KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANTEN DESEN ÖLÇÜMÜ VE MUTLAK KAZANCIN HESAPLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elo. ve Hab. Müh. Soydan ÇAKIR

Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Müh.
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Gonca ÇAKIR

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANTEN DESEN ÖLÇÜMÜ VE MUTLAK KAZANCIN HESAPLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elo. ve Hab. Müh. Soydan ÇAKIR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 15.05.2008

Tezin Savunulduğu Tarih: 19.06.2008

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Yrd. Doç. Dr. Gonca ÇAKIR	Prof. Dr. Levent SEVGİ	Doç. Dr. A. Arif ERGİN
(.....)	(.....)	(.....)

KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Anten ölçümleri çeşitli ulusal ve uluslararası standartlara göre yapılmaktadır. Bu standartların bir kısmı anten faktörünün, bir kısmı da anten kazancının ölçümlerine yöneliktir. Bu uluslararası standartların birçoğu mutlak anten kazancı ölçümlerini sadece maksimum iletim yönünde sunabilmekte ve anten parametrelerine ait çok ayrıntılı bilgiler sunmamaktadır. Bu eksikliğin giderilebilmesi için, bu tez çalışmasında hem önemli uluslararası standartların verdiği sonuçlara ulaşan hem de uluslararası standartların sunamadığı diğer bir çok önemli parametrelere de ulaşabilen bir anten kalibrasyon yöntemi düşünülmüştür. Böylece maksimum mutlak kazanç ve anten faktörleri yanında antenin iki ve üç boyutlu desenlerini, istenilen herhangi bir yöndeki kazanç ve yönlendiriciliği, ve anten üzerinde harcanan ısıl kayıpları yani anten verimliliğinin tespitini yapabilen bir ölçüm sistemi tanıtılmış ve böylece uluslararası standartlara iyi bir alternatif yeni bir yöntem düşünülmüştür.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) bünyesindeki Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (UME) gerçekleştirilmiştir. UME, ülkemizde yapılan ölçümleri güvence altına alan ve bu ölçümlerin uluslararası sisteme entegrasyonunu sağlayan bir kurumdur. Tanıtılan yeni anten ölçüm sistemi ile anten parametrelerinin çok daha detaylı bir şekilde raporlanması amaçlanmıştır.

Tezin her aşamasında bana desteğini eksik etmeyen tez danışmanım, çok değerli hocam Sn. Yrd.Doç.Dr.Gonca ÇAKIR' a, teorik ve pratik olarak desteklerini esirgemeyen Sn. Prof.Dr.Levent SEVGİ' ye, UME Elektromanyetik Metroloji Laboratuarları sorumlusu Sn. Doç.Dr.Ramiz HAMİD' e ve UME Elektromanyetik Metroloji Laboratuarları EMC birimi çalışanları Sn. Savaş ACAK' a ve Sn. Osman ŞEN' e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ v
SEMBOLLER vi
ÖZET viii
İNGİLİZCE ÖZET ix
1. GİRİŞ 1
2. ANTEN DESEN ANALİZİ İÇİN SAYISAL TEKNİK 2
3. ANSI IEEE C63.5 ÜÇ ANTEN YÖNTEMİ 6
4. ANSI IEEE 149 MUTLAK ANTEN KAZANCI ÖLÇÜMÜ 10
4.1. İki Anten Yöntemi 10
4.2. Üç Anten Yöntemi 11
4.3. Zeminden Yansımalı Yöntem 16
5. ANTEN DESEN ÖLÇÜMÜ 18
6. ANTEN ÜZERİNDE HARCANAN ISIL KAYIPLARIN ÖLÇÜMÜ 20
7. ANTEN ÖLÇÜM YAZILIMI 24
8. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ 42
8.1. Ölçüm Belirsizliği 42
8.1.1. Ölçüm belirsizliğine giriş 42
8.1.2. Belirsizlik hesaplama yöntemleri 44
8.2. Anten Desen Ölçümü ve Mutlak Kazanç Hesabı Ölçüm Belirsizliği 51
8.2.1. Model fonksiyonun tanımlanması 51
8.2.2. Belirsizlik bileşenleri 52
8.2.3. Belirsizlik bütçesi 66
9. DENEYSEL SONUÇLAR 68
9.1. Schaffner Marka Horn Anten için Ölçümler 69
9.1.1. Schaffner marka horn anten 1 GHz desen ölçümleri 70
9.1.2. Schaffner marka horn anten 2 GHz desen ölçümleri 72
9.1.3. Schaffner marka horn anten 3 GHz desen ölçümleri 74
9.1.4. Schaffner marka horn anten 4 GHz desen ölçümleri 76
9.1.5. Schaffner marka horn anten 5 GHz desen ölçümleri 78
9.1.6. Schaffner marka horn anten 6 GHz desen ölçümleri 80
9.1.7. ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 standartlarının karşılaştırılması 82
9.1.8. Anten desen ölçümü ve uluslararası standartlar ile ısıl kayıp ölçümü 85
9.1.9. Net güç ve yansıma katsayısı ölçümü 87
9.1.10. Alıcı anten koaksiyel kablo ölçümleri 88
9.1.11. Anten desen ölçümü ile ısıl kayıp ölçümü 88
10. SONUÇLAR 91
KAYNAKLAR 93
EKLER 94
ÖZGEÇMİŞ 147

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Sayısal yöntem için modelleme şekli 3
Şekil 3.1: ANSI IEEE C63.5 üç anten yöntemi gösterimi 6
Şekil 3.2: ANSI IEEE C63.5 üç anten yönteminde bir anten çiftinin ölçümü 6
Şekil 4.1: ANSI IEEE 149 üç anten yönteminde bir anten çiftinin ölçüm fotoğrafı (TÜBİTAK UME' de yapılan bir ölçümden alınmıştır) 12
Şekil 4.2: ANSI IEEE 149 zeminden yansımalı yöntem için bir anten çiftinin ölçümü 16
Şekil 5.1: Küresel koordinatlarda uzak alan anten desen ölçüm düzeneği 18
Şekil 5.2: Uzak alan anten desen ölçüm düzeneğinin fotoğrafı 18
Şekil 6.1: İletimsel ve dielektriksel kayıpların ölçümü için ölçüm modeli 20
Şekil 6.2: Anten girişindeki net gücün ve gerilim yansıma katsayısının ölçümü 22
Şekil 7.1: Yazılım açılış ekranı 25
Şekil 7.2: Yazılım ana ekranı 25
Şekil 7.3: Anten faktörler sonuçlarının gösterildiği ekran 29
Şekil 7.4: ANSI IEEE C63.5 / ANSI IEEE 149 üç anten yöntemleri için yazılım penceresi 30
Şekil 7.5: Anten empedans ve ilişkili parametreleri için yazılım ekranı 31
Şekil 7.6: Anten desen ölçümünün yapıldığı yazılım ekranı 33
Şekil 7.7: Polar formatta iki boyutlu anten desen çizimlerinin yapıldığı ekran 34
Şekil 7.8: Yatay düzlem desen sonuçlarından dikey düzlem desenlerinin çizildiği ve yönlendiricilik değerinin hesaplandığı yazılım ekranı 35
Şekil 7.9: Anten hakkında detaylı sonuçların gösterildiği yazılım ekranı 39
Şekil 7.10: Üç boyutlu anten desen ölçümünün çizdirildiği yazılım ekranı 40
Şekil 8.1: Örnek ölçüm ve belirsizlik değerleri gösterimi 42
Şekil 8.2: Bir ölçümün aşamaları 43
Şekil 8.3: Model fonksiyon için şekilsel gösterim 46
Şekil 8.4: Normal dağılım için bir örnek 47
Şekil 8.5: Normal dağılım için grafiksel gösterim 48
Şekil 8.6: Dikdörtgen dağılım için grafiksel gösterim 49
Şekil 8.7: Üçgen dağılım için grafiksel gösterim 50
Şekil 8.8: U tipi dağılım için grafiksel gösterim 51
Şekil 8.9: Yarım dalga dipol için model hatasını tespit eden programcık arayüzü 55
Şekil 8.10: Lineer bir dizinin model hatasının tespiti için geliştirilen programcık 59
Şekil 8.11: Planer bir dizinin model hatasının tespiti için geliştirilen programcığın arayüzü 60
Şekil 9.1: Schaffner horn anten, 1 GHz yatay düzlem desenleri, ($\theta=90^o$, $0^o\leq\phi\leq360^o$, logaritmik skala) 70
Şekil 9.2: Schaffner horn antenin 1 GHz için üç boyutlu deseni 71
Şekil 9.3: Schaffner horn antenin 1 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o\leq\theta\leq180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri 71
Şekil 9.4: Schaffner horn anten, 2 GHz yatay düzlem grafiği ($\theta=90^o$, $0^o\leq\phi\leq360^o$, logaritmik skala) 72

Şekil 9.5: Schaffner horn antenin 2 GHz için üç boyutlu deseni 73
Şekil 9.6: Schaffner marka horn antenin 2 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \le \theta \le 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri.....73
Şekil 9.7: Schaffner horn anten, 3 GHz yatay düzlem grafiği ($\theta=90^o$, $0^o \le \phi \le 360^o$, logaritmik skala) 74
Şekil 9.8: Schaffner marka horn antenin 3 GHz için üç boyutlu deseni.....75
Şekil 9.9: Schaffner marka horn antenin 3 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \le \theta \le 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri.....75
Şekil 9.10: Schaffner horn anten, 4 GHz yatay düzlem grafiği ($\theta=90^o$, $0^o \le \phi \le 360^o$, logaritmik skala) 76
Şekil 9.11: Schaffner marka horn antenin 4 GHz için üç boyutlu deseni.....77
Şekil 9.12: Schaffner marka horn antenin 4 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \le \theta \le 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri.....77
Şekil 9.13: Schaffner horn anten, 5 GHz yatay düzlem desenleri ($\theta=90^o$, $0^o \le \phi \le 360^o$, logaritmik skala) 78
Şekil 9.14: Schaffner marka horn antenin 5 GHz için üç boyutlu deseni.....79
Şekil 9.15: Schaffner marka horn antenin 5 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \le \theta \le 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri.....79
Şekil 9.16: Schaffner horn anten, 6 GHz yatay düzlem grafiği $\theta=90^o$, $0^o \le \phi \le 360^o$, logaritmik skala) 80
Şekil 9.17: Schaffner marka horn antenin 6 GHz için üç boyutlu deseni.....81
Şekil 9.18: Schaffner marka horn antenin 6 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \le \theta \le 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri.....81
Şekil 9.19. İletimsel ve dielektriksel ısıl kayıpların ölçümü için ölçüm modeli.....88

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 5.1 : Yazılım tarafından yatay düzlem desenleri için arka planda oluşturulan tablo 19
Tablo 7.1 : Yazılımın uyumlu çalışabileceği laboratuar cihazları 24
Tablo 8.1 : Normal dağılım için önemli eşitlikler ve tanımlar 48
Tablo 8.2 : Anten desen ve mutlak kazanç ölçümleri belirsizlik bileşenleri 52
Tablo 8.3 : Yarım dalga dipol için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası 56
Tablo 8.4 : $\mathrm{Sin}^4\theta.\mathrm{Sin}^4\phi$ deseni için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası 56
Tablo 8.5 : Özel Desen-1 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası 57
Tablo 8.6 : Özel Desen-2 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası 58
Tablo 8.7 : Özel Desen-3 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası 59
Tablo 8.8 : Özel Desen-4 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası 61
Tablo 8.9 : Özel Desen-5 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası 62
Tablo 8.10: Anten desen ve gerçek kazanç ölçümü için belirsizlik bütçesi (1 GHz – 6 GHz) 66
Tablo 9.1 : Geliştirilen yazılım ile ölçümü yapılan antenler 68
Tablo 9.2 : Schaffner horn anten 1 GHz desen ölçüm sonuçları 72
Tablo 9.3 : Schaffner horn anten 2 GHz desen ölçüm sonuçları 74
Tablo 9.4 : Schaffner horn anten 3 GHz desen ölçüm sonuçları 76
Tablo 9.5 : Schaffner horn anten 4 GHz desen ölçüm sonuçları 78
Tablo 9.6 : Schaffner horn anten 5 GHz desen ölçüm sonuçları 80
Tablo 9.7 : Schaffner horn anten 6 GHz desen ölçüm sonuçları 82
Tablo 9.8 : Schaffner horn anteni için ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE149 karşılaştırması 84
Tablo 9.9 : Schaffner horn anteni için Yönlendiricilik(D_o) ve Gerçek Kazanç (G_o) tablosu 86
Tablo 9.10 : Schaffner anteni için her iki metottan elde edilen değerlerin farkı ve ısıl kayıp 87
Tablo 9.11 : Schaffner anteni için gerilim yansıma katsayısı (Γ) ölçümü 87
Tablo 9.12 : Ölçümlerde kullanılan, alıcı anten ile spektrum analizörü arasındaki kablo kayıpları 88
Tablo 9.13 : Schaffner anteni için P_{rad} ölçüm sonuçları ve ısıl kayıplar 89
Tablo 9.14 : "D_o(dB) – G_o(dB)" ile elde edilen ısıl kayıplar ile "P_{net}(dBm) – P_{rad}(dBm)" ölçümü ile elde edilen ısıl kayıplar arasındaki farklar 90
Tablo 10.1 : Tez kapsamında amaçlanan final sonuçlar 91

SEMBOLLER

AF : Anten faktörü, (dB/m)
c : Işık hızı, (m/s)
D : Yönlendiricilik, (dB)
D_o : Maksimum Yönlendiricilik, (dB)
$D_{\theta,\phi}$: Herhangi bir θ ve ϕ açısı için yönlendiricilik, (dB)
D_θ : θ için kısmı yönlendiricilik, (dB)
D_ϕ : ϕ için kısmı yönlendiricilik, (dB)
E : Elektrik alan, (V/m)
E_r : Elektrik alanın küresel koordinatlardaki r bileşeni, (V/m)
E_θ : Elektrik alanın küresel koordinatlardaki θ bileşeni, (V/m)
E_ϕ : Elektrik alanın küresel koordinatlardaki ϕ bileşeni, (V/m)
f : Frekans, (Hz)
G : Kazanç
G_o : Maksimum mutlak kazanç, (dB)
$G_{\theta,\phi}$: Herhangi bir θ ve ϕ açısı için mutlak kazanç, (dB)
H : Manyetik alan, (A/m)
H_r : Manyetik alanın küresel koordinatlardaki r bileşeni, (A/m)
H_θ : Manyetik alanın küresel koordinatlardaki θ bileşeni, (A/m)
H_ϕ : Manyetik alanın küresel koordinatlardaki ϕ bileşeni, (A/m)
M : Yatay parçalama sayısı
N : Dikey parçalama sayısı
P_{fwd} : İletilen güç, (dBm)
P_{rvs} : Geri yansıyan güç, (dBm)
P_{net} : Net Güç, (dBm)
P_{rad} : Işınan Güç, (dBm)
P_{av} : Ortalama güç, (W)
R : Uzunluk, (m) veya Direnç, (Ω)
r : Mesafe, (m)
sr : Katı açı (steradian)
t : Zaman, (s)
T : Isıl kayıp, (dB)
$T_{D\text{-}G}$: Yönlendiricilik ve mutlak kazanç farkından elde edilen ısıl kayıp
T_{desen} : Desen ölçümü ile bulunan ısıl kayıp, (dB)
U : Işınım şiddeti, (W)
U_{max} : Maksimum ışınım şiddeti, (W)
V : Gerilim, (V)
V_{fwd} : İletilen gerilim, (V)
V_{rvs} : Yansıyan gerilim, (V)
W_{av} : Ortalama güç yoğunluğu, (W/m^2)
W_{rad} : Işınım yoğunluğu, (W/m^2)
Z : Empedans, (Ω)
Γ : Yansıma katsayısı

$\bar{a}_r$: Küresel koordinatlarda boylam bileşeni için birim vektör
π : Pi sayısı (3,14.....)
λ : Dalgaboyu, (m)
θ : Kürese koordinatlardaki theta açısı, radyan
ϕ : Küresel koordinatlardaki phi açısı, radyan

Alt İndisler

av : Ortalama
fwd : İleri
in : Giriş
o : Maksimum
out : Çıkış
rad : Işınan (Radiated)
rvs : Geri
r : Küresel koordinatlarda *r* bileşeni
net : Net
θ,ϕ : Küresel koordinatlarda θ ve ϕ bileşeni

Kısaltmalar

AF : Anten Faktörü (Antenna Factor)
ANSI : American National Standards Institute
ASTA : Açık Alan Test Sahası
dB : Desibel
EMC : Elektromanyetik Uyumluluk (Electromagnetic Compatibility)
EMI : Electromagnetic Interference
FNBW : First Null Beamwidth (İlk Sıfırlar Işıma Demet Genişliği)
GHz : Giga Hertz
GPIB : General Purpose Interface Bus
HPBW : Half Power Beamwidth (Yarı Güç Işıma Açısı)
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO : The International Organization for Standardization
kHz : Kilo Hertz
m : Metre
MHz : Mega Hertz
ms : Mili saniye
NSA : Normalize Alan Zayıflatması (Normalized Site Attenuation)
OATS : Open Area Test Site (Açık Alan Test Sahası)
OPENGL : Açık Grafik Kütüphanesi (Open Graphics Library)
RF : Radyo Frekans (Radio Frequency)
RMS : Karelerinin ortalamasının karekökü (root mean square)
SI : Uluslararası Birimler Sistemi
TÜBİTAK : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UME : Ulusal Metroloji Enstitüsü

ANTEN DESEN ÖLÇÜMÜ VE MUTLAK KAZANÇ HESABI

Soydan ÇAKIR

Anahtar kelimeler: Anten, Anten Deseni, Mutlak Kazanç, Anten Yönlendiriciliği, Üç Anten Yöntemi

Özet: Bu tez kapsamında, anten mutlak kazancının ölçülebilmesi için, IEEE ANSI C63.5 v.b uluslararası standartlara alternatif olabilecek, üç boyutlu anten desen ölçümüne dayanan bir ölçüm yöntemi tanıtılmıştır.

Anten ölçümü ile ilgili kullanılan uluslararası standartların birçoğu anten hakkında sadece maksimum ışıma yönündeki mutlak kazanç ve anten faktörüyle sınırlandırılmış kısıtlı bilgiler verebilmekte, üç veya iki boyutlu anten deseni, herhangi istenen bir yöndeki mutlak kazanç ve yönlendiricilik, anten verimliliği gibi çok önemli bilgileri sunmamaktadırlar.

Bu tez kapsamında tanıtılan ölçüm yönteminde bir antene ait sadece maksimum mutlak kazanç ve anten faktörü tespit edilmeyip, antene ait küresel koordinatlardaki istenen konumdaki yönlendiricilik ve mutlak kazanç bilgilerine ulaşılabilmektedir. Ayrıca tanıtılan bu yeni yöntem ile antene ait üç ve iki boyutlu desen grafikleri çizilebilmekte ve anten üzerinde harcanan ısıl kayıplara yani anten verimliliğine de ulaşılabilmektedir. Kısacası bu yeni yöntem ile, uluslararası standartlar ile kıyaslandığında, anten hakkında çok daha detaylı bilgilere ulaşılabilmektedir. Bu yönleriyle bu yeni yöntem uluslararası anten kalibrasyon standartlarına iyi bir alternatif olmaktadır.

ANTENNA PATTERN MEASUREMENT AND ABSOLUTE GAIN CALCULATION

Soydan ÇAKIR

Keywords : Antenna, Antenna Pattern, Absolute Gain, Antenna Directivity, Three Antenna Method

Abstract: A new antenna calibration method is introduced as an alternative to some international standards such as ANSI IEEE C63.5 in order to measure absolute gain and antenna factor.

Most of the international standards yield only gain along maximum radiation direction and related antenna factor, however they don't give information about gain and directivity along any desired direction, two or three dimensional patterns and efficiency. The introduced method not only yields the antenna factor and gain along maximum radiation direction, but also yields gain and directivity along any desired direction, two and three dimensional patterns and antenna efficiency. This extra information is useful in most of electromagnetic compatibility (EMC) measurements and tests.

The new antenna calibration method is basically based on the measurement of antenna radiation pattern and needs slightly more calibration time.

1. GİRİŞ

Bu tez kapsamında, uzak alan anten ışıma desen ölçümünün düzeneği kurulmuş ve anten desen ölçümünü ve gerekli analizleri tam olarak yapan ve otomatik hale getiren bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yazılıma ayrıca uluslararası ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 standartlarındaki anten faktörü ve mutlak kazanç ölçümlerini destekleyen özellikler eklenerek, yazılımın bu uluslararası standartları desteklemesi ve karşılaştırma olanağı da sağlanmıştır. Yazılımın geliştirilmesi sonrası, bu yazılım aracılığı ile 2 adet horn , bir adet log-periyodik ve bir adet halka antenin ışıma desenleri 3 boyutlu küresel koordinatlarda çıkartılmış, çizdirilmiş ve bu 3 boyutlu desen üzerinde yüzey integrali alınarak antenlere ait yönlendiricilik değerleri çeşitli frekanslarda tespit edilmiştir. Bundan sonraki adım olarak seçilen horn antenlerden birine ait empedans, yansıma katsayısı ve ısıl kayıp parametreleri tespit edilmiş ve bu parametrelerinde hesaba katıldığı mutlak kazanca ulaşılmıştır.

En son aşamada, yine aynı yazılım ile fakat bu sefer, ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 uluslararası standartları kullanılarak daha önce deseni ölçülen horn antenin mutlak kazançları ve faktörleri tespit edilmiştir.

Bu ölçümlerin sonucunda hem kendi desen ölçümü yöntemimizden hem de uluslararası standartlardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve analizleri yapılarak, Türkiye' de ve dünyada anten parametrelerinin tespiti için çok yaygın bir şekilde kullanılan ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 standartlarının doğruluğu denetlenecek ve anten parametrelerinin tespiti için bu uluslararası standartlara alternatif bir yöntem bulunmaya çalışılacaktır.

2. ANTEN DESEN ANALİZİ İÇİN SAYISAL TEKNİK

Pratikte kullanılan bir çok antenlerin desenleri öyle karmaşıktır ki kapalı desen formun matematiksel ifadesini bulmak mümkün değildir. Bu nedenle integral alınamaz ve maksimum yönlendiriciliğe ulaşılamaz. Bu nedenle tez kapsamında yapılacak çalışmalarda bu bölümde anlatılan yöntem hayati rol oynayacaktır.

Şimdi, yönlendiriciliği bulmak için, bu tez kapsamında geliştirilen yazılım tarafından da kullanılan sayısal analiz tekniği anlatılacaktır. Bu konu ile ilişkili ve destekleyici anten teorisi ile ilgili tüm bilgiler EK A' da çok detaylı olarak sunulmuştur. Okuyucunun bu tez kapsamındaki konuları iyi anlayabilmesi için EK A' da verilen konu ile doğrudan ilişkili olan anten teorisini incelemesi tavsiye edilmektedir.

Bir antenin ışıma şiddetinin,

$$U = B_o f(\theta) g(\phi) \tag{2.1}$$

ile ifade edildiğini düşünelim. Burada B_o sabittir. f ve g sırasıyla θ ve ϕ' nin fonksiyonlarıdır. Böyle bir ışıma şiddetine sahip anten için yönlendiricilik,

$$D_o = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \tag{2.2}$$

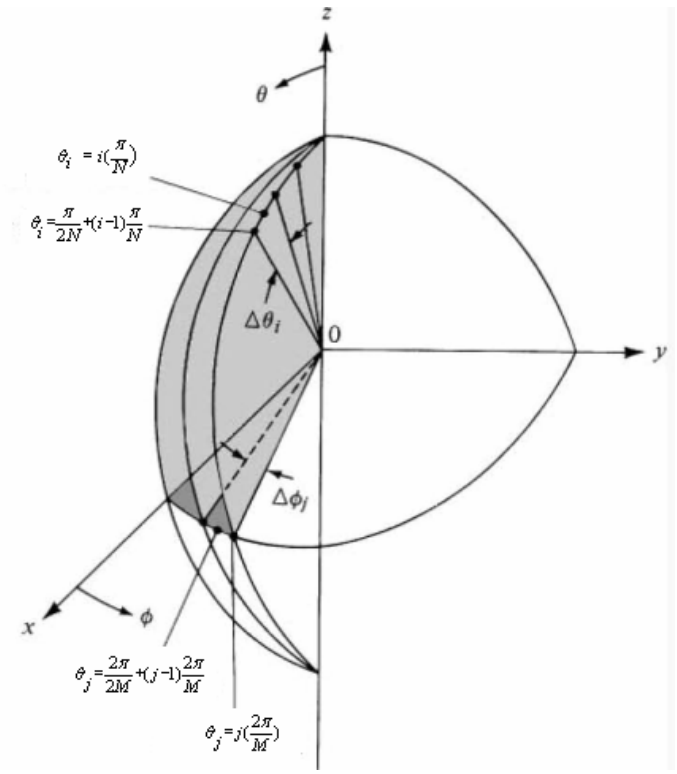
ve ışınan güç,

$$P_{rad} = B_o \int_0^{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} f(\theta) g(\phi) \sin\theta d\theta \right\} d\phi \tag{2.3}$$

olacaktır ve aynı zamanda,

$$P_{rad} = B_o \int_0^{2\pi} g(\phi) \left\{ \int_0^{\pi} f(\theta) \sin\theta d\theta \right\} d\phi \tag{2.4}$$

olarak yazılabilir.



Şekil 2.1: Sayısal yöntem için modelleme şekli

Eğer integraller analitik olarak çözülemez ise, toplam serisine yakınlaştırılabilir ve

$$\int_0^{\pi} f(\theta)\sin\theta d\theta = \sum_{i=1}^{N}[f(\theta_i)\sin\theta_i]\Delta\theta_i \tag{2.5}$$

olarak yazabiliriz.

Eğer N, π aralığını düzgün adımlarla bölüyor ise,

$$\Delta\theta_i = \frac{\pi}{N}, \qquad i = 1,2,3,\ldots\ldots, N \tag{2.6}$$

olur.

Şekil 2.1' e dikkatli bakıldığında görülür ki, θ_i bir çok formda yazılabilir. Bunlardan iki tanesi,

$$\theta_i = i(\frac{\pi}{N}), \qquad i = 1,2,3.....,N \tag{2.7}$$

veya

$$\theta_i = \frac{\pi}{2N} + (i-1)\frac{\pi}{N}, \qquad i = 1,2,3.....,N \tag{2.8}$$

olacaktır.

İlk durumda, θ_i her bölmenin başlayan kenarından alınırken, ikinci durumda her bölmenin merkezinden alınır. İncelenen desenin şekline göre uygun form seçilebilir.

Aynı şekilde, ϕ değişimleri içinde benzer işlemleri yapabiliriz.

$$\int_0^{2\pi} g(\phi).d\phi = \sum_{j=1}^{M} g(\phi_j).\Delta\theta_j \tag{2.9}$$

olarak yazılabilir. M düzgün parçalama aralığı ise,

$$\Delta\theta_j = \frac{2\pi}{M} \tag{2.10}$$

olarak yazılır. Şekil 2.1' i referans aldığımızda,

$$\theta_j = j(\frac{2\pi}{M}), \qquad j = 1,2,3.....,M \tag{2.11}$$

veya

$$\theta_j = \frac{2\pi}{2M} + (j-1)\frac{2\pi}{M}, \qquad j = 1,2,3.....,M \tag{2.12}$$

olur.

Artık 2.5, 2.6, 2.7, 2.9, 2.10 ve 2.11 eşitliklerini birleştirirsek,

$$P_{rad} = B_o(\frac{\pi}{N})(\frac{2\pi}{M})\sum_{j=1}^{M}\left\{ g(\phi_j)\left[\sum_{i=1}^{N} f(\theta_i)\sin\theta_i\right]\right\} \tag{2.13}$$

elde ederiz.

Mademki θ ve ϕ değişkenleri birbirinden ayrılabilir (2.13) eşitliği,

$$P_{rad} = B_o(\frac{\pi}{N})(\frac{2\pi}{M})\left[\sum_{j=1}^{M} g(\phi_j)\right]\left[\sum_{i=1}^{N} f(\theta_i)\sin\theta_i\right] \tag{2.14}$$

olarak yazılabilir.

Eğer θ ve ϕ birbirinden ayrılamaz değişkenler ise ışınım şiddeti,

$$U = B_o F(\theta,\phi) \tag{2.15}$$

olur. Bu durumda,

$$P_{rad} = B_o(\frac{\pi}{N})(\frac{2\pi}{M})\sum_{j=1}^{M}\left[\sum_{i=1}^{N} F(\theta_i,\phi_j)\sin\theta_i\right] \tag{2.16}$$

olacaktır.

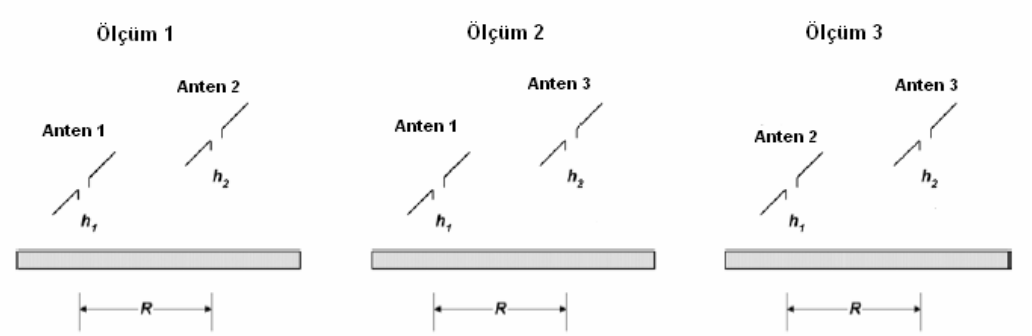
Artık P_{rad}' ın bulunması ile maksimum yönlendiricilik (D_o), EK-A' da belirtilen (A20) eşitliğinden yararlanarak,

$$D_{\max} = D_o = \frac{U_{\max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \tag{2.17}$$

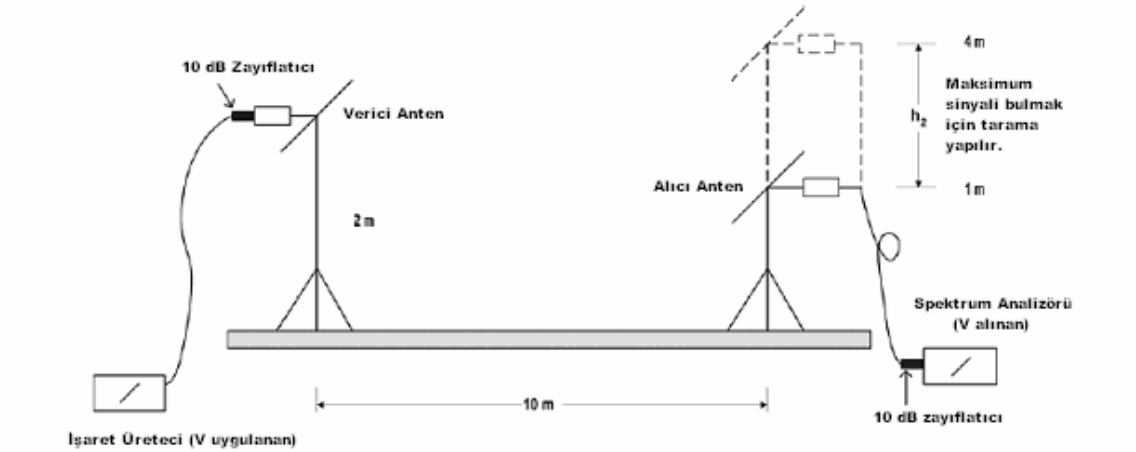
olarak yazılır.

3. ANSI IEEE C63.5 ÜÇ ANTEN YÖNTEMİ

Bu yöntem, ANSI IEEE C63.5 [2,3] standardı tarafından önerilen 3 antenin kullanımı ile 3 antenin de anten faktör (dB) bilgilerine ulaşan bir yöntemdir. Yöntem, Şekil 3.1' de görüldüğü üzere 3 farklı ölçüm düzeneğinden oluşmaktadır.



Şekil 3.1: ANSI IEEE C63.5 üç anten yöntemi gösterimi



Şekil 3.2: ANSI IEEE C63.5 üç anten yönteminde bir anten çiftinin ölçümü

Üç anten yöntemi, NSA (Normalize Edilmiş Site Zayıflatması) değeri ± 1 dB' den daha iyi olan bir ASTA (Açık Saha Test Alanı) gerektirmektedir. Bu yöntemde, antenlerin yatay polarizasyonda ve aralarındaki mesafenin (R) 10 m olduğu durum, diğer tüm durumlara göre en iyi uzak alan anten faktörlerini verecektir. Özellikle,

antenlerin yatay polarizasyonda olması, ölçümün saha değişimlerine daha duyarsız olmasını sağlayacaktır. Bu nedenle ölçümler sırasında 1 GHz' in altındaki frekanslar için yatay polarizasyon ve 10 m ölçüm mesafesi önerilmekte olup, bu tez çalışması kapsamında yapılan tüm 1 GHz frekansı altı çalışmalarda 10 m ölçüm mesafesi ve yatay polarizasyon kullanılmıştır. Yine 1 GHz frekans altı ölçümlerde, metal zemin ile olan istenmeyen parazitik etkilerin ortadan kaldırılması için verici anten yüksekliği yerden yeteri kadar yükseklikte tercihen (h_1) 2 m seçilmelidir. Alıcı anten ise ölçümlerde 1 m – 4 m arasında taranarak maksimum alım seviyesi tespit edilir.

1 GHz üstü frekanslarda, ölçümlerdeki tüm antenlerin yerden yüksekliği 2 m, antenler arası mesafe (R) 3 m ve yatay polarizasyon olarak seçilir. Alıcı anten için ekstra bir tarama yapılması gerekmeksizin metal zeminden yüksekliği 2 m olarak seçilir. Bu nedenle bu tez kapsamında yapılan 1 GHz frekans üstü tüm çalışmalarda anten mesafeleri 3 m, anten yükseklikleri 2 m ve polarizasyon yatay olarak seçilmiştir.

ANSI IEEE C63.5 standardında üç anteninde faktörlerine aşağıdaki eşitliklerle ulaşılır.

$$
\begin{aligned}
A_1 &= A_{1_uygulanan} - A_{1_okunan} - A_{1_yol} \\
A_2 &= A_{2_uygulanan} - A_{2_okunan} - A_{2_yol} \\
A_3 &= A_{3_uygulanan} - A_{3_okunan} - A_{3_yol} \\
AF_1 &= 10\log f_{MHz} - 24.6 + 0.5\left[E_D^{\max} + A_1 + A_2 - A_3\right] \\
AF_2 &= 10\log f_{MHz} - 24.6 + 0.5\left[E_D^{\max} + A_1 + A_3 - A_2\right] \\
AF_3 &= 10\log f_{MHz} - 24.6 + 0.5\left[E_D^{\max} + A_2 + A_3 - A_1\right]
\end{aligned}
\qquad (3.1)
$$

Burada,

$E_D^{\max}$ = Standart içinde değeri verilen maksimum alınan sinyal seviyesidir. (dBμV/m)

AF_1, AF_2, AF_3 = 1,2 ve 3 nolu antenlerin anten faktörleri (dB/m)

A_1, A_2, A_3 = Şekil 3.1 ve 3.2' de verilen ölçüm düzenekleri ile ölçülen alan zayıflatmaları

$A_{1_uygulanan}, A_{2_uygulanan}, A_{3_uygulanan}$ = Şekil 3.1 ve 3.2' de verilen ölçüm düzeneklerinde işaret üreteci tarafından uygulanan seviye (dBμV)

$A_{1_okunan}, A_{2_okunan}, A_{3_okunan}$ = Şekil 3.1 ve 3.2' de verilen ölçüm düzeneklerinde spektrum analizörü tarafından okunan seviye (dBμV)

$A_{1_yol}, A_{2_yol}, A_{3_yol}$ = Şekil 3.1 ve 3.2' de verilen ölçüm düzeneklerindeki, kullanılan kablolar, zayıflatıcılar ve varsa ön kuvvetlendiriciler dahil olmak üzere işaret üreteci-verici anten ve alıcı anten-spektrum analizörü arasında kullanılan yolun toplam kaybı (dB)

f_{MHz} = MHz biriminde frekans değeri

olarak verilir.

(3.1) eşitlikleri incelediğinden ayrıca E_D^{maz} düzeltim faktörünün kullanıldığı görülmektedir. Bu faktörün kullanım nedeni, üç anten kalibrasyon yönteminin tamamen serbest uzayda yapılmayıp, metal bir zemin üzerinde yapılıyor olmasıdır. Şu ana kadar yapılan tüm teorik eşitlikler tamamen serbest uzay için çıkarılmış olduğundan, böyle bir düzeltim faktörü gerekli olmaktadır. Bu faktörler (E_D^{maz}) her bir frekans için teorik olarak hesaplanmış olup ilgili standartta (ANSI IEEE C63.5) bir tablo olarak sunulmuştur. (3.1) eşitlikleri kullanılırken E_D^{maz} değerleri bu tablolardan temin edilmelidir.

Adım adım üç anten yöntemi ile kalibrasyon:

- Ölçümde kullanılan tüm ölçüm cihazlarının ısınması için bir süre beklenir. Kalibrasyonu yapılacak 3 anten sırasıyla "Anten 1", "Anten 2" ve "Anten 3" olarak numaralandırılır.
- Şekil 3.2' deki ölçüm düzeneği "Anten 1" verici, "Anten 2" alıcı olacak şekilde ayarlanır. Cihazlarda ilgili frekans ayarlaması sonrası işaret üreteci genlik değeri, alıcı tarafta alınan seviyenin taban gürültüsünden en az 16 dB yüksek olmasına dikkat edilerek ayarlanır. Bu seviye "$A_{1_uygulanan}$" olarak isimlendirilir. Spektrum analizörde okunan değer ise "A_{1_okunan}" olacaktır. Bir sonraki adımda ise işaret

üretecinin seviye ve frekans ayarı bozulmadan, her iki antene bağlı kablolar antenlerden çıkartılarak birbirine bağlanır ve işaret üreteci üzerindeki uygulanan seviye ile spektrum analizörde okunan değer arasındaki fark sistemde kullanılan kablo yolunun kaybı olup "A_{1_yol}" olarak isimlendirilir. Unutulmamalıdır ki "A_{1_yol}" değeri kullanılan koaksiyel kablo ve yol üzerinde kullanılan tüm zayıflatıcıları hatta eğer varsa ön-kuvvetlendirici v.b cihazları da içeren genel terimdir. "A_{1_yol}" bir kayıp terimi olarak belirtilmiş olmasına karşın sistem yolu üzerinde RF kuvvetlendiricilerin olması durumunda değeri pozitif olabilmektedir. Nihai olarak bu elde edilen verilerden "$A_{1_uygulanan}$- A_{1_okunan}- A_{1_yol}" matematiksel işlemi ile A_1 değerine ulaşılır. Buraya kadar anlatılanlar istenen diğer tüm frekanslar için tekrarlanır. Frekans seçimi için ANSI IEEE C63.5 standardı içerisinde verilen ilgili tablolardan yararlanılabilir.

- Adım 2, "Anten 1" verici, "Anten 3" alıcı durumu için uygulanır ve A_2 değerine ulaşılır.
- Adım 2, "Anten 2" verici, "Anten 3" alıcı durumları için tekrarlanır ve A_3 değerine ulaşılır.
- Artık A_1, A_2 ve A_3 değerlerinin bulunması ile her üç antenin faktörlerine (3.1) eşitlikleri ile ulaşılır.

Genellikle bu yöntem uyarınca anten kalibrasyonu yapan akredite kalibrasyon laboratuarları anten faktörlerinin bulunması sonrası raporlama işleminde, anten faktörlerini anten kazancı ile birlikte vermektedir. Anten faktöründen kazanca geçerken kullanılan eşitlik EK-A' da (A92) eşitliği ile verildiği üzere "$G_o(dB) = 20\log(f_{MHz}) - AF(dB) - 29.79$" olmaktadır.

4. ANSI IEEE 149 MUTLAK ANTEN KAZANCI ÖLÇÜMÜ

Bu bölümde anlatılacak yöntemler ANSI IEEE 149 [4] standardı tarafından önerilmektedir. Anlatılacak yöntemlerde, her bir ölçüm 2 anteni içerir ve ölçümler sırasında antenler için uzak alan şartlarının sağlanması gereklidir. Bu bölümde anlatılan yöntemlerde, antenler aynı polarizasyonda ve maksimum yönlendiricilik yönünde hizalanmalıdır. ANSI IEEE 149 standardı, ANSI IEEE C63.5 standardının aksine anten faktörü yerine antenlerin mutlak kazançlarının tespitini hedef almaktadır.

ANSI IEEE 149 standardı kapsamında mutlak anten kazancı tespiti 3 yöntem ile yapılmaktadır.

- İki anten yöntemi
- Üç anten yöntemi
- Zeminden yansımalı yöntem

4.1. İki Anten Yöntemi

Karşılıklı konulmuş iki anten için decibel formda aşağıdaki eşitlik yazılır,

$$(G_{ot})_{dB} + (G_{or})_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \tag{4.1}$$

Burada,

$(G_{ot})_{dB}$ = İletim antenin mutlak kazancı (dB)

$(G_{or})_{dB}$ = Alıcı antenin mutlak kazancı (dB)

P_r = Alınan güç (W)

P_t = İletilen Güç (W)

λ = Çalışma dalgaboyu (m)

olmaktadır.

Eğer verici ve alıcı anten benzer (parametreleri birbirine çok yakın) antenler ise,

$$(G_{ot})_{dB} = (G_{or})_{dB} = \frac{1}{2}\left[20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right)\right] \tag{4.2}$$

olacaktır.

4.2. Üç Anten Yöntemi

Eğer mutlak kazancı bulunmak istenen antenler benzer değil ise, üçüncü bir anten mutlak kazançların tespiti için gerekecektir. Her bir antenin mutlak kazancının tespiti için üç ölçüm yapılmalıdır. Her bir ölçümde bir anten çifti için ölçüm alınır. Antenler sırasıyla "a", "b" ve "c" olarak isimlendirilir ise, Bölüm 3' teki ölçümün benzeri bir ölçüm gerçekleştirilir. Ölçümler sırasıyla "a-b", "a-c" ve "b-c" çiftleri için Bölüm 3' te anlatıldığı şekilde gerçekleştirilir. Ölçümler sonucunda üç adet denklem elde edilecektir. Bu bölümde anlatılan yöntem laboratuar ortamında 1 GHz ve üstü frekanslar için uygundur. Antenlerin metal zeminden en az 2 m' de yukarıda olması, aralarındaki mesafenin en az 3 m olmak üzere uzak alan şartlarını sağlamaları gerekmektedir. Ayrıca, antenler arasındaki metal zeminin elektromanyetik yutucu malzemeler ile kaplanması ölçüm belirsizliğini düşürmek açısından uygun olacaktır.

İlgili eşitliklerimiz,
(a-b anten çifti için)

$$(G_a)_{dB} + (G_b)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right) \tag{4.3}$$

(a-c anten çifti için)

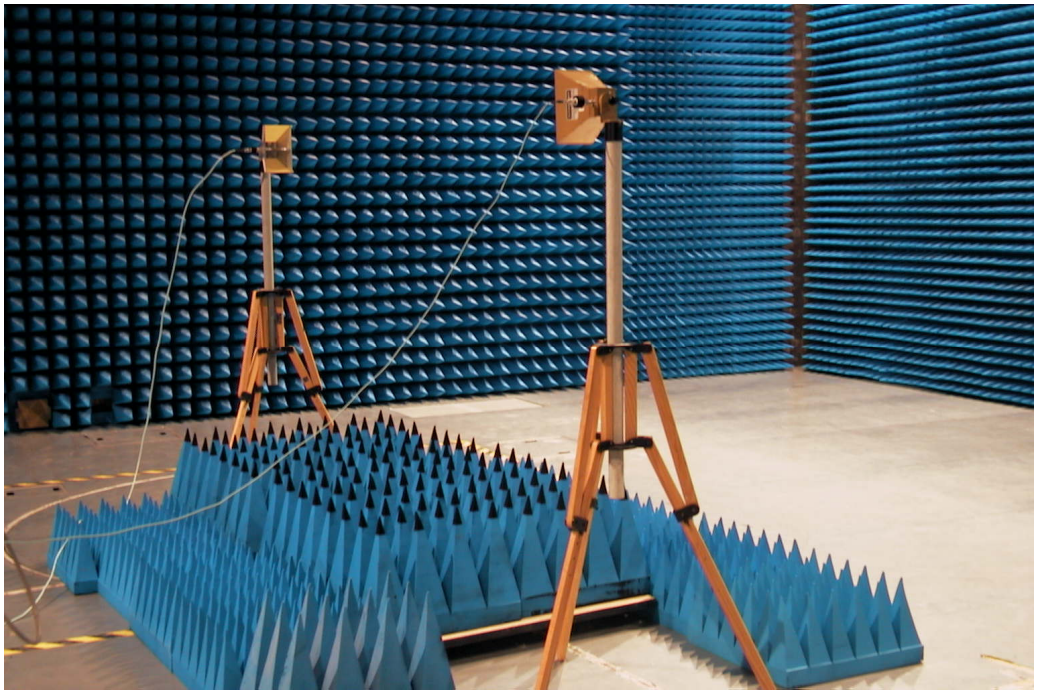
$$(G_a)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}}\right) \tag{4.4}$$

(b-c anten çifti için)

$$(G_b)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}}\right) \tag{4.5}$$

olacaktır.

Bu üç denklemin çözümü oldukça basittir fakat çözümün yapılabilmesi için R, λ ve $\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right)$, $\left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}}\right)$ ve $\left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}}\right)$ oranlarının bilinmesi gereklidir.



Şekil 4.1: ANSI IEEE 149 üç anten yönteminde bir anten çiftinin ölçüm fotoğrafı (TÜBİTAK UME' de yapılan bir ölçümden alınmıştır)

İki ve üç anten yöntemlerinde dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır.

- Sistem frekansı durağan olmalıdır.
- Antenler uzak alan şartlarını sağlamalıdır.
- Antenler maksimum yönlendiricilik yönünde karşılıklı olarak yerleştirilmelidirler.
- Tüm komponentler empedans ve polarizasyon olarak uyumluluk göstermelidir.
- Çevre yansımaları minimum edilmeli. Bu nedenle işlem zeminden yeteri kadar yüksekte bir tam yansımasız / yarı_yansımasız odada veya bir açık alan test sahasında gerçekleştirilmelidir. İşlem yarı yansımasız odada veya açık alan test sahasında yapılıyor ise zeminin yutucu malzemelerle en azından kısmi olarak kaplanması ölçüm belirsizliğini oldukça düşürecektir.

Belirtilen (4.3), (4.4) ve (4.5) eşitliklerinin nasıl üretildiğini kısaca gösterelim. Şekil 3.1' de gösterilen antenlerin maksimum etkin alanları ve maksimum kazançları,

Anten 1..... $A_{em_1,}\, G_{01}$

Anten 2..... $A_{em_2,}\, G_{02}$

Anten 3..... $A_{em_3,}\, G_{03}$

olsun.

Şekil 3.1'de gösterilen Ölçüm1 düzeneği için Anten 1' in Anten 2'nin hemen üzerinde oluşturacağı güç yoğunluğu,

$$W_{t1} = \frac{P_{t1}}{4\pi R^2} G_{o1} \tag{4.6}$$

olacaktır. Burada,

W_{t1} = Anten 1' in Anten 2 üzerinde oluşturduğu güç yoğunluğu (W/m^2)

P_{t1} = Anten 1' in tam girişinde ölçülen toplam güç (kayıpsız bir anten için ışınan güç olacaktır) (W)

R = Anten 1 ve Anten 2 arasındaki mesafe (3 veya 10 m olarak seçilir) (m)

G_{o1} = Anten 1 için kazanç değeri (kayıpsız bir anten için yönlendiricilik ile aynı şeyi ifade eder) (birimsiz)

Artık Anten 1 tarafından Anten 2' nin yüküne (50 Ω) aktarılan gücü bulabiliriz.

$$P_{r2} = W_{t1}.A_{em2} = \frac{P_{t1}}{4\pi R^2} G_{o1} A_{em2} \tag{4.7}$$

olacaktır. Burada,

P_{r2} = Anten 2'nin yüküne aktarılan güç seviyesi (W)

A_{em2} = Anten 2' ye ait maksimum etkin alan (m^2)

olmaktadır.

