



# **Metamalzemeler ile Çok Yönlü Özgün Entegre Sensör Uygulamaları ve Tasarımları**

**Program Kodu: 3001**

**Proje No: 114E295**

**Proje Yürütücüsü:  
Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL**

**Araştırmacı(lar):**

Doç.Dr.Muharrem KARAASLAN

Doç.Dr.Emin ÜNAL

Doç.Dr.Furkan DİNÇER

Yrd.Doç.Dr.Zafer ÖZER

**Bursiyer(ler):**

Selda CANBAZ

Olcay ALTINTAŞ

Elif Eda DALKILINÇ



## ÖNSÖZ

Bu projede metamatzemeler kullanılarak özgün sensör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Sensör tasarımlarının bir kısmı sinyal emici özelliklere de sahiptir. U şekilli frekans seçici yüzey sensör tasarımı yoğunluk sensörü olarak kullanımı gerçekleştirilmiştir. Bakımsız özelliklerine sahip farklı geometrik özellikli metamatzemeler sıcaklık sensörü olarak kullanılmıştır. Ayrıca bakımsız yokluk özelliğine sahip yapılar basınç, nem ve sıcaklık sensörleri olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada frekans seçici yüzey tabanlı metamatzeme olarak U şekilli yapılar, bakımsız metamatzeme sensör uygulamaları için iç içe karelerin ön ve arka yüzeyde birbiri ile açılı yerleştirilmesi ile elde edilmiş yapılar, bakımsız yokluk tabanlı sensör uygulamaları için ise ön ve arka yüzeye  $90^\circ$  ile yerleştirilmiş gamalı haç yapılar kullanılmıştır. Kullanılan bütün yapılar, amacı gerçekleştirecek özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiş ve bu amaçlara uygun sensör tasarımları için uygun frekans aralıklarında dizayn edilmiştir. Proje 114E295 kodu ile Tübitak tarafından desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER VE TABLOLAR.....	iv
ŞEKİLLER.....	iv
TABLOLAR.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	6
3.1 Sinyal Emici Tabanlı U-Şekilli Frekans Seçici Yüzey Sensör Tasarımı.....	6
3.2 Periyodik Sınır Koşullarında İletim Katsayıları.....	7
3.3 Dalga Kılavuzu Sınır Koşullarında İletim Katsayıları.....	8
3.4 İletim Katsayılarının Yapı Boyutlarına Göre Elde Edilmesi.....	9
3.5 Elektrik Alan Dağılımının ve Yüzey Akım Yoğunluğunun Elde Edilmesi.....	11
3.6 Geliş Açısının İletim Parametreleri Üzerindeki Etkisi.....	12
3.7 Biyosensör Tasarımı.....	13
3.8 Bakımsız Yokluk Tabanlı Metamalzeme Sensör Tasarımı.....	15
4. BULGULAR VE SONUÇ.....	20
4.1 U-Şekilli Frekans Seçici Yüzey Sensör Uygulamaları.....	20
4.2 Biyosensör Uygulamaları.....	24
4.3 Bakımsız Yokluk Tabanlı Metamalzeme Sensör Uygulamaları.....	32
4.3.1 Bakımsız Yokluk Tabanlı Metamalzeme Basınç Sensörü.....	32
4.3.2 Bakımsız Yokluk Tabanlı Yoğunluk Sensörü.....	33
4.3.3 Bakımsız Yokluk Tabanlı Sıcaklık Sensörü.....	37
4.3.4 Bakımsız Yokluk Tabanlı Nem Sensörü.....	39
KAYNAKLAR.....	42

