

Frekans Seçici Yüzeylerin İletim ve Yansıma Karakteristiklerinin İncelenmesi

Saim Ekici¹

Erdem Yazgan²

¹Mikrodalga Elektronik Sistemler (MİKES) A.Ş., Ankara

²Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara

¹saim.ekici@mikes.com.tr

²yazgan@hacettepe.edu.tr

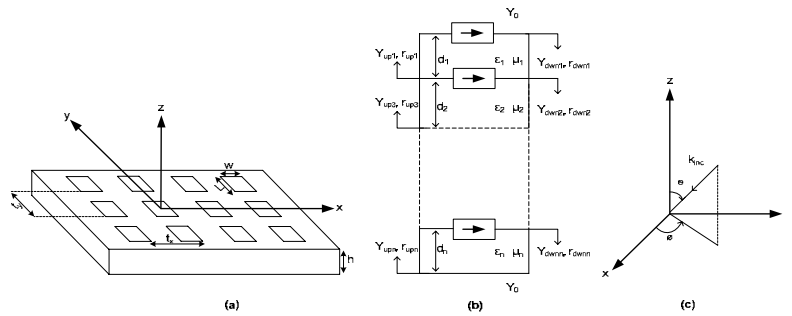
Özetçe

Elektronik Harp (EH) alanında radar kesitinin azaltılması için birçok teknik uygulanmaktadır. Burada temel amaç yansımayı olabildiğince azaltmaktır. Bu tekniklerden birisi de tek veya çok katmanlı periyodik yapılar kullanmaktır. Bu çalışmada herhangi bir yüzeyden yansımayı azaltmak için dörtgen iletken yamaların kullanıldığı Frekans Seçici Yüzey (FSY) yapıları incelenmiştir. FSY analizinde izgesel alan immitans yaklaşımı ile Moment Metodu'nun birlikte kullanıldığı integral yöntemi izlenmiştir. Ayrıca çok katmanlı yapılar için iletim hattı modelinden yararlanılmıştır. Elektromanyetik alan, Floquet modlarının birer fonksiyonu şeklinde genişletilerek levhalar üzerindeki bilinmeyen akımlara ait katsayılar Moment Metodu ile bulunarak FSY'ye ait yansıma ve iletim katsayıları elde edilmiştir.

1. Giriş

Periyodik yapılar temel anlamda iki şekilde uyarılır. Pasif dizide gelen düzlemsel bir dalga ile, aktif dizide ise her elemana bağlanmış birer üreteç ile uyarılma gerçekleştirilir. Kullanım amacına göre belirli bir frekans bandını soğuran veya yansıtan pasif dizilere Frekans Seçici Yüzey (FSY) denir. FSY özellikle haberleşmede, mikrodalga entegre devrelerde ve antenlerde kullanılmaktadır [1]-[5]. Örneğin, radom yapılarında FSY, sinyalin frekans bandında tam iletim yaparken diğer frekans bandlarında yansıtıcı özellik göstermektedir.

FSY'nin yansıma ve iletim karakteristiği; kullanılan malzemelerin cinsine, katman kalınlığına, düzlemsel dalga'nın geliş açısına ve polarizasyonuna, katmanlar üzerine yerleştirilen metalik yamaların boyutları, geometrisi ile periyodikliğine ve simetri ekseninin konumuna göre değişmektedir. Katman yapısında, örneğin; ferromagnetik malzemeler kullanılarak yapının iletim ve yansıma karakteristiği, kullanım sırasında da değiştirilebilmektedir. Yine aynı amaçla ara katmanlardan herhangi birisinin kalınlığı değiştirilerek görev yapılacak bölgedeki tehditlerin frekans bandında gelen sinyaller soğurulabilir. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta kalınlık ile soğurulan band genişliği arasındaki ters ilişkidir. Kalınlığın artması, hem maliyeti arttıracığı hem de fazladan yük getireceği için en optimum değer seçilmelidir. Bu çalışmada yansıma katsayısını düşürmek için Şekil 1'de verilen tek veya çok katmanlı periyodik yapılar incelenmiş olup yukarıda bahsedilen parametrelerin, yapının iletim ve yansıma karakteristiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır.



