

Farklı Dielektrik Rezonatör Geometrilere Sahip Tamamı Dielektrik Soğurucu Yüzey Yapıları İçin Hassasiyet Analizleri

Sensitivity Analyses for All-Dielectric Absorber Structures Having Different Dielectric Resonator Geometries

Nezihe Karacan¹, Gönül Turhan-Sayan², Evren Ekmekçi¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Süleyman Demirel Üniversitesi
karacannezihe@gmail.com, evrenekmekci@sdu.edu.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
gtsayan@metu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada silindirik, eliptik, kare, dikdörtgen, altıgen ve sekizgen şekilli dielektrik rezonatör yapıları kullanılarak tamamı dielektrik soğurucu yüzey yapıları tasarlanmıştır. Rezonatör yapılarının dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değerleri değiştirilerek rezonans frekansının ve soğurma seviyesinin rezonatör geometrisine bağlı hassasiyet incelemeleri nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. Rezonans frekansındaki kayma miktarının incelenen geometriler arasında neredeyse rezonatör geometrisinden bağımsız olduğu görülmüştür. Diğer taraftan rezonatörün dielektrik sabitinin artması ile çalışma frekans aralığında yüksek dereceli rezonans modları da gözlemlenmiş ve bu modların soğurma seviyelerinin rezonatör geometrisine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca tüm rezonatör geometrileri için kayıp tanjant değişimine göre soğurma spektrumlarındaki davranışın benzer olduğu değerlendirilmiştir. Yapılan bu analizlerin sensör çalışmaları için iyi bir kılavuz olacağına inanılmaktadır.

Abstract

In this study, the all-dielectric absorber structures are designed using cylindrical, elliptical, square, rectangular, hexagonal, and octagonal-shaped resonators. By changing the dielectric constant and the loss tangent values of the resonator structures, sensitivity investigations of resonance frequency and absorption level depending on the resonator geometry are realized numerically. It has been seen that the amount of shift in the resonance frequency is almost independent of the resonator geometry among the studied geometries. On the other hand, with the increase of the dielectric constant of the resonators, higher-order resonance modes have also been observed in the operating frequency range, and it has been determined that the absorption levels of these modes depend on the resonator geometry. Moreover, it has been evaluated that the behavior of the absorption spectra according to change of the loss tangent is similar for all resonator geometries. It is believed that these conducted analyses will be a good guide for sensor studies.

1. Giriş

Dielektrik rezonatörler, kompakt boyutları sayesinde devreye kolayca entegre edilebilmeleri [1], [2], oksitlenme ve aşınmaya karşı dayanıklı olmaları ve yüksek sıcaklıklarda kararlılıklarının yüksek olması [3], [4] gibi fiziksel avantajlarının yanı sıra içerisinde desteklenen modların çeşitliliği (elektrik dipol, manyetik dipol, elektrik kuadrupol, manyetik kuadrupol vb.) [2] sayesinde mikrodalga frekans bölgesinden optik frekans bölgesine [3]-[12] kadar geniş uygulama alanlarına sahip olmaları nedeniyle son zamanlarda yaygın bir çalışma konusu haline gelmiştir. Dielektrik rezonatörler, anten [5], [6], filtre [3], elektromanyetik indüklenmiş saydamlık [7], [11], soğurucu yüzey [4], [8], [9], kutuplayıcı [10] ve sensör [6], [9], [12] uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Literatürde mevcut uygulamalarda genellikle silindirik şekilli rezonatör geometrisi [2]-[5], [7], [9] kullanılırken, eliptik [10], yarım küre [6], konik [13], kare [13], dikdörtgen [2], [5], [12], altıgen [5] ve sekizgen [5] şekilli rezonatör geometrileri ile yapılmış çalışmalar da mevcuttur. Ancak rezonatör geometrisinin iletim, yansıma veya soğurma spektrumuna etkisinin incelendiği çalışma sayısı oldukça sınırlıdır ve bu çalışmalarda parametre olarak yalnızca dielektrik rezonatör geometrisinin etkileri araştırılmıştır [5], [8]. Daha ayrıntılı bir şekilde; Meher ve arkadaşları tarafından silindirik, dikdörtgen, altıgen ve sekizgen şekilli dielektrik rezonatör yapıları ile anten tasarımları yapılmış ve rezonatör geometrisinin kazanç, yönlülük, bant genişliği gibi anten parametrelerine etkisi incelenmiştir [5]. Bunun yanı sıra Zhao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise dielektrik malzeme olarak su kullanılarak damla ve tüp şeklinde rezonatör yapıları ile geniş bantlı soğurucu yüzey tasarımları yapılmış ve yapıların soğurma miktarı, bant genişliği gibi soğurma parametrelerine etkisi araştırılmıştır [8].

