

**İNCE ANTEN DİZİSİ KULLANARAK
DÜZLEMSEL YAKIN ALAN ELDE EDİLMESİ**

726642

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Önder TÜRKOĞLU
(504972027)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Ağustos 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Şubat 2002**

TEZ DANIŞMANI : Prof. Dr. İnci AKKAYA

Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Ercan TOPUZ (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Filiz GÜNEŞ(Y.T.Ü.)

Prof.Dr. Selim ŞEKER(B.Ü.)

Yrd. Doç. Dr. Selçuk PAKER(İ.T.Ü.)

ŞUBAT 2002

ÖNSÖZ

Ülkemizin özellikle güney doğusunda sivil hayatı tehdit eden mayınların açtığı sorunlar, mayın bulma ve imha etme sistemleri üzerine çalışmaları zorunlu kılmaktadır. Bu tezde öncelikli hedefi mayın taramada kullanılacak düzlemsel yakın alan veren bir anten sistemi geliştirmektir.

Bu tezin hazırlanması sırasında, zaman zaman oluşan sağlık problemlerine rağmen, hafta sonları da dahil çok değerli zamanlarından fedakarlık ederek, tezin kemale ermesi için yol gösteren, kendini ülkenin bilim ve teknolojisini geliştirmeye ve bu bilim ve teknolojileri geliştirecek bilim adamı yetiştirmeye adanmış kıymetli danışmanım Sayın Prof. Dr. İnci AKKAYA Hanım'a şükranlarımı sunmayı borç bilirim.

Yine bu tezin yol almasında değerli katkıları bulunan Sayın Prof. Dr. Burhanettin CAN ve Sayın Doç. Dr. Cevdet IŞIK'a, sevgili meslektaşlarım Bayram ESEN ve Cüneyt UTKU'ya, kıymetli fikirlerinden dolayı Ali YAPAR'a, yardımlarından dolayı M.Ü. İnternet Merkezine ve engin sabrından dolayı da sevgili eşim Huriye Hanım'a teşekkür ederim.

Önder TÜRKOĞLU

Ağustos 2001

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Mayın Tarama	3
1.2 Anten Sistemi	7
1.3 Antenlerin Beslemesi	9
1.4 E-Şekilli Anten	11
1.5 E Şekilli Antenin Devresi	13
1.6 Özet: Tezde ele alınan problem	13
2. E ŞEKLİ ANTENLERİN ANALİZİ	15
2.1 Ortadan Beslemeli E-Şekilli Antenler (OBEŞA)	15
2.2 Uçtan Beslemeli E-Şekilli Antenler(UBEŞA)	27
2.3 EŞA'ın Görüntüsü	32
2.4 Özet:	35
3. UÇTAN BESLEMELİ VE ORTADAN BESLEMELİ EŞA'LERİN ÖZELLİKLERİ	36
3.1 EŞAların Ortak Ve Öz Empedansları	39
3.2 E Şekilli Antenin Beslemesi	43
3.3 Zeminin Etkisi	44
3.4 Özet	46
4. EŞA DİZİSİNİN ANALİZİ	47
5. SİSTEM TASARIMI	51
5.1 Program	55
5.1.1 Program Bileşenleri	56
5.1.2 Programın Doğrulanması	58
5.2 Genetik Algoritma Uygulaması	59
5.3 EŞA Dizisindeki Elemanların Besleniş Ve Empedansları	61
5.4 Sonuçların Tartışması	68
5.5 Alıcı Antenler	69
5.6 Özet	70

6. ÇALIŞMANIN DEVAMI VE ÖNERİLER	72
6.1 Sakıncalara Çözümler	73
6.2 Rezonans Bölgesini Değiştirme	74
7. KAYNAKLAR	77
A KÜREDEN SAÇILAN ALANLAR	80
B GENETİK ALGORİTMADA Uygunluk Kriteri	81
B.1 Farklar Toplamı (Hatalar Toplamı):	81
B.2 En Az Kareler Yöntemi (Hata Karelerinin Toplamı)	81
B.3 Geniş Bölge Yöntemi	82
B.4 En Az Hata Yöntemi	83
B.5 Melez Yöntemler	84
ÖZGEÇMİŞ	85



KISALTMA LİSTESİ

EŞA	: E Şekli Anten
OBDA	: Ortadan beslemeli dipol anten
UBDA	: Uçtan beslemeli dipol anten
OBEŞA	: Ortadan beslemeli E Şekli anten
UBEŞA	: Uçtan beslemeli e şekilli anten
SaEOBEŞA	: Sağ El Ortadan beslemeli E Şekli anten
SaEUBEŞA	: Sağ El Uçtan beslemeli e şekilli anten
SoEOBEŞA	: Sol El Ortadan beslemeli E Şekli anten
SoEUBEŞA	: Sol El Uçtan beslemeli e şekilli anten
Hz	: Hertz
MHz	: Mega hertz
mA	: Miliamper
V	: Volt
GA	: Genetik Algoritma
A	: Anten
W	: Akort ve empedans uydurma devresi
m	: Metre
cm	: Santimetre
dm	: Desimetre

TABLO LİSTESİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1-1	Değişik Ortamların 100MHz'deki İletkenlik ve Dielektrik Sabitleri[]	5
Tablo 1-2	Çalışma Frekansı Bandı Sınır Hesapları	6
Tablo 5-1	(12,0,0) noktasında olan antenin Şekil 5-4'te gösterilen 6 görüntüsü için P(70,-30,15) noktasına göre r_1 değerleri ve fonksiyon değerleri örneği	54
Tablo 5-2	Kayıt yapısı açıklamaları	57
Tablo 5-3	10 üyeli bir ailede uygulanan genetik işlemler	60
Tablo 5-4	Düzlemsel Yakın Alan Elde Edilmesi Problemi İçin 100 İterasyonlu Bir Uygulamada Kullanılan Yöntemler Ve Bir Önceki Adımdan Daha İyi Üyeyi Veren Genetik İşlemler ve İterasyon Sayıları	60
Tablo 5-5	Anten Besleme Tipi Ve Akım Genliği Tablosu	67
Tablo 6-1	40/5 anten sistemi için anten tipi ve besleme akım genliği tablosu	75

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1-1	Toprak altında bulunan bir mayına gelen ve yansıyan dalgalar	4
Şekil 1-2	İletken bir kürenin a yarı çapına bağlı olarak radar kesitinin πa^2 'ye oranı[19]	4
Şekil 1-3	Mayın yarıçapı - Frekans bölgesi seçimi. Noktalı çizgiler $0.8 \leq \frac{2\pi a}{\lambda'} \leq 1.2$ bölgesi için ve koyu çizgiler $0.6 \leq \frac{2\pi a}{\lambda'} \leq 1.5$	6
Şekil 1-4	Anten konfigürasyonu	7
Şekil 1-5	51 Antenin simetrik beslenmesi a) sistem şeması b) empedans uydurma ve akort devresi	8
Şekil 1-6	Yuvarlatılmış köşeler	9
Şekil 1-7	50 MHz'de merkezi (0,0,0) konumunda bulunan ve z eksenine paralel 50cm boyu a) ortadan beslenmiş, b) uçtan beslenmiş, c) eş faz ve eş akımla 51 elemanlı ortadan beslenmiş d) eş faz ve eş akımla 51 elemanlı uçtan beslenmiş sistemlerin düzlem parçası üzerindeki elektrik alan z bileşeni dağılımları	10
Şekil 1-8	Anten beslemesinin seçimi	11
Şekil 1-9	Verici ve alıcı anten sistemi konfigürasyonu	12
Şekil 1-10	E Şekilli Anten	12
Şekil 1-11	Uçtan beslemeli E Şekilli Anten	13
Şekil 2-1	a) Ortadan Beslemeli EŞA ve Kartezyen koordinat sistemi b) a'da antenin yatay kısmı c) a'daki antenin düşey kısmı	16
Şekil 2-2	Kartezyen koordinatlarda bir P noktasına göre OBEŞA'ya göre konum gösterilimi	16
Şekil 2-3	İnce dipol OBEŞA anten üzerinde sinüzoidal akım dağılımı a) Analitik b) NEC	17
Şekil 2-4	OBEŞA iletkeni üzerinde NEC2d (4NEC2) tarafından hesaplanan iletken çapına bağlı akım genliği değişimleri	18
Şekil 2-5	Uçtan Beslemeli EŞA ve akım dağılımı a) gösterim b) NEC	28
Şekil 2-6	Orijinleri çakışık 2 koordinat sistemi	32
Şekil 2-7	EŞA ve görüntüsü için ayrı ayrı koordinat sistemleri	33
Şekil 2-8	Merkezleri arasında $\Delta y \geq 2h_1$ uzaklık olan bir EŞA ve görüntüsü (2. Anten 1. antenin (0, $\Delta y/2$, 0) noktası etrafında Şekil düzleminde 180° dönünce 2. anten elde ediliyor.)	34
Şekil 3-1	Merkezi xyz konumunda bulunan bir EŞA ve merkezi 000 noktasında bulunan bir EŞA	39

Şekil 3-2 Değişik kulak boyları için, sabit frekansta, OBEŞA empedansının anten ana boyu ile değişimi (anten çapı $10-3\lambda$).....	41
Şekil 3-3 Değişik kulak boyları için UBEŞA empedansının anten ana boyu ile değişimi (anten çapı $10-3\lambda$).....	42
Şekil 3-4 Değişik anten boyları için OBEŞA empedansının kulak boyu ile değişimi (anten çapı $10^{-3}\lambda$).....	42
Şekil 3-5 Değişik anten boyları için UBEŞA empedansının kulak boyu ile değişimi (anten çapı $10^{-3}\lambda$).....	43
Şekil 3-6 $2h=50\text{cm}$ $h_1=15\text{cm}$ ve 1mm yarıçaplı EŞA'lerin empedansı.....	43
Şekil 3-7 E Şekli Antenin Uçtan beslemesi.....	44
Şekil 3-8 a) Besleme hattı b) besleme hattına karşı düşen iki telli hat	44
Şekil 3-9 Dalganın farklı ortamlarla karşılaşması.....	45
Şekil 3-10 Zemin üzerinde bir anten ve zemine göre görüntüsü	46
Şekil 4-1 Yansıtıcı levhalar bulunan bir EŞA dizisi	48
Şekil 4-2 Oxy düzlemi içinde a) esas anten ve yansıtıcılar b) $x=-\frac{\Delta x}{2}$ ve $x=+\frac{\Delta x}{2}$ yansıtıcıların verdiği görüntülerin konumları c) $y=\frac{\Delta y}{2}$ deki yansıtıcının verdiği görüntüler	49
Şekil 4-3 Ozy düzlemi içinde a) esas anten ve yansıtıcılar b) $z=-\frac{\Delta z}{2}$ ve $z=+\frac{\Delta z}{2}$ yansıtıcıların verdiği görüntülerin konumları c) $y=\frac{\Delta y}{2}$ deki yansıtıcının verdiği görüntüler	50
Şekil 5-1 Mayın tarama anten sistemi ve taşıyıcı araç.....	51
Şekil 5-2 Verici ve alıcı anten sistemi konfigürasyonu	52
Şekil 5-3 Hesap düzlemi	53
Şekil 5-4 x-ekseni üzerindeki yansıtıcı ve görüntünün konum bilgileri	54
Şekil 5-5 Problem uzayı.....	54
Şekil 5-6 Problem Çözüm Uzayı	55
Şekil 5-7 Yakın Alan Programı ekran görüntüsü.....	56
Şekil 5-8 120 MHz'de Ana ekran Görünümü.....	57
Şekil 5-9 Şekil 5-8'nin kayıt yapısı örneği	57
Şekil 5-10 Şekil 5-9'deki giriş parametreleri için elektrik alanın z bileşeninin genliğinin normalize grafiği.....	58
Şekil 5-11 100 MHz'de a) elektrik alanın z bileşeni normalize diyagramı, b) antenlerin dizi içindeki empedansları, c) besleme tipi ve akım genlikleri giriş menüsü d) besleme tipi ve akım genlikleri benzetimi.....	58
Şekil 5-12 $y=30\text{cm}$, $z=0$ $-1<x<1\text{m}$ çizgisi üzerinde elektrik Alan ve magnetik alan genliğinin değişimi üst) Yakın alan programı alt)NEC	59
Şekil 5-13 100 MHz'de çeşitli genetik algoritma uygunluk kriterlerinin yakınsaması	61

Şekil 5-14 Ortadan uca doğru anten empedanslarının frekansla değişimi.....	62
Şekil 5-15 50-450 MHz bandında Elektrik Alan z bileşeni kaplama başarımı a) Genliğin değişimi b) Maksimum faz sapması.....	62
Şekil 5-16 50-480 MHz bandında 50x200cm ² düzlem parçası üzerinde elektrik alan z bileşen normalize alan diyagramları	63
Şekil 5-17 Antenlerin ayrı ayrı empedansları	64
Şekil 5-18 50-450 MHz bandında Normalize poynting vektörü değişimi.....	65
Şekil 5-19 OBEŞA ve UBEŞA antenlerin ayrı ayrı reaktansları	65
Şekil 5-20 Zemin üzerindeki sistem için anten empedansları	66
Şekil 5-21 Elektrik alan bileşenleri grafiği	68
Şekil 5-22 Elektrik alan x bileşeni filtresi.....	69
Şekil 5-23 Verici ve alıcı anten sisteminin katmanlarının görünümü $y_1 > y_2 > y_3 > y_4 > y_5 > y_6$	70
Şekil 6-1 Besleme devreleri	72
Şekil 6-2 2h=40 cm, h ₁ =5 cm için 50x200cm yüzeyinde 3dB sınırları	74
Şekil 6-3 2h=40 cm, h ₁ =5 boy lu anten dizisinin empedansı (anten yarıçapı 1mm) ..	75
Şekil 6-4 Mayın yarıçapı - Frekans bölgesi seçimi. $0.6 \leq \frac{2\pi r}{\lambda'} \leq 1.5$	76
Şekil 6-5 Mayın yarıçapı - Frekans bölgesi seçimi. $2 \leq \frac{2\pi r}{\lambda'} \leq 2.7$	76
Şekil A.1 Bir küreden saçılan elektrik alanı bileşenleri a) z bileşeni, b) x bileşeni c) Ex/Ez oranı [46]	80
Şekil B.1 a) Farklar Toplamı (Hatalar Toplamı) yöntemi b) kalın çizgi kötü durum	81
Şekil B. 2 a) En az kareler yöntemi yöntemi b) kalın çizgi kötü durum.....	82
Şekil B.3 a)Sol Bölge Genişletme Yöntemi b) kalın çizgi kötü durum.....	82
Şekil B. 4 a) Sağ Bölge Genişletme Yöntemi b) kalın çizgi kötü durum	83
Şekil B.5 a)En Geniş Bölge Yöntemi b) kalın çizgi kötü durum	83
Şekil B. 6 a) En Az Hata Yöntemi b) kalın çizgi kötü durum	84

SEMBOL LİSTESİ

$\vec{A}$	: Vektörel Potansiyel
$\vec{J}$	: Akım Yoğunluğu vektörü
$\vec{H}$	: Magnetik Alan vektörü
$\vec{E}$	: Elektrik Alan vektörü
$\vec{u}_i$	: i Yönündeki Birim Vektör
i_b	: Anten Karın Noktası Akımı (A)
σ	: Ortamın İletkenlik Katsayısı (S/m)
ϵ	: Ortamın Dielektrik Katsayısı (F/m)
ϕ	: Azimut Açısı ($^\circ$)
θ	: Eğim(Elevasyon Açısı) ($^\circ$)
∂	: Kısmi Türev Operatörü
γ	: Dalga Sayısı
α	: Zayıflama Sabiti(Np/m)
σ	: Radar Kesiti (m^2)
λ	: Dalga Boyu (m)
μ	: Ortamın Magnetik Geçirgenlik Sabiti (H/m)
ℓ	: İletim Yolu Boyu (m)
Γ	: Yansıma Katsayısı
λ'	: Bir Ortamdaki Dalga Boyu (m)
ϵ_r	: Ortamın Boşluğa Göre Bağlı Dielektrik Katsayısı
μ_r	: Ortamın Boşluğa Göre Bağlı Magnetik Geçirgenlik Sabiti
a	: Cisim Yarıçapı (m)
A_i	: i . Anten
D, d	: İki İletken Arası Mesafe (m)
d_i	: İletken Yarıçapı (m)
E_g	: Gelen Elektrik Alanı (V/m)
E_s	: Saçılan Elektrik Alanı (V/m)
E_x	: Elektrik Alanı X Bileşeni (V/m)
E_y	: Elektrik Alanı Y Bileşeni (V/m)
E_z	: Elektrik Alanı Z Bileşeni (V/m)
f	: Frekans (Hz)
h	: Anten Yarı Boyu (m)
h_1	: Anten Kulak Boyu (m)
I	: Anten Akımı (A)
k	: Propogasyon Sabiti
K	: Görüntü Anten Sayısı
M	: Merkez
N, n	: Anten Sayısı
P	: Gözlem Noktası
P'	: Referans Nokta
P_0	: Referans Nokta

R, r	: Bir Gözlem Noktasının Bir Referans Noktaya Uzaklığı (m)
ρ	: Bir Gözlem Noktasının Bir Referans Eksene Uzaklığı (m)
R_a	: Anten Direnci (Ω)
V	: Gerilim Kaynağı (V)
V	: Hacim (m^3)
W_1	: İ. Antenin Empedans Uyumlaştırma Ve Akort Devresi
x, x'	: Kartezyen Kordinat X Ekseni, X Bilşeni (m)
X_a	: Anten Reaktansı (Ω)
Z	: Empedans (Ω)
Z_0	: Karakteristik Empedans (Ω)
Z_1	: Toprağın Dalga Empedansı (Ω)
Z_B	: Hattın Besleme Noktası Empedansı (Ω)
y, y'	: Kartezyen Kordinat Y Ekseni, Y Bilşeni (m)
z, z'	: Kartezyen Kordinat Z Ekseni, Z Bilşeni (m)
Z_{21}	: Anten Ortak Empedansı (Ω)

İNCE ANTEN DİZİSİ KULLANARAK DÜZLEMSSEL YAKIN ALAN ELDE EDİLMESİ

ÖZET

Tomografi, yer altı yapılarını inceleme, mayın tarama gibi bir çok uygulamada kullanılmak üzere bir anten sistemi geliştirmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Çalışmada yapılması ve maliyeti en uygun anten tipi olan ince antenler kullanılmıştır.

Enerji maliyetini de en aza indirmek için düzlemsel yakın alan elde edilmeye çalışılmıştır.

Öncelikle mayın tarama amacı göz önüne alınarak, sistem bu ekseninde geliştirilmiştir. Bunun için toprağın elektriksel özellikleri ve uygulamada bilinen mayın boyutları dikkate alınarak çalışma frekansları tespit edilmiştir. İnce antenler kullanılacağı düşünülmüş genel sistem konfigürasyonu kurulmuştur.

Sistemin daha etkin ve verimli hale getirilmesi için kullanılacak antenlerin sadece ortadan beslemeli ince dipol antenler değil, aynı zamanda uçlarından da beslenebilen ince dipol antenlerden oluşması düşünülmüştür. Sistemde kullanılan yansıtıcılar ve uçtan beslemeli dipol antenler ve diğer elektronik devreler sebebiyle, yeni bir anten geometrisi önerilmiştir. Bu geometrik antene E Şekilli Anten (EŞA) adı verilmiştir.

Bu çalışmada, uçtan beslemeli dipol anten, ortadan beslemeli E Şekilli Anten (EŞA) ve uçtan beslemeli E Şekilli Anten (EŞA)'ların yakın alan ve empedans ifadeleri elde edilmiştir.

Daha sonra belli bir düzlem parçasında düzlemsel yakın alan elde edebilmek için, problem uzayı tanımlanmıştır. Buna göre 1+25x2 tane anten kullanılmaktadır. Bu antenlerin besleme akımı genliği ve besleme tipi parametrelerinin ayarlanarak uygun bir çözüm takımı elde edilecek ve bu takımla söz konusu düzlem parçası üzerinde düzlemsel yakın alan elde edilecektir. Bu optimizasyon probleminin çözümü için genetik algoritma incelenmiş ve probleme uyarlanmıştır.

Bir düzlem üzerinde yansıtıcı, yutucu ve ince E Şekilli Anten (EŞA)lerden oluşan bir sistemin elektrik alanını hesaplayan ve benzetim (simülasyon) yapan bir program geliştirilmiştir. Bu program aynı zamanda genetik algoritma ile çözüm yapabilmekte, anten ışıma diyagramlarını ve empedanslarını hesaplamaktadır.

Bu program yardımıyla yapılan optimizasyonlar sonucu, seçilen 50-450 MHz bandında, anten düzleminin 30 cm uzaklığında düzlemsel yakın alan elde edilmiştir.

OBTAINING PLANAR NEAR FIELD BY USING THIN ANTENNA ARRAY

SUMMARY

This work is done to improve an antenna system which is used for the tomography, underground investigation, mine detection, etc. In this work, the thin wire antenna, that is ease-cost and ease-manufacturing, is used.

Planar near field was tried to obtain to decrease the energy cost.

The system was developed for the mine detection purpose, mainly. For this aim, the operation frequency was determined by consider the electrical specifications of ground and typical known mine sizes in the application. The general system configuration is set by consider using the thin wire antennas.

To make the system effective, the antenna is considered as not only center fed dipole antenna, but also end fed dipole antenna. Because of the reflector which is used in the system, the end fed dipole antennas and the other electronic circuits, a new antenna geometry is proposed. This geometrical antenna is called as E shaped Antenna (ESA).

In this work, the near fields and impedances of the end fed dipole antenna, the center fed E shaped Antenna (ESA) and the end fed E shaped Antenna (ESA) are obtained.

Then, problem space is defined to obtain the planar near field on the deterministic plane part. For this aim, it is considered that there are $1+25 \times 2$ antennas, and the planar near field can be obtained by adjusting the antenna feeding current amplitudes and the antenna feeding type. The genetic algorithm is studied to solve this problem and adapted to the problem.

A computer program, which computes electrical field of a system that contains the E Shaped Antennas, the reflector and the absorber, and simulates, is developed. This program solves problem by genetic algorithm and computes radiation diagram and impedances.

A planar near field on a plane at 30 cm distance to the antenna plane, is obtained, at chosen 50-450MHz frequency band with this program.

1. GİRİŞ

- Tomografide
- Toprak altı küçük hedef çalışmalarında: arkeolojik uygulamalar, su borularındaki çatlakları belirleme, mayın taramada
- Yakın mesafe radar çalışmalarında

Antene yakın alanı düzlemsel olan dalga (“düzlemsel yakın alan”) elde edilmesi önem kazanmaktadır.

Carine ve arkadaşları[1] bir aracın üzerinde bir taşıyıcı direk yardımıyla yükseltile bir antenin (kullanılan frekansa göre) çok uzakta (yerde) nispeten düzlemsel alan oluşturması ilkesinden faydalanarak bir sistem geliştirmişlerdir. Ancak bu sistemde çok güçlü bir verici sistem kullanılması gerekmektedir. Ayrıca bu sistem (uygulama açısından, insan ve araç boyutlarına göre) çok büyük boyutlardadır. Pratik ve ekonomik bir sistem için düzlemsel dalganın daha basit bir yapı ile ve antenin yakınındaki bir bölgede elde edilmesi arzu edilir.

Bu çalışmanın konusu geniş bir frekans bandında, tespit edilen amaç için yeterli büyüklükteki ($180 \times 60 \text{ cm}^2$) bir yüzey üzerinde doğrusal polarizasyonlu, düzlemsel yakın alan elde edilmesidir.

Giubolini araba kazalarına karşı kullanılacak bir yakın alanlı anten dizisi üzerine bir çalışma yapmıştır [2]. Giubolini 24Ghz çalışma frekansında 4 verici 48 alıcı microstrip anten içeren bir sistemle araba kazalarına karşı bir radar geliştirir.

Akkaya ve Esen [3] de mayın tarama amaçlı bir diziyi yarık antenler ile oluşturmaya çalışırlar. Sistem yarık anten besleme problemlerine sahiptir ve tamamlanmamıştır.

Carevic'in[4] de yine mayın şekilli cisim tespiti konusunda bir çalışması vardır. Sistem tanımı eksiktir.

Kingsley ve Quegan[5] yer altı inceleme radarlarını (GPR) inceledikleri bölümde 50 km/s hızla yerden 50 m yüksekten uçan bir helikoptere yerleştirilmiş darbeli bir radar sistemi ile elde edilen sonuçları vermişlerdir. Bu yöntem helikoptere gereksindirmesi nedeniyle de yüksek maliyetli bir yaklaşımdır.

Bazı yer altı inceleme uygulamalarında ise, yere dikey bir kuyu açıp bu kuyudan içeri gönderilen bir sistemle yatay tarama[6], lazer[7], sonar[6,8] yöntemleri de kullanılmıştır. Literatürde yapılan bazı mayın tespit analizleri de düzlemsel bir alan üretildiği varsayımı üzerine geliştirilmiştir[9].

Bourgois ve Smith [10] ise önerdikleri sistemde 790 MHz bandında çalışan 15.6 cm boylu, birbirine paralel ve araları 34.2 cm olan 2 dipol vardır. Dipollar birbirine paraleldir ve birisi verici, diğeri alıcı olarak çalışmaktadır. Sistem başlangıçta mayınsız bir ortamdan saçılan alan şiddetine eğitildiği için, çalışma sırasında mayın tespit edilecek saha üzerinde ilerlenirken, eğitim verilerine göre saçılan elektrik alanını değiştirecek mayın gibi bir nesne ortaya çıkınca, alıcı sistem değişimi sezer ve alarm verir. Sistem bistatik radar prensibiyle çalışır.

Bistatik radar sisteminde alıcı ve vericinin birbirinden bağımsız ve uzak antenleri vardır. Bu çalışmada şekillenecek olan sistem ise bistatik değildir, alıcı ve verici aynı noktadaki antenleri kullanacaktır. Bu nedenle geriye saçılan alan söz konusudur.

Örneğin $\vec{k}_{giden} = -k\vec{u}_y = k(\theta = 0^\circ, \varphi = 90^\circ)$ ve $\vec{k}_{gelen} = k\vec{u}_y = k(\theta = 180^\circ, \varphi = 90^\circ)$ propogasyon vektörleriyle çalışılacaktır. Şekil 1-2'deki radar kesiti bu tip gelen ve saçılan alanlar için çıkarılmıştır.

Yukarıda anılan sistemler genellikle üretim, maliyet ve uygulama açısından külfetli sistemlerdir. Literatürde mayın tarama amaçlı dipol antenler kullanılsa da[5,10,11,12], dipol anten sistemleriyle geliştirilmiş düzlemsel yakın alan uygulamasına rastlanmamıştır.

Mayın tarama vb. düzlemsel yakın alan elde edilmesi gereken sistemlerde verici anten ile incelenen hedef arasındaki mesafe çok az (metre boyutunda) olması halinde, anten yüzeyinden birkaç on cm sonra düzlemsel yakın alan elde edilmelidir. Bu nedenle de antenin yakın alan denklemleri bulunması gerekir. Dipol anten için Jordan[13], Collins [14] ve Balanis'in[15] yakın alan çözümü vardır.

Düzlemsel dalga; "tek boyutlu uzaysal bağımlılığı olan"[16], ilerleme doğrultusuna dik düzlem üzerinde sabit fazlı dalgadır Doğrusal düzlemsel dalga: ilerleme doğrultusuna dik bir düzlem üzerindeki alan genliği, fazı ve yönü sabit olan dalgadır[16,17]. Bir doğrusal (üniform) düzlemsel dalga

$$\vec{E} = |E_0| \vec{u}_z e^{-jk_y y} \quad (1-1)$$

şeklinde tanımlanabilir. Buradaki birim vektör ve ilerleme yönü tezin ileriki bölümlerinde tanımlanacak sisteme göre seçilmiştir. İdeal halde E_0 =sabit ve gerçel olmalıdır. İdeal bir hal olan bu tanımın pratikte tutturulması mümkün değildir. Ancak bir kaynaktan çok uzaktaki bir düzlem üzerindeki genliği ve fazı makul toleranslar içinde olan dalga da düzlem dalga olarak tanımlanır. Bu toleranslar ise genliğinin en kötü halde yarı güç seviyesinden daha fazla olması ve fazının da reel kısmının %10'dan daha az değişmesidir. Bizim oluşturduğumuz alanda ise

$$\pm \frac{\lambda}{16} = \pm \frac{360^\circ}{16} = \pm 22.5^\circ \quad (1-2)$$

22.5°'lik bir faz sapmasına izin verilecek. Burada $\frac{\lambda}{16}$ mikrodalga antenlerde açıklık düzlemindeki faz hataları toleransını tanımlar[14]. Aynı zamanda

$$e^{-j23} = 0.92 + j0.38 \quad (1-3)$$

olmaktadır. Yani fazın gerçel kısmının %10 değişmesine izin verilmektedir.

Bu çalışmada mayın tarama işlemlerinde kullanılması için, dipol dizileri kullanılarak düzlemsel yakın alan elde edilmeye çalışılacaktır. Çünkü ince dipol antenler üretimi ve maliyeti açısından en uygun antenlerden biridir. Bu anten sisteminin, mayın taramanın yanında, tomografi, yer altı boru/hat teşhis ve diğer jeolojik incelemelerde de kullanılması mümkündür.

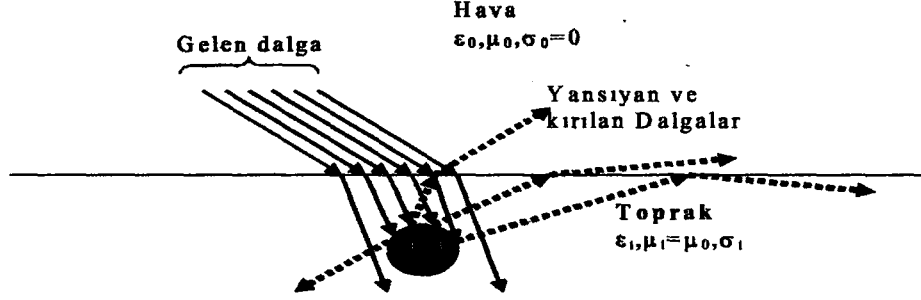
1.1 Mayın Tarama

Toprak altına gömülü mayınlar değişik amaçlar için değişik boyutlarda üretilmiş ve kullanılmıştır. Sıcak savaşın uzağında bulunan masum halk için bile, mayınlar ciddi problemler oluşturmaktadır.

Mayın boyutları ve şekli kullanılış amacına göre değişmekle birlikte bu çalışmada, mayınların 5-30 cm çaplı olduğu kabul edilerek, toprağın elektriksel sabitlerinin de çok değişken olduğu göz önünde bulundurularak, bu mayınları tespit etme işleminde kullanılacak sistem için frekans bölgesini seçmek gerekmektedir.

Mayınların küresel olduğu kabul edilirse, bir mayın üzerine herhangi bir yönden elektromagnetik dalga geldiği zaman, bu dalga çeşitli yönlerde yansır (Şekil 1-1). Yansıma yolu üzerinde belli bir konumda bulunan alıcı antenlerde gerilim indüklenir.

Frekansa ve bu cismin/mayının boyuna bağlı olarak yansımış olan dalgayı alıcı (anten) ve ilişkili sistemler tespit eder. Şekil 1-1'te de görüldüğü gibi, toprağa giren elektromagnetik dalganın tümü cisme/mayına isabet etmez. İsabet eden ve yansıyan elektromagnetik dalgaların hepsi, yansıyarak tekrar toprak üzerine geri çıkamaz. Çıkan dalgalar da farklı yönlerde ilerlerler.

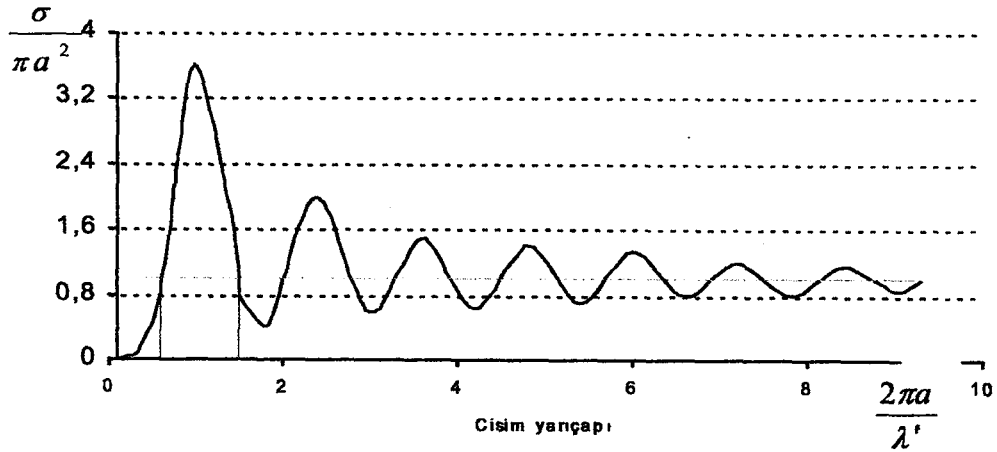


Şekil 1-1 Toprak altında bulunan bir mayına gelen ve yansıyan dalgalar

Bir cismin radar kesiti(σ); o cismin, alan genliği E_g olan düzlemsel dalga ile ısıtıldığı durumda, geri saçtığı E_s alanının kendinden r mesafe uzaktaki değerine bağlı olarak;

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s(\vec{r})|^2}{|E_g(\vec{r})|^2} = 4\pi r^2 \frac{|E_s(r)|^2}{|E_g|^2} \quad (1-4)$$

formülüyle ifade edilir. a yarıçaplı bir iletken küre için $\frac{\sigma}{\pi a^2}$ oranı alanın dalga boyu λ' 'ya bağlı olarak ifade edilebilir(Harrington[18], Collins[14] ve Stutzman[19], bkz Şekil 1-2).



Şekil 1-2 İletken bir kürenin a yarı çapına bağlı olarak radar kesitinin πa^2 'ye oranı[19]

Bu şekil üzerinde kullanacağımız rezonans bölgesi $0.6 < \frac{2\pi}{\lambda'} < 1.5$ seçildi. (Bölüm 7.2’de 2. rezonans dalgasının da kullanılışına değinilmiştir).

$$\frac{2\pi}{\lambda'} = 0.6 \Rightarrow \frac{\sigma}{\pi a^2} = 0.8 \text{ ve } \frac{2\pi}{\lambda'} = 1.5 \Rightarrow \frac{\sigma}{\pi a^2} = 0.8 \quad (1-5 \text{ a})$$

Burada a cisim yarıçapı, λ' elektromagnetik dalganın ortamdaki dalga boyudur.

Tablo 1-1 Değişik Ortamların 100MHz’deki İletkenlik ve Dielektrik Sabitleri[20]

<i>Ortam</i>	<i>İletkenlik(S/m)</i>	<i>Bağıl dielektrik sabiti ϵ_r</i>
Hava	0	1
Kuru Asfalt	10^{-3} - 10^{-2}	2-4
Islak Asfalt	10^{-2} - 10^{-1}	6-12
Kuru kil	10^{-2} - 10^{-1}	2-6
Doymuş Kil	10^{-1} - 10^{-0}	15-40
Kuru beton	10^{-3} - 10^{-2}	4-10
Islak beton	10^{-2} - 10^{-1}	10-20
Kuru Granit	10^{-8} - 10^{-6}	5
Nemli Granit	10^{-3} - 10^{-2}	7
Kuru kireç	10^{-9} - 10^{-6}	7
Islak kireç	10^{-2} - 10^{-1}	8
Kaya tuzu	10^{-4}	4-7
Kuru kum	10^{-7} - 10^{-3}	4-6
Islak kum	10^{-4} - 10^{-2}	10-30
Tabakalı kaya	10^{-2} - 10^{-1}	6-9
Kuru kumlu toprak	10^{-4} - 10^{-2}	4-6
Islak kumlu toprak	10^{-2} - 10^{-1}	15-30
Kuru humuslu toprak	10^{-4} - 10^{-3}	4-6
Islak humuslu toprak	10^{-2} - 10^{-1}	10-20
Kuru killi toprak	10^{-4} - 10^{-1}	4-6
Islak killi toprak	10^{-1} - 10^{-0}	10-15

$$\lambda' = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-5 \text{ b})$$

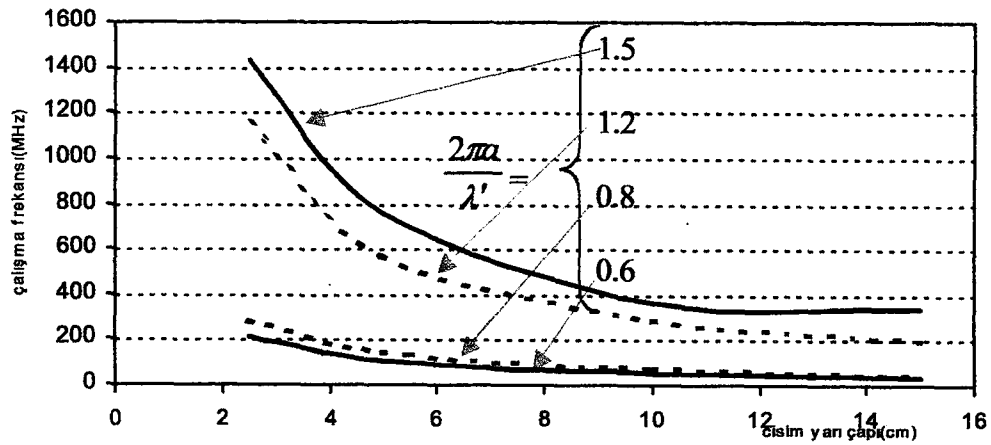
dir. λ alanın boşluktaki dalga boyu ve ϵ_r ortamın bağıl dielektrik sabitidir. Tablo 1-1’de çeşitli zemin tiplerinin iletkenlik ve bağıl dielektrik sabitleri görülmektedir. Tablo 1-1’den bağıl dielektrik sabiti $4 \leq \epsilon_r \leq 30$ olduğu tespit edilerek ve cisim yarıçapı $a=2.5$ cm, $a=5$ cm, $a=10$ cm ve $a=15$ cm seçilerek rezonans frekans bölgeleri hesaplanmıştır.

Tablo 1-2'de Şekil 1-2'den seçilen rezonans bölgesi için, (1-5 a) bağıntılarının geçerli olabilmesi için $\sigma \ll \omega \epsilon$ olmalıdır. Bu nedenle zeminin σ ve ϵ parametrelerinin; 100 MHz'de parametreleri en büyük toprak için $\sigma_1 + j\omega \epsilon_1 = 2 \cdot 10^{-2} + j2\pi 100 \cdot 10^6 \cdot 30 \frac{1}{36\pi 10^9} = 2 \cdot 10^{-2} + j1,67 \cdot 10^{-1}$ ve parametreleri en küçük toprak için $\sigma_2 + j\omega \epsilon_2 = 10^{-4} + j2\pi 100 \cdot 10^6 \cdot 4 \frac{1}{36\pi 10^9} = 10^{-4} + j2,22 \cdot 10^{-2}$ sınır değerleri arasında sabitlere sahip olabileceği bunun da $\sigma \ll \omega \epsilon$ şartını sağladığı görülmektedir.

Tablo 1-2 Çalışma Frekansı Bandı Sınır Hesapları

	a=2.5 cm	a=5 cm	a=10 cm	a=15 cm
$\frac{2\pi a}{\lambda'} = 0,6$	208 ≤ f ≤ 570 MHz	104 ≤ f ≤ 286 MHz	52 ≤ f ≤ 143 MHz	34 ≤ f ≤ 95 MHz
$\frac{2\pi a}{\lambda'} = 0,8$	277 ≤ f ≤ 764 MHz	138 ≤ f ≤ 382 MHz	70 ≤ f ≤ 191 MHz	46 ≤ f ≤ 127 MHz
$\frac{2\pi a}{\lambda'} = 1$	347 ≤ f ≤ 995 MHz	173 ≤ f ≤ 477 MHz	87 ≤ f ≤ 237 MHz	57 ≤ f ≤ 159 MHz
$\frac{2\pi a}{\lambda'} = 1,2$	415 ≤ f ≤ 1150 MHz	208 ≤ f ≤ 570 MHz	105 ≤ f ≤ 286 MHz	69 ≤ f ≤ 191 MHz
$\frac{2\pi a}{\lambda'} = 1,5$	520 ≤ f ≤ 1430 MHz	216 ≤ f ≤ 760 MHz	130 ≤ f ≤ 360 MHz	86 ≤ f ≤ 238 MHz

Tabloda cisim yarıçapı $2.5\text{cm} \leq a \leq 15\text{cm}$ olacağı kabul edilerek hesaplanan çalışma frekans bandları görülmektedir. Ayrıca Şekil 1-3'de cisim yarıçapı ile çalışma frekansının değişimi görülmektedir. Şekilde anten çapı anten yarıçapı-dalga boyu oranı arttıkça, gereken çalışma frekansının da azalmakta olduğu görülmektedir.



Şekil 1-3 Mayın yarıçapı - Frekans bölgesi seçimi. Noktalı çizgiler $0.8 \leq \frac{2\pi a}{\lambda'} \leq 1.2$ bölgesi için ve

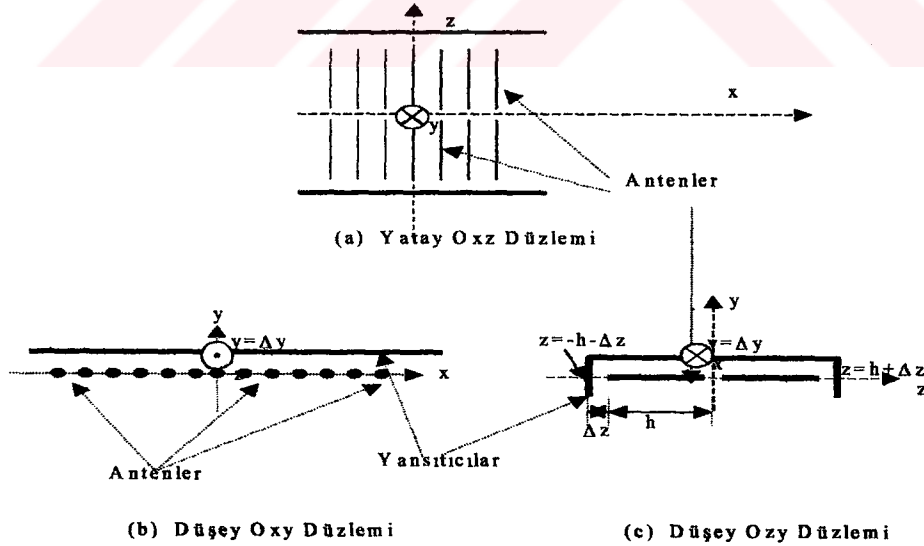
koyu çizgiler $0.6 \leq \frac{2\pi a}{\lambda'} \leq 1.5$

Tablo 1-2 ve Şekil 1-3'deki verilerden yukarıda tanımlanan ortamda , tanımlanan boyutta bir mayını tespit etmek için gerekecek en küçük frekansın 40MHz, en yüksek frekansın 1580MHz olduğu görülmektedir. Fakat $\frac{2\pi m}{\lambda'}$ 'nin 0.6 değerini sağlaması yeterli geleceği için (Şekil 1-3) çalışma frekans bölgesinin 50MHz ile 450MHz arasında sınırlamanın yeterli olacağını kabul ettik.

