

ÜÇGEN ANTENLERİN ANALİZİ

ANALYSIS OF TRIANGULAR ANTENNAS

SEVDA BALK

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LISANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2008

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LISANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :
Prof.Dr. Gönül Turhan Sayan

Üye (Danışman) :
Prof.Dr. Adnan Köksal

Üye :
Prof.Dr. Feza Arıkan

Üye :
Prof.Dr. Birsen Saka

Üye :
Doç.Dr. Çiğdem Seçkin Gürel

ONAY

Bu tez/...../2008 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

......./...../2008

Prof.Dr. Erdem Yazgan
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

ÜÇGEN ANTENLERİN ANALİZİ

SEVDA BALK

ÖZ

Üçgen antenler sıklıkla kullanılan, geniş bantlı antenlerdir. Bu tez çalışmasında, üçgen antenlerin giriş empedans değerleri ve hüzme genişlikleri, anten üzerindeki akım dağılımları hesaplanmış ve uzak alan örüntüleri incelenmiştir. Bu inceleme sırasında, analizi yapılan antenin, boyutlarının, açıklık açısının ve çalışılan frekansların empedans, hüzme genişliği ve uzak alan örüntülerini nasıl değiştirdiğine bakılmıştır.

Analizde, Elektrik Alan İntegral Denklemi'ne (EAİD), Momentler Yöntemi (MY) uygulanmıştır. MY'de, Rao-Wilton-Glisson tarafından geliştirilen RWG taban fonksiyonları ve Galerkin test yöntemi kullanılmıştır. Antenin yüzeyi ise, düzlemsel yama üçgenlerle modellenmiştir.

Bu çalışmada önce, anten geometrisine ait bilgiler yazılan programla elde edilmiştir. EAİD, MY ile nümerik hale getirilmiş ve lineer sisteme dönüşen integro-diferensiyel denklemler çözülmüştür. Besleme modeli olarak küçük yarık modeli kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak gerilim matrisi bulunduktan sonra, akım vektörü hesaplanmıştır. Akım vektörünün bulunmasıyla, anten üzerindeki akım dağılımı, antenin giriş empedansı ve antenin uzak alan örüntüleri hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlarla, üçgen antenlerin geniş bantlı oldukları gözlenmiştir. Antenin uzunluğu ve açıklık açısı arttıkça da antenin yönlülüğünün arttığı gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üçgen antenlerin boyu, λ 'dan büyük olduğunda ve açıklık açısı 60° 'den büyük olduğunda, antenin yönlülüğünün arttığına işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Üçgen Antenler, Elektrik Alan İntegral Denklemi, Momentler Yöntemi, RWG Açılım Fonksiyonları, Üçgenleştirme, Giriş Empedansı, Akım Dağılımı, Küçük Yarık Modeli, Uzak Alan Örüntüsü

Danışman: Prof.Dr. Adnan Köksal, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

ANALYSIS OF TRIANGULAR ANTENNAS

SEVDA BALK

ABSTRACT

Triangular antennas are commonly used broadband radiating elements. In this study, input impedances, beamwidth of triangular antennas and current distribution on the antenna are calculated and far-field pattern is analysed. It has been observed that changing the length, and flare angle of the antenna and changing frequency affect the impedance, beamwidth, and the far-field pattern of the triangular antenna.

In this analysis, Method of Moments (MoM) is applied to Electric Field Integral Equation (EFIE). In MoM, RWG basis functions developed by Rao-Wilton-Glisson and Galerkin test method are used. The surface of the antenna is modeled by planar patch triangles.

First of all, information about the antenna geometry is obtained by a computer program in this study. EFIE is in numerical form and integro-differential equations are solved by MoM. Delta-gap model is used as a feed model. By using this model, voltage matrix is calculated. The current vector is calculated afterwards by multiplying the inverse of impedance matrix with the voltage matrix. By using current vector, current distribution on the antenna, the input impedance and the far field pattern of the antenna is calculated.

It has been observed that triangular antennas are broadband antennas. It has also been observed when the length and the flare angle of the antenna increase, the antenna becomes more directional. According to the results of the study, if the length of antenna is greater than λ and the flare angle of the antenna is greater than 60° , the antenna is more directional.

Keywords: Triangular Antennas, Electric Field Integral Equation, Method of Moments, RWG Basis Functions, Triangulation, Input Impedance, Current Distribution, Delta-gap Model, Far Field Pattern

Advisor: Prof.Dr. Adnan Köksal, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering

TEŞEKKÜR

Sabrı ve ilgisiyle tez çalıőmamı sürdürmem için desteğini ve bilgisini esirgemeyen danıőmanım Sayın Prof.Dr. Adnan KÖKSAL'a,

Dostluk ve bilgisini benimle paylaşan oda arkadaşım őölen'e,

Hayata tutunmak için her zaman güzel sebepler olduğunu gösteren arkadaşım Burcu'ya,

Bana ikinci bir aile olup, her zaman yanımda olan, sıkıntılarımı benimle paylaşan canım halam Saniye, eniőtem Yakup, kuzenlerim Gönül ve Füsün'a,

Canıma can katan kardeőlerim Serkan ve Furkan'a,

Sevgisiyle, sabrıyla bana her zaman güç veren, beni bugünlere getiren, en iyi şekilde yetiőtiren canım annem ve babama,

Bana olan sonsuz inancını, güvenini hissettiğim, sevgisiyle her zaman yanımda olan, bana güç veren canım Akın'a,

içtenlikle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. TEORİ	3
2.1. Elektrik Alan İntegral Denklemi (EAİD)	3
2.2. Momentler Yöntemi	5
2.2.1. Geometrinin Modellenmesi ve Üçgenleştirme	8
2.2.2. Rao-Wilton-Glisson (RWG) Açılım Fonksiyonları	9
2.2.3. EAİD'nin Momentler Yöntemiyle İfadesi	12
2.2.3.1. Tekillik Sorununun Ortadan Kaldırılması	16
2.2.3.2. İntegrallerin Nümerik Olarak Hesaplanması	19
2.3. Anten Uyarımı	21
2.4. Giriş Empedansı	23
2.5. RWG Açılım Fonksiyonları ile Uzak Alan Örüntüsünün Hesaplanması .	24
2.6. Düzlem Dalga ile İndüklenmiş Üçgen Antenin Yüzey Akım Dağılımının Bulunması	25
3. ÜÇGEN ANTENLER	26
3.1. Üçgen Antenlerin Giriş Empedansı	26
3.2. Üçgen Antenlerin Uzak Alan Örüntüsü	27
3.3. Üçgen Antenlerin Yüzey Akım Dağılımı	29
4. PARAMETRİK ÇALIŞMA	40
5. SONUÇLAR	49

KAYNAKLAR DİZİNİ	51
EKLER DİZİNİ	53
ÖZGEÇMİŞ	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Genel Saçılım Probleminin Geometrisi	4
Şekil 2.2. Matlab PDE araç kutusu ile üçgenleştirme	9
Şekil 2.3. Makarov tarafından yazılan program ile üçgenleştirme	10
Şekil 2.4. Üçgen tanım kümesinde tanımlı RWG açılım fonksiyonu parametreleri	11
Şekil 2.5. Açılım üçgeninin yerel koordinat dönüşümü yapıldıktan sonraki konumu	17
Şekil 2.6. Yöntem-Adım 1	20
Şekil 2.7. Yöntem-Adım 2	21
Şekil 2.8. Uyarılan kenarın (besleme kenarı) (ℓ_m) dipol anten ve üçgen antende gösterimi	22
Şekil 3.1. x-y düzlemine yerleştirilmiş üçgen anten	27
Şekil 3.2. Üçgen antenin giriş empedansınının gerçel kısmı	28
Şekil 3.3. Üçgen antenin giriş empedansınının sanal kısmı	29
Şekil 3.4. Üçgen antenin giriş empedansınının sanal kısmı (yeni koordinatlarla)	30
Şekil 3.5. Üçgen antenin uzak alan örüntüsü, a) $f=75\text{MHz}$, b) $f=450\text{MHz}$	31
Şekil 3.6. Üçgen antenin uzak alan örüntüsü, a) $f=750\text{MHz}$, b) $f=1\text{GHz}$	31
Şekil 3.7. Üçgen antenin uzak alan örüntüsü, a) $f=2\text{GHz}$, b) $f=3\text{GHz}$	32
Şekil 3.8. Üçgen antenin uzak alan örüntüsü, $f=4\text{GHz}$	32
Şekil 3.9. $f=75\text{MHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı	33
Şekil 3.10. $f=75\text{MHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı	33
Şekil 3.11. $f=450\text{MHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı	34
Şekil 3.12. $f=450\text{MHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı	34

Şekil 3.13. $f=750\text{MHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı	35
Şekil 3.14. $f=750\text{MHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı	35
Şekil 3.15. $f=1\text{GHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı	36
Şekil 3.16. $f=1\text{GHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı	36
Şekil 3.17. $f=2\text{GHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı	37
Şekil 3.18. $f=2\text{GHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı	37
Şekil 3.19. $f=3\text{GHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı	38
Şekil 3.20. $f=3\text{GHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı	38
Şekil 3.21. $f=4\text{GHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı	39
Şekil 3.22. $f=4\text{GHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı	39
Şekil 4.1. a) x-y düzlemine yerleştirilmiş üçgen anten, b) Kartezyen koordinatlarda (θ, ϕ) açılarının gösterimi	40
Şekil 4.2. $L=0.25\lambda$, uzak alan örüntüsü	41
Şekil 4.3. $L=\lambda$, uzak alan örüntüsü	42
Şekil 4.4. $L=3\lambda$, uzak alan örüntüsü	43
Şekil 4.5. $\alpha = 30^\circ$, uzak alan örüntüsü	44
Şekil 4.6. $\alpha = 60^\circ$, uzak alan örüntüsü	45
Şekil 4.7. $\alpha = 120^\circ$, uzak alan örüntüsü	46
Şekil 4.8. Üçgen antenin giriş empedansının anten uzunluğuna göre değişimi	46
Şekil 4.9. Üçgen antenin giriş empedansının antenin açıklık açısıyla değişimi	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Üçgen antenlerin empedansı ile ilgili parametrik çalışmanın sonuçları	45
Çizelge 4.2. Üçgen antenlerle ilgili parametrik çalışmanın sonuçları	48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

EAİD	: Elektrik Alan İntegral Denklemi
MY	: Momentler Yöntemi
RWG	: Rao-Wilton-Glisson
\vec{E}^i	: gelen elektrik alan
\vec{E}^s	: saçılan elektrik alan
\vec{A}	: vektör manyetik potansiyel
$\vec{\phi}$: skaler elektrik potansiyel
\vec{J}	: akım yoğunluğu
σ	: yük yoğunluğu
L	: doğrusal operatör
$f(x)$: bilinmeyen fonksiyon
$[Z_{mn}]$: empedans matrisi
$[a_n]$: bilinmeyen katsayılar vektörü
$[v_m]$: gerilim vektörü
μ	: ortamın manyetik geçirgenliği
ϵ	: ortamın elektrik geçirgenliği
\vec{F}	: vektör akım momenti

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında üçgen antenlerin analizi yapılmıştır. Bu anten ucuz ve hafif olması, boyutlarının küçüklüğü, verimli olması, üretiminin kolay olması nedeniyle çok sık kullanılmaktadır (Eldek *et al.*, 2005). Üçgen antenler, fiziksel olarak küçük olmalarının yanı sıra, dörtgen antenlere göre ışınım kaybı daha azdır (Siddiqui and Guha, 2007). Ayrıca bu antenler geniş bantlı antenlerdir (Leat *et al.*, 1998). Bu nedenle bu antenlerin analizi oldukça önemlidir.

Üçgen antenler hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan ilki 1952 yılında yapılan Brown ve Woodward'ın (Brown and Woodward, 1952) çalışmasıdır. Çalışmalarında, iki konili ve üçgen antenlerin değişik açıklık açıları ve monopol elektriksel uzunluğuna sahip olduklarında, giriş empedansları ve alan örüntülerinin değişimine bakmışlardır. R.C. Compton, R.C. McPhedran ve Z. Popovic'in yaptığı çalışmada (Compton *et al.*, 1987) ise üçgen antenin yüzeyindeki akım, modların toplamı olarak düşünülmüş ve yarı statik bir çözümle hesaplama yapılmıştır.

Üçgen antenlerin empedans bant genişliğini artırmak ve sabit ışınım örüntüsü elde etmek için çalışmalar yapılmıştır. Örneğin direnç ve kapasitif (RC) yük eklenmiş ve değişik uyarım yöntemleri kullanılmıştır (Qu *et al.*, 2006). A.A. Eldek'in çalışmasında da (Eldek *et al.*, 2005) üçgen üzerindeki yarıklı üçgen antenin bant genişliğinin arttığı görülmüştür.

C.J. Leat, N.V. Shuley, G.F. Stickley (Leat *et al.*, 1998) ve Makarov (Makarov, 2001) çalışmalarında üçgen anten analizi yapmışlardır. Bu çalışmalarda, S. M. Rao, D. R. Wilton, A. W. Glisson'ın (Rao *et al.*, 1982) makalesinde kullanılan yöntemle, anten üçgenlerle modellenmiş ve RWG (Rao-Wilton-Glisson) açılım fonksiyonu kullanarak Elektrik Alan İntegral Denklemi (EAİD) çözülmüştür. Ancak EAİD içerisinde yer alan integraller yaklaşım yapılarak çözülmüştür. Bu tez çalışmasında ise, integraller Gauss kuralı yoluyla çözülmüştür. İntegrallerin gerçek değerlerine yakın değerler elde edildiğinden daha doğru sonuçlar elde edildiği düşünülmektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasında anlatılan yöntemlerin tümü, ilk defa üçgen anten analizinde kullanılmıştır.

Bu çalışma beş temel bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1'de, üçgen antenlerin özellikleri hakkında bilgi verilmiş ve literatürde, üçgen antenlerle ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Bölüm 2'de, iletken yüzey üzerinde oluşan yüzey akımını

hesaplamak için kullanılan EAİD'nin, Momentler Yöntemi (MY) ile açılımı gösterilmiştir. EAİD'nin açılımı sırasında oluşan tekillik sorununun çözümü anlatılmıştır. Üçgen antenin uyarımında kullanılan küçük yarık modelinden bahsedilmiştir. Üçgen antenlerin giriş empedansı, uzak alan örüntüsü ve yüzey akım dağılımı hesaplamaları hakkında teorik bilgi verilmiştir. Bölüm 3'te, üçgen antenin değişik frekanslarda giriş empedansı hesaplanarak Makarov'un (Makarov, 2001) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Değişik frekanslarda, uzak alan örüntüleri hesaplanarak, xz düzleminde Makarov'un sonuçlarıyla karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca, üçgen anten üzerine düzlem dalga geldiğinde ve üçgen anten, küçük yarık modeli ile uyarıldığında değişik frekanslarda akım dağılımının nasıl değiştiği gözlenmiştir. Bölüm 4'te, üçgen antenlerle ilgili parametrik çalışmanın sonuçları gösterilmiştir. Parametrik çalışmada, değişik dalga boyuna ve açıklık açısına sahip olan üçgen antenlerin giriş empedansı ve uzak alan örüntülerinin değişimine bakılmıştır. Bölüm 5'te, ise yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar hakkında bilgi verilmiştir.

2. TEORİ

Elektromanyetik alanlar için temel alan denklemleri Maxwell denklemleridir (Ishimaru, 1991)

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Farklı geometrik yapılar, bu denklemlerin çözümünü sınırladığından, problem iyi tanımlanmalı, sınır koşulları bilinmelidir (Ergül, 2003). Değişik geometrik yapılar için birçok nümerik yöntem geliştirilmiştir. Bu bölümde, üçgen antenler için geliştirilen yöntem anlatılacaktır. EAİD, MY, RWG açılım fonksiyonları, karşılaşılan sorunlar ve çözümleri, anten uyarımı ve antenlerin uzak alan örüntüsü ile ilgili bilgiler verilecektir.

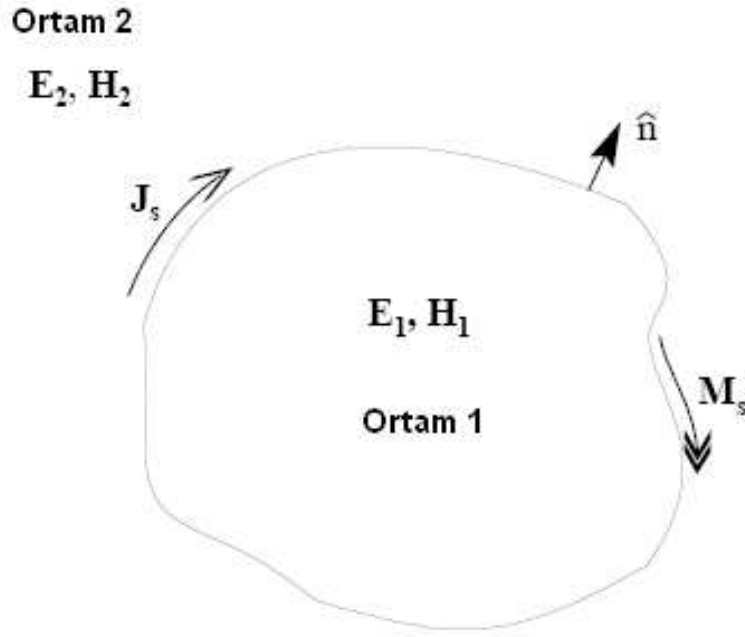
2.1 Elektrik Alan İntegral Denklemi (EAİD)

EAİD, iletken yüzey üzerinde indüklenen yüzey akımını hesaplamak için kullanılır. Bu denklem, elektrik alanın yüzey üzerindeki teğet bileşenleri üzerindeki sınır koşulları kullanılarak çözülür.

EAİD'ni oluşturmak için öncelikle problemin tanımlanması gerekir. Bu tez çalışmasında çözülen problem şu şekildedir:

S, açık veya kapalı mükemmel iletken saçıcı yüzeyi, \hat{n} bu yüzeye dik olan birim vektör, \vec{E}^i ise saçıcı yokken kaynak tarafından üretilen, S yüzeyinde \vec{J} akımını indükleyen, gelen alan olsun (Rao *et al.*, 1982). Bir yüzeyde bir ortamdan diğer ortama geçen elektrik alanın teğet bileşenleri birbirine eşittir. S, mükemmel iletken saçıcı yüzeyinde sınır koşullarına bakıldığında,

$$\hat{n} \times (\vec{E}^i + \vec{E}^s) = 0 \quad (2.5)$$



Şekil 2.1. Genel Saçılım Probleminin Geometrisi

$$-\vec{E}_{\text{tan}}^i = \vec{E}_{\text{tan}}^s \quad (2.6)$$

elde edilir. Burada tan, teğet bileşeni göstermektedir. Saçılan alan aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır:

$$\vec{E}^s = -j\omega\vec{A} - \nabla\Phi \quad (2.7)$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.8)$$

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int \sigma(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.9)$$

Burada, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, μ ve ϵ ortamın elektrik ve manyetik geçirgenlikleri, $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$, gözlem noktası, \vec{r} ile S yüzeyi üzerindeki \vec{r}' kaynak noktası arasındaki uzaklıktır. Yüzey yük yoğunluğu σ ile yüzey akım yoğunluğu \vec{J} arasındaki bağıntıyı veren süreklilik denklemi şöyledir:

$$\nabla_s \cdot \vec{J} = -j\omega\sigma \quad (2.10)$$

Eş. 2.6'daki ifadede saçılan alan potansiyeller cinsinden yazılırsa,

$$\vec{E}_{\text{tan}}^i = (j\omega\vec{A} + \nabla\Phi)_{\text{tan}} \quad (2.11)$$

elde edilir. Eş. 2.11'deki denkleme \vec{A} ve Φ değerleri yerleştirilirse EAİD elde edilmiş olur:

$$\vec{E}_{\text{tan}}^i = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_S \vec{J} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' + \frac{j}{4\pi\omega\epsilon} \int_S \nabla(\nabla \cdot \vec{J}) \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.12)$$

2.12 no'lu denklemde görülen akımın türevinden dolayı açılım fonksiyonu ve test yöntemi seçilirken dikkatli olunmalıdır.

