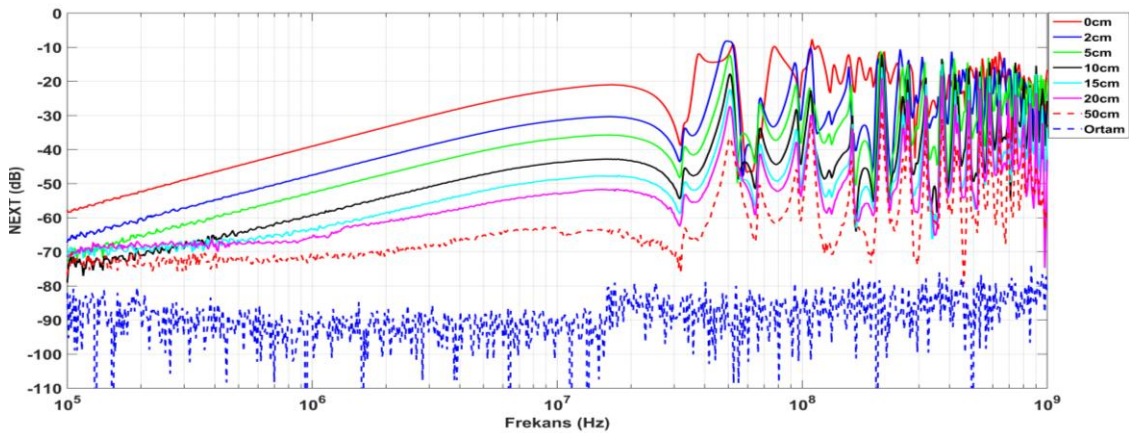


Şekil 5. 11 0 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

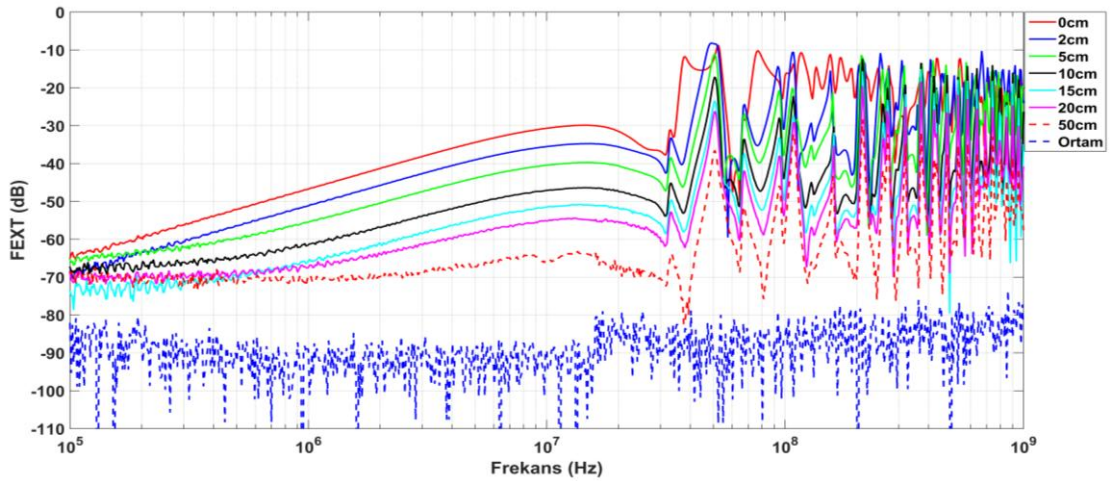
Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 30 dB’lik, uzak kenarda ise yaklaşık olarak 20 dB’lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise, kablolar arası mesafe 0 cm’den 10 cm’ye çıktığında maksimum çapraz karışma seviyesinin yakın ve uzak kenarda yaklaşık olarak 30 dB azaldığı görülmektedir. Ayrıca rezonans bölgesindeki bazı frekanslarda, maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayırımından bağımsız bir şekilde aynı seviyede ölçüldüğü görülmektedir.

5.1.1.6 250 cm Uzunluk Ve 5 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.12 ve 5.13’de 5 cm yükseklikte her bir KIRMIZI-SİYAH ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda ölçülen çapraz karışma seviyesi sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 12 5 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

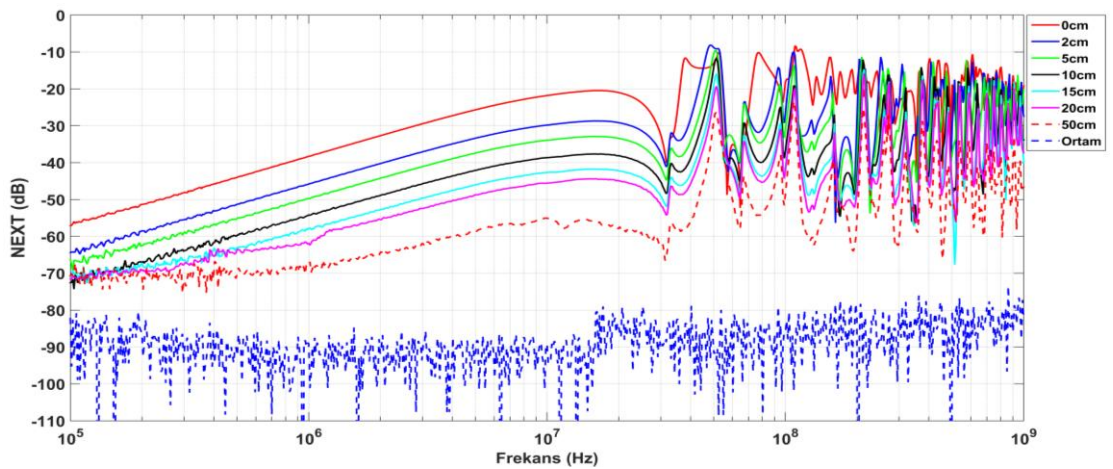


Şekil 5. 13 5 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

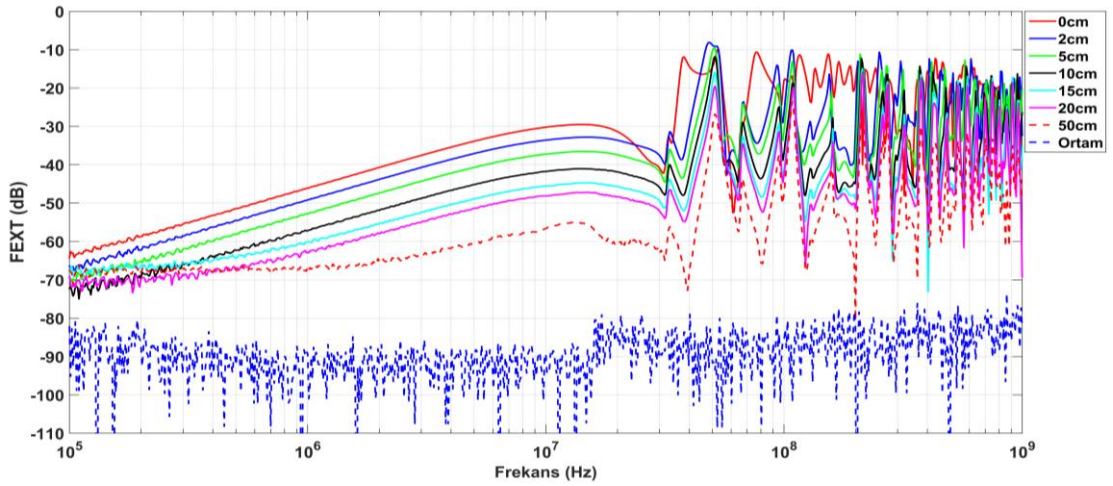
Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 20 dB'lik, uzak kenarda ise yaklaşık olarak 15 dB'lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablolar arası mesafenin çapraz karışmaya etkisi görülememektedir ve ayrıca rezonans frekansı bölgesinde maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayırımından bağımsız olarak ölçüldüğü görülmektedir.

5.1.1.7 250 cm Uzunluk Ve 10 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.14 ve 5.15'te 10 cm yükseklikte her bir KIRMIZI-SİYAH ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda ölçülen çapraz karışma seviyesi sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 14 10 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

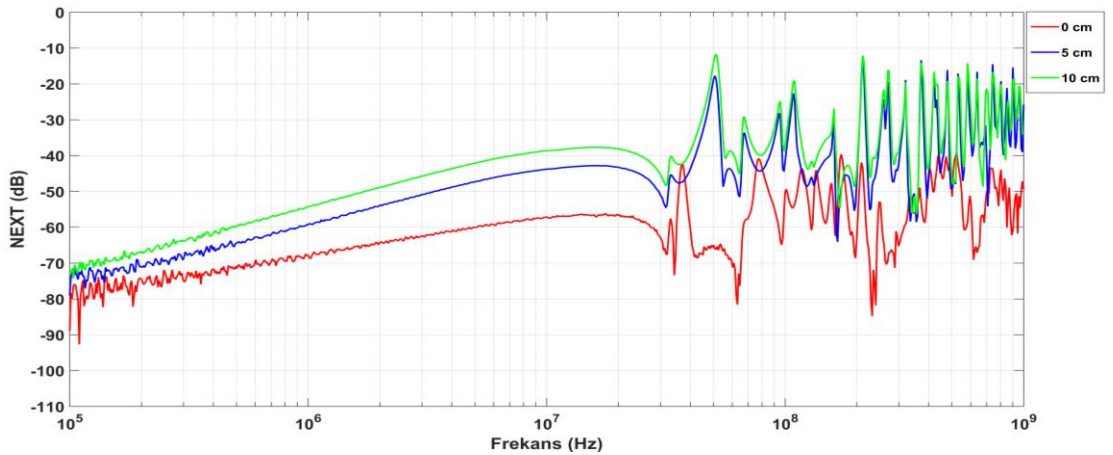


Şekil 5. 15 10 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

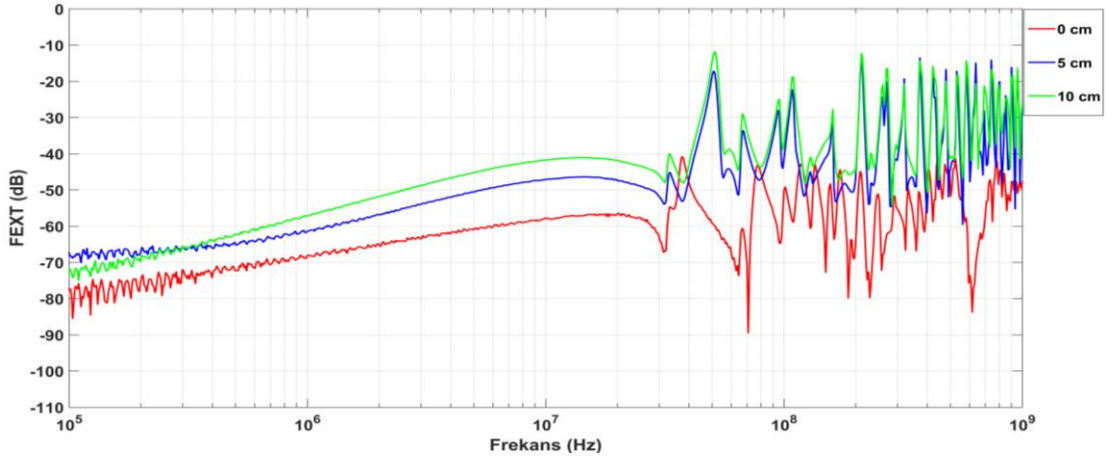
Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 20 dB'lik, uzak kenarda ise yaklaşık olarak 10 dB'lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablolar arası mesafenin çapraz karışmaya etkisi görülememektedir ve ayrıca rezonans frekansı bölgesinde maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayırımından neredeyse bağımsız olarak ölçüldüğü görülmektedir.

5.1.1.8 250 cm Uzunluk İçin Yükseklik Karşılaştırmaları

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de 0 cm, 5 cm ve 10 cm yükseklik ve 10 cm kablolar arası mesafe için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar için alınan çapraz karışma seviyesi karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 16 Yüksekliğin yakın kenar çapraz karışma seviyesine etkisi

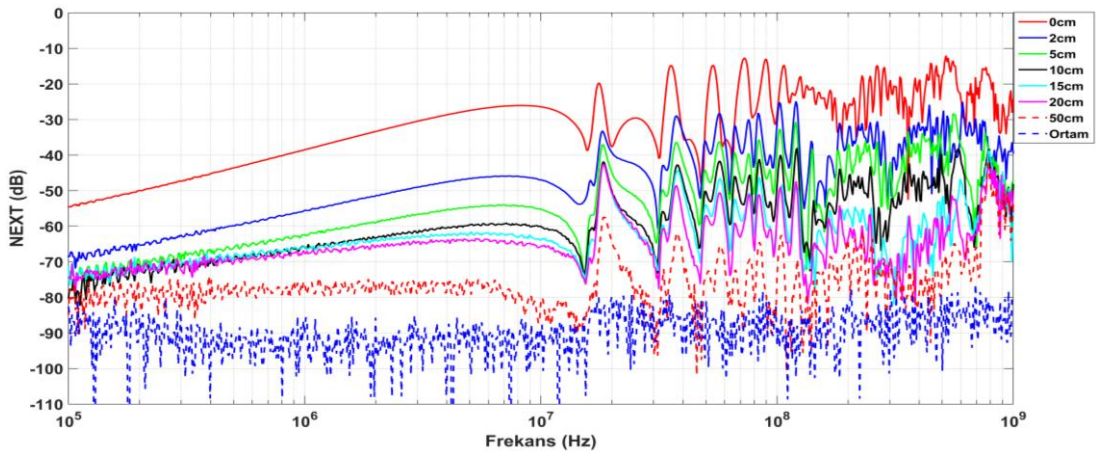


Şekil 5. 17 Yüksekliğin uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisi

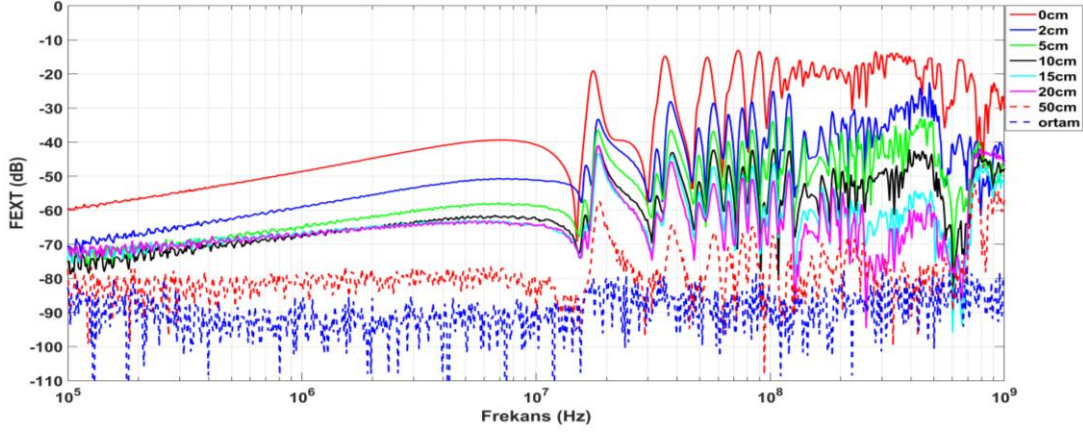
Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kabloların toprak düzlemine olan yüksekliği arttıkça çapraz karışmanın seviyesi de artmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 30 dB'lik, uzak kenarda ise yaklaşık olarak 20 dB'lik artış görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise yüksekliğin özellikle 5 cm'den ve 10 cm'ye çıkarılmasının çapraz karışmanın seviyesini çok değiştirmediği görülmektedir. Fakat yüksekliğin 0 cm'den 10 cm'e çıkarılması durumunda ise rezonans bölgesindeki maksimum çapraz karışmanın yaklaşık olarak 30 dB arttığı görülmektedir.