1.2 Anten Sistemi

GHz frekans bölgesinde kaynaktan birkaç metre uzaklıkta düzlemsel alan elde etmek oldukça kolaydır. Bunun için de mikroşerit (yama) antenler ve bu antenlerin dizileri kullanılır [2],[21]. Bu çalışmada 100 MHz'ler mertebesinde frekanslar ile çalışılacaktır. Düzlemsel dalganın anten sistemine yakınlık derecesi dm mertebesinde olacaktır. Bu nedenle düzlemsel yakın alan elde etme işlemi, üretim ve maliyeti daha avantajlı olan ince dipol antenlerle yapılacaktır. Sistem mayın tarama eksenli olduğu için, yol üzerinde mayın aranacağı dikkate alınarak, 180x60cm² boyutlarında bir anten düzlemi öngörülmektedir. Bu sistemin, bir aracın önüne zeminden en az 25 cm yüksekte ve yatay konumda takılarak kullanılması düşünülmektedir.

Anten sisteminin kartezyen koordinat sistemindeki konfigürasyonu Şekil 1-4'teki gibi olacaktır.



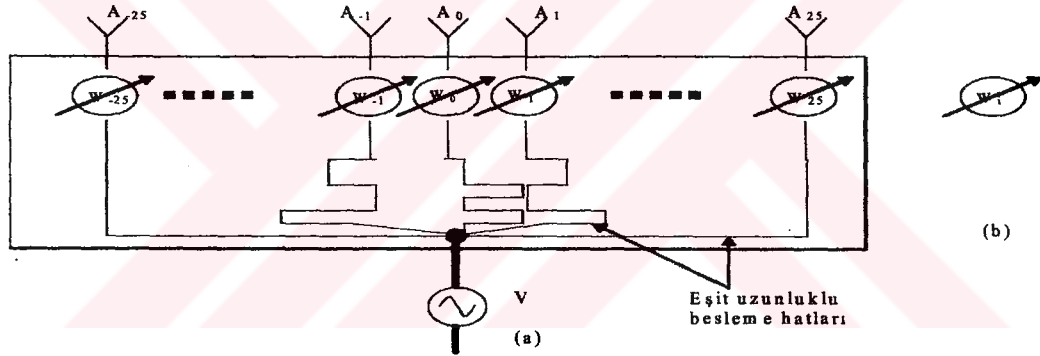
Şekil 1-4 Anten konfigürasyonu

Burada anten eksenini z eksenine paraleldir, ve antenler x ekseninde sıralanmışlardır. Çalışmamızda dipol anten boyu 50cm, antenler arası uzaklık 4 cm

olacak şekilde 51 anten kullanılmıştır. Anten sisteminin arkasında düzlemsel bir yansıtıcı vardır. Ayrıca iki yanında ve x eksenine paralel yansıtıcılar vardır, z eksenine paralel olarak da anten sisteminin iki yanında yutucu birer malzeme olduğu kabul edilmiştir.

Sistemde kullanılan 51 anten için Şekil 1-5'te görüldüğü gibi akort ve empedans uydurma katının tasarlanması gerekmektedir. Bu kattaki ayarlı empedans uyduruculara, frekans değiştikçe, antenlerin değişen empedanslarını besleme hattına uyduracak ve besleme akımlarını uygun şekilde seçecek şekilde kumanda edilecektir. Şekil 1-5'ten de görüldüğü gibi değişken frekanslı besleme üreticinin çıkış noktasından antenlere kadar olan tüm besleme hatlarının uzunluğu birbirlerine eşittir.

Anten beslemeleri $x=0$ eksenine göre simetrik seçilmiştir. Şekilde $x=0$ 'a da bir anten yerleştirilmiştir. Düzlemsel bir yakın alan elde edebilmek için uygun bir akım genliği takımı elde edilmeye çalışılacaktır. Her bir antenin bir kontrol devresi olacak ve besleme akımı ve empedans uyumu bununla kontrol edilecektir (Şekil 1-5 b).



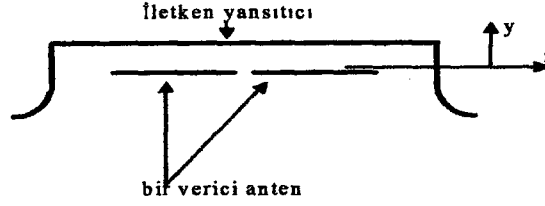
Şekil 1-5 51 Anten simetrik beslenmesi a) sistem şeması b) empedans uydurma ve akort devresi

Bu çalışmada, anten beslemelerinin $x=0$ eksenine göre simetrik seçilmesinden dolayı, $x=0$ eksenine aynı uzaklıkta bulunan antenler aynı genlikte ve fazda akımlarla beslenecektir.

Elde edilen düzlemsel dalga Oxz düzlemine paralel olan toprağa düşey olan bir propogasyon vektörüyle ilerlemelidir. Dalganın elektrik alanı z eksenine paralelse, zeminden yansımış dalgaların elektrik alanı da z eksenine paraleldir. Ancak, toprağın içine giren düzlemsel dalga mayın gibi bir hedefe rastlarsa, bundan yansıyan dalgalarda x bileşeni de olur. Bu dalgalar zeminden havaya çıktıktan sonra da x bileşenli (üstelik x bileşeni diğer bileşenlerden daha büyük genlikli[46]) olacaktır.

Böylece elektrik alanın, hem zeminden ve hem de hedeften yansıyıp dönen z bileşeni yerine sadece hedeften dönen x bileşeniyle çalışmak daha pratik olacaktır.

Bu nedenle, sistemde z-polarizasyonlu olarak üretilecek olan dalganın toprak içindeki mayın gibi bir hedefe çarpıp yansımından sonra, oluşacak olan x-polarizasyonlu alanı tespit etmek için, alıcı antenler de sisteme x-polarizasyonlu olarak yerleştirilecektir. Sistem mikro-kontrolör ile kontrol edilecektir (bkz.Şekil 1-5 ve Şekil 1-9).



Şekil 1-6 Yuvarlatılmış köşeler

Düşey yansıtıcıların uçlarından kırınım olmaması için, yansıtıcının uç kısmı yuvarlatılmalıdır.Şekil 1-6'de yansıtıcı uçlarının yuvarlatılması gösterilmiştir. Krauss[22] yuvarlatılma yarıçapını en az $\lambda/4$ olarak önerir.

1.3 Antenlerin Beslemesi

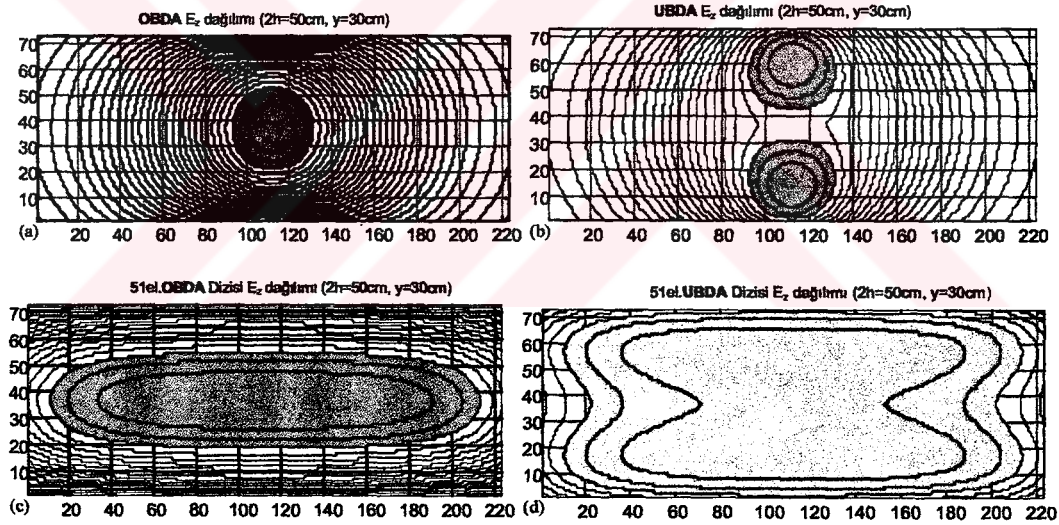
Tespit edilen bir düzlem parçası düzlemsel bir alan dağılımı elde edebilmek için, antenler kısmen ortadan ve kısmen de uçtan beslenecektir. Her ne kadar dipol antenler uygulamada ortadan beslenirlerse de bu çalışmada üniformluğa en yakın alanı üretmek için, bir dipolun uçtan da beslenebildiği kabul edilerek, bu haldeki alan ifadeleri de elde edilecektir.

Bölüm 2 ve Bölüm 3'te gösterildiği gibi literatürde dipol antenler ortadan beslenmektedir ve anten üzerinde anten uçlarında sıfır ve genliği sinüzoidal değişen akım dağılımı kabulüyle analiz yapılmaktadır. Bu durumda bir düzlem parçası üzerindeki antenin yakın alanında antenin uçlarına yakın yerlerde alan genliği, anten üzerinde akım genliğinin maksimum olduğu yere yakın yerlerdeki alan genliği değerlerine göre daha düşük olacaktır (bkz. Şekil 1-7 a). Sistemde literatürdeki gibi antenler sadece ortadan beslemeli kullanılırsa, Şekil 1-7 a)dan da görülebileceği gibi (x, y=sbt, z=±h)'daki yakın alan genliği (x, y=sbt, z=0)'daki yakın alan genliğinden daha düşük değerli olur. Ancak anten üzerinde sinüs dalga genliğinin minimum ve maksimum yerleri değiştirilirse, bu durumda düzlem parçasındaki alan dağılımı da

değişecektir. Mesela akım minimumunun olduğu yer anten üzerinde (0,0,0) noktasına çekilirse bu durumda düzlem parçası üzerinde (x, y=sbt, z=0)deki alan genliği (x, y=sbt, z=th) daki yakın alan genliğinden daha düşük olur.

Şekil 1-7 a)da (3.4) denkleminin verdiği yakın alan genliğinin (-111<x<111, y=30, -36<z<36) düzlem parçasındaki dağılımı ve Şekil 1-7 b)de (3.10) denkleminin (-111<x<111, y=30, -36<z<36) düzlem parçasındaki verdiği yakın alan genliğinin dağılımı görülüyor. Şekillerde her bir eğri 1dBlik değişime karşılık gelmektedir ve koyu bölgeler yarı güç tolerans bölgesidir.

Şekil 1-4 a'daki sistem konfigürasyona sahip ancak yansıtıcıları olmayan ve her bir elemanı eş genlik eş fazlı akımla beslenen bir dizi için; Şekil 1-7 c)de ortadan beslemeli dipolların, Şekil 1-7 d)de uçtan beslemeli dipolların ve (-111<x<111, y=30, -36<z<36) düzlem parçası üzerindeki elektrik alan z bileşeni dağılımı görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi 50 MHz'de uçtan beslemeli antenler daha geniş bir oranda düzlemsellik sağlamaktadır



Şekil 1-7 50 MHz'de merkezi (0,0,0) konumunda bulunan ve z eksenine paralel 50cm boylu a) ortadan beslenmiş, b)uçtan beslenmiş, c)eş faz ve eş akımla 51 elemanlı ortadan beslenmiş d)eş faz ve eş akımla 51 elemanlı uçtan beslenmiş sistemlerin düzlem parçası üzerindeki elektrik alan z bileşeni dağılımları

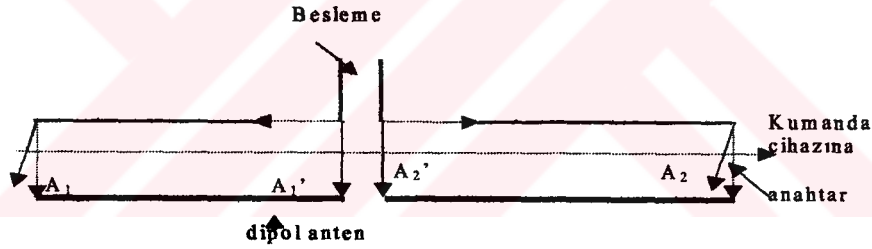
Sistemdeki antenlerin akım minimumlarının farklı farklı yerlerde olmaları, süper pozisyon işlemi sonucunda bir düzlem parçası üzerinde nispeten üniform bir alan genliği oluşturur.

Bu çalışmada z eksenini boyunca olan değişimleri kompanze etmek için besleme tipi, x eksenini boyunca olan değişimleri kompanze etmek için besleme akım genliği ayarlanacaktır.

Uçtan beslemeli ve ortadan beslemeli antenler değişken frekanslarda çalışılacağı için, her bir frekans için farklı akım takımları elde edilecektir . Bu nedenle de antenlerin besleme şeklinin de frekansa bağlı olarak değişebileceği kabul edilecektir. Yani bir anten bir frekans için ortadan beslemeli olarak kullanılırken, aynı anten başka bir frekansta uçtan beslemeli olarak kullanılabilecektir. Bu durumda antenin iki ucunda bulunan anahtarlar yardımıyla anten istenilen besleme şekline getirilecektir. Şekil 1-8da görülen şekilde ya A_1 ve A_2 anahtarları açık A'_1 ve A'_2 anahtarları kapalı yada A_1 ve A_2 anahtarları kapalı A'_1 ve A'_2 anahtarları açık olacaktır. Bu anahtarlama işlemini bir mikrokontrolör sistemi kumanda edecektir.

1.4 E-Şekilli Anten

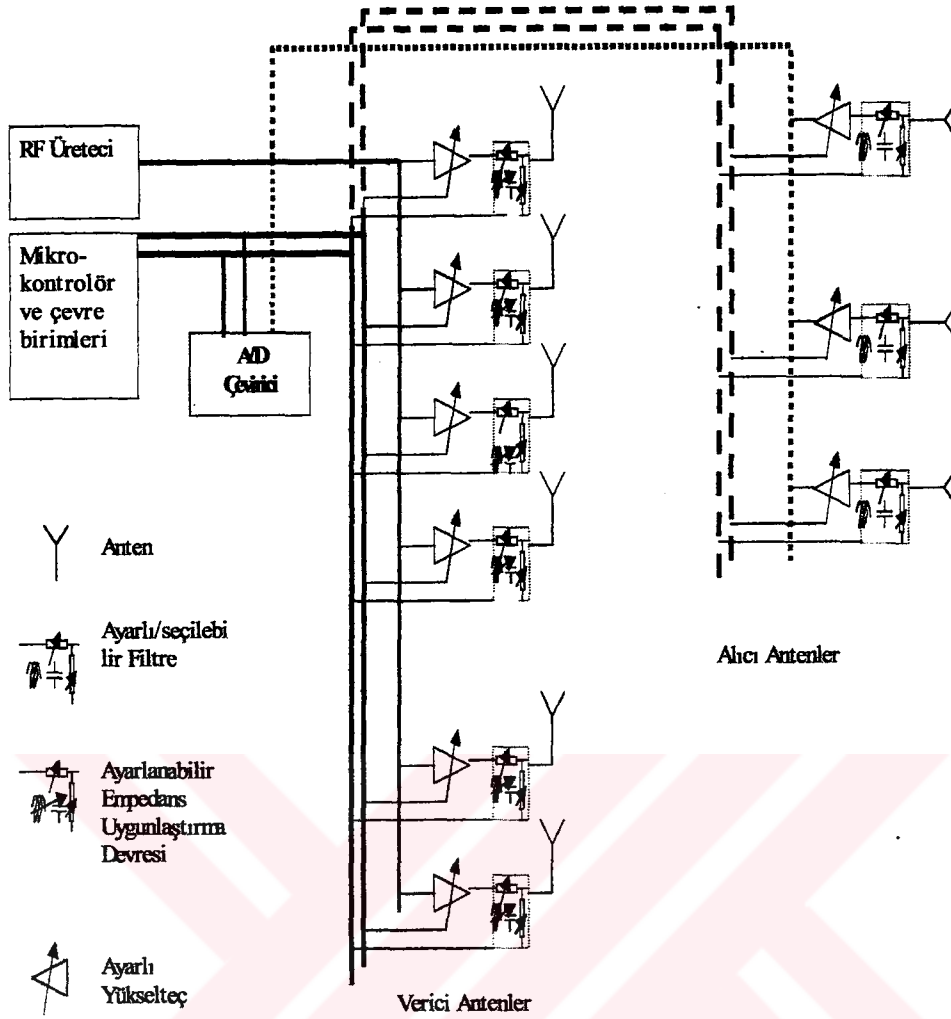
Şekil 1-8'deki gibi, bir dipol kullanıldığı zaman, bu dipol anteni uçtan veya ortadan beslemek için kullanılan irtibat telleri de ışıma yapar ve anten fonksiyonuna göre ışıma alanına bozucu katkılarda bulunacaktır. Ayrıca her bir antenin önünde bulunacak anahtarlar da, kırılma ve yansıma ilkelerine göre, ışıma alan diyagramını kısmen değiştirecektir.



Şekil 1-8 Anten beslemesinin seçimi

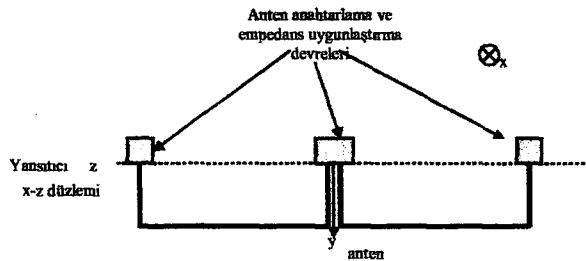
Bu ve diğer istenmeyen ilave alanların oluşmaması için anten dizisinin üzerinde x-z düzlemine paralel bir yansıtıcı levha konulmuştur. Hat ve anahtar sistemini bu yansıtıcının arkasına yerleştirmek, bağlantı parçalarının ışıma yapma sorunu çözmektedir. Bu durumda antenin geometrik şekli de değişir.

Şekil 1-10'den de görüleceği gibi, ışıma sadece z eksenine paralel kısımdan değil, aynı zamanda da y eksenine paralel düşey parçalardan (kulaklardan) da olmaktadır. Bu anten, E-Şekilli Anten (EŞA) olarak tanımlanacaktır. Her ne kadar ortadan beslemeli EŞA kapasitif yüklü dipol antene benzese de literatürde sadece ortadan beslenmiş dipol antenin yakın alan ifadeleri mevcuttur [13]. Ne uçtan beslemeli dipolun nede ortadan veya uçtan beslenen EŞA'lerin yakın alan denklemleri literatürde yoktur.



Şekil 1-9 Verici ve alıcı anten sistemi konfigürasyonu

Bu çalışmada EŞA'nın uçtan ve ortadan beslemeli olması durumuna göre elektrik alan denklemleri elde edilecek, daha sonra genetik algoritma (GA) metodu kullanılarak anten çalışma frekans bandı 10 MHz'lik adımlara ayrılıp her bir frekans adımında elektrik alanın z bileşeninin sabitleştirilmesi için, her bir antenin besleme şekli ve akım genlikleri hesaplanacaktır. En son olarak her bir antenin bu frekanslarda, dizi içindeki empedansı hesaplanacaktır.

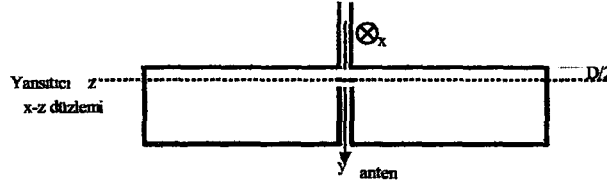


Şekil 1-10 E Şekli Anten

1.5 E Şekilli Antenin Devresi

Sistemde anten düzlemi Ozx 'e paralel bir yansıtıcı bulunmaktadır. Besleme hattı bu yansıtıcıya paralel ve sabit bir uzaklıkta olacaktır. Bu uzaklığı sabit tutmak ve besleme hattının hareket etmesini önlemek için besleyici hatlar bir yalıtkan lak tabakası içine gömülmüştür (Şekil 3-8). EŞA ortadan beslendiği zaman besleme dipol antenlerle aynı şekilde olacaktır. EŞA'nın uçtan beslenmesi durumunda anten devresinin eş değeri Şekil 1-11'de görüldüğü gibi olur.

Anten beslemesi Bölüm 3.2'de izah edilecektir.



Şekil 1-11 Uçtan beslemeli E Şekilli Anten

Geri düzlemdeki bu yansıtıcının seçilen frekans bölgesinde sabit potansiyelde tutulabilmesi söz konusu değildir. $\sigma=\infty$ olan bir yansıtıcı için, yansıtıcıya teğet elektrik alanı $\vec{E}_t=0$ sınır şartı kullanılarak, görüntü ilkesiyle hesap yapılır.

1.6 Özet: Tezde ele alınan problem

Bu çalışmada 50-450 MHz bandında ince anten dizisi kullanılarak en azından $60 \times 180 \text{ cm}^2$ düzlem parçası üzerinde düzlemsel alan dağılımı elde edilecektir.

Bu amaçla anten besleme şekli ve besleme akımı genlikleri takımı elde edilecektir.

Mayın tarama amaçlı bir sistem tasarımı yapılacaktır.

Çalışma frekansları tespit edildi

Anten yapısının dizi olarak ve E şekli elemanlarla teşkil edileceği belirlendi.

Literatürde bulunmayan uçtan beslemeli dipol anten, ortadan beslemeli E Şekilli anten ve uçtan beslemeli E Şekilli antenlere ait yakın alan ve öz ve ortak empedans denklemleri elde edilecektir.

26 adet anten çiftinin akım genliğinin 6bit=64 basamak arasından seçilmesi kararlaştırılmıştır. Her bir antenin ortadan veya uçtan beslenmesi durumuyla seçilmesi gereken haller sayısı $2 \times 64 = 128$ olmaktadır. Yapılması gereken ise; 128

seçeneğin 26 elemanlı $P(128,26)=2.02 \times 10^{26}$ sayıdaki permütasyonunu oluşturmak ve bunların her birinin yakın alanını çizmek, bu alanları birbiri ile karşılaştırarak en uygun olanını almaktır. Bu işlem yerine bir optimizasyon yöntemi kullanılması zorunludur. Genetik algoritma (GA) metodu kullanılarak anten çalışma frekans bandı 10 MHz'lik adımlara ayrılıp her bir frekans adımında elektrik alanın z bileşeninin sabitleştirilmesi için, her bir antenin besleme şekli ve akım genlikleri hesaplanacaktır.

En son olarak her bir antenin bu frekanslarda, dizi içindeki empedansı hesaplanacaktır.

Bu bilgilerin ışığında, mayın tarama amaçlı bir sistem önerilecek.



2. E ŞEKLİ ANTENLERİN ANALİZİ

İletim hattı ve anten problemi analizinde iletken bir tel üzerinde sinüzoidal bir duran dalga var olduğu kabul edilir [14], [19] [2217]. İletken tel üzerinde olan duran dalganın bir sinüs eğrisi olmasının nedeni akımın yürüten dalgalarında zayıflama sabitinin sıfır kabul edilmesidir. Gerçekte bu yürüten dalgalarda daima sıfırdan farklı bir zayıflama sabiti vardır. Dolayısıyla yürüten dalga denkleminde

$$e^{jkx} - e^{-jkx} = 2j \cdot \sin(kx) \quad (2.1)$$

formülü yerine

$$e^{jkx+\alpha} - e^{-jkx-\alpha} = 2j \cdot \sin(kx) \cosh(\alpha) + 2 \cos(kx) \sinh(\alpha) \quad (2.2)$$

formülü kullanılmalıdır. Bu denklemlerde

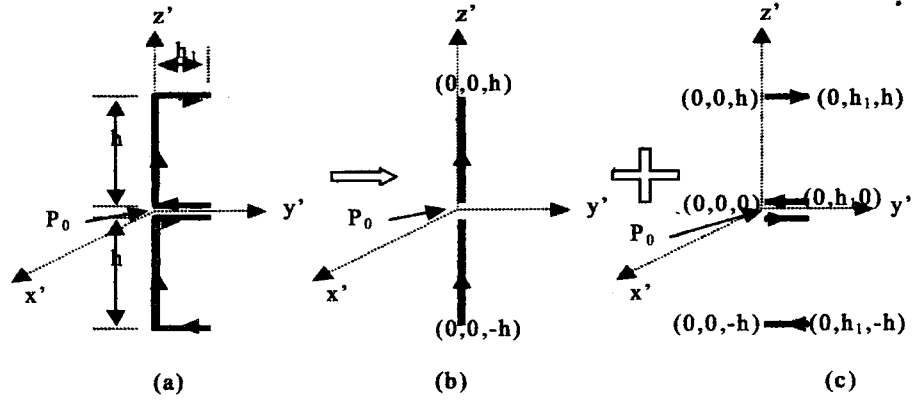
$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \approx k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (2.3)$$

[17,23]. k dalganın iletkendeki propogasyon sabiti, k_0 dalganın boşluktaki propogasyon sabiti, ω açısal hız, ve α iletkenin zayıflatma sabitidir. Fakat daima $\alpha \ll k$ 'dir. Bu durumda antenin (veya hattın) uçtaki uç noktaları hariç hiçbir noktada sıfır akım genliği olmaz. Bu çalışmamızda $\alpha=0$ kabul edilerek yaklaşık analiz yapılmıştır.

2.1 Ortadan Beslemeli E-Şekli Antenler (OBEŞA)

Şekil 2-1 a)'da merkez noktası $P_0(x_0, y_0, z_0)$ olan bir ince anten görülmektedir. E şekilli antenin genel bir denklemini elde etmek amacıyla, Şekil 2-1 a) daki anten 2 antenin süper pozisyonu olarak düşünülmüştür. Bu antenler Şekil 2-1 b) ve Şekil 2-1 c) de gösterilmiştir. z eksenine paralel parça Şekil 2-1a)da ve y eksenine paralel parça Şekil 2-1c) de görülmektedir. Düşey anten kısmının toplam boyu $2h$ 'dir ve bu kısım z' eksenine paraleldir, ayrıca y' eksenine paralel h_1 boylu anten parçaları (kulaklar) vardır. Düşey antenin orta noktasının bir $P(x, y, z)$ gözlem noktasına uzaklığı r_0 , uçlarının P gözlem noktasına uzaklıkları r_1 ve r_2 olsun. Benzer şekilde r_3 ,

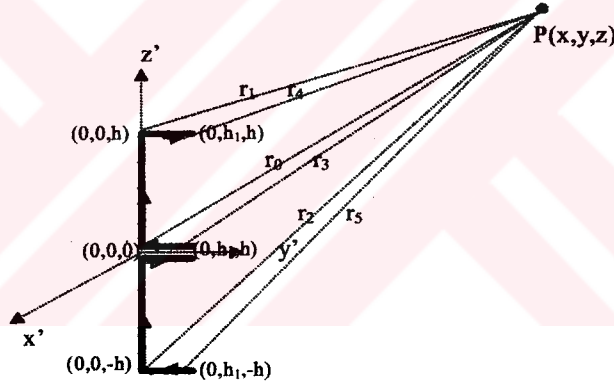
r_4 ve r_5 de h_1 boylu kısımların ($y=h_1$) uçlarının P ye olan uzaklıkları olsun. Kartezyen koordinatlarda (x,y,z) ve (x',y',z') noktaları arasındaki r uzaklığı;



Şekil 2-1 a) Ortadan Beslemeli EŞA ve kartezyen koordinat sistemi b) a'da antenin yatay kısmı c) a'daki antenin düşey kısmı

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (2.4)$$

olduğu için r_0, r_1, r_2, r_3, r_4 ve r_5 (Şekil 2-2);



Şekil 2-2 Kartezyen koordinatlarda bir P noktasına göre OBEŞA'ya göre konum gösterilimi

$$r_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.5 a)$$

$$r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2} \quad (2.5 b)$$

$$r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2} \quad (2.5 c)$$

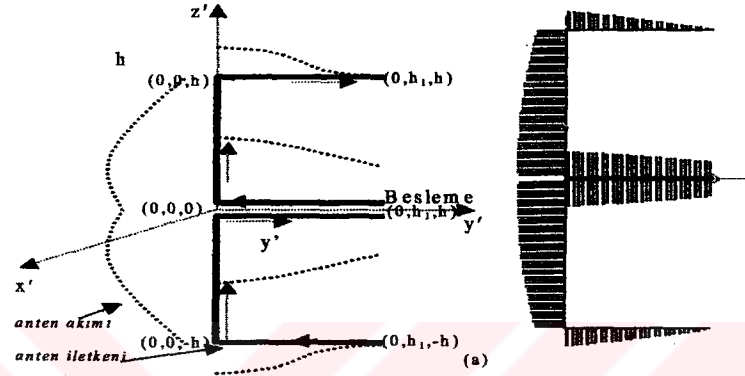
$$r_3 = \sqrt{x^2 + (y-h_1)^2 + z^2} \quad (2.5 d)$$

$$r_4 = \sqrt{x^2 + (y-h_1)^2 + (z-h)^2} \quad (2.5 e)$$

$$r_5 = \sqrt{x^2 + (y-h_1)^2 + (z+h)^2} \quad (2.5 f)$$

olur. Krauss katlanmış tel antenler üzerinde yaklaşık sinüzoidal akım değişimi olduğunu göstermektedir[22]. E Şekli antenin $P(x,y,z)$ noktasında uyandırdığı alanı çözmek için, anten üzerinde yönleri ve şekli Şekil 2-3 a)daki gibi olan bir sinüzoidal akım yoğunluğu dağılımı olduğu kabul edilecektir. Yani akım $(0,h_1,h)$ ve $(0,h_1,-h)$

noktalarında sıfır, besleme noktalarında ise sürekli olan iki sinüs fonksiyonu şeklindedir. Tezde ince tel anten üzerinde mevcut olduğu varsayılmış olan sinüzoidal akım dağılımının gerçekte ne şekilde olduğunu ve tel kalınlığına bağlı olarak nasıl değiştiğinin belirlenmesi amacıyla moment metoduna dayalı ve ince anten analizlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan NEC yazılımı ile bir dizi test yapılmıştır. Şekil 2-3 b)de anten üzerinde akım genliği değişimini NEC programı ile $2h=50\text{cm}$, $h_1=15\text{cm}$ OBEŞA için 200 MHz’de hesaplanıp çizilen bir örneği görülmektedir.



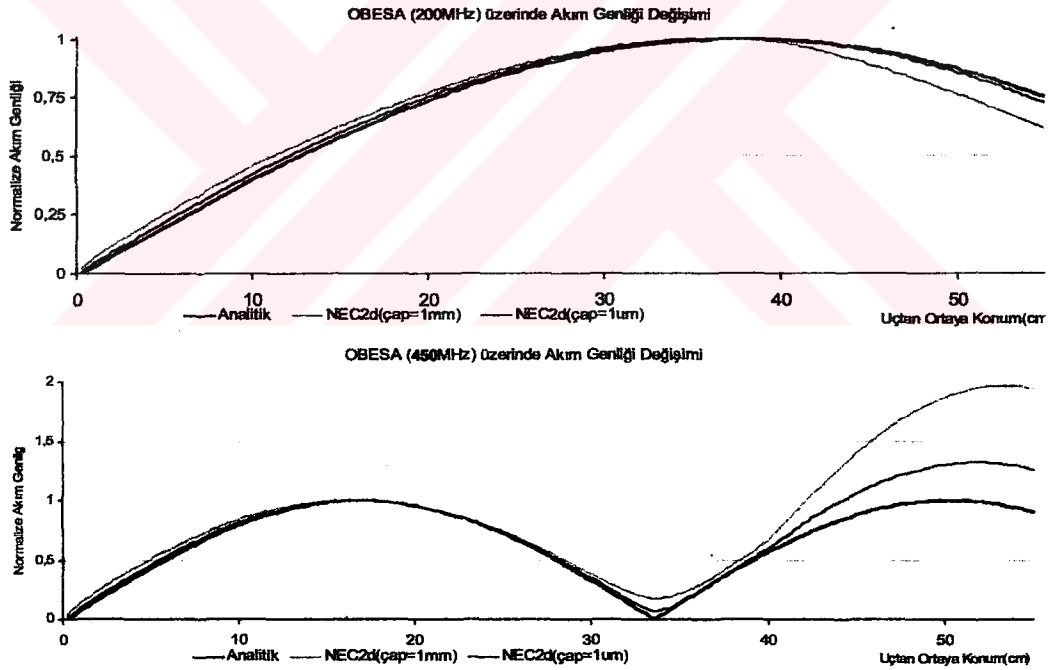
Şekil 2-3 İnce dipol OBEŞA anten üzerinde sinüzoidal akım dağılımı a)Analitik b)NEC

Şekil 2-4)de NEC yardımıyla hesaplanan akım değerlerinin ideal sinüzoidal duran dalga ile karşılaştırılması görülmektedir. Şekillerde anten kulak boyu 15 cm, ana dipol boyu 50 cm, iletken çapı 1mm ve 1 μm alınarak 2.5mm’lik segmentlerle hesap yapılmıştır. Şekillerden de görüldüğü gibi iletken çapı küçüldükçe anten üzerindeki genlik değişimi analitik ideal sinüzoidal genlik değerlerine yakınsamaktadır. Diğer taraftan anteni oluşturan tellerin uygulamada kullanılabilecek 1mm mertebesinde kalınlıkları göz önüne alındığında bile: iç kulağın dışında birbirine yakın olduğu görülmektedir. İç kulak parçalarında tezde yapılan varsayım gerçek akımla farklılaşmaktadır. Ancak bu parçaların akım yönlerindeki zıtlık sebebiyle, (2.7-b) ve (2.7-c) denklemlerinden de görüleceği gibi, bunlardan kaynaklanan etkiler birbirini götüreceğinden bu farklılık tezde elde edilmiş olan sonuçların geçerliliğini fazlaca etkilemeyecektir. Bu durumda Şekil 2-4)den görülebileceği üzere, antenin dış kulak ve ana dipolları üzerindeki analitik ideal sinüzoidal akım genliği değişimi ile NEC2d programının hesapladığı sonuçlar birbiriyle aynı olur. Böylece Şekil 2-3 a)daki gibi bir sinüzoidal akım dağılımı kabulü desteklenmektedir. Kuşkusuz tutulabilecek diğer bir yolda teller üzerindeki akım dağılımlarının (örneğin NEC) yardımıyla sayısal

olarak belirlenmesi ve bu akımların oluşturacağı alanların da sayısal integrasyonla belirlenmesi olabilirdi. Çok yoğun bilgisayar kullanım gerektirmesi nedeniyle tezde bu yola sapılmamış ve alan ifadelerinin analitik olarak belirlenmesine olanak veren sinüzoidal akım dağılımı varsayımının kullanılması tercih edilmiştir. Anten kalınlığının sıfır olması limit hali için, anten üzerindeki akım yoğunluğu[23];

$$\begin{aligned} \vec{J}(x', y', z') = I_0 \{ & \sin(k(h - y'))\delta(x')\delta(z'-h)[u(y) - u(y'-h)] \vec{u}_y + \sin(k(h+h_1 - z'))\delta(x')\delta(y')[u(z') - u(z'-h)] \vec{u}_z \\ & - \sin(k(h+h_1 + y'))\delta(x')\delta(z')[u(y') - u(y'-h_1)] \vec{u}_y + \sin(k(h+h_1 + y'))\delta(x')\delta(z')[u(y') - u(y'-h_1)] \vec{u}_y \\ & + \sin(k(h+h_1 + z'))\delta(x')\delta(y')[u(z'+h) - u(z')] \vec{u}_z - \sin(k(h - y'))\delta(x')\delta(z'+h)[u(y) - u(y'-h)] \vec{u}_y \} \end{aligned} \quad (2.6)$$

şeklinde olacaktır. Burada I_0 akımın maksimum genliği, k propogasyon sabiti, h dipol kısmın yarı boyu, h_1 y eksenine paralel parçaların (kulakların) boyu, x', y' ve z' akımın aktığı noktanın koordinatları, $u(x)$ birim basamak fonksiyonu ve $\vec{u}_x, \vec{u}_y$ ve $\vec{u}_z$ sırasıyla x, y ve z yönündeki birim vektörlerdir. Bu tezde kullanacağımız $P(x, y, z)$ gözlem noktasındaki vektör potansiyel $\vec{A}(P)$, $\vec{J}$ akım yoğunluğuna bağlı olarak;



Şekil 2-4 OBESA iletkeni üzerinde NEC2d (4NEC2) tarafından hesaplanan iletken çapına bağlı akım genliği değişimleri

$$\vec{A}(P) = \vec{A}(x, y, z) = \int_{V'} \vec{J} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dV' = \left(\int_{2h} \vec{J} \vec{u}_z \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \right) \vec{u}_z + \left(\int_{h_1} \vec{J} \vec{u}_y \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \right) \vec{u}_y \quad (2.7 a)$$

formülüyle ifade edilecektir. Bu ifadeye (2.6) denklemini taşınırsa

$$\begin{aligned}\vec{A}(P) = & \int_0^h I_0 \sin(k(h_1 - y')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \vec{u}_y + \int_0^h I_0 \sin(k(h + h_1 - z')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \vec{u}_z \\ & + \int_0^h I_0 \sin(k(h + h_1 + y')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \vec{u}_y - \int_0^h I_0 \sin(k(h + h_1 + y')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \vec{u}_z \\ & + \int_{-h}^0 I_0 \sin(k(h + h_1 + z')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \vec{u}_z - \int_0^h I_0 \sin(k(h_1 - y')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \vec{u}_y, \quad (2.7 \text{ b})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{A}(P) = & \int_0^h I_0 \sin(k(h_1 - y')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \vec{u}_y + \int_0^h I_0 \sin(k(h + h_1 - z')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \vec{u}_z \\ & + \int_{-h}^0 I_0 \sin(k(h + h_1 + z')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \vec{u}_z - \int_0^h I_0 \sin(k(h_1 - y')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \vec{u}_y, \quad (2.7 \text{ c})\end{aligned}$$

olur.