2.2 Momentler Yöntemi

Bu bölümde EAİD'ni çözmek için kullanılan yöntem olan Momentler Yöntemi'nden (MY) bahsedilecektir. MY, doğrusal denklemleri çözmek için sıklıkla kullanılan genel bir yöntemdir (Harrington, 1993).

İntegral denklemleri genel olarak şu şekilde gösterilebilir:

$$L\{f(x)\} = g(x) \quad (2.13)$$

L, denklemin doğrusal operatörü, $f(x)$ akım dağılımını gösteren bilinmeyen fonksiyon ve $g(x)$ ise bilinen bir besleme veya uyarım fonksiyonudur. Bilinmeyen fonksiyon f , L'nin tanım bölgesinde f_1, f_2, f_3, \dots gibi fonksiyonlarla seri olarak açılabilir.

$$f = \sum_n a_n f_n \quad (2.14)$$

Burada a_n , katsayı ve f_n ise açılım fonksiyonudur (taban fonksiyonu). Açılım fonksiyonları doğrusal olarak birbirinden bağımsız olmalı ve akım dağılımının açılımının doğru yapılması için akımın davranışına uygun olarak seçilmelidir. Tam sonuç için

açılım fonksiyonlarının sonsuz toplamı alınmalıdır. Ancak pratikte bu mümkün olmayacağından yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir. Bu yüzden, gerçek sonuçla yaklaşık sonuç arasındaki hata önemli olmaktadır. Kalıntı hatası,

$$\begin{aligned} R(x) &= L\left\{\sum_n^N a_n f_n(x)\right\} - g(x) \\ &= \left[\sum_n^N a_n L\{f_n(x)\}\right] - g(x) \end{aligned} \quad (2.15)$$

olarak tanımlanır. L operatörü doğrusal olduğundan toplam operatörü ile yer değiştirebilir. Hatanın sıfır veya sıfıra yakın olması gerektiğinden, test fonksiyonu veya ağırlık fonksiyonu da denilen yeni bir fonksiyonlar kümesi kullanılarak hata ağırlıklandırılır.

Bu ağırlıklandırma,

$$\langle a(x), f(x) \rangle = \int a(x)f(x)dx \quad (2.16)$$

iç çarpımı kullanılarak ve 2.15 no'lu denklemin iç çarpımı alınarak elde edilir.

$$\langle f_m, R \rangle = \sum_{n=1}^N a_n \langle f_m, Lf_n \rangle - \langle f_m, g \rangle \quad (2.17)$$

Kalıntı hatasının test fonksiyonuyla iç çarpımının sıfır olması istendiğinden,

$$\sum_{n=1}^N a_n \langle f_m, Lf_n \rangle = \langle f_m, g \rangle \quad (2.18)$$

$$\sum_{n=1}^N a_n \int f_m(x) \cdot L\{f_n(x)\} = \int f_m(x) \cdot g(x) \quad (2.19)$$

bulunur. 2.19 no'lu denklem matris formunda yazılabilir:

$$[Z_{mn}][a_n] = [v_m] \quad (2.20)$$

Burada Z_{mn} empedans matrisi, a_n bilinmeyen katsayılar vektörü (akım vektörü), ϑ_m ise voltaj (gerilim) vektörü olarak adlandırılır. Bu ifadelerin açık halleri,

$$[Z_{mn}] = \begin{bmatrix} \langle f_1, Lf_1 \rangle & \langle f_1, Lf_2 \rangle & \dots & \langle f_1, Lf_N \rangle \\ \langle f_2, Lf_1 \rangle & \langle f_2, Lf_2 \rangle & \dots & \langle f_2, Lf_N \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle f_N, Lf_1 \rangle & \langle f_N, Lf_2 \rangle & \dots & \langle f_N, Lf_N \rangle \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$[a_n] = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\vartheta_m = \begin{bmatrix} \langle f_1, g \rangle \\ \langle f_2, g \rangle \\ \vdots \\ \langle f_N, g \rangle \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

olarak verilir. Eğer $[Z_{mn}]$ tekil değilse, bu matrisin tersi vardır. $[Z]$ matrisindeki (m,n) elemanları m -yinci test ve n -yinci açılım fonksiyonu arasındaki etkileşimi ifade eder. a_n bilinmeyen katsayıları şu şekilde bulunur:

$$[a_n] = [Z_{mn}]^{-1} [\vartheta_m] \quad (2.24)$$

Akım dağılımı olan f şu şekilde bulunur:

$$f = [f_n]^T [a_n] = [f_n]^T [Z_{mn}]^{-1} [\vartheta_m] \quad (2.25)$$

Bu çözüm, gerçek veya yaklaşık çözüm olabilir. Bunu belirleyen f_n ve f_m fonksiyonlarının seçimi ve problemin yapısıdır. Eğer $f_n = f_m$ olursa bu yöntem Galerkin yöntemi denir. Test ve açılım fonksiyonları birbirinden farklı seçilirse, karşılıklılık teoremi sağlanamayacağından, $[Z_{mn}]$ ve $[Z_{nm}]$ matrisleri birbirine eşit olmayacaktır. Ayrıca, yüksek doğruluğu olan bir sonuç elde edilemeyecektir (Sawaya, 2005). Bu tez çalışmasında Galerkin test yöntemi kullanılmıştır.

2.2.1 Geometrinin Modellenmesi ve Üçgenleştirme

Elektromanyetik saçılım ve yayılım problemlerinde kullanılan birçok geometrik model vardır. Bunlardan bazıları, tel-ağ modeli, dörtgen yama modeli, üçgen yama modeli vb.'dir. Tel-ağ modeli, ışınım örüntüsü, radar kesit alanı gibi uzak alan niceliklerini bulmada oldukça başarılı olan bir modeldir. Ancak, yüzey akımı ve giriş empedansı gibi yakın alan niceliklerini bulmak için elverişli değildir. Ayrıca çözümde, sanal döngü akımlarının oluşması, kötü koşullu moment matrisleri ve saçıcının kavite rezonans frekansında hatalı akımların olması gibi problemler tel-ağ modelinin dezavantajlarıdır.

Dörtgen yama modeliyle birçok yüzey modellenenebilir. Bu modellemede de bazı sorunlarla karşılaşılmaktadır. Örneğin bu modelleme yapılsa bile dörtgen yamalar üzerinde uygun açılım fonksiyonları tanımlamak zordur. Ayrıca dörtgenin köşeleri birbirinden bağımsız olarak modellenemeyeceğinden, modelleyicinin işi zorlaşmaktadır.

Bu tezde, her türlü yüzeyi modellemede oldukça başarılı olan düzlemsel üçgen yama modeli kullanılmıştır. Üçgenleştirme olarak adlandırılan bu yöntem, hem açık hem kapalı geometrilere uygulanabilir. Düzlemsel üçgen yamalar her türlü geometrideki yüzeyi veya sınırı modelleyebilir ve yamaların büyüklükleri yüzey geometrisi veya yüzey akımının çözünürlüğüne göre değişebilir.

Yüksek doğruluk için üçgenler yeterince küçük seçilmelidir. Fakat üçgen sayısı arttıkça bilinmeyen sayısı, n , artacak ve n arttıkça bu doğrusal sistemi çözmek zorlaşacaktır. Eğer geometrinin boyutları, dalga boyunun $1/10$ 'u olarak seçilirse bilinmeyen sayısı gerekenden fazla olmayacak ve MY'ni uygulamak daha kolay olacaktır.

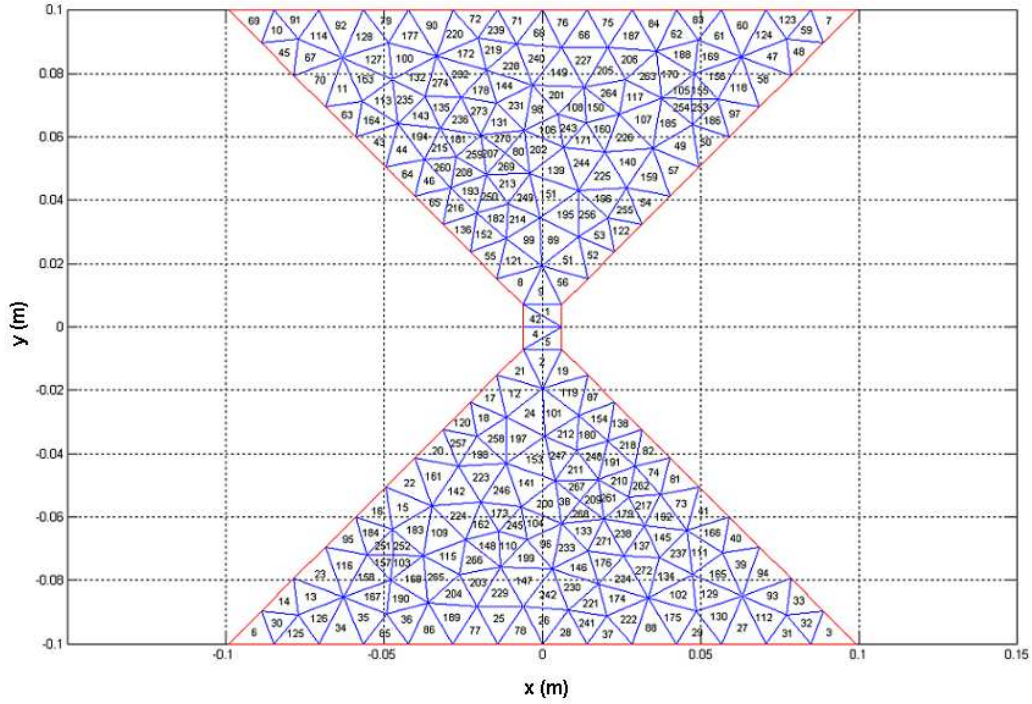
Yüzeyleri üçgenleştirmek için hazırlanmış birçok yazılım mevcuttur. Bu yazılım programları üçgenleştirme algoritmaları kullanarak yüzeyleri modellemektedir. Bunlardan en çok bilineni ve kullanılanı Delaunay algoritmasıdır. Delaunay algoritması genelde sonlu elemanlar yöntemi için üçgenleştirme yaparken kullanılır.

Bu tezde Matlab PDE araç kutusu ve Makarov'un Matlab ortamında geliştirdiği ve yayınladığı yazılım kullanılarak geometriler modellenmiştir. Şekil 2.2 'de Matlab PDE araç kutusu tarafından üçgen yamalara ayrılmış üçgen anten bulunmaktadır. Şekil 2.3'te Makarov (Makarov, 2002) tarafından yapılan çalışma kullanılarak üçgen

yamalara ayrılmış anten bulunmaktadır. Her iki anten de x-y düzleminde yerleştirilmiştir.

Bu programlar kullanılarak geometrideki her üçgene ait tanımlayıcı bilgiler elde edilmektedir. Üçgenlerin köşe koordinatları, bu koordinatların hangi üçgenlere ait olduğu ve her üçgende yer alan düğümlerin numaraları elde edilerek, hesaplamalarda kullanılmıştır.

Üçgen tanım kümesinde tanımlanabilecek birçok açılım fonksiyonu vardır. Akımın ifadesinde hataların küçük olması için yüksek mertebeli fonksiyonlar tercih edilmiştir. Bir sonraki bölümde kullanılan açılım fonksiyonu ve bu açılım fonksiyonunun neden seçildiği anlatılacaktır.

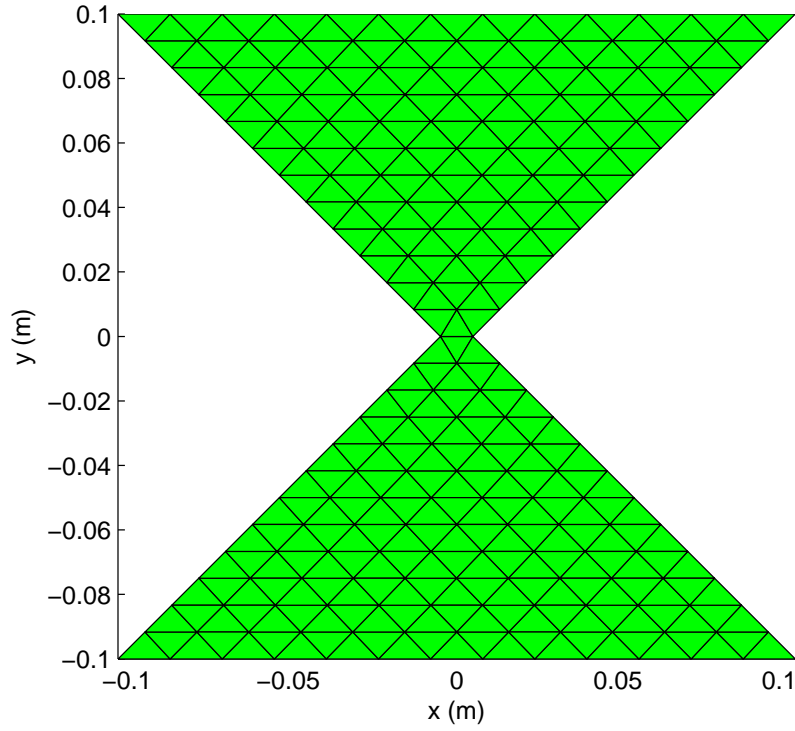


Şekil 2.2. Matlab PDE araç kutusu ile üçgenleştirme

2.2.2 Rao-Wilton-Glisson (RWG) Açılım Fonksiyonları

Bölüm 2.2'de akım dağılımının ifadesi için açılım fonksiyonları kullanılmıştır. Bu bölümde kullanılan açılım fonksiyonu ve özellikleri ile ilgili bilgi verilecektir.

Açılım fonksiyonu seçilirken, yüksek mertebeli bir açılım fonksiyonu seçilmelidir. Çünkü EAİD ıraksama operatörü içermektedir. Bu tez çalışmasında Rao-Wilton-Glisson tarafından geliştirilen RWG açılım fonksiyonları kullanılmıştır. Bu açılım



Şekil 2.3. Makarov tarafından yazılan program ile üçgenleştirme

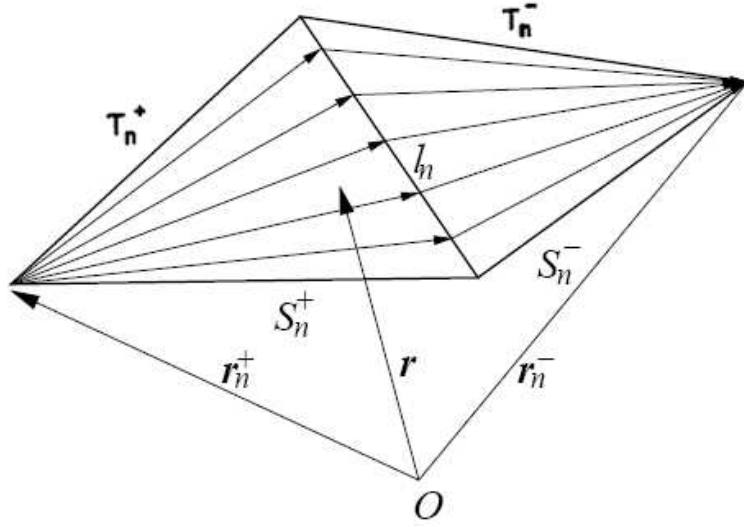
fonksiyonu, EAİD ve üçgen modelleme için oldukça uygun bir fonksiyondur.

Şekil 2.4, RWG fonksiyonunun tanımlandığı yüzeyi göstermektedir. S_n^\pm n -yinci kenara ait yüzey, r_n^\pm n -yinci kenara ait orijinle bağımsız düğüm arasındaki uzaklık, ℓ_n n -yinci kenarın uzunluğudur. \pm işaretleri referans akım yönündedir. Vektör açılım fonksiyonu,

$$f_n(\vec{r}) = \begin{cases} \frac{\ell_n}{2A_n^+} \rho_n^+ & , \quad r \in T_n^+ \\ \frac{\ell_n}{2A_n^-} \rho_n^- & , \quad r \in T_n^- \\ 0 & , \quad \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (2.26)$$

olarak tanımlanır. Burada A_n^\pm , n -yinci bilinmeyene ait yüzeyin alanı, ρ_n^\pm , n -yinci kenara ait, \vec{r} vektörü ile bağımsız düğüm arasındaki uzaklıktır. $\vec{\rho}_n$, T_n^+ içinde yer alıyorsa $(\vec{r} - \vec{r}_n^+)$, T_n^- içinde yer alıyorsa $(\vec{r}_n^- - \vec{r})$ 'dir. RWG açılım fonksiyonunun bazı özellikleri şunlardır (Shen, 1994):

- T_n^+ ve T_n^- 'nin oluşturduğu sınır boyunca çizgisel yükler yoktur.



Şekil 2.4. Üçgen tanım kümesinde tanımlı RWG açılım fonksiyonu parametreleri

- Ortak kenara dik olan akım bileşeni, kenar boyunca sabit ve süreklidir.
- f_n 'nin yüzey ıraksaklığı şu şekildedir:

$$\nabla \cdot f_n(\vec{r}) = \begin{cases} \frac{\ell_n}{A_n^+}, & r \in T_n^+ \\ \frac{\ell_n}{A_n^-}, & r \in T_n^- \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (2.27)$$

Görüldüğü gibi RWG açılım fonksiyonunun ıraksaması vardır. RWG fonksiyonunun bu özelliği sayesinde EAİD içerisinde bulunan ıraksama operatörüyle ilgili sorun da halledilmiş olur. Ayrıca test fonksiyonunun da ıraksamasının alınması gerektiğinden RWG fonksiyonu test fonksiyonu olarak da kullanılabilir. Böylece Galerkin test yöntemi EAİD'ye başarıyla uygulanabilir.

Akımın RWG fonksiyonuyla ifadesi

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N a_n \vec{f}_n(\vec{r}) \quad (2.28)$$

'dir. N, sınırdaş olmayan bir kenarla eşleştirildiğinde, en fazla 3 tane açılım fonksiyonu sıfırdan farklı olur. n -yinci kenara ait \vec{f}_n 'nin dik bileşeni bir olduğundan, her a_n

katsayısı n -yinci kenardan geçen akım yoğunluğunun dik bileşeni olarak adlandırılabilir. Her açılım fonksiyonu, akım yüzeye dik olduğu için, her üçgende bağımsızdır ve a_n katsayıları da bu yüzden bağımsız niceliklerdir.