EK-A' da elde ettiğimiz eşitlik (A81)' den bilindiği üzere Anten 2 için maksimum kazanç ve maksimum etkin alan arasındaki eşitliği yazarsak,

$$A_{em2} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{o2} \tag{4.8}$$

olur. Burada,

λ = Dalga boyu (m)

G_{o2} = Anten 2' nin kazancı (kayıpsız bir anten için yönlendiricilik ile aynı şeyi ifade eder) (birimsiz)

olmaktadır.

Artık nihai eşitliği yazabiliriz,

$$P_{r2} = \frac{P_{t1}}{4\pi R^2} G_{o1} G_{o2} \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{4.9}$$

olur.

Bu bulunan eşitlik (4.9), Şekil 3.1' de verilen Anten 1 – Anten 2 ölçüm sistemi için çıkartılmış olup, diğer Anten 1 – Anten 3 ve Anten 2 – Anten 3 çifti için aynı şekilde,

$$P_{r3} = \frac{P_{t1}}{4\pi R^2} G_{o1} G_{o3} \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{4.10}$$

$$P_{r3} = \frac{P_{t2}}{4\pi R^2} G_{o2} G_{o3} \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{4.11}$$

olacaktır.

Bu eşitlikler dikkatle incelendiğinde elimizde 3 bilinmeyenli 3 denklem olduğu görülecektir. Bu üç eşitliğin her iki tarafının 10 tabanında logaritmasını alırsak ve biraz düzenlersek, (1,2 ve 3 anten indislerini a,b ve c olarak ta değiştirerek)

(a-b çifti için)

$$(G_a)_{dB} + (G_b)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right) \tag{4.12}$$

(a-c çifti için)

$$(G_a)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}}\right) \tag{4.13}$$

(b-c çifti için)

$$(G_b)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}}\right) \tag{4.14}$$

eşitliklerine ulaşırız. Bilinmeyenler,

G_{o1}, G_{o2}, G_{o3} .....Sırasıyla Anten 1, Anten 2 ve Anten 3' e ait maksimum kazanç değerleri

Bilinenler,

P_{ta}, P_{tb} .....Sırasıyla Anten 1 ve Anten 2' nin girişlerinde ölçülen güçtür ve deneysel olarak bilinmektedir.

P_{rb}, P_{rc} .....Sırasıyla Anten 2 ve Anten 3' ün çıkışlarında ölçülen güçtür ve deneysel olarak bilinmektedir.

R .....Ölçümler sırasında antenler arası mesafedir ve deneysel olarak bilinmektedir.

λ .....Dalga boyu ve deneysel olarak bilinmektedir.

olmaktadır.

Bu (4.12), (4.13) ve (4.14) eşitliklerinin çözümü üç antene ait maksimum mutlak kazanç değerlerini verecektir.

Artık çözümleri yazabiliriz,

$$G_a = \frac{1}{2}\left[20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}}\right) - 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}}\right)\right]$$

$$G_b = \frac{1}{2}\left[20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right) - 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}}\right)\right] \tag{4.15}$$

$$G_c = \frac{1}{2}\left[20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}}\right) - 10\log_{10}\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right)\right]$$

olur.

Maksimum kazanç değerinde anten faktörüne geçiş EK-A' da belirtildiği ve ispatlandığı üzere,

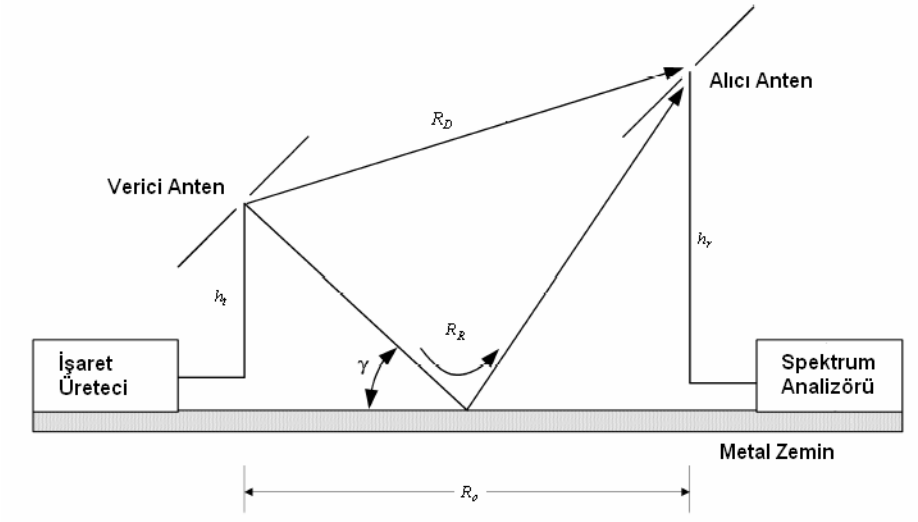
$$G_o(dB) = 20\log(f_{MHz}) - AF(dB) - 29.79 \tag{4.16}$$

eşitliği ile yapılır.

4.3. Zeminden Yansımalı Yöntem

Bu yöntem daha çok geniş bantlı antenlerin, 1 GHz ve altı frekanslar için mutlak kazançlarının ölçümü için kullanılır. Bu yöntem yerden yansımaları da hesaba kattığı için, Bölüm 4.1 ve 4.2' de anlatılan iki ve üç anten yöntemlerinde değişiklikler yapılması gereklidir. Bu yöntem sadece elektrik alan alabilen lineer polarizasyonlu antenlere uygulanır. Halka antenler için yöntemde değişiklikler gerekir ki şuan ki tez kapsamımız dışındadır.

Ölçümler sırasında, ölçümlerin yatay polarizasyonda yapılması şiddetle tavsiye edilmektedir çünkü tecrübeler ve teorik çalışmalar yatay polarizasyonda belirsizliğin daha düşük olduğunu göstermiştir. Bu yöntem için Şekil 4.2' de gösterilen düzenek öngörülmüştür.



Şekil 4.2: ANSI IEEE 149 zeminden yansımalı yöntem için bir anten çiftinin ölçümü

İlgili eşitliğimiz,

$$(G_a)_{dB} + (G_b)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R_D}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right) - 20\log\left(\sqrt{D_A D_B} + \frac{rR_D}{R_R}\right) \qquad (4.17)$$

olmaktadır. Burada D_A ve D_B antenlerin R_D boyunca yönlendiriciliğidir ve antenlerin genlik desenlerinden mutlak kazanç ölçümü öncesinde tespit edilebilirler. R_D, R_R, λ ve P_r / P_t' de ayrıca ölçülebilir. Burada belirlenmesi gereken en önemli parametre r faktörüdür. r faktörü antenlerin yayınım deseni, çalışma frekansı ve ölçüm alanının elektriksel/geometriksel özelliklerinin bir fonksiyonudur.

r faktörünün tespiti için,

- İlk olarak alıcı anten maksimum elektrik alanı gösterir pozisyonda iken R_D, R_R, P_r, D_A ve D_B değerleri ölçülür.
- İkinci ölçüm olarak alıcı anten öyle konumlandırılır ki alınan sinyal minimum seviyede olur. Bu pozisyonda iken ölçülen değerlere ise $R_D{}'$, $R_R{}'$, $P_r{}'$, $D_A{}'$ ve $D_B{}'$ diyeceğiz.

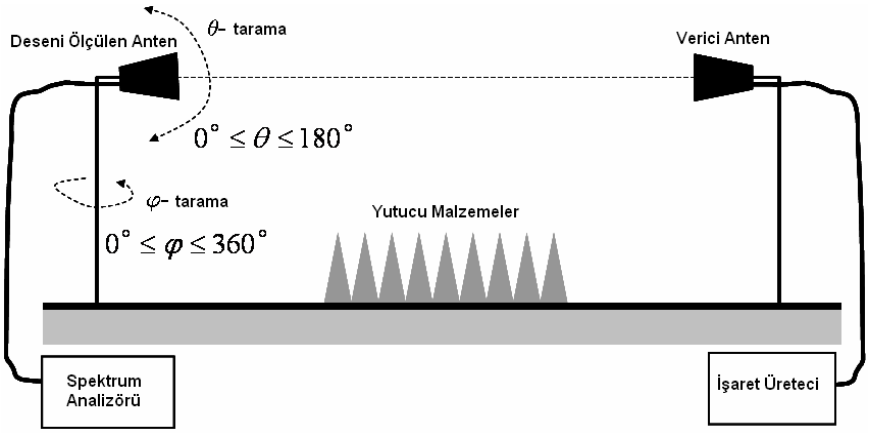
Bu ölçülen değerler ile,

$$r = \left(\frac{R_R R_R{}'}{R_D R_D{}'}\right)\left[\frac{\sqrt{(P_r / P_r{}')(D_A{}' D_B{}')}R_D - \sqrt{D_A D_B}R_D{}'}{\sqrt{(P_r / P_r{}')}R_R + R_R{}'}\right] \qquad (4.18)$$

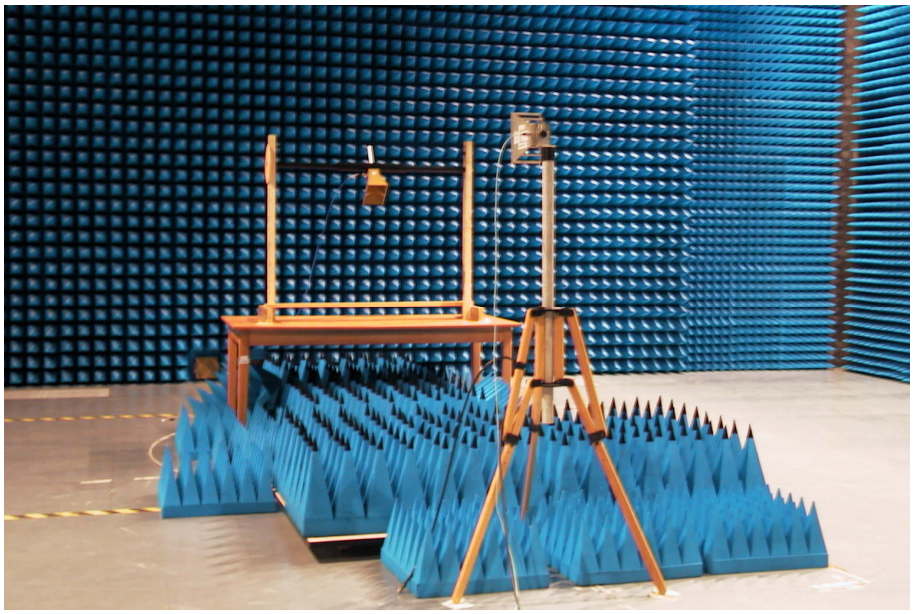
olarak ifade edilir.

5. ANTEN DESEN ÖLÇÜMÜ

Uzak alan anten desen ölçümü, Şekil 5.1' de verilen ölçüm düzeneği ile icra edilir ve tez kapsamında yapılan çalışmalarda bu düzenek kurulmuştur fakat gösterilen şekilden farklı olarak bazı ölçümlerde deseni ölçülen anten verici durumuna, yardımcı antende alıcı durumuna alınmıştır.



Şekil 5.1: Küresel koordinatlarda uzak alan anten desen ölçüm düzeneği



Şekil 5.2: Uzak alan anten desen ölçüm düzeneğinin fotoğrafı

Şekil 5.1' de görüldüğü üzere deseni ölçülecek anten alıcı durumdadır. Alıcı tarafta spektrum analizöründe yeterli seviyede sinyal algılanabilecek şekilde işaret üreteci ilgili frekansta ve genlikte ayarlanır. Alıcı antenin 3 boyutlu desenini çıkarmak için, deseni ölçülen anten, her 10^{o} θ açısı için, yatay düzlemde $\phi = 0^{o}$' den $\phi = 360^{o}$' ye kadar 1^{o}' yi geçmeyen hassasiyetle döndürülür. Yatay düzlemde ϕ açısının her 1^{o} artışı için yazılım spektrum analizörden bir değer okuyacaktır. Bu işlem $\theta = 0^{o}$' dan $\theta = 180^{o}$' ye kadar her 5^{o}' deki yatay düzlemde tekrarlanır. Nihai olarak bilgisayar tarafından arka planda Tablo 5.1' deki gibi bir tablo oluşturulacaktır.

Tablo 5.1: Yazılım tarafından yatay düzlem desenleri için arka planda oluşturulan tablo

Frekans (MHz)	θ Açısı (derece)	ϕ Açısı (derece)	Elektrik Alan (dBµV/m)
xxx	xxx	xxx	xxx

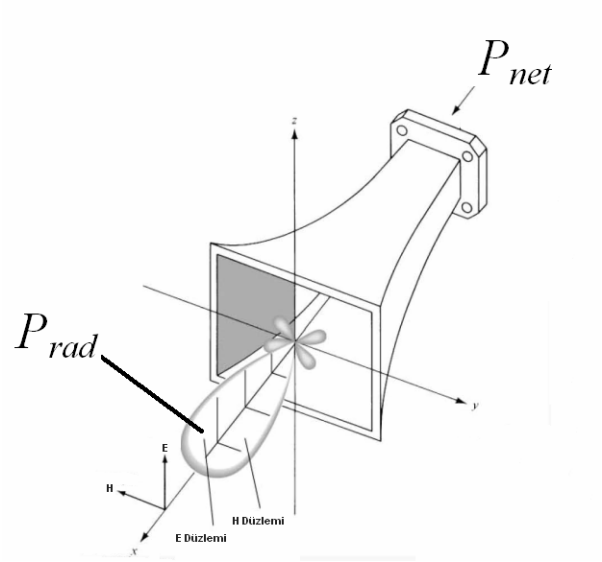
Yazılım artık tüm bilgileri derleyip 3 boyutlu deseni çıkarıp, anten parametrelerine ulaşacaktır. Tablo 5.1' de verilen xxx ifadesi yazılım tarafından yazılacak değeri ifade etmektedir.

6. ANTEN ÜZERİNDE HARCANAN ISIL KAYIPLARIN ÖLÇÜMÜ

Antenlerin iletimsel ve dielektriksel kayıplarının decibel biriminde ölçümü için Şekil 6.1' deki bir ölçüm modeli düşünülmüştür. Uzak alan ışınan güç (P_{rad}) ile anten girişindeki net gücün (P_{net}) farkı iletimsel ve dielektriksel kayıpları verecektir. Bu bölümde anlatılan yöntemde, iletimsel ve dielektriksel kayıplar anten desen ölçümü yöntemi ile bulunduğu için T_{desen} (dB) olarak isimlendirilmiştir. Yani,

İletimsel / Dielektriksel Kayıplar (dB)= T_{desen} (dB) = P_{net} (dBm) - P_{rad} (dBm) (6.1)

olacaktır.



Şekil 6.1: İletimsel ve dielektriksel kayıpların ölçümü için ölçüm modeli

Bu bölümde ölçülen P_{rad}'ın klasik anten desen ölçümünde ölçülen P_{rad}' tan en büyük farkı gerçek olmasıdır. Klasik anten desen ölçümünde ana hedef, desen şekli ve yönlendiricilik olduğundan P_{rad}' ın gerçek olmasına gerek yoktur. Çünkü,

$$D_{\max} = D_o = \frac{U_{\max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \tag{6.2}$$

eşitliği gereği $U_{\max}$ ve P_{rad} oran durumunda olduğundan ve,

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta,\phi) \sin\theta d\theta d\phi \tag{6.3}$$

olduğu da hatırlanırsa P_{rad}' ın gerçek olma zorunluluğu olmayacaktır. Kısacası klasik anten desen ölçümünde deseni ölçülen anten karşısına kalibreli (anten faktörü bilinen) bir anten koymaya gerek yoktur. Fakat söz konusu ölçüm gerçek P_{rad} olduğunda, deseni ölçülecek anten karşısına kalibreli bir anten konulması ve deseni ölçülen antenin verici durumunda olması gerekecektir. Bu nedenle bu bölümde anlatılan T_{desen}(dB) ölçümünün, klasik anten desen ölçümünden tek farkı bu olacaktır. Sonuçta bulmak istediğimiz iletimsel ve dielektriksel kayıp decibel biriminde,

$$T_{desen}(\text{dB}) = P_{net}(\text{dBm}) - P_{rad}(\text{dBm}) \tag{6.4}$$

olacaktır.

İleri güç (P_{fwd}) yerine net gücün (P_{net}) kullanılmasının tek nedeni anten girişindeki empedans uyuşmazlığından kaynaklanan yansımalar ile oluşan kayıp ile iletimsel/dielektriksel kayıpların ayırt edilebilmesidir. Çünkü,

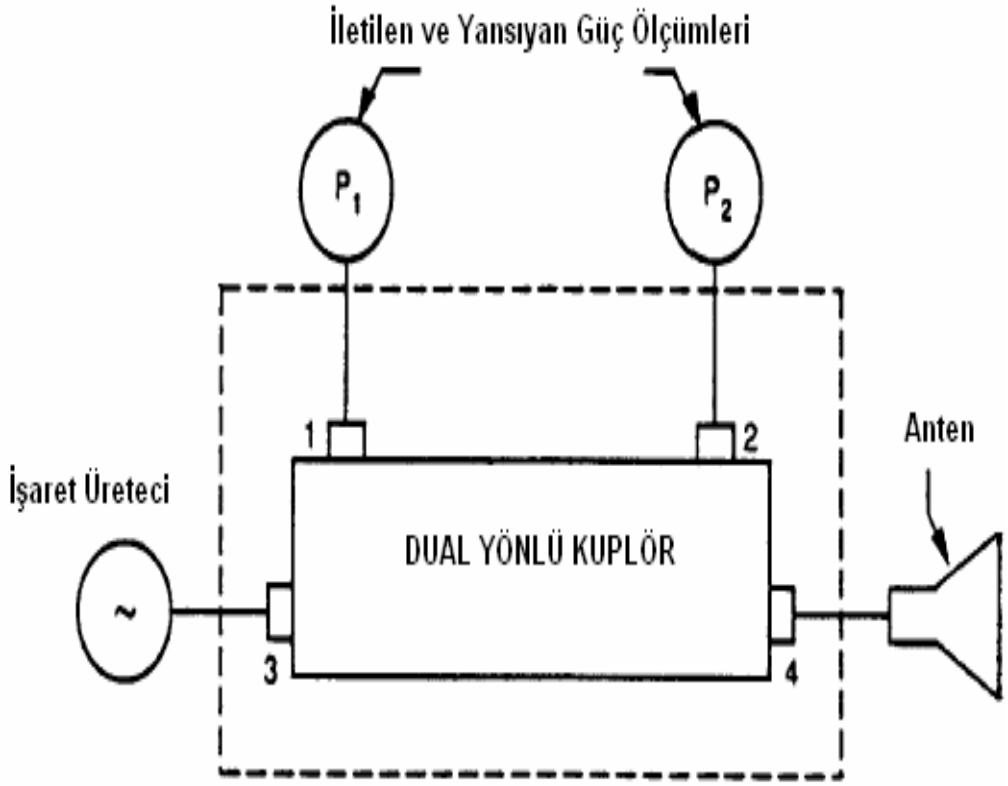
$$P_{net} = P_{fwd} - P_{rvs} \tag{6.5}$$

dir.

P_{net} ölçümünün en kolay yolu antenin tam girişine kalibreli bir dual yönlü kuplör (dual directional coupler) konulmasıdır ve Şekil 6.2' de verilen düzenek bu amaç için kullanılır.

Bu tez kapsamında yapılan bu T_{desen}(dB) ölçüm çalışmasında deseni ölçülen anten verici durumuna alınarak karşısına izlenebilirliği olan kalibreli bir anten konulmuş ve desen ölçümü ile gerçek P_{rad} ölçümü yapılmış ve P_{net} ile olan farkına bakılmıştır.

Ölçümlerimiz sırasında P_{fwd} ve P_{rvs} ölçümleri bir spektrum analizör kullanılarak yapıldığı için sonuçlar dBm biriminde elde edilmektedir. Bu iki değerden gerilim yansıma katsayısı (Γ) hesabı ise bilinen aşağıdaki (6.6) eşitlikleri ile yapılmaktadır.



Şekil 6.2: Anten girişindeki net gücün ve gerilim yansıma katsayısının ölçümü

50 Ω' luk bir ölçüm alıcısı için,

$$P_{fwd}(W) = \frac{10^{[P_{fwd}(dBm)/10]}}{10^3}, \qquad V_{fwd}(V) = \sqrt{50 P_{fwd}(W)}$$

$$P_{rvs}(W) = \frac{10^{[P_{rvs}(dBm)/10]}}{10^3}, \qquad V_{rvs}(V) = \sqrt{50 P_{rvs}(W)} \tag{6.6}$$

$$\Gamma = \frac{V_{rvs}(V)}{V_{fwd}(V)} \text{ (birimsiz)}$$

olmaktadır.

Ayrıca şunu belirtmek gerekir ki T_{desen}(dB) ölçümü için farklı bir yazılım tasarlanmayıp klasik anten desen ölçümünü yapan aynı yazılım kullanılacaktır. Sadece analiz sırasında, yazılım tarafından elde edilen elektrik alan değerlerine, alıcı antenin anten faktörü ve alıcı anten-spektrum analizörü arasındaki kablo yol kaybı (K) eklenecektir. Yani,

$$E(dB\mu V/m) = V(dB\mu V) + AF(dB/m) + K(dB) \tag{6.7}$$

olacaktır.

7. ANTEN ÖLÇÜM YAZILIMI

Tez kapsamımızda geliştirilen bu yazılım, uzak alan anten desen ölçümünü, ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 standartlarını tam olarak desteklemekte olup Microsoft Visual C# 2005 programlama diliyle geliştirilmiştir ve yaklaşık 10.000 satır C kodundan oluşmaktadır. Bu yazılım, Windows tabanlı 32 bitlik bir yazılım olup Microsoft Windows 95, 98, 2000, XP işletim sistemlerinde çalışabilmektedir.

Tez kapsamında geliştirilen bu yazılım Tablo 7.1' de detayları verilen laboratuar cihazları ile iletişim kurarak, uyumlu çalışabilmektedir. Tablo 7.1' de belirtilen cihazların dışında başka üretici veya model bir cihaz kullanılmak istenirse, ilgili laboratuar cihazı için gerekli sürücü (driver) yüklemesi sadece programcı tarafından yapılabilir.

Tablo 7.1: Yazılımın uyumlu çalışabileceği laboratuar cihazları

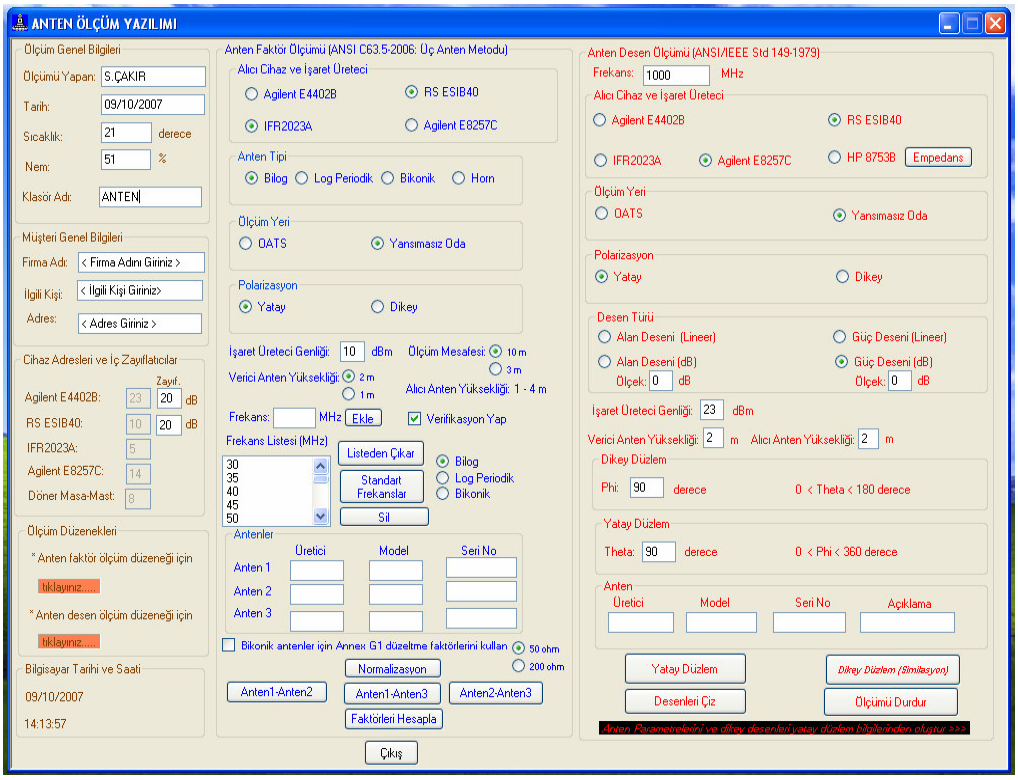
Cihaz Tanımı	**Üretici**	**Model**	**Frekans Aralığı**	**Haberleşme Portu**
İşaret Üreteci	IFR	2023A	9 kHz – 1.2 GHz	GBIP (IEEE 488)
İşaret Üreteci	Agilent	E8257C	250 kHz – 40 GHz	GBIP (IEEE 488)
Spektrum Analizörü	Agilent	E4402B	9 kHz – 3 GHz	GBIP (IEEE 488)
Spektrum Analizörü	Rohde-Schwarz	ESIB40	20 Hz – 40 GHz	GBIP (IEEE 488)
Network Analizörü	HP	8753B	300 kHz – 3 GHz	GBIP (IEEE 488)
Döner Masa	Siepel	-	-	GBIP (IEEE 488)
Hareketli Anten Ayağı	Siepel	-	-	GBIP (IEEE 488)

Programın çalıştırılması ile aşağıda Şekil 7.1' de görülen açılış ekranı sonrası Şekil 7.2' de verilen ana ölçüm ekranı görüntülenir.



Şekil 7.1: Yazılım açılış ekranı

Açılış ekranı sonrası gelen ana ölçüm ekranı Şekil 7.2' deki gibidir.



Şekil 7.2: Yazılım ana ekranı

Yazılım ana ekranı 3 alt sütundan oluşmaktadır. İlk sütun bilgi verici olup ölçümü yapan, cihaz GPIB adresleri, tarih, saat vb kısımlardan oluşmaktadır. İkinci sütun (mavi yazılı alan) ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 standartları için dizayn edilmiş olup, bu kısımdaki parametreler ve alanlar bu standartlar içindeki üç anten yöntemini eksiksiz desteklemektedir. Üçüncü sütun ise küresel koordinatlarda uzak alan anten desen ölçümünü tam olarak desteklemektedir. Bundan sonraki satırlarda adım adım yazılımın bölümleri tanıtılacaktır.

a) "Anten Faktör Ölçümü (ANSI C63.5:2006: Üç Anten Metodu)" Ana Ekranı :

Bu bölüm yazılım ana ekranının tam ortasında mavi bir tonla tasarlanmış olup, bu bölümde olan alt bölüm ve tuşlar aşağıda tanımlanmıştır.

- "Alıcı Cihaz ve İşaret Üreteci" : Bu kısımda bilgisayara bağlanılacak ve üç anten yönteminde kullanılması planlanan işaret üreteci seçilir.
- "Anten Tipi" : Kalibrasyonu yapılacak hedef antenlerin tipi bu kısımda seçilir.
- "Ölçüm Yeri": Yarı Yansımasız Oda veya Açık Alan Test Alanı (OATS) olarak seçilebilir.
- "Polarizasyon": Kalibrasyonu yapılacak antenin kalibrasyonunun hangi polarizasyonda yapılacağı burada belirtilir
- "İşaret Üreteci Genliği": Önemli bir parametredir. Ölçümler boyunca kullanılacak işaret üreteci genliğini belirler.
- "Ölçüm Mesafesi": Antenler arası ölçüm mesafesi burada belirtilir. Burada seçilen mesafe direkt olarak kalibrasyon sonuçlarını etkileyeceğinden doğru seçim çok önemlidir.
- "Verici Anten Yüksekliği": Verici antenin metal zeminden yüksekliği burada girilir. Burada seçilen yükseklik direkt olarak kalibrasyon sonuçlarını etkileyeceğinden doğru seçim çok önemlidir.
- "Alıcı Anten Yüksekliği": Bu alan bilgi amaçlı olup, yazılım tarafından alıcı antenin 1 m – 4 m arası taranacağı bilgisini verir.
- "Frekans": Kalibrasyonun hangi frekanslarda yapılması isteniyor ise o frekanslar MHz biriminde bu alana girilerek "Ekle" tuşuna basılır.
- "Ekle" ve "Listeden Çıkar" tuşları: Kalibrasyonu yapılacak frekans listesine yeni frekanslar eklemek veya var olanları çıkarmak için kullanılır.

- “Verifikasyonu Yap”: Bu küçük kutu işaretli ise, 1 m – 4 m arası tarama sonucu elde edilen maksimum seviyeyi bir kez de 4 m – 1 m arası geri dönüş yolunda denetler. Bu özellikle çevreden anlık gelebilecek istenmeyen gürültülere karşı iyi bir önlemdir. Eğer 1 m – 4 m tarama sırasında bulunan maksimum, 4 m – 1 m dönüş yolunda bulunan maksimumdan ± 1 dB farklı ise yazılım bir sorun olduğunu düşünür ve bir sonraki frekansa geçmeden ilgili frekansı bir kez daha tekrarlar. Bu işleme her iki tarama sonucu arasındaki fark ± 1 dB’ den küçük olana kadar devam eder. Bu küçük kutu işaretli değil ise, antenin geri dönüş yolunda herhangi bir doğrulama yapılmaz.
- “Standart Frekanslar” tuşu ve yanındaki üç adet anten tipi : 3 tip antene ait standart frekansları bir anda seçmek için kullanır.
- “Sil” tuşu: Frekansların tamamını bir anda silmek için kullanılır.
- “Antenler”: Bu kısım sadece bilgilendiricidir. Antenlerin üretici, model ve seri no bilgileri buraya yazılır.
- “Bikonik antenler için Annex G1 düzeltme faktörlerini kullan”: Bu kutucuk seçilirse ve kalibre edilen anten bikonik anten ise, ANSI C63.5-2006 standardında Annex G1’ de verilen bikonik anten düzeltme faktörleri aktif olur. Bu kutucuğun yanındaki “50 ohm” ve “200 ohm” seçim halkaları bikonik antenin balun empedansını göstermektedir. Anten üreticisinin açıkladığı değere göre uygun olan seçilir.
- “Normalizasyon” tuşu: Bu tuşlardan herhangi birine basıldığında Şekil 7.4’ de görülen “Anten Faktör Ölçüm” penceresi açılacak ve yazılım, kullanıcıdan kalibrasyonda kullanılan koaksiyel kabloların antenlerden çıkarılıp birbirlerine bağlanmasını isteyecektir. Kullanıcı bu isteği yerine getirip “Tamam” tuşuna bastığında ana ekranda seçilen tüm frekanslar için yol kaybı ölçülecek ve $V_{_yol}$ olarak ikili modda (binary mode) bilgisayarın sabit diskinde kullanıcının ana sayfada belirttiği klasöre kayıt edilecektir. Tüm veriler aynı zamanda anlık olarak yazılım penceresindeki tablolara da aktarılacaktır.
- “Anten1-Anten2” , “Anten1-Anten3” ve , “Anten2-Anten3” tuşları: Bu tuşlardan herhangi birine basıldığında yine Şekil 7.4’ te görülen “Anten Faktör Ölçüm” penceresi açılacak ve yazılım, kullanıcıdan tuşa ismini veren ilk anteni verici, ikinci anteni ise alıcı olarak ölçüm düzeneğine yerleştirmesini isteyecektir. Kullanıcı bu isteği yerine getirip “Tamam” tuşuna bastığında ilk etapta yazılım

antenin o anki konumunu tespit edip, eğer alıcı anten 1 m pozisyonunda değil ise 1 m' ye getirecektir. Bundan sonra, yazılım, ana ekranda seçilen her bir frekans için alıcı anteni saniyede 8 cm' yi aşmamak kaydı ile 4 m' ye çıkarmaya başlayacaktır. Antenin bu yükselişi sırasında, yaklaşık 100 ms' de bir veri spektrum analizörden okunarak "Elektrik Alan Seviyesi - Yükseklik" tabloları kullanıcını ana ekranda belirttiği klasör içinde kayıt altına alınacaktır ve aynı anda da anlık olarak yazılım ekranındaki tablolara aktarılıp anlık bilgilendirme yapılacaktır. Ölçüm süresince alıcı antenin hareketleri ve pozisyonu görsel olarak yazılım ekranında izlenebilmektedir. Anten 4 m' ye vardığında, eğer ana ekranda "Verifikasyon" kutucuğu seçilmiş ise yazılım, 4 m' den 1 m' ye inişte de aynı şeyleri yaparak elde ettiği sonuçları 1 m' den 4 m' ye çıkarken elde ettiği sonuçlarla karşılaştıracaktır. Her iki durumda da elde edilen maksimum seviye tespitleri arasındaki fark 1 dB' yi aşmıyorsa sonucu doğru kabul edip, tüm sonuçları kaydedip bir sonraki frekansa geçecek ve şu ana kadar olan adımları yine tekrarlayacaktır. Ana ekranda "Verifikasyon" kutucuğunun seçilmesi, özellikle çevreden anlık gelebilecek ve test sonuçlarını yanlışa sürükleyecek gürültülerden korunmak için oldukça faydalı olacaktır. Bu "Verifikasyon" kutucuğu ana ekranda işaretlenmez ise nispeten daha hızlı bir ölçüm olacak fakat sistemin dış anlık şiddetli gürültülere bağışıklığı azalacaktır. Yansımasız odalardaki ölçümlerde doğrulama yapılmaksızın ölçüm yapılabilir olmasına karşın, açık alan test sahasındaki ölçümlerde kesinlikle önerilmektedir. Nihai olarak, alıcı antenin yükseklik taraması sonrası elde edilen maksimum değer (V_{x_okunan}), işaret üreteci seviyesi ($V_{x_uygulanan}$) ve normalizyon işlemi sırasında ilgili frekans için elde edilen yol kaybı (V_{x_yol}), ($V_{x_uygulanan}$ - V_{x_okunan} - V_{x_yol}) formülüne konarak V_x elde edilir. x değeri,

Anten 1 – Anten 2 çifti için 1,

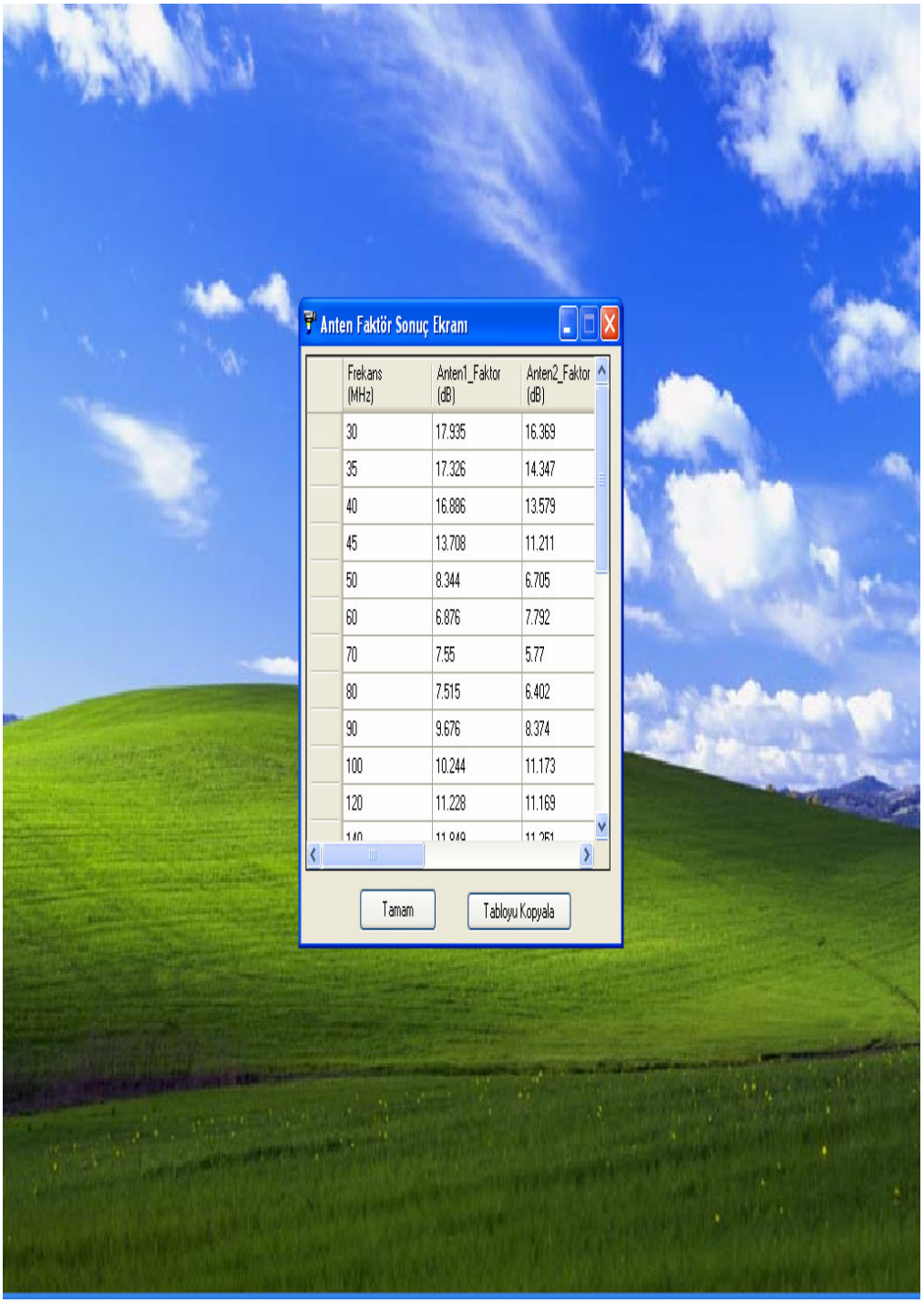
Anten 1 – Anten 3 çifti için 2,

Anten 2 – Anten 3 çifti için 3,

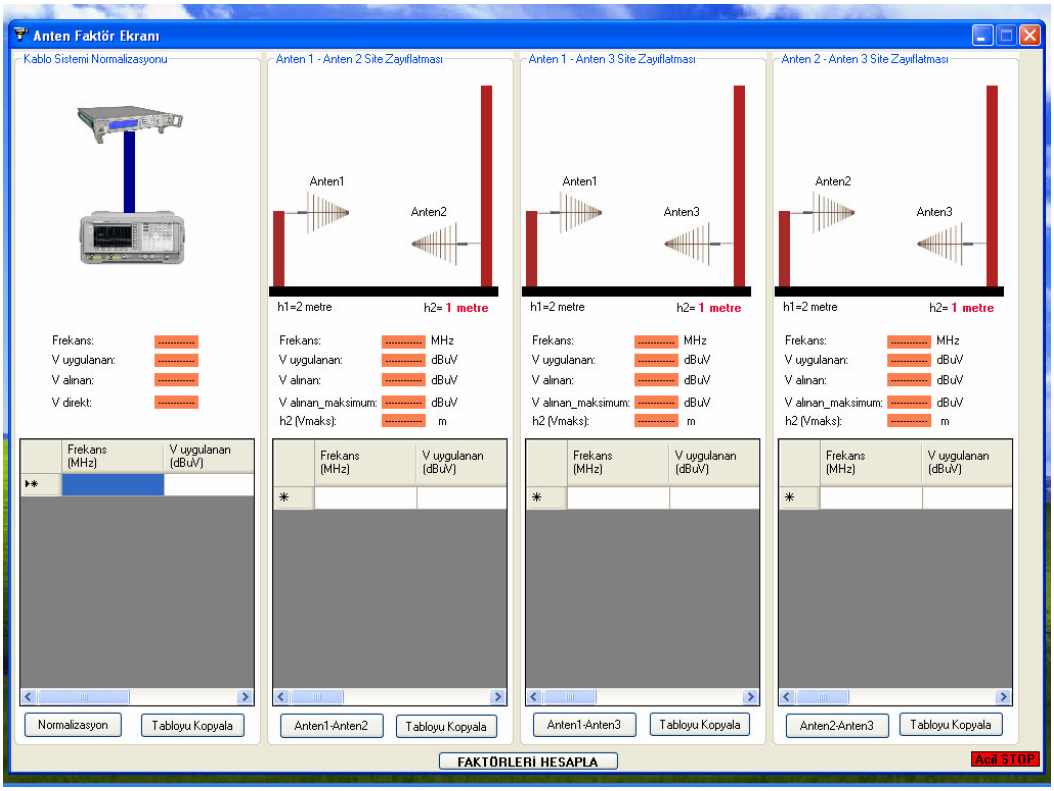
olacaktır.

- "Faktörleri Hesapla" tuşu: Normalizasyon işlemi dahil tüm anten çiftleri için ölçümler tamamlandığında artık bu tuşa basılarak ana ekrandaki tüm frekans değerleri için ölçülen 3 anteninde faktör ve kazanç parametreleri Şekil 7.3' de görüldüğü üzere "Anten Faktör Sonuç Ekranı" penceresinde bir tablo halinde

bilgisayar ekranına getirilecektir. Genellikle bu tabloda kullanıcıyı, sadece değerlerini istediği anten ile ilgili sütun ilgilendirip diğer yardımcı iki antene ait parametreler bilgi amaçlı kalacaktır.



Şekil 7.3: Anten faktörler sonuçlarının gösterildiği ekran



Şekil 7.4: ANSI IEEE C63.5 / ANSI IEEE 149 üç anten yöntemleri için yazılım penceresi

b) "Anten Desen Ölçümü" Ana Ekranı :

Bu bölüm, Şekil 7.2' da görülen yazılım ana ekranının en sağ tarafında kırmızı bir tonla dizayn edilmiş olup, bu bölümde olan alt bölüm ve tuşlar aşağıda tanımlanmıştır.

- "Frekans" : Desen ölçümünün hangi frekansta yapılacağı burada "MHz" birimi ile belirtilir.
- "Alıcı Cihaz ve İşaret Üreteci": Bu kısımda ölçümde kullanılacak işaret üreteci ve alıcı cihaz (spektrum analizörü) seçilir. Desen ölçümü analizi sırasında yada herhangi bir an mutlak kazanç değerine ulaşılmak istenirse bu noktada işaret üreteci olarak yazılımın tek tanıdığı network analizörü olan HP 8753B seçilerek yazılımın empedans ölçme yeteneği kazanması sağlanır. HP 8753B network analizör dışında seçilen bir işaret üreteciyle yine desen ölçümü yapmak ve yönlendiricilik değerine ulaşmak mümkün olacak fakat anten girişindeki yansıma katsayısını ölçmek mümkün olmayacaktır. Bu bölümde bulunan "Empedans" tuşu ölçüm düzeneğinden bağımsız istenildiği an empedans ölçümü yapmak için

kullanılır. Bu tuşun kullanılabilmesi için sadece network analizörünün açık ve bilgisayara bağlı olması yeterlidir. Bu tuşa basılması sonucu Şekil 7.5' de görülen küçük bir yazılım penceresi açılarak o an network analizörüne takılı olan antene ait ilgili frekanstaki empedans ve buna bağlı diğer bilgileri verecektir. Bu ekrandaki bilgiler sadece bilgi amaçlı olup ölçüm sonuçları üzerinde hiçbir etkisi yoktur.



Şekil 7.5: Anten empedans ve ilişkili parametreleri için yazılım ekranı

- "Ölçüm Yeri": Anten desen ölçümünün yapılacağı mekan burada bilgi amaçlı belirtilebilir.
- "Polarizasyon": Deseni ölçülen antenin polarizasyonu burada bilgi amaçlı belirtilebilir.
- "Desen Türü":

  - Alan Deseni (Lineer): Desenler, ölçülen elektrik alan baz alınarak "µV/m" biriminde çizilecektir.

  - Alan Deseni (dB): Desenler, ölçülen elektrik alan baz alınarak "dB" biriminde çizilecektir.

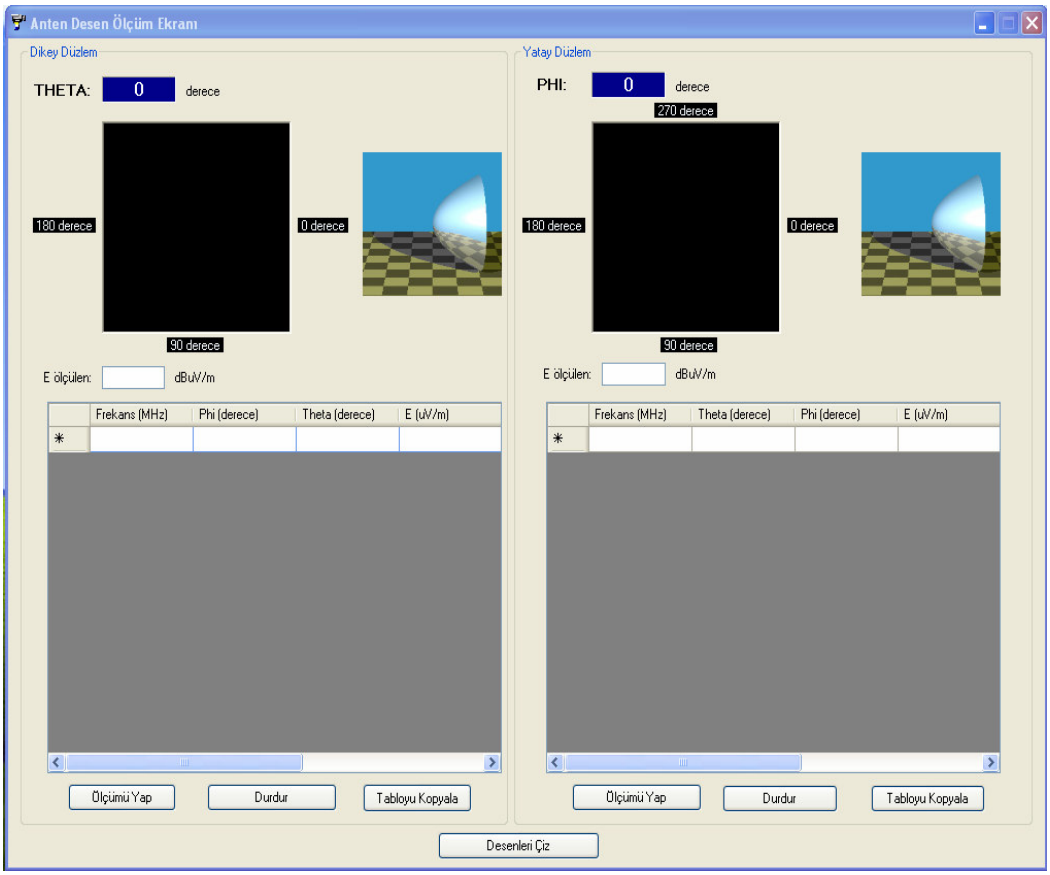
- Güç Deseni (Lineer): Desenler, ölçülen elektrik alanın karesi baz alınarak mW biriminde çizilecektir.

- Güç Deseni (dB): Desenler ölçülen elektrik alan gücü baz alınarak dBm biriminde çizilecektir. Bu aslında pratik ölçümlerde Alan Deseni (dB) ile aynı sonucu verecektir.

Bu bölüm içinde bulunan decibel desenlerine ait "Ölçeklendirme" alanı ölçüm sonuçlarını etkileyen bir değer olmayıp, desen grafiği üzerinde sadece ölçeklendirme yapmaktadır. Desen ölçümünde ölçülen en düşük değer ile polar grafiğin merkezi arasında, bu alana girilen değer kadar mesafe bırakılır. Bu ölçeklendirme, değeri sıfır ise desen ölçümünde okunan en düşük değer polar grafiğin merkezine yerleştirilecektir. Bu durum özellikle izotropik desenlerin net görünümü zorlaştıracaktır. Bu alana sıfırdan büyük bir ölçeklendirme değeri girilerek izotropinin çok net bir şekilde görülmesi sağlanabilir.