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - z')^2} \quad (2.8 \text{ a})$$

$$R_1 = \sqrt{x^2 + (y - y')^2 + (z - h)^2} \quad (2.8 \text{ b})$$

$$R_2 = \sqrt{x^2 + (y - y')^2 + (z + h)^2} \quad (2.8 \text{ c})$$

$$R_3 = \sqrt{x^2 + (y - y')^2 + z^2} \quad (2.8 \text{ d})$$

şeklinde tanımlama yaparak yukarıdaki eşitlik şu şekle dönüşür:

$$\begin{aligned}\vec{A}(P) = & \int_0^h I_0 \sin(k(h_1 - y')) \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi R_1} dy' \vec{u}_y + \int_0^h I_0 \sin(k(h + h_1 - z')) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz' \vec{u}_z \\ & + \int_{-h}^0 I_0 \sin(k(h + h_1 + z')) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz' \vec{u}_z - \int_0^h I_0 \sin(k(h_1 - y')) \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi R_2} dy' \vec{u}_y, \quad (2.9)\end{aligned}$$

P noktasındaki magnetik alan $\vec{H}(P)$, vektör potansiyel $\vec{A}(P)$ 'nin rotasyonelidir. $\nabla \times$ rotasyonel operatörü olmak üzere;

$$\vec{H}(P) = \nabla \times \vec{A}(P) = \left(\frac{\partial}{\partial y} A_z - \frac{\partial}{\partial z} A_y \right) \vec{u}_x - \frac{\partial}{\partial x} A_z \vec{u}_y + \frac{\partial}{\partial x} A_y \vec{u}_z \quad (2.10)$$

olarak ifade edilir. Diğer yandan

$$\frac{\partial}{\partial x} e^{-jkr} = -jk(x - x') \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{e^{-jkr}}{r} = -(x - x') \frac{(1 + jkr)e^{-jkr}}{r^3} \quad (2.12)$$

olduğu göz önüne alınarak türev işlemi sonucu;

$$\begin{aligned}\bar{H}(P) = \nabla \times \left\{ \left[\int_0^h I_0 \sin(k(h_1 - y')) \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi R_1} dy' - \int_h^0 I_0 \sin(k(h_1 - y')) \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi R_2} dy' \right] \bar{u}_y, \right. \\ \left. + \left[\int_0^h I_0 \sin(k(h + h_1 - z')) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz' + \int_h^0 I_0 \sin(k(h + h_1 + z')) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz' \right] \bar{u}_z \right\} \quad (2.13 a)\end{aligned}$$

Bu denklemde A_z 'nin z 'nün ve A_y 'nin y 'nün integrali olması ve rotasyonel işlemlerinin de A_z 'nin x ve y değişkenlerine ve A_y 'nin de x ve z değişkenlerine uygulanması nedeniyle türev ve integral işlemlerinin sırası değişebilir.

$$\begin{aligned}\bar{H}(P) = \left[- \int_0^h I_0 \sin(k(h + h_1 - z')) y \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jkR}}{4\pi} dz' - \int_h^0 I_0 \sin(k(h + h_1 + z')) y \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jkR}}{4\pi} dz' \right. \\ \left. + \int_0^h I_0 \sin(k(h_1 - y')) (z - h) \frac{1 + jkR_1}{R_1^3} \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi} dy' - \int_h^0 I_0 \sin(k(h_1 - y')) (z + h) \frac{1 + jkR_2}{R_2^3} \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi} dy' \right] \bar{u}_x \\ + \left[\int_0^h I_0 \sin(k(h + h_1 - z')) x \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jkR}}{4\pi} dz' + \int_h^0 I_0 \sin(k(h + h_1 + z')) x \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jkR}}{4\pi} dz' \right] \bar{u}_y \\ - \left[\int_0^h I_0 \sin(k(h_1 - y')) x \frac{1 + jkR_1}{R_1^3} \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi} dy' - \int_h^0 I_0 \sin(k(h_1 - y')) x \frac{1 + jkR_2}{R_2^3} \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi} dy' \right] \bar{u}_z \quad (2.13 b)\end{aligned}$$

olur. (2.1) ifadesindeki açılım uygulanarak;

$$\begin{aligned}\bar{H}(P) = \left[- \int_0^h I_0 \frac{e^{jk(h+h_1-z')} - e^{-jk(h+h_1-z')}}{2j} y \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jkR}}{4\pi} dz' - \int_h^0 I_0 \frac{e^{jk(h+h_1+z')} - e^{-jk(h+h_1+z')}}{2j} y \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jkR}}{4\pi} dz' \right. \\ \left. + \int_0^h I_0 \frac{e^{jk(h_1-y')} - e^{-jk(h_1-y')}}{2j} (z - h) \frac{1 + jkR_1}{R_1^3} \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi} dy' - \int_h^0 I_0 \frac{e^{jk(h_1-y')} - e^{-jk(h_1-y')}}{2j} (z + h) \frac{1 + jkR_2}{R_2^3} \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi} dy' \right] \bar{u}_x \\ + \left[\int_0^h I_0 \frac{e^{jk(h+h_1-z')} - e^{-jk(h+h_1-z')}}{2j} x \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jkR}}{4\pi} dz' + \int_h^0 I_0 \frac{e^{jk(h+h_1+z')} - e^{-jk(h+h_1+z')}}{2j} x \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jkR}}{4\pi} dz' \right] \bar{u}_y \\ - \left[\int_0^h I_0 \frac{e^{jk(h_1-y')} - e^{-jk(h_1-y')}}{2j} x \frac{1 + jkR_1}{R_1^3} \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi} dy' - \int_h^0 I_0 \frac{e^{jk(h_1-y')} - e^{-jk(h_1-y')}}{2j} x \frac{1 + jkR_2}{R_2^3} \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi} dy' \right] \bar{u}_z \quad (2.14 a)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{H}(P) = \left[- \int_0^h I_0 y \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jk(R-h-h_1+z')} - e^{-jk(R+h+h_1-z')}}{8\pi j} dz' - \int_h^0 I_0 y \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jk(R-h-h_1-z')} - e^{-jk(R+h+h_1+z')}}{8\pi j} dz' \right. \\ \left. + \int_0^h I_0 (z - h) \frac{1 + jkR_1}{R_1^3} \frac{e^{-jk(R_1-h_1+y')} - e^{-jk(R_1+h_1-y')}}{8\pi j} dy' - \int_h^0 I_0 (z + h) \frac{1 + jkR_2}{R_2^3} \frac{e^{-jk(R_2-h_1+y')} - e^{-jk(R_2+h_1-y')}}{8\pi j} dy' \right] \bar{u}_x \\ + \left[\int_0^h I_0 x \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jk(R-h-h_1+z')} - e^{-jk(R+h+h_1-z')}}{8\pi j} dz' + \int_h^0 I_0 x \frac{1 + jkR}{R^3} \frac{e^{-jk(R-h-h_1-z')} - e^{-jk(R+h+h_1+z')}}{8\pi j} dz' \right] \bar{u}_y \\ - \left[\int_0^h I_0 x \frac{1 + jkR_1}{R_1^3} \frac{e^{-jk(R_1-h_1+y')} - e^{-jk(R_1+h_1-y')}}{8\pi j} dy' - \int_h^0 I_0 x \frac{1 + jkR_2}{R_2^3} \frac{e^{-jk(R_2-h_1+y')} - e^{-jk(R_2+h_1-y')}}{8\pi j} dy' \right] \bar{u}_z \quad (2.14 b)\end{aligned}$$

şeklinde elde edilir. Diğer taraftan;

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial z'} \left(\frac{e^{-jk(r+z'+a)}}{r(r+z'-z)} \right) &= \left\{ \frac{-jk \left(\frac{-(z-z')}{r} + 1 \right) r(r+z'-z) - \left(\frac{-(z-z')}{r} (r+z'-z) + r \left(\frac{-(z-z')}{r} + 1 \right) \right)}{[r(r+z'-z)]^2} \right\} e^{-jk(r+z'+a)} \\
&= - \left\{ \frac{jk \left(\frac{-(z+z'+r)}{r} \right) r(r+z'-z) + \left(\frac{-(z-z')}{r} (r+z'-z) + r \left(\frac{-(z+z'+r)}{r} \right) \right)}{[r(r+z'-z)]^2} \right\} e^{-jk(r+z'+a)} \\
&= - \left\{ \frac{\frac{jk(-z+z'+r)^2}{1} + \left(\frac{(r+z'-z)[-(z-z')+r]}{r} \right)}{r^2(r+z'-z)^2} \right\} e^{-jk(r+z'+a)} = - \frac{jk+1}{r^2} e^{-jk(r+z'+a)} \quad (2.15 a)
\end{aligned}$$

ve

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial z'} \left(\frac{e^{-jk(r-z'+a)}}{r(r-z'+z)} \right) &= \left\{ \frac{-jk \left(\frac{-(z-z')}{r} - 1 \right) r(r-z'+z) - \left(\frac{-(z-z')}{r} (r-z'+z) + r \left(\frac{-(z-z')}{r} - 1 \right) \right)}{[r(r-z'+z)]^2} \right\} e^{-jk(r-z'+a)} \\
&= \left\{ \frac{-jk \left(\frac{-(z+z'-r)}{r} \right) r(r-z'+z) - \left(\frac{-(z-z')}{r} (r-z'+z) + r \left(\frac{-(z+z'-r)}{r} \right) \right)}{[r(r-z'+z)]^2} \right\} e^{-jk(r-z'+a)} \\
&= \left\{ \frac{\frac{jk(z-z'+r)^2}{1} + \left(\frac{(r-z'+z)[(z-z')+r]}{r} \right)}{r^2(r-z'+z)^2} \right\} e^{-jk(r-z'+a)} = \frac{jk+1}{r^2} e^{-jk(r-z'+a)} \quad (2.15 b)
\end{aligned}$$

olduğu göz önüne alınıp (2.13 b) denkleminde (2.14 a) ve (2.14 b) açılımların sağ tarafına karşı düşen ifadelerin yerine sol taraftaki ifadeler yazılıp integraller alınır;

$$\begin{aligned}
\vec{H}(P) &= \left[-\frac{yI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(R-h-h_1+z')}}{R(R+z'-z)} \Big|_{z'=0}^h - \frac{e^{-jk(R+h+h_1-z')}}{R(R-z'+z)} \Big|_{z'=0}^h \right) - \frac{yI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(R-h-h_1-z')}}{R(R-z'+z)} \Big|_{z'=-h}^0 + \frac{e^{-jk(R+h+h_1+z')}}{R(R+z'-z)} \Big|_{z'=-h}^0 \right) \right] \vec{u}_z \\
&+ \frac{(z-h)I_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(R_1-h_1+y')}}{R_1(R_1+y'-y)} \Big|_{y'=0}^h - \frac{e^{-jk(R_1+h_1-y')}}{R_1(R_1-y'+y)} \Big|_{y'=0}^h \right) - \frac{(z+h)I_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(R_2-h_2+y')}}{R_2(R_2+y'-y)} \Big|_{y'=0}^h - \frac{e^{-jk(R_2+h_2-y')}}{R_2(R_2-y'+y)} \Big|_{y'=0}^h \right) \vec{u}_x \\
&+ \left[\frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(R-h-h_1+z')}}{R(R+z'-z)} \Big|_{z'=0}^h - \frac{e^{-jk(R+h+h_1-z')}}{R(R-z'+z)} \Big|_{z'=0}^h \right) + \frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(R-h-h_1-z')}}{R(R-z'+z)} \Big|_{z'=-h}^0 + \frac{e^{-jk(R+h+h_1+z')}}{R(R+z'-z)} \Big|_{z'=-h}^0 \right) \right] \vec{u}_y \\
&- \left[\frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(R_1-h_1+y')}}{R_1(R_1+y'-y)} \Big|_{y'=0}^h - \frac{e^{-jk(R_1+h_1-y')}}{R_1(R_1-y'+y)} \Big|_{y'=0}^h \right) - \frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(R_2-h_2+y')}}{R_2(R_2+y'-y)} \Big|_{y'=0}^h - \frac{e^{-jk(R_2+h_2-y')}}{R_2(R_2-y'+y)} \Big|_{y'=0}^h \right) \right] \vec{u}_z \quad (2.16)
\end{aligned}$$

bulunur. Diğer yandan (2.7 a)-(2.7 d) denklemlerinde tanımlanan R ifadeleri için;

$$R|_{z'=0} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = r_0 \quad (2.17 a)$$

$$R|_{z'=h} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2} = r_1 \quad (2.17 b)$$

$$R|_{z'=-h} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2} = r_2 \quad (2.17 c)$$

$$R_1|_{y'=0} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2} = r_1 \quad (2.17 d)$$

$$R_1|_{y'=h_1} = \sqrt{x^2 + (y-h_1)^2 + (z+h)^2} = r_4 \quad (2.17 e)$$

$$R_2|_{y'=0} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2} = r_2 \quad (2.17 f)$$

$$R_2|_{y'=h_1} = \sqrt{x^2 + (y-h_1)^2 + (z-h)^2} = r_5 \quad (2.17 g)$$

$$R_3|_{y'=0} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = r_0 \quad (2.17 h)$$

$$R_3|_{y'=h_1} = \sqrt{x^2 + (y-h_1)^2 + z^2} = r_3 \quad (2.17 i)$$

olduğu dikkate alınarak sadeleştirme işlemleriyle;

$$\begin{aligned} \bar{H}(P) = & \left[\frac{yI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(r_1-h_1)}}{r_1(r_1+h-z)} + \frac{e^{-jk(r_1+h_1)}}{r_1(r_1-h+z)} - \frac{e^{-jk(r_0-h-h_1)}}{r_0(r_0-z)} - \frac{e^{-jk(r_0+h+h_1)}}{r_0(r_0+z)} \right) \right. \\ & - \frac{yI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(r_0-h-h_1)}}{r_0(r_0+z)} + \frac{e^{-jk(r_0+h+h_1)}}{r_0(r_0-z)} - \frac{e^{-jk(r_2-h_1)}}{r_2(r_2+h+z)} - \frac{e^{-jk(r_2+h_1)}}{r_2(r_2-h-z)} \right) \\ & - \frac{(z-h)I_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jkr_4}}{r_4(r_4+h_1-y)} + \frac{e^{-jkr_4}}{r_4(r_4-h_1+y)} - \frac{e^{-jk(r_1-h_1)}}{r_1(r_1-y)} - \frac{e^{-jk(r_1+h_1)}}{r_1(r_1+y)} \right) \\ & + \frac{(z+h)I_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jkr_5}}{r_5(r_5+h_1-y)} + \frac{e^{-jkr_5}}{r_5(r_5-h_1+y)} - \frac{e^{-jk(r_2-h_1)}}{r_2(r_2-y)} - \frac{e^{-jk(r_2+h_1)}}{r_2(r_2+y)} \right) \Big] \bar{u}_x \\ & - \left[\frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk(r_1-h_1)}}{r_1(r_1+h-z)} + \frac{e^{-jk(r_1+h_1)}}{r_1(r_1-h+z)} - \frac{e^{-jk(r_0-h-h_1)}}{r_0(r_0-z)} - \frac{e^{-jk(r_0+h+h_1)}}{r_0(r_0+z)} \right) \right. \\ & - \left(\frac{e^{-jk(r_0-h-h_1)}}{r_0(r_0+z)} + \frac{e^{-jk(r_0+h+h_1)}}{r_0(r_0-z)} - \frac{e^{-jk(r_2-h_1)}}{r_2(r_2+h+z)} - \frac{e^{-jk(r_2+h_1)}}{r_2(r_2-h-z)} \right) \Big] \bar{u}_y \\ & + \left[\frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jkr_4}}{r_4(r_4+h_1-y)} + \frac{e^{-jkr_4}}{r_4(r_4-h_1+y)} - \frac{e^{-jk(r_1-h_1)}}{r_1(r_1-y)} - \frac{e^{-jk(r_1+h_1)}}{r_1(r_1+y)} \right) \right. \\ & - \left. \frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jkr_5}}{r_5(r_5+h_1-y)} + \frac{e^{-jkr_5}}{r_5(r_5-h_1+y)} - \frac{e^{-jk(r_2-h_1)}}{r_2(r_2-y)} - \frac{e^{-jk(r_2+h_1)}}{r_2(r_2+y)} \right) \right] \bar{u}_z \quad (2.18) \end{aligned}$$

bulunur . Burada

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.19 a)$$

$$\rho_0 = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (2.19 b)$$

$$\rho_1 = \sqrt{x^2 + (z-h)^2} \quad (2.19 c)$$

$$\rho_2 = \sqrt{x^2 + (z+h)^2} \quad (2.19 d)$$

dir.

$$\begin{aligned} \bar{H}(P) = & \left[\frac{yI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk r_1}}{r_1} \frac{2\{r_1 \cos(kh_1) + j(z-h) \sin(kh_1)\}}{\rho^2} - \frac{e^{-jk r_0}}{r_0} \frac{2\{r_0 \cos(k(h+h_1)) + jz \sin(k(h+h_1))\}}{\rho^2} \right) \right. \\ & - \frac{yI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk r_0}}{r_0} \frac{2\{r_0 \cos(k(h+h_1)) - jz \sin(k(h+h_1))\}}{\rho^2} - \frac{e^{-jk r_2}}{r_2} \frac{2\{r_2 \cos(kh_1) - j(z+h) \sin(kh_1)\}}{\rho^2} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{(z-h)I_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk_1} 2r_4}{r_4 \rho_1^2} - \frac{e^{-jk_1} 2\{r_1 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)\}}{r_1 \rho_1^2} \right) + \frac{(z+h)I_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk_2} 2r_5}{r_5 \rho_2^2} - \frac{e^{-jk_2} 2\{r_2 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)\}}{r_2 \rho_2^2} \right) \Big] \bar{u}_x \\
& - \left[\frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk_1} 2\{r_1 \cos(kh_1) + j(z-h) \sin(kh_1)\}}{r_1 \rho^2} - \frac{e^{-jk_0} 2\{r_0 \cos(k(h+h_1)) + jz \sin(k(h+h_1))\}}{r_0 \rho^2} \right) \right. \\
& - \frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk_0} 2\{r_0 \cos(k(h+h_1)) - jz \sin(k(h+h_1))\}}{r_0 \rho^2} - \frac{e^{-jk_2} 2\{r_2 \cos(kh_1) - j(z+h) \sin(kh_1)\}}{r_2 \rho^2} \right) \Big] \bar{u}_y \\
& + \left[\frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk_1} 2r_4}{r_4 \rho_1^2} - \frac{e^{-jk_1} 2\{r_1 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)\}}{r_1 \rho_1^2} \right) - \frac{xI_0}{8\pi j} \left(\frac{e^{-jk_2} 2r_5}{r_5 \rho_2^2} - \frac{e^{-jk_2} 2\{r_2 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)\}}{r_2 \rho_2^2} \right) \right] \bar{u}_z \quad (2.20 a)
\end{aligned}$$

aynı r_i terimli ifadeler tek terim olacak şekilde toplanarak,

$$\begin{aligned}
\bar{H}(P) = & \frac{2I_0}{8\pi j} \left[\frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left(y \frac{\{r_1 \cos(kh_1) + j(z-h) \sin(kh_1)\}}{\rho^2} + (z-h) \frac{\{r_1 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)\}}{\rho_1^2} \right) \right. \\
& + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left(y \frac{r_2 \cos(kh_1) - j(z+h) \sin(kh_1)}{\rho^2} - (z+h) \frac{r_2 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)}{\rho_2^2} \right) \\
& + \frac{e^{-jk_0}}{r_0} \left(-y \frac{\{r_0 \cos(k(h+h_1)) + jz \sin(k(h+h_1))\}}{\rho^2} - y \frac{\{r_0 \cos(k(h+h_1)) - jz \sin(k(h+h_1))\}}{\rho^2} \right) - \frac{(z-h)e^{-jk_1}}{\rho_1^2} \\
& + \frac{(z+h)e^{-jk_2}}{\rho_2^2} \Big] \bar{u}_x - \frac{2xI_0}{8\pi j} \left[\frac{e^{-jk_0}}{r_0} \left(\frac{r_0 \cos(k(h+h_1)) + jz \sin(k(h+h_1))}{\rho^2} - \frac{r_0 \cos(k(h+h_1)) - jz \sin(k(h+h_1))}{\rho^2} \right) \right. \\
& + \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(kh_1) + j(z-h) \sin(kh_1)}{\rho^2} + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(kh_1) - j(z+h) \sin(kh_1)}{\rho^2} \Big] \bar{u}_y \\
& + \frac{2xI_0}{8\pi j} \left[\left(\frac{e^{-jk_1}}{\rho_1^2} - \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)}{\rho_1^2} \right) - \left(\frac{e^{-jk_2}}{\rho_2^2} - \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)}{\rho_2^2} \right) \right] \bar{u}_z \quad (2.20 b)
\end{aligned}$$

ve sadeleştirilerek ,

$$\begin{aligned}
\bar{H}(P) = & \frac{I_0}{4\pi j} \left[\frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left(\frac{y}{\rho^2} r_1 \cos(kh_1) + j \frac{(z-h)y}{\rho^2} \sin(kh_1) \right) + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left(\frac{y}{\rho^2} r_2 \cos(kh_1) - j \frac{(z+h)y}{\rho^2} \sin(kh_1) \right) \right. \\
& + \frac{e^{-jk_0}}{r_0} \left(\left(\frac{y}{\rho^2} - \frac{y}{\rho^2} \right) r_0 \cos(k(h+h_1)) + j \left(\frac{yz}{\rho^2} + \frac{yz}{\rho^2} \right) \sin(k(h+h_1)) \right) + \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left(\frac{z-h}{\rho_1^2} r_1 \cos(kh_1) + j \frac{(z-h)y}{\rho_1^2} \sin(kh_1) \right) \\
& - \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left(\frac{z+h}{\rho_2^2} r_2 \cos(kh_1) + j \frac{(z+h)y}{\rho_2^2} \sin(kh_1) \right) - \frac{(z-h)e^{-jk_1}}{\rho_1^2} + \frac{(z+h)e^{-jk_2}}{\rho_2^2} \Big] \bar{u}_x \\
& - \frac{2xI_0}{8\pi j} \left[-2 \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(k(h+h_1)) + \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(kh_1) + j(z-h) \sin(kh_1)}{\rho^2} + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(kh_1) - j(z+h) \sin(kh_1)}{\rho^2} \right] \bar{u}_y \\
& + \frac{2xI_0}{8\pi j} \left[\left(\frac{e^{-jk_1}}{\rho_1^2} - \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)}{\rho_1^2} \right) - \left(\frac{e^{-jk_2}}{\rho_2^2} - \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)}{\rho_2^2} \right) \right] \bar{u}_z \quad (2.20 c)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\vec{H}(P) = & \frac{I_0}{4\pi j} \left[\left\{ \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left(\frac{y}{\rho^2} r_1 \cos(kh_1) + j \frac{(z-h)y}{\rho^2} \sin(kh_1) \right) + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left(\frac{y}{\rho^2} r_2 \cos(kh_1) - j \frac{(z+h)y}{\rho^2} \sin(kh_1) \right) \right. \right. \\
& - 2 \frac{ye^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(k(h+h_1)) \left. \right\} + \left\{ \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left(\frac{z-h}{\rho_1^2} r_1 \cos(kh_1) + j \frac{(z-h)y}{\rho_1^2} \sin(kh_1) \right) \right. \\
& - \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left(\frac{z+h}{\rho_2^2} r_2 \cos(kh_1) + j \frac{(z+h)y}{\rho_2^2} \sin(kh_1) \right) - \frac{(z-h)e^{-jk_4}}{\rho_1^2} + \frac{(z+h)e^{-jk_5}}{\rho_2^2} \left. \right\} \vec{u}_x \\
& - \frac{xI_0}{4\pi j} \left[-2 \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(k(h+h_1)) + \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(kh_1) + j(z-h) \sin(kh_1)}{\rho^2} \right. \\
& + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(kh_1) - j(z+h) \sin(kh_1)}{\rho^2} \left. \right] \vec{u}_y + \frac{xI_0}{4\pi j} \left[\frac{e^{-jk_4}}{\rho_1^2} - \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)}{\rho_1^2} \right. \\
& - \frac{e^{-jk_5}}{\rho_2^2} + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)}{\rho_2^2} \left. \right] \vec{u}_z \quad (2.21)
\end{aligned}$$

bulunur. Kaynakların bulunmadığı bir gözlem noktasındaki elektrik alan ise magnetik alanın rotasyoneli ile orantılıdır. ω açısal çalışma frekansı ve ϵ ortamın dielektrik sabiti olmak üzere;

$$\vec{E}(P) = \nabla \times \vec{H} = \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \vec{u}_x + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \vec{u}_y + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \vec{u}_z = \vec{E}_x + \vec{E}_y + \vec{E}_z \quad (2.22)$$

dir. Elektrik alanın x bileşeni;

$$E_x(P) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{\partial}{\partial z} H_y \right) \quad (2.23 a)$$

ifadesine (2.21) taşınarak

$$\begin{aligned}
E_x(P) = & + \frac{xI_0}{j\omega\epsilon 4\pi j} \left\{ \left[\frac{-jk(y-h_1)}{r_4} \frac{e^{-jk_4}}{\rho_1^2} + \frac{e^{-jk_1}}{r_1 \rho_1^2} \left(jky \cos(kh_1) + j \left(y \frac{(1+jk_1)y}{r_1^2} - 1 \right) \sin(kh_1) \right) \right. \right. \\
& + jk(y-h_1) \frac{e^{-jk_5}}{r_5 \rho_2^2} + \frac{e^{-jk_2}}{r_2 \rho_2^2} \left(-jky \cos(kh_1) - j \left(y \frac{(1+jk_2)y}{r_2^2} - 1 \right) \sin(kh_1) \right) \left. \right] \\
& + \left[-2 \left(\frac{-jkz}{r_0} \right) \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(k(h+h_1)) + \frac{e^{-jk_1}}{r_1 \rho^2} \left(-jk(z-h) \cos(kh_1) + j \frac{\rho^2 - jk_1(z-h)^2}{r_1^2} \sin(kh_1) \right) \right. \\
& + \frac{e^{-jk_2}}{r_2 \rho^2} \left(-jk(z+h) \cos(kh_1) - j \frac{\rho^2 - jk_2(z+h)^2}{r_2^2} \sin(kh_1) \right) \left. \right] \left. \right\} \quad (2.23 b)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_x(P) = & - \frac{x3I_0}{k} \left\{ \frac{-jk(y-h_1)}{r_4} \frac{e^{-jk_4}}{\rho_1^2} + \frac{e^{-jk_1}}{r_1 \rho_1^2} \left(jky \cos(kh_1) - j \frac{\rho_1^2 - jk_1 y^2}{r_1^2} \sin(kh_1) \right) \right. \\
& + jk(y-h_1) \frac{e^{-jk_5}}{r_5 \rho_2^2} + \frac{e^{-jk_2}}{r_2 \rho_2^2} \left(-jky \cos(kh_1) + j \frac{\rho_2^2 - jk_2 y^2}{r_2^2} \sin(kh_1) \right) - 2 \left(\frac{-jkz}{r_0} \right) \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(k(h+h_1))
\end{aligned}$$

$$+ \frac{e^{-jk_1}}{r_1 \rho^2} \left(-jk(z-h) \cos(kh_1) + j \frac{\rho^2 - jkr_1(z-h)^2}{r_1^2} \sin(kh_1) \right) \\ + \frac{e^{-jk_2}}{r_2 \rho^2} \left(-jk(z+h) \cos(kh_1) - j \frac{\rho^2 - jkr_2(z+h)^2}{r_2^2} \sin(kh_1) \right) \Bigg\} \quad (2.23 c)$$

$$E_x(P) = -jx30I_0 \left\{ \frac{e^{-jk_1}}{r_1 \rho_1^2} \left(y \cos(kh_1) - \frac{\rho_1^2 - jkr_1 y^2}{kr_1^2} \sin(kh_1) \right) \right. \\ - \frac{e^{-jk_2}}{r_2 \rho_2^2} \left(y \cos(kh_1) - \frac{\rho_2^2 - jkr_2 y^2}{kr_2^2} \sin(kh_1) \right) \frac{(y-h_1) e^{-jk_4}}{\rho_1^2} + (y-h_1) \frac{e^{-jk_5}}{r_3 \rho_2^2} \Bigg\} \\ - jx30I_0 \left\{ 2 \frac{z}{r_0} \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(k(h+h_1)) - \frac{e^{-jk_1}}{r_1 \rho^2} \left((z-h) \cos(kh_1) - \frac{\rho^2 - jkr_1(z-h)^2}{kr_1^2} \sin(kh_1) \right) \right. \\ \left. - \frac{e^{-jk_2}}{r_2 \rho^2} \left((z+h) \cos(kh_1) + \frac{\rho^2 - jkr_2(z+h)^2}{kr_2^2} \sin(kh_1) \right) \right\} \quad (2.23 d)$$

olur. Kısaltma yapılarak OBEŞA'nın elektrik alanının x bileşeni

$$E_x(P) = -j30I_0 x \left\{ 2 \frac{z}{r_0} \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(k(h+h_1)) + \left(\frac{y}{\rho_1^2} - \frac{(z-h)}{\rho^2} \right) \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \cos(kh_1) + j \left(\frac{y^2}{\rho_1^2} - \frac{(z-h)^2}{\rho^2} \right) \frac{e^{-jk_1}}{r_1^2} \sin(kh_1) \right. \\ \left. - \left(\frac{(z+h)}{\rho^2} + \frac{y}{\rho_2^2} \right) \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \cos(kh_1) - j \left(\frac{y^2}{\rho_2^2} - \frac{(z+h)^2}{\rho^2} \right) \frac{e^{-jk_2}}{r_2^2} \sin(kh_1) - \frac{(y-h_1) e^{-jk_4}}{r_4 \rho_1^2} + (y-h_1) \frac{e^{-jk_5}}{r_3 \rho_2^2} \right\} \quad (2.24)$$

olur. Bu elektrik alanının y bileşeni;

$$E_y(P) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial}{\partial z} H_x - \frac{\partial}{\partial x} H_z \right) \quad (2.25 a) \\ = \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{I_0}{4\pi j} \left\{ e^{-jk_1} \left(\frac{-jk(z-h)}{r_1} \frac{y}{\rho^2} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{y}{\rho^2} \left(\frac{1+jkr_1}{r_1^2} (z-h)^2 + 1 \right) \sin(kh_1) \right. \\ + e^{-jk_2} \left(\frac{-jk(z+h)}{r_2} \frac{y}{\rho^2} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{y}{\rho^2} \left(\frac{1+jkr_2}{r_2^2} (z+h)^2 - 1 \right) \sin(kh_1) + 2y \frac{jkze^{-jk_0}}{r_0 \rho^2} \cos(k(h+h_1)) \\ + e^{-jk_1} \left(\frac{-jk(z-h)}{r_1} \frac{z-h}{\rho_1^2} + \frac{x^2 - (z-h)^2}{\rho_1^4} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left(-\frac{1+jkr_1}{r_1^2} (z-h)^2 \frac{y}{\rho_1^2} + y \frac{x^2 - (z-h)^2}{\rho_1^4} \right) \sin(kh_1) \\ + e^{-jk_2} \left(\frac{jk(z+h)}{r_2} \frac{z+h}{\rho_2^2} + \frac{x^2 - (z+h)^2}{\rho_2^4} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left(\frac{1+jkr_2}{r_2^2} (z+h)^2 \frac{y}{\rho_2^2} - y \frac{x^2 - (z+h)^2}{\rho_2^4} \right) \sin(kh_1) \\ - \frac{e^{-jk_4}}{\rho_1^2} \left(\frac{-jk(z-h)(z-h)}{r_4} + \frac{x^2 - (z-h)^2}{\rho_1^2} \right) + \frac{e^{-jk_5}}{\rho_2^2} \left(\frac{-jk(z+h)^2}{r_5} + \frac{x^2 - (z+h)^2}{\rho_2^2} \right) \\ - \left[\frac{e^{-jk_4}}{\rho_1^2} - \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(kh_1)}{\rho_1^2} + \frac{jy \sin(kh_1)}{\rho_1^2} - \frac{e^{-jk_5}}{\rho_2^2} + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(kh_1)}{\rho_2^2} + \frac{jy \sin(kh_1)}{\rho_2^2} \right] \\ - x \left[\frac{e^{-jk_4}}{\rho_1^2} \left(\frac{-jkx}{r_4} - \frac{2x}{\rho_1^2} \right) - \frac{e^{-jk_1}}{\rho_1^2} \left(\frac{-jkx}{r_1} - \frac{2x}{\rho_1^2} \right) \cos(kh_1) - jy \frac{e^{-jk_1}}{r_1 \rho_1^2} \left(\frac{-x(1+jkr_1)}{r_1^2} - \frac{2x}{\rho_1^2} \right) \sin(kh_1) \right. \\ \left. + x \frac{e^{-jk_2}}{\rho_2^2} \left(\frac{-jkx}{r_2} - \frac{2x}{\rho_2^2} \right) \cos(kh_1) + jy \frac{e^{-jk_2}}{r_2 \rho_2^2} \left(\frac{-x(1+jkr_2)}{r_2^2} - \frac{2x}{\rho_2^2} \right) \sin(kh_1) - x \frac{e^{-jk_5}}{\rho_2^2} \left(\frac{-jkx}{r_5} - \frac{2x}{\rho_2^2} \right) \right\} \quad (2.25 b)$$

olur. Aynı r_1 terimli ifadeler toplanarak;

$$\begin{aligned}
E_y(P) = & \frac{-30I_0}{kj} \left\{ e^{-jkr_1} \left(\frac{-jk(z-h)}{r_1} \frac{y}{\rho^2} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \frac{y}{\rho^2} \left(-\frac{1+jkr_1}{r_1^2} (z-h)^2 + 1 \right) \sin(kh_1) \right. \\
& + e^{-jkr_2} \left(\frac{-jk(z+h)}{r_2} \frac{y}{\rho^2} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \frac{y}{\rho^2} \left(\frac{1+jkr_2}{r_2^2} (z+h)^2 - 1 \right) \sin(kh_1) + 2y \frac{jkze^{-jkr_0}}{r_0 \rho^2} \cos(k(h+h_1)) \\
& + e^{-jkr_1} \left(\frac{-jk(z-h)}{r_1} \frac{z-h}{\rho_1^2} + \frac{x^2-(z-h)^2}{\rho_1^4} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \left(-\frac{1+jkr_1}{r_1^2} (z-h)^2 \frac{y}{\rho_1^2} + y \frac{x^2-(z-h)^2}{\rho_1^4} \right) \sin(kh_1) \\
& + e^{-jkr_2} \left(\frac{jk(z+h)}{r_2} \frac{z+h}{\rho_2^2} - \frac{x^2-(z+h)^2}{\rho_2^4} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \left(\frac{1+jkr_2}{r_2^2} (z+h)^2 \frac{y}{\rho_2^2} - y \frac{x^2-(z+h)^2}{\rho_2^4} \right) \sin(kh_1) \\
& + \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)}{\rho_1^2} - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(kh_1) + jy \sin(kh_1)}{\rho_2^2} \\
& + \frac{e^{-jkr_1}}{\rho_1^2} x \left(\frac{-jkx}{r_1} - \frac{2x}{\rho_1^2} \right) \cos(kh_1) + jyx \frac{e^{-jkr_1}}{r_1 \rho_1^2} \left(-\frac{x(1+jkr_1)}{r_1^2} - \frac{2x}{\rho_1^2} \right) \sin(kh_1) \\
& + x^2 \frac{e^{-jkr_2}}{\rho_2^2} \left(\frac{jk}{r_2} + \frac{2}{\rho_2^2} \right) \cos(kh_1) + jyx^2 \frac{e^{-jkr_2}}{r_2 \rho_2^2} \left(\frac{(1+jkr_2)}{r_2^2} + \frac{2}{\rho_2^2} \right) \sin(kh_1) \\
& - \frac{e^{-jkr_4}}{\rho_1^2} \left(\frac{-jk(z-h)(z-h)}{r_4} + \frac{x^2-(z-h)^2}{\rho_1^2} \right) - \frac{e^{-jkr_4}}{\rho_1^2} x \frac{e^{-jkr_4}}{\rho_1^2} \left(\frac{-jkx}{r_4} - \frac{2x}{\rho_1^2} \right) \\
& \left. + \frac{e^{-jkr_5}}{\rho_2^2} \left(\frac{-jk(z+h)^2}{r_5} + \frac{x^2-(z+h)^2}{\rho_2^2} \right) + \frac{e^{-jkr_5}}{\rho_2^2} + x^2 \frac{e^{-jkr_5}}{\rho_2^2} \left(\frac{-jk}{r_5} - \frac{2}{\rho_2^2} \right) \right\} \quad (2.25 c)
\end{aligned}$$

bulunur. Sadeleştirilerek ;

$$\begin{aligned}
E_y(P) = & \frac{-30I_0}{kj} \left\{ e^{-jkr_1} \left(\frac{-jk(z-h)}{r_1} \frac{y}{\rho^2} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \frac{y}{\rho^2} \left(-\frac{1+jkr_1}{r_1^2} (z-h)^2 + 1 \right) \sin(kh_1) \right. \\
& + e^{-jkr_2} \left(\frac{-jk(z+h)}{r_2} \frac{y}{\rho^2} \right) \cos(kh_1) + j \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \frac{y}{\rho^2} \left(\frac{1+jkr_2}{r_2^2} (z+h)^2 - 1 \right) \sin(kh_1) + 2y \frac{jkze^{-jkr_0}}{r_0 \rho^2} \cos(k(h+h_1)) \\
& \left. - \frac{jk}{r_1} e^{-jkr_1} \cos(kh_1) - jy \frac{1+jkr_1}{r_1^2} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \sin(kh_1) + \frac{jk}{r_2} e^{-jkr_2} \cos(kh_1) + jy \frac{1+jkr_2}{r_2^2} \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \sin(kh_1) + \frac{jk}{r_4} e^{-jkr_4} - \frac{jk}{r_5} e^{-jkr_5} \right\} \quad (2.25 d)
\end{aligned}$$

olur.

$$\begin{aligned}
E_y(P) = & -j30I_0 \left\{ -\frac{(z-h)}{r_1} \frac{y}{\rho^2} e^{-jkr_1} \cos(kh_1) + \frac{e^{-jkr_1}}{kr_1} \frac{y}{\rho^2} \left(\frac{\rho^2 - jkr_1(z-h)^2}{r_1^2} \right) \sin(kh_1) \right. \\
& - \frac{(z+h)}{r_2} \frac{y}{\rho^2} e^{-jkr_2} \cos(kh_1) - \frac{e^{-jkr_2}}{kr_2} \frac{y}{\rho^2} \left(\frac{\rho^2 - jkr_2(z+h)^2}{r_2^2} \right) \sin(kh_1) + 2yz \frac{e^{-jkr_0}}{r_0 \rho^2} \cos(k(h+h_1)) \\
& \left. - j30I_0 \left\{ \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \cos(kh_1) - y \frac{1+jkr_1}{kr_1^2} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \sin(kh_1) + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \cos(kh_1) + y \frac{1+jkr_2}{kr_2^2} \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \sin(kh_1) + \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} - \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} \right\} \right\} \quad (2.25 e)
\end{aligned}$$

Kısaltılarak OBEŞA'in elektrik alanının y bileşeni;

$$\begin{aligned}
E_y(P) = & -j30I_0 \left\{ 2yz \frac{e^{-jkr_0}}{r_0 \rho^2} \cos(k(h+h_1)) - \frac{e^{-jkr_1}}{r_1 \rho^2} ((z-h)y + \rho^2) \cos(kh_1) \right. \\
& \left. - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2 \rho^2} ((z+h)y - \rho^2) \cos(kh_1) - jy \frac{e^{-jkr_1}}{\rho^2} \sin(kh_1) + jy \frac{e^{-jkr_2}}{\rho^2} \sin(kh_1) + \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} - \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} \right\} \quad (2.26)
\end{aligned}$$

bulunur. Elektrik alanın z bileşeni;

$$E_z(P) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial}{\partial x} H_y - \frac{\partial}{\partial y} H_x \right) \quad (2.27 a)$$

$$\begin{aligned}
E_z(P) = & + \frac{I_0}{j\omega\epsilon 4\pi j} \left\{ 2 \frac{e^{-jk r_0}}{\rho^2} \left(-x \frac{jk}{r_0} x + \frac{y^2 - x^2}{\rho^2} \right) \cos(k(h+h_1)) + 2 \left(\frac{-jky}{r_0} y + \frac{x^2 - y^2}{\rho^2} \right) \frac{e^{-jk r_0}}{\rho^2} \cos(k(h+h_1)) \right. \\
& - \left(x \frac{-jkr_1}{r_1} + \frac{y^2 - x^2}{\rho^2} \right) \frac{e^{-jk r_1}}{\rho^2} \cos(kh_1) - j(z-h) \left(-x \frac{1+jkr_1}{r_1^2} x + \frac{y^2 - x^2}{\rho^2} \right) \frac{e^{-jk r_1}}{r_1 \rho^2} \sin(kh_1) \\
& - \left(x \frac{-jkr_2}{r_2} + \frac{y^2 - x^2}{\rho^2} \right) \frac{e^{-jk r_2}}{\rho^2} \cos(kh_1) + j(z+h) \left(-x \frac{1+jkr_2}{r_2^2} x + \frac{y^2 - x^2}{\rho^2} \right) \frac{e^{-jk r_2}}{r_2 \rho^2} \sin(kh_1) \\
& - \left(\frac{-jky}{r_1} \frac{y}{\rho^2} + \frac{x^2 - y^2}{\rho^4} \right) e^{-jk r_1} \cos(kh_1) - j(z-h) \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} \left(-y \frac{1+jkr_1}{r_1^2} \frac{y}{\rho^2} + \frac{x^2 - y^2}{\rho^4} \right) \sin(kh_1) \\
& - e^{-jk r_2} \left(\frac{-jky}{r_2} \frac{y}{\rho^2} + \frac{x^2 - y^2}{\rho^4} \right) \cos(kh_1) + j(z+h) \frac{e^{-jk r_2}}{r_2} \left(-y \frac{1+jkr_2}{r_2^2} \frac{y}{\rho^2} + \frac{x^2 - y^2}{\rho^4} \right) \sin(kh_1) \\
& - \left(\frac{jky}{r_1} \frac{z-h}{\rho_1^2} \right) e^{-jk r_1} \cos(kh_1) - j(z-h) \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} \left(-y \frac{1+jkr_1}{r_1^2} \frac{y}{\rho_1^2} + \frac{1}{\rho_1^2} \right) \sin(kh_1) - e^{-jk r_2} \left(\frac{jky}{r_2} \frac{z+h}{\rho_2^2} \right) \cos(kh_1) \\
& + j(z+h) \frac{e^{-jk r_2}}{r_2} \left(-y \frac{1+jkr_2}{r_2^2} \frac{y}{\rho_2^2} + \frac{1}{\rho_2^2} \right) \sin(kh_1) - (y-h_1)jk \frac{(z-h)e^{-jk r_4}}{r_4 \rho_1^2} + (y-h_1)jk \frac{(z+h)e^{-jk r_5}}{r_5 \rho_2^2} \left. \right\} \quad (2.27 \text{ b})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_z(P) = & + \frac{I_0}{j\omega\epsilon 4\pi j} \left\{ -2 \frac{jk}{r_0} e^{-jk r_0} \cos(k(h+h_1)) + \frac{jk}{r_1} e^{-jk r_1} \cos(kh_1) + (z-h) \frac{1+jkr_1}{r_1^2} \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} \sin(kh_1) \right. \\
& + \frac{jk}{r_2} e^{-jk r_2} \cos(kh_1) - j(z+h) \frac{1+jkr_2}{r_2^2} \frac{e^{-jk r_2}}{r_2} \sin(kh_1) - \left(\frac{jky}{r_1} \frac{z-h}{\rho_1^2} \right) e^{-jk r_1} \cos(kh_1) \\
& - j(z-h) \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} \left(-y \frac{1+jkr_1}{r_1^2} \frac{y}{\rho_1^2} + \frac{1}{\rho_1^2} \right) \sin(kh_1) - e^{-jk r_2} \left(\frac{jky}{r_2} \frac{z+h}{\rho_2^2} \right) \cos(kh_1) \\
& + j(z+h) \frac{e^{-jk r_2}}{r_2} \left(-y \frac{1+jkr_2}{r_2^2} \frac{y}{\rho_2^2} + \frac{1}{\rho_2^2} \right) \sin(kh_1) - (y-h_1)jk \frac{(z-h)e^{-jk r_4}}{r_4 \rho_1^2} + (y-h_1)jk \frac{(z+h)e^{-jk r_5}}{r_5 \rho_2^2} \left. \right\} \quad (2.27 \text{ c})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_z(P) = & -j30I_0 \left\{ \left[-2 \frac{e^{-jk r_0}}{r_0} \cos(k(h+h_1)) + \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} \cos(kh_1) + (z-h) \frac{1+jkr_1}{kr_1^2} \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} \sin(kh_1) + \frac{e^{-jk r_2}}{r_2} \cos(kh_1) \right. \right. \\
& \left. \left. - (z+h) \frac{1+jkr_2}{kr_2^2} \frac{e^{-jk r_2}}{r_2} \sin(kh_1) \right] - j30I_0 \left\{ \frac{y}{r_1} \frac{z-h}{\rho_1^2} e^{-jk r_1} \cos(kh_1) - (z-h) \frac{\rho_1^2 - jkr_1 y^2}{r_1^2} \frac{e^{-jk r_1}}{kr_1 \rho_1^2} \sin(kh_1) \right. \right. \\
& \left. \left. - e^{-jk r_2} \frac{y}{r_2} \frac{z+h}{\rho_2^2} \cos(kh_1) + (z+h) \frac{\rho_2^2 - jkr_2}{kr_2^2} \frac{e^{-jk r_2}}{\rho_2^2 r_2} \sin(kh_1) - (y-h_1) \frac{(z-h)e^{-jk r_4}}{r_4 \rho_1^2} + (y-h_1) \frac{(z+h)e^{-jk r_5}}{r_5 \rho_2^2} \right\} \right\} \quad (2.27 \text{ d})
\end{aligned}$$

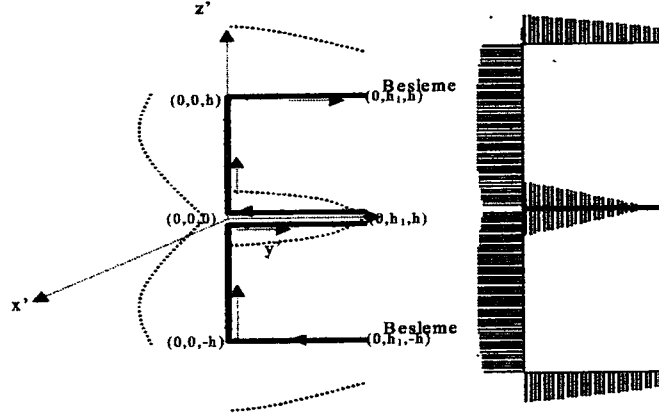
dir. Kısaltılarak OBEŞA'in elektrik alanının z bileşeni;

$$\begin{aligned}
E_z(P) = & -j30I_0 \left\{ \left[-2 \frac{e^{-jk r_0}}{r_0} \cos(k(h+h_1)) + \left(\rho_1^2 + y(z-h) \right) \frac{e^{-jk r_1}}{r_1 \rho_1^2} \cos(kh_1) + j(z-h) \frac{e^{-jk r_1}}{\rho_1^2} \sin(kh_1) \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{e^{-jk r_2}}{r_2 \rho_2^2} (\rho_2^2 - y(z+h)) \cos(kh_1) - j(z+h) \frac{e^{-jk r_2}}{\rho_2^2} \sin(kh_1) - \frac{(y-h_1)(z-h)}{\rho_1^2} \frac{e^{-jk r_4}}{r_4} + \frac{(y-h_1)(z+h)}{\rho_2^2} \frac{e^{-jk r_5}}{r_5} \right] \right\} \quad (2.28)
\end{aligned}$$

2.2 Uçtan Beslemeli E-Şekilli Antenler(UBEŞA)

OBEŞA'e benzer şekilde ama uçtan beslenen E-şekilli anten (UBEŞA)'nin de üzerinde sinüzoidal akım vardır. Şekil 2-5 a)da ideal bir sinüzoidal duran dalga gösterilimi, Şekil 2-5 b)de NEC programının $2h=50\text{cm}$, $h_1=15\text{cm}$ UBEŞA için 200

MHz'de hesaplayıp çizdiği anten üzerinde akım genliği değişimi görülmektedir. Bu akım ortadaki $(0, h_1, 0^+)$ noktalarında sıfırdır. Uçlardaki $(0, h_1, h)$ ve $(0, h_1, -h)$ noktalarında ise süreklilik göstermektedir (Şekil 2-5). UBEŞA'nın kartezyen koordinatlardaki konum gösterilimi ve $P(x, y, z)$ gözlem noktasına göre durumu yapısal olarak gene Şekil 2-1 ve Şekil 2-2 gibidir. Anten üzerindeki akım yoğunluğu ise;



Şekil 2-5 Uçtan Beslemeli EŞA ve akım dağılımı a) gösterim b) NEC

$$\begin{aligned} \vec{J}(x', y', z') = & I_0 \{ \sin(k(h+h_1+y')) \delta(x') \delta(z'-h) [u(y)-u(y'-h)] \vec{u}_y + \sin(k(h_1+z')) \delta(x') \delta(y') [u(z')-u(z'-h)] \vec{u}_z \\ & - \sin(k(h_1-y')) \delta(x') \delta(z') [u(y')-u(y'-h_1)] \vec{u}_y + \sin(k(h_1-y')) \delta(x') \delta(z') [u(y')-u(y'-h_1)] \vec{u}_y \\ & + \sin(k(h_1-z)) \delta(x') \delta(y') [u(z'+h)-u(z')] \vec{u}_z - \sin(k(h+h_1+y')) \delta(x') \delta(z'+h) [u(y')-u(y'-h_1)] \vec{u}_y \} \quad (2.29) \end{aligned}$$

olacaktır. Düşey anten parçalarının toplam boyu $2h$ 'dır ve bu kısım z' eksenine paraleldir; ayrıca y' eksenine paralel h_1 boylu anten parçaları (kulaklar) vardır. Burada da antenin orta noktasının $P(x, y, z)$ gözlem noktasına uzaklığı r_0 , düşey uçların P gözlem noktasına uzaklığı r_1 ve r_2 'dir aynı şekilde r_3 , r_4 ve r_5 'de h_1 boylu parçaların uçlarının gözlem noktası P 'ye uzaklıklarıdır. Uçtan beslemeli durumda da r_i ifadeleri için (2.4) ve (2.5) denklemleri geçerli olacaktır.