2.2.3 EAİD'nin Momentler Yöntemiyle İfadesi

Bu bölümde, EAİD'ne MY'nin nasıl uygulandığı gösterilecektir. Galerkin test yöntemi kullanıldığından açılım ve test fonksiyonu olarak RWG fonksiyonları kullanılmıştır. Programın daha hızlı olması, hesaplamaların daha kolay olması için EAİD içerisindeki integraller daha küçük parçalara ayrılmıştır. İntegrallerin hesaplanması yapılırken Green fonksiyonunun doğasından dolayı tekillik sorunu oluşmaktadır. Tekillik sorunu gözlem noktası kaynak noktasına yaklaştıkça oluşur. Tekillik sorununu çözmek için integraller analitik ve nümerik olarak ayrılmış ve hesaplamalar ayrı ayrı yapılmıştır.

Bölüm 2.1'de EAİD verilmişti. Eş. 2.12 yeniden yazılırsa,

$$\vec{E}_{\text{tan}}^i = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_S \vec{J} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' + \frac{j}{4\pi\omega\epsilon} \int_S \nabla\nabla \cdot \vec{J} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.29)$$

Akım yoğunluğu, \vec{J} 'nin açılım fonksiyonlarıyla ifadesi Eş. 2.29'a yerleştirilirse,

$$\vec{E}_{\text{tan}}^i = \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_{S_n} \sum_{n=1}^N a_n \vec{f}_n(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' + \frac{j}{4\pi\omega\epsilon} \int_{S_n} \nabla\nabla \cdot \sum_{n=1}^N a_n \vec{f}_n(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.30)$$

elde edilir. İntegral operatörü doğrusal bir operatör olduğundan toplam operatörü ile yer değiştirebilir. Ayrıca, $k^2 = \omega^2\mu\epsilon$ kullanılarak,

$$\vec{E}_{\text{tan}}^i = \sum_{n=1}^N \left[\frac{j\omega\mu}{4\pi} \int_{S_n} a_n f_n(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' + \frac{j\omega\mu}{4\pi\omega^2\mu\epsilon} \int_{S_n} \nabla\nabla \cdot a_n f_n(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \right] \quad (2.31)$$

$$\vec{E}_{\text{tan}}^i = \sum_{n=1}^N \frac{j\omega\mu}{4\pi} \left[\int_{S_n} a_n f_n(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' + \frac{1}{k^2} \int_{S_n} \nabla\nabla \cdot a_n f_n(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \right] \quad (2.32)$$

elde edilir. Hata fonksiyonunun sıfır olması için Eş. 2.32, RWG fonksiyonuyla test edilir ve

$$\langle \vec{E}_i, \vec{f}_m \rangle = \langle \vec{J}, \vec{f}_m \rangle \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} \int_{S_m} \vec{E}_{\text{tan}}^i \cdot \vec{f}_m(\vec{r}) ds &= \int_{S_m} \vec{f}_m(\vec{r}) \cdot \left[\sum_{n=1}^N \frac{j\omega\mu}{4\pi} \left[\int_{S_n} a_n f_n(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \right] \right] ds \\ &+ \int_{S_m} \vec{f}_m(\vec{r}) \cdot \left[\sum_{n=1}^N \frac{j\omega\mu}{4\pi} \left[\frac{1}{k^2} \int_{S_n} \nabla \nabla \cdot a_n f_n(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \right] \right] ds \end{aligned} \quad (2.34)$$

bulunur. Eş. 2.34, matrislerle aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\sum_{n=1}^N a_n Z_{mn} = \vartheta_m \quad (2.35)$$

Burada,

$$Z_{mn} = \int_{S_m} f_m(\vec{r}) \cdot \left[\int_{S_n} f_n(\vec{r}') \cdot \vec{G}_n(\vec{r}, \vec{r}') ds' \right] ds \quad (2.36)$$

$$\vartheta_m = \int_{S_m} \vec{E}_i(\vec{r}) \cdot \vec{f}_m(\vec{r}) ds \quad (2.37)$$

$$\vec{G}_n(\vec{r}, \vec{r}') = \left[I + \frac{\nabla \nabla}{k^2} \right] g(\vec{r}, \vec{r}') \quad (2.38)$$

$$\vec{G}_n(\vec{r}, \vec{r}') = \left[I + \frac{\nabla \nabla}{k^2} \right] g(\vec{r}, \vec{r}') \quad (2.39)$$

$$g(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{-jkR}}{R} = \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} \quad (2.40)$$

olarak verilir. $[Z_{mn}]$ matrisini oluşturan integral birbirinden bağımsız integrallere ayrılabilir:

$$Z_{mn} = \int_{S_m} f_m(\vec{r}) \cdot \left[\int_{S_n} f_n(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \right] ds + \int_{S_m} f_m(\vec{r}) \cdot \left[\int_{S_n} \frac{\nabla \nabla e^{-jkR}}{k^2 R} \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right] ds \quad (2.41)$$

Denklemin sağ tarafında iraksama operatörü içeren kısım şu şekilde yazılabilir:

$$\int_{S_m} f_m(\vec{r}) \cdot \left[\int_{S_n} \frac{\nabla \nabla e^{-jkR}}{k^2 R} \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right] ds = \frac{1}{k^2} \int_{S_m} f_m(\vec{r}) \cdot \nabla \left[\int_{S_n} \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right] ds \quad (2.42)$$

Iraksama operatörünün $\nabla \cdot (\psi \vec{A}) = \psi \nabla \cdot \vec{A} + \vec{A} \cdot \nabla \psi$ (Balanis, 1982) özelliği kullanılırsa Eş.2.42,

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot \left\{ f_m(\vec{r}) \int_{S_n} \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right\} ds \\ &- \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot f_m(\vec{r}) \left\{ \int_{S_n} \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right\} ds \\ &= \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \hat{u} \cdot f_m(\vec{r}) \left\{ \int_{S_n} \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right\} dl \\ &- \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot f_m(\vec{r}) \left\{ \int_{S_n} \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right\} ds \end{aligned} \quad (2.43)$$

olarak yeniden yazılabilir. Burada, \hat{u} , üçgen çifti etrafındaki dik bileşeni ifade etmektedir. RWG fonksiyonlarında sınırlarda akan akımın dik bileşeni olmadığından,

$$\frac{1}{k^2} \int_{\partial S_m} \hat{u} \cdot f_m(\vec{r}) \left\{ \int_{S_n} \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right\} dl = 0 \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{k^2} \int_{S_m} f_m(\vec{r}) \cdot \nabla \left\{ \int_{S_n} \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right\} ds = \\ - \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot f_m(\vec{r}) \left\{ \int_{S_n} \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right\} ds \end{aligned} \quad (2.45)$$

yazılabilir. Ayrıca,

$$\nabla G_o = -\nabla' G_o \quad (2.46)$$

eşitliği, Eş. 2.45'te kullanılırsa

$$\begin{aligned} \frac{1}{k^2} \int_{S_m} f_m(\vec{r}) \cdot \nabla \left\{ \int_{S_n} \nabla g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right\} ds = \\ \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot f_m(\vec{r}) \left\{ \int_{S_n} \nabla' g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' \right\} ds \end{aligned} \quad (2.47)$$

elde edilir. Aynı işlem içteki integrale uygulanırsa

$$\begin{aligned} \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot f_m(\vec{r}) \int_{S_n} \nabla' g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') ds' ds \\ = \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot f_m(\vec{r}) \int_{S_n} \nabla' \{ g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot f_n(\vec{r}') \} ds' ds \\ - \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot f_m(\vec{r}) \int_{S_n} g(\vec{r}, \vec{r}') \nabla' \cdot f_n(\vec{r}') ds' ds \end{aligned} \quad (2.48)$$

bulunur. 2.48 no'lu denklemin sağ tarafındaki denklemlerden ilkinin iraksama teoremi uygulanırsa,

$$\frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot f_m(\vec{r}) \int_{\Delta S_n} \hat{u} \cdot \{ f_n(\vec{r}') g(\vec{r}, \vec{r}') \} d\ell' ds = 0 \quad (2.49)$$

elde edilir. Böylece, $[Z_{mn}]$ empedans matrisiyle ilgili integral denklemlerin son hali,

$$\begin{aligned} Z_{mn} = \int_{S_m} f_m(\vec{r}) \cdot \int_{S_n} g(\vec{r}, \vec{r}') f_n(\vec{r}') ds' ds \\ - \frac{1}{k^2} \int_{S_m} \nabla \cdot f_m(\vec{r}) \int_{S_n} g(\vec{r}, \vec{r}') \nabla' \cdot f_n(\vec{r}') ds' ds \end{aligned} \quad (2.50)$$

olarak yazılabilir. Görüldüğü gibi Z_{mn} matrisini hesaplamak için gerekli integraller uygun forma getirilmiştir. Seçilen RWG fonksiyonu yüksek mertebeli bir fonksiyon olduğu için, ıraksaması vardır ve Bölüm 2.2.2'de bu konudan bahsedilmiştir. Eş. 2.26'da tanımlı olan açılım ve test fonksiyonları Eş. 2.50'de yerine konursa empedans matrisi,

$$Z_{ik, jl} = \frac{\ell_{ik}\ell_{jl}}{4A_iA_j} \int_{S_i} (\vec{r} - \vec{r}_{ik}) \cdot \int_{S_j} (\vec{r}' - \vec{r}_{jl}) g(\vec{r}, \vec{r}') ds' ds - \frac{1}{k^2} \frac{\ell_{ik}\ell_{jl}}{A_iA_j} \int_{S_i} \int_{S_j} g(\vec{r}, \vec{r}') ds' ds \quad (2.51)$$

olarak elde edilir. i ve j , i -yinci ve j -yinci üçgenler arasındaki etkileşimi göstermektedir. k ve l ise açılım ve dağılım fonksiyonlarının üçgendeki sıralamasını göstermektedir. Hesaplama yapılırken daha etkin ve hızlı sonuç elde etmek için bilinmeyenler arasındaki etkileşimi hesaplamak yerine, üçgen üçgen dolaşarak hesaplama yapılmıştır. Böylece her üçgene ait integraller birer kez hesaplanmış ve her bilinmeyen için gerekli katsayılar sonradan eklenmiştir. Her integrali dokuz defa hesaplamak yerine bir defa hesaplamak programın hızını oldukça artırmıştır.

2.2.3.1 Tekillik Sorununun Ortadan Kaldırılması

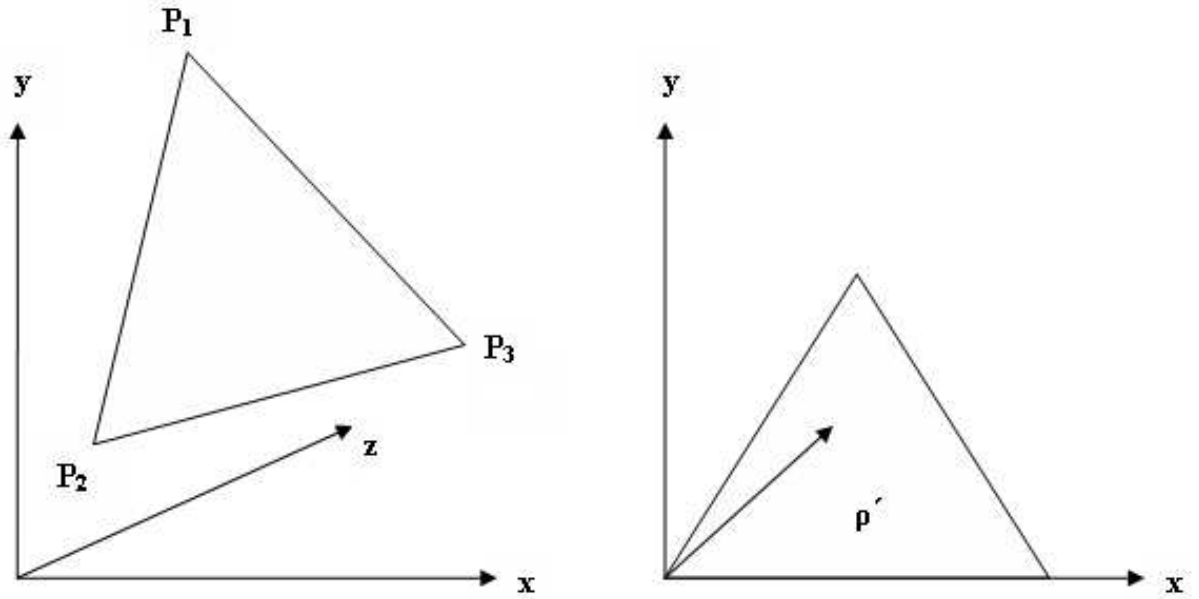
Yüzey integral denklemlerini MY ile çözmek için, problemin tanımlandığı geometrik yapı yamalara ayrılır. Böylece problemin skaler ve/veya vektörel bilinmeyenleri açılım fonksiyonlarıyla basitçe tanımlanabilir. Bu yamalar üzerinde yüzey integrallerinin çözümünde tekillik sorunu olduğundan, integraller sadeleştirilerek yaklaşık veya tam değerleri bulunmalıdır.

Green fonksiyonlarından dolayı oluşan tekillik sorununu çözmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada Green fonksiyonu içeren integrallere $\frac{1}{R}$ eklenip çıkarılmış, daha sonra bu integraller Graglia'nın çalışmasında anlatılan yöntemle çözülmüştür (Graglia, 1993). Eş.2.51 'de iç kısımda yer alan integraller şu şekilde

yazılabilir:

$$\begin{aligned} \int_{S_j} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' &= \int_{S_j} \frac{e^{-jkR} - 1}{R} ds' + \int_{S_j} \frac{1}{R} ds' \\ \int_{S_j} r' \frac{e^{-jkR}}{R} ds' &= \int_{S_j} r' \frac{e^{-jkR} - 1}{R} ds' + \int_{S_j} \frac{r'}{R} ds' \end{aligned} \quad (2.52)$$

Eş. 2.52 'de yer alan integralleri hesaplamak için açılım ve test üçgenleri yerel koordinatlarda yeniden tanımlanmalıdır. Şekil 2.5'te bu dönüşümün nasıl yapıldığı gösterilmiştir. Açılım üçgeninin bir köşesi orijinde olacak şekilde dönüşüm yapılmıştır.



Şekil 2.5. Açılım üçgeninin yerel koordinat dönüşümü yapıldıktan sonraki konumu

Bu işlemler yapılırsa, Bölüm 2.2.3'te yer alan Eş. 2.51 şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned}
Z_{ik,jl} &= \frac{\ell_{ik}\ell_{jl}}{4A_iA_j} \int_{S_i} (\vec{r} - \vec{r}_{ik}) \cdot \int_{S_j} \vec{r}' g(\vec{r}, \vec{r}') ds' ds \\
&\quad - \frac{\ell_{ik}\ell_{jl}}{4A_iA_j} r_{jl} \int_{S_i} (\vec{r} - \vec{r}_{ik}) \cdot \int_{S_j} g(\vec{r}, \vec{r}') ds' ds \\
&\quad - \frac{1}{k^2} \frac{\ell_{ik}\ell_{jl}}{A_iA_j} \int_{S_i} \int_{S_j} g(\vec{r}, \vec{r}') ds' ds \\
&= \frac{\ell_{ik}\ell_{jl}}{4A_iA_j} \int_{S_i} (\vec{\rho} - \vec{\rho}_{ik}) \cdot \int_{S_j} \vec{\rho}' \frac{e^{-jkR}}{R} ds' ds \\
&\quad - \frac{\ell_{ik}\ell_{jl}}{4A_iA_j} \rho_{jl} \int_{S_i} (\vec{\rho} - \vec{\rho}_{ik}) \cdot \int_{S_j} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' ds \\
&\quad - \frac{1}{k^2} \frac{\ell_{ik}\ell_{jl}}{A_iA_j} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{e^{-jkR}}{R} ds' ds
\end{aligned} \tag{2.53}$$

Burada yerel koordinatlarda hesaplama yapıldığından \vec{r} ve \vec{r}' , $\vec{\rho}$ ve $\vec{\rho}'$ olarak değiştirilmiştir. Gözlem noktası ve kaynak noktası arasındaki uzaklık ise $R = |\vec{\rho} - \vec{\rho}'|$ olmuştur. Eş. 2.53 hesaplanırken integraller parçalara ayrılmış, böylece hesaplamalar kolaylaşmıştır (Ergül, 2003).

$$Z_{ik,jl} = \frac{\ell_{ik}\ell_{jl}}{A_iA_j} \left[-\frac{l_1}{k^2} + \frac{l_2}{4} + \vec{\rho}_{ik} \cdot \vec{\rho}_{jl} \frac{l_1}{4} - \frac{x_{ik}l_3 + y_{ik}l_4}{4} - \frac{x_{jl}l_5 + y_{jl}l_6}{4} \right] \tag{2.54}$$

$$l_1 = \int \int \frac{e^{-jkR} - 1}{R} ds' ds + \int \int \frac{1}{R} ds' ds \tag{2.55}$$

$$\begin{aligned}
l_2 &= \int \int \frac{xx' e^{-jkR} - 1}{R} ds' ds + \int \int \frac{xx'}{R} ds' ds \\
&\quad + \int \int \frac{yy' e^{-jkR} - 1}{R} ds' ds + \int \int \frac{yy'}{R} ds' ds
\end{aligned} \tag{2.56}$$

$$l_3 = \int \int \frac{x e^{-jkR} - 1}{R} ds' ds + \int \int \frac{x}{R} ds' ds \tag{2.57}$$

$$l_4 = \int \int \frac{y e^{-jkR} - 1}{R} ds' ds + \int \int \frac{y}{R} ds' ds \tag{2.58}$$

$$I_5 = \int \int x' \frac{e^{-jkR} - 1}{R} ds' ds + \int \int \frac{x'}{R} ds' ds \quad (2.59)$$

$$I_6 = \int \int y' \frac{e^{-jkR} - 1}{R} ds' ds + \int \int \frac{y'}{R} ds' ds \quad (2.60)$$

(2.55-2.60) denklemlerinde yer alan x , y test üçgeniyle x' , y' ise açılım fonksiyonuyla ilgili yerel koordinatlardaki uzunluklardır.

2.2.3.2 İntegrallerin Nümerik Olarak Hesaplanması

Bölüm 2.2.3.1'de integraller parçalara ayrılmıştı. Bu integraller hesaplanırken oluşan tekillik sorunu Graglia'nın çalışmasında anlatılan yöntemle nümerik ve analitik integrallerin parçalara ayrılmasıyla çözülmüştür. İntegralleri hesaplamak için Gauss kuralları (Gaussian quadrature) kullanılmıştır. Gauss kuralı, alınan integralin, tanım kümesi içerisinde belirli noktalarda hesaplanmış fonksiyonların, ağırlıklandırılmış toplamlarıyla integrallerin yaklaşık değerlerini bulmak için kullanılan bir integral alma yöntemidir.

