



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Metamalzeme Tabanlı Mermer Sensör Tasarımı

Ali ÇINGİ<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> *Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, TÜRKİYE*

*\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: alicingi2727@gmail.com*

### ÖZET

Bu çalışmada Agariya Brown, Banswara Marble, Kesariyaji Green ve Pink Babarmal mermer taşlarına yönelik olarak X bandında metamalzeme tabanlı sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışma içerisinde verilen dört farklı mermer türünün dielektrik değerleri ve kayıp tanjant değerleri incelenerek belirtilen frekans aralığına parametrik atanan değerler sonucuna göre rezonatör tasarımı yapılmaktadır. Tasarımı yapılan sensör ile birlikte mermer taşlarının yansıma değerleri nümerik olarak elde edilebilmekte ve böylelikle mermer türünün belirlenmesi mümkün olmaktadır. Böyle bir çalışma farklı frekans aralıkları için de yapılabileceği gibi farklı materyaller için de geliştirilebilir konumdadır.

**Anahtar Kelimeler:** *Metamalzeme, Sensör, Mermer, Emilim*

## Design of Metamaterial Based Marble Sensor

### ABSTRACT

In this study, metamaterial based sensor design is carried out intended for Agariya Brown, Banswara Marble, Kaseriyaji Green and Pink Babarmal marble stones on X-band. In the study, design of resenator is made by examining dielectric and loss tangent values of four different types of marble according to values that is parametrically assigned to frequency range specified. With the designed sensor, the reflection values of marble stones can be numerically obtained and thus the marble type can be determined. Such a study can be done for different frequency range as well as for different materials.

**Keywords:** *Metamaterial, sensor, Marble, Absorption*

## I. GİRİŞ

Doğada bulunan her malzeme dielektrik sabiti  $\epsilon$  ve manyetik geçirgenlik  $\mu$  değerlerine sahiptir. Bu parametreler elektromanyetik dalganın yayılımını etkileyen temel parametrelerdir. Bunun nedeni ise dispersiyon eşitliğinde tek maddesel parametreler olmasıdır [1]. Doğada bulunan birçok malzeme pozitif  $\epsilon$  ve  $\mu$  değerine sahiptir. Dielektrik sabiti  $\epsilon$  ve manyetik geçirgenlik  $\mu$  değerinin negatif değere sahip olması ise doğada olmayan malzemelerin sergilediği bir özelliktir. Bu özelliği sergileyen malzemeler ise metamalzeme olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle araştırma konularında son zamanlarda sıklıkla yer almaktadır. Metamalzemelere yönelik ilk çalışmalar Rus bilim adamı Veselago tarafından 1968 yılında teorik olarak ortaya konmaktadır [2]. Veselago çalışmasında çift pozitif ortamda görülmesi mümkün olmayan etkilerin çift negatif ortamda teorik olarak ortaya koymaktadır. Uzun yıllar teoride kalan bu çalışmalar Pendry ve ark. (1999) önerdiği “SwissRoll” ve ayrıık halkalardan yola çıkılarak Shelby ve ark. (2001) deneysel olarak ispatlayarak metamalzemelerin gerçek hayatta uygulamalarına yönelik uygulamaların öncüleri olmuştukları [3-4]. Günümüzde metamalzemeler ile ilgili olarak süper lens [5], görünmezlik pelerini [6], antenler [7-8], termal detektörler [9] ve sensör [10-11] uygulamaları yapılmaktadır. Bunun yanında metamalzemeler tek bant, multibant ve geniş bant da mükemmel performans sergileyebilen malzemelerdir.

