

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

Gölge Ögücü, 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 özetlenmiştir. 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, ışıma örüntüsü) 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 saçınımını 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 saçınımını 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.

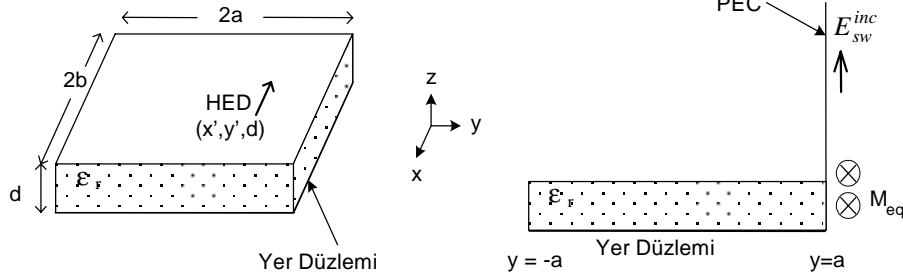
## 2. Formülasyon

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 dielektriğin 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.

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

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

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]

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

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

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

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

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

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 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

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

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.

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

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,  $k_{\rho p}$  yüzey dalgaının 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 mikroşerit 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. Mikroşerit hattın  $y$  yönünde uzandığı düşünülürse bu yöntemde anteni besleyen mikroşerit hat üzerindeki akım  $+y$  (gelen) ve  $-y$  (yansıyan) yönlerinde ilerleyen iki dalga cinsinden ifade edilmektedir.

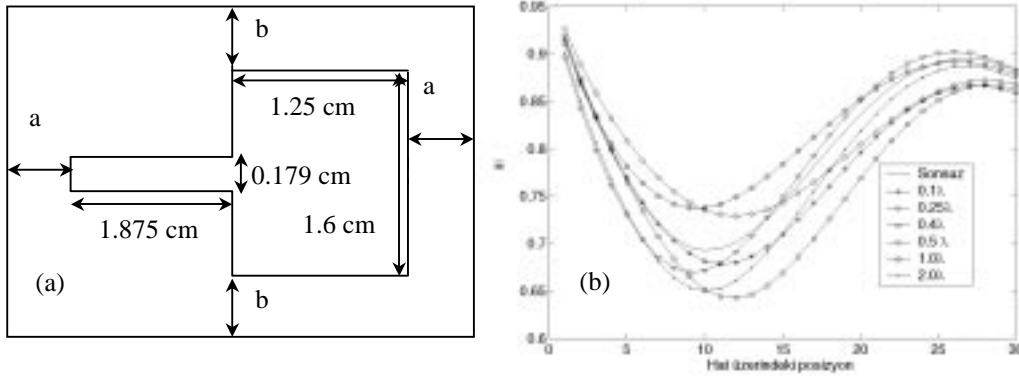
$$I = C^+ e^{-\gamma_1 y} + C^- e^{\gamma_2 y} \quad (9)$$

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 dalganın 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 mikroşerit 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 büyüdüğe antenin giriş empedansı dielektriğin sonsuz olduğu duruma yaklaşmaktadır.

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



Şekil 2 (a) Mikroşerit anten, (b) mikroşerit hat üzerindeki akım dağılımı

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

	$a=b=0.1\lambda$	$a=b=0.25\lambda$	$a=b=0.4\lambda$	$a=b=0.5\lambda$	$a=b=\lambda$	$a=b=2\lambda$	$a=b=\infty$
Gerek( $Z_{in}$ )	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
$\angle s_{11}$ ( $^\circ$ )	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, Gölge Öğücü, "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. Öğücü, "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, MTT-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.