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{n=1}^N A_n f(x_n) + E(f) \quad (2.61)$$

A_n katsayıları, önceden hesaplanmış ağırlık katsayılarıdır. Bu değerler yazılan programda kullanılmıştır. x_n noktalarının sayısı ise integrasyonun gerçek değere yaklaşmasına göre değişmektedir. Kullanılan x_n noktaları az seçildiğinde bazen integral gerçek değerinden çok uzakta olmakta, çok seçildiğinde ise gereksiz işlem kalabalığına yol açmaktadır. Bu nedenle belli koşullar altında uyarlamalı integrasyon (adaptive integration) yapılmıştır. İntegral alınan üçgenlerin birbirine yakınlığı, üzerinde integral alınan üçgenlerin kenar uzunluğu-yükseklik oranı, üçgenlerin alanlarının dalga boyundan çok küçük olması gibi koşullar integral için kaç tane nokta kullanılması gerektiğini belirler. Belirlenen nokta sayısı ile integral alınır. Daha sonra nokta sayısı artırılıp yeniden integral alınır ve bir önceki değerle karşılaştırılır. Aradaki hata, belirlenen hata değerinden küçükse işlem durdurulur. Hata daha büyükse nokta sayısı artırılır ve bir önceki hata değeriyle karşılaştırılır. Bu işlemler, hata değeri istenen değerden daha küçük olana kadar devam eder.

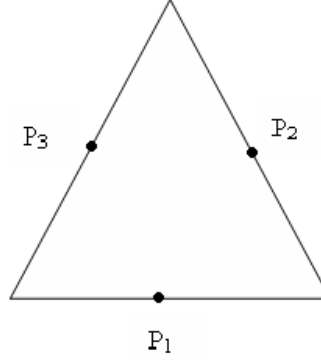
Sonuç olarak, yüksek mertebeli Gauss kuralları kullanmak yerine, uyarlamalı bir algoritma kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan uyarlamalı algoritma ile ilgili bilgi verilecektir.

Yöntem :

- Adım 1 : Üçgen üzerinde, kenarların ortası olacak şekilde 3 nokta belirlenir. İntegral şu şekilde hesaplanır:

$$I_3 = [f(p_1) + f(p_2) + f(p_3)] \frac{A_j}{3} \quad (2.62)$$

(A_j , j. üçgenin alanı)



Şekil 2.6. Yöntem-Adım 1

- Adım 2 : Üçgenlerin ortanca noktalarında 3 yeni nokta daha belirlenir. Bu altı noktanın integrali,

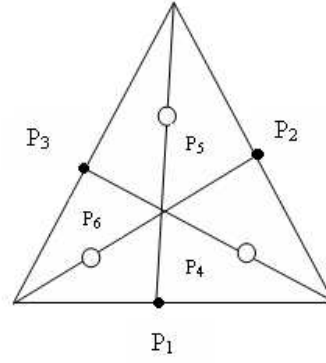
$$I_6 = [f(p_1) + f(p_2) + f(p_3) + 2f(p_4) + 2f(p_5) + 2f(p_6)] \frac{A_j}{9} \quad (2.63)$$

'dir.

- Adım 3 : 6-noktalı ve 3-noktalı integral değerleri karşılaştırılır:

$$E_{3,6} = \frac{|I_6 - I_3|}{|I_6|} \quad (2.64)$$

Eğer hata değeri belirlenen eşik değerinden azsa integralin yakınsadığı kabul edilir. I_6 değeri integralin değeri olarak alınır. Hata daha büyükse, daha fazla noktada örneklenerek istenen yakınsama değerine ulaşılır.



Şekil 2.7. Yöntem-Adım 2

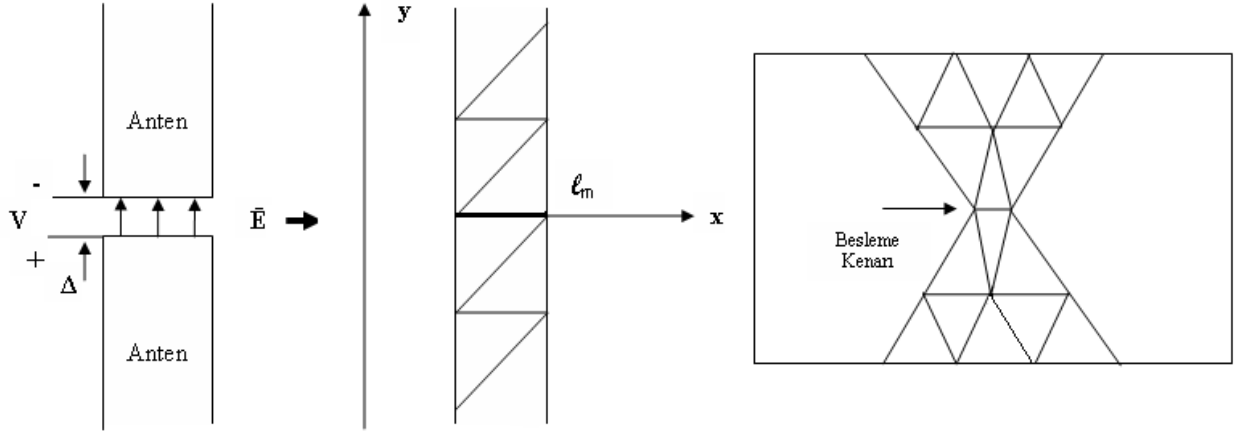
- Adım 4 : Yakınsaklık elde edilmediyse, bu yan üçgenler, integral alma işleminin yapıldığı yeni tanım kümesi olarak alınır ve Adım 1'deki işlemler bu yan üçgenlerde yeniden yapılır.
- Adım 5 : Bu uyarlamalı algoritma yan üçgenlerde 3-noktalı ve 6-noktalı integral sonuçlarının karşılaştırılmasıyla devam eder. Yan üçgenlerden birinde yakınsaklık elde edildiğinde işlem biter, ancak diğer yan üçgenlerde algoritma devam edebilir.

Görüldüğü gibi bu yöntemde, yakınsaklık, tüm yan üçgenlerde elde edilene kadar algoritma devam etmektedir. Nokta sayısı arttıkça fonksiyonun değeri hızla değişebilmektedir. Bunun nedeni, algoritmanın örnekleme sadece yakınsamanın olmadığı bölgede daha yoğun bir şekilde yapmasıdır. Bu yöntemin dezavantajı integrasyon tanım kümesinin en-boy oranı büyüdükçe ortaya çıkmaktadır.

2.3 Anten Uyarımı

Gelen dalga olmadığında gerilim kaynağı olarak yeni bir uyarım modeli tanımlamak gerekir. Antenler genelde elektriksel olarak birbirine yakın uçlardan, iletim hatlarıyla beslenirler. Bu da, bir ideal gerilim kaynağının küçük yarıklar vasıtasıyla bağlanması demektir. Şekil 2.8'de bu bağlantı bir dipol ve üçgen anten için gösterilmiştir (Makarov, 2001).

ℓ_m uyarılan kenarın uzunluğudur. Yarık içindeki elektrik alanı tanımlamanın birçok yolu vardır. En basit ve RWG kenar için en uygun yol delta-fonksiyon üretici veya besleme kenarı modelidir (Oo and Li, 2006). Bu modelde yarık, önemsiz sayılabi-



Şekil 2.8. Uyarılan kenarın (besleme kenarı) (ℓ_m) dipol anten ve üçgen antende gösterimi

lecek kadar küçük bir Δ genişliği olan bir yarık gibi düşünülür. Yarık boyunca gerilim V ise, yarıktaki elektrik alan,

$$\vec{E} = -\nabla\Phi = \frac{V}{\Delta}\hat{a}_y \quad (2.65)$$

olur. Burada Φ , elektriksel potansiyeldir. Δ sıfıra yaklaştıkça, alan sonsuza gider. O halde, delta-fonksiyon yaklaşımı yapılabilir :

$$\vec{E} = V\delta(y)\hat{a}_y \quad (2.66)$$

Eş. 2.66'da yarık üzerindeki elektrik alanın integrali, uygulanan gerilime eşit olduğundan şu şekilde yazılabilir:

$$\int E_y dy = V \quad (2.67)$$

Bu yarık yerine sınır elemanı olan, n -yinci kenarı kullanmak daha uygun olur. Bu kenara ait olan RWG elemanı sadece bir tanedir. Şekil 2.8'de (Leat *et al.*, 1998) besleme kenarları görülebilir.

$Z \cdot I = V$ eşitliğindeki voltaj vektöründe n -yinci RWG elemanı dışındaki tüm elemanlar sıfırdır. Bu bilgiler kullanılarak MY denklemindeki voltaj vektörü şu şekilde

hesaplanabilir:

$$V_{n=m} = \int_{T_{n=m}} \vec{E} \cdot \vec{f}_m ds = V \int_{T_{n=m}} \delta(y) \hat{a}_y \cdot \vec{f}_m ds = \ell_m V \quad , m = n \quad (2.68)$$

$$V_{n=m} = \int_{T_m} \vec{E} \cdot \vec{f}_m ds = 0 \quad , \text{diğer durumda}$$

Eş. 2.68'de RWG açılım fonksiyonu f_n 'nin kenara dik olan bileşeninin her zaman bire eşit olması özelliği kullanılmıştır. Uyarım (besleme) voltajı 1 V olarak alınmıştır.

2.4 Giriş Empedansı

Anten için önemli parametrelerden biri antenin giriş empedansıdır. Empedans bilindiği takdirde geri dönüş kaybı gibi anten parametrelerini bulmak oldukça kolaydır. Giriş empedansı, antenin terminallerinde görülen empedans, veya terminal çiftlerindeki gerilim-akım oranı, veya antenin herhangi bir noktasındaki elektrik alanın, manyetik alana oranı olarak tanımlanır (Balanis,1982). Bir önceki bölümde bahsedilen uyarım modelinde, empedans, besleme geriliminin ($V = 1 V$), besleme kenarındaki (n . kenar) toplam akımın dik bileşene oranı olarak hesaplanır. Yüzey akımlarının RWG taban fonksiyonuyla açılımı şu şekildedir :

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N a_n f_n(\vec{r}) \quad (2.69)$$

Sadece $n = m$ olduğunda açılım fonksiyonu, empedans hesaplamalarında kullanılır. Çünkü diğer açılım fonksiyonlarının m -yinci kenara dik bileşeni yoktur. Ayrıca RWG taban fonksiyonu f_m 'nin m -yinci kenara dik bileşeni bire eşittir ve bu kenardaki toplam akım,

$$I = \ell_m f_m \quad (2.70)$$

'dir. ℓ_m , m -yinci kenarın uzunluğudur. Böylece anten empedansı basitçe

$$Z_A = \frac{V}{\ell_m f_m} = \frac{V_m}{\ell_m^2 f_m} \quad (2.71)$$

olarak hesaplanabilir. Giriş empedansı ohm (Ω) cinsinden ölçülür ve genelde karmaşık bir nicelikdir.

2.5 RWG Açılım Fonksiyonları ile Uzak Alan Örüntüsünün Hesaplanması

Uzak alan bölgesi, antenin açısal alan dağılımının antene olan uzaklıktan bağımsız olduğu bölge olarak tanımlanır (Balanis, 1982). Antenin ışıma örüntüsü ise, yayılan gücün dağılımının uzaydaki yöneliminin fonksiyonudur (Collin, 1985). Işınım örüntülerini 3 boyutlu çizmek yerine düzlemsel ara kesitlerini çizmek tercih edilir. E-düzlemi, yayılan alanın maksimum olduğu ve elektrik alanının bu düzlemde yer aldığı düzlemdir. H-düzlemi ise, \vec{H} manyetik alanın bulunduğu ve yayılımının en yüksek olduğu düzlemdir.

Bu bölümde uzak alanda örüntünün nasıl hesaplandığı anlatılacaktır. RWG fonksiyonlarıyla gösterilen akımın bir cisim üzerinde indüklenmesiyle radar kesit alanı hesaplanmıştır. Uzak alanda, yani $r \gg \lambda$ ise elektrik alan,

$$\vec{E}(\vec{r}) = -jk\eta \left[\hat{\theta}\hat{\theta} \cdot \vec{F}(\theta, \phi) + \hat{\phi}\hat{\phi} \cdot \vec{F}(\theta, \phi) \right] g(r) \quad (2.72)$$

$$g(r) = \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.73)$$

olarak yazılabilir. Burada $\vec{F}(\theta, \phi)$, vektör akım momentidir ve

$$\vec{F}(\theta, \phi) = \int_{S'} \vec{J}(\vec{r}') e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}'} d\vec{r}' \quad (2.74)$$

ile verilir. Akımın açılımında RWG fonksiyonları kullanıldıysa, açılım üçgeni için vektör akım momentisi şu şekilde bulunabilir (Ergül and Gürel, 2007) :

$$\begin{aligned} \vec{F}(\theta, \phi) &= \int_{S'} \sum_{n=1}^N a_n \vec{f}_n(\vec{r}') e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}'} d\vec{r}' \\ &= \sum_{n=1}^N a_n \int_{S'} f_n(\vec{r}') e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}'} d\vec{r}' \end{aligned} \quad (2.75)$$

$$\vec{k} = k(\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \quad (2.76)$$

Radar Kesit Alanı (RKA), vektör akım momenti kullanılarak hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} RKA(\theta, \phi) &= \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 P^{rad}(\vec{r}) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 |\vec{E}(\vec{r})|^2 \\ &= \frac{k^2 \eta^2}{4\pi} |\hat{\theta}\hat{\theta} \cdot \vec{F}(\theta, \phi) + \hat{\phi}\hat{\phi} \cdot \vec{F}(\theta, \phi)|^2 \end{aligned} \quad (2.77)$$

2.6 Düzlem Dalga ile İndüklenmiş Üçgen Antenin Yüzey Akım Dağılımının Bulunması

Gelen dalga düzlem dalga ise gelen elektrik alan:

$$\vec{E}^i = (\hat{\theta}\hat{\theta} \cdot \vec{F}(\theta, \phi) + \hat{\phi}\hat{\phi} \cdot \vec{F}(\theta, \phi)) e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (2.78)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada \vec{F} , vektör akım momentidir ve bir önceki bölümde nasıl hesaplandığı anlatılmıştır. $(\hat{\theta}, \hat{\phi})$ küresel koordinatlarda gelen düzlem dalganın geliş açısını gösterir. \vec{k} yayılım vektörü Eş.2.76'daki gibi hesaplanır.

Elektrik alan hesaplandıktan sonra empedans matrisiyle çarpılarak akım vektörü elde edilir. Bu akım vektörü düzlem dalganın üçgen anten üzerinde indüklediği akımdır. 3.Bölüm'de diğer sonuçların yanı sıra değişik frekanslarda üçgen antende akım dağılımının nasıl olduğu da gösterilecektir.

3. ÜÇGEN ANTENLER

Bir önceki bölümde, sonlu iletken yapılara uygulanan EAİD'nin çözümü için gereken eşitlikler ve bu eşitliklerin çözümlerinde kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Ayrıca, anten uyarımı, giriş empedansı ve uzak alan örüntüsünün nasıl bulunduğu konularıyla ilgili bilgi verilmiştir. Bu bölümde ise, üçgen antenler anlatılan bu yöntemlerle incelenmiş ve elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

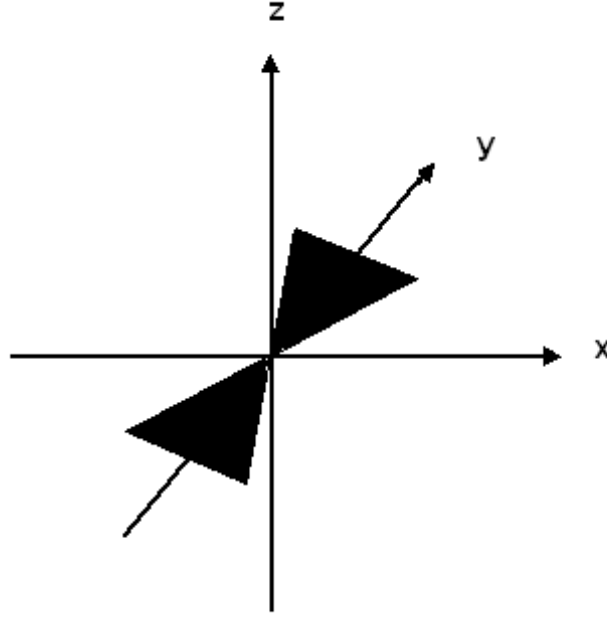
3.1 Üçgen Antenlerin Giriş Empedansı

Bölüm 2.4'te üçgen antenlerin giriş empedansının nasıl hesaplandığı hakkında bilgi verilmiştir. Bu bilgiler kullanılarak üçgen antenin değişik frekanslarda giriş empedansları hesaplanmıştır. Elde edilen empedans değerleri Makarov'un çalışmasındaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan üçgen anten, Şekil 2.3'te gösterilen üçgen antendir. Bu anten, 336 üçgene ayrılmış, açıklık açısı, $\alpha = 90^\circ$ ve toplam uzunluğu 0.2m olan bir antendir. Antenin bulunduğu düzlem $x - y$ düzlemidir ve Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

Tez çalışmasında elde edilen değerler, Makarov'un çalışmasıyla karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

Empedansın gerçel kısmına bakıldığında Makarov'un çalışmasındaki değerlere yakın çıktığı görülmüştür. Ancak değerler tamamen aynı değildir. Yüksek frekanslara çıktıkça empedansın gerçel kısmında farklılıklar olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, bu tez çalışmasında ve Makarov'un çalışmasında EAİD'yi çözmek için kullanılan yöntemlerin farklı olmasıdır. Makarov, çalışmasında EAİD içinde yer alan integralleri 9-noktalı nümerik integrasyon kullanarak çözmüştür (Makarov, 2001). Bunun için her üçgen, dokuz küçük üçgene ayrılmıştır. Dokuz üçgenin orta noktası integrasyon noktası olarak alınmış ve bu noktalarda hesaplama yapılmıştır. Bu tez çalışmasında ise EAİD'de yer alan integraller Gauss kuralı yoluyla çözümlenip uyarlamalı bir algoritma kullanıldığından, integrallerin gerçek değerlerine yakın sonuçlar bulunmuştur. Bu nedenle, bu tez çalışmasında bulunan değerlerin daha güvenilir olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Makarov'un çalışması, bir sonraki bölümde yapılan parametrik çalışmanın sonuçlarının doğruluğunun kanıtlanması için yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.1. x-y düzlemine yerleştirilmiş üçgen anten

Şekil 3.3'e bakıldığında her iki çalışmada da empedansın sanal kısımlarının aynı olduğu görülmektedir. Ancak grafik koordinatları değiştirilerek yeniden çizildiğinde (Şekil 3.4) yüksek frekanslarda değerlerin aynı olmadığı rahatlıkla görülebilir.

