



An Absorber-Based Metamaterial Sensor For Sensing Relative Humidity

 Mustafa Suphi GULSU  Fulya BAGCI*  Baris AKAOGLU

Ankara University Faculty of Engineering, Department of Physics Engineering, 06100, Besevler/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
 Received: 11/04/2020
 Revision: 10/06/2020
 Accepted: 03/07/2020

Highlights

- Relative humidity sensor
- Metamaterial
- Sensitivity

Keywords

C band
 Equivalent Circuit
 Kapton HN film
 Surface Current
 Electric Field

In this study, a relative humidity sensor based on a metamaterial consisting of electric-inductive capacitive resonators and a commercial polyimide band on top of a transparent copper-backed substrate is designed for C band satellite communication frequencies. The resonance frequency of the metamaterial is estimated by an equivalent circuit approach. Later, the spectral response is characterized by three-dimensional electromagnetic simulations. The effect of the gap width of the electric-inductive capacitive resonator on the sensitivity of the relative humidity is investigated. It is found that decreasing the gap width of the resonators has a positive effect. On the other hand, increasing the thickness of the polyimide band did not show any enhancement on the sensitivity value. The designed sensor has potential to be used for tracking climate and environmental conditions.

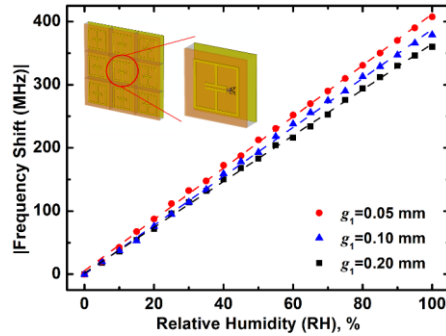


Figure A. Absolute frequency shift as a function of % relative humidity for different gap width values

Purpose: A metamaterial based highly sensitive relative humidity sensor is aimed to be designed at C-band frequencies, which is suitable for tracking climate and environmental conditions.

Theory and Methods: A metamaterial sensor for relative humidity sensing is designed by utilizing from equivalent circuit approach and by using a three-dimensional electromagnetic solver based on finite integration technique. Reflection spectra are calculated for relative humidity ratios of environments ranging from 0% to 100% in 5% steps. Relationship between the shift of the resonance frequency and relative humidity change is put forward for structure parameters.

Results: The metamaterial comprising of electric-inductive capacitive resonators is estimated to show a resonance at 8.38 GHz by the equivalent circuit approach and at 8.57 GHz by the numerical analysis. When the metamaterial is coated with a commercial polyimide band, Kapton HN, the resonance frequency is shifted to 7.00 GHz with -36 dB attenuation. Surface current distribution over the metamaterial unit cell at the resonance frequency is investigated to have a physical background of the resonance effect. The resonance linearly shifts to lower frequencies as the relative humidity is increased. Effects of the gap width of the resonator and thickness of the polyimide band on the sensitivity of the sensor are investigated.

Conclusion: A metamaterial sensor having 4.07 MHz/RH of relative humidity (RH) sensitivity is demonstrated numerically for C-band meteorology applications. It is found that the sensitivity of the metamaterial based sensor increases for narrower gap widths since the localization of the electric field increases.



Bağıl Nem Oranını Algılamaya Yönelik Soğurucu Tabanlı Metamalzeme Sensör

Mustafa Suphi GÜLSU^{ID} Fulya BAĞCI*^{ID} Barış AKAOĞLU

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, 06100, Beşevler/ANKARA

Öz

Bu çalışmada yansıma spektrumunun izlenmesi ile ortamdaki bağıl nem oranını algılamaya yönelik soğurucu tabanlı bir metamalzeme sensör geliştirilmiştir. Hava radar sistemlerinde kullanılan C bandı esas alınarak 7,0 GHz frekansında tepki veren bir metamalzeme sensör tasarlanmıştır. Ortamın bağıl nem miktarının artmasıyla rezonans frekans doğrusal biçimde değişmektedir. Rezonatörde elektrik alanın yoğun biçimde depo edildiği bölgenin genişliğinin bağıl nem sensörünün duyarlılığına etkisi incelenmiştir. Geliştirilen ve optimize edilen sensör her %1 kadarlık bağıl nem değişimine karşı 4,07 MHz kadar frekansta kayma göstermektedir. Neme duyarlı polimit bandın kalınlığının metamalzeme sensörün bağıl nem duyarlılığına kayda değer ölçüde etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Önerilen sensör iklim ve çevre koşullarının takibinde kullanılabilir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/04/2020
Düzeltilme: 10/06/2020
Kabul: 03/07/2020

