

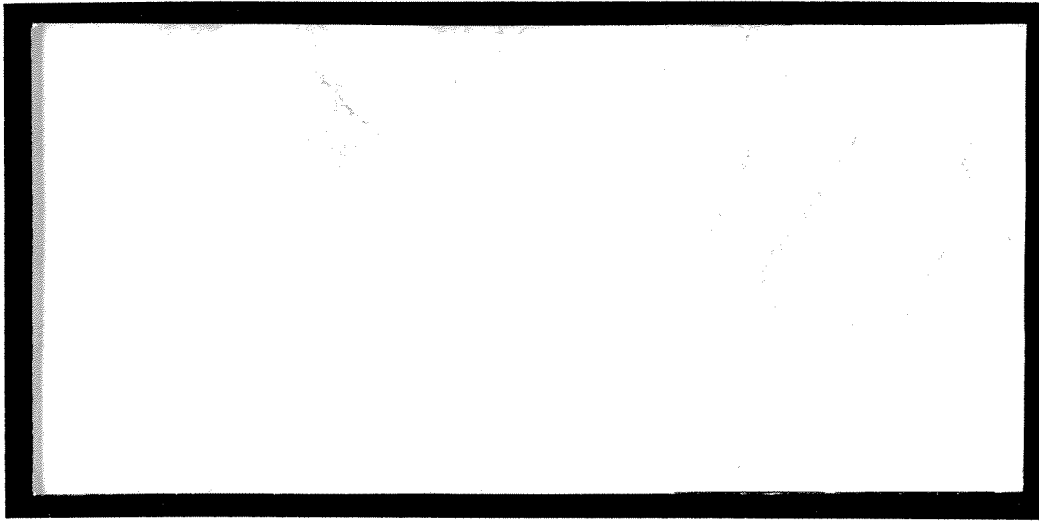
DHP



TÜRKİYE BİLİMSEL VE  
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL  
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

2003/101



Elektrik, Elektronik ve Enformatik Araştırma Grubu

Electric, Electronics and Informatics Research  
Grant Committee

**Mikroşerit Antenlerde Sonlu Yer Düzleminin  
ve Dielektrik Katmanının Etkilerinin İncelenmesi**

**PROJE NO : 100E015**

**Lale Alatan  
Özlem Aydın Çivi  
Gölge Öğücü**

**MART 2003  
ANKARA**

## ÖNSÖZ

100E015 Nolu projede, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katmanının mikroşerit anten parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri ve Gaziantep Üniversitesi araştırma görevlisinden oluşan üç kişilik bir ekip tarafından gerçekleştirilen bu proje TÜBİTAK ELEKTRİK ELEKTRONİK ve ENFORMATİK ARAŞTIRMA GRUBU tarafından desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ .....	vi
ÖZ .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. SONLU YER DÜZLEMİ VE DIELEKTRİK KATMAN ÜZERİNE YERLEŞTİRİLMİŞ MİKROŞERİT ANTENLERİN ANALİZİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YÖNTEM.....	4
2.1 Sonlu Yer Düzlemi ve Dielektrik Katman için Elde Edilen Yaklaşık Green Fonksiyonu .....	4
2.2 Sonlu yer düzlemi ve dielektrik katman üzerine yerleştirilmiş mikroşerit antenlerin MoM yöntemi ile analizi .....	9
2.3. Antenin Giriş Empedansının Hesaplanması .....	12
2.4. Sonlu Antenin Işıma Örüntüsünün Hesaplanması.....	14
3. SAYISAL SONUÇLAR.....	21
4. SONUÇ.....	38
REFERANSLAR .....	40
Ek. 1 BÜTÇE BİLGİLERİ.....	42
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU.....	43

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 Problem geometrisi ve eşdeğer problem.....	5
Şekil 2. Sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş elektrik dipol ve eşdeğer problem .....	5
Şekil 3. $y=a$ kenarına belirli açılarla gelen düzlemsel dalgalar .....	7
Şekil 4. Yama anten problemi.....	10
Şekil 5 Genel iki-girişli düzenek.....	13
Şekil 6. Sonsuz yer düzlemi ve dielektrik tabaka üzerindeki yama antenin ışınma örüntüsü, düz çizgi: yama anten ve besleme hattının ışınma örüntüsü , kesikli çizgi:yalnızca yama antenin ışınma örüntüsü.....	15
Şekil 7. Dielektrik içindeki eşdeğer polarizasyon akımları.....	17
Şekil 8. Kesikli çizgi: Dielektrik katmanı ve yer düzleminin sonsuz olduğu varsayımıyla hesaplanmış ışınma örüntüsü, Düz çizgi:Dielektrik katmanının sonlu, yer düzleminin sonsuz olduğu varsayımıyla hesaplanmış ışınma örüntüsü .....	18
Şekil 9. Yama anten akımlarının yer düzlemi üzerinde oluşturduğu eşdeğer akımlar.....	19
Şekil 10. Dielektrikteki eşdeğer polarizasyon akımlarının yer düzlemi üzerinde oluşturduğu eşdeğer akımlar .....	20
Şekil 11 Üretilen Antenin geometrisi.....	21
Şekil 12. $a=5.095\text{cm}$ , $b=5.046\text{cm}$ için $s_{11}$ .....	22
Şekil 13. $a=2.295\text{cm}$ , $b=2.046\text{cm}$ için $s_{11}$ .....	23
Şekil 14. $a=1.46\text{cm}$ , $b=1.246\text{cm}$ için $s_{11}$ .....	23
Şekil 15 H ve E düzlemlerindeki ışınma örüntülerini elde etmek için anten sırasıyla soldaki ve sağdaki şekilde gösterildiği gibi döndürülmüştür. ....	26
Şekil 16 E-düzlemi ışınma örüntüsü (1.durumdaki boyutlar için).....	28
Şekil 17 H-düzlemi ışınma örüntüsü (1.durumdaki boyutlar için) .....	29
Şekil 18 E-düzlemi ışınma örüntüsü (2.durumdaki boyutlar için).....	30
Şekil 19 H-düzlemi ışınma örüntüsü (2.durumdaki boyutlar için) .....	31
Şekil 20 E-düzlemi ışınma örüntüsü (3.durumdaki boyutlar için).....	32
Şekil 21 H-düzlemi ışınma örüntüsü (3.durumdaki boyutlar için) .....	33
Şekil 22 E-düzlemi ışınma örüntüsü (4.durumdaki boyutlar için).....	34
Şekil 23 H-düzlemi ışınma örüntüsü (4. durumdaki boyutlar için) .....	35
Şekil 24 E-düzlemi ışınma örüntüsü (5. durumdaki boyutlar için).....	36
Şekil 25 H-düzlemi ışınma örüntüsü (5. durumdaki boyutlar için) .....	37

## TABLO LİSTESİ

Tablo 1 Üretilen antenlerin boyutları ve ölçüm sonuçları.....	22
Tablo 2 Hesaplanan $s_{11}$ değerleri, $a=5\text{cm}$ , $b=5\text{cm}$ .....	24
Tablo 3 Hesaplanan $s_{11}$ değerleri, $a= 2.295$ , $b=2.046$ cm .....	24
Tablo 4 Hesaplanan $s_{11}$ değerleri, $a= 1.46$ , $b=1.246$ cm .....	25
Tablo 5 Hesaplanan $s_{11}$ değerleri, $a= b=0.2$ cm.....	25
Tablo 6 Bütçe özeti .....	42

## ÖZ

Mikroşerit antenler hafif, ince ve küçük ölçekli yapıları, ucuza ve seri olarak üretilebilmeleri ve monte edilecekleri yüzeye göre şekillendirilebilmeleri açısından bir çok ticari ve askeri uygulamada tercih edilmektedir. Mikroşerit yama antenler, uygulamada sonlu dielektrik katmanlar üzerine yapıldıkları halde, tasarım aşamasını kolaylaştırmak amacıyla dielektrik ve yer tabakalarının sonsuz olduğu varsayımı kullanılmakta; bu da uygulamada amaçlanan özelliklerin tam olarak elde edilememesine yol açmaktadır. Bu projede, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katman üzerindeki mikroşerit yama antenin elektromanyetik modellenmesi yapılmış, bu tür sonlu yapıların analizi için MoM (momentler yöntemi) formülasyonu ve bu formülasyona dayalı bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım kullanılarak elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak geliştirilen formülasyonun doğruluğu gösterilmiştir. Ayrıca, geliştirilen yöntem kullanılarak, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katmanın anten parametrelerine olan etkileri incelenmiştir. Antenin ışınma örüntüleri tüm uzay için bulunmuştur. Yer düzleminin ve dielektrik katmanın sonlu olmasının ışınma örüntüsünü önemli ölçüde etkilediği; oysa ki giriş empedansını ve rezonans frekansını pek etkilemediği gözlenmiştir.

*Anahtar kelimeler:* mikroşerit antenler, sonlu yer düzlemi, sonlu dielektrik katmanı, sayısal yöntemler

## ABSTRACT

Microstrip antennas, being low profile, lightweight, low cost and conformal, are widely used in both commercial and military applications. Although microstrip antennas are printed on finite substrate and ground plane, computer aided design tools make use of infinite ground plane and dielectric substrate assumption to simplify the analysis. This assumption may lead to some deviations from the design goals, so some iterations are required to obtain the given specifications. In this project, microstrip patch antenna on finite ground plane and substrate has been modeled and an efficient MoM formulation and code based on this formulation has been developed to analyze these structures. To validate this formulation, numerical results have been compared with measurements. Radiation pattern of the microstrip antenna for all space has been calculated. The effects of finite ground plane and truncated substrate on radiation characteristics of a microstrip antenna have been investigated. It has been observed that radiation pattern has been affected significantly, whereas resonant frequency and input impedance have not been affected considerably.

*Key words:* microstrip antennas, finite ground plane, truncated dielectric substrate, numerical methods



# 1. GİRİŞ

Mikroşerit antenler hafif, ince ve küçük ölçekli yapıları, ucuza ve seri olarak üretilebilmeleri ve monte edilecekleri yüzeye göre şekillendirilebilmeleri açısından telsiz ve mobil iletişim, uydu iletişimi, akıllı anten sistemleri vb. bir çok uygulamada tercih edilmektedir. Özellikle mobil iletişim sistemleri gibi kısıtlı bir alanda tasarım yapılmasını gerektiren uygulamalarda mikroşerit antenlerin yer düzlemleri anten elemanının büyüklüğüne göre çok geniş yapılamaz. Bu nedenle, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katmanının anten parametrelerine (rezonans frekansı, giriş empedansı, ışıma örüntüsü gibi) olan etkilerinin incelenmesi anten tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır. Mikroşerit antenler, uygulamada sonlu dielektrik katmanlar üzerine yapıldıkları halde, tasarım aşamasını kolaylaştırmak amacıyla dielektrik ve yer tabakalarının sonsuz olduğu varsayımı kullanılmakta; bu da uygulamada amaçlanan özelliklerin tam olarak elde edilememesine yol açmaktadır. Bu nedenle, istenilen özellikler elde edilene kadar deneme yanılma yöntemiyle değişiklikler yapılarak antenler üretilmekte ve ölçümler yapılmaktadır. Bu da hem zaman hem işgücü hem de mali yönden zarara yol açmaktadır. Bu projede, sonlu dielektrik katmanı ve yer düzleminin anten parametrelerine olan etkisinin incelenmesi için, öncelikle, yer düzlemi ve dielektrik katmanının sonlu olduğu durum düşünülerek mikroşerit anten modellenmiş, bu tür yapıların analizi için MoM formülasyonu ve yazılımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım kullanılarak elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak geliştirilen formülasyonun doğruluğu gösterilmiştir. Ayrıca, geliştirilen yöntem kullanılarak, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katmanının anten parametrelerine olan etkileri incelenmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalarda dielektrik katmanının ve yer plakasının sonlu olmasının anten parametreleri üzerinde büyük ölçüde etkisi olduğu gösterilmiştir [1]-[7]. Yapılan çalışmaların çoğunda, sonlu yer düzlemi ve dielektriğin, daha çok antenin ışıma örüntüsüne olan etkileri incelenmiştir. Sonsuz dielektrik Green fonksiyonu kullanılarak mikroşerit yama antenin üzerindeki akım dağılımı bulunmuş, ve bu akımlar kullanılarak dielektriğin içindeki ve yer düzlemi üzerindeki eşdeğer polarizasyon akımları fiziksel optik (PO) yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Bütün bu akımların yarattığı ışıma örüntüsü bulunmuştur. Bir diğer deyişle bu çalışmalarda, antenin üzerindeki akım dağılımının ve anten giriş empedansının sonlandırılmış yer düzlemi ve dielektrik tabakadan etkilenmediği varsayılmıştır. Oysa ki, A. Bhattacharyya'nın makalesinde [6], yama anten üzerindeki rezonans frekansı ve giriş

empedansının, yer düzlemi ve dielektrik tabakanın büyüklüğüyle, sırasıyla %10 ve %50 civarında değiştiği gösterilmiştir. [7]'de, sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka tarafından oluşturulan kenardan yüzey dalgalarının saçınımını modelleyen kenar geçirisinin (admittance) hesaplanması anlatılmıştır. [6]'da bu kenar geçirisi iletim hattı modelinde kullanılarak dairesel dielektrik üzerindeki dairesel yama antenin giriş empedansı ve rezonans frekansı hesaplanmıştır. Fakat bu yöntem yalnızca iletim hattı modeli ile analiz edilebilecek mikroşerit antenler için kullanılabilir. Ayrıca, kenar geçirisi, sonsuz manyetik hat akımı için çıkarılmış olduğundan [6]'daki gibi yüzey dalganın daima kenara dik geldiği durumlar için uygulanabilmektedir. Bu nedenle, yüzey dalgaların kenara farklı açılarla yaklaştığı dikdörtgen mikroşerit yama antenin analizinde bu yöntem kullanılamaz. Bu projenin başlangıcında, bu makaledeki sonuçlar da göz önüne alınarak, sonlu daha genel mikroşerit anten yapılarının analizinin yapılabilmesi ve özellikle de üç boyutlu yapılarda giriş empedansının değişiminin incelenmesi için çalışmalar yapılmasına karar verilmişti. Fakat yapılan çalışmalar sırasında bu makaledeki formülasyonda ve dolayısıyla sonuçlarda hata olduğu gözlenmiştir. Bu hata ve sonuçlara etkisi ikinci bölümde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Bu hata düzeltilindiğinde, makalede iddia edildiğinin aksine, giriş empedansının sonlu yapıdan pek etkilenmediği gözlenmiştir. Bu da bu projede önerdiğimiz yöntemin sonuçlarıyla uyum içerisindedir.

Bu projede, daha genel mikroşerit anten yapılarının analizinin yapılabilmesi için sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka tarafından oluşturulan kenardan, yüzey dalgalarının saçınımını modelleyen kenar geçirisi kullanılarak, sonlu yapı için yaklaşık bir Green fonksiyonu bulunmuştur. Bu Green fonksiyonu kullanılarak yapılan MoM formülasyonu yama anten üzerindeki akım dağılımları ve giriş empedansı sonlu yer düzlemi ve dielektriğin etkileri de katılarak hesaplanabilmektedir. MoM yönteminde mikroşerit anten üzerindeki akımlar açılım fonksiyonları cinsinden ifade edilerek iletken yüzey üzerindeki teğet elektrik alanının sıfır olma sınır koşulundan elde edilen integral denklemi matris denkleme dönüştürülmektedir. Integral denklemi elde edilirken, bu projede geliştirilen yaklaşık Green fonksiyonu kullanılmıştır. Formülasyonda vektör ve skalar potansiyeller için Green fonksiyonlarının, yer uzayında kapalı formdaki ifadeleri kullanılmıştır, [8,9]. İkinci bölümde, sonlu yer düzlemi ve dielektrik için yaklaşık Green fonksiyonunun nasıl elde edildiği ve sonlu mikroşerit antenin analizi için geliştirilen formülasyon ayrıntıları ile anlatılmıştır.

Geliştirilen yöntem kullanılarak, farklı büyüklüklerde sonlu dielektrik ve yer düzlemi üzerine yerleştirilmiş mikroşerit hat ile beslenen dikdörtgen mikroşerit yama antenlerin ışınma örüntüleri, giriş empedansları, rezonans frekansları hesaplanmıştır. Ayrıca, antenler

laboratuvarımızdaki olanaklar çerçevesinde üretilerek ışınma örüntüleri ve yansıma katsayıları ( $S_{11}$ ) ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarıyla, hesaplamalardan elde sonuçlar karşılaştırılmış ve birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir. Bu da geliştirilen yöntemin ve yazılımın doğruluğunu göstermektedir. Antenin arkaya yaptığı ışınma ancak sonlu yapıları inceleyen bir yöntemle bulunabilir; burada geliştirilen yöntemle arkaya olan ışınma doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Antenin ışınma örüntüsünün, yer düzleminin ve dielektriğin sonlu olmasından çok etkilendiği görülmüştür. Mikroşerit yama antenin üzerindeki akımlar, dielektriğin içindeki akımlar ve yer düzleminin üzerindeki akımların ışınma örüntüsüne etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Sonlu dielektrik ve yer düzleminin anten parametrelerine olan etkileri üçüncü bölümde verilmiştir.

Projeden elde edilen sonuçlar ve ileride yapılabilecek çalışmalar dördüncü bölümde özetlenmiştir. Projenin ayrıntılı bütçesi ise Ek.1'de sunulmuştur.

Bu projede, proje önerisinde belirtildiği şekilde, sonlu dielektrik ve yer düzlemi üzerindeki mikroşerit yama antenlerin ışınma analizi için özgün bir formülasyon ve ilgili yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen formülasyon konferanslarda sunulmuş ve ilgi çekmiştir, [10,11,12]. Yine öneride belirtildiği gibi, sayısal olarak elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonlu dielektrik ve yer düzleminin antenin ışınma örüntüsü, giriş empedansı, rezonans frekansı gibi önemli anten parametrelerine olan etkileri incelenmiştir.

## 2. SONLU YER DÜZLEMİ VE DİELEKTRİK KATMAN ÜZERİNE YERLEŞTİRİLMİŞ MİKROŞERİT ANTENLERİN ANALİZİ İÇİN GELİŞTİRİLEN YÖNTEM

Bu bölümde, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katman üzerine yerleştirilmiş mikroşerit yama antenlerin analizi için geliştirilen yöntem anlatılmaktadır. Öncelikle, sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka tarafından oluşturulan kenardan, yüzey dalgalarının saçınımını modelleyen kenar geçirisi kullanılarak, sonlu yapı için yaklaşık Green fonksiyonunun elde edilmesi ayrıntılarıyla verilmiştir. Daha sonra bu Green fonksiyonu kullanılarak antenin MoM yöntemiyle modellenmesi anlatılmıştır. Bölüm 2.3'de antenin giriş empedansının, Bölüm 2.4'de ise sonlu yapılar için ışınma örüntüsünün hesaplanma yöntemi verilmiştir.

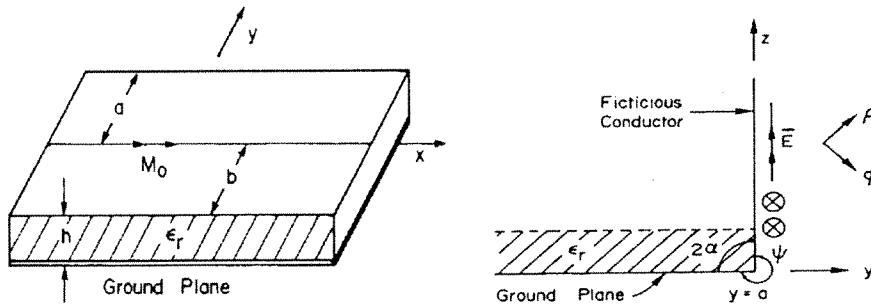
### 2.1 Sonlu Yer Düzlemi ve Dielektrik Katman için Elde Edilen Yaklaşık Green Fonksiyonu

[7]'de, sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka tarafından oluşturulan kenardan yüzey dalgalarının saçınımını modelleyen kenar geçirisi (admittance) bulunarak antenin iletim hattı modelinde kullanılmıştır. Kenar geçirisi, sonsuz manyetik hat akımı için çıkarılmıştır. Daha genel mikroşerit anten yapılarının analizinin yapılabilmesi için sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka tarafından oluşturulan kenardan yüzey dalgalarının saçınımını modelleyen kenar geçirisi kullanılarak, sonlu yapı için yaklaşık bir Green fonksiyonu bulunabilir. Bu Green fonksiyonu kullanılarak yapılan MoM formülasyonu ile yama anten üzerindeki akım dağılımları ve giriş empedansının sonlu yer düzlemi ve dielektriğin büyüklüğüyle değişimi doğru olarak hesaplanabilir. Böylece, anten parametrelerini en az etkileyecek yer düzlemi büyüklüğü ve şekli de saptanabilir. Aşağıda sonlu yer düzlemi ve dielektrik için yaklaşık Green fonksiyonunun nasıl elde edildiği maddeler halinde verilmiştir.