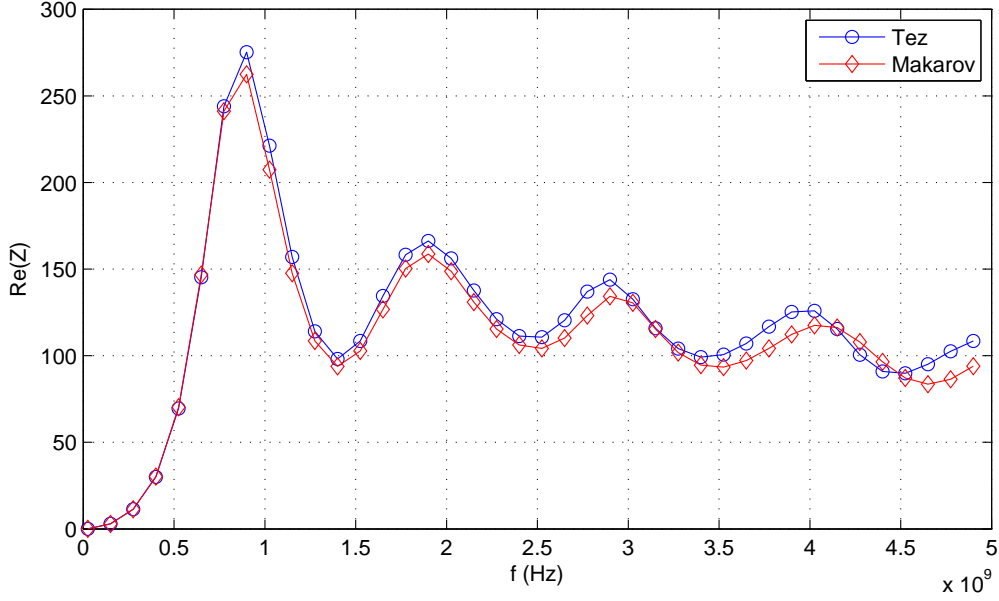
Şekil 3.3'e bakıldığında, 1.5-5GHz frekansları arasında sanal kısmın neredeyse sabit ve negatif (kapasitif) bir değere sahip olduğu görülmektedir.

Antenlerin empedansı tamamen gerçel olduğunda antenden yayılan güç en fazladır. Bu nedenle antenlerin rezonans frekansları önemlidir. Üçgen antenin Şekil 3.2'de bazı frekanslarda rezonansa girdiği görülmektedir. Bu frekanslar 900MHz, 1.9GHz, 2.9GHz, 4GHz'dir. Üçgen antenlerin rezonans frekanslarını hesaplamak için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır.

Empedans değerinin üçgen antenin açıklık açısı veya boyuyla nasıl değiştiği hakkındaki bilgi 4.Bölüm'de Parametrik Çalışma konusunda anlatılacaktır.

3.2 Üçgen Antenlerin Uzak Alan Örüntüsü

Bölüm 2.5'te üçgen antenlerin uzak alan örüntüsünün nasıl hesaplandığı anlatılmıştır. Bu bölümde elde edilen nümerik sonuçlar gösterilecektir. Kullanılan anten Bölüm 3.1'deki anten ile aynı geometriye sahiptir.

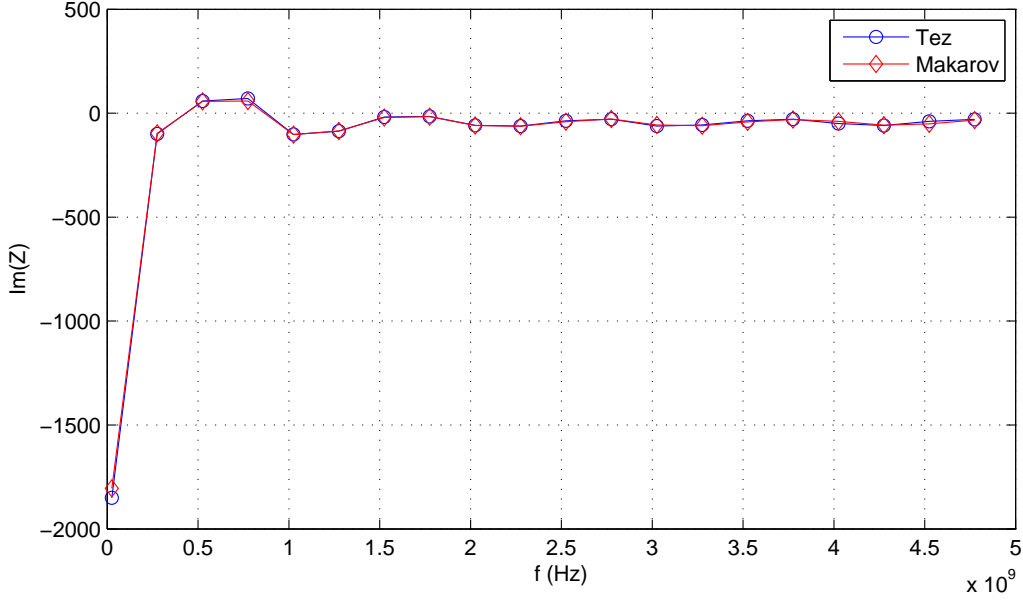


Şekil 3.2. Üçgen antenin giriş empedansınının gerçel kısmı

x-z düzleminde ve y-z düzleminde değişik frekanslarda üçgen antenlerin uzak alan örüntülerinin nasıl değiştiğine bakılmıştır. x-z düzleminde, uzak alan örüntüsü Makarov'un sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. 75MHz, 450MHz, 750MHz, 1GHz, 2GHz, 3GHz ve 4GHz frekanslarında antenin uzak alan örüntüsü Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de yer almaktadır.

Değişik frekanslarda hesaplanan uzak alan örüntüsü değerlerine bakılarak üçgen antenlerle ilgili şu yorumlar yapılabilir:

- Düşük frekanslarda, bu çalışmada ve Makarov'un çalışmasında elde edilen değerlerin aynı olduğu görülmüştür. Yüksek frekanslara çıktıkça değerler aynı değildir, ancak birbirine yakındır. Aradaki fark kullanılan yöntemlerin farklı olmasındandır. Kullanılan yöntemlerde herhangi bir yaklaşık değer alınmadığından, bu çalışmada elde edilen değerlerin daha güvenilir olduğuna inanılmaktadır.
- Düşük frekanslara bakıldığında anten örüntüsünün yönsüz olduğu görülmektedir. 3GHz ve 4GHz'deki örüntülere bakıldığında ise antenin yönlü bir anten olduğu anlaşılmaktadır.
- Üçgen antenin empedans ve uzak alan örüntüsü değerlerine bakılarak, antenin bant genişliği 0.5-2GHz aralığı olarak tanımlanabilir. Bu nedenle, üçgen



Şekil 3.3. Üçgen antenin giriş empedansınının sanal kısmı

antenler geniş bantlı antenler olarak adlandırılırlar. Şekillerden de bu rahatlıkla görülebilmektedir.

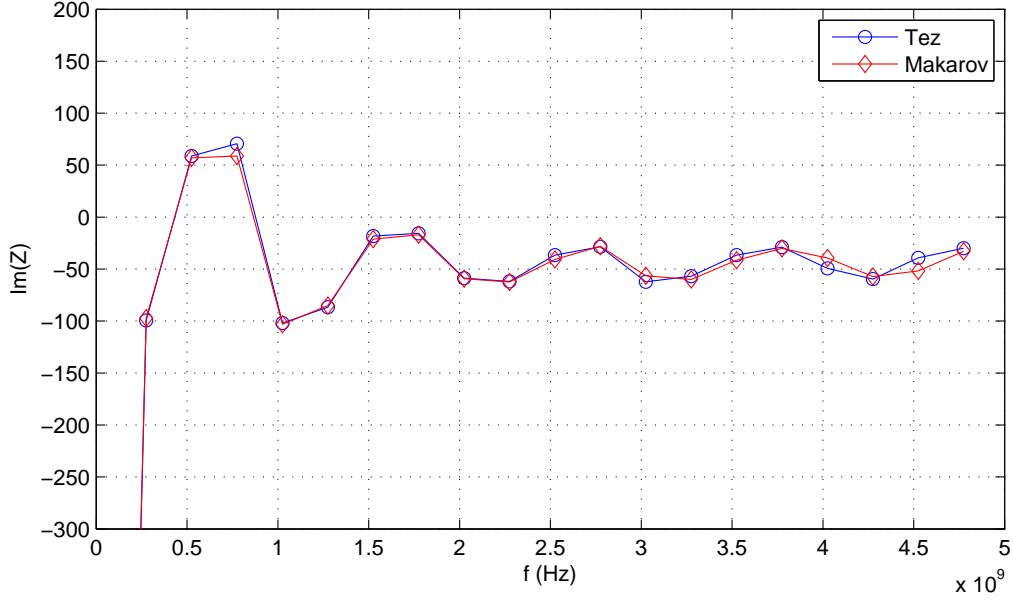
Antenin boyutları ve açıklık açısı değiştiğinde uzak alan örüntüsünün nasıl değiştiği Parametrik Çalışma konusunda anlatılacaktır.

3.3 Üçgen Antenlerin Yüzey Akım Dağılımı

Bu bölümde üçgen antenlerin yüzey akım dağılımları gösterilecektir. Kullanılan üçgen anten Matlab PDE toolbox ile oluşturulmuş, üçgen sayısı 274, boyu 0.2m ve açıklık açısı 90° olan Şekil 2.2'de gösterilen antendir.

İki farklı akım dağılımına bakılmıştır. Bunlardan ilki, gelen dalga düzlem dalga olduğunda üçgen anten üzerinde indüklenen akım dağılımı, diğeri ise yarık delta üretici ile beslendiğinde antenin yüzeyinde indüklenen akım dağılımıdır. Değişik frekanslarda akım dağılımına bakılmıştır. Çalışılan frekanslar 75MHz, 450MHz, 750MHz, 1GHz, 2GHz, 3GHz ve 4GHz'dir.

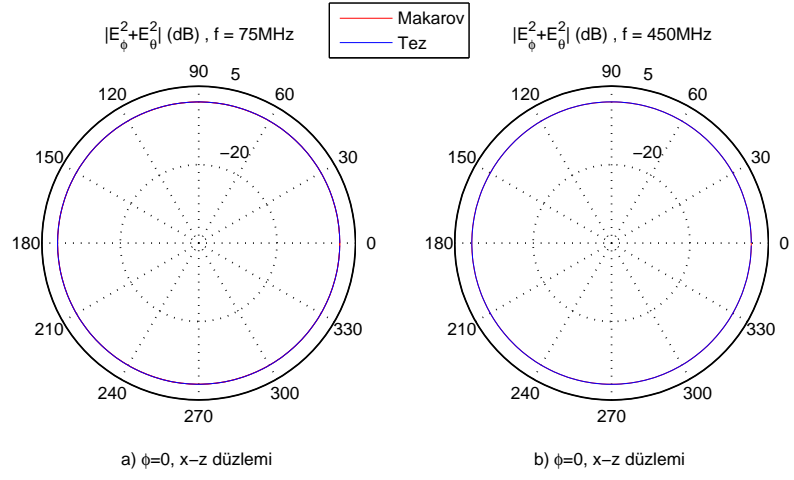
Bölüm 2.6'da düzlem dalganın anten üzerinde indüklediği akımın nasıl bulunduğu anlatılmıştır. Şekil 3.9, Şekil 3.11, Şekil 3.13, Şekil 3.15, Şekil 3.17, Şekil 3.19 ve Şekil 3.21'de yer alan akım dağılımlarına bakıldığında düşük frekanslarda akımın maksimum değerinin yüksek frekanslara göre daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca



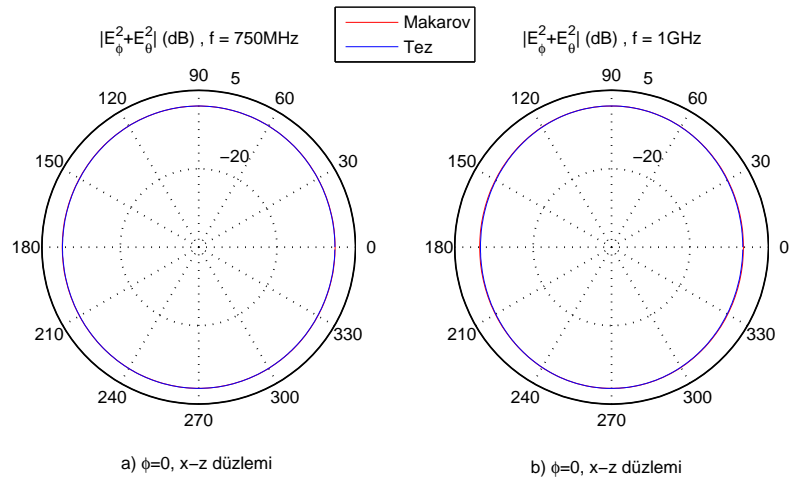
Şekil 3.4. Üçgen antenin giriş empedansının sanal kısmı (yeni koordinatlarla)

akım değerleri üçgen antenin $y = \pm 0.1$ kenarında en yüksektir. Orta kısımlarında akım değerleri azdır. 3GHz ve 4GHz'de akım dağılımının maksimum değeri 25A/m olarak sabit kalırken, antenin tüm kenarlarındaki akım dağılımı değerleri de artmıştır.

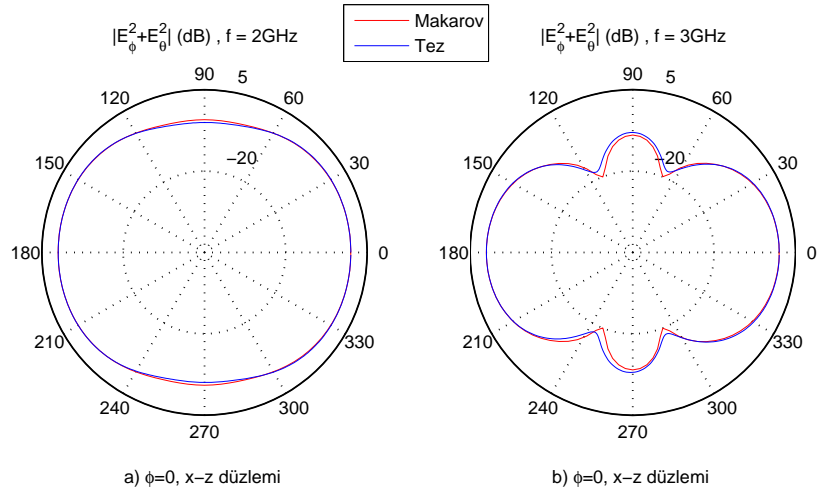
Uyarılan kenar modeline bakıldığında düşük frekanslarda yüzeyde indüklenen akımın daha az olduğu görülmüştür. Besleme kenarı olarak, üçgen antenin ortasındaki kenar seçildiğinden en yüksek akım değeri burada görülmektedir.



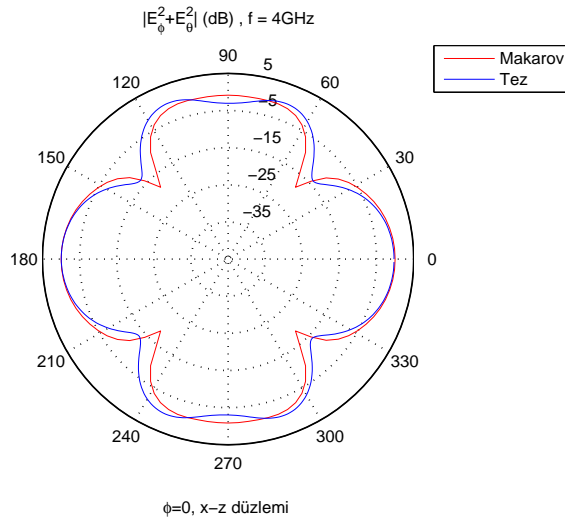
Şekil 3.5. Üçgen antenin uzak alan örüntüsü, a) $f=75\text{MHz}$, b) $f=450\text{MHz}$



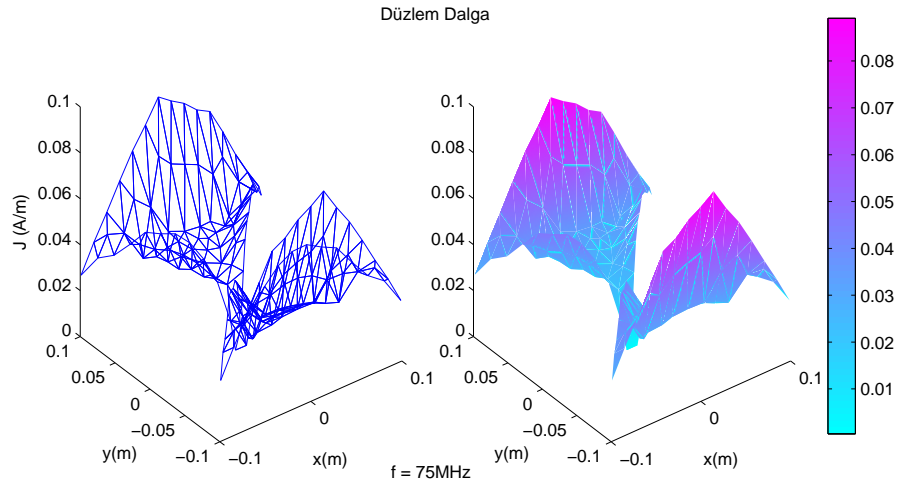
Şekil 3.6. Üçgen antenin uzak alan örüntüsü, a) $f=750\text{MHz}$, b) $f=1\text{GHz}$



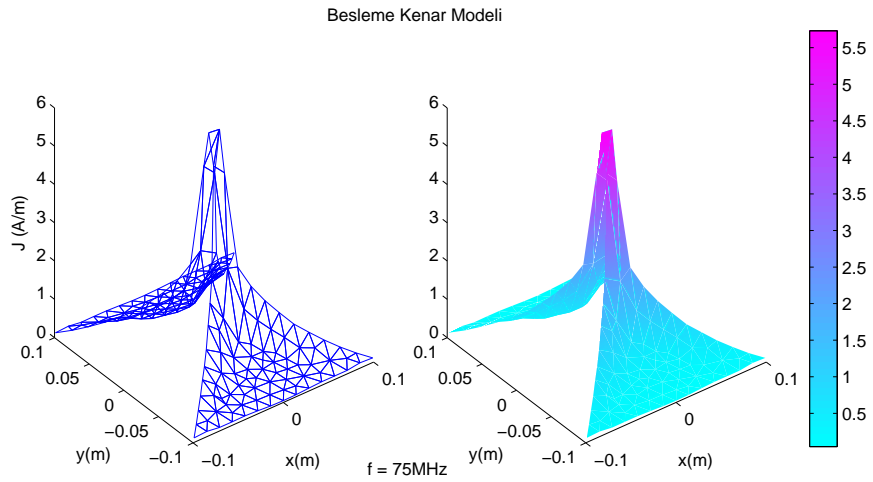
Şekil 3.7. Üçgen antenin uzak alan örüntüsü, a) $f=2\text{GHz}$, b) $f=3\text{GHz}$



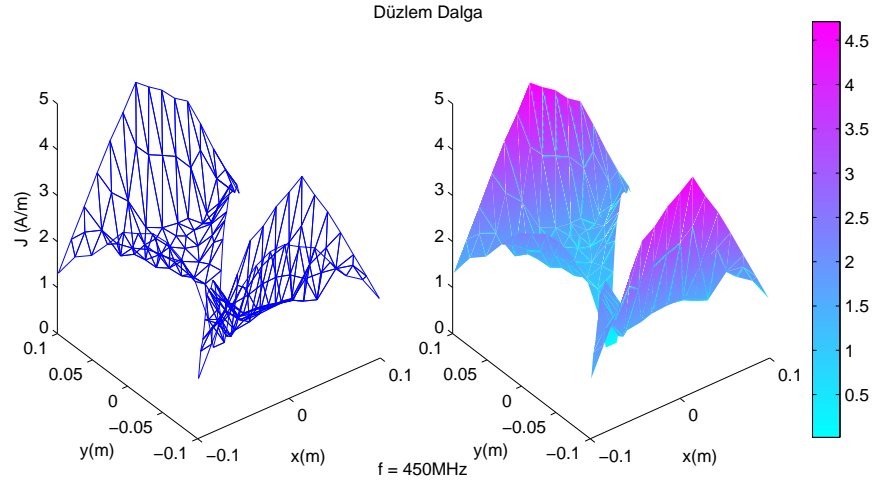
Şekil 3.8. Üçgen antenin uzak alan örüntüsü, $f=4\text{GHz}$



