

Mikroşerit Yama Antenlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi

A. Egemen YILMAZ, Mustafa KUZUOĞLU
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
06520, Ankara

ayilmaz@havelsan.com.tr, kuzuoglu@metu.edu.tr

Özet: Mikroşerit yama antenler ile ilgili açık bölge saçılma ve ışıma problemlerinin doğrusal ve/veya ikinci dereceden eş parametrelili altıyüzlü kenar elemanları ile çözümü, bu çalışmanın esasını oluşturmaktadır. Hafiflik, ucuzluk, kolay üretim ve diğer devrelerle kolaylıkla tümleştirilebilme gibi özellikleri sayesinde geniş uygulama alanları bulan mikroşerit yama antenlerin analizi üzerinde birçok çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmadaki sonlu eleman formülasyonunda, Galerkin Yöntemi ile tanımlı baz fonksiyonları kullanılmakta; ağ sonlandırımı ise Mükemmel Eşlenmiş Katmanlar ile gerçekleştirilmektedir. Mikroşerit yama antenlerdeki besleme devresi, üstleç, kısa devre vb. yapıların modellenmesi için de eşlenik yapılar oluşturulmaktadır. Geliştirilen yöntem, antenlerdeki değişkenlerin saçılım ve ışıma karakteristiklerine etkilerini incelemek üzere değişik problemlerde uygulanmıştır.

1. Giriş

Mikroşeritlerin ışıma kaynağı olarak kullanılması kavramı, ilk olarak 1953 yılında Deschamps tarafından önerilmiş olup [1], bu konudaki ilk patent 1955 yılında Fransa'da Gutton ve Baissinot adına tescil edilmiştir. 1970'li yıllarda gerek malzeme teknolojilerinin ilerlemesi, gerekse daha sağlam temellere oturan teorik modellerin önerilmesi sayesinde mikroşerit anten üretimi büyük bir ivme kazanmıştır. Pratik anlamda başarılı ilk antenler 1972'de Howell [2], 1974'de Munson [3] tarafından geliştirilmiştir. Hafiflik, ucuzluk, kolay üretilebilme ve şekillendirilme, diğer devrelerle kolayca tümleştirilebilme gibi avantajları sayesinde bilhassa hareketli sistemlerde yaygın kullanım alanları bulan mikroşerit anten ailesinin; mikroşerit yama antenler, mikroşerit dipoller, baskı yarı antenler gibi alt türleri bulunmaktadır. Tüm bu alt türler arasında üretim kolaylığı, her şekilde üretilebilme, anten dizisi oluşturulabilme gibi özellikleri ile öne çıkan mikroşerit yama antenlerin incelenmesi, bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır.

Mikroşerit yama antenlerin incelenmesinde, diğer birçok uygulamada olduğu gibi analitik çözümün mümkün olmadığı durumlarda, nümerik yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılmakta olan Sonlu Elemanlar Yöntemi aslen yapısal mekanik problemleri için geliştirilmiş olup, 1940'lı yıllarda Courant tarafından elektromanyetik problemlere uyarlanmıştır [4]. Sonlu Elemanlar Yöntemi, problem uzayının küçük parçalara bölünmesi ve bilinmeyen fonksiyonun bu küçük parçalar üzerinde çeşitli baz fonksiyonlarla ifade edilmesi temeline dayanır. Yöntemin genel bir avantajı, problemi ifade eden denklemdeki matrisin seyrek bir matris olmasıdır. Bu sayede, bellek kullanımı ve matris çözümü verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Yöntemin homojen olmayan karmaşık cisimlerin modellenmesindeki başarısı nedeniyle, mikroşerit yama antenlerin analizinde kullanılması başarılı sonuçlar vermektedir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin açık bölge problemlerine uygulanması için literatürde değişik yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler arasından Berenger'nin önerdiği Mükemmel Eşlenmiş Katmanlar (PML) yöntemi [5], bu çalışmada karmaşık koordinat dönüşümü [6] ile modellenmiştir.

