

Bakışsız Levhada Bir- ve İki-Döngülü Kare Helezon Frekans Seçici Yüzeylerin Yansıma ve İletim Katsayıları

Kemal Delihacıoğlu¹

Savaş Uçkun²

Tuncay Ege³

^{1,2,3}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep

¹e-posta: kemal@gantep.edu.tr

²e-posta: savas@gantep.edu.tr

³e-posta: t_ege@gantep.edu.tr

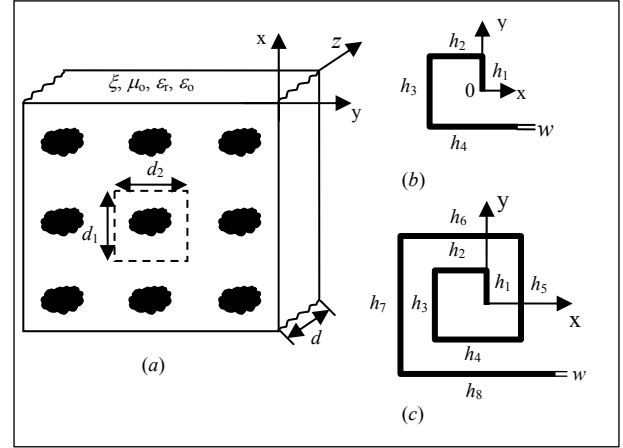
Özetçe

Bu çalışmada, bakışsız levha üzerine periyodik yerleştirilen Bir- ve İki döngülü kare helezon metal iletkenlerin yansıma ve iletim katsayıları nümerik olarak incelenmiştir. Gelen dalganın iletken yüzeylerde indüklediği bilinmeyen akım katsayıları Moment Metodu ile hesaplanmıştır. Temel fonksiyonlar düz kısımlarda üst üste çakışan parçalı sinüslerin toplamı şeklinde seçilirken, köşelerde ise akım sürekliliğinin sağlanması için yarısı dikey diğer yarısı da yatayda olmak üzere iki eşit parça şeklinde seçilmiştir. Frekans Seçici Yüzeyler bakışsız levha ile desteklendiğinde gelen dalganın polarizasyonu dönmekte farklı frekans bantlarında birden çok rezonans görülebilmektedir. Bakışsızlık admitansının ve gelme açısının farklı değerlerinde ortak kutupsal yansıma ve çapraz kutupsal iletim katsayılarının gelen dalganın frekansına göre grafikleri çizilmiştir.

1. Giriş

Son yıllarda bakışsız materyaller ve dielektrik levha üzerine periyodik dizilen Frekans Seçici Yüzeylerle ilgili hem teorik hem de deneysel çok sayıda çalışma yapılmıştır [1,2]. Elektromagnetik bakışsızlık (chirality), anten, mikrodalga ve optik gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; polarizasyon dönüştürücü [3], mikroşerit antenlerde [4], yansız anten kaplamalarında [5], dielektrik-bakışsız yüzeylerde [6], bakışsız dalga kılavuzu [7], emici materyal [8], bakışsız faz kaydırıcı [9], bakışsız levhada Frekans Seçici Yüzey (FSY) uygulamaları [10] ve burada sayılmayan literatürde mevcut daha birçok uygulama alanları vardır.

FSY’de yansıma ve iletim katsayıları frekansa göre değişmekte ve bir mikrodalga frekansında tamamen yansıtıcı özellik gösterirken, başka bir frekansta tamamen geçiren özellik gösterebilmektedir. Periyodik metal iletkenlerden oluşan FSY’ler, Elektromagnetik filtre yada polarizasyon dönüştürücü gibi davranmaktadır. FSY’ler başta anten ve mikrodalga alanlarında olmak üzere çok bantlı mikrodalga antenlerde, hibrid radomlarda, yansıtıcı antenlerde, bant durduran yada bant geçiren filtre tasarımlarında vb. çok sayıda uygulama alanları mevcuttur [2]. L-şeklindeki ve bir döngülü kare helezon şeklindeki metal iletkenlerden oluşan iki yeni FSY’in dielektrik levha ile desteklendiği durumdaki yansıma ve iletim katsayıları ilk kez [11]’de incelenmişti. Yine dielektrik levha üzerine periyodik yerleştirilen iki-döngülü kare helezon FSY’lerin analizi ilk kez [12]’de incelenmişti. Bu çalışmada ise bakışsız levha üzerine periyodik olarak dizilmiş bir- ve iki döngülü kare helezon metal iletkenlerin