Ayrıca literatürde dielektrik rezonatörün dielektrik sabiti (ϵ_{diel}) ve kayıp tanjantının ($\tan\delta_{\text{diel}}$) değişiminin hassasiyet üzerine etkisinin incelendiği çalışmalar da mevcuttur [6], [9], [12]. Ancak bu çalışmalarda yalnızca tek bir rezonatör geometrisi için hassasiyet analizleri yapılmıştır [6], [9], [12]. Daha detaylı

olarak; Wang ve arkadaşları tarafından sıcaklığa duyarlı kalsiyum titanat malzeme ile dikdörtgen şekilli dielektrik rezonatör tasarımı yapılmış ve sıcaklık değişimi ile malzemenin dielektrik özelliklerinin değişiminin yansıma spektrumu üzerine etkisi incelenmiştir [12]. Buna ilaveten, Jacobsen ve arkadaşları tarafından su ile yapılmış yarımküre şekilli dielektrik rezonatör yapısı kullanılarak anten tasarımı yapılmış ve sıcaklık değişimi ile suyun dielektrik özelliklerinde meydana gelen değişimin yansıma spektrumu üzerine etkileri gözlemlenmiştir [6]. Son olarak Karacan ve Ekmekci tarafından kimyasal sıvılar kullanılarak silindirik dielektrik rezonatör ile tamamı dielektrik soğurucu yüzey tasarımı yapılmış ve dielektrik rezonatörün dielektrik özelliklerinin değişiminin soğurma spektrumuna etkisi nümerik ve deneysel olarak analiz edilmiştir [9].

Bu çalışmada, silindirik, eliptik, kare, dikdörtgen, altıgen ve sekizgen şekilli rezonatör geometrileri ile tamamı dielektrik soğurucu yüzey tasarımları yapılmıştır. Rezonatör yapıları içerisindeki elektrik alan ve manyetik alan dağılımları incelenerek soğurma mekanizması tartışılmıştır. Tasarlanan dielektrik rezonatörlerin dielektrik sabiti (ϵ_{diel}) ve kayıp tanjant ($\tan\delta_{\text{diel}}$) değerleri değiştirilerek her bir rezonatör geometrisi için hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir rezonatör geometrisi için uzayda kapladıkları hacim hesaplanmıştır.

2. Tasarımlar ve Benzetimler

Şekil 1’de silindirik, eliptik, kare, dikdörtgen, altıgen ve sekizgen şekilli geometrilere sahip dielektrik rezonatörler ile tasarlanan tamamı dielektrik soğurucu yüzey yapılarının şematik gösterimleri ve tasarım parametreleri verilmiştir. Tüm tasarımlarda dielektrik rezonatörler, boyutları $L_x \times L_y \times t_{\text{sub}} = 72,136 \times 34,036 \times 3 \text{ mm}^3$ olan polipropilen (3,5 GHz’de $\epsilon_{\text{pp}} = 2,208$ dielektrik sabiti ve $\tan\delta_{\text{pp}} = 0,000297$ kayıp tanjant değerlerine sahip) [9] destek taban malzemesi üzerine yerleştirilmiştir. Başlangıçta dielektrik rezonatörlerin tasarımı için dielektrik malzeme olarak 2,45 GHz’de $\epsilon_{\text{diel}} = 20,3$ ve $\tan\delta_{\text{diel}} = 0,042$ değerlerine sahip aseton [14] kullanılmıştır.