## ŞEKİLLER VE TABLOLAR

### ŞEKİLLER

Şekil 3.1. Sinyal emici tabanlı U şekilli frekans seçici yüzey sensör uygulaması için yapılan tasarımlar (a) tek elemanlı birim hücre, (b) iki elemanlı birim hücre, (c) dört elemanlı birim hücre.....	6
Şekil 3.2. Sinyal emici tabanlı U şekilli frekans seçici yüzey sensör uygulaması için PCB cihazında üretilen yapılar.....	7
Şekil 3.3. TE ve TM dalga polarizasyon modunda nümerik ve deneysel iletim katsayı değerleri (a) tek, (b) çift, (c) dört U-şekilli yapı.....	8
Şekil 3.4. Dalga kılavuzu sınır koşullarında iletim katsayısı değerleri (a) tek, (b) çift, (c) dört U-şekilli FSY yapısı.....	9
Şekil 3.5. d7 parametresinin iki U-şekilli FSY iletim katsayısı üzerindeki etkisi.....	10
Şekil 3.6. d10 parametresinin dört U-şekilli FSY iletim katsayısı üzerindeki etkisi.....	11
Şekil 3.7. (a) Tek, (b) çift, (c) dört U-şekilli FSY yapılarının rezonans frekansı noktalarındaki elektrik alan dağılımları ve yüzey akım yoğunlukları.....	12
Şekil 3.8. TE dalga polarizasyonu modunda farklı geliş açılarına göre nümerik ve deneysel elde edilen iletim katsayıları (a) tek, (b) çift, (c) dört U-şekilli FSY yapısı.....	13
Şekil 3.9. Büyük bakışimsızlık tabanlı sensör uygulaması için tasarlanan yapı, (a) boyutlar, Birinci yapı için birim hücre boyutları, (b) büyük bakışimsızlık tabanlı tasarlanan yapının perspektif görünüşü.....	14
Şekil 3.10. Küçük bakışimsızlık tabanlı sensör uygulaması için tasarlanan yapı, (a) boyutlar, Birinci yapı için birim hücre boyutları, (b) küçük bakışimsızlık tabanlı tasarlanan yapının perspektif görünüşü.....	14
Şekil 3.11. sıfır bakışimsızlık tabanlı sensör uygulaması için tasarlanan yapı, (a) boyutlar, Birinci yapı için birim hücre boyutları, (b) sıfır bakışimsızlık tabanlı tasarlanan yapının perspektif görünüşü.....	15
Şekil 3.12. Algılayıcı uygulaması için Gamalı haç tabanlı rezonatörler kullanılarak geliştirilen yapı ve detaylı ölçüleri.....	16
Şekil 3.13. Bakışimsız yokluk tabanında tasarlanan metamalzeme yapısı, (a)simülasyon ve sınır koşullarının yerleşimi, (b)5x5 şeklinde baskı devresine çıkarılmış durum, (c) Deneysel kurulum görüntüsü.....	17
Şekil 4.1. Deneysel çalışma ortamı (a) periyodik üretilmiş bir U şekilli yapı (b) dalga kılavuzu ölçüm ortamı (c) dalga kılavuzu ölçümleri için üretilmiş U şekilli yapılar.....	20
Şekil 4.2. Tek U şekilli FSY yapısı (a) sinyal emici uygulaması (b) sensör uygulaması.....	21
Şekil 4.3. Teorik, nümerik ve deneysel sinyal emilim değerleri ve frekansları (a) tek, (b) çift, (c) dört U şekilli sinyal emici tabanlı FSY.....	22
Şekil 4.4. (a) Farklı tip Arlon malzemelerin yoğunluk sensörü olarak kullanılması durumunda elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlar, (b) Farklı yoğunluklarda un malzemesinin sensör tabakasına yerleştirilmesi durumunda elde edilen iletim katsayısının nümerik sonuçları.....	24
Şekil 4.5. Büyük bakışimsızlık özelliğine sahip elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıklarına göre yansıma katsayısı değerleri.....	25
Şekil 4.6. Küçük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile yansıma katsayısı değerleri.....	25
Şekil 4.7. Sıfır bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile yansıma katsayısı değerleri.....	26
Şekil 4.8. Büyük bakışimsız özellikli yapı için 7 GHz' de ve 30 °C kemik iliği için analiz edilen elektrik alan dağılımının yapının ön ve arkayüzünden görünüş grafiği.....	26
Şekil 4.9. Büyük bakışimsız özellikli yapı için 7 GHz' de ve 30 °C kemik iliği için analiz edilen yüzey akım dağılımının yapının ön ve arkayüz üzerindeki görünüşü.....	27

Şekil 4.10. Büyük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile iletim katsayısı değerleri değişimi.....	27
Şekil 4.11. Küçük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile iletim katsayısı değerleri değişimi.....	28
Şekil 4.12. Sıfır bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile iletim katsayısı değerleri değişimi.....	28
Şekil 4.13. Büyük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli yapı için nümerik olarak elde edilen bakışimsızlık değeri.....	29
Şekil 4.14. Küçük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli yapı için nümerik olarak elde edilen bakışimsızlık değeri.....	29
Şekil 4.15. Sıfır bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli yapı için nümerik olarak elde edilen bakışimsızlık değeri.....	30
Şekil 4.16. Elmas şekilli yapılardan büyük bakışimsızlık tabanlı yapının farklı kemik iliği sıcaklığı algılanması için biyosensör uygulaması olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan rezonans frekansları değerleri değişimi.....	31
Şekil 4.17. Elmas şekilli yapılardan küçük bakışimsızlık tabanlı yapının farklı kemik iliği sıcaklığı algılanması için biyosensör uygulaması olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan rezonans frekansları değerleri değişimi.....	31
Şekil 4.18. Elmas şekilli yapılardan sıfır bakışimsızlık tabanlı yapının farklı kemik iliği sıcaklığı algılanması için biyosensör uygulaması olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan rezonans frekansları değerleri değişimi.....	32
Şekil 4.19. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün algılama katmanının kalınlığına göre rezonans değişimini veren nümerik ve deneysel yansıma katsayısı verileri.	33
Şekil 4.20. Önerilen Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün basınç algılama uygulamasında oluşan (a) 0.5mm (b) 2.5mm' deki epsilon, mu ve bakışimsızlık değeri.....	33
Şekil 4.21. Farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörünün yoğunluk sensörü uygulamasının nümerik ve deneysel sonuçlarının gösterilmesi.....	35
Şekil 4.22. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzemesensörün yoğunluk sensörü olarak kullanıldığında (a) AD 25N için epsilon, mu ve bakışimsızlık değeri, (b) AD 450 için epsilon, mu ve kırılma indisi verileri.....	35
Şekil 4.23. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzemesensörün un yoğunluğu tespiti için kullanımı (a) farklı un yoğunluklarına göre rezonans frekansı değerleri (b) un yoğunluğundaki artışa göre rezonans frekansı ve elektrik geçirgenliği değerlerinin değişimi.....	36
Şekil 4.24. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzemesensörün yoğunluk sensörü olarak kullanıldığında farklı yoğunluklardaki buğday unu için epsilon( $\epsilon$ ), mu( $\mu$ ) ve bakışimsızlık( $\epsilon$ ) değerleri (a) $0.4 \text{ gr/cm}^3$ , (b) $0.8 \text{ gr/cm}^3$ , (c) $1.2 \text{ gr/cm}^3$ .....	37
Şekil 4.25. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzemesensörün kemik iliği sıcaklığı tespitinde kullanımı (a) sıcaklık değişiminin sensörün yansıma katsayısına etkisi, (b) sıcaklık, rezonans frekansı ve elektrik geçirgenliği arasındaki bağlantı.....	38
Şekil 4.26. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzemesensörün sıcaklık sensörü olarak kullanıldığında farklı sıcak değerleri için epsilon( $\epsilon$ ), mu( $\mu$ ) ve bakışimsızlık( $\epsilon$ ) değerleri (a) $30^\circ\text{C}$ , (b) $70^\circ\text{C}$ , (c) $90^\circ\text{C}$ ,.....	39
Şekil 4.27. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzemesensörün kauçuk lateks nem oranı tespiti için kullanımı (a) nem değişimi ile sensörün yansıma katsayısına etkisi, (b) nem yüzdesine bağlı olarak rezonans frekansı ve dielektrik sabitinin değişimi.....	40
Şekil 4.28. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzemesensörün nem sensörü olarak kullanıldığında farklı nem değerleri için epsilon( $\epsilon$ ), mu( $\mu$ ) ve bakışimsızlık değerleri( $\epsilon$ ) (a) $45\%$ , (b) $65\%$ , (c) $85\%$ ,.....	41

