

WLAN Kanalları İçin Bant Durduran Frekans Seçici Yüzey Tasarımı

¹İfakat Merve Bayraktar, ²Nursel Akçam ve ²Funda Ergün Yardım

¹Gümrük ve Ticaret Bakanlığı, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

Özet

WLAN (Wireless Local Area Network - Kablosuz Yerel Alan Ağı) kanalları IEEE 802.11 protokolünde belirtilen 2,4 GHz, 3,6 GHz, 4,9 GHz, 5 GHz ve 5,9 GHz frekans bantlarıdır. Kanal sayısının azlığı ve bu frekansta çalışan cihazların çok olmasına rağmen, genellikle 2,4 GHz frekansı kullanılmaktadır. Kanal sayısının çokluğu ve bu frekansta çalışan cihazların az olması sayesinde 5 GHz frekansında daha verimli kullanımın sağlanabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla çalışmada, 5 GHz frekans bandında girişimin önlenmesi ve istenmeyen dalgaların engellenmesi için bant durduran Frekans Seçici Yüzey (FSY) tasarımı yapılmıştır. FSY tasarımı; geometrisi, periyodu, eleman tipi, diziler arası mesafe, ortamın parametreleri, gelen dalganın açısı ve polarizasyonu gibi parametreler önemlidir. Bu tasarımla FSY'nin 5 GHz frekans bandındaki kalkanlama etkinlikleri Green Fonksiyonları ve Momentler Metodu kullanılarak incelenmiştir. Filtre tasarımı kare tipinde yama elemanlar kullanılmıştır. Tasarımın başarısı, yatay ve dikey polarizasyonda gelen dalganın açıları değiştirilerek, 5 GHz frekans bandındaki kalkanlama etkinlikleri ölçülerek belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: FSS, Green Fonksiyon, Moment Metodu, Gauss Eliminasyon Yöntemi

Abstract

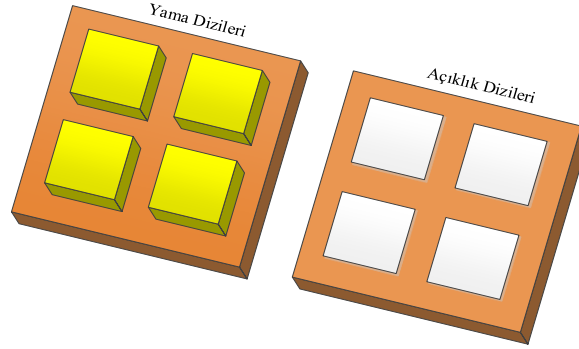
WLAN channels are the 2.4 GHz, 3.6 GHz, 4.9 GHz, 5 GHz ve 5.9 GHz frequency bands defined in IEEE 802.11 protocol. Although having limited number of channels and many devices operating at this frequency, usually 2.4 GHz frequency is used. It is considered that 5 GHz frequency can be used more efficient because of its high channel number and less number of devices that use this frequency. For this reason in this study, a band reject Frequency Selective Surface (FSS) design was introduced to prevent interference and undesired waves in 5 GHz frequency band. In FSS design the parameters like geometry, period, material type, distance between series, ambient parameters, incident wave angle and polarization are important. By the FSS design in this study the shielding effects in 5 GHz frequency band was examined by using Green Functions and Method of Moments. In filter design square type patch elements were used. The success of the design was determined by measuring the shielding effect in 5 GHz frequency band by changing the incident wave angle in both vertical and horizontal polarization.

