

## Yarıklı Sektörel Dalga Kılavuzu Dizi Antenlerin Çok-katlı Radom ve Metal Kalınlığı ile Analizi

Mert Kalfa, Vakur B. Ertürk

İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bilkent, Ankara

[kalfa@ee.bilkent.edu.tr](mailto:kalfa@ee.bilkent.edu.tr), [vakur@ee.bilkent.edu.tr](mailto:vakur@ee.bilkent.edu.tr),

**Özet:** Bu çalışmada çok-katmanlı radom içeren yarıklı sektörel dalga kılavuzu anten dizileri, birleşik Momentler Metodu/Green'in fonksiyonu tekniği ile çözümlenmiştir. Yarıkların bulunduğu metal yüzeyin kalınlığı hesaba katılmıştır. Çözümleme için gerekli Green'in fonksiyonları detaylı şekilde türetilmiş ve HFSS<sup>TM</sup> ile doğrulanmıştır. Önerilen yöntem ile farklı anten yapıları analiz edilmiş, uzak-alan ışınma örüntüleri ve S-parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar HFSS<sup>TM</sup> benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

**Abstract:** In this study, slotted sectoral waveguide array antennas with multilayered radomes and non-zero metal thicknesses are analyzed with a hybrid Method of Moments/Green's function technique. The Green's function representations required for the analysis are rigorously derived and validated using HFSS<sup>TM</sup>. Various antennas are analyzed using the proposed method. Numerical results in the form of far-zone radiation patterns and S-parameters are presented and compared to the results obtained from HFSS<sup>TM</sup>.

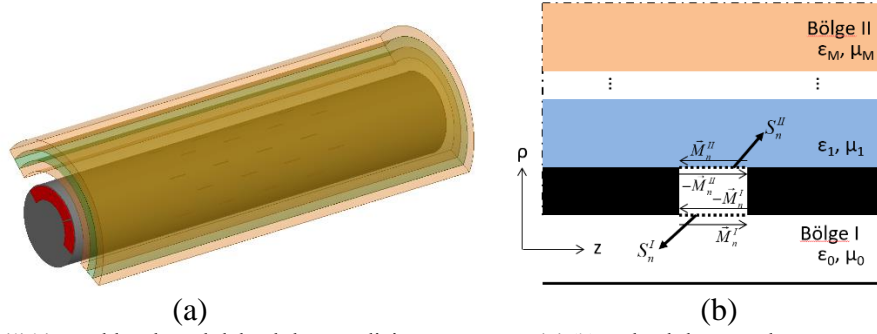
### 1. Giriş

Dielektrik kaplı yarıklı dalga kılavuzu anten dizileri düşük profilli olmaları, yüksek güç dayanımları ve kullanılan platform üzerindeki eğik yüzeylere uyumlanabilmeleri sebebiyle askeri ve sivil uygulamalarda tercih edilmektedir. Eğik yüzey uyumluluğu, özellikle aerodinamiğin ve radar kesit alanının (RKA) kritik olduğu hava platformlarında gerekli hale gelmektedir. Eğik yüzeylere uyumlu yarıklı dalga kılavuzu anten dizilerinin isabetli analizi ve tasarımı oldukça ilgi çeken bir konu olmasına rağmen, literatürde bulunan analiz yöntemleri genellikle düşük etkinlikleri ve yüksek rastgele erişimli hafıza (RAM) gereksinimleri nedeniyle tercih edilmemektedir. Mevcut analiz yöntemleri içinde en yaygın kullanılanlar Momentler Metodu'nun integral denklem çözümleyicileridir. Ancak integral denklem çözümleyiciler, özellikle silindirik katmanlı ortamların bulunduğu problemlerde çok uzun matris oluşturma süreleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Yazarların daha önceki çalışmalarında eşksenel olarak dielektrik katmanlar ile kaplı bir yarıklı sektörel dalga kılavuzu dizi anten, birleşik Momentler Metodu/Green'in fonksiyonu tekniği (MoM/GF) ile ilk kez çözümlenmiştir [1]. Bu çalışmada ise [1]'de verilen analiz yöntemi, yarıkların açıldığı metal yüzeyin metal kalınlığını (et kalınlığını) da hesaba katacak şekilde geliştirilmiştir. Bu sayede analiz yöntemi üretimi yapılacak anteni daha isabetli modelleyebilecek şekilde güncellenmiştir.