Sensörler ise seçiciliğinin artırılması ve maddelerin tespiti için geliştirildikleri görülmektedir. Metamalzeme yapıli sensörlerde ise sensörlerin hassasiyetlerinin arttığı [12] ve duyarlılıklarının daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir [13]. Bunun yanında metamalzeme yapıli sensörlerin tasarımının nanometre boyutunda tasarımlara yakın olması, yüksek frekansta [14] ve dielektrik algılamada [15, 16] metamalzeme tabanlı sensörler geliştirilmesi, sensör uygulamalarına yönelik ilginin artmasında etkili olmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde Metamalzeme tabanlı sensörlere yönelik olarak; kimyasal maddelerin ayrıştırılmasına yönelik olarak metamalzeme tabanlı sensörün etanol, metanol ve aseton ve benzeri kimyasal maddeleri ayırt edilmesine için metamalzeme tabanlı sensörün geliştirildiği [17]; biyomedikal uygulamalarda monoküler yapıların algılanması ve analizi için nanometrik yapıta tasarımların yapılması, hızlı algılama ve duyarlılıklarının artırılmasına yönelik olarak metamalzeme tabanlı sensörlerin geliştirildiği [18], akaryakıt maddelerin benzin ve dizel gibi ve bu ürünlerin sahtesine yönelik olarak yapılan çalışmalarda metamalzeme tabanlı sensör uygulamalarının yapılarak sahtesinden ayırt edilmesinin sensör tasarımlarının geliştirildiği görülmektedir [19]. Bu durum Metamalzeme tabanlı sensör uygulamalarına yönelik olarak yapılan çalışmalara katkı sağlamaktadır. Böylelikle bu alanda yapılan çalışmalar ile birlikte bu alanda daha fazla gelişmelerin olacağı bilinmektedir.

Bu çalışmada daha önceki çalışmalar incelenerek nümerik olarak sinyal emici yeteneği mükemmel olan mermer türünün tespitinde kullanılabilir metamalzeme tabanlı sensör tasarımı yapılmaktadır. Bunun için farklı mermer türlerinde lineer bir yansıma sonucu verecek bir yapı tasarımı optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla bu çalışma da parametre değişikliğinde hassasiyet gösteren bir yapı tasarımı yapılmaktadır. Ayrıca tasarımı yapılan sensör yüksek frekansta algılama, düşük kayıp faktörü ve düşük enerji maliyeti ile de dikkat çekmektedir.

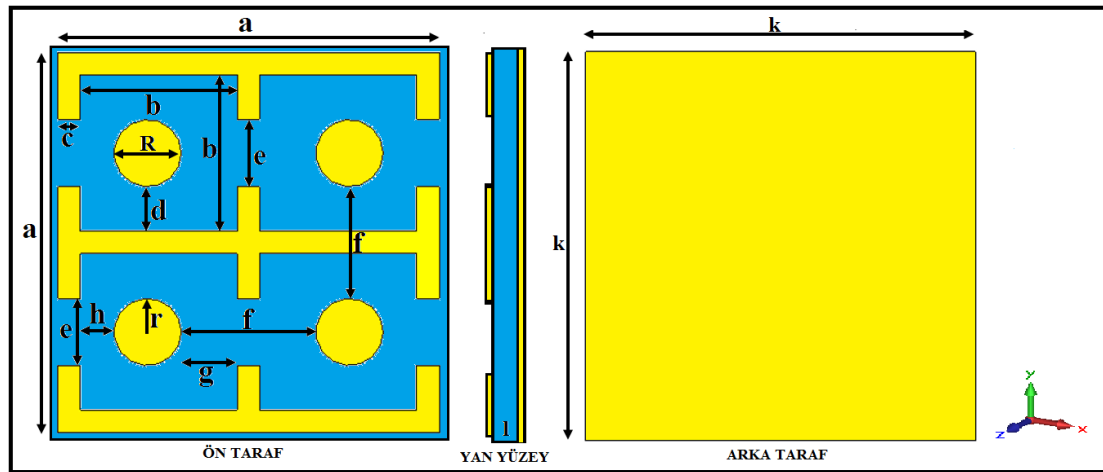
## II. METAMALZEME TABANLI MERMER SENSÖRÜ TASARIMI

Tasarımı yapılan metamalzeme tabanlı sensör için öncelikli olarak mermer taşlarının dielektrik sabitleri ve kayıp tanjant değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Daha önceki yapılan çalışmalarda bu çalışmada kullanılacak olan Agariya Brown, Banswara Marble, Kesariyaji Green ve Pink Babarmal mermer taşlarının dielektrik sabitleri ve kayıp tanjant değerleri ise Tablo 1’de verilmektedir.