5.1.1.9 500 cm Uzunluk Ve 0 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.18 ve 5.19'da 0 cm yükseklikte her bir KIRMIZI-SİYAH ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda ölçülen çapraz karışma seviyesi sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 18 0 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

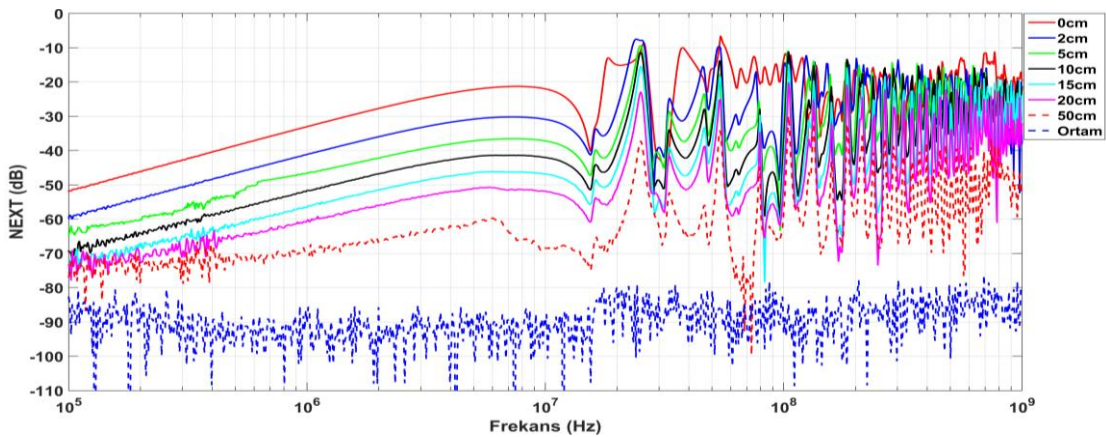


Şekil 5. 19 0 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

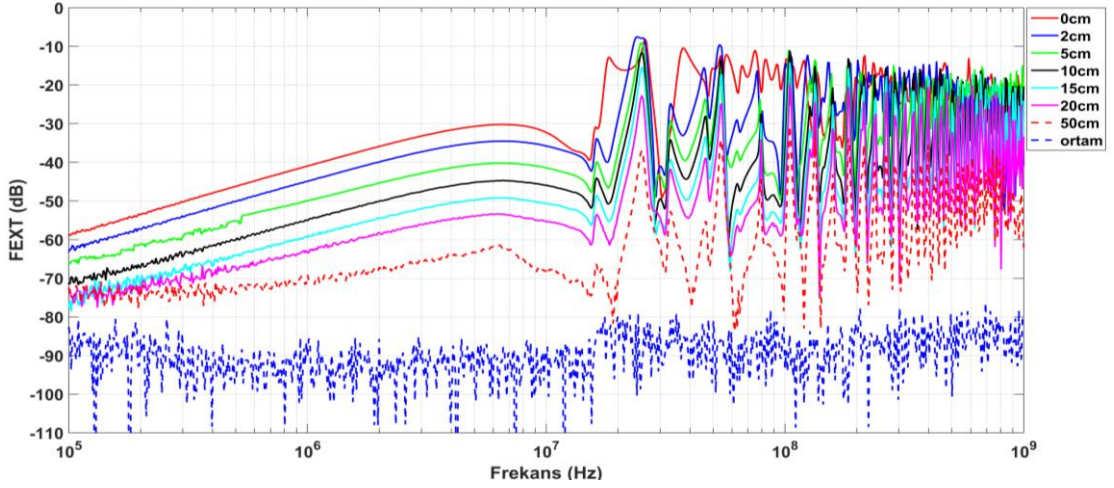
Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 30 dB'lik, uzak kenarda ise yaklaşık olarak 20 dB'lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise, kablolar arası mesafe 0 cm'den 10 cm'ye çıktığında maksimum çapraz karışma seviyesinin yakın ve uzak kenarda yaklaşık olarak 30 dB azaldığı görülmektedir. Ayrıca rezonans bölgesindeki bazı frekanslarda, maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayırımından bağımsız bir şekilde aynı seviyede ölçüldüğü görülmektedir.

5.1.1.10 500 cm Uzunluk Ve 5 cm Yükseklik İçin Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.20 ve 5.21'de 5 cm yükseklikte her bir KIRMIZI-SİYAH ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda ölçülen çapraz karışma seviyesi sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 20 5 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

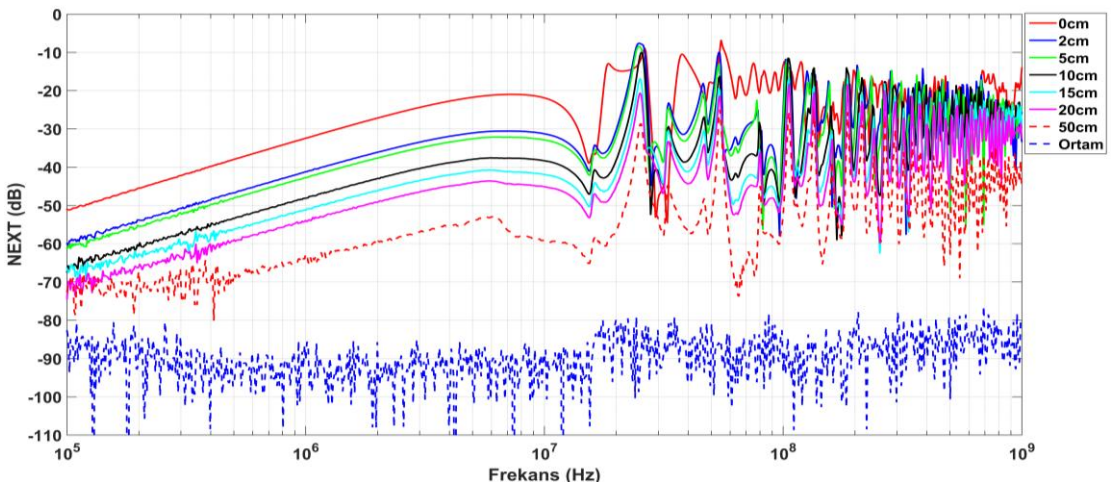


Şekil 5. 21 5 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

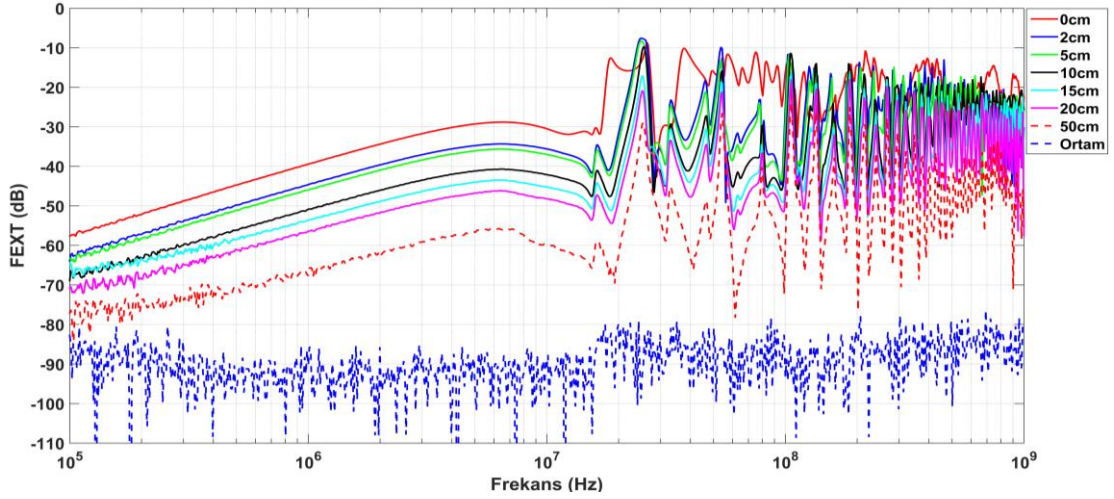
Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 20 dB’lik, uzak kenarda ise yaklaşık olarak 15 dB’lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablolar arası mesafenin çapraz karışmaya etkisi görülememektedir ve ayrıca rezonans bölgesinde maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayırımından neredeyse bağımsız olduğu da görülmektedir.

5.1.1.11 500 cm Uzunluk Ve 10 cm Yükseklik için Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.22 ve 5.23’te 10 cm yükseklikte her bir KIRMIZI-SİYAH ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda ölçülen çapraz karışma seviyesi sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 22 10 cm yükseklik için yakın kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

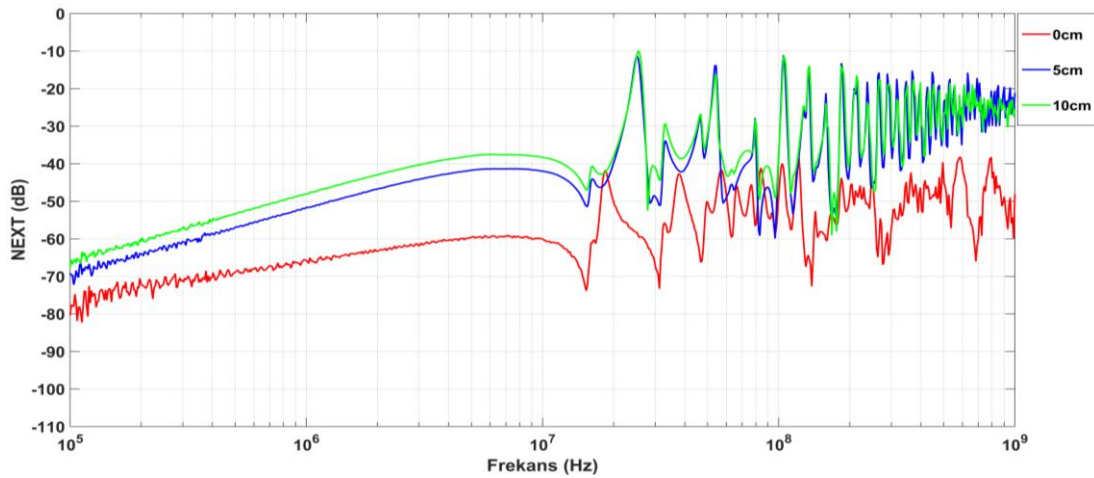


Şekil 5.23 10 cm yükseklik için uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçüm sonuçları

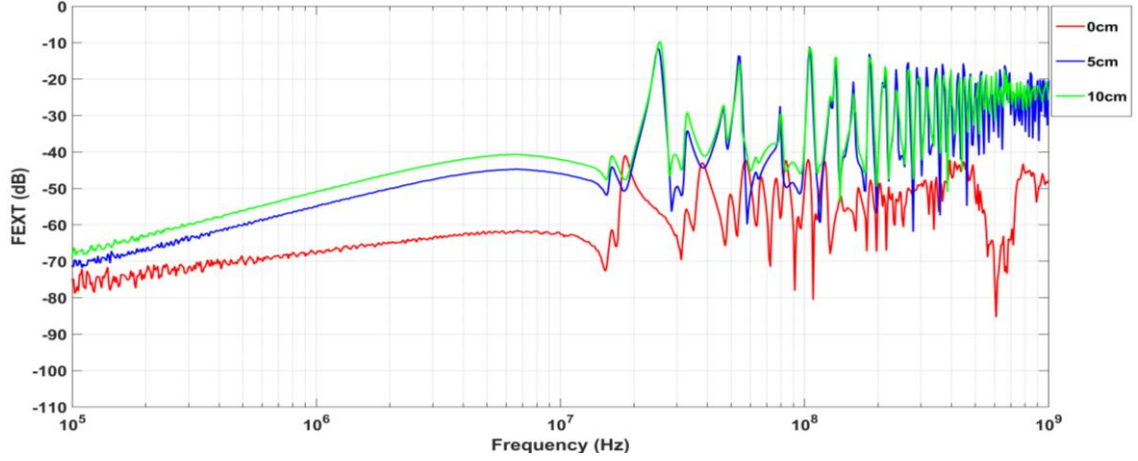
Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 20 dB'lik, uzak kenarda ise yaklaşık olarak 10 dB'lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablolar arası mesafenin çapraz karışmaya etkisi görülememektedir ve ayrıca rezonans bölgesinde maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayırımından neredeyse bağımsız olduğu da görülmektedir.