Temsili bir dizi anten geometrisi ve dalga kılavuzu üzerindeki tek bir yarığın kesiti Şekil 1'de görülebilir. MoM/GF tekniği ile elde edilen matris denkleminin girdilerinin hesaplanması için üç farklı Green'in fonksiyonuna ihtiyaç vardır. Sektörel dalga kılavuzunun iç bölgesi (Bölge-I) ve çok-katmanlı radom (Bölge-II) için ikici (*dyadic*) Green fonksiyonunun boylamsal manyetik akımları boylamsal manyetik alanlara ilişkilendiren bileşeni yazarların daha önceki çalışmalarında hesaplanmıştır [1]. Metal kalınlığını hesaba katabilmek için Bölge-I ve Bölge-II'yi birbiriyle ilişkilendiren üçüncü bir bölge tanımlanmıştır (Bölge-III). Sektörel oyuk olarak modellenebilen bu bölgenin uygun ikici Green'in fonksiyonu bileşeni bu çalışma kapsamında türetilmiştir. Geliştirilen analiz yöntemi ile çözümlenen örnek silindirik katmanlı yarıklı sektörel dalga kılavuzu yapıları için eşdeğer yarık akımları, uzak-alan ışınma örüntüleri ve S-parametreleri hesaplanmış, elde edilen sonuçlar bir sonlu elemanlar yöntemi çözümleyicisi olan HFSS sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Bildirinin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de bu çalışmada uygulanan MoM/GF analiz tekniği detaylandırılmış, Bölüm 3'te ise örnek bir anten geometrisi için sayısal sonuçlar HFSS sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. (a) Temsili bir yarıklı sektörel dalga kılavuzu dizi anten geometrisi (b) Dalga kılavuzu, dış ortam ve yarık içi bölgeyi gösteren kesit.

## 2. Analiz Yöntemi

Bu çalışmada eşeksenel silindirik dielektrik katmanlarla kaplı yarıklı sektörel dalga kılavuzu dizi antenlerin analizi için birleşik MoM/GF tekniği uygulanmıştır. Bu tekniğe göre çözümleme yapılan geometri denklik teoremi ve yarıklar üzerinde temsili manyetik akım kaynakları kullanılarak Şekil 1-b'de gösterildiği gibi üç bölgeye ayrılır. Sektörel dalga kılavuzu içinde sadece temel modun ( $TE_{11}$ ) uyarıldığı varsayılmıştır. Sektörel dalga kılavuzunun geniş kenarında boylamasına açılan yarıklar dik yönde oldukça ince olduklarından sadece enine elektrik (TE) modlarının yayıldığı varsayılmaktadır. Yarıklar üzerindeki temsili manyetik akım kaynakları sonlu sayıda parçalı sinüzoid fonksiyon ile ifade edildikten sonra manyetik alan integral denklemini oluşturmak için yarıklar üzerinde teğet manyetik alanların devamlılığı uygulanır. Oluşturulan integral denklemi, Galerkin'in yöntemi kullanılarak matris denklemi haline getirilir.