Anahtar Kelimeler

Bağıl Nem Sensörü
Metamalzeme
Duyarlılık

Keywords

C Bandı
Eşdeğer Devre
Kapton HN filmi
Yüzey Akımı
Elektrik Alan

An Absorber-Based Metamaterial Sensor For Sensing Relative Humidity

Abstract

An absorber-based metamaterial sensor is developed for detecting the relative humidity of the environment by monitoring the reflection spectrum. Considering C band used in air radar systems as a basis, a metamaterial sensor that responds at a frequency of 7.0 GHz is designed. As the relative humidity of the environment increases, the resonance frequency changes linearly. The impact of the width of the region, where the electric field is intensively concentrated, on the sensitivity of the sensor is investigated. The developed and optimized sensor shows a frequency shift of 4.07 MHz against every 1% change in the relative humidity. It was concluded that the thickness of the humidity-sensitive polymer band does not remarkably affect the relative humidity sensitivity of the metamaterial sensor. The proposed sensor can be used for tracking climate and environmental conditions.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hava ve iklimi etkileyen su devriminin en önemli parçası havadaki nem miktarıdır. İklim bilimciler, insan kökenli ortaya çıkan küresel ısınma sonucu her 1°C'lik sıcaklık artışının, atmosferde bulunan su buharı miktarında yaklaşık olarak %7 oranında artmaya neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Küresel ısınma, aşırı yağışlara ve şiddetli sellere neden olabilmektedir. Ekoloji, tarım, jeoloji ve tıp gibi alanlar içerisinde, nem daha çok bağıl nem biçiminde ele alınmakta ve önemli bir parametre olarak göze çarpmaktadır. Bağıl nem değeri, genellikle yüzde üzerinden verilmektedir. Bağıl nem, havadaki nemin belirli bir hava sıcaklığında taşıyabileceği en yüksek neme oranına denilmektedir[1]. Bağıl nem, tarıma uygun bitki ve meyve ağaçlarının yaprakları üzerinde suyun tutunmasından çeşitli mantar ve bakterilerin gelişmesine, fotosentez sürecinde gazların yer değiştirmesinden yararlı ve zararlı böcek türlerinin var olmasına kadar birçok biyofiziksel çevreyi etkileyen bir parametredir. İnsanların ev ve iş yerleri olarak kullandığı kapalı alanlarda klima kullanımı, üst solunum yolu, kronik obstruktif akciğer hasatlığı (KOA) ve zatürre gibi tehlikeli alt solunum yolu hastalıklarının artmasına yol açmaktadır. Bu sebeple, ortamın bağıl nem değerinin dikkatle izlenmesi gerekmektedir[2,3]. Bunlarında ötesinde, hastanelerde, temiz odalarda, tarihi belgelerin bulunduğu arşiv odalarında, müzelerde, elektronik cihazların korunmasında ve yüksek gerilim

çalışmalarının yapıldığı laboratuvarlarda bağıl nem algılayıcılarının varlığı büyük bir öneme sahiptir[4]. Gıda malzemelerinin raf ömürlerini uzun tutmak amacı ile de ortamın nem değerini belirli bir değerin altında tutmak gereklidir[5].

Son yıllarda mikrodalga frekanslarda ölçüm yapabilen metalmalzeme tabanlı kırılma indisi, mikroakışkan, gerinim ve basınç sensörleri üzerine çok sayıda çalışmalar yürütülmektedir[6-9]. Gerinim sensörlerinde, sensörü oluşturan rezonatörün genişliği ve boyunun değişimi kapasitans değerini de değiştirdiğinden, rezonans frekansının da değişmesine neden olmaktadır[10,11]. Mikroakışkan sensörlerde mikro kanallardan akan sıvının dielektrik sabitinin en küçük değişimi rezonatörün kapasitif etkiye sahip bölgedeki elektrik alan dağılımını etkilemesinden dolayı rezonans frekansında kaymaya sebep olmaktadır[12]. Benzer şekilde, metalmalzeme tabanlı nem sensörlerinde ortamın sahip olduğu su buharı miktarının değişiminin rezonans frekansında kaymaya neden olduğu tespit edilmiştir[4]. Örneğin, toprak içerisine yerleştirilen farklı tipte metalmalzemeler ile gerçekleştirilen bir çalışmada en yüksek frekans kayması 1,5 GHz'teki rezonans frekanstan 910 MHz kayma ile ayırık halka rezonatörlerden oluşan metalmalzeme yapısında gözlenmiştir[13].

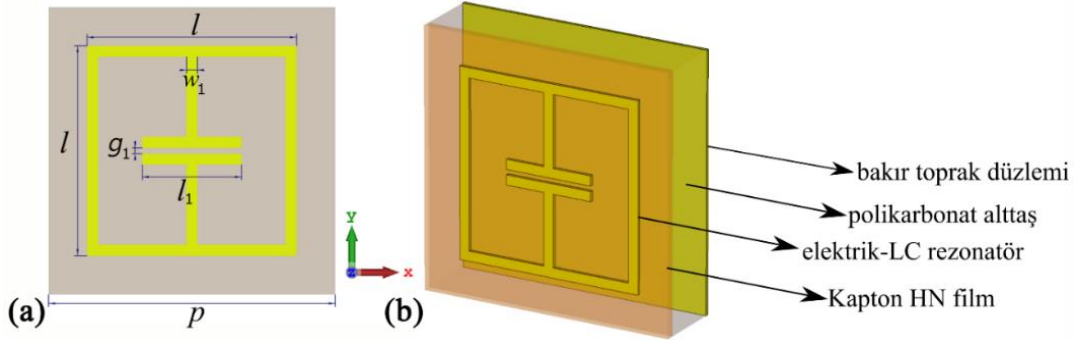
Nemi algılamak için iyi proton iletkenliğine sahip olmalarından ötürü Al_2O_3 , TiO_2 gibi oksit bazlı bazı seramik malzemeler kullanılmıştır[14,15]. Fakat, bu malzemelerin nem algılama aralıkları dardır. Son yıllarda, bu sebepten ötürü polimer bazlı nem algılayıcılarına yönelik ilgi artmıştır. Bu çalışmanın amacı, metalmalzeme tabanlı sensör ile nem algılama davranışının incelenmesidir. Ortamın bağıl nemini en iyi ayırt edebilecek özelliklere sahip bir sensör tasarımı amacıyla en uygun rezonatör yapısı ve alttaş olarak, sırasıyla, elektrik indüktif-kapasitif (LC) rezonatör ve saydam ile esnek olduğundan polikarbonat malzemesi seçilmiştir. Yakın zamanda benzer biçimde elektrik LC rezonatör yapılı bir metalmalzeme kullanılarak, metalmalzemenin tüm yüzeyinin ipek protein fibroin ile kaplanmasıyla THz frekanslarda bir nem sensörü geliştirilmiştir[16]. Bu çalışma ise mikrodalga frekanslara yönelik olup, çalışmada nemi algılamak üzere uygun bir fiyata ticari olarak satın alınabilen, su tutma özelliğine sahip aromatik ticari bir polimit olan Kapton HN bant seçilmiştir. Bantın dielektrik sabiti, ortamın bağıl nem değerinin değişiminden etkilenerek değişiklik göstermektedir[17]. Kapton HN bant ile radyo frekans tanımlama (RFID) teknolojisine yönelik nem sensörü yapımı için 860-930 MHz frekans aralığında çalışılmıştır[18]. Bu çalışmada ise Kapton HN bant, metalmalzeme rezonatör ile birlikte kullanılarak sensörün duyarlılığının artırılması hedeflenmiştir. Ortamdaki bağıl nem değişimini algılama yetkinliği üç boyutlu bir elektromanyetik benzetim programı kullanılarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, elektromanyetik soğurucu özelliği sergileyen metalmalzeme tasarımı için elektrik-LC rezonatör yapısı kullanılmıştır. Elektrik-LC rezonatörlere sahip metalmalzemenin bir birim hücrenin tasarımı ve bu tasarıma ait geometri parametreleri Şekil 1(a)'da gösterilmektedir. Elektrik-LC rezonatörünün seçilmesinin temel nedeni, Şekil 1(a)'da g_1 parametresi ile gösterilen ayırık bölgelerinin gelen elektromanyetik dalganın elektrik alanı ile güçlü bir biçimde bağlaşmasıdır[19-22]. Güçlü elektrik alan bağlaşımının nem sensörünün duyarlılığına büyük katkı sağlaması beklenmektedir. Elektrik-LC rezonatörlü metalmalzemenin kare şeklindeki birim hücrenin kenar uzunluğu p parametresi ile gösterilmiştir ve 5,2 mm değerindedir. Metalmalzeme, arka yüzü tamamen bakır kaplı, 1,25 mm kalınlıklı polikarbonat alttaş üzerinde bulunmaktadır. Rezonatör ve toprak düzleminde, yüksek iletkenlik özelliğinden ve az maliyetli olmasından ötürü bakır tercih edilmiştir. Bakır $70 \mu m$ kalınlığa ve $5,8 \times 10^8 S/m$ iletkenliğe sahiptir. Şekil 1(a)'da gösterilen elektrik-LC rezonatörün şerit genişliği ve boyu, sırasıyla $w_1=0,2 mm$, $l=3,8 mm$; kapasitif etki sağlayan kol uzunluğu $l_1=1,8 mm$ ve ayırık mesafesi $g_1=0,10 mm$ 'dir. Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi metalmalzeme sensörün ön yüzeyi üzerine kaplanan Kapton HN bantının kalınlığı ise 0,1 mm'dir.