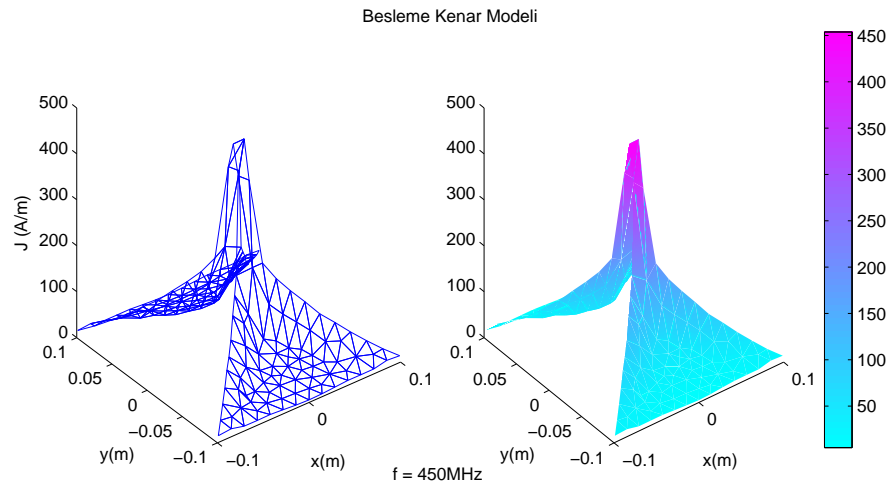
Şekil 3.9. $f=75\text{MHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı



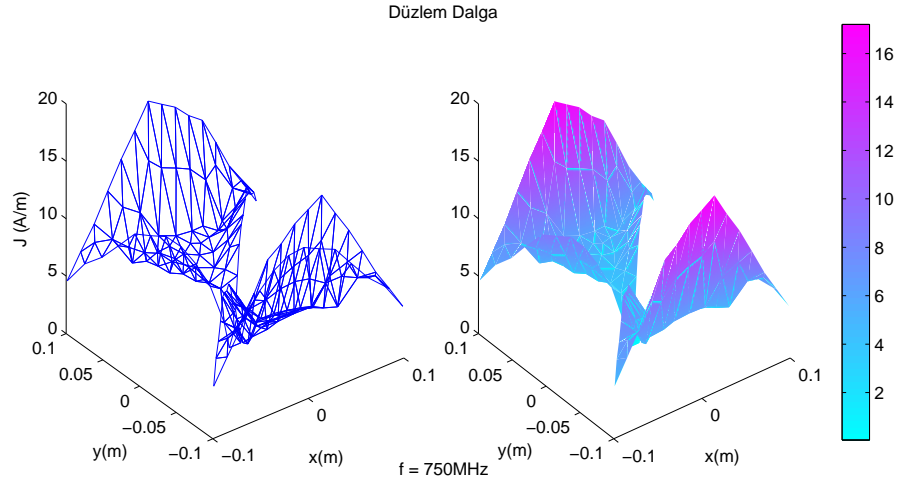
Şekil 3.10. $f=75\text{MHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı



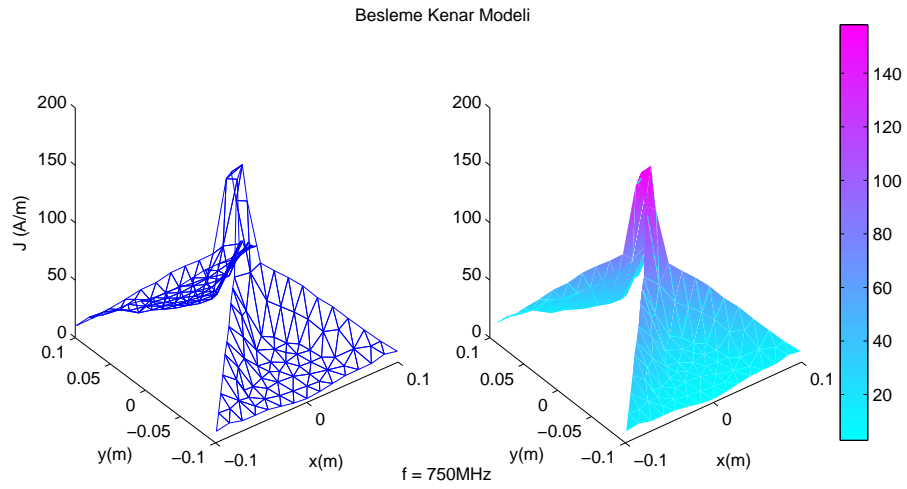
Şekil 3.11. $f=450\text{MHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı



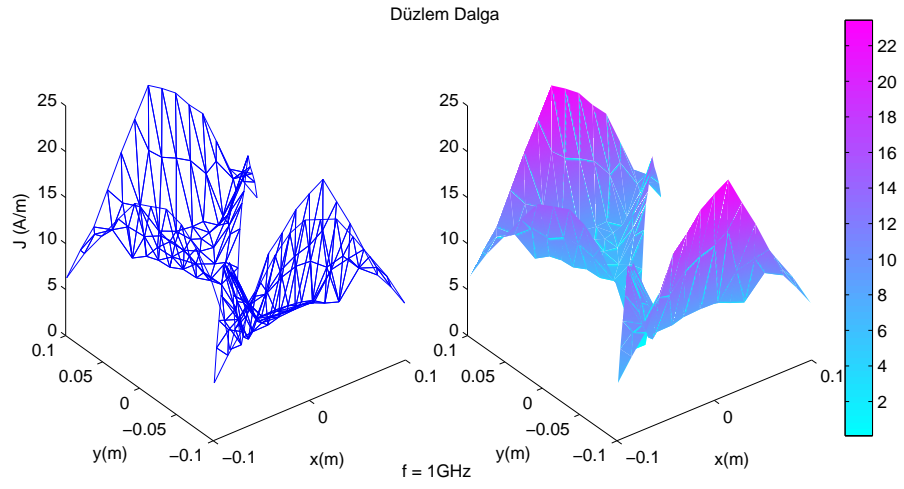
Şekil 3.12. $f=450\text{MHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı



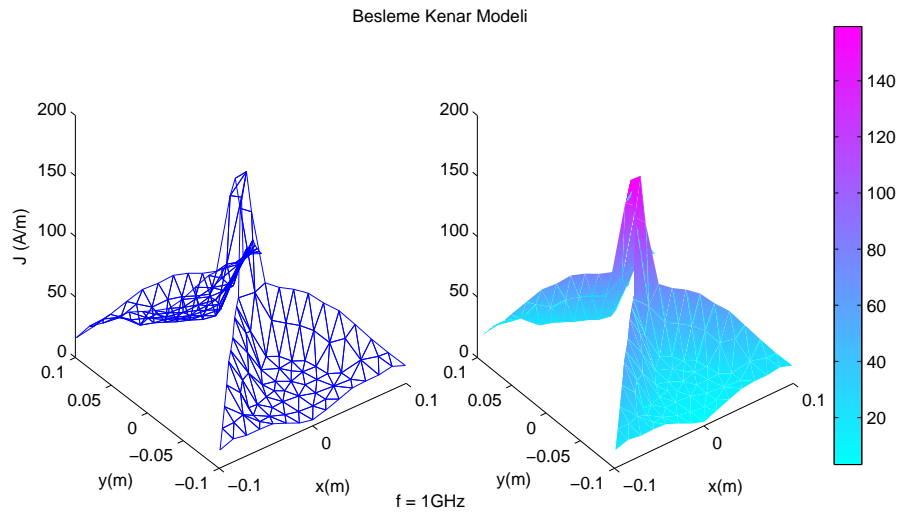
Şekil 3.13. $f=750\text{MHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı



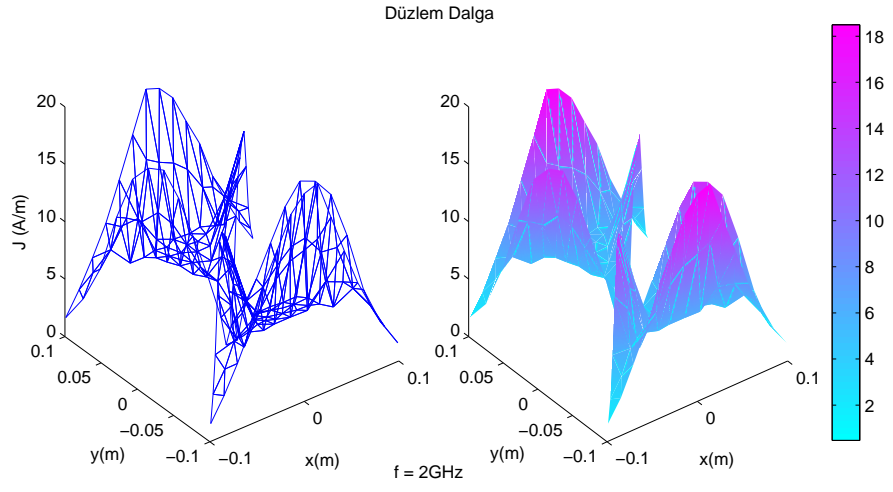
Şekil 3.14. $f=750\text{MHz}$ 'de yarı delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı



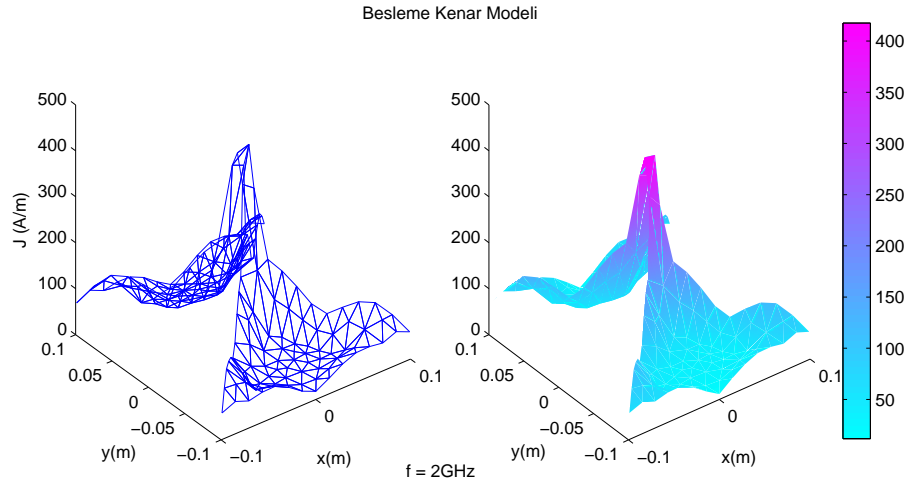
Şekil 3.15. $f=1\text{GHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı



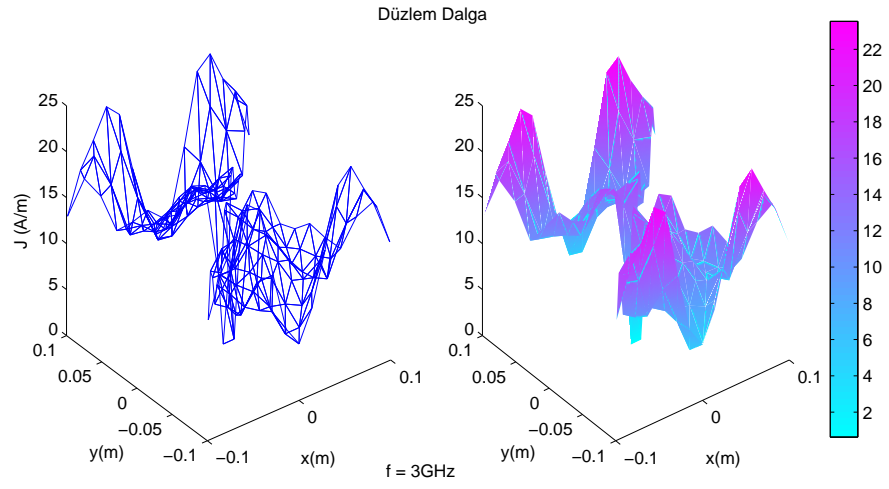
Şekil 3.16. $f=1\text{GHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı



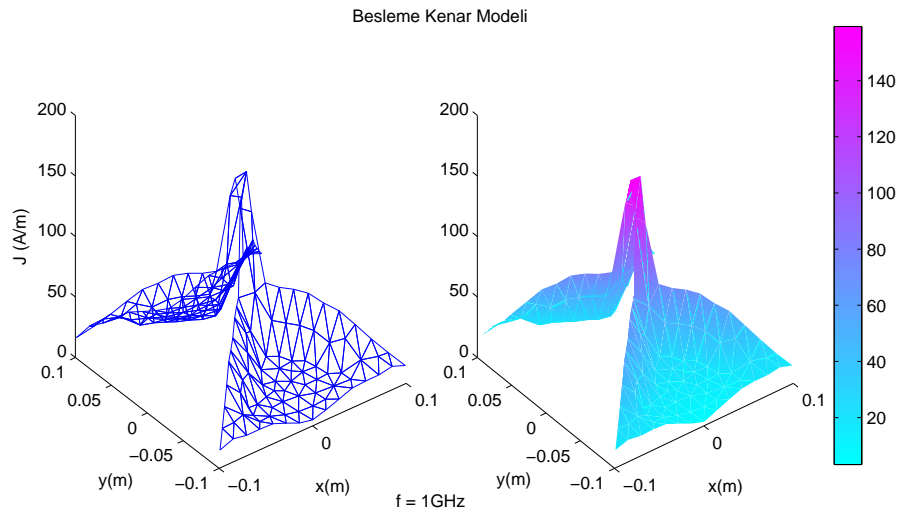
Şekil 3.17. $f=2\text{GHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı



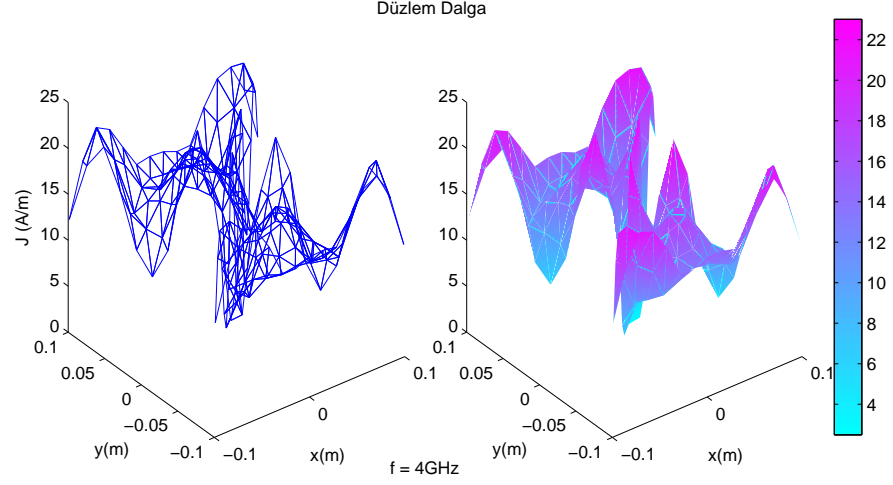
Şekil 3.18. $f=2\text{GHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı



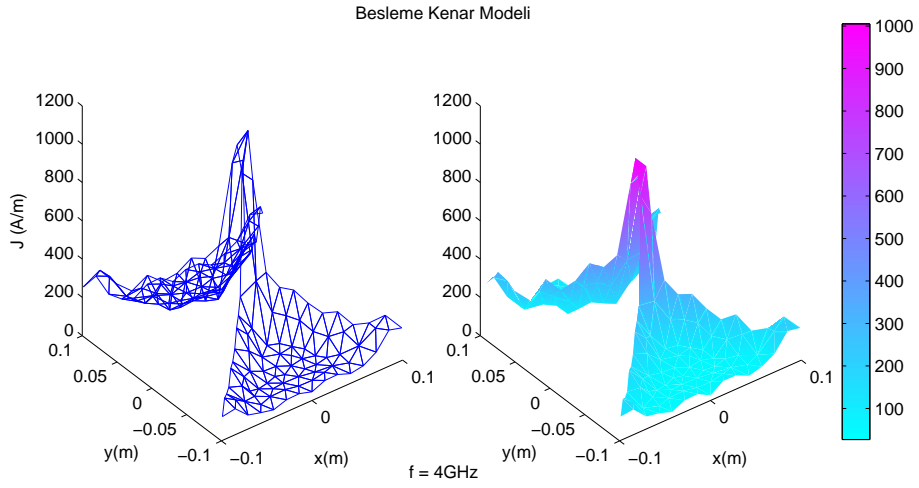
Şekil 3.19. $f=3\text{GHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı



Şekil 3.20. $f=3\text{GHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı



Şekil 3.21. $f=4\text{GHz}$ 'de düzlem dalga ile uyarıldığında üçgen antenin yüzey akım dağılımı

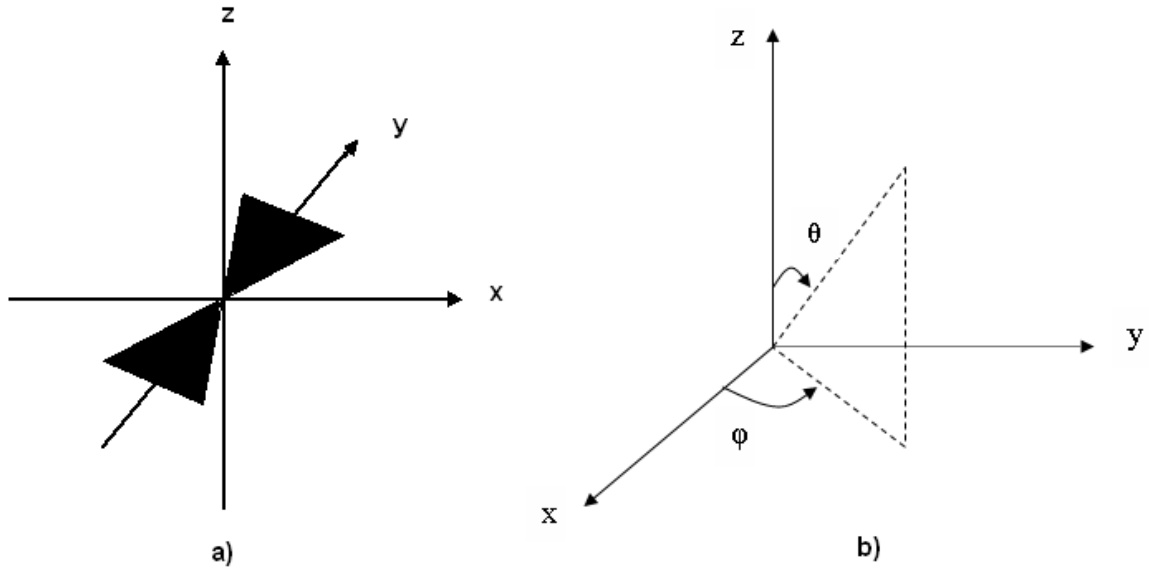


Şekil 3.22. $f=4\text{GHz}$ 'de yarık delta üretici ile beslendiğinde üçgen antenin yüzey akım dağılımı

4. PARAMETRİK ÇALIŞMA

Bir önceki bölümde uzunluk ve açı parametreleri olmadan üçgen antenin özellikleriyle ilgili genel bilgi verilmiştir. Bu bölümde ise, değişik dalga boyundaki anten uzunluklarına ve açıklık açlarına sahip üçgen antenlerin uzak alan örüntülerinin ve empedanslarının nasıl değiştiğine bakılacaktır.