Şekil 1: a) Bakışsız levha üzerine metal iletkenlerden oluşan ve periyodik olarak yerleştirilen Frekans Seçici Yüzeyler b) Bir-döngülü kare helezon FSY elemanı, c) İki-döngülü kare helezon FSY elemanı.

ortak kutupsal yansıma (co-polarized reflection, R_{co}^{TE}) ve çapraz kutupsal iletim (cross-polarized transmission, T_{cr}^{TM}) katsayıları Şekli (Modal) analiz metodu kullanılarak incelenmiştir.

2. Teori

Bakışsız levha üzerine gelen doğrusal polarizasyonlu dalga bakışsız levha içinde farklı faz hızlarında sağ ve sol el dairesel polarizasyonlu iki dalgaya ayrılır. Bakışsız levhanın arkasında bu iki dalga birleşerek, polarizasyon düzlemi gelen dalganın polarizasyon düzlemine göre dönmüş doğrusal polarizasyonlu bir dalga oluşturur. Dalganın dönme miktarı bakışsız ortamda ne kadar hareket ettiğine ve dalga sayıları arasındaki farka bağlıdır. Bu optik etkinliğin sadece bakışsız levhanın yüzeyinde değil, ortam boyunca olduğunu belirtmektedir [13]. Bakışsız nesne ile aynadaki görüntüsü arasında bir simetri yoktur. Bakışsız ortamda elektrik akı yoğunluğu (D) ve manyetik alan (H) hem elektrik alana (E) hem de manyetik akı yoğunluğuna (B) bağlıdır. Yön bağımsız, homojen, kayıpsız ve bakışsız ortamda genel yapı denklemleri [1],

$$D = \epsilon E - j\xi B \quad (1)$$

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - j\xi E \quad (2)$$

şeklinde. Bu denklemlerde ϵ , μ_0 ve ξ sırasıyla bakışsız ortamın elektriksel geçirgenliğini, manyetik geçirgenliğini ve bakışsızlık admitansını göstermektedir. ξ 'nin değeri bakışsızlık için bir ölçü olup + veya - işaretli olması ortamın sağ yada sol el polarizasyonu ile ilgilidir. ξ 'nin işaretindeki değişim aynadaki görüntüsünü almak ile aynıdır. ξ 'nin + veya - işaretli olması ortamın sağ veya sol el polarizasyonlu olduğunu gösterir. $\xi=0$ ise ortam dielektriktir. Genel yapı denklemleri kayınsız (source free) Maxwell denklemleri ile birlikte çözümlerse elektrik ve manyetik alanlar için bakışsız dalga denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\nabla \times \nabla \times \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} - 2\omega\mu_0\xi\nabla \times \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} - \omega^2\mu_0\epsilon \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} = 0 \quad (3)$$

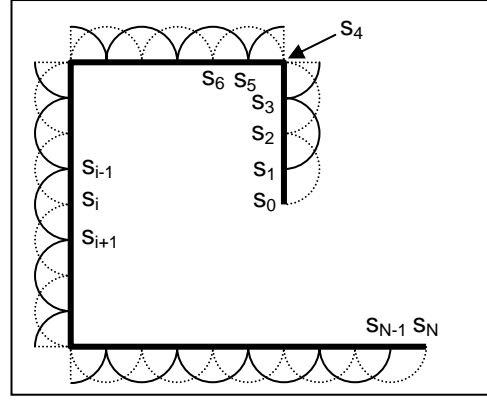
Bakışsız dalga denkleminin çözümü sağ ve sol el dairesel polarizasyonlu (right and left hand circularly polarized) olmak üzere bakışsız ortamda iki farklı dalga içermektedir. Bu iki dalga bakışsız ortamda farklı hızlarda yayılırlar.