- "İşaret Üreteci Genliği" : Desen ölçümü sırasında, desen ölçümü yapılan antene uygulanan işaret seviyesi dBm biriminde bu alana girilir. Bu alana girilen değer, karşı alıcı antende yeterli seviyede işaret oluşturacak düzeyde olmalıdır.
- "Verici Antenin Yüksekliği" ve "Alıcı Antenin Yüksekliği": Bu kısımlar sadece bilgilendirici olup, bu alanlara girilen değerlerin ölçüm sonuçlarına etkisi yoktur. Fakat desen ölçümlerinde metal zeminin etkisinin minimum olması için yerden en az 2 m mesafe tavsiye edilir.
- "Dikey Düzlem": Bu kısımda ölçüm için gerekli ϕ açısı girilir.
- "Yatay Düzlem": Bu kısımda ölçüm için gerekli θ açısı girilir. Bu kısımda doğru değerin girilmesi hem ölçüm sonuçlarının doğru kayıt edilmesi hem de 3-D desenin doğru çizimi için çok önemlidir. Ölçüm sırasındaki gerçek θ açısı ile bu alanda belirtilen θ açısı tamamen uyuşmalıdır.
- "Anten" : Bu kısım sadece bilgilendirici olup deseni ölçülen anten hakkında üretici, model ve seri no bilgileri bu alana girilir.
- "Yatay Düzlem" tuşu: Bu tuş ile Şekil 7.6' da görülen "Anten Desen Ölçüm Ekranı" açılarak yatay düzlemde ana sayfada belirtilen θ açısı için desen ölçümü başlayacaktır. Yazılım, döner masa ile iletişim kurarak saniyede ortalama 1^o hızla masayı döndürürken, aynı anda spektrum analizörden okuma yapacaktır. Bu döndürme işlemi kürese koordinatlarda $\phi = 0^o$' dan başlayıp $\phi = 360^o$' de son

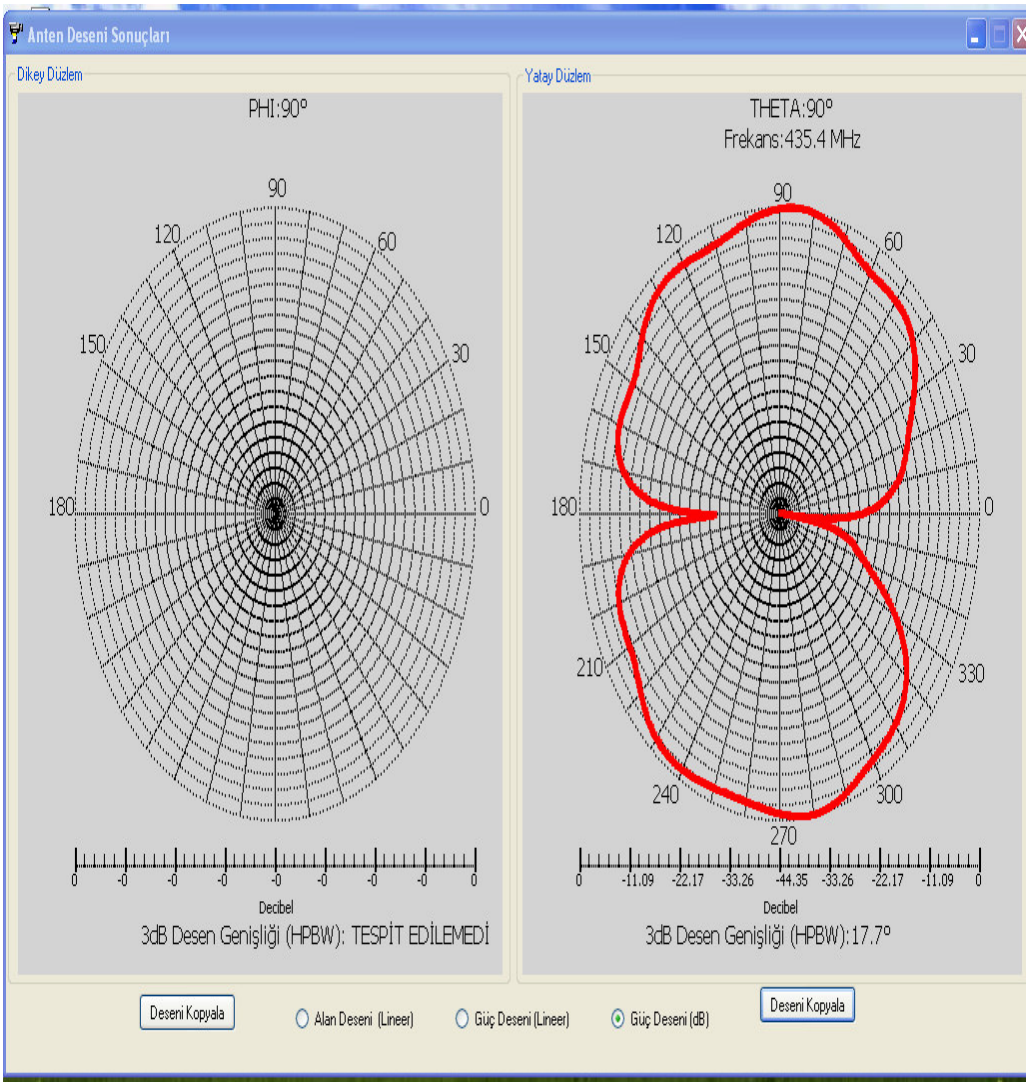
bulacak ve yazılım tarafından "ϕ açısı – Elektrik Alan (dBµV)" tablosu oluşturulacaktır. Bu tablolar bir sonraki adımlarda desenin çizimi için kullanılacaktır. "Anten Desen Ölçüm Ekranı" yazılım penceresi ileri konularda daha detaylı incelenecektir.



Şekil 7.6: Anten desen ölçümünün yapıldığı yazılım ekranı

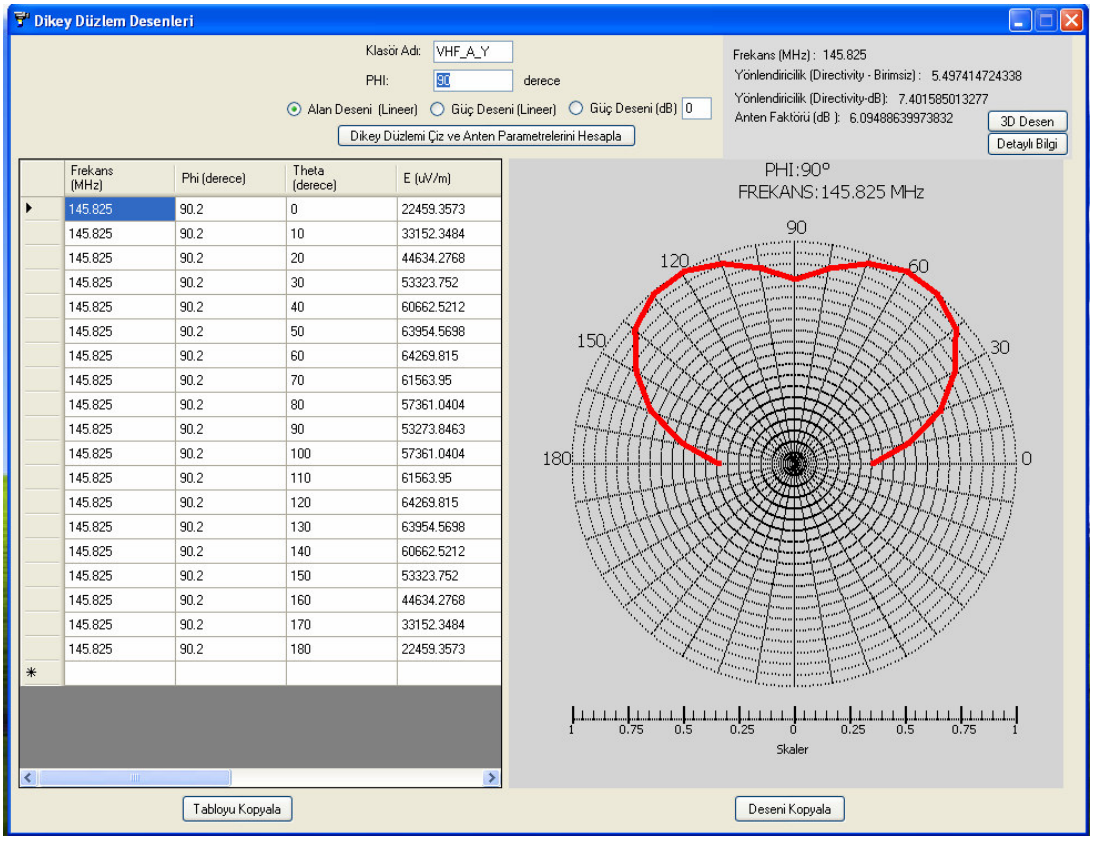
- "Dikey Düzlem" tuşu: Bu tuş sadece similasyon amaçlı dikey desen ölçümü için kullanılır. Ölçüm sisteminde dikey düzlem desenini ölçmek için anteni dikey düzlemde hareket ettirecek bir düzenek olmadığından, antenin polarizasyonu değiştirilerek yatay düzlemde 0^o-180^o açıları arası taranır. Bu ölçüm θ açısının 0^o-180^o açıları arası tarandığı gerçek dikey desen ölçümünü simüle edecektir. Bu tuşa basılmadan önce deseni ölçülen antenin var olan polarizasyonu değiştirilmelidir. Bu similasyonun kullanımı tavsiye edilmemektedir. Bunun yerine tüm yatay düzlem desenlerinin çizilmesi sonrası oluşturulacak 3 boyutlu ışıma deseninden dikey düzlem desenlerinin çıkarılması en iyi sonucu verecektir.

- “Desenleri Çiz” tuşu: “Yatay Düzlem” veya “Dikey Düzlem” tuşları ile verileri toplanmış desen bilgilerini derleyip, analiz ederek ilgili desen grafiklerini polar formatta oluşturarak Şekil 7.7’ de görülen “Anten Deseni Sonuçları” ekranında gösterir. Bu tuş ile oluşturulacak desen grafikleri için ana ekrandaki “Desen Türü” bölümünde belirtilen bilgiler baz alınacaktır.



Şekil 7.7: Polar formatta iki boyutlu anten desen çizimlerinin yapıldığı ekran

- “Anten Parametrelerini ve Dikey Düzlem Desenlerini Yatay Düzlemlerinden Oluştur” etiketi: Bu etiket, dikey düzlem desenlerinin, yatay düzlem desenlerinden oluşturulan 3 boyutlu ışıma deseninden üretilmesini sağlar. Bu tuşa basılması sonrası, Şekil 7.8’ de görülen yazılım penceresi ekrana gelecektir.



Şekil 7.8: Yatay düzlem desen sonuçlarından dikey düzlem desenlerinin çizildiği ve yönlendiricilik değerinin hesaplandığı yazılım ekranı

- "Ölçümü Durdur" tuşu: Acil durumda veya istenildiği anda ölçümü durdurur.

c) "Anten Desen Ölçüm Ekranı" Penceresi:

Bu pencere ana yazılım ekranında bulunan "Yatay Düzlem" veya "Dikey Düzlem" tuşlarına basılması ile ekrana gelen desen ölçümünün yapıldığı ve desen ölçüm detaylarının izlendiği penceredir. Şekil 7.6' da gösterilmiştir. Bu pencere ilgili şekilde görüldüğü üzere "Yatay Düzlem" ve "Dikey Düzlem" bölümlerinden oluşmaktadır. Bu pencere ile ilgili kısım ve tuşlar aşağıda sunulmuştur.

- "Dikey Düzlem" bölümü: Bu bölüm dikey düzlem deseni ölçümü sırasında temel ve görsel öğeleri içerip aynı zamanda ölçümü durdurmak ve tekrar başlatmak için temel tuşlara sahiptir. Ölçüm sırasında spektrum analizörden okunan elektrik alan değerini "dBμV/m" birimde anlık olarak gösterilir. Bu bölümde bulunan ölçümler sırasında elde edilen θ açısı (derece), Elektrik Alan (dBμV/m), ϕ açısı

(derece), Güç (dBm) değeri anlık olarak işlenir. Bu değerler bir sonraki adımda dikey düzlem desenini çizmek için kullanılacaktır. Ayrıca döner masanın o anki pozisyonu ekranda görsel olarak kullanıcıya aktarılır. Görsel gösterim θ açısı (derece) için olup 0^o – 180^o aralığında sınırlandırılmıştır. Bu bölümde bulunan "E ölçülen" bölümü dikey düzlem desen ölçümü sırasındaki spektrum analizörden okunan anlık değerleri "dBμV/m" biriminde gösterir.

- "Yatay Düzlem" bölümü: Bu bölüm yatay düzlem deseni ölçümü sırasında temel ve görsel öğeleri içerip aynı zamanda ölçümü durdurmak ve tekrar başlatmak için temel tuşlara sahiptir. Ölçüm sırasında spektrum analizörden okunan elektrik alan değerini "dBμV/m" birimde anlık olarak gösterilir. Bu bölümde bulunan ölçümler sırasında elde edilen ϕ açısı (derece), Elektrik Alan (dBμV/m), θ açısı (derece), Güç (dBm) değeri anlık olarak işlenir. Bu değerler bir sonraki adımda yatay düzlem desenini çizmek için kullanılacaktır. Ayrıca döner masanın o anki pozisyonu ekranda görsel olarak kullanıcıya aktarılır. Görsel gösterim ϕ açısının (derece) için olup 0^o – 360^o aralığında taramasını kapsamaktadır. Bu bölümde bulunan "E ölçülen" bölümü yatay düzlem desen ölçümü sırasındaki spektrum analizörden okunan anlık değerleri "dBμV/m" biriminde gösterir.
- "Ölçümü Yap" tuşu: Bu tuştan ekranda 2 adet bulunmaktadır. Bunlardan biri dikey düzlem deseni, diğeri yatay düzlem desen ölçüm işlemini başlatmaktadır ve bu tuşlar, ana ekranda bulunan "Yatay Düzlem" ve "Dikey Düzlem" tuşlarına direkt olarak bağlıdır ve onlarla aynı işlevlere sahiptir.
- "Durdur" tuşu: Bu tuş ana ekrandaki "Ölçümü Durdur" tuşu ile aynı işleve sahip olup desen ölçümünü istenildiği an durdurur. Bu pencerede 2 adet bulunmaktadır.
- "Tabloyu Kopyala" tuşu: Ölçümler sonrasında deseni oluşturacak bilgilerin yer aldığı tablonun Word, Excel v.b dış programlarda kullanılabilmesi için bu tabloyu bilgisayarın hafızasına yükler. Bu tuş 2 adet olup, hangisine basılırsa onunla ilgili tablodaki bilgiler kopyalanır.

d) "Anten Deseni Sonuçları" Penceresi:

Ana ekrandan "Desenleri Çiz" tuşuna basılması açılan ve desen grafiklerinin polar formatta çizildiği ekrandır. Şekil 7.7' de gösterilmiştir. Dikey düzlem desenleri

pencerenin sol tarafında, yatay düzlem desenleri ise sağ tarafta çizilir. Bu pencerenin en alt tarafında, çizilmiş olan desen türünü değiştirmeye yarayan 3 adet seçim halkası bulunmaktadır. Bunlar 3 adet ve daha önce açıklanan desen türleridir. Bu 3 tip desen türleri arasında geçişler bu küçük halkalardan istenildiğine tıklanarak yapılabilir.

e) "Dikey Düzlem Desenleri" Penceresi:

Bu pencere ana ekranda "Anten Parametrelerini ve Dikey Düzlem Desenleri Yatay Düzlemlerinden Oluştur" tuşuna basılması ile açılır ve Şekil 7.8' de gösterilmiştir. Dikey düzlem desenlerinin pratik olarak çizimi çok güçtür çünkü bilgisayar kontrollü bir step motorun deseni ölçülecek anteni belli bir ϕ açısında, $\theta = 0^o$-180^o olacak şekilde dikey olarak hareket ettirmesi gerekmektedir. İstenilen ϕ açısında dikey düzlem ölçümünün pratik zorluklarından kaçarken minimum veri kaybı ile dikey düzlem desenlerine ulaşmak için, bu yazılımda 3 boyutlu desen sonuçlarından istenilen ϕ açısı için dikey düzlem desenlerinin çıkarılması tasarlanmştır. Dikey düzlem desenlerinin çıkarılabilmesi için 3 boyutlu anten ışıma deseninin, belirli adımlardaki θ açılarında yatay düzlem desenlerinin oluşturulmasını gerektirmektedir. θ açılarının sıklığı dikey düzlem desenlerinin görünüş kalitesini arttıracaktır. Bu pencerede verilen tabloda çizilen polar dikey düzlem desenine ait sayısal bilgiler bulunmaktadır. Bunlar,

- Frekans (MHz)
- Phi (derece) açısı : Dikey düzlem deseninin hangi ϕ açısı için çizildiği bilgisi. Tüm tablo satırlarında bu değer sabittir.
- Theta (derece): O anki θ açısının değeri
- E (dBμV/m) : İlgili θ (Theta) açısındaki elektrik alan bileşeninin dBμV/m birimindeki değeri
- P(mW): İlgili θ (Theta) açısındaki elektrik alan bileşeninin mW birimindeki değeri
- P(dBm): İlgili θ (Theta) açısındaki elektrik alan bileşeninin dBm birimindeki değeri

Tablonun son iki sütunun da ise üç boyutlu desenden dikey düzlem desenleri çıkarılırken yapılan açı hatası belirtilmektedir.

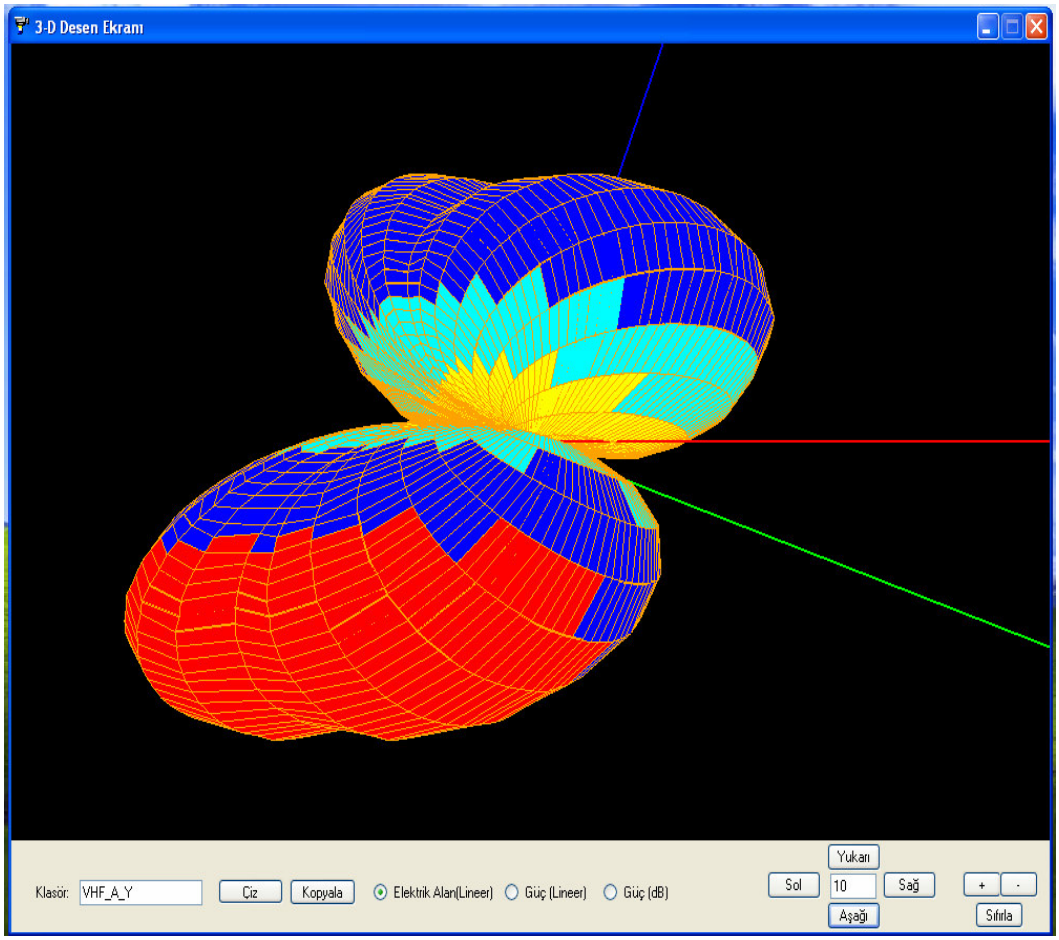
"Dikey Düzlem Desenleri" penceresinin detayları:

- "Klasör Adı" : Daha önce yatay düzlem desenlerinin kayıt edildiği ve dikey düzlem desenlerinin çizilmesi istendiği klasör
- "PHI": Dikey düzlem desenlerinin çizileceği ϕ açısı burada belirtilir.
- "Alan Deseni (Lineer), Güç Desenei (Lineer), Güç Deseni (dB)" küçük seçim halkaları: Dikey düzlem desenlerinin hangi polar formatta çizileceği burada belirtilir.
- "Dikey Düzlemi Çiz ve Anten Parametrelerini Hesapla" tuşu: Verilen "Klasör Adı" ve ϕ açısı için $\theta = 0^o$-180^o için polar formatta dikey düzlem deseni ve ilgili bilgilendirici tablo ekrana aktarılır. Ekrana verilen polar grafikte dikey düzlem desenin çizildiği ϕ açısı ve frekans polar grafiğin üzerine, eğer hesaplanabiliyorsa HPBW (Half Power Beam Width – Yarı Güç Demet Genişliği) değeri de grafiğin altına işlenir. Bu tuş ayrıca arka planda oluşturulup, ekrana henüz aktarılmayan üç boyutlu desen grafiğini kullanarak deseni ölçülen antene ait "Yönlendiricilik (Birimsiz)", "Yönlendiricilik (dB)" ve "Anten Faktörü (dB)" değerlerini pencerenin solunda ekrana yansıtacaktır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta burada belirtilen "Anten Faktörü (dB)" değerleri antenin yönlendiricilik değerinden çıkartılmış olup, antenin kayıpsız olduğu düşünülerek EK-A' da verilen (A91) eşitliği ile hesaplanmaktadır. Fakat gerçekte antenler kayıpsız olmadığı için bu ekranda verilen anten faktörü belli bir hata ile gösterilmiş olup sadece bilgi amaçlıdır. Tezin ilerleyen kısımlarında, anten üzerinde harcanan ısıl kayıplarda tespit edilerek gerçek anten faktörüne ve mutlak kazanca ulaşılacaktır.
- "Detaylı Bilgi" Tuşu: Bu tuşa basılması ile birlikte sistemde bulunan network analizörüde devreye sokularak ve üç boyutlu desen üzerinde çok daha detaylı analiz yapılarak Şekil 7.9' da verilen pencere ekrana getirilir. Bu "Detaylar " penceresi antene ait tüm empedans, yansıma katsayısı, iletim katsayısı v.b bilgilerini de içermektedir. Bu tuşa basabilmek için ana yazılım ekranında işaret üreteci olarak network analizörünün seçilmiş olması gerekmektedir. Aksi halde bu tuşa basılması sonrası yazılım network analizörü ile iletişim kuramadığından hata mesajları ile dönecektir. Bu nedenle bu tuşa basılmadan önce network analizörünün bilgisayar ile bağlantısı kontrol edilmelidir.



Şekil 7.9: Anten hakkında detaylı sonuçların gösterildiği yazılım ekranı

- "3D Desen" Tuşu: Bu tuşa basılması sonrası Şekil 7.10' de görülen "3D Desen Ekranı" isimli pencere ekrana gelecek ve belirtilen klasörde yatay düzlem desen bilgileri bulunan antenin 3 boyutlu görüntüsü OPENGL teknolojisi kullanılarak ekrana aktarılacaktır. Bu ekranda verilen desen sadece görsel amaçlı olup sayısal anlamda pek fazla bilgi içermemektedir. Desen üzerindeki kırmızı bölgeler ölçülen yüksek elektrik alan seviyelerini, mavi bölgeler orta şiddetteki seviyeleri, açık mavi bölgeler zayıf şiddetteki seviyeleri ve sarı bölgeler minimum şiddetteki seviyeleri göstermektedir. Bu "3D Desen Ekranı" penceresi ile ilgili çok daha detaylı bilgiler ileride verilmiştir.



Şekil 7.10: Üç boyutlu anten desen ölçümünün çizdirildiği yazılım ekranı

- "Tabloyu Kopyala" ve "Deseni Kopyala" tuşları: Grafiğin çizilmesi sonrası tablonun veya grafiğin başka dış programlara (Word, Excel...v.b) yapıştırılabilmesi için, grafik ve tabloyu hafızaya alır.

f) "3D Desen" Penceresi:

Şekil 7.10' da görülen pencere olup, "Dikey Düzlem Desenleri" penceresinden "3D Desen" tuşuna basılması ile ekrana gelir. Çizilen ışıma deseninin formatı bu pencerenin en altında bulunan üç adet seçim halkası kullanılarak değiştirilebilir. İlgili desen formatları:

- Elektrik Alan (Lineer)
- Güç (Lineer)
- Güç (dB)

Bu pencerenin detayları aşağıdadır.

- "Klasör" bölümü: Bu bölüme üç boyutlu deseni çizilecek antenin yatay düzlem bilgilerinin bulunduğu klasör adı girilir.
- "Çiz" tuşu: İlgili klasörde bulunan yatay düzlem desen bilgilerini kullanarak üç boyutlu desen grafiğini OPENGL teknolojisini kullanarak çizer.
- "Kopyala" tuşu: Ekrandaki desenin, dış programlara (Word, Excel...v.b) aktarılabilmesi için hafızaya alır.
- "+" ve "-" tuşları: Desen grafiğini ekrana yakınlaştırmak için "+", uzaklaştırmak için "-" tuşuna basılır. Desen aşırı şekilde yakınlaştırılırsa 3 boyutlu desenin içine girilir ve desenin içine bir göz atılabilir, desen aşırı uzaklaştırılırsa ekrandan kaybolacaktır.
- "Sağ", "Sol", "Yukarı" ve "Aşağı" tuşları: 3 boyutlu deseni, bu dört tuşun ortasında belirtilen açı adımlarında sağ, sol, yukarı ve aşağı yönlerde hareket ettirir.
- "Sıfırla" tuşu: Desen üzerindeki konumla ilgili değişiklikleri geri alarak, deseni ilk konumuna getirir.

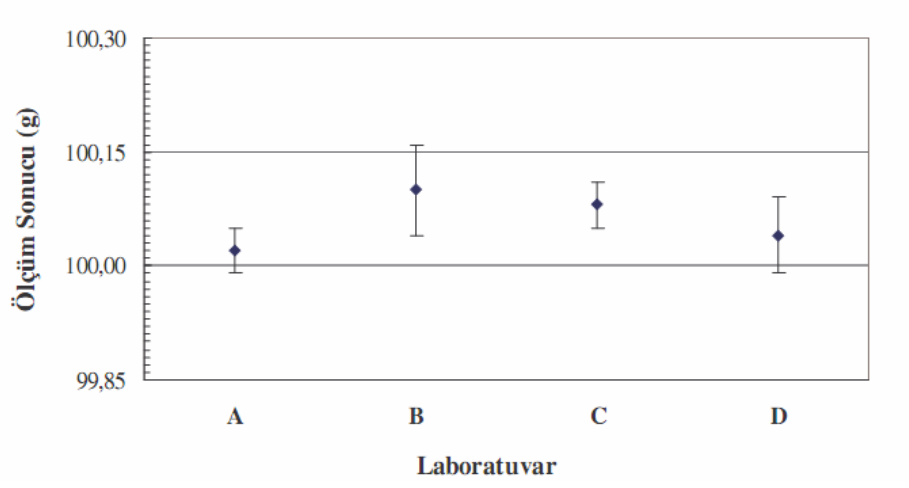
8. ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ

8.1. Ölçüm Belirsizliği

Bu bölümde detaylı olarak ölçüm belirsizliği ve ölçüm belirsizliği hesabı anlatılacaktır [7].

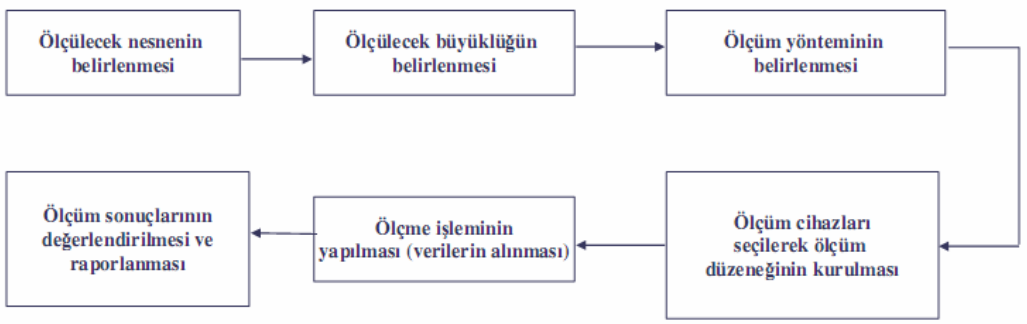
8.1.1. Ölçüm belirsizliğine giriş

Bir ölçümün sonucu raporlandığında, sonucun kalitesini ve güvenilirliğini belirten sayısal göstergeye belirsizlik değeri denilmektedir. Belirsizlik, ölçülen büyüklüğün gerçek değer etrafında bulunabileceği aralığı tanımlayan tahmini bir değerdir. Şekil 8.1' de örnek ölçüm belirsizliği değerleri gösterilmiştir. Belirtilen şekilde ölçüm sonucu "g" birimi ile gösterilmiş ve sınır değerlerin 100.00 ve 100.15 olduğu bir durum için sırasıyla A, B, C ve D laboratuarları için ölçüm sonucu nokta ile ve belirsizlik aralığı ise dikey çizgilerle gösterilmiştir. Ölçüm belirsizliği konusunda yayınlanan en ciddi doküman ISO tarafından yayınlanmış olup "Guide to the Expression Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" dokümanıdır ve hala bu konuda kullanılan en yaygın dökümandır.



Şekil 8.1: Örnek ölçüm ve belirsizlik değerleri gösterimi

Belirsizlik değeri her zaman bir ölçüm sonucu ile birlikte anlamlıdır. Ölçüm, bir büyüklüğün değerinin bulunmasına yönelik işlemler dizisidir. Şekil 8.2' de bir ölçüm işleminin aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 8.2: Bir ölçümün aşamaları

Ölçüm sonucundan, ölçülen büyüklüğün gerçek değerinin çıkarılmasıyla elde edilen sonuca hata denilmektedir ve ikiye ayrılmaktadır.

- Sistematik Hata: Aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri boyunca sabit kalan veya önceden tahmin edilebilen değişimler gösteren ölçüm hatası bileşenidir. Bu tür hatalar için düzeltme işlemi yapmak mümkündür.
- Rastgele Hata: Aynı büyüklüğün bir dizi ölçümleri esnasında, önceden tahmin edilemeyecek şekilde değişen ölçüm hatası bileşenidir. Rastgele hata için düzeltme yapmak mümkün değildir.

Belirsizlik hesabı ile ilgili diğer önemli tanım deneysel standart sapmadır. Aynı ölçülen büyüklüğe ait n adet ölçüden oluşan bir seri için, aşağıdaki eşitlik (8.1) ile hesaplanan parametre deneysel standart sapmadır ve sonuçların dağılımını karakterize eder ve,

$$s_{x_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\bar{x} - x_i)^2} \tag{8.1}$$

olarak ifade edilir. Burada,

x_i : i. ölçüm sonucu

$\bar{x}$: değerlendirilen n adet ölçüm sonucunun ortalamas.

olmaktadır.

Bir örnek vermek gerekir ise,

Veriler: {8.5, 9.0, 9.3, 9.5, 8.6, 9.9}

olsun. Verilerin aritmetik ortalaması 9.13 olacaktır. Deneysel standart sapma ise,

$$S_A = \sqrt{\frac{1}{5}\{(9.13-8.5)^2 + (9.13-9.0)^2 + ... + (9.13-8.6)^2 + (9.13-9.9)^2} \tag{8.2}$$

$$S_A = 0.54$$

olarak bulunur.

Ölçüm belirsizliği, genel olarak bir çok bileşeni içerir. Bu bileşenlerin bir kısmı, ölçüm sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel dağılımı incelenerek deneysel standart sapma yardımıyla karakterize edilebilirler. Diğer bileşenlerin tahmini ise sadece tecrübeye veya eldeki diğer bilgilere dayandırılabilir. Bir sonraki 8.1.2 bölümünde bu konuya detaylı değinilecektir.

8.1.2. Belirsizlik hesaplama yöntemleri

A tipi belirsizlik yöntemi: Gözlem serilerine dayanan, istatistiksel analiz yöntemidir.
A tipi belirsizlik hesaplamalarında kullanılan dağılımlar,

- Normal dağılım
- Student dağılımı

dır. Sadece bir ölçüm yapılmış ise A-tipi değerlendirme uygulanamaz.

B tipi belirsizlik hesaplama yöntemi: Bunlar A tipi dışında istatistiksel olmayan yöntemlerdir. B tipi belirsizlik hesaplama yönteminde kullanılan dağılımlar,

- Dikdörtgen
- Üçgen
- U-tipi
- Trapezoidal

dir.

B tipi belirsizlik hesaplama yönteminde kullanılan bilgiler,

- Daha önce ölçümlerde elde edilen veriler

- İlgili malzemeler ve kullanılan cihazlar konusundaki deneyim ve daha önce edinilmiş bilgiler
- Üretici firmaların belirttiği özellikler
- Kalibrasyon ve diğer sertifikalarda bulunan veriler
- El kitaplarından alınan referans verilere ilişkin belirsizlikler

olmaktadır.

Bu noktada, belirsizlik hesapları için bileşik standart belirsizlik tanımını yapalım. Bir ölçümün pek çok sayıda başka değerlerden elde edilmiş sonucunun standart belirsizliği, bu değerlerdeki değişimlerin ölçüm sonucunun nasıl etkilendiği göz önüne alınarak hesaplanan varyans veya kovaryans ifadeleri toplamının pozitif kare köküne eşittir. Genişletilmiş belirsizlik ise ölçülen bir niceliğin beklentilere göre ölçüm sonucu değerlerinin büyük bir kısmını içeren aralık olarak tanımlanır.

Ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasındaki aşamalar,

- Ölçümün matematiksel modelinin belirlenmesi, yani model fonksiyonun oluşturulması
- Belirsizlik bileşenlerinin belirlenmesi
- Belirsizlik bileşen değerlerinin hesaplanması
- Bileşik belirsizliğin hesaplanması
- Genişletilmiş belirsizliğin hesaplanması
- Ölçüm sonuçlarının raporlanması

olarak sayılabilir.

Model fonksiyon, ölçümlerdeki girdi büyüklükleri ile çıktı büyüklüğü (sonuç) arasındaki ilişkiyi gösteren matematiksel bir ifadedir ve

$$y = F(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) \tag{8.3}$$

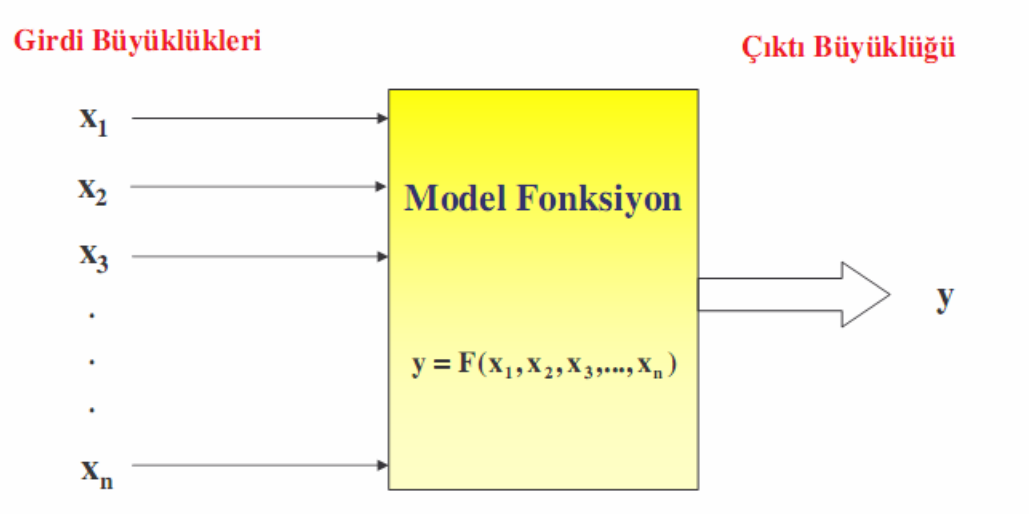
olarak gösterilir. Burada,

$x_1, x_2, x_3, ..., x_n$: Girdi büyüklükleri

y : Çıktı büyüklüğü (sonuç)

olmaktadır.

Model fonksiyon için şematik gösterim Şekil 8.3' de gösterilmiştir.



Şekil 8.3: Model fonksiyon için şekilsel gösterim

Elektromanyetik, anten ve EMC ölçümlerinin belirsizlik hesaplarında sıkça kullanılan istatistiksel dağılımlar,

- Normal
- Dikdörtgen
- Üçgen
- U tipi

dir.

Normal dağılım, gauss dağılımı olarak ta bilinmektedir. Eşitlik (8.4) ile tanımlanır.

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{z^2}{2}) \tag{8.4}$$

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{8.5}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}(x-\mu)^2} \tag{8.6}$$

Burada,

x : Ölçüm sonucu

μ :Ölçülen büyüklüğün gerçek değeri

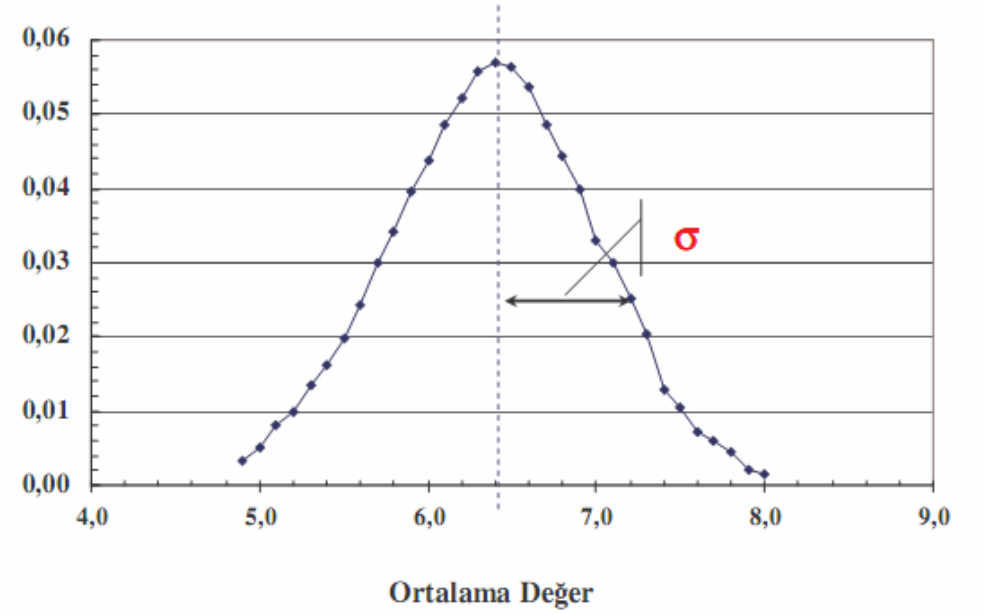
σ : Standart sapma

olmaktadır.

Normal dağılım için bir örnek Şekil 8.4' de verilmiş, Şekil 8.5' de ise normal dağılım için grafiksel gösterim sunulmuştur. Normal dağılım ile ilgili çok önemli tanımlar ve eşitlikler Tablo 8.1' de bulunabilir. Normal dağılım genelde elektromanyetik, anten ve EMC ölçümlerinde kalibrasyon sertifikalarından alınan değerlere, ölçüm sistemi ve ölçülen cihazın tekrar üretilebilirliği belirsizlik bileşenlerine uygulanır.

Ölçüm Sonucu	Sayı (n)	p=n/N N=6000	Ölçüm Sonucu	Sayı (n)	p=n/N N=6000	Ölçüm Sonucu	Sayı (n)	p=n/N N=6000
4,9	22	0,003	6,0	306	0,044	7,1	210	0,030
5,0	36	0,005	6,1	340	0,049	7,2	176	0,025
5,1	56	0,008	6,2	365	0,052	7,3	143	0,020
5,2	69	0,010	6,3	390	0,056	7,4	91	0,013
5,3	94	0,013	6,4	399	0,057	7,5	74	0,011
5,4	114	0,016	6,5	395	0,056	7,6	51	0,007
5,5	138	0,020	6,6	376	0,054	7,7	42	0,006
5,6	170	0,024	6,7	340	0,049	7,8	31	0,004
5,7	210	0,030	6,8	311	0,044	7,9	14	0,002
5,8	240	0,034	6,9	278	0,040	8,0	11	0,002
5,9	277	0,040	7,0	230	0,033	ORTALAMA		6,45

Şekil 8.4: Normal dağılım için bir örnek

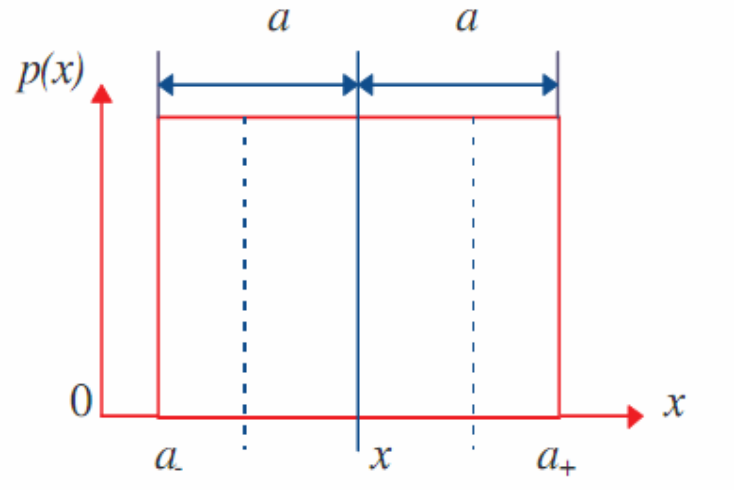


Şekil 8.5: Normal dağılım için grafiksel gösterim

Tablo 8.1: Normal dağılım için önemli eşitlikler ve tanımlar

n ölçüm sonucu	$x_1, x_{2,} x_3, ..., x_n$
Ölçüm sonuçlarının ortalaması	$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$
Deneysel varyans	$V(x) = s^2(x) = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$
Deneysel standart sapma	$s(x) = \sqrt{V(x)}$
Ortalamanın standart sapması = Standart belirsizlik	$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}}$
Serbestlik derecesi	$v = n - 1$

Dikdörtgen dağılım, bir büyüklüğün sadece değişim gösterebileceği aralık bilindiği taktirde kullanılır. Bu dağılımın grafiksel gösterimi Şekil 8.6' da verilmiştir. Elektromanyetik, anten ve EMC ölçümlerinde bu dağılım genelde diğer hiç bir dağılıma uymayan yada dağılımı tahmin edilemeyen belirsizlik bileşenleri için uygulanır ve en kötü durumu ifade etmektedir. Genelde kullanım kitapçıklarından, cihaz tanıtım kataloklarından temin edilen veya tecrübeye dayandırılarak belirlenen belirsizlik bileşenleri için bu dağılım kullanılır.



Şekil 8.6: Dikdörtgen dağılım için grafiksel gösterim

Belirsizlik bileşeni,

$$u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{3}} \tag{8.7}$$

veya sıfırın civarında simetrik olma durumu için,

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{8.8}$$

olarak ifade edilir.

Bölüm işleminin neden $\sqrt{3}$ olduğunu hemen gösterelim. Olasılık dağılım fonksiyonu,

$$f(x) = \frac{1}{2a} \qquad -a < x < a \tag{8.9}$$

dır. Buradan deneysel varyans,

$$V(x) = \int x^2 f(x) dx \tag{8.10}$$

$$V(x) = \int_{-a}^{a} \frac{x^2}{2a} dx = \frac{1}{2a}\left(\frac{x^3}{3}\right)_{-a}^{+a} = \frac{a^2}{3} \tag{8.11}$$

ve belirsizlik bileşeni,

$$u(x) = \sqrt{V(x)} = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{8.12}$$

olacaktır.

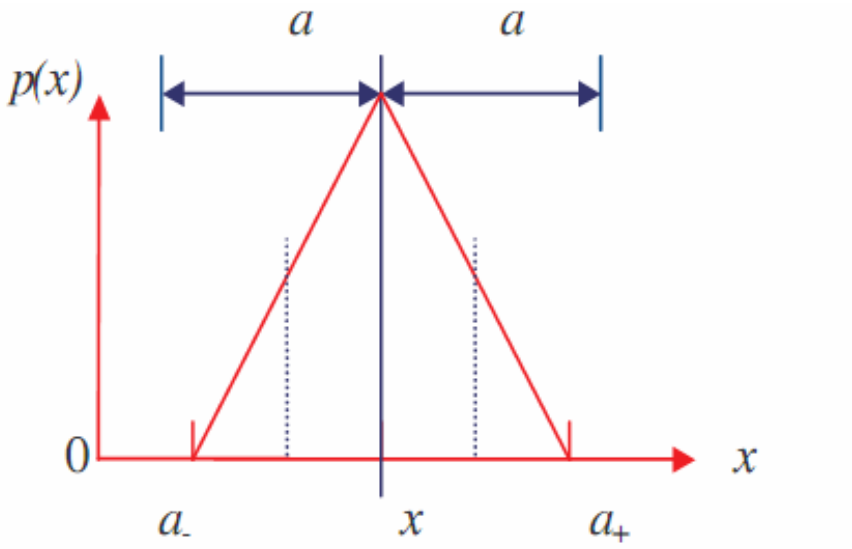
Üçgen dağılım, bir büyüklüğün değişim gösterebilecek aralık ve değerlerin merkezde bulunma olasılığının daha yüksek olduğu bilindiği taktirde kullanılır. Grafiksel gösterimi Şekil 8.7' de verilmiştir. Belirsizlik bileşeni,

$$u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{6}} \tag{8.13}$$

veya sıfırın çevresinde simetrik bir durum için,

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \tag{8.14}$$

olacaktır.



Şekil 8.7: Üçgen dağılım için grafiksel gösterim

U tipi dağılım, bir büyüklüğün değişim gösterebilecek aralık ve değerlerin sınırlara yakın bulunma olasılığının daha yüksek olduğu bilindiği taktirde kullanılır. Gösterimi Şekil 8.8' de verilmiştir. Elektromanyetik, anten ve EMC ölçümlerinde

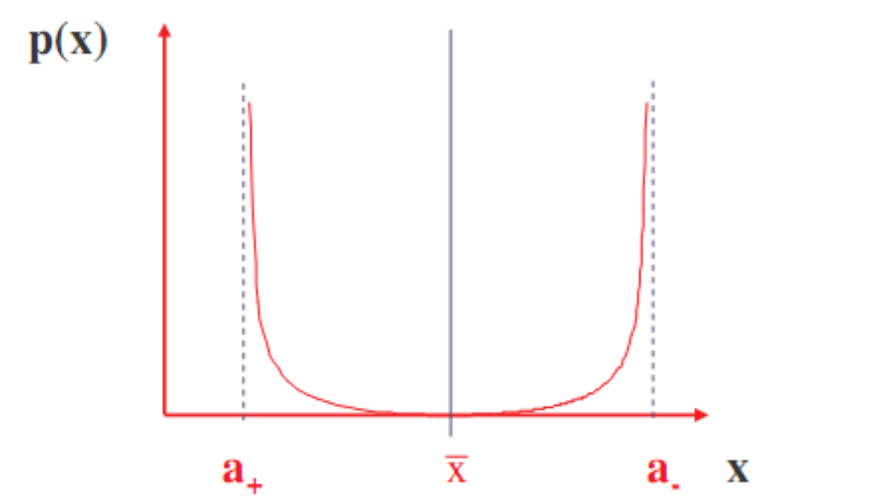
empedans uyuşmazlığından kaynaklanan belirsizlikler için bu dağılım kullanılmaktadır. Belirsizlik bileşeni,

$$u(x) = \frac{a_+ - a_-}{2\sqrt{2}} \tag{8.15}$$

veya sıfırın çevresinde simetrik bir durum için,

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{2}} \tag{8.16}$$

olur.