Şekil 1: (a) Tek katmanlı FSY yapısı, (b) Çok katmanlı FSY yapısı için eşdeğer iletim hattı modeli, (c) Düzlemsel dalga'nın gelme açısı

2. FSY için Temel Formülasyonlar

Bu çalışmada, bilinmeyen yüzey akım yoğunluğu katsayılarının hesaplanmasında Moment Metodu kullanılmaktadır. Moment Metodu'nda ihtiyaç duyulan diyadik Green fonksiyonu elemanları, izgesel alan imitans yaklaşımı ile elde

edilmektedir. Metalik yamalar üzerinde indüklenen bilinmeyen akım, bilinen tam alan veya alt alan taban fonksiyonlarının seri toplama şeklinde modellenmektedir. Moment Metodu ile seri toplama ait bilinmeyen akım katsayıları hesaplanmaktadır. Elektromanyetik saçılma probleminin çözümü için katmanlı yapılar, iletim hattı ile modellenmektedir [5].

FSY analizini oldukça kolaylaştıran Floquet Teoremi'ne göre x - y düzleminde iki yönlü sınırsız periyodikliğe sahip yapılar için her bir elemanın sahip olduğu x ve y yönündeki düzlemsel dalgalar yayılım katsayıları, $e^{-j\alpha a}$, $e^{-j\beta b}$, haricinde aynıdır. Yani bir birim hücrenin herhangi bir noktasındaki alan ile başka bir birim hücrenin aynı noktasındaki (önceki birim hücrede alınan noktaya göre x ve y doğrultusunda bir periyodun tam katına karşılık gelen nokta) alan, yayılım katsayısı dışında aynıdır.

Anizotropik dielektrik malzeme için dielektrik geçirgenlik tensörü,

$$\bar{\bar{\epsilon}} = \epsilon_o \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada ϵ_o , serbest uzay dielektrik sabitini, ϵ_{xx} ve ϵ_{zz} ise sırasıyla x ve z yönlerindeki bağıl dielektrik sabitlerini göstermektedir. Periyodik dörtgen yamalar x - y düzlemine yerleştirilmiş olup FSY yapısının optik eksen z yönündedir. ϵ_{xx} ve ϵ_{zz} 'in değiştirilmesiyle elde edilecek farklı dielektrik malzemeler kullanılarak istenilen iletim ve yansıma karakteristikleri elde edilebilir.

Tek katmanlı FSY yapısı için gerekli formülasyonlar [1]-[5]'te verilmiştir. Bu formülasyonların çıkarımı burada detaylı bir şekilde verilmeyecek olup çok katmanlı yapılar daha detaylı incelenecektir.

Kartezyen koordinat sisteminde skaler Helmholtz Denklemi,

$$\left(\nabla^2 + k^2\right)\psi(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

şeklinde tanımlanmakta olup $+z$ yönünde ilerleyen homojen dalga denklemi $\psi(x, y, z) = \Phi(x, y) e^{-jz}$ ile gösterilmektedir. (1)'deki Helmholtz Denklemi; yapının x yönünde a , y yönünde b periyodikliğine sahip olduğu düşünülerek değişken ayırma yöntemi ile yeniden düzenlenirse Floquet modlarına ait izgesel değişkenleri,

$$\alpha_m = \frac{2m\pi}{a} + k_x^{inc} \quad \text{ve} \quad \beta_n = \frac{2n\pi}{b} + k_y^{inc} \quad (3)$$

şeklinde bulunur. Burada $k_x^{inc} = k_o \sin \theta \cos \phi$ ve $k_y^{inc} = k_o \sin \theta \sin \phi$, sırasıyla, x ve y yönündeki dalga numaraları göstermektedir.