Bakışsız levha üzerine metal iletkenlerden oluşan bir- ve iki döngülü kare helezonlar Şekil 1a' da görüldüğü gibi periyodik olarak yerleştirilmiştir. Yine Şekil 1a' da elemanlar arası uzaklıklar d_1 , d_2 ve levha kalınlığı, d ile gösterilmiştir. Şekil 1b ve 1c'de bir- ve iki döngülü kare helezonların uzunlukları ve eni görülmektedir. TE (Transverse Electric) düzlemsel dalga bakışsız levhaya hava ortamından normal açıyla gelmektedir. Gelen, yansıyan ve dielektrik levhadan saçılan elektrik ve manyetik alanlar Floquet teorem [14] kullanılarak sonsuz düzlemsel dalgaların toplamı şeklinde yazılır [15]. Sınır şartları kullanılarak ve birim hücredeki iletken yüzlerinde gelen, yansıyan ve saçılan elektrik alanların teğetsel bileşenleri sifira eşitlenerek Elektrik Alan İntegral Denklemi (EAİD) elde edilir. EAİD'de Moment metodu [16] kullanılarak akım yoğunluğu bilinmeyen akım katsayıları ve bilinen temel fonksiyonlar cinsinden yazılır. Temel fonksiyonlar iletken yüzeylerde üst üste çakışan parçalı sinüsler olarak seçildiğinde değişken a_s yönünde, aşağıdaki gibi yazılabilir [17].

$$f_n(s) = a_s \begin{cases} \frac{\sin\beta(s-s_{n-1})}{\sin\beta(s_n-s_{n-1})} & s_{n-1} \leq s < s_n \\ \frac{\sin\beta(s_{n+1}-s)}{\sin\beta(s_{n+1}-s_n)} & s_n \leq s < s_{n+1} \end{cases} \quad (4)$$

Bu denklemde β hava ortamındaki faz sabitini belirtmektedir. a_s yönündeki birim vektör ya a_x yada a_y yönünü göstermektedir. FSY eni dalga boyuna göre çok küçük olduğundan, akımın iletken şeritlerin uzunluğu boyunca aktığı düşünülmüştür. Şekil 2'de temel fonksiyonlar bir-döngülü kare helezon üzerinde gösterilmiştir. Temel fonksiyonlar orijinden başlayarak metal iletken boyunca devam ederler. İlk şerit (h_1) boyunca temel fonksiyonlar a_y yönünde seçilmiştir.

EAİD aynı temel fonksiyonlarla test edildiğinde NxN matris denklemi elde edilir. Bilinmeyen akım katsayıları matrisin tersinin alınmasıyla hesaplandıktan sonra ortak kutupsal yansıma ve çapraz kutupsal iletim katsayıları bakışsız levha ile desteklenen FSY'ler için aşağıdaki denklemler kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir [18].



Şekil 2: Temel fonksiyonların (üst üste çakışan parçalı sinüslerin) bir-döngülü kare helezon üzerinde gösterimi.

$$R_{co}^{TE} = E_{200}^{TE} + \sum_{n=1}^N \alpha_n^{TE} (C_{100}g_{n00}^{TE} + C_{200}g_{n00}^{TM}) / A \quad (5)$$

$$T_{cr}^{TM} = e_{300}^{TM} + \sum_{n=1}^N \alpha_n^{TE} (P_{300}g_{n00}^{TE} + P_{400}g_{n00}^{TM}) / A \quad (6)$$

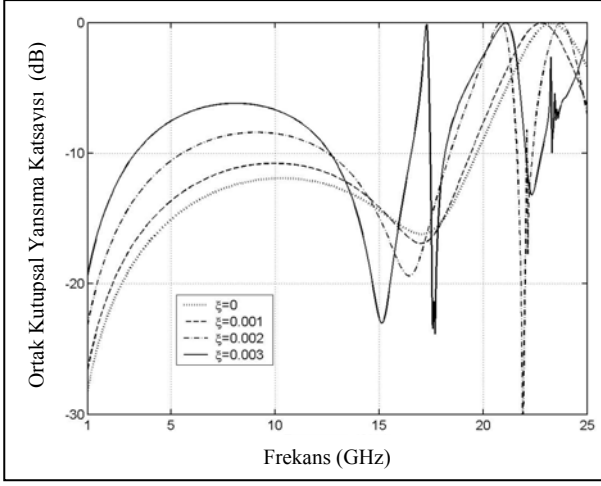
Bu denklemlerde E_{200}^{TE} ve e_{300}^{TM} FSY'lerin olmadığı durumda bakışsız levhadan yansıyan ortak kutupsal ve iletilen çapraz kutupsal katsayıları, 1'den N'e kadar olan toplam bakışsız levha ile desteklenen FSY'lerdeki saçılmaları, α bilinmeyen akım katsayılarını, C ve P'ler ortamın parametreleri cinsinden katsayıları, g_{n00}^{TE} ve g_{n00}^{TM} temel fonksiyonların içsel çarpımlarını ve A birim hücre alanını göstermektedir. Üst indis TE ve TM yansıyan veya geçen dalganın polarizasyonunu belirtmektedir. TE (TM) düzlemsel dalga için ortak kutupsal kısım TE (TM) ve çapraz kutupsal kısım da TM (TE)'dir.