5.1.1.12 500 cm Uzunluk İçin Yükseklik Karşılaştırmaları

Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te 0 cm, 5 cm ve 10 cm yükseklik ve 10 cm kablolar arası mesafe için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar için alınan çapraz karışma seviyesi karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5.24 Yüksekliğin yakın kenar çapraz karışma seviyesine etkisi

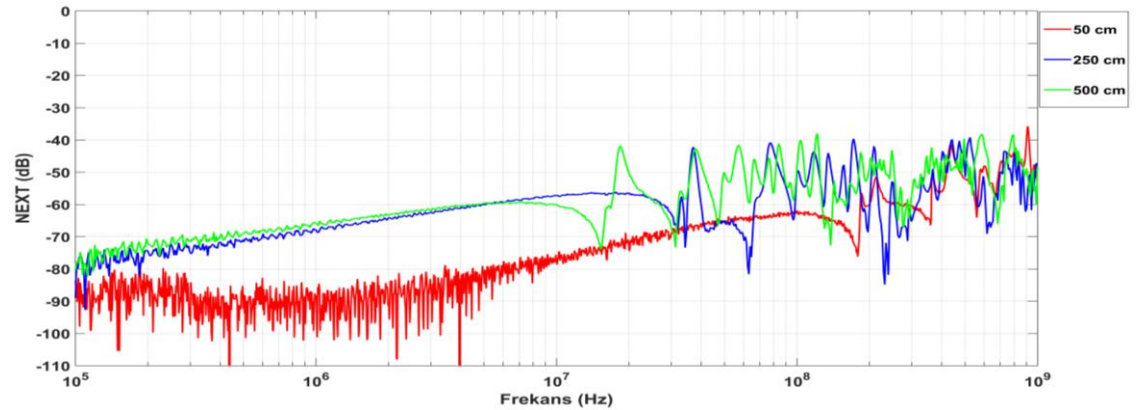


Şekil 5. 25 Yüksekliğin uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisi

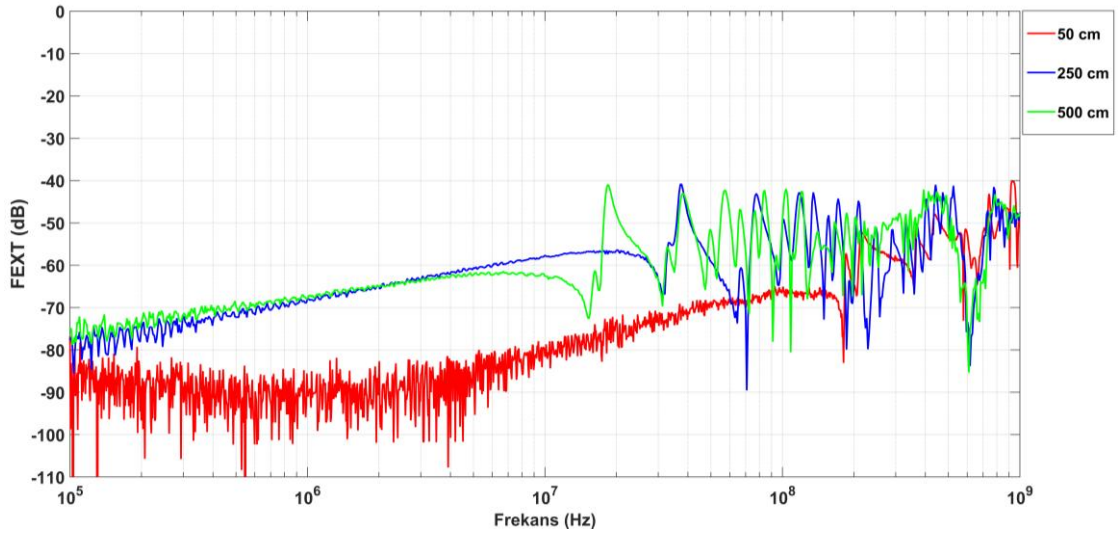
Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kabloların toprak düzlemine olan yüksekliği arttıkça çapraz karışmanın seviyeside artmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık olarak 20 dB'lik, uzak kenarda da yine yaklaşık olarak 20 dB'lik artış görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise yüksekliğin özellikle 5 cm'den ve 10 cm'e çıkarılmasının çapraz karışmanın seviyesini değiştirmedığı görülmektedir. Fakat yüksekliğin 0 cm'den 10 cm'e çıkarılması durumunda ise rezonans bölgesindeki maksimum çapraz karışmanın yaklaşık olarak 30 dB arttığı görülmektedir.

5.1.1.13 Kablo Uzunluklarının Çapraz Karışma Seviyesine Etkisi

Şekil 5.26 ve 5.27'de 0 cm yükseklik ve 10 cm kablo ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda çapraz karışma seviyesinin kablo uzunluğu ile nasıl değiştiğinin 50 cm, 250 cm ve 500 cm kablo uzunluklarında karşılaştırılmalı sonuçları verilmektedir.



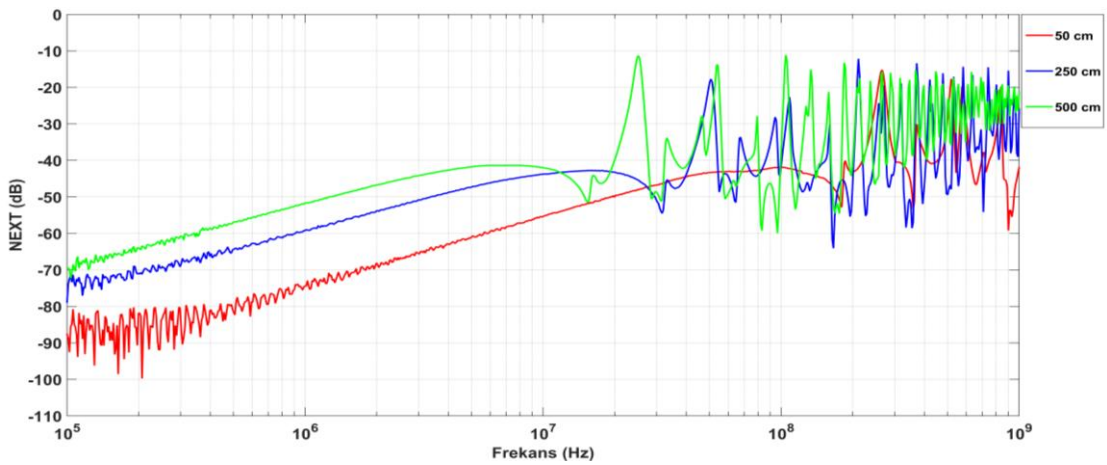
Şekil 5. 26 0 cm yükseklik için uzunluğun yakın kenar çapraz karışma seviyesine etkisinin karşılaştırma sonuçları



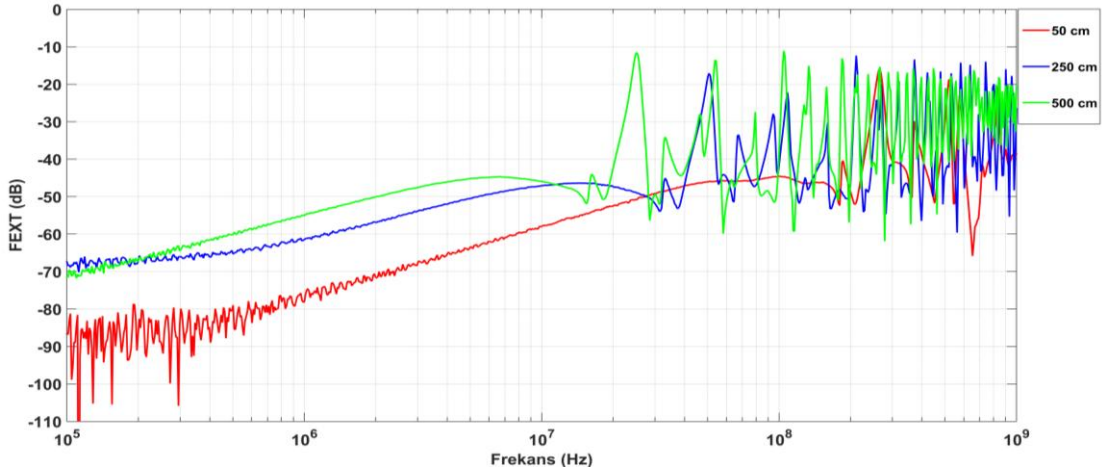
Şekil 5. 27 0 cm yükseklik için uzunluğun uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisinin karşılaştırma sonuçları

Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kabloların uzunluğu arttıkça çapraz karışmanın seviyesi de artmaktadır. Fakat ölçülen maksimum çapraz karışma seviyesi değişmemektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablo uzunluğunun artırılması maksimum çapraz karışmanın seviyesini değiştirmedığı görülmektedir. Fakat kablo uzunluğu arttıkça sistemin giderek daha düşük frekanslarda rezonansa girdiği görülmektedir.

Şekil 5.28 ve 5.29’de 5 cm yükseklik ve 10 cm kablo ayırma mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda çapraz karışma seviyesinin kablo uzunluğu ile nasıl değiştiğinin 50 cm, 250 cm ve 500 cm kablo uzunlukları için karşılaştırılmalı sonuçları grafik olarak verilmektedir.



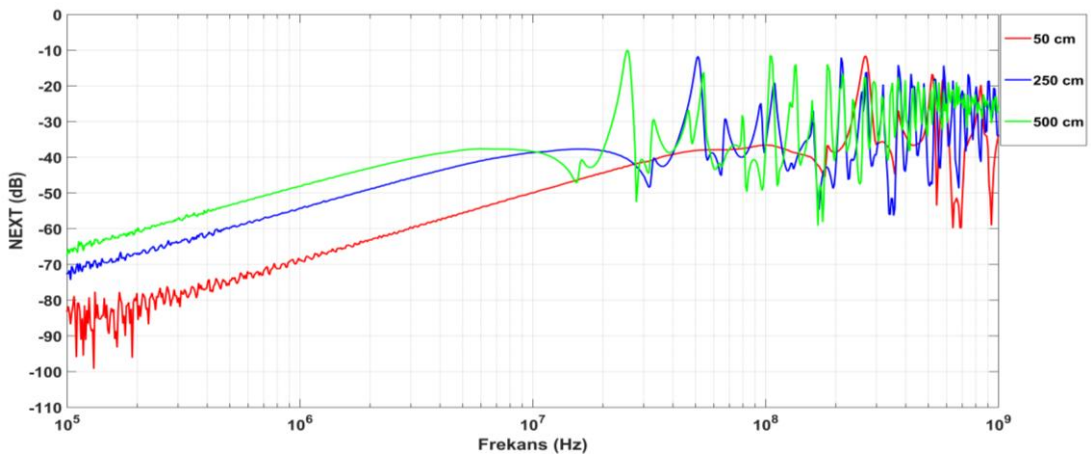
Şekil 5. 28 5 cm yükseklik için uzunluğun uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisinin karşılaştırma sonuçları



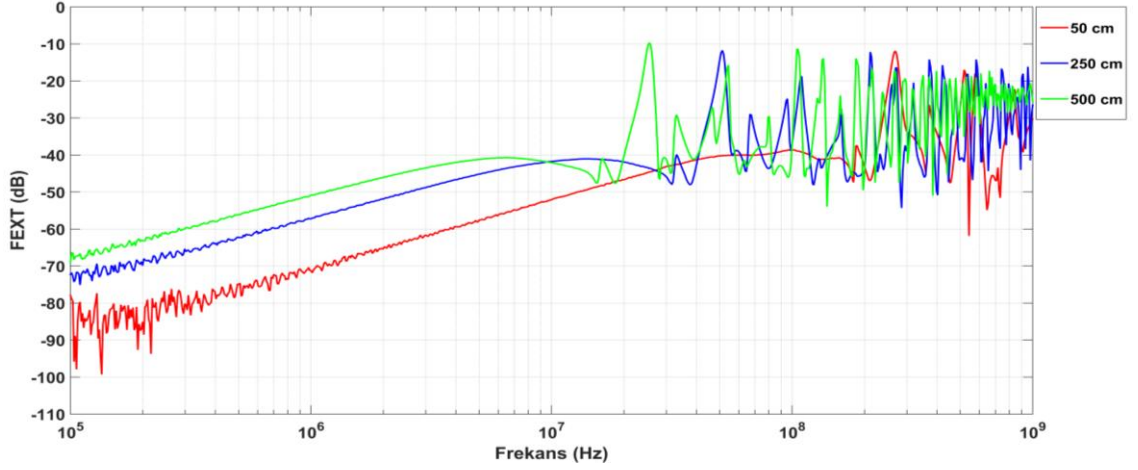
Şekil 5. 29 5 cm yükseklik için uzunluğun uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisinin karşılaştırma sonuçları

Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'da görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kabloların uzunluğu arttıkça çapraz karışmanın seviyesi de artmaktadır. Fakat ölçülen maksimum çapraz karışma seviyesi değişmemektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablo uzunluğunun artırılması maksimum çapraz karışmanın seviyesini değiştirmedığı görülmektedir. Fakat kablo uzunluğu arttıkça sistemin giderek daha düşük frekanslarda rezonansa girdiği görülmektedir.

Şekil 5.30 ve 5.31'de 10 cm yükseklik ve 10 cm kablo ayırım mesafesi için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenarda çapraz karışma seviyesinin kablo uzunluğu ile nasıl değiştiğinin 50 cm, 250 cm ve 500 cm kablo uzunlukları için karşılaştırılmalı sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 5. 30 10 cm yükseklik için uzunluğun yakın kenar çapraz karışma seviyesine etkisinin karşılaştırma sonuçları



Şekil 5. 31 10 cm yükseklik için uzunluğun uzak kenar çapraz karışma seviyesine etkisinin karşılaştırma sonuçları

Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kabloların uzunluğu arttıkça çapraz karışmanın seviyeside artmaktadır. Fakat ölçülen maksimum çapraz karışma seviyesi değişmemektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablo uzunluğunun arttırılması maksimum çapraz karışmanın seviyesini değiştirmedığı görülmektedir. Fakat kablo uzunluğu arttıkça sistemin giderek daha düşük frekanslarda rezonansa girdiği görülmektedir.