Key Words: FSS, Green Funtion, Moment Method, Gauss Elimination Method

1.Giriş

Dielektrik ortam üzerine yerleştirilmiş Şekil 1'deki gibi periyodik metal yama veya açıklık dizileri, elektromanyetik dalgalara karşı Frekans Seçici Yüzey (FSY) özelliği gösterirler [1]. FSY yapılar, yansıma ve iletim karakteristiklerini gelen elektromanyetik dalganın frekansına bağlı

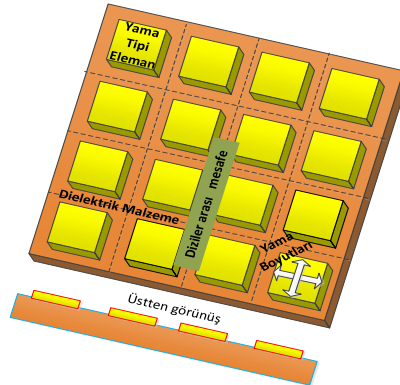
olarak değiştirirler. Bu özellikleri sayesinde FSY yapılar, istenilen frekanstaki dalgaları geçiren ve durdurulması istenen dalgaları geçirmeyen, elektromanyetik dalgalar için filitre gibi çalışırlar.



Şekil 1. FSY periyodik metal yama ve açıklık dizileri

Filtreleme amacıyla FSY, uydu sistemlerinde [2], anten ve haberleşme sistemlerinde [3], Radyo Frekansı ile Tanımlama (Radio Frequency Identification - RFID) uygulamalarında [4], özellikle elektromanyetik dalga kalkanlama uygulamaları başta olmak üzere askeri alanlarda [5], radar uygulamalarında [6], sivil uygulamalarda [7] ve 21. yy'dan itibaren de 3G ve GSM ağlarında [8] kullanılmaya başlanmıştır.

FSY'deki saçılma analizlerinde, etkili ve basit çözümler sunan MoM en çok tercih edilen yöntemlerden biridir [9]. Elektromanyetik dalga FSY'e çarptığında, dalga FSY yüzeyinde akım indüklenmesine neden olur ve saçılmalar meydana gelir. Elektrik alan ile bu indüklenen akım arasındaki ilişkiden yola çıkarak frekans alanında MoM uygulandığında; doğrusal denklem sistemleri elde edilir. Bu denklem sistemlerinin bilgisayar yardımıyla çözülmesiyle saçılma ve iletim katsayılarını verir. Saçılma ve iletim katsayıları, akım yoğunluklarını ifade etmek için kullanılır. Akım yoğunluklarından elektrik alanlarının ifadesi elde edilerek gelen elektrik alan ile ilerleyen elektrik alan arasındaki ilişkiden FSY'nin kalkanlama etkinlikleri hesaplanır.



Şekil 2. FSY tasarım parametreleri

FSY tasarımında; dielektrik ortamın parametreleri, FSY'nin geometrisi, periyodu, yama veya açıklık dizileri kullanılması, eleman tipi, diziler arası mesafe, gelen dalganın açısı ve polarizasyonu gibi parametreler (Şekil 2) etkili olup, FSY'nin hangi frekanstaki dalgaları geçireceğini ve hangi frekanstaki dalgaları durduracağını belirler. Elektromanyetik dalganın geliş açısındaki değişimlere daha kararlı bir filtre yapısında oldukları için [10] bu makalede kare tipinde yama elemanlar kullanılmıştır.

2. Formülasyon

Manyetik vektör potansiyeli için dalga denklemi aşağıdaki gibi verilir [11]:

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad (1)$$

Burada, ϵ ; elektriksel geçirgenlik katsayısı (F/m), μ ; manyetik geçirgenlik katsayısı (H/m), J ; birim alan başına akım yoğunluğu (A/m^2) ve $\vec{A}$; manyetik vektör potansiyelidir. Manyetik vektör potansiyelinin neden olduğu fazör saçılan elektrik alan:

$$\vec{E}^{\text{saçılan}}(r) = -j\omega \left[\vec{A}(r) + \frac{1}{k^2} (\nabla(\nabla \cdot \vec{A}(r))) \right] \quad (2)$$

biçiminde ifade edilir [11]. Burada, r ; konum vektörü (bir noktanın uzaydaki konumunu diğer bir noktaya göre belirleyen sabit), ω ; dalganın açısal frekansı ve $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$; dalga sayısıdır.