3. Sayısal Değerler

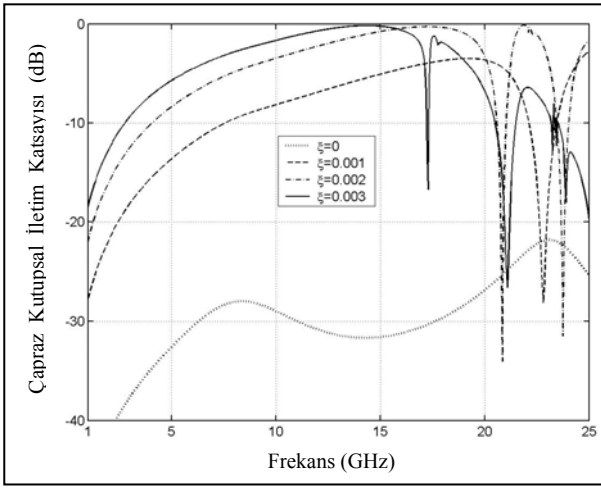
Bu bölümde Şekil 1a ve 1b'de gösterilen bir- ve iki-döngülü kare helezon FSY'lerin ortak kutupsal yansıma ve çapraz kutupsal iletim katsayılarının bakışsızlık admitansının ve geliş açısının farklı değerleri için gelen dalganın frekansına göre grafikleri çizilmiştir. Floquet modları kullanılan temel fonksiyonlar ile orantılı olup sonuçlarda çok az bir fark elde edilinceye kadar yakınsamanın olduğu değere kadar arttırılmıştır. Her iki FSY için de yayını yapan mod sıfırıncı moddur.

Bir-döngülü kare helezon FSY'in sayısal sonuçları Şekil 3 ve 4'te sunulmuştur. İlk şeridin uzunluğu $h_1=0.16$ cm olup diğer şeritlerin uzunlukları $h_n=n*h_1$ ($n=2, 3, 4$) 'den bulunabilir. Bir-döngülü kare helezon FSY'in eni ilk şeridin onda biri olarak seçilmiştir ($w=0.016$ cm). Periyodik hücrelerdeki elemanlar arası mesafe eşit olup $d_1=d_2=0.7$ cm'dir. Bir-döngülü kare helezon FSY'in toplam uzunluğu için 25 tane üst üste çakışan sinüs fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan Floquet modlarının sayısı $(2M+1)^2$ olup $M=12$ 'dir. Bakışsızlık admitansının değeri $|\xi| \leq \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 / \mu_0}$ [19] aralığında seçilmiştir.

Şekil 3'de bakışsızlık admitansın dört farklı değerinde normal açıyla gelen dalgadan dolayı bir-döngülü kare helezon FSY'deki ortak kutupsal yansıma katsayısının gelen dalganın frekansına göre değişimi görülmektedir.



(a)

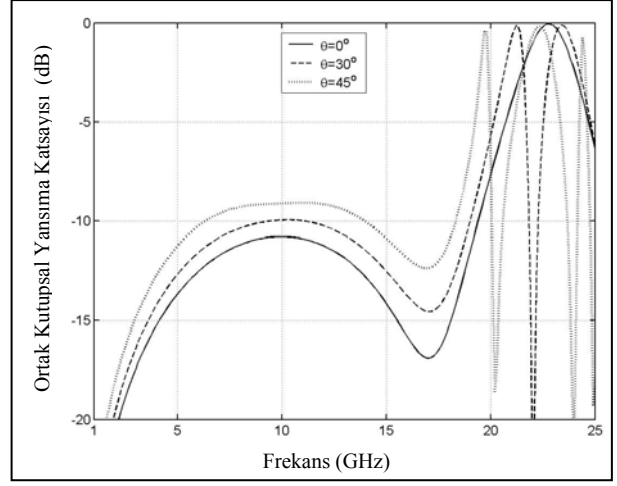


(b)