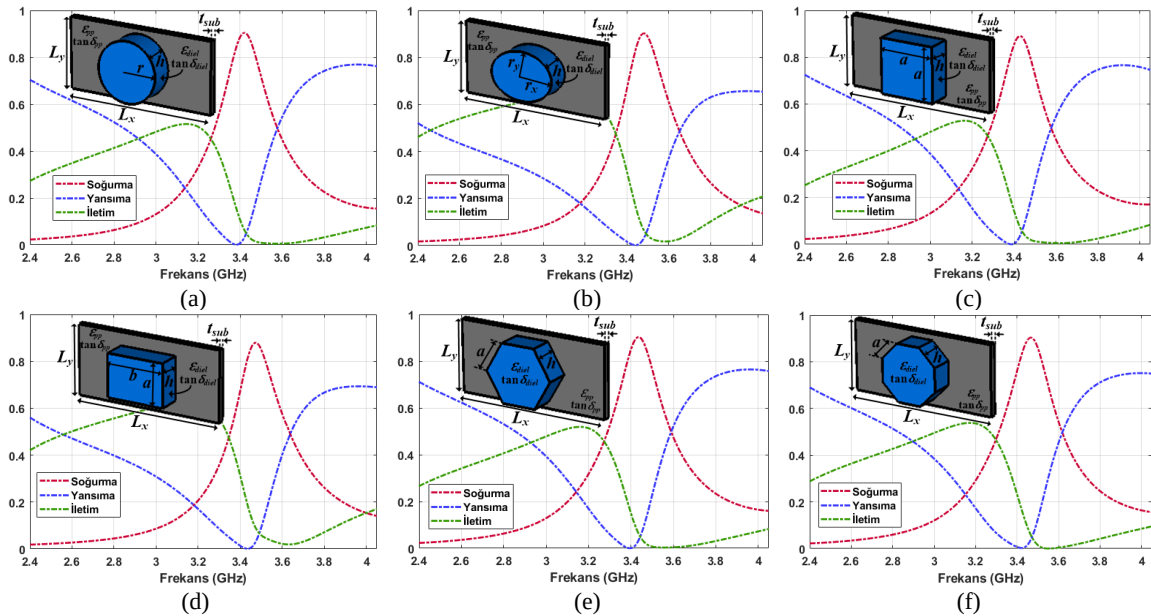
Rezonatörlerin geometrik boyutları soğurma rezonans frekansı $f_0 \cong 3,4 \text{ GHz}$ civarında olacak şekilde nümerik hesaplamalar ile belirlenmiş ve tasarım parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir. Dielektrik rezonatörün yüksekliği h tüm rezonatörler için eşit ve 11,5 mm’dir.

Çizelge 1: Dielektrik rezonatörler için tasarım parametreleri.

Rezonatör Yapısı	Tasarım Parametreleri (mm)				
	r	r_x	r_y	a	b
Silindirik şekilli	14,5	—	—	—	—
Eliptik şekilli	—	15,5	11,5	—	—
Kare şekilli	—	—	—	26,5	—
Dikdörtgen şekilli	—	—	—	28	21
Altıgen şekilli	—	—	—	16	—
Sekizgen şekilli	—	—	—	11,5	—

Bu çalışmada gerçekleştirilen tasarımlar ve benzetimler CST Studio Suite® yazılımının frekans bölgesi çözücüsü [15] kullanılarak yapılmıştır. Benzetimlerde Şekil 2’de gösterildiği gibi WR284 dikdörtgen dalga kılavuzu kurulumu kullanılmış ve yapıyı çevreleyen uzay x ve y eksenlerine dik duvarlar boyunca elektrik ($E_t = 0$) ve z eksenine dik duvarlar boyunca açık-ekle (open-add) sınır koşulları ile sonlandırılmıştır. Yapı z eksenine yerleştirilen dalga kılavuzu kapıları ile uyarılmıştır.

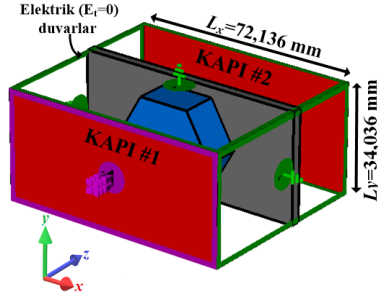
WR284 dikdörtgen dalga kılavuzunda temel mod olarak TE_{10} modu desteklenmektedir ve bu modda dalga z eksenini boyunca ilerlerken elektrik alan vektörü yalnızca y bileşenine, manyetik alan vektörü hem x hem de z bileşenlerine sahiptir. Temel modda sergilediği sinüs davranışından dolayı dalga kılavuzunun merkezinde manyetik alanın x bileşeni daha baskınken dalga kılavuzunun x eksenine dik kenarlarına doğru z bileşeni daha baskın hale gelmektedir [1]. Tasarımlarda rezonatör yapıları dalga kılavuzu düzleminin tam ortasına gelecek şekilde yerleştirildiği için yapıların uyarımında etkin olarak y yönünde bir elektrik alan ve x yönünde manyetik alan rol oynamaktadır.