Elektromanyetik dalga FSY yüzeyine çarptığında iletken yama üzerinde indüklenen akım ile bu akımın FSY içinde bulunduğu ortamdaki herhangi bir noktada meydana getirdiği manyetik vektör potansiyeli arasındaki ilişki Green fonksiyonu ile

$$\vec{A}(r) = \int \vec{G}(r, r') \vec{J}(r') ds' \quad (3)$$

biçiminde ifade edilir. Burada, r ; gözlem noktası ve r' ; kaynak noktasıdır.

Manyetik vektör potansiyeli için Green fonksiyonunun çözümü aşağıdaki gibi verilir [12].

$$\vec{G} = \frac{e^{-jk|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \quad (4)$$

FSY tasarımında kare tipinde yama eleman kullanıldığı için gelen elektrik alan ve manyetik vektör potansiyeli iki boyutta yazılabilir. Bu durumda, gelen elektrik alanının x ve y bileşenleri ve manyetik vektör potansiyelinin ifadesi dalga denkleminde (Eş.(1)) yerine konulduğunda ve

düzenlendiğinde E_x^{gelen} ve E_y^{gelen} bileşenleri için matris formda denklem sistemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} E_x^{\text{gelen}} \\ E_y^{\text{gelen}} \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \\ \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & 1 + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

İki boyutta manyetik vektör potansiyeli $\vec{A}(x,y)e^{j(a_mx+b_ny)}$ biçiminde yazılabilir. Burada “m” ve “n” kare tipindeki yama sayısına bağlı olarak değişen indisleri göstermektedir. Eşitliklerdeki a_m ve b_n ise yama sayısına bağlı olarak değişen uzaysal frekanslardır ve

$$a_m = a_0 + \frac{2\pi}{a} m \quad (6)$$

$$b_n = b_0 + \frac{2\pi}{b} n \quad (7)$$

biçiminde ifade edilirler.

Elektrik alan ile manyetik vektör potansiyelinin ifadesinden elde edilen denklem sistemine Green fonksiyonunu uygulandığında:

$$\begin{bmatrix} E_x(a_m, b_n) \\ E_y(a_m, b_n) \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} \frac{k^2 - a_m^2}{k^2} & \frac{-a_m b_n}{k^2} \\ \frac{-a_m b_n}{k^2} & \frac{k^2 - b_n^2}{k^2} \end{bmatrix} G(a_m, b_n) \begin{bmatrix} J_x(a_m, b_n) \\ J_y(a_m, b_n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

eşitliği elde edilir.

Green fonksiyonunun çözümünden elde edilen denklemin Eş.(4) Fourier Dönüşümü alınarak ifade edilirse;

$$G(a_m, b_n) = \frac{-j}{\sqrt{k^2 - a_m^2 - b_n^2}} \quad (9)$$

denklemini elde edilir.

Matris formundaki denklem sistemine (Eş.(8)), Green fonksiyonu uygulandığında en genel haliyle doğrusal denklem sistemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} E_x(a_m, b_n) \\ E_y(a_m, b_n) \end{bmatrix} = -\frac{1}{2\omega\epsilon} \sum_{m,n} \begin{bmatrix} \frac{k^2 - a_m^2}{\sqrt{k^2 - a_m^2 - b_n^2}} & \frac{-a_m b_n}{\sqrt{k^2 - a_m^2 - b_n^2}} \\ \frac{-a_m b_n}{\sqrt{k^2 - a_m^2 - b_n^2}} & \frac{k^2 - b_n^2}{\sqrt{k^2 - a_m^2 - b_n^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x(a_m, b_n) \\ J_y(a_m, b_n) \end{bmatrix} e^{j(a_m x + b_n y)} \quad (10)$$

Moment Metodu elektromanyetikte integral içeren problemlerde yaygın olarak kullanılır. Böylece, $K(x, x')$ bilenen çekirdek fonksiyonu, $g(x)$ bilenen kaynak fonksiyonu ve $f(x)$ bilinmeyen fonksiyonları göstermek üzere Moment Metodu Eş.(11)'de verilen integrale kolaylıkla uygulanabilir.