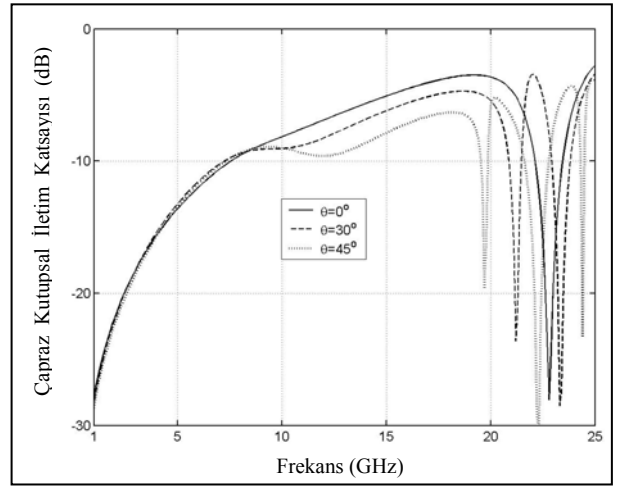
Şekil 3: Bakışsız levhada bir-döngülü kare helezon FSY için farklı ξ değerlerinde a) Ortak kutupsal yansımaya ve b) Çapraz kutupsal iletim katsayıları: $\theta=\phi=0^\circ$, $d=0.5$ cm, $\epsilon_r=1.6$, $w=0.016$ cm, $h_1=0.16$ cm, $h_n=n*h_1$ cm, $n=2,3,4$, $d_1=d_2=0.7$ cm.

Şekil 3a' da bakışsızlık admitansının düşük değerinde (çizgili eğri) sadece bir rezonans frekansı mevcut iken ξ 'nin yüksek değerlerinde iki farklı rezonans frekansı vardır. 1–12.5 GHz frekans aralığında ortak kutupsal yansımaya katsayısının değeri ξ arttıkça artmakta olduğu görülmektedir. $\xi=0.002$ S değerinde iki farklı rezonans frekansı olup bant aralıkları yaklaşık olarak birbirlerine eşittir. $\xi=0.003$ S değerinde ise birinci rezonanstaki bant aralığı ikinciye göre daha dardır.

Şekil 3b'de görüleceği üzere çapraz kutupsal iletim katsayısının değeri $\xi=0$ için -20 dB'in altındadır. $\xi=0.001$ S değerinde bakışsız levhanın ardında polarizasyon dönüşümünün olmadığı görülürken, $\xi=0.002$ S için 18 ve 22 GHz frekanslarında iki farklı anti-rezonans (gelen dalganın polarizasyonu TE' den TM' e dönüşüyor) gözlenmiştir. $\xi=0.003$ S olduğunda ise anti-rezonans (full transmission) 15 GHz'de görülmektedir.



(a)

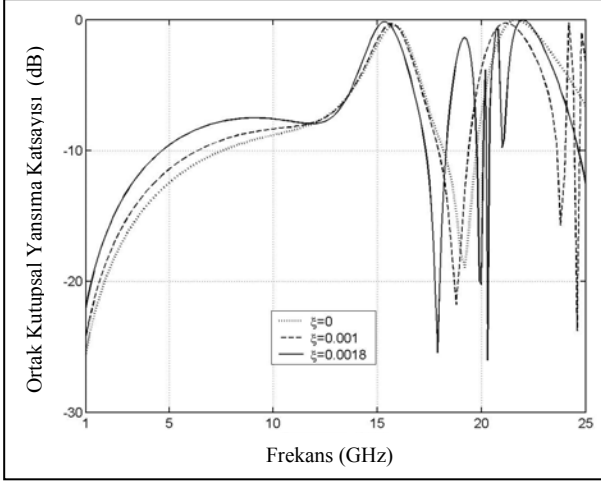


(b)