2. Elektrik Alan ve Sonlu Eleman Formülasyonu

Üç boyutlu bir elektromanyetik saçılım veya ışıma probleminde, toplam elektrik alanın sonlu elemanlar yöntemi için zayıf formda formülasyonunun yapılması (sırasıyla Maxwell denklemleri kullanılarak dalga denklemi elde edilmesi; bu denklemin bir Ω hacmi üzerinde tanımlı vektörel bir φ fonksiyonu ile içsel çarpımının alınması; bir takım vektör eşitlikleri ile bu denklemin indirgenmesi; elektrik alanın söz konusu N kenarlı V_i hacimleri içerisinde \mathbf{w}_i baz fonksiyonları cinsinden ifade edilmesi; ve Galerkin yöntemi uyarınca \mathbf{w}_i baz fonksiyonlarının içsel çarpımda kullanılan φ fonksiyonuna eşit seçilmesi) durumunda aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\int_{V_i} \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \sum_{n=1}^N \mathbf{w}_n E_n \right) \cdot (\nabla \times \mathbf{w}_m) dV - \int_{V_i} \left(k_0^2 \varepsilon_r \sum_{n=1}^N \mathbf{w}_n E_n \right) \cdot \mathbf{w}_m dV = \int_{V_i} \left(k_0^2 (\varepsilon_r - 1) \mathbf{E}^{\text{inc}} \right) \cdot \mathbf{w}_m d\Omega \quad (1)$$

w_i baz fonksiyonları, kullanılacak olan sonlu elemanların geometrilerine uygun olacak ve bütünlük kriterlerini sağlayacak şekilde tanımlanmalıdır. Örneğin, uvp uzayında 8 düğüm noktası (node) ve 12 kenar ile tanımlanmış olan doğrusal altı yüzlü kenar elemanları [7] için u yönündeki kenarlarda baz fonksiyonları şu şekilde yazılabilir:

$$w_i = \frac{1}{8}(1 + v_i v)(1 + p_i p)\nabla u \quad (2)$$

(2) numaralı eşitlikte $v_i = \pm 1$ ve $p_i = \pm 1$ olup i 'inci kenarın v ve p koordinatlarıdır. v ve p yönündeki kenarlarla ilişkili baz fonksiyonları benzer şekilde bulunabilir. İkinci dereceden altı yüzlü kenar elemanı ise, Kameari tarafından 20 düğüm noktası ve 36 kenar ile tanımlanmıştır [8]. Elemanın u yönündeki kenarlarında tanımlanan baz fonksiyonları (sırasıyla fiziksel olarak kenarlarda bulunan kısa kenarlar ve yüzeylerde bulunan uzun kenarlar için) aşağıdaki gibidir:

$$w_i = \frac{1}{8}(1 + v_i v)(1 + p_i p)(u_i u + v_i v + p_i p - 1)\nabla u \quad (3)$$

$$w_i = \frac{1}{4}(1 + p_i p)(1 - v^2)\nabla u \quad (4)$$

(3) ve (4) numaralı eşitliklerde $u_i = \pm 1/2$, $v_i = \pm 1$ ve $p_i = \pm 1$ olup i 'inci kenarın merkez noktasının koordinatlarıdır. v ve p yönündeki kenarlarla ilişkili baz fonksiyonları benzer şekilde bulunabilir.

Sonlu eleman çözümü şu adımlar takip edilerek yapılır: Her bir eleman için ilgili denklemlerde (doğrusal elemanlar için (2), ikinci dereceden elemanlar için (3) ve (4) numaralı denklemlerde) belirtilen baz fonksiyonları hesaplanarak (1) numaralı denklemdeki integraller Gauss yöntemiyle alınır. Bütün elemanlar için elde edilen matrisler bütün geometriyi temsil edecek global sistem matrisini ve ilgili denklemi elde etmede kullanılır. Bilinen sınır değerler denklemde yerine konular ve matris denklemi çözülür. Elde edilen elektrik alandan, Huygens'in denklik prensibi vasıtasıyla uzak alan hesaplanır. Uzak alan sayesinde; ışınma problemlerinde cisimlerin ışınma örüntü karakteristiklerinin; yansıma problemlerinde de cisimlerin Radar Ara Kesitleri'nin (RCS) hesaplanması mümkündür.

4. Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin Mikroşerit Yama Antenlere Uygulanması

Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin mikroşerit yama anten problemlerine uygulanması esnasında anten geometrisinde bulunan özel yapıların (üstleç, duyurga, kısa devre vb.) uygun bir şekilde modellenmesi, ilgili eleman matrislerinde temsil edilmesi gerekmektedir.