Yine antenin merkez noktası $P_0(0,0,0)$ noktasına yerleştirilmiştir. $P(x, y, z)$ gözlem noktasındaki vektör potansiyel $\vec{A}(P)$, $\vec{J}$ akım yoğunluğuna bağlı olarak;

$$\vec{A}(P) = \vec{A}(x, y, z) = \int_{V'} \vec{J} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dV' = \left(\int_{2h} \vec{J} \vec{u}_z \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \right) \vec{u}_z + \left(\int_{h_1} \vec{J} \vec{u}_y \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \right) \vec{u}_y, \quad (2.30 a)$$

$$\begin{aligned} \vec{A}(P) = & + \int_{-h}^h I_0 \sin(k(h_1+z')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \vec{u}_z + \int_{-h}^h I_0 \sin(k(h_1-z')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \vec{u}_z \\ & + \int_{-h_1}^{h_1} I_0 \sin(k(h+h_1+y')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \vec{u}_y - \int_{-h_1}^{h_1} I_0 \sin(k(h+h_1+y')) \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dy' \vec{u}_y, \quad (2.30b) \end{aligned}$$

olur. R_i (2.8 a) (2.8-d) eşitlikleriyle tanımlı olmak üzere yukarıdaki eşitlik şu şekle dönüşür:

$$\begin{aligned}\bar{A}(P) = & + \int_0^h I_0 \sin(k(h_1 + z')) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz' \bar{u}_z + \int_h^0 I_0 \sin(k(h_1 - z')) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz' \bar{u}_z \\ & + \int_0^h I_0 \sin(k(h_1 + h + y')) \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi R_1} dy' \bar{u}_y - \int_h^0 I_0 \sin(k(h_1 + h + y')) \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi R_2} dy' \bar{u}_y,\end{aligned}\quad (2.30c)$$

P noktasındaki magnetik alan $\vec{H}(P)$, vektör potansiyel $\vec{A}(P)$ 'nin rotasyoneli olarak, $\nabla \times$ rotasyonel operatörü olmak üzere;

$$\vec{H}(P) = \nabla \times \vec{A}(P) = \left(\frac{\partial}{\partial y} A_z - \frac{\partial}{\partial z} A_y \right) \bar{u}_x - \frac{\partial}{\partial x} A_z \bar{u}_y + \frac{\partial}{\partial x} A_y \bar{u}_z \quad (2.31 a)$$

olduğu ve (2.30) denklemi y' ve z' nün ayrı ayrı integrali olduğu göz önüne alınıp (2.1) açılımı uygulanarak (2.15 a)-(2.15 b) denklemleri ışığında integral alınır.

$$\begin{aligned}\vec{H}(P) = & \frac{2I_0}{8\pi j} \left[\frac{e^{-jk_0}}{r_1} \left(-y \frac{\{r_1 \cos(k(h+h_1)) - j(z-h) \sin(k(h+h_1))\}}{\rho^2} \right) - \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left(y \frac{r_2 \cos(k(h+h_1)) + j(z+h) \sin(k(h+h_1))}{\rho^2} \right) \right. \\ & + \frac{e^{-jk_0}}{r_0} \left(\left(\frac{y}{\rho^2} + \frac{y}{\rho^2} \right) r_0 \cos(kh_1) + j \left(-\frac{yz}{\rho^2} + \frac{yz}{\rho^2} \right) \sin(kh_1) \right) - \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left((z-h) \frac{\{r_1 \cos(kh_1) - jy \sin(kh_1)\}}{\rho_1^2} \right) \\ & + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left((z+h) \frac{r_2 \cos(k(h+h_1)) - jy \sin(k(h+h_1))}{\rho_2^2} \right) + (z-h) \frac{e^{-jk_4}}{r_4} \frac{\{r_4 \cos(k(h+2h_1)) - j(y-h_1) \sin(k(h+2h_1))\}}{\rho_1^2} \\ & - (z+h) \frac{e^{-jk_5}}{r_5} \frac{\{r_5 \cos(k(h+2h_1)) - j(y-h_1) \sin(k(h+2h_1))\}}{\rho_2^2} \Big] \bar{u}_x + \frac{2xI_0}{8\pi j} \left[-2 \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(kh_1) \right. \\ & + \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(k(h+h_1)) - j(z-h) \sin(k(h+h_1))}{\rho^2} + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(k(h+h_1)) + j(z+h) \sin(k(h+h_1))}{\rho^2} \Big] \bar{u}_y \\ & - \frac{2xI_0}{8\pi j} \left[\frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{\{r_1 \cos(k(h+h_1)) - jy \sin(k(h+h_1))\}}{\rho_1^2} + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{\{r_2 \cos(k(h+h_1)) - jy \sin(k(h+h_1))\}}{\rho_2^2} \right. \\ & + \frac{e^{-jk_4}}{r_4} \frac{\{r_4 \cos(k(h+2h_1)) - j(y-h_1) \sin(k(h+2h_1))\}}{\rho_1^2} + \frac{e^{-jk_5}}{r_5} \frac{\{r_5 \cos(k(h+2h_1)) - j(y-h_1) \sin(k(h+2h_1))\}}{\rho_2^2} \Big] \bar{u}_z\end{aligned}\quad (2.31b)$$

$$\begin{aligned}\vec{H}(P) = & \frac{I_0}{4\pi j} \left[2y \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(kh_1) - \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left(y \frac{\{r_1 \cos(k(h+h_1)) - j(z-h) \sin(k(h+h_1))\}}{\rho^2} \right) \right. \\ & - \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left(y \frac{r_2 \cos(k(h+h_1)) + j(z+h) \sin(k(h+h_1))}{\rho^2} \right) - \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left((z-h) \frac{\{r_1 \cos(kh_1) - jy \sin(kh_1)\}}{\rho_1^2} \right) \\ & + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left((z+h) \frac{r_2 \cos(k(h+h_1)) - jy \sin(k(h+h_1))}{\rho_2^2} \right) + (z-h) \frac{e^{-jk_4}}{r_4} \frac{\{r_4 \cos(k(h+2h_1)) - j(y-h_1) \sin(k(h+2h_1))\}}{\rho_1^2} \\ & - (z+h) \frac{e^{-jk_5}}{r_5} \frac{\{r_5 \cos(k(h+2h_1)) - j(y-h_1) \sin(k(h+2h_1))\}}{\rho_2^2} \Big] \bar{u}_x + \frac{2xI_0}{8\pi j} \left[-2 \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(kh_1) \right. \\ & + \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{r_1 \cos(k(h+h_1)) - j(z-h) \sin(k(h+h_1))}{\rho^2} + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{r_2 \cos(k(h+h_1)) + j(z+h) \sin(k(h+h_1))}{\rho^2} \Big] \bar{u}_y \\ & + \frac{2xI_0}{8\pi j} \left[\frac{e^{-jk_1}}{r_1} \frac{\{r_1 \cos(k(h+h_1)) - jy \sin(k(h+h_1))\}}{\rho_1^2} - \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \frac{\{r_2 \cos(k(h+h_1)) - jy \sin(k(h+h_1))\}}{\rho_2^2} \right. \\ & - \frac{e^{-jk_4}}{r_4} \frac{\{r_4 \cos(k(h+2h_1)) - j(y-h_1) \sin(k(h+2h_1))\}}{\rho_1^2} \\ & + \frac{e^{-jk_5}}{r_5} \frac{\{r_5 \cos(k(h+2h_1)) - j(y-h_1) \sin(k(h+2h_1))\}}{\rho_2^2} \Big] \bar{u}_z\end{aligned}\quad (2.32)$$

Kaynakların bulunmadığı bir gözlem noktasında elektrik alan magnetik alanın rotasyoneliyle orantılıdır. ω açısal çalışma frekansı ve ϵ ortamın dielektrik sabiti olmak üzere;

$$\vec{E}(P) = \left(\frac{\partial H_z}{j\omega\epsilon y} - \frac{\partial H_y}{j\omega\epsilon z} \right) \vec{u}_x + \left(\frac{\partial H_x}{j\omega\epsilon z} - \frac{\partial H_z}{j\omega\epsilon x} \right) \vec{u}_y + \left(\frac{\partial H_y}{j\omega\epsilon x} - \frac{\partial H_x}{j\omega\epsilon y} \right) \vec{u}_z = \vec{E}_x + \vec{E}_y + \vec{E}_z \quad (2.33)$$

olur. UBEŞA'nın elektrik alanın x bileşeni;

$$E_x(P) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{\partial}{\partial z} H_y \right) \quad (2.34 a)$$

$$\begin{aligned} E_x(P) = & -j30I_0 x \left\{ \frac{e^{-jk_1}}{r_1 \rho_1^2} \left(y \cos(k(h+h_1)) + \frac{\rho_1 - jkr_1 y^2}{kr_1^2} \sin(k(h+h_1)) \right) + \frac{e^{-jk_2}}{r_2 \rho_2^2} \left(y \cos(kh_1) + \frac{\rho_2 - jkr_2 y}{kr_2^2} \sin(kh_1) \right) \right. \\ & + \frac{e^{-jk_4}}{r_4 \rho_1^2} \left((y-h_1) \cos(k(h+2h_1)) + \frac{\rho_1^2 - jkr_4 (y-h_1)^2}{kr_4^2} \sin(k(h+2h_1)) \right) \\ & \left. - \frac{e^{-jk_5}}{r_5 \rho_2^2} \left((y-h_1) \cos(k(h+2h_1)) + \frac{\rho_2^2 - jkr_5 (y-h_1)^2}{kr_5^2} \sin(k(h+2h_1)) \right) \right\} \\ & - j30I_0 \left\{ -2 \frac{z}{r_0} \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(kh_1) + \frac{e^{-jk_1}}{r_1 \rho^2} \left((z-h) \cos(k(h+h_1)) + \frac{\rho^2 - jkr_1 (z-h)^2}{kr_1^2} \sin(k(h+h_1)) \right) \right. \\ & \left. + \frac{e^{-jk_2}}{r_2 \rho^2} \left((z+h) \cos(k(h+h_1)) - \frac{\rho^2 - jkr_2 (z+h)^2}{kr_2^2} \sin(k(h+h_1)) \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.34 b)$$

$$\begin{aligned} E_x(P) = & -j30I_0 x \left\{ -2 \frac{z}{r_0} \frac{e^{-jk_0}}{\rho^2} \cos(kh_1) \right. \\ & - \frac{e^{-jk_1}}{r_1} \left(\left(\frac{y}{\rho_1^2} - \frac{(z-h)}{\rho^2} \right) \cos(k(h+h_1)) - j \left(\frac{y^2}{\rho_1^2} - \frac{(z-h)^2}{\rho^2} \right) \frac{\sin(k(h+h_1))}{r_1} \right) \\ & + \frac{e^{-jk_2}}{r_2} \left(\left(\frac{(z+h)}{\rho^2} + \frac{y}{\rho_2^2} \right) \cos(k(h+h_1)) - j \left(\frac{y^2}{\rho_2^2} - \frac{(z+h)^2}{\rho^2} \right) \frac{\sin(k(h+h_1))}{r_2} \right) \\ & + \frac{e^{-jk_4}}{r_4 \rho_1^2} \left((y-h_1) \cos(k(h+2h_1)) + \frac{\rho_1^2 - jkr_4 (y-h_1)^2}{kr_4^2} \sin(k(h+2h_1)) \right) \\ & \left. - \frac{e^{-jk_5}}{r_5 \rho_2^2} \left((y-h_1) \cos(k(h+2h_1)) + \frac{\rho_2^2 - jkr_5 (y-h_1)^2}{kr_5^2} \sin(k(h+2h_1)) \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.35)$$

bulunur. UBEŞA'nın elektrik alanı y bileşeni;

$$E_y(P) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial}{\partial z} H_x - \frac{\partial}{\partial x} H_z \right) \quad (2.36.a)$$

$$\begin{aligned} E_y(P) = & -j30I_0 \left\{ \left[-2 \frac{zye^{-jk_0}}{r_0 \rho^2} \cos(kh_1) + \frac{(z-h)y}{r_1 \rho^2} e^{-jk_1} \cos(k(h+h_1)) + \frac{e^{-jk_2}}{kr_1} \frac{y}{\rho^2} \left(\frac{\rho^2 - jkr_1 (z-h)^2}{r_1^2} \right) \sin(k(h+h_1)) \right] \right. \\ & \left. + \frac{(z+h)y}{r_2 \rho^2} e^{-jk_2} \cos(k(h+h_1)) - \frac{e^{-jk_2}}{kr_2} \frac{y}{\rho^2} \left(\frac{\rho^2 - jkr_2 (z+h)^2}{r_2^2} \right) \sin(k(h+h_1)) \right\} \end{aligned}$$

$$-j30I_0 \left\{ \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \cos(k(h+h_1)) - y \frac{1+jkr_1}{kr_1^2} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \sin(k(h+h_1)) - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \cos(k(h+h_1)) + y \frac{1+jkr_2}{kr_2^2} \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \sin(k(h+h_1)) \right. \\ \left. + \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} \cos(k(h+2h_1)) + (y-h_1) \frac{1+jkr_4}{kr_4^2} \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} \sin(k(h+2h_1)) + \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} \cos(k(h+2h_1)) - (y-h_1) \frac{1+jkr_5}{kr_5^2} \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} \sin(k(h+2h_1)) \right\} \quad (2.36.b)$$

Kısaltılarak UBEŞA'in elektrik alanının y bileşeni

$$E_y(P) = j30I_0 \left\{ -2 \frac{yz}{\rho^2} \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \cos(kh_1) + \frac{((z-h)y + \rho^2)}{\rho^2} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \cos(k(h+h_1)) - j \frac{y}{\rho^2} e^{-jkr_1} \sin(k(h+h_1)) \right. \\ \left. + \frac{((z+h)y - \rho^2)}{\rho^2} \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \cos(k(h+h_1)) + j \frac{y}{\rho^2} e^{-jkr_2} \sin(k(h+h_1)) - \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} \cos(k(h+2h_1)) \right. \\ \left. + (y-h_1) \frac{1+jkr_4}{kr_4^2} \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} \sin(k(h+2h_1)) + \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} \cos(k(h+2h_1)) - (y-h_1) \frac{1+jkr_5}{kr_5^2} \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} \sin(k(h+2h_1)) \right\} \quad (2.37)$$

olur. UBEŞA'in elektrik alanının z bileşeni

$$E_z(P) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial}{\partial x} H_y - \frac{\partial}{\partial y} H_x \right) \quad (2.37.a)$$

$$E_z(P) = -j30I_0 \left\{ \left[2 \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \cos(kh_1) - \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \cos(k(h+h_1)) + (z-h) \frac{1+jkr_1}{kr_1^3} e^{-jkr_1} \sin(k(h+h_1)) \right. \right. \\ \left. - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \cos(k(h+h_1)) - (z+h) \frac{1+jkr_2}{kr_2^3} e^{-jkr_2} \sin(k(h+h_1)) \right] - j30I_0 \left\{ - \frac{y}{r_1} \frac{z-h}{\rho_1^2} e^{-jkr_1} \cos(k(h+h_1)) \right. \\ \left. - (z-h) \frac{e^{-jkr_1}}{\rho_1^2 r_1} \left(\frac{\rho_1^2 - jkr_1 y^2}{kr_1^2} \right) \sin(k(h+h_1)) + \frac{y}{r_2} \frac{z+h}{\rho_2^2} e^{-jkr_2} \cos(k(h+h_1)) \right. \\ \left. + (z+h) \frac{e^{-jkr_2}}{\rho_2^2 r_2} \left(\frac{\rho_2^2 - jkr_2 y^2}{kr_2^2} \right) \sin(k(h+h_1)) + (z-h) \frac{(y-h_1)}{\rho_1^2 r_4} e^{-jkr_4} \cos(k(h+2h_1)) \right. \\ \left. + (z-h) \frac{e^{-jkr_4}}{\rho_1^2 r_4} \left(\frac{\rho_1^2 - jkr_4 (y-h_1)^2}{kr_4^2} \right) \sin(k(h+2h_1)) - (z+h) \frac{(y-h_1)}{\rho_2^2 r_5} e^{-jkr_5} \cos(k(h+2h_1)) \right. \\ \left. - (z+h) \frac{e^{-jkr_5}}{\rho_2^2 r_5} \left(\frac{\rho_2^2 - jkr_5 (y-h_1)^2}{kr_5^2} \right) \sin(k(h+2h_1)) \right\} \quad (2.37.b)$$

olur. Kısaltılarak UBEŞA'in elektrik alanının z bileşeni şöyle elde edilir;

$$E_z(P) = -j30I_0 \left\{ \left[2 \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \cos(kh_1) - (\rho_1^2 + y(z-h)) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1 \rho_1^2} \cos(k(h+h_1)) + j(z-h) \frac{e^{-jkr_1}}{\rho_1^2} \sin(k(h+h_1)) \right. \right. \\ \left. - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2 \rho_2^2} (\rho_2^2 - y(z+h)) \cos(k(h+h_1)) - j(z+h) \frac{e^{-jkr_2}}{\rho_2^2} \sin(k(h+h_1)) \right. \\ \left. + (z-h) \frac{(y-h_1)}{\rho_1^2 r_4} e^{-jkr_4} \cos(k(h+2h_1)) + \frac{(z-h)}{\rho_1^2} \frac{e^{-jkr_4}}{kr_4} \left(\frac{\rho_1^2 - jkr_4 (y-h_1)^2}{r_4^2} \right) \sin(k(h+2h_1)) \right. \\ \left. - (z+h) \frac{(y-h_1)}{\rho_2^2 r_5} e^{-jkr_5} \cos(k(h+2h_1)) - \frac{(z+h)}{\rho_2^2} \frac{e^{-jkr_5}}{kr_5} \left(\frac{\rho_2^2 - jkr_5 (y-h_1)^2}{r_5^2} \right) \sin(k(h+2h_1)) \right\} \quad (2.38)$$

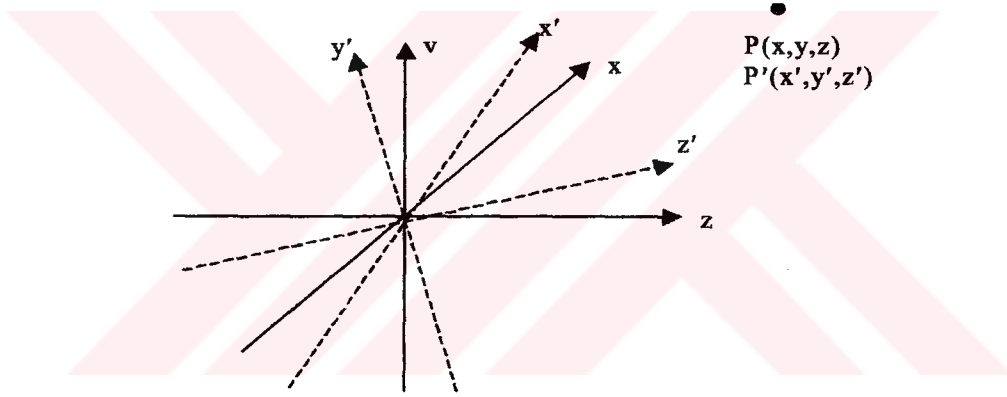
2.3 EŞA'nın Görüntüsü

EŞA ve görüntüsünün geometrik şekli tamamen aynı ve merkez noktasına göre simetriktir. Görüntü EŞA'nın alan ifadesini belirlemek için önce kartezyen koordinatlarda, koordinat sistemleri arası konum ve vektör dönüşümü belirlensin.

Şekil 2-6'teki gibi orijinleri çakışık 2 dik koordinat sistemi olsun: xyz ve x'y'z'. Bu orijin noktasına göre uzayda bir gözlem noktası, xyz sistemine göre P(x,y,z) ve x'y'z' sistemine göre P' (x',y',z') olur. P(x,y,z) ile P' (x',y',z') arasında bir dönüşüm matrisi,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

olacak şekilde, T dönüşüm matrisi,

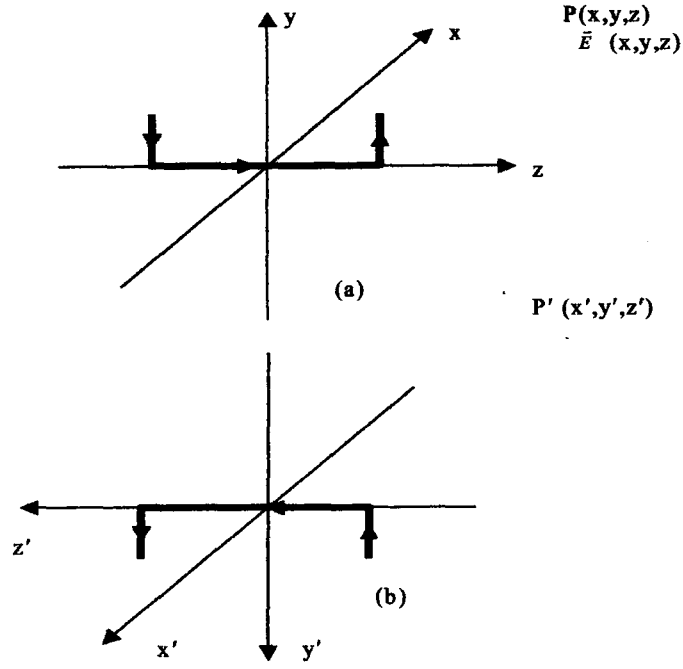


Şekil 2-6 Orijinleri çakışık 2 koordinat sistemi

$$T = \begin{bmatrix} \vec{u}'_x \cdot \vec{u}_x & \vec{u}'_x \cdot \vec{u}_y & \vec{u}'_x \cdot \vec{u}_z \\ \vec{u}'_y \cdot \vec{u}_x & \vec{u}'_y \cdot \vec{u}_y & \vec{u}'_y \cdot \vec{u}_z \\ \vec{u}'_z \cdot \vec{u}_x & \vec{u}'_z \cdot \vec{u}_y & \vec{u}'_z \cdot \vec{u}_z \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

şeklinde tanımlanır[24]. Bu P noktasındaki bir vektör de yine aynı T dönüşüm matrisiyle dönüştürülür.

Şekil 2-7 a)da gösterilen xyz koordinat sisteminde EŞA'nın P noktasında oluşturduğu elektrik alan $\vec{E}(x,y,z)$ ve Şekil 2-7 b)de gösterilen x'y'z' koordinat sisteminde görüntü EŞA'nın P' noktasında ürettiği elektrik alan $\vec{E}'(x',y',z')$ olsun. Antenlerin orta noktaları çakışık (orijinler aynı) ve P gözlem noktası ile P' gözlem noktası aynı yer olsun. Burada



Şekil 2-7 EŞA ve görüntüsü için ayrı ayrı koordinat sistemleri

$$\begin{aligned}\vec{u}'_x &= -\vec{u}_x \\ \vec{u}'_y &= -\vec{u}_y \\ \vec{u}'_z &= -\vec{u}_z\end{aligned}\quad (2.41)$$

olduğu için T' dönüşüm matrisi

$$T' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

olur. P noktasının xyz eksen sistemine göre konum vektörü $\vec{r}$ ve $x'y'z'$ eksen sistemine göre konum vektörü $\vec{r}'$ olsun,

$$= [T'] \vec{r} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{bmatrix} = -\vec{r} \quad (2.43)$$

olur. P' noktasındaki elektrik alan, $x'y'z'$ koordinat sisteminde $\vec{E}'(x',y',z')$ olur.

Ters dönüşüm matrisi T ;

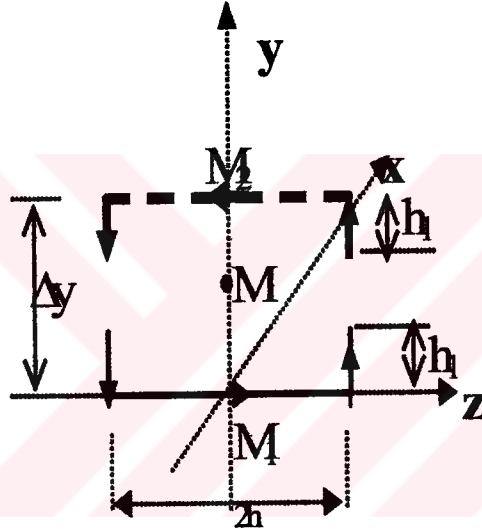
$$T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

olacağından xyz sisteminde elektrik alan

$$\vec{E}(x,y,z)=T^* \vec{E}' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \\ E'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E'_x \\ -E'_y \\ -E'_z \end{bmatrix} = -\vec{E}'(-x,-y,-z) \quad (2.45)$$

olur. Örneğin Şekil 2-8'deki gibi bir konfigürasyona sahip alan ve boyutları aynı olan bir EŞA ve bir de görüntü EŞA olsun. Görüntü EŞA'nın merkez noktası $(0,\Delta y,0)$ da olsun. Antenlerin h_1 uzunlukları $\frac{\Delta y}{2}$ den küçük veya eşit olsun. Bu durumda $P(x,y,z)$ noktasında oluşan toplam elektrik alan

$$\vec{E}(x,y,z)$$



Şekil 2-8 Merkezleri arasında $\Delta y \geq 2h_1$ uzaklık olan bir EŞA ve görüntüsü (2. Anten 1. antenin $(0,\Delta y/2,0)$ noktası etrafında şekil düzleminde 180° dönünce 2. anten elde ediliyor.)

$$\vec{E}_T(x,y,z) = \vec{E}(x,y,z) - \vec{E}(-x, -(y-\Delta y), -z) \quad (2.46)$$

olur. Böylece Şekil 2-8'de de görüldüğü gibi M_1 merkezli EŞA, eğer M noktası etrafında 180° döndürülürse M_2 merkezli görüntü EŞA elde edilmektedir. Diğer yandan Şekil 2-8 deki her iki anten $y=\Delta y/2$ deki yansıtıcı düzleme birbirlerinin görüntüsü olmak durumundadırlar. Sonuç olarak bir EŞA antenin görüntüsü; bu antenin görüntü düzlemindeki M merkez noktasına göre 180° dönüş yapmakla elde edilen ters el EŞA olmaktadır. Görüntü alan ifadeleri de, anten merkezindeki Δy 'lik kayma ve anten yapısının 180° çevrilmesi ile bulunan antenin alanı olarak ifade edilebilir. Yani bir görüntü EŞA'nın alanı öteleme ve dönüşüm işlemiyle elde edilir.

2.4 Özet:

Jordan'ın ortadan beslemeli Dipol Anten için verdiği yakın alan formülleri gerek sağ el, gerek sol el E şekli antenler için geliştirildi.

Uçtan Beslemeli Anten ise bizim tarafımızdan önerilmiş bir anten tipidir. Yakın alanları dahil bütün ifadeleri tarafımızdan çıkarılmıştır. Uluslar arası ELECO'01 sempozyumunda tebliğ olarak verilmiştir[25].

Elde edilen sonuçlar sinüzoidal akım dağılımı kabulünün üzerine yapılan tam diferansiyel problem çözümdür, yaklaşıklık yapılmamıştır.



3. UÇTAN BESLEMELİ VE ORTADAN BESLEMELİ EŞA'LERİN ÖZELLİKLERİ

Uçtan Beslemeli ve Ortadan Beslemeli EŞA denklemlerinde $h_1=0$ alındığı zaman ince dipol anten denklemlerini sağlamalıdır. Bu hal için $h_1=0$ alınsın: P gözlem noktasının antenin uç noktalarına uzaklıkları özel olarak;

$$r_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3.1,a)$$

$$r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2} \quad (3.1,b)$$

$$r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2} \quad (3.1,c)$$

$$r_3 = \sqrt{x^2 + (y-0)^2 + z^2} = r_0 \quad (3.1,d)$$

$$r_4 = \sqrt{x^2 + (y-0)^2 + (z-h)^2} = r_1 \quad (3.1,e)$$

$$r_5 = \sqrt{x^2 + (y-0)^2 + (z+h)^2} = r_2 \quad (3.1,f)$$

olur. OBEŞA (2.24), (2.26), (2.28) denklemlerine ve UBEŞA (2.35), (2.37), (2.38) denklemlerine $h_1=0$ ve (3.1a)-(3.1f) denklemleri taşınısın. Ortadan beslemeli EŞA için elektrik alanın x bileşeni;

$$E_x(P) = -\frac{j30I_0 x}{\rho^2} \left\{ 2 \frac{z}{r_0} e^{-jkr_0} \cos(kh) - (z-h) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - (z+h) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right\} \quad (3.2)$$

Elektrik alanın y bileşeni;

$$E_y(P) = -\frac{j30I_0 y}{\rho^2} \left\{ 2 \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \cos(kh) - (z-h) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - (z+h) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right\} \quad (3.3)$$

Elektrik alanın z bileşeni ise ;

$$E_z(P) = -j30I_0 \left\{ -2 \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \cos(kh) + \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right\} \quad (3.4)$$

bulunur. Böylece dipol antenlerin yakın alan ifadeleri elde edildiği için E şekilli antenlerin alan ifadelerinin elde edilmesinde sağlama yapılmış olur. Uçtan beslemeli E şekilli antenler için;

$$\begin{aligned}
E_x(P) = & -j30I_0x \left\{ -2 \frac{z}{r_0} \frac{e^{-jkr_0}}{\rho^2} \cos(kh_1) \right. \\
& - \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \left(\left(\frac{y}{\rho_1^2} - \frac{(z-h)^2}{\rho^2} \right) \cos(k(h+h_1)) - j \left(\frac{y^2}{\rho_1^2} - \frac{(z-h)^2}{\rho^2} \right) \frac{\sin(k(h+h_1))}{r_1} \right) \\
& + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \left(\left(\frac{(z+h)}{\rho^2} + \frac{y}{\rho_2^2} \right) \cos(k(h+h_1)) - j \left(\frac{y^2}{\rho_2^2} - \frac{(z+h)^2}{\rho^2} \right) \frac{\sin(k(h+h_1))}{r_2} \right) \\
& + \frac{e^{-jkr_4}}{r_4 \rho_1^2} \left((y-h_1) \cos(k(h+2h_1)) + \frac{\rho_1^2 - jkr_4(y-h_1)^2}{kr_4^2} \sin(k(h+2h_1)) \right) \\
& \left. - \frac{e^{-jkr_5}}{r_5 \rho_2^2} \left((y-h_1) \cos(k(h+2h_1)) + \frac{\rho_2^2 - jkr_5(y-h_1)^2}{kr_5^2} \sin(k(h+2h_1)) \right) \right\} \quad (3.5,a)
\end{aligned}$$

idi. UBEŞA elektrik alanının x bileşeni denklemi (3.5) ifadesinde $h_1=0$ alınıp r_i parametreleri (3.1) denklemlerine göre düzenlenir

$$\begin{aligned}
E_x(P) = & -j30I_0x \left\{ -2 \frac{z}{r_0} \frac{e^{-jkr_0}}{\rho^2} 1 - \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \left(\left(\frac{y}{\rho_1^2} - \frac{(z-h)^2}{\rho^2} \right) \cos(kh) - j \left(\frac{y^2}{\rho_1^2} - \frac{(z-h)^2}{\rho^2} \right) \frac{\sin(kh)}{r_1} \right) \right. \\
& + \frac{e^{-jkr_2}}{r_1 \rho_1^2} \left(y \cos(kh) + \frac{\rho_1^2 - jkr_1 y^2}{kr_1^2} \sin(kh) \right) + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \left(\left(\frac{(z+h)}{\rho^2} + \frac{y}{\rho_2^2} \right) \cos(kh) - j \left(\frac{y^2}{\rho_2^2} - \frac{(z+h)^2}{\rho^2} \right) \frac{\sin(kh)}{r_2} \right) \\
& \left. - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2 \rho_2^2} \left(y \cos(kh) + \frac{\rho_2^2 - jkr_2 y^2}{kr_2^2} \sin(kh) \right) \right\} \quad (3.5,b)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_x(P) = & -j30I_0x \left\{ -2 \frac{z}{r_0} \frac{e^{-jkr_0}}{\rho^2} - \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \left(-\frac{(z-h)}{\rho^2} \cos(kh) - \frac{\rho^2 - jkr_1(z-h)^2}{kr_1 \rho^2} \frac{\sin(kh)}{r_1} \right) \right. \\
& \left. + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \left(\frac{(z+h)}{\rho^2} \cos(kh) - \frac{\rho^2 - jkr_2(z+h)^2}{kr_2 \rho^2} \frac{\sin(kh)}{r_2} \right) \right\} \quad (3.5,c)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_x(P) = & -\frac{j30I_0x}{\rho^2} \left\{ -2 \frac{z}{r_0} e^{-jkr_0} + \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \left((z-h) \cos(kh) + \frac{\rho^2 - jkr_1(z-h)^2}{kr_1} \frac{\sin(kh)}{r_1} \right) \right. \\
& \left. + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \left((z+h) \cos(kh) - \frac{\rho^2 - jkr_2(z+h)^2}{kr_2} \frac{\sin(kh)}{r_2} \right) \right\} \quad (3.6)
\end{aligned}$$

bulunur. Benzer şekilde (2.37) denklemi de

$$\begin{aligned}
E_y(P) = & -j30I_0 \left\{ -2 \frac{yz}{\rho^2} \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \cos(kh_1) + \frac{((z-h)y + \rho^2) e^{-jkr_1}}{\rho^2 r_1} \cos(k(h+h_1)) \right. \\
& - j \frac{y}{\rho^2} e^{-jkr_1} \sin(k(h+h_1)) + \frac{((z+h)y - \rho^2) e^{-jkr_2}}{\rho^2 r_2} \cos(k(h+h_1)) + j \frac{y}{\rho^2} e^{-jkr_2} \sin(k(h+h_1)) \\
& - \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} \cos(k(h+2h_1)) + (y-h_1) \frac{1+jkr_4}{kr_4^2} \frac{e^{-jkr_4}}{r_4} \sin(k(h+2h_1)) + \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} \cos(k(h+2h_1)) \\
& \left. - (y-h_1) \frac{1+jkr_5}{kr_5^2} \frac{e^{-jkr_5}}{r_5} \sin(k(h+2h_1)) \right\} \quad (3.7,a)
\end{aligned}$$

olup burada $h_1=0$ alınıp r parametreleri (3.1) denklemlerine göre düzenlenir;

$$E_y(P) = -j30I_0 \left\{ -2 \frac{yz}{\rho^2} \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} + \frac{((z-h)y + \rho^2) e^{-jkr_1}}{\rho^2 r_1} \cos(kh) - \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \cos(kh) \right. \\ \left. - j \frac{y}{\rho^2} e^{-jkr_1} \sin(kh) + y \frac{1 + jkr_1}{kr_1^2} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \sin(kh) + \frac{((z+h)y - \rho^2) e^{-jkr_2}}{\rho^2 r_2} \cos(kh) \right. \\ \left. + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \cos(kh) + j \frac{y}{\rho^2} e^{-jkr_2} \sin(kh) - y \frac{1 + jkr_2}{kr_2^2} \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \sin(kh) \right\} \quad (3.7,b)$$

$$E_y(P) = -j30I_0 \left\{ -2 \frac{yz}{\rho^2} \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} + \frac{(z-h)y}{\rho^2} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \cos(kh) + y \frac{\rho^2 - jkr_1(z-h)^2}{kr_1^2 \rho^2} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \sin(kh) \right. \\ \left. + \frac{(z+h)y}{\rho^2} \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \cos(kh) - y \frac{\rho^2 - jkr_2(z+h)^2}{kr_2^2 \rho^2} \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \sin(kh) \right\} \quad (3.7,c)$$

$$E_y(P) = -\frac{j30I_0 y}{\rho^2} \left\{ -2z \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} + (z-h) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \cos(kh) + \frac{\rho^2 - jkr_1(z-h)^2}{kr_1^2} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \sin(kh) \right. \\ \left. + (z+h) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \cos(kh) - \frac{\rho^2 - jkr_2(z+h)^2}{kr_2^2} \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \sin(kh) \right\} \quad (3.8)$$

bulunur. UBEŞA elektrik alanının z bileşeni (2.38) denklemi de

$$E_z(P) = -j30I_0 \left\{ \left[2 \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \cos(kh_1) - (\rho_1^2 + y(z-h)) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1 \rho_1^2} \cos(k(h+h_1)) + j(z-h) \frac{e^{-jkr_1}}{\rho_1^2} \sin(k(h+h_1)) \right] \right. \\ \left. - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2 \rho_2^2} (\rho_2^2 - y(z+h)) \cos(k(h+h_1)) - j(z+h) \frac{e^{-jkr_2}}{\rho_2^2} \sin(k(h+h_1)) \right. \\ \left. + (z-h) \frac{(y-h_1)}{\rho_1^2 r_4} e^{-jkr_4} \cos(k(h+2h_1)) + \frac{(z-h)}{\rho_1^2} \frac{e^{-jkr_4}}{kr_4} \left(\frac{\rho_1^2 - jkr_4(y-h_1)^2}{r_4^2} \right) \sin(k(h+2h_1)) \right. \\ \left. - (z+h) \frac{(y-h_1)}{\rho_5^2 r_5} e^{-jkr_5} \cos(k(h+2h_1)) - \frac{(z+h)}{\rho_2^2} \frac{e^{-jkr_5}}{kr_5} \left(\frac{\rho_2^2 - jkr_5(y-h_1)^2}{r_5^2} \right) \sin(k(h+2h_1)) \right\} \quad (3.9,a)$$

idi, bu denklemde $h_1=0$ alınıp r parametreleri (3.1) denklemlerine göre düzenlenirse,

$$E_z(P) = -j30I_0 \left\{ \left[2 \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} - (\rho_1^2 + y(z-h)) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1 \rho_1^2} \cos(kh) + (z-h) \frac{y}{\rho_1^2 r_1} e^{-jkr_1} \cos(kh) \right] \right. \\ \left. + j(z-h) \frac{e^{-jkr_1}}{\rho_1^2} \sin(kh) + \frac{(z-h)}{\rho_1^2} \frac{e^{-jkr_1}}{kr_1} \left(\frac{\rho_1^2 - jkr_1 y^2}{r_1^2} \right) \sin(kh) - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2 \rho_2^2} (\rho_2^2 - y(z+h)) \cos(kh) \right. \\ \left. - (z+h) \frac{y}{\rho_5^2 r_2} e^{-jkr_2} \cos(kh) - j(z+h) \frac{e^{-jkr_2}}{\rho_2^2} \sin(kh) - \frac{(z+h)}{\rho_2^2} \frac{e^{-jkr_2}}{kr_2} \left(\frac{\rho_2^2 - jkr_2 y^2}{r_2^2} \right) \sin(kh) \right\} \quad (3.9,b)$$

$$E_z(P) = -j30I_0 \left\{ 2 \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} - \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \cos(kh) + (z-h) \frac{e^{-jkr_1}}{kr_1} \left(\frac{1 + jkr_1}{r_1^2} \right) \sin(kh) \right. \\ \left. - \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \cos(kh) - (z+h) \frac{e^{-jkr_2}}{kr_2} \left(\frac{1 + jkr_2}{r_2^2} \right) \sin(kh) \right\} \quad (3.10)$$

bulunur. Bu sonuçlar (3.5 3.7, 3.9,) Türkoğlu ve Akkaya'nın [26,27] sonuçlarıyla aynı olması nedeniyle uçtan beslemeli EŞA alan ifadelerinin de bir sağlaması yapılmış olur.