Bağıl nem algılama özelliğine sahip soğurucu tabanlı metalmalzeme sensör, üç farklı malzeme kullanılarak dört katmanlı olacak biçimde tasarlanmıştır (Şekil 1(b)). Elektromanyetik dalgalarla ilk önce etkileşen katmanda Kapton HN bant yapısı bulunmaktadır. Ortamın değişen bağıl nem oranından etkilenerek bu katmanın kompleks elektriksel geçirgenlik değeri değişiklik göstermektedir. Üst katmanın bir alt katmanını oluşturan ikinci katmanda, elektrik-LC rezonatör yapısı yer almaktadır. Elektrik-LC rezonatör elektrik-tipi

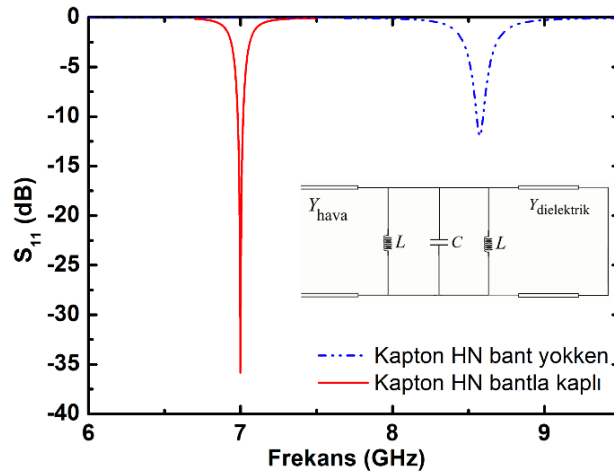
bir rezonatördür; gelen elektromanyetik dalganın elektrik alanı ile güçlü bir şekilde etkileşmektedir. Bu rezonatörün $x=0$ düzlemine göre ayna simetrisi olduğundan manyetik tepkisi bulunmamaktadır[21]. Elektrik-LC rezonatör yapısı üzerinde kapasitif etki, arka yüzü bakır ile kaplı olduğundan ön yüzeyi ile etkileşiminden ötürü indüktif etki ortaya çıkmaktadır. Bu etkiler rezonansa girerek belirli bir frekansta yansımının en aza inmesini sağlamaktadır. Üçüncü katman olarak, elektrik-LC rezonatör ile bakır toprak düzlemi arasında polikarbonat alttaş kullanılmıştır. Kullanılan alttaşların kompleks dielektrik sabiti değerleri ve kalınlığının soğurma üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır[21]. Polikarbonat alttaşın dielektrik sabit 2,9; kayıp tanjant parametresi 0,01 olarak alınmıştır. Kapton HN bandının dielektrik sabitinin gerçel kısmı bağıl neme (BN) bağlı olarak $3,05+0,008 \times \%BN$ ile değişmektedir, kayıp tanjant değeri ise $0,0015+0,00002 \times \%BN$ ile tanımlıdır[4,17].



Şekil 1. Elektrik-LC rezonatörünün birim hücresinin (a) önden ve (b) üç boyutlu temsili görünüşü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Elektrik-LC rezonatörlü soğurucu tabanlı metamalzeme Kapton HN bant ile kaplanmadığında 8,6 GHz frekansta $-11,94$ dB'lik bir yansıma rezonansı göstermektedir. Üst yüzeyi Kapton HN bant ile kaplanarak sensör özelliği kazandırıldığında ise rezonans frekansı 7,0 GHz'e düşmektedir. Rezonans frekansı göz önüne alındığında metamalzeme sensörün birim hücre parametresi $p=\lambda_0/8,2$ 'dir, toplam kalınlığı ise $\lambda_0/25,2$ olmaktadır (λ_0 , elektromanyetik dalganın boşluktaki rezonans dalga boyu). Bu durum tasarlanan sensörün elektriksel olarak oldukça küçük olduğuna işaret etmektedir. Tasarlanan sensörün nemsiz ortamda Kapton HN bant yokken ve kaplı iken hesaplanan yansıma spektrumları Şekil 2'de gösterilmiştir. Sensör, gönderilen elektromanyetik dalgalara 7,0 GHz'de $-36,0$ dB ile güçlü bir tepki vermektedir. Metamalzeme sensörün arka tarafı tamamen bakır kaplı olduğundan elektromanyetik dalgalar iletilmemektedir. 7,0 GHz'de yansımının en aza indirilmesiyle %99,9 oranında soğurma gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün Kapton HN bant yokken ve kaplı iken yansıma spektrumları.