Kolay referans için anten geometrisi Şekil 4.1.a'da tekrar verilmiştir. Parametrik çalışmada kullanılan geometrik değişkenler ise Şekil 4.1.b'de gösterilmiştir.

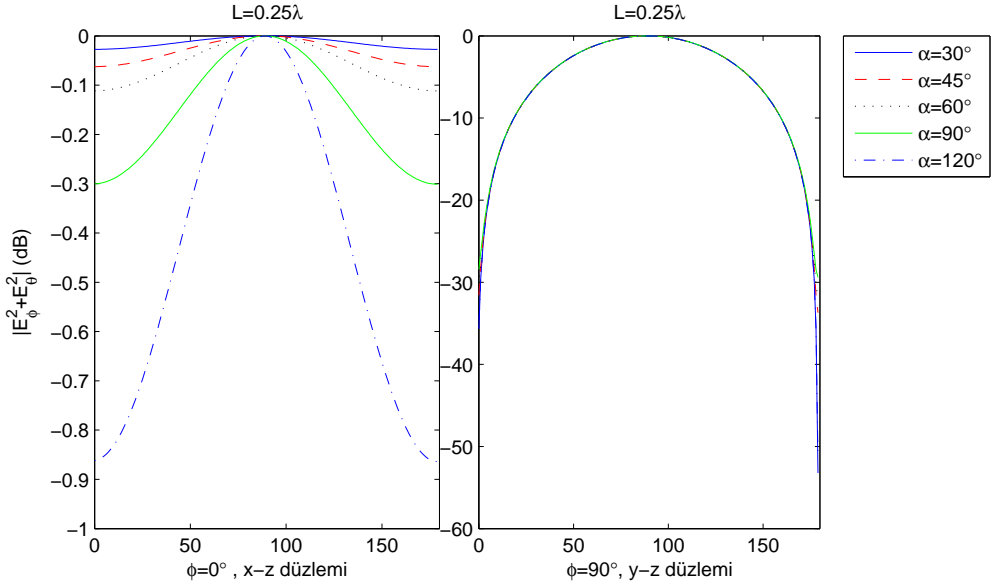


Şekil 4.1. a) x-y düzlemine yerleştirilmiş üçgen anten, b) Kartezyen koordinatlarda (θ, ϕ) açılarının gösterimi

Bu bölümde kullanılan antenlerin boyları, L , 0.25λ , 0.5λ , 0.75λ , λ , 2λ , 2.5λ ve 3λ olarak seçilmiştir. Antenlerin açıklık açıları, α ise, 30° , 45° , 60° , 90° ve 120° olarak seçilmiştir.

Üçgen antenin x-z (E-düzlemi) ve y-z (H-düzlemi) düzlemlerinde ışınım örüntülerinin hüzme genişliklerine ve ilk yan kulakçık seviyelerine bakılmıştır ((θ, ϕ) açılarının kartezyen koordinatlardaki gösterimi Şekil 4.1'da verilmiştir.). Elde edilen sonuçlar tablo haline getirilmiş ve Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Çizelge 4.2'de kullanılan kısaltmaların açıklaması şu şekildedir:

- EHG : E-düzlemi'nde, ışınım örüntüsünün 3dB'lik hüzme genişliği
- EYKS : E-düzlemi'nde, ışınım örüntüsünün ilk yan kulakçık seviyesi

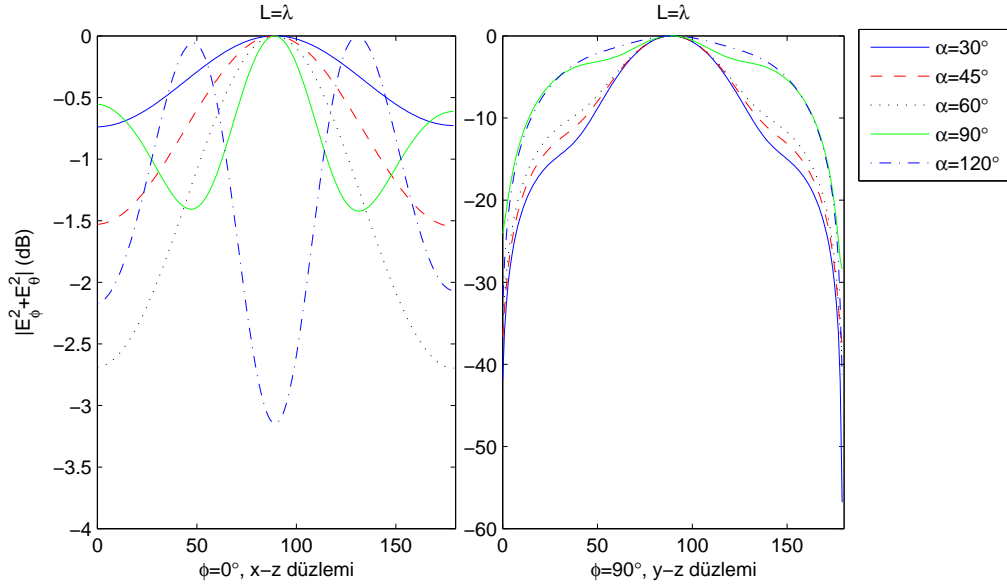


Şekil 4.2. $L=0.25\lambda$, uzak alan örüntüsü

- HHG : H-düzlemi'nde, ışınım örüntüsünün 3dB'lik hüzme genişliği
- EYKS : H-düzlemi'nde, ışınım örüntüsünün ilk yan kulakçık seviyesi

Çizelge 4.2'deki değerlere bakılarak üçgen antenlerle ilgili şu yorumlar yapılabilir:

- Antenin uzunluğu küçükken ($L < \lambda$), açıklık açısı artsa da x-z düzleminde elektrik alan değerinin -3dB'nin altına inmediği görülmüştür. Üçgen anten, küçük dalga boyu uzunluklarında yönsüz bir antendir.
- Anten uzunluğu 2λ 'dan büyük olduğunda, üçgen antenin yönlü bir anten olduğu gözlenmiştir. EHG, sabit bir değere sahip değildir. Anten boyu 2λ iken EYKS'nin 3λ 'daki EKYS'nden daha düşük değere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, 3λ uzunluğa sahip antenin hüzme genişliği daha küçüktür. Antenin açıklık açısı arttıkça yan kulakçık seviyesi de düşmektedir.
- Anten uzunluğu λ 'dan küçük olduğunda, açıklık açısı artsa da y-z düzleminde elektrik alan hüzme genişliğinin sabit olduğu gözlenmiştir. Ancak anten boyu arttıkça hüzme genişliği küçülmektedir.
- Antenin uzunluğu arttıkça ($L > \lambda$), yan kulakçık seviyesi düşmüştür.

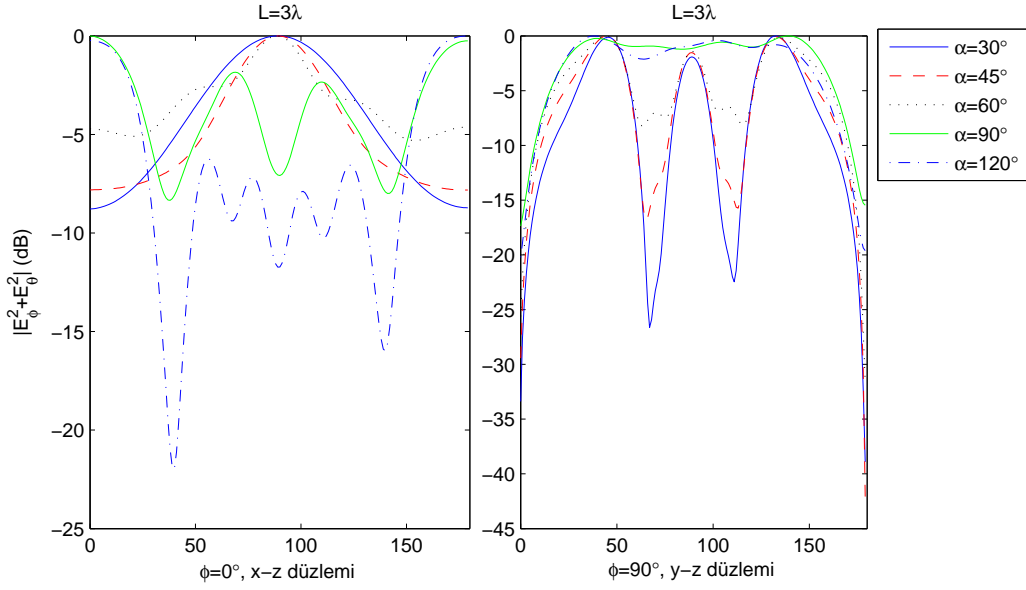


Şekil 4.3. $L=\lambda$, uzak alan örüntüsü

- Anten uzunluğu sabitken, açıklık açısı arttıkça y-z düzleminde yan kulakçık seviyesi artmaktadır. Ancak $\alpha = 120^\circ$ olduğunda yan kulakçık seviyesi yeniden düşmektedir.

Anten boyu sabitken, üçgen antenin açıklık açısı değiştirildiğinde uzak alan örüntülerinin değişimini gösteren şekiller, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4'te yer almaktadır. Bu şekillere bakılarak şu yorumlar yapılabilir:

- $L = 0.25\lambda$ iken, x-z düzleminde elektrik alanın -3dB altına inmediği görülmektedir. y-z düzleminde ise, açıklık açısının değişmesinin antenin örüntüsünü değiştirmediği görülmektedir. Ayrıca yan kulakçık yoktur.
- $L = \lambda$ iken, x-z düzleminde elektrik alan değeri sadece $\alpha = 120^\circ$ iken -3dB'nin altına inmiştir. Bu yüzden, anten bu düzlemde yönsüzdür. y-z düzleminde α arttıkça antenin hüzme genişliği artmaktadır.
- $L = 3\lambda$ iken, x-z düzleminde elektrik alan değerleri -3dB'nin altındadır. Ana hüzme, $\alpha = 90^\circ$ ve $\alpha = 120^\circ$ iken 0° etrafındayken, diğer açılarda 90° civarındadır. y-z düzleminde ise yan kulakçıklar azalmış, ana hüzme genişliği artmıştır.
- Anten uzunluğu arttıkça x-z düzleminde anten yönlü bir anten olmuştur. Ayrıca α arttıkça 90° etrafında olan ana hüzme, 0° civarında oluşmaya başlamış-

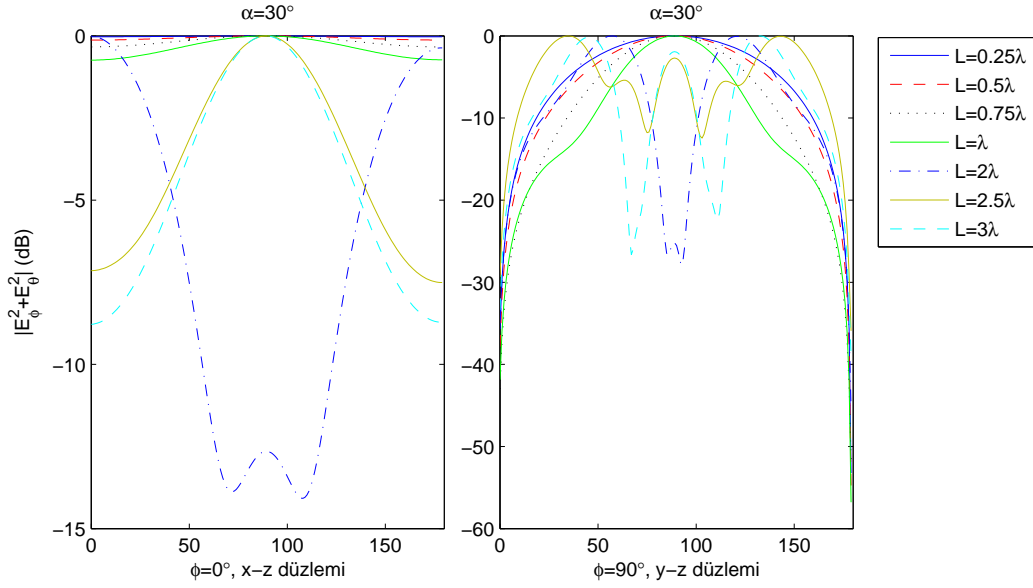


Şekil 4.4. $L=3\lambda$, uzak alan örüntüsü

tır. y-z düzleminde ise α arttıkça, kulakçık sayısı azalmakta ve hüzme genişliği artmaktadır.

Antenin açıklık açısı sabitken, boyu değiştirildiğinde uzak alan örüntülerinin değişimini gösteren şekiller, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7'de yer almaktadır.

- $\alpha = 30^\circ$ iken, x-z düzleminde anten uzunluğu λ 'dan küçükken antenlerin yön-süz anten oldukları görülmektedir. $L = 2\lambda$ iken, uzak alan örüntüsünün ana hüzmesi 0° etrafındadır. $L = 2.5\lambda$ ve $L = 3\lambda$ iken 90° etrafındadır. y-z düzleminde anten boyu arttıkça kulakçık sayısının arttığı ve hüzme genişliğinin daraldığı görülmektedir.
- $\alpha = 60^\circ$ iken, x-z düzleminde anten uzunluğu λ 'dan küçükken elektrik alan değeri, -3dB'nin altına inmemiştir. $L = 2\lambda$ iken ana hüzme 0° etrafındayken, $L = 2.5\lambda$ ve $L = 3\lambda$ iken 90° civarındadır. y-z düzleminde ise antenin boyu arttıkça kulakçık sayısı artmakta ve hüzme genişliği azalmaktadır.
- $\alpha = 120^\circ$ iken, anten uzunluğu 0.5λ iken, elektrik alan değerleri -3dB'den küçüktür. 0.25λ , 0.75λ ve λ iken -3dB'nin altına düşmemiştir. L , 2λ 'dan büyükken ana hüzme 0° civarındadır ve uzunluk arttıkça hüzme daralmakta ve yan kulakçıkların seviyesi artmaktadır. y-z düzleminde ise üçgen antenin uzunluğu λ olana kadar antenin ana hüzmesi daralmakta ve sonra artmaktadır.



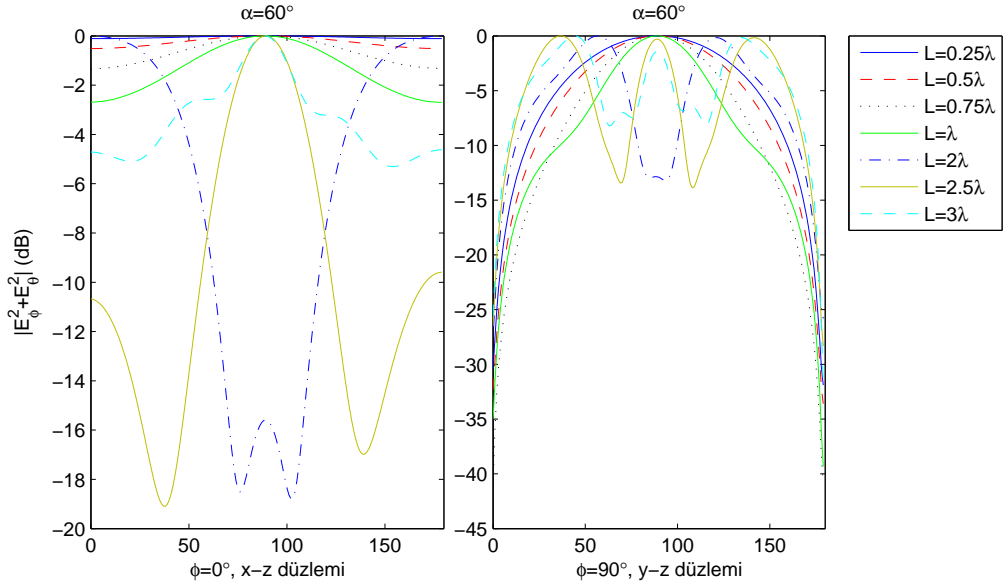
Şekil 4.5. $\alpha = 30^\circ$, uzak alan örüntüsü

Şekil 4.8'de anten boyu değişikçe üçgen antenin giriş empedansının değişimi görülmektedir.

- α , 30° , 45° ve 60° iken antenin empedansının reel kısmı, en yüksek değerine $L = 0.75\lambda$ olduğunda ulaşmaktadır. α , 90° , 120° iken, $L = 0.5\lambda$ olduğunda empedansın reel kısmı en yüksek değerindedir. Antenin açıklık açısı arttıkça empedansın reel kısmının değerleri azalmaktadır.
- Empedansın sanal kısmına bakıldığında, α , 30° , 45° ve 60° ve $L = 0.5\lambda$ iken empedansın sanal kısmı en yüksek değerine sahiptir ve pozitiftir. $L > 0.75\lambda$ iken, empedansın sanal kısmı negatiftir (kapasitif).

Şekil 4.9'de, antenin açıklık açısı değişikçe üçgen antenin giriş empedansının değişimi görülmektedir.

- Empedansın reel kısmına bakıldığında en fazla değişimin anten boyu $L = 0.75\lambda$ iken olduğu görülmektedir. $L = 0.25\lambda$ iken empedans değerleri oldukça küçüktür ve sabittir. L , 2λ , 2.5λ ve 3λ olduğunda empedans değerleri birbirine yakın değerlere sahiptir.
- Empedansın sanal kısmına bakıldığında, en büyük değişimin, $L = 0.5\lambda$ iken olduğu görülmektedir. Antenin açıklık açısı 90° 'den küçükken empedansın sanal



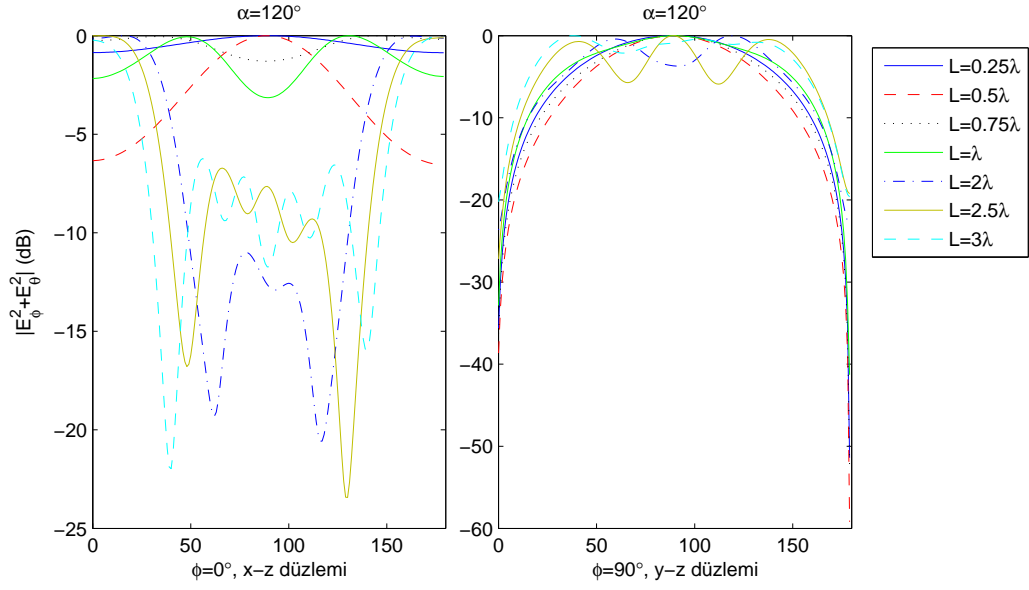
Şekil 4.6. $\alpha = 60^\circ$, uzak alan örüntüsü

kısmı negatiftir (kapasitif).