## TABLolar

Tablo 3.1. Şekil 3.1.'de Sinyal emici tabanlı U şekilli frekans seçici yüzey sensör uygulaması için belirlenen boyutlar (mm) 6

Tablo 4.1.Sinyal emici tabanlı U şekilli FSY yapıları için elde edilen sinyal emilim değerleri 21

Tablo 4.2. U şekilli FSY yapısının un yoğunluğuna göre elde edilen rezonans frekansı değişimleri 23

## ÖZET

MTM'ler doğada bulunmayan, negatif kırılma gibi ayrıcalıklı ve egzotik özelliklere sahip periyodik yapıda tasarlanmış EM malzemelerdir. MTM'lerin sunmuş olduğu en önemli özelliklerinden birisi, EM dalganın polarizasyonunu değiştirerek optiksel etkinliği ve aktiviteyi sağlamasıdır. Böylece EM dalganın istenilen şekilde yönlendirilmesi, polarize edilmesi ve kontrol edilebilmesi gerçekleştirilebilmektedir.

Günümüzde MTM'ler ile görünmezlik pelerini (cloaking), süper lens, anten, kalkanlama (absorber) ve sensör gibi savunma sanayi için büyük önem arz eden çalışmalar yapılabilmektedir. Ayrıca MTM'lerin bu ve benzeri uygulamalar için pratik olarak çok sayıda avantaj sunduğu (EM özelliklerinin kullanılması ile) bilim insanlarınca kanıtlanmıştır.

Bu proje kapsamında ise MTM ile tek bir yapıda hem yoğunluk sensörü (hassasiyet oranı, %99) hem de mükemmel sinyal emilimi (%99) gerçekleştirebilen entegre bir algılayıcının tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. MTM'lerin doğada bulunan malzemelere entegrasyonu ile sunmuş olduğu optiksel aktivite, polarizasyon kontrolü, elektrik alan ve manyetik alan arasında cross-coupling (çapraz-etkileşim) etkisi gibi EM özellikler MTM'li malzemelerin yüksek verim ve kazanç değerine sahip olmasını sağlamaktadır. MTM'lerin bu özelliklerinin kullanımı ile yüksek hassasiyete sahip bir entegre algılayıcının tasarlanması gerçekleştirilmiştir. Çünkü MTM'lerin gösterdiği egzotik EM özellikler ile algılayıcıda kazanç, hassasiyetinin artırılması, elektriksel yapı boyutlarının azaltılması gibi birçok önemli avantajlar elde edilebilmektedir.



## ABSTRACT

MTMs are EM materials that are not found in nature and are designed for periodic construction with exclusive and exotic features such as negative refraction. One of the most important features that MTMs offer is that they change the polarization of the EM waveguide to provide optical activity and activity. Thus, the EM waveguide can be directed, polarized and controlled in any desired manner.

Nowadays MTMs can be used for defense industry such as cloaking, super lens, antenna, absorber and sensor. It has also been proven by scientists that MTMs offer a number of practical advantages for these and similar applications (with the use of EM features).

Within the context of this project, the design and production of an integrated sensor, which can achieve both density sensor (sensitivity ratio, 99%) and excellent signal absorption (99%) in a single structure with MTM. MT features such as optical activity, polarization control, cross-coupling effect between the electric field and the magnetic field, which MTMs offer with the integration of the materials found in the nature, provide MTM materials with high efficiency and gain value. The use of these features of MTMs has led to the design of an integrated sensor with high sensitivity. Because of the exotic EM properties that MTMs show, there are many important advantages such as gain in sensor, increase sensitivity, and reduce the size of electrical structure.



## 1. GİRİŞ

Elektromanyetik açıdan metamalzemeler doğada bulunmayan sıra dışı özelliklere sahip etkin homojen elektromanyetik yapılar olarak tanımlanabilir. Kılavuzlanan dalga boyundan daha küçük boyutlara sahip hücrelerden oluşur. Bu hücreler genellikle periyodik şekilde düzenlenmiştir. Yapısal parametreler  $\epsilon$  ve  $\mu$  kırılma indisini oluşturur.