Kapton HN bant ile kaplı değilken elektrik-LC rezonatörlü metalmalzemenin eşdeğer devresi Şekil 2’de gösterilmiştir. Burada Y_{hava} ve $Y_{dielektrik}$, sırası ile havanın ve polikarbonat alttaşın admittanslarını ifade etmektedir. En alt tabaka toprak düzlemi olduğundan $Y_{dielektrik}$ kısa devre ile sonlandırılmıştır. Elektrik-LC rezonatörün Şekil 1’de g_1 ile gösterilen ayrık kısmı kapasitif etkiye sebep olduğundan eşdeğer devrede C kapasitansı ile, sağ ve sol taraflardaki metalik kollar ise indüktif etkiye sahip olduğu için iki adet L indüktansı ile gösterilmiştir. Kapasitans ve iki adet indüktans birbirine paraleldir [21]. Elektrik-LC rezonatörün rezonans frekansı $f = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$ ile ifade edilir [21]. Elektrik-LC rezonatörün C kapasitansı,

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{polikarbonat} \frac{c_1 S}{h_{polikarbonat}} + \epsilon_0 \epsilon_{polikarbonat} \frac{w_1 h_{metal}}{g_1} \quad 1$$

ile belirlenmektedir [24]. Bu eşitlikteki ϵ_0 boş uzayın elektriksel geçirgenliği, $\epsilon_{polikarbonat}$ polikarbonatın dielektrik sabiti, h_{metal} bakırın, $h_{polikarbonat}$ polikarbonat alttaşın kalınlığıdır. S parametresi, elektrik-LC rezonatörün yüzey alanıdır. c_1 geometrik bir çarpan olarak ele alınmıştır [24,25]. Kapasitans hesaplanırken ayrık eleman g_1 ’in etkisi ve elektrik-LC rezonatörün toprak düzlemi ile olan kapasitif etkisi dikkate alınmıştır. Elektrik alan dağılımı incelendiğinde birim hücrelerdeki rezonatörler arası kapasitif etkinin zayıf olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple kapasitans ifadesine dâhil edilmemiştir.

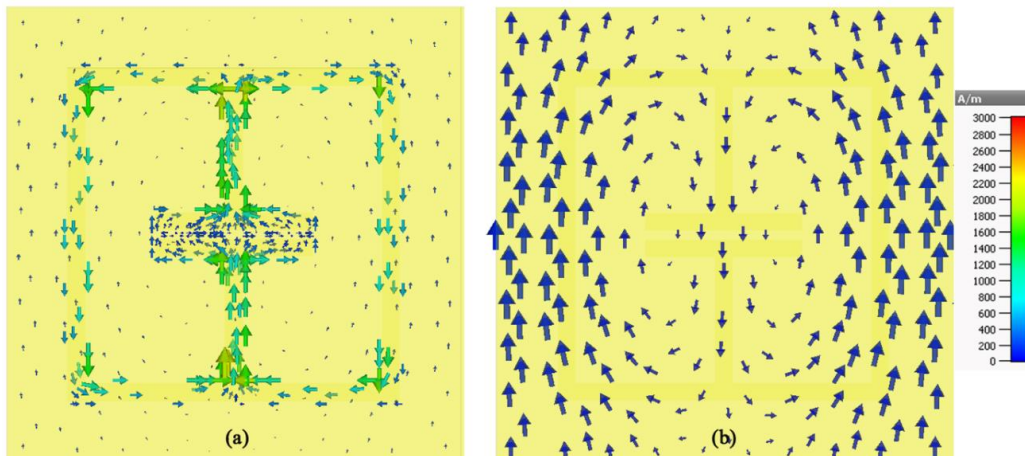
Elektrik-LC rezonatörün L indüktansı ise,

$$L = \mu_0 h_{polikarbonat} \left(\frac{2w_1}{l} + \frac{2l}{w_1} + \frac{l - 2w_1 - g_1}{w_1} \right) \quad 2$$

ile tanımlıdır [26]. Burada μ_0 boş uzayın manyetik geçirgenliğidir.

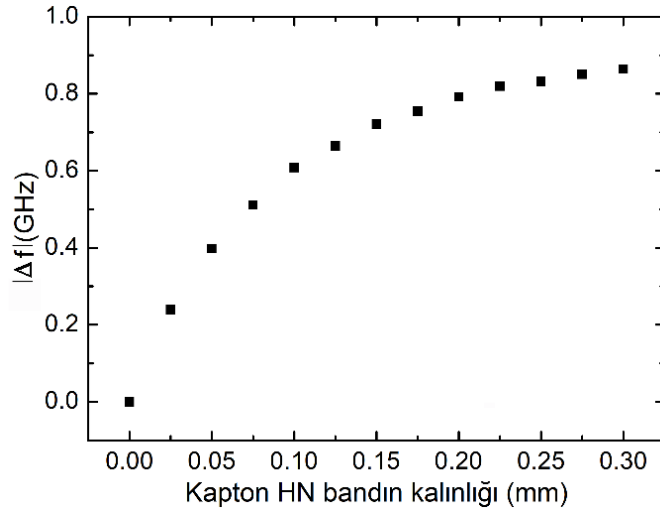
Elektrik-LC rezonatörlü metalmalzemenin rezonans frekansı, eşdeğer devre modeli ile hesaplamalar sonucunda 8,38 GHz olarak bulunmuştur. Bu rezonatörün üç boyutlu elektromanyetik benzetim programı ile 8,57 GHz frekansta rezonansa sahip olduğu hatırlandığında, eşdeğer devre modeli ile de oldukça yakın bir sonuç elde edildiği göze çarpmaktadır.