Şekil 1: (a) silindirik, (b) eliptik, (c) kare, (d) dikdörtgen, (e) altıgen ve (f) sekizgen şekilli dielektrik rezonatörler ile tasarlanmış tamamı dielektrik soğurucu yapıları için soğurma, iletim ve yansıma grafikleri. İçteki figürler yapıların şematikleri ve tasarım parametrelerini göstermektedir.

3. Benzetim Sonuçları

Tasarlanan yapılar için soğurma, iletim ve yansımaları grafikleri Şekil 1’de verilmiştir. Soğurma = $1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ ile hesaplanmıştır [4], [9]. Burada $|S_{11}|^2$ ve $|S_{21}|^2$ sırasıyla yansımaya ve iletim olarak tanımlanmıştır. Literatürde $|S_{11}|^2$ ve $|S_{21}|^2$ ifadelerinin eş ve çapraz bileşenlerine sahip olabileceği belirtilmiştir [16], [17]. Bu sebeple tüm rezonatör geometrilerine ait soğurucu yüzey yapıları bu bildirinin öncü çalışmaları kapsamında ayrıca birim hücre “unit cell” kurulumu altında da incelenmiş ve S parametrelerine ait çapraz polarizasyon bileşenlerinin ihmal edilebileceği görülmüştür. Bu nedenle hesaplamalarda yalnızca eş kutuplanma durumuna ait S parametreleri dikkate alınmıştır.



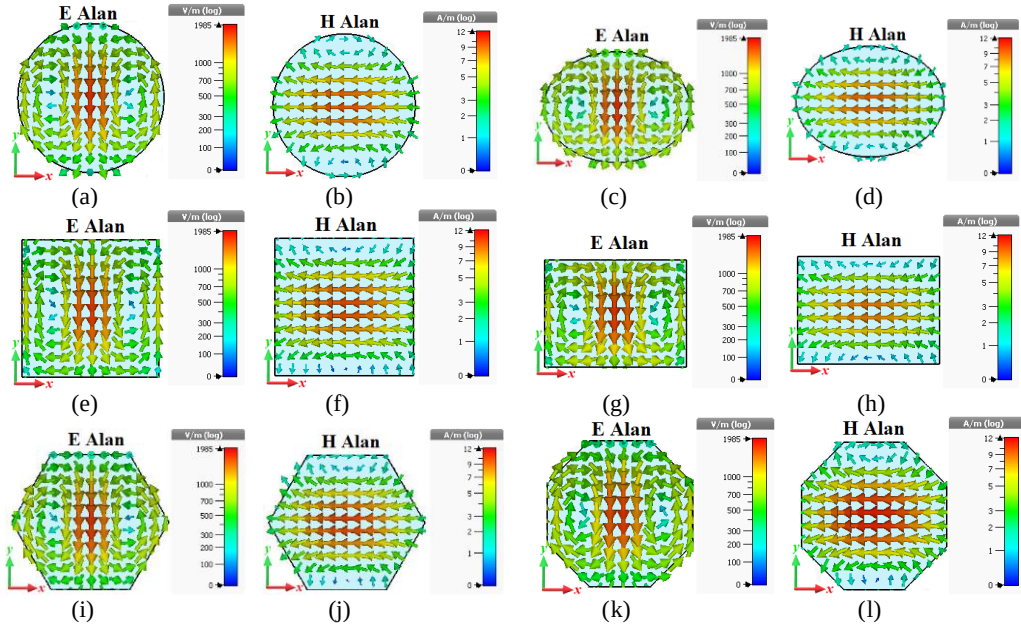
Şekil 2: Tamamı dielektrik soğurucu yüzey yapıları için örnek benzetim düzeneği.

Şekil 1’de verilen grafikler incelendiğinde tüm rezonatör geometrileri için soğurmanın maksimum olduğu f_0 ’da hem iletim hem de yansımaların yaklaşık minimum değerlere sahip olduğu görülmüştür. Tüm rezonatör geometrileri için f_0 değerleri ve soğurma seviyeleri Çizelge 2’de verilmiştir. Soğurma seviyelerinin tüm yapılar için 0,85’in üzerinde olduğu görülmektedir.

Soğurma mekanizmasını daha detaylı bir şekilde incelemek için her bir rezonatör geometrisine ait f_0 değerinde, rezonatör yapıları içerisindeki elektrik alan ve manyetik alan dağılımları xy düzleminde 60° faz açısı için Şekil 3’te çizdirilmiştir. Tüm yapılar için maksimum soğurmanın yatay elektrik dipol ve yatay manyetik dipol rezonansın birbirine dik bir şekilde ve aynı anda uyarılması sonucunda meydana geldiği gözlemlenmiştir [4], [9].