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Burada  $\epsilon_r$  ve  $\mu_r$  sırasıyla bağıl elektrik ve manyetik geçirgenlikler olup havanın elektrik ve manyetik geçirgenliği ile ilişkilidir. Bu iki parametrenin işaret değişimlerinde dört durum gözlenmektedir. Bunlardan her ikisinin negatif (-,-) olma durumu hariç diğer durumlar doğadaki maddelerde bulunmaktadır. Fakat her ikisinin eş zamanlı negatif olma durumu yeni tür malzemelere karşılık gelmekte ve bu malzemeler Metamalzemeler olarak adlandırılmakta ve negatif kırılma indisine sahip olmaya imkân tanımaktadır.

1967 yılında Veselago'nun yaptığı teorik çalışmaya kadar, kayıpları açıklamak için kompleks olarak belirtilen kırılma indisinin negatif olabileceği mümkün görülmemiş ve buna dair herhangi bir çalışma yapılmamıştı. Veselago elektrik ve manyetik geçirgenlik parametrelerinin belirlenen bir frekans aralığında eş zamanlı negatif olması durumunda negatif bir kırılma indisine sahip olunabileceğini teorik olarak ispatlamıştır. Ne yazık ki bu çalışmayı destekleyecek ve doğrulayacak deneysel herhangi bir çalışma 1990'lı yılların ortalarına kadar yapılmamıştır. Pendry ve ark. 1996 yılında deneysel bir çalışma gerçekleştirerek Veselago'nun teorik çalışmasını bir adım öteye götürüp, negatif kırılma indisinin elde edilebileceğini deneylerinde göstermişlerdir. Daha sonrasında, bu tür malzemelere ilgi giderek artmış ve Smith ve ark. ve Sehlby ve ark. 2000'li yıllarda çeşitli deneysel çalışmalarla hem elektrik ve hem de manyetik geçirgenliğin eş zamanlı negatif olabildiğini doğrulamıştır.

Giderek artan metamalzeme çalışmalarına paralel olarak yeni birçok uygulama alanı ortaya çıkmış ve bu doğrultuda tarım, tıp, askeri sanayiden uzay teknolojilerine kadar birçok alanda yüksek verimli ürünler oluşturmaya ışık tutacak çalışmalar yapılmaktadır. Bu önemli alanlardan biri de algılama uygulamaları olup bu proje kapsamında, metamalzemeleri kullanarak tek bir yapı içerisinde çok yüksek hassasiyet oranına sahip yoğunluğu



algılayabilen sensör hem de mükemmel sinyal emilimine imkan veren bir yapı tasarlanmış ve üretilerek deneysel çalışmalarla tasarımı doğrulanmıştır.

Algılayıcı sensör yapılarının analitik ve deneysel çalışmaları proje kapsamında gerçekleştirilmiş ve SCI kapsamındaki çeşitli dergilerde yayınlara dönüştürülmüştür. Yüksek verimli algılayıcı tasarımları ile ilerideki çalışmalara ışık tutulmuş ve bu şekilde literatüre katkıda bulunulmuştur.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kırılma indisinin, kayıpları açıklamak için kompleks bir ifade şeklinde belirtilmesi, hatta yön bağımlı malzemeleri tanımlarken bir tensör olarak ifade edilmesi gerekirken, işaretinin negatif olabileceği hiç sorgulanmamıştır. 1968 yılında, Veselago, her iki EM makroskobik parametrenin belirli bir frekans aralığında negatif olması durumunda, ortamın negatif kırılma indisine sahip olabileceğini teorik olarak ortaya koymuştur. Veselago, farazi olan bu ortam için, terslenmiş kırılma Snell kanununu, ters Doppler etkisini ve zıt Cerenkov yayılımlarını ortaya koymasına rağmen, bu çalışması, doğada böyle bir ortam olmadığından uzun yıllar ilgi görmemiştir. Fakat 2000'li yıllar civarında, ortamın EM özelliklerini negatif olarak elde etmek için ortaya konulan teorik çalışmalar deneysel olarak gerçekleştirilmiş (Pendry ve ark. 1996, Pendry ve ark. 1999, Smith ve ark. 2000, Shelby ve ark. 2001) ve tüm bu çalışmalarda Veselago'nun (1968) farazi bir ortam için ortaya koyduğu sonuçlar hayata geçirilmiş, doğrulanmış ve bu malzemeler MTM olarak adlandırılmıştır.

Bütün negatif kırılma indisli MTM'ler, tamamı negatif ( $\epsilon - \mu$ ) özelliklerine sahip iki ayrı yapı kullanılarak üretilmektedir. Bu çiftin negatif özelliğinden dolayı bu ortam içerisine giren EM dalgaların faz ve grup hızları zıt yönde ilerlemektedir. Çünkü MTM'ler; doğada bulunmayan, negatif kırılma gibi ayrıcalıklı ve ekzotik özelliklere sahip periyodik yapıda tasarlanmış EM malzemelerdir (Pendry ve ark. 1996, Pendry ve ark. 1999, Smith ve ark. 2000, Shelby ve ark. 2001). MTM'ler; pelerin (Pendry ve ark. 2006), radara yakalanmama (Dincer ve ark. 2013), ışına örüntüsü yüksek verimli anten (Li ve ark. 2012), mükemmel lens (Fang ve ark. 2005), sensör (Sabah ve Roskos 2012) vs. gibi sayılamayacak kadar birçok önemli potansiyel uygulama alanlarına sahiptirler. Bu tip malzemeler insan yapımı olduklarından ötürü istenilen frekansta (MHz (Wiltshire ve ark. 2001), GHz (Smith ve ark. 2000), sub-THz (Gokkavas ve ark. 2006), THz (Yen ve ark. 2004), sub-PHz (Linden ve ark. 2004), near-IR (Zhang ve ark. 2005), optik (Dolling ve ark. 2007)) tasarlanabilmektedirler.