[7]'de, Şekil 1'de gösterildiği gibi, yarı sonlu dielektrik katman üzerine, manyetik çizgisel akım kaynağı yerleştirilmiş ve bu kaynaktan yayılan dalgalar uzay dalgası (space wave) ve yüzey dalgası (surface wave) terimlerine ayrılmışlardır. Yer düzlemi ve dielektriğin sonlanması nedeniyle yüzey dalgalarının karşılaştığı süreksizliği kenar geçirisiyle modelleyebilmek için eşdeğerlik prensibi (equivalence principle) kullanılarak, dielektrik-hava süreksizliğinde ( $y=a, z>0$ ) eşdeğer manyetik yüzey akımları bulunmuştur. Eşdeğerlik prensibine dayanılarak  $y=a$ 'ya hayali yarı-sonsuz bir iletken levha yerleştirilmiştir. Bu sanal

iletken tabaka ve dielektrik tabaka altındaki yer düzlemi bir kama (wedge) oluşturmaktadır. Bu kamanın üzerine yerleştirilmiş eşdeğer manyetik akımların yarattığı manyetik alan bulunmuştur. Daha sonra manyetik alanın sanal iletken üzerindeki bileşeni ve sanal iletkenin üzerine düşen yüzey dalgasının elektrik alan bileşeni (eşdeğer manyetik akımlar) kararlı formül (stationary formula) içinde kullanılmış ve kenar geçirisi  $y_{edge}$  aşağıda ifade edildiği şekilde bulunmuştur:

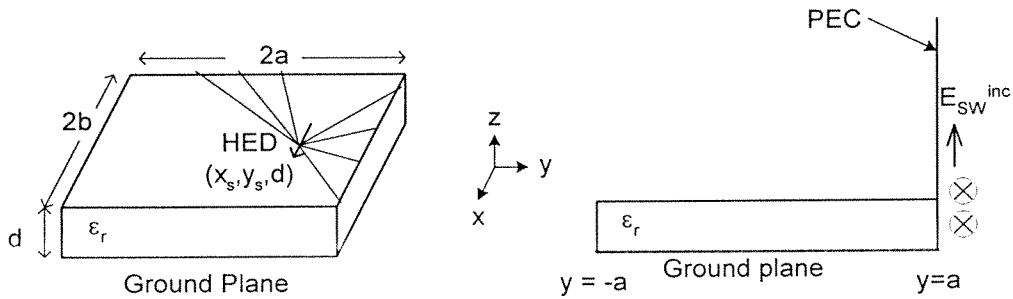
$$y_{edge} = \frac{\langle H, M \rangle}{\langle M, M \rangle} \quad (1)$$



Şekil 1 Problem geometrisi ve eşdeğer problem

Daha genel bir analiz yöntemi geliştirmek için dört tarafı da sonlu olan iletken tabaka üzerindeki dielektrik katmanın üzerine, Şekil 2'de gösterildiği gibi,  $(x', y', d)$  noktasına, bir yatay elektrik dipolü yerleştirilmiştir. Bu dipolün yaydığı yüzey dalgasının,  $y=a$  kenarı üzerindeki değeri şu şekilde ifade edilebilir :

$$E_z^{inc,sw} = 2\pi j \text{Re} s f(z) k_{\rho 0} H_0^2 \left( k_{\rho 0} \sqrt{(x-x')^2 + (a-y')^2} \right) \quad (2)$$



Şekil 2. Sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş elektrik dipol ve eşdeğer problem

Denklem (2)'de  $f(z)$ , dalganın  $z$ -yönünde nasıl değiştiğini gösteren fonksiyon,  $H_0^2$  sıfıncı derece, ikinci tür Hankel fonksiyonu,  $k_{\rho 0}$  yüzey dalganın yayılma sabiti,  $Res$  ise frekans uzayında Green fonksiyonunun yüzey dalga yayılım sabitine karşılık gelen kalıntısıdır (residue).  $f(z)$ , [7]'de denklem (15)'te verildiği gibi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$f(z) = \begin{cases} \cos(k_{z1}z)/\varepsilon_r, & z < d \\ \cos(k_{z1}d)e^{-k_{z2}(z-d)}, & z > d \end{cases} \quad (3)$$

burada  $k_{z1} = \sqrt{\varepsilon_r k_0^2 - k_{\rho 0}^2}$ ,  $k_{z2} = \sqrt{k_{\rho 0}^2 - k_0^2}$  dir.

Denklem (1)'de sadeleşmelerden sonra paydadaki iç çarpım  $f(z)$ 'in karesinin integrali haline indirgenmektedir. Bu integral analitik olarak aşağıdaki şekilde alınabilir:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} f(z)^2 dz &= \int_0^d \frac{\cos^2(k_{z1}z)}{\varepsilon_r^2} dz + \int_d^{\infty} \cos^2(k_{z1}d)e^{-2k_{z2}(z-d)} dz \\ &= \frac{1}{2\varepsilon_r^2} \left[ d + \frac{\sin(2k_{z1}d)}{2k_{z1}} \right] + \frac{\cos^2(k_{z1}d)}{2k_{z2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

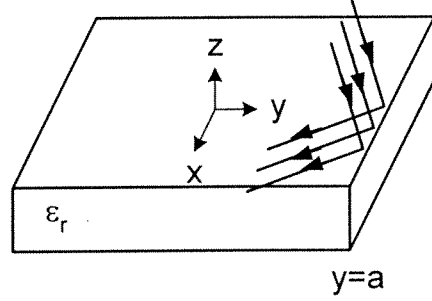
Denklem (4) ile [7]'deki Denklem (19) karşılaştırıldığında, makaledeki denklemde eksiklikler olduğu görülmektedir. Denklem (19) kullanılarak hesaplanmış yansıma katsayıları küçük çıkmakta ( $\sim 0.4-0.5$ ) ve yer düzleminin büyük olduğu durumlarda bile giriş empedansının, rezonans frekansının etkilendiği gibi bir yansılamaya yol açmaktadır. Denklem (4) ile hesaplanmış yansıma katsayıları ise 1'e daha yakın çıkmaktadır, dolayısıyla ancak yer düzlemi ve dielektrik katman yama antenin boyutlarına çok yakın olduğu zaman giriş empedansı ve rezonans frekansını etkilemektedir.

Yüzey dalgasının kenardan yansımalarını hesaplarken problemin çözümünü daha da basitleştirmek için Denklem (2)'de verilen Hankel fonksiyonunun düzlem dalgalar cinsinden açılımı kullanılmıştır:

$$\pi H_0^2(k_{\rho 0} \sqrt{x^2 + y^2}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_x x} \frac{e^{-jk_y y}}{k_y} dk_x = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_y y} \frac{e^{-jk_x x}}{k_x} dk_y, \quad k_{\rho 0} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (5)$$

Bu sayede Şekil 3'de gösterildiği gibi kenardaki yüzeye belirli açılarla gelen düzlem dalgaların yansımalarının daha kolay formüle edilmesi ve her geliş açısına göre yansıma katsayısının ( $\Gamma$ ) hesaplanması mümkün olmuştur:

$$\Gamma(k_y) = \frac{\frac{k_{\rho 0}}{\omega\mu} - y_{edge}(k_y)}{\frac{k_{\rho 0}}{\omega\mu} + y_{edge}(k_y)}, \quad (6)$$



Şekil 3.  $y=a$  kenarına belirli açılarla gelen düzlemsel dalgalar

Yüzeysel dalganın düzlem dalgaları cinsinden açılımında Denklem (5)'de, her geliş açısına karşılık gelen düzlem dalganın,  $y=a$  düzleminde oluşturduğu eşdeğer akımlar bulunmuştur. Eşdeğer akımların çizgisel akımlar olduğu [7]'deki durumun tersine bu projede geliştirilen yöntemde, ele alınan kaynağın dipol olması nedeniyle eşdeğer akımlar  $x$  yönünde de değişmektedir ( $e^{-jk_x x}$ ). Daha sonra  $y=a$ ,  $z>0$  düzlemine hayali iletken tabaka konulmuş; bu iletken tabaka yer düzlemiyle bir kama oluşturmuştur. Bu eşdeğer akımların kamanın varlığında yaydıkları manyetik alanın Green fonksiyonu, silindirik dalga fonksiyonları cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir, [13]:

$$G_x^H = \begin{cases} \omega\epsilon_0\pi \frac{2}{3} e^{-jk_z x} \sum_n \frac{1}{\sigma_n} H_{\frac{2n}{3}}^{(2)}(k_t z') J_{\frac{2n}{3}}(k_t z), & z < z' \\ \omega\epsilon_0\pi \frac{2}{3} e^{-jk_z x} \sum_n \frac{1}{\sigma_n} H_{\frac{2n}{3}}^{(2)}(k_t z) J_{\frac{2n}{3}}(k_t z'), & z > z' \end{cases} \quad (7)$$

Burada  $\sigma_0 = 2, \sigma_n = 1, n \neq 0$  ve  $k_t = \sqrt{k_0^2 - k_x^2}$  dir. Eşdeğer akımların  $x$  yönündeki değişimi nedeniyle silindirik dalga fonksiyonları  $k_0$  yerine  $k_t$  ile yayılmaktadır.

İletken düzlem üzerindeki toplam manyetik alan aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$H_x(z) = \int_0^{\infty} f(z') G_x^H(z, z') dz' \quad (8)$$

Elde edilen toplam manyetik alan kullanılarak, kenar geçirisi Denklem (1)'deki kararlı formülle hesaplanmaktadır. Böylelikle her geliş açısı için kenar geçirisi ve ona karşılık gelen kenar yansıma katsayısı hesaplanmaktadır.

Bulunan bu yansıma katsayıları kullanılarak, yansıyan elektrik alan yüzey dalgası terimi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$E_z^{\text{ref}} \propto \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(k_y) e^{-jk_y 2a} e^{+jk_y y} \frac{e^{-jk_x x}}{k_x} dk_y \quad (9)$$

Yansıma katsayısı  $\Gamma(k_y)$ , genelleştirilmiş fonksiyon kalemi (Generalized Pencil of Function - GPOF) yöntemi kullanılarak, kompleks üsteller cinsinden aşağıdaki şekilde açılabilir:

$$\Gamma(k_y) \cong \sum_{i=1, N} \beta_i e^{\alpha_i k_y} \quad (10)$$

Böylelikle yansıyan elektrik alan yüzey dalgası terimi  $E_z^{\text{ref}}$

$$E_z^{\text{ref}} \propto \sum_{i=1, N} \beta_i \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_y(2a-y+j\alpha_i)} \frac{e^{-jk_x x}}{k_x} dk_y \quad (11)$$

olur. Yine Hankel fonksiyonunun düzlemsel dalgalar cinsinden açılımından yararlanılarak yansıyan elektrik alan bileşeni

$$E_z^{\text{ref,sw}} = f(z) k_{\rho 0} \sum_{i=1, N} \beta_i H_0^2 \left( k_{\rho 0} \sqrt{(x-x')^2 + \underbrace{(2a-(y+y')-j\alpha_i)^2}_{\text{kaynağın görüntüsü}}} \right) \quad (12)$$

şeklinde bulunur.



Yukarıda Denklem (12)'de verilen yansıyan dalga sadece  $y=a$  kenarı için bulunmuştur. Sonlu dielektrik katmanının diğer kenarlarından meydana gelecek yansımalar da, yansımaya neden olan süreksizliğin yapısının değişmemesi nedeni ile aynı  $\alpha_i$  ve  $\beta_i$  değerleri ile ifade edilebilmektedir. Böylelikle dört kenardan ( $y=a$ ,  $y=-a$ ,  $x=b$ ,  $x=-b$ ) yansıyan toplam yüzey dalga aşağıdaki gibi ifade edilebilir

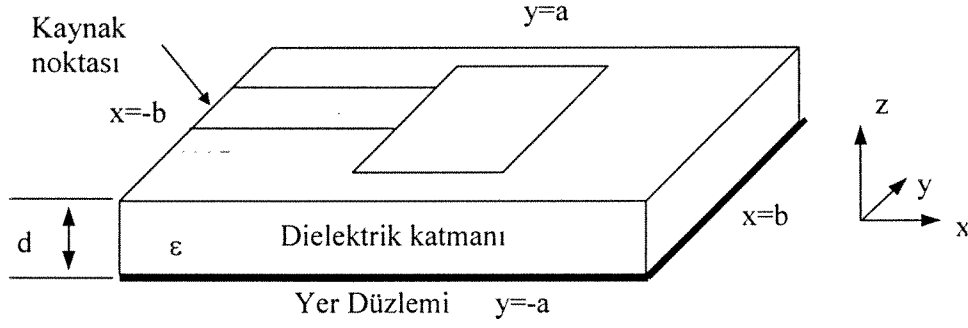
$$\begin{aligned}
E_z^{ref,sw} = f(z)k_{\rho 0} \sum_i \beta_i \left\{ H_0^2 \left( k_{\rho} \sqrt{(x-x')^2 + (2a - (y+y') - ja_i)^2} \right) \right. \\
+ H_0^2 \left( k_{\rho} \sqrt{(x-x')^2 + (2a + (y+y') - ja_i)^2} \right) \\
+ H_0^2 \left( k_{\rho} \sqrt{(2b - (x+x') - ja_i)^2 + (y-y')^2} \right) \\
\left. + H_0^2 \left( k_{\rho} \sqrt{(2b + (x+x') - ja_i)^2 + (y-y')^2} \right) \right\}
\end{aligned} \quad (13)$$

## 2.2 Sonlu yer düzlemi ve dielektrik katman üzerine yerleştirilmiş mikroşerit antenlerin MoM yöntemi ile analizi

Bu bölümde, Şekil 4'deki gibi mikroşerit yama anten yapılarının, sonlu dielektrik ve yer düzlemi için MoM yöntemiyle analizi için kullanılan formülasyon anlatılmıştır. MoM yönteminde mikroşerit anten üzerindeki akımlar açılım fonksiyonları cinsinden ifade edilerek iletken yüzey üzerindeki teğet elektrik alanının sıfır olma sınır koşulundan elde edilen integral denklemi matris denklemine dönüştürülür. Karışık potansiyel integral denklemi, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
-E_x^{inc} &= -j\omega G_{xx}^A * J_x + \frac{1}{j\omega} \frac{\partial}{\partial x} [G_q * \nabla \cdot \vec{J}] \\
-E_y^{inc} &= -j\omega G_{yy}^A * J_y + \frac{1}{j\omega} \frac{\partial}{\partial y} [G_q * \nabla \cdot \vec{J}]
\end{aligned} \quad (14)$$

burada  $E^{inc}$ , gelen (incident) elektrik alanı,  $J_x$  ve  $J_y$  yama anten üzerinde  $x$  ve  $y$  yönünde indüklenen akımları,  $G_q$  skalar potansiyel için Green fonksiyonunu,  $G_{xx}^A$ ,  $x$  yönündeki dipolün  $x$  yönünde yarattığı vektör potansiyelin Green fonksiyonunu,  $G_{yy}^A$  ise  $y$  yönündeki dipolün  $y$  yönünde yarattığı vektör potansiyelin Green fonksiyonunu göstermektedir.



Şekil 4. Yama anten problemi

İntegral denklemlerin MoM yöntemi ile çözümünde bilinmeyen indüklenen yüzey akımları temel fonksiyonlar  $J_{xn}$  ve  $J_{yn}$  cinsinden aşağıdaki şekilde açılmaktadır:

$$J_x = \sum_{n=1}^N A_x J_{xn}(x, y), \quad J_y = \sum_{n=1}^N A_y J_{yn}(x, y) \quad (15)$$

Bu çalışmada temel fonksiyon olarak akım yönünde üçgensel değişimli, akıma dik yönde sabit olan çatı şeklindeki (rooftop) fonksiyonlar kullanılmıştır. Galerkin metodu uygulanarak test fonksiyonları temel fonksiyonlarla aynı seçilmiştir. Test fonksiyonları  $T_{xn}$  ve  $T_{yn}$ 'in, uygun bir içsel çarpımının kullanılması ve sınır şartlarının uygulanmasıyla aşağıdaki matris denklemi elde edilmektedir:

$$\begin{bmatrix} Z_{mn}^{xx} & Z_{mn}^{xy} \\ Z_{mn}^{yx} & Z_{mn}^{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m^x \\ V_m^y \end{bmatrix} \quad (16)$$

Burada

$$Z_{mn}^{xx} = \left\langle T_{xm}, G_{xx}^A * J_{xn} \right\rangle + \frac{1}{\omega^2} \left\langle T_{xm}, \frac{\partial}{\partial x} \left[ G_q * \frac{\partial}{\partial x} J_{xn} \right] \right\rangle \quad (17.a)$$

$$Z_{mn}^{xy} = \frac{1}{\omega^2} \left\langle T_{xm}, \frac{\partial}{\partial x} \left[ G_q * \frac{\partial}{\partial y} J_{yn} \right] \right\rangle \quad (17.b)$$

$$V_m^x = - \left\langle T_{xm}, E_x^{inc} \right\rangle \quad (17.c)$$

Denklem (17)'de hesaplanması gereken içsel çarpım terimleri analitik olarak hesaplanamayan integraller içerir. Bu yüzden Green ve temel fonksiyonlar üzerinden alınan evrişim (convolution) integrali temel ve test fonksiyonlarının üzerine transfer edilir. Bu sayede evrişim (convolution) analitik olarak hesaplanabilir, [9]. Böylece, matris elemanları aşağıdaki ifadeler kullanılarak bulunabilir

$$Z_{mn}^{xx} = \left\langle G_{xx}^A, T_{xm} * J_{xn} \right\rangle - \frac{1}{\omega^2} \left\langle G_q, \left[ \frac{\partial}{\partial x} T_{xm} * \frac{\partial}{\partial x} J_{xn} \right] \right\rangle \quad (18.a)$$

$$Z_{mn}^{xy} = -\frac{1}{\omega^2} \left\langle G_q, \left[ \frac{\partial}{\partial x} T_{xm} * \frac{\partial}{\partial y} J_{yn} \right] \right\rangle \quad (18.b)$$

Denklem (18)'deki integraller hesaplanırken, bulunan yaklaşık kapalı-form Green fonksiyonları kullanılmaktadır. Burada yaklaşık Green fonksiyonunu kullanırken dikkat edilmesi gereken noktalar vardır. Bölüm 2.1'de dielektrik katman ile hava tabakasının birleştiği düzleme yerleştirilmiş  $x$  ya da  $y$ -yönündeki noktasal bir akım kaynağının neden olduğu  $z$ -yönündeki yüzey dalgasının dielektrik katmanın dört kenarından yansıması hesaplanarak yaklaşık Green fonksiyonu elde edilmiştir. MoM matris elemanları incelendiği zaman vektör potansiyel Green fonksiyonunun  $xx$ ,  $xy$  ve  $yy$  bileşenlerinin hesaplanmasının gerektiği gözlenmektedir. Ancak bu bileşenlerden hiç biri  $z$ -yönündeki elektrik alan ifadesinde yer almamakta, yalnız scalar potansiyel  $z$ -yönündeki elektrik alanı belirlemektedir. Bu nedenle kenarlardan olan yansımaları ifade eden terimler sadece skalar potansiyelin Green fonksiyon hesaplanmasında kullanılmış ve sonsuz durum için elde edilen Green fonksiyonuna eklenmiştir. Vektör potansiyel için ise herhangi bir terim eklemekten sadece sonsuz durum için elde edilen Green fonksiyonlar kullanılmıştır.