$$\int_a^b f(x') K(x, x') dx' = g(x) \quad (11)$$

MoM'da, $f(x)$ bilinmeyen fonksiyonu, a_n bilinmeyen katsayıları ve $f_n(x)$ bilinen baz fonksiyonlarını göstermek üzere,

$$f(x) = \sum_{n=1}^N a_n f_n(x) \quad (12)$$

eşitliği ile ifade edilir. “L” integral operatörü olmak üzere, MoM'un problemde verilen integrale uygulanmasıyla,

$$\sum_{n=1}^N a_n L\{f_n(x)\} = g(x) \quad (13)$$

olarak genel çözüm denklemi elde edilir. İntegral ifadesi belli bir hata altında hesaplanacağı için, MoM'da, “W(x)” hata fonksiyonu,

$$W(x) = [\sum_{n=1}^N a_n L\{f_n(x)\}] - g(x) \quad (14)$$

biçiminde verilir. MoM uygulanmasıyla elde edilen denklem sistemleri,

$$[Z_{mn}][a_n] = [V_m] \quad (15)$$

$$[Z_{mn}] = \langle W_n | L f_n \rangle \quad (16)$$

$$[V_m] = \langle W_m | g \rangle \quad (17)$$

olarak ifade edilirler. Moment Metodunda, hata ve baz fonksiyonlarının tanımlanmasında farklı tipte fonksiyonlar kullanılır. Literatürde hata fonksiyonları olarak, Dirac Delta Fonksiyonları ve Galerkin Yöntemi, baz fonksiyonlarının tanımlanmasında ise tam bölge veya alt bölge baz fonksiyonları yaygın olarak kullanılır [11]. Problem tipi doğrusal veya düzgünse, problem çözümünde tam bölge baz fonksiyonların kullanılması daha kolay ve hızlı sonuçlar alınmasını

sağlar. Farklı geometrideki yapılarda ise alt bölge baz fonksiyonların kullanılması daha iyi sonuçlar verir.

Bu makalede, FSY problem tipi düzgün kare yamalardan oluştuğu için, problem çözümünde tam bölge baz fonksiyonları kullanılmıştır. Hata fonksiyonlarını tanımlarken ise, hata fonksiyonunu baz fonksiyonuna eşit olarak seçen Galerkin yöntemi kullanılmıştır ve,

$$W_m = f_n \quad (18)$$

$$[Z_{mn}] = \langle f_m | Lf_n \rangle \quad (19)$$

$$[V_m] = \langle f_m | g \rangle \quad (20)$$

biçiminde denklem sistemi tanımlanmıştır.

Hata ve baz fonksiyonlarının tanımlanmasından sonra MoM uygulandığında Z_{mn} , a_n ve V_m denklemleri (Eş.(16 – 17)) için $Ax = b$ doğrusal denklem sistemi (Eş.(15)) elde edilir. Galerkin yöntemi uygulanarak bütün veriler yerine konulduğunda $Ax = b$ doğrusal denklem sistemi en genel haliyle,

$$\begin{bmatrix} \langle f_1 | Lf_1 \rangle & \cdots & \langle f_1 | Lf_n \rangle \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle f_m | Lf_1 \rangle & \cdots & \langle f_m | Lf_n \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle f_1 | g \rangle \\ \vdots \\ \langle f_m | g \rangle \end{bmatrix} \quad (21)$$

biçiminde elde edilir.

Tablo 1. Gauss eliminasyon, LU ayrıştırma ve QR ayrıştırma yöntemleri çözüm süreleri

“A” Matrisi Boyutu	“b” Vektörü Boyutu	Gauss Eliminasyon Yöntemi süresi (sn)	LU Ayrıştırma Yöntemi süresi (sn)	QR Ayrıştırma Yöntemi süresi (sn)
500x500	500x1	0,0074	0,0117	0,0363
1000x1000	1000x1	0,0399	0,1105	0,3312
1500x1500	1500x1	0,1125	0,2328	0,9079
2000x2000	2000x1	0,2542	0,3087	2,0808
2500x2500	2500x1	0,4189	1,2926	3,3882
3000x3000	3000x1	0,6528	2,2192	5,5797
3500x3500	3500x1	0,9420	2,8516	9,3603
4000x4000	4000x1	1,3743	4,2278	12,5497
4500x4500	4500x1	1,8947	5,2103	16,9602
5000x5000	5000x1	2,7019	7,8787	23,2206