MTM'lerin en önemli özelliklerinden birisi, EM dalganın polarizasyonunu değiştirerek optiksel etkinliği ve aktiviteyi sağlamasıdır (Ye ve He 2010, Li ve ark. 2010, Aydın ve ark. 2008). Böylece EM dalganın istenilen şekilde polarizasyonu gerçekleştirilebilmektedir.

MTM'lerin sahip olduğu bu ayrıcalıklı EM özelliklerin bahsedilen potansiyel uygulama alanlarına entegrasyonu ile malzemelerde önemli kazançlar elde edildiği literatürdeki son yıllarda yapılan çalışmalar ile sabittir. MTM uygulamalarının uzun bir geçmişe sahip olmaması ve son yıllarda yapılan çalışmalar ile savunma sanayi için önemli düzeyde potansiyel oluşturması bilim insanlarının bu malzemelere olan ilgisini arttırmıştır.

Literatürdeki çalışmalar tarandığında MTM'lerin algılayıcı uygulamalarına entegrasyonu ile ilgili geçmiş yıllara ait çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak genel ve bilinen, klasik geometrik yapılara sahip MTM yapılarının sensör uygulamalarına entegrasyonu şeklinde gerçekleştirilmektedir (Sabah ve Roskos 2012, Sabah ve Roskos 2013, Fabio ve ark. 2013, Melik ve ark. 2009a, Melik ve ark. 2009b, Yang ve ark. 2013, Withayachumnankul ve ark. 2013, Chen ve ark. 2012, Melik ve ark. 2010a, Melik ve ark. 2010b, He ve ark. 2011, Huang ve ark. 2009a, Taya ve ark. 2009, Yang ve ark. 2010, Huang ve Yang 2011, He ve ark. 2010, Withayachumnankul ve ark. 2011, Schueler ve ark. 2012, Niu ve ark. 2011a, Niu ve ark. 2011b, Niu ve ark. 2012, Yang ve ark. 2011, Huang ve ark. 2011, Huang ve ark. 2009b, Yang ve ark. 2012, Reinhard ve ark. 2012, Puentes ve ark. 2011).

Ek olarak; MTM tabanlı algılayıcıların algılama hassasiyetini ve kazancı arttırdığı çalışmalar literatürde mevcuttur. Kaynakları verilen bu çalışmalara olabildiğince değinilmiştir. Literatürce bu bulgu sabittir. Literatürde büyük çoğunlukla hatta saygın dergilerde yayınlanan sensör çalışmalarının önemli bir kısmı dahi SRR (ayrık halka rezonatör) tabanlıdır (Ekmekci ve Sayan 2013, Tao ve ark. 2010, Xu ve ark. 2011, He ve ark. 2011, Driscoll ve ark. 2007, Melik ve ark. 2009a, Melik ve ark. 2009b, Melik ve ark. 2010a, Melik ve ark. 2010b, Chang ve ark. 2010, Jeppesen ve ark. 2010, Pryce ve ark. 2011). Literatürdeki bu çalışmalara ek olarak güncel bir çalışmada da MTM tabanlı SRR geometri ile elektriksel büyüklüğü azaltılmış, rezonans frekans değerinde hassaslığı artırılmış algılayıcı tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir (Ekmekci ve Sayan 2013). Literatür çalışmalarından da sabit olan bu bulgular proje kapsamı altında detaylı olarak değerlendirilmiş olup proje çalışması ile yapılacak klasik SRR geometrilerinden farklı olarak, projenin özgün değerlerinden birini oluşturan kolay fabrikasyon özelliğine sahip, hem sinyal emici (absorber) hem de yoğunluk ölçümü gerçekleştirebilecek çok yönlü entegre sensör tasarımı ve üretimi sağlanacaktır. Bu tasarımda MTM'nin sunmuş olduğu EM özelliklerinin eş zamanlı olarak negatif olmasından dolayı yapının, algılayıcıyla ve dış ortam (hava) ile empedans uyumuna daha geniş bir bant aralığında girmesi sağlanarak daha hassas bir algılama sistemi ortaya koyulmaktadır. Çünkü yeni düzlemsel MTM'ler eş zamanlı negatif dielektrik sabiti (permittivity) ve manyetik geçirgenlik (permeability) değerine sahip olabilmektedir. MTM yapılarının klasik malzemelere göre bu konuda üstünlükleri bilinen bir gerçektir. Son yıllarda yapılan algılayıcı ile ilgili literatür çalışmalarından bazıları;

Melik ve ark. (2009a), MTM tabanlı SRR-esnek kablosuz gerilme ölçümü yapabilen bir sensör tasarımı ve üretimi gerçekleştirmişlerdir. Kapton tape ve silikon alttaşı için karşılaştırma yapmışlardır. Elde edilen bulgular sonucunda tape tabanlı alttaşına entegre sensör ile hassaslık seviyesi 0.292 MHz/kgf değerine kadar geliştirilmiş ve 250 kgf yükten

daha fazla ağırlıkları %3 hata payı ile ölçebilmişlerdir. Geleneksel gerilme ölçüm sensörlerine göre 6 kat daha hassas ve 16 kat daha az hata payı değerlerine ulaşmışlardır. Ayrıca Melik ve ark.'nın (2009a, 2009b, 2010a ve 2010b) çok sayıda sensör uygulama çalışmaları mevcuttur. Çalışmalarının ortak özelliği SRR yapılarını kullanmasıdır.