FSY yapısı için gelen elektrik alan şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\begin{bmatrix} E_{ix}^{inc} \\ E_{iy}^{inc} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^M \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} \tilde{Z}_{xx}^{ij} & \tilde{Z}_{xy}^{ij} \\ \tilde{Z}_{yx}^{ij} & \tilde{Z}_{yy}^{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{J}_{jx} \\ \tilde{J}_{jy} \end{bmatrix} e^{j(\alpha_m x + \beta_n y)} \quad (4)$$

(4)'te i alt indisi i . İletken levhayı göstermektedir, $i = 1, 2, \dots, M$. Eşitliğin sol tarafı, herbir iletken yamanın oluşturduğu saçılan alan ifadelerinin toplamına eşittir. Yamalar üzerinde indüklenen bilinmeyen akımı bulmak için operatör eşitliği, Galerkin Metodu kullanılarak çözülmüştür. Bu yöntemde test fonksiyonu ile taban fonksiyonu aynı seçilmekte ve operatör eşitliği, matris eşitliği şeklinde ifade edilebilmektedir. (4)'te Galerkin Metodu, uygun taban fonksiyonları kullanılarak uygulandığında,

$$\begin{bmatrix} \int J_{xi}^* E_x^{inc} \\ \int J_{yi}^* E_y^{inc} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^M \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} \tilde{J}_{xi}^* & 0 \\ 0 & \tilde{J}_{yi}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{Z}_{xx}^{ij} & \tilde{Z}_{xy}^{ij} \\ \tilde{Z}_{yx}^{ij} & \tilde{Z}_{yy}^{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{J}_{xj}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) & 0 \\ 0 & \tilde{J}_{yj}(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{xj} \\ C_{yj} \end{bmatrix} \quad (5)$$

elde edilir. j . yamadaki akım ile i . yamadaki saçılan alan arasındaki ilişki kullanılarak diydik Green fonksiyonu elemanları şu şekilde ifade edilir:

$$\tilde{Z}_{xx}^{ij} = \frac{1}{\alpha_m^2 + \beta_n^2} (\beta_n^2 \tilde{Z}_{eqij}^h + \alpha_m^2 \tilde{Z}_{eqij}^e), \quad \tilde{Z}_{xy}^{ij} = \tilde{Z}_{yx}^{ij} = \frac{\alpha_m \beta_n}{\alpha_m^2 + \beta_n^2} (\tilde{Z}_{eqij}^e - \tilde{Z}_{eqij}^h) \quad \text{ve} \quad \tilde{Z}_{yy}^{ij} = \frac{1}{\alpha_m^2 + \beta_n^2} (\beta_n^2 \tilde{Z}_{eqij}^e + \alpha_m^2 \tilde{Z}_{eqij}^h) \quad (6)$$

(6)'da e ve h üst indisleri, sırasıyla, TM ve TE polarizasyonları belirtmektedir. $\tilde{Z}_{eqij}^{e,h}$, bir dielektrik katmana ait eşdeğer empedans değeri olup j . yamadaki akım ile i . yamadaki saçılan alan arasındaki ilişkiyi göstermektedir [2]:

$$\tilde{Z}_{eqij}^{e,h} = \frac{1}{Y_{dwni}^{e,h} + Y_{upi}^{e,h}} \quad (7)$$

Şekil 1(b)'de görüldüğü gibi $Y_{dwni}^{e,h}$ ve $Y_{upi}^{e,h}$, sırasıyla, i . dielektrik sınırdan aşağı ve yukarı doğru bakıldığında görülen giriş empedans değerleridir. Buna göre;

$$Y_{dwni}^{e,h} = Y_{oi}^{e,h} \left(\frac{1 - r_{dwni}^{e,h}}{1 + r_{dwni}^{e,h}} \right) \quad \text{ve} \quad Y_{upi}^{e,h} = Y_{oi}^{e,h} \left(\frac{1 - r_{upi}^{e,h}}{1 + r_{upi}^{e,h}} \right) \quad (8)$$

(8)'de verilen $r_{dwni}^{e,h}$ ve $r_{upi}^{e,h}$, Şekil 1(b)'de görüldüğü gibi dielektrik katman nedeniyle, sırasıyla, aşağı ve yukarı yönde oluşan yansıma katsayılarıdır:

$$r_{dwni}^{e,h} = \frac{Y_{oi}^{e,h} - Y_{o,i+1}^{e,h}}{Y_{oi}^{e,h} + Y_{o,i+1}^{e,h}} e^{-j2\gamma_{ei,hi} d_i} \quad \text{ve} \quad r_{upi}^{e,h} = \frac{Y_{oi}^{e,h} - Y_{o,i-1}^{e,h}}{Y_{oi}^{e,h} + Y_{o,i-1}^{e,h}} e^{-j2\gamma_{ei,hi} d_i} \quad (9)$$