3.1 EŞAların Ortak Ve Öz Empedansları

Şekil 3-1'de gösterildiği gibi, kartezyen koordinatlarda 2 EŞA olsun. Bunlardan birinin merkezinin koordinatları (0,0,0) ve diğerinin koordinatları (x,y,z) olsun. Merkezi 000 da olanın besleme akım genliği i_0 , merkezi xyz noktasında bulunan 2. antenin besleme akımı genliği i_2 ve oluşturduğu elektrik alanı $\vec{E}_2$ olsun. Herhangi iki ince antenin ortak empedansı genel olarak:

$$Z_{21} = Z_{12} = -\frac{1}{i_0 i_{20} \text{ 1. antenizeri}} \int i_1(x', y', z') E_{2_{\text{teget}}}(x', y', z') dl'(x', y', z') \quad (3.11)$$

genel formülü ile bulunur. Burada $\frac{i_1(x', y', z') dl'(x', y', z')}{i_0}$ oranı; 1. antenin i_0 la beslenirken üzerindeki bir (x',y',z') noktasındaki dl' boyundaki anten elemanından akan akımın dl' ile çarpılarak i_0 a bölümüne eşittir. $E_{2_{\text{teget}}}(x', y', z')$ i_2 la beslenen ikinci antenin (x',y',z') noktasında oluşturduğu elektrik alanının 1. antenin iletkenine teğet olan bileşenidir.



Şekil 3-1 Merkezi xyz konumunda bulunan bir EŞA ve merkezi 000 noktasında bulunan bir EŞA

Şekil 3-1'deki 1. antende oluşacak ortak empedans katkısı;

$$Z_{21} = -\frac{1}{i_0} \left\{ \int_0^{h_1} \vec{E}_2(-x, -(y-y'), -(z-h)) \cdot \vec{u}_y \sin(k(h_1-y')) dy' + \int_0^{h_2} \vec{E}_2(-x, -y, -(z-z')) \cdot \vec{u}_z \sin(k(h_1+h-z')) dz' \right. \\ \left. - \int_0^{h_1} \vec{E}_2(-x, -(y-y'), -z) \cdot \vec{u}_y \sin(k(h+h_1+y')) dy' + \int_0^{h_2} \vec{E}_2(-x, -(y-y'), -z) \cdot \vec{u}_y \sin(k(h+h_1+y')) dy' \right. \\ \left. + \int_{-h}^0 \vec{E}_2(-x, -y, -(z-z')) \cdot \vec{u}_z \sin(k(h_1+h+z')) dz' - \int_0^{h_1} \vec{E}_2(-x, -(y-y'), -(z+h)) \cdot \vec{u}_y \sin(k(h_1-y')) dy' \right\} \quad (3.12)$$

$$Z_{21} = -\frac{1}{i_{20}} \left\{ \int_0^{h_1} E_{2y}(-x, -(y-y'), -(z-h)) \sin(k(h_1 - y')) dy' + \int_0^h E_{2z}(-x, -y, -(z-z')) \sin(k(h_1 + h - z')) dz' \right. \\ \left. + \int_{-h}^0 E_{2z}(-x, -y, -(z-z')) \sin(k(h_1 + h + z')) dz' - \int_0^{h_1} E_{2y}(-x, -(y-y'), -(z+h)) \sin(k(h_1 - y')) dy' \right\} \quad (3.13)$$

dir. Bu denklemlerde i_{20} 2. antenin besleme noktası akım genliği, $\vec{u}_y$ y yönündeki birim vektör, E_{2y} ve E_{2z} 2. antenin elektrik alanının y ve z bileşenleridir. Benzer şekilde 1. anten uçtan beslemeli olursa bu durumda;

$$Z_{21} = -\frac{1}{i_{20}} \left\{ \int_0^{h_1} \vec{E}_2(-x, -(y-y'), -(z-h)) \cdot \vec{u}_y \sin(k(h_1 + h + y')) dy' + \int_0^h \vec{E}_2(-x, -y, -(z-z')) \cdot \vec{u}_z \sin(k(h_1 + h - z')) dz' \right. \\ \left. - \int_0^{h_1} \vec{E}_2(-x, -(y-y'), -z) \cdot \vec{u}_y \sin(k(h_1 - y')) dy' + \int_0^h \vec{E}_2(-x, -(y-y'), -z) \cdot \vec{u}_y \sin(k(h_1 - y')) dy' \right. \\ \left. + \int_{-h}^0 \vec{E}_2(-x, -y, -(z-z')) \cdot \vec{u}_z \sin(k(h_1 - z')) dz' - \int_0^{h_1} \vec{E}_2(-x, -(y-y'), -(z+h)) \cdot \vec{u}_y \sin(k(h_1 + h + y')) dy' \right\} \quad (3.14)$$

$$Z_{21} = -\frac{1}{i_{20}} \left\{ \int_0^{h_1} E_{2y}(-x, -(y-y'), -(z-h)) \sin(k(h_1 + h + y')) dy' + \int_0^h E_{2z}(-x, -y, -(z-z')) \sin(k(h_1 + h - z')) dz' \right. \\ \left. + \int_{-h}^0 E_{2z}(-x, -y, -(z-z')) \sin(k(h_1 - z')) dz' - \int_0^{h_1} E_{2y}(-x, -(y-y'), -(z+h)) \sin(k(h_1 + h + y')) dy' \right\} \quad (3.15)$$

olur. Eğer bu denklemlerde antenler arası mesafe sıfır ve besleme tipleri aynı yani antenler özdeş (anten özdeşiyle aynı konumda bulunursa) alınırsa antenin öz empedansı elde edilir[28,29,30,31].:

$$Z_{OBES\Lambda} = -\frac{1}{i_0} \left\{ \int_0^{h_1} E_y(0, y', h) \sin(k(h_1 - y')) dy' + \int_0^h E_z(0, 0, z') \sin(k(h_1 + h - z')) dz' \right. \\ \left. + \int_{-h}^0 E_z(0, 0, z') \cdot \vec{u}_z \sin(k(h_1 + h + z')) dz' - \int_0^{h_1} E_y(0, y', -h) \sin(k(h_1 - y')) dy' \right\} \quad (3.16)$$

$$Z_{UBES\Lambda} = -\frac{1}{i_0} \left\{ \int_0^{h_1} E_y(0, y', h) \sin(k(h_1 + h + y')) dy' + \int_0^h E_z(0, 0, z') \sin(k(h_1 + z')) dz' \right. \\ \left. + \int_{-h}^0 E_z(0, 0, z') \sin(k(h_1 - z')) dz' - \int_0^{h_1} E_y(0, y', -h) \sin(k(h_1 + h + y')) dy' \right\} \quad (3.17)$$

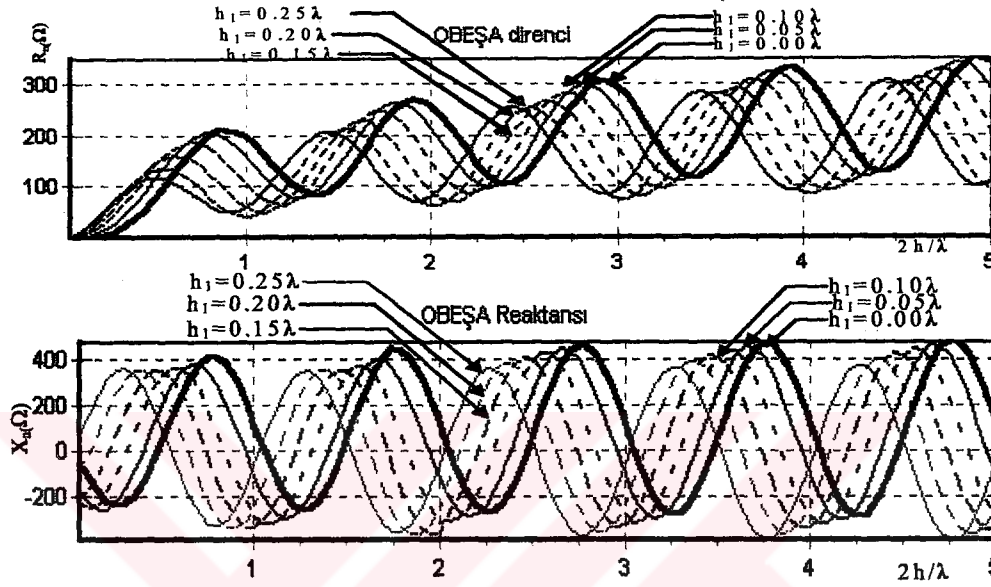
Özel olarak bu denklemlerde $h_1=0$ alınırsa $2h$ boyundaki dipol antenin öz empedans denklemleri elde edilir;

$$Z_{OBDA} = -\int_0^h \frac{E_z(0, 0, z')}{i_0} \sin(k(h - z')) dz' - \int_{-h}^0 \frac{E_z(0, 0, z')}{i_0} \cdot \vec{u}_z \sin(k(h + z')) dz' \\ = -\int_{-h}^h \frac{E_z(0, 0, z')}{i_0} \sin(k(h - |z'|)) dz' \quad (3.18)$$

$$Z_{UBDA} = -\int_0^h \frac{E_z(0, 0, z')}{i_0} \sin(kz') dz' - \int_{-h}^0 \frac{E_z(0, 0, z')}{i_0} \sin(-kz') dz' = -\int_{-h}^h \frac{E_z(0, 0, z')}{i_0} \sin(k|z'|) dz' \quad (3.19)$$

olur. Bu denklemlerde $||$ mutlak değer operatörüdür. Böylece (3.16) ifadesinin de sağlanması yapılmış olur. Çünkü (3.18) denklemi, ortadan beslemeli dipol antenler (OBDA) için literatürde verilen denklemlerle aynıdır [15, 32, 23].

Eğer anten bir zemin üzerine belli bir uzaklıkta ise, zemin bir yansıtıcı yüzey olarak değerlendirilir, zemine göre antenin görüntüsü uygun dönüşüm ve öteleme işlemleri ile belirlenir ve görüntü antenin oluşturduğu ortak empedans (3.27) oranında hesaba katılır.

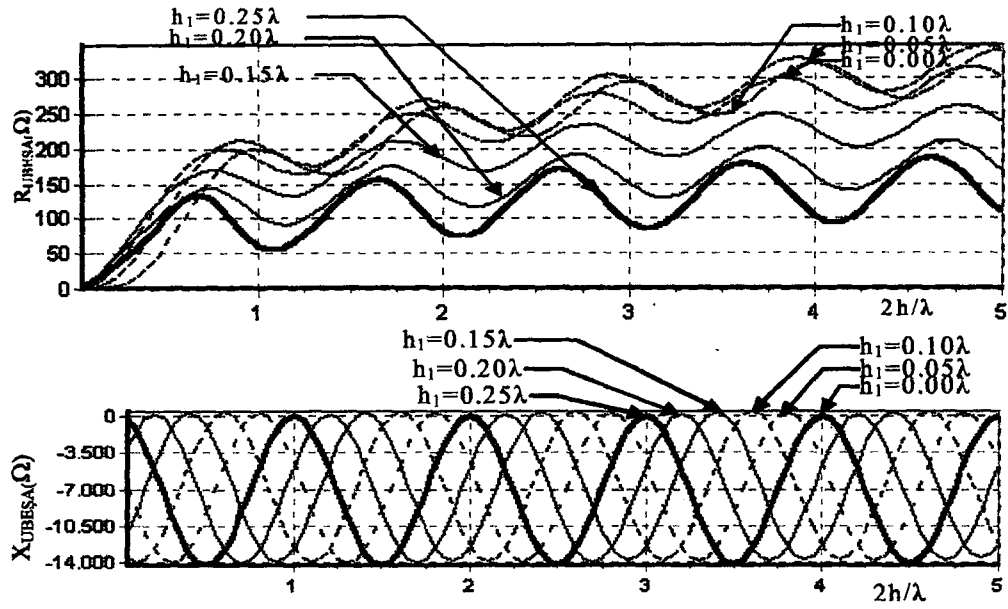


Şekil 3-2 Değişik kulak boyları için, sabit frekansta, OBEŞA empedansının anten ana boyu ile değişimi (anten çapı $10-3\lambda$)

Şekil 3-2’de sabit bir frekansta OBEŞA için kulak boylarının empedansa etkisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi y eksenine paralel parçaların (kulakların) boyu h_1 arttıkça, anten boyuna bağlı direncin ortalama değeri genellikle azalmaktadır. Ve ekstramumlar sola doğru kaymaktadır, reaktans kapasitifleşmektedir.

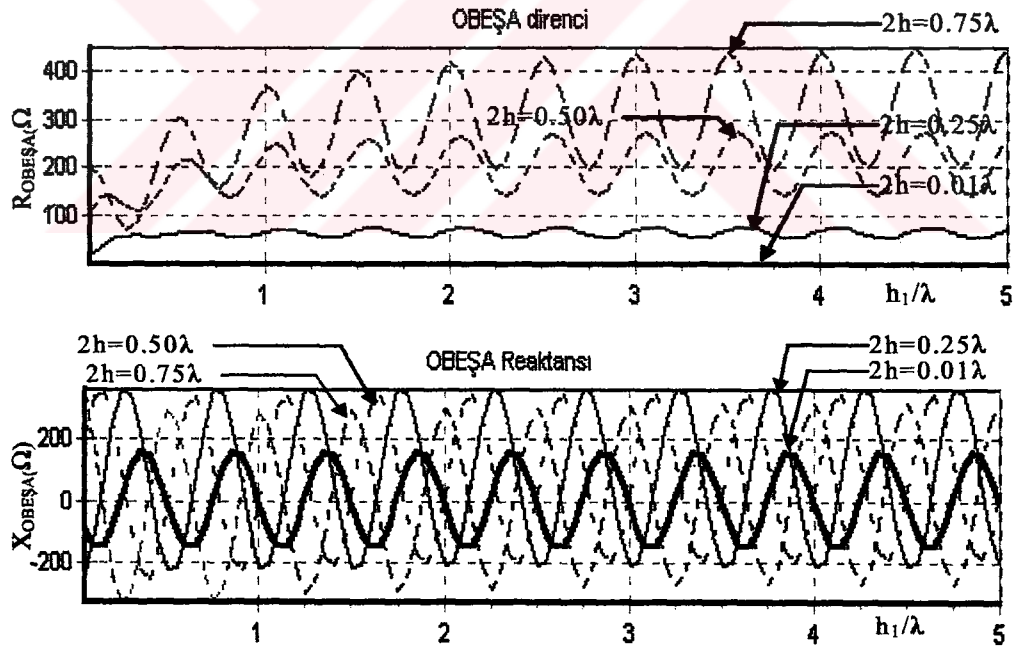
Şekil 3-3’de sabit bir frekansta UBEŞA için anten ana dipolu boyunun ve kulak boylarının empedansa etkisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi y eksenine paralel parçaların (kulakların) boyu h_1 arttıkça anten boyuna bağlı direncin ortalama değeri OBEŞA’dan daha çok azalmaktadır. Aynı zamanda ekstramumlar sola doğru kaymaktadır. Reaktans ise sürekli kapasitif olmaktadır. Kulak boyu 0.25λ ve 0.00λ iken reaktanslar yaklaşık olarak birbirine eşit olmaktadır.

Kulak boyunun 0’dan farklı olması durumunda OBEŞA reaktansının ortalaması sıfır civarında ve minimum ve maksimumlar 400Ω dan küçüktür. UBEŞA’nın reaktansı genliği ise birden yükselmekte ve değeri $-14k\Omega$ olabilmektedir.



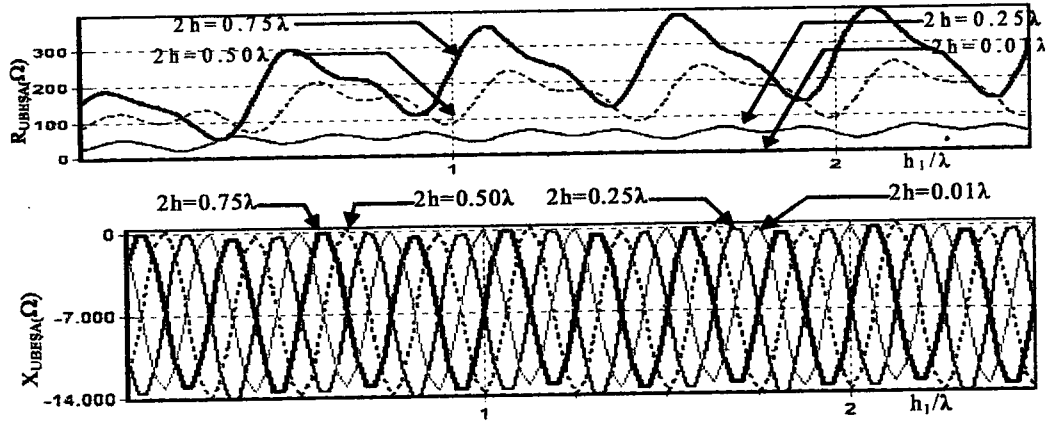
Şekil 3-3 Değişik kulak boyları için UBEŞA empedansının anten ana boyu ile değişimi (anten çapı $10^{-3}\lambda$).

Şekil 3-4 ve Şekil 3-5'te değişik anten boyları için kulak parçalarının empedansa etkisi görülmektedir. Şekillerde değişim kulak boyuna göre verilmiştir. Şekillerde OBEŞA için $h_1=0$ için literatürde verilen dipol anten grafikleriyle aynıdır.



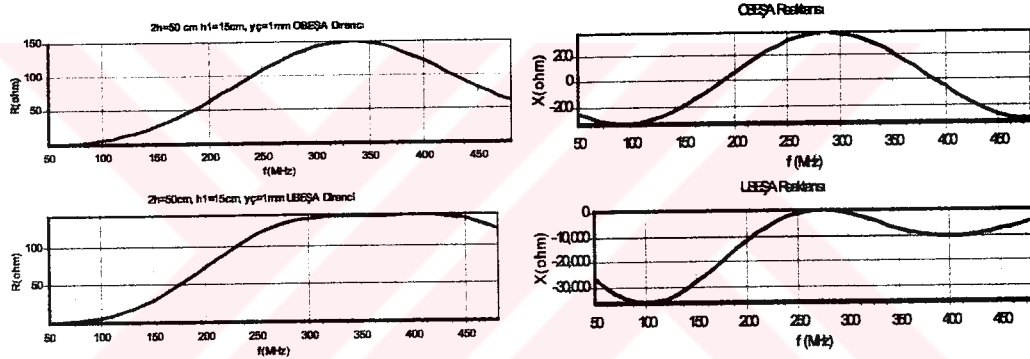
Şekil 3-4 Değişik anten boyları için OBEŞA empedansının kulak boyu ile değişimi (anten çapı $10^{-3}\lambda$).

Şekil 3-4 ve Şekil 3-5'te empedansların $2h/\lambda$ 'ya göre 0.5 periyodu ile periyotlu olduğu görülmektedir. UBEŞA için anten boyu reaktansın maksimumlarının genliğini etkilememektedir.



Şekil 3-5 Değişik anten boyları için UBEŞA empedansının kulak boyu ile değişimi (anten çapı $10^{-3}\lambda$).

Sistemde kullanılan $2h=\text{cm}$, $h_1=15\text{cm}$ ve iletken yarıçapı $d_i=1\text{mm}$ olan EŞA'lerin hesaplanan çalışma frekans bölgesindeki empedansı Şekil 3-6'da görülmektedir. 330 MHz'de OBEŞA direnci 300-450MHz'de UBEŞA direnci maksimum olmaktadır, UBEŞA reaktansı genellikle kapasitif kalmaktadır.



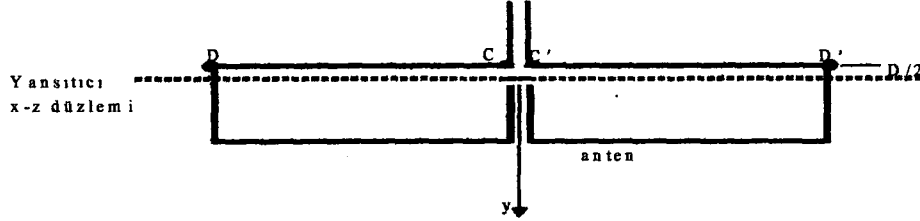
Şekil 3-6 $2h=50\text{cm}$ $h_1=15\text{cm}$ ve 1mm yarıçaplı EŞA'lerin empedansı

3.2 E Şekilli Antenin Beslemesi

Sistemde anten düzlemine paralel bir yansıtıcı bulunmaktadır. Besleme hattı bu yansıtıcıya paralel ve sabit bir uzaklıkta olacaktır. Bu uzaklığı sabit tutmak ve besleme hattının hareket etmesini önlemek için besleyici hatlar bir yalıtkan lak tabakası içine gömülmüştür (Şekil 3-8). EŞA'nın uçtan beslenmesi durumunda anten konfigürasyon eş değeri Şekil 1-11 da görüldüğü gibi olur. Yansıtıcının üzerinde bulunan besleme hattının yansıtıcıdan dolayı oluşacak olan görüntüsü ve akım yönü Şekil 3-8 de gösterilmiştir. Şekil 3-8'den de görüldüğü gibi arası D olan 2 telli iletim hattı ile akımları aynı gerilimleri ise yarı yarıya olmak üzere karşılıklıdır. Dolayısıyla dolgu malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r iken, iletken kalınlığının d_i olması halinde besleme hat parçalarının karakteristik empedansı :

$$Z'_0 = \frac{1}{2} Z_0 = \frac{1}{2} \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \log_{10} \frac{D}{d_i} \quad (3.20)$$

olur [23]. Burada Z_0 , Şekil 3-8 b)deki tam hattın karakteristik empedansıdır.



Şekil 3-7 E Şekilli antenin Uçtan beslemesi

Besleme noktası CC' arasından görülecek uçtan beslemeli EŞA (UBEŞA) empedansı da:

$$Z_B = Z_0 \frac{Z_{UBA} + Z_0 \tanh(jkh + \alpha h)}{Z_0 + Z_{UBA} \tanh(jkh + \alpha h)} \quad (3.21)$$

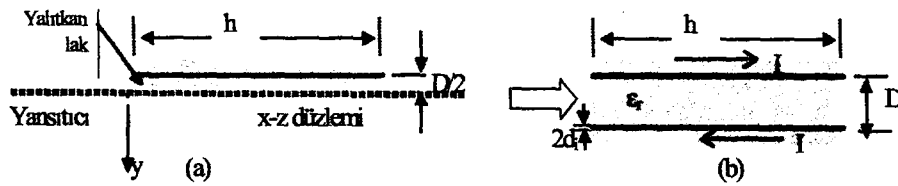
kayıpsız bir hatta ise:

$$Z_B = Z_0 \frac{Z_{UBA} + jZ_0 \tan(kh)}{Z_0 + jZ_{UBA} \tan(kh)} \quad (3.22)$$

olur[33]. Burada Z_B besleme noktasından görülen empedans, Z_0 eşdeğer besleme hattının karakteristik empedansı, Z_{UBA} UBEŞA'nın DD' noktaları arasından görülen empedansı, h anten ana dipolu yarı boyu, k hattaki propogasyon sabiti olup:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda'} = \frac{2\pi}{\lambda/\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r} = k_0 \sqrt{\epsilon_r} \quad (3.23)$$

dir. Burada λ' hattaki işaretin dalga boyu, k_0 boşluktaki dalganın propogasyon sabitidir.



Şekil 3-8 a) Besleme hattı b) besleme hattına karşı düşen iki telli hat

3.3 Zeminin Etkisi

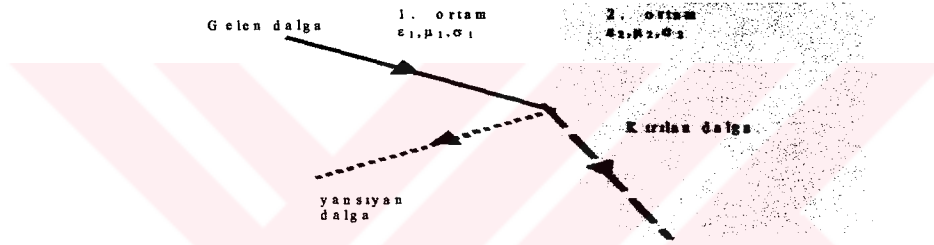
Zemin de antenlerin empedansına etkir. Önce düzlemsel bir dalganın zeminden nasıl yansıdığını görelim: Elektromagnetik alan kaynağı herhangi bir zeminle karşılaşıncı

bir kısmı bu zemine kırılarak nüfuz edecek, bir kısmı da geliş açısına uygun bir açıyla geri yansıyacaktır [22] (bkz. Şekil 3-9).

Yansıyan dalga ile gelen dalganın elektrik alanları arasındaki oran yansıma katsayısı (Γ)dır. Yansıma katsayısı dalganın ilerlediği ortam ile karşılaştığı ortamların empedanslarına bağlıdır. Bir ortamın dalga empedansı Z :

$$Z = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}}} \quad (3.24)$$

ile tanımlanır. Burada μ ortamın magnetik geçirgenlik sabiti, ϵ ortamın dielektrik sabiti, σ ortamın iletkenlik sabiti ve ω dalganın açısal frekansıdır. Özel olarak havadan gelen dalganın toprak zeminle karşılaşmasını ele alalım: Havanın dalga empedansı Z_0 :



Şekil 3-9 Dalganın farklı ortamlarla karşılaşması

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 377 \, \Omega \quad (3.25)$$

dir. Burada μ_0 boşluğun magnetik geçirgenlik sabiti olup $\mu_0 = 4\pi / 10^7$ (H/m) ve ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti olup $\epsilon_0 = 1 / 36\pi \cdot 10^9$ (F/m)'dir. Toprağın dalga empedansı Z_t ise:

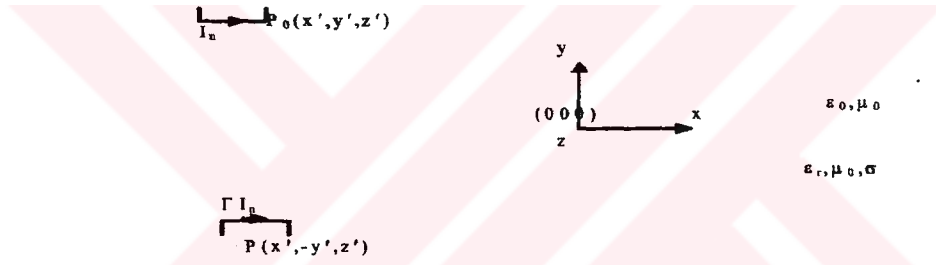
$$Z_t = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}}} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \frac{1}{\epsilon_r}}}{\sqrt{1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0}}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\epsilon_r} \frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{\sqrt{1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r \epsilon_0}}} \quad (3.26)$$

olur. Burada ϵ_r toprağın bağıl dielektrik sabitidir. Havadan yere doğru gelen bir dalga için yerin yansıma katsayısı[33]:

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = \frac{\frac{\sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{\sqrt{1-j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_r\epsilon_0}}} - \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{\frac{\sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{\sqrt{1-j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_r\epsilon_0}}} + \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}} = \frac{\frac{\sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}}}{\sqrt{1-j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_r\epsilon_0}}} - 1}{\frac{\sqrt{\frac{1}{\epsilon_r}}}{\sqrt{1-j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_r\epsilon_0}}} + 1} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}}} - 1 \quad (3.27)$$

olur. Düzlemsel dalga hesaplarında bu yansıma katsayısının geçerli olması için, zemin anten arası mesafenin en az 0.2λ ($kr > 1$) olması gereklidir[19].

Sonuç olarak eleman akımları I_n olan, zemin yüzeyinden y' kadar yüksekteki anten düzlemi y eksenine paralel bir propogasyon vektörü olan bir düzlem dalga oluşturmuşsa, zemin yüzeyinden y' kadar alçakta ve eleman akımları ΓI_n olan bir görüntü anten dizisi bulunduğu kabul edilerek bu dizinin elemanlarının da anten dizisinin empedansını etkilediği düşünülecektir. Gerçekte bu yöntem, alanımız tam düzlemsel olmadığı için, biraz yaklaşık bir yöntemdir.



Şekil 3-10 Zemin üzerinde bir anten ve zemine göre görüntüsü

3.4 Özet

Bölüm 2 ve 3'te çıkarılan bütün formüller matematiksel olarak kesin sonuçlardır. Çalışmada sadece 3 yaklaşıklık yapılmıştır:

- İletken tel üzerinde sinüzoidal bir akım dağılımı kabulü. Bu yöntem zaten literatürde kullanılmaktadır ve EŞA için de NEC ile gösterilmiştir.
- Sayısal integral alırken integral adımını sıfır seçmemek: Sayısal integral adımının anten çapından küçük olmalıdır. Gerek hesaplarda gerekse programda maddi bir hata yapıp yapmadığımızı kontrol etmek için literatürde (mesela Jordan'da) $h1=0$ (ayrıca anten iletkeninin çapının sıfır olduğu) limit halindeki bulunmuş olan sonuçları kullandık ve hesaplarımızda hiçbir işlem hatası yapmamış olduğumuzu irdeledik.
- Toprağın yansıtıcılığı için görüntü metodunun kullanılması:(bu metodun kullanılması için, Stutzman[19] mesafenin en az 0.2 dalga boyu olmasını önermiştir.)

4. EŞA DİZİSİNİN ANALİZİ

Şekil 4-1 deki gibi ama yansıtıcısız n antenli bir EŞA dizisinin bir P(x,y,z) noktasında uyardığı toplam elektrik alanı:

$$\vec{E}_T(x,y,z) = \sum_{i=0}^n \vec{E}(x-id,y,z) \quad (4.1)$$

olur. Burada ilk anten(0,0,0) noktasında bulunuyor ve antenler x ekseninde d aralıklı olarak dizilidir. $\vec{E}_T(x,y,z)$ dizinin P(x,y,z) gözlem noktasında oluşturduğu toplam elektrik alanıdır, $\vec{E}(x,y,z)$ ise merkezi (0,0,0) noktasında bulunan bir antenin P(x,y,z) gözlem noktasında oluşturduğu elektrik alanıdır. Simetri özellikleri kullanılarak bu denklem daha da sade hale getirilebilir.

Diğer taraftan bir (2.24), (2.26), (2.28), (2.35), (2.37) ve (2.38) ile tanımlanan E şekilli anten(EŞA)in alan denklemleri

$$\vec{E}(x,y,z) = -j30I_0 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(x,y,z) e^{-jk_r(x,y,z)} \vec{u}_i \quad (4.2)$$

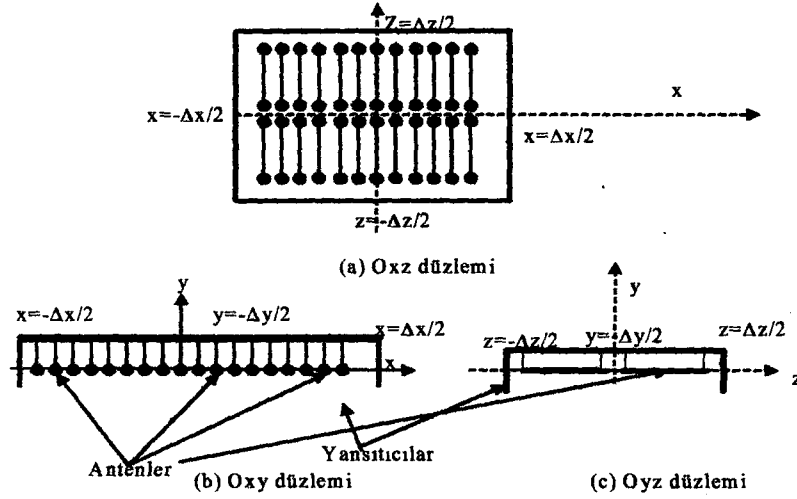
şeklinde tanımlanabilir. Burada I_0 sıfırıncı anten besleme akımı, $\vec{u}_i$ i. birim vektör ($\vec{u}_1 = \vec{u}_x$, $\vec{u}_2 = \vec{u}_y$, $\vec{u}_3 = \vec{u}_z$), r_j 2. bölümde (2.5) ifadelerinde olduğu gibi P gözlem noktasının antenin uç noktalarına uzaklığı, F_{ij} elektrik alan vektörünün i. bileşenine ait r_j teriminin karmaşık faz çarpanıdır. Bir P(x,y,z) gözlem noktasında uyarılan toplam elektrik alan;

$$\vec{E}_T(x,y,z) = -j30 \sum_{m=0}^n I_m e^{-jkm} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(x-md,y,z) e^{-jk_r(x-md,y,z)} \vec{u}_i \quad (4.3)$$

olur.

Şekil 4-1'de $y = -\Delta y$, $z = \Delta z/2$, $z = -\Delta z/2$, $x = \Delta x/2$ ve $x = -\Delta x/2$ düzlemlerinde yansıtıcı levhalar bulunan bir EŞA dizisi

görülmektedir. Şekilde $2n+1$ anten olsun, $z=0$ 'daki anten 0. anten seçilerek yukarıdaki denklemi düzenleyelim:



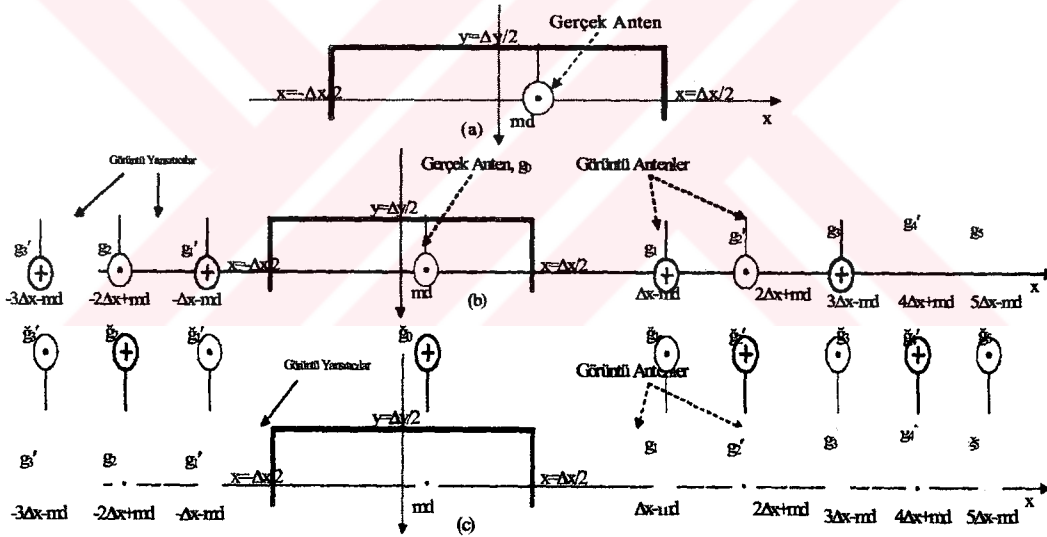
Şekil 4-1 Yansıtıcı levhalar bulunan bir EŞA dizisi

Antenlerin P gözlem noktasında oluşturduğu toplam elektrik alan sadece antenlerden değil aynı zamanda yansıtıcılardan da gelmektedir. Şekil 4-2 ve Şekil 4-3 dikkate alınarak,

$$\begin{aligned}
 \vec{E}_T(x, y, z) = & -j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(x-md, y, z) e^{-jkr_j(x-md, y, z)} \vec{u}_i \\
 & + j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(-(x-md), -(y+\Delta y), -z) e^{-jkr_j(-(x-md), -(y+\Delta y), -z)} \vec{u}_i \\
 & + j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}((x+md-\Delta x), y, z) e^{-jkr_j((x+md-\Delta x), y, z)} \vec{u}_i \\
 & + j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}((x+md+\Delta x), y, z) e^{-jkr_j((x+md+\Delta x), y, z)} \vec{u}_i \\
 & - j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(x-md, y, z-\Delta z) e^{-jkr_j(x-md, y, z-\Delta z)} \vec{u}_i \\
 & - j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(x-md, y, z+\Delta z) e^{-jkr_j(x-md, y, z+\Delta z)} \vec{u}_i \\
 & + j30 \sum_{g=2}^K \left\{ - \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(-(x+md-(g-1)\Delta x), -(y-\Delta y), -z) e^{-jkr_j(-(x+md-(g-1)\Delta x), -(y-\Delta y), -z)} \vec{u}_i (-1)^g \right. \\
 & \left. - j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}((x+md-g\Delta x), y, z) e^{-jkr_j((x+md-g\Delta x), y, z)} \vec{u}_i (-1)^g \right. \\
 & \left. - \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(-(x+md+(g-1)\Delta x), -(y-\Delta y), -z) e^{-jkr_j(-(x+md+(g-1)\Delta x), -(y-\Delta y), -z)} \vec{u}_i (-1)^g \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}((x+md+g\Delta x), y, z) e^{-jkr_j((x+md+g\Delta x), y, z)} \vec{u}_i (-1)^g \\
& + j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(-(x-md), -(y-\Delta y), -(z-(g-1)\Delta z)) e^{-jkr_j(-(x-md), -(y-\Delta y), -(z-(g-1)\Delta z))} \vec{u}_i \\
& - j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(x-md, y, z-g\Delta z) e^{-jkr_j(x-md, y, z-g\Delta z)} \vec{u}_i \\
& + j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(-(x-md), -(y-\Delta y), -(z+(g-1)\Delta z)) e^{-jkr_j(-(x-md), -(y-\Delta y), -(z+(g-1)\Delta z))} \vec{u}_i \\
& - j30 \sum_{m=-n}^n I_m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^5 F_{ij}(x-md, y, z+g\Delta z) e^{-jkr_j(x-md, y, z+g\Delta z)} \vec{u}_i \Big\} \quad (4.4)
\end{aligned}$$

olur. Denklemden I_m m. antenin akımının, varsa gerçek, yoksa teorik karın noktasındaki genliği, $\Delta z/2$, ozy düzlemine paralel yansıtıcılar bu düzleme uzaklığı, $\Delta x/2$ ozy düzlemine paralel yansıtıcılarının bu düzleme uzaklığı, $\Delta y/2$ anten düzlemine ve Oxy düzlemine paralel (geri) yansıtıcının bu düzleme uzaklığı, K hesaba katılmak istenilen görüntü anten sayısıdır.

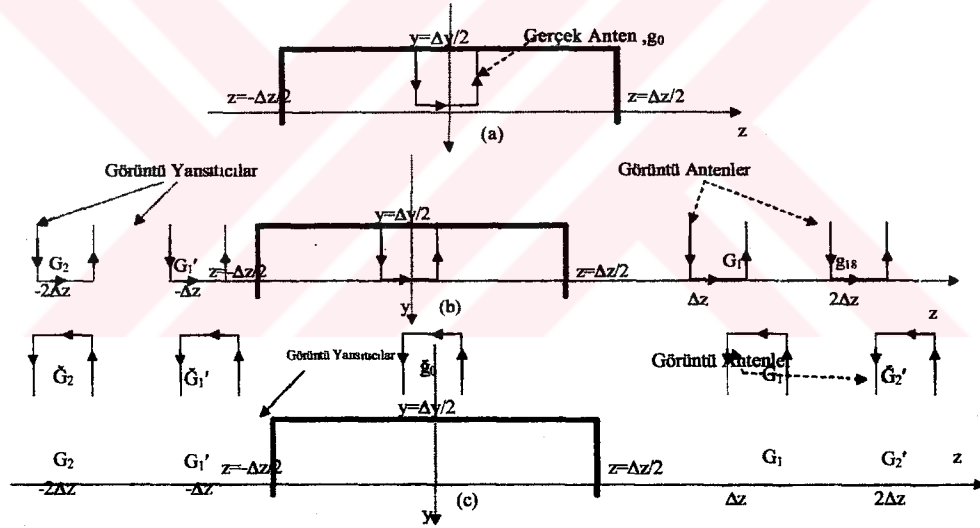


Şekil 4-2 Oxy düzlemi içinde a) esas anten ve yansıtıcılar b) $x = -\frac{\Delta x}{2}$ ve $x = +\frac{\Delta x}{2}$ yansıtıcılarının verdiği görüntülerin konumları c) $y = \frac{\Delta y}{2}$ deki yansıtıcının verdiği görüntüler

Şekil 4-2 sistemdeki bir antenin Oyz eksenine paralel yansıtıcılardan meydana gelen görüntüleri görülmektedir. g_1 antenin Oyz eksenine paralel yansıtıcılardan $x > 0$ olanından oluşan görüntü, g_1' ise $x < 0$ olan yansıtıcıdan oluşan görüntüdür. g_2 , g_1 görüntü antenin Oyz eksenine paralel yansıtıcılardan $x < 0$ olanından oluşan görüntü, g_2' ise g_1' görüntü antenin $x > 0$ olan yansıtıcıdan oluşan görüntüsüdür. Yani

g_1 in görüntüsü g_2 , g_2 in görüntüsü g_3 , g_3 in görüntüsü g_4 vd. ve g_1 'in görüntüsü g_2' , g_2' in görüntüsü g_3' , g_3' in görüntüsü g_4' vd.'dir. $\tilde{g}_i$ ise Ozy düzlemine paralel yansıtıcılardan oluşan görüntülerin Oxz düzlemine paralel yansıtıcıdan oluşan görüntüleridir. Bu şekil görüntülerinin elde edilmesinde Krauss tarafından verilen yansıtıcıların görüntüsünün de kullanılması işlemi uygulanmıştır.[22]

Aynı şekilde, Şekil 4-3te sistemdeki bir antenin Oxz eksenine paralel yansıtıcılardan meydana gelen görüntüleri görülmektedir G_1 antenin Oxz eksenine paralel yansıtıcılardan $z>0$ olanından oluşan görüntü, G_1' ise $z<0$ olan yansıtıcıdan oluşan görüntüdür. G_2 , G_1 görüntü antenin Oxz eksenine paralel yansıtıcılardan $z<0$ olanından oluşan görüntü, G_2' ise G_1' görüntü antenin $z>0$ olan yansıtıcıdan oluşan görüntüsüdür. Yani G_1 in görüntüsü G_2 , G_2 'in görüntüsü G_3 , G_3 in görüntüsü G_4 vd. ve G_1' in görüntüsü G_2' , G_2' in görüntüsü G_3' , G_3' in görüntüsü G_4' vd.'dir. $\tilde{G}_i$ ise Oxy düzlemine paralel yansıtıcılardan oluşan görüntülerin Oxz düzlemine paralel yansıtıcıdan oluşan görüntüleridir.