Şekil 8.8: U tipi dağılım için grafiksel gösterim

8.2. Anten Desen Ölçümü ve Mutlak Kazanç Hesabı Ölçüm Belirsizliği

Bu bölümde, anten desen ölçümü ve sonrasında ki mutlak kazanç ölçümündeki ölçüm belirsizliği bütçesi belirlenip, genişletilmiş ölçüm belirsizliği hesaplanacaktır.

8.2.1. Model fonksiyonun tanımlanması

S = dM + dY + dIG + dIF + dAG + dFH + dP + dCP + dMS + dA + dB + dAF + dKK + dU + dYK+dUYK+ dT

8.2.2. Belirsizlik bileşenleri

Tablo 8.2: Anten desen ve mutlak kazanç ölçümleri belirsizlik bileşenleri

Bileşen Sembolü	Bileşen Adı	Birimi	Açıklama
S	Sonuç	dB	Bu ölçülen değerdir, yani sonuçtur.
dM	Model Hatası	dB	Yönlendiricilik hesap modelinde integral işleminin, çift toplam şeklinde alınmasından kaynaklanan hata
dY	Yansımalar	dB	Zeminden ve duvarlarda oluşan istenmeyen yansımalardan kaynaklanan belirsizlik. (ölçüm yapılan ortam)
dIG	İşaret Üreteci Genlik Hassasiyeti	dB	İşaret üreteci genlik hassasiyetinden kaynaklanan belirsizlik
dIF	İşaret Üreteci Frekans Hassasiyeti	dB	İşaret üreteci frekans hassasiyetinden kaynaklanan belirsizlik
dAG	Spektrum Analizörü Genlik Hassasiyeti	dB	Spektrum analizörü genlik hassasiyetinden kaynaklanan belirsizlik
dFH	Spektrum Analizörü Frekans Hassasiyeti	dB	Spektrum analizörü frekans hassasiyetinden kaynaklanan belirsizlik
dP	Polarizasyon	dB	Alıcı ve verici antenlerin polarizasyonlarının tam ideal ayarlanamaması
dCP	Çarpraz Polarizasyon	dB	Antenlerin balans ayarının ideal olmaması. Örneğin, yatay polarizasyonda iken dikey polarizasyonlu dalgalar sızdırması. Böylece istenmeyen enerji kaybı ortaya çıkmaktadır.
dMS	Antenler Arası Mesafe	dB	Antenler arasındaki mesafenin θ ve ϕ taramaları sırasında azda olsa değişmesi, sabit durmaması.
dA	Açı hatası	dB	θ ve ϕ açı hatası
dB	Desen ölçüm bölgesi	dB	Desen ölçümü için kullanılan bölgenin ideal uzak alan olmamasından kaynaklanan belirsizlik.
dAF	Alıcı Anten	dB	Alıcı antenin anten faktöründen kaynaklanan belirsizlik

Tablo 8.2: (Devam) Anten desen ve mutlak kazanç ölçümleri belirsizlik bileşenleri

Bileşen Sembolü	**Bileşen Adı**	**Birimi**	**Açıklama**
dKK	Kablo Kaybı	dB	Alıcı anten ve spektrum analizörü arasındaki kablo kaybından kaynaklanan belirsizlik
dU	Uyuşmazlık	dB	Spektrum analizörü ve alıcı anten arasındaki empedans uyuşmazlığı.
dYK	Yönlü Kupler (Directional Coupler)	dB	P_{net} ölçümü sırasında, verici antenin girişinde kullanılan yönlü kuplörden kaynanlanan belirsizlik
dUYK	Yönlü Kuplör Uyuşmazlık	dB	Yönlü Kupler ile spektrum analizörü arasındaki uyusmazlık
dT	Ölçüm sistemi tekrar üretilebilirliği	dB	Ölçüm sistemi tekrar üretilebilirliğinden kaynaklanan belirsizlik.

Şimdi belirsizlik bileşenlerinin açıklamaları maddeler halinde verelim,

- Model hatası (dM) :

Model hatası, ortalama ışınan gücün hesaplanması sırasında çift katlı integralin çift katlı toplam ile ifade edilmesinden kaynaklanan hatadır. Bu hatanın yaklaşık mertebesini bulabilmek için ortalama güç ifadesi bilinen yarım dalga dipolünü referans kabul ederek çift katlı integralin analitik sonucu ile çift katlı toplam sonucu karşılaştırılarak hata bulunacaktır. Ayrıca bunu dışında 6 adet farklı dar huzmeli desen daha incelenerek model hatası tahmin edilmeye çalışılacaktır.

- Yarım dalga dipolü:

Bir yarım dalga dipol için bilinen ışınım şiddeti (U) ve ışınan güç (P_{rad}) ifadeleri [1],

$$U = r^2 W_{rad} = \eta \frac{\left|I_o^2\right|}{8\pi^2} \left[\frac{\cos[\frac{\pi}{2}\cos\theta]}{\sin\theta} \right]^2 \quad \text{(W)} \tag{8.17}$$

ve analitik olarak bulunan ışınan güç ifadesi,

$$P_{rad} = 2.4352\eta \frac{\left|I_o\right|^2}{8\pi} \quad \text{(W)} \tag{8.18}$$

dir.

I_o=0.2 A seçersek ve η=377 olduğunu düşünerek,

$$P_{rad} = 2.4352\eta \frac{\left|I_o\right|^2}{8\pi} = 1.4618 \quad \text{(W)} \tag{8.19}$$

$$D_o = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} = \frac{4\pi U_{\max}}{1.4618} = 1.643 \tag{8.20}$$

elde edilir. Bulunan bu sonuç analitik sonuç olup bizim için gerçek sonuç olarak kabul edilecektir.

Şimdi aynı integralin çift katlı toplam ile alınması için basit bir C# kodu yazalım. Yazılım,

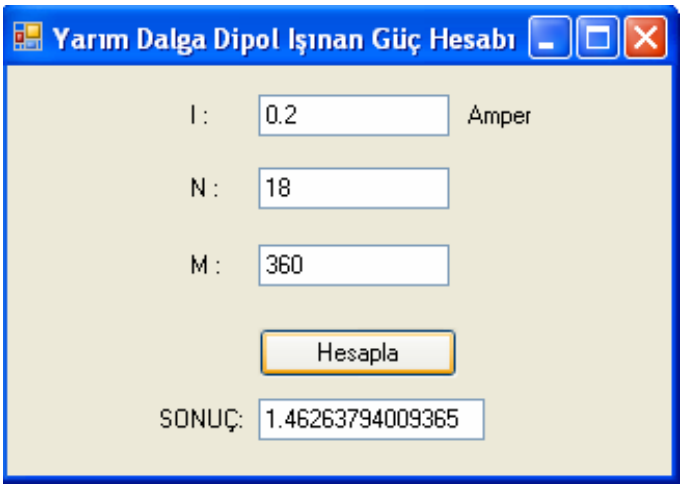
$$U = B_o F(\theta, \phi) \tag{8.21}$$

olmak üzere,

$$P_{rad} = B_o \int_0^{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} f(\theta) g(\phi) \sin\theta d\theta \right\} d\phi \tag{8.22}$$

$$P_{rad} = B_o \int_0^{2\pi} \left\{ \int_0^{\pi} F(\theta_i, \phi_j) \sin\theta d\theta \right\} d\phi \approx B_o (\frac{\pi}{N})(\frac{2\pi}{M}) \sum_{j=1}^{M} \left[\sum_{i=1}^{N} F(\theta_i, \phi_j) \sin\theta_i \right] \tag{8.23}$$

yaklaşıklığını kullanmak üzere programlanacaktır. Programa ait formumuz aşağıdaki gibi olup, program kodu Tablo C1' de sunulmuştur.



Şekil 8.9: Yarım dalga dipol için model hatasını tespit eden programcık arayüzü

Form üzerinde görünen "I" dipol üzerindeki akan amper birimindeki akımı, N dikey düzlem deseni ve M yatay düzlem parçalama sayılarıdır. Tez kapsamında geliştirilen yazılım için N ve M değerleri sırasıyla minimum 18 ve 360 olmaktadır ve en kötü durumu simgelemektedir. Ayrıca diğer birkaç durum için daha hata oranları decibel biriminde hesaplanacaktır.

Yazılım tarafından üretilen sonuç,

$$P_{rad} \text{ (yazılım)} = 1.46263794009365 \text{ (W)} \tag{8.24}$$

olmuştur.

Eşitlik (8.25)' de yönlendiricilik,

$$D_o \text{ (yazılım)} = D_{oy} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} = \frac{4\pi U_{\max}}{1.46263794009365} \tag{8.25}$$

olarak bulunur.

Şimdi analitik çözüm (D_o) ile yazılım çözümünün (D_{oy}) farkı decibel biriminde bulunursa,

$$10\log\frac{D_{oy}}{D_o} = 0.0025 \text{ dB} \tag{8.26}$$

olmaktadır.

Çeşitli açılar için model hatası Tablo 8.3' de sunulmuştur.

Tablo 8.3: Yarım dalga dipol için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası

YARIM DALGA DİPOL (I : 0.2 A)				
Theta (θ) Adımı (derece)	Phi (ϕ) Adımı (derece)	Ölçülen P_{rad} (W)	Gerçek P_{rad} (W)	Hata (dB)
10	1	1.46263794009365	1.461775478	0.00256
5	5	1.46262720867327	1.461775478	0.00252
10	10	1.46263794009366	1.461775478	0.00256
60	60	1.45107367656326	1.461775478	0.03
90	90	1.885	1.461775478	1.1

- $\text{Sin}^4\theta.\text{Sin}^4\phi$ deseni:

Bir önceki bölümdeki kullanılan yazılıma yapılan küçük bir değişiklik ile bulunan sonuçlar Tablo 8.4' de sunulmuştur.

Tablo 8.4: $\text{Sin}^4\theta.\text{Sin}^4\phi$ deseni için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası

$U=\text{SIN}^4\theta.\text{SIN}^4\phi$				
Theta (θ) Adımı (derece)	Phi Adımı (ϕ) (derece)	Ölçülen P_{rad} (W)	Gerçek P_{rad} (W)	Hata (dB)
10	1	2.51327357990527	2.51327412287173	≈ 0
5	5	2.51327411455756	2.51327412287173	≈ 0
10	10	2.51327357990527	2.51327412287173	≈ 0
60	60	2.40393603843171	2.51327412287173	0.193
90	90	4.93480220054468	2.51327412287173	2.93

- Özel desen 1:

Desen fonksiyonumuz aşağıdaki gibi olsun,

$$U(\theta,\phi)=\begin{Bmatrix} \sin^4\theta.\cos^4\phi & ;\phi\geq 300,\phi\leq 60,\ 0\leq\theta\leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\sin^4\phi) & ;60<\phi\leq 120,\ 0\leq\theta\leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\cos^4(\phi-\frac{3\pi}{4})) & ;120<\phi\leq 150,\ 0\leq\theta\leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\cos^4\phi) & ;150<\phi\leq 210,\ 0\leq\theta\leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\cos^4(\phi-\frac{5\pi}{4})) & ;210<\phi\leq 240,\ 0\leq\theta\leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\sin^4\phi) & ;240<\phi\leq 300,\ 0\leq\theta\leq 180 \end{Bmatrix} \quad (8.27)$$

Bu desen ileriye doğru dar bir huzme verirken, yan, arka ve köşelere doğru dar ama biraz daha ufak loblar üretmektedir. Bu fonksiyonumuz için ilgili program kodumuz Tablo C2' de verilmiştir.

Tablo 8.5: Özel Desen-1 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası

U=(θ,ϕ) – ÖZEL DESEN 1				
Theta (θ) Adımı (derece)	Phi (ϕ) Adımı (derece)	Ölçülen P_{rad} (W)	Gerçek P_{rad} (W)	Hata (dB)
10	1	5.11542333721997	5.12564490656707	≈ 0.0086
5	5	5.07012975541184	5.12564490656707	≈ 0.04
10	10	4.99830202067735	5.12564490656707	≈ 0.1
60	60	3.80143775967844	5.12564490656707	≈ 1.29
90	90	9.86960440108936	5.12564490656707	2.84

- Özel desen 2:

Özel Desen-1'e ve programcığına küçük bir değişiklik uygulayarak çok dar hüzmeli bir desen oluşturalım. Bu desen sadece ileriye doğru dar bir hüzme vermektedir.

$$U(\theta,\phi)=\begin{Bmatrix} \sin^8\theta.\cos^8\phi & ;270^o\leq\phi,90\geq\phi,\ 0\leq\theta\leq 180 \\ 0 & Diger \end{Bmatrix} \quad (8.28)$$

Tablo 8.6: Özel Desen-2 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası

U=(θ,ϕ)				
Theta (θ) Adımı (derece)	Phi (ϕ) Adımı (derece)	Ölçülen P_{rad} (W)	Gerçek P_{rad} (W)	Hata (dB)
10	1	0.698131700408879	0.698131700797626	≈ 0
5	5	0.698131700797389	0.698131700797626	≈ 0
10	10	0.698131700408878	0.698131700797626	≈ 0
60	60	0.6	0.698131700797626	≈ 0.66
90	90	2.46	0.698131700797626	5.36

- Özel desen 3 - lineer dizi:

Daha önce işlenen aşağıdaki desene ait anteni 8' li bir lineer dizi haline getirelim,

$$U(\theta,\phi)=\begin{cases}\sin^8\theta.\cos^8\phi & ;270^o\le\phi,90\ge\phi,0\le\theta\le180\\ 0 & Diger\end{cases} \tag{8.29}$$

olsun. Bu desen ileriye doğru çok dar bir hüzme üretiyordu. Şimdi bu anteni bir dizi haline getirelim.

N elemanlı bir dizi için dizi faktörü [1] ,

$$AF=\left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\left(kd\cos\theta+\beta\right)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\left(kd\cos\theta+\beta\right)\right)}\right] \tag{8.30}$$

olur.

Bu dizi faktörü ile yeni desen fonksiyonu

$$U_{dizi}(\theta,\phi)=\left(AF\right)^2U(\theta,\phi) \tag{8.31}$$

olacaktır.

Broadside tipinde bir dizi için:

f= 1 GHz

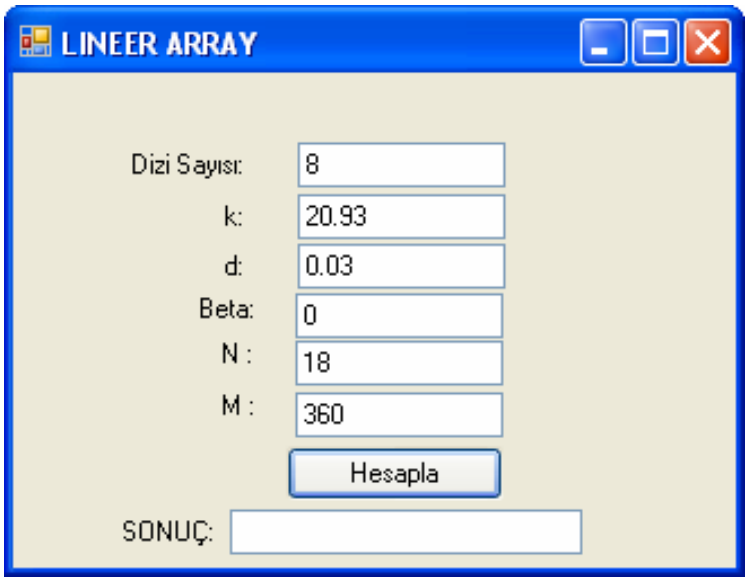
k= 20.9

d= 0.1λ=0.03 m

β=0

olarak seçelim.

Bu amaçla yazılan programcık arayüzü aşağıda, kodu ise Tablo C3' de verilmiştir.



Şekil 8.10: Lineer bir dizinin model hatasının tespiti için geliştirilen programcık

Tablo 8.7: Özel Desen-3 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası

LINEER DİZİ Udizi(θ,ϕ)				
Theta (θ) Adımı (derece)	Phi (ϕ) Adımı (derece)	Ölçülen P_{rad} (W)	Gerçek P_{rad} (W)	Hata (dB)
10	1	37.6754875774752	37.675487578423	≈ 0
5	5	37.6754875784268	37.675487578423	≈ 0
10	10	37.6754875774752	37.675487578423	≈ 0
60	60	22.44	37.675487578423	≈ 2.25
90	90	157.91	37.675487578423	6.22

- Özel desen 4 - planer dizi:

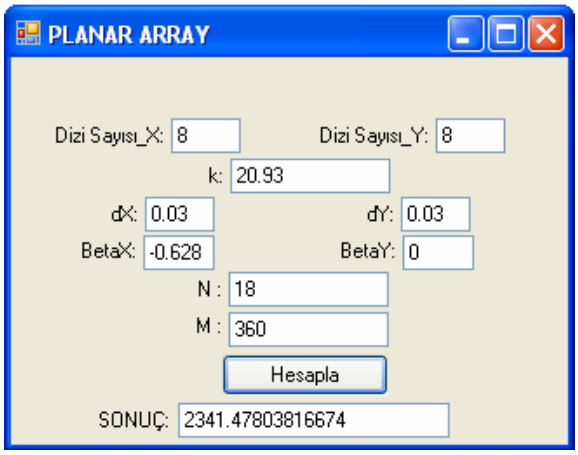
Bir önceki örneği planer bir dizi (8 x 8) haline getirelim.

$$U(\theta,\phi)=\begin{cases}\sin^8\theta.\cos^8\phi & ;270^o\le\phi,90\ge\phi,0\le\theta\le180\\ 0 & Diger\end{cases} \tag{8.32}$$

NxM elemanlı bir dizi için dizi faktörü [1] ,

$$AF(\theta,\phi)=\left\{\frac{\sin\left(\frac{M}{2}\left(k\ d_x\sin\theta\cos\phi+\beta_x\right)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\left(k\ d_x\sin\theta\cos\phi+\beta_x\right)\right)}\right\}\left\{\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\left(k\ d_y\sin\theta\sin\phi+\beta_y\right)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\left(k\ d_y\sin\theta\sin\phi+\beta_y\right)\right)}\right\} \tag{8.33}$$

olur. Bu dizi faktörü ile yeni $U_{dizi}(\theta,\phi)=(AF)^2.U(\theta,\phi)$ olacaktır.



Şekil 8.11: Planer bir dizinin model hatasının tespiti için geliştirilen programcığın arayüzü

Dizi parametrelerini,

f = 1 GHz

k=20.3

dx=0.03 m

dy=0.03 m

olarak kabul edelim, ve $\theta = 90^o$ ve $\phi = 0^o$' da maksimum elde edebilmek için,

$$B_x = -kd_x \sin\theta_o \cos\phi_o = \text{-}0.627$$
$$B_y = -kd_y \sin\theta_o \sin\phi_o = 0 \qquad (8.34)$$

olur.

Bu dizi ile ilgili programcık arayüzümüz Şekil 8.11' de verilmiş olup, kodu Tablo C4' te sunulmuştur.

Tablo 8.8: Özel Desen-4 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası

ÖZEL DESEN-4 Udizi=(θ,ϕ)				
Theta (θ) Adımı (derece)	Phi (ϕ) Adımı (derece)	Ölçülen P_{rad} (W)	Gerçek P_{rad} (W)	Hata (dB)
10	1	2341.47803816674	2341.47803806706	≈ 0
5	5	2341.47803806709	2341.47803806706	≈ 0
10	10	2341.47803812373	2341.47803806706	≈ 0
36	72	4134.6225450632	2341.47803806706	≈ 2.46
90	90	10106.4743761256	2341.47803806706	6.35

- Özel desen 5 - planer dizi:

Desen fonksiyonumuz aşağıdaki gibi olsun,

$$U(\theta,\phi) = \begin{cases} \sin^4\theta.\cos^4\phi & ;\phi \geq 300, \phi \leq 60, 0 \leq \theta \leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\sin^4\phi) & ;60 < \phi \leq 120, 0 \leq \theta \leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\cos^4(\phi - \frac{3\pi}{4})) & ;120 < \phi \leq 150, 0 \leq \theta \leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\cos^4\phi) & ;150 < \phi \leq 210, 0 \leq \theta \leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\cos^4(\phi - \frac{5\pi}{4})) & ;210 < \phi \leq 240, 0 \leq \theta \leq 180 \\ 0.2(\sin^4\theta.\sin^4\phi) & ;240 < \phi \leq 300, 0 \leq \theta \leq 180 \end{cases} \qquad (8.35)$$

Bu desen ileriye doğru dar bir hüzme verir iken, yan, arka ve köşelere doğruda düşük loblara sahiptir. Şimdi böyle bir desene sahip anteni 8x8 planer dizi haline getirecek

programımızı yazalım ve bir önceki modeldeki yazılım formumuzu kullanalım. Program kodu Tablo C5' te sunulmuştur.

Tablo 8.9: Özel Desen-5 için çeşitli θ ve ϕ adımları için model hatası

ÖZEL DESEN-5 Udizi=(θ,ϕ)				
Theta (θ) Adımı (derece)	Phi (ϕ) Adımı (derece)	Ölçülen P_{rad} (W)	Gerçek P_{rad} (W)	Hata (dB)
10	1	3774.8456624735	3775.30052316158	≈ 0
5	5	3772.85620092834	3775.30052316158	≈ 0
10	10	3769.76339242052	3775.30052316158	≈ 0
36	72	5448.7942956655	3775.30052316158	≈ 1.59
90	90	10202.4551158308	3775.30052316158	4.31

Elde ettiğimiz tüm sonuçları değerlendirdiğimizde model hatasının 10^o' lik θ (theta), 1^o' lik phi (ϕ) adımı ile yapılan modellemede hatanın sıfıra çok yakın ve 0.2 dB' yi aşmayacağını tahmin edebiliriz.

Ayrıca son olarak minimum N ve M değerleri teorik olarak "Fast Multipole" yöntemi [6] ile bulalım. Bunun için aşağıdaki eşitlikleri kullanacağız.

$$N=ka+10 \tag{8.33}$$

$$M=2N+1 \tag{8.34}$$

Burada,

N : Veri kaybı yaşamadan yapılabilecek minimum θ için parçalama sayısı

M : Veri kaybı yaşamadan yapılabilecek minimum ϕ için parçalama sayısı

k : Dalga sayısı ($2\pi/\lambda$)

a: Deseni ölçülen anteni içine alabilecek en küçük kürenin yarıçapı

olarak verilir.

Ölçümlerimizde kullandığımız horn antenleri içine alabilecek en küçük kürenin yarıçapı maksimum 15 cm' dir. 1 GHz için N=13 ve M=27 olarak bulunur ki toplam

veri sayısı 351 olur. 6 GHz için ise *N*=29 ve *M*=58 bulunur ki toplam ihtiyaç duyulan veri sayısı 1682' dir.

Kendi ölçümlerimizde N=18 ve M=360 seçerek 6480 veri topluyoruz ki yukarıda elde ettiğimiz değerlerin oldukça üzerindedir.

- Yansıma (dY):

Bu belirsizlik bileşeni ölçüm sırasında yan duvarlarda ve zeminde oluşabilecek istenmeyen yansımalardan kaynaklanan belirsizliği betimlemektedir. Ölçüm ortamın yarı yansımasız oda , ölçümü yapılan antenin deseni dar hüzmeli horn anten, ölçüm mesafesinin 3 m, zeminden yüksekliğin 2 m ve zeminin yutucu malzemeler ile kaplı olması da dikkate alındığında bu belirsizlik bileşeninin ihmal edilebilir olduğu tahmin edilmektedir.

- dIG, dIF, dAG, dFH:

İşaret üreteci ve spektrum analizör üreticisinin ilan ettiği spek bilgileri ve sertifikalarından temin edilebilir.

- Polarizasyon (dP):

Her iki antenin aynı polarizasyonda olduğu özel aparatlarla denetlendiğinden 0.2 dB' yi aşmayacağı tahmin edilmektedir.

- Çarpraz polarizasyon (dCP):

Deseni ölçülen antenin tipi horn olması ve antenin üretici spekleri kullanılarak karar verilir.

- Antenler arası mesafe (dMS):

İlk olarak desen ölçümündeki theta (θ) ve phi (ϕ) taramaları sırasındaki, deseni ölçülen anten ile alıcı anten arasındaki mesafede ne kadar bir değişim yaşandığı tespit edilerek sonra bunun alıcı taraftaki elektrik alan seviyesindeki etkisi ölçülerek bu bileşen tespit edilir.

- Açı hatası (dA):

Yazılımın, bilgisayar kontrollü döner masadan açı bilgisini alması sonrası, spektrum analizörden okuma yapmaktadır. Açı bilgisinin alınması ile spektrum analizörden okumanın yapılması arasındaki zaman kaybı süresince, döner masanın kaç derecelik açı yaptığı ve yapılan bu açı mesafesinin okunan elektrik alana etkisi küçük bir ölçümle bulunabilir. Yazılımın döner masadan açı bilgisini alması ile spektrum analizörden seviye bilgisini alması arasında yaklaşık 100 ms' lik bir gecikme vardır. Bu süre dikkate alınarak açı hatasından kaynaklanan belirsizlik bulunur.

- Desen ölçüm bölgesi (dB):

İlgili ölçüm frekansları, antenin boyutları ve ölçüm mesafesi de dikkate alınarak 0.2 dB' yi aşmayacağı tahmin edilmektedir.

- Alıcı anten (dAF):

Alıcı antenin sertifikasından temin edilir. Genellikle sertifikadan alınan değerler %95 güvenilirlik düzeyine sahip genişletilmiş belirsizlik olup, k=2 genişletme faktörüne bölünerek kullanılır.

- Kablo kaybı (dKK):

Kullanılan kablonun sertifikasından temin edilir. Genellikle sertifikadan alınan değerler %95 güvenilirlik düzeyine sahip genişletilmiş belirsizlik olup, k=2 genişletme faktörüne bölünerek kullanılır.

- Uyuşmazlık (dU):

Alıcı anten girişindeki ve spektrum analizör girişindeki yansıma katsayılarından tahmin edilir. Spektrum analizör girişinde bir 3 dB zayıflatıcı kullanılarak değeri bir miktar düşürülebilir. Belirsizlik bileşeni $20\log_{10}\left(1\pm\left|\Gamma_G\right\|\Gamma_L\right|\right)$ formülü [5] ile tahmin edilir.

Bu formülde $\left|\Gamma_G\right|$ ve $\left|\Gamma_L\right|$ sırasıyla kaynak ve yük tarafındaki yansıma katsayılarıdır. $20\log_{10}\left(1\pm\left|\Gamma_G\right\|\Gamma_L\right|\right)$ formülünün vereceği pozitif ve negatif değerlerden mutlak değeri en büyük olan belirsizlik bileşeni olarak kabul edilir.

- Yönlü kuplör (dYK):

Yönlü kuplörün kalibrasyon sertifikasından temin edilebilir. Genellikle sertifikadan alınan değerler %95 güvenilirlik düzeyine sahip genişletilmiş belirsizlik olup, k=2 genişletme faktörüne bölünerek kullanılır.

- Yönlü kuplör uyuşmazlık (dUYK)

Yönlü kuplörün portları ile spektrum analizör arasındaki uyuşmazlıktan kaynaklanan belirsizliktir. Yine basit bir ölçüm ve $20\log_{10}\left(1\pm\left|\Gamma_G\right\|\Gamma_L\right|\right)$ dB eşitliği ile temin edilebilir.

- Ölçüm sistemi tekrar üretilebilirliği:

Ölçüm sistemi tekrar üretilebilirliği ard arda yapılan 10 ölçüm sonucunun standart sapmasından elde edilir.

Bu bileşenin ölçümü için, farklı zamanlarda en az 10 ölçüm alınır ve bu ölçümlerden deneysel standart sapma ve %68' lik güvenilirlik düzeyine sahip standart belirsizlik bileşeni Tablo 8.1' deki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

8.2.3. Belirsizlik bütçesi

Yapılan anten desen ve mutlak kazanç ölçümü için belirsizlik tablosu Tablo 8.10' da sunulmuştur. Bu tabloda her bir bileşen ile ilgili gerekli açıklamalar Bölüm 8.2.2' de verilmiştir.

Tablo 8.10: Anten desen ve mutlak kazanç ölçümü için belirsizlik bütçesi (1 GHz - 6 GHz)

Bileşen Sembolü	**Bileşen Adı**	**Birimi**	**Değeri**	**Dağılımı**	**Bölücü**	**Duyarlılık Katsayısı (Ci)**	**Belirsizlik Bileşeni (Ui)**	**Belirsizlik Bileşenin Karesi (Ui ^ 2)**
dM	Model Hatası	dB	0.2	Dikdörtgen	1.732	1	0.115	0.0132
dY	Yansımalar	dB	0.2	Dikdörtgen	1.732	1	0.115	0.0132
dIG	İşaret Üreteci Genlik Hassasiyeti	dB	0.1	Normal 2	2	1	0.05	0.0025
dIF	İşaret Üreteci Frekans Hassasiyeti	dB	0.1	Diktörtgen	1.732	1	0.06	0.0036
dAG	Spektrum Analizörü Genlik Hassasiyeti	dB	0.2	Normal 2	2	1	0.1	0.01
dFH	Spektrum Analizörü Frekans Hassasiyeti	dB	0.2	Diktörtgen	1.732	1	0.115	0.0132
dP	Polarizasyon	dB	0.1	Diktörtgen	1.732	1	0.06	0.0036
dCP	Çarpraz Polarizasyon	dB	0.1	Dikdörtgen	1.732	1	0.06	0.0036
dMS	Antenler Arası Mesafe	dB	0.3	Dikdörtgen	1.732	1	0.173	0.03
dA	Açı hatası	dB	0.2	Dikdörtgen	1.732	1	0.115	0.0132
dB	Desen ölçüm bölgesi	dB	0.2	Dikdörtgen	1.732	1	0.115	0.0132
dAF	Alıcı Anten	dB	1	Normal 2	2	1	0.500	0.250
dKK	Kablo Kaybı	dB	0.2	Normal 2	2	1	0.1	0.01
dU	Uyuşmazlık	dB	0.5	U	1.414	1	0.353	0.125

Tablo 8.10: (Devam) Anten desen ve mutlak kazanç ölçümü için belirsizlik bütçesi (1 GHz - 6 GHz)

dYK	Yönlü Kupler (Directional Coupler)	dB	0.1	Dikdörtgen	1.732	1	0.06	0.0036
dUYK	Yönlü Kuplör Uyuşmazlık	dB	0.1	U	1.414	1	0.07	0.0049
dT	Ölçüm sistemi tekrar üretilebilirliği	dB	0.5	Normal 1	1	1	0.5	0.25

Bileşik Belirsizlik: 0.87 dB

Genişletilmiş Belirsizlik: 1.74 dB

9. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde 3 adet farklı tip antenin geliştirilen yazılım ile ölçümleri yapılacak ve tez çalışmasının fiziksel ölçümleri başlayacaktır. Tez kapsamında ölçümü ve analizleri yapılacak antenler Tablo 9.1' de sunulmuştur.

Tablo 9.1: Geliştirilen yazılım ile ölçümü yapılan antenler ve detayları

Anten Tipi	**Üretici**	**Model**	**Seri No**	**Frekans Aralığı**	**Çalışmanın Odaklanacağı Frekans**	**Yapılan Ölçüm**
Halka Anten	EMCO	-	-	30 Hz – 30 MHz	10 MHz	Sadece Desen Ölçümü
Log Periyodik	EMCO	3146	9606-4559	200 MHz -1 GHz	1 GHz	Desen ve Yönlendiricilik Ölçümü
Horn	ARA	DRG 118A	9014	1 GHz – 18 GHz	1 GHz	Desen ve Yönlendiricilik Ölçümü
Horn	ARA	DRG 118A	9014	1 GHz – 18 GHz	2 GHz	Desen ve Yönlendiricilik Ölçümü
Horn	ARA	DRG 118A	9014	1 GHz – 18 GHz	3 GHz	Desen ve Yönlendiricilik Ölçümü
Horn	Schaffner	BHA 9118	9014	1 GHz – 18 GHz	1 GHz	Desen, Yönlendiricilik ve Mutlak Kazanç
Horn	Schaffner	BHA 9118	9014	1 GHz – 18 GHz	2 GHz	Desen, Yönlendiricilik ve Mutlak Kazanç

Tablo 9.1: (Devam) Geliştirilen yazılım ile ölçümü yapılan antenler ve detayları

Anten Tipi	**Üretici**	**Model**	**Seri No**	**Frekans Aralığı**	**Çalışmanın Odaklanacağı Frekans**	**Yapılan Ölçüm**
Horn	Schaffner	BHA 9118	9014	1 GHz – 18 GHz	3 GHz	Desen, Yönlendiricilik ve Mutlak Kazanç
Horn	Schaffner	BHA 9118	9014	1 GHz – 18 GHz	4 GHz	Desen, Yönlendiricilik ve Mutlak Kazanç
Horn	Schaffner	BHA 9118	9014	1 GHz – 18 GHz	5 GHz	Desen, Yönlendiricilik ve Mutlak Kazanç
Horn	Schaffner	BHA 9118	9014	1 GHz – 18 GHz	6 GHz	Desen, Yönlendiricilik ve Mutlak Kazanç

Geliştirilen yazılım ile detaylı incelemesi yapılacak ilk anten Schaffner marka horn anten olup bu anten için ölçümler eksiksiz (Desen + Yönlendiricilik + Mutlak Kazanç) olarak yapılacak ve yine bu anten için kendi yöntemimiz ile uluslararası standartlara ait yöntemlerin karşılaştırılması yapılacaktır. Tablo 9.1' de belirtilen diğer antenler için sadece desen ve yönlendiricilik ölçümleri yapılıp bir ileri adım olan kazanç ölçümüne geçilmeyecek ve bunların sonuçları EK-B' de sunulacaktır.

9.1. Schaffner Marka Horn Anten için Ölçümler

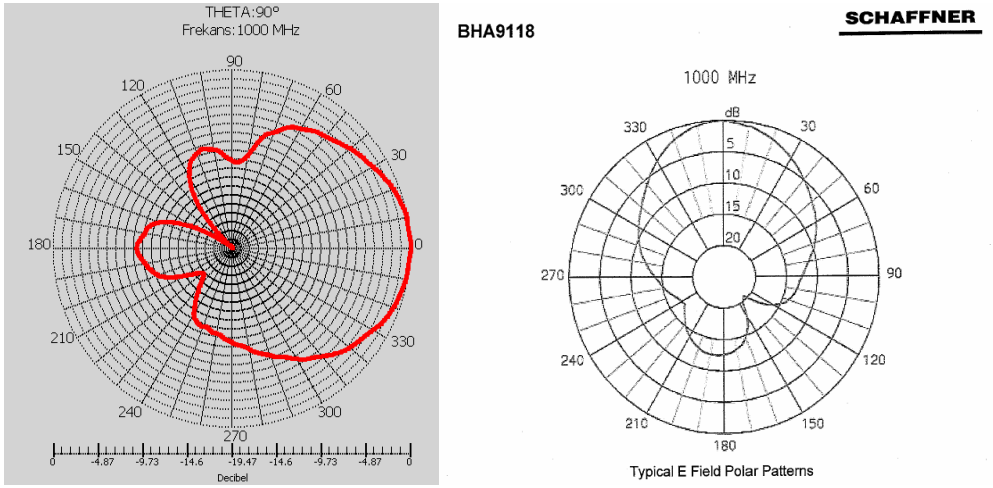
Bu bölümde, Schaffner marka BHA9118 model numaralı 9014 seri numaralı antene, geliştirilen yazılım ile ve kurulan düzenek ile desen ölçümü çalışmaları yapılacak ve elde edilen sonuçlar frekans bazında gösterilecektir. Temel desenler olması nedeniyle, desen sonuçları sadece yatay düzlem deseni $\theta = 90^{o}$ ve dikey düzlem deseni $\phi = 0^{o}$ için verilecektir. Ama yazılım ile istenilen θ ve ϕ için iki boyutlu yatay

veya dikey düzlem desenlerinin çizdirilebileceği unutulmamalıdır. Ayrıca, 3-D desenlerde, iki boyutlu desenlerin hemen ardından sunulacaktır.

Her bir frekans için, iki ve üç boyutlu desenlerin sunulması sonrası, yazılım tarafından üç boyutlu desenden elde edilen yönlendiricilik (dB) ve ışınan güç (dBm) değerleri tablo halinde verilecektir. Son aşama olarak, anten girişindeki net güç (dBm) ile ışınan güç (dBm) arasındaki fark ile anten üzerinde harcanan ısıl kayıplara ve hemen ardından mutlak kazanç değerine ulaşılacaktır.

Bu bölüm içerisinde yer alan Bölüm 9.1.7' de aynı anten için yine yazılım aracılığı ile fakat bu sefer uluslararası ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 standartları kullanılarak mutlak kazanç ve anten faktörü değerlerine ulaşılacaktır.

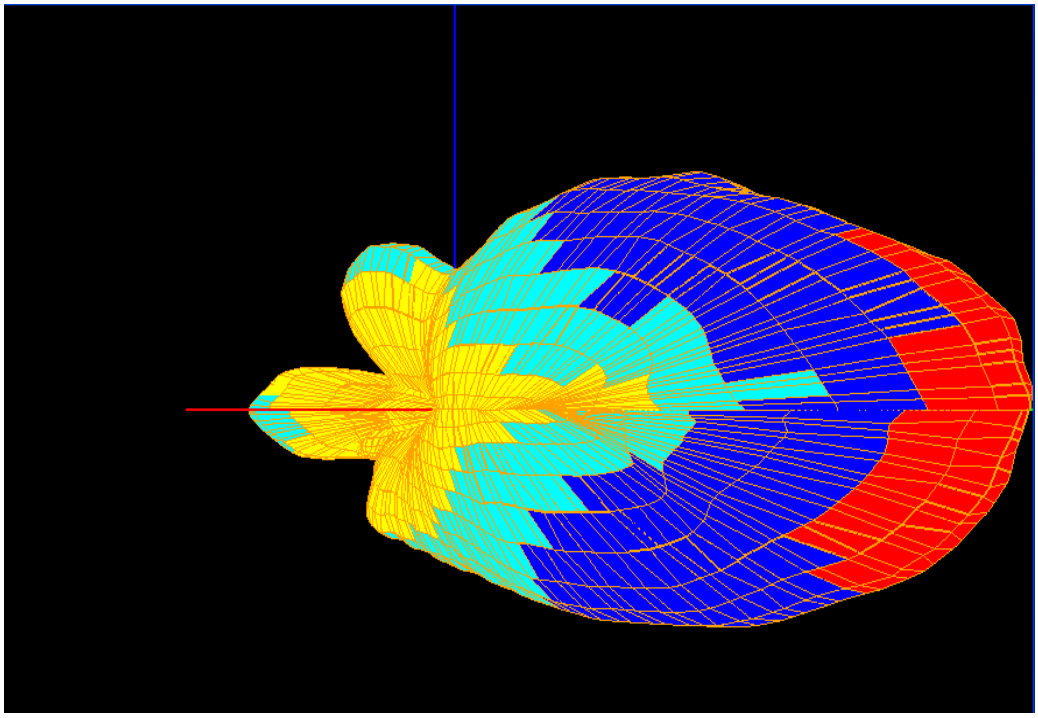
9.1.1. Schaffner marka horn anten 1 GHz desen ölçümleri



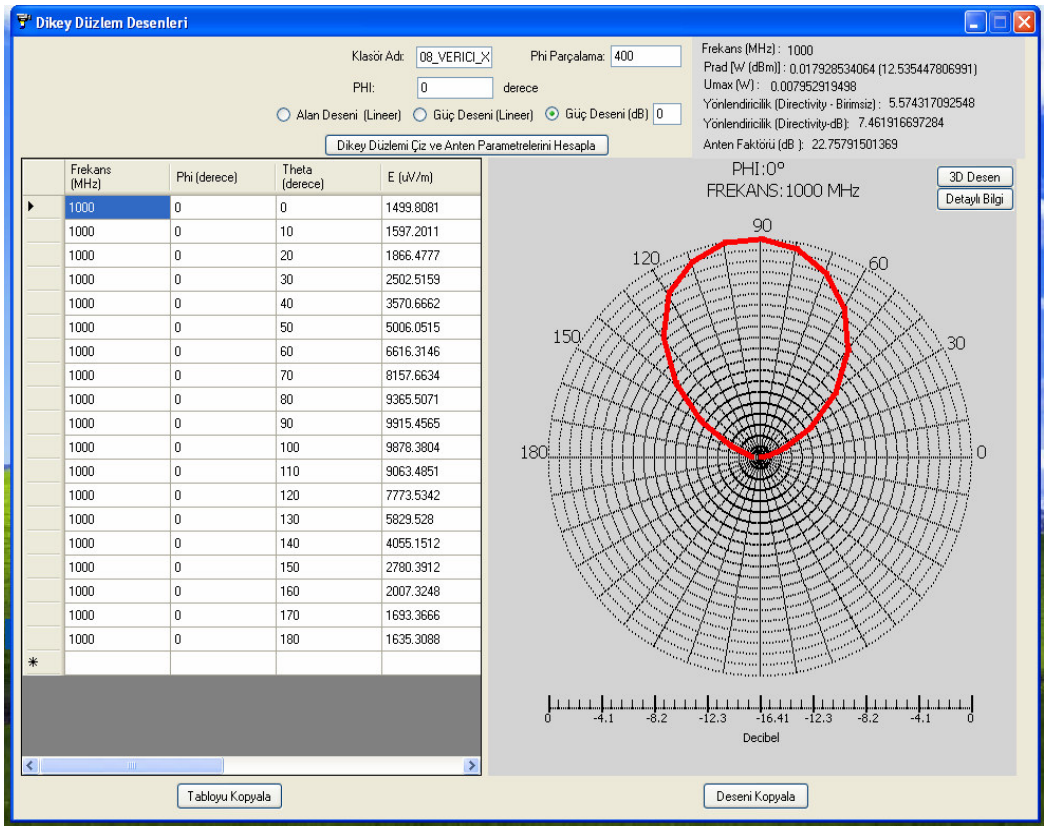
(a) (b)

Şekil 9.1: Schaffner horn anten, 1 GHz yatay düzlem desenleri, (θ=90°, 0°≤ϕ≤360°, logaritmik skala)
(a): Tasarlanan yazılım ile bulunan sonuç
(b): Üretici deklerasyonu

Dikkatle bakılırsa, geliştirilen yazılımın verdiği sonuç ile Schaffner firmasının ilan ettiği tipik desen arasında çok iyi uyumluluk olduğu görülüyor. Ek olarak, her ikisinin minimum seviyesinin -20 dB civarı olduğu görülmektedir.