5.1.2 KIRMIZI Güç Kablosu Ve SİYAH Veri Kablosu

Bölüm 5.1.1'de KIRMIZI bir güç kablosundan SİYAH bir güç kablosu arasında meydana gelen çapraz karışmaya; kablolar arası mesafe, kabloların toprak düzleminden yüksekliği ve kabloların uzunluğunun etkisi detaylı bir şekilde yapılan deneyler ile incelenmiştir. Bu bölümde ise ekranlı kablo kullanmanın çapraz karışma üzerindeki etkisi incelenmektedir.

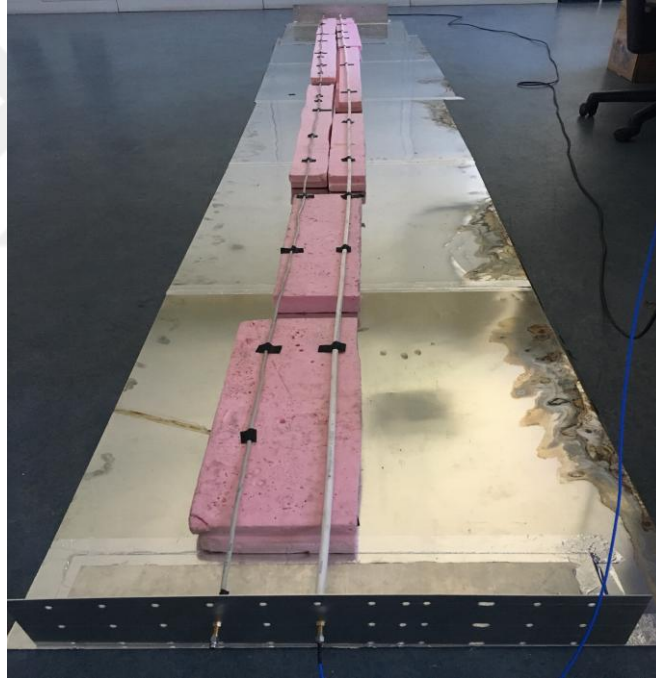
5.1.2.1 5 cm Yükseklik Ve 500 cm Uzunluk için Ölçüm Sonuçları

Kurulan bu deney düzeneği ile elektriksel iletkenlik yoluyla kaçak yapan KIRMIZI bir cihazın güç kablosu ile bu kabloyla aynı kanalla taşınan veya herhangi bir şekilde yanyana giden rasgele bir SİYAH veri kablosu arasında meydana gelen çapraz karışma modellenecektir.

Şekil 5.32 ve 5.33'te kurulan deney düzenekleri gösterilmektedir. Verilen düzenekte kullanılan güç kabloları elektrik iç tesisatlarında en sık kullanılan 3×2.5 mm² H05VV-F

TTR tipi, veri kabloları ise tesislerde çok sık kullanılan CAT-6 (ekransız) ve CAT-7 (ekranlı) kablolardır. Toprak yüzeyi için galvaniz kaplı alüminyum plaka kullanılmaktadır.

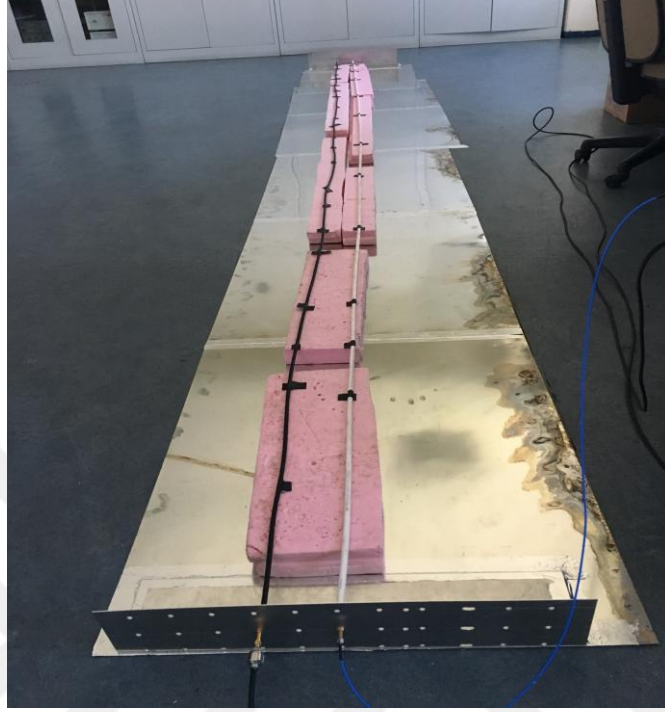
Şekil 5.32'deki deney düzeneğini kurmak için; ekranlı veri kablosunun yakın ve uzak kenarı toprak düzlemi ile konnektörler yardımıyla irtibatlandırılmaktadır. 100 kHz-1 GHz frekans aralığındaki sinyaller network analizörün birinci kanalından üretilerek KIRMIZI güç kablosuna giriş yapılmaktadır ve bu hat 50 ohm'luk bir direnç ile sonlandırılmaktadır. Network analizörün ikinci portu ise SİYAH veri kablosunun yakın ve uzak kenarlarına sırayla takılarak boşta kalan diğer kenar 50 ohm'luk direnç ile sonlandırılmaktadır. Daha sonra kablolar arası mesafe 10 cm için kabloların toprak düzleminden yüksekliği 5 cm ve kabloların uzunlukları 500 cm olacak şekilde ayarlanarak ölçümler alınmaktadır.



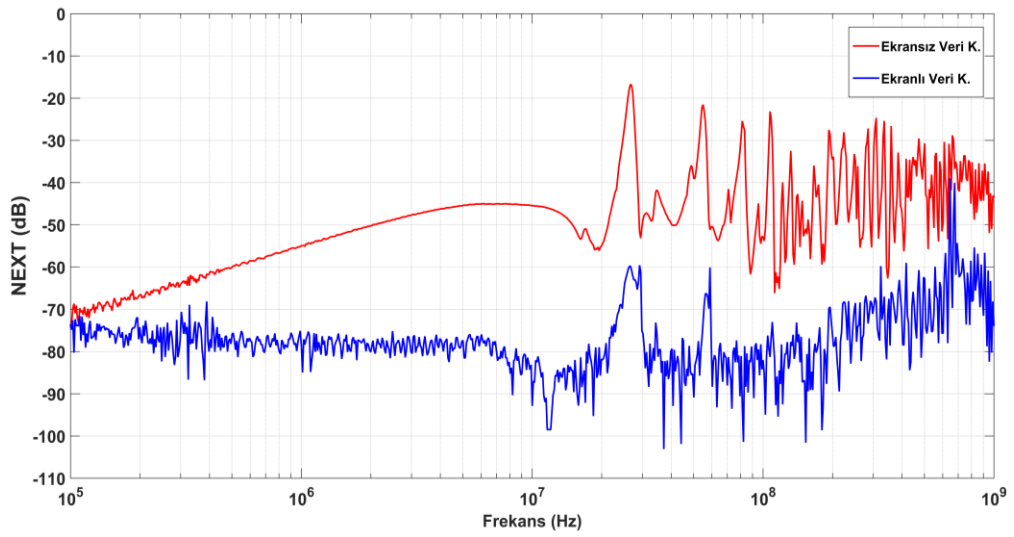
Şekil 5. 32 KIRMIZI güç ve SİYAH ekranlı veri kablosu çapraz karışma deney düzeneği

Şekil 5.33'teki deney düzeneğini kurmak için; ekranlı veri kablosunun yakın ve uzak kenarı ekranlı kısımları ile birlikte toprak düzlemine konnektörler yardımıyla irtibatlandırılmaktadır. 100 kHz-1 GHz frekans aralığındaki sinyaller network analizörün birinci kanalından üretilerek KIRMIZI güç kablosuna giriş yapılmaktadır ve bu hat 50 ohm'luk bir direnç ile sonlandırılmaktadır. Network analizörün ikinci portu ise SİYAH veri kablosunun yakın ve uzak kenarlarına sırayla takılarak boşta kalan diğer kenar 50

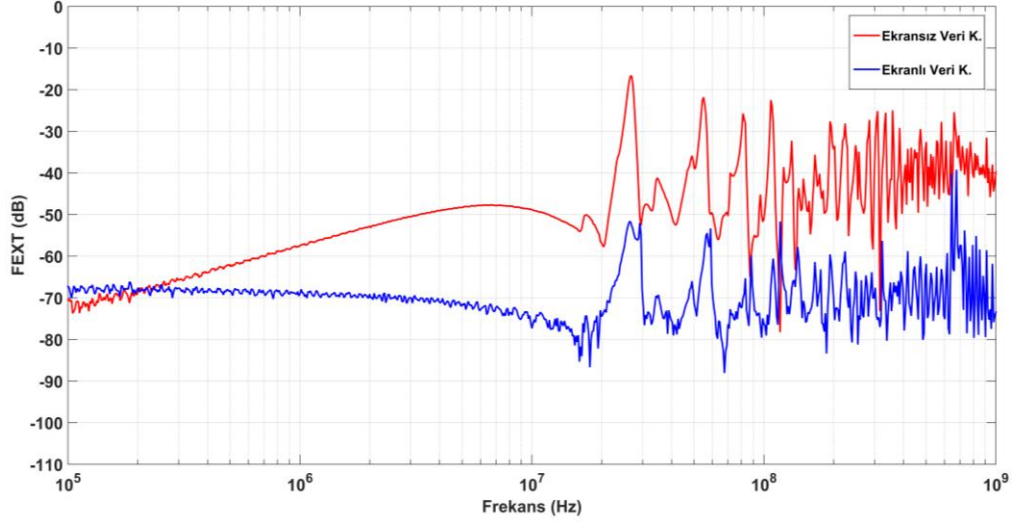
ohm'luk direnç ile sonlandırılmaktadır. Daha sonra kablolar arası mesafe 10 cm için kabloların toprak düzleminde yüksekliği 5 cm ve kabloların uzunlukları 500 cm olacak şekilde ayarlanarak ölçümler alınmaktadır.



Şekil 5. 33 KIRMIZI güç ve SİYAH ekranlı veri kablosu çapraz karışma deney düzeneği Kurulan deney düzenekleri ile yapılan deneyler sonucu elde edilen yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyesi ölçümlerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak sırasıyla, Şekil 5.34 ve 5.35'te verilmektedir.



Şekil 5. 34 Ekranlı ve ekransız veri kabloları için yakın kenar çapraz karışma seviyesinin karşılaştırma sonuçları



Şekil 5. 35 Ekranlı ve ekranlı veri kabloları için uzak kenar çapraz karışma seviyesinin karşılaştırma sonuçları

Şekil 5.34 ve 5.35'te görüldüğü gibi ekranlı alıcı kablo yerine ekranlı alıcı kablo kullanmak yakın kenar ve uzak kenarda meydana gelen çapraz karışmanın seviyesini önemli derecede etkilemektedir. Ölçülen frekans aralığında, 1 MHz'in altında ekranlı kablo kullanmak çok etkili değilken 1 MHz'ten rezonansın başladığı 20 MHz seviyelerine kadar ekranlı veri kablosu kullanmak yakın kenar için yaklaşık olarak 30 dB'lik ve uzak kenar için ise yaklaşık olarak 20 dB'lik zayıflatma sağlamaktadır. Rezonansların olduğu frekans bölgesinde ise ekranlı kablo kullanmak çapraz karışmanın seviyesinde yakın kenar için yaklaşık olarak 40 dB'lik, uzak kenarda ise maksimum çapraz karışmanın seviyesinde yaklaşık olarak 30 dB'lik bir zayıflatma meydana getirmektedir.

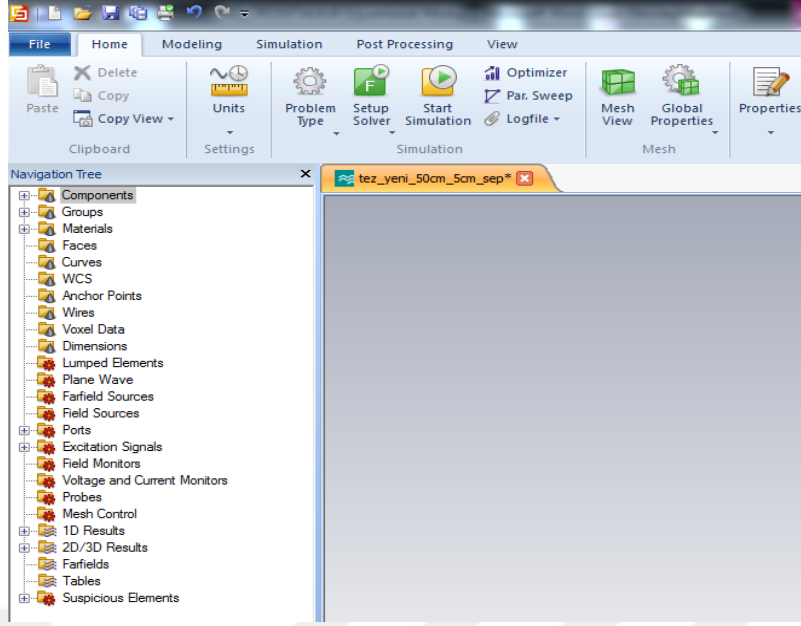
ÇAPRAZ KARIŞMA SİMÜLASYONU VE SONUÇLARI

Yapılan deneyler sonucu elde edilen ölçüm sonuçlarının doğruluğunun kontrolü için simülasyon programı olarak CST (Computer Simulation Technology) kullanılmıştır. CST programı elektromanyetik tasarım ve analiz yapmak isteyenler için tasarlanmış bir simülasyon programıdır [23]. Çeşitli frekans aralıklarında kullanıcıya tasarımı için en doğru yöntemi kullanmasını sağlamaktadır. Bu nedenlerle yapılan deneyleri simüle etmek için CST programı seçilmiştir.

6.1 CST Programı

Tüm simülasyonlar CST programının kablolar için hazır modülü olan Cable Studio altındaki frekans alanı çözümü (frequency domain solver) aracı kullanılarak yapılmaktadır. Aynı zamanda simülasyonlar, zaman alanı çözümü (time domain solver) ile de yapılabilmektedir. Ayrıca, CST bu hesaplamalarını klasik MTLs teorisini baz alarak yapmaktadır.