Çizelge 2: Çeşitli rezonatör geometrileri için soğurma parametreleri ve rezonatörlere ait hacim değerleri.

Rezonatör yapısı	f_0 (GHz)	Soğurma seviyesi	Δf (GHz)	Hacim (mm ³)
Silindirik şekilli	3,42	0,904	1,298	7595,98
Eliptik şekilli	3,48	0,902	1,315	6439,87
Kare şekilli	3,43	0,891	1,295	8075,88
Dikdörtgen şekilli	3,47	0,879	1,308	6762
Altıgen şekilli	3,44	0,903	1,303	7648,74
Sekizgen şekilli	3,47	0,904	1,315	7343,69



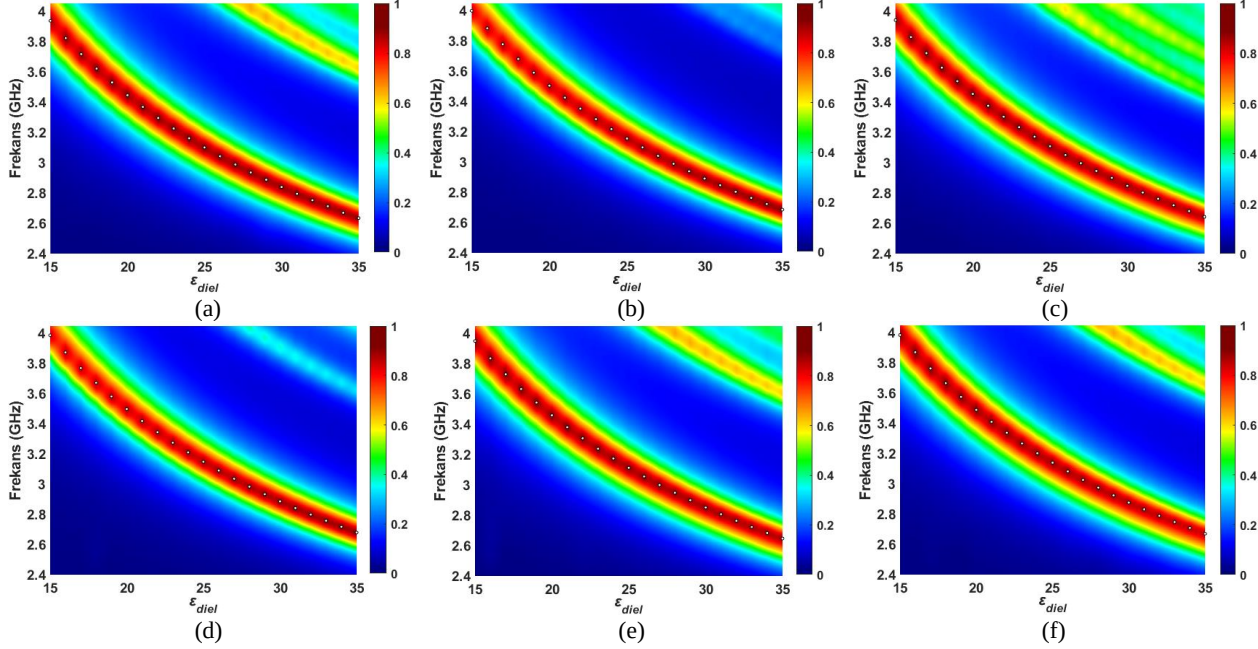
Şekil 3: Silindirik dielektrik rezonatör geometrisi için 3,42 GHz’de 60° faz açısındaki (a) elektrik ve (b) manyetik alan dağılımları. Eliptik dielektrik rezonatör geometrisi için 3,48 GHz’de 60° faz açısındaki (c) elektrik ve (d) manyetik alan dağılımları. Kare şekilli dielektrik rezonatör geometrisi için 3,43 GHz’de 60° faz açısındaki (e) elektrik ve (f) manyetik alan dağılımları. Dikdörtgen şekilli dielektrik rezonatör geometrisi için 3,47 GHz’de 60° faz açısındaki (g) elektrik ve (h) manyetik alan dağılımları. Altıgen şekilli dielektrik rezonatör geometrisi için 3,44 GHz’de 60° faz açısındaki (i) elektrik ve (j) manyetik alan dağılımları. Sekizgen şekilli dielektrik rezonatör geometrisi için 3,47 GHz’de 60° faz açısındaki (k) elektrik ve (l) manyetik alan dağılımları.