Dielektrik katmanlara ait karakteristik admittans değerleri, $Y_{oi}^h = \frac{\gamma_{hi}}{j\omega\mu_o}$ ve $Y_{oi}^e = \frac{j\omega\epsilon_o\epsilon_{xxi}}{\gamma_{ei}}$ olup

$\gamma_{ei} = \sqrt{\frac{\epsilon_{xxi}}{\epsilon_{zzi}} (\alpha_m^2 + \beta_n^2 - \omega^2 \mu_o \epsilon_o \epsilon_{zzi})}$ ve $\gamma_{hi} = \sqrt{(\alpha_m^2 + \beta_n^2 - \omega^2 \mu_o \epsilon_o \epsilon_{xxi})}$ 'dir. Bilinmeyen akım katsayıları, C_j , (5)'in

çözülmesiyle bulunur ve yamalar üzerinde indüklenen toplam akım, $J = \sum_{i=1}^M C_i J_i$ ile bulunur. Burada J_i , taban fonksiyonlarını göstermektedir.

[4]'te tek katmanlı yapı için verilen yansıma katsayısı çok katmanlı yapılar için yeniden düzenlendiğinde,

$$R^{e,h} = R_{imn}^{e,h} - \frac{1}{WLY_{eq1}^{e,h}} J \quad \text{ve} \quad R_{imn}^{e,h} = \frac{Y_{dwn2}^{e,h} - \left[\frac{(1 - r_{up1}^{e,h})}{(1 + r_{up1}^{e,h})} \right] Y_{o1}^{e,h}}{Y_{dwn2}^{e,h} + \left[\frac{(1 - r_{up1}^{e,h})}{(1 + r_{up1}^{e,h})} \right] Y_{o1}^{e,h}} \quad (10)$$

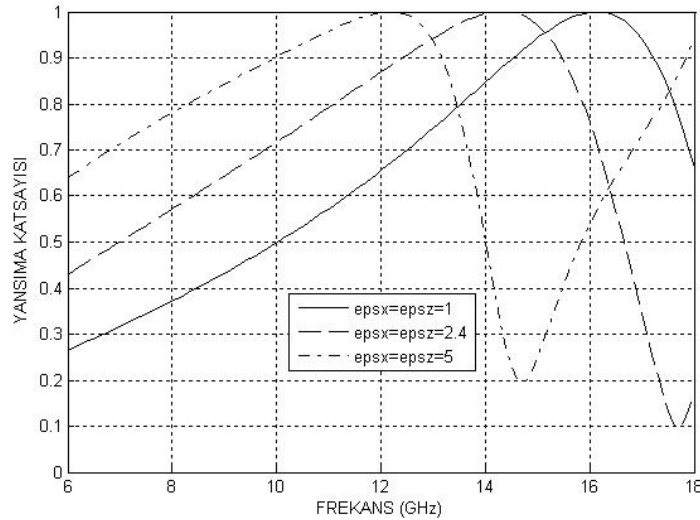
elde edilir. Burada $Y_{eqi}^{e,h} = Y_{upi-1}^{e,h} + Y_{dwni+1}^{e,h}$, i . dielektrik sınıra ait eşdeğer admittans değeridir. İletim katsayısının hesaplanmasında ise aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır:

$$T^{e,h} = t_{imn}^{e,h} \left(1 + R_{imn}^{e,h}\right) - \frac{1}{WLY_{eq1}^{e,h}} J \quad \text{ve} \quad t_{imn}^{e,h} = \begin{cases} i=1 \text{ ise } \left(1 - r_{dwni}^{e,h}\right) e^{-j2\gamma_{ei,hi}d_i} \\ i>1 \text{ ise } \left(t_{i-1,mn}^{e,h} - r_{dwni}^{e,h} t_{i-1,mn}^{e,h}\right) e^{-j2\gamma_{ei,hi}d_i} \end{cases} \quad (11)$$