Rezonansın metalmalzeme yapısı ile ilişkisini belirlemek için rezonans frekansta yüzey akımları incelenmiştir. Metalmalzemenin ön ve arka yüzlerinde indüklenen yüzey akımları sırası ile Şekil 3(a) ve (b)’de gösterilmiştir. Şekil 3(a)’dan görüldüğü gibi yüzey akımları $x=0$ düzlemine göre simetrik olduğundan net bir manyetik akı oluşturmaz [21]. Fakat Şekil 3(a) ve (b)’nin karşılaştırılması ile yüzey akım yönelimlerinin ön ve arka yüzde birbirine zıt olduğu görülmektedir. Bu durum bir manyetik momentin oluşmasına sebebiyet vermektedir [27-29]. Rezonatörün ayrık kısmından kaynaklanan elektrik dipol momentini ile manyetik moment etkileşerek 7,0 GHz frekansında bir rezonans oluşturmaktadır.



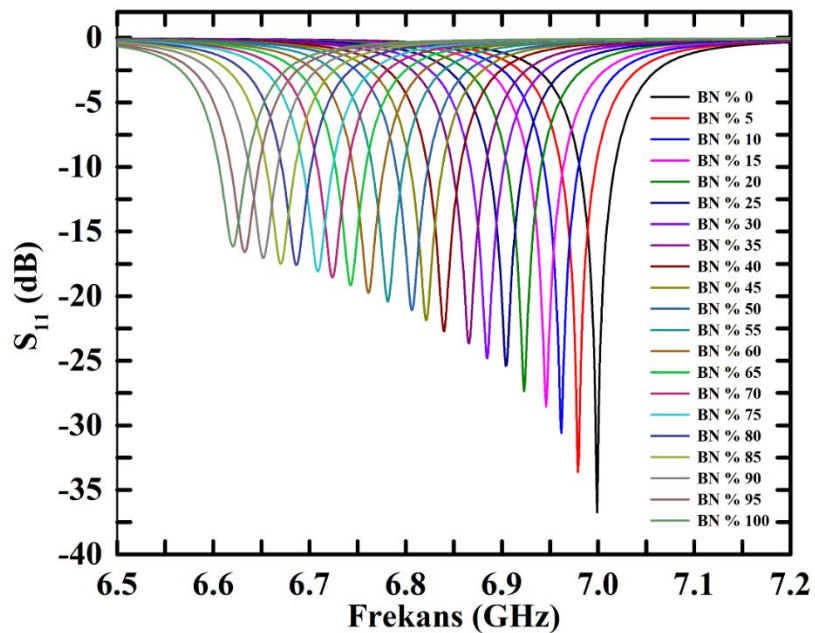
Şekil 3. Metalmalzeme sensörün birim hücrelerinin (a) ön yüzeyinde ve (b) arka bakır toprak düzlemde 7,0 GHz frekansta indüklenen yüzey akımları

Kapton HN bandın kalınlığı 0,1 mm iken 7,0 GHz frekansta rezonans oluşarak yansıma minimum hale gelmektedir. Çalışmamızın bu kısmında metalzeme üzerinde Kapton HN bant yokken ve farklı kalınlıklarda Kapton HN bant kaplı iken rezonans frekansın nasıl değiştiği incelenmiştir. Kapton HN bandın kalınlığı arttıkça metalzemenin etkin dielektrik sabiti arttığı için frekans azalmaktadır. Fakat bu artış Şekil 4’den de görüleceği üzere doğrusal değil üstel biçimindedir. Kapton HN bandın kalınlığı 0,3 mm’den daha fazla olduğunda ise frekanstaki kayma ihmal edilecek boyuta ulaşmaktadır. Bu sonuçlar ipek protein fibroin ile kaplı elektrik-LC metalzemeli yapıda ipek protein fibroinin kalınlığının artmasıyla rezonans frekansın değişim eğrisine benzer biçimdedir[16].



Şekil 4. Kapton HN bandın kalınlığına bağlı olarak rezonans frekanstaki değişim

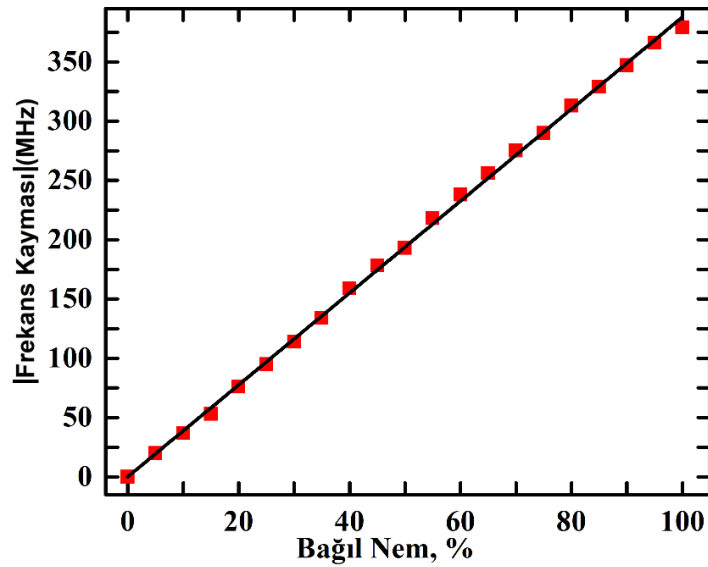
0,1 mm kalınlıkta Kapton HN bantlı soğurucu tabanlı metalzeme sensörün farklı bağıl nem oranlarında hesaplanan yansıma spektrumları Şekil 5’de gösterilmektedir. Ortamın sahip olduğu bağıl nem miktarı %0’dan %100’e kadar değişirken, rezonans frekansı 7,00 GHz’den 6,62 GHz’e kadar azalmıştır. %0’dan %100’e bağıl nem değişimi için rezonans frekansın kayma miktarı 380 MHz olarak bulunmuştur. THz frekanslarda gerçekleştirilen metalzeme tabanlı bir nem sensörü çalışmasında ara katmanda sudaki yoğunlaşmaya hassas olmasından ötürü gözenekli silikon kullanılmıştır. Gözenekli silikonda da su yoğunluğu arttıkça etkin dielektrik sabiti arttığından rezonans frekans azalış göstermektedir. Fakat bu çalışmada metalzeme sensörün bağıl nem duyarlılığı yerine kırılma indisi duyarlılığı incelenmiştir[30].