$$\begin{bmatrix} Y_{ij}^{(I)} + Y_{ij}^{(III)}(S^I, S^I) & Y_{ij}^{(III)}(S^I, S^{II}) \\ Y_{ij}^{(III)}(S^{II}, S^I) & Y_{ij}^{(II)} + Y_{ij}^{(III)}(S^{II}, S^{II}) \end{bmatrix}_{2N \times 2N} \begin{bmatrix} \alpha_i^I \\ \alpha_i^{II} \end{bmatrix}_{2N \times 1} = \begin{bmatrix} I_i \\ 0 \end{bmatrix}_{2N \times 1} \quad (1)$$

$$Y_{ij}^{(I)} = \begin{cases} \iint_{S_i} \iint_{S_j} G_{zz}^{HM(I)} K_i K_j dS dS', & K_i, K_j \in \text{aynı dalga kılavuzu} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (2)$$

$$Y_{ij}^{(II)} = \iint_{S_i} \iint_{S_j} G_{zz}^{HM(II)} K_i K_j dS dS' \quad (3)$$

$$Y_{ij}^{(III)}(S^a, S^b) = \begin{cases} \iint_{S^a} \iint_{S^b} G_{zz}^{HM(III)} K_i^a K_j^b dS dS', & K_i^a, K_j^b \in \text{aynı yarık} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4)$$

Denklem (1)'de  $\alpha_n$  parçalı sinüzoid fonksiyonlarının bilinmeyen voltaj katsayılarına,  $I_i$  ise dalga kılavuzları içindeki uyarımdan kaynaklanan akım vektörünün elemanlarına karşılık gelir. Denklem (2)-(4)'te  $G_{zz}^{HM(I,II,III)}$  sırasıyla I., II. ve III. bölgede Green'in fonksiyonunun boylamsal manyetik akımları boylamsal manyetik alanlara ilişkilendiren bileşeni,  $K_i$  ise parçalı sinüzoid fonksiyonlarını ifade eder. Denklem (1)'de verilen matrisin girdilerinin hesaplanması için problemin üç bölgesi için üç farklı Green'in fonksiyonuna ihtiyaç vardır. Bölge-I ve Bölge-II için geliştirilen Green'in fonksiyonları [1]'de verilmiştir.

Yarıkların iç bölgesine (Bölge-III) karşılık gelen Green'in fonksiyonu bileşeni, diklik prensibi, Fourier dönüşümleri ve kalıntı teoremi ile şu şekilde türetilir.

$$G_{zz}^{HM(III)} = j\omega\epsilon \frac{2}{c_z} \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} B_{pq} \cos(v_p \phi) \cos(v_p \phi') \sin(k_{z_s} z) \sin(k_{z_s} z') \frac{k^2 - k_{z_s}^2}{k^2 - k_{c_{pq}}^2 - k_{z_s}^2} \quad (5)$$

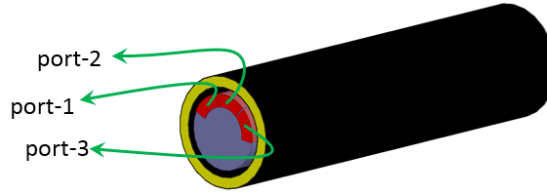
$$k_{z_s} = \frac{s\pi}{c_z}, \quad s = 1, 2, \dots \quad (6)$$

Denklem (5)'te verilen ifadeler [1]'de detaylı olarak açıklanmıştır. Türetilen Green'in fonksiyonları kullanılarak Denklem (1)'deki matris girdileri hesaplanmakta ve matris denklemi nümerik teknikler ile çözülerek yarıklar üzerindeki eşdeğer manyetik akımlar belirlenmektedir. Daha sonra Bölge-II'deki eşdeğer manyetik akımlar ile uzak-alan ışınım örüntüleri, Bölge-I'deki eşdeğer manyetik akımlar ile de S-parametreleri hesaplanmaktadır.