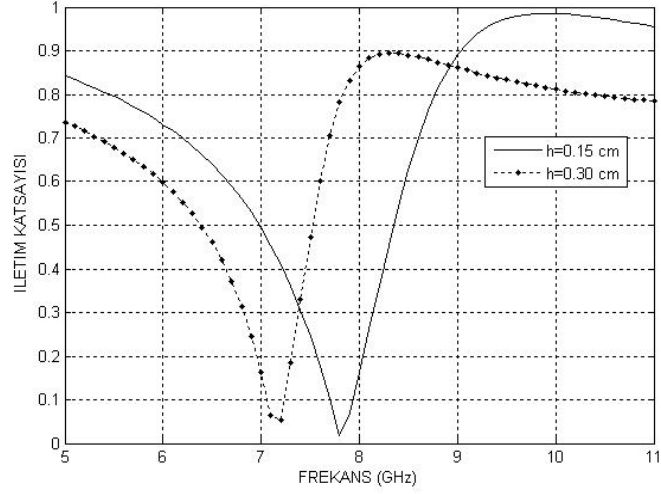
Buraya kadar elde edilen eşitlikler, problemin bilgisayar ortamında kodlanmasında kullanılacaktır. Bundan sonraki aşamada, kod kullanılarak değişik FSY yapıları modellenerek bunların karakteristikleri incelenmiştir.

3. Sonuçlar

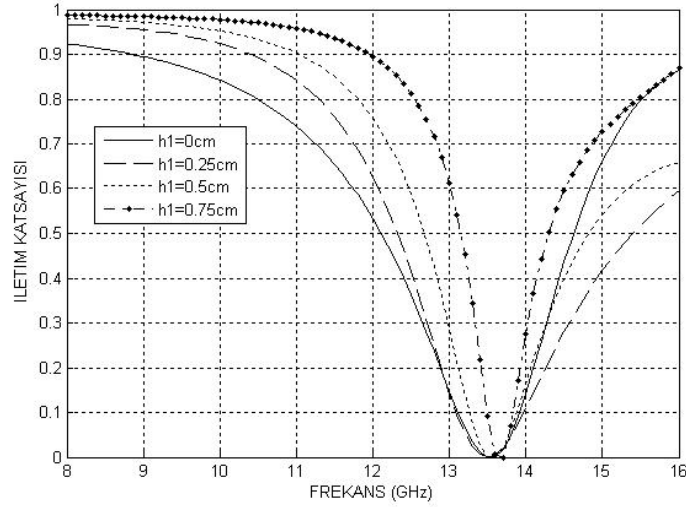
Bu çalışmada dörtgen mükemmel iletken yamalar kullanılmıştır. FSY yapısı, x ve y yönünde sınırsız periyodikliğe sahip, kalınlığı ihmal edilebilir metalik yamalardan oluştuğu için yamalar üzerinde indüklenen akımın sadece x ve y bileşeni analiz sırasında kullanılmaktadır. Aşağıdaki grafiklerde farklı FSY modellerine ait iletim ve yansımaya karakteristikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde istenilen rezonans frekansını ve band genişliğini elde edebilmek için farklı yapı parametrelerinin değiştirebileceği görülmektedir. Şekil 2’de bağıl dielektrik sabiti arttıkça rezonans frekansı (tam yansımaya olduğu frekans) düşmektedir. Şekil 3’te dielektrik katman kalınlığı arttıkça yapının rezonans frekansının azalmaktadır. Şekil 4’te katman kalınlığı arttıkça yapının durdurucu band genişliğinin azaldığı görülmektedir. Şekil 5’te orta katman kalınlığı arttıkça rezonans frekansı düşmektedir. Şekil 6’da gelme açısının Brewster açısından büyük olduğu durumlarda, serbest uzay-dielektrik katman sınırında yansımaya olmamaktadır. Şekilde, Brewster açısından küçük gelme açılarında iletimin düşük etkinlikte ve dar band genişliğinde gerçekleştiği görülmektedir. Ancak gelen dalga, Brewster açısından daha büyük bir açı ile geldiğinden iletimin daha etkin ve band genişliğinin yüksek olduğu görülmektedir.