Rezonatör geometrisinin hassasiyet üzerine etkisini incelemek için öncelikle tüm soğurucu yüzey yapılarındaki rezonatörlerin $\tan \delta_{\text{die}}$ değerleri 0,042’de sabit tutularak ϵ_{die} değerleri 15’ten 35’e kadar 1’er adım aralığı ile değiştirilmiştir

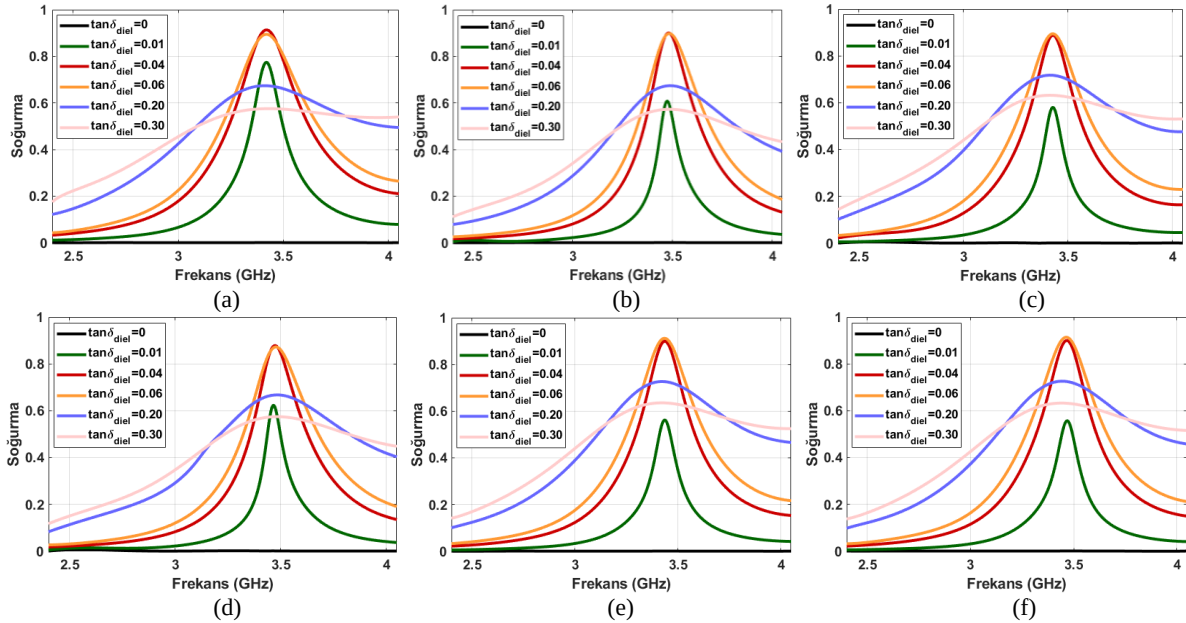
ve ϵ_{die} değişiminin soğurma spektrumlarına etkisi Şekil 4’te verilmiştir. Grafiklerdeki beyaz noktalar temel soğurma rezonans frekanslarını (f_0) göstermektedir. Şekil 4’te verilen grafikler incelendiğinde tüm yapılar için ϵ_{die} arttıkça f_0 ’ın

azaldığı gözlemlenmiştir. Rezonans frekansındaki kayma miktarı Δf tüm yapılar için $\Delta f = f_{maks} - f_{min}$ ile hesaplanmış ve Çizelge 2’de verilmiştir. Burada f_{min} , $\epsilon_{diel} = 35$ için ve f_{maks} , $\epsilon_{diel} = 15$ için rezonans frekanslarını göstermektedir. Δf ’in tüm rezonatör geometrileri için neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Buna ilaveten ϵ_{diel} ’in değişimi ile soğurma seviyeleri tüm rezonatör geometrileri için çok az miktarda değişim göstermiş ancak tüm ϵ_{diel} değerleri için 0,85’in

üzerinde kalmıştır. Ayrıca ϵ_{diel} arttıkça f_0 ’ın azalmasından kaynaklı olarak ilgili çalışma frekans aralığında yüksek dereceli rezonans modları için de soğurma spektrumları gözlemlenmiştir. Yüksek dereceli rezonans modları için soğurma seviyeleri eliptik ve dikdörtgen şekilli rezonatör yapıları için göreceli olarak daha düşük (maksimum 0,4) iken silindirik, kare, altıgen ve sekizgen şekilli rezonatör yapıları için göreceli olarak daha yüksektir (maksimum 0,65).