İletken yamanın bulunduğu bölgenin, oluşturulan ağ ile fiziksel olarak elemanların kenarlarına denk getirilmesi; ve matris denkleminde söz konusu kenarlar üzerinde elektrik alanın teğet bileşeninin 0'a eşitlenmesi gerekmektedir. Benzer işlemler, mikroşerit besleme devresi için de yapılmalıdır.

Geometride Z_L (Ω) değerinde bir empedans yük bulunması durumunda ise: empedans yük, yamayı toprak düzlemine bağlayan l uzunluğunda iletken bir yapı olarak düşünülmeli, yükün bulunduğu eleman(lar)ın matris(ler)inde aşağıdaki değer atanmalıdır:

$$E(m, n) = \frac{jk_0 Z_0 l^2}{Z_L} \mathbf{w}_m \cdot \mathbf{w}_n \quad (5)$$

Kısa devreler için (5) numaralı denklemde $Z_L = 0$ değeri kullanılmalı, ya da söz konusu elemanın ilgili kenarı boyunca elektrik alanın 0'a eşit olması sağlanmalıdır.

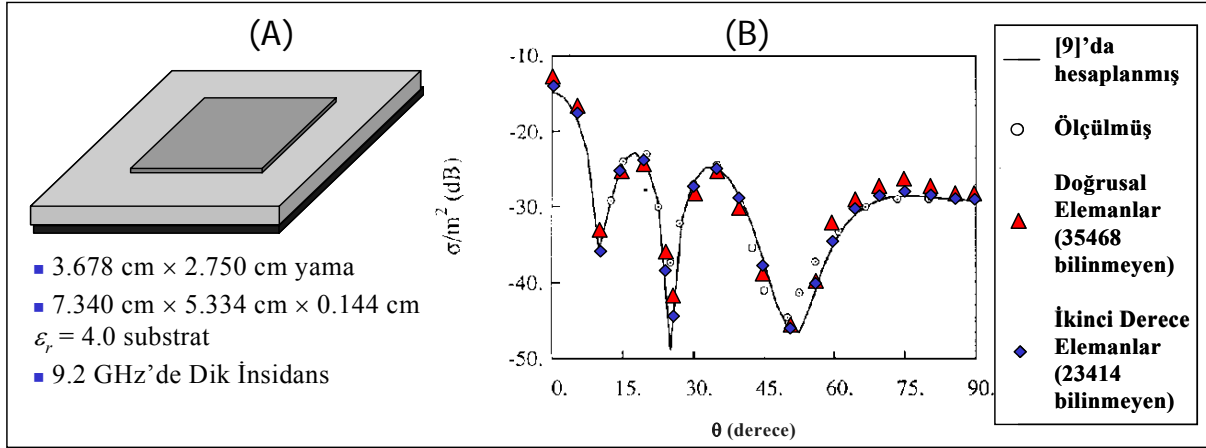
Eşeksenli (koaksiyel) besleme devreleri ise, akım kaynağı yapılar olarak düşünülmeli ve ilgili eleman matris denkleminin sağ tarafına aşağıdaki değer atanmalıdır:

$$B(n) = \frac{jk_0 Z_0 l^2}{\mathbf{I} \cdot \mathbf{w}_n} \quad (6)$$

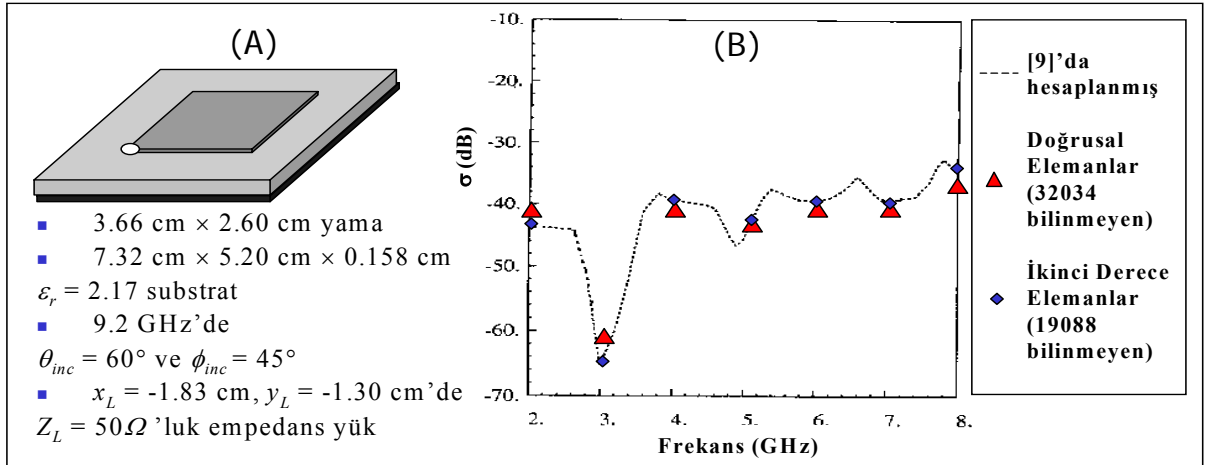
5. Sonuçlar

Günümüzde askeri uygulamalarda, düşük Radar Ara Kesit Alanı'na sahip platformlar geliştirilmesi elektronik harp açısından büyük önem arz etmektedir. Özellikle hareketli platformlarda ve askeri sistemlerde yaygın kullanımları olan mikroşerit yama antenlerin, buldukları sistemlerin Radar Ara Kesit Alanı'na önemli katkısı bulunmaktadır. Bu nedenle, mikroşerit yama antenlerin yansıma özelliklerinin incelenmesi, değişik yöntemlerle

(ışınma karakteristiklerini bozmadan) yansıtma özelliklerinin indirgenmesi önemli bir husustur. Yapılmış olan çalışmanın ilk etabında, değişik yama geometrileri için hem doğrusal hem de ikinci dereceden altı yüzlü sonlu kenar elemanları kullanılarak Radar Ara Kesit Alanı değerleri hesaplanmış, elde edilen sonuçlar [9] ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. (A) Çözülen yüksüz yama anten probleminin tanımı; (B) Sonuçlar ve [9] ile karşılaştırmalar.



Şekil 2. (A) Çözülen yüklü yama anten probleminin tanımı; (B) Sonuçlar ve [9] ile karşılaştırmalar.

Şekil 1 ve 2(A)'da tanımlanmış olan geometriler için sırasıyla Şekil 1 ve 2(B)'de verilmiş olan sonuçlarda, uygulanan yöntemin başarılı olduğu görülmektedir. İkinci dereceden elemanlar ile doğrusal elemanlar arasında bir karşılaştırma yapıldığında ise; ikinci dereceden elemanların toplam eleman sayısı (dolayısıyla da bilinmeyen sayısı, bellek kullanımı, işlemci zamanı) ve çözüm doğruluğu gibi kriterler açısından büyük bir iyileştirme sağladığı gözlenmiştir. Halen devam etmekte olan çalışmalarda, mikroşerit yama antenlerin ışıma özelliklerine ilişkin problemler incelenmekte ve sonlu eleman çözümleri gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmaların devamında, bilhassa pratik uygulamalarda çok yaygın olan benzer şekilli (conformal) mikroşerit yama antenler ile ilgili problemlerin çözülmesi hedeflenmiştir.

Kaynaklar

- [1] G. A. Deschamps, "Microstrip Microwave Antennas", 3üncü ABD HvKK Sempozyumu, 1953.
- [2] J. Q. Howell, "Microstrip Antennas", IEEE AP-S Int. Symp. Digest, s.177-180, 1972.
- [3] R. E. Munson, "Conformal Microstrip...", IEEE Trans. Ant. Prop., cilt AP-22: s.74-78, 1974.
- [4] R. Courant, "Variational methods for a solution...", Bull. Amer. Math. Soc., 49: s.1-23, 1943.
- [5] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for...", J. Comp. Phys., cilt 114, s. 185-200, Ekim 1994.
- [6] W. C. Chew ve W. H. Weedon, "A 3-D perfectly...", Microwave Opt. Tech. Lett., s. 599-604, Eylül 1994.
- [7] J. S. van Welij, "Calculation of eddy current", IEEE Trans. Mag., cilt 21, No. 6, s. 2239-2241, 1985.
- [8] A. Kameari, "Calculation of Transient 3D...", IEEE Trans. Mag., cilt 26, No. 2, s. 466-469, Mart 1990.
- [9] J. M. Jin ve J. Volakis, "A Hybrid Finite...", IEEE Trans. Ant. Prop., cilt 39, 11: s. 1598-1604, Kasım 1991.