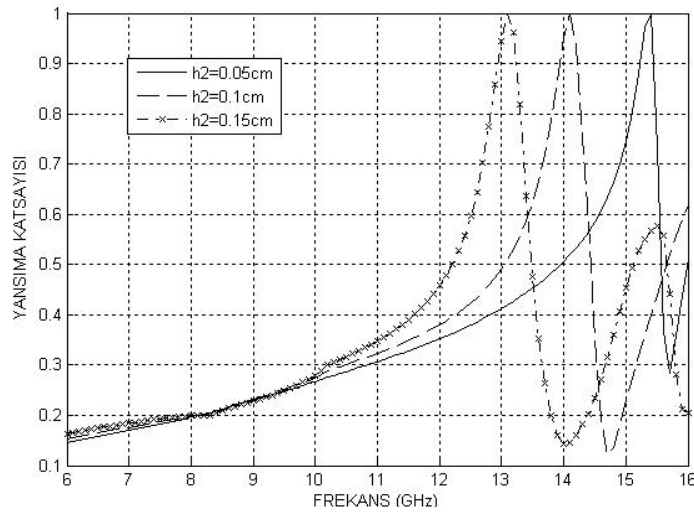
Şekil 2: Tek katmanlı FSY’de TE gelen dalga için bağıl dielektrik sabitin yansımaya etkisi



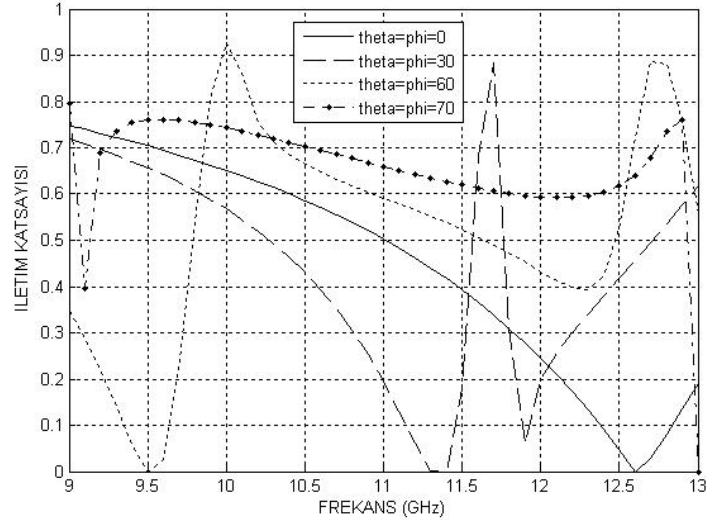
Şekil 3: Tek katmanlı FSY'de TE gelen dalga durumu için katman kalınlığının iletme etkisi



Şekil 4: Çift katmanlı FSY'de TE gelen dalga durumu için üst katman kalınlığının iletme etkisi



Şekil 5: Üç katmanlı FSY'de TM gelen dalga için orta katman kalınlığının yansımaya etkisi



Şekil 6: Tek katmanlı FSY’de TM gelen dalga durumu için gelme açısının yansımaya etkisi

4. Kaynakça

- [1] R. Mittra, C.H. Chan, ve T. Cwik, “Techniques for analyzing frequency selective surfaces: A review”, Proc. IEEE, Aralık 1988, vol. 76, s. 1593-1616.
- [2] T.K. Wu, Frequency Selective Surfaces and Grid Arrays, New York: Wiley, 1995.
- [3] A.L.P.S. Campos, A.G. d’Assunção, ve L.M. de Mendonça, “Scattering by FSS on Anisotropic Substrate for TE and TM Excitation, IEEE Tran. Microwave Theory Tech.”, Ocak 2002, vol. 50, no.1, s. 72-76.
- [4] J.P. Montgomery, “Scattering by an Infinite Periodic Array of Thin Conductors on a Dielectric Sheet”, IEEE Trans. Antennas Propagat., Ocak 1975, vol. AP-23, no.1, s. 70-75.
- [5] T. Itoh, “Spectral Domain Immittance Approach for Dispersion Characteristics of Generalized Printed Transmission Lines”, IEEE Tran. Microwave Theory Tech., Temmuz 1980, vol. MTT- 28, no. 7, s. 773-736 129.
- [6] S. Ekici, “Çok Katmanlı Dielektrik Üzerindeki Parça İletkenlerden Saçılım”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 2008.