*Tablo 1. Mermer taşlarının dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değerleri [20].*

No	Mermer Taşı	Dielektrik Sabiti ( $\epsilon$ )	Kayıp Tanjant
1	Agariya Brown	7.1592	0.11697
2	Banswara Marble	7.9073	0.13009
3	Kesariyaji Green	6.8306	0.111220
4	Pink Babarmal	7.54800	0.12371

Tablo 1’de de açıkça görüldüğü gibi dielektrik değerleri ve kayıp tanjant değerleri birbirine yakın değerlerde çıkmaktadır. Yapılan bu ölçümlerde frekans aralığı 8.8- 12.2 GHz aralığında olup tasarımı yapılan rezonatöründe frekans aralığının bu değerler arasında olması gerekmektedir [21]. Metamalzeme yapılarında frekans değerlerinin ayarlanabilmesinin ise MEMS anahtarları [22], kapasitör/ varaktör devreleri [23], ferro elektrik/ manyetik yapılar [24], sıvı kristaller [25] ve karesel birim hücrelerde SRR’lerde boşluklar eklenerek kapasitans ve endüktans değerlerinin değiştirilmesi [26] gibi farklı yöntem ve metotları ile frekans değerlerini değiştirmek mümkün olmaktadır [21]. Bu çalışmada da tasarımı yapılan rezonatörün kapasitans ve endüktans değerlerinin değiştirilip frekans aralığının 8.8- 12.2 GHz aralığına çekilebilmesi için yapı üzerinde bulunan karesel birim hücrelerin kesit alanları değiştirilmektedir. Tasarıma ait rezonatör Şekil 1’de görülmektedir.

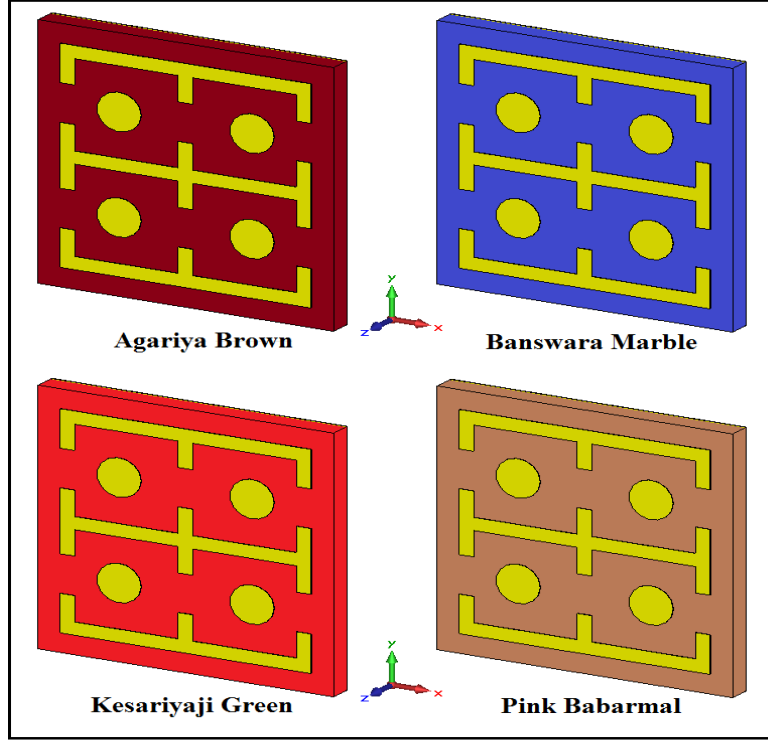


*Şekil 1. Mermer taşlarının frekans aralığına göre tasarımı yapılan rezonatör.*

Tasarlanan rezonatörde kesit ölçüleri;  $a=17.00$  mm,  $b=7.00$  mm,  $c= 1.00$  mm,  $d=2.00$  mm,  $e=3.00$  mm,  $f=5.00$  mm,  $g=2.00$  mm,  $R= 3.00$  mm,  $r=1.50$  mm,  $k=20.00$  mm,  $l=1.60$  mm, olarak belirlenmektedir. Bu yapıda, yapının arka kısmını metalik özelliklere sahip olan,  $5,8 \times 10^7$  S/m elektriksel iletkenliğe ve