Withayachumnankul ve ark. (2013) MTM tabanlı SRR-mikro akışkan ölçümü yapabilen bir sensör tasarımı ve üretimi gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmadaki elde ettikleri bulgular; mikrokanaaldan sıvı akışının gerçekleştiği bölgede alan değişimi meydana gelmesi ve bu durumda rezonans frekansının değişmesi, rezonans frekansı ve bant genişliği, sıvı örneğinin kompleks dielektrik değerinden etkilenmesi, algılayıcının rezonansı ile sıvı örneğinin dielektrik değeri arasındaki deneysel ilişki ile sıvı örneklerinin kompleks dielektrik değerlerinin tahmin edilebilmesi, şeklindedir.

Ekmekci ve Sayan (2013), çok fonksiyonlu, elektriksel büyüklüğü geleneksel MTM sensörlerine göre azaltılmış ve hassaslığı artırılmış bir sensör yapısı tasarlamış ve üretmişlerdir. Çalışmalarını X-band dalga kılavuzu içerisinde gerçekleştirmiş olup yapı ölçüleri de ayarlanarak THz frekanslarında da benzer işlevlerin gerçekleştirilebileceğini belirtmişlerdir. Yaptıkları sensörün kimyasal, biyolojik ve basınç ölçümlerinde efektif olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarını iki farklı ölçüm kategorisi şeklinde tasarlamışlardır. İlk olarak yapılarının elektriksel özelliklerinin değiştirmişler ve bunun frekans cevabını karşılaştırarak yorumlamışlar ve yapıları arasına hava tabakası yerleştirerek bunun basınç sensörü için kullanılabileceğini göstermişlerdir. İkinci kategoride ise sıcaklık, nem, yoğunluk gibi çevresel faktörlerin değişim tepkilerini tasarladıklarını SRR tabanlı sensör ile incelemişlerdir.

Son yıllarda sinyal emici ile ilgili de çok sayıda çalışma yapılmıştır (Dincer ve ark. 2013, Lee ve Lim 2011, Wang ve ark. 2009, Zhu ve ark. 2010, Landy ve ark. 2008, Park ve ark. 2013, Bilotti ve ark. 2006). Literatürde yapılan tüm bu çalışmalar taranmıştır. Bunlardan bazıları; Lee ve Lim (2011) çift rezonansın sağlanması ile band genişliği artırılmış bir mikrodalga sinyal emici sunmuşlardır. Çift rezonansın elde edilmesi önceki MTM'li sinyal emici çalışmalarına göre bant genişliğinin daha fazla olmasını sağlamıştır. Tasarladıkları MTM'li sinyal emici, ince kalınlıklı bir konfigürasyona sahip olup farklı polarizasyon açılarına da bağımlı değildir. Ölçüm yaptıkları horn anteni  $0^0$ 'den  $90^0$ 'ye kadar  $10^0$ 'lik adımlar ile döndürmüşlerdir.  $9.75\text{ GHz}$ 'de ve  $10.3\text{ GHz}$ 'de %98'in üzerinde üzerinde bir emilim değerine ulaşmışlardır. Fakat yaptıkları çalışmada  $40^0$ ,  $50^0$ ,  $70^0$  ve  $80^0$  için grafikler verilmemiştir. Bundan dolayı bu değerler için yapının tam olarak polarizasyon açısı bağımsız olarak çalışmadığı kanaati uyanmaktadır.

Wang ve ark. (2009) nümerik ve deneysel olarak bakışimsız MTM tabanlı sinyal emici çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile farklı polarizasyon açıları ve gelen açısı (