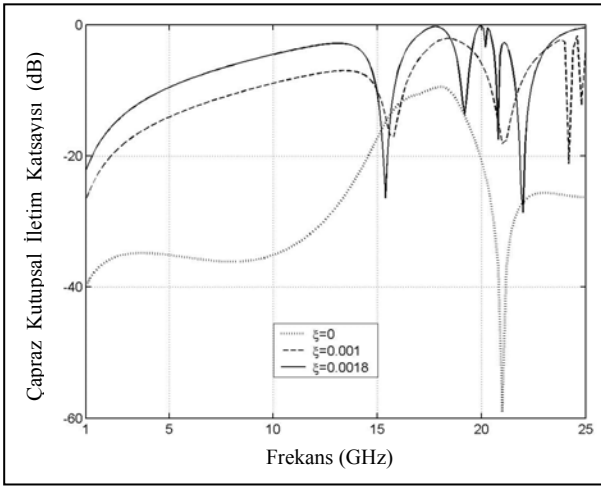
Şekil 4: Bakışsız levhada bir-döngülü kare helezon FSY için farklı geliş açılarındaki a) Ortak kutupsal yansımaya ve b) Çapraz kutupsal iletim katsayıları: $\phi=0^\circ$, $\xi=0.001$ S, $d=0.5$ cm, $\epsilon_r=1.6$, $w=0.016$ cm, $h_1=0.16$ cm, $h_n=n*h_1$ cm, $n=2,3,4$, $d_1=d_2=0.7$ cm

Şekil 4'te ortak kutupsal yansımaya ve çapraz kutupsal iletim katsayılarının geliş açısının farklı değerlerinde frekansa göre grafikleri çizilmiştir. Şekil 4a'da normal açıyla gelen dalga için 23 GHz'de rezonans görülmektedir. Normal açıda bir rezonans frekansı varken 30° ve 45° lik geliş açılarındaki birden fazla rezonans olduğu gözlenmiştir. Geliş açısı arttıkça rezonans frekansı da sola doğru daha küçük frekanslara kaymaktadır. Şekil 4b'de görüleceği gibi $\xi=0.001$ S için farklı geliş açılarındaki anti-rezonans oluşmamaktadır.

Şekil 5 ve 6'da bakışsız levha üzerine periyodik olarak yerleştirilen iki-döngülü kare helezon FSY'in ortak kutupsal yansımaya ve çapraz kutupsal iletim katsayılarının normal açıyla gelen dalga için farklı bakışsızlık değerlerinde frekansa göre grafikleri sunulmuştur. İlk şeridin uzunluğu $h_1=0.1$ cm olup diğer şeritlerin uzunlukları $h_n=n*h_1$ ($n=2, 3, \dots, 8$)'den bulunabilir. İki-döngülü kare helezonun toplam uzunluğu 3.6 cm dir. İki-döngülü kare helezon FSY'in eni ilk şeridin onda biri olarak seçilmiş olup $w=h_1/10=0.01$ cm'dir.



(a)

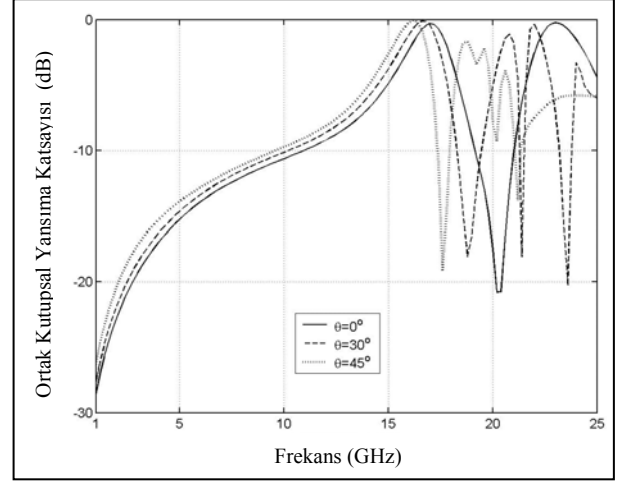


(b)