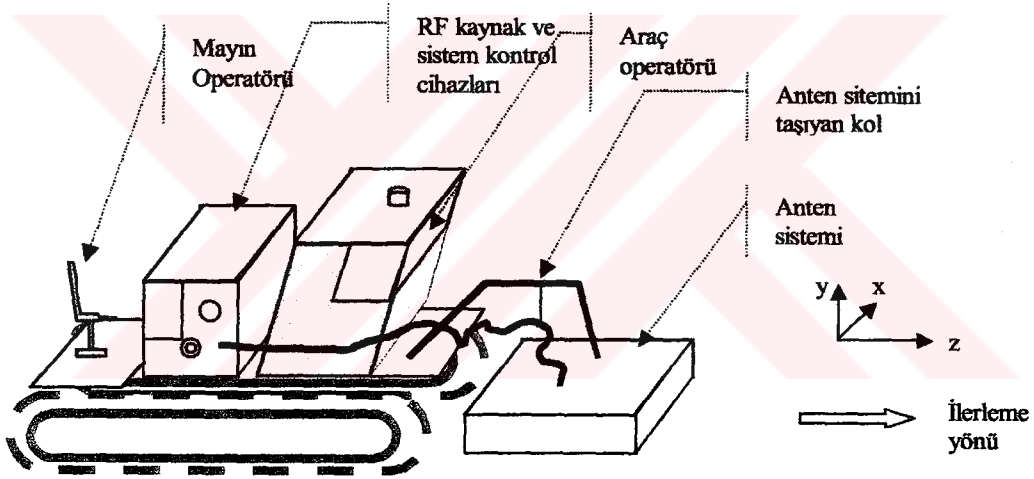
Şekil 4-3 Ozy düzlemi içinde a) esas anten ve yansıtıcılar b) $z = -\frac{\Delta z}{2}$ ve $z = +\frac{\Delta z}{2}$ yansıtıcıların

verdiği görüntülerin konumları c) $y = \frac{\Delta y}{2}$ deki yansıtıcının verdiği görüntüler

Şimdiki problemimiz doğrusal düzlemsel dalga (a) $|E_z| \gg |E_x|$ $|E_z| \gg |E_y|$ b) $|E_z| \cong \text{sabit}$ ve gerçel sonuçlarını elde etmek için her antene ait besleme tipi ve besleme akımlarının tespit edilmesidir. Bu çözüm genetik algoritma uygulamasıyla elde edilecektir.

5. SİSTEM TASARIMI

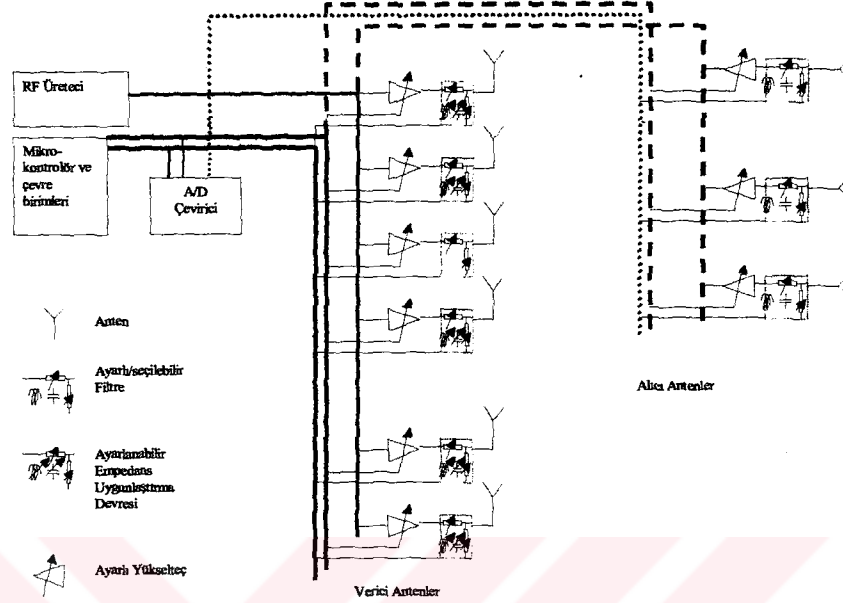
Anten sistemin (bkz Şekil 1-9) bir aracın önüne takılarak kullanılması düşünülmektedir. Şekil 5-1'de de görüldüğü gibi anten sistemi aracın önünde bir düzlemsel alan oluşturacaktır. Araç genişliği 160cm alınmıştır. verici antenlerin ana dipolu araç ilerleme doğrultusu olarak kabul edilen z eksenine paralel yerleştirilmiştir. Sistemde kulak boyu $h_1=15\text{cm}$, anten boyu $2h=50\text{cm}$ seçilmiştir. Antenler arası mesafe $d=4\text{cm}$ alınarak 51 anten kullanılmıştır. Verici antenler Oxy düzlemine göre simetrik beslenmiştir. Oxy düzlemine paralel ve Ozy düzlemine paralel yansıtıcılar anten uçlarına 11 cm uzaklıktadır ve Ozx düzlemine paralel olan geri yansıtıcının antenlerin oluşturduğu düzleme uzaklığı $\Delta y/2=15\text{cm}$ 'dir.



Şekil 5-1 Mayın tarama anten sistemi ve taşıyıcı araç

Verici anten sisteminin boyutları x eksenini boyunca 222cm, z eksenini boyunca 72cm, ve y eksenini boyunca 15+2 cm'dir. Antenleri içeren düzlem $y=0$ düzlemidir. Zemin (toprak) ise $y=-30$ cm düzlemidir. Buna göre $y=-30$ cm, $-90 \leq x < 90$ cm ve $-30 \leq z \leq 30$ cm bölgesinde, düzlemsel alan elde edilecektir. Toprak içinde mayın yoksa, zeminden yansıyan elektrik alanı zemine giden elektrik alanı ile aynı polarizasyona sahiptir. Ancak mayın olması halinde gelen düzgün düzlemsel elektrik alanıyla dik açı yapan elektrik alanı (gelen alan polarizasyonu ile aynı polarizasyonda saçılan alan bileşeninden daha yüksek genlikte) topraktan geri gelebilecektir. Bu nedenle

mayınları tespit edecek olan alıcı antenler x eksenine paralel olarak seçilmelidir. Hesaplamalar bilgisayar programı algoritmaları kullanılarak yapıp, $y=-30$ cm düzlemindeki elektrik alanı bileşenlerinin genlikleri bilgisayar grafik ekranında benzetim(simülasyon) yöntemiyle gösterildi.



Şekil 5-2 Verici ve alıcı anten sistemi konfigürasyonu

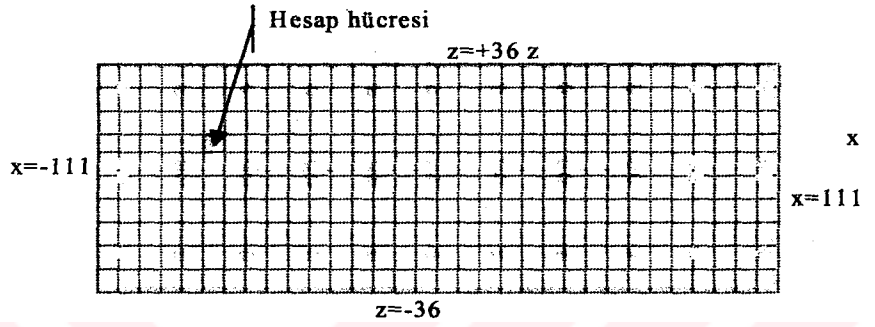
Şekil 5-3'de dikdörtgen şeklinde hücrelere ayrılmış olan hesap uzayı görülmektedir. Her hücrenin orta noktası için elektrik alan vektörünün bileşenleri hesaplanıp genliklerin seçilen kıstasa uygun olup olmadığı kontrol edilecek ve uygun sonucu veren anten akımı grubu her frekans için ayrı ayrı belirlenecektir.

Amacımız y eksenine doğrultusunda ilerleyen, söz konusu yüzey parçası üzerinde yönü ve genliği sabit kabul edilebilecek, yakın alanı düzlemsel dalga elde etmektir. Dalganın $\vec{E}$ elektrik alanının z eksenine paralel olması istenmektedir. Uygunluk kıstası; elektrik alanının z-bileşeninin $y=-30$ cm düzleminde en fazla -3dB farkla sabit olmasıdır. x ve y bileşenlerinin ise idealde sıfır olması istenmektedir.

Düzlemsel yakın alan oluşturulması için değiştirilecek parametreler antenlerin akımlarının genliği ve besleme şekli(ortadan veya uçtan olması)dır. Anten boyu ve yansıtıcı uzaklığı gibi fiziki parametreler çalışma sırasında değiştirilemez. $2 \times 0.7 \text{ m}^2$ lik alan seçimimiz; tamamen ülkemizin toprak yolları ve hafif araç kullanma mecburiyeti gerçeklerine binaendir. Bu parametreler bir seçimdir. Ama istenirse bu da bir parametre olarak GA'ya uygulanabilir. Biz çalışmamızda anten ana dipol boyunu kullanılan en küçük dalga boyunun altında bir değer olarak sabit seçtik.

Yansıtıcı uzaklıklarını ise sistem hacmini çok fazla büyütmemesi için uygun bir mesafede, kullanılan en küçük dalga boyunun çeyreğine yakın değerde seçtik.

Yansıtıcılardan kaynaklanan görüntü antenlerin de hesaba katılacağı dikkate alındığında görüntü sayısının çok büyük olması hesap süresini uzatacağı için yeterli sayıda görüntü kullanılmalıdır. Çünkü görüntü antenler gerçek antenlere göre uzaklaştıkça elektrik alanlarının genlikleri $(\frac{1}{r}, \frac{1}{r^2}$ terimlerinin fonksiyonu olması sebebiyle) azalacaktır.

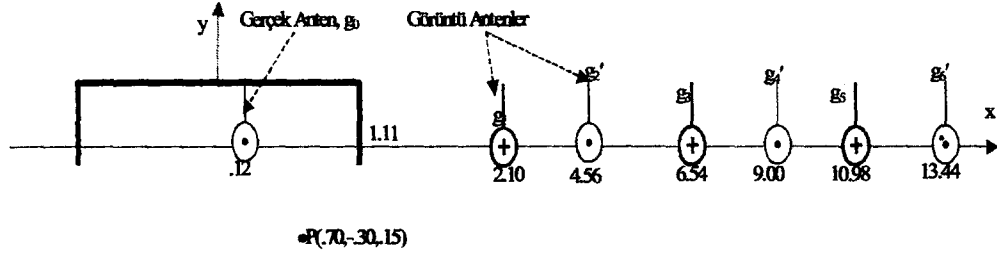


Şekil 5-3 Hesap düzlemi

Anten dizisinin orta noktası orijin alınsın. $z=-36$ cm ve $z=+36$ cm'deki yansıtıcıların etkisi dikkate alınarak görüntünün toplam alana etkisini kestirelim: Orijinin $+x$ yönündeki 3. antenin ve görüntülerinin $x=70$ cm, $z=15$ cm, $y=-30$ cm'daki gözlem noktası için $r_0, r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$ değerleri ve örnek fonksiyonlardaki genel terim yapısına uygun olarak r_i parametrelerinin alan fonksiyonuna katkısı Tablo 5-1'de verilmiştir.

Tablodan da görüldüğü gibi antenlerin ilk görüntüsünü hesaba katmak zorunlulukken, 4. görüntüden sonraki terimlerin hesaba katılması ihmal edilebilir.

Düzlemsel yakın alan elde etmek için 26 anten akımı ve 26 besleme şekli olmak üzere 52 parametrenin en uygun kümesi tespit edilecektir. Bu parametrelerin çıkış kümesi ise elektrik alanının 72×222 cm² lik hesap düzlemi üzerindeki hücrelerdeki değerlerinin genliğidir. Örneğin hücre boyutları 6×6 cm² olursa 13×38 hücrelerinden 494 adet var demektir. Çıkış parametreleri (E_x, E_y ve E_z) 3×494 tane olacaktır. Şekil 5-5'te problem çözüm uzayı görülmektedir.



Şekil 5-4 x-ekseni üzerindeki yansıtıcı ve görüntünün konum bilgileri

Tablo 5-1 (.12,0,0) noktasında olan antenin Şekil 5-4'te gösterilen 6 görüntüsü için P(.70,-.30,.15) noktasına göre r_i değerleri ve fonksiyon değerleri örneği

R	Gerçek anten	g_1	g_2'	g_3	g_4'	g_5	g_6'
r_0 (m)	0,67	1,44	3,87	5,85	8,31	10,29	12,74
r_1 (m)	0,66	1,44	3,87	5,85	8,31	10,28	12,74
r_2 (m)	0,77	1,49	3,89	5,86	8,32	10,29	12,75
r_3 (m)	0,75	1,48	3,89	5,86	8,31	10,29	12,75
r_4 (m)	0,74	1,47	3,89	5,86	8,31	10,29	12,75
r_5 (m)	0,84	1,52	3,91	5,87	8,32	10,30	12,75
$1/r_0$ (m ⁻¹)	1,49	0,69	0,26	0,17	0,12	0,10	0,08
$1/r_1$ (m ⁻¹)	1,51	0,70	0,26	0,17	0,12	0,10	0,08
$1/r_2$ (m ⁻¹)	1,31	0,67	0,26	0,17	0,12	0,10	0,08
$1/r_3$ (m ⁻¹)	1,33	0,68	0,26	0,17	0,12	0,10	0,08
$1/r_4$ (m ⁻¹)	1,35	0,68	0,26	0,17	0,12	0,10	0,08
$1/r_5$ (m ⁻¹)	1,20	0,66	0,26	0,17	0,12	0,10	0,08



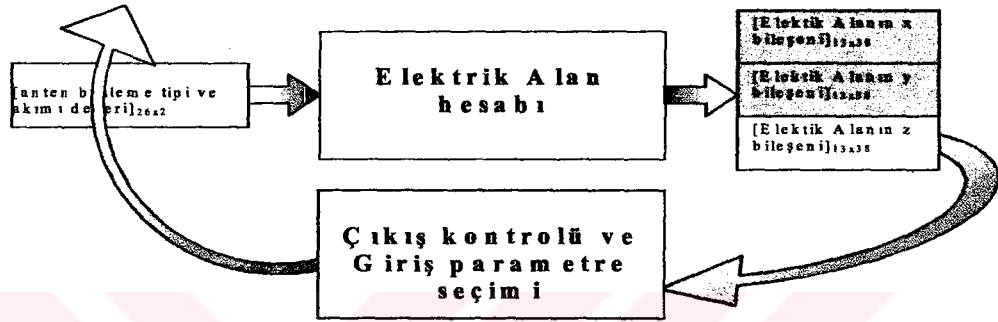
Şekil 5-5 Problem uzayı

Şekil 5-5de 6x6cm²'lik hücrelerle 72x222cm²'lik hesap uzayında giriş parametre boyutu ve çıkış parametre boyutu görülmektedir. Daha hassas çalışma için hesap hücresi daha küçük, mesela 2x2 cm² yada 1x1 cm² seçilebilir. Başlangıçta hesap hücre boyutunu büyük yapmak kaba bir yaklaşıkla problemin çözülmesini sağlar. daha sonra daha küçük bir hücre boyutuyla bu çözüm daha iyiye götürülür. Hesap sonunda oluşan değer kümesine bakılarak istenilen alan elde edildiği zaman işlem bitmiş olacaktır. Arzu edilen alan oluşmamışsa

alınan sonuçlara bakılarak, anten besleme tipi 2 ve anten sayısı 26 olmak üzere 26x2'lik parametreden bir veya bir kaç değiştirilerek uygun sonuç elde edilmeye çalışılır, bkz.Şekil 5-6.

Şekil 5-6'teki algorithmada kontrol işlemi 2 türlü yapılır.

1. Yol: Çıkış kümesi grafik ekranda benzetim yöntemiyle gösterilir ve bilgisayar kullanıcısı giriş takımını değiştirir ve yeni bir sonuç elde ederek bir önceki sonuçla bunu kıyaslar ve istediği sonucu elde edene kadar deneme-yanılma yöntemini kullanır.



Şekil 5-6 Problem Çözüm Uzayı

2. Yol: Kullanıcının yapması gereken bu işlem yine uygun bir algoritma ile bilgisayara yaptırılır.

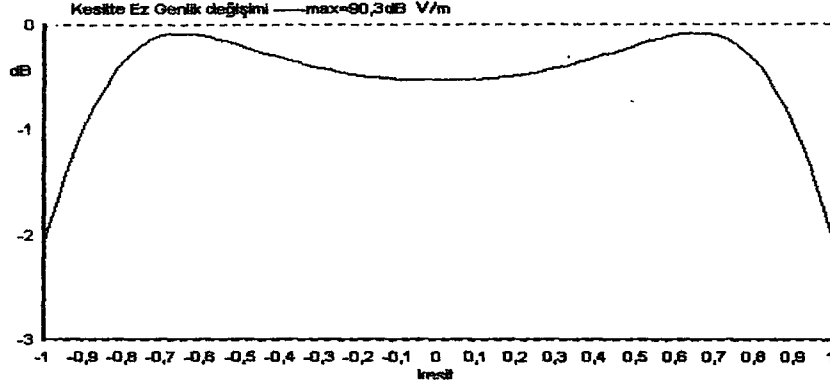
İşlem süresinin uzaması ve karar verme sayısının artması karar verme işleminin de bilgisayara yaptırılmasını gerekli kılar. Programın sadece istenilen hesabı yapan bir hesap makinesi tipi bir program olmayıp aynı zamanda kullanıcısı için bazı temel kararları alıp daha uygun sonucu veren bir program da olması gerekir.

Bu algoritmalarından biri de genetik algoritmadır ve elektromagnetik problem çözümlerinde yaygın olarak[34-43], hatta anten şekli tasarımında da bir çözüm yöntemi olarak kullanılmaktadır [44]. Bu çalışmada da genetik algoritma bir çözüm şekli olarak kullanılacaktır[47].

5.1 Program

Yakın alan programı kullanılarak düzlemsel yakın alan elde edilmeye çalışılmıştır. Söz konusu programın[45] ürünleri bu bölümde gösterilecektir.

Şekil 5-8'de elektrik alan z bileşeni normalize güç diyagramında, -3dB kuralının $z=0$ eksenini üzerinde, $x=\pm 100\text{cm}$ çizgisi boyunca sağlandığı görülmektedir. Şekil 5-9'de ise bu alanı veren anten besleme tipi ve akım genlikleri ile ilgili parametrelerin kayıt yapısı verilmiştir.



Şekil 5-8 120 MHz'de Ana ekran Görünümü

```
ccccEccEccEcccccccEcEEEEEE 120 51 50 4 15 11 11 199 199
26 12 3 1 1 2 8 18 38 0 37 4 63 12 9 19 29 51 47 22 35 31 58 44
63 25 15 15 15 15 1e-3
```

Şekil 5-9 Şekil 5-8'nin kayıt yapısı örneği

Bu yapıdaki parametrelerin anlamları ise Tablo 5-2'de verilmektedir.

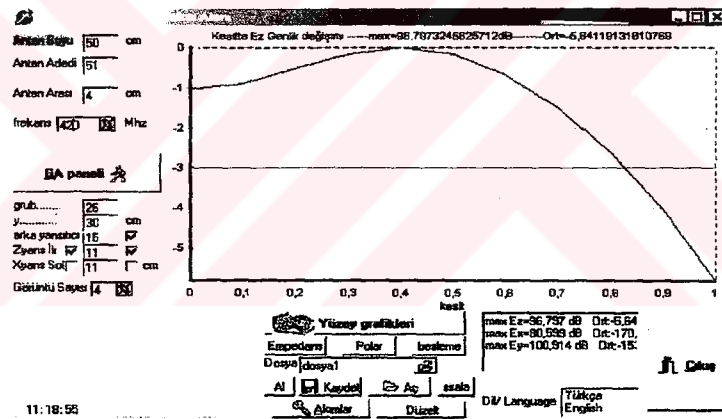
Tablo 5-2 Kayıt yapısı açıklamaları

ccccEccEccEcccccccEcEEEEEE	26 antenin besleme şekli, c;ortadan beslemeli, E;uçtan beslemeli .
120	Çalışma Frekansı, birimi MHz'dir.
51	Toplam anten adedi.
50	Anten ana eksen (z eksenine paralel) boyu, birimi cm'dir.
4	Anten arası (x ekseninde), birimi cm'dir.
15	Anten düzlemine paralel geri yansıtıcının antenlere uzaklığı, (cm).
11	+z'de bulunan yan yansıtıcının anten uçlarına uzaklığı, birimi cm'dir. Eğer değer 199 ise bu yönde yansıtıcı yoktur.
11	-z'de bulunan yan yansıtıcının anten uçlarına uzaklığı, birimi cm'dir. Eğer değer 199 ise bu yönde yansıtıcı yoktur.
199	+x'de bulunan yan yansıtıcının anten uçlarına uzaklığı, birimi cm'dir. Eğer değer 199 ise bu yönde yansıtıcı yoktur.
199	-x'de bulunan yan yansıtıcının anten uçlarına uzaklığı, birimi cm'dir. Eğer değer 199 ise bu yönde yansıtıcı yoktur.
26 12 3 1 1 2 8 18 38 0 37 4 63 12 9 19 29 51 47 22 35 31 58 44 63 25	26 anten'e ait simetrik besleme akım değer oranları.
15	Ortadan beslemeli antenin iç kulak parçası boyu, birimi cm'dir.
15	Ortadan beslemeli antenin dış kulak parçası boyu, birimi cm'dir.
15	Uçtan beslemeli antenin iç kulak parçası boyu, birimi cm'dir.
15	Uçtan beslemeli antenin dış kulak parçası boyu, birimi cm'dir.
1e-3	Anten çapı, birimi mm'dir.

Şekil 5-10 de yukarıdaki parametrelerin sağladığı elektrik alanın z bileşeninin normalize diyagramı ($|E_z(x,-30,z)|$ nin dB olarak değeri) 3 boyutlu olarak gösterilmiştir. Alan değeri gözlem yüzeyinin büyük bir çoğunluğunda aynı değerde

Düzlemsel yakın alan elde etmek için geliştirilen program ile hesaplamalar, benzetim ve optimizasyon yapılmıştır. Bu bölümde söz konusu program tanıtılacak ve program yeteneği tanımlanacaktır.

Bilgisayar programında EŞAnın elektrik alanları tanımlanmıştır. Elektrik alan fonksiyonunda EŞAnın merkez noktasının kartezyen koordinatlarda sistemin orijininde olduğu, anten ana ekseninin $x=0$ ve $y=0$ da z ekseninde olduğu ve anten kulaklarının $x=0$ da $+y$ eksenine yönünde olduğu kabul edilmiştir. Fonksiyona anten yarı boyu, çalışma frekansı kulak boyu ve hesap yapılması istenilen gözlem noktanın kartezyen koordinatlardaki karşılığı gönderilmektedir. Eğer anten sistemin orijininde değil yada yönü farklı ise bu durumda gerek öteleme ve gerekse koordinat sistemi ve vektör dönüşüm işlemleri ile gerekli ayarlama işlemleri yapılır. Fonksiyon karmaşık sayılarla elektrik alanın x , y ve z bileşenlerinin değerlerini ayrı ayrı hesaplayıp [47]deki akış diyagramında "Fonksiyonu Çalıştır..." kutusuna sonucu gönderir. Özel hesaplar için ise elektrik alanın yalnızca x , y yada z bileşenini hesaplatmak ta seçime bağlıdır. Şekil 5-7'de programın ana sayfası görülmektedir.



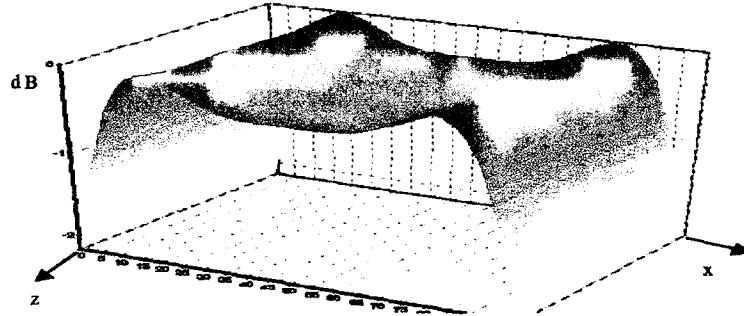
Şekil 5-7 Yakın Alan Programı ekran görüntüsü

5.1.1 Program Bileşenleri

Program ana döngüsünde belirlenen yüzey, belirlenen akım takımı için elektrik alanlarının genlikleri ve dB cinsinden değerleri hesaplanmaktadır. Ayrıca bileşen kendi maksimumu ile normalize edilmektedir.

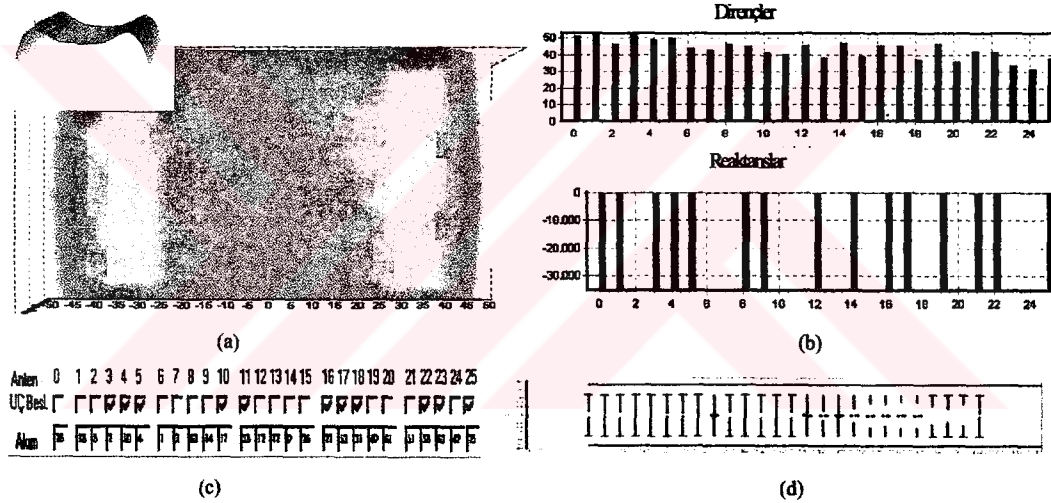
Program ana sayfasında herhangi bir akım takımı için hesap yapılır yapılmaz, sonuç benzetimi grafikte yapılmaktadır. Eğer bir seçim yapılmamışsa elektrik alanın z bileşeninin dB cinsinden değeri $z=0$ da x eksenine için grafikleştirilmektedir. Şekil 5-8 de 120 MHz için ana sayfa grafik ekran görünümünü göstermektedir.

kalmış bir kısmında ise -3dB kuralına uygun bir şekilde değişmiştir. faz değeri için ise 23° faz sapmasına izin verilmiştir. Çünkü $e^{\pm j23^\circ} = 0.92 \pm j0.326$ dir. Bu da e^{j0} ın %10dan az fark göstermektedir.



Şekil 5-10 Şekil 5-9'deki giriş parametreleri için elektrik alanın z bileşeninin genliğinin normalize grafiği

Şekil 5-11'de -3dB güç sınırı, Anten empedansları, bu değerleri sağlayan akım değeri ve besleme tipi ve anten besleme sistemi benzetimi yer almaktadır.

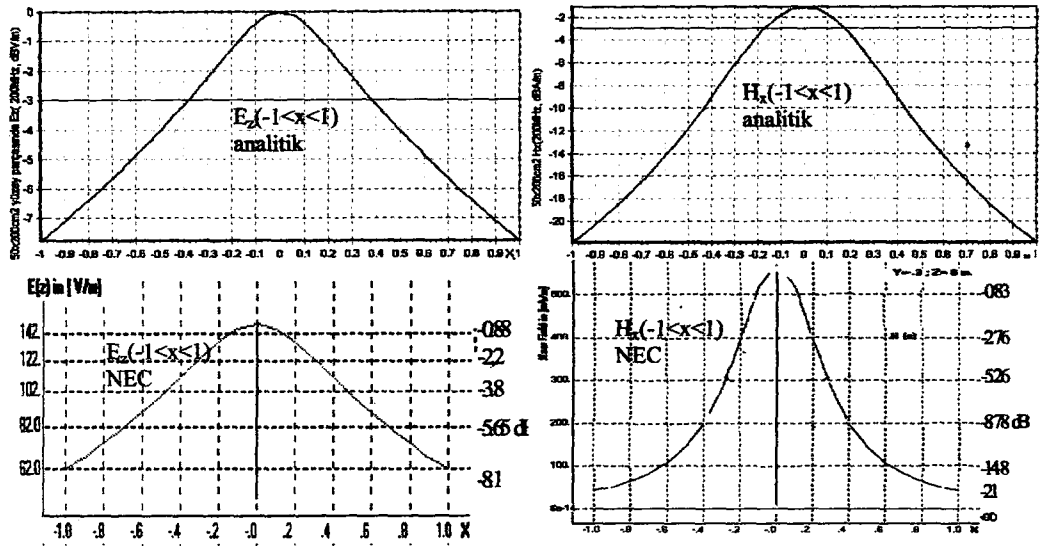


Şekil 5-11 100 MHz'de a) elektrik alanın z bileşeni normalize diyagramı, b) antenlerin dizi içindeki empedansları, c) besleme tipi ve akım genlikleri giriş menüsü d) besleme tipi ve akım genlikleri benzetimi

Şekil 5-11 görüldüğü gibi anten direnci antenin besleme tipine bağlı olarak çok az değişmekle birlikte, daha çok, antenin dizideki konumuyla değişmekte ve uçlara doğru gidildikçe anten direnci azalmaktadır. Anten reaktansı ise antenin besleme tipi ile daha çok değişmektedir. Ortadan beslemeli antenlerin reaktansı daha büyük değerler almaktadır.

5.1.2 Programın Doğrulanması

Şekil 5-12'de Bölüm 2'de çıkarılmış analitik formüllerle hesap yapan yakın alan programının alan grafiği ile NEC programının alan grafiği görülmektedir.



Şekil 5-12 $y=30\text{cm}$, $z=0$ $-1 < x < 1\text{m}$ çizgisi üzerinde elektrik Alan ve magnetik alan genliğinin değişimi üst) Yakın alan programı alt) NEC

Hesaplar boş uzayda $2h=50\text{cm}$ (z eksenine paralel), $h_1=15\text{ cm}$ (y eksenine paralel) olan araları 4 cm olan 3 EŞA'den 1.si $x=-4\text{cm}$, 2.si $x=0\text{ cm}$ ve 3.sü de $x=4\text{ cm}$ konumunda iken $y=-30\text{ cm}$ düzleminde $-1 < x < 1\text{m}$ için yapılmıştır. Her 2 programında sonucunun aynı olması nedeniyle yakın alan programının sağlanması yapılmıştır.

5.2 Genetik Algoritma Uygulaması

Tablo 5-4 te 100 iterasyonlu bir genetik algoritma uygulaması için yöntemler ve işlemler gösterilmiştir. Yakın alan programı genetik algoritma fonksiyonunda, Türkoğlu[47] tarafından verilen akış diyagramında "sırala" döngüsünden sonra üyeler en iyiden en kötüye sıralanır. Zayıf ve güçsüz DNA'lar "AT"ılır ve eğer en iyi üye istenilen kriteri sağlamışsa genetik algoritma fonksiyonundan çıkılır. Eğer kriter elde edilmemişse "ikinci nesil üretilir. Yakın alan programı genetik algoritma fonksiyonunda yeni nesil şu şekilde üretilmiştir.

Yukarıdaki listeden de görüldüğü gibi göçmen yöntemi kullanılmamış ve çaprazlama sadece 2 kez kullanılmıştır. Çünkü Tablo 5-4'ten de görüleceği gibi bu süreçler daha iyi çözümü daha az vermektedirler. Tablo 5-3'e göre tanımlanan 2. nesil üretme işlemleri için üyenin değeri için: Hatalar Toplamı (HT), Kareler toplamı (KT), En az hata (EAH), Melez1:Sağ Bölge Genişletme+ Kareler toplamı, Melez2:Sol Bölge Genişletme+ Kareler toplamı yöntemleri ayrı ayrı uygulanmıştır.

Fonksiyonda her bir işlem için ayrı bir sayaç kullanılmıştır ve iterasyonda her bir adımda en iyi üyeyi sağlayan işlemin sayacı bir artırılmıştır. Her hangi bir işlem bir önceki adımdaki üyeden daha iyi bir üye üretememişse bu durumda en iyi üyenin sayacı artırılmıştır.

Tablo 5-3 10 üyeli bir ailede uygulanan genetik işlemler

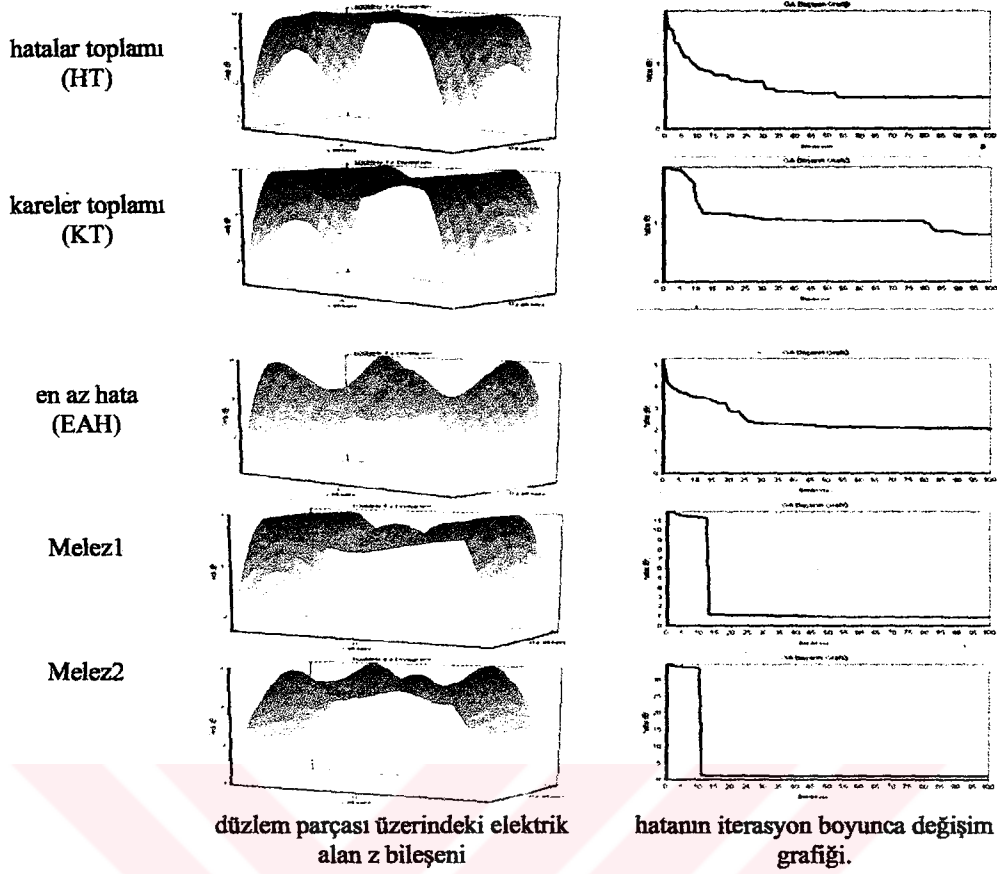
İşlemden önce	İşlemden sonra
en iyi	en iyi
2. iyi	2. iyi
3. iyi	3. iyi
4. iyi	en iyi ile 2. iynin çaprazlaması
5.iyi	en iyi ile 3. iynin çaprazlaması
5. kötü	en iynin mutasyonu
4. kötü	En iynin evrilmesi
3. kötü	2. iynin evrilmesi
2. kötü	2. iynin mutasyonu
en kötü	En iynin evrilmesi

Tablo 5-4'dan da görüldüğü gibi en başarılı işlemler en iynin evrilmesi ve mutasyonu olmuştur. İşlemin büyük bir kısmında en iyi üye kendini muhafaza etmiştir yada genetik işlemler en iyi üyeden daha iyisini üretememiştir. En başarılı yöntemler ise melez yöntemler olmuştur. Bu uygulamada elde edilen sayısal değerler aynı iterasyonlar tekrarlandığında değişirler, yine de işlemlerin birbirine göre kıyasında çok fazla değişiklik olmaz. Şekil 5-13'te yukarıdaki Tablo 5-4 te verilen süreç ve işlemleri veren GA uygulamalarının başarımlarını grafikleri ve bu iterasyonlar sonucu elde edilen elektrik alanı z bileşeni grafikleri görülmektedir.

Tablo 5-4 Düzlemsel Yakın Alan Elde Edilmesi Problemi İçin 100 İterasyonlu Bir Uygulamada Kullanılan Yöntemler Ve Bir Önceki Adımdan Daha İyi Üyeyi Veren Genetik İşlemler ve İterasyon Sayıları

Yöntem	Hatalar Toplamı (HT)	Kareler toplamı (KT)	En az hata (EAH)	Sol Bölge Genişletme+KT	Sağ Bölge Genişletme+KT
En İyi Üyenin muhafaza edilmesi	73	71	57	59	61
Çaprazlama	1	3	7	7	5
En İyinin Mutasyonu	6	7	7	10	10
En İyinin Evrilmesi	13	10	15	16	9
2. İyinin Mutasyonu	4	8	7	3	11
2. İyinin Evrilmesi	4	2	8	7	5

Şekillerden de görüldüğü gibi iterasyonun başlangıcında hem yüksek değerli değişimler olmakta ve hem de ardı ardına en iyi üyeyi elde etme (hatayı azaltma) yönünde ilerleme olmaktadır. ancak iterasyon artıkça (zaman ilerledikçe) değişiklik sayısı azalmakta ve değişikliklerde küçük genlikli olmaktadır. Yani hata belli bir limite yakınsamaktadır.

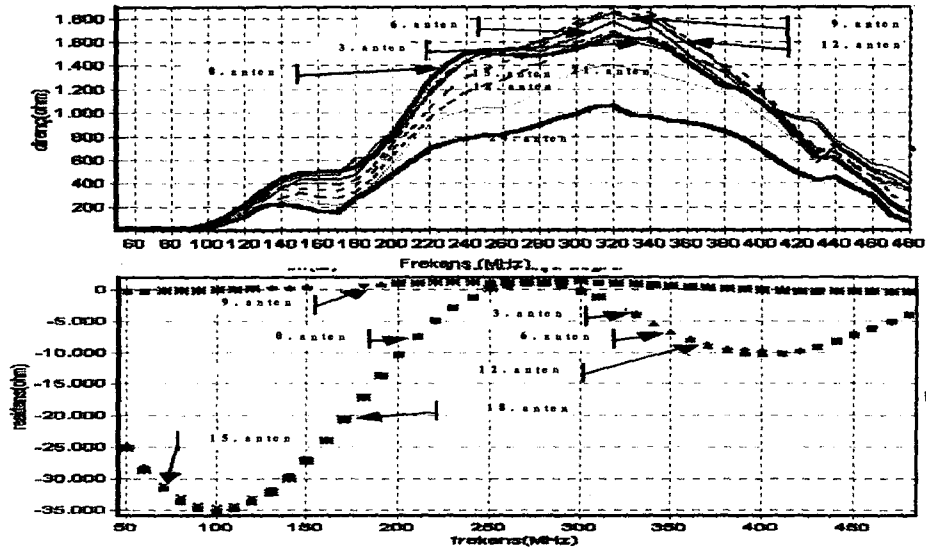


Şekil 5-13 100 MHz'de çeşitli genetik algoritma uygunluk kriterlerinin yakınsaması

5.3 EŞA Dizisindeki Elemanların Besleniş Ve Empedansları

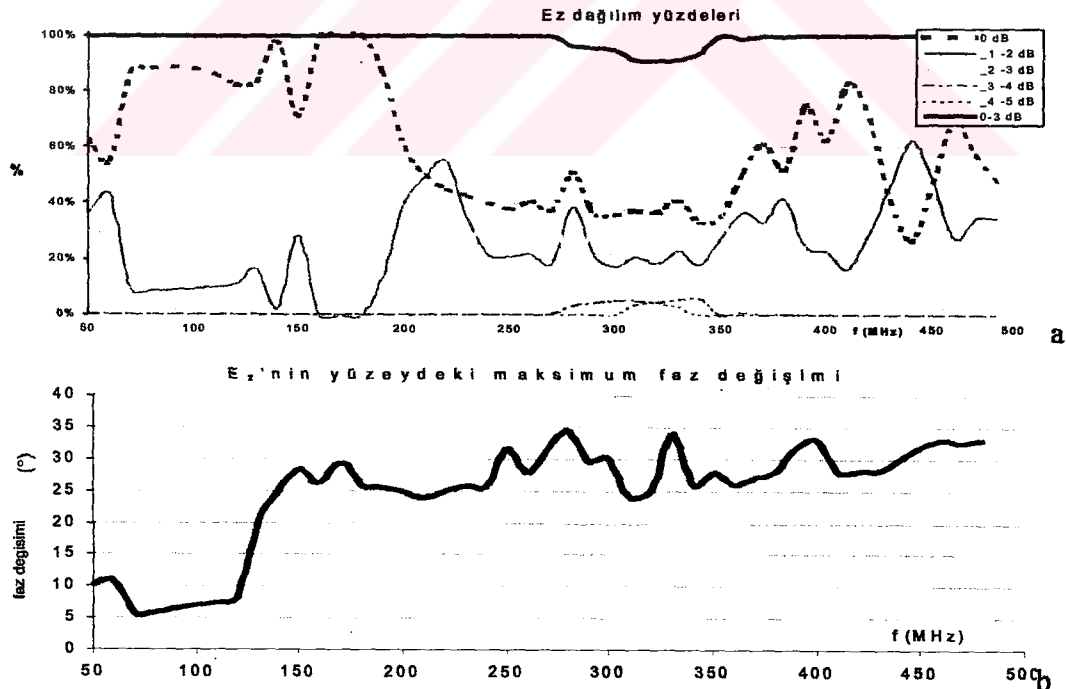
Şekil 5-16'da $50 \times 200 \text{ cm}^2$ yüzeyinde 10MHz'lik aralarla elektrik alan z bileşeni diyagramları görülmektedir. Şekilde renk tonundaki her bir koyulaşma 1 dB'lik değişime tekabül etmektedir. -3dB yarı güç tolerans seviyesi kalın çizgi ile belirlenmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi $50 \times 180 \text{ cm}^2$ 'lik yüzeyde alan değerinin -3dB'den daha az sapma yapma hedefine ulaşılmıştır.