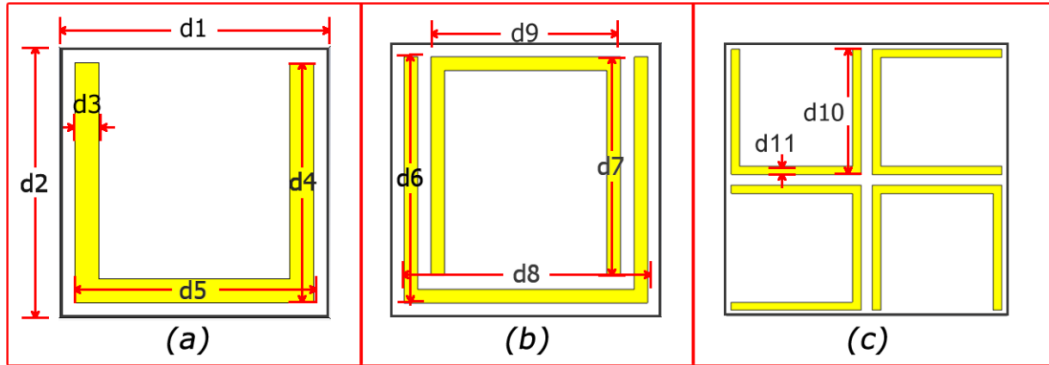
*TE*, *TM*) durumlarından bağımsız çok iyi bir sinyal emici tasarlamışlardır. Yalnız farklı açı değerleri için simülasyonda  $0^0$ 'den  $70^0$ 'ye kadar  $10^0$ 'lik açı aralıkları ile nümerik sonuçlar elde etmişlerdir.  $80^0$  ve  $90^0$  için nümerik sonuçlar verilmemiştir. Benzer şekilde deneysel olarak da sadece  $15^0$ ,  $30^0$ ,  $45^0$  ve  $60^0$  için sonuçlar yansıtılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre  $60^0$ 'de %98 ve  $70^0$ 'de %90 oranında emilim değerlerine ulaşılmıştır. Çalışması yapılan diğer açı değerlerinde de benzer emilim değerlerini yakalamışlardır.

Ayrıca Zhu ve ark. (2010) başka bir MTM tabanlı sinyal emici çalışmalarında gelen açı (*TE*, *TM*) bağımsız mikrodalga frekansında çalışan geniş bant sinyal emici çalışmasını nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yalnız, açı değişimlerini  $0^0$ ,  $30^0$ ,  $40^0$ ,  $50^0$  ve  $60^0$  için incelemişlerdir. Bu durum yüksek ihtimalle diğer açılarda sinyal emilim değerinin açı bağımlı olduğunu gösterebilir. Elde edilen sonuçlara göre %97'nin üzerinde emilim değerine ulaşılmıştır.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

#### 3.1 Sinyal Emici Tabanlı U-Şekilli Frekans Seçici Yüzey Sensör Tasarımı

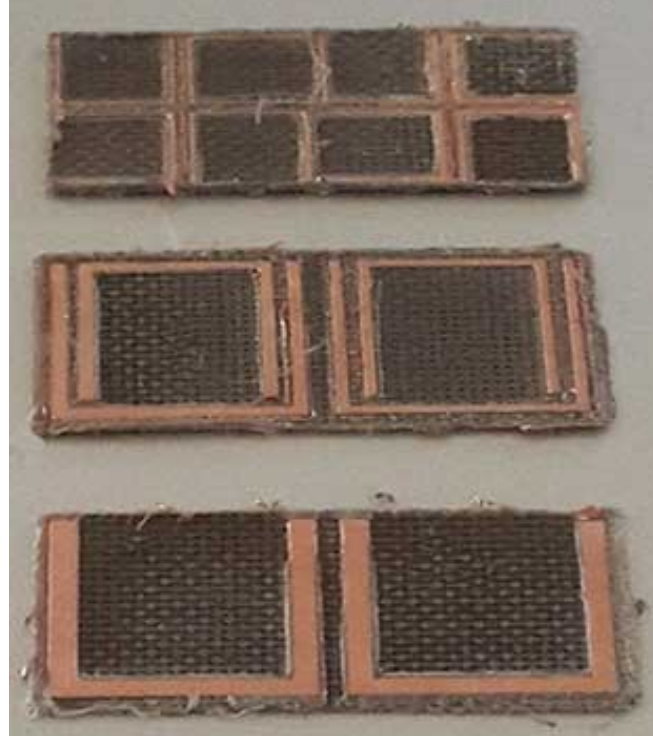
Bu tasarımda, üç farklı (tek, çift ve dört) U şekilli rezonatör birim hücreleri kullanılarak sinyal emici ve frekans seçici yüzey (FSY) tabanlı sensör tasarımları elde edilmiştir. Bu rezonatör tasarımlarının dar frekans bantlarına sahip olmasından dolayı mikrodalgalarda filtreleme uygulamalarında kullanılması önerilmektedir. Şekil 3.1.'de U şekilli rezonatörlerin gösterimi ve Tablo 3.1.'de bu rezonatörlerin boyutlarına ilişkin değerler yer almaktadır. 0.0175 mm kalınlığa ve  $5.8001 \times 10^7 S/m$  iletkenlik değerine sahip bakır cinsi metal kullanılarak tasarlanan U şekilli rezonatörler, dielektrik katsayısı ve kayıp tanjant değeri sırasıyla  $\epsilon_R=2.17$  ve 0.0009 olan Arlon CuClad 217 alttaş malzemesi üzerine inşa edilmiştir. Meydana gelecek olan kaybı azaltmak için alttaş kalınlığı 0.5 mm olarak seçilmiştir. Şekil 3.1.'de gösterilen her bir birim hücre tasarımının boyutu  $10 \times 10 mm$ 'dir. FIT tabanlı simülasyon programı kullanılarak tasarlanan yapıların seçilen boyutları göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada hedef frekans bandı X ve Ku banttır ve çalışma frekansı aralığı ise 8–18 GHz'dir. PCB cihazında üretimi gerçekleştirilen yapılar Şekil 3.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Sinyal emici tabanlı U şekilli frekans seçici yüzey sensör uygulaması için yapılan tasarımlar (a) tek elemanlı birim hücre, (b) iki elemanlı birim hücre, (c) dört elemanlı birim hücre