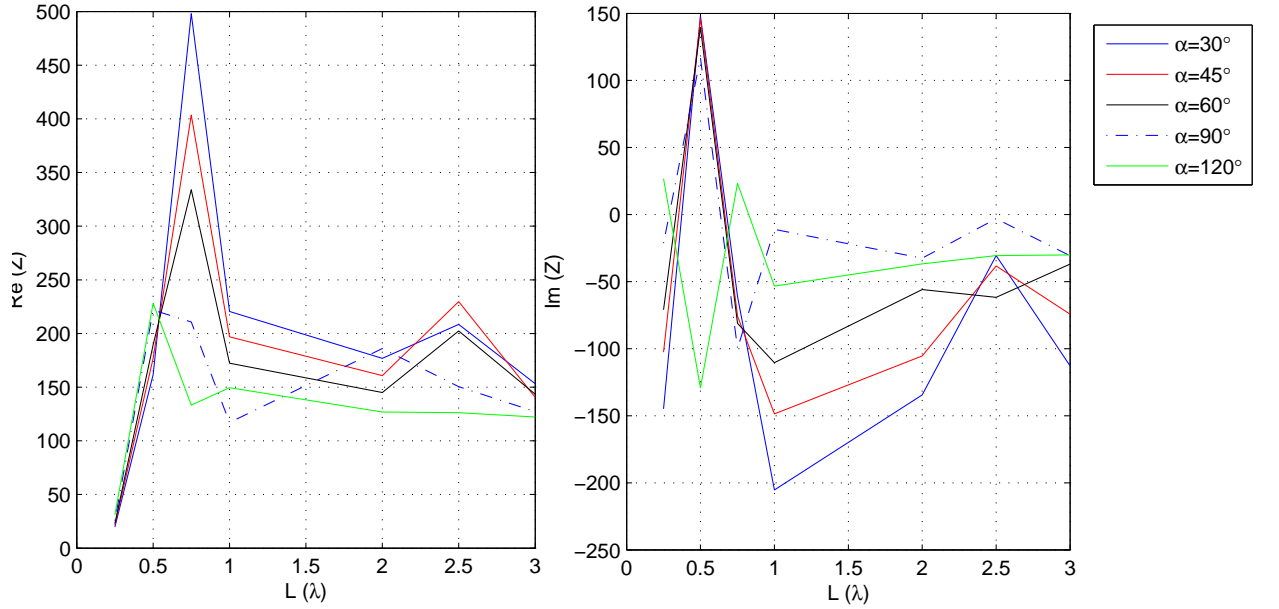
Üçgen antenin boyu ve açıklık açısı değiştikçe üçgen antenin empedansı da değişmektedir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da bu değişim görülmektedir. Ayrıca elde edilen sonuçlar tablo haline getirilmiş ve Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Üçgen antenlerin empedansı ile ilgili parametrik çalışmanın sonuçları

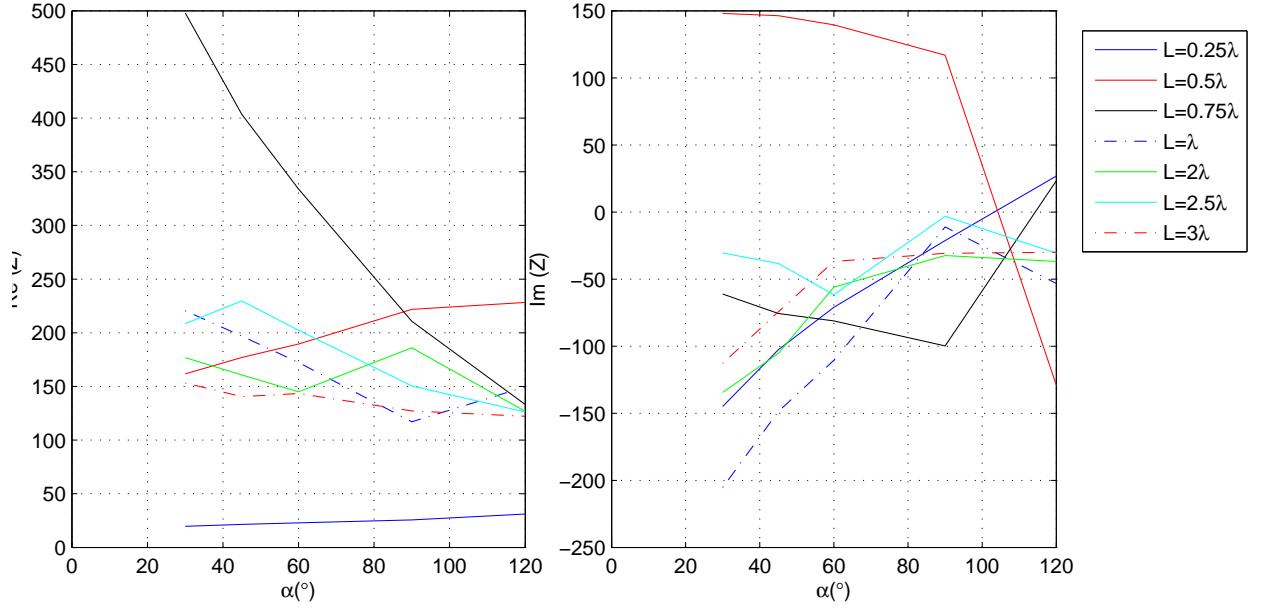
$L \setminus \alpha$	30°	45°	60°	90°	120°
0.25λ	$19.6 - j144.9$	$21.4 - j102.6$	$22.8 - j71.0$	$25.7 - j21.3$	$31.0 + 26.8$
0.5λ	$161.8 + j148.0$	$177.0 + j146.4$	$189.6 + j139.5$	$221.7 + j116.9$	$228.2 - j129.2$
0.75λ	$498.1 - j61.1$	$403.5 - j75.7$	$339.9 - j81.1$	$210.7 - j99.8$	$133.3 + j23.3$
λ	$220.5 - j205.3$	$196.9 - j148.7$	$172.3 - j110.5$	$117.0 - j11.1$	$149.6 - j53.3$
2λ	$176.8 - j134.5$	$160.7 - j105.4$	$145.0 - j55.9$	$185.9 - j32.4$	$126.9 - j36.8$
2.5λ	$208.5 - j30.5$	$229.7 - j38.4$	$202.4 - j61.6$	$150.4 - j3.1$	$126.2 - j30.6$
3λ	$153.2 - j112.8$	$140.5 - j74.4$	$143.3 - j36.8$	$127.2 - j30.7$	$122.2 - j30.0$



Şekil 4.7. $\alpha = 120^\circ$, uzak alan örüntüsü



Şekil 4.8. Üçgen antenin giriş empedansının anten uzunluğuna göre değişimi



Şekil 4.9. Üçgen antenin giriş empedansının antenin açıklık açısıyla değişimi

Çizelge 4.2. Üçgen antenlerle ilgili parametrik çalışmanın sonuçları

$L (\lambda)$	$\alpha (^{\circ})$	$EHG (^{\circ})$	$EYKS (dB)$	$HHG (^{\circ})$	$HYKS (dB)$
0.25	30	yok	-0.027	87	-53.23
	45	yok	-0.062	86	-33.71
	60	yok	-0.111	86	-31.89
	90	yok	-0.301	86	-29.39
	120	yok	-0.863	86	-51.39
0.5	30	yok	-0.126	76	-55.02
	45	yok	-0.281	75	-36.07
	60	yok	-0.515	75	-33.59
	90	yok	-1.485	74	-31.52
	120	84	-6.548	71	-59.19
0.75	30	yok	-0.336	60	-51.64
	45	yok	-0.732	60	-45.85
	60	yok	-1.318	60	-40.77
	90	121	-3.937	59	-34.65
	120	yok	-1.254	77.5	-52.44
1.0	30	yok	-0.727	44	-56.78
	45	yok	-1.547	46	-37.51
	60	yok	-2.698	46.5	-39.32
	90	yok	-1.422	72	-28.39
	120	169	-3.145	97	-41.3
2.0	30	68	-13.88	27	-26.68
	45	73.5	-14.21	27.5	-15.61
	60	91	-18.51	32	-12.96
	90	61	-19.06	137	-19.44
	120	75	-19.32	39	-3.71
2.5	30	77	-7.51	27	-6.23
	45	46.5	-16.19	27.5	-13.22
	60	36.5	-16.98	27.5	-13.44
	90	53.5	-12.39	26.5	-7.14
	120	59	-16.79	25.5	-5.90
3.0	30	70	-8.721	21.5	-26.63
	45	50	-7.825	24	-16.83
	60	66.5	-5.308	30	-8.21
	90	46	-8.341	178.5	-15.46
	120	43	-21.97	130.5	-19.62

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, üçgen antenlerin analizi yapılmıştır. Analizde, üçgen antenlerin giriş empedansı, uzak alan örüntüleri ve akım dağılımları hesaplanmış ve bununla ilgili parametrik çalışma yapılmıştır. Üçgen anten, üçgenlerle modellenmiştir. Analizde EAİD kullanılmıştır. EAİD'nin çözümü için MY kullanılmıştır. Daha az işlemle integral alınabilen Gauss kuralları tercih edilmiştir. Uyarlamalı bir algoritma ile integrasyon yapılmıştır. MY ile nümerik hale getirilen EAİD içerisinde yer alan integraller küçük parçalara ayrılmış, böylece hesaplamalar kolaylaşmıştır. Ayrıca integraler hesaplanırken üçgen üçgen dolaşarak hesaplama yapılmıştır. Bu sayede programın hızı artmıştır. Anten uyarım yöntemi olarak, basit ve oldukça kullanışlı olması nedeniyle delta-yarık modeli kullanılmıştır. MY ile EAİD'nin çözümünden sonra, giriş empedansı, uzak alan örüntüsü ve anten yüzeyindeki akım dağılımı hesaplanmıştır.

3.Bölüm'de, elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Üçgen antenin giriş empedansı, başka bir çalışmayla karşılaştırılmıştır. Her iki çalışmada da sonuçlar birbirine yakındır. Böylece bu tez çalışmasında uygulanan yöntemin doğruluğu saptanmıştır. Yüksek frekanslara çıktıkça empedans değerleri farklılaşmaktadır. Empedansın gerçel kısmına bakıldığında belli noktalarda rezonansa girdiği görülmektedir. Sanal kısma bakıldığında da değerler birbirine yakındır. Ayrıca 1.5-5GHz arasında sanal kısmın değerleri sabit ve negatiftir.

Üçgen antenin uzak alan örüntüsüne de bakılmıştır. $x - z$ düzleminde bulunan değerler, başka bir çalışmayla karşılaştırılmıştır. Düşük frekanslarda alan örüntüleri aynıyken, yüksek frekanslara çıktıkça örüntüler arasında fark ortaya çıkmaktadır. Düşük frekanslarda anten yönsüzken, yüksek frekanslara çıktıkça yönlülüğün arttığı görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan yöntemlerde hesaplama için herhangi bir yaklaşık sonuç kullanılmadığından, elde edilen değerlerin karşılaştırma yapılan çalışmaya göre daha doğru olduğu düşünülmektedir.

Burada yapılan çalışmalarla, üçgen antenlerin geniş bantlı antenler oldukları gözlenmiştir. Empedans ve uzak alan örüntülerine bakarak antenin giriş empedansının yüksek olduğu ve anten örüntüsünün yönsüz olduğu, 0.5 – 2GHz aralığı bant genişliği olarak tanımlanabilir.

Üçgen antenin akım dağılımı değerlerine bakıldığında akımın, düşük frekanslarda daha az olduğu görülmektedir. Anten, düzlem dalga ile uyarıldığında, akım antenin kenarlarında daha yüksek değerlere sahiptir. Uyarılan kenar modelinde ise akımın maksimum değeri, uyarılan kenarın olduğu orta kısımdadır. Frekans arttıkça akımın maksimum değeri de artmaktadır.

4.Bölüm'de üçgen antenlerle ilgili yapılan parametrik çalışmadan bahsedilmiştir. Değişik dalga boyu uzunluğuna ve açıklık açısına sahip üçgen antenin, giriş empedansı ve uzak alan örüntüsündeki değişime bakılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çizelge ve şekillerle gösterilmiştir. Antenin uzunluğu arttıkça, $x - z$ düzleminde antenin uzak alan değerlerinin -3dB 'nin altına düştüğü görülmüştür. Anten uzunluğu arttıkça antenin yönlülüğü artmıştır. Anten uzunluğu λ 'dan küçük olduğunda $y - z$ düzleminde uzak alan hüzmeye genişliğinin sabit olduğu ve yan kulakçık seviyesinin düştüğü gözlenmiştir. Antenin açıklık açısı arttıkça, anten dörtgensel üçgenlere yaklaştığından alan örüntüsü bu antenlere benzemektedir.

Üçgen antenin empedansının uzunluk ve açıklık açısıyla değişimine de bakılmıştır. Empedansın gerçel kısmı, açıklık açısı, 30° , 45° , 60° olduğunda en yüksek değerine, $L = 0.75\lambda$ iken ulaşmaktadır. Empedansın sanal değerlerine bakıldığında, L , 0.75λ 'dan büyük olduğunda ulaşmaktadır. Empedansın sanal kısmının negatif olduğu görülmüştür. Antenin uzunluğu sabitken, empedansın açıklık açısıyla değişimine bakıldığında en büyük değişimin $L = 0.5\lambda$ iken olduğu görülmüştür.

İleriye dönük çalışmalarda bu parametrik çalışma kullanılarak anten parametrelerine karşılık gelen tepkileri kestirmek için eğri uydurma çalışması yapılabilir. Böylece farklı boy ve açıklık açılara sahip üçgen antenlere ait empedans ve uzak alan örüntüsü için yaklaşık değerler kolaylıkla elde edilebilir. Ayrıca, anten giriş empedansında ve uzak alan örüntüsünde keskin değişimlerin olduğu uzunluk ve açıklık açıları incelenebilir ve bunlar daha iyi performans elde etmek için kullanılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Balanis, C. A., 1982, *Antenna Theory Analysis and Design*, John Wiley and Sons.
- Brown, G.H., and Woodward, D.H., 1952, Experimentally determined radiation characteristics of conical and triangular antennas, *RCA Reviews* 13(4), 425–452.
- Collin, R.E., 1985, *Antennas and Radiowave Propagation*, McGraw-Hill Book Company.
- Compton, R.C., McPhedran, R.C., and Popovic, Z., 1987, Bow-tie antennas on a dielectric half-space: theory and experiment, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 35(6), 622–631.
- Eldek, A.A., Elsherbeni, A.Z., and Smith, C.E., 2005, A microstrip-fed modified printed bow-tie antenna for simultaneous operation in the c and x-bands, *Radar Conference, IEEE International* 10, 939–943.
- Ergül, Ö., and Gürel, L., 2007, Modeling and synthesis of circular-sectoral arrays of log-periodic antennas using multilevel fast multipole algorithm and genetic algorithms, *Radio Science*.
- Ergül, Ö. S., 2003, Fast multipole method for the solution of electromagnetic scattering problems, Master's thesis, Bilkent Üniversitesi.
- Graglia, R.D., 1993, On the numerical integration of the linear shape functions times the 3-d green's function or its gradient on a plane triangle, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 41(10), 1448–1455.
- Harrington, R. F., 1993, *Field Computation by Moment Methods*, IEEE Press.
- Ishimaru, A., 1991, *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation and Scattering*, Prentice Hall.
- Leat, C.J., Shuley, N.V., and Stickley, G.F., 1998, Triangular-patch model of bowtie antennas: validation against brown and woodward, *IEE Proc, Microwave Antennas Propagation* 145(6), 465–470.
- Makarov, S., 2001, Mom antenna simulations with matlab:rwg basis functions, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine* 43(5), 100–107.
- Makarov, S. N., 2002, *Antenna and EM Modeling with Matlab*, Wiley-Interscience.
- Oo, Z.Z., and Li, L., 2006, Different excitation feed models for full-wave simulation of aperture antenna systems, *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*.
- Qu, S.W., Ruan, C.L., and Wang, B.Z., 2006, Planar bow-tie antenna embedded in circular aperture within conductive frame, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 5, 399–401.
- Rao, S. M., Wilton, D. R., and Glisson, A. W., 1982, Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 30(3), 409–418.

- Sawaya, K., 2005, Antenna design by using method of moments, *IEICE TRANS. COMMUN.* 88(5), 1766–1773.
- Shen, X., 1994, Application of massively parallel architecture to computational electromagnetics, Master's thesis, Syracuse University.
- Siddiqui, J.Y., and Guha, D., 2007, Applications of triangular microstrip patch:circuit elements to modern wireless antennas, *Microwave Review*.

EKLER DİZİNİ

EK 1. İNGİLİZCE-TÜRKÇE TERİMLER SÖZLÜĞÜ

EK 1. İNGİLİZCE-TÜRKÇE TERİMLER SÖZLÜĞÜ

adaptive	: uyarlamalı
basis function	: açılım fonksiyonu
beam	: hüzme
beamwidth	: hüzme genişliği
bow-tie antenna	: üçgen anten
current distribution	: akım dağılımı
curve fitting	: eğri uydurma
delta-function generator	: delta-fonksiyon üretici
delta-gap model	: küçük yarık modeli
directional	: yönlü
divergence	: ıraksama
driving edge	: uyarılan kenar
domain	: tanım bölgesi
Electric Field Integral Equation (EFIE)	: Elektrik Alan İntegral Denklemi (EAİD)
expansion	: ifade
far field	: uzak alan
far field pattern	: uzak alan örüntüsü
feed	: besleme veya uyarım
flare angle	: açıklık açısı
Gauss Quadrature	: Gauss kuralı
incident wave	: gelen dalga
input impedance	: giriş empedansı
lobe	: kulakçık
meshing	: üçgenleştirme
Method of Moments (MoM)	: Momentler Yöntemi (MY)
node	: düğüm
omnidirectional	: yönsüz
patch	: yama
plane wave	: düzlem dalga
radar cross section	: radar kesit alanı
radiation pattern	: ışınım örüntüsü
return loss	: geri dönüş kaybı

scatterer	: saçııcı
side lobe	: yan kulakçık
singularity	: tekillik
triangular antenna	: üçgen anten
vector current moment	: vektör akım momenti
wire-grid model	: tel-ağ modeli

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : SEVDA BALK
Doğum Yeri : Sivas
Doğum Yılı : 09.02.1982
Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu

Ortaokul-Lise 1993-2000 : Selçuk Anadolu Lisesi, SİVAS
Lisans 2000-2005 : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yabancı Dil : Almanca, İngilizce

İş Tecrübesi

Aralık 2005-... : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA
Araştırma Görevlisi