Sonsuz dielektrik katman ve yer düzlemi için skalar ve vektör potansiyellerin yer uzayında (spatial domain) ifade edilmesinde kapalı formdaki Green fonksiyonları yöntemi kullanılmıştır [14]. Bu yöntemde frekans uzayındaki (spectral domain) Green fonksiyonları kompleks üsteller cinsinden açılmakta ve yer uzayına dönüşümde Sommerfeld özelliği kullanılmaktadır. Skalar potansiyel Green fonksiyonu kapalı formda aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$G_q = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left\{ \sum_n b_n \frac{e^{-jkr_n}}{r_n} + \underbrace{(-j2\pi) \sum_i^{N_{TE}+N_{TM}} k_{pp(i)} H_0^2(k_{pp(i)}\rho) \text{Re } s^i}_{\text{yüzeydalga}} \right\} \quad (19)$$

$$\rho = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}, r_n = \sqrt{\rho^2 - a_n^2}$$

Bu denklemde  $b_n$  ve  $a_n$  sırasıyla frekans uzayındaki Green fonksiyonun kompleks üsteller cinsinden açılımındaki katsayı ve üsteli ifade etmektedir,  $k_{pp}$  yüzey dalganın yayılım sabiti,  $\text{Re } s$  ise kalıntısıdır.

Sonlu yerdüzlemi ve dielektrik katman üzerine yerleştirilmiş yama antenin analizinde Denklem (19)'daki ifadeye Deklem (13)'deki yansıma terimleri eklenmektedir.

Sonuçta oluşan empedans matrisi ve voltaj vektöründen yama anten üzerindeki akım dağılımını Denklem (16)'yı kullanarak bulmak mümkündür.

### 2.3. Antenin Giriş Empedansının Hesaplanması

Elde edilen akım dağılımından antenin giriş empedansının hesaplanması için [16]'da önerilen yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde anteni besleyen mikroşerit hat üzerindeki akım  $+y$  (gelen) ve  $-y$  (yansıyan) yönlerinde ilerleyen iki dalga cinsinden ifade edilmekte ve yansıyan dalganın katsayısının gelen dalganın katsayısına oranı yansıma katsayısını vermektedir. Elde edilen yansıma katsayısı iletim hattının karakteristik empedansına göre normalize edildiği için öncelikle iletim hattının karakteristik empedansının hesaplanması gerekmektedir. Efektif dielektrik katsayısını ve karakteristik empedansını bulmak için önce hattın ucuna yama anteni bağlamadan sonu açık bırakılan hattın üzerindeki akım dağılımı yukarıda anlatılan MoM yöntemiyle bulunmuştur. En Az Kare Prony Metodu (least square Prony Method) [17] kullanılarak hattın üzerindeki akım

$$I = C^+ e^{-\gamma_1 y} + C^- e^{\gamma_2 y} \quad (20)$$

şeklinde yazılmıştır. Burada  $\gamma_1$  ve  $\gamma_2$ , sırasıyla  $+y$  ve  $-y$  yönünde hareket eden dalgaların dalga sayısı,  $C^+$  ve  $C^-$  de sırasıyla bu yönlerde hareket eden dalgaların katsayılarıdır. Denklem (20)'deki dalga sayısından her iki yöne hareket eden dalganın yayılım sabiti bulunabilir. Bulunan bu yayılım sabitinden efektif dielektrik sabiti

$$\epsilon_{eff} = \left( \frac{c\beta}{\omega} \right)^2 \quad (21)$$

hesaplanır.  $\beta$  yayılım sabiti ( $\gamma$ 'nın sanal kısmı),  $c$  ışık hızı ve  $\omega$  frekanstır. Efektif dielektrik sabiti bulunduktan sonra karakteristik empedans yarı-TEM yaklaşımına [18] dayanılarak şu şekilde bulunur:

$$Z_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o \epsilon_{eff}}} \ln \left( f_1 \frac{d}{w} + \sqrt{1 + \left( 2 \frac{d}{w} \right)^2} \right) \quad (22)$$

Bu denklemde  $f_1 = 6 + (2\pi - 6) \exp\left(- (30.666d/w)^{0.7528}\right)$ ,  $d$  dielektrik katmanının kalınlığı ve  $w$  iletim hattının genişliğidir.

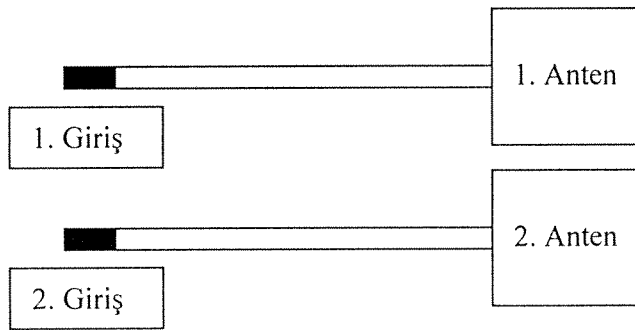
$Z_c$  bulunduktan sonra ikinci aşamada yama antenin giriş empedansı bulunabilir. Şekil 5'deki iki-girişli yapının saçılım parametrelerini bulmak için önce birinci girişe uyarım verilir ve anten ve mikroşerit iletim hattı üzerindeki akım dağılımı bulunur. Birinci anten düzeneğinin ikinci anten düzeneği üzerindeki etkisi ile bu anten ve iletim hattında da bir akım dağılımı oluşmuştur. Her iki iletim hattı üzerindeki akımlar Prony Method'u kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_1 = I_{11}^+ e^{-j\beta_{11}y} + I_{11}^- e^{j\beta_{11}y}$$

$$I_2 = I_{21}^+ e^{-j\beta_{12}y} + I_{21}^- e^{j\beta_{12}y} \quad (23)$$

Burada  $I_{ij}$   $j$ -ninci giriş uyarıldığında  $i$ -ninci girişteki iletim hattının akım dalga katsayısıdır. Bu katsayılar arasında s-parametre matrisiyle şu şekilde bir ilişki kurulabilir:

$$\begin{bmatrix} -I_{11}^- \\ I_{21}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{11}^+ \\ -I_{21}^+ \end{bmatrix} \quad (24)$$



Şekil 5 Genel iki-girişli düzenek

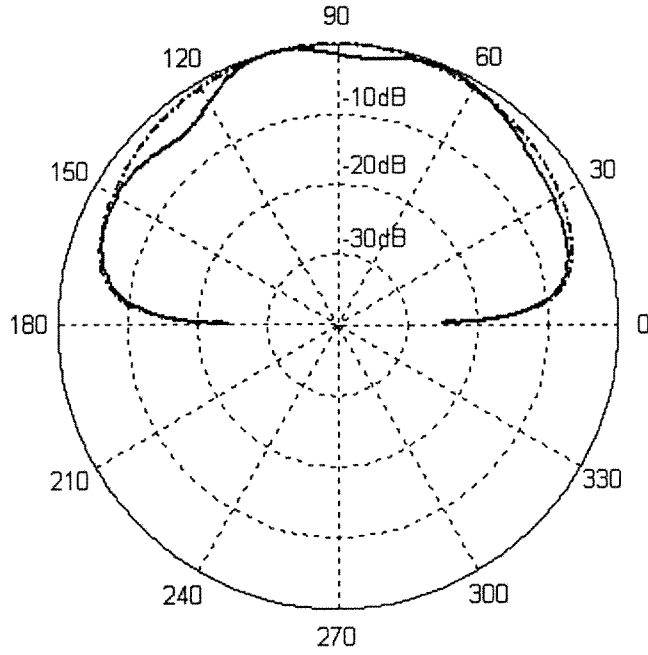
Denklem (24)'ten bulunan s-parametreleri karakteristik empedansla normalize edilmiştir. Birinci antenin giriş empedansı ise

$$Z_{in} = Z_c \frac{1 + s_{11}}{1 - s_{11}} \quad (25)$$

bağıntısı ile bulunur.

#### 2.4. Sonlu Antenin Işıma Örüntüsünün Hesaplanması

Mikroşerit antenin sonsuz dielektrik katmanı ve yer düzlemi üzerinde olduğu varsayılarak MoM analizi sonucunda elde edilen akım dağılımından ışıma örüntüsü kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Yama antenin üzerindeki akımlar bulunduktan sonra, bu akımların yarattığı elektrik alanın x,y ve z bileşenleri yama antenin bulunduğu düzlem üzerinde frekans uzayında (spectral domain) kolaylıkla bulunabilmektedir. Frekans uzayındaki bu elektirik alan bileşenlerinin yer uzayına (spatial domain) dönüşüm integrali uzak alanda olmamız nedeniyle durağan faz (stationary phase) yöntemi kullanılarak hesaplanmaktadır. x,y,z bileşenleri küresel koordinat sistemine dönüştürülerek uzak alan ifadeleri elde edilmektedir. Sonsuz dielektrik katmanı ve yer düzlemi varsayımıyla elde edilen E-düzlemindeki uzak alanın  $\theta$  bileşeni Şekil 6'da düz çizgiyle gösterilmektedir. Sunulan uzak alanlar Şekil 11'deki anten ve besleme hattı boyutları için elde edilmiştir. Geliştirilen yazılımla elde edilen sonuçların çiziminde Matlab kullanılmıştır. Polar çizimlerde Matlab'in koyduğu açılarda "0" anten düzlemine, "90" derece ise anten düzlemine dik olan doğrultuya denk gelmektedir. Elde edilen ışıma örüntüsündeki asimöetri ve girintilere uzun besleme hattının neden olabileceği düşünülmüş ve bunu doğrulamak için sadece yama anten üzerindeki akım dağılımı kullanılarak ışıma örüntüsü tekrar hesaplanmıştır. Şekil 6'de kesikli çizgiyle gösterilen ışıma örüntüsü yalnızca yama antenin ışıma örüntüsüdür. Görüldüğü gibi, yalnızca yama antenin ışıması gözönüne alındığında elde edilen örüntü simetriktir ve girintiler gözlenmemektedir.



Şekil 6. Sonsuz yer düzlemi ve dielektrik tabaka üzerindeki yama antenin ışıma örüntüsü, düz çizgi: yama anten ve besleme hattının ışıma örüntüsü, kesikli çizgi: yalnızca yama antenin ışıma örüntüsü

Şekil 6'de yer düzlemi ve dielektrik sonsuz alındığı için antenin arka kısmında bir ışıma gözlenmemekte ve anten düzlemine yakın gözlem açılarında (0, 180 derece) hesaplanan elektrik alanı sıfıra yakındır. Antenin anten düzlemine yakın gözlem açılarında daha doğru hesaplanabilmesi ve arka ışın demetlerinin bulunabilmesi için dielektrik katmanının ve yer düzleminin sonlu olduğu bilgisinin kullanılması gerekmektedir. Literatürde, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katman etkilerinin hesaplanabilmesi için başlıca iki yöntem önerilmektedir, [3,5] ve [4]. Her iki yöntemde de dielektrik içerisindeki eşdeğer polarizasyon akımları ve yer düzlemi üzerindeki eşdeğer elektrik akımı fiziksel optik yaklaşımı kullanılarak frekans uzayında hesaplanmaktadır. Bu eşdeğer akımların neden olduğu uzak alanlar, literatürde önerilen yöntemlerden biriyle asimptotik olarak, diğ erinde ise nümerik olarak bulunmaktadır. Nümerik yöntemde frekans uzayındaki eşdeğer akımların yer uzayına dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem sayısal olarak verimli bir şekilde yapılamadığı için FFT (Fast Fourier Transform) gibi yöntemler kullanılmıştır. Ancak, yine de sonuçlar hızlı bir şekilde elde edilememektedir. Bu çalışmada, frekans uzayından yer uzayına dönüşüm

gerektiren her türlü hesaplamada kompleks yansı (complex image) yöntemi kullanılarak bu dönüşümler verimli bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, literatürde önerilen sayısal hesaplama yöntemi tercih edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda eşdeğer akımların bulunmasında dielektrik tabaka ve yer düzlemi sonsuz varsayılmıştır. Bu çalışmada sonlu yer düzlemi ve dielektrik katmanı için önerdiğimiz yeni Green fonksiyonları kullanılarak dielektrik katman içindeki ve yer düzlemi üzerindeki eşdeğer akımlar daha doğru olarak bulunmaktadır.

Yama anten ve besleme hattı üzerindeki akımlar Bölüm 2.2’de anlatıldığı gibi hesaplandıktan sonra, dielektrik katmanın içindeki eşdeğer polarizasyon akımları aşağıda özetlendiği şekilde hesaplanmıştır.

$x$  yönündeki bir elektrik dipolün dielektrik içerisinde oluşturduğu  $z$  yönündeki elektrik alan frekans uzayında aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\tilde{G}_{xz} = -\frac{Z_0 k_x k_2 \cos(k_1 z)}{k_0 T_M} \quad (26)$$

burada  $T_M = \varepsilon_r k_2 \cos(k_1 d) + j k_1 \sin(k_1 d)$ ’dir.

Benzer bir şekilde,  $y$  yönündeki bir elektrik dipolün dielektrik içerisinde oluşturduğu  $z$  yönündeki elektrik alan frekans uzayında aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\tilde{G}_{yz} = -\frac{Z_0 k_y k_2 \cos(k_1 z)}{k_0 T_M} \quad (27)$$

Frekans uzayındaki Green fonksiyonlarının, yer uzayına dönüştürülmesinde Bölüm 2.2’de özetlenen kompleks yansı yöntemi kullanılmıştır. Ancak bu yöntemin kullanılabilmesi için frekans uzayındaki fonksiyonun sadece  $k_z$ ’ye bağlı olması gerekmektedir. Bu nedenle kompleks yansı yöntemi kullanılarak Green fonksiyonlarının  $jk_x$  ve  $jk_y$  dışında kalan terimleri kompleks üstellerle yaklaştırılarak yer uzayındaki Green fonksiyonları bulunmuştur. Frekans uzayındaki  $jk_x$  ve  $jk_y$  terimleri, yer uzayında sırasıyla  $x$  ve  $y$ ’ye göre türeve karşılık gelmektedir. Yama üzerindeki akımların oluşturduğu  $z$  yönündeki alanların bulunabilmesi için bu Green fonksiyonları ile akımların evrişim (convolution) integrallerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplanma sırasında, Green fonksiyonunun  $x$  ve  $y$  ‘ye göre olan türevleri, parçalı integral alma (integration by part) yöntemi kullanılarak, akım dağılımı üzerine transfer edilmiştir.  $x$  yönündeki akımların hesaplanmasında üçgen açılım fonksiyonlarının kullanılması nedeniyle  $x$  yönündeki türev kolaylıkla alınabilmektedir. Benzer bir şekilde  $y$  yönündeki açılım fonksiyonları da  $y$  yönünde üçgen değişimi göstermektedir.



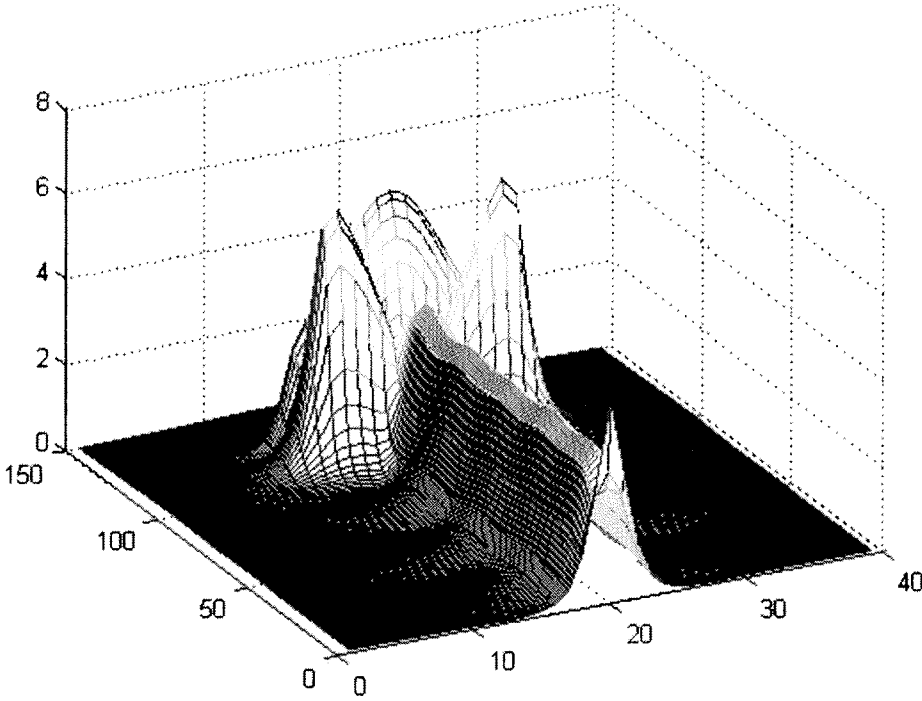
Yer uzayında bulunan Green fonksiyonlarına dielektrik katmanı ve yer düzleminin sonlu olması nedeniyle kenardan yansıyan yüzey dalgaları temsil eden yansımış Henkel fonksiyonları eklenmiştir.

Dielektrik içindeki z yönündeki eşdeğer polarizasyon akımları, yukarıda anlatıldığı gibi hesaplanan elektrik alandan aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$J_{dz} = j\omega\epsilon_0(\epsilon_r - 1)E_{dz} . \quad (28)$$

[4]'deki çalışmada, x ve y yönündeki polarizasyon akımlarının z yönündekine göreceli olarak uzak alan ışınmasını çok az etkilediğinin gösterilmesi nedeniyle bu çalışmada da sadece z yönündeki polarizasyon akımları gözönüne alınmıştır.

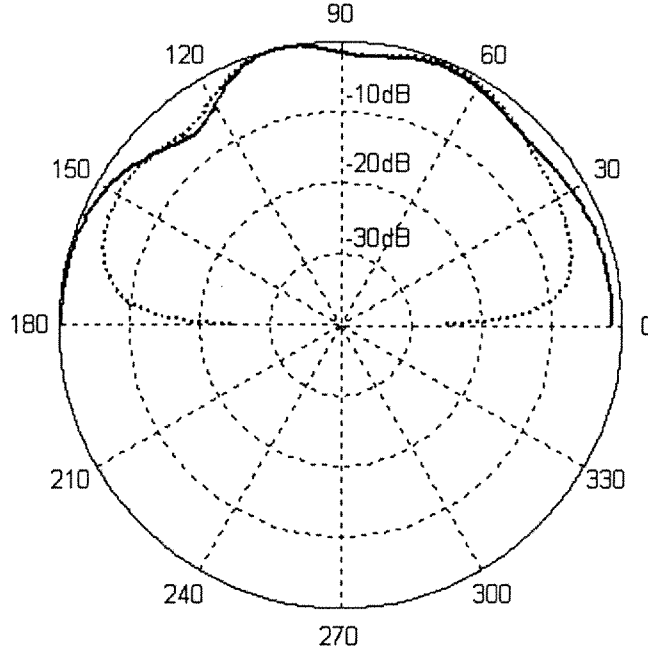
Şekil 11'deki boyutlardaki anten, dielektrik ve yer düzlemi için hesaplanan dielektrik polarizasyon akımları Şekil 7'da gösterilmektedir.



Şekil 7. Dielektrik içindeki eşdeğer polarizasyon akımları

Yer düzleminin sonsuz olduğu varsayımıyla, eşdeğer polarizasyon akımlarının ve yama anten ve besleme hattı üzerindeki akımların yansılarını ile birlikte oluşturdukları E düzlemi uzak alanı Şekil 8'da düz çizgiyle verilmiştir. Bu şekildeki kesikli çizgi, dielektirik

katmanının da sonsuz olduğu durum içindir. Görüldüğü gibi dielektrik katmanının sonlu olması anten düzlemine yakın gözlem açılarında elektrik alanın sıfırdan farklı, büyük bir değer olmasına neden olmaktadır.