$Ax = b$ doğrusal denklem sistemlerinin çözümü için doğrudan yöntemler ve sayısal yöntemler kullanılır. Doğrudan yöntemler için ters matris, Cramer, Gauss eliminasyon, Gauss Jordan, LU (Lower Upper) ayrıştırması ve QR ayrıştırması yöntemleri örnek verilebilir. Sayısal yöntemler için ise Jakobi, Gauss Siedell, Eşlenik Gradyan gibi iteratif yöntemler örnek olarak verilebilir.

Bu makalede, verilen doğrusal denklem sistemlerinin çözümü için doğrudan yöntemlerden Gauss eliminasyon, LU ayrıştırması ve QR ayrıştırması yöntemleri farklı matris boyutları için ayrı ayrı test edilerek (Tablo 1) en hızlı çözümü sağlayan yöntem seçilmiştir.

3.Simülasyon Sonuçları

Kaçak veya istenmeyen alanların azaltılması amacıyla yapılan elektromanyetik durdurma işlemi kalkanlama olarak adlandırılır ve kalkanlama etkinliği (shielding efficiency-SE) decibel (dB) cinsinden

$$KE_{dB} = 20 \log_{10} \frac{E_{gelen}}{E_{ilerleyen}} \quad (22)$$

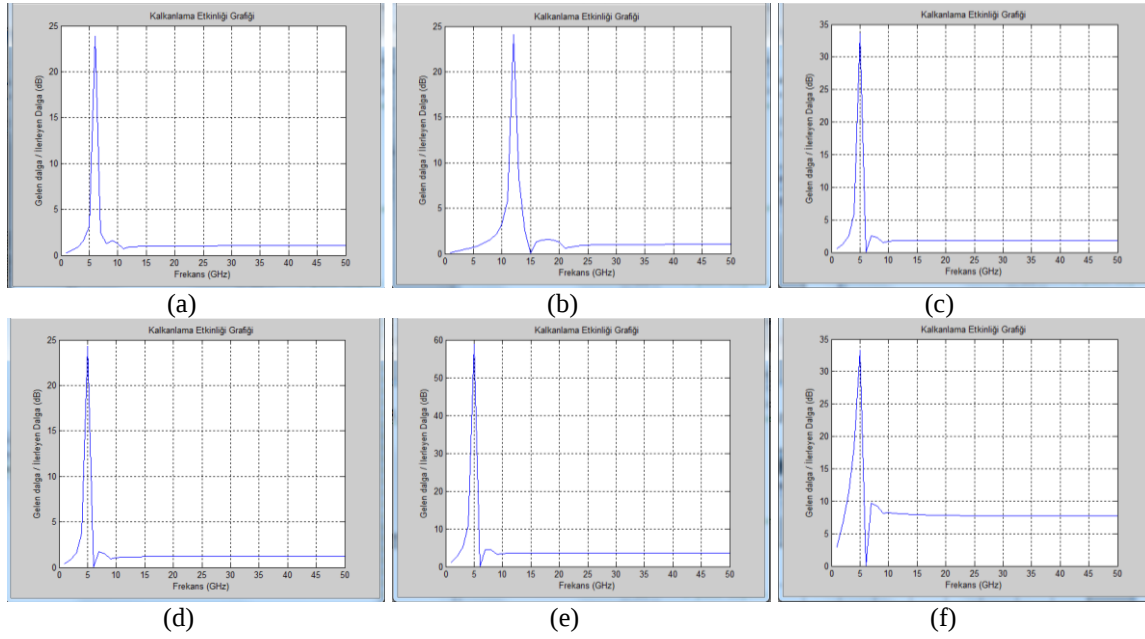
biçiminde ifade edilir.