0,035 mm kalınlığa sahip bakır malzemeden oluşmaktadır. Aynı şekilde ön yzde rezonatör de bakır cinsi metalden yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarında kare yapının e kesit alanı, daire çapı R kesitine eşit olduğunda en iyi sinyal emici yapının ortaya çıktığı görölmektedir.

Rezonatör yapının tasarımığan sonra daha önceden Tablo 1’de verilen her bir mermer taşına ait dielektrik değerleri ve kayıp tanjant değerleri ayrı ayrı simülasyon programından tanımlatılarak emilim ve yansıma değerleri incelenmektedir. Mermer taşlarına ait yapılar şekil 2’de verilmektedir.



şekil 2. Mermer taşları ve rezonatör yapıları

Dielektrik ve kayıp tanjant değerlerine göre tasarımı yapılan bu yapıların kapasitif değişiklikleri ve temel rezonans davranışları LC rezonans devresi ile ifade edilmektedir. Bu LC devreleri sensör uygulamalarının temel yöntemlerindendir. Kapasitif etkinin belirlenmesinde yüzey parametrelerinin değişimi ile endüktif etkilerin belirlenmesi ise rezonatör yapılarının birbirlerine göre konumlarının durumuna göre belirlenmektedir.

### III. SENSÖR TASARIMININ NÜMERİK ANALİZİ VE SONUÇLARI

Yapılan bu çalışmada farklı mermer taşlarının dielektrik değerleri ve kayıp tanjant değerlerinin bilinmesi ve yapılan ölçümlerde frekans aralığının 8.8 GHz ve 12.2 GHz aralığında tutulması oluşturulan sensörün geometrik yapısından çıkan sonuçlarında bu aralıklarda bulunması gerektiğini ortaya koymaktadır. Böylelikle belirtilen frekans aralığında en iyi sonuçların alınması mümkün olmaktadır.

Oluşturulan yapının her iki tarafında da bakır malzemeden oluşması ve oluşturulan rezonatörün üzerindeki boşluklar rezonans frekansında değişimlere neden olmaktadır. Rezonans frekansındaki değişimlerin kapasitans ve kayıp tanjant değerleri ile olan bağlantısı ise denklem 1 ve denklem 2 ve denklem 3 ile ortaya konmaktadır [21].

$$C = \frac{\varepsilon C_0}{\varepsilon_0} = (\varepsilon' - j\varepsilon'') \frac{C_0}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon' - j\varepsilon''}{\varepsilon_0} = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - \tan \delta_e) \quad (2)$$

Aynı şekilde kayıp tanjant değeri ise aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır [21].

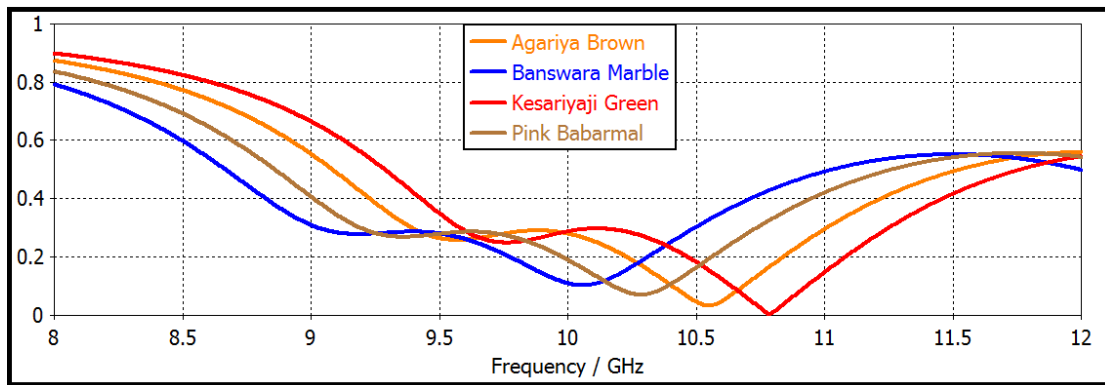
$$\tan \delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3)$$