Şekil 8. Kesikli çizgi: Dielektrik katmanı ve yer düzleminin sonsuz olduğu varsayımıyla hesaplanmış ışına örüntüsü, Düz çizgi: Dielektrik katmanının sonlu, yer düzleminin sonsuz olduğu varsayımıyla hesaplanmış ışına örüntüsü

Dielektrik katmanının sonlu olmasının etkileri incelendikten sonra yer düzleminin de sonlu olmasının etkilerini incelemek amacıyla yer düzlemi üzerindeki eşdeğer akımlar hesaplanmıştır. Yer düzlemi üzerindeki eşdeğer akımlara neden olan iki kaynak vardır. Bunlar, yama ve besleme hattı üzerindeki akımlar ve dielektrik içerisindeki eşdeğer polarizasyon akımlarıdır. Burada, yer düzlemi üzerindeki  $x$ -yönündeki eşdeğer akımların elde edilmesine ilişkin formülasyon sunulacaktır.

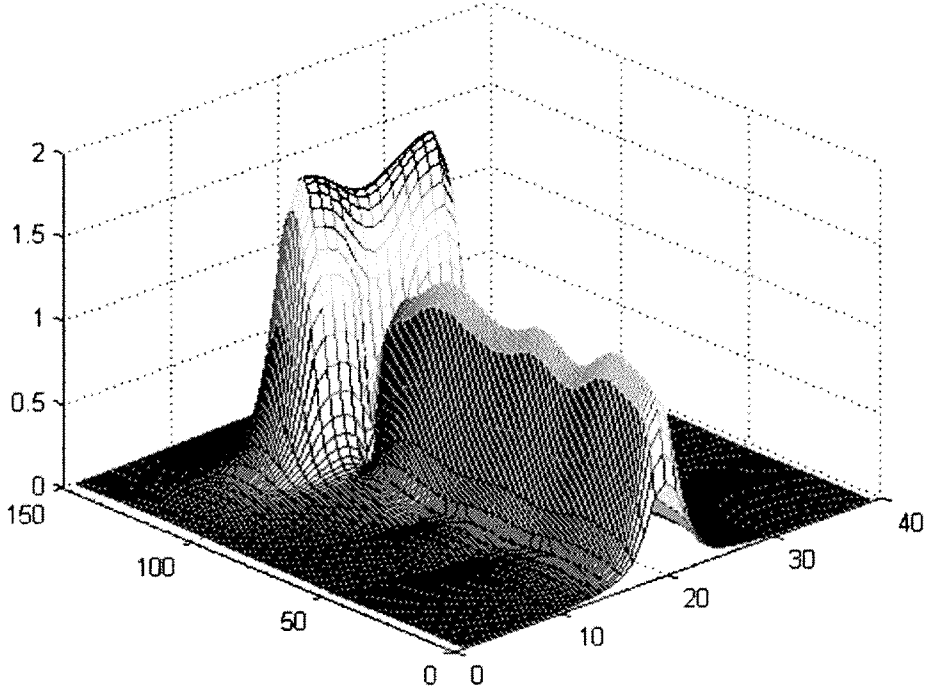
Yama anten üzerindeki  $x$  yönündeki akımlar ( $J_{px}$ )  $x$  yönündeki vektör potansiyeli yaratırlar. Bu vektör potansiyelden, yer düzlemi üzerinde oluşturulan akımlar ( $J_{gx}^p$ ) PO yaklaşımıyla aşağıda anlatıldığı şekilde bulunmaktadır.

$$A_x = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \otimes J_{px} \quad (29)$$

$$H_y = \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial z} A_x \quad (30)$$

$$J_{gx}^p = -2H_y = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \otimes J_{px} \right) \quad (31)$$

Şekil 11’de boyutları verilen anten ve yer düzlemi için yama anten ve besleme hattı tarafından yer düzlemi üzerinde oluşan akımlar Şekil 9’da verilmektedir.

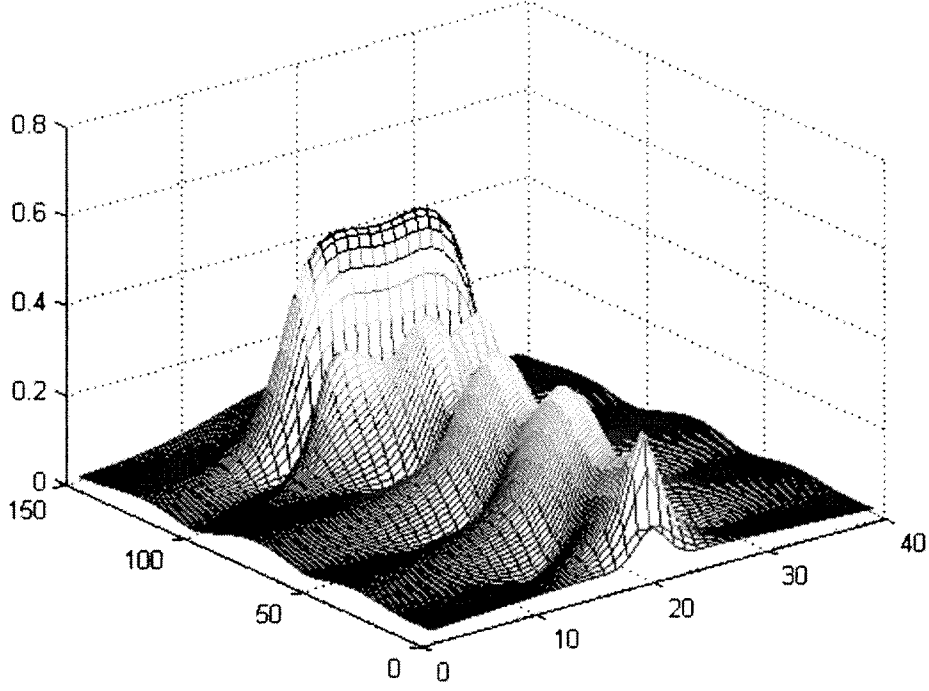


Şekil 9. Yama anten akımlarının yer düzlemi üzerinde oluşturduğu eşdeğer akımlar

Dielektrik katman içerisindeki  $z$  yönündeki eşdeğer polarizasyon akımları ( $J_{dz}$ ),  $z$  yönünde vektör potansiyel yaratmaktadır. Benzer bir şekilde dielektrik akımlarının yer düzlemi üzerinde oluşturduğu eşdeğer akımlar aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$J_{gx}^d = -2H_y = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \otimes J_{dz} \right) \quad (32)$$

Şekil 7’de verilen sonlu dielektrik katman içindeki eşdeğer polarizasyon akımları tarafından yer düzlemi üzerinde oluşan akımlar Şekil 10’da verilmektedir.



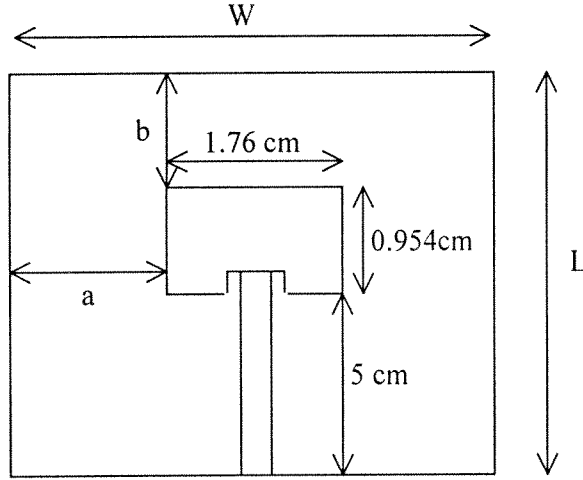
Şekil 10. Dielektrikteki eşdeğer polarizasyon akımlarının yer düzlemi üzerinde oluşturduğu eşdeğer akımlar

Tüm eşdeğer akımlar yukarıda anlatıldığı gibi hesaplandıktan sonra, besleme hat, yama anten, dielektrik katman içindeki ve yer düzlemi üzerindeki eşdeğer akımlar kullanılarak uzak alan ışınma örüntüleri hesaplanmıştır. Üretilen anten için ölçüm sonuçları ve geliştirilen yöntemle elde edilen sonuçlar Bölüm 3’de verilmektedir.

### 3. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde, yer düzlemi ve dielektrik tabakasının sonlu olmasının ışınma örüntüsü, giriş empedansı ve rezonans frekansı gibi anten parametreleri üzerindeki etkileri incelenecektir. Geliştirilen yazılımla elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır.

Şekil 11’de üretilen antenin geometrisi verilmiştir, Tablo1’de ise ölçüm yapılan farklı  $a$  ve  $b$  değerleri verilmiştir. Mikroserit yama anten, Rogers firmasının RO4003 dielektrik tabakasının üzerine yapılmıştır. Bu malzemenin dielektrik sabiti 3.38, kalınlığı ise 1.52mm’dir. RO4003, Rogers firmasının ürettiği en kalın dielektriktir. Anten  $L=11.1$  cm,  $W=11.9$  cm olacak şekilde üretildikten sonra, kenarlarından kesilerek daha küçültülmüş ve her aşamada ölçüm yapılmıştır. Dielektrik boyutları kısaltılırken, besleme hattının bulunduğu kenar dışındaki üç kenardan kısaltılma yapılmıştır. Farklı boyutlardaki ölçümlerde antenin besleme yapısının tamamen aynı kalmasının garantilenmesi için bu küçültme yöntemi izlenerek, eşksenli konektör sadece bir kere lehimlenmiş ve bir daha çıkarılıp takılmamıştır.

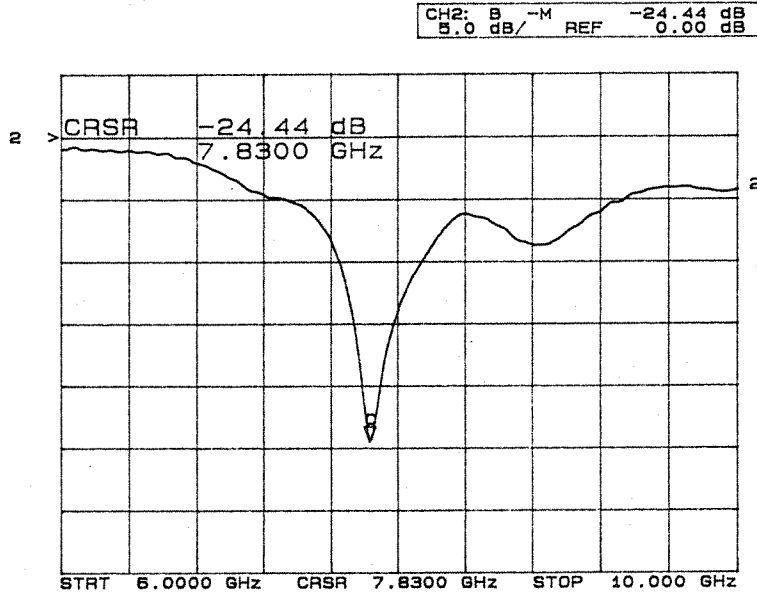


Şekil 11 Üretilen Antenin geometrisi

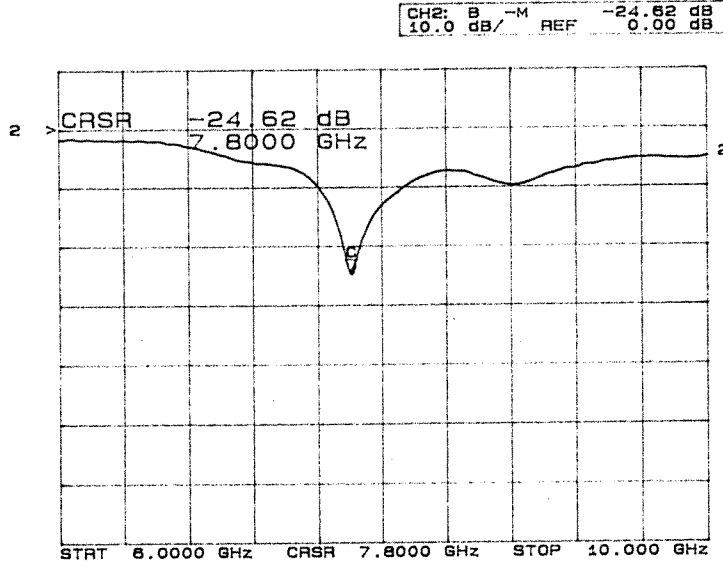
Tablo 1’de her durum için rezonans frekansı ve yansıma katsayısı verilmiştir. Farklı boyutlardaki yer düzlemi ve dielektrik için ölçülmüş  $S_{11}$  (yansıma katsayıları) grafikleri Şekil 12-Şekil 14’de verilmiştir. Ölçüm sonuçlarından antenin rezonans frekansının yer düzlemi ve dielektriğin sonlu olmasından etkilenmediği gözlenmektedir.

Tablo 1 Üretilen antenlerin boyutları ve ölçüm sonuçları

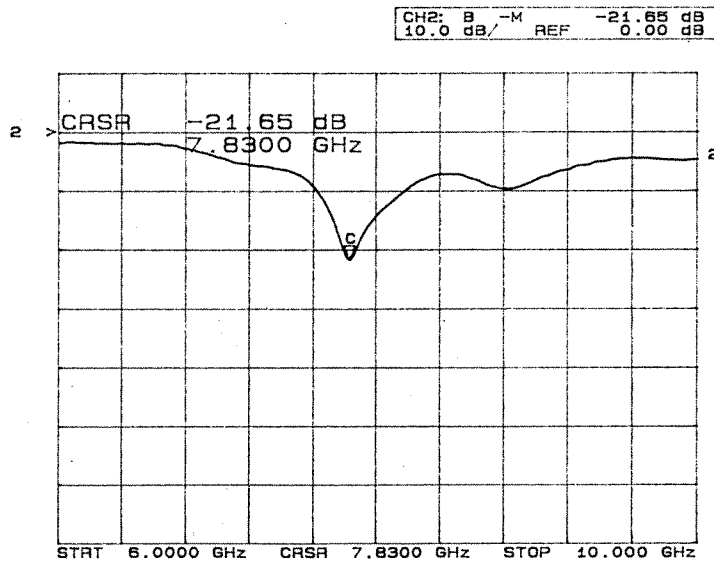
Anten	a (cm)	b (cm)	$f_{res}$ (GHz)	$S_{11}$ at $f_{res}$ (dB)	$ s_{11} $
1	5.095	5.046	7.83	-24.2	0.0616
2	4.12	4.046	7.83	-23.5	0.0668
3	3.22	3.166	7.83	-24.9	0.0568
4	2.295	2.046	7.8	-24.6	0.0588
5	1.46	1.246	7.83	-21.65	0.0826



Şekil 12.  $a=5.095\text{cm}$ ,  $b=5.046\text{cm}$  için  $s_{11}$



Şekil 13.  $a=2.295\text{cm}$ ,  $b=2.046\text{cm}$  için  $s_{11}$



Şekil 14.  $a=1.46\text{cm}$ ,  $b=1.246\text{cm}$  için  $s_{11}$

Tablo 2-Tablo 5’de ise farklı boyutlardaki yer düzlemi ve dielektrik için hesaplanan  $s_{11}$  verilmiştir. Görüldüğü gibi, hesaplanan sonuçlarla ölçüm sonuçları birbirine uymaktadır. Hesaplanan  $s_{11}$  değerleri, konektördeki empedans uyumsuzluk değerlerini içermediği için ölçüm değerlerinden daha küçük bulunmuştur. Hem sonsuz hem de sonlu yer düzlemi ve dielektrik durumunda, antenin 8 GHz’de rezonansa geldiği hesaplanmıştır, üretilen antenin ise 7.83 GHz’de rezonansa geldiği ölçülmüştür. Rezonans frekansındaki bu kayma antenin

boyunda 0.2mm'lik bir hataya karşılık gelmektedir. Bu kadar küçük bir fark, mikroşerit anten üretiminde kullanılan kazıma cihazının hata payı gözönüne alındığında normal karşılanmaktadır.

*Tablo 2 Hesaplanan  $s_{11}$  değerleri,  $a=5cm$ ,  $b=5cm$*

<b>f (GHz)</b>	<b> S<sub>11</sub>  </b>	<b>Phase(S<sub>11</sub>)</b>
7.5	0.6751	14.1427
7.6	0.5918	6.1113
7.7	0.4858	-3.3281
7.8	0.3519	-14.4381
7.9	0.1883	-27.2129
8.0	0.0038	-31.3538
8.1	0.1803	-55.6662
8.2	0.3399	-67.3901
8.3	0.4637	-74.3773

*Tablo 3 Hesaplanan  $s_{11}$  değerleri,  $a= 2.295$ ,  $b=2.046 cm$*

<b>f (GHz)</b>	<b> S<sub>11</sub>  </b>	<b>Phase(S<sub>11</sub>)</b>
7.5	0.6729	14.0425
7.6	0.5896	5.9499
7.7	0.4838	-3.6100
7.8	0.3500	-14.9860
7.9	0.1871	-28.6275
8.0	0.0066	76.1900
8.1	0.1808	-52.7956
8.2	0.3408	-65.4562
8.3	0.4669	-72.9212



Tablo 4 Hesaplanan  $s_{11}$  değerleri,  $a=1.46$ ,  $b=1.246$  cm

f (GHz)	$ S_{11} $	Phase( $S_{11}$ )
7.5	0.6816	13.6913
7.6	0.5998	5.4847
7.7	0.4951	-4.2394
7.8	0.3617	-15.8366
7.9	0.1981	-29.7124
8.0	0.0146	-65.4086
8.1	0.1699	-54.5162
8.2	0.3278	-67.3046
8.3	0.4507	-74.5363

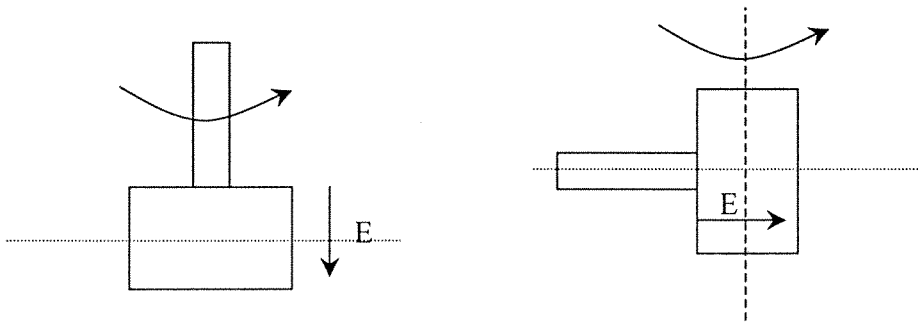
Tablo 5 Hesaplanan  $s_{11}$  değerleri,  $a=b=0.2$  cm

f (GHz)	$ S_{11} $	Phase( $S_{11}$ )
7.5	0.6872	15.0516
7.6	0.6035	7.5551
7.7	0.4973	-1.2111
7.8	0.3623	-11.3595
7.9	0.1957	-21.9188
8.0	0.0154	36.5145
8.1	0.1909	-58.9711
8.2	0.3597	-68.8589
8.3	0.4918	-75.4396

Daha kalın ya da dielektrik sabiti daha büyük olan dielektrik tabaka üzerine yapılmış antenlerde, yer düzlemi ve dielektrik boyutları yamanın boyutlarına çok yakın olduğu durumlarda giriş empedansı ve rezonans frekansının etkileneceği düşünülmektedir. Örneğin, dielektrik sabiti 2.5 olan bir dielektrik tabaka için  $0.2\lambda$  kalınlığa kadar yalnızca bir yüzey dalga oluşmaktadır. Bu kalınlığa yakın bir dielektrik tabakada, yüzey dalgaları daha etkili olacağından, dielektrik tabaka ve yer düzleminin sonundan yansıyan yüzey dalgaları rezonans frekansı kaydırabilir, ya da giriş empedansını değiştirebilir. Üretilen antende kullanılan dielektrik tabakanın kalınlığı ise  $0.04\lambda$ 'dır. Görüldüğü gibi bu malzeme bu frekansta elektriksel olarak oldukça ince bir dielektriktir, bu nedenle yüzey dalgalarının rezonans

frekansına etkisi yoktur. Daha önce de belirtildiği gibi, bu dielektrik tabaka Rogers firmasının ürettiği en kalın tabakadır. Laboratuvarımızda, üretilen antende kullanılan dielektrik tabakadan daha kalın veya dielektrik sabiti daha büyük olan bir dielektrik tabaka olmadığından bu durum denenememiştir. Bu nedenle frekans mümkün olduğunca yüksek seçilmiştir, ancak daha yüksek seçildiği takdirde kazıma işlemi sırasında hataların daha büyük olacağı düşünülerek frekans daha da çok yükseltilmemiştir.