Tablo 3.1. Şekil 3.1.'de Sinyal emici tabanlı U şekilli frekans seçici yüzey sensör uygulaması için belirlenen boyutlar (mm)

d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11
10	10	0.8	9	9	9	8	9	7	4.6	0.3

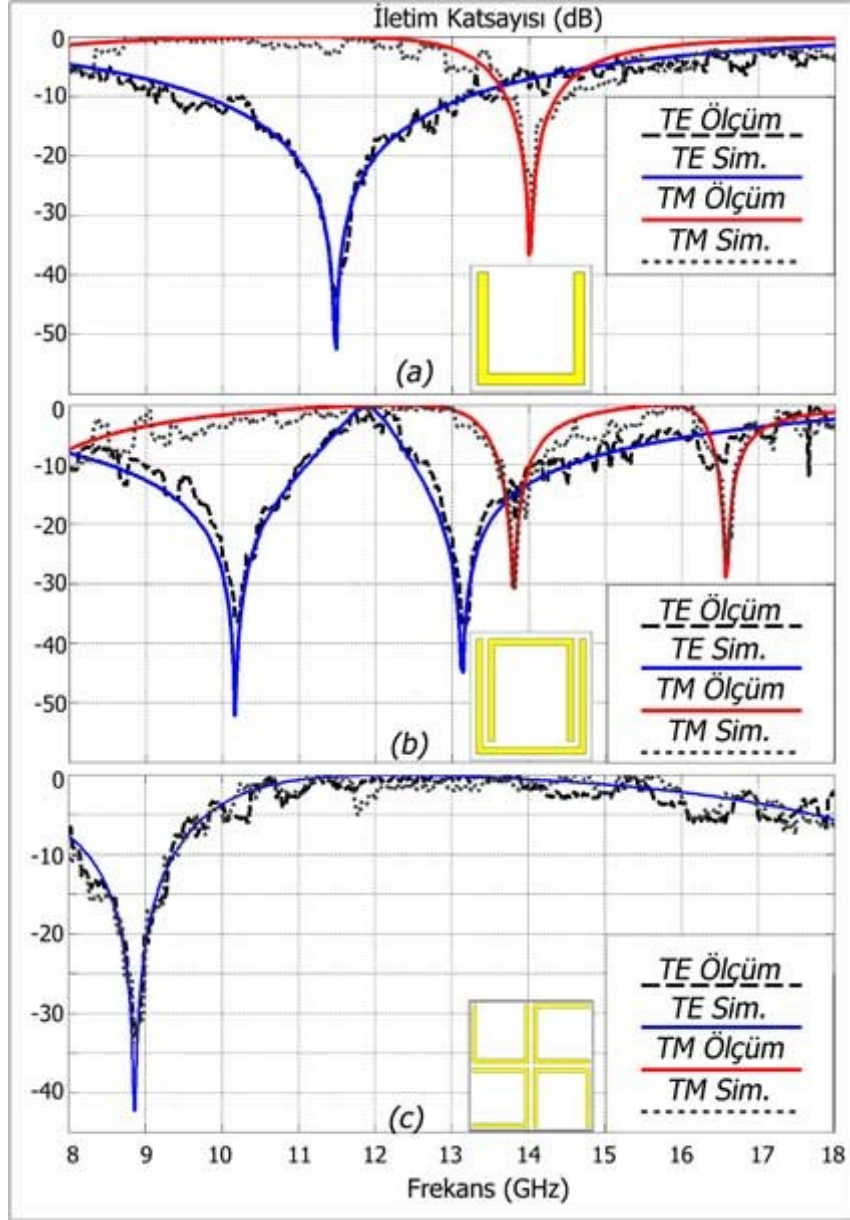


Şekil 3.2. Sinyal emici tabanlı U şekilli frekans seçici yüzey sensör uygulaması için PCB cihazında üretilen yapılar

### 3.2 Periyodik Sınır Koşullarında İletim Katsayıları

Tek, çift ve dört U şekilli yapılardan oluşan FSU'ler için  $X-(8-18GHz)$  bant ve  $Ku-(12-18GHz)$  bant çalışma frekansı aralıklarında, her U şekilli yapının özgün sınır koşullarında nümerik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. U şekilli FSU yapıların dikey (TE) ve yatay (TM) dalga polarizasyonu durumlarına ilişkin nümerik ve deneysel iletim katsayıları değerleri Şekil 3.3.'te gösterilmektedir. Tek ve çift U şekilli yapılar için Şekil 3.3. (a)'da ve Şekil 3.3.(b)'de görüldüğü üzere tek ve çift rezonans frekansı değerleri elde edilmiştir. TE ve TM dalga polarizasyonu modlarında rezonans frekanslarındaki farkın oluşmasının nedeni iki dalga polarizasyonu modu arasında  $90^\circ$ 'lik farktan kaynaklanmaktadır. Fakat Şekil 3.3(c)'de görüldüğü üzere dört U şekilli yapının simetrik yapısından dolayı rezonans frekansı değerleri dalga polarizasyon modlarından bağımsızdır. Tek, çift ve dört U şekilli yapıların frekans seçici yüzey frekans noktaları sırasıyla TE dalga polarizasyon modu için 11.48, 10.168–13.141, 8.86 GHz ve TM dalga polarizasyon modu için 14, 13.809–16.587, 8.85 GHz olarak elde edilmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışmalar sonuçları birbiriyle karşılaştırıldığında, sonuçların birbirini desteklediği gözlemlenmektedir.