### 3. Sayısal Sonuçlar

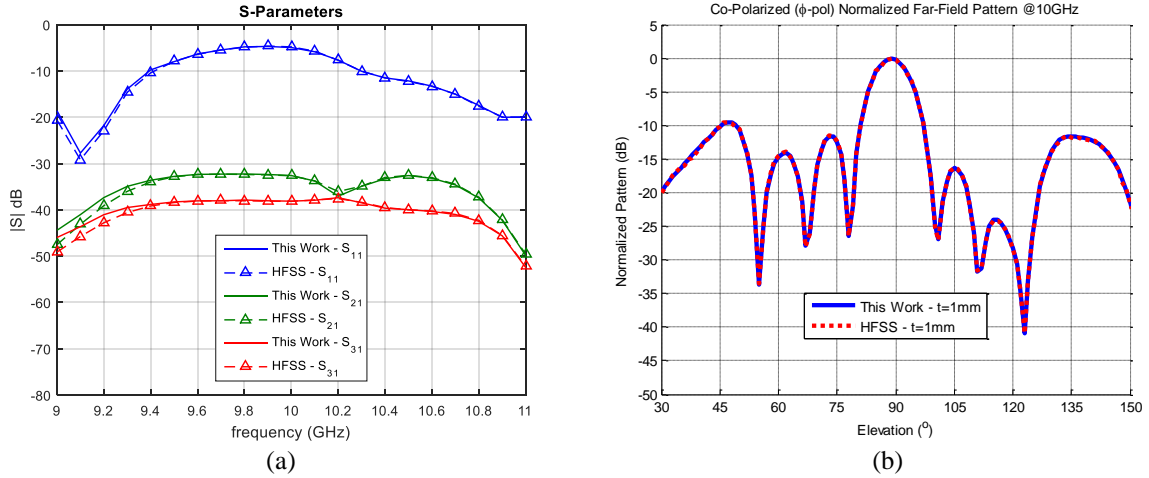
Bu bildiriye açıklanan yöntemi doğrulamak amacıyla örnek bir dizi antenin analizi yapılmış ve sonuçlar HFSS benzetimleri ile kıyaslanmıştır. Şekil 2'de görüntüsü ve port numaraları verilen dizi antenin bazı özellikleri aşağıda listelenmiştir:

- Dalga kılavuzları: 20mm bükme yarıçapı ile bükülmüş 3 adet WR-90 ( $52^\circ$  aralıklarla yerleştirilmiş),
- Her dalga kılavuzunda merkezden eşit uzaklıkta 14mm boyunda 8 adet yarık,
- Antenden 5mm uzaklıkta A-Sandviç Radom
  - 0.83mm cam kumaşı ( $\epsilon_r=4.3$ ) / 8mm köpük ( $\epsilon_r=1.09$ ) / 0.83mm cam kumaşı ( $\epsilon_r=4.3$ )
- Yarıkların açıldığı yüzeyde 1mm metal kalınlığı.



Şekil 2. Analiz edilen dizi anten geometrisi

Şekil 3-a'da dalga kılavuzlarının S-parametreleri verilmiştir. Şekil 3-b'de ise üç dalga kılavuzu eş genlik ve faz ile uyarıldığında elde edilen yükseliş ışınım örüntüleri verilmiştir. Tüm grafiklerde sonuçların uyumlu oldukları görülmektedir.



Şekil 3. (a) Yansıma katsayıları (b) Yanca ve yükseliş ışınım örüntüleri (10GHz)

### 5. Sonuç

Bu bildiriye eşksenel olarak dielektrik katmanlar ile kaplı bir yarıklı sektörel dalga kılavuzu dizi anten, birleşik MoM/GF tekniği ile çözümlenerek yöntemin doğruluğu HFSS benzetimleri ile doğrulanmıştır. Yazarların önceki çalışmalarına ek olarak yarıkların açıldığı yüzeydeki metal kalınlığı da hesaba katılmıştır. Sunulan çözümlenme yönteminin silindirik katmanlı ortamlarda gömülü malzemeye entegre dalga kılavuzları, oyuk antenler ve benzeri açıklık tipi antenlerin analizi için de kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

### Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumunun EEEAG-113E628 no'lu projesi tarafından desteklenmektedir.

### Kaynaklar

[1] Kalfa M. ve Ertürk V.B., "Analysis of slotted sectoral waveguide arrays with multilayered radomes," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, cilt 64, no. 2, s. 800-805, 2016.