Bölümümüzde yeni yapılan yansısız odada antenlerin ışınma örüntüsü ölçülmüştür. Yansısız odada kullanılan soğurucular 10 yıllık bir zaman zarfında farklı projelerden alınmıştır; bu projeden de 20 panel soğurucu ile bu odanın yapımına katkıda bulunulmuştur. Ölçüm sonuçları ve geliştirilen yazılımla elde edilen ışınma örüntüleri Şekil 16-Şekil 25'de verilmiştir. Yankısız odanın içindeki ölçüm düzeneği bu iş için üretilmiş profesyonel cihazlardan oluşmamaktadır. Bu nedenle hem ölçümlerde bazı problemler çıkmakta, hem de ışınma örüntüleri gerçek açı değerlerine karşılık çizilememektedir. Var olan düzenele yapılan ölçümlerde ışınma örüntüsünün maksimumu sıfır dereceye gelecek şekilde çizdirilebilmektedir. Dolayısıyla, aşağıdaki şekillerdeki ölçüm sonuçlarındaki açılar gerçek açılara karşı gelmemektedir. Simülasyon sonucu elde edilen ışınma örüntülerindeki ana ışın demeti kayma derecesinin gerçek duruma karşılık geldiği üretilen anten elle çevrilerek gözlenmiştir. Karşılaştırma yapılırken bu durumun gözönünde bulundurulması gerekmektedir. Geliştirilen yazılımla elde edilen sonuçların çiziminde Matlab kullanılmıştır. Polar çizimlerde Matlab'in koyduğu açılarda "0" anten düzlemine, "90" derece ise anten düzlemine dik olan doğrultuya denk gelmektedir. Ayrıca, yansısız odanın dinamik aralığı 50 dB civarındadır. Dolayısıyla, 50 dB'den daha düşük değerlerde ölçümde hata söz konusudur.

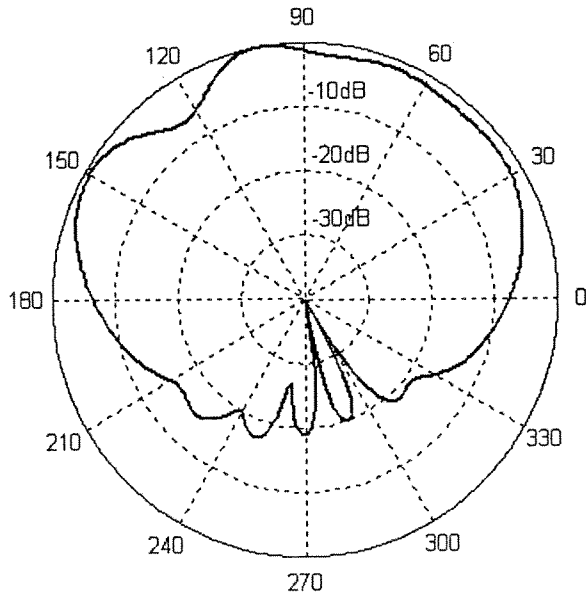
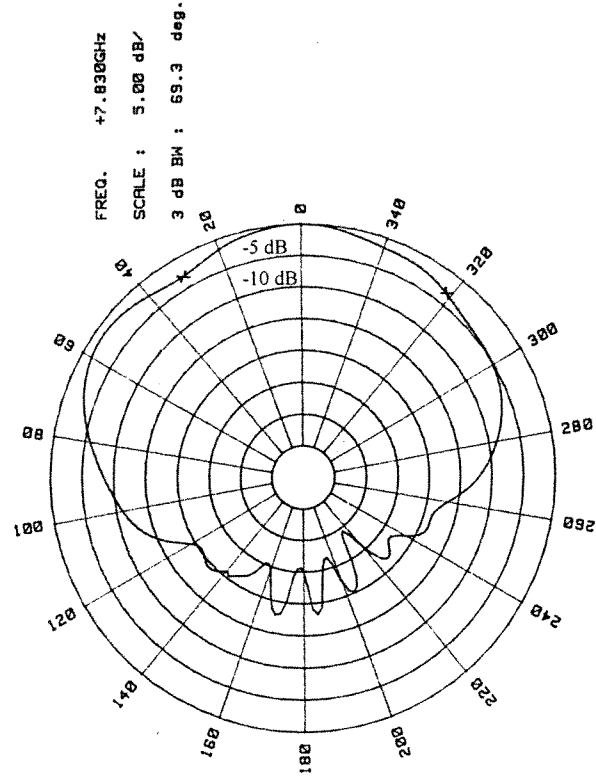


Şekil 15 H ve E düzlemlerindeki ışınma örüntülerini elde etmek için anten sırasıyla soldaki ve sağdaki şekilde döndürülmüştür.

Ölçüm sonuçlarıyla, geliştirilen yazılımdan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında iyi bir uyum gözlenmektedir. Arka ışın demet düzeyleri, ışınma örüntüsündeki girintiler birbirini

tutmaktadır. Geliştirilen yazılımla hesaplanan H düzlemindeki ışınma örüntülerinin demet genişlikleri ölçülenlerle hemen hemen aynıdır. E düzlemindeki ışınma örüntüsünün simetrik olmamasının nedeni, daha önce de belirtildiği gibi uzun besleme hattından olan ışınmadır. Geliştirilen yöntemle hesaplanan E düzlemindeki ışınma örüntüsünün ölçüm sonuçlarından biraz daha farklı olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilir: Üretilen antende mikroserit hatta güç gelmesini sağlayan konektör modellemeye katılmamıştır. Dolayısıyla konektörden kaynaklanan etkiler bu çalışmada geliştirilen yöntemle hesaplanan sonuçlarda gözlenememektedir. Konektörün dış iletkeni yer düzlemine lehimlenmiştir. Bu da konektörün komşuluğunda yer düzleminde indüklenen akımda bir artışa neden olmaktadır. Konektör tarafından yer düzlemi üzerinde indüklenen akımın doğru olarak modellenmesi için MoM çözümünde yama üzerindeki akımlara ek olarak yer düzlemi üzerindeki akımların da temel fonksiyonları cinsinden açılması ve değerlerinin bulunması gerekmektedir, [19]. Ancak bu yaklaşım çözüm süresini çok uzatmaktadır ve bu çalışmada işlemsel olarak verimli bir yöntem geliştirilmesi amaçlandığı için bu yöntem tercih edilmemiştir. Ayrıca, dielektrik içersindeki eşdeğer akımların hesaplanmasında dielektriğin sonlu olması gözönüne alınmıştır; ancak yer düzlemi üzerindeki akımda yer düzleminin sonlu olması nedeniyle kenarlarda oluşacak tekillik (edge singularity) hesaba katılmamıştır. Benzer bir şekilde tekillik etkilerinin de incelenebilmesi için yer düzlemi üzerindeki akımın MoM yöntemiyle hesaplanması gerekmektedir. Yukarıda özetlenen nedenlerden ötürü yer düzlemi üzerindeki akımı n tam olarak modellenmemesi nedeniyle hesaplanan ışınma örüntüleriyle, ölçümler arasında ufak uyumsuzluklar gözlenmiştir. Bunlara ek olarak mevcut anten ölçüm sisteminden kaynaklanan hataların gözardı edilmemesi gerekmektedir. Örneğin, ölçülen H-düzlemi arka ışınma örüntülerinde asimetri gözlenmektedir; ancak gerçekte üretilen anten bu düzlemde tamamen simetrik olduğu için teorik olarak simetrik bir örüntü beklenmektedir.

Ayrıca, ışınma örüntülerindeki yan ve arka demet düzeylerinin, yer düzlemi ve dielektrik katman küçüldükçe büyüdüğü gözlenmektedir. H düzlemindeki örüntünün 3 dB demet genişliği yer düzlemi ve dielektrik katman küçüldükçe küçülmektedir, fakat yan demetlerdeki güç düzeyi de arttığı için anten kazancı artmayabilir. Laboratuvarımızda standart kazançlı antenler olmadığı için kazanç ölçümü yapılamamıştır.



Şekil 16 E-düzlemi ışınma örüntüsü (1.durumdaki boyutlar için)

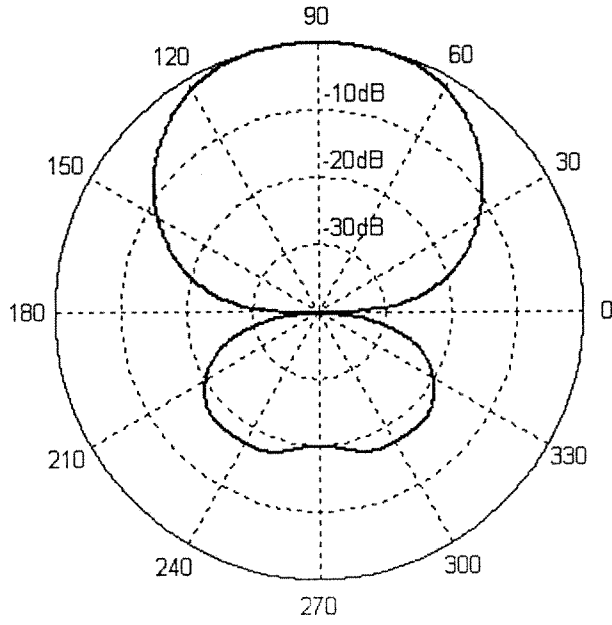
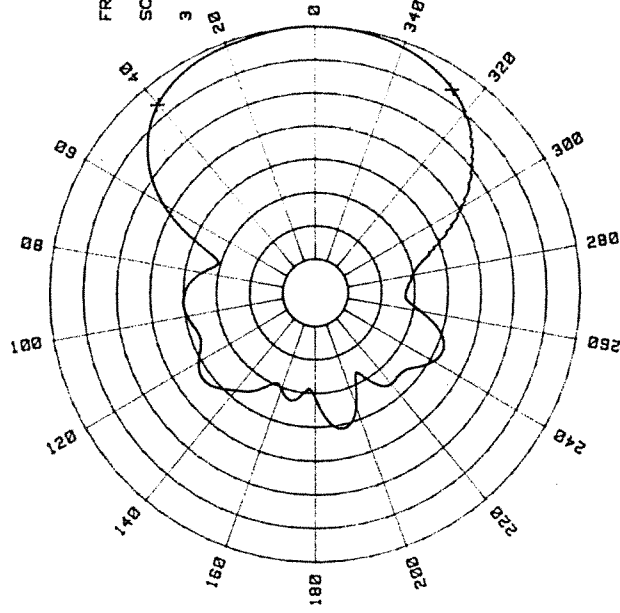
H-1  
#.

FREQ. +7.830GHz

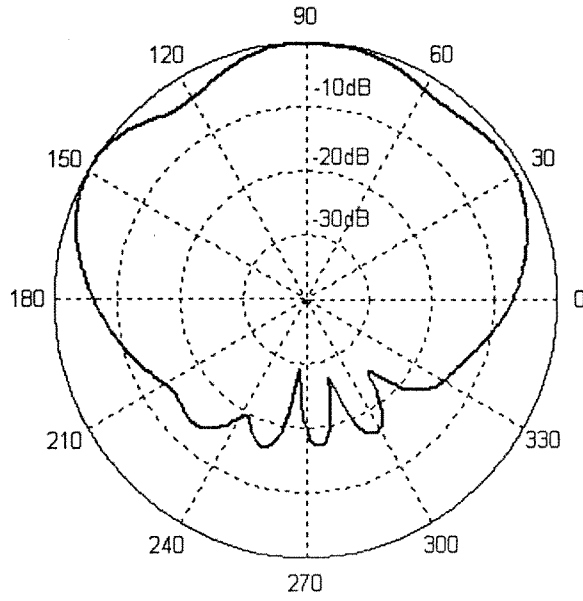
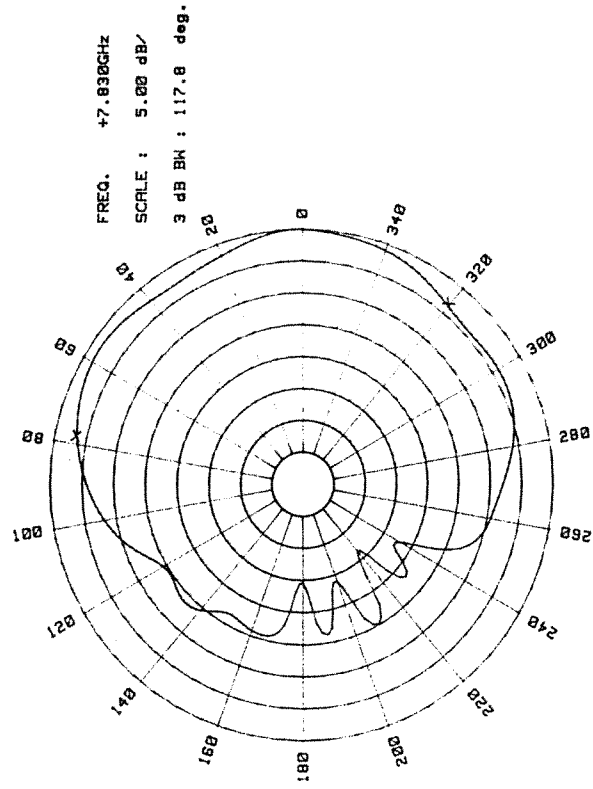
SCALE : 5.00 dB/

3 dB BH : 74.3 deg.

H-plane  
max Y H

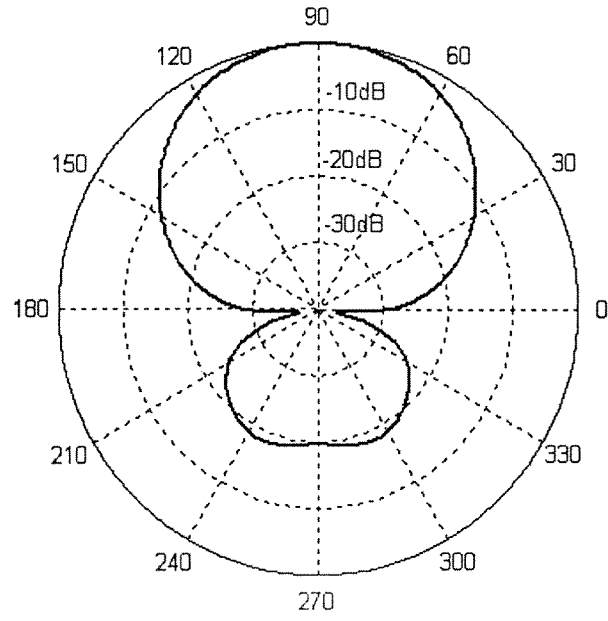
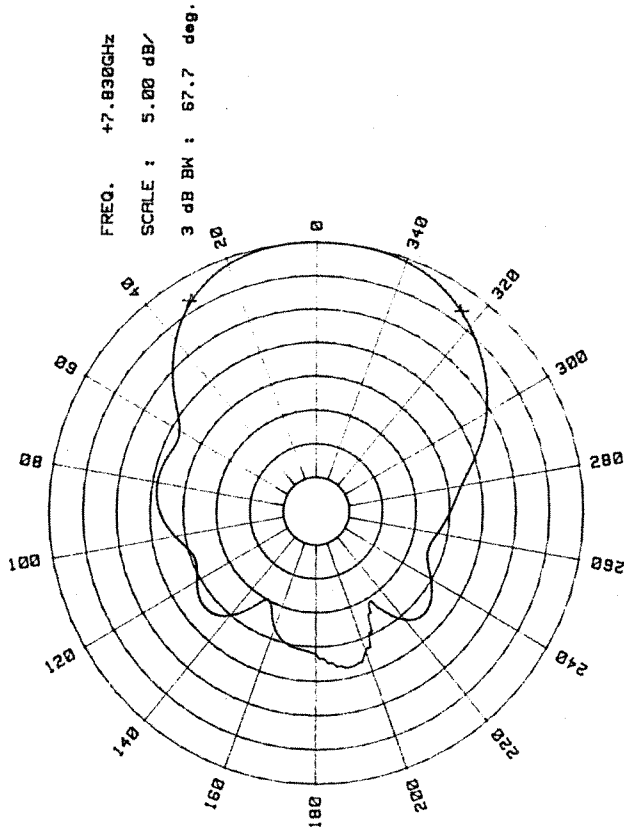


Şekil 17 H-düzlemi ışıma örüntüsü (1.durumdaki boyutlar için)

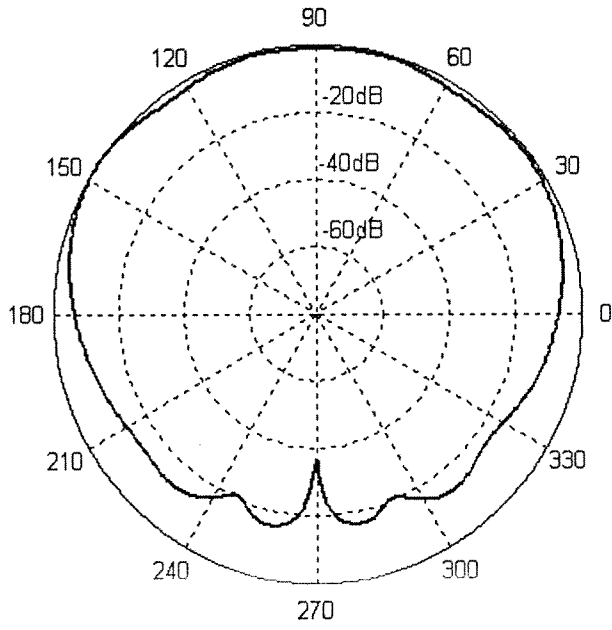
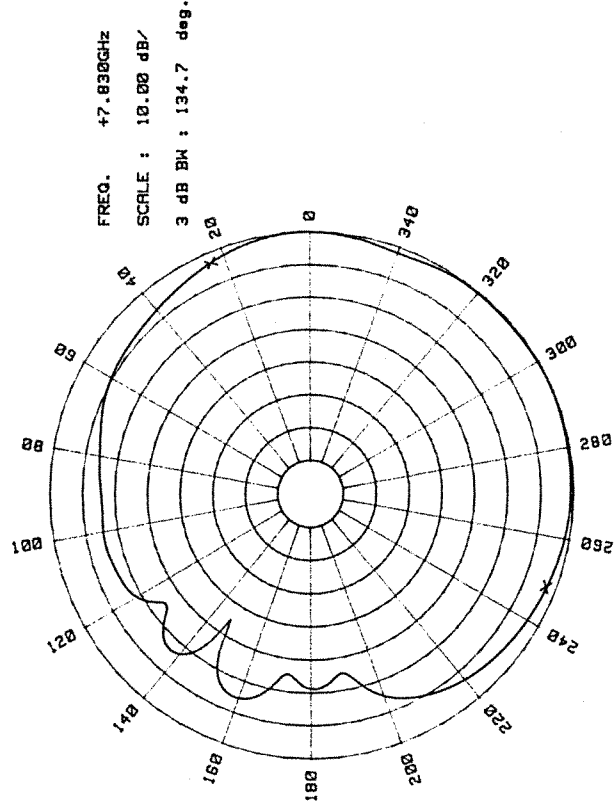


Şekil 18 E-düzlemi ışınma örüntüsü (2.durumdaki boyutlar için)