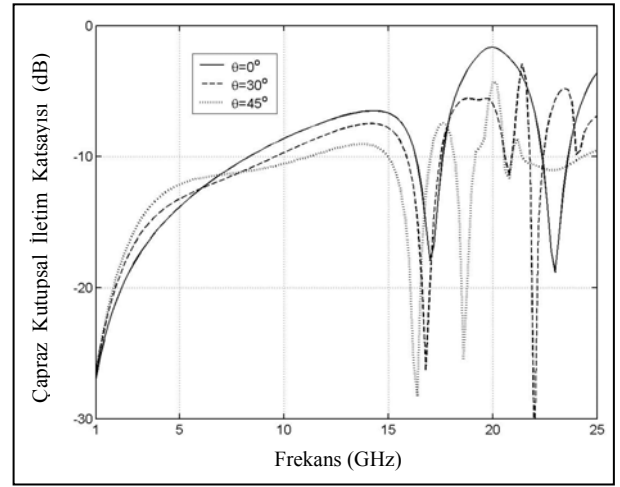
Şekil 5: Bakışimsız levhada iki-döngülü kare helezon FSY için farklı ξ değerlerinde a) Ortak kutupsal yansımaya ve b) Çapraz kutupsal iletim katsayıları: $\theta=\phi=0^\circ$, $d=0.5$ cm, $\epsilon_r=1.6$, $w=0.01$ cm, $h_1=0.1$ cm, $h_n=n*h_1$ cm, $n=2,3,\dots,8$, $d_1=d_2=0.83$ cm.

Periyodik hücrelerdeki elemanlar arası mesafe eşit olup $d_1=d_2=0.83$ cm'dir. İki-döngülü kare helezon FSY'de indüklenen akım katsayılarını bulmak için toplam 56 tane üst üste çakışan parçalı sinüs fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan Floquet modlarının sayısı $(2M+1)^2$ olup $M=15$ olarak alınmıştır.

Şekil 5'te bakışimsızlık admitansının farklı değerleri için ortak kutupsal yansımaya ve çapraz kutupsal iletim katsayılarının frekansa göre değişimi sunulmuştur. Şekil 5a' da görüleceği üzere tüm ξ değerlerinde iki farklı rezonans frekansı vardır. 1–12 GHz frekans aralığında ortak kutupsal yansımaya katsayısının değeri ξ 'nin değeri arttıkça artmakta olduğu gözlenmektedir. 11.5–13.5 GHz frekans aralığında ortak kutupsal yansımaya katsayısının değerinde belirgin bir değişim görülmemektedir. 15.5 GHz' de oluşan ilk rezonans frekansında ξ arttıkça daha küçük frekanslara doğru küçük bir kayma olmaktadır. $\xi=0$ ve $\xi=0.001$ S değerleri için ikinci rezonanstaki bant aralığı birinciye göre daha dardır.



(a)



(b)

Şekil 6: Bakışimsız levhada iki-döngülü kare helezon FSY için farklı geliş açıları için a) Ortak kutupsal yansımaya ve b) Çapraz kutupsal iletim katsayıları: $\phi=0^\circ$, $\xi=0.001$ S, $d=0.5$ cm, $\epsilon_r=1.2$, $w=0.01$ cm, $h_1=0.1$ cm, $h_n=n*h_1$ cm, $n=2,3,\dots,8$, $d_1=d_2=0.83$ cm.

Şekil 5b'de $\xi=0.0018$ S değeri için çapraz kutupsal iletim katsayısının değeri birden fazla frekans değerinde bire eşit olmaktadır. Bu frekans değerlerinde anti-rezonans olup gelen dalganın polarizasyonunun TE' den TM'e dönüştüğü gözlenmiştir. $\xi=0$ ve $\xi=0.001$ S değerleri için anti-rezonans meydana gelmemektedir.

Geliş açısının farklı değerleri için ortak kutupsal yansımaya ve çapraz kutupsal iletim katsayılarının frekansa göre değişimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Geliş açısı 45° ' ye kadar arttırıldığında 16.5 GHz' de oluşan ilk rezonans frekansı sola doğru kayarken ikinci rezonans ortadan kalkmaktadır. Gelen dalganın eğik açılı olması durumunda Şekil 6b' de görüldüğü üzere anti-rezonans oluşmamıştır.