Şekil 9.2: Schaffner horn antenin 1 GHz için üç boyutlu deseni

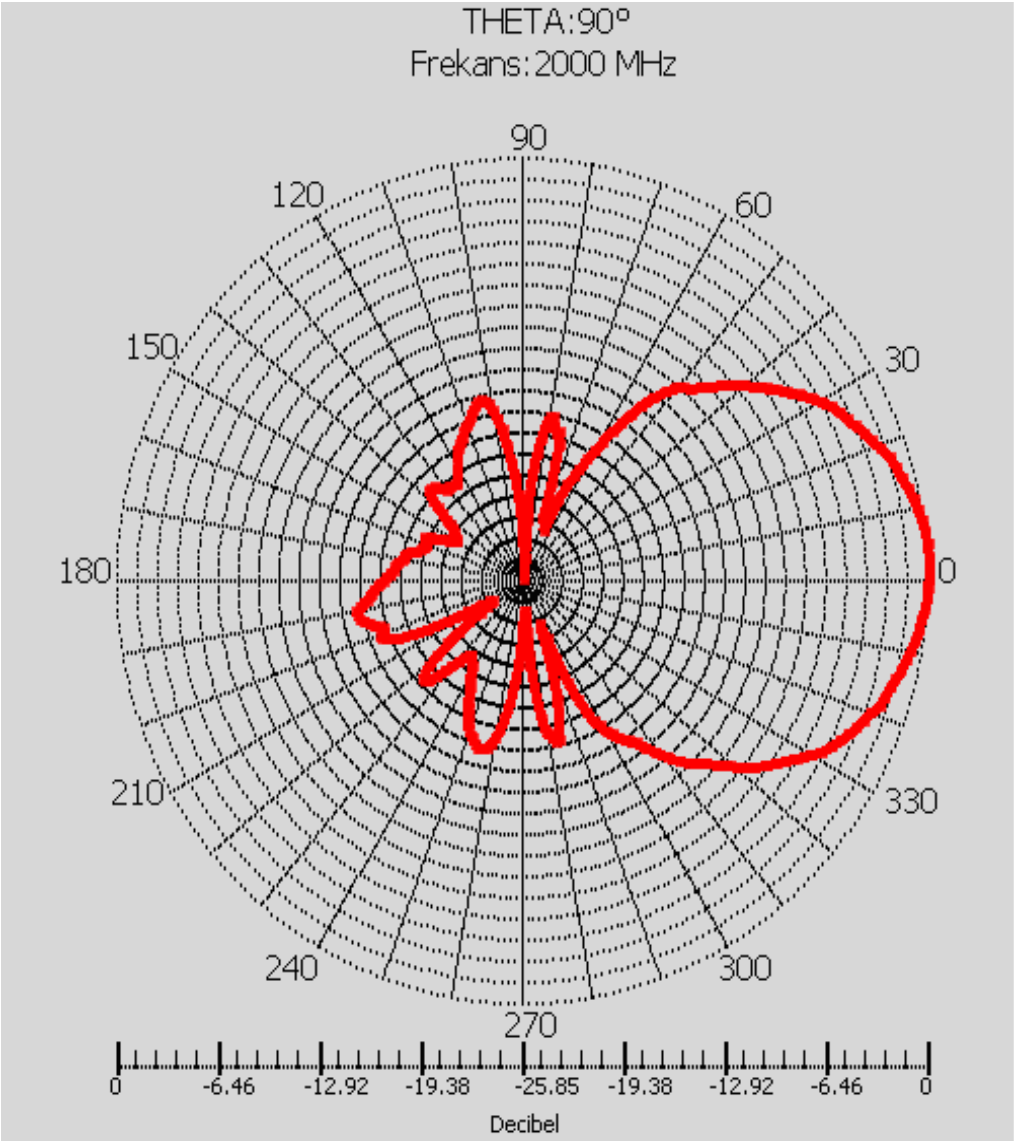


Şekil 9.3: Schaffner horn antenin 1 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri

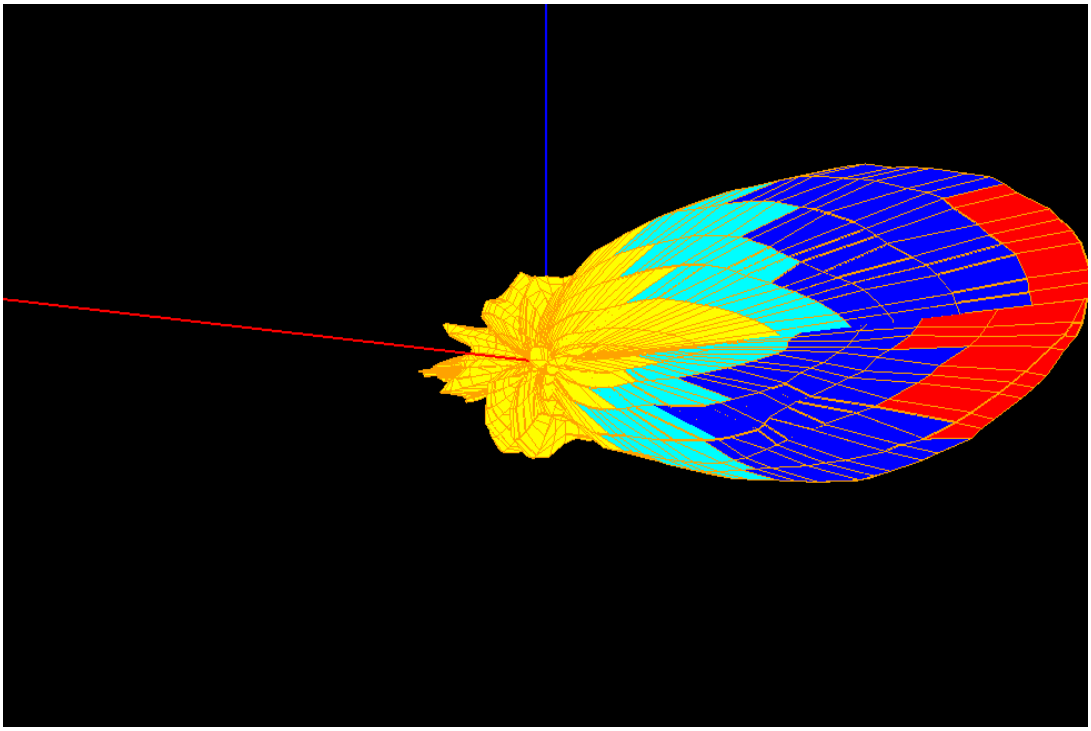
Tablo 9.2: Schaffner horn anten 1 GHz desen ölçüm sonuçları

Frekans (MHz)	1000
P_{rad} *(W),* Işınan Güç	0.0179
P_{rad} *(dBm)*, Işınan Güç	12.53
U_{max} *(W)*, Maksimum Işıma Şiddeti	0.0079
D_o (birimsiz), Maksimum Yönlendiricilik	5.57
D_o (dB), Maksimum Yönlendiricilik	7.46

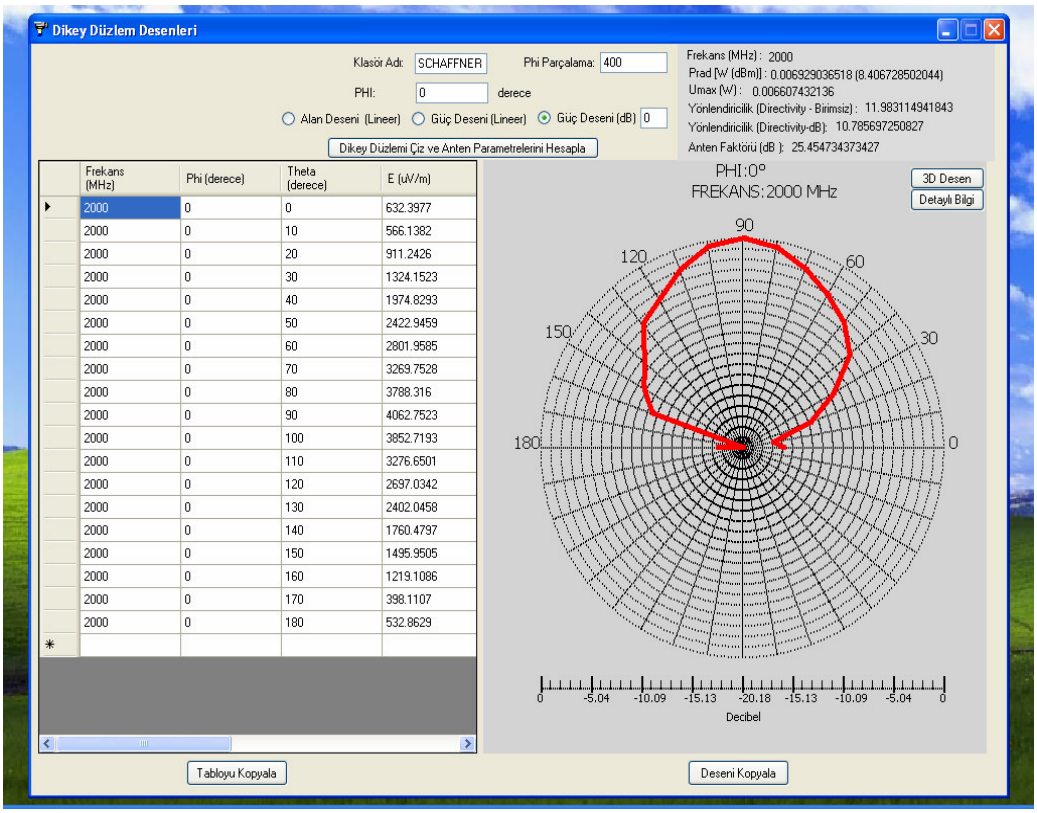
9.1.2. Schaffner marka horn anten 2 GHz desen ölçümleri



Şekil 9.4: Schaffner horn anten, 2 GHz yatay düzlem grafiği (θ=90°, 0°≤ϕ≤360°, logaritmik skala)



Şekil 9.5: Schaffner horn antenin 2 GHz için üç boyutlu deseni



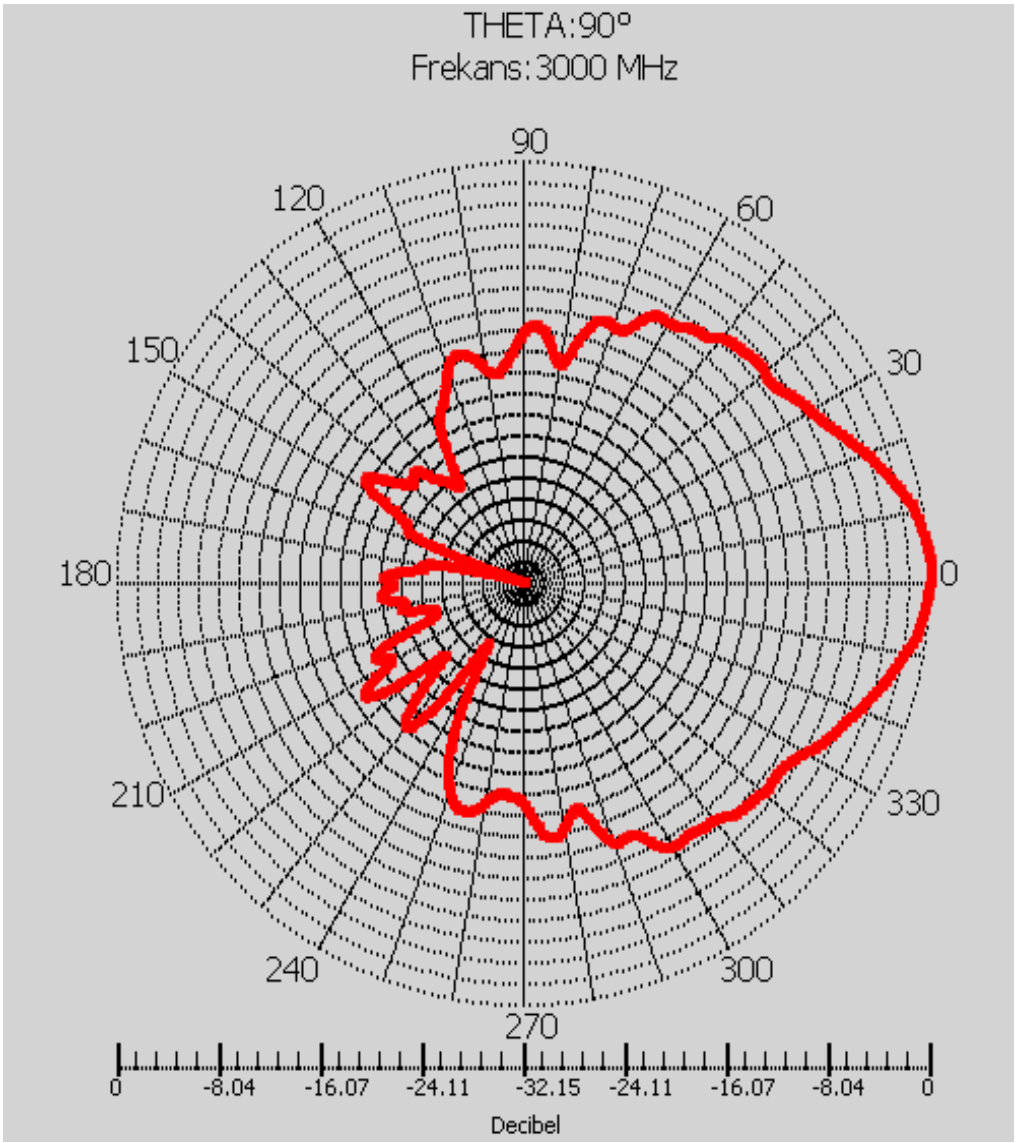
Frekans (MHz)	Phi (derece)	Theta (derece)	E (uV/m)
2000	0	0	632.3977
2000	0	10	566.1382
2000	0	20	911.2426
2000	0	30	1324.1523
2000	0	40	1974.8293
2000	0	50	2422.9459
2000	0	60	2801.9585
2000	0	70	3269.7528
2000	0	80	3788.316
2000	0	90	4062.7523
2000	0	100	3852.7193
2000	0	110	3276.6501
2000	0	120	2697.0342
2000	0	130	2402.0458
2000	0	140	1760.4797
2000	0	150	1495.9505
2000	0	160	1219.1086
2000	0	170	398.1107
2000	0	180	532.8629

Şekil 9.6: Schaffner marka horn antenin 2 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri

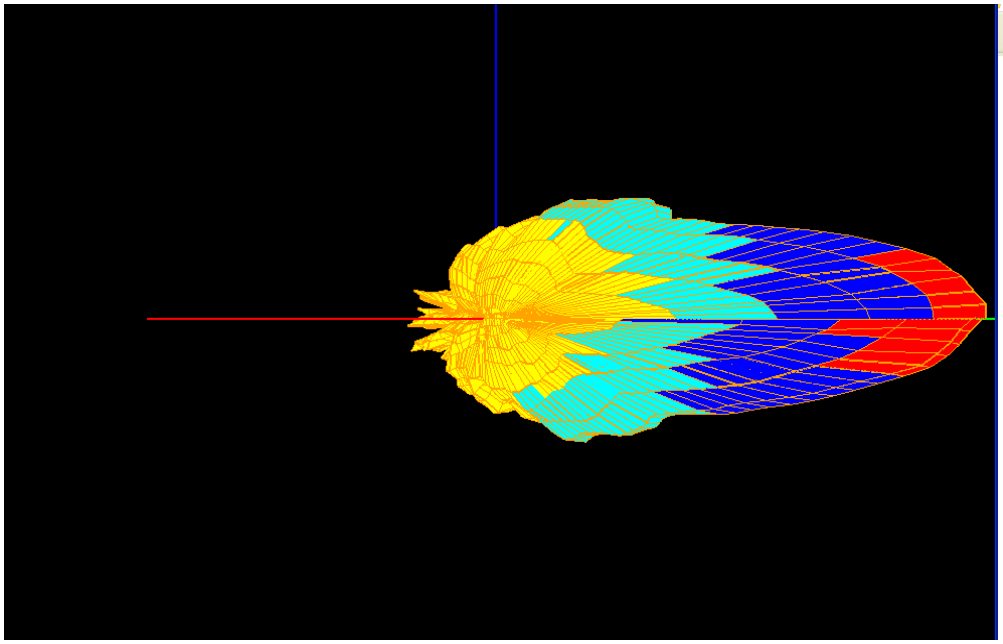
Tablo 9.3: Schaffner horn anten 2 GHz desen ölçüm sonuçları

Frekans (MHz)	2000
P_{rad} *(W),* Işınan Güç	0.0069
P_{rad} *(dBm)*, Işınan Güç	8.40
U_{max} *(W)*, Maksimum Işıma Şiddeti	0.0066
D_o (birimsiz), Maksimum Yönlendiricilik	11.98
D_o (dB), Maksimum Yönlendiricilik	10.79

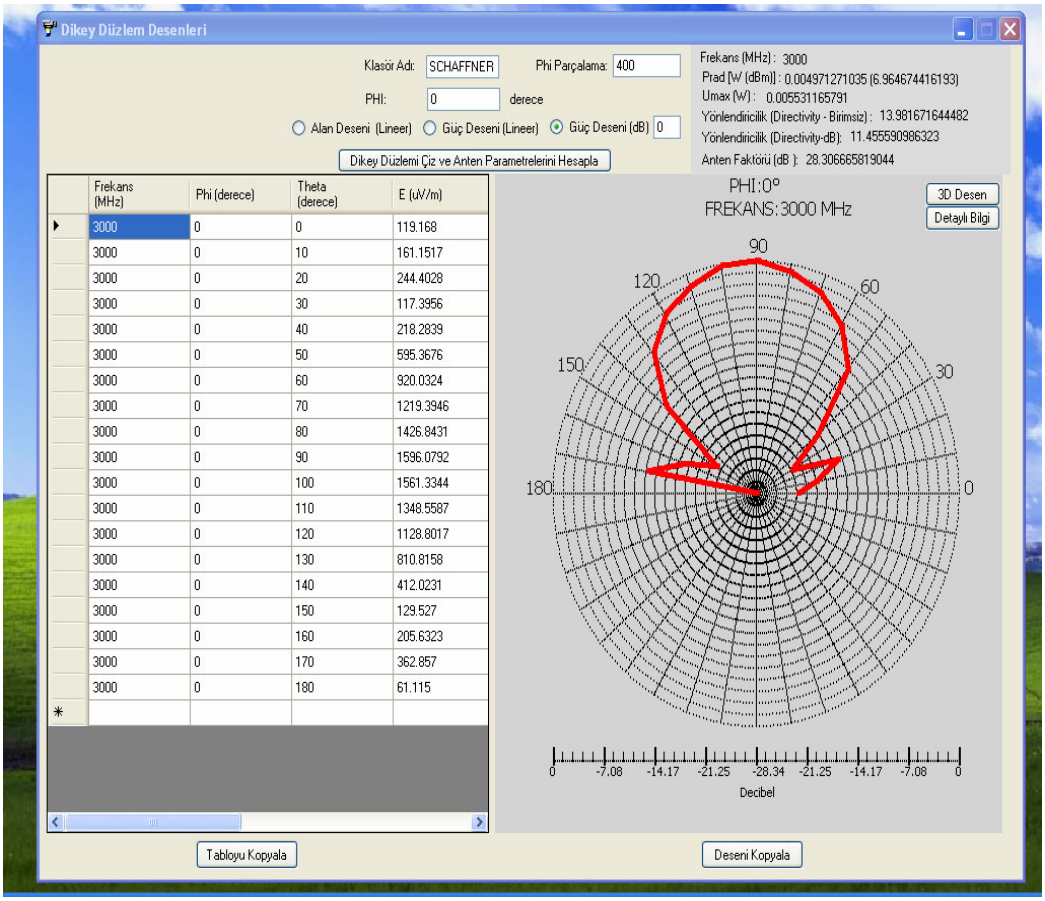
9.1.3. Schaffner marka horn anten 3 GHz desen ölçümleri



Şekil 9.7: Schaffner horn anten, 3 GHz yatay düzlem grafiği (θ=90^o, 0^o≤ϕ≤360^o, logaritmik skala)



Şekil 9.8: Schaffner marka horn antenin 3 GHz için üç boyutlu deseni

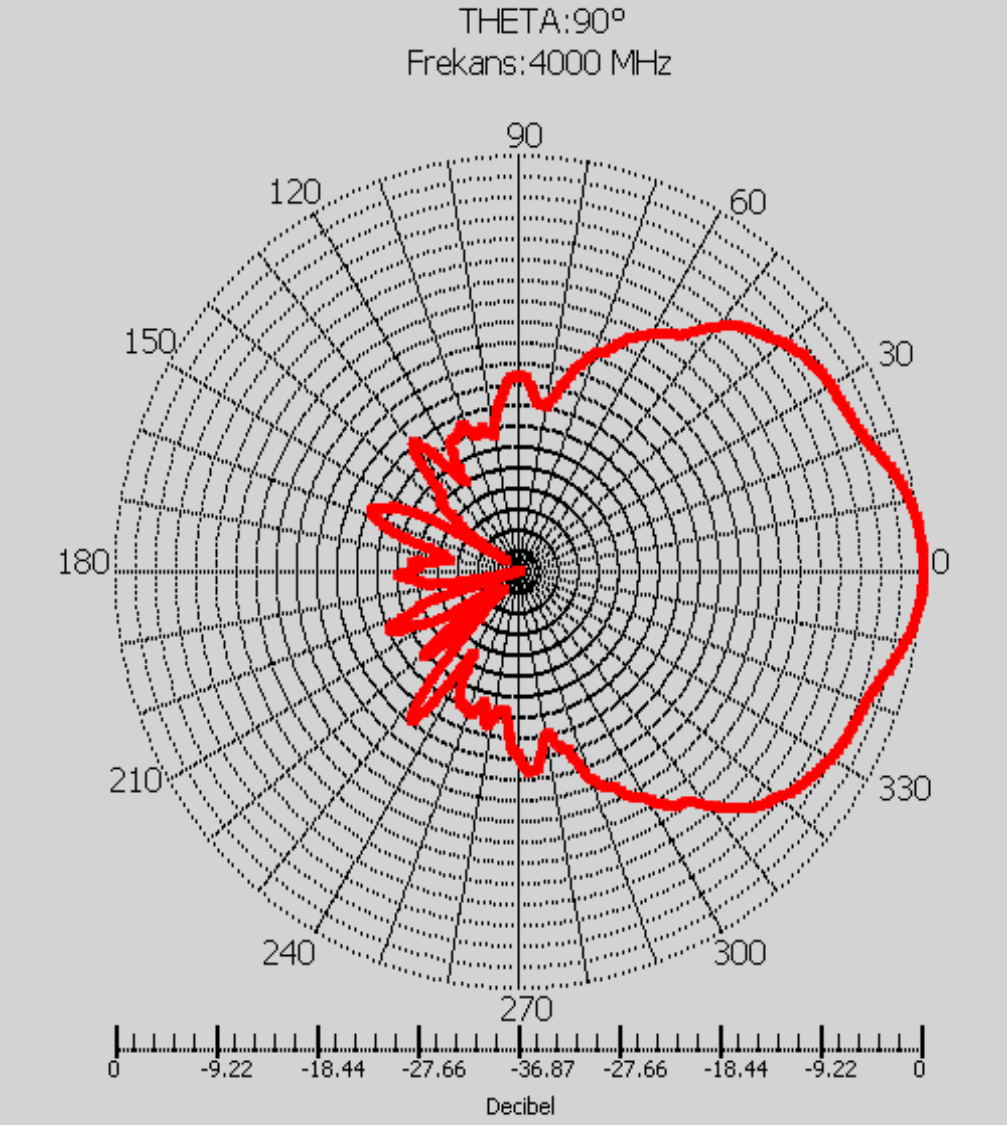


Şekil 9.9: Schaffner marka horn antenin 3 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri

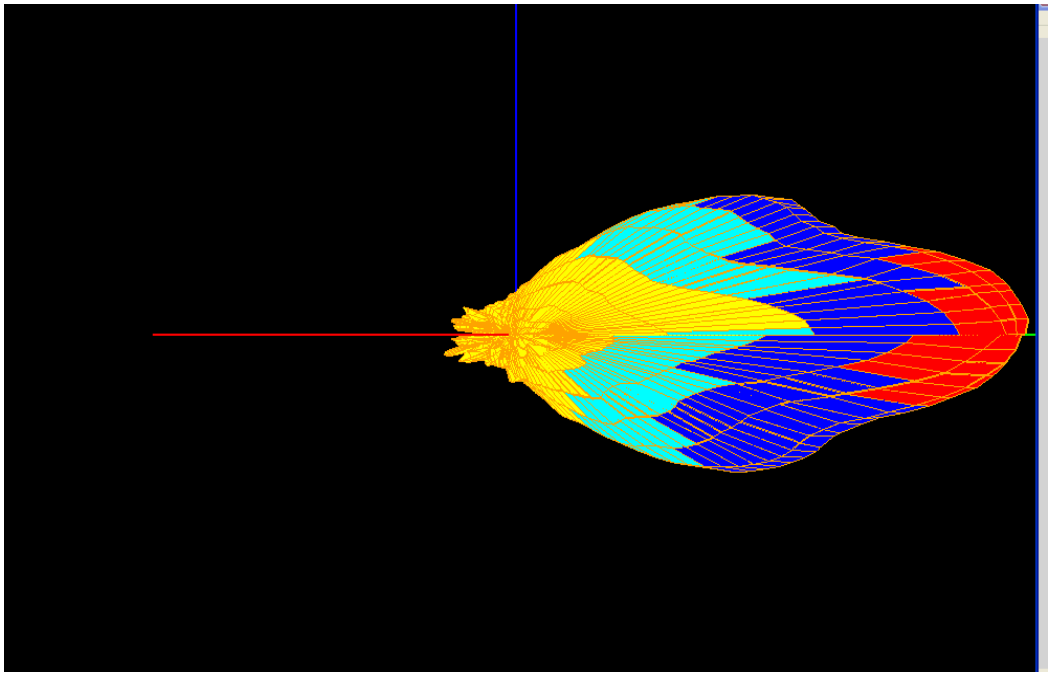
Tablo 9.4: Schaffner horn anten 3 GHz desen ölçüm sonuçları

Frekans (MHz)	3000
P_{rad} *(W),* Işınan Güç	0.0049
P_{rad} *(dBm)*, Işınan Güç	6.96
U_{max} *(W)*, Maksimum Işıma Şiddeti	0.0055
D_o (birimsiz), Maksimum Yönlendiricilik	13.98
D_o (dB), Maksimum Yönlendiricilik	11.45

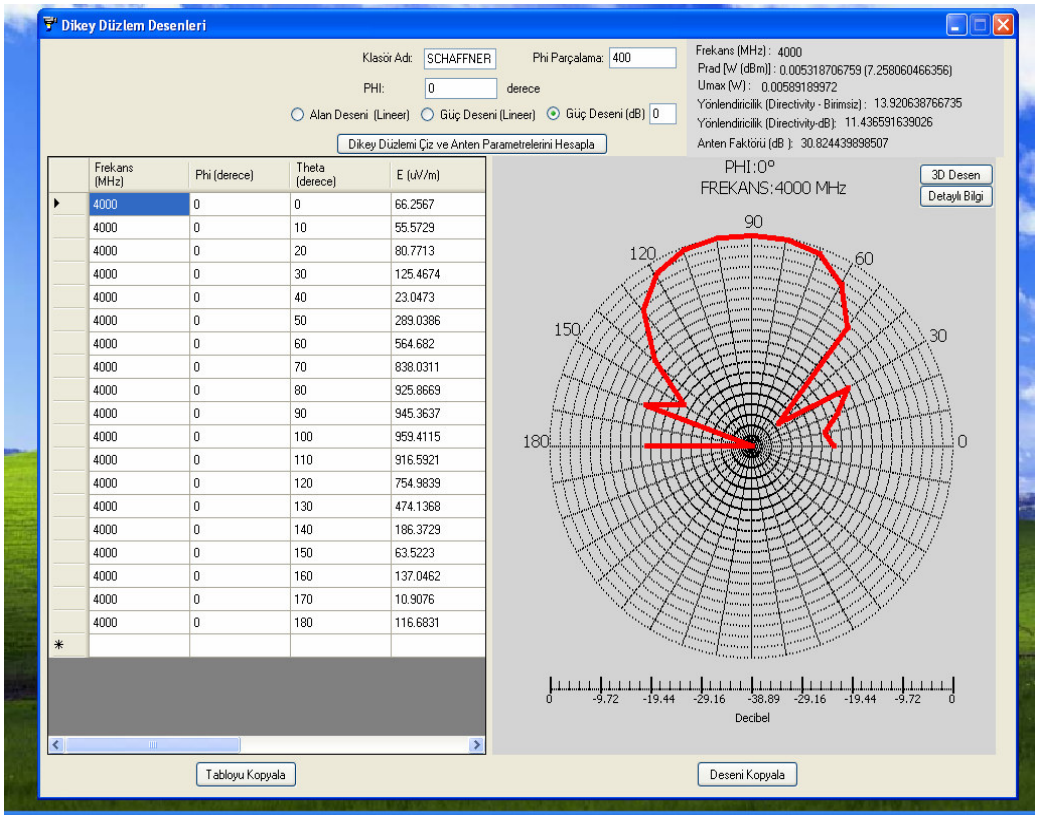
9.1.4. Schaffner marka horn anten 4 GHz desen ölçümleri



Şekil 9.10: Schaffner horn anten, 4 GHz yatay düzlem grafiği (θ=90°, 0°≤ϕ≤360°, logaritmik skala)



Şekil 9.11: Schaffner marka horn antenin 4 GHz için üç boyutlu deseni

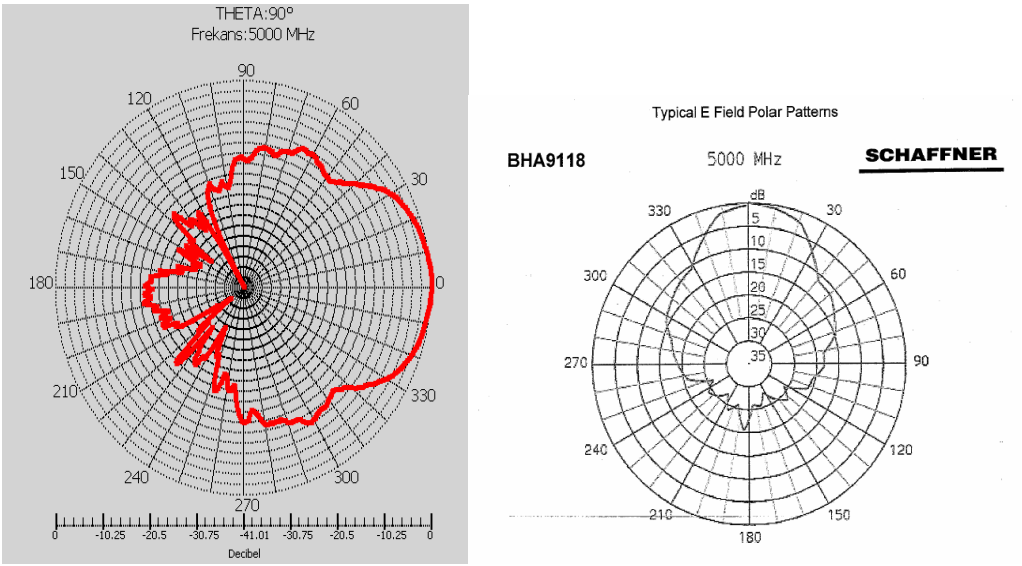


Şekil 9.12: Schaffner marka horn antenin 4 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri

Tablo 9.5: Schaffner horn anten 4 GHz desen ölçüm sonuçları

Frekans (MHz)	4000
P_{rad} *(W),* Işınan Güç	0.0053
P_{rad} *(dBm)*, Işınan Güç	7.25
U_{max} *(W)*, Maksimum Işıma Şiddeti	0.0058
D_o (birimsiz), Maksimum Yönlendiricilik	13.92
D_o (dB), Maksimum Yönlendiricilik	11.43

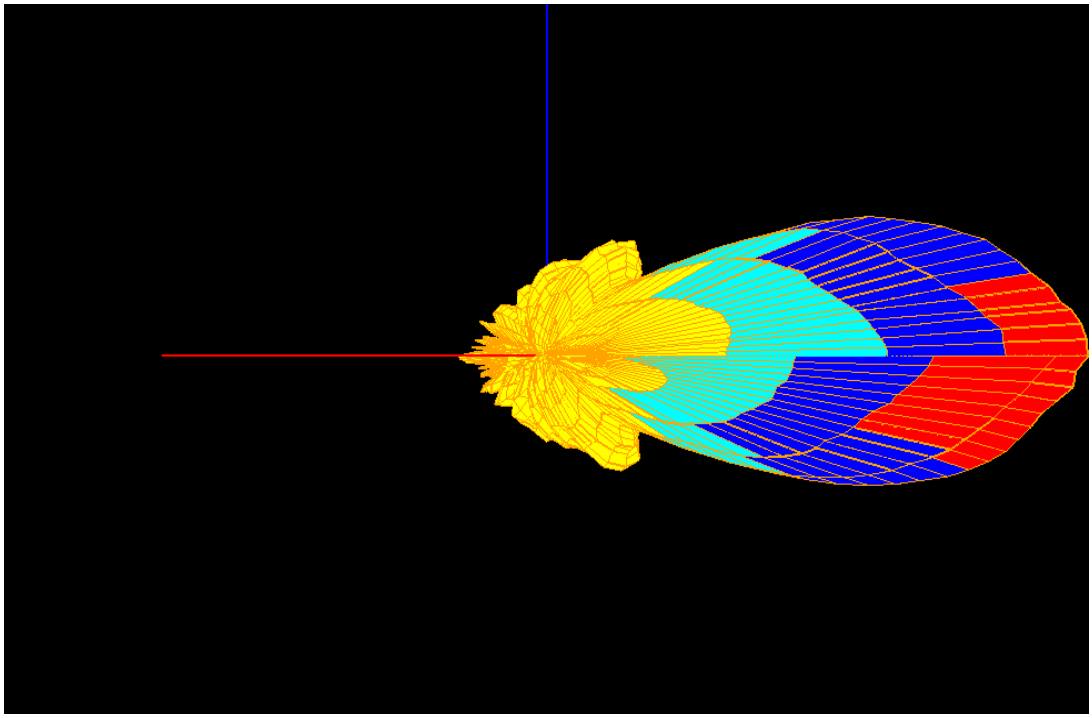
9.1.5. Schaffner marka horn anten 5 GHz desen ölçümleri



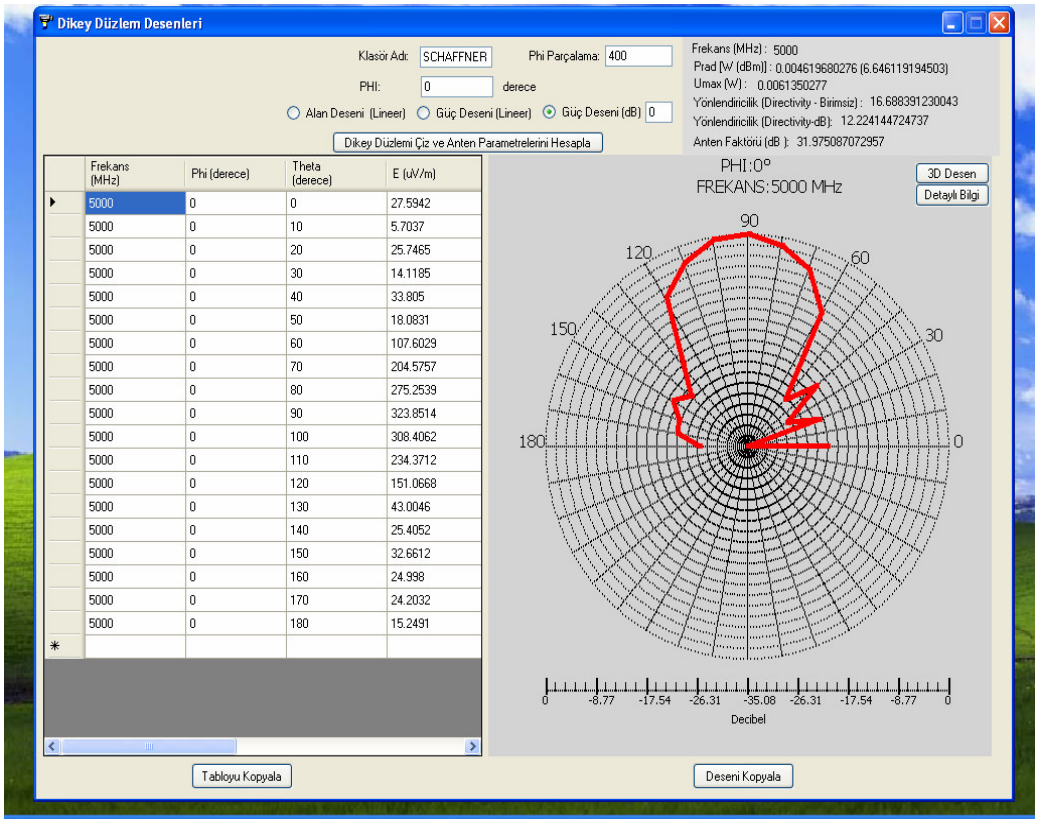
(a) (b)

Şekil 9.13: Schaffner horn anten, 5 GHz yatay düzlem desenleri (θ=90°, 0°≤ϕ≤360°, logaritmik skala)
(a) : Tasarlanan yazılım ile bulunan sonuç
(b) : Üretici deklerasyonu

Not: En düşük seviye noktaları hariç 5 GHz içinde iyi bir uyumluluk göze çarpıyor. En düşük seviye noktalarındaki farklar ise muhtemelen Schaffnerin seri üretimindeki her anteninin desenini ölçmeyip sadece tipik değerler yayınlamasından kaynaklanıyor. Yada, bu daha büyük bir ihtimal ki, Schaffner ölçümlerinde açı hassasiyetini kaba bıraktığı için desen bilgisinin arka loblarındaki keskin ve ince detaylar yitirilmiş. Schaffnerin ürettiği desene bakıldığında yaklaşık 10 derece phi adımı ile yapılmış izlenimi vardır. Bizim kendi yazılımımız ile ise ölçümler 1 derece hassasiyetle yapılmıştır.



Şekil 9.14: Schaffner marka horn antenin 5 GHz için üç boyutlu deseni

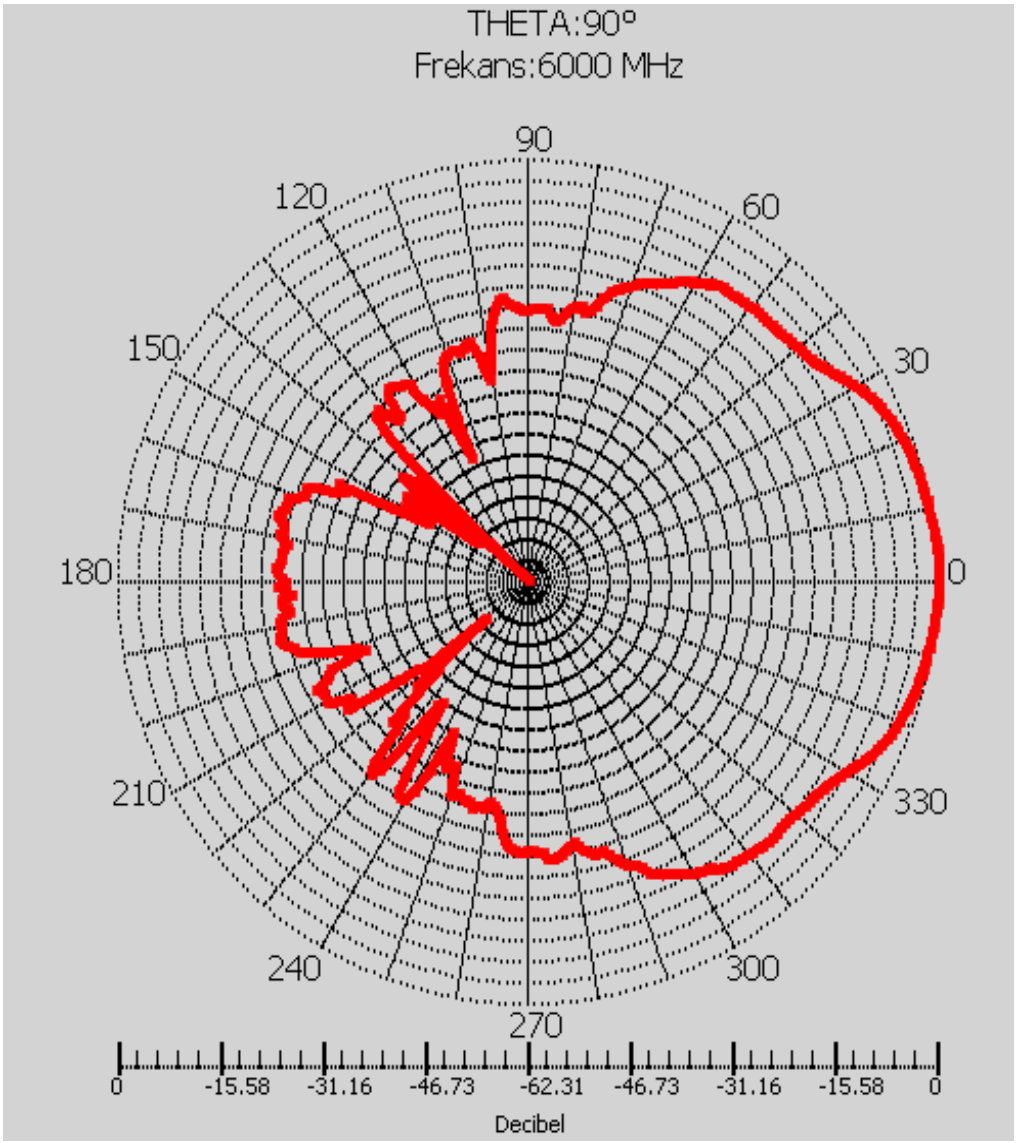


Şekil 9.15: Schaffner marka horn antenin 5 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri

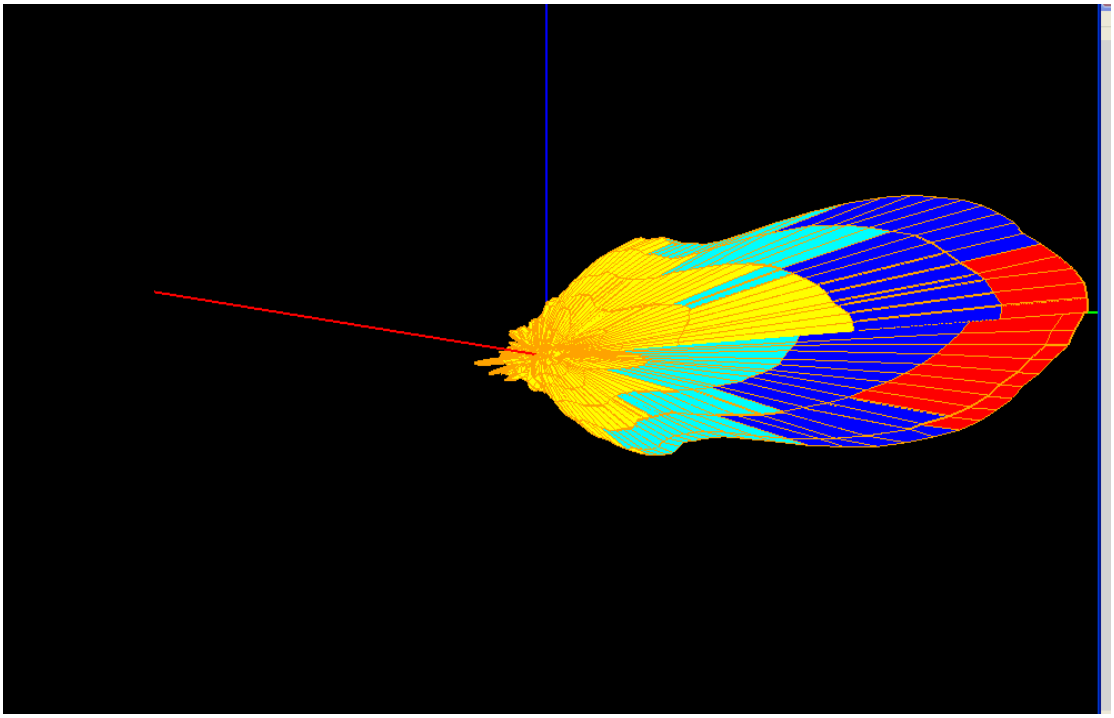
Tablo 9.6: Schaffner horn anten 5 GHz desen ölçüm sonuçları

Frekans (MHz)	5000
P_{rad} *(W),* Işınan Güç	0.0046
P_{rad} *(dBm)*, Işınan Güç	6.64
U_{max} *(W)*, Maksimum Işıma Şiddeti	0.0061
D_o (birimsiz), Maksimum Yönlendiricilik	16.68
D_o (dB), Maksimum Yönlendiricilik	12.22

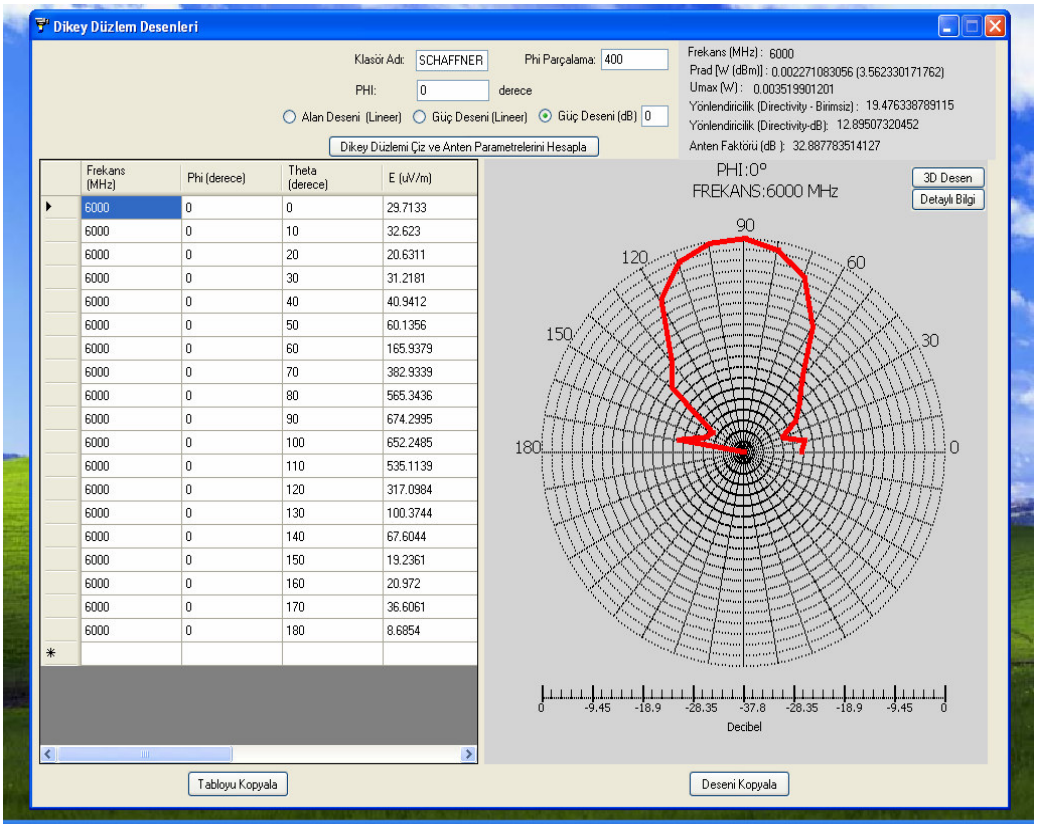
9.1.6. Schaffner marka horn anten 6 GHz desen ölçümleri



Şekil 9.16: Schaffner horn anten, 6 GHz yatay düzlem grafiği $\theta=90^o$, $0^o \leq \phi \leq 360^o$, logaritmik skala)



Şekil 9.17: Schaffner marka horn antenin 6 GHz için üç boyutlu deseni



Şekil 9.18: Schaffner marka horn antenin 6 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 180^o$, logaritmik skala) ve tespit edilen diğer anten parametreleri

Tablo 9.7: Schaffner horn anten 6 GHz desen ölçüm sonuçları

Frekans (MHz)	6000
P_{rad} *(W),* Işınan Güç	0.0022
P_{rad} *(dBm)*, Işınan Güç	3.56
U_{max} *(W)*, Maksimum Işıma Şiddeti	0.0035
D_o (birimsiz), Maksimum Yönlendiricilik	19.47
D_o (dB), Maksimum Yönlendiricilik	12.89

9.1.7. ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 standartlarının karşılaştırılması

Daha önce bahsedildiği üzere IEEE ANSI C63.5 standardı üç anten yöntemi, antenlerin mutlak kazançları yerine ana hedef olarak anten faktörünü hesaplamaktadır ve öngördüğü formüller aşağıdaki gibidir ve tamamen anten faktörünü hedef almaktadır. Açıkça söylemek gerekirse, IEEE ANSI C63.5 üç anten yönteminde mutlak kazançtan hiç söz edilmemesine rağmen, tüm kalibrasyon ve test laboratuarları (9.2) eşitliğini kullanarak mutlak kazancı anten faktöründen üretmektedirler ve kullanmaktadırlar. Üç anten yöntemi formülleri tekrar hatırlatılır ise,

$$A_1 = A_{1_uygulanan} - A_{1_okunan} - A_{1_yol}$$

$$A_2 = A_{2_uygulanan} - A_{2_okunan} - A_{2_yol}$$

$$A_3 = A_{3_uygulanan} - A_{3_okunan} - A_{3_yol} \qquad (9.1)$$

$$AF_1 = 10\log f_{MHz} - 24.6 + 0.5\left[E_D^{\max} + A_1 + A_2 - A_3\right]$$

$$AF_2 = 10\log f_{MHz} - 24.6 + 0.5\left[E_D^{\max} + A_1 + A_3 - A_2\right]$$

$$AF_3 = 10\log f_{MHz} - 24.6 + 0.5\left[E_D^{\max} + A_2 + A_3 - A_1\right]$$

olur. Eşitlik (9.1)' de adı geçen tüm parametreler Bölüm 3' te tanımlanmış idi.

Anten faktöründen mutlak kazanca geçiş formülü 50 Ω alıcı için,

$$G = 20log\ (f_{MHz}) - AF - 29.79 \qquad (9.2)$$

dir.

Ana hedefi anten faktörü olan bir standarttan elde edilen anten faktörü sonuçlarının eşitlik (9.2) ile mutlak kazanca dönüştürülmesi ne kadar doğrudur? Bunu araştırabilmek için ANSI IEEE 149 standardında anlatılan ve direkt olarak mutlak kazancı hedef alan ölçüm yöntemi ile ANSI IEEE C63.5 yönteminin karşılaştırmasını yapacağız.

Bu ANSI IEEE 149 mutlak kazanç ölçüm yöntemi, mutlak kazancı hesaplar iken Bölüm 4' te anlatıldığı üzere (9.3) eşitliğini ve bundan çıkarılan (9.4) eşitliklerini kullanır. (9.3) eşitliği kullanılarak, 3 antenin sırasıyla karşılıklı konulması ile bulunan 3 denklemin basitçe çözümü üç antenin ayrı ayrı mutlak kazançlarını verecektir. Bu yöntemde, ölçüm sırasında anten girişlerinde 10 dB zayıflatıcılar kullanılarak empedans uyuşmazlığı ihmal edilebilir seviyelere getirilmeye çalışılır.

$$P_{r2} = \frac{P_{t1}}{4\pi R^2} G_{o1} G_{o2} \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{9.3}$$

(9.3) eşitliğinden elde edilen denklemler,
(a-b, a-c ve b-c anten çiftleri için)

$$(G_a)_{dB} + (G_b)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right)$$

$$(G_a)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}}\right) \tag{9.4}$$

$$(G_b)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}}\right)$$

olarak verilmektedir. Eşitliklerde görülen tüm parametreler Bölüm 4' te belirtilmiş idi.

Şimdi, bu 3 antene ait mutlak kazançlar hem IEEE ANSI C63.5 hem de ANSI IEEE 149 uyarınca bulalım. Sonuçlar Schaffner anteni için Tablo 9.8' de sunulmuştur. Diğer iki antenin sonuçları, yardımcı antenler oldukları için, şu an için ilgilenmiyoruz. Ama Schaffner anteni ile birlikte bu iki yardımcı anten için de tüm bilgilerin elde edildiği unutulmamalıdır.

Tablo 9.8: Schaffner horn anteni için ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 karşılaştırılması

SCHAFFNER BHA9118			-YAZILIM- IEEE C63.5 Üç Anten Yöntemi		-YAZILIM- IEEE 149 Mutlak Kazanç Ölçüm Yöntemi	Mutlak Kazanç Farkları (dB)
Frekans (GHz)	Anten	Üretici / Model	AF (dB/m)	G_o (dB)	G_o(dB)	
1	Horn	Schaffner BHA9112	24.499	5.711	5.733	0.022
2	Horn	Schaffner BHA9112	27.091	9.14	9.162	0.022
3	Horn	Schaffner BHA9112	29.866	9.886	9.908	0.022
4	Horn	Schaffner BHA9112	32.448	9.803	9.826	0.023
5	Horn	Schaffner BHA9112	33.764	10.426	10.448	0.022
6	Horn	Schaffner BHA9112	34.481	11.292	11.314	0.022

Bulunan sonuçlar şunu gösteriyor ki ANSI IEEE C63.5 üç anten yöntemi ile bulunan anten faktörlerini kullanarak (9.2) eşitliği ile hesaplanan mutlak kazançlar, ANSI IEEE 149 standardı uyarınca yapılan analizin ürettiği mutlak kazançlarla tamamen uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sonuç, mutlak kazanç ölçümünde, ANSI IEEE C63.5 üç anten yöntemi ile birlikte (9.2) eşitliğinin güvenle kullanılabileceği ve mutlak kazanca bu şekilde ulaşılabileceğini göstermiştir. Zaten bir çok kalibrasyon laboratuarı ANSI IEEE C63.5 standardından elde ettiği anten faktörü sonuçlarında n (9.2) eşitliğini kullanarak mutlak kazanç değerlerini de raporlarında sunmaktadırlar. Bu bölümde elde ettiğimiz sonucumuzu ileriki bölümlerde kullanacağız.