Bunların yanında bu denklemler ile birlikte yüzey akım dağılımı ve elektrik alan şiddeti arasında da denklem 2 ve 3'de verilen değerlere göre denklem 4 ve 5'de verilen bezer bir bağıntı kurulabilmektedir [21].

$$I = j\omega(\varepsilon' - j\varepsilon'') \frac{C_0}{\varepsilon_0} U = (j\omega\varepsilon' - \omega\varepsilon'') \frac{C_0}{\varepsilon_0} U \quad (4)$$

$$J = (j\omega\varepsilon' - \omega\varepsilon'') E = \varepsilon \frac{dE}{dt} \quad (5)$$

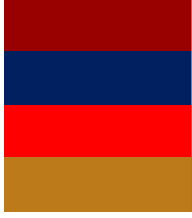
Tasarımı yapılan rezonatörün ve mermer taşlarının dielektrik ve kayıp tanjant değerlerinin ayrı ayrı girilmesi sonucunda bu yapılara ait tasarımı yapılan sensörün nümerik  $S_{11}$  sonuçları gösteren grafik Şekil 3'de verilmektedir.



Şekil 3. Mermer taşlarının nümerik  $S_{11}$  grafiği

Periyodik olarak belirlenen sınır şartları içerisinde mermer taşlarına yönelik olarak yapılan  $S_{11}$  emilim değerleri bulunmaktadır. Yapının arka kısmının metal olarak belirlenmesi iletim değerinin sıfıra yakın olmasını sağlamaktadır. Burada farklı mermer türlerinden yansıyan en küçük değer emilim değerinin en yüksek olduğu değeri ifade etmektedir. Sinyal emilimi için  $A(w) = 1 - (R(w) + T(w))$  formülünde yararlanılarak emilim değerleri hesaplanmakta olup elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmektedir.

*Tablo 2. Mermer taşlarının yansıma ve emilim değerleri*

	<b>Mermer Taşları</b>	<b>S<sub>11</sub></b>	<b>A<sub>(w)</sub></b>
	Agariya Brown	0.0319	% 99.89
	Banswara Marble	0.1020	% 98.96
	Kesariya Green	0.0032	% 99.99
	Pink Babarmal	0.0697	% 99.51

Tablo 2 incelendiğinde mermer taşlarına yönelik tasarımı yapılan sensörün emilim değerinin tamamında mükemmel bir sonuç verdiği açıkça görülmektedir. Daha önceki sinyal emilim formülünden yararlanılarak S<sub>11</sub> değerlerindeki azalış durumuna göre sinyal emiliminin arttığı görülmektedir. Böylelikle sinyal emilimine bağlı olarak mermer taşları üzerinde yapılan çalışmalarda mermer taş değişimleri ile birlikte yoğunluğun değişime göre hızlı ve en doğru sonuçları vermesi mümkün olmaktadır.