Şekil 5. Kapton HN bant ile kaplı metalzeme sensörün bağıl nem değişimine bağlı yansıma spektrumları

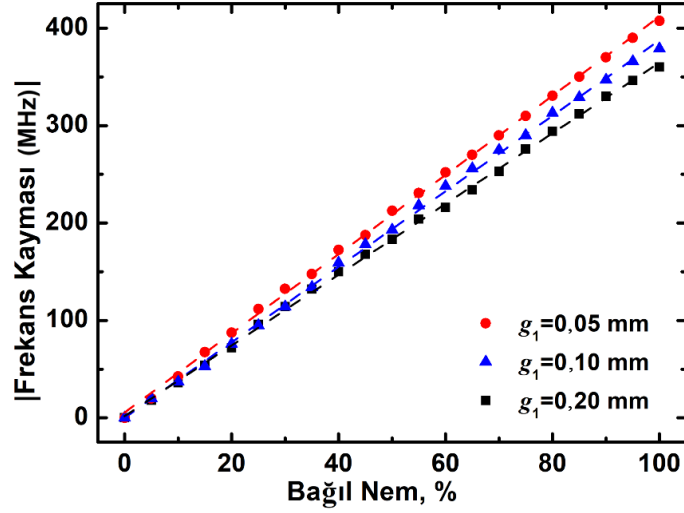
Rezonans frekansındaki kaymanın bağıl neme göre değişim sonuçları Şekil 6’da gösterilmektedir. Sensörün bağıl nem değişimini algılama yeteneğini sensörün duyarlılığı göstermektedir. Sensörün duyarlılığı bağıl nemdeki %1’lik değişime karşı rezonans frekansındaki kayma şeklinde tanımlıdır. Hesaplamalardan soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün bağıl nem duyarlılığı 3,87 MHz/BN olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değer, Kapton HN bandın sadece elektrik-LC rezonatörün ayrık kısmına konulduğu soğurucu tabanlı olmayan metamalzeme kullanılarak tasarlanan sensörün[4] bağıl nem duyarlılığından 2,3 kat daha büyüktür. Terahertz frekanslarda elektrik-LC rezonatörlü metamalzemenin yüzeyi ipek protein fibroin ile kaplanarak en fazla 0,22 GHz/%BN oranında duyarlılık elde edildiği rapor edilmiştir[16]. Bu değer çalışmamızdan daha yüksek olsa da terahertz bölgesi mikrodalga frekanslardan daha yüksek frekansta olduğundan karşılaştırma yapılabilmesi mümkün değildir. Ekmekçi vd. ayrık halka rezonatöre sahip iki alttaşın arasına bağıl nem değeri %10,5 ile %21,0 arasında değişen nohut unu yerleştirmişlerdir. Mikrodalga dalga kılavuzu kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda neme duyarlılığı 12,57 MHz/BN, deney neticesinde ise 20,76 MHz/BN olarak elde etmişlerdir[31]. Fakat nohut unu, çalışmamızdaki polimit film gibi çevresindeki neme karşı dielektrik sabiti çok hassas bir malzeme olmadığından nemli ortamda bir süre bekletilerek ortamın nemi hakkında fikir sahibi olunabilir.

Rezonans frekansındaki kaymanın bağıl nem değişimi ile doğrusal biçimde değişmesi, tasarlanan soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün uygulamalar açısından elverişli olduğunu göstermektedir. Rezonans frekans bağıl nem ile doğru orantılı biçimde değişim gösterdiğinden önerilen sensör herhangi bir ortamdaki referans ortama göre olan nem değişimini kolayca algılayabilir.



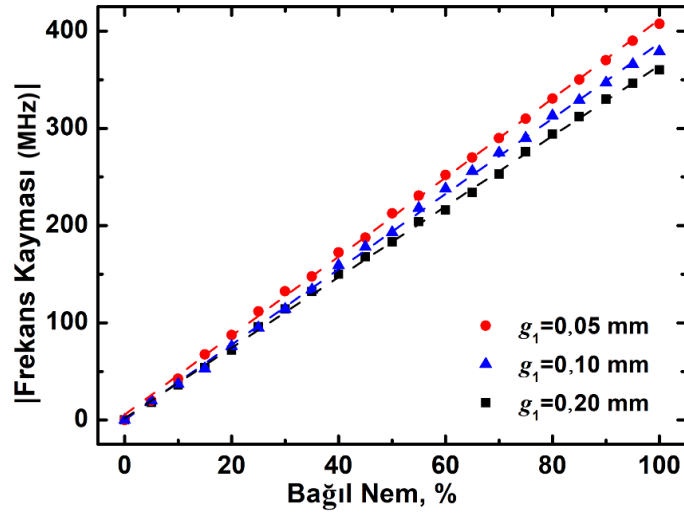
Şekil 6. Rezonans frekansındaki kaymasının bağıl nem değişimi ile ilişkisi ($g_1 = 0,10$ mm ve Kapton HN bant kalınlığı 0,10 mm)