9.1.8. Anten desen ölçümü ve uluslararası standartlar ile ısıl kayıp ölçümü

Bu bölümde, geliştirilen yazılım kullanılarak, Schaffner marka BHA9118 model ve 9014 seri numaralı horn antenin anten desen ölçümü ile yönlendiriciliği ve ANSI IEEE C63.5 üç anten yöntemi ile de mutlak kazancı bulunacaktır.

Üretecinin ilan ettiği değerler ile tam uyumluluk bulunması sonrası geliştirilen yazılım aracılığı ile her iki yöntemden elde edilen sonuçlar birbirlerine oranlanarak anten üzerinde harcanan ısıl kayıplar decibel biriminde tespit edilecektir. Bu oranlama işlemi decibel biriminde (9.5) eşitliğinde gösterildiği üzere çıkarma işlemi olarak yorumlanır.

İlgili eşitlik,

$$\text{Isıl Kayıp}(T_{D\text{-}G})(\text{dB}): \text{Yönlendiricilik}(D_o)(\text{dB}) - \text{Mutlak Kazanç}(G_o)(\text{dB}) \quad (9.5)$$

olarak verilir.

Isıl kayıp için $T_{D\text{-}G}$ ifadesinin kullanılma nedeni bu ısıl kayıp değerinin yönlendiricilik ve mutlak kazancın farkından elde ediliyor olmasıdır.

Bu bölümdeki hedeflere ulaşmadan önce şunları bir daha vurgulamak gerekir ,

- Desen ölçümü ile elde edilen değer aslında kazanç olmayıp sadece yönlendiriciliktir(D_o). Bu değer anten üzerinde harcanan ısıl kayıpları ve anten girişindeki empedans uyuşmazlığından kaynaklanan yansıma kayıplarını içermemektedir. IEEE mutlak kazanç tanımına sadece anten üzerindeki ısıl kayıpları dahil edip, empedans uyuşmazlıklarından kaynaklanan kayıpları dahil etmediğinden hesaplarımızda bizde bu kurala uyacağız. (Bazı kaynaklar mutlak kazanca empedans uyuşmazlığından kaynaklanan kayıpları da dahil etmektedir.)
- ANSI IEEE C63.5 üç anten yöntemi ile elde edilen kazanç değeri (G_o) Bölüm 9.1.7' de ispatlandığı üzere mutlak kazanç olup, anten üzerinde harcanan ısıl kayıpları da içermektedir. Standart tarafından önerilen önlemler ile bu kazanç, empedans uyuşmazlığından kaynaklanan yansıma kayıplarını içermemektedir.

- Nihai olarak, yazılımın anten desen ölçümü ile ürettiği decibel biriminde yönlendiricilik değeri ile üç anten yöntemi ile ürettiği mutlak kazançlar arasındaki farkın kesinlikle anten üzerinde harcanan ısıl kayıplar olacağını söyleyebiliriz. Ayrıca Bölüm 9.1.11' de ısıl kayıp değerleri, havadaki P_{rad}' ın ölçülmesi sonrası $P_{net} - P_{rad}$ formülü ile bulunup bu bölümde elde edilen ısıl kayıplar ile de ayrıca karşılaştırılacaktır.

Bu bölümde ısıl kayıpları ($T_{D\text{-}G}$),

$$T_{D\text{-}G}(\text{Isıl Kayıplar})(\text{dB}) = D_o(\text{dB}) - G_o(\text{dB}) \tag{9.6}$$

eşitliği ile bulacağız.

Tablo 9.9: Schaffner horn anteni için Yönlendiricilik(D_o) ve Mutlak Kazanç (G_o) tablosu

SCHAFFNER BHA9112		YAZILIM 3-D Desen Ölçümü ile	YAZILIM IEEE C63.5 Üç Anten Yöntemi ile		Üretici Spekleri	
Frekans (GHz)	Üretici/ Model	Yönlendiricilik D_o (dB)	AF (dB/m)	G_o (dB)	AF (dB/m)	G_o (dB)
1	Schaffner BHA9112	7.460	24.499	5.711	24.37	5.83
2	Schaffner BHA9112	10.860	27.091	9.14	27.28	8.94
3	Schaffner BHA9112	11.440	29.866	9.886	29.94	9.80
4	Schaffner BHA9112	11.422	32.448	9.803	32.62	9.62
5	Schaffner BHA9112	12.230	33.764	10.426	33.01	11.16
6	Schaffner BHA9112	12.980	34.481	11.292	34.27	11.49

Tablo 9.9' da Schaffner anteni için yazılımın verdiği sonuçlar ile üretici speklerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Tablo 9.10' da ise Schaffner anteni için, yazılımın anten desen ölçümü ile bulduğu yönlendiricilik değeri ile ANSI IEEE C63.5 üç anten yöntemi ile bulduğu mutlak kazanç değerleri arasında farklar gösterilmiştir. Bu fark anten üzerinde harcanan ısıl kayıplardır.

Tablo 9.9' da elde edilen değerleri kullanarak Tablo 9.10' da Schaffner anteni için ısıl kayıpları ($T_{D\text{-}G}$) bulalım.

Tablo 9.10: Schaffner anteni için her iki yöntemden elde edilen değerlerin farkı ve ısıl kayıp

Frekans (GHz)	$T_{D\text{-}G} = Do - G_o$ (dB) (Isıl Kayıp)
1	1.749
2	1.720
3	1.554
4	1.619
5	1.804
6	1.688

9.1.9. Net güç ve yansıma katsayısı ölçümü

Schaffner marka horn antenin girişinde elde edile yansıma katsayısı ölçüm sonuçları Tablo 9.11' de sunulmuştur.

Tablo 9.11: Schaffner anteni için gerilim yansıma katsayısı (Γ) ölçümü

Frekans (GHz)	P_{fwd} (W)	P_{rvs} (W)	P_{net} (W)	Gerilim Yansıma Katsayısı (Γ)
1	14.21	6.47	13.40	0.410
2	10.39	-6.56	10.3	0.142
3	8.44	-4.59	8.21	0.223
4	9.38	-5.22	9.22	0.186
5	7.28	-3.20	6.87	0.299
6	5.22	-2.76	4.46	0.399

9.1.10. Alıcı anten koaksiyel kablo ölçümleri

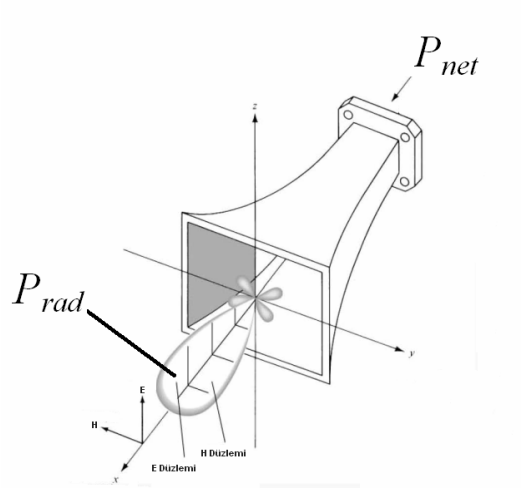
Tablo 9.12: Ölçümlerde kullanılan, alıcı anten ile spektrum analizörü arasındaki kablo kayıpları

Frekans (GHz)	Kullanılan Alıcı Yol*	Uygulanan (dBm)	Alınan (dBm)	Kablo Kaybı (dB)
1	Path1	0	-10.88	10.88
2	Path1	0	-15.74	15.74
3	Path1	0	-19.40	19.40
4	Path1	0	-23.20	23.20
5	Path1	0	-30.35	30.35
6	Path2	0	-20.62	20.62

* Path1 ve Path2 TÜBİTAK UME EMC laboratuarlarında yarı yansımasız oda içerisinde bulunan ölçüm yollarına ait etiketlerdir.

9.1.11. Anten desen ölçümü ile ısıl kayıp ölçümü

Bu bölümde Schaffner marka BHA9118 model, 9014 seri numaralı horn antenin ısıl kayıplarının bulunabilmesi için aşağıdaki ölçüm yöntemi kullanılacaktır.



Şekil 9.19. İletimsel ve dielektriksel ısıl kayıpların ölçümü için ölçüm modeli

Bu yöntem uyarınca İletim ve Dielektrik Isıl Kayıplar(T_{Desen})(dB) = P_{net}(dBm)-P_{rad}(dBm) olacaktır. Bu bölümde elde edilen ısıl kayıpların T_{Desen} olarak ifade

edilmesinin nedeni anten desen ölçümü ile bulunuyor olmasıdır. Bu yöntem 3-D desen ölçümü ile çok benzer olup, desen ölçümünde deseni ölçülen anten genelde alıcı olarak kullanılırken (genellikle bu tavsiye edilir), P_{rad} ölçümünde ise deseni ölçülen anten verici olarak kullanılıp, bu anten karşısına anten faktörü bilinen kalibreli bir alıcı anten koyulmalıdır. Ayrıca alıcı anteni spektrum analizöre bağlayan koaksiyel kablonun kaybı tam olarak bilinmelidir. Birde spektrum analizör girişine bir 3 dB zayıflatıcı takılarak spektrum analizör girişindeki uyuşmazlık yok edilmelidir. Bu amaçla daha önce deseni ölçülen anten bu kez verici konumuna alınmış ve karşısına kalibreli alıcı bir anten konulmuştur. Tablo 9.13 ve Tablo 9.14' te Schaffner horn antene uygulanan ölçümlerin sonuçları sunulmuştur.

Tablo 9.13: Schaffner anteni için P_{rad} ölçüm sonuçları ve ısıl kayıplar

P_{rad}'ı Ölçülen Anten / Frekans	Alıcı Anten (Yardımcı)	Yansıma Katsayısı (Γ)	Alıcı Anten AF + Kablo Kaybı (dB)	P_{fwd} (dBm) / P_{rvs} (dBm)	P_{net} (dBm)	P_{rad} (dBm)	Isıl Kayılar (T_{Desen}) (dB)
Schaffner 1 GHz	ARA	0.410	35.300	14.21 / 6.47	13.40	12.530	0.870
Schaffner 2 GHz	ARA	0.142	42.19	10.39 / -6.56	10.3	8.406	1.89
Schaffner 3 GHz	ARA	0.223	49.584	8.44 / -4.59	8.21	6.960	1.25
Schaffner 4 GHz	ARA	0.186	54.257	9.38 / -5.22	9.22	7.25	1.97
Schaffner 5 GHZ	ARA	0.2992	63.878	7.28 / -3.20	6.87	6.46	0.41
Schaffner 6 GHz	ARA	0.399	55.095	5.22 / -2.76	4.46	3.56	0.90

Not : Ölçümler sırasında; 1 GHz için işaret üreteci seviyesi: 20 dBm, Kullanılan alıcı kablo yolu: PATH1
2 GHz için işaret üreteci seviyesi: 20 dBm, Kullanılan alıcı kablo yolu: PATH1
3 GHz için işaret üreteci seviyesi: 20 dBm Kullanılan alıcı kablo yolu: PATH1
4 GHz için işaret üreteci seviyesi: 23 dBm, Kullanılan alıcı kablo yolu: PATH1
5 GHz için işaret üreteci seviyesi: 23 dBm, Kullanılan alıcı kablo yolu: PATH1
6 GHz için işaret üreteci seviyesi: 23 dBm, Kullanılan alıcı kablo yolu: PATH2

Tablo 9.14: "D_o(dB) – G_o (dB)" ile elde edilen ısıl kayıplar ile "P_{net}(dBm) - P_{rad}(dBm)" ölçümü ile elde edilen ısıl kayıplar arasındaki farklar

Frekans (GHz)	Anten	T_{D-G} (D_o-G_o) (dB)	T_{Desen} ($P_{net} - P_{rad}$) (dB)	Fark (dB)
1	Schaffner BHA9118	1.749	0.87	0.879
2	Schaffner BHA9118	1.720	1.89	0.17
3	Schaffner BHA9118	1.554	1.25	0.304
4	Schaffner BHA9118	1.619	1.97	-0.351
5	Schaffner BHA9118	1.804	0.41	1.394
6	Schaffner BHA9118	1.688	0.90	0.788

10. SONUÇLAR

Bu bölümde artık hiçbir uluslararası standart veya yöntem kullanmadan kendi geliştirdiğimiz desen ölçüm sistemi ile mutlak kazanca ulaşılacaktır. Tablo 10.1' de verilen final tablomuzu, tüm ölçümleri eksiksiz olarak yapılan Schaffner anten için yapılan ölçümlere dayandıracağız. Bu amaçla Bölüm 9.1' de desen ölçümü ile bulunan maksimum yönlendiricilik (D_o) yine aynı bölümde anten desen ölçümü ile elde edilen ısıl kayıplar(T_{Desen}) birbirinden çıkarılarak bu tez çalışmasının asıl amacı olan mutlak kazanca sadece anten desen ölçümü ile ulaşılacaktır. Elde edilen bu final sonuç IEEE ANSI C63.5 ve ANSI IEEE 149 uluslararası standartlarının ürettiği değerler ile karşılaştırılacaktır. Bu karşılaştırma aşağıda Tablo 10.1' de yapılmıştır.

Tablo 10.1: Tez kapsamında ulaşılan final sonuçlar

Frekans (GHz)	Anten	Anten Desen Ölçümü			ANSI C63.5 (ve ANSI 149) Üç Anten Yöntemi	Fark (dB)
		D_o(dB)	T_{Desen} (dB)	G_o (dB) (D_o-T_{desen})	G_o (dB)	
1	Schaffner	7.460	0.870	6.59	5.83	0.76
2	Schaffner	10.86	1.89	8.97	8.94	0.03
3	Schaffner	11.440	1.250	10.19	9.80	0.39
4	Schaffner	11.422	1.970	9.452	9.62	-0.168
5	Schaffner	12.230	0.410	11.82	11.16	0.66
6	Schaffner	12.980	0.90	12.08	11.49	0.59

Anten Desen Ölçümü için hesapladığımız 1.74 dB belirsizlik ile elde sonuçlar şunu net gösteriyor ki anten desen ölçümü ile ulaşılan mutlak kazanç, IEEE ANSI C63.5 ve ANSI IEEE 149 gibi uluslararası standartlarda bahsedilen standart yöntemler ile ± 1 dB'yi aşmayan farklar ile aynı sonuçları vermektedir ve anten desen ölçüm yöntemi ile mutlak kazanç hesabı bu uluslararası yöntemlere iyi bir alternatiftir.

Geliştirilen yazılım ve anten desen ölçümü ile ulaşılan mutlak kazanç bilgisinin, IEEE ANSI C63.5 ve ANSI IEEE 149 ile ulaşılan mutlak kazanç bilgisine göre en büyük avantajı, bu yöntemin sadece antenin maksimum ışıma yönünde değil, istenilen her yönde (θ=60^o, ϕ=30^o gibi) mutlak kazanç ve yönlendiricilik bilgilerini verebilmesidir, çünkü geliştirilen yazılım sadece maksimum ışıma yönündeki değil, tüm 3 boyutlu koordinatlardaki bilgileri tutabilmektedir. Anten desen ölçümü ile mutlak kazanç elde edilmesinin diğer en büyük avantajı anten üzerinde harcanan ısıl kayıpları da decibel biriminde yan ürün olarak sunabilmesidir. ANSI IEEE C63.5 v.b uluslararası standartlar ise sadece antenin maksimum ışıma yönündeki mutlak kazanç bilgisine ulaşıp, diğer yönlerdeki (theta=60^o, phi=30^o gibi) kazanç bilgilerini verememektedir. Ayrıca bu iki uluslararası standarttaki yöntemler yönlendiricilik hakkında yine hiçbir bilgi veremezler ve anten üzerinde harcanan ısıl kayıp bilgilerine de ulaşamazlar.

Anten Desen Ölçümü ile mutlak kazanç elde edilmesinin tek dezavantajı süre olarak ANSI IEEE C63.5 ve ANSI IEEE 149 standartlarına göre daha uzun bir ölçüm süresi gerektirmesidir, fakat sonucunda elde edilen bilgi kapasitesi bu iki uluslararası standarda oranla oldukça yüksektir.

Final sonuç olarak şunu belirtebiliriz ki bu tez kapsamında tanıtılan anten desen ölçümü ve mutlak kazanç hesabı, anten hakkında çok detaylı ve kapsamlı bilgi edilmek istendiğinde ANSI IEEE C63.5 v.b uluslararası standartlara iyi bir alternatiftir.

KAYNAKLAR

1. Constantine A. Balanis, " Antenna Theory Analysis and Design", Third edition, ***Wiley-Interscience A John Wiley & Sons Inc. Publication***, 27-112, (2005).

2. Accredited Standards Committee on Electromagnetic Compatibility C63, "ANSI C63.5-2006 American National Standard Electromagnetic Compatibility-Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) Control-Calibration Antennas (9 kHz to 40 GHz)", Revision of ANSI C63.4-2004, ***IEEE***, 1-63, (2006).

2. Accredited Standards Committee on Electromagnetic Compatibility C63, "ANSI C63.5-1998 American National Standard Electromagnetic Compatibility-Emission Measurements in Electromagnetic Interference (EMI) Control-Calibration Antennas (9 kHz to 40 GHz)", Revision of ANSI C63.5-1998, ***IEEE***, 1-31, (1998).

4. IEEE Antenna Standards Committee, and Boles, M., A., "ANSI/IEEE Std 149-1979 IEEE Standard Test Procedures for Antennas", (Revision of IEEE Std 149-1965), ***IEEE***, 78-84, (1979).

5. United Kingdom Accreditation Service, "Lab34 The Expression of Uncertainty in EMC Testing ",First Edition, ***UKAS***, 1-36, (2002).

6. Ronald Coifman, Vladimir Rokhlin, Stephen Wandzuraz, "The Fast Multipole Method for the Wave Equation: A Pedestrian Prescription", ***IEEE Antennas and Propagation Magazine***, vol. 35, no.3, 9-11, (1993)

7. TÜBİTAK UME, "BEL01 Eğitim Dökümanı: Ölçüm ve Kalibrasyonlarda Belirsizlik Hesapları_ rev4", ***TÜBİTAK UME***, 1-67, (2006)

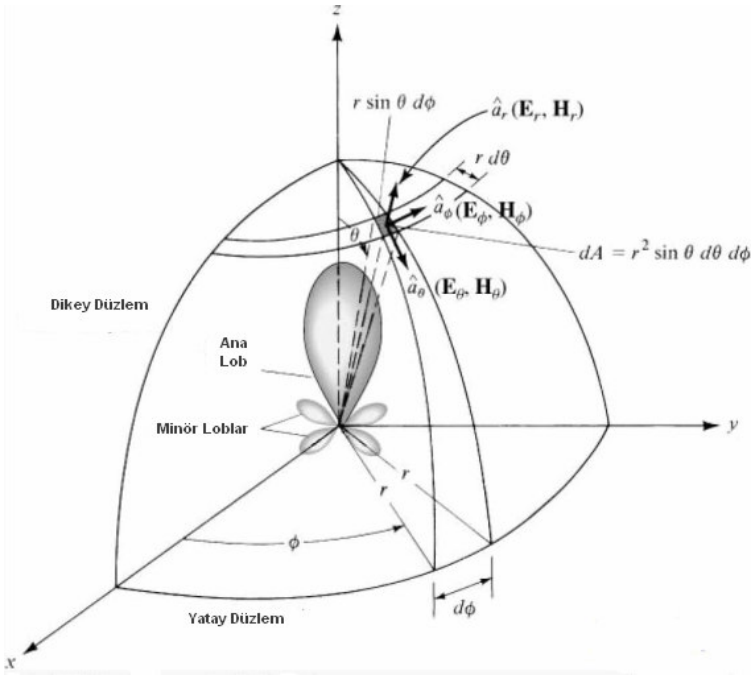
EKLER

EK-A

Bu bölümde tez kapsamımız ile doğrudan yada dolaylı ilişkili anten ve anten deseni hakkında bilgiler sunulmuştur [1]. Konunun anlatımı sırasında vektör ifadeleri skaler ifadelerden ayırmak için üst çizgiler kullanılmıştır.

A.1. Anten Deseni

İlk olarak "Anten Deseni" tanımlaması ile başlayalım. "Anten Deseni" küresel koordinatların bir fonksiyonunda bir antenin ışıma özelliklerinin grafiksel veya matematiksel gösterimi olarak tanımlanır. Bir çok durumda, yayınım deseni uzak alan bölgede tanımlanır ve koordinat parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Desen gösterimi için uygun koordinat seti Şekil A1'de gösterilmiştir.



Şekil A1: Desen gösteriminde kullanılan koordinat sistemi

Bu şekilde belli bir yarıçapta alınan elektrik ve manyetik alanının çizimi "Alan Genlik Deseni" olarak isimlendirilir. Diğer yandan sabit bir yarıçap boyunca güç yoğunluğunun uzaysal değişiminin grafiği "Güç Deseni" olarak isimlendirilir.

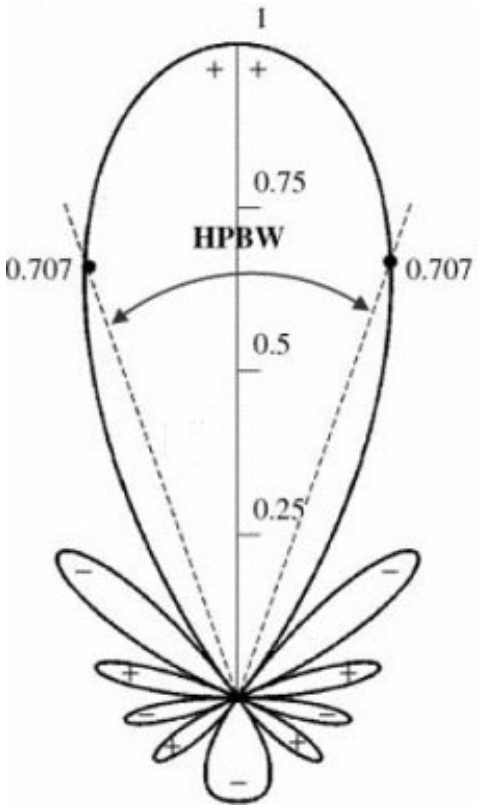
Genellikle alan ve güç desenleri maksimum değere göre normalize edilerek gösterilir. Aynı zamanda, güç desenleri genellikle logaritmik skalada decibel (dB) olarak çizilir. Logaritmik skala genellikle lineer skalaya göre tercih edilir çünkü desen grafiğindeki çok küçük değerdeki bölgeler, örneğin minör loblar, çok daha detaylı görülürler. Bir anten için 3 çeşit desen grafiği çizilebilir.

- Alan Deseni (Lineer Skala) : Bu tür grafikte, elektrik veya manyetik alanın şiddeti açısal uzayın bir fonksiyonu olarak gösterilir.
- Güç Deseni (Lineer Skala): Bu tür grafikte, elektrik veya manyetik alanın şiddetinin karesi açısal uzayın bir fonksiyonu olarak gösterilir.
- Güç Deseni (decibel): Bu tür grafikte, elektrik veya manyetik alanın şiddetinin karesi decibel biriminde açısal uzayın bir fonksiyonu olarak gösterilir.

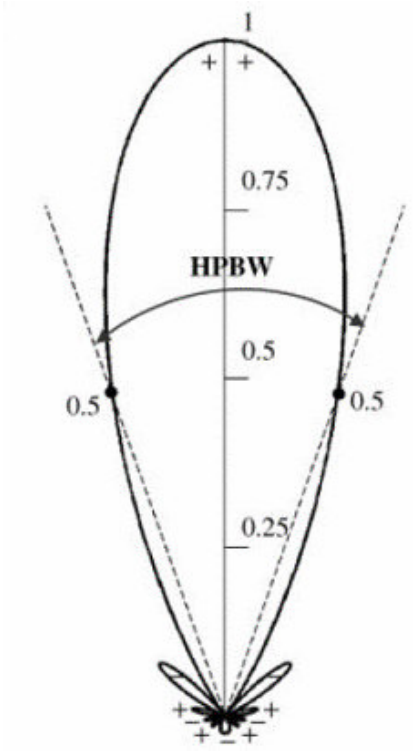
Aşağıda Şekil A2, Şekil A3 ve Şekil A4' te bu 3 türe ait desen grafikleri gösterilmektedir. Bu grafiklerde görülen "+" ve "-" işaretler loblar arasındaki polarizasyon değişimlerini gösterir.

Desende görülen maksimum gücün değerinin yarısına düştüğü noktalar arasındaki küçük açıya "Yarı Güç Işıma Açısı (Half Power Beam Width - HPBW)" adı verilir. Şekil A2' de görüldüğü üzere HPBW değeri alan deseni için maksimum değerin % 70.7' e indiği noktalar arasındaki küçük açıdır. Bir lineer güç deseni için ise maksimum değerin %50' sine düştüğü değerler arasındaki açıdır. Decibel güç deseni için ise maksimum değerin –3 dB azaldığı noktalar arasındaki açıdır. Tabii aynı antene ait her 3 tip grafikte aynı HPBW değerini verir.

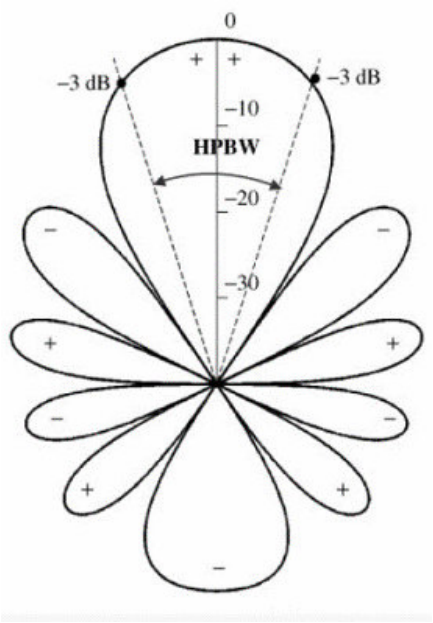
Pratikte, bir antenin üç boyutlu deseni, 2 boyutlu desenlerin seri ölçümünden çizilir. Bizim tez kapsamımızda yaptığımız tüm üç boyutlu desen ölçüm çalışmaları da bu şekilde yapılmıştır. Çalışmalarımızda ilk olarak yatay düzlem desenleri çıkartılmış daha sonra bu yatay düzlem desenleri birleştirilerek üç boyutlu desenler elde edilmiştir.



Şekil A2: Lineer skala elektrik alan deseni için HPBW gösterimi

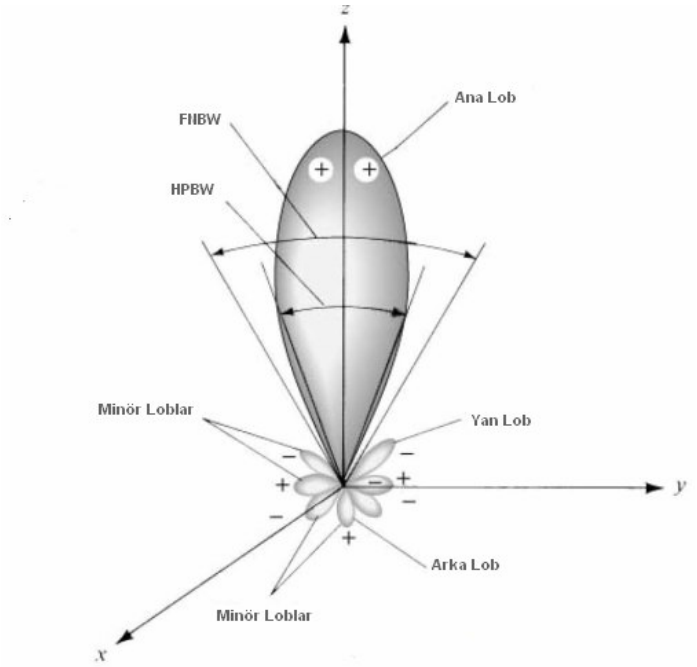


Şekil A3: Lineer skala güç deseni için HPBW gösterimi



Şekil A4: Logaritmik skala güç deseni için HPBW gösterimi

Anten desenleri lob adı verilen parçalardan oluşur. Bu loblar majör (veya ana), minör, yan ve arka lob isimleriyle alt parçalara ayrılır. Her bir lobun çevresi çok düşük seviyedeki ışıma yoğunluklarla kaplıdır. Zaten lobları birbirinden ayıran aralarındaki nerdeyse sıfıra yakın düşük seviyeli bölgelerdir. Şekil A5, 3 boyutlu simetrik bir desen örneğini göstermektedir.



Şekil A5: Üç boyutlu simetrik bir desen örneği

Ana lob maksimum ışıma yönünü içeren lobdur ve Şekil A5' deki örneğimizde $\theta=0^o$ dır. Bazı antenlerden birden fazla majör lob olabilir. Majör lob dışındaki tüm loblara minör lob denir. İstenen yön dışındaki tüm loblara yan lob adı verilir.

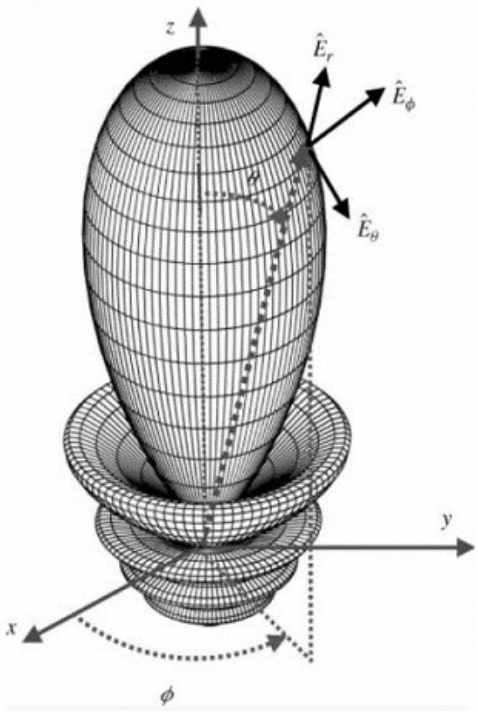
Arka lob ise, ana lob ile hemen hemen 180^o açı yapan lobdur. Genelde, ana lob dışındaki lobların (minör loblar) hiç birisi istenmemektedir ve minimum yapılmaya çalışılır. Genelde yan loblar, minör lobların en büyüğü olurlar. Genellikle minör lobların seviyeleri, ana loba olan decibel cinsinden olan farkla ifade edilir. Örneğin – 20 dB' lik veya daha küçük yan lob seviyeleri bir çok uygulama için istenen ve yeterli bir seviyedir.

-30 decibel' den daha düşük yan lob, çok dikkatli anten dizaynı gerektirir. Örneğin radar uygulamalarında çok düşük yan lob gereksinimi çok yüksektir, çünkü yan loblar yanlış hedef bildirimine sebep olabilirler.

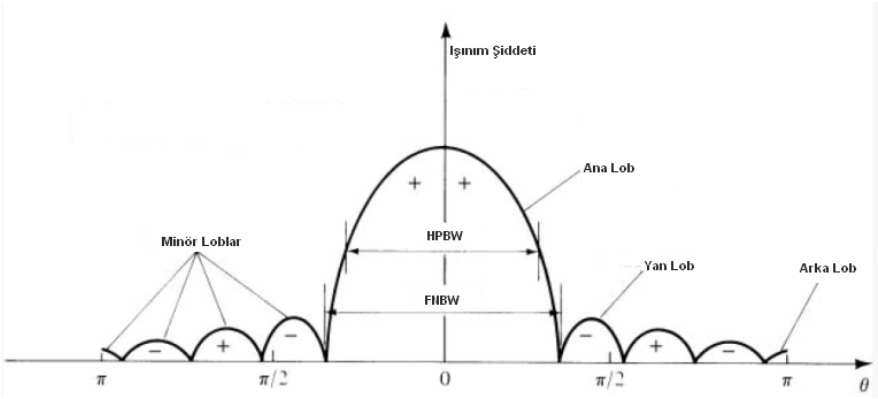
Şekil A6' de bir başka 3 boyutlu, lineer skalada çizilmiş uzak alan elektrik alan genlik deseni gösterilmiştir. Şekil A7' de ise aynı desenin iki boyutlu X-Y düzleminde gösterimi verilmiştir. Şekil A6' dan görüldüğü üzere örnek desenimizin bir ana lobu, dört adet yan ve bir adet arka lobu vardır. Desen üzerindeki herhangi bir nokta $r = r_c$ için E_r, E_θ, E_ϕ elektrik alan bileşenlerinin seviyesini göstermektedir. Uzak alan için, bilindiği üzere $E_r \approx 0$ olmakta ve diğer iki komponent elektrik alan seviyesini belirlemektedir.

Uzak alan bölgesi için $E_r \approx 0$ olmasında dolayı anten deseninin şekli artık mesafeden çok az etkilenir hale gelmektedir. Bu nedenle tez kapsamında yapılan çalışmalarımızda yaptığımız tüm ölçümlerde uzak alan koşulunun sağlanıyor olmasına dikkat edilmiştir. Fakat gerçek ölçümlerde hiçbir zaman uzak alan şartının ideal olarak sağlanamamasından dolayı, bununla ilgili belirsizlik bileşeninin ölçüm belirsizliğe hesabına eklenmesi gerekmektedir.

Tez kapsamımızda yaptığımız ölçümlerde kullandığımız horn antenler için uzak alan şartları Bölüm A.2' de sunulmuş olup antenin en büyük boyutuna ve çalışma frekansına bağlıdır.



Şekil A6: Üç boyutlu lineer skala desen örneği ve elektrik alan bileşenlerinin gösterimi



Şekil A7: Bir desenin iki boyutlu gösterimi

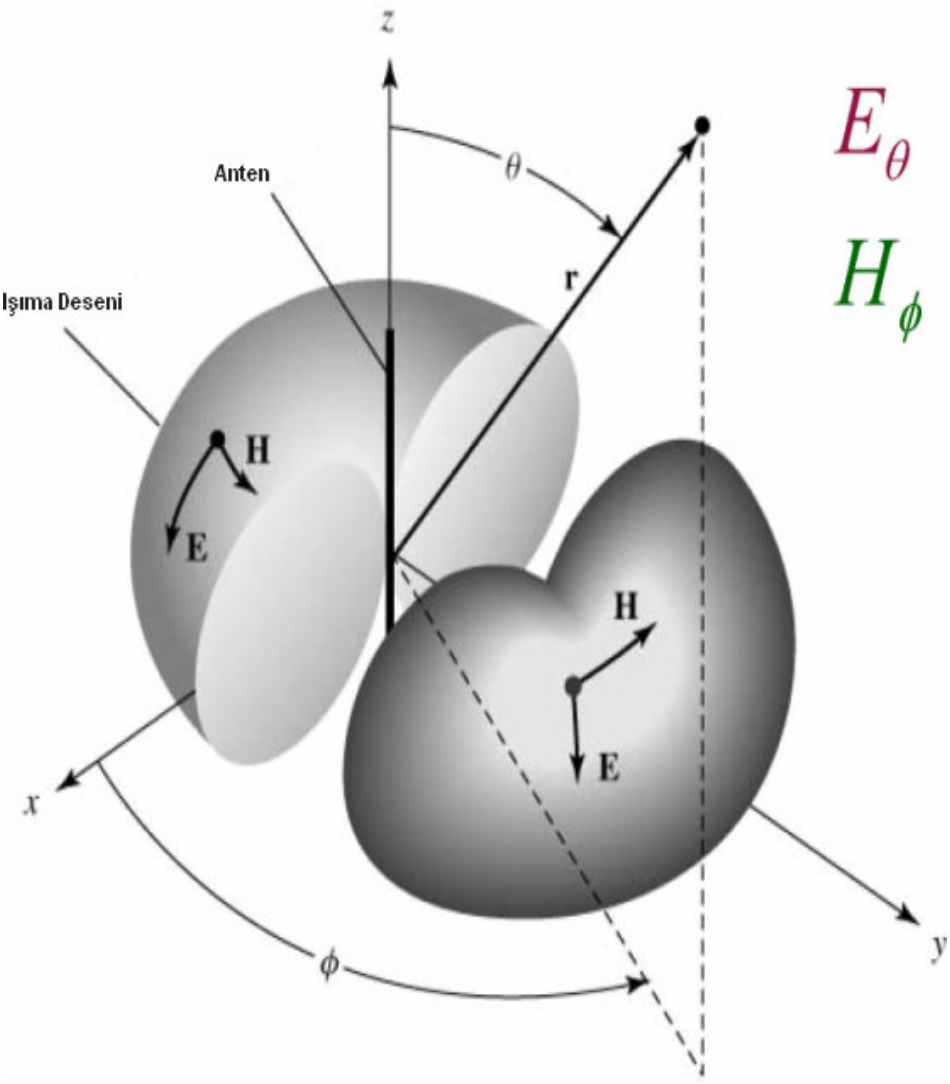
Bileşke elektrik alan için formül,

$$|E| = \sqrt{\left(|E_r|^2 + |E_\theta|^2 + |E_\phi|^2\right)} \tag{A1}$$

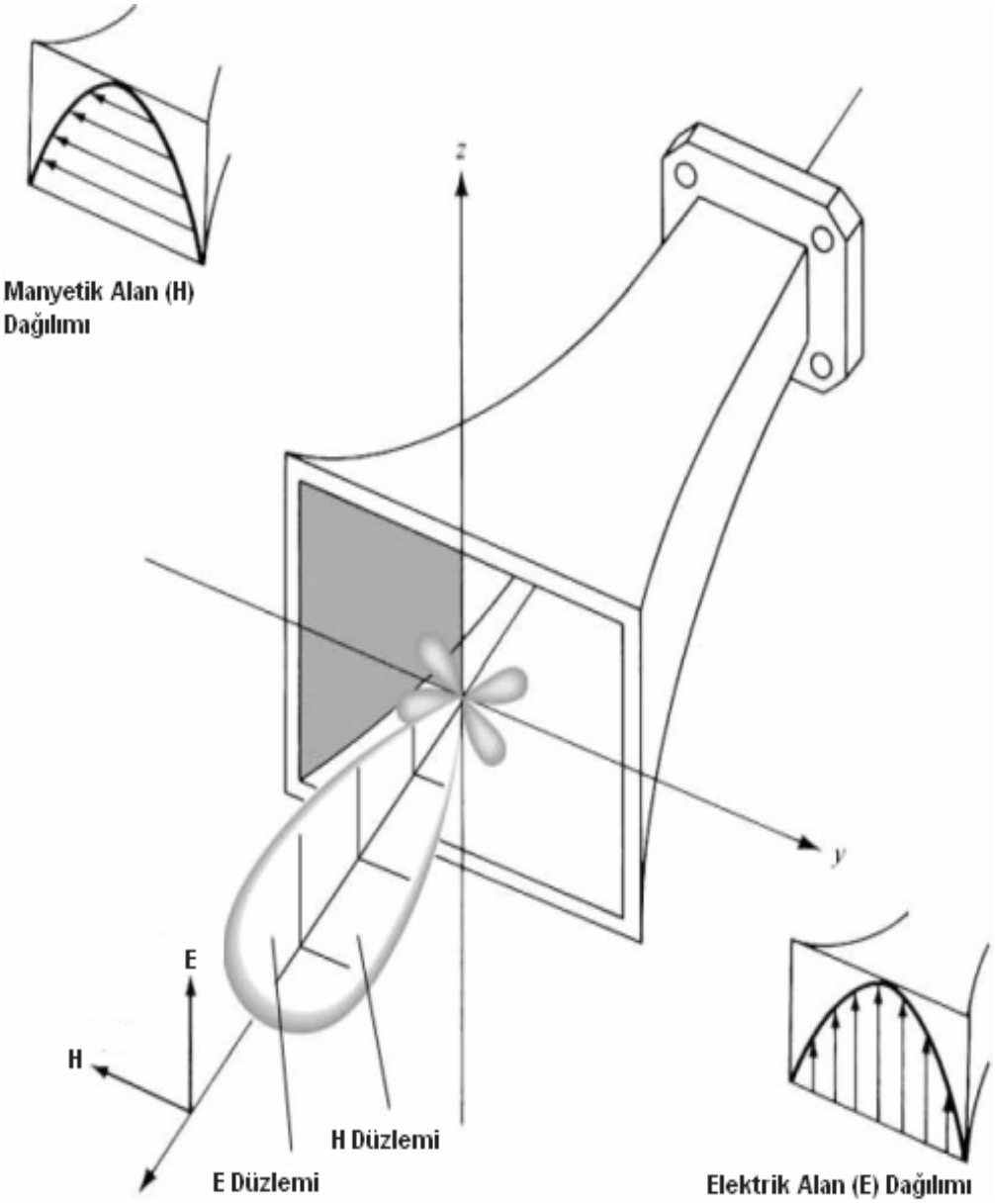
olacaktır.

Şimdi, bu noktada kısaca izotropik, yönsel (directional) ve tek düzlemde yönlü (omni-directional) desenlerin ne olduklarına bir bakalım. İzotropik anten, her yöne

eşit yayınım yapan kayıpsız bir antendir. İzotropik anten fiziksel olarak var olan bir anten olmamasına karşın gerçek antenlerin yönlendirme ile ilgili parametrelerini ifade ederken referans olarak kullanılır. Bir yönsel anten, elektromanyetik dalgayı bazı yönlerde diğer yönlere göre daha fazla alan veya gönderen antendir. Yönsel yayınım desenlerine ait anten örneği Şekil A9' da verilmiştir. Şekil A8' de verilen desen örneğinde ise, $\theta = \pi/2$ için yatay düzlemde yayın yoktur ama ϕ=sabit için dikey düzlemde yayın vardır. Bu tip desenlere tek düzlemde yönlü (omni-directional) desenler adı verilir. Bu tür desenler, verilen bir düzlem için yayın yapmaz iken (örneğimizde yatay düzlem), buna dik düzlemde (örneğimizde dikey düzlem) yayın yapar. Tek düzlemde yönlü desenler, yönsel desenlerin çok özel bir şeklidir.



Şekil A8: Tek düzlemde yönlü (omni-directional) desen örneği



Şekil A9: Yönlü bir anten ve deseni

Lineer polarize olmuş bir anten için, E düzlemi ve H düzlemi desenleri ifadesi sıklıkla kullanılır. E düzlemi, elektrik alan vektörünü içeren ve maksimum yayınımın olduğu düzlemdir. H düzlemi ise manyetik alan vektörünün bulunduğu ve maksimum yayınımın olduğu düzlemdir. Bu durum en iyi bir örnekle açıklanır. Şekil A9' da verilen örnekte x-z düzlemi (dikey düzlem, $\phi = 0$), E düzlemidir. x-y düzlemi (yatay düzlem, $\theta = \pi/2$) ise H düzlemidir. Çünkü bu düzlemeler sırasıyla E ve H vektörlerini taşıyan düzlemler aynı zamanda maksimum yayınımın olduğu düzlemlerdir.

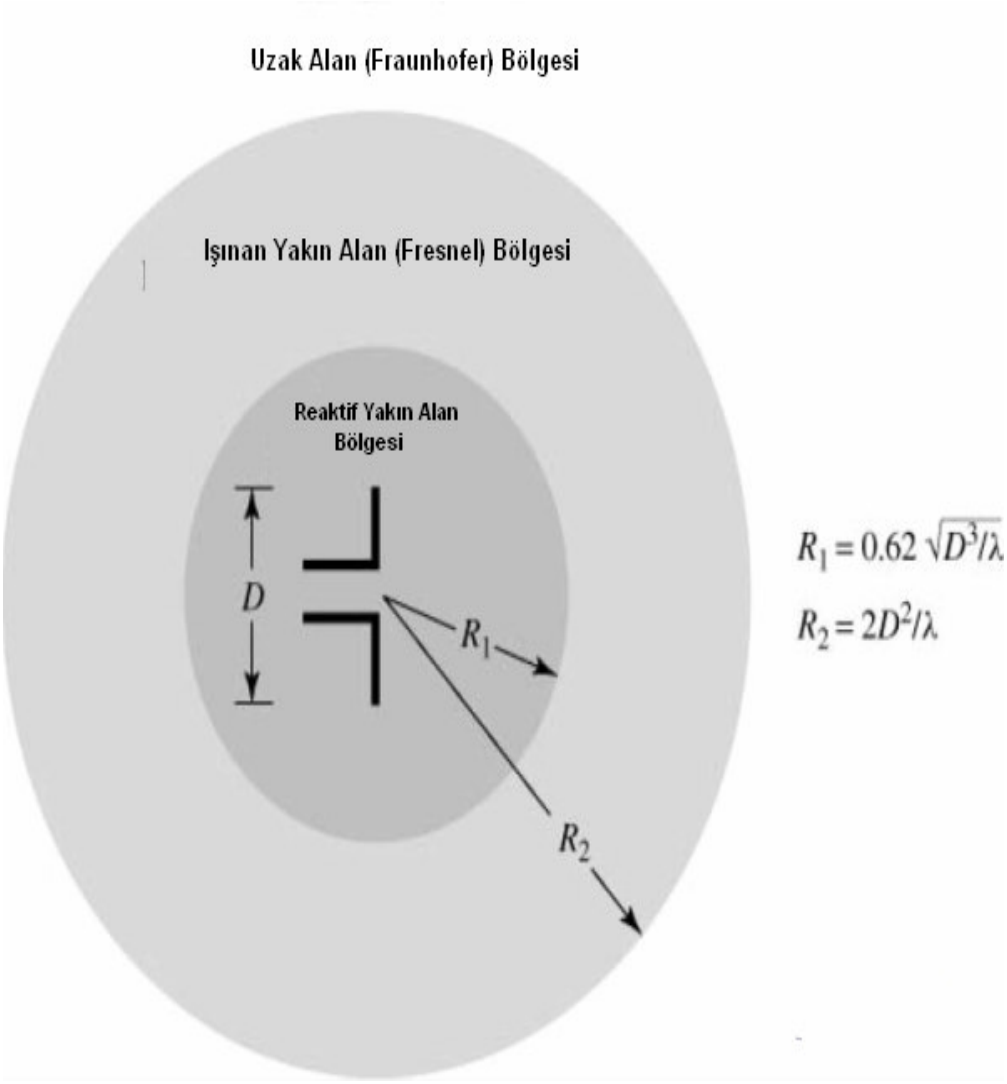
A.2. Antenin Bölgeleri

Bir anteni saran 3 uzay bölgesi bulunmaktadır. Bunlar,

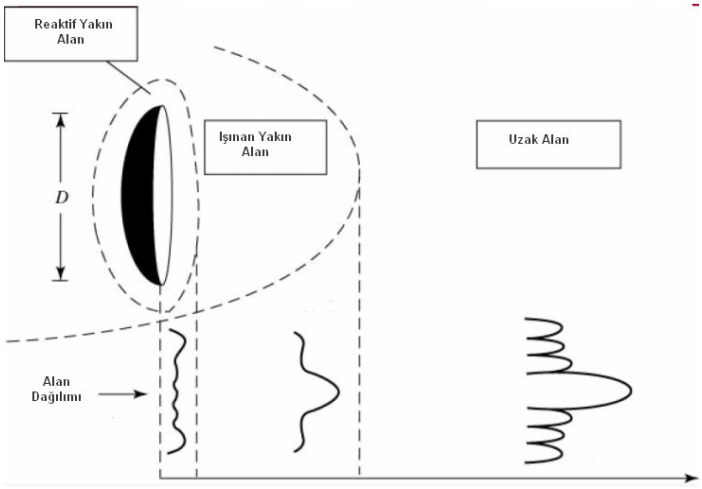
- Reaktif yakın alan bölgesi
- Aktif (ışınan) yakın alan bölgesi (Fresnel)
- Uzak alan (Fraunhofer) bölgesi

olmaktadır.