#### IV. SONUÇ

Metamalzeme tabanlı sensörlerin gelişiminde en önemli etkenlerden biri de elektromanyetik dalganın polarizasyonunun değişikliği ve optiksel etkinliğinin sağlanması olayıdır. Böylelikle elektromanyetik dalganın yönlendirilmesi, polarize edilmesi ve kontrolünün sağlanması da kolay olmaktadır. Bu özellikleriyle metamalzeme tabanlı sensörlerin savunma sanayi, kimyasal alanlar ve sağlık sektörlerinde kullanılması büyük önem arz etmektedir. Yapılan bu çalışmada son yıllarda popüler hale gelen ve her geçen gün kullanımı artan metamalzemelere yönelik olarak bir sensör uygulaması yapılmaktadır. Literatür çalışmalarında kimyasal maddelerin ayırt edilmesi, biyolojik çalışmaların detaylı incelenmesi, petrol yakıtlarının sahtesinden ayırt edilmesi için yapılan çalışmalar ve savunma sanayisinde radarlarda kullanımı dikkate alındığına bu alandaki çalışmaların çeşitlenebileceği ve böylelikle metamalzeme tabanlı sensörlerin artacağı gerçeklik göstermektedir. Yapılan bu çalışmada da daha önceki çalışmalar incelenerek sensör uygulamalarına yönelik olarak basınç ve yoğunluk algılaması yapılarak mermer türünün ayırt edilmesi sağlanmaktadır. Önerilen sensör tasarımı için öncelikli olarak mermer taşlarının dielektrik ve kayıp tanjant değerleri araştırılarak ölçülen dielektrik ve kayıp tanjant değerlerinin çalışma frekansı aralıkları belirlenmektedir. Belirlenen frekans aralığına göre simülasyon programında rezonatör tasarımı yapılarak sonuçlar programda test edilmektedir. Yapılan simülasyonlar neticesinde parametrik değerlere bağlı olarak en iyi rezonans frekansında rezonatör tasarımı yapılmakta olup sonuçları mükemmel seviyede çıkmaktadır. Böylelikle bu çalışma ile birlikte mermer taşlarının türünün belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bunun yanında mermerin kalitesi ve içerisindeki yabancı madde oranlarının da tespiti mümkün olmaktadır. Bu çalışma ile birlikte Metamalzeme tabanlı sensörlerin daha ileri seviyelerde çalışmalar yapılabileceğini göstermektedir. Sensörlerin algılanması ve yüksek kazanç ile çalışmaları mümkün olmaktadır. Sadece bir tek alanda değil farklı alanlarda da Metamalzeme tabanlı sensörler tasarlanabileceği ortaya çıkmaktadır. Mermer taşları üzerinde yapılması sadece bir örnek teşkil etmekle birlikte çeşitli gıdaların dielektrik değerlerinin (mısır, patates vs) ve farklı türden kemiklerin (farklı hayvan ırklarına ait kemiklerin biyolojik teşhisi) elde edilmesi ile birlikte bu alanlara yönelik olarak da sensör tasarımı yapılabileceğini ortaya koymaktadır. Yapısal boyutlarındaki değişimler sensörlerin daha etkin kullanımına olanak sağlamaktadır. Önceleri sadece savunma sanayisinde kullanılan Metamalzeme tabanlı sensörlerin bu alanın dışında sağlık, kimya, gıda ve doğa bilimlerinin

incelenmesinde kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır. Yüksek doğruluk (%99,99) oranına sahip olmaları hata oranını en az seviyelere indirmektedir. Hassas uygulama gerektiren yerlerde rahatlıkla kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır.

## V. KAYNAKLAR

- [1] E Konakyeri, "Metamalzeme kaplı iletken cisimden saçılan alanı en aza indiren parametrik değerlerin matematiksel bir yöntem ile hesaplanması," Yüksek lisans tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [2] V.G Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 517-526, 1968.
- [3] R. A Shelby, D. R Smith, S. C Nemat-Nasser and S Schultz, "Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial," *Applied Physics Letters*, vol. 78, no. 4, pp. 489-491, 2001.
- [4] J.B Pendry, A.J Holden, D.J Robbins and W.J. Steward, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE RFID Virtual Journal*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, 1999.
- [5] X. Yang, J. Yin, G. Yu, L. Peng and N Wang, "Acoustic superlens using helmholtz-resonator-based metamaterials," *Applied Physics Letters*, vol. 107, no. 19, 193505, 2015.
- [6] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr and D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science*, vol. 314, no. 5801, pp. 977-980, 2006.
- [7] O. Sıpahtioğlu, S.A. Barringer, "Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash, and moisture content" *Journal Of Food Science*, vol. 68, no. 1, pp. 234-239, 2003.
- [8] D. Faktorová "Microwave characterization of frequency and temperature dependences of beef bone dielectric properties using waveguide measurement system" *MEASUREMENT, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference*, Smolenice, Slovakia, 2009.
- [9] Qi-Y. Wen, Yun-S. Xie, Huai-W. Zhang, Qing-H. Yang, Yuan-X. Li and Ying-L. Liu, "Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band," *Optics Express*, vol. 17, no. 22, pp. 20256-20265, 2009.
- [10] J. Grant, Y. Ma, S. Saha, A. Khalid, D. R. S. Cumming "Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber", *Optics Letters*, vol. 36, no. 17, pp. 3476-3478, 2011.
- [11] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, R. D. Averitt, W. J. Padilla, "A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization" *Optics Express*, vol. 16, no. 10, pp. 7181-7188, 2008.
- [12] H. Hsu, M. J. Hill, R. W. Ziolkowski, J. Papapolymerou, "A duroid-based planar ebg cavity resonator filter with improved quality factor", *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, vol. 1, pp. 67-70, 2002.