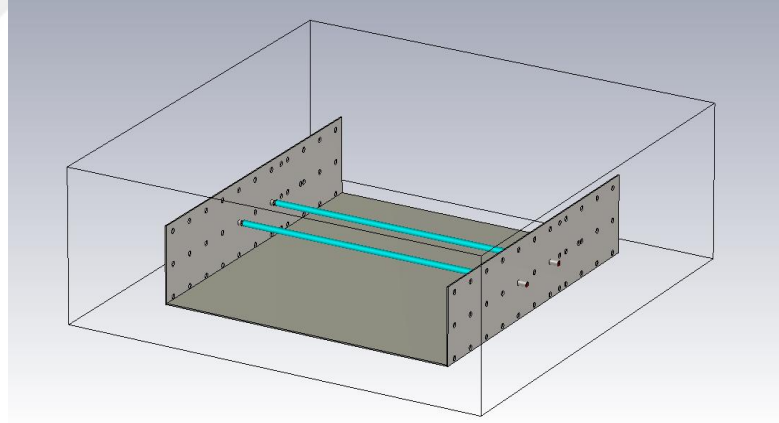
Çapraz karışma deney düzeneğinin modellenmesi için CST Cable Studio altındaki üç boyutlu modelleme aracı (modeling) kullanılmaktadır. Şekil 6.1'de CST Cable Studio'nun arayüzü gösterilmektedir. Arayüzden de anlaşıldığı üzere Cable Studio'nun altındaki çeşitli araçlar kullanılarak ölçümler için gerekli ayarlar (uzunlukların birimleri, frekans aralığı ve birimi, ölçüm yapılacak uzayın sınırının belirlenmesi, vs.) yapılmaktadır. Bu ayarlamalar tamamlandı ve üç boyutlu model oluşturulduktan sonra çözüm aracı (F Setup Solver) kullanılarak sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca, buradan elde edilen sonuçlar text dosyası olarakta program tarafından sağlanabildiğinden başka ortamlarda da (Matlab vb.) sonuçlar işlenebilmektedir.



Şekil 6. 1 CST Cable Studio arayüzü

6.2 KIRMIZI Güç Kablosu Ve SİYAH Güç Kablosu

CST Cable Studio kullanılarak üç boyutlu olarak tasarım yapılmıştır. Tasarımı yapılan üç boyutlu CST modeli Şekil 6.2’de verilmektedir.



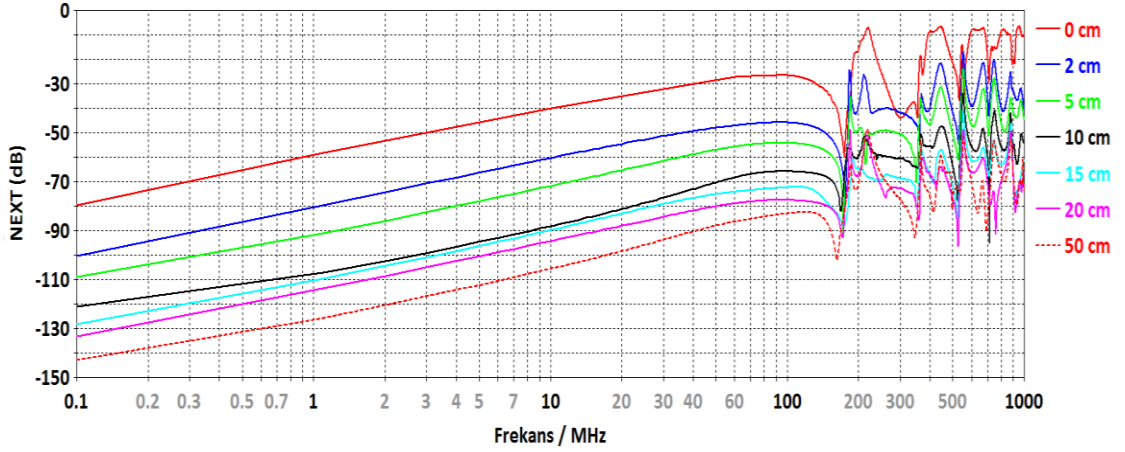
Şekil 6. 2 3 boyutlu çapraz karışma modeli

Şekil 6.2’de verilen 3 boyutlu model ile gerçek ölçümler için kullanılan Şekil 5.1’de verilen deney düzeneğinin bire bir aynısı modellenmektedir ve ayrıca, kullanılan tüm malzemelerin elektromanyetiksel özellikleri göz önünde bulundurulmaktadır. Ölçümlerde kullanılan güç kablolarının uzunlukları 50 cm’dir. Yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin 0 cm, 5 cm ve 10 cm yükseklikte hesaplanabilmesi için

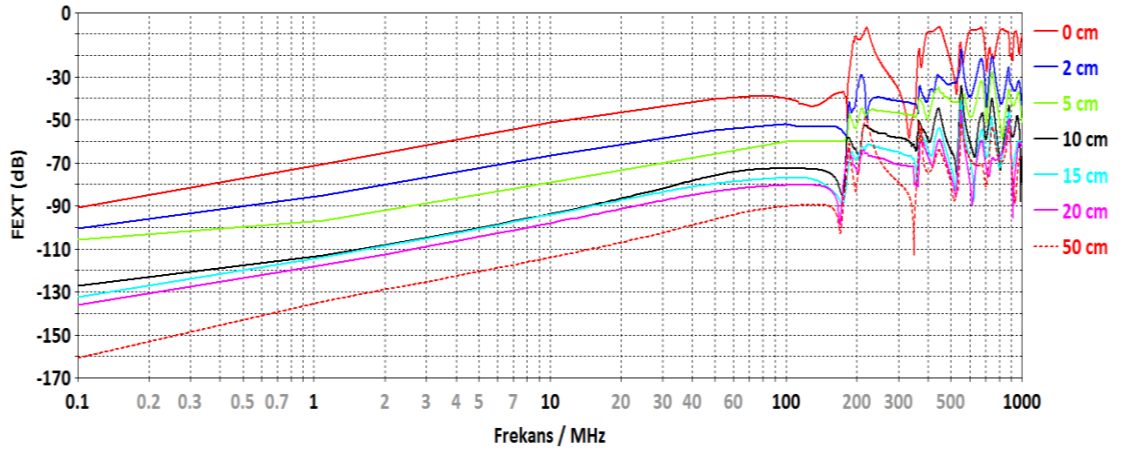
simülasyonlar gerçekleştirilmektedir. Her bir kombinasyon için elde edilen simülasyon sonuçları grafik olarak verilmektedir.

6.2.1 0 cm Yükseklik İçin Simülasyon Sonuçları

Şeki 6.3 ve 6.4’de sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışma seviyesinin simülasyon sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 6. 3 3 boyutlu çapraz karışma modeli için 0 cm yükseklikteki kabloların yakın kenar çapraz karışma seviyeleri



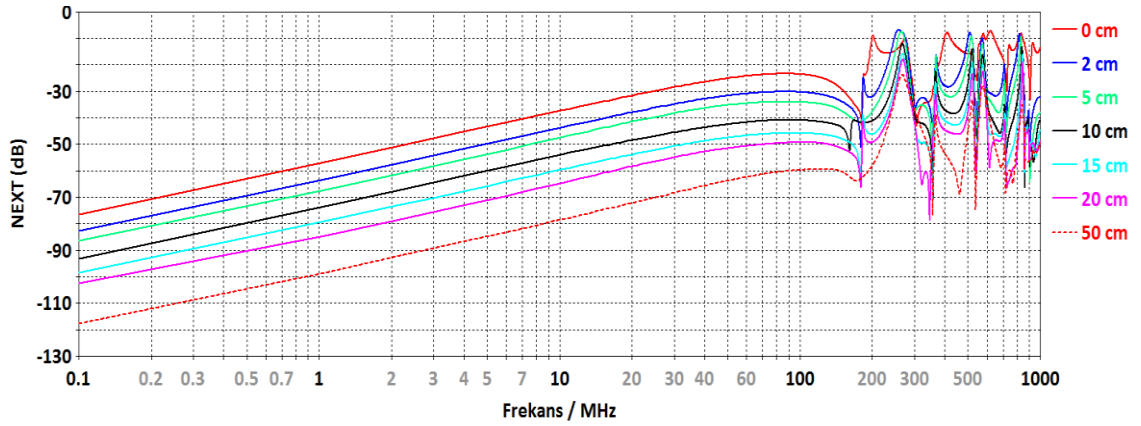
Şekil 6. 4 3 boyutlu çapraz karışma modeli için 0 cm yükseklikteki kabloların yakın kenar çapraz karışma seviyeleri

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’te görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yaklaşık 30 dB’lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise, kablolar arası mesafe 0 cm’den 10 cm’ye çıktığında maksimum çapraz karışma seviyesinin yakın ve uzak kenarda yaklaşık olarak 30 dB azaldığı

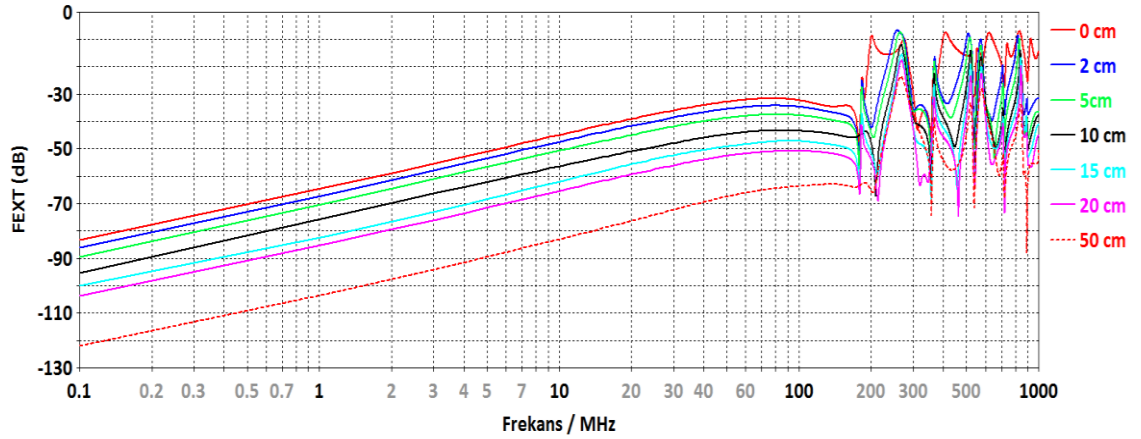
görülmektedir. Ayrıca rezonans bölgesindeki bazı frekanslarda, maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayrimından bağımsız bir şekilde aynı seviyede ölçüldüğü görülmektedir.

6.2.2 5 cm Yükseklik İçin Simülasyon Sonuçları

Şeki 6.5 ve 6.6'da sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışman seviyesinin simülasyon sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 6. 5 3 boyutlu çapraz karışma modeli için 5 cm yükseklikteki kabloların çeşitli kablo ayrimlarındaki yakın kenar çapraz karışma seviyeleri



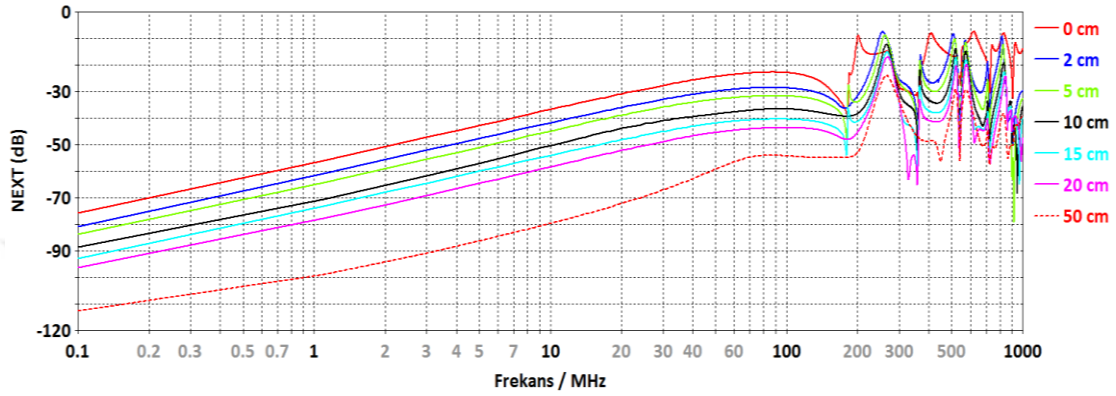
Şekil 6. 6 3 boyutlu çapraz karışma modeli için 5 cm yükseklikteki kabloların çeşitli kablo ayrimlarındaki uzak kenar çapraz karışma seviyeleri

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık 20 dB'lik, uzak kenarda ise yaklaşık 15 dB'lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablolar arası mesafenin çapraz karışmaya etkisi görülememektedir ve ayrıca rezonans

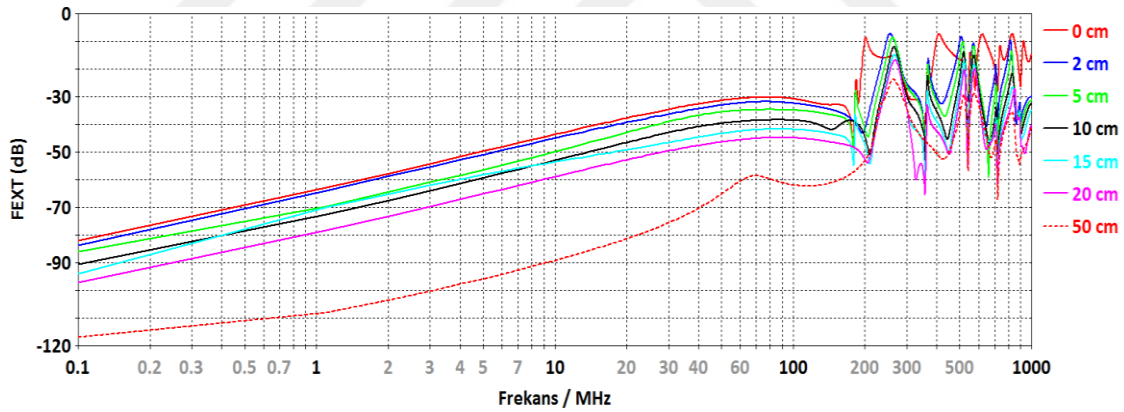
bölgesinde maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayrimından bağımsız olduğuda görülmektedir.