Bu bölgeler basit bir şekilde Şekil A10' da gösterilmiştir. Bu bölgelerin her birinin içindeki elektromanyetik alan yapısı farklıdır.



Şekil A10: Bir antenin ışınım bölgeleri



Şekil A11: Antenin ışınım bölgeleri ve desen değişimi

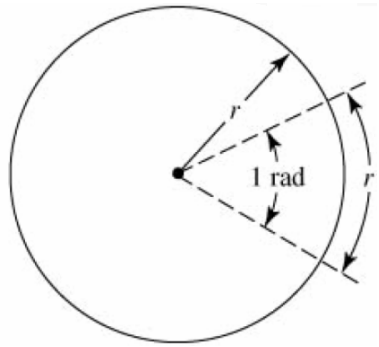
Reaktif yakın alan bölgesi antenin hemen civarında bulunan, reaktif alanın baskın olduğu bölgedir. Bir çok anten için, $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ bölgesi reaktif yakın alan bölgesi kabul edilir. Bu ifadede, D antenin en büyük boyutu ve λ dalga boyudur. Aktif (ışınan) yakın alan bölgesi ise reaktif yakın alan bölgesi ve uzak alan bölgesi arasındaki geçiş alanı bölgesidir. Antenin boyutları dalgaboyu ile karşılaştırılabilir büyüklükte ise bu bölge var olmayabilir. Eğer antenin boyutları dalgaboyuna oranla çok küçük ise, bu bölge mevcuttur ve $R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ ile $R < 2D^2/\lambda$ sınırları arasında kaldığı kabul edilir. Bu alanı uzak alan bölgesinden ayıran en önemli özellik, bu bölgede açısal alan dağılımı antenden R uzaklığına bağımlıdır.

Uzak alan bölgesinde açısal alan dağılımı artık antenden uzaklığa (R) bağımlı değildir. Yani antenin ışıma deseni, R parametresine bağlı değildir ve desen şekli R değiştikçe değişmez. Bir çok anten için uzak alan ifadesi $R > 2D^2/\lambda$ ' dir.

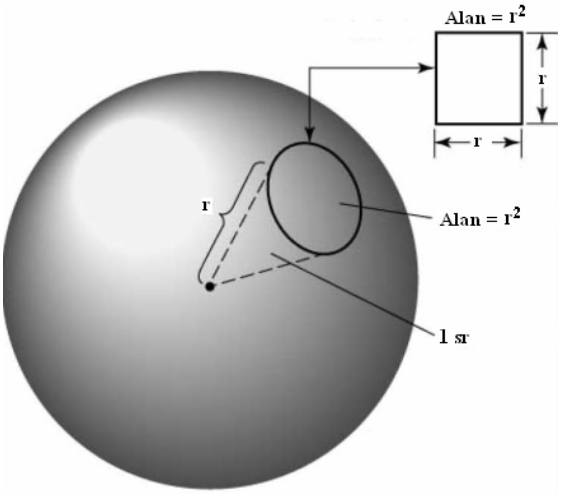
Bir antenin ışıma desen grafiği reaktif alan bölgesinden uzak alan bölgesi sınırına kadar şekil olarak değişiklik göstermektedir. Buna en güzel örnek Şekil A11' de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere reaktif alan bölgesinde desenin alan dağılımı çok yaygın nerede ise düzgün (uniform)' dir yani herhangi bir yönsellik yoktur. Gözlem noktamızı yavaş yavaş uzak alan bölgesine yaklaştırırsak, loblar yavaş yavaş oluşmaya başlar. Uzak alan sınırına kadar R arttıkça, loblar ve yönlendiricilik daha şiddetli ortaya çıkar. Uzak alan sınırı aşıldığında ise artık ışıma desen grafiği

loblarıyla birlikte tamamen ortaya çıkar ve artık R arttıkça desenin şeklinde küçük değişikler hariç bir değişme olmaz. Tez kapsamında yapılacak tüm çalışmalar sadece uzak alanda yapılacaktır.

2 boyutlu desen çiziminde kullanılan açı birimi radyan' dır. Radyan düzlem açı ölçüsüdür. r yarıçaplı bir çember üzerinde r uzunluğundaki yayı gören merkez açısı 1 radyan olarak isimlendirilir. Bir çemberin çevresi $2\pi r$ olduğunda göre çemberin çevresi 2π radyandır. Şekil A12' de bir radyan gösterilmiştir. Birde katı açı diye bir tanım vardır. Katı açı birimi sr (steradian)' dır. R yarıçaplı bir kürede merkezden r^2 alanı gören açı 1 sr katı açıdır. Bir kürenin alanı $4\pi r2$ olduğuna göre kapalı bir kürenin alanı 4π sr' dir. Şekil A.13' de bir sr gösterilmektedir.



Şekil A12: Bir radyanın gösterimi



Şekil A13: Bir katı açı gösterimi

r yarıçaplı bir kürenin yüzeyinde sonsuz küçük bir yüzey alanı dA,

$$dA = r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (m^2) \tag{A2}$$

ile verilir.

Ve buradan bir kürenin katı açı elemanı dΩ ,

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi \qquad (sr) \tag{A3}$$

olarak tanımlanır.

A.3. Elektromanyetik Güç Yoğunluğu

Bir elektromanyetik dalga güç taşımaktadır. Elektromanyetik dalga ile ilişkili gücü tanımlamakta kullanılan ifade anlık "Poynting" vektörüdür ve,

$$\bar{w} = \bar{e} \, x \, \bar{h} \tag{A4}$$

olarak ifade edilir. Burada,

$\bar{w}$ = Anlık poynting vektörü (W/m^2)

$\bar{e}$ = Anlık elektrik alan şiddeti (V/m)

$\bar{h}$ = Anlık manyetk alan şiddeti (A/m)

olmaktadır.

Poynting vektörü bir güç yoğunluğu ifadesi olduğundan dolayı, toplam güç, kapalı bir yüzey üzerinde poynting vektörünün normal komponentinin integre edilmesi ile bulunur. Yani,

$$p = \oiint_S \bar{w} . \bar{ds} = \oiint_S \bar{w} . \bar{n} \, da \tag{A5}$$

olur. Burada,

p = Anlık toplam güç

$\bar{n}$ = Yüzeye normal birim vektör

da = Kapalı yüzeydeki sonsuz küçük alan parçası (m^2)
olmaktadır.

Zamanla değişen alan uygulamalarında, poynting vektörünü bir periyotta integre edip, periyoda bölerek ortalama güç yoğunluğunun bulunması istenmektedir. Şimdi anlık elektrik ve manyetik alan ifadelerini zaman domeninde yazalım. E ve H ifadeleri, e ve h ' ın fazör ifadeleri olsunlar. e ve h ifadeleri,

$$\bar{e}(x, y, z; t) = \mathrm{Re}\left[\bar{E}(x, y, z) e^{jwt} \right] \tag{A6}$$

$$\bar{h}(x, y, z; t) = \mathrm{Re}\left[\bar{H}(x, y, z) e^{jwt} \right] \tag{A7}$$

olarak yazılır.

Bu noktada,

$$\mathrm{Re}\left[\bar{E}\, e^{jwt} \right] = \frac{1}{2}\left[\bar{E}\, e^{jwt} + \bar{E}^{*}.e^{-jwt} \right] \tag{A8}$$

eşitliğini kullanarak,

$$\bar{w} = \bar{e}\, x\, \bar{h} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\bar{E}\, x\, \bar{H}^{*} \right] + \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\bar{E}\, x\, \bar{H}\, e^{j2wt} \right] \tag{A9}$$

elde ederiz.

İlk terim zamanın fonksiyonu değildir, ve ikinci terimin zamanla değişimi, frekansın 2 katıdır. Poynting vektörünün zamanla değişimi,

$$\bar{W}_{av}(x, y, z) = \left[\bar{w}(x, y, z; t) \right]_{av} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\bar{E}\, x\, \bar{H}^{*} \right] \ (\mathrm{W/m^2}) \tag{A10}$$

olur.

Eşitlik (A10)' daki "1/2" ifadesi E ve H alanlarının tepe değerleri göstermesinden dolayı, bu değerleri RMS' e çevirmek için kullanılmıştır. Dikkat edilirse yukarıda $\left(ExH^{*}\right)/2$ ifadesinin reel kısmını kullandık ve bunun ortalama güç yoğunluğunu verdiğini söyledik. Peki bu çarpımın sanal kısmı ne anlama gelmektedir? Bu çarpımın sanal kısmı yayılmayıp depo edilen reaktif enerji yoğunluğunu simgelemektedir. Ama şu anda bu reaktif enerji, bu tez çalışmasının kapsamı dışındadır. Zaten tüm çalışmalarımızı uzak alanda yapacağımız için reaktif enerjinin ihmal edilebilir bir seviyede olduğunu düşüneceğiz çünkü reaktif enerji tamamen kaynağa yakın bölgelerde baskındır. Artık bir antenden yayılan ortalama gücü, diğer adıyla ışınan gücü, az önce bulunan güç yoğunluğu ifadesinin kapalı yüzey üzerinde integralini alarak,

$$P_{rad} = P_{av} = \oiint_S \bar{W}_{rad} . \bar{ds} = \oiint_S \bar{W}_{av} . \bar{n}\, da = \frac{1}{2} \oiint_S \mathrm{Re}\left[\bar{E}\, x\, \bar{H}^{*} \right] . ds \qquad \text{(A11)}$$

buluruz.

İşte bulduğumuz bu son ifade anten güç deseni çizimlerinde kullanılan ana ifadedir.
Bir izotropik anten ideal bir kaynaktır ve her yönde eşit yayınım yapar. Bu tür bir anten veya kaynak pratikte var olmamasına karşın, diğer antenler için iyi bir referans olur. İzotropik antenin simetrik yayınımı nedeni ile onun poynting vektörü küresel koordinatlardaki θ ve ϕ' nin bir fonksiyonu olmayacaktır. Ek olarak, sadece R bileşeni olacaktır. Böylece izotropik bir kaynak için,

$$P_{rad} = \oiint_S \bar{W}_o\, \bar{ds} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left[\bar{a}_r\, W_o(r) \right] . \left[\bar{a}_r\, r^2 \sin\theta d\theta d\phi \right] = 4\pi r^2 W_o \qquad \text{(A12)}$$

olur ve izotropik anten için güç yoğunluğu,

$$\bar{W}_o = \bar{a}_r\, W_o = \bar{a}_r \left(\frac{P_{rad}}{4\pi r^2} \right) \qquad (\mathrm{W/m^2}) \qquad \text{(A13)}$$

elde ederiz. Bu değer r yarıçaplı kürenin yüzeyinde düzgün olarak yayılmıştır.

A.4. Işıma Şiddeti

Işıma şiddeti (radiation intensity), verilen bir yöndeki birim katı açı için bir antenden ışınan güçtür. Bu bir uzak alan parametresidir ve ışınım yoğunluğunun antenden olan uzaklığın karesine bölümü ile kolayca bulunur. U ile ifade edilir ve

$$U = r^2 W_{rad} \tag{A14}$$

olmaktadır. Burada,

U = Işınım şiddeti (W / birim katı açı)

W_{rad} = Işınım yoğunluğu (W/m^2)

olarak ifade edilir.

Yayınım şiddeti bir antenin uzak alan elektrik alan ifadesiyle aşağıdaki gibi ilişkilidir ve,

$$U(\theta,\phi) = \frac{r^2}{2\eta}\left|\overline{E}(r,\theta,\phi)\right|^2 \approx \frac{r^2}{2\eta}\left[\left|E_\theta(r,\theta,\phi)\right|^2 + \left|E_\phi(r,\theta,\phi)\right|^2\right] \approx \frac{1}{2\eta}\left[\left|E_\theta^o(\theta,\phi)\right|^2 + \left|E_\phi^o(\theta,\phi)\right|^2\right] \tag{A15}$$

olarak ifade edilir. Burada,

$\overline{E}(r,\theta,\phi)$ = Antenin uzak alandaki elektrik alan şiddetidir = $\overline{E}^o(\theta,\phi)\dfrac{e^{-jkr}}{r}$

E_θ, E_ϕ = Bir antenin uzak alandaki elektrik alan komponentleri

η = Ortamın karakteristik empedansı

olmaktadır.

Antenin uzak alan ifadesi incelendiği için dikkat ederseniz yukarıda E_r ifadesini sıfır kabul ettik. Aslında burada belirtmemiz gereken en önemli şey, antenin güç deseni yayınım şiddetinin bir ölçüsü olduğudur. Kısacası bir antenin güç deseni yayınım şiddeti (U) ifadesi kullanılarak çizilir.

Antenden yayınan toplam güç U cinsinden aşağıdaki ifade ile,

$$P_{rad} = \oiint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U \sin\theta d\theta d\phi \tag{A16}$$

olarak bulunur. Burada,

$d\Omega$ = Katı açı elemanı= $\sin\theta d\theta d\phi$

olmaktadır.

İzotropik bir anten veya kaynak içi U , θ ve ϕ' den bağımsız olacaktır. (W_{rad}' da olduğu gibi). İzotropik bir anten veya kaynak için,

$$P_{rad} = \oiint_{\Omega} U_o d\Omega = U_o \oiint_{\Omega} d\Omega = 4\pi U_o \tag{A17}$$

ve son olarak izotropik anten veya kaynak için ışınım şiddeti,

$$U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi} \tag{A18}$$

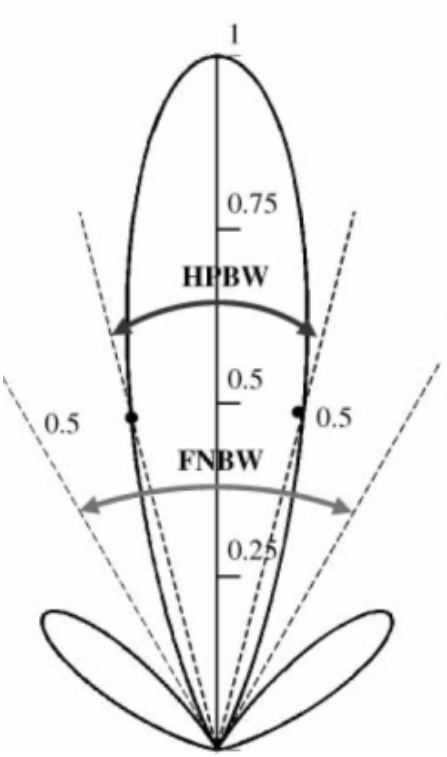
olur.

A.5. Işıma Demet Genişliği (BeamWidth)

Antenin ışıma deseni ile ilgili önemli parametrelerden biridir. Işıma demet genişliği, desenin maksimum yayınım kısmında her iki zıt kısımlardaki tanımlanan eş nokta arasındaki açısal açıklık olarak tanımlanır.

Bir anten deseninde çeşitli ışıma demet genişlikleri tanımlıdır. Bunların en önemlisi Yarı Güç Işıma Demet Genişliği (Half Power Beam Width - HPBW)' dir. Yarı Güç Işıma Demet Genişliği, maksimum ışıma yapılan düzlemde, ışıma şiddetinin yarıya düştüğü 2 nokta arasındaki açıdır.

Diğer önemli ışıma demet genişliği ışıma desenindeki ilk sıfır noktalar arasındaki açısal mesafedir. Buna İlk Sıfırlar Işıma Demet Genişliği (First-Null Beamwidth - FNBW) adı verilir. Bu durumlar Şekil A14' de gösterilmiştir.



Şekil A14: HPBW ve FNBW gösterimi

A.6. Yönlendiricilik (Directivity)

Yönlendiriciliğin en yaygın tanımı, belirli bir yöndeki ışıma şiddetinin tüm yönlerdeki ortalama ışıma şiddetine oranı olarak verilmektedir. Ortalama ışıma şiddeti, antenden ışıyan toplam gücün 4π' ye oranlanması ile bulunur. Eğer yönlendiricilikten bahsedilerken herhangi bir yön bilgisi verilmez ise maksimum ışımanın gerçekleştiği yönden söz edildiği farzedilir. İzotropik olmayan bir kaynağın yönlendiriciliğini daha basit ve net bir şekilde tanımlamak istersek, bu kaynağın bir yöndeki ışıma şiddetinin izotropik kaynak üzerindekine oranıdır. Matematiksel formda,

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi}{P_{rad}} \tag{A19}$$

olarak verilir.

Eğer herhangi bir yön verilmez ise,

$$D_{\max} = D_o = \frac{U_{\max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} \tag{A20}$$

olur. Burada,

D = Yönlendiricilik (Birimsiz)

D_o = Maksimum Yönlendiricilik (Birimsiz)

U = Işıma Şiddeti (W / Birim Katı Açı)

$U_{\max}$ =Maksimum Işıma Şiddeti (W / Birim Katı Açı)

U_o = İzotropik Kaynağın Işıma Şiddeti (W / Birim Katı Açı)

P_{rad} = Toplam Işınan Güç (W)

olarak ifade edilir.

Bir izotropik kaynak için, açıktır ki $U, U_{\max}, U_o$ ifadeleri birbirine eşittir.

Birbirine dik polarizasyon komponentleri olan antenler için, kısmi yönlendiricilik diye bir tanım vardır. Verilen polarizasyon ve verilen bir yön için ışıma şiddetinin, tüm yönlerdeki ortalama ışıma şiddetine oranıdır. Küresel koordinat sisteminde, birbirine dik ϕ ve θ komponentleriyle birlikte toplam maksimum yönlendiricilik (D_o),

$$D_o = D_\theta + D_\phi \tag{A21}$$

olarak yazılabilir. Burada D_θ ve D_ϕ kısmi yönlendiricilerdir ve

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \tag{A22}$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \tag{A23}$$

olarak ifade edilir. Burada,

U_θ = Verilen bir yöndeki θ komponenti için ışıma şiddeti

U_ϕ = Verilen bir yöndeki ϕ komponenti için ışıma şiddeti

$(P_{rad})_\theta =$ θ komponenti için tüm yönlerdeki ışıma yapan güç

$(P_{rad})_\phi = \phi$ komponenti için tüm yönlerdeki ışıma yapan güç

olmaktadır.

İzotropik bir kaynağın her yöndeki ışıması eşit olduğundan yönlendiriciliği 1 olarak alınır. İzotropik kaynak dışındaki tüm kaynakların maksimum yönlendiriciliği, izotropik kaynak referans olarak alındığında 1' e eşit veya 1' den büyüktür. Eğer maksimum yönlendiricilik değil de herhangi bir yöndeki yönlendiricilik söz konusu ise yönlendiricilik 1' den düşük olabilir ve hatta sıfır olabilir. Herhangi bir yön için yönlendiricilik sıfırdan büyük veya eşit ama maksimum yönlendiriciliğe eşit veya küçük olabilir.($0 \le D \le D_o$)

Şimdi yönlendiricilik için çok daha genel bir ifade bulalım. Bu konuda incelemesi yapılacak kaynağın (antenin) desen ifadesinin θ ve ϕ' ye bağlı olduğunu düşünelim. Böyle bir kaynağın alan şiddeti ifadesi,

$$U = B_o F(\theta,\phi) \cong \frac{1}{2\eta}\left[\left|E_\theta^o(\theta,\phi)\right|^2 + \left|E_\phi^o(\theta,\phi)\right|^2\right] \tag{A24}$$

gibi olsun. Burada B_o bir sabit sayıdır ve E_θ^o ve E_ϕ^o antenin uzak bölge elektrik alan bileşenleridir ve,

$$U_{\max} = B_o F_{\max}(\theta,\phi) \tag{A25}$$

olur. Toplam ışıma yapan güç,

$$P_{rad} = \oiint_\Omega U(\theta,\phi)d\Omega = B_o \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F(\theta,\phi)\sin\theta d\theta d\phi \tag{A26}$$

olmaktadır. Artık yönlendiricilik ve maksimum yönlendiricilik için genel ifadelerini,

$$D(\theta,\phi) = 4\pi \frac{F(\theta,\phi)}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F(\theta,\phi)\sin\theta d\theta d\phi} \tag{A27}$$

$$D_o(\theta,\phi) = 4\pi \frac{F_{\max}(\theta,\phi)}{\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F(\theta,\phi)\sin\theta d\theta d\phi} \tag{A28}$$

olarak yazabiliriz.

Maksimum yönlendiricilik ayrıca,

$$D_o(\theta,\phi) = \frac{4\pi}{\left(\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F(\theta,\phi)\sin\theta d\theta d\phi\right)/\left(F(\theta,\phi)_{\max}\right)} = \frac{4\pi}{\Omega_A} \tag{A29}$$

$$\Omega_A = \frac{1}{F(\theta,\phi)_{\max}} \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F(\theta,\phi)\sin\theta d\theta d\phi = \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} F_n(\theta,\phi)\sin\theta d\theta d\phi \tag{A30}$$

$$F_n(\theta,\phi) = \frac{F(\theta,\phi)}{F(\theta,\phi)_{\max}} \tag{A31}$$

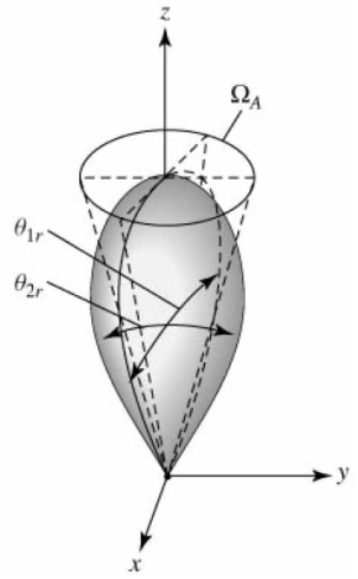
olacaktır.

A.7. Yönlü Anten Desenleri

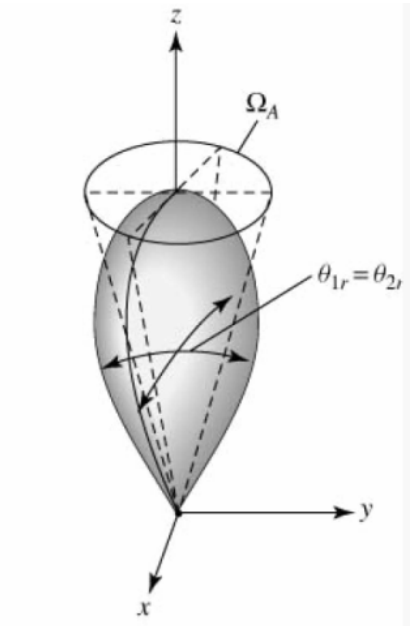
Yönlendiriciliği hesaplamak için (A29) ile verilen eşitliği kullanmaktansa, dizayn işlemlerinde yaklaşık hesaplama formülleri kullanılır.

Bu bölümde anlatılacak olan yaklaşık formüllerin kullanılması çok hassas yönlendiricilik gereksinimleri olduğunda kesinlikle tavsiye edilmemektedir. Hassas yönlendiricilik ölçümleri için bu tez kapsamımızda anlatılan üç boyutlu anten desen ölçüm düzeneği ve yine bu tez kapsamımızda anlatılan bilgisayar yazılımına benzer bir yazılım kullanılmalıdır.

Eğer bir anten dar bir ana loba ve ihmal edilebilir yan loblara sahip ise, ışıma katı açısı yaklaşık olarak 2 dik düzlemdeki yarı güç açılarının çarpımına eşittir. Simetrik bir desen için bu iki düzlemdeki yarım güç açıları hemen hemen eşit olacaktır.



Şekil A15: Yönlendiriciliğin yaklaşık hesabı için desen modeli



Şekil A.16: Yönlendiriciliğin yaklaşık hesabı için simetrik desen modeli

Bu yaklaşım ile,

$$D_o = \frac{4\pi}{\Omega_A} \cong \frac{4\pi}{\Theta_{1r}\Theta_{2r}} \tag{A32}$$

olur.

Işıma katı açısı Ω_A yaklaşık olarak,

$$\Omega_A = \Theta_{1r}\Theta_{2r} \tag{A33}$$

dir. Burada,

Θ_{1r} = Bir düzlemdeki yarı güç ışıma açısı (rad)

Θ_{2r} = Diğerine dik düzlemdeki yarı güç ışıma açısı (rad)

olarak ifade edilir.

Eğer Θ_{1r} ve Θ_{2r} derece birimi ile verilmiş ise,

$$D_o \cong \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{1r}\Theta_{2r}} = \frac{41{,}253}{\Theta_{1r}\Theta_{2r}} \tag{A34}$$

olur.

Planer diziler için çok daha iyi bir yaklaşım,

$$D_o \cong \frac{32400}{\Omega_A} = \frac{32400}{\Theta_{1r}\Theta_{2r}} \tag{A35}$$

olarak verilir.

Çoğu kez yönlendiricilik birimsizlik yerine decibel biriminde ile ifade etmek çok yerinde olur.

$$D(dB) = 10\log_{10}\left[D(birimsiz)\right] \tag{A36}$$

$$D_o(dB) = 10\log_{10}\left[D_o(birimsiz)\right] \tag{A37}$$

Ayrıca yönlendiricilik için bulunmuş olan diğer bir yaklaşık formül,

$$\frac{1}{D_0} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}\right) \tag{A38}$$

$$D_1 \cong \frac{1}{\left[\frac{1}{2\ln 2}\int_0^{\Theta_{1r}} \sin\theta d\theta\right]} \cong \frac{16\ln 2}{\Theta_{1r}^2} \tag{A39}$$

$$D_2 \cong \frac{1}{\left[\frac{1}{2\ln 2}\int_0^{\Theta_{2r}} \sin\theta d\theta\right]} \cong \frac{16\ln 2}{\Theta_{2r}^2} \tag{A40}$$

olmaktadır. Burada Θ_{1r} ve Θ_{2r} radyan biriminde yarı güç ışıma demet genişliğidir.

Nihai formül olarak,

$$\frac{1}{D_o} \cong \frac{1}{2\ln 2}\left(\frac{\Theta_{1r}^2}{16} + \frac{\Theta_{2r}^2}{16}\right) = \frac{\Theta_{1r}^2 + \Theta_{2r}^2}{32\ln 2} \tag{A41}$$

veya

$$D_o \cong \frac{32\ln 2}{\Theta_{1r}^2 + \Theta_{2r}^2} = \frac{22.181}{\Theta_{1r}^2 + \Theta_{2r}^2} \tag{A42}$$

olur.

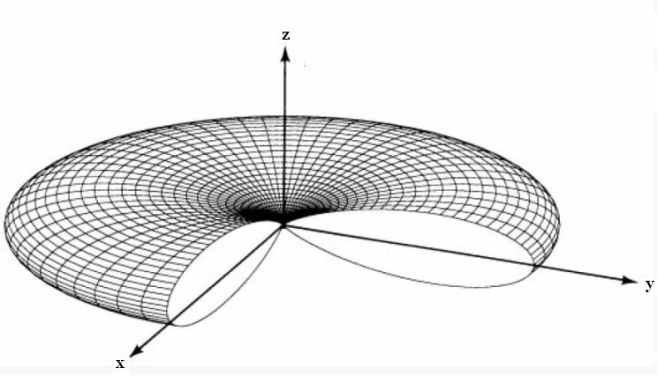
A.8. Tek Düzlemde Yönlü (Omni-Directional) Desenler

Bazı antenler Şekil A17' de görüldüğü üzere tek düzlemde yönlü desenler üretirler.

Tek düzlemde yönlü desenler yaklaşık olarak genellikle,

$$U = \left|\sin^n(\theta)\right| \qquad 0 \le \theta \le \pi, \quad 0 \le \phi \le 2\pi \tag{A43}$$

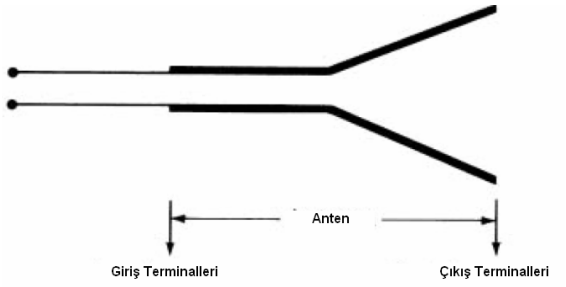
n = tamsayı ve tamsayı olmayan değerler
ile ifade edilebilirler.



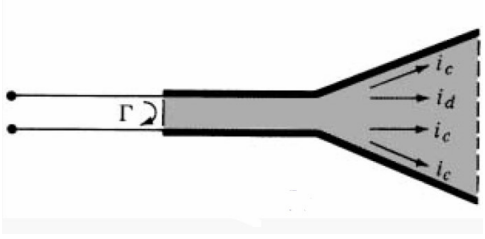
Şekil A17: Tek düzlemde yönlü bir desen örneği

A.9. Anten Verimi ve Kazanç

Şekil A19' de görüldüğü üzere antenler ile ilgili olarak birkaç verimlilik tanımları mevcuttur. Toplam anten verimliliği e_o, anten girişindeki ve yapısındaki kayıpları hesaba katmak için kullanılmaktadır. Şekil A18' da ise bir antene ait konu ile ilgili giriş ve çıkış noktaları gösterilmektedir.



Şekil A18: Bir antenin giriş ve çıkış terminalleri



Şekil A19: Bir antenin girişinde ve üzerindeki kayıpların temsili gösterimi

Bahsedilen kayıplar iletim hattı ve anten arasındaki empedans uyuşmazlığını ve I^2R iletimsel veya dielektriksel kayıplarını kapsar. Genel olarak,

$$e_o = e_r e_c e_d \tag{A44}$$

olarak yazılabilir. Burada,

e_o = Toplam verimlilik (birimsiz)

e_r = Uyuşmazlık verimliliği $(1-|\Gamma|^2)$ (birimsiz)

e_c = İletim verimliği (birimsiz)

e_d = Dielektrik verimliliği (birimsiz)

Γ = Anten girişindeki gerilim yansıma katsayısı

olmaktadır. Ayrıca,

$$\Gamma = \frac{(Z_{in} - Z_o)}{(Z_{in} + Z_o)} \tag{A45}$$

Z_{in} = Anten giriş empedansı, Z_o = İletim hattı karakteristik empedansı ve gerilim durağan dalga oranı ($VSWR$),

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{A46}$$

ile ifade edilir. Ayrıca şunu ifade etmek gerekir ki e_c ve e_d hesaplanması oldukça zor ifadeler olup genellikle deneysel olarak ölçülmesi gereklidir ve bunları birbirinden ayırmak ölçümler ile bile olsa oldukça zordur. Bu nedenle genellikle tek bir parametre ile ifade edilirler. Verimlilik ifadesini tekrar yazar isek,

$$e_o = e_r e_{cd} = e_{cd}(1-|\Gamma|^2) \tag{A47}$$

olur. Burada,

$$e_{cd} = e_r e_{cd} \tag{A48}$$

dir.

Bu noktadan itibaren yönlendiricilik ile çok yakın ilişkili olan bir başka terim olan ve bizim tez kapsamındaki ana amaçlarımızdan biri olan "Kazanç" ifadesini inceleyeceğiz. Bu ifade yönlendiricilik ile birlikte verimliliği de içine alan daha

kapsamlı bir ifadedir. Daha önce anlatıldığı üzere yönlendiricilik sadece antenin yönsel özelliklerini tanımlayıp, antenin deseni tarafından belirlenmektedir.

$$\text{Kazanç}= G = \frac{U(\theta,\phi)}{P_{in}} \text{ (birimsiz)} \tag{A49}$$

olup, bu eşitlikte,

$U(\theta,\phi)$ = Herhangi bir yöndeki ışınım şiddeti

P_{in} = Anten tarafından kabul edilen toplam giriş gücü

olmaktadır ve P_{in} ile P_{rad} arasında,

$$P_{rad} = P_{in}.e_{cd} \tag{A50}$$

ilişkisi mevcuttur.

IEEE standartlarına göre kazanç empedans uyuşmazlıklarından kaynaklanan kayıpları içermemektedir. Bu nedenle bu tez kapsamında bizde bu kurala uyacağız. Bu noktadan itibaren kazanç ifadesini yaygın kullanımı nedeni ile "Mutlak Kazanç (G_o)" olarak isimlendireceğiz. Bu şekilde farklı isimlendirme kullanılmasının sebebi bazı kaynaklarda kazanç ifadesine anten girişinde empedans uyuşmazlığından kaynaklanan kayıplarında dahil edilmesidir.

(A.50) eşitliğini kullanarak, (A.49) eşitliğini,

$$G(\theta,\phi) = e_{cd}\left[4\pi\frac{U(\theta,\phi)}{P_{rad}}\right] \tag{A51}$$

$$G(\theta,\phi) = e_{cd}D(\theta,\phi) \tag{A52}$$

olarak indirgeyebiliriz. Benzer şekilde,

$$G(\theta,\phi)_{\max} = e_{cd}D(\theta,\phi)_{\max} \tag{A53}$$

olur. Yine benzer şekilde maksimum mutlak kazanç, maksimum yönlendiricilik ile,

$$G_o = e_{cd}.D_o \tag{A54}$$

olarak ifade edilir.

Burada elde ettiğimiz önemli diğer sonuç, eğer anten üzerindeki iletimsel ve dielektriksel ısıl kayıplar deneysel olarak ölçülmek istenirse antenin mutlak kazancı antenin yönlendiriciliğine oranlanmalıdır. Yani,

$$e_{cd} = \frac{G_o}{D_o} \tag{A55}$$

olur.

Anten üzerinde harcanan ısıl kaybı decibel biriminde ifade edersek,

$$T(dB) = G_o(dB) - D_o(dB) \tag{A56}$$

olacaktır. Burada $T(dB)$, decibel biriminde anten üzerinde ısısal olarak kaybolan gücü simgelemektedir.

Şimdi mutlak kazanç için biraz daha inceleme yaparsak, daha önce yönlendiricilik için yazılan ifadeler aşağıda öngörüldüğü üzere aynen kazanç içinde geçerlidir. Yani,

$$G_o = G_\theta + G_\phi \tag{A57}$$

olarak yazılabilir. Burada G_θ ve G_ϕ kısmi mutlak kazançlardır ve

$$G_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{P_{in}} \tag{A58}$$

$$G_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{P_{in}} \tag{A59}$$

olur. Burada,

$U_\theta =$ E_θ alan komponentinin dahil olduğu verilen yöndeki ışıma şiddeti

$U_\phi =$ E_ϕ alan komponentinin dahil olduğu verilen yöndeki ışıma şiddeti

P_{in} = Toplam kabul edilen giriş gücü

olarak ifade edilir.

Genelikle kazanç ifadesi decibel birimi ile ifade edilmek istenir ve,

$$G_o(dB) = 10\log[e_{cd} D_o(birimsiz)] \quad \text{(A60)}$$

olur.

A.10. Antenin Giriş Empedansı ve Etkili Alanı

Anten tarafından sunulan empedansa veya anten girişinde gerilimin akıma olan oranına antenin giriş empedansı denir. Şekil A20' de görüldüğü üzere antenin a ve b uçlarında herhangi bir yük bulunmaz iken görülen empedans antenin giriş empedansıdır ve,

$$Z_A = R_A + jX_A \quad \text{(A61)}$$

ile tanımlanır. Burada,

$Z_A =$ a ve b uçları arasındaki anten empedansıdır (ohm)

$R_A =$ a ve b uçları arasındaki anten direncidir (ohm)

$X_A =$ a ve b uçları arasındaki anten reaktansıdır (ohm)

olarak ifade edilir.

Genel olarak direnç kısmı 2 parçadan oluşur,

$$R_A = R_r + R_L \quad \text{(A62)}$$

Burada,

R_r = Antenin ışıma direnci

R_L = Antenin kayıp direnci

dir.

Bu noktada, antenin, Şekil A21' de görüldüğü üzere iç empedansı Z_T olan bir alıcıya bağlandığını düşünelim. Bu durum için antenin Thevenin eşdeğer devresi Şekil A23' de verilmektedir. Alıcı empedans $Z_T = R_T + jX_T$ olarak ifade edilir. Burada,

$Z_T =$ Alıcının uçları arasındaki empedans (ohm)

$R_T =$ Alıcının uçları arasındaki direnç (ohm)

X_T = Alıcının uçları arasındaki reaktans (ohm)

olmaktadır.

Anten ile alıcı arasında empedans uyumluluğu var ise,

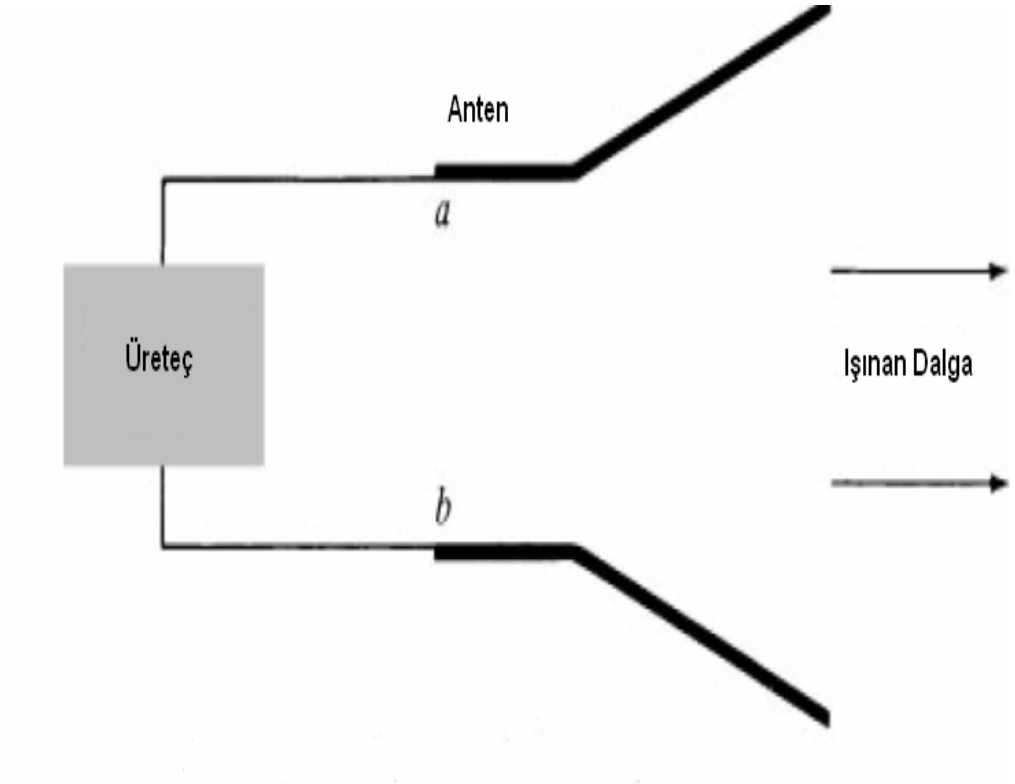
$$R_r + R_L = R_T$$
$$X_A = -X_T \tag{A63}$$

olacaktır.

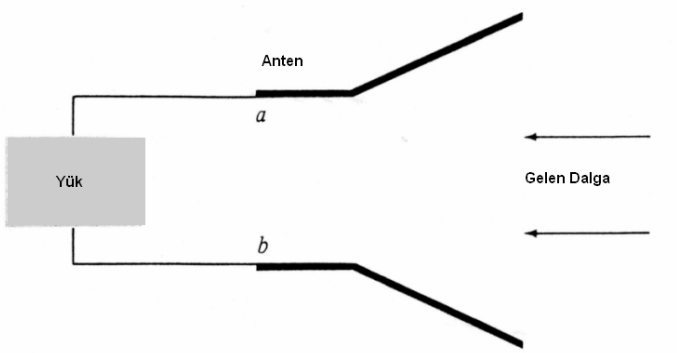
Empedans uyumluluğu durumunda yüke aktarılan güç,

$$P_T = \frac{|V_T|^2}{8}\left[\frac{R_T}{(R_T + R_L)^2}\right] = \frac{|V_T|^2}{8}\left[\frac{1}{R_r + R_L}\right] = \frac{|V_T|^2}{8R_T} \tag{A64}$$

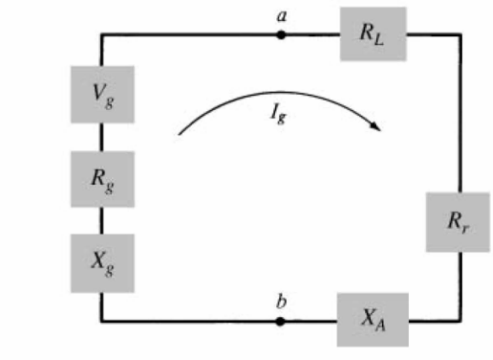
olacaktır. Şekil A20 ve A22' de ise antenin verici durumu için gösterimler verilmiştir.



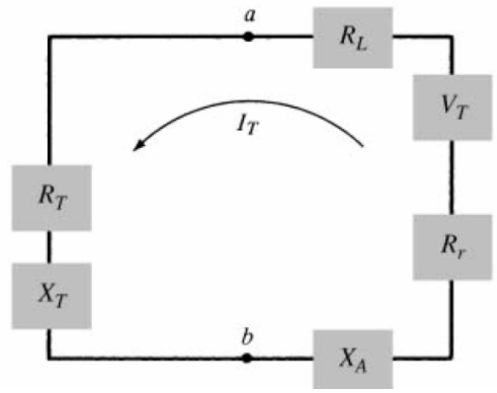
Şekil A20: Verici durumundaki bir antenin gösterimi



Şekil A21: Alıcı durumundaki bir antenin gösterimi



Şekil A22: Verici durumundaki bir antenin devre gösterimi



Şekil A23: Alıcı durumundaki bir antenin devre gösterimi

Az önce işlenen güç aktarımı ile ilgili olarak antenler üzerinde çeşitli alanlardan (yüzeylerden) bahsedilir. Bu alan, bir antenin üzerine bir elektromanyetik dalga geldiğinde antenin gelen dalganın gücünü yakalayabilme kabiliyetini tanımlar. Bu alanların en önemlisi etkin alan (veya etkin açıklık) olarak tanımlanır. Bu, alıcı

antenin terminallerindeki gücün, antene belirtilen yönde gelen antenle aynı polarizasyonlu düzlem dalganın güç yoğunluğuna oranıdır. Yani,

$$A_e = \frac{P_T}{W_i} = \frac{|I_T|^2 R_T / 2}{W_i} \tag{A65}$$

olur. Burada,

A_e = Etkin alan (açıklık) (m^2)

P_T = Antene bağlı yüke aktarılan güç (W)

W_i = Gelen dalganın güç yoğunluğu (W/m^2)

olarak ifade edilir.

(A65) eşitliğinden görüldüğü üzere etkin alan ile gelen dalganın güç yoğunluğu çarpımı antene bağlı yüke aktarılan gücü verecektir. Ayrıca,

$$A_e = \frac{|V_T|^2}{2W_i}\left[\frac{R_T}{(R_r + R_L + R_T)^2 + (X_A + X_T)^2}\right] \tag{A66}$$

olur.

Eğer anten ile yük arasında empedans uyumluluğu var ise, yani,

$$\begin{aligned} R_r + R_L &= R_T \\ X_A &= -X_T \end{aligned} \tag{A67}$$

ise, maksimum etkin alan,

$$A_{em} = \frac{|V_T|^2}{8W_i}\left[\frac{R_T}{(R_r + R_L)^2}\right] = \frac{|V_T|^2}{8W_i}\left[\frac{1}{R_r + R_L}\right] \tag{A68}$$

olacaktır. (A68) eşitliğinde elde edilen etkin alanın, gelen dalganın güç yoğunluğu ile çarpımı yüke aktarılacak maksimum gücü verecektir.

Bu konu ile ilişkili olarak bir de açıklık verimliliği (ε_{ap}) diye adlandırılan başka bir ifade vardır ki maksimum etkin alanın (A_{em}), antenin fiziksel alanına (A_p) oranıdır.

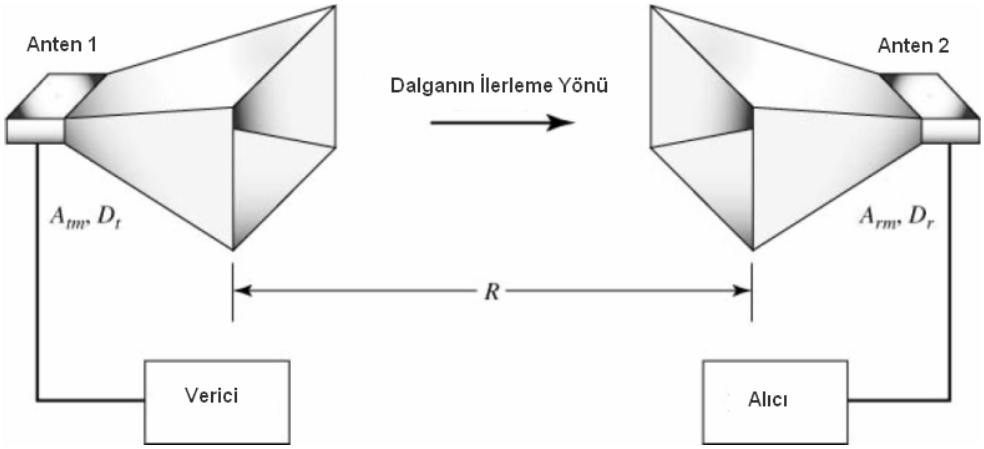
Yani,

$$\varepsilon_{ap} = \frac{A_{em}}{A_p} \tag{A69}$$

dir.

A.11. Maksimum Yönlendiricilik ve Maksimum Etkin Alan İlişkisi

Maksimum alan ile maksimum yönlendiricilik arasındaki ilişkiyi bulabilmek için Şekil A24' de verilen düzeneğe bakalım. Bu şekilde Anten 1 iletim modunda, Anten 2 alıcı modundan çalışmaktadır. Anten 1' e ait yönlendiricilik ve etkin alan A_t ve D_t, Anten 2 için ise A_r ve D_r olarak seçilmiştir.



Şekil A24: Verici ve alıcı durumundaki iki antenin karşılıklı konumlandırılması

Eğer Anten1 izotropik olsa ise R m uzaklıkta oluşturacağı yayınan güç yoğunluğu,

$$W_o = \frac{P_T}{4\pi R^2} \tag{A70}$$

olacaktır. Burada P_T toplam ışınan güçtür. Ama anten izotropik değilde, yönsel özellikleri de olduğundan dolayı R m uzaklıktaki ışınan güç yoğunluğu aslında,

$$W_t = W_o.D_t = \frac{P_T D_t}{4\pi R^2} \tag{A71}$$

olacaktır. Alıcı anten tarafından alınan ve yüke aktarılan güç ise,

$$P_r = W_t.A_r = \frac{P_T D_t A_r}{4\pi R^2} \tag{A72}$$

veya

$$D_t A_r = \frac{P_r}{P_t} 4\pi R^2 \tag{A73}$$

olacaktır.

Eğer Anten 2 verici olup, Anten 1 alıcı olursa,

$$D_r A_t = \frac{P_r}{P_t} 4\pi R^2 \tag{A74}$$

elde edilir.

(A73) ve (A74) eşitliklerinden,

$$\frac{D_t}{A_t} = \frac{D_r}{A_r} \tag{A75}$$

elde edilir. Aynı eşitlik maksimum durum içinde yazılabilir. Yani,

$$\frac{D_{ot}}{A_{tm}} = \frac{D_{or}}{A_{rm}} \tag{A76}$$

olur. A_{tm}, A_{rm} (D_{ot}, D_{or}) sırasıyla Anten 1 ve Anten 2' nin maksimum etkin alanları (yönlendiricilikleri)' dir.

Eğer Anten1 izotropik ise, $D_{ot} = 1$ olur ve onun maksimum etkin alanı (A76) eşitliği kullanılarak,

$$A_{tm} = \frac{A_{rm}}{D_{or}} \tag{A77}$$

olarak yazılır.

(A77) eşitliği şunu gösterir ki izotropik bir kaynağın maksimum etkin alanı, herhangi bir diğer kaynağın maksimum etkin alanının, aynı kaynağın maksimum yönlendiriciliğine oranına eşit olur. O halde herhangi bir kaynak olarak basitlik olması amacıyla ve parametrelerinin bilinmesi amacıylada boyu çalışma dalgaboyuna oranla çok küçük olan küçük bir dipol anten seçelim. Bu küçük dipol anten için elde edeceğimiz A_{rm} / D_{or} oranının değeri bize izotropik bir antenin etkin alanını verecektir. Bu oran sadece küçük bir dipol anten için değil tüm kaynaklar için geçerlidir. Boyu çalışma dalga boyuna oranla çok küçük olan bir dipol anten için,

$$A_{em} = 0.119\lambda^2 \tag{A78}$$

ise, $D_o = 1.5$ olacağı kolaylıkla gösterilebilir.