4

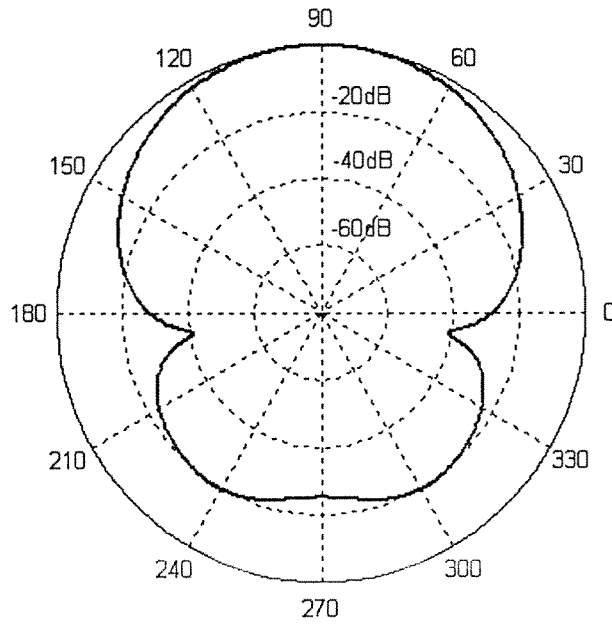
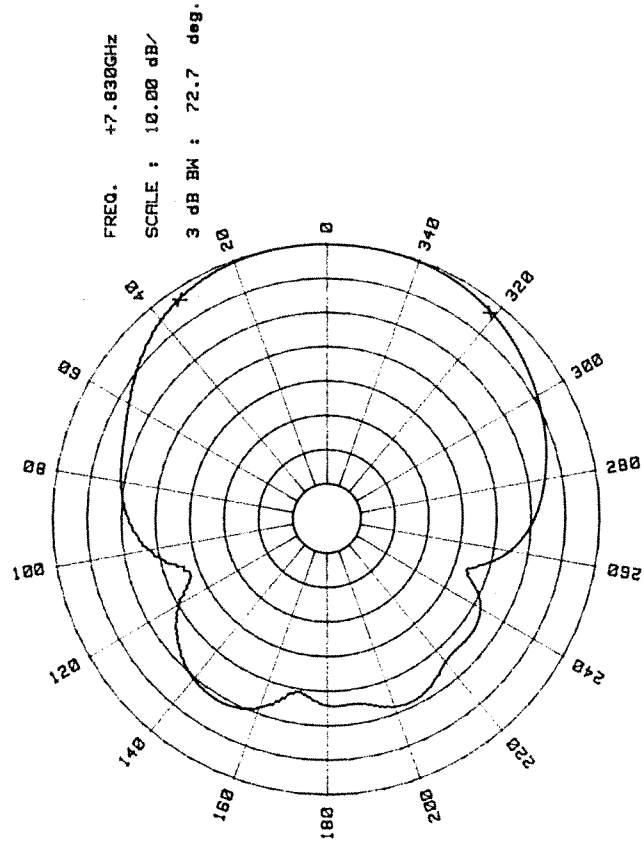


Şekil 19 H-düzlemi ışıma örüntüsü (2.durumdaki boyutlar için)

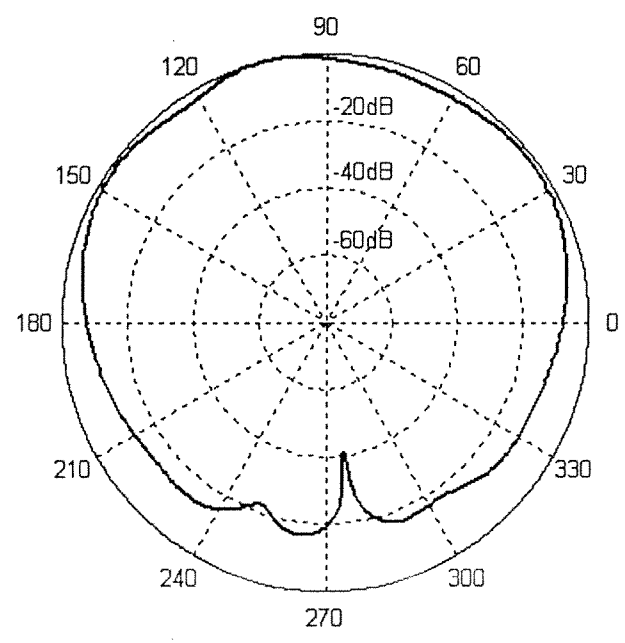
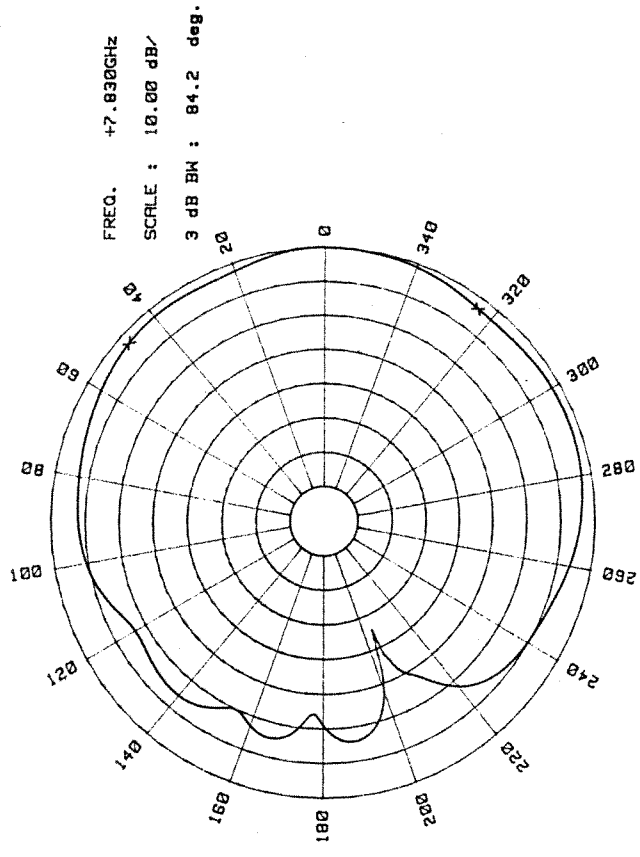


Şekil 20 E-düzlemi ışınma örüntüsü (3.durumdaki boyutlar için)

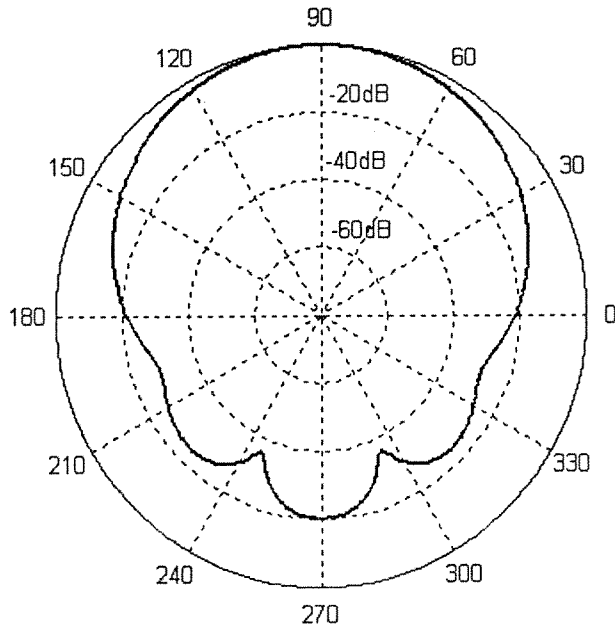
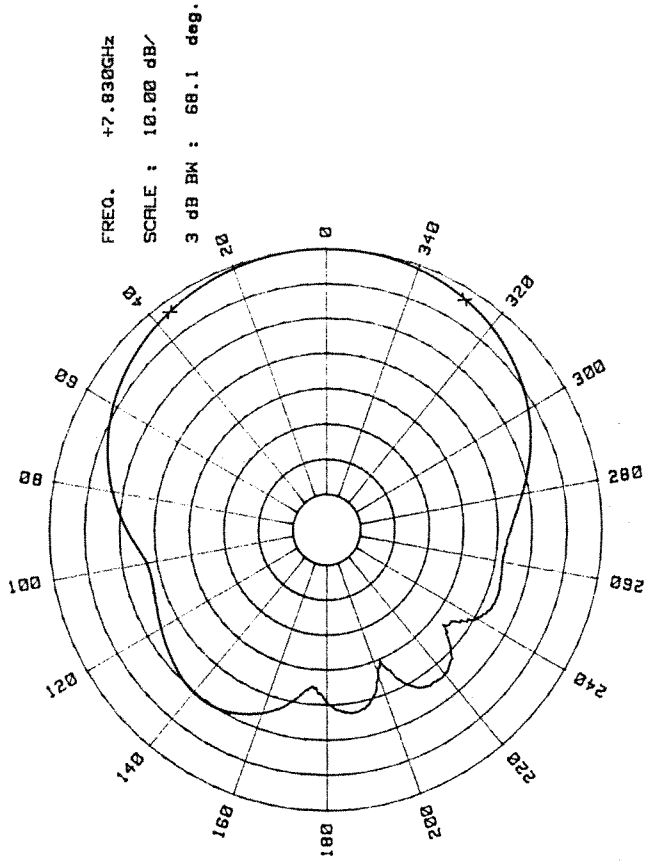




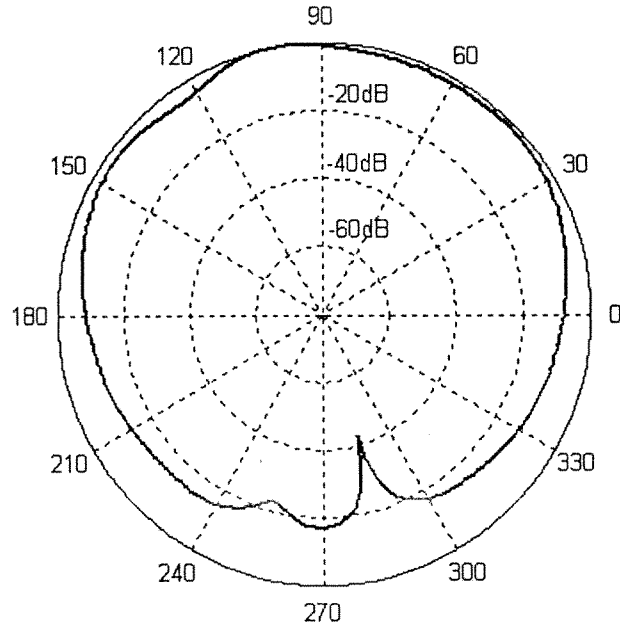
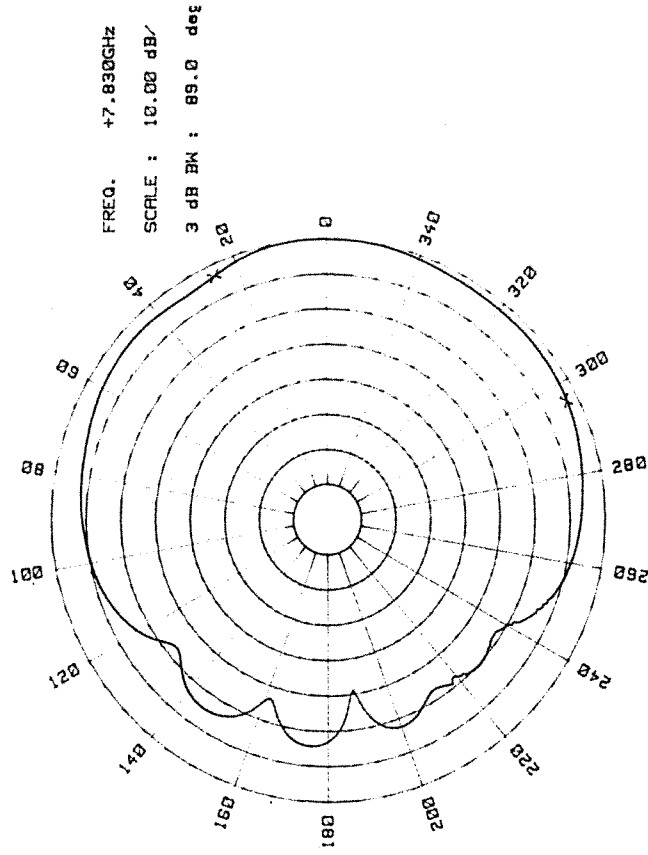
Şekil 21 H-düzlemi ışınma örüntüsü (3.durumdaki boyutlar için)



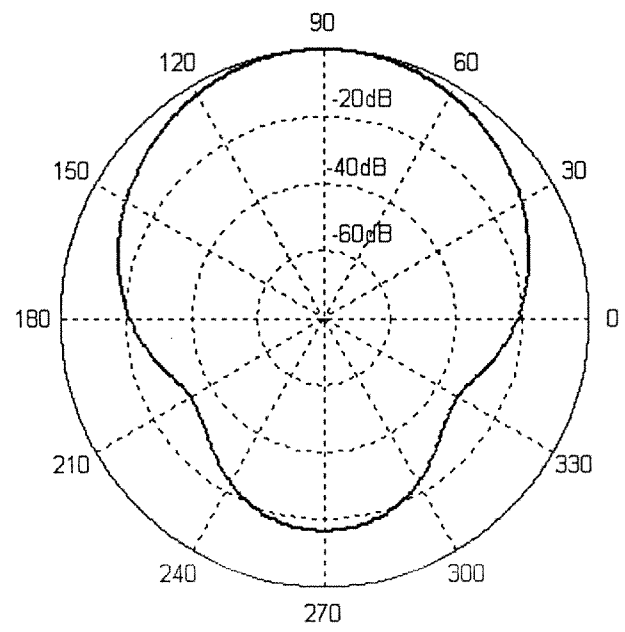
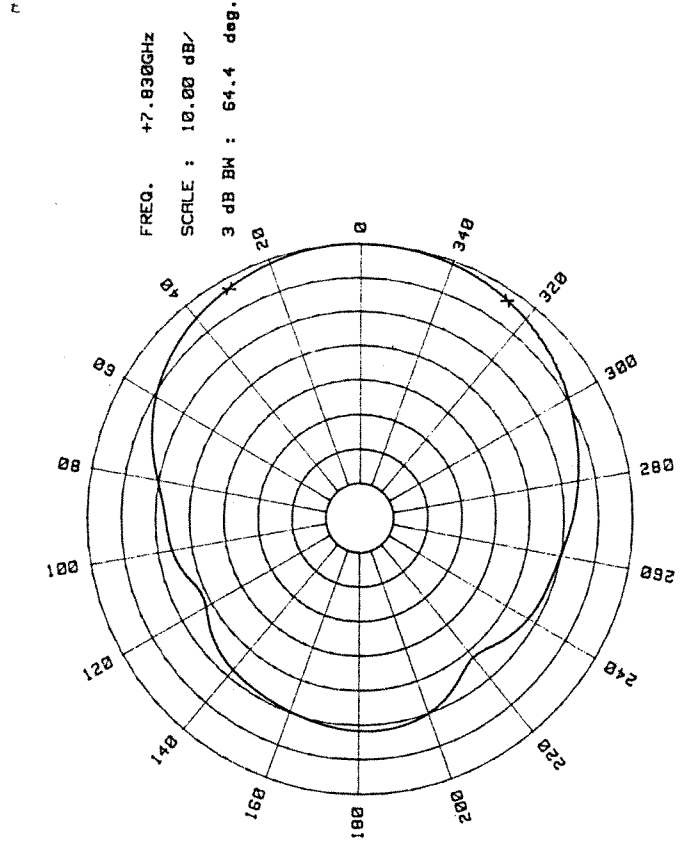
Şekil 22 E-düzlemi ışıma örüntüsü (4.durumdaki boyutlar için)



Şekil 23 H-düzlemi ışıma örüntüsü (4. durumdaki boyutlar için)



Şekil 24 E-düzlemi ışınma örüntüsü (5. durumdaki boyutlar için)



Şekil 25 H-düzlemi ışınma örüntüsü (5. durumdaki boyutlar için)

#### 4. SONUÇ

Bu projede, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katman üzerindeki mikroşerit yama antenin elektromanyetik modellenmesi yapılmış, bu tür sonlu yapıların hızlı ve doğru bir şekilde analizi için MoM (momentler yöntemi) formülasyonu ve bu formülasyona dayalı bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım kullanılarak elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak geliştirilen formülasyonun doğruluğu gösterilmiştir. Ayrıca, geliştirilen yöntem kullanılarak, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katmanın anten parametrelerine olan etkileri incelenmiştir. Antenin ışınma örüntüleri tüm uzay (üst ve alt yarı uzaylar) için bulunmuştur. Yer düzleminin ve dielektrik katmanın sonlu olmasının ışınma örüntüsünü önemli ölçüde etkilediği; oysa ki giriş empedansını ve rezonans frekansını pek etkilemediği gözlenmiştir. Literatürde bu konudaki çalışmalardan yalnızca bir tanesinde giriş empedansının ve rezonans frekansının dielektrik ve yer düzlemi boyutlarından etkilendiği iddia edilmiştir, [6]. Ancak daha önce de belirtildiği gibi bu makalenin dayanağı olan [7]'de önemli hatalar olduğu ve bu hatalar düzeltildiğinde iddia edilen sonuçların elde edilemediği saptanmıştır. Daha kalın ya da dielektrik sabiti daha büyük olan dielektrik tabaka üzerine yapılmış antenlerde, yer düzlemi ve dielektrik boyutları yamanın boyutlarına çok yakın olduğu durumlarda giriş empedansı ve rezonans frekansının etkileneceği düşünülmektedir. Fakat, laboratuvarımızda, üretilen anten de kullanılan dielektrik tabakadan daha kalın veya dielektrik sabiti daha büyük olan bir dielektrik tabaka olmadığından bu durum deneysel olarak gözlenememiştir.

Bu konuda ileride yapılabilecek araştırmalar şu şekilde özetlenebilir: Yazılım geliştirilirken, öncelikle önerilen yöntemin çalıştığını göstermek amaçlanmıştır. Bu nedenle, yazılımın hızlı sonuç vermesi için ek bir gayret gösterilmemiştir. Kompleks argümanlı Hankel fonksiyonlarını içeren integrallerin nümerik olarak hesaplanması uzun zaman almaktadır. Bu nedenle, önerilen yöntem dizi antenler için rahatlıkla uygulanabilecek bir yöntem olmasına karşın, sonuçların çok uzun sürede elde edilmesi nedeniyle dizi anten örneğine uygulanmamıştır. Proje yöneticisinin bildirisinde, [20], önerdiği yöntem kullanılarak hesaplama süresi önemli ölçüde azaltılarak dizi antenler de incelenebilir.

Mevcut yöntemde yalnızca yüzey dalgalarının kenardan yansımalarının etkileri incelenmiştir. Buna ek olarak, sızıntı dalgalara (leaky wave) karşı gelen terim ayrılarak, bu

dalgaların yansıma katsayısı da bulunarak formülasyonun içine dahil edilebilir. Bu kalın dielektrik tabaka kullanan yapılarda daha doğru sonuçlar elde edilmesine yol açacaktır.

Pratikte kullanılan antenlerde en uygun büyüklükteki yer düzleminin belirlenmesi için optimizasyon algoritması geliştirilip burada yapılan formülasyonla birlikte kullanılabilir. Farklı şekillerdeki yer düzleminin ışıma parametrelerine etkileri incelenebilir.