Şekil 4: Çeşitli ϵ_{diel} değerleri için (a) silindirik, (b) eliptik, (c) kare, (d) dikdörtgen, (e) altıgen ve (f) sekizgen şekilli dielektrik rezonatör geometrilerine ait 3-boyutlu soğurma spektrumları. Grafiklerdeki beyaz noktalar f_0 değerlerini göstermektedir.



Şekil 5: $\tan \delta_{diel} = 0, 0,01, 0,04, 0,06, 0,2$ ve $0,3$ değerleri için (a) silindirik, (b) eliptik, (c) kare, (d) dikdörtgen, (e) altıgen ve (f) sekizgen şekilli dielektrik rezonatör geometrilerine ait soğurma spektrumları.

Ardından dielektrik rezonatörün $\tan \delta_{diel}$ değişiminin hassasiyet üzerine etkisini incelemek amacıyla tüm rezonatör geometrileri için $\epsilon_{diel} = 20,3$ ’te sabit tutulmuş ve $\tan \delta_{diel} = 0$,

0,01, 0,04, 0,06, 0,2 ve 0,3 değerleri için soğurma spektrumlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar tüm rezonatör geometrileri için Şekil 5’te

sunulmuştur. Şekil 5'te verilen sonuçlar incelendiğinde tüm yapılar için $\tan\delta_{\text{diel}}$ arttıkça soğurma seviyesinin arttığı ve belirli bir $\tan\delta_{\text{diel}}$ değeri için maksimum olduktan sonra tekrar azalmaya başladığı gözlemlenmiştir. Soğurmanın maksimum olduğu $\tan\delta_{\text{diel}}$ değeri tüm rezonatör geometrileri için farklıdır. Bunun yanı sıra soğurma seviyesindeki artış hızı da tüm rezonatör geometrileri için farklıdır ve en hızlı artışın silindirik şekilli rezonatör geometrisine ait olduğu açıkça görülmektedir (bkz. Şekil 5(a)). Ayrıca tüm rezonatör geometrileri için $\tan\delta_{\text{diel}}$ arttıkça soğurma bant genişliğinin de arttığı tespit edilmiştir. Soğurma bant genişliğinin yine silindirik şekilli rezonatör geometrisi için nispeten daha büyük olduğu görülmüştür.

Son olarak tüm rezonatör geometrileri için Çizelge 1'de verilen değerler kullanılarak rezonatörlerin hacimleri hesaplanmış ve elde edilen değerler Çizelge 2'de sunulmuştur. En yüksek hacmin kare şekilli rezonatör geometrisine ait iken en düşük hacmin eliptik şekilli rezonatör geometrisine ait olduğu görülmüştür. Dolayısıyla tasarımlarda kullanılan malzeme miktarının en az eliptik şekilli rezonatör geometrisine ait olacağı sonucu çıkarılmıştır.

4. Tartışma

Bu çalışmada silindirik, eliptik, kare, dikdörtgen, altıgen ve sekizgen şekilli rezonatör geometrileri kullanılarak tamamı dielektrik soğurucu yüzey yapıları tasarlanmış ve bu yapıların ϵ_{diel} ve $\tan\delta_{\text{diel}}$ değişimine göre hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Alan dağılımları incelenerek tüm rezonatör geometrileri için maksimum soğurmanın elektrik dipol ve manyetik dipol rezonansın rezonatörler içerisinde aynı anda desteklenmesi sonucunda meydana geldiği görülmüştür. ϵ_{diel} 'in artması ile f_0 'da meydana gelen kayma miktarının (yani Δf) tüm rezonatör geometrileri için yaklaşık 1,3 GHz (± 15 MHz) olduğu ve dielektrik sabitine göre hassasiyetin rezonatör geometrisine bağlı olarak neredeyse değişmediği değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra ϵ_{diel} arttıkça gözlemlenen yüksek dipol rezonansın rezonans modları ve bu modların soğurma seviyelerinin eliptik ve dikdörtgen şekilli rezonatör geometrileri için silindirik, kare, altıgen ve sekizgen şekilli rezonatör geometrilerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Tüm rezonatör geometrileri için soğurma seviyelerinin belirli bir $\tan\delta_{\text{diel}}$ değerine kadar arttığı ve bu $\tan\delta_{\text{diel}}$ değerinden sonra azaldığı, ayrıca tüm rezonatör geometrileri için $\tan\delta_{\text{diel}}$ arttıkça soğurma bant genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Buna ilaveten yaklaşık aynı çalışma frekansına ve farklı geometrilere sahip dielektrik rezonatör yapılarının farklı hacim değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın sensör çalışmalarında kullanılacak dielektrik rezonatör yapıların tasarımı için önemli bir kılavuz olacağı düşünülmektedir.

5. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 121R070 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] Pozar, D.M., Microwave Engineering, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2011.
- [2] Mongia, R.K. ve Bhartia, P., "Dielectric resonator antennas—a review and general design relations for

- resonant frequency and bandwidth", Int. J. Microw. Millimeter-Wave Comput. Eng., 4, s. 230–247, 1994.
- [3] Li, L., Wang, J., Ma, H., Wang, J., Feng, M., Du, H., Yan, M., Zhang, J., Qu, S. ve Xu, Z., "Achieving all-dielectric metamaterial band-pass frequency selective surface via high-permittivity ceramics", Appl. Phys. Lett., 108, s. 122902, 2016.
- [4] Liu, X., Fan, K., Shadrivov, I.V. ve Padilla, W.J., "Experimental realization of a terahertz all-dielectric metasurface absorber", Opt. Express, 25(1), s. 191–201, 2017.
- [5] Meher, P.R., Behera, B.R. ve Mishra, S.K., "Design and its state-of-the-art of different shaped dielectric resonator antennas at millimeter-wave frequency band", International Int. J RF Microw. Comput. Aided Eng., 30(7), s. e22221, 2020.
- [6] Jacobsen, R.E., Lavrinenko, A.V. ve Arslanagić, S., "Electrically small water-based hemispherical dielectric resonator antenna", Applied Sciences, 9(22), s. 4848, 2019.
- [7] Jamilan, S., Semouchkin, G. ve Semouchkina, E., "Analog of electromagnetically induced transparency in metasurfaces composed of identical dielectric disks", J Appl. Phys., 129(6), s. 063101, 2021.
- [8] Zhao, J., Wei, S., Wang, C., Chen, K., Zhu, B., Jiang, T. ve Yijun Feng, "Broadband microwave absorption utilizing water-based metamaterial structures", Opt. Express, 26(7), s. 8522–8531, 2018.
- [9] Karacan, N. ve Ekmekci, E., "An all-dielectric microwave absorber composed of a dielectric hollow cylinder filled by chemical liquids and its application on sensing", Sens. Actuators A Phys., 314, s. 112235, 2020.
- [10] Zi, J., Xu, Q., Wang, Q., Tian, C., Li, Y., Zhang, X., Han, J. ve Zhang, W., "Antireflection-assisted all-dielectric terahertz metamaterial polarization converter", Appl. Phys. Lett., 113, s. 101104, 2018.
- [11] Cui, Y., Wang, X., Ren, B. ve Jiang, Y., "Polarization-controlled electromagnetically induced transparency analogue based on multipolar resonances", Opt. Mater. Express, 12(9), s. 3738–3748, 2022.
- [12] Wang, Q., Liu, Y., Zhang, M., Bai, X. ve Guo, Z., "A simple dielectric resonator-based sensor for temperature measurement", Results Phys., 27, s. 104481, 2021.
- [13] Terekhov, P.D., Babicheva, V.E., Baryshnikova, K., Shalin, A.S., Karabchevsky, A. ve Evlyukhin, A.B., "Multipole analysis of dielectric metasurfaces composed of nonspherical nanoparticles and lattice invisibility effect", Phys. Rev. B, 99(4), s. 045424, 2019.
- [14] Komarov, V.V., Handbook of Dielectric and Thermal Properties of Materials at Microwave Frequencies, Artech House, Norwood, USA, 2012.
- [15] CST STUDIO SUITE®, Dassault Systèmes, the 3DEXPERIENCE® Company. www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/.
- [16] Li, Y., Zhang, J., Qu, S., Wang, J., Zheng, L., Pang, Y., Xu, Z. ve Zhang, A., "Achieving wide-band linear-to-circular polarization conversion using ultra-thin bi-layered metasurfaces", J Appl. Phys., 117, s. 044501, 2015.
- [17] Chen, H., Wang, J., Ma, H., Qu, S., Xu, Z., Zhang, A., Yan, M. ve Li, Y., "Ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on multiple plasmon resonances", J Appl. Phys., 115, s. 154504, 2014.