O halde artık izotropik bir antenin etkin alanını bulabiliriz.

$$A_{tm} = \frac{A_{rm}}{D_{or}} = \frac{0.119\lambda^2}{1.5} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \tag{A79}$$

olur. (A77) formülünü kullanarak,

$$A_{rm} = D_{or} A_{tm} = D_{or}(\frac{\lambda^2}{4\pi}) \tag{A80}$$

olarak buluruz.

Bu noktada artık bu formülü genelleştirerek herhangi bir anteni kapsayacak şekilde

$$A_{em} = (\frac{\lambda^2}{4\pi})D_o \tag{A81}$$

olarak yazarız.

(A81) eşitliği anten empedansının yük ile tam uyuşma durumu ve gelen dalganın anten ile aynı polarizasyonda olma durumu için çıkarılmıştır. Yani,

$e_r = 1$

dir. Ayrıca iletim ve dielektrik kayıplarının olmadığı varsayılmıştır. Eğer bu iletim ve dielektrik kayıpları mevcut ise,

$$A_{em} = e_{cd}(\frac{\lambda^2}{4\pi})D_o \tag{A82}$$

olarak yazılır.

En kötü durumda tüm kayıpların var olduğu durum için genel eşitlik yazarsak,

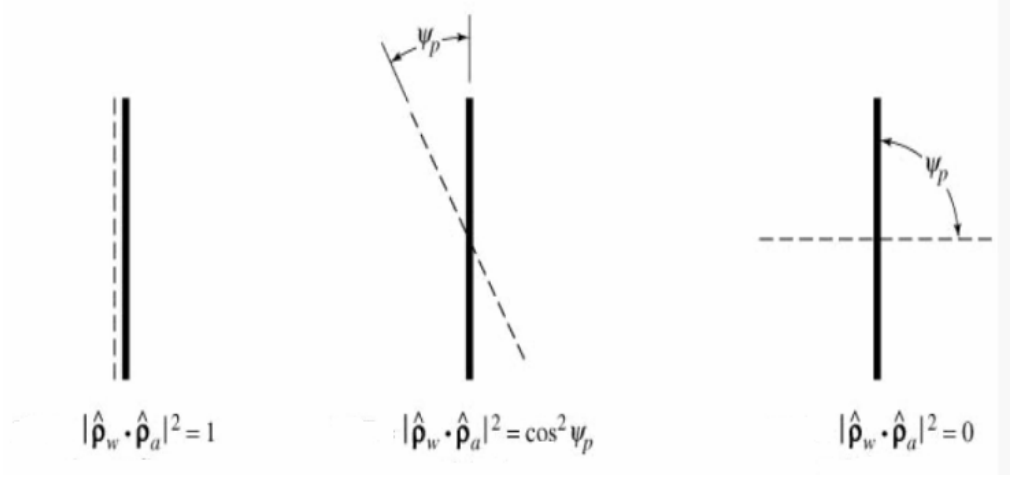
$$A_{em} = e_o(\frac{\lambda^2}{4\pi})D_o\left|\overrightarrow{\rho_w}.\overrightarrow{\rho_a}\right|^2 = e_{cd}(1-|\Gamma|^2)(\frac{\lambda^2}{4\pi})D_o\left|\overrightarrow{\rho_w}.\overrightarrow{\rho_a}\right|^2 \tag{A83}$$

Burada daha önce bahsi geçmeyen iki ifade,

ρ_w = Gelen dalganın polarizasyonunu gösteren birim vektör

ρ_a = Antenin polarizasyonunu gösteren birim vektör

olarak ifade edilir.



Şekil A25: Polarizasyon uyuşmazlığından kaynaklanan kayıpların gösterimi

Son olarak anten faktörü tanımı yapalım ve kazanç ile ilişkisini göstererek anten teorisi bölümümüzü sonlandıralım. Anten Faktörü (AF), antene gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeninin (E), antenin bağlı olduğu hat üzerindeki gerilime (V) oranı, yani,

$$AF = \frac{E}{V} \tag{A84}$$

olarak tanımlanmaktadır.Burada,

AF = Anten Faktörü (1/m)

E = Elektrik Alan Şiddeti (V/m)

V = Gerilim (V)

olarak ifade edilir.

Anten faktörünün decibel gösterimi,

$$AF(dB) = E(dB\mu V/m) - V(dB\mu V) \tag{A85}$$

olacaktır.

Şimdi anten faktörü ile maksimum yönlendiricilik arasında bir ilişkiyi 50 Ω' luk bir sistemde bulmaya çalışalım. Bu ilişkinin, 50 Ω' luk bir sistemde bulunmasının tek sebebi laboratuar ortamlarında genellikle 50 Ω' luk ölçüm sistemlerinin kullanılıyor olmasıdır. Kısacası ispatımızda, bir alıcı antenin 50 Ω giriş empedanslı bir alıcıya (spektrum analizörü veya EMI alıcı) bağlandığını kabul edeceğiz. Daha önce verilen eşitliklerimiz,

$$A_{em} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0 \quad (\mathrm{m}^2)$$

$$W_i = \frac{E^2}{2\eta} \quad (\mathrm{W/m}^2) \tag{A86}$$

$$P_T = W_i . A_{em} \quad (\mathrm{W})$$

idi. Bu eşitlikleri kullanarak,

$$P_T = W_i . A_{em} = \frac{E^2}{2\eta} \frac{\lambda^2}{4\pi} D_0 \tag{A87}$$

yazabiliriz.

50 Ω' luk bir sistemde alıcıya aktarılan gücü yazar ve eşitlik (A87) ile birleştirirsek,

$$P_T = \frac{V^2}{100} = \frac{E^2}{2\eta}\frac{\lambda^2}{4\pi}D_0 \qquad \text{(A88)}$$

olacaktır. Eşitlik (A88)' i biraz düzenleyelim ve D_o' ı yalnız bırakalım, sonrada eşitliğin her iki tarafının logaritmasını alarak 10 ile çarpalım,

$$10\log(D_o) = 20\log(\frac{V}{E}) + 10\log(\frac{4\pi\eta}{50}) - 20\log(\lambda) \qquad \text{(A89)}$$

olacaktır. $AF = \frac{E}{V}$, $\eta = 377$ (serbest uzay) ve $\lambda = c / f$ olduğunu hatırlarsak,

$$10\log(D_o) = -20\log(\frac{E}{V}) + 10\log(30.16\pi) - 20\log(\frac{10^{-6}c}{f_{MHz}}) \qquad \text{(A90)}$$

olacaktır. Bu eşitlikte,

c = Serbest uzaydaki ışık hızı 3.108 m/sn

f_{MHz} = Frekans (MHz)

olmaktadır.

Biraz daha düzenleme yaparsak ve decibel biriminde yazarsak,

$$D_o(dB) = 20\log(f_{MHz}) - AF(dB) - 29.79 \qquad \text{(A91)}$$

olacaktır.

Bu formül çıkartılırken antenin iletimsel ve dielektriksel kayıplarının olmadığı düşünülmüştür. Eğer bu kayıplar mevcut ise yönlendiricilik yerine kazanç kullanılmalıdır ve,

$$G_o(dB) = 20\log(f_{MHz}) - AF(dB) - 29.79 \qquad \text{(A92)}$$

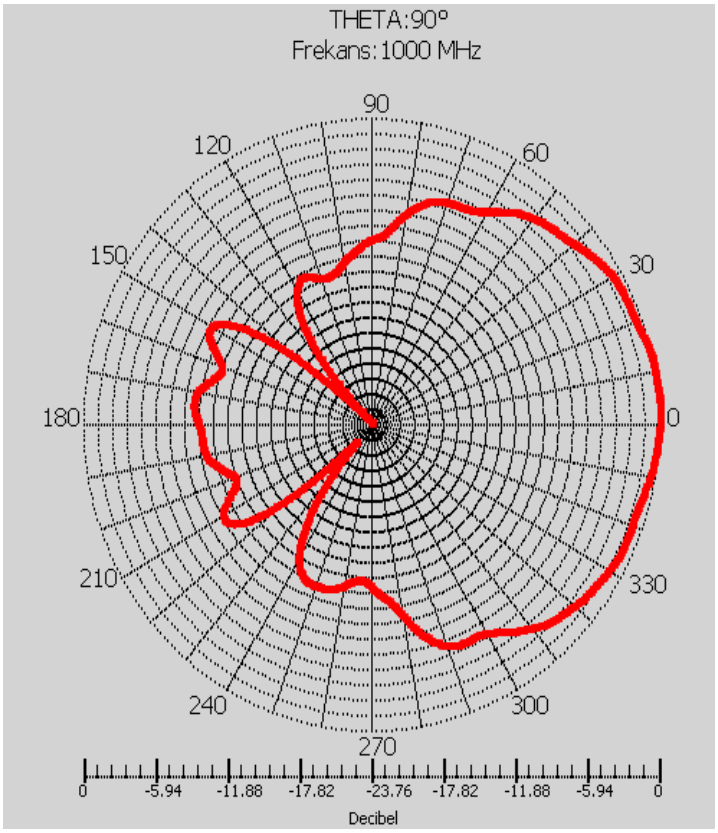
olacaktır. Pratikte genellikle kullanılan antenlerin girişlerine empedans uyumluluğu için RF zayıflatıcılar konulmakta ve yansıma kayıpları minimum seviyelere indirilebilmektedir.

EK-B

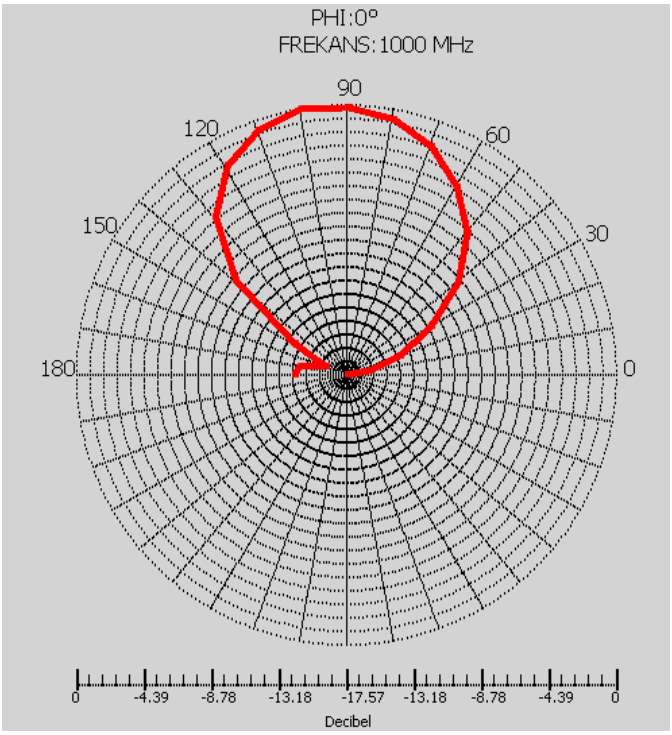
B.1. ARA Marka Horn Anten için Ölçümler

Bu bölümde, ARA marka DRG118/A model numaralı 9014 seri numaralı antene, geliştirilen yazılım ile ve kurulan düzenek ile yapılan desen ölçümü çalışmaları yapılacak ve elde edilen sonuçlar frekans bazında gösterilecektir. Temel desenler olması nedeniyle, desen sonuçları sadece yatay düzlem deseni $\theta = 90^o$ ve dikey düzlem deseni $\phi = 0^o$ için verilecektir. Ayrıca, 3-D desenlerde, iki boyutlu desenlerin hemen ardından sunulacaktır.

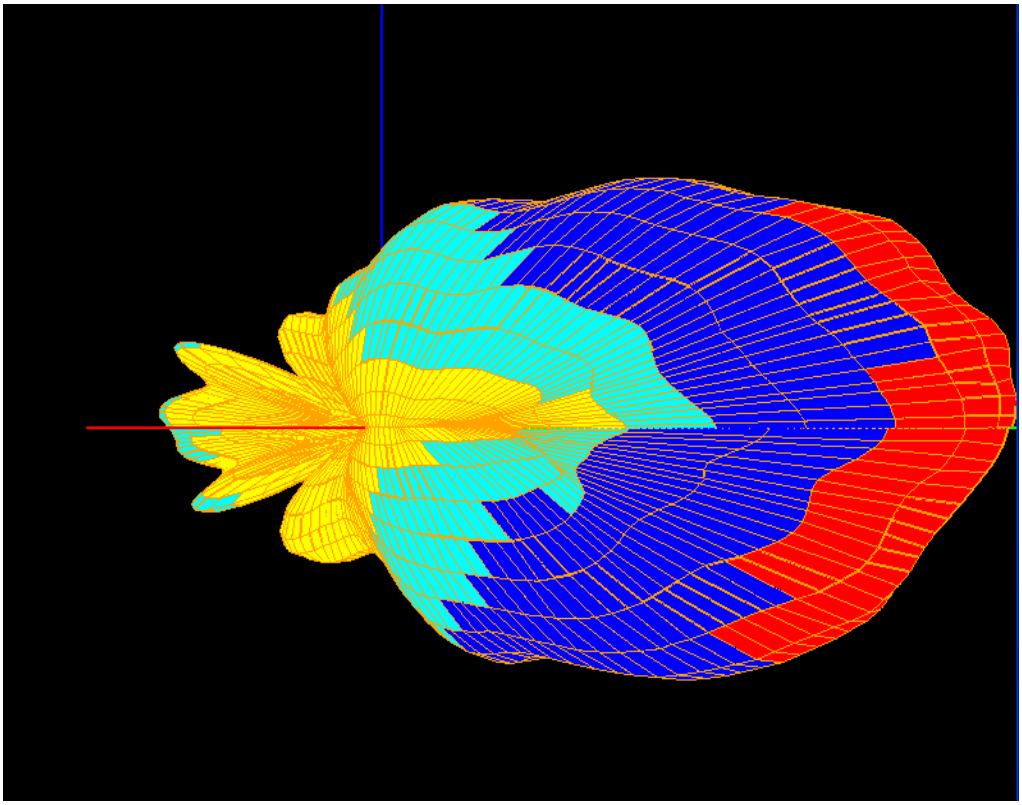
B.1.1. ARA horn anten 1 GHz desen ölçümleri



Şekil B1: ARA horn anten, 1 GHz yatay düzlem grafiği (θ=90^o, 0^o≤ϕ≤360^o, logaritmik skala)

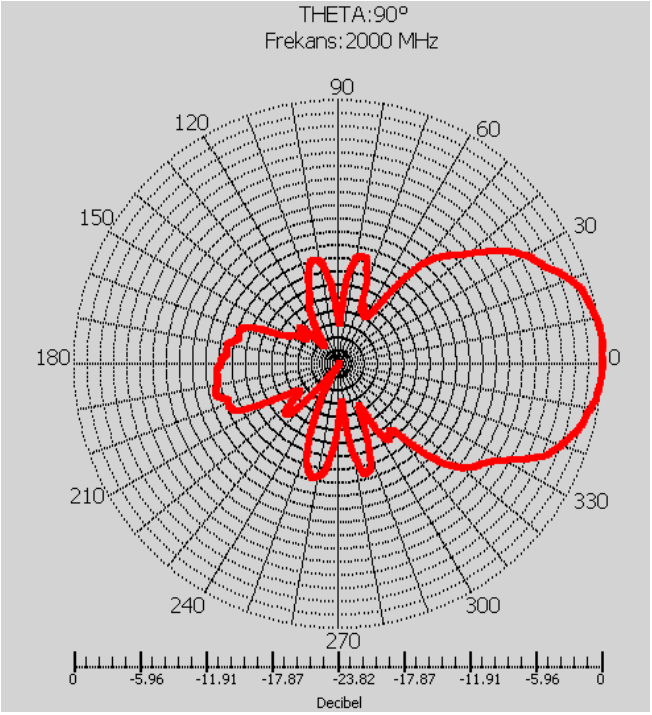


Şekil B2: ARA marka horn antenin 1 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 360^o$, logaritmik skala)

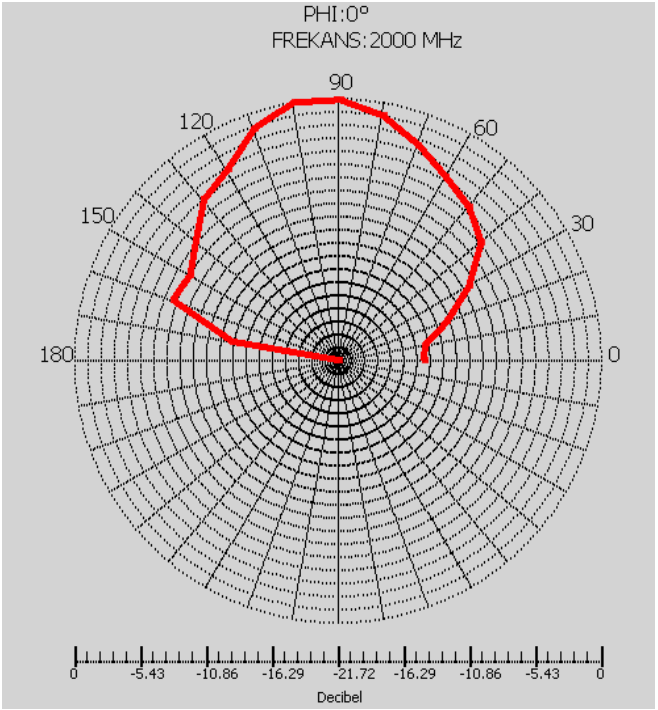


Şekil B3: ARA marka horn antenin 1 GHz için üç boyutlu deseni

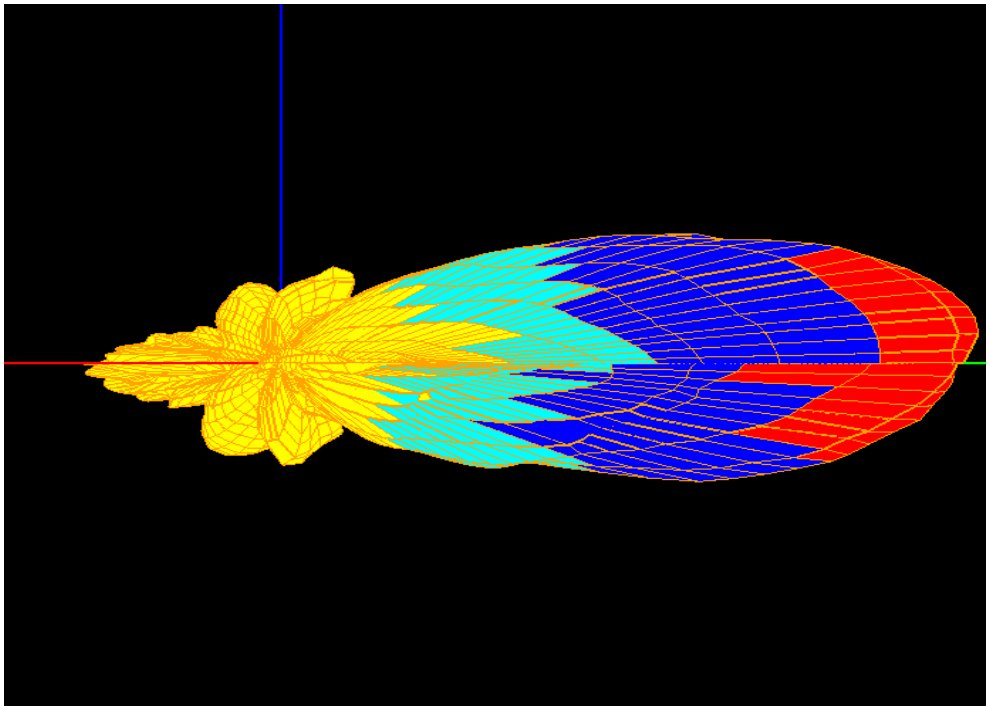
B.1.2. ARA horn anten 2 GHz desen ölçümleri



Şekil B4: ARA horn anten, 2 GHz yatay düzlem grafiği ($\theta=90^o$, $0^o \leq \phi \leq 360^o$, logaritmik skala)

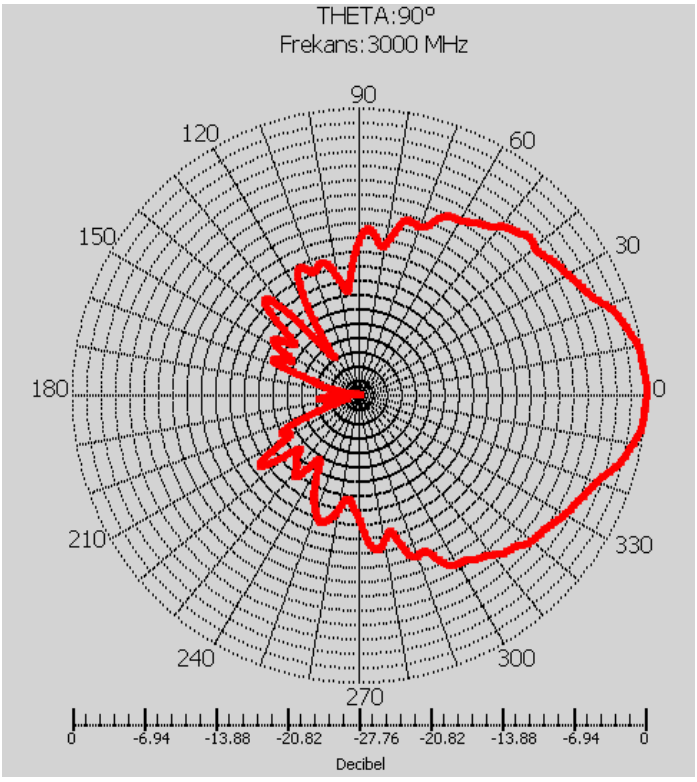


Şekil B5: ARA marka horn antenin 2 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 360^o$, logaritmik skala)

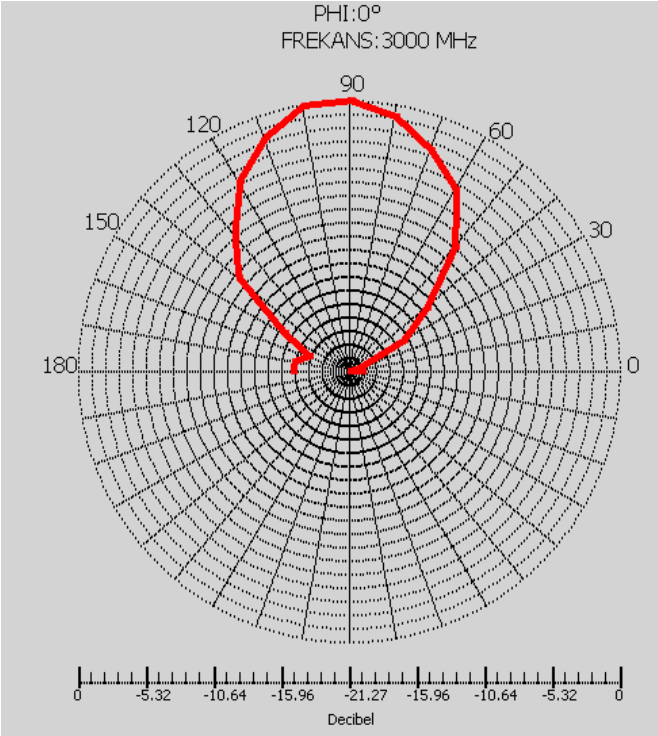


Şekil B6: ARA marka horn antenin 2 GHz için üç boyutlu deseni

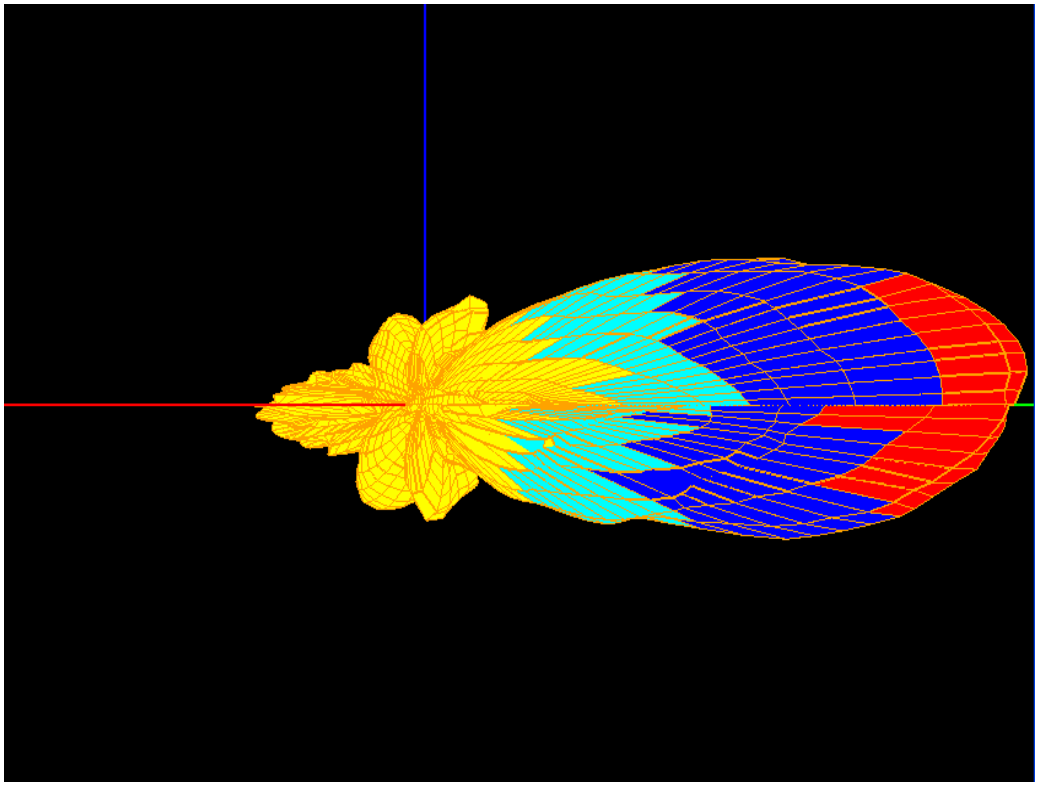
B.1.3. ARA horn anten 3 GHz desen ölçümleri



Şekil B7: ARA horn anten, 3 GHz yatay düzlem grafiği ($\theta=90^o$, $0^o \leq \phi \leq 360^o$, logaritmik skala)



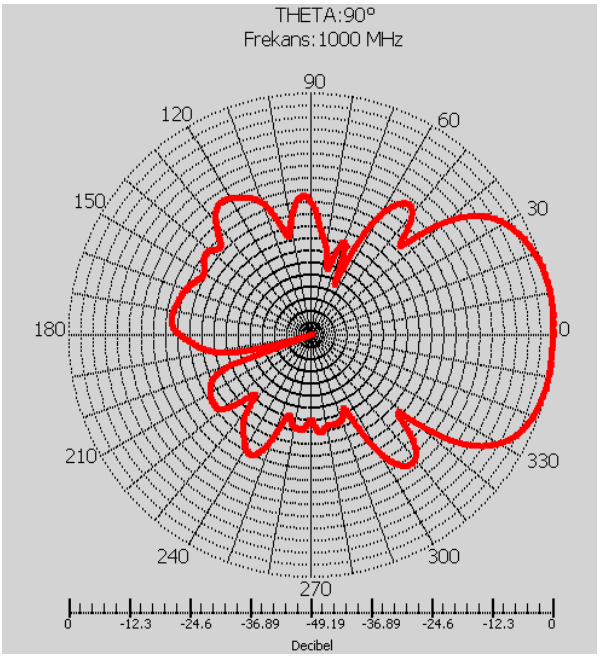
Şekil B8: ARA marka horn antenin 3 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 360^o$, logaritmik skala)



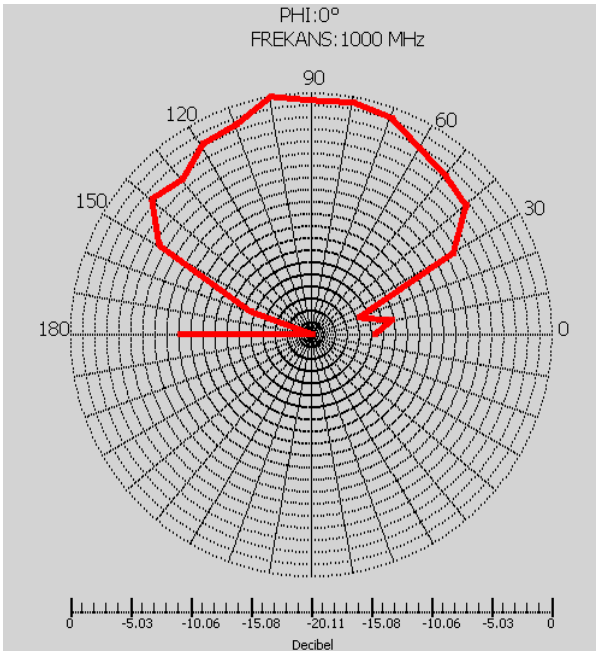
Şekil B9: ARA marka horn antenin 3 GHz için üç boyutlu deseni

B.2. Log-Periyodik Anten için Ölçümler

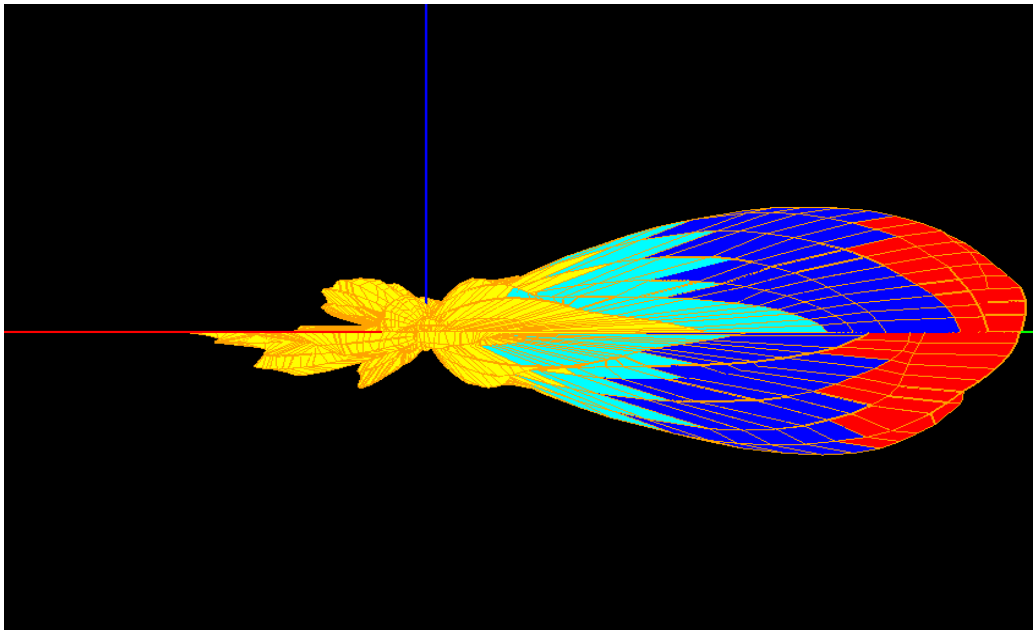
B.2.1. Log-Periyodik anten 1 GHz desen ölçümleri



Şekil B10: Log-periyodik antenin, 1 GHz yatay düzlem deseni ($\theta=90^o$, $0^o \leq \phi \leq 360^o$, logaritmik skala)



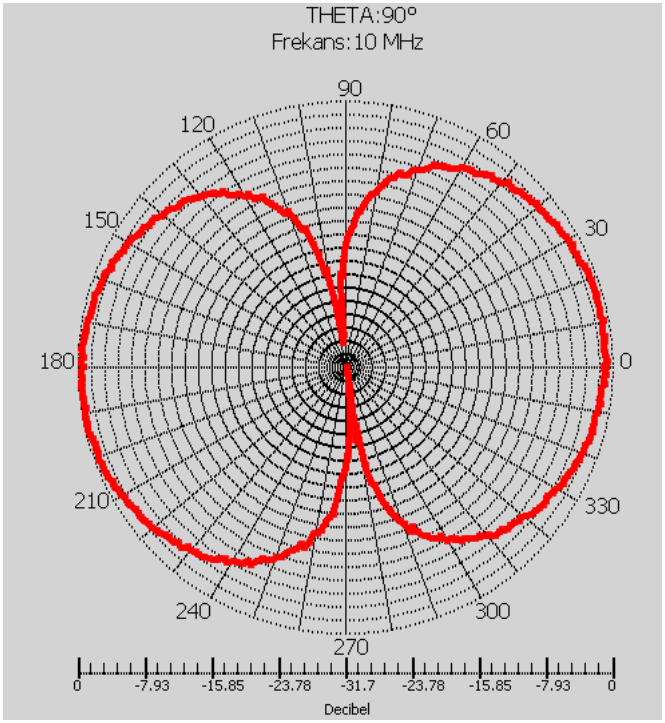
Şekil B11: Log-periyodik antenin, 1 GHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 180^o$, logaritmik skala)



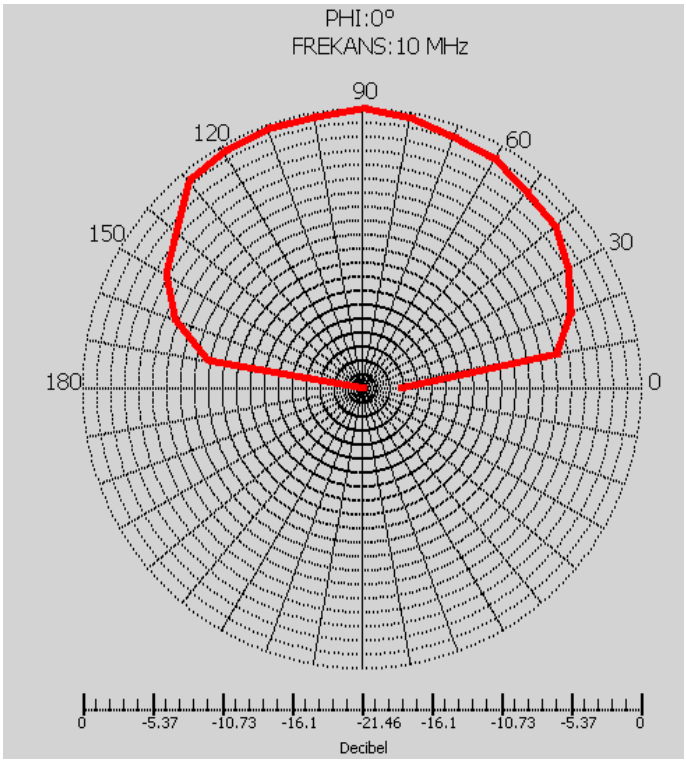
Şekil B12: Log-periyodik antenin 1 GHz için üç boyutlu deseni

B.3. Halka Anten için Ölçümler

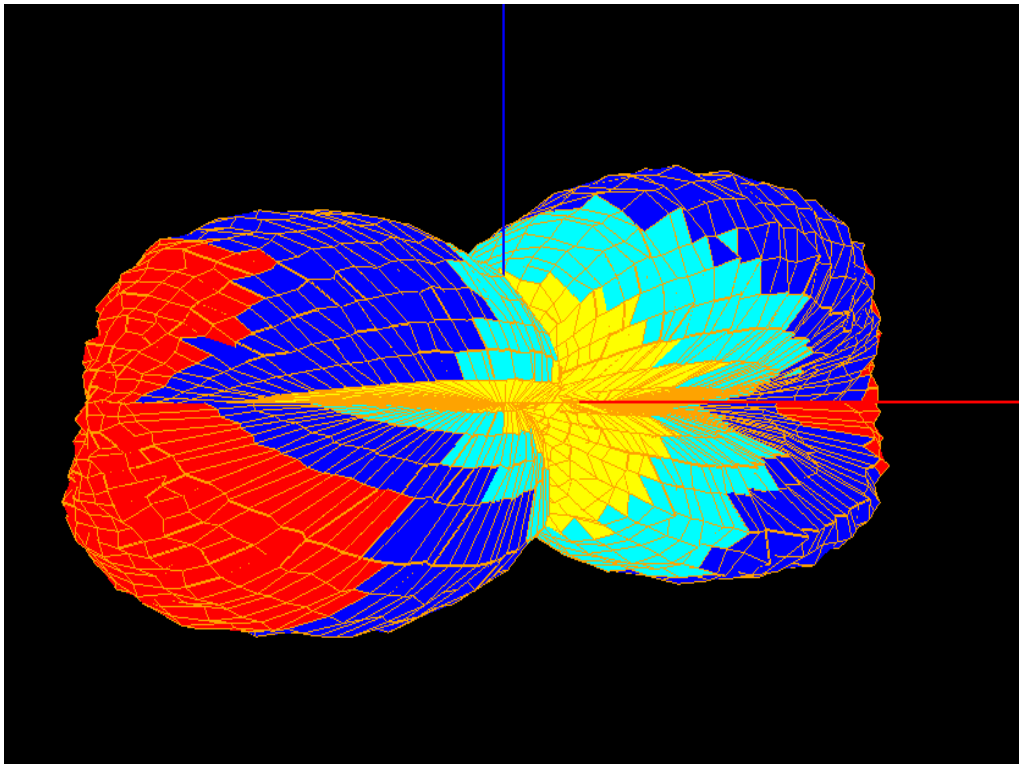
B.3.1. Halka anten 10 MHz desen ölçümleri



Şekil B13: Halka antenin, 10 MHz yatay düzlem deseni (θ=90^o, 0^o≤ϕ≤360^o, logaritmik skala)



Şekil B14: Halka antenin, 10 MHz, $\phi = 0^o$ için dikey düzlem deseni ($0^o \leq \theta \leq 180^o$, logaritmik skala)



Şekil B15: Halka antenin, 10 MHz için üç boyutlu deseni

EK-C:

Tablo C1: Yarım dalga dipol için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
// KOD BAŞLANGICI

// Yarım dalga dipol için model hatası

// ***************************

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace WindowsApplication1
{
   public partial class Form1 : Form
   {
      public Form1()
      {
         InitializeComponent();
      }

      private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
      {
         double p;
         p = 0;

         for (int j = 1; j <= int.Parse(textBox2.Text); j++)
         {
            for (int i = 1; i <= int.Parse(textBox1.Text); i++)
            {
               p = p + Math.Pow((Math.Cos((Math.PI / 2) * Math.Cos(((double)i) * (Math.PI)
/ double.Parse(textBox1.Text)))) / (Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text))), 2);
            }
         }
         p = ((377 * Math.Pow(double.Parse(textBox4.Text), 2)) / (8 * Math.PI * Math.PI)) *
(Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) * (((double)2) * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)) * p;
         textBox3.Text = p.ToString();
      }
   }
}
```

Tablo C2: $Sin^4\theta.Sin^4\phi$ deseni için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
// KOD BAŞLANGICI

//Sin4(Theta). Sin4(Theta) deseni

//*****************************

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace WindowsApplication1
{
   public partial class Form1 : Form
   {
      public Form1()
      {
         InitializeComponent();
      }

      private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
      {
         double p;
         p = 0;
         for (int j = 1; j <= int.Parse(textBox2.Text); j++)
         {
            for (int i = 1; i <= int.Parse(textBox1.Text); i++)
            {
               if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) <= 60 || (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) >= 300) p = p + Math.Pow(Math.Cos(j * 2 * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
               if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 60 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) <= 120) p = p + 0.2*Math.Pow(Math.Sin(j * 2 * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
               if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 120 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) <= 150) p = p + 0.2 * Math.Pow(Math.Cos(j * 2 * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)-Math.PI*3/4), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
               if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 150 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) <= 210) p = p + 0.2 * Math.Pow(Math.Cos(j * 2 * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
```

Tablo C2: (Devam) $Sin^4\theta.Sin^4\phi$ deseni için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
                if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 210 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) <= 240) p = p + 0.2 * Math.Pow(Math.Cos(j * 2 * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)-5*Math.PI/4), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
                if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 240 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) < 300) p = p + 0.2 * Math.Pow(Math.Sin(j * 2 * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));

            }
          }
          p = (Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) * (((double)2) * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)) * p;
          textBox3.Text = p.ToString();
       }
    }
}
// KODUN SONU
```

Tablo C3: Lineer dizi (8) – Özel Desen 3 için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
// Lineer Dizi-Ozel Desen 3
//************************
//************************


using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;


namespace WindowsApplication1
{
   public partial class Form1 : Form
   {

      public Form1()

      {    InitializeComponent();   }
```

Tablo C3:(Devam) Lineer dizi (8) – Özel Desen 3 için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
      private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
      {


         int sayac;
         double p,array_factor,dizi_sayisi,k,d,B;
         p = 0;
         dizi_sayisi = double.Parse(textBox6.Text);
         k = double.Parse(textBox5.Text);
         d = double.Parse(textBox4.Text);
         B = double.Parse(textBox7.Text);
         progressBar1.Value = 0;
         progressBar1.Maximum = (int.Parse(textBox2.Text) + 1) *
(int.Parse(textBox1.Text) + 1);
         progressBar1.Visible = true;

         sayac = 0;
         for (int j = 1; j <= int.Parse(textBox2.Text); j++)
         {
            for (int i = 1; i <= int.Parse(textBox1.Text); i++)
            {
               sayac++;
               progressBar1.Value = sayac; Application.DoEvents();

               array_factor = Math.Pow(((Math.Sin(dizi_sayisi * (k * d * Math.Cos(i *
Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) + B) / 2) / Math.Sin((k * d * Math.Cos(i * Math.PI
/ double.Parse(textBox1.Text)) + B) / 2))), 2);

               if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) <= 90 || (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) >= 270) p = p + array_factor*Math.Pow(Math.Cos(j * 2 *
Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)), 8) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 8) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
               else Application.DoEvents();

            }
         }

         p = (Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) * (((double)2) * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)) * p;
         textBox3.Text = p.ToString();
         progressBar1.Visible = false;


      }
   }
}
```

Tablo C4: Planer dizi – Özel Desen 4 için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
//Planer dizi
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace WindowsApplication1
{
   public partial class Form1 : Form
   {
      public Form1()
      {
         InitializeComponent();
      }

      private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
      {

         double p, array_factor, dizi_sayisiX, dizi_sayisiY, k, dX,dY, BX,BY;

         p = 0;

         int sayac;

                dizi_sayisiX = double.Parse(textBox6.Text);

               dizi_sayisiY = double.Parse(textBox8.Text);

               k = double.Parse(textBox5.Text);

               dX = double.Parse(textBox4.Text);

               dY = double.Parse(textBox9.Text);

               BX = double.Parse(textBox7.Text);

               BY = double.Parse(textBox10.Text);
         progressBar1.Value = 0;

progressBar1.Maximum=(int.Parse(textBox2.Text)+1)*(int.Parse(textBox1.Text)+1);
         progressBar1.Visible = true;
         sayac = 0;
         for (int j = 1; j <= int.Parse(textBox2.Text); j++)
         {
            for (int i = 1; i <= int.Parse(textBox1.Text); i++)
            {
               sayac++;
               progressBar1.Value = sayac; Application.DoEvents();
```

Tablo C4:(Devam) Planer dizi – Özel Desen 4 için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
            array_factor = Math.Pow((((Math.Sin(dizi_sayisiX * (k * dX * Math.Sin(i *
Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) * Math.Cos(j * 2 * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)) + BX) / 2) / Math.Sin((k * dX * Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)) * Math.Cos(j * 2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)) +
BX) / 2))) * ((Math.Sin(dizi_sayisiY * (k * dY * Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)) * Math.Sin(j * 2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)) +
BY) / 2) / Math.Sin((k * dY * Math.Sin(i * Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) *
Math.Sin(j * 2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)) + BY) / 2)))), 2);

                if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) <= 90 || (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) >= 270) p = p + array_factor * Math.Pow(Math.Cos(j * 2 *
Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)), 8) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 8) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
                else Application.DoEvents();


            }
        }
        p = (Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) * (((double)2) * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)) * p;
        textBox3.Text = p.ToString();
        progressBar1.Visible = false;

    }

  }

}
```

Tablo C5: Planer dizi (8x8) – Özel Desen 5 için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
// 8x8 Planar Array (Ozel desen 5)

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;


namespace WindowsApplication1

{

   public partial class Form1 : Form
```

Tablo C5: (Devam) Planer dizi (8x8) – Özel Desen 5 için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
{
      public Form1()
      {
         InitializeComponent();
      }
      private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
      {
         double p, array_factor, dizi_sayisiX, dizi_sayisiY, k, dX,dY, BX,BY;
         p = 0;
         int sayac;
                dizi_sayisiX = double.Parse(textBox6.Text);
               dizi_sayisiY = double.Parse(textBox8.Text);
               k = double.Parse(textBox5.Text);
               dX = double.Parse(textBox4.Text);
               dY = double.Parse(textBox9.Text);
               BX = double.Parse(textBox7.Text);
               BY = double.Parse(textBox10.Text);
         progressBar1.Value = 0;
progressBar1.Maximum=(int.Parse(textBox2.Text)+1)*(int.Parse(textBox1.Text)+1);
         progressBar1.Visible = true;

         sayac = 0;
         for (int j = 1; j <= int.Parse(textBox2.Text); j++)
         {

            for (int i = 1; i <= int.Parse(textBox1.Text); i++)
            {

               sayac++;

               progressBar1.Value = sayac; Application.DoEvents();
               array_factor = Math.Pow((((Math.Sin(dizi_sayisiX * (k * dX * Math.Sin(i *
Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) * Math.Cos(j * 2 * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)) + BX) / 2) / Math.Sin((k * dX * Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)) * Math.Cos(j * 2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)) +
BX) / 2))) * ((Math.Sin(dizi_sayisiY * (k * dY * Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)) * Math.Sin(j * 2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)) +
BY) / 2) / Math.Sin((k * dY * Math.Sin(i * Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) *
Math.Sin(j * 2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)) + BY) / 2)))), 2);

               if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) <= 60 || (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) >= 300) p = p + array_factor*Math.Pow(Math.Cos(j * 2 *
Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));

               if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 60 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) <= 120) p = p + 0.2 * array_factor * Math.Pow(Math.Sin(j *
2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
```

Tablo C5: (Devam) Planer dizi (8x8) – Özel Desen 5 için model hatasını tespit eden programcık kodu

```
if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 120 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) <= 150) p = p + 0.2 * array_factor * Math.Pow(Math.Cos(j *
2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text) - Math.PI * 3 / 4), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i *
Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
                if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 150 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) <= 210) p = p + 0.2 * array_factor * Math.Pow(Math.Cos(j *
2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
                if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 210 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) <= 240) p = p + 0.2 * array_factor * Math.Pow(Math.Cos(j *
2 * Math.PI / double.Parse(textBox2.Text) - 5 * Math.PI / 4), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i *
Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
                if ((j * 2 * 180 / double.Parse(textBox2.Text)) > 240 && (j * 2 * 180 /
double.Parse(textBox2.Text)) < 300) p = p + 0.2 * array_factor * Math.Pow(Math.Sin(j * 2
* Math.PI / double.Parse(textBox2.Text)), 4) * Math.Pow(Math.Sin(i * Math.PI /
double.Parse(textBox1.Text)), 4) * Math.Sin(((double)i) * (Math.PI) /
double.Parse(textBox1.Text));
            }
          }
          p = (Math.PI / double.Parse(textBox1.Text)) * (((double)2) * Math.PI /
double.Parse(textBox2.Text)) * p;
          textBox3.Text = p.ToString();
          progressBar1.Visible = false;
      }
   }
}
```

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Çorlu' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Lüleburgaz' da tamamladı. 1994 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nden 1999 yılında Elektronik ve Haberleşme Mühendisi olarak mezun oldu. 1999 – 2005 yılları arasında sırasıyla Esim Test Hizmetleri A.Ş ve Vestel ARGE' de EMC Mühendisi olarak çalıştı ve 2005 yılından itibaren TÜBİTAK UME EMC laboratuarında araştırmacı olarak görev yapmakta olup, evli ve bir çocuk babasıdır.