4. Sonuç

Bu çalışmada bir- ve iki-döngülü kare helezon iletkenlerden oluşan iki yeni FSY'in bakışimsız levhadan yansıma ve iletim katsayıları TE düzlemsel dalga için incelenmiştir. Bilinmeyen akım katsayılarını bulmak için üst üste çakışan parçalı sinüsler modeli Moment metodu ile birlikte kullanılmıştır. Bakışimsızlık admitansının ve geliş açısının farklı değerleri için ortak kutupsal yansıma ve çapraz kutupsal iletim katsayılarının frekansa göre grafikleri çizilmiştir. Nümerik sonuçlar bakışimsızlık admitansının gelen dalganın polarizasyonunu döndürmekte önemli bir parametre olduğunu göstermiştir. Düşük ξ değerlerinde polarizasyon dönüşümü görülmemiştir. ξ 'nin yüksek değerlerinde birden fazla rezonans frekansının olduğu görülmüştür. Geliş açısı arttıkça bir-döngülü kare helezon FSY için birden fazla rezonans frekansı gözlenmiştir. İki-döngülü kare helezon FSY için geliş açısının farklı değerlerinde ilk rezonans frekansı sola doğru kayarken ikinci rezonans frekansı kaybolmaktadır.

5. Kaynakça

- [1] I.V. Lindell, A.H. Sihvola, S.A. Tretyakov, A.J. Viitanen, *Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media*, Norwood, MA, 1994.
- [2] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. Wiley, New York, 2000.
- [3] A.J. Viitanen, I.V. Lindell, "Chiral slab polarization transformer for aperture antennas," *IEEE Trans. AP*, 46, 9, 1395-1397, 1998.
- [4] D.M. Pozar, "Microstrip antennas and arrays on chiral substrates," *IEEE Trans. AP*, 40, 1260-1263, 1992.
- [5] H. Cory, I. Rosenhouse, "Some applications of multi-layered chiral structures," *Electron. Lett.* 28, 1051-1053, 1992.
- [6] A. Lakhtakia, V.K. Varadan, V.V. Varadan, "Scattering by periodic achiral-chiral interface," *J. Opt. Soc. Am. A*. 11, 1675-1681, 1989.
- [7] P. Pelet, N. Engheta, "The theory of chirowaveguides," *IEEE Trans. AP*, 38, 1, 90-98, 1990.
- [8] A.M.M. Allam, "Chiral absorbing material," *17th National Radio Science Conference*, Minufiya University, Egypt, 2000.
- [9] M.M.I. Saadoun, N. Engheta, "Theoretical study of variation of propagation constant in a cylindrical waveguide due to chirality: Chiro-phase shifting," *IEEE Trans. Microw. Theory & Tech.* 42, 9, 1690-1694, 1994.
- [10] A.O. Koca, *Analysis of Frequency Selective Surfaces on Chiral Slab*. Ph. D. Tezi Gaziantep Üniversitesi, 1997.
- [11] K. Delihacioglu, S. Uckun, T. Ege, "Scattering characteristics of FSS comprised of L-shaped and one-turn helix shaped conductors for TE and TM excitation," *Electrical Engineering*, 89, 3, 177-181, 2007.
- [12] K. Delihacioglu, S. Uckun, T. Ege, Frequency selective surfaces comprised of periodic arrays of two-turn square spiral shaped conductors, (AEÜ) *Int. J. Electron. Commun.*, 61, 3, 182-185, 2007.
- [13] S. Bassiri, N. Engheta, C.H. Papas, "Electromagnetic Wave Propagation through a Dielectric-Chiral Interface and through a Chiral Slab," *J. Opt. Soc. Am. A*, 5, 1450-1459, 1988.
- [14] N. Amitay, V. Galindo, C.P. Wu, *Theory and analysis of phased array antennas*. Wiley-Interscience, New York, 1972.
- [15] K. Delihacioglu, S. Uckun "Power reflection and transmission coefficients for Meander-Line polarizers with a chiral slab," *ETRI Journal*, 25, 1, 41-48, 2003
- [16] R. F. Harrington, *Field computation by moment methods*: MacMillan, New York, 1968.
- [17] H. Nakano, *Helical and Spiral Antennas: A Numerical Approach*: Wiley, New York, 1987.
- [18] K. Delihacioglu, *Analysis of square spirals on planar dielectric and chiral slabs*, Ph. D. Tezi, Gaziantep Üniversitesi, 2007.
- [19] N. Engheta, D.L. Jaggard, "Electromagnetic Chirality and its Applications," *IEEE AP-S Newslett.*, 30, 6, 1988