Bu kısımda kapasitif ayrık genişliği g_1 'in soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün duyarlılığına etkisi incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda g_1 mesafesinin artırılmasının sensörün duyarlılığına negatif yönde etkisi olduğu görülmüştür. g_1 0,100 mm'den 0,125 mm'ye artırıldığında duyarlılık 3,87 MHz/BN'den 3,73 MHz/BN'ye düşmüştür. g_1 0,150 mm ve 0,200 mm olduğunda ise duyarlılık sırasıyla 3,70 MHz/BN ve 3,60 MHz/BN olarak elde edilmiştir. Öte yandan, g_1 mesafesinin azaltılmasının sensörün duyarlılığına olumlu yönde katkısı olmaktadır. g_1 değeri 0,050 mm'ye düşürüldüğünde bağıl nem duyarlılığı 4,07 MHz/BN'ye artış göstermiştir. Karşılaştırma olması açısından $g_1=0,20$ mm ve $g_1=0,05$ mm için duyarlılık grafikleri $g_1=0,10$ mm ile birlikte Şekil 7'de gösterilmiştir. g_1 aralığının azaltılması ile duyarlılığın artması, ayrık bölgede daha fazla elektrik alan enerjisinin depo edilmesine imkân tanınmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışma ile, metamalzeme tabanlı nem sensörü çalışmaları içerisinde bildiğimiz kadarıyla ilk defa metamalzemedeki rezonatörlerde rezonans frekansında ayrık alanın daraltılması ile artan elektrik alanının sensörün duyarlılığını geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Frekans kaymasının geometrik parametreler ile doğrusal olarak değişmesi de istenilir bir özelliktir.



Şekil 7. Rezonans frekans kaymasının bağıl nem değişimi ile ilişkisi

Kapton HN bandın kalınlığı 300 μm 'den fazla olduğunda rezonans frekans değişiklik göstermediğinden ötürü, band kalınlığının nem sensörünün duyarlılığına etkisini incelemek için band kalınlığı 300 μm ve $g_1=0,05$ mm iken metamalzeme sensörün bağıl nem değişimlerine karşı tepkisi incelenmiştir. Bağıl nem değişimine karşı rezonans frekansın değişim grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir. Bağıl nem oranı arttığında etkin dielektrik sabiti arttığı için rezonans frekans değeri azalmaktadır. Bağıl nem oranı %0'dan %100'e değişirken frekanstaki mutlak kayma 412,8 MHz kadar olmaktadır. Frekans kaymasının bağıl nem değişimine göre olan doğrusal fitinden duyarlılık yine 4,07 MHz/BN olarak elde edilmiştir. Bu durum Kapton HN bandın kalınlığının 0,10 mm'den 0,30 mm'ye artırılmasının bağıl nem duyarlılığına etkisinin olmadığını göstermektedir. Neme duyarlı polimit filmin kalınlığının sensörün bağıl nem duyarlılığını etkilememesi, rezonans frekansta elektrik alan ve yüzey akımlarının metamalzeme rezonatörlerinde yoğunlaşmasından ileri gelmektedir.



Şekil 8. Rezonans frekans kaymasının bağıl nem değişimi ile ilişkisi ($g_1 = 0,05$ mm ve Kapton HN bant kalınlığı 0,30 mm)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma ile sayısal yöntemler kullanılarak mikrodalga frekanslarda yüksek duyarlılıkta çalışabilen, düşük maliyetli bir bağıl nem sensörü geliştirilmiştir. Sensörün yapısında, elektrik-LC rezonatörlerden oluşan soğurucu tabanlı bir metamalzeme ve neme duyarlı ticari bir bant bulunmaktadır. Geliştirilen sensörün bağıl nem duyarlılığı 3,87 MHz/BN olarak elde edilmiştir. Metamalzeme yüzeyinde elektrik alanın yüksek oranda depolandığı bölgenin daraltılması ile duyarlılığın daha da artırılacağı ortaya

konulmuştur. Duyarlılık 4,07 MHz/BN'ye artırılmıştır. Neme duyarlı ticari olarak satın alınabilen bir polimit olan Kapton HN bandın kalınlığının 0,30 mm'ye artırılması ise metamalzeme sensörün nem duyarlılığını iyileştirmemiştir. Bu durum, metamalzeme tabanlı sensörlerde duyarlılığın metamalzeme rezonatörleri ile belirlendiği sonucunu doğurmaktadır. Geliştirilen sensör, mikrodalga frekanslarında nem algılama amaçlı kullanılabilir. Bağlı nemin insan vücudundaki biyolojik etkileşimler açısından da oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında, havadaki nem hava sıcaklığını da belirleyici bir unsurdur. Gıda maddelerinin bozunmadan muhafaza edilmesinde, arşiv odalarında, müzelerde, aşırı kuru ortamlarda oluşabilecek deformasyonun önüne geçilmesinde ortamdaki nem oranını kontrol altında tutabilmek gereklidir. Bu sebeple bağlı nem takibi son derece önemlidir. Çalışmada sunulan metamalzeme sensörü bu bakımdan ekonomik ve pratik bir çözüm olabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 117E5074 no'lu proje desteği ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] L. N. Gunawardhana, G. A. Al-Rawas, S. Kazama. (2017). An alternative method for predicting relative humidity for climate change studies. *Meteorological Applications*, 24(4), 551-559. Doi: 10.1002/met.1641
- [2] R. Dales, L. Liu, A. J. Wheeler, N. L. Gilbert. (2008). Public health: Quality of indoor residential air and health. *Canadian Medical Association Journal*, 179(2), 147-152. Doi: 10.1503/cmaj.070359
- [3] J. Shaman, M. Kohn. (2009). Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(9), 3243-3248. Doi: 10.1073/pnas.0806852106.
- [4] E. M. Amin, N. C. Karmakar, B. Winther-Jensen. (2014). Polyvinyl-alcohol (PVA)-based RF humidity sensor in microwave frequency. *Progress in Electromagnetics Research B*, 54, 149-166. Doi:10.2528/PIERB13061716.
- [5] M. Aktaş, T. Menlik, K. Boran, B. Aktekeli, Z. Aktekeli. (2014). Isı pompalı bir kurutucuda portakal kabuğu kurutulması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2(2), 229-238.
- [6] E. Ekmekçi, G. Turhan-Sayan. (2007). Investigation of effective permittivity and permeability for a novel V- shaped metamaterial using simulated S-parameters. *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 251-254.
- [7] R. Melik, E. Unal, N. K. Perkgoz, C. Puttlitz, H. V. Demir. (2009). Flexible metamaterials for wireless strain sensing. *Applied Physics Letters*, 95(18), 181105. Doi: 10.1063/1.3250175
- [8] I. Y. Abdulkarim, L. Denga, O. Altıntaş, E. Ünal, M. Karaaslan. (2019). Metamaterial absorber sensor design by incorporating swastika shaped resonator to determination of the liquid chemicals depending on electrical characteristics. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 114, 113593. Doi: 10.1016/j.physe.2019.113593
- [9] W. Zhang, J. Y. Li, J. Xie. (2018). High sensitivity refractive index sensor based on metamaterial absorber. *Progress in Electromagnetics Research M*, 71, 107-115. Doi: 10.2528/PIERM18042903.
- [10] R. Melik, E. Unal, N. K. Perkgoz, C. Puttlitz, H. V. Demir. (2009). Flexible metamaterials for wireless strain sensing. *Applied Physics Letters*, 95(18), 3-5. Doi: 10.1063/1.3250175
- [11] R. Melik, E. Unal, N. K. Perkgoz, B. Santoni, D. Kamstock, C. Puttlitz, H. V. Demir. (2010). Nested metamaterials for wireless strain sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 16(2), 450-458. Doi: 10.1109/JSTQE.2009.2033391