Şekil 5-14 1mm yarı çaplı antenlerin empedanslarının frekansla değişimini göstermektedir. Anten dirençleri 13-1800 Ω arasında değişmektedir. Anten dizideki konumu da anten direncini etkileyen faktörlerden birisidir. Ortaya göre simetrik ilk 15er antenin direnci çok yüksek iken bundan sonraki antenlerin dirençleri hızla azalmaktadır. Hatta uçtaki antenleri direnci ortadaki antenlerin direncinin yaklaşık yarısına düşmüştür. Anten reaktansları ise anten besleme tipine bağlı olarak bir 2 ayrı zarf üzerinde değişmektedir. Anten eğer ortadan beslenmişse reaktansı çok yüksek, uçtan beslenmişse nispeten çok küçük olmaktadır. 260-360 MHz bölgesini bir rezonans bölgesi olarak tanımlamak mümkündür. Söz konusu bantta antenlerin direnci maksimum değer alırken antenlerin reaktansları da minimuma inmektedir.

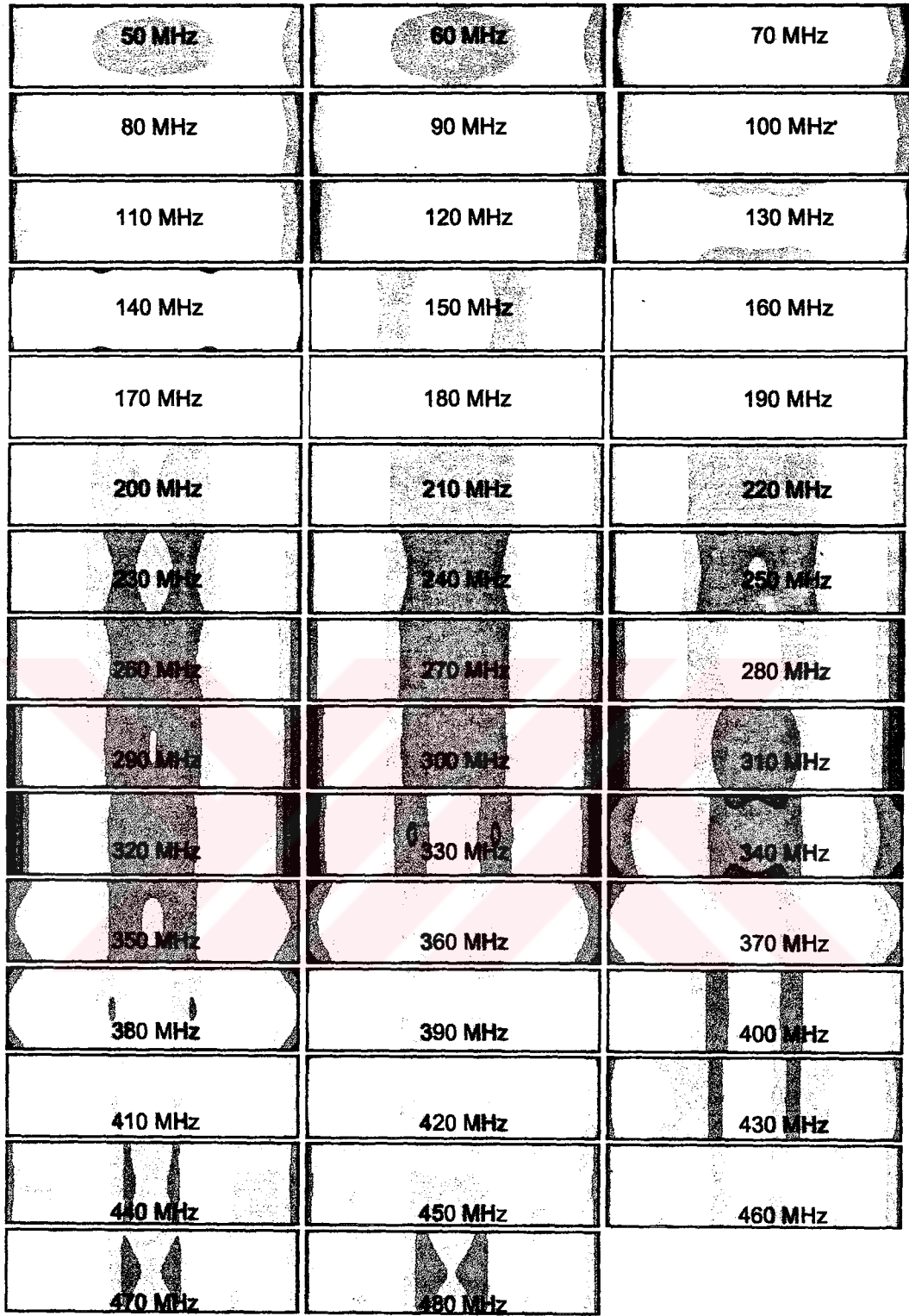


Şekil 5-14 Ortadan uca doğru anten empedanslarının frekansla değişimi

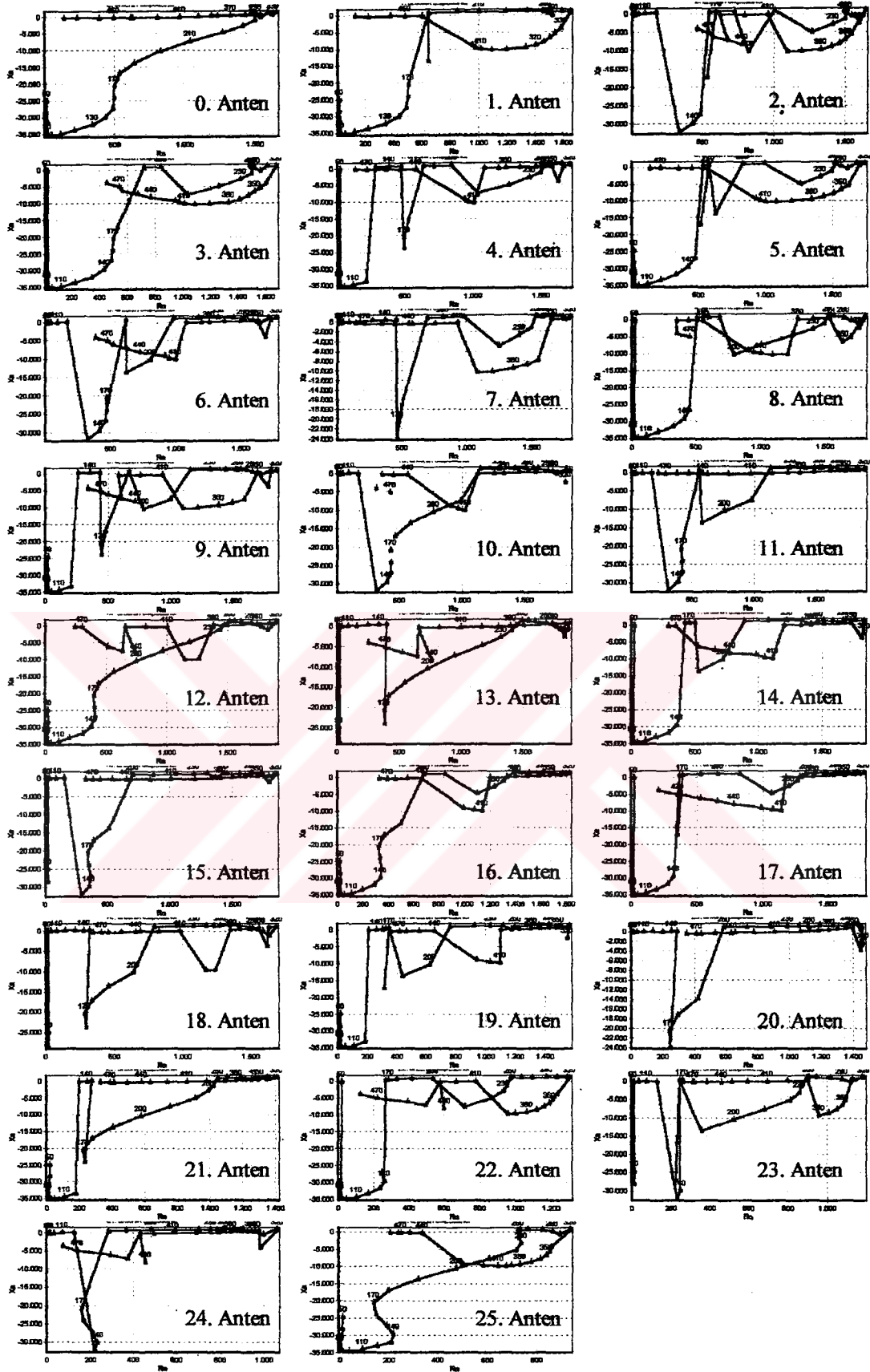
Şekil 5-15'de söz konusu yüzey parçası üzerinde 1dB'lik adımlarla elektrik alanın z bileşeninin dağılımının yüzdesi verilmiştir. Kalın siyah çizgi ise yarı güç toleransına karşılık gelen düzlemsellik yüzdesidir. Grafikte başarımın %100'ün altına düştüğü yerlerde, Şekil 1-2'den 2. rezonans bölgesi seçilerek, çalışılabilir. Şekil 1-3'ten görüleceği gibi, $2\pi a/\lambda'$ daha büyük değerli bir rezonans bölgesinde çalışmak, daha büyük frekanslarla çalışmaya tekabül eder. Faz sapmasında ise hedeflenen %10'luk tolerans'a karşılık düşen 23° sınırı ortalama 5° aşımıştır ve tolerans %12'ye çıkmıştır.



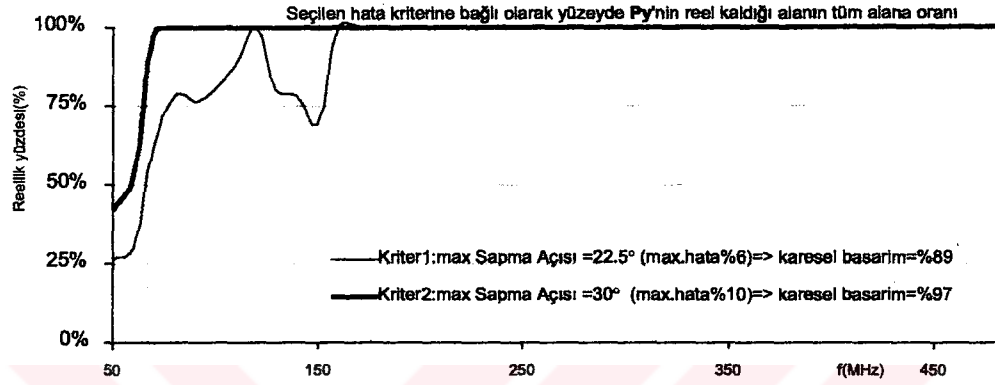
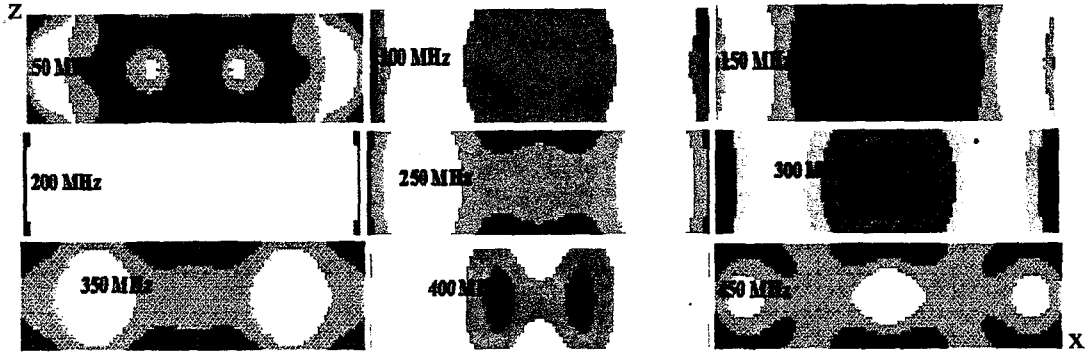
Şekil 5-15 50-450 MHz bandında Elektrik Alan z bileşeni kaplama başarımı a) Genliğin değişimi b) Maksimum faz sapması



Şekil 5-16 50-480 MHz bandında 50x200cm² düzlem parçası üzerinde elektrik alan z bileşen normalize alan diyagramları



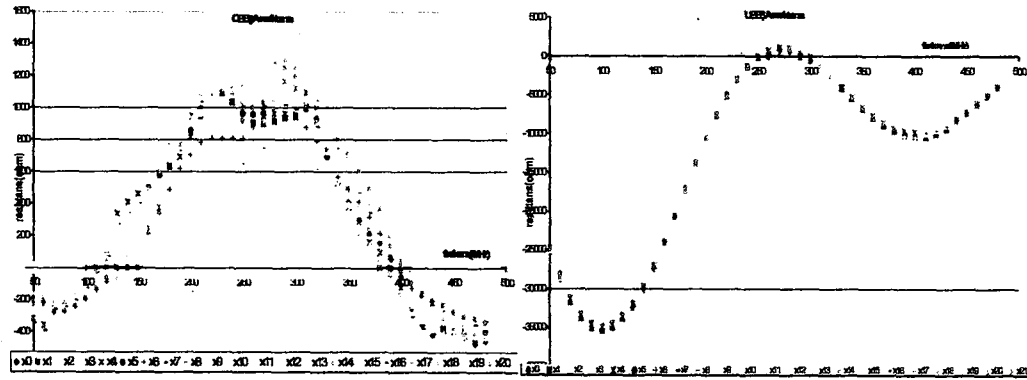
Şekil 5-17 Antenlerin ayrı ayrı empedansları



Şekil 5-18 50-450 MHz bandında Normalize poynting vektörü değişimi

Şekil 5-18 'de söz konusu düzlem parçası üzerinde, 50-450 MHz bandında y eksenine doğrultusundaki poynting vektörünün değişimi görülmektedir. Şekilde renk tonundaki her bir koyulaşma genlikteki 1dB'lik azalmaya tekabül etmektedir. Söz konusu bandda poynting vektörü de -3dB yarı güç tolerans şartını sağlamaktadır ve reeldir. Poynting vektöründeki bu düzlemsellik elektrik alan faz ve genliğini sabitleştirme çalışmasının yeterli olduğunu göstermektedir.

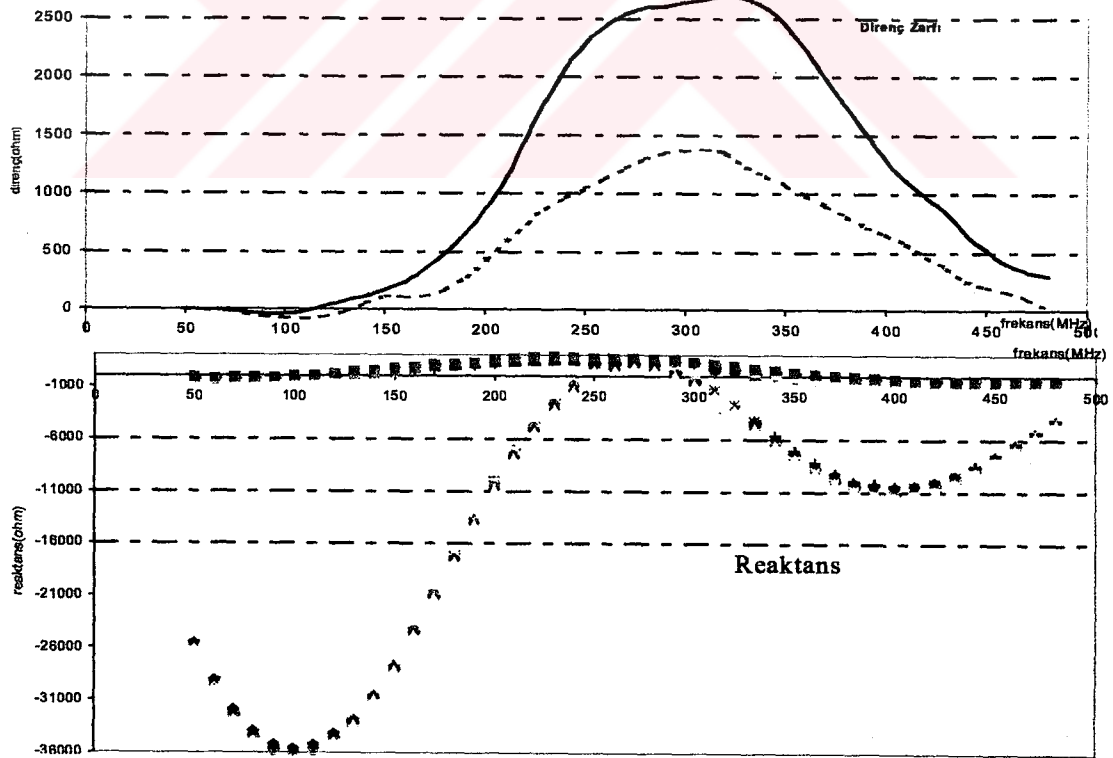
Faz sapmasında ise hedeflenen %10'luk tolerans'a karşılık düşen 23° sınırı ortalama 5° aşılmıştır ve tolerans (fazın gerçel kısmı) %12'ye çıkmıştır.



Şekil 5-19 OBEŞA ve UBEŞA antenlerin ayrı ayrı reaktansları

Şekil 5-19 da Şekil 5-14’de verilen EŞA reaktanslarının, UBEŞA ve OBEŞA için ayrı ayrı grafiği çizilmiştir. Görüldüğü gibi şekillerde UBEŞA reaktansı OBEŞA reaktanslarından daha yüksek değerler almaktadır. Şekil 5-20 da ise söz konusu 1mm yarı çaplı anten sisteminin yerden 30 cm yüksekte olması ve $\epsilon_r=6$, $\sigma=10^{-2}$ S/m olması durumunda sistem içindeki toplam anten empedanslarının frekansla değişimi görülmektedir. Şekil 5-20’da direnç grafiğinde direnç değişiminin zarfı (söz konusu frekans için maksimum direnç değeri ve minimum direnç değeri) verilmiştir. Görüldüğü gibi 60-130 MHz bandında zeminin etkisiyle toplam anten direnci negatif olmaktadır. Tüm antenlere enerji verilirken antenlerin tümünün enerji çekmesi mümkün değildir.

Bu empedanslar hesaplanırken zemin bir yansıtıcı empedans gibi düşünülmüş ve bölüm 3.3’te izah edildiği gibi, anten besleme akımları yansıtma katsayısıyla orantılı olan görüntü anten yöntemi kullanılmıştır. Stutzman[19] görüntü yönteminin analitik geçerlilik bölgesi olarak zemin-anten arası mesafenin en az 0.2λ ($kr>1$) olması gerektiğini ifade ediyor. Bu durumda zemin anten arası mesafe 30cm alındığına göre $0.2\lambda<30\text{cm}$, $\lambda<150\text{cm}$, $f>200\text{MHz}$ olmalıdır. Bu nedenle şekilde görüntü yöntemiyle elde edilen empedans eğrisi için 50-200MHz bandındaki sonuçlar doğru olamaz.



Şekil 5-20 Zemin üzerindeki sistem için anten empedansları

Tablo 5-5 de yukarıdaki alan ve empedansları veren anten besleme tipi ve besleme akım genlikleri verilmektedir. Tablodaki akımlar 6bit seçimine göre verilmiştir ve bu değerler oran değerlerdir. Yani buradaki değerlerin birimi A seçilirse bu durumda Şekil 6.23'teki eğrilerin birimi de dBV/m olacaktır. Şekil 6.23'e göre, örneğin 180MHz'de maksimum Ez alan genliği $E_{\max}=100\text{dBV/m} \approx 10^5 \text{ V/m}$ ve en düşük alan genliği $0.71 \times 10^5 \text{ V/m}$ olur. Antenlerin akımı tablodan okunan değerler μA seçilirse bu durumda da yüzeydeki alan genliği $10^5 \mu\text{V/m} = 10^2 \text{ mV/m} = 0.1 \text{ V/m}$ olur. Hedeften yansıyarak geri gelen işaretlerin algılanabilmesi için gereken minimum alan şiddeti $E_{\min}$ göz önüne alınarak akımlar $E_{\min}/E_{\max}$ oranında azaltılacaktır.

Tablo 5-5 Anten Besleme Tipi Ve Akım Genliği Tablosu

f	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125
50	E07	E19	c03	c05	c10	E03	c29	c06	c03	E12	c01	c09	E24	c02	c45	E18	E22	c44	E49	E33	c57	E38	c61	E42	c55	E44
60	E07	E19	c03	c05	c10	E03	c29	c06	c03	E12	c01	c09	E24	c02	c45	E18	E22	c44	E49	E33	c57	E38	c61	E42	c55	E44
70	E03	E18	c37	E14	E12	E02	c27	c03	E32	E12	c08	c10	E22	c45	E30	c20	E09	E38	c61	E35	c47	E46	E57	c59	c28	E44
80	E03	E18	c37	E14	E12	E02	c27	c03	E32	E12	c08	c10	E22	c45	E30	c20	E09	E38	c61	E35	c47	E46	E57	c59	c28	E44
90	E03	E18	c37	E14	E12	E02	c27	c03	E32	E12	c08	c10	E22	c45	E30	c20	E09	E38	c61	E35	c47	E46	E57	c59	c28	E44
100	E03	E18	c37	E14	E12	E02	c27	c03	E32	E12	c08	c10	E22	c45	E30	c20	E09	E38	c61	E35	c47	E46	E57	c59	c28	E44
110	E03	E18	c37	E14	E12	E02	c27	c03	E32	E12	c08	c10	E22	c45	E30	c20	E09	E38	c61	E35	c47	E46	E57	c59	c28	E44
120	E03	E18	c37	E14	E12	E02	c27	c03	E32	E12	c08	c10	E22	c45	E30	c20	E09	E38	c61	E35	c47	E46	E57	c59	c28	E44
130	E12	E02	E03	E12	c11	E05	E06	c01	E02	c03	E02	E12	E02	c03	E12	E01	E01	E32	c31	c00	c60	c60	E30	E57	E50	E07
140	E12	E02	E03	E12	c11	E05	E06	c01	E02	c03	E02	E12	E02	c03	E12	E01	E01	E32	c31	c00	c60	c60	E30	E57	E50	E07
150	E12	E02	E03	E12	c11	E05	E06	c01	E02	c03	E02	E12	E02	c03	E12	E01	E01	E32	c31	c00	c60	c60	E30	E57	E50	E07
160	E12	E02	c12	E12	E12	c03	E02	E03	c11	E01	E32	E06	E06	E03	c01	E02	E12	c00	E05	c07	E22	E52	c60	c60	E50	E07
170	E12	E02	c12	E12	E12	c03	E02	E03	c11	E01	E32	E06	E06	E03	c01	E02	E12	c00	E05	c07	E22	E52	c60	c60	E50	E07
180	E12	c00	E02	E05	c56	E01	c11	E32	c03	E06	E03	c01	E02	E12	c07	E12	E12	E02	E06	E03	E25	E52	c60	E50	c60	E07
190	E12	E03	c03	c00	c11	E32	E06	c56	c01	c00	E02	E05	E62	E12	E03	E06	E12	c07	E25	E12	E02	E52	c60	E50	c62	E07
200	E12	c03	E03	c00	c11	E32	E06	c50	E03	E12	E62	E05	E02	E09	E12	c31	c07	c05	E06	E48	c00	E52	c60	E50	c62	E07
210	E12	c00	c03	E03	E06	c32	c11	c50	E03	E12	E62	E05	E02	E09	c12	c40	c03	c05	c07	c31	c00	E50	E59	E52	c62	E07
220	E12	c00	E03	E03	E06	E12	c50	E03	E35	c12	c40	c03	E05	E62	c32	c11	E02	E05	c07	c31	c00	E50	E59	E52	c62	E07
230	E12	c00	E03	E03	E06	E12	c50	E03	E35	c12	c40	c03	E05	E62	c32	c11	E02	E05	c07	c31	c00	E50	E59	E52	c62	E07
240	E12	c00	E03	E03	E06	E12	c50	E03	E35	c12	c40	c03	E05	E62	c32	c11	E02	E05	c07	c31	c00	E50	E59	E52	c62	E07
250	c01	E03	c09	c21	c09	c37	c36	c08	c41	c26	c29	c41	E22	E58	E26	E53	E63	E44	c60	E56	c34	c42	c51	c55	c56	c44
260	E27	c07	E27	E11	E05	c35	E30	c06	E20	c21	E58	c02	c13	c07	E59	c45	c55	E24	c34	E42	E50	E47	E04	c58	c50	E41
270	E47	c26	c14	c03	c08	c11	c17	c41	E25	c25	c18	E02	c20	c49	E59	E57	E56	c59	c40	c49	E23	E53	E15	c12	E61	c57
280	E50	c03	E24	c05	c11	E16	c06	E33	c08	E24	c46	c50	E56	E61	E58	E61	c62	E57	c54	c60	E13	E08	E08	E02	c11	E27
290	E53	c37	E33	E11	c06	E07	E03	c03	E22	E16	E43	c35	E63	E62	c62	c62	c57	c54	E23	c11	c08	c02	c63	E33	E59	E27
300	E53	c37	E33	E11	c06	E07	E03	c03	E22	E16	E43	c35	E63	E62	c62	c62	c57	c54	E23	c11	c08	c02	c63	E33	E59	E27
310	c14	c10	E18	c63	c18	c12	c12	c29	E44	c43	c27	c46	E41	E55	c45	E33	c59	c37	E28	c58	E20	c08	c21	c44	c61	c24
320	c14	c10	E18	c63	c18	c12	c12	c29	E44	c43	c27	c46	E41	E55	c45	E33	c59	c37	E28	c58	E20	c08	c21	c44	c61	c24
330	c09	E13	c17	E10	E01	c04	E12	c42	c19	E34	c54	c51	c51	c62	E55	c52	c53	c14	E16	c01	E06	c01	E04	c15	E01	E61
340	c44	E07	E05	E12	c00	E18	c29	c22	E08	c14	c49	c27	c05	c03	c03	c14	c00	c00	c00	c00	c00	c00	E31	E43	c64	E93
350	c44	E07	E05	E12	c00	E18	c29	c22	E08	c14	c49	c27	c05	c03	c03	c14	c00	c00	c00	c00	c00	c00	E31	E43	c64	E93
360	c44	E12	E05	E07	c00	E18	c29	E12	c14	E08	c49	c27	c05	c03	c03	c14	c00	c00	c00	c00	c00	c00	E31	E43	c54	E63
370	c44	E12	E05	E07	c00	E18	c29	E12	c14	E08	c49	c27	c05	c03	c03	c14	c00	c00	c00	c00	c00	c00	E31	E43	c54	E63
380	c44	E12	E05	E07	c00	E18	c29	E12	c14	E08	c49	c27	c05	c03	c03	c14	c00	c00	c00	c00	c00	c00	E31	E43	c54	E63
390	c44	E12	E18	E07	c00	E05	c29	E12	E11	E07	c27	c49	E06	c00	c00	c00	c00	c03	E21	c00	c00	c00	E31	c54	c49	E63
400	c44	E12	E18	E07	c00	E05	c29	E12	E11	E07	c27	c49	E06	c00	c00	c00	c00	c03	E21	c00	c00	c00	E31	c54	c49	E63
410	c47	E12	c29	E07	E11	E13	E21	c14	E07	c00	E05	c27	c49	c00	E06	c00	E18	E12	c00	E31	c00	c00	c00	c54	c49	E63
420	c47	E12	c29	E07	E11	E13	E21	c14	E07	c00	E05	c27	c49	c00	E06	c00	E18	E12	c00	E31	c00	c00	c00	c54	c49	E63
430	c47	E12	c29	E07	E11	E13	E21	c14	E07	c00	E05	c27	c49	c00	E06	c00	E18	E12	c00	E31	c00	c00	c00	c54	c49	E63
440	c16	c58	E19	E27	c02	c44	E19	c04	c23	E51	c05	c20	E14	E01	E19	c05	c20	E50	c40	c04	c09	c49	E46	c30	E48	c55
450	c16	c58	E19	E27	c02	c44	E19	c04	c23	E51	c05	c20	E14	E01	E19	c05	c20	E50	c40	c04	c09	c49	E46	c30	E48	c55
460	c16	c58	E19	E27	c02	c44	E19	c04	c23	E51	c05	c20	E14	E01	E19	c05	c20	E50	c40	c04	c09	c49	E46	c30	E48	c55
470	c16	c58	E19	E27	c00	c44	E19	c27	E19	E01	E16	c12	c05	E51	c12	c04	c20	E50	c49	c09	c04	c40	E46	c30	E48	c55
480	c16	c58	E19	E27	c00	c44	E19	c27	E19	E01	E16	c12	c05	E51	c12	c04	c20	E50	c49	c09	c04	c40	E46	c30	E48	c55

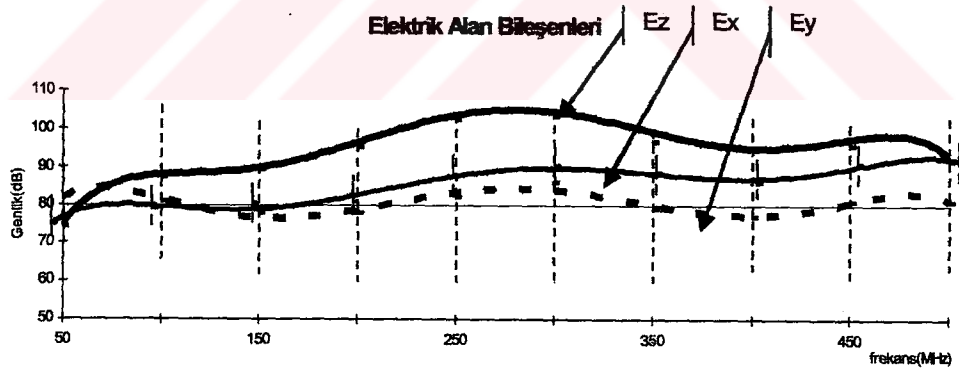
5.4 Sonuçların Tartışması

Tezin hedefi 50-450MHz bandında 50x180 cm²lik bir düzlem parçası üzerinde tek polarizasyonlu düzlemsel yakın alan elde etmektir. Bunun için ince anten dizisi kullanılarak bu antenler için uygun bir geometrik form elde edilmesi ve bu yapı üzerinde her bir antenin besleme akım genliğinin ve besleme tipinin her bir frekans için ayrı ayrı seçilebileceği öngörülmüştür.

Bu başlangıç şartları altında 50-480MHz bandında 60x200cm²lik bir yüzeyde elektrik alanının z bileşeni göz önüne alınarak düzlemsel yakın alan elde edilmeye çalışılmıştır. Anten ana ekseninin z yönünde olması ile, x eksenine paralel 2 yansıtıcının olması ile ve elektrik alanının x bileşeninin etkisini önlemiştir. Böylece elektrik alanının z bileşeni ile çalışılmıştır.

Antenlerin fiziki boyu 50 cm ana eksen ve 15 cm kulak eksenini seçilmiştir. Anten düzleminin arkasında olan yansıtıcı 15 cm uzaklıktadır. Oyz düzlemine paralel yansıtıcılar ise 11 cm uzaklıkta seçilmiştir.

Yapılan hesap ve benzetimler sonucu görülmüştür ki, elektrik alanının z bileşeni 50-270 MHz ve 350-450MHz bantlarında 60x200cm² düzlem parçasında, 270-350MHz bandında ise en azından 60x180cm² düzlem parçasında düzlemselliğini sağlamaktadır.

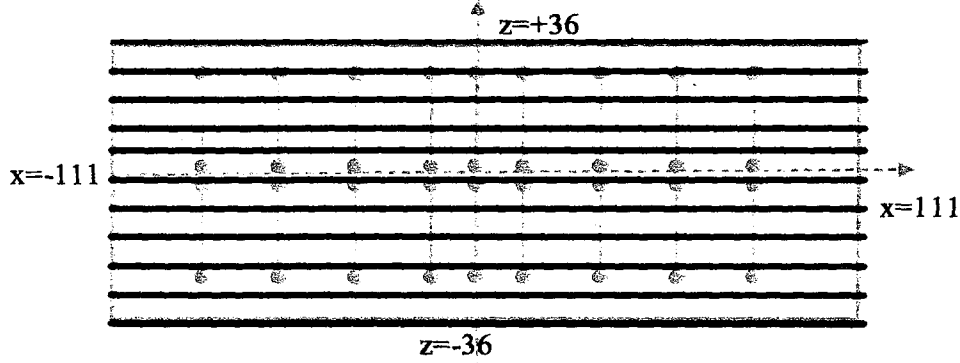


Şekil 5-21 Elektrik alan bileşenleri grafiği

Şekil 5-21'te elektrik alan bileşenlerinin genliklerinin grafiği görülmektedir. Grafikte veriler 60x200cm² düzlem parçasında ortalama alan değerlerine göre verilmiştir. Elektrik alanının z bileşeni bandın büyük bölümünde diğer bileşenlerden en az 10dB daha güçlüdür. Ancak gerek bu mertebeden az bir güç farkının olduğu frekanslarda gerekse ortalamadan daha güçlü yerlerdeki yakınlık durumu dikkate

alındığında sisteme filtre eklemek gerekli olacaktır. Bu nedenle elektrik alan x bileşeni için ızgara filtrenin kullanılması gereklidir.

Şekil 5-22'te elektrik alan x bileşenini filtrelemek için x eksenine paralel yerleştirilmiş tel ızgara görülmektedir. Sistemde kullanılan en küçük dalga boyu 60 cm olması nedeniyle ızgara telleri arası mesafe 5 cm alınması uygundur.



Şekil 5-22 Elektrik alan x bileşeni filtresi

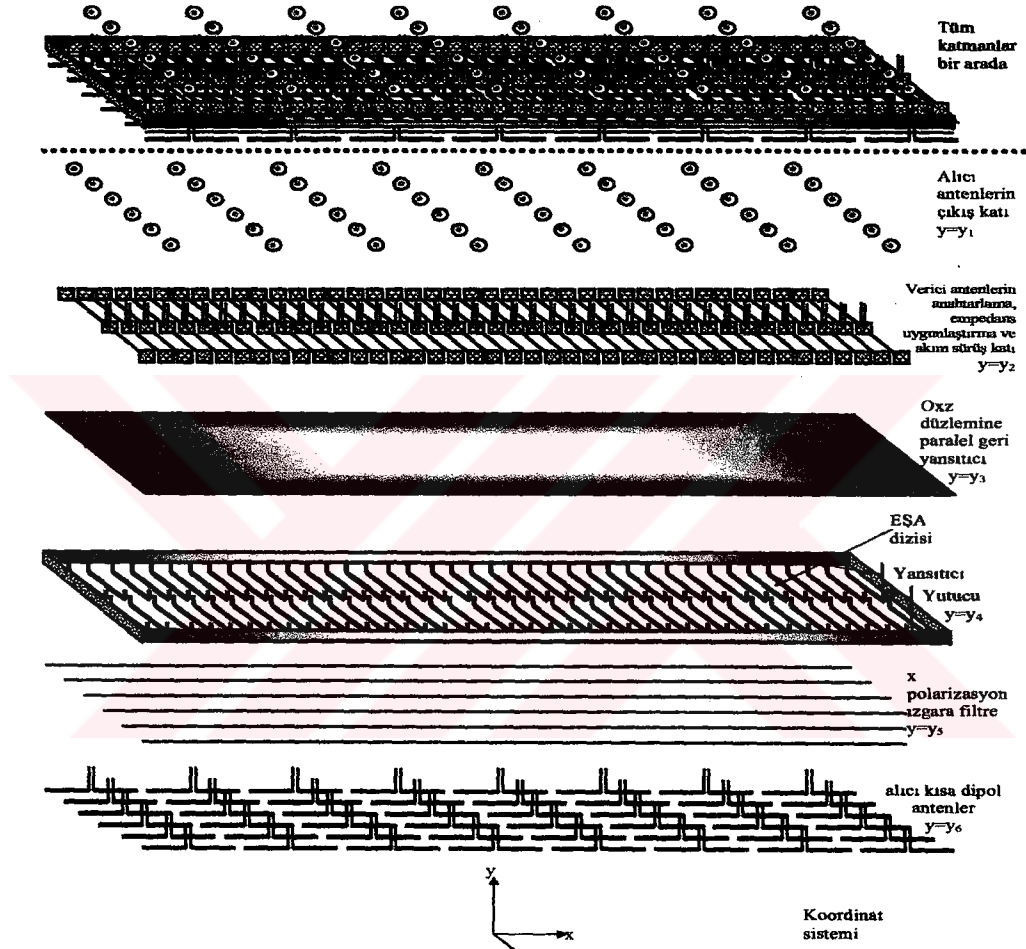
270-350 MHz bandında aynı zamanda anten direnci de maksimum seviyeye çıkmaktadır. Bunun sebebi anten besleme noktasında akım düğümü (tam duran dalga) oluşmasıdır. Çünkü ortadan beslemeli anten için toplam boy 80cm olup 375MHz frekansının dalga boyuna tekabül eder ve uçtan beslemeli anten için toplam anten boyu 110cm olup 272MHz frekanslı bir dalganın dalga boyuna tekabül eder.

5.5 Alıcı Antenler

z polarizasyonlu bir alan yer altındaki bir iletken küreye çarptıktan sonra x polarizasyonlu olarak geri toprak üstüne çıkacaktır. Sarı, yer altında bir küreden dönen alanın x polarizasyonlu ve kürenin tam üstünde maksimum küre çapından uzaklaştıkça alan genliğinin hızla sıfır seviyesine indiğini göstermiştir[46]. Bu durumda alıcı antenler de küçük dipollar olmalı ve verici anten düzleminin hemen altına x polarizasyonlu olarak yerleştirilmelidir.

Şekil 5-23de verici ve alıcı anten sistemlerinin görünüşleri verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi alıcı antenler x -polarizasyon filtre ızgaralarının altına konumlandırılmalıdır. Böylece mayından saçılarak gelen ve alıcı antenleri geçerek ilerleyen dalgalar bu ızgaralar tarafından geri yansıtılmadan yutulacaktır ve bu dalgalar tekrar diğer yansıtıcılardan yansıyarak geri dönemeyecektir. Şekil 5-23deki alıcı anten sisteminin çıkış katı, mayın varlığına delalet edecek belli bir eşik seviyesinin üzerinde akım indüklendiğinde o anten için alarm verecek bir devreyi de

içerir. Sözgelimi bu sistem bir ikaz lambası sistemi olup eşik seviyesinden güçlü işaret alan lambalar yanarak mayının yeri belli olacağı gibi bu anten çıkışları bir mikrokontrolör-işaret işleme devresine de verilerek burada işlenir ve cismin konumu ve büyüklüğü hakkında hesap yapıp sonuç bir özel amaçlı ekranda gösterilir ve mayın operatörü de bu ekrandan mayının konumunu kolayca görebilir. Bu durumda daha hassas bir ölçüm için alıcı kısa dipolların besleme hattının ışımaya katkısı tekrar incelenmelidir.



Şekil 5-23 Verici ve alıcı anten sisteminin katmanlarının görünümü $y_1 > y_2 > y_3 > y_4 > y_5 > y_6$

5.6 Özet

Toprak radarı oluşturmak ince antenlerle için, kolay imal edilebilecek orijinal bir sistem oluşturulmuştur.

100-450 MHz bandında $50 \times 200 \text{ cm}^2$ yüzey parçası üzerinde z bileşeni diğer bileşenlerden en az 15dB daha güçlü bir yakın elektrik alanı oluşturulmuştur. 50-100MHz bandında ise z ve x polarizasyonları yaklaşık aynı seviyededir. X

polarizasyon filtresi kullanılarak burada da doğrusal polarizasyonlu yakın alan elde edilir.

Tezde literatürde bulunmayan UBDA, OBEŞA, UBEŞA alan ve empedans formülleri kesin ifadelerle bulunmuştur.

Jordan'ın yakın alan çıkarsaması geliştirilmiştir.

Özel bir konfigürasyon içinde de olsa UBEŞA'in beslemesi geliştirilmiştir.

Özellikle küre şekilli mayınlar için alıcı bir anten sistemi geliştirilmiştir.

Empedans hesaplarında zemin etkisi incelenirken görüntü yönteminin sınırları da irdelenmiştir.

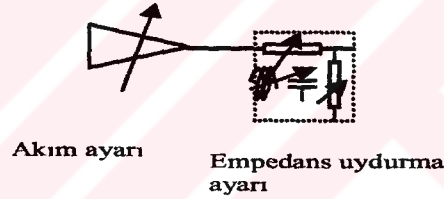
Sayısal hesabı daha önce verilmiş, her bir frekans için 2.02×10^{26} ihtimali teker teker denemek ve sonuç elde etmek yerine genetik algoritma kullanılmıştır.