FSY'nin kalkanlama etkinlikleri, FSY'yi oluşturan elemanların tiplerine, FSY ve yamaların boyutlarına, gelen dalganın açısına ve polarizasyonuna bağlı olarak değişir. Özellikle FSY'yi oluşturan elemanların tipleri FSY tasarımında önemli rol oynar. Çünkü her eleman tipinin kendisine has özellikleri bulunur. Bu nedenle, FSY tasarımı yapılırken problem tipine göre eleman tipi seçilmesi oldukça önemlidir.

Çalışmada tasarlanan FSY'nin 5 GHz'de kararlı bir bant durduran filtre yapısında olması istenmektedir. Elektromanyetik dalganın geliş açısındaki değişimlere göre daha kararlı bir filtre yapısında olmaları nedeniyle FSY tasarımında kare tipinde yama elemanlar kullanılmıştır.

FSY eleman tipi belirlendikten sonra 5 GHz'de bant durduran filtre tasarlayabilmek için FSY ve yamaların boyutlarını belirlemek gerekir. Farklı FSY ve yama boyutları için simülasyon sonuçları Şekil 3'de verilmiştir. 5 GHz'de en iyi kalkanlama etkinliği (Şekil 3), FSY uzunluğu 50mm ve yama uzunluğu 30mm olan tasarımda elde edilmiştir.

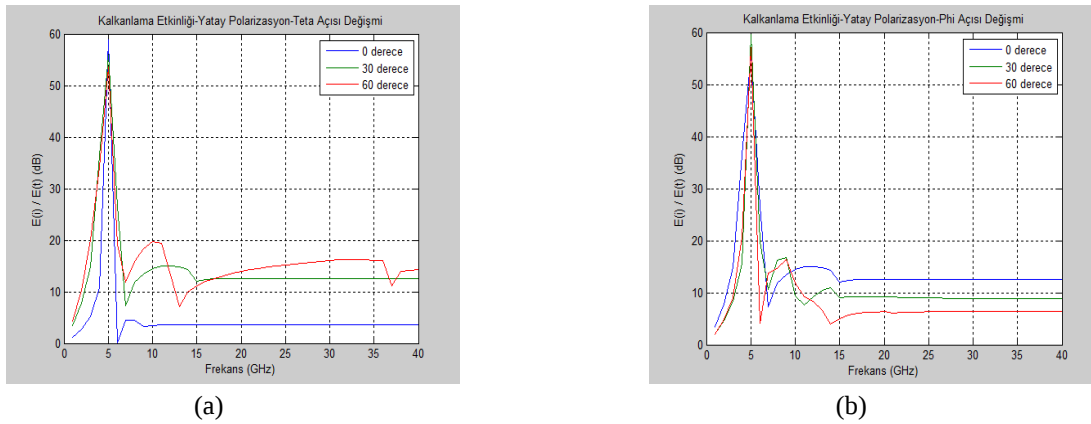
FSY uzunluğu ve yama uzunluğu belirlendikten sonra, FSY yapılarının kalkanlama etkinliklerinin gelen dalganın açısına (θ ve φ) ve polarizasyonuna (yatay veya dikey) bağımlılığı incelenmiştir. Yatay polarizasyonda θ ve φ açılarının 0° , 30° ve 60° değerleri için kalkanlama etkinlikleri sırasıyla Şekil 4(a) ve Şekil 4(b)'de verilmiştir.