## REFERANSLAR

- [1] J. Huang, "Finite ground plane effects on microstrip antenna radiation patterns", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 31, No. 4, pp. 649-653, July 1983.
- [2] E. Lier, K. R. Jakobsen, "Rectangular microstrip antennas with infinite and finite ground plane dimensions", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 31, No. 6, pp. 978-984, November 1983.
- [3] S. Maci, L. Borselli, L. Rossi, "Diffraction at the edge of a truncated grounded dielectric slab", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 44, No. 6, pp. 863-873, June 1996.
- [4] S.A. Bokhari, J.R. Mosig, F.E. Gardiol, "Radiation pattern computation of microstrip antennas on finite size ground planes", *IEE Proceedings-H*, Vol.139, No.3, pp.278-286, June 1992.
- [5] V. Volski and G.A.E. Vandenbosch, "Radiation patterns of sources placed near the truncation of a semiinfinite dielectric structure: The demonstration case of a magnetic line current", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 48, No. 2, pp. 240-245, Feb. 2000.
- [6] A. K. Bhattacharyya, "Effects of ground plane truncation on the impedance of a patch antenna", *IEE Proceedings-H*, Vol.138, No.6, pp.560-564, December 1991.
- [7] A. K. Bhattacharyya, "Effects of ground plane and dielectric truncations on the efficiency of a printed structure", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 39, No. 3, pp. 303-308, March 1991.
- [8] Y.L. Chow, J.J. Yang, D.H. Fang, and G.E. Howard, "Closed form spatial Green's function for the thick substrate", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.39, pp.588-592, March 1991.
- [9] M.I. Aksun and R.Mitra, "Derivation of closed form Green's functions for a general microstrip geometry", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.40, No.11, pp.2055-2062, November 1992.
- [10] L. Alatan, Ö. Aydın Civi, G. Ögücü, "An Approximate Green's Function for a Finite Grounded Dielectric Slab", *2001 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Boston-USA, Proc. URSI, p. 43, July 8-13 2001.
- [11] L. Alatan, Ö. Aydın Civi, G. Ögücü, "Analysis of Printed Structures on Truncated Dielectric Slab and Finite Ground Plane", *2002 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, San Antonio-USA, vol.4, p.190-193, June 16-21 2002.
- [12] G. Ögücü, L. Alatan, Ö. Aydın Civi, T. Ege, "Sonlu Yer Düzlemi ve Dielektrik Katman Üzerine Yerleştirilmiş Mikroşerit Antenlerin Analizi", *URSI-Türkiye'2002 Birinci Ulusal Kongresi*, p 125-128, Eylül 2002.
- [13] L.W. Pearson, "The Electromagnetic Edge Wave Due to a Point Source of Current Radiating in the Presence of a Conducting Wedge", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 34, No. 9, pp. 1125-1131, Sept. 1986.
- [14] G. Dural and M. I. Aksun, "Closed form Green's Functions for General Sources and Stratified Media", *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-43, no. 7, pp. 1545-1552, July 1995.
- [16] T.K. Sarkar, Z.A. Maricevic and M. Kahvizi, "An Accurate De-embedding Procedure for Characterizing Discontinuities", *Int. Journal of Milimeter-wave Computer-Aided Engineering*, vol.2, no.3, pp.135-143, 1992.
- [17] F.D. Hildebrand, *Introduction to Numerical Analysis*, New York: McGraw-Hill, 1956
- [18] F. Gardiol, *Microstrip Circuits*, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1994



- [19] F.Tiezzi, A.Alvarez-Melcon and J.R. Mosig, "A New Excitation Model for Microstrip Antennas on Finite Size Ground Planes", *AP2000 Millenium Conference on Antennas & Propagation*, Davos-Switzerland, 9-14 April 2000.
- [20] L. Alatan, "A New Approach to the Use of Complex Images Method in the Evaluation of MoM Matrix Entries", *2003 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Columbus-USA, June 22-27 2003 (4 sayfalık bildiri sunulmak üzere kabul edilmiştir).

## Ek. 1 BÜTÇE BİLGİLERİ

Bu proje kapsamında yapılan harcamalar Tablo 6'de özetlenmiştir.

Tablo 6 Bütçe özeti

	Teçhizat (TL)	Sarf (TL)	Seyahat (TL)	Telif (TL)	Toplam (TL)
Proje Bütçesi	1.439.750.000	1.625.000.000	100.000.000	4.140.000.000	7.304.750.000
1. Rapor Döneminde Harcanan	1.385.000.000	-	23.000.000	-	1.408.000.000
2. Rapor Döneminde Harcanan	-	977.046.270	56.000.000	1.035.000.000	2.068.046.270
3. Rapor Döneminde Harcanan	-	-	21.000.000	1.035.000.000	1.056.000.000
Sonuç Raporu	-	-	-	2.070.000.000	2.070.000.000
Kalan	54.750.000	647.953.730	-	-	702.703.730*

\* Tablodakilere ek olarak, ikinci rapor döneminde, mikrodalga soğurucuların yurtdışından alımına ilişkin 953.686.373 TL'lik akreditif harcaması yapılmış olduğu için bu miktar gerçekte proje bütçesinde kalan miktarı yansıtmamaktadır.

## Analysis of Printed Structures on Truncated Dielectric Slab and Finite Ground Plane

Lale Alatan\*<sup>1</sup>

Özlem Aydin Civi<sup>1</sup>

Gölge Ögücü<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Electrical & Electronics Eng. Dept.  
Middle East Technical University  
06531 Ankara, TURKEY  
lalatan@metu.edu.tr

<sup>2</sup>Electrical & Electronics Eng. Dept.  
University of Gaziantep  
Gaziantep, TURKEY

### Abstract

An approximate Green's function for a finite grounded dielectric slab is obtained by using the edge-admittance concept. This Green's function is used in the Method of Moment solution of the mixed potential integral equation derived for printed structures.

### Introduction

In the numerical analysis of radiating printed structures, like microstrip antennas, Method of Moments (MoM) is commonly used. In most of the MoM based commercial software packages (e.g. Ensemble by Ansoft and IE3D by Zeland), the dielectric substrate and/or the ground plane is assumed to be infinite. However in most of the applications, like mobile communications, the dielectric substrate of microstrip antennas are restricted to small sizes due to the space and/or cost limitations. Therefore the accurate mathematical modelling of the finite geometry becomes important in predicting the effects of finite ground plane and dielectric substrate on the radiation characteristics of printed structures. When the ground plane and the dielectric substrate are finite, the MoM formulation results in a large number of unknowns (volume polarization currents in the dielectric and the surface currents on the ground plane), unless the Green's function for the finite geometry is known. In this paper we propose a method to obtain an approximate Green's function for the finite geometry by using the reflected surface waves from the air-dielectric interface. The reflection coefficient at the interface is found by using the edge admittance values obtained as a function of the incident angle. The resulting Green's function is expressed in closed form in terms of complex images, and the incident and reflected surface wave contributions. This Green's function is used in the MoM solution of the mixed-potential integral equation, to predict the radiation characteristics of printed structures build on finite ground plane and dielectric substrate. The results obtained for a microstripline are demonstrated.

### Formulation

The scalar and vector potential Green's function of a horizontal electric dipole placed on an infinite grounded dielectric slab can be obtained in closed form in terms of complex images and surface wave contributions. In order to be able to analyze general microstrip antenna structures, we proposed to modify the Green's function of an infinite grounded dielectric slab to take into account of the reflected surface waves from the edge of the truncated dielectric slab [1].

---

Supported in part by TUBITAK (The Scientific and Technical Research Council of Turkey) within the scope of EEEAG 100E015 project.

The procedure used to obtain this modified Green's function can be summarized as follows:

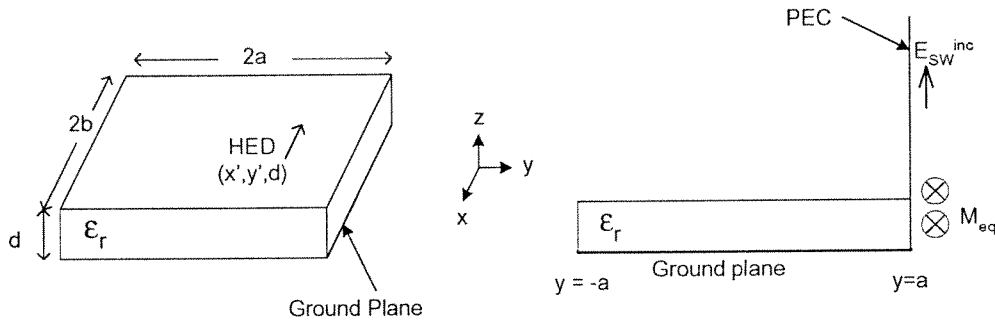


Fig1. HED on truncated dielectric and finite ground plane

1) Find the surface wave component of the incident electric field at the dielectric-air interface ( $y = a, z > 0$ ), Fig.1,

$$\vec{E}_{sw}^{inc} = f(z)k_{\rho 0}\mathbf{H}_0^2(k_{\rho 0}\sqrt{(x-x')^2+(a-y')^2})\hat{a}_z$$

where  $k_{\rho 0}$  is the propagation constant of surface wave.

2) In order to be able to analyze the effect of incident waves coming from various angles, use plane wave expansion of the Hankel function

$$\pi\mathbf{H}_0^2(k_{\rho 0}\sqrt{x^2+y^2}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_x x} \frac{e^{-jk_y y}}{k_y} dk_x, \quad k_{\rho 0} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

3) Using the above incident electric field component, define equivalent magnetic currents at the dielectric-air interface ( $y = a, z > 0$ ),

$$\vec{M}_{eq} = \vec{E}_{sw}^{inc} \times \hat{n}$$

where  $\hat{n}$  is the unit vector normal to interface.

Note that equivalent magnetic currents possess  $e^{-jk_x x}$  variation.

4) Place a semi-infinite perfect electric conductor at the dielectric-air interface. This fictitious PEC and finite ground plane form a  $90^\circ$  wedge. The Green's function of a horizontal magnetic line current with  $e^{-jk_x x}$  variation, placed on a conducting  $90^\circ$  wedge is given as, [2]

$$G_x^H = \begin{cases} \omega\epsilon_0\pi \frac{2}{3} e^{-jk_x x} \sum_n \frac{1}{\sigma_n} \mathbf{H}_{\frac{2n}{3}}^{(2)}(k_t z') \mathbf{J}_{\frac{2n}{3}}(k_t z), & z < z' \\ \omega\epsilon_0\pi \frac{2}{3} e^{-jk_x x} \sum_n \frac{1}{\sigma_n} \mathbf{H}_{\frac{2n}{3}}^{(2)}(k_t z) \mathbf{J}_{\frac{2n}{3}}(k_t z'), & z > z' \end{cases}$$

where  $\sigma_0 = 2, \sigma_n = 1, n \neq 0$  and  $k_t = \sqrt{k_0^2 - k_x^2}$ .

By using this Green's, the total field due to the equivalent single line current can be found as

$$H_x(z) = k_{\rho 0} \int_0^{\infty} f(z') G_x^H(z, z') dz'$$

5) Using the stationary formula given in [3], calculate the edge admittance as a function of  $k_y$

$$y_{edge}(k_y) = \frac{\langle \overline{H}, \overline{M}_{eq} \rangle}{\langle \overline{M}_{eq}, \overline{M}_{eq} \rangle}$$

6) Using the edge admittance find the reflection coefficient of the surface waves at the interface

$$\Gamma(k_y) = \frac{\frac{k_{\rho 0}}{\omega \mu} - y_{edge}(k_y)}{\frac{k_{\rho 0}}{\omega \mu} + y_{edge}(k_y)}$$

7) Reflected surface wave at an observation point inside the dielectric can be evaluated as follows

$$E_{sw}^{ref} \propto \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(k_y) e^{-jk_y 2a} e^{-jk_x x} \frac{e^{+jk_y(y+y')}}{k_y} dk_x$$

8) Expand reflection coefficient in terms of complex exponentials by using GPOF (Generalized Pencil of Function)

$$\Gamma(k_y) \cong \sum_{i=1, N} \beta_i e^{-\alpha_i k_y}$$

9) Finally reflected surface wave component can be expressed in the following form

$$E_{sw}^{ref} = f(z) k_{\rho 0} \sum_{i=1, N} \beta_i \mathbf{H}_0^2 \left( k_{\rho 0} \sqrt{(x-x')^2 + (2a \pm (y+y') - j\alpha_i)^2} \right)$$

where (-), (+) correspond to reflection from edge at  $y=a$ , and edge at  $y=-a$ , respectively.

The reflection coefficients corresponding to the edges parallel to x-axis will be same as the ones for the edges parallel to y-axis. In writing the reflected surface wave contributions from these edges, only the argument of the Hankel function will change accordingly as

$$\mathbf{H}_0^2 \left( k_{\rho 0} \sqrt{(y-y')^2 + (2b \pm (x+x') - j\alpha_i)^2} \right)$$

By using the procedure outlined in this paper, the scalar and vector potential Green's functions for a finite grounded dielectric slab can be obtained in closed form in terms of a summation of complex images [4], incident and reflected surface wave contributions. These Green's functions are used in the MoM solution of MPIE obtained for printed structures.

### Numerical Results

To demonstrate the effects of finite ground plane and dielectric substrate on the current distribution of printed structures, a microstrip line is considered. The relative permittivity of the dielectric substrate is 3.48 and its thickness is 0.635 cm. The frequency of operation is selected as 5 GHz. The length and width of the line are 4.8 cm and 0.3 cm, respectively. Current distribution over the microstrip line is plotted in Fig.2 for various sizes of grounded dielectric slab. The values given in the figure legend (s), correspond to the distance between the edge of the line and dielectric truncation in terms of free space wavelength. It can be observed from the figure that the current distribution oscillates around and finally converges to the one corresponding to the infinite dielectric slab.

## Conclusion

An approximate Green's function is obtained for the finite grounded dielectric slab. This Green's function is used in the MoM solution of the MPIE for a microstrip line. The variations on the current distribution obtained for different dielectric sizes imply that the truncation of the dielectric slab and ground plane has an important effect on the characteristics of printed structures. More detailed simulation results for other types of printed structures like microstrip antennas will be given in the presentation.

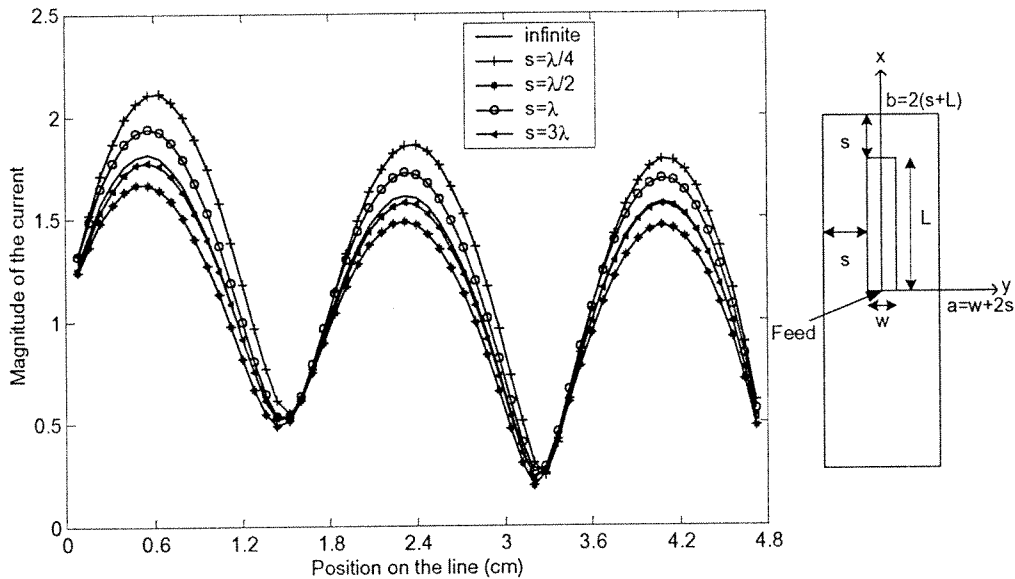


Fig.2 Current distributions on microstrip line for different sizes of dielectric slab and ground plane

## References

- [1] Lale Alatan, Özlem Aydin Civi, Gölge Ögücü, "An Approximate Green's Function for a Finite Grounded Dielectric Slab", *2001 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Boston-USA, Proc. URSI, p. 43, July 8-13 2001.
- [2] L.W. Pearson, "The Electromagnetic Edge Wave Due to a Point Source of Current Radiating in the Presence of a Conducting Wedge", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 34, No. 9, pp. 1125-1131, Sept. 1986.
- [3] A. K. Bhattacharyya, "Effects of ground plane truncation on the impedance of a patch antenna", *IEE Proceedings-H*, Vol.138, no. 6, pp. 560-564, December 1991.
- [4] M.I. Aksun, "Derivation of closed form Green's functions for a general microstrip geometries", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.MTT-45, no.5, pp.651-658, May 1996.

## An Approximate Green's Function for a Finite Grounded Dielectric Slab

Lale Alatan\*<sup>1</sup>

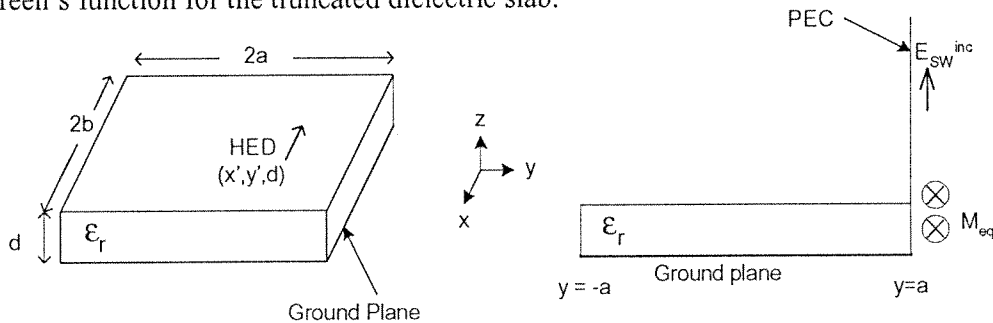
Özlem Aydın Civi<sup>1</sup>

Gölge Ögücü<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Electrical & Electronics Eng. Dept.  
Middle East Technical University  
06531 Ankara, TURKEY

<sup>2</sup>Electrical & Electronics Eng. Dept.  
University of Gaziantep  
Gaziantep, TURKEY

Especially in applications like mobile communications, the dielectric substrate of microstrip antennas are restricted to small sizes due to the space limitations. In most studies which analyze microstrip patch antennas with finite grounded dielectric slabs, the current distribution on the patch surface and therefore the input impedance of the antenna are assumed not to be affected by the truncation of the ground plane and the dielectric slab. However both the experimental and the theoretical results presented in [1] implies that the input impedance of the antenna could vary up to 50% by changing the size of the grounded dielectric slab. In [1], the transmission line model is modified by including an edge admittance that models the scattering of surface waves from the edge formed by the truncation of the dielectric slab and the ground plane. However this method can be applied to only a certain class of patch antennas that could be analyzed by using transmission line model. In order to be able to analyze general microstrip antenna structures, we propose to modify the Green's function of an infinite grounded dielectric slab to take into account of the scattered surface waves from the edge of the truncated dielectric slab. The procedure used to obtain this modified Green's function can be summarized as follows: 1) Find the Green's function of a horizontal electric dipole on the infinite grounded dielectric slab, 2) by using the incident surface waves define equivalent magnetic currents at the dielectric-air interface ( $y = a, z > 0$ ), 3) place a semi-infinite perfect electric conductor at the dielectric-air interface ( $y = a, z > 0$ ), 4) by using the Green's function of a horizontal magnetic dipole placed on a conducting  $90^\circ$  wedge, find the total field due to the equivalent currents, 5) using the stationary formula given in [1], calculate the position dependent edge admittance, 6) using the edge admittance find the reflection coefficient of the surface waves, 7) repeat steps 3-6 for the other edge ( $x = b$ ), 8) use these reflection coefficients to obtain an approximate Green's function for the truncated dielectric slab.



In [1], the edge admittance is obtained for the 2-dimensional problem; hence it does not include any information about the shape of the edge. However in our formulation 3-dimensional problem is considered and the edge admittance is obtained as a function of position along the edge. Therefore, by using this approximate Green's function, it will be possible to optimize the shape of the dielectric truncation to minimize the surface wave reflections. Numerical results will be demonstrated in the presentation.

[1] A. K. Bhattacharyya, "Effects of ground plane truncation on the impedance of a patch antenna", *IEE Proceedings-H*, Vol.138, no. 6, pp. 560-564, December 1991.