Bu çalışma tamamen kuramsal ve sayısaldır.

6. ÇALIŞMANIN DEVAMI VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı 50-450 MHz bandında $50 \times 180 \text{ cm}^2$ bir düzlem parçasında düzlemsel yakın alan elde etmek için uygun bir anten konfigürasyonu önerip bu konfigürasyon için istenilen alanı veren anten besleme tipi ve besleme akım genliği tablosunu elde etmek, sonra da bu antenlerin seçilen 50-450MHz frekans bandında empedansını hesaplamaktır. Bu çalışmada bu hedeflere ulaşılmıştır. Bu çalışmada düzlemsel yakın alan veren bir sistemin elektromagnetik kısmı çözülmüştür. Sistemin uygulanabilirliği açısından devreciler empedans uygunlaştırma ve akım ayarlama devrelerini çözecekler.

Bu tezin devamında 6. bölümde ulaşılan teorik sonuçların uygulanması gerekir. Bunun için her bir frekansta her bir anten için besleme devrelerinin mikrokontrolör ile kumanda edileceği dikkate alınarak tasarlanması gerekir. Şekil 6-1'de besleme devreleri görülmektedir.



Şekil 6-1 Besleme devreleri

Besleme devrelerinin sayısını en aza indirmek için aynı frekansta aynı empedansa sahip ve aynı genlikle beslenmesi gereken antenler aynı devreden beslenebilirler. Örneğin Tablo 5-5'ye göre 220 MHz'de 12. ve 17. antenler uçtan beslemeli olarak 5 akım genlikleriyle beslenmektedirler. Şekil 5-17'den 220 MHz frekansında 12. antenin empedansının $Z_{12}(220\text{Mhz})=1.22-j5 \text{ k}\Omega$ ve 17. antenin empedansının da $Z_{17}(220\text{Mhz})=1.18-j5 \text{ k}\Omega$ olduğu görülmektedir. Bu frekansta iki anten birbirine paralel bağlanarak, oluşan $Z_A(220\text{Mhz})=0.6-j2.5 \text{ k}\Omega$ empedansına göre empedans uygunlaştırma devresi tasarlanır. Bu durumda $2 \times 5 = 10$ akım genliği üretecek şekilde mikrokontrolör akım devresini kumanda eder. Şekil 6.22'de zeminin etkisi empedanslara katılırken görüntü yöntemi kullanılmıştı ve 50-120 MHz bandında tüm antenler alıcı gibi görünmüştü. Bu bölge zaten görüntü yöntemi için analitik bölgenin dışındadır. Bu nedenle analitik olmayan bölge için, hatta tüm çalışma

bandında, zemin etkisine karşı deneysel olarak, antenlerin her birinin dizi içindeki empedansları tespit edilmelidir.

Ayrıca bazı antenlerin birbirlerine seri bağlanabileceği göz önüne alınarak dizinin ne şekilde etkileneceği de tekrar incelenmelidir. Çünkü seri bağlama neticesinde bir antenden seri bağlı olduğu diğer antene güç kaybı faktörüyle akım iletilecektir. Bu hem akım yoluna daha önce bağlı olan antende ısıma güç kaybıyla ve hem de iki anten arasında akımı taşıyan iletim yolunda olacaktır.

İletim yolundaki kayıplar için (4.4) denkleminde α zayıflama parametresinin sıfır olmayacağı ve I_m teriminin de $e^{-j\pi/2}$ terimiyle birlikte kullanılacağı açıktır. Bu nedenle bazı antenleri birbirine seri olan dizinin yakın alanı tekrar hesaplanıp, yeniden optimizasyon yapılmalıdır.

Analizler sonsuz ince tel için yapılmış ve bu nedenle akım dağılımlarının sinüzoidal olduğu kabul edilmiştir. Uygulamada kullanılacak olan mm mertebesinde kalınlıklı teller için bu dağılım varsayımı her yerde geçerli olmamakla beraber, Bölüm 2.1’de tartışıldığı gibi, akım dağılımlarında oluşacak farklılıkların tezde hesaplanmış olan değişimleri fazlaca etkilememesi beklenmektedir. Ancak bu durumun doğrulanması için benzer bir analizin akım dağılımlarını ve bunların yarattığı alanların sayısal yöntemlerle hesaplanıp kontrolü gerekir.

6.1 Sakıncalara Çözümler

Bir transmisyon hattının karakteristik empedansı $(2 \cdot 138 \log(\frac{D}{d_i}))$ ’dır. Burada D iki iletken arası mesafe, d_i iletken yarıçapıdır. UBDA ve UBEŞAnın beslemesinde bu denkleme göre iletken çapı ayarlanarak bir miktar empedans uygunluğu sağlanabilir.

Sistemde bir kısmı antenlere paralel ve bir kısmı da dik şekilde bir kaç yansıtıcı eklenerek antenin kullanım bandını artıracığından mahzurlara bir miktar çözüm bulunur. Yansıtıcı konumları uygun hesaplanarak empedansın negatif olduğu frekans bantlarında sistem empedansının pozitif çıkması sağlanır.

Uçtan beslemeli antenler, ortadan beslemeli antenlere göre beslemesi daha zor olmakla beraber daha geniş bir bantta kullanılmaya elverişlidir. Anten boyları dalga boyunun tam katı iken her iki antenin ısıma diyagramı aynıdır, ancak dalga boyundan daha büyük antenlerde uçtan beslemeli antenin kazancı daha yüksektir.

Uçtan beslemeli antenin ışıma direnci daha yüksek olması sebebiyle dizilerde birkaç anten paralel bağlanarak kullanılabilirler. Ancak anten boyunun $\lambda/2$ nin tek katı civarında olması durumunda kritik bir durum oluşmaktadır. Frekans süpürmeli kullanımlarda bu duruma öncelikle dikkat edilmelidir.

6.2 Rezonans Bölgesini Değiştirme

280-350 MHz bölgesinde anten direncinde yükselme ve ışıma düzlem parçasında daralma oluşmuştu. Bu frekanslar anten boyları değiştirilerek çalışma bandının dışına taşınabilir. Örneğin anten ana eksen boyu 40 cm ve kulak eksen boyu 5 cm seçilirse bu tip bir empedans yükselmesinin önüne geçilir ve anten düzleminin tam altında yani $20 \times 200 \text{ cm}^2$ düzlem parçasında elektrik alanın z bileşeni için bu her zaman -3dB seviyesinin üzerinde olur. Bunun yanında anten empedansı da diğer anten sistemi gibi çok büyük ölçekli değişmez. Ancak bu sistemde ışıma alanı x ekseninde daralmıştır. Bunun yanında bandın başında anten empedansı ortak empedansların da etkisiyle $1-2 \Omega$ seviyesine düşmüştür ve hatta bir frekans bölgesinde empedans negatife düşmüştür.

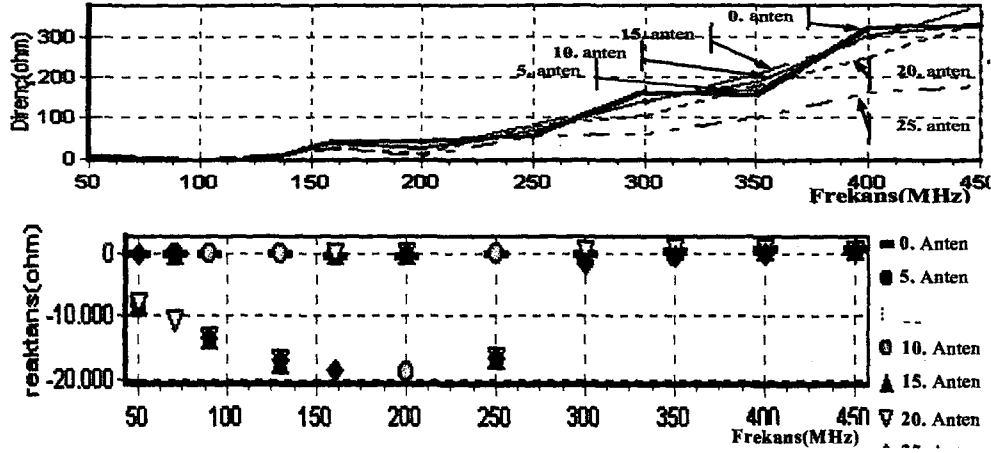


Şekil 6-2 $2h=40 \text{ cm}$, $h_1=5 \text{ cm}$ için $50 \times 200 \text{ cm}$ yüzeyinde 3dB sınırları

Şekil 6-2'de $2h=40 \text{ cm}$, $h_1=5 \text{ cm}$ boylu anten dizisi için $50 \times 200 \text{ cm}$ yüzeyinde elektrik alan z bileşeninin seçilen yüzey üzerindeki dağılımı görülmektedir. Şekillerde renk tonundaki her bir koyulaşma 1dB 'lik alan genliğindeki azalmaya tekabül etmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi 50-450MHz bandının tamamında elektrik alanın z bileşeni 3dB sınırı içinde kalmaktadır. Yukarıdaki diyagramları veren sistemde de geri yansıtıcı anten düzleminin 5 cm geride, yan yansıtıcılar 11 cm uzaklıkta, anten arası 4 cm, anten çapı 1mm'dir.

Şekil 6-3'de $2h=40 \text{ cm}$, $h_1=5 \text{ cm}$ boylu anten konfigürasyonunun empedansı görülmektedir. Anten ortak empedanslarının da etkisiyle 80-120 MHz bandında bir

kısım antenlerin direnci negatif değer almaktadır. Anten reaktansı da yine ortadan beslemeli antenler için büyük değerler almakla beraber bir zarf içerisinde değişmektedir. Tablo 6-1'de Şekil 6-2'deki ışıma alanlarını veren anten besleme parametreleri tablosu görülmektedir.



Şekil 6-3 2h=40 cm, h₁=5 boy lu anten dizisinin empedansı (anten yarıçapı 1mm)

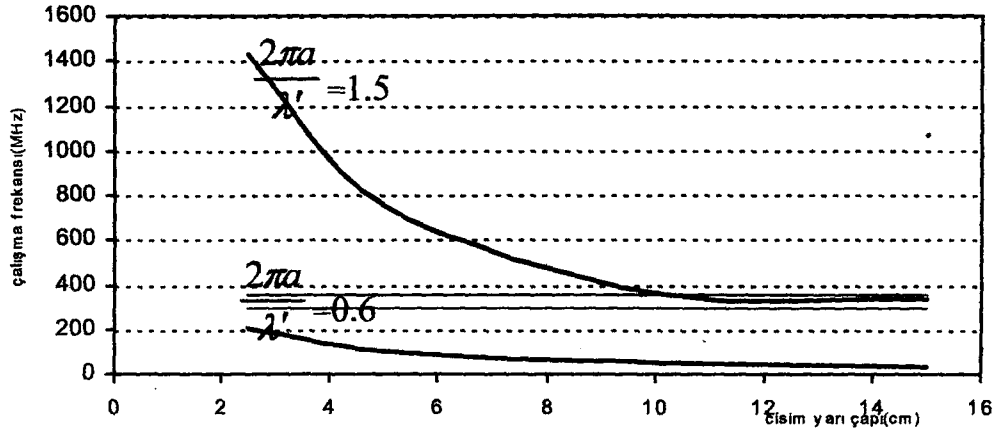
Tablo 6-1 40/5 anten sistemi için anten tipi ve besleme akım genliği tablosu

f	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
5	E35	E08	c23	c09	E03	c10	E32	E03	c44	E08	E27	E11	c23	E33	c40	c18
9	c06	E08	c21	E30	E54	c37	c19	E08	E43	c23	c43	c15	E41	E13	E03	E13
13	c06	E08	c21	E30	E54	c37	c19	E08	E43	c23	c43	c15	E41	E13	E03	E13
16	c17	c01	c03	E02	E07	c08	c10	c01	E02	E23	c20	E10	E23	E15	E15	c20
23	c46	c45	c34	E11	c61	c08	c01	E08	c07	c07	c01	c03	c04	E18	c03	c02
30	c17	E32	c16	c43	c10	c12	c04	E41	c40	E01	E19	c06	E08	E04	c01	c01
36	c16	c43	c10	c04	c17	E34	c52	E01	c27	c12	E19	c06	c23	E04	c04	c01
37	c16	c43	c12	c10	E34	c17	c04	E41	c52	E01	E19	c06	E08	E04	E11	c01
40	c56	E55	E31	E07	c04	E08	E37	E04	E24	c30	c27	c47	E08	c11	E04	c63
42	c62	E47	c54	c61	c26	c04	c15	c40	c05	c05	E01	E43	c35	c34	E07	c27
43	c62	E47	c54	c61	c26	c04	c15	c40	c05	c05	E01	E43	c35	c34	E07	c27
45	c62	E47	c54	c61	c26	c04	c15	c40	c05	c05	E01	E43	c35	c34	E07	c27

Diğer bir yöntem ise cisim yarıçapı-radar kesiti grafiğinde rezonans bölgesini değiştirmektir. Böylece özellikle 280-350MHz bandına karşı düşecek yarıçaplı cisimler için başka bir frekanstan tarama yapılabilir. Şekil 1-2 üzerinde rezonans bölgesi $2 < \frac{2\pi a}{\lambda'} < 2.7$ seçilebilir. ($\frac{2\pi a}{\lambda'}=2$ iken $\frac{\sigma}{a^2}=0.8$ ve $\frac{2\pi a}{\lambda'}=2.7$ iken $\frac{\sigma}{a^2}=0.8$).

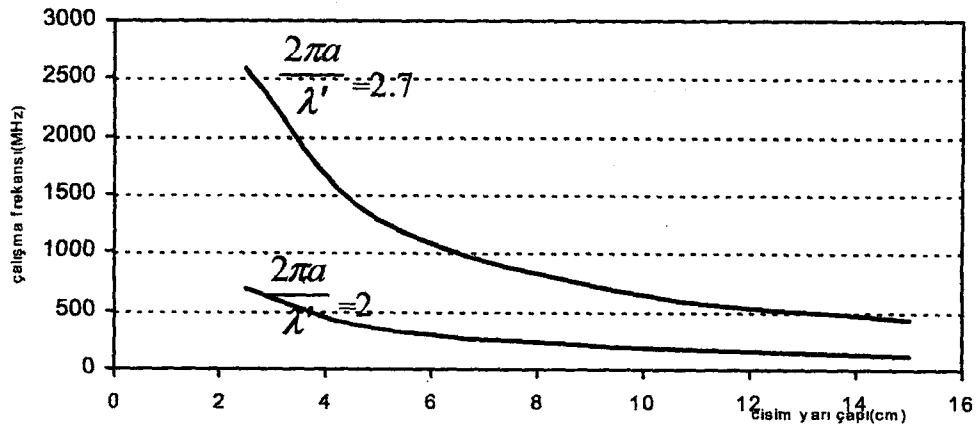
Şekil 6-4de $0.6 \leq \frac{2\pi a}{\lambda'} \leq 1.5$ rezonans bölgesi için cisim yarıçapı-çalışma frekansı

ilişkisini veren grafik, Şekil 1-2de $2 \leq \frac{2\pi a}{\lambda'} \leq 2.7$ rezonans bölgesi için cisim yarıçapı-çalışma frekansı ilişkisini veren grafik görülmektedir.



Şekil 6-4 Mayın yarıçapı - Frekans bölgesi seçimi. $0.6 \leq \frac{2\pi a}{\lambda'} \leq 1.5$

Şekil 6-4'de antenler için rezonans bölgesini oluşturan 270-350 MHz bölgesi işaretlenmiştir. Şekil 6-4'den de görüldüğü gibi özellikle 10 cm'den küçük yarıçaplı cisimler için, yine seçilen 50-450MHz frekans bandı içinde kalan diğer frekanslarla çalışmak mümkündür. 10 cm'den büyük yarı çaplı cisimler için rezonanslı 270-350 MHz frekans bandı ile seçilen çalışma frekansı bandının üst sınırı kesişmektedir. Yine de bu durum kabul edilebilir bir durum olmasına rağmen, söz konusu rezonanslı 270-350 MHz frekans bandındaki empedans yükselmesi problemi açısından bu bölgenin üst frekans bantlarına taşınması istenebilir. Şekil 6-5'da $2 \leq \frac{2\pi a}{\lambda'} \leq 2.7$ rezonans bölgesi için hesaplanan çalışma frekansı eğrisi görülmektedir.



Şekil 6-5 Mayın yarıçapı - Frekans bölgesi seçimi. $2 \leq \frac{2\pi a}{\lambda'} \leq 2.7$

KAYNAKLAR

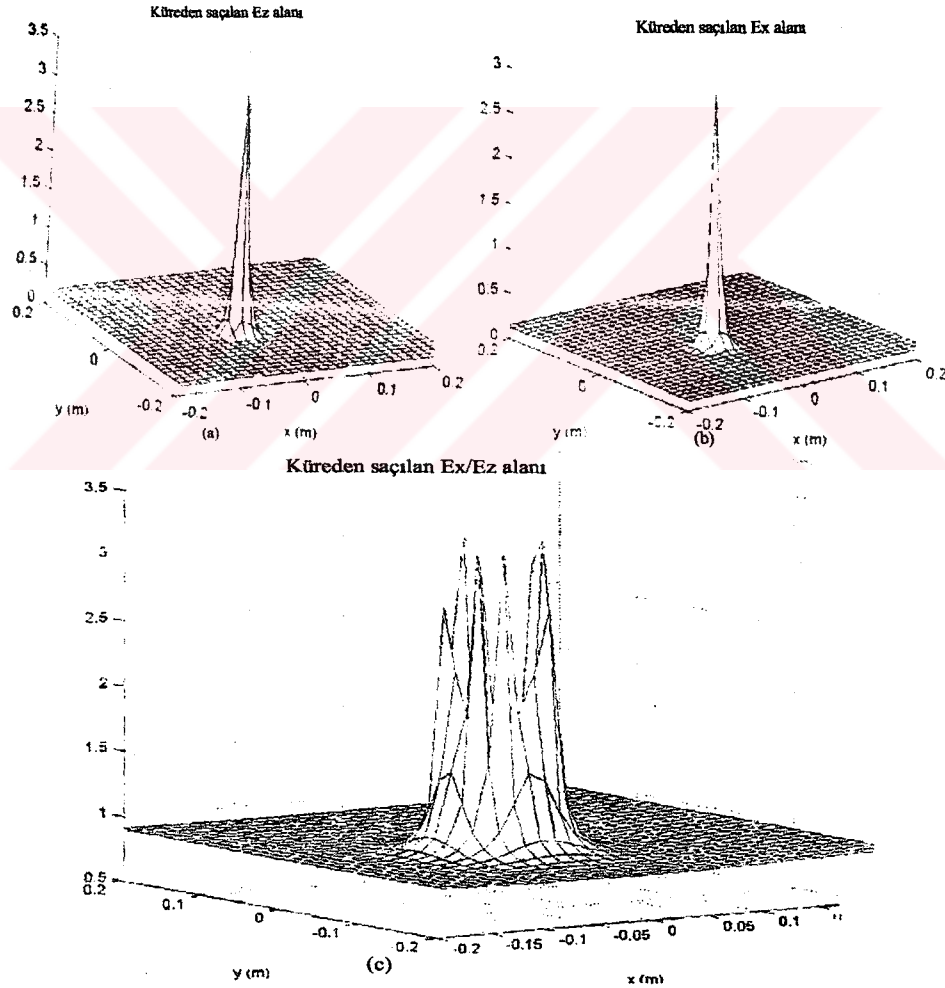
- [1] Carine, L. *Et al.*, 1999, Ultra-Wide Band Syntatic-Aparture Radar For Mine-Field Dedection, *Antenna & Propogation Magazine*, 1
- [2] Giubbolini, L., 1999, A Microwave Imaging Radar in the Near Field for Anti-Collision (MIRANDA), *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 9, 1891-1900
- [3] Akkaya, İ., Esen, B., 1999, Yakın Alanı Düzlemsel Dalga Olan Faz Taramalı Yarıklı Anten Dizisi, *Elektrik, Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı* Gaziantep, 6-12 Eylül s:162-164,
- [4] Carevic, D., 2000, Cluter Reduction And Decection Of Minelike Objects In Ground Penetrating Radar Data Using Wavelets, *Surface Sensing Technologies And Applications*, 1, 101-118
- [5] Kingsley, S., Quegan, S., 1992, Understanding Radar Systems, Mcgraw Hill,
- [6] Guy, E.D, Radzevicius, S.J., 2001, "Recognition Of Borehole Radar-Cable-Related Effects Using Variable Offset Sounding", *Subsurface Sensing Technologies And Application*, 2, 127-140
- [7] Mcknight, S.W., *Et. Al.*, 2001, "Laser-Induced Acooustic Imaging Of Buried Objects", *Subsurface Sensing Technologies And Application*, 2, 119-126
- [8] Bramanti, M., Bozzi, E., 2001, " A Procedure To Detect Flaws Inside Large Sized Marble Blocks By Ultrasound", *Subsurface Sensing Technologies And Application*, 1,1-13
- [9] Morgenthaller, A.W., Rappaport, C. M, 2001, "Detecting Nonmetallic Mines Under Rough Ground Using Semi-Analytic Mode Matching", *Subsurface Sensing Technologies And Application*, 3, 231-248
- [10] Bourgois, J.M., Smith, G.S., 1998, "A Complete Electromagnetic Simulation Of The Separated- Aperture Sensor For Detecting Buried Land Mines", *IEEE Transaction On The Antenna And Propagation*, 10, 1419-1426
- [11] Hernandez-Lopez, M.A., *Et. Al.*, 2001, "A Resistively Loaded Thin Wire Antenna For Mine Detection", *Subsurface Sensing Technologies And Application*, 3, 265-272
- [12] Craddoc, I.J., *Et. Al.*, 2001, "Demonstration Of The Detection Of Buried Mines With Real-Aperture Radar" *Subsurface Sensing Technologies And Application*, 3, 273-284
- [13] Jordan, E.C., Balmain, K.G., 1968, Electromagnetic Waves And Broadcasting Systems, Prentice Hall.
- [14] Collin, R.E., Zucker, F.J., 1969, Antenna Theory, McGraw-Hill Book Co. Inc.
- [15] Balanis, C. ,1982, Antenna Theory Analysis And Design, John Wiley & Son's, Singapore

-
- [16] **Cheng, D.K.**, 1983, Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Canada
- [17] **Ishimaru, A.**, 1991, Electromagnetic Wave Propagation Radiation and Scattering, Prentice Hall, USA.
- [18] **Harrington, R. F.**, 1961, Time Harmonic Electromagnetic Fields, McGraw-Hill Company, Inc., Newyork
- [19] **Stutzman, W.L., Thiele, G.A.**, 1981 Antenna Theory and Design, John Wiley & Son's, USA
- [20] **Daniels, D.J.**, 1996, Surface-Penetrating Radar, IEE, England
- [21] **Hu, C.C., Jou, C. F., And Wu, J. J.**, 2000, An Aperture-Coupled Linear Microstrip Leaky-Wave Antenna Array With Two Dimensional Dual-Beam Scanning Capability, *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 6, 909-913
- [22] **Krauss, J.D.**, 1988, Antennas, McGraw Hill, Singapore.
- [23] **Akkaya, İ.**, 1996, Anten & Propogasyon, Sistem Yayınları, Istanbul.
- [24] **Schilling, R. J.**, 1990, Fundamentals of Robotics,, Prentice Hall, New Jersey(USA)
- [25] **Türkoglu, O., Akkaya, İ.**, 2001, "E SHAPED ANTENNAS (ESA)", *ELECO'2001 2nd International Conference On Electrical And Electronics Engineering Electronics Proceeding*, 195-199 , Bursa, 7-11 November.
- [26] **Türkoglu, Ö., Akkaya, İ.**, 2000 "Near Field of Whip Antenna Arrays", *Marmara University Journal of Sciences and Technology*, Istanbul ,16, 205-216.
- [27] **Türkoglu, Ö., Akkaya, İ.**, 2001, Anten Besleme Tipinin Anten Işıma Diyagramına Etkisi , Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği, 9. Ulusal Kongresi, Kabul edilmiş bildiri
- [28] **Akkaya, İ.**, 1981, "Analysis Of The Circular Cylindrical Dipole Of Any Material, In Any Medium", *Bulletin Of The Technical University Of The Istanbul*, 11 29-49
- [29] **Akkaya, İ.**, 1977, "On The Mutual Impedance Of Antennas Of General Type", *Bulletin Of The Technical University Of The Istanbul*, 1, 45-72
- [30] **Akkaya, İ.**, 1981, "The Radiation Field, The Impedance, The Toploading And The Coated Case And The Buried Case Of Imperfectly Conducting; By The Way Conclusions On The Concept Of Surface Impedance, ", *Bulletin Of The Technical University Of The Istanbul*, 2, 136-159
- [31] **Akkaya, İ.**, 1994, Anten Problemlerinde Fourier Dönüşümleri, İTÜ Rektörlüğü, İstanbul
- [32] **Bayrakçı, E.**, 1995, Antenler, Güneş Yayınları, Bursa.
- [33] **Marshall, S.V., Skitek, G.G.**, 1990, Electromagnetic Concepts and Applications, Prentice Hall International, USA
- [34] **Ares-Pena, et.al**, 1999, Genetic Algorithms In The Design And Optimization Of Antenna Array Patterns, *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 3, 506-511

-
- [35] Yeo, B.K., And Lu, Y.,1999, Array Failure Correction With A Genetic Algorithm, *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, **5**, 823-828
- [36] Haupt, R. L., 1995 "An Introduction To Genetic Algorithms For Electromagnetics ," *IEEE Trans. Antennas Propagat. Magazine*, **4**, 7-14
- [37] Tennant *Et Al.* , 1994, Array Pattern Nulling By Element Position Perturbations Using A Genetic Algorithm, *Electron. Lett.*, **30**, 174-176.
- [38] Yan, K. K., And Lu, Y.,1997, Sidelobe Reduction In Array Pattern Synthesis Using Genetic Algorithm, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **7**, 1117-1121.
- [39] Ares, F. *et al*, 1996, Application Of Genetic Algorithms And Optimizing The Aperture Distributions Of Antenna Array Patterns" *Electron. Lett.*, **3**, 148-149.
- [40] Buckley, M. J., 1996 , Synthesis Of Shaped Beam Antenna Patterns Using Implicity Constrained Current Elements, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2192-197.
- [41] Ares, F., *et al.*,1994, Design Of Planar Arrays To Obtain Efficient Footprint Patterns With An Arbitrary Boundary, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **11**, 1509-1514.
- [42] Haupt, R. L., 1995, Thinned Arrays Using Genetic Algorithms,*IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **7**, 993-999.
- [43] Botha, E., and Mcnamara, D. A.,1993, A Contoured Beam Synthesis Technique For Planar Antenna Arrays With Quadrantal And Centro-Symmetry, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **9**, 1222-1231.
- [44] Altshuler, E. E., 2000, Design Of A Vehicular Antenna For GPS/IRIDIUM Using A Genetic Algorithm, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **6**, 968-972.
- [45] Türkoğlu, Ö., 2001, "Near Field Of Antenna Array Program", 1. Uluslar Arası Eğitim Teknolojileri Sempozyumu, Sakarya Ün. Eğitim Fakültesi Dergisi, **3**,353-359
- [46] Sarı, M., 2001, Toprak İçine Gömülü Mükemmel İletken Küreden Elektromagnetik Saçılma, *Bitirme Tezi*, İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi, İstanbul.
- [47] Türkoğlu, Ö., 2001, Genetik Algoritma Metodu İle Düzlemsel Yakın Alan Elde Etmek İçin Uygunluk Fonksiyonu Analizi, *İstanbul Üniv. Elektrik-Elektronik Dergisi*, **2**, 257-265

A KÜREDEN SAÇILAN ALANLAR

Sarı[46], yer altında gömülü bir küreden dönen elektrik alanları için aşağıdaki grafikleri vermektedir. Çapı 5 cm olan küre, $\epsilon_r=4$ ve $\sigma=10^{-4}$ S/m olan toprak yüzeyinin 5.5 cm altına gömülmüştür ve toprak yüzeyinin 0.05 cm altındaki toprak yüzeyine paralel ve merkezi kürenin merkezi üzerinde olan $40 \times 40 \text{ cm}^2$ lik bir yüzey parçası üzerinde, 400 MHz frekansında aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Benzer grafikler metal olmayan küresel bir mayın için Morgenthaller ve Rappaport [9] tarafından da verilmiştir.



Şekil A.1 Bir küreden saçılan elektrik alanı bileşenleri a) z bileşeni, b) x bileşeni c) Ex/Ez oranı [46]

B GENETİK ALGORİTMADA UYGUNLUK KRİTERİ

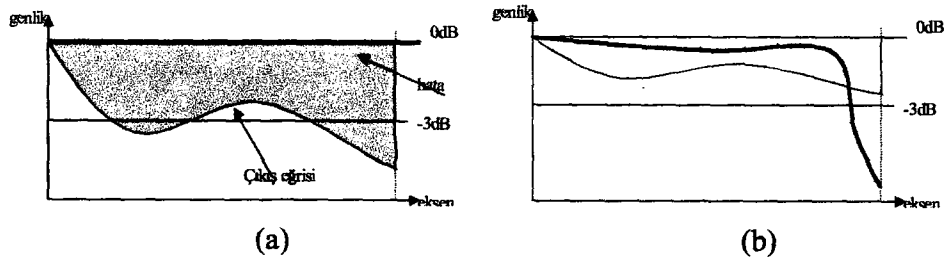
Aşağıda Türkoğlu[47]'dan genetik algoritmada uygunluk kriteri bölümü verilmiştir.

Genetik algoritmanın başarısı çok iyi tanımlanmış uygunluk kriterine bağlıdır. Özellikle çok büyük boyutlu bir çıkış vektörü veren fonksiyonlar için bu durum daha da önemlidir. Uygunluk kriteri için çıkış vektörünün ne şekilde bir özelliğe sahip olacağı ve bu özelliğe göre istenilen sonucu sayısal olarak bilgisayara tanıtmak gerekir. Aşağıda bir alan hesabı optimizasyonu için çeşitli uygunluk kriterleri tartışılacaktır.

Örnek: Problemimizde çizgisel bir kesitte belli aralıklarla hesaplanan elektrik alan değerinin sabit bir değer, normalize edildiğinde 0 dB'e en yakın olması istenmektedir ve kötü halde -3dB'den daha iyi olması beklenmektedir . Bu durumda uygunluk kriterleri ve problemleri nelerdir?, bakalım:

B.1 Farklar Toplamı (Hatalar Toplamı):

Bu yöntemde istenilen eğri ile fonksiyon sonucu eğrinin farkının integrali alınır ve en az değeri (hatayı) veren giriş vektörü en iyi üye seçilir. Şekil B.1'de farklar toplamı yöntemi gösterilmiştir. Şekil B.1-a)da gri alanın toplamı (hatanın integrali)'nin minimum (hatta 0) olması gerekir. Ancak Şekil B.1-b)de gösterildiği gibi kalın çizgiyle gösterilen eğrinin hata toplamı ince çizgiden daha az olmasına rağmen daha kötü bir sonuçtur. Eksenin sağında -3dB sınırının dışına taşmıştır.

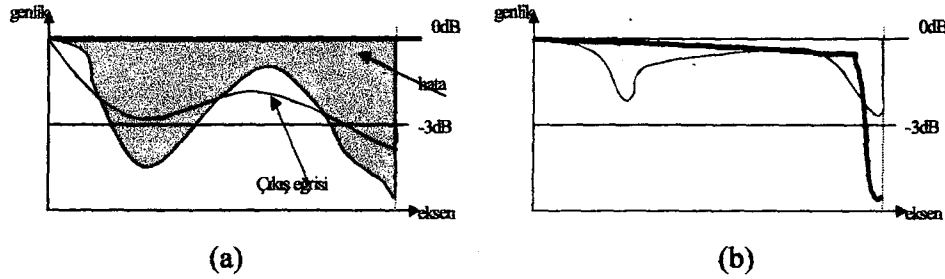


Şekil B.1 a) Farklar Toplamı (Hatalar Toplamı) yöntemi b) kalın çizgi kötü durum

B.2 En Az Kareler Yöntemi (Hata Karelerinin Toplamı)

Bu yöntemde istenilen eğri ile fonksiyon sonucu eğrinin farkının karelerinin integrali alınır ve en az hatayı veren giriş vektörü en iyi üye seçilir. Şekil B. 2de farkların

kareler toplamı yöntemi gösterilmiştir. Şekil B. 2a)da gri alanın toplamı (hatanın integrali) nin minimum olması ve hatta 0 olması gerekir. Ancak Şekil B. 2b)de gösterildiği gibi kalın çizgiyle gösterilen eğrinin hata kareleri toplamı ince çizgiden daha az olmasına rağmen, kalın çizgi daha kötü bir sonuçtur. Çünkü eksenin sağında -3dB sınırının dışına taşmıştır.

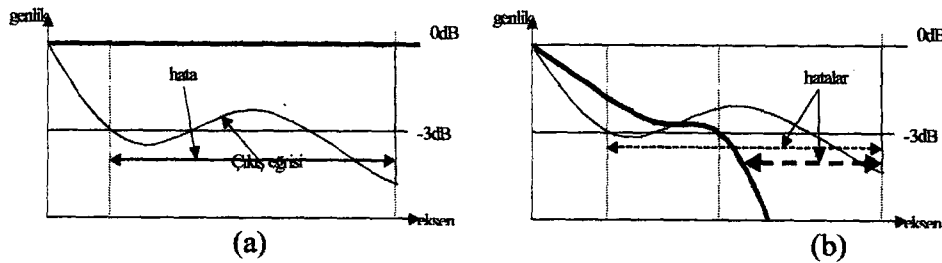


Şekil B. 2 a) En az kareler yöntemi b) kalın çizgi kötü durum

B.3 Geniş Bölge Yöntemi

Bu yöntemde kabul edilen hatanın üst sınırı referans alınmıştır. Eğri değişkenimize ait olan hatanın referansın altında kaldığı bölgelerin artırılması, en kötü halden daha iyi olan bölgelerin genişletilmesine çalışılır. Bunun için 3 yöntem vardır.

a) **Sol Bölge Genişletme:** Söz konusu değişken üzerinde sürekli ve maksimum genişlikte sağlanması hedeflenir. Böylece alanın kabul edilebilir bantta olması sağlanır. Bunun için değişken üzerinde sıfırdan başlayarak uçlara doğru gidilirken karşılaşılan ilk sürekli bölge esas alınır. Şekil B.3'de Sol bölge genişletme yöntemi görülmektedir. Şekil B.3 a)da da görüldüğü gibi hatayı küçültmek ve 0 yapmak demeti büyütecek ve -3dB sınırını sağlayacaktır. Şekil B.3 b)de ise kalın çizgi -3dB sınırından çok uzak (hata değeri daha az) olmasına rağmen daha iyi bir sonuç vermektedir.

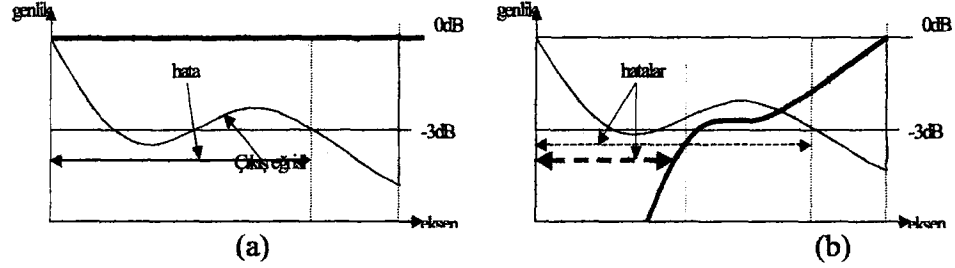


Şekil B.3 a)Sol Bölge Genişletme Yöntemi b) kalın çizgi kötü durum

b) **Sağ Bölge Genişletme:** Söz konusu değişken üzerinde uçlarda sürekli ve maksimum genişlikte sağlanması hedeflenir. Böylece alanın kabul edilebilir bantta

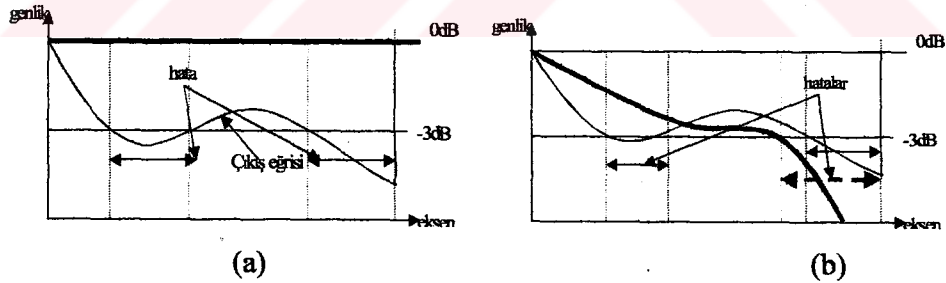
olması sağlanır. Bunun için değişken üzerinde uçlardan başlayarak ortaya doğru gidilirken karşılaşılan ilk sürekli bölge esas alınır.

Şekil B. 4'de Sol bölge genişletme yöntemi görülmektedir. Şekil B. 4 a)da da görüldüğü gibi hatayı küçültmek ve 0 yapmak demeti büyütecek ve -3dB sınırını sağlayacaktır. Şekil B. 4 b)de ise kalın çizgi -3dB sınırından çok uzak (hata değeri daha az) olmasına rağmen daha iyi bir sonuç vermektedir.



Şekil B. 4 a) Sağ Bölge Genişletme Yöntemi b) kalın çizgi kötü durum

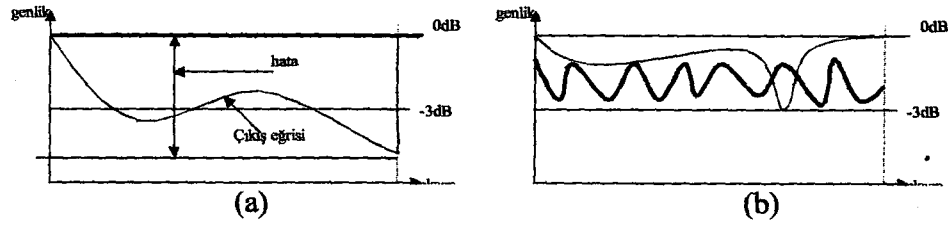
c) **En geniş bölge:** Söz konusu değişken üzerinde sürekli ve maksimum genişlikte sağlanması hedeflenir. Böylece alanın kabul edilebilir bantta olması sağlanır. Bunun için değişken üzerinde referanstan daha iyi bölgenin toplam genişliği esas alınır. Şekil B.5'de Sol bölge genişletme yöntemi görülmektedir. Şekil B.5 a)da da görüldüğü gibi hatayı küçültmek ve 0 yapmak demeti büyütecek ve -3dB sınırını sağlayacaktır. Şekil B.5b)de ise kalın çizgi -3dB sınırından çok uzak (hata değeri daha az) olmasına rağmen daha iyi bir sonuç vermektedir.



Şekil B.5 a)En Geniş Bölge Yöntemi b) kalın çizgi kötü durum

B.4 En Az Hata Yöntemi

Bu yöntemde ise en büyük hata tespit edilmekte ve bu hata küçültülmeye çalışılmaktadır. Ancak Şekil B. 6 b)de görüldüğü gibi daha kötü bir durum (hem daha dalgalı ve hem de hatalar toplamı daha fazla) genlikçe küçük hatalar verebilir. Bu durumda en az hata yöntemi kabul edilemez yada tercih edilemez hatalara götürür.



Şekil B. 6 a) En Az Hata Yöntemi b) kalın çizgi kötü durum

B.5 Melez Yöntemler

Yukarıda söz edilen yöntemler birlikte de kullanılması uygundur. Ancak bu yöntemleri eşit ağırlıkta kullanmak bazı problemler üretebilir. Bu nedenle yöntemlerden daha öncelikli olanının ağırlığı artırılmalı; daha sonra, diğer yöntem iyileştirme amaçlı kullanılmalıdır. Örneğin sol bölge genişletme yöntemi ile en az kareler yöntemi birleştirilebilir. Bunun için

$$HATA_{toplam} = M \times HATA_{Sol\ Bölge\ Genişletme\ Yöntemi} + HATA_{en\ az\ kareler\ toplamı} \quad (B.1)$$

şeklinde yeni bir uygunluk kriteri belirlenir. Bu örnekte, bizim için öncelikli hata terimi sol bölge genişletme yöntemi terimi, ikinci derecede önemi olan hata terimi ise en az kareler toplamı yöntemi terimidir. Dolayısıyla 1. dereceden önemli olan hata terimini düzeltmek istiyoruz. Burada 1. hata terimini 1000 ile çarpmamızın nedeni mesela

$$M \times HATA_{Sol\ Bölge\ Genişletme\ Yöntemi} \geq 10 \times HATA_{en\ az\ kareler\ toplamı} \quad (B.2)$$

olmasını sağlamasıdır. Yukarıdaki 10 çarpanı iki eşitlik arasındaki mertebe farkı sağlamak içindir. Problemin yapısına göre tabi ki M sayısı uygun şekilde seçilmelidir. Daha temel olarak formülü

$$HATA_{toplam} = \sum_i HATA_{i,Yöntem} \times KATSAYI_i \quad (EK\ B.3)$$

şeklinde düzenleyebiliriz. Böylece sadece 2 değil bir çok yöntemi birlikte kullanabiliriz.

Bölüm 5 da bu yöntemlerin başarısı verilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Önder TÜRKOĞLU 1972 yılında Konya-Karapınar-Kuzukuyusu Köyü'nde doğdu.

Ocak 1997'den beri Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Haberleşme Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Askerliğini yapmış, evli ve 2 çocuk babasıdır.

1978-1983 yıllarında Kuzukuyusu Köyü İlkokulu'nda

1983-1986 yıllarında Ereğli Atatürk Ortaokulu'nda

1986-1989 yıllarında Ereğli Cumhuriyet Lisesi'nde

1989-1994 yıllarında İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde

1994-1997 yıllarında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümü'nde okuyarak Elektronik ve Haberleşme Yüksek Mühendisi unvanını aldı

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KÜLTÜR
DOKÜMANTASYON MERKEZİ