- [13] R. Aylo, P. P. Banerjee, A. K. Ghosh and P. Verma, "Design of metamaterial based sensors for pressure measurement," *Proc. of SPIE*, vol. 7604, p. 760412, 2010.
- [14] M. Karaaslan, E. Unal, O. Akgol and C. Sabah, "Flexible chiral metamaterials with dynamically optical activity and high negative refractive index," *Modern Physics Letters*, vol. 29, no. 18, pp. 1550087-8, 2015.
- [15] H. Tao, A. C. Strikwerda, M. Liu, J. P. Mondia, E. Ekmekci, K. Fan, D. L. Kaplan, W. J. Padilla, X. Zhang, R. D. Averitt and F. G. Omenetto, "Performance enhancement of terahertz metamaterials on ultrathin substrates for sensing applications," *Applied Physics Letters*, vol. 97, no. 26, pp. 261909, 2010.
- [16] Z. Ozer, A. M. Mamedov and E. Ozbay, "Metamaterial absorber based multifunctional sensor application," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, no. 175, pp. 012059, 2017.
- [17] M. Yoo, H. Ki Kim, S. Lim, "Electromagnetic-based ethanol chemical sensor using metamaterial absorber," *Sensors and Actuators B: Chemical*, no. 222, pp.173-180, 2016.
- [18] S. RoyChoudhury, V. Rawat, A. H. Jalal, S.N. Kale, S. Bhansali, "Recent advances in metamaterial split-ring-resonator circuits as biosensors and therapeutic agents," *Biosensors and Bioelectronics*, no. 86, pp. 595–608, 2016.
- [19] A. Titt, P. Mai, R. Taubert, D. Dregely, N. Liu, H. Giessen, "Palladium-based plasmonic perfect absorber in the visible wavelength range and its application to hydrogen sensing" *Nano Letter.*, vol. 11, pp. 4366–4369, 2011.
- [20] P.C. Bapna and S. Joshi, "Measurement of dielectric properties of various decorative stones at x-band microwave frequencies," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 2, no. 7, pp. 180-186, 2014.
- [21] Y. Öztürk, "Düzlemsel metalmazemeler ve uygulamaları," Doktora tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [22] T. Hand and S. Cummer, "Characterization of tunable metamaterial elements using mems switches," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, no. 6, pp. 401–404, 2007.
- [23] D. Wang, L. Ran, H. Chen, M. Mu, J. A. Kong and Wu, B. I., "Active lefthanded material collaborated with microwave varactors," *Applied Physics Letters*, vol. 91, no. 16, 164101, 2007.
- [24] T. Hand and S. Cummer, "Frequency tunable electromagnetic metamaterial using ferroelectric loaded split rings," *Journal of Applied Physics*, vol. 103, no. 6, 066105, 2008.
- [25] Q. Zhao, L. Kang, B. Du, B. Li, J. Zhou, H. Tang and B. Zhang, "Electrically tunable negative permeability metamaterials based on nematic liquid crystals," *Applied Physics Letters*, vol. 90, no. 1, 011112, 2007.
- [26] E. Ekmekci, K. Topalli, T. Akin, and G.T. Sayan, "A tunable multi-band metamaterial design using micro-split srr structures," *Optics Express*, vol. 17, no. 18, pp. 16046-16058, 2009.