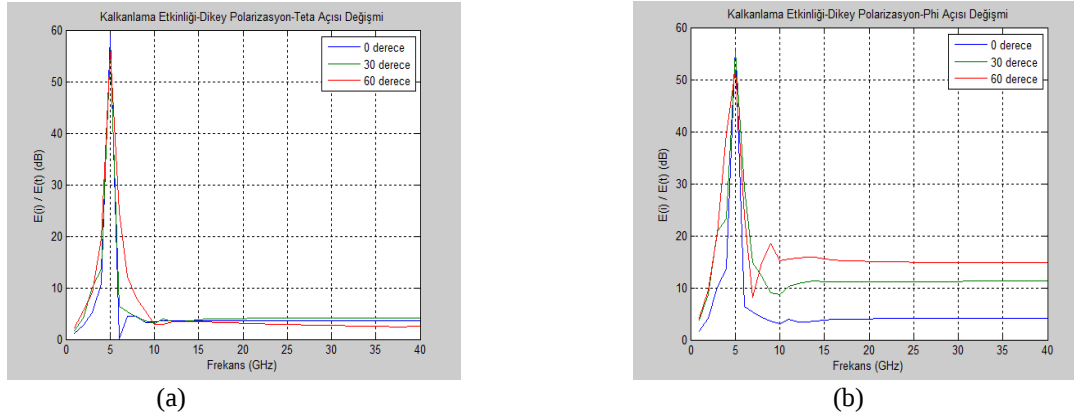
Şekil 3. FSY kalkanlama etkinlikleri (a) FSY uzunluğu:20mm, yama uzunluğu:1mm, (b) FSY uzunluğu:40mm, yama uzunluğu:1mm, (c) FSY uzunluğu:50mm, yama uzunluğu:10mm, (d) FSY uzunluğu:50mm, yama uzunluğu:20 mm, (e) FSY uzunluğu:50mm, yama uzunluğu:30mm, (f) FSY uzunluğu:50mm, yama uzunluğu:40mm

Şekil 4(a) ve Şekil 4(b)'de görüldüğü gibi FSY yapılarında kullanılan kare tipinde yama elemanlar, yatay polarizasyonda değişen dalga açılarına (θ ve ϕ), kararlı bir bant durdurucu filtre yapısında cevap vermektedir.

Dikey polarizasyonda θ ve ϕ açılarının 0° , 30° ve 60° değerleri için kalkanlama etkinlikleri sırasıyla Şekil 5(a) ve Şekil 5(b)'de verilmiştir.



Şekil 4. Yatay polarizasyonda kalkanlama etkinlikleri (a) $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ için (b) $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ için



Şekil 5. Dikey polarizasyonda kalkanlama etkinlikleri (a) $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ için (b) $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ için

Dikey polarizasyonda da Şekil 5(a) ve Şekil 5(b)'de görüldüğü gibi FSY yapılarında kullanılan kare tipinde yama elemanlar, değişen dalga açlarına (θ ve ϕ), kararlı bir bant durduran filtre yapısında cevap vermektedir. Bu da yatay ve dikey polarizasyonda kare tipinde yama elemanların FSY tasarımı başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Sonuçlar

Bu makalede 5 GHz frekans bandında, bant durduran bir FSY tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan FSY'de, kare tipinde yama elemanlar kullanılmıştır. Öncelikle 5 GHz'de bant durduran filtre tasarlayabilmek için FSY ve yamaların boyutları belirlenmiştir. Farklı FSY ve yama boyutları için simülasyon sonuçları (Şekil 3) incelendiğinde; 5 GHz'de en iyi kalkanlama etkinliğinin, FSY uzunluğu 50mm ve yama uzunluğu 30mm olan tasarımda elde edildiği görülmüştür.

Daha sonra FSY'nin kalkanlama etkinlikleri, farklı geliş açıları ve polarizasyon durumları için simüle edilmiştir. 5 GHz frekansında yatay polarizasyonda $\theta = 0^\circ$ ve $\phi = 0^\circ$ için (Şekil 4(a) ve Şekil 4(b)) FSY'nin en iyi kalkanlama etkinliğine sahip olduğu görülmüştür. Yatay polarizasyonda θ açısı artırıldığında özellikle 9 GHz ile 12 GHz frekans aralığında istenmeyen yayınımın olduğu, $\theta = 60^\circ$ olduğu zaman 10 GHz frekansında yaklaşık 19 dB'lik bir istenmeyen yayılım olduğu görülmüştür. Ayrıca θ açısı attıkça 5 GHz bandında yayılma olduğu görülmüştür. Kalkanlama eşiği olarak ortalama 20 dB'lik değer kabul edilirse, kare tipi yama elemanların yatay polarizasyonda 5 GHz frekansında, değişen θ açlarına göre kararlı bir filtre yapısında cevap vermiştir.