## Sonlu Yer Düzlemi ve Dielektrik Katmanı Üzerine Yerleştirilmiş Mikroşerit Antenlerin Analizi

Gölge Öğücü, Lale Alatan\*, Özlem Aydın Civi\*, Tuncay Ege  
Gaziantep Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü  
27310 Gaziantep  
ogucu@gantep.edu.tr, t\_ege@gantep.edu.tr

\*ODTU  
Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü  
Ankara  
lalatan@metu.edu.tr, ozlem@metu.edu.tr

*Özet: Bu çalışmada, sonlu dielektrik tabakası ve yer plakası üzerine yerleştirilmiş yatay elektrik dipolünün yaklaşık Green fonksiyonlarını bulmak için geliştirilen yöntem özellenmiştir. Bulunan bu Green fonksiyonları moment metodu (MoM) formülasyonunda kullanılarak yama anten üzerindeki akım dağılımı, antenin giriş empedansı ve saçılım parametresi sonlu yapı dikkate alınarak bulunmuştur.*

### 1. Giriş

Mikroşerit antenlerin analizinde, antenler her ne kadar uygulamada sonlu dielektrik katmanlar üzerine yapılmış olsalar da, genellikle dielektrik ve yer tabakalarının sonsuz olduğu varsayılır. Fakat, özellikle gezgin iletişim uygulamalarında, antenlerin küçük bir alan üzerine yapılması gerekmektedir. Bu da antenin, dielektrik katmanı ve yer düzleminin kenarına yakın olmasını gerektirir. Bu sonlu yapı sebebiyle anten parametreleri (anten üzerindeki akım dağılımı, giriş empedansı, ışınma örtüsü) yer düzlemi ve dielektrik tabakanın büyüklüğü ile değişmektedir [1]. Bu nedenle mikroşerit antenlerin tasarımında, sonlu yapı gözönüne alınmalıdır.

Antenlerin sayısal analizinde sıklıkla kullanılan bir yöntem moment metodu (MoM) formülasyonudur. Yer düzlemi ve dielektrik tabaka sonlu olduğunda, eğer sonlu yapı için Green fonksiyonları bilinmiyorsa, MoM formülasyonunda tanımlanması ve bulunması gereken birçok bilinmeyen (dielektrik tabaka içindeki eşdeğer hacim polarizasyon akımları, yer düzlemi üzerindeki eşdeğer yüzey akımları) vardır. [2]'de, manyetik hat akımının oluşturduğu yüzey dalgalarının sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka tarafından oluşturulan kenardan saçımını modelleyen kenar geçirisi bulunarak antenin iletim hattı modelinde kullanılmıştır. Fakat bu yöntem yalnızca iletim hattı modeli ile analiz edilebilecek mikroşerit antenler için kullanılabilir. Önceki çalışmamızda [3], daha genel ve üç boyutlu mikroşerit anten yapılarının analizinin yapılabilmesi için, sonsuz dielektrik ve yer düzlemi için bulunan Green fonksiyonları, sonlu yapılar için de kullanılabilir şekilde geliştirilmiştir. Yatay elektrik dipolünün (HED) oluşturduğu yüzey dalgalarının sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka tarafından oluşturulan kenardan saçımını modelleyen kenar geçirisi kullanılarak, sonlu yapı için yaklaşık bir Green fonksiyonu kapalı formda bulunmuştur.

Bu çalışmada, [3]'te geliştirilen Green fonksiyonu, MoM formülasyonunda kullanılarak, sonlu yer düzlemi ve dielektrik tabaka üzerine yerleştirilen mikroşerit hatla beslenen yama antenlerin analizi yapılmıştır. Anten üzerindeki akım dağılımı farklı dielektrik katmanı ve yer düzlemi büyüklükleri için bulunmuş ve bu değerler dielektrik ve yer düzleminin sonsuz varsayıldığı durumdaki akım dağılımıyla karşılaştırılmıştır.

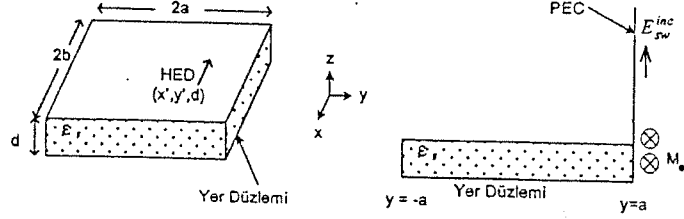
### 2. Formülasyon

Sonsuz dielektrik katman ve yer düzleminin üzerine yerleştirilmiş yatay elektrik dipolünün skalar ve vektör potansiyellerinin Green fonksiyonları kapalı formda kompleks görüntüler (complex images) ve yüzey dalgasının katkısı olarak elde edilebilir. Genel mikroşerit anten yapılarını analiz edebilmek için sonsuz yapı için bulunan

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından EEEAG 100E015 projesi kapsamında desteklenmektedir.



Green fonksiyonlarını yüzey dalgalarının sonlandırılmış dielektrik kenarından olan yansımalarını da dikkate alacak şekilde değiştirerek sonlu yapı için Green fonksiyonlarını bulmak mümkündür. Bu fonksiyonların bulunması için izlenecek yöntem aşağıdaki şekilde özetlenebilir [4]:



Şekil 1 Sonlu dielektrik katman üzerinde dipol ve  $y=a$ 'da eşdeğer problem

1) Dielektrik-hava arayüzünde ( $y = a, z > 0$ ), Şekil 1, elektrik alanın yüzey dalga elemanını bulmak gerekir.

$$\vec{E}_{zw}^{inc} = f(z)k_{\rho 0}H_0^2 \left( k_{\rho 0} \sqrt{(x-x')^2 + (a-y')^2} \right) \hat{a}_z \quad (1)$$

Burada  $k_{\rho 0}$  yüzey dalgasının yayılım sabitidir.  $f(z)$ , dalganın  $z$ -yönünde nasıl değiştiğini gösteren fonksiyon,  $H_0^2$  ise sıfırıncı derece, ikinci tür Hankel fonksiyonudur.

2) Değişik geliş açılarındaki dalgaların etkisini daha iyi analiz edebilmek için Hankel fonksiyonunun düzlem dalga açılımından faydalanılabilir.

$$\pi H_0^2 \left( k_{\rho 0} \sqrt{x^2 + y^2} \right) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-jk_x x} \frac{e^{-jk_y y}}{k_y} dk_x, \quad k_{\rho 0} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (2)$$

3) Dielektrik-hava arayüzüne hayali bir yarı-sonsuz mükemmel elektrik iletken (PEC) yerleştirilerek, yukarıda bulunan gelen yüzey dalgayı kullanarak dielektrik-hava arayüzünde ( $y = a, z > 0$ ) eşdeğer magnetik akım tanımlanır ( $\vec{M}_{eq} = \vec{E}_{zw}^{inc} \times \hat{n}$ ).

4) Hayali PEC ve sonlu yer düzlemi  $90^\circ$ 'lik bir takoz oluşturur. İletken  $90^\circ$  takoz üzerine yerleştirilmiş,  $e^{-jk_x x}$  ile değişen yatay çizgisel manyetik bir akımın Green fonksiyonu Denklem (3)'teki gibidir [5]

$$G_x^H = \begin{cases} \omega \epsilon_0 \pi \frac{2}{3} e^{-jk_x x} \sum_n \frac{1}{\sigma_n} H_{2n}^2(k_i z') J_{2n}(k_i z), & z < z' \\ \omega \epsilon_0 \pi \frac{2}{3} e^{-jk_x x} \sum_n \frac{1}{\sigma_n} H_{2n}^2(k_i z) J_{2n}(k_i z'), & z > z' \end{cases} \quad (3)$$

Burada  $\sigma_0 = 2, \sigma_n = 1, n \neq 0$  and  $k_i = \sqrt{k_0^2 - k_x^2}$ . Bu Green fonksiyonu kullanılarak eşdeğer akımın oluşturduğu toplam manyetik alan ( $\vec{H}$ ) bulunur.

5) Kararlı formül (stationary formula) [2] kullanılarak,  $k_y$ 'a bağlı olarak kenar geçirisi  $y_{edge}$  bulunabilir. Yüzey dalgalarının kenardan yansıma katsayıları kenar geçirisi kullanılarak aşağıdaki şekilde bulunur:

$$y_{edge}(k_y) = \frac{\langle \vec{H}, \vec{M}_{eq} \rangle}{\langle \vec{M}_{eq}, \vec{M}_{eq} \rangle}, \quad \Gamma(k_y) = \frac{\frac{k_{\rho 0}}{\omega \mu} - y_{edge}(k_y)}{\frac{k_{\rho 0}}{\omega \mu} + y_{edge}(k_y)} \quad (4)$$

6) Dielektrik içindeki bir gözlem noktasında yansıyan yüzey dalgaları şu şekilde bulunabilir:

$$E_{zw}^{ref} \propto \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(k_y) e^{-jk_y 2a} e^{-jk_x x} \frac{e^{+jk_y(y+y')}}{k_y} dk_x \quad (5)$$

7) Tüm geliş açıları için bulunan yansıma katsayısı genelleştirilmiş fonksiyon kalem (Generalized Pencil of Function - GPOF) yöntemi kullanılarak kompleks üsteller cinsinden açılması yolu ile yansıyan yüzey dalgaları aşağıdaki gibi bulunur

$$E_z^{ref,rs} = f(z)k_{\rho 0} \sum_{i=1,N} \beta_i H_0^2 \left( k_{\rho 0} \sqrt{(x-x')^2 + \frac{(2a-(y+y')-ja_1)^2}{\text{kaynağın görüntüsü}}} \right) \quad (6)$$

Denklem (6)'daki  $\alpha_i$  ve  $\beta_i$  değerleri dielektrik katmanın kalınlığı, dielektrik sabiti ve frekans tarafından belirlenmektedir. Sonlu dielektrik katmanın diğer kenarlarından meydana gelecek yansımalar da yansıma neden olan süreksizliğin yapısının değişmemesi nedeni ile aynı  $\alpha_i$  ve  $\beta_i$  değerleri ile ifade edilebilmektedir. Böylelikle dört kenardan ( $y=a, y=-a, x=b, x=-b$ ) yansıyan toplam yüzey dalga aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$E_z^{ref,rs} = f(z)k_{\rho 0} \sum_i \beta_i \left\{ H_0^2 \left( k_{\rho} \sqrt{(x-x')^2 + (2a-(y+y')-ja_1)^2} \right) + H_0^2 \left( k_{\rho} \sqrt{(x-x')^2 + (2a+(y+y')-ja_1)^2} \right) \right. \\ \left. + H_0^2 \left( k_{\rho} \sqrt{(2b-(x+x')-ja_1)^2 + (y-y')^2} \right) + H_0^2 \left( k_{\rho} \sqrt{(2b+(x+x')-ja_1)^2 + (y-y')^2} \right) \right\} \quad (7)$$

Yama antenin analizinde karışık potansiyel integral denklemi kullanılmaktadır. Bu nedenle hem skalar potansiyelin ( $G_q$ ) hem de vektör potansiyelin ( $\bar{G}^A$ ) Green fonksiyonlarına ihtiyaç vardır. Sonlu dielektrik katman ve yer düzlemi için skalar ve vektör potansiyellerin yer uzayında (spatial domain) ifade edilmesinde kapalı formdaki Green fonksiyonları yöntemi kullanılmıştır [6]. Bu yöntemde frekans uzayındaki (spectral domain) Green fonksiyonları kompleks üsteller cinsinden açılmakta ve yer uzayına dönüşümde Sommerfeld özelliği kullanılmaktadır. Skalar potansiyel Green fonksiyonu kapalı formda aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$G_q = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left\{ \sum_n b_n \frac{e^{-jkr_n}}{r_n} + (-j2\pi) \underbrace{\sum_i^{N_{ik}+N_{rv}} k_{pp(i)} H_0^2(k_{pp(i)}\rho) Res^i}_{\text{yüzey dalgası}} \right\} \quad (8)$$

Burada  $\rho = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$  ve  $r_n = \sqrt{\rho^2 - a_n^2}$  'dir.  $b_n$  ve  $a_n$  sırasıyla frekans uzayındaki Green fonksiyonun kompleks üsteller cinsinden açılımındaki katsayı ve üsteli ifade etmektedir,  $k_{pp}$  yüzey dalga sayısı,  $Res$  ise rezidüsüdür.

Sonlu yer düzlemi ve dielektrik katman üzerine yerleştirilmiş yama antenin analizinde Denklem (8)'deki ifadeye Denklem (7)'deki yansıma terimleri eklenmektedir. MoM formülasyonunda yukarıda bulunan Green fonksiyonları kullanılarak mikroserit hatla beslenen ve sonlu dielektrik katman üzerine yerleştirilmiş bir yama anten üzerindeki akım dağılımı bulunmuştur. Elde edilen akım dağılımından antenin giriş empedansının hesaplanması için [7]'de önerilen yöntem kullanılmıştır. Mikroserit hattın  $y$  yönünde uzandığı düşünülürse bu yöntemde anteni besleyen mikroserit hat üzerindeki akım  $+y$  (gelen) ve  $-y$  (yansıyan) yönlerinde ilerleyen iki dalga cinsinden ifade edilmektedir.

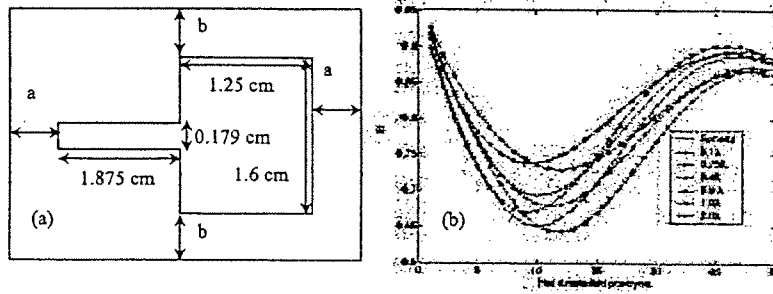
$$I = C^+ e^{-\gamma_1 y} + C^- e^{\gamma_2 y} \quad (9)$$

Burada  $\gamma_1$  ve  $\gamma_2$ , sırasıyla  $+y$  ve  $-y$  yönünde hareket eden dalgaların dalga sayısı (wave number),  $C^+$  ve  $C^-$  de sırasıyla bu yönlerde hareket eden dalgaların katsayılarıdır. Denklem (9)'daki dalga sayısından her iki yöne hareket eden dalga yayılım sabiti bulunabilir. Bulunan bu yayılım sabitinden efektif dielektrik sabiti ( $\epsilon_{eff}$ ) ve karakteristik empedans ( $Z_c$ ) bulunur.  $Z_c$  ve  $\epsilon_{eff}$  değerleri kullanılarak ve  $C^+$  ve  $C^-$  katsayılarından saçılım parametresi ve giriş empedansı bulunabilir.

### 3. Sonuçlar

Geliştirilen yazılım kullanılarak, değişik büyüklükteki dielektrik katman ve yer düzlemi üzerine yerleştirilen Şekil 2(a)'daki mikroserit yama antenin üzerindeki akım dağılımı ve giriş empedansı 5 GHz'te farklı a ve b değerleri için analiz edilmiştir. Dielektriğin kalınlığı 0.635 cm ve dielektrik sabiti 3.48'dir. Tablo 1'de antenin saçılım parametresi ve normalize edilmiş giriş empedansı verilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için dielektriğin ve yer düzleminin sonsuz olduğu durum da tabloda sunulmuştur. Tablodan da görüldüğü gibi dielektrik katmanı büyüdükçe antenin giriş empedansı dielektriğin sonsuz olduğu duruma yaklaşmaktadır.

Şekil 2(b)'de anteni besleyen mikroserit hat üzerindeki akım dağılımı farklı dielektrik büyüklükleri için çizilmiştir. Görüldüğü gibi dielektrik katmanı büyüdükçe sonuçlar monotonik olarak değil salınarak sonsuz değere yaklaşmaktadır ve bu gözlemler [1]'deki sonuçlarla örtüşmektedir.



Şekil 2 (a) Mikroserit anten, (b) mikroserit hat üzerindeki akım dağılımı

Tablo 1. Efektif Dielektrik Sabiti ve Karakteristik Empedans, Giriş Empedansı

	$a=b=0.1\lambda$	$a=b=0.25\lambda$	$a=b=0.4\lambda$	$a=b=0.5\lambda$	$a=b=\lambda$	$a=b=2\lambda$	$a=b=\infty$
Gerçek( $Z_{in}$ )	0.871949	0.905642	0.793759	0.923155	0.98733	0.847602	0.885981
Sanal( $Z_{in}$ )	-0.394871	-0.527866	-0.380465	-0.321198	-0.418489	-0.488117	-0.446258
$ s_{11} $	0.216981	0.271181	0.236013	0.169383	0.206151	0.267586	0.237657
$\angle s_{11}$ (°)	83,944284	-15,537515	-106.48573	-93.97288	-22,54696	-92.54034	-91.02005

### Kaynaklar

- [1] A. K. Bhattacharyya, "Effects of Ground Plane Truncation on the Impedance of a Patch Antenna", IEE Proceedings-H, 138(6), s.560-564, 1991.
- [2] A. K. Bhattacharyya, "Effects of Ground Plane and Dielectric Truncations on the Efficiency of a Printed Structure", IEEE Trans. Antennas Propagat., 39(3), s.303-308, 1991.
- [3] Lale Alatan, Özlem Aydın Civi, Gülge Ögücü, "An Approximate Green's Function for a Finite Grounded Dielectric Slab", 2001 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting, Boston-USA, Proc. URSI, s.43, 8-13 Temmuz 2001.
- [4] L. Alatan, Ö. Aydın Civi, G. Ögücü, "Analysis of Printed Structures on Truncated Dielectric Slab and Finite Ground Plane", 2002 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting
- [5] L.W. Pearson, "The Electromagnetic Edge Wave Due to a Point Source of Current Radiating in the Presence of a Conducting Wedge", IEEE Trans. Antennas Propagat., 34(9), s.1125-1131, 1986.
- [6] G. Dural, M. I. Aksun, "Closed form Green's Functions for General Sources and Stratified Media", IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, MIT-43(7), s.1545-1552, 1995.
- [7] T.K. Sarkar, Z.A. Maricevic and M. Kahvizi, "An Accurate De-embedding Procedure for Characterizing Discontinuities", Int. Journal of Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering, 2(3), s.135-143, 1992.

## PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

**Proje Kodu :** 100E015

**Proje Başlığı :** Mikroşerit Antenlerde Sonlu Yer Düzleminin ve Dielektrik Katmanının Etkilerinin İncelenmesi

**Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar :** Lale Alatan (yürütücü), Y. Doç.Dr.Özlem Aydın Çivi, Y. Müh.Gölge Ögücü

**Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi :** Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06531

**Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi :** TÜBİTAK, EEEAG

**Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri :** 1/8/2000-31/8/2002

**Öz : (en çok 70 kelime)**

zF Sonlu yer düzlemi ve dielektrik katman üzerindeki mikroşerit yama antenin elektromanyetik modellenmesi yapılmış, bu tür sonlu yapıların analizi için MoM formülasyonu ve bu formülasyona dayalı bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım kullanılarak elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılarak geliştirilen formülasyonun doğruluğu gösterilmiştir. Ayrıca, geliştirilen yöntem kullanılarak, sonlu yer düzlemi ve dielektrik katmanın anten parametrelerine olan etkileri incelenmiştir. Antenin ışınma örüntüleri tüm uzay için bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** mikroşerit antenler, sonlu yer düzlemi, sonlu dielektrik katmanı, sayısal yöntemler  
(microstrip antennas, finite ground plane, truncated dielectric substrate, numerical methods)

**Projeden Kaynaklanan Yayınlar:** 1.L. Alatan, Ö. Aydın Civi, G. Ögücü, "An Approximate Green's Function for a Finite Grounded Dielectric Slab", *2001 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Boston-USA, Proc. URSI, p. 43, July 8-13 2001.

2. L. Alatan, Ö. Aydın Civi, G. Ögücü, "Analysis of Printed Structures on Truncated Dielectric Slab and Finite Ground Plane", *2002 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and URSI Radio Science Meeting*, San Antonio-USA, vol.4, p.190-193, June16-21 2002.

3. G. Ögücü, L.Alatan, Ö. Aydın Çivi, T. Ege, "Sonlu Yer Düzlemi ve Dielektrik Katmanı Üzerine Yerleştirilmiş Mikroşerit Antenlerin Analizi", *URSI-Türkiye'2002 Birinci Ulusal Kongresi*, p 125-128, Eylül 2002.

**Bilim Dalı :**

**Doçentlik B. Dalı Kodu :**