6.2.3 10 cm Yükseklik İçin Simülasyon Sonuçları

Şeki 6.7 ve 6.8’de sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışma seviyesinin simülasyon sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 6. 7 3 boyutlu çapraz karışma modeli için 10 cm yükseklikteki kabloların çeşitli kablo ayrımlarındaki yakın kenar çapraz karışma seviyeleri



Şekil 6. 8 3 boyutlu çapraz karışma modeli için 10 cm yükseklikteki kabloların çeşitli kablo ayrımlarındaki uzak kenar çapraz karışma seviyeleri

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de görüldüğü gibi rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafe arttıkça çapraz karışmanın seviyesi azalmaktadır. Bu bölgede 0 cm ve 10 cm arasında yakın kenarda yaklaşık 15 dB’lik, uzak kenarda ise yaklaşık 10 dB’lik zayıflama görülmektedir. Rezonans frekansının üzerindeki bölgede ise kablolar arası mesafenin çapraz karışmaya etkisi görülememektedir ve ayrıca rezonans bölgesinde maksimum çapraz karışma seviyesinin mesafe ayrimından bağımsız olduğuda görülmektedir.

ÇAPRAZ KARIŞMA ÖLÇÜM VE SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

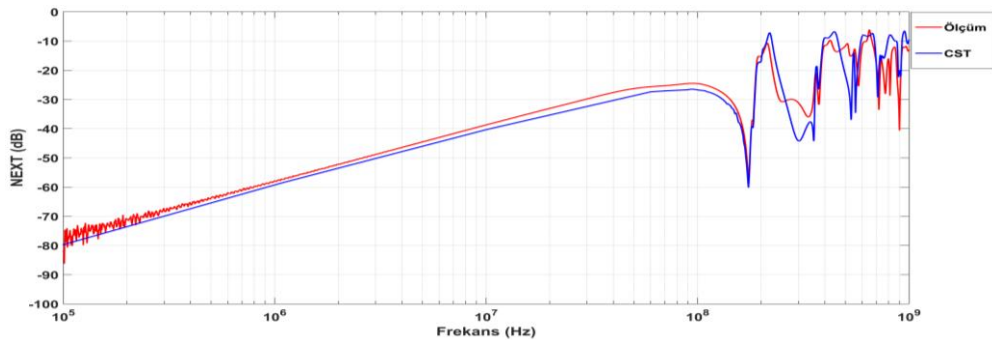
Gerçek deneylerle elde edilen ölçüm sonuçlarının doğrulunun kontrolü için simülasyon programı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

7.1 50 cm Uzunluk İçin Sonuçların Karşılaştırılması

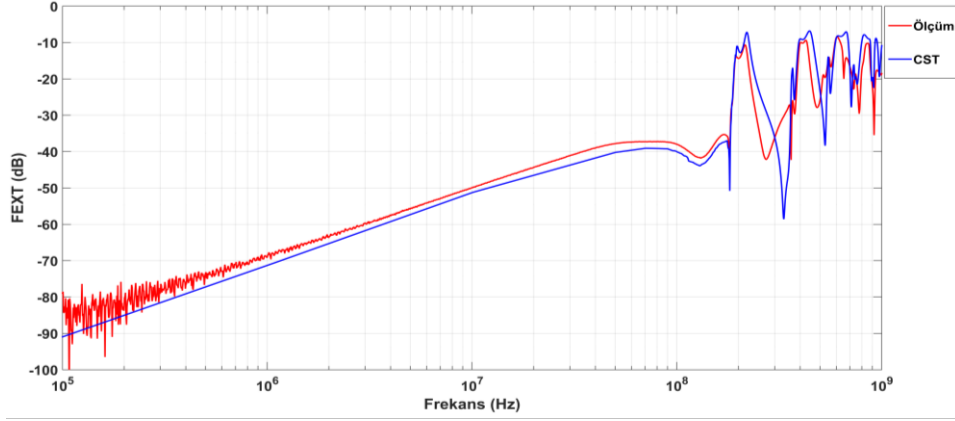
50 cm kablo uzunluğu için 0 cm, 5 cm ve 10 cm’de yükseklikte elde edilen gerçek ölçüm ve simülasyon sonuçları tüm kablo ayırım mesafeleri için yapılmaktadır. Burada her bir yükseklikte seçilen birkaç kablo ayırım mesafesine ait yakın kenar ve uzak kenar için çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.

7.1.1 0 cm Yükseklik İçin Sonuçların Karşılaştırılması

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de 0 cm kablo ayırımı için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.

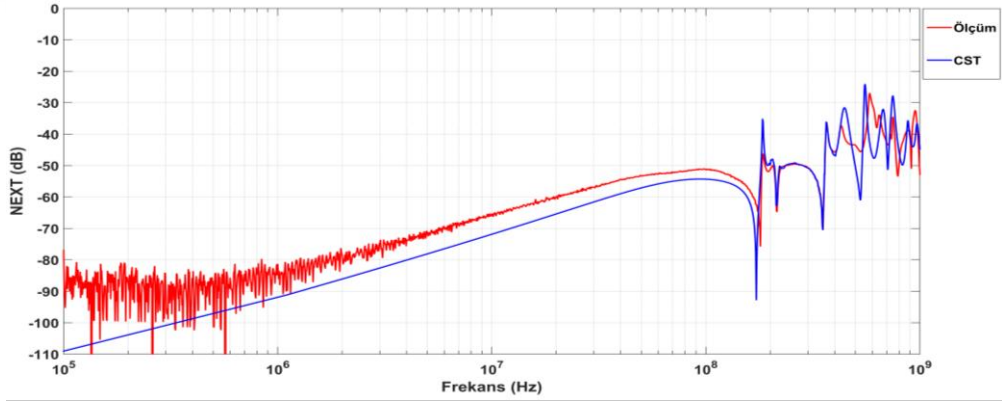


Şekil 7. 1 0 cm yükseklikteki 0 cm ayırma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

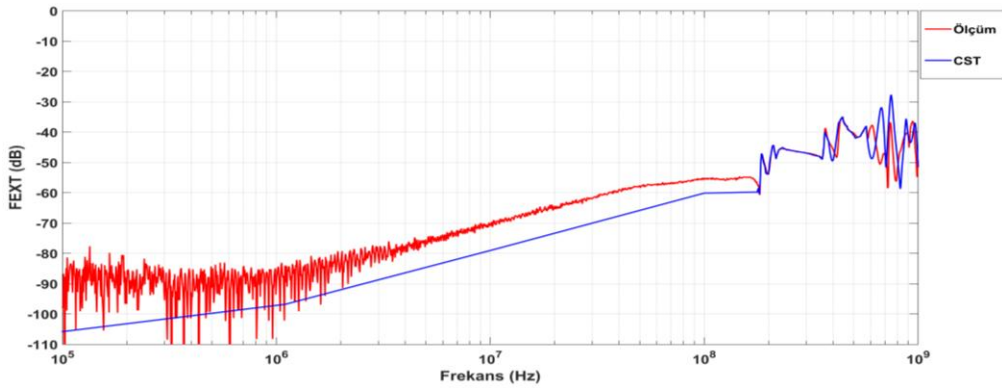


Şekil 7. 2 0 cm yükseklikteki 0 cm ayırma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

Şekil 7.3 ve 7.4'te 5 cm kablo ayırımı için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.

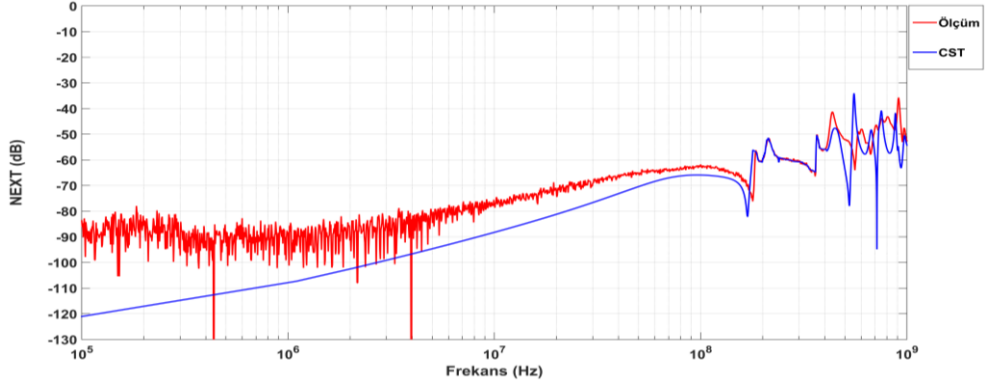


Şekil 7. 3 0 cm yükseklikteki 5 cm ayırma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

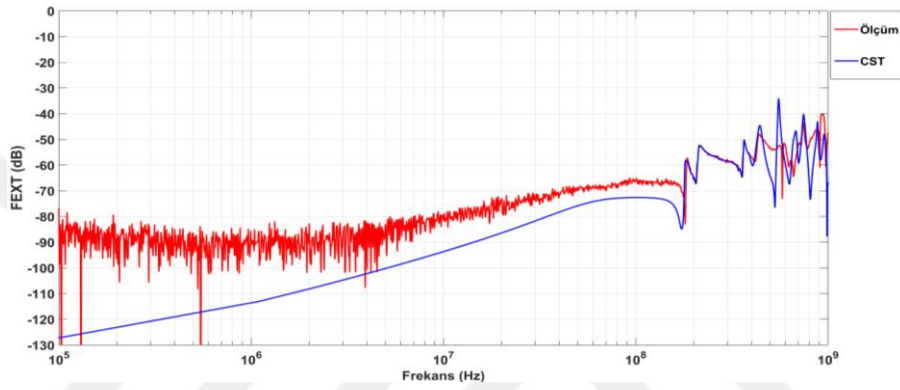


Şekil 7. 4 0 cm yükseklikteki 5 cm ayırma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

Şekil 7.5 ve 7.6'da 10 cm kablo ayırımı için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları verilmektedir.



Şekil 7. 5 0 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

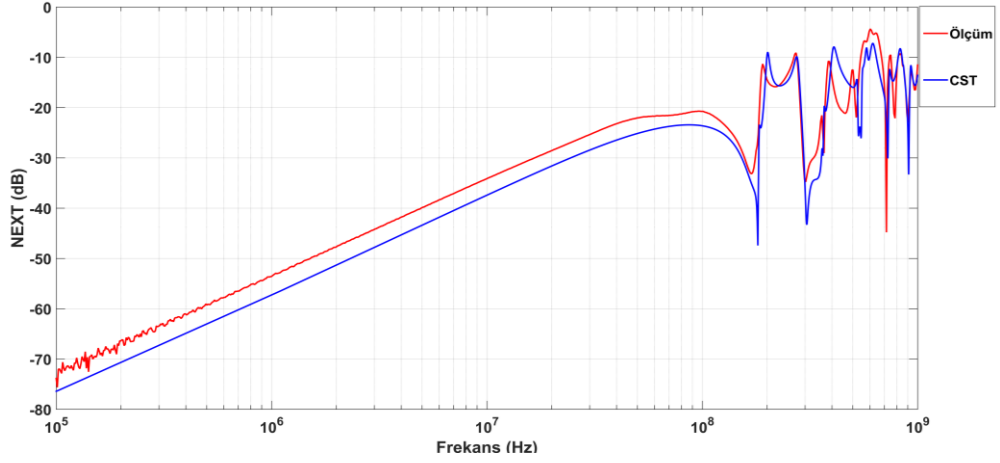


Şekil 7. 6 0 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

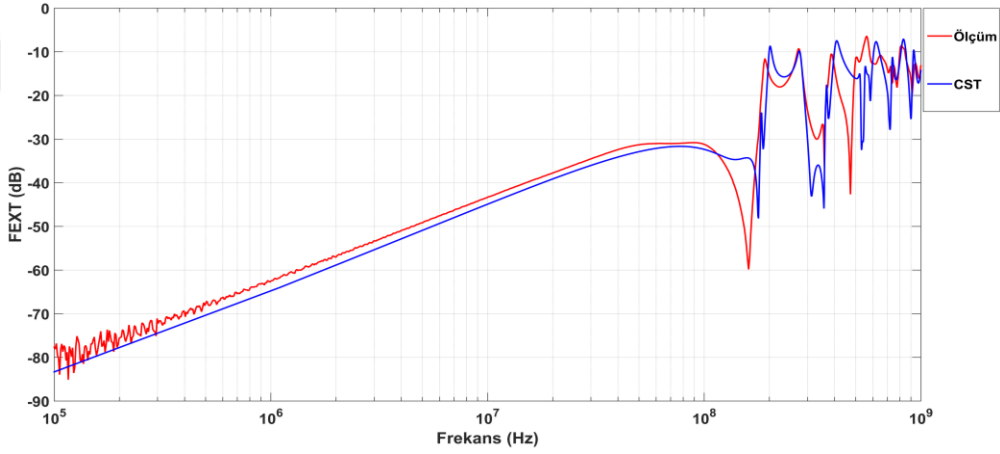
0 cm yükseklikte çeşitli kablo ayırım mesafeleri (0 cm, 5 cm, 10 cm) için verilen ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmaları sonucunda, elde edilen sonuçların benzer çıktığı grafiklerden görülmektedir. Fakat burada, gerçek ölçümler için özellikle düşük frekanslarda kablo ayırım mesafesi arttıkça çapraz karışma seviyesi düştüğünden ve ölçüm yapılan cihazın gürültü tabanının yeterli seviyede olmamasından dolayı ölçüm ve simülasyon sonuçları arasında farklılıklar meydana gelmektedir. Rezonans bölgesinin olduğu yüksek frekanslarda ise sonuçlar arasındaki farklılıklar, gerçek ölçümler için kullanılan deney düzeneğinin simülasyon programında modellenirken bire bir aynı şekilde yapılamadığından ve özellikle yüksek frekanslarda deney düzeneğinin fiziksel özelliklerindeki ufak farklılıkların ölçümleri etkilemesinden kaynaklanmaktadır.

7.1.2 5 cm Yükseklik için Sonuçların Karşılaştırılması

Şekil 7.7 ve 7.8'de 0 cm kablo ayırımı için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.