- [12] X. Yang, D. Zhang, S. Wu, Y. Yin, L. Li, K. Cao, K. Huang. (2017). Reconfigurable all-dielectric metasurface based on tunable chemical systems in aqueous solution. *Scientific Reports*, 7, 3190. Doi: 10.1038/s41598-017-03439-9
- [13] G. Kiti, V. Radoni, V. Crnojevi-Bengin. (2012). Soil moisture sensors based on metamaterials. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 34(6), 689-693.
- [14] Z. Chen, M-C. Jin, C. Zhen. (1990). Humidity sensors with reactively evaporated Al_2O_3 films as porous dielectrics. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2(3), 161-171. Doi: 10.1016/0925-4005(90)85001-F
- [15] G. Garcia-Belmonte, V. Kytin, T. Dittrich, J. Bisquert. (2003). Effect of humidity on the AC conductivity of nanoporous TiO_2 . *Journal of Applied Physics*, 94, 5261-5264. Doi: 10.1063/1.1610805
- [16] H. S. Kim, S.H. Cha, B. Roy, S. Kim, Y.H. Ahn. (2018). Humidity sensing using THz metamaterial with silk protein fibroin. *Optics Express*, 26(26), 33575-33581. Doi: 10.1364/OE.26.033575
- [17] Kapton Polyimide Film, [Online]. Mevcut: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kapton> [Erişim: 10 Mart 2020].
- [18] J. Virtanen, L. Ukkonen, T. Björninen, A. Z. Elsherbeni, L. Sydänheimo. (2011). Inkjet-printed humidity sensor for passive UHF RFID systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(8), 2768. Doi: 10.1109/TIM.2011.2130070
- [19] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, W. J. Padilla. (2008). Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100, 207402. Doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402
- [20] D. Schurig, J. J. Mock, D. R. Smith. (2006). Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials. *Applied Physics Letters*, 88, 041109. Doi: 10.1063/1.2166681
- [21] W. Withayachumnankul, C. Fumeaux, D. Abbott. (2010). Compact electric-LC resonators for metamaterials. 18, 25912-25921. Doi: 10.1364/OE.18.025912
- [22] M. W. Zayed, M. Shafuzzaman, M. O. Goni. (2014). ELC resonator based narrow band metamaterial absorber. *Proceedings of the 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering*, 564-567. Doi: 10.1109/ICECE.2014.7026986
- [23] S. Fallahzadeh, K. Forooghi, Z. Atlasbaf. (2012). A polarization-insensitive metamaterial absorber with a broad angular band. *Proceedings of the 20th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 1540-1543. Doi: 10.1109/IranianCEE.2012.6292603
- [24] D. H. Luu, N. V. Dung, P. Hai, T. T. Giang, V. D. Lam. (2016). Switchable and tunable metamaterial absorber in THz frequencies. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1, 65-68. Doi: 10.1016/j.jsamd.2016.04.002
- [25] J. Zhou, E. N. Economou, T. Koschny, C.M. Soukoulis. (2006). Unifying approach to left-handed material design. *Optics Letters*, 31(24), 3620-3622. Doi: 10.1364/OL.31.003620
- [26] A. Dhouibi, S. N. Burokur, A. Lustrac, A. Priou. (2012). Study and analysis of an electric Z-shaped meta-atom. *Advanced Electromagnetics*, 1(2), 64-70. Doi: 10.7716/aem.v1i2.82
- [27] A. Ebrahimi, W. Withayachumnankul, S. F. Al-Sarawi, D. Abbott. (2014). Dual-mode behavior of the complementary electric-LC resonators loaded on transmission line: Analysis and applications. *Journal of Applied Physics*, 116(8), 1-7. Doi: 10.1063/1.4893751
- [28] H. Li, L. H. Yuan, B. Zhou, X. P. Shen, Q. Cheng, T. J. Cui. (2011). Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers. *Journal of Applied Physics*, 110(1), 014909. Doi: 10.1063/1.3608246

- [29] H. Tao, C. M. Bingham, A. C. Strikwerda, D. Pilon, D. Shrekenhamer, N. I. Landy, K. Fan, X. Zhang, W. J. Padilla, R. D. Averitt. (2008). Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization. *Physical Review B*, 78, 241103. Doi: 10.1103/PhysRevB.78.241103
- [30] B. Ni, Z.Y. Wang, R. S. Zhao, X. Y. Ma, Z. Q. Xing, L. S. Yang, L. J. Huang, Y. Y. Lin, D. B. Zhan. (2017). Realisation of a humidity sensor based on perfect metamaterial absorber. *Optical and Quantum Electronics*, 49, 33. Doi: 10.1007/s11082-016-0858-6
- [31] E. Ekmekci, U. Kose, A. Cinar, O. Ertan, Z. Ekmekci. (2019). The use of metamaterial type double-sided resonator structures in humidity and concentration sensing applications. *Sensors and Actuators A: Physical* 297, 111559. Doi: 10.1016/j.sna.2019.111559