Yatay polarizasyonda ise ϕ açısını artırıldığında, özellikle 8 GHz ile 9 GHz frekans aralığında yaklaşık 16 dB'lik bir istenmeyen yayılım olduğu görülmüştür. Ayrıca θ açısının aksine, ϕ açısını artırıldığında 5 GHz bandında herhangi bir yayılma olmadığı görülmüştür. FSY'nin, yatay polarizasyonda 5 GHz frekansında, değişen ϕ açlarına göre kararlı bir filtre yapısında olduğu görülmüştür.

FSY'nin dikey polarizasyonda da $\theta = 0^\circ$ ve $\varphi = 0^\circ$ için (Şekil 5(a) ve Şekil 5(b)) 5GHz frekansında çok iyi bir kalkanlama etkinliğine sahip olduğu görülmüştür. Dikey polarizasyonda θ açısı artırıldığında FSY'nin kalkanlama etkinliğinin daha kararlı yapıda cevap verdiği görülmüştür. Sadece $\theta = 60^\circ$ olduğu zaman 5 GHz bandında önemsenmeyecek büyüklükte bir yayılma olduğu görülmüştür. FSY'nin dikey polarizasyonda, 5 GHz frekansında, değişen θ açılarına göre kararlı bir filitre yapısında cevap vermiştir.

Dikey polarizasyonda φ açısını artırıldığında, FSY'nin kalkanlama etkinliği kararlı bir yapıda cevap vermektedir. Sadece $\varphi = 60^\circ$ olduğu zaman 9 GHz frekansında yaklaşık 19 dB'lik bir istenmeyen yayılım olduğu görülmüştür. Kalkanlama eşiği olarak ortalama 20 dB'lik değer kabul edilirse, kare tipi yama elemanların dikey polarizasyonda da 5 GHz frekansında, değişen φ açılarına göre kararlı bir filitre yapısında cevap verdiği söylenebilir.

Kaynaklar

- [1] Gökçen A, Ünal E, Kutlu Y. Dielektrik Otam Üzerine Yerleştirilmiş Periyodik Kare ve Daire Yapılı Frekans Seçici Yüzeylerin 1800 MHz. için Kalkanlama Etkinliği, İTUSEM; 2005.
- [2] Maini, Agrawal V. Satellite Technology: Principles and Applications. New York City/United States: John Wiley & Sons; 2011, p. 694.
- [3] Capolino F. Applications of Metamaterials. London/England: CRC Press; 2009, p. 762.
- [4] Shen Z. Millimeter Wave Imaging Technologies for Plasma Diagnostics on Superconducting Tokamak Machines. Michigan/United States: ProQuest; 2007, p.197.
- [5] Elbert BR. The Satellite Communication Applications Handbook. London/England:Artech House; 2004, p. 551.
- [6] Balanis CA. Modern Antenna Handbook. New York City/United States: John Wiley & Sons; 2011, p. 1074.
- [7] Wu TK. Frequency Selective Surface and Grid Array. New York City/United States: Wiley; 1995, p. 331.
- [8] Subrt L, Grace D and Pechac P. Controlling the Short-Range Propagation Environment Using Active Frequency Selective Surfaces. Radioengineering; 2010; 19:4; p.610-617.
- [9] Celozzi S, Araneo R and Lovat G. Electromagnetic Shielding. New York City/United States: John Wiley & Sons; 2008, p. 385.
- [10] Munk BA. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York City/United States: John Wiley & Sons; 2000.
- [11] Balanis CA. Advanced Engineering Electromagnetics. New York City/United States: John Wiley & Sons; 1989, p. 670-743.
- [12] Akira I. Electromagnetic Wave Propagation, Radiation and Scattering. New Jersey /United States: Prentice Hall; 1991.