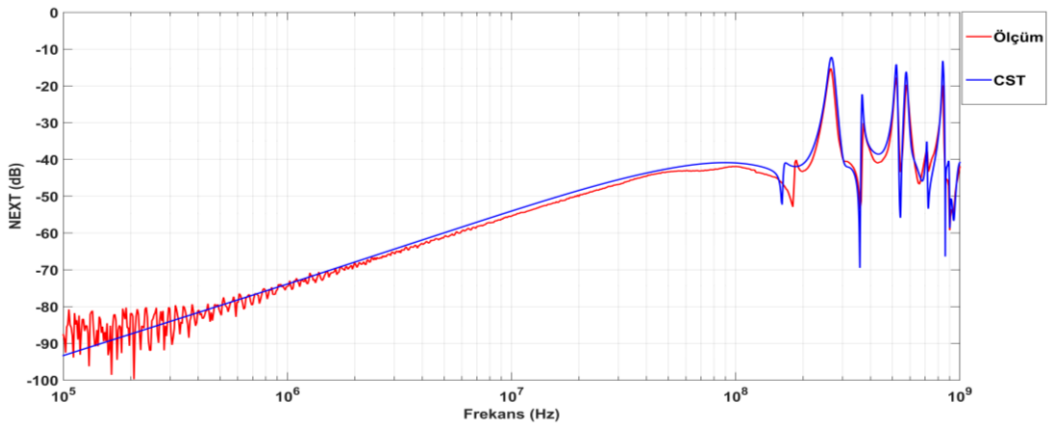


Şekil 7. 7 5 cm yükseklikteki 0 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

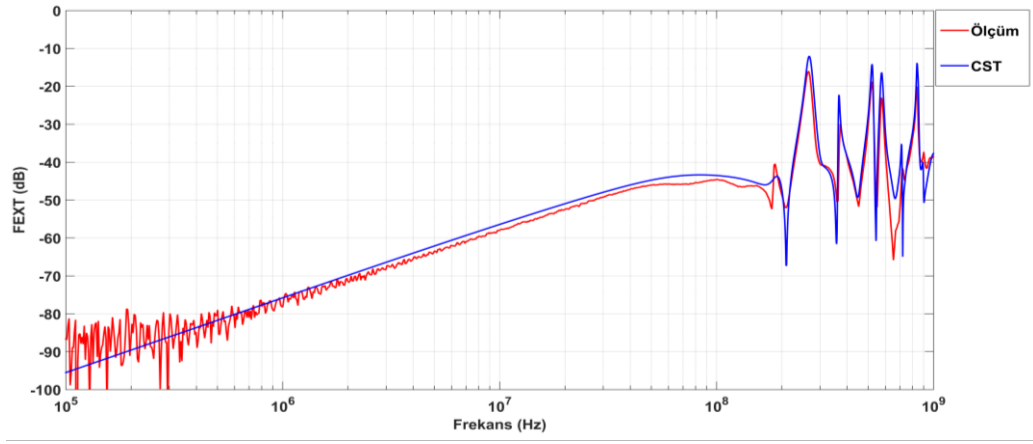


Şekil 7. 8 5 cm yükseklikteki 0 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

Şekil 7.9 ve 7.10'da 10 cm kablo ayrımı için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.

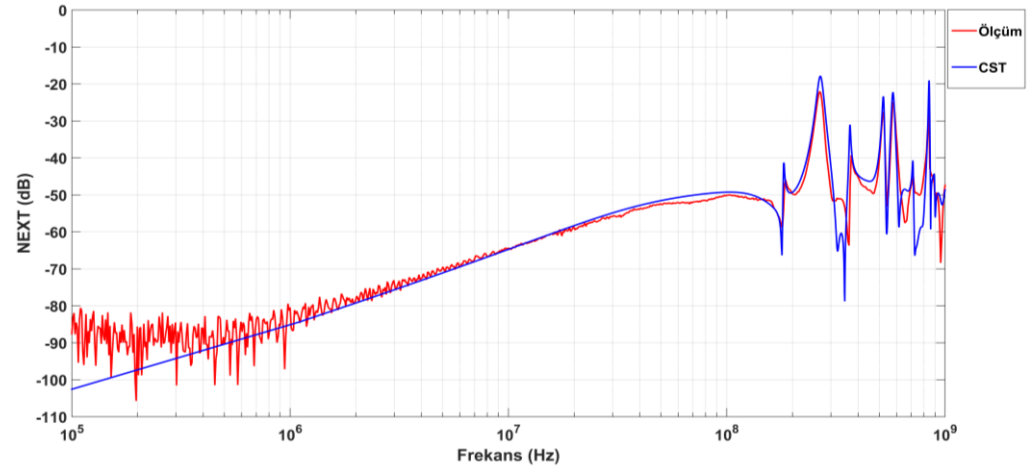


Şekil 7. 9 5 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

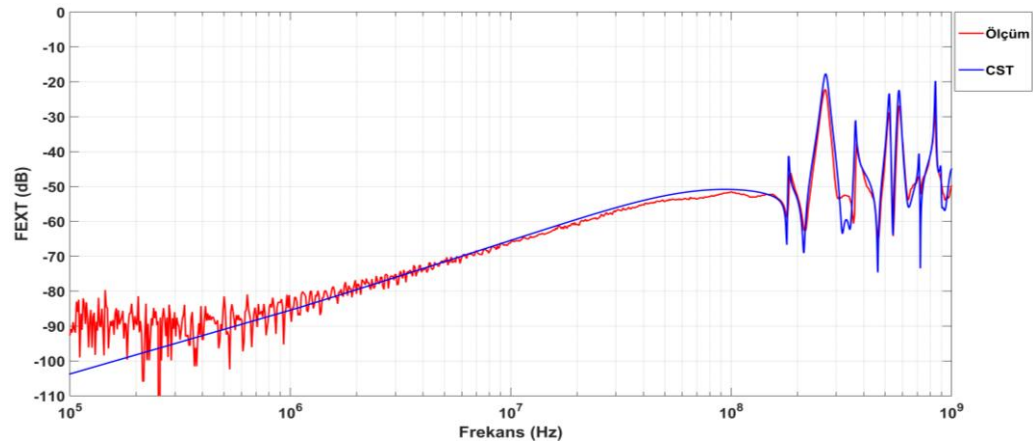


Şekil 7. 10 5 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

Şekil 7.11 ve 7.12’de 20 cm kablo ayrımı için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 7. 11 5 cm yükseklikteki 20 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

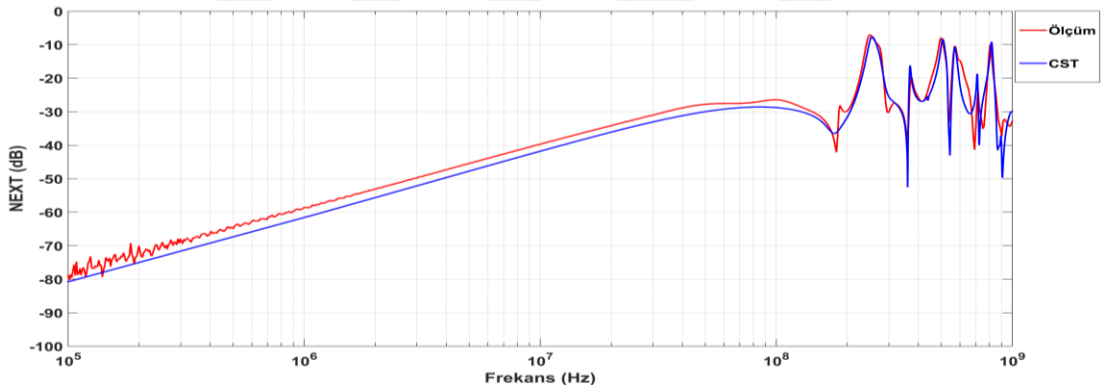


Şekil 7. 12 5 cm yükseklikteki 20 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

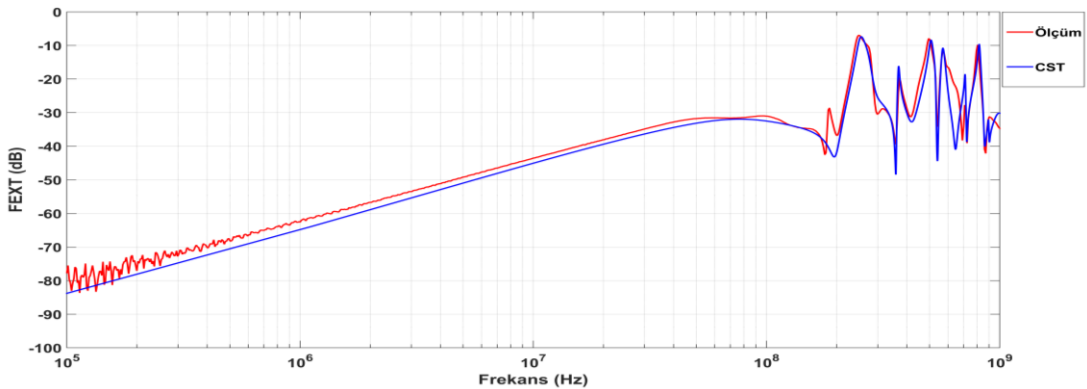
5 cm yükseklikte çeşitli kablo ayırım mesafeleri (0 cm, 10 cm, 20 cm) için verilen ölçüm ve simülasyonların karşılaştırılmaları sonuçları grafiklerden de anlaşıldığı üzere benzer çıkmaktadır. Fakat burada, gerçek ölçümler için özellikle düşük frekanslarda kablo ayırım mesafesi arttıkça çapraz karışma seviyesi düştüğünden ve ölçüm yapılan cihazın gürültü tabanının yeterli seviyede olmamasından dolayı ölçüm ve simülasyon sonuçları arasında farklılıklar meydana gelmektedir. Rezonans bölgesinin olduğu yüksek frekanslarda ise sonuçlar arasındaki farklılıklar, gerçek ölçümler için kullanılan deney düzeneği simülasyon programında modellenirken bire bir aynı şekilde yapılamadığından ve özellikle yüksek frekanslarda deney düzeneğinin fiziksel özelliklerindeki ufak farklılıkların ölçümleri etkileyebilmesinden kaynaklanmaktadır.

7.1.3 10 cm Yükseklik İçin Sonuçların Karşılaştırılması

Şekil 7.13 ve 7.14'da 2 cm kablo ayırımı için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.

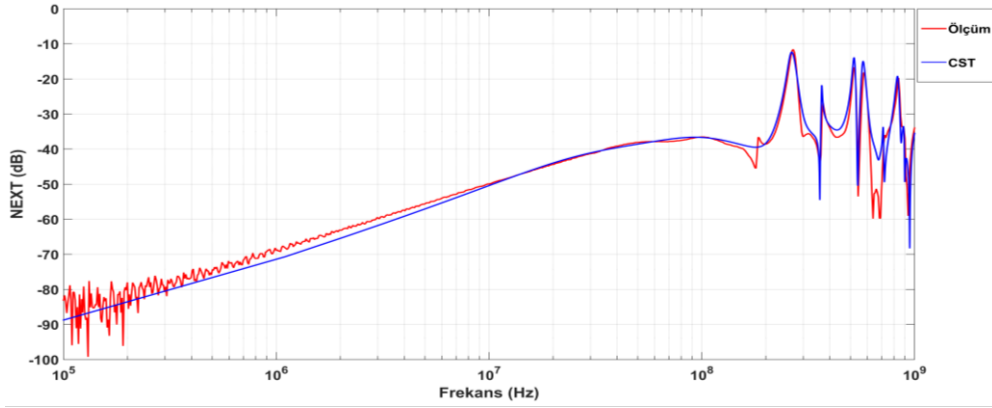


Şekil 7. 13 10 cm yükseklikteki 2 cm ayırma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

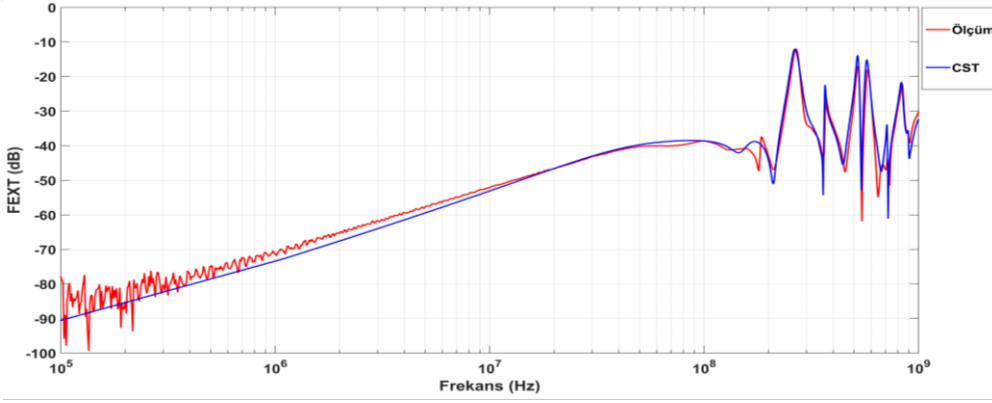


Şekil 7. 14 10 cm yükseklikteki 2 cm ayırma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

Şekil 7.15 ve 7.16'da 10 cm kablo ayrımı için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.

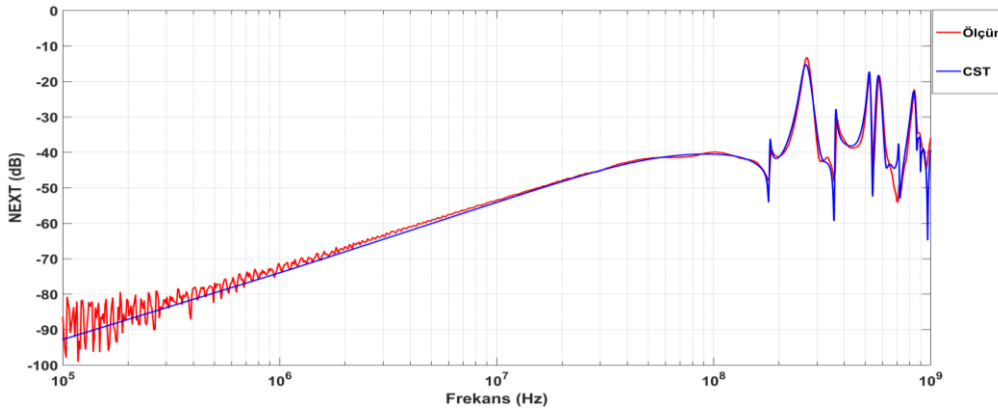


Şekil 7. 15 10 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

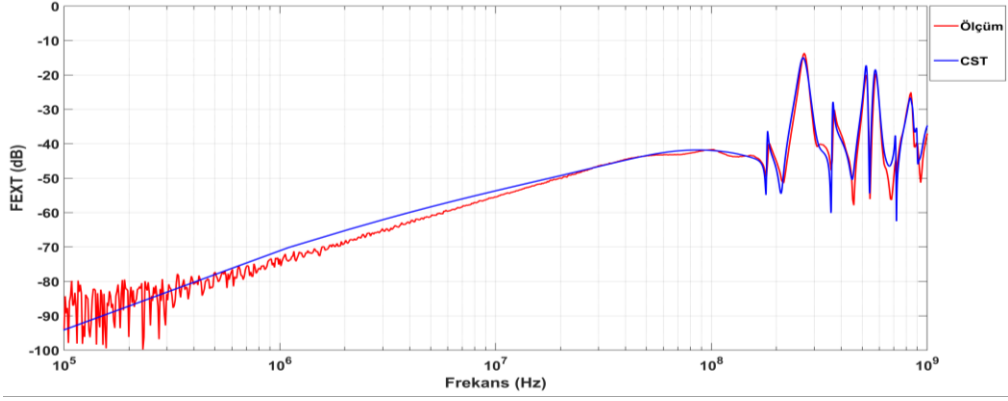


Şekil 7. 16 10 cm yükseklikteki 10 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

Şekil 7.17 ve 7.18'de 15 cm kablo ayrımı için sırasıyla, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırma sonuçları grafik olarak verilmektedir.



Şekil 7. 17 10 cm yükseklikteki 15 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yakın kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması



Şekil 7. 18 10 cm yükseklikteki 15 cm ayrıma sahip kabloların ölçüm ve simülasyon ile elde edilen uzak kenar çapraz karışma seviyeleri karşılaştırılması

10 cm yükseklikte çeşitli kablo ayırım mesafeleri (2 cm, 10 cm, 15 cm) için verilen ölçüm ve simülasyonların karşılaştırılma sonuçları grafiklerden de anlaşıldığı üzere benzer çıkmaktadır. Rezonans bölgesinin olduğu yüksek frekanslarda sonuçlar arasındaki farklılıklar, gerçek ölçümler için kullanılan deney düzeneği simülasyon programında modellenirken bire bir aynı şekilde yapılamadığından ve özellikle yüksek frekanslarda deney düzeneğinin fiziksel özelliklerindeki ufak farklılıkların ölçümleri etkileyebilmesinden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak 50 cm uzunluğa sahip kabloların üç farklı yükseklik (0 cm, 5 cm, 10 cm) için çeşitli kablo ayırım mesafelerinde yapılan gerçek ölçüm ve simülasyon sonuçlarının, yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin karşılaştırılması ile sonuçlar arasında yüksek oranda benzerlik olduğu görülmektedir. Bu sonuç bize yapmış olduğumuz deneysel çalışma ile elde ettiğimiz ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğunu ve simülasyon için yapılan modelinin yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyelerinin tespiti için kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca, 50 cm kablo uzunluğu için yapmış olduğumuz üç boyutlu simülasyon modeli ile yakın kenar ve uzak kenar çapraz karışma seviyesi hesabı 250 cm ve 500 cm kablo uzunlukları için de kullanılabilir. Fakat 250 cm ve 500 cm kablo uzunlukları için yapılan simülasyon modelinde, bu durum simülasyon programının hesaplama yapmak için kullandığı uzayın büyümesi anlamına gelmektedir ve buna bağlı olarak hesap süresinin artması demektir. Bu da eldeki kaynaklarla hesaplamanın günlerce sürmesine neden olmaktadır. Bu nedenle simülasyon sonuçları sadece 50 cm uzunluktaki kablo modeli için yapılmıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tesislerinde gizlilik dereceli bilgiyi işleyecek ve bulunduracak kurum ya da firmaların TEMPEST tesisat kapsamında uyması gereken kurallardan biri olan; KIRMIZI ve SİYAH olarak tabir edilen güç veya veri kablolarının tüm hat boyunca birbirinden en az 10 cm uzakta olması kuralı analiz edilmiştir. Bu analizi yapmak için kablolar arasında meydana gelen çapraz karışmanın teorik altyapısı incelenmiş ve kurulan deney düzenekleri ile ölçümler alınmıştır. Ayrıca yapılan deneylerin simülasyonu yapılarak, ölçümler sonucu elde edilen çıktılar simülasyon sonuçları ile desteklenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen çıktılar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Ölçümler sonucu elde edilen grafiklerde rezonans frekansının altında kalan bölgede kablolar arası mesafenin arttırılması sonucunda, yakın kenar ve uzak kenarda çapraz karışma seviyesinin azaldığı görülmüştür,
- Ölçümler sonucu elde edilen grafiklerde rezonans frekansının üzerinde kalan bölgede kablolar arası mesafenin arttırılması sonucunda, yakın kenar ve uzak kenarda maksimum çapraz karışmanın seviyesinin değişmediği görülmüştür,
- Çapraz karışmanın meydana geldiği bölgedeki kabloların uzunluğunun artması sonucunda rezonans frekansının altında kalan bölgede, yakın kenar ve uzak kenarda çapraz karışma seviyesinin arttığı görülmüştür,
- Çapraz karışmanın meydana geldiği bölgedeki kabloların uzunluğunun artması sonucunda rezonans frekansının üzerinde kalan bölgede, yakın kenar ve uzak

kenarda maksimum çapraz karışma seviyesinin değişmediği fakat uzunluk arttıkça rezonans frekansının daha düşük frekanslara kaydığı görülmüştür,

- Çapraz karışmanın meydana geldiği bölgedeki kabloların toprak düzleminden olan yüksekliğinin artması sonucunda rezonans frekansının altında kalan bölgede, yakın kenar ve uzak kenarda çapraz karışma seviyesinin arttığı fakat maksimum çapraz karışma seviyesinin değişmediği görülmüştür,
- Çapraz karışmanın meydana geldiği bölgedeki kabloların toprak düzleminden olan yüksekliğinin artması sonucunda rezonans frekansının üzerinde kalan bölgede, yakın kenar ve uzak kenarda maksimum çapraz karışma seviyesinin 5 cm'lik yükseklikten sonra önemli bir derecede değişmediği görülmüştür,
- Ekranlı kablo kullanmanın hem rezonans frekansı altında ve hem de üzerinde kalan bölgede, yakın kenar ve uzak kenarda çapraz karışma seviyesini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür,
- Elde edilen ölçüm sonuçlarının ve simülasyon sonuçlarının yüksek oranda benzer çıktığı görülmüştür ve
- Çapraz karışmanın analizi için yapılan simülasyonda verilen üç boyutlu modelin çapraz karışmanın seviyesinin belirlenmesi için kullanılabileceği görülmüştür.

Elde edilen bu sonuçlar ışığında kablolar arası çapraz karışmanın seviyesini; kablolar arası mesafe, kabloların toprak düzleminden yüksekliği, kabloların uzunlukları ve kullanılan kabloların ekranlı olup olmaması gibi değişik parametrelerin çapraz karışmanın seviyesini önemli oranda etkilediği görülmüştür. Bu nedenle çapraz karışmayı minimum seviyede tutmak için, özellikle gizliliğin önem arz ettiği tesislerde olabildiğince KIRMIZI ve SİYAH kabloların bina dağıtım panosunda son kullanıcıya kadar; toprak düzlemine yakın, olabilecek minimum uzunlukta, maksimum ayrıma sahip ve ekranlı olması (veri kabloları için) gibi parametrelere dikkate alarak çekilmesi önerilmektedir.

Ayrıca bulunan bu sonuçların yanı sıra, elde edilen çıktılara TEMPEST açısından bakıldığında; kablolar arası ayırım mesafesi 10 cm'den fazla olduğunda da çapraz karışmanın aynı seviyelerde (daha düşük ayrımlara göre) meydana geldiği görülmüştür.

Buna göre; herhangi bir yöntem ile hattın dinlenildiği düşünöldüğünde, çapraz karışma maksimum hangi seviyede olursa elde edilen gizli bilgilerin geri dönüştürölemeyeceği konusu NATO ve TSK tarafından yayımlanan yönergelerde net olarak belirtilmemektedir. Bu nedenle gizliliğin önem arz ettiğı tesislerin tesisatlarındaki kablolarda meydana gelen çapraz karışmanın seviyesinin TEMPEST açısından hangi seviyede tehdit oluşturduğu konusu yapılan yeni çalışmalar ile daha detaylı olarak incelenebilir.



- [1] Paul, C.R., (1978). "Solution of The Transmission-Line Equations for Three-Conductor Lines in Homogeneous Media" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1: 216-222.
- [2] Paul, C.R., (1978). "Prediction of Crosstalk in Ribbon Cables: Comparison of Model Predictions and Experimental Results" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 3: 394-406.
- [3] Paul, C.R. ve Jack W.M., (1979). "Prediction of Crosstalk Involving Twisted Pairs of Wires-Part I: A Transmission-Line Model for Twisted-Wire Pairs" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2: 92-105.
- [4] Paul, C.R. ve Jack W.M., (1979). "Prediction of Crosstalk Involving Twisted Pairs of Wires-Part II: A Simplified Low-Frequency Prediction Model" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2: 105-114.
- [5] Paul, C.R., (1981). "Transmission-Line Modeling of Shielded Wires for Crosstalk Prediction" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 4: 345-351.
- [6] Paul, C.R., (1982). "On The Superposition of Inductive and Capacitive Coupling in Crosstalk-Prediction Models" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 3: 335-343.
- [7] Paul, C.R., (1984). "Estimation of Crosstalk in Three-Conductor Transmission Lines" IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility, 4: 182-192.
- [8] Paul, C.R., (1992). "Derivation of Common-Impedance Coupling from The Transmission-Line Equations" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 34(3): 315-319.
- [9] Mora, N., Rachidi, F., Pelissou, P. ve Junge, A., (2012). "Cable Crosstalk Analysis and Simulation: A Comparison Between Low Frequency Circuit Approach and Transmission Line Theory" Proceedings of the ESA Workshop on Aerospace EMC, 21-23 May 2012, Venice.
- [10] Halligan, M.S. ve Beetner, D.G (2014). "Maximum Crosstalk Estimation in Weakly Coupled Transmission Lines" IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 56(3): 736-744.

- [11] Halligan, M.S. ve Beetner, D.G (2014). "Maximum Crosstalk Estimation in Lossless and Homogeneous Transmission Lines" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 62(9): 1953-1961.
- [12] Van Leersum, B. J. A. M., Thomas, D.W.P., Bergsma, J.G., Van der Graff, J. ve Leefeink, F.B.J. (2012). "Cable Crosstalk and Separation Rules in Complex Installations" International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 21-23 September 2012, Rome.
- [13] Üstüner, F., Tarım, N. ve İyibakanlar, G., (2009). "Hava Aracı Kablolarında Çapraz Karışma Ölçümleri ve Kablo Ayrım Kuralları", Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi,4: 29-37.
- [14] Bradley, A.T., Yavoich, B.J., Hodson, S.M. ve Godley, R.F., (2010). "Comparison of Analysis, Simulation, and Measurement of Wire-To-Wire Crosstalk, Part 1" Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 12-16 April 2010, Beijing.
- [15] Bradley, A.T., Yavoich, B.J., Hodson, S.M. ve Godley, R.F., (2010). "Comparison of Analysis, Simulation, and Measurement of Wire-To-Wire Crosstalk, Part 2" Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), 12-16 April 2010, Beijing.
- [16] Paul, C.R., (2006). Introduction to Electromagnetic Compability, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- [17] Edminister, J.A., (1993). Electromagnetics, Second Edition, Mc Graw-Hill Inc., New York.
- [18] Kumbasar, A.H., (2010). "TEMPEST", UEKAE Dergisi, 2(3): 21-27.
- [19] SDIP-27, (2014). NATO TEMPEST Requirements And Evaluation Procedures, NATO, Washington D.C.
- [20] SDIP-29, (2006). Facility Design Criteria and Installation of Equipment for the Processing of Classified Information, NATO, Washington D.C.
- [21] MST-401, (2009). Türk Silahlı Kuvvetleri TEMPEST Test Yönergesi, T.C. Genelkurmay Başkanlığı, Ankara.
- [22] MY-401, (2015). Türk Silahlı Kuvvetleri TEMPEST Yönergesi, T.C. Genelkurmay Başkanlığı, Ankara.
- [23] CST, 3D Electromagnetic Simulation Software, www.cst.com, 23 Ekim 2017.
- [24] Cheng, D.K., (1993). Fundamentals of Engineering Electromagnetics, Second Edition, Addison-Wesley Inc., New York.
- [25] Saraç, U., (2010). "TEMPEST'in Keşfi ve Sinyal Analizi", UEKAE Dergisi, 2(3): 29-34.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Veyis SOLAK
Doğum Tarihi ve Yeri :01.03.1990 / Aksaray
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :veyis.solak@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Tesisleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	2017
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lise	Fen Bilimleri	Otakçılar Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi	2008

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015-...	TÜBİTAK	Araştırmacı
2014-2015	ŞAH Aydınlatma Mühendislik Taahhüt Sanayi Ticaret Limited Şirketi	Proje Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Solak, V., Efendioğlu, H.S., olak, B. ve Garip, M. (2017). "Analysis and Simulation of Cable Crosstalk", The 4th International EMC Conference, 24-27 September 2017, Ankara.
2. Bulut, F., Efendioğlu, H.S., olak, Yabuloğlu, M. ve zer, H. (2017). "Electromagnetic Shielding Behavior of Different Metallic Wire-Meshes and Thin Metal Plate", The 4th International EMC Conference, 24-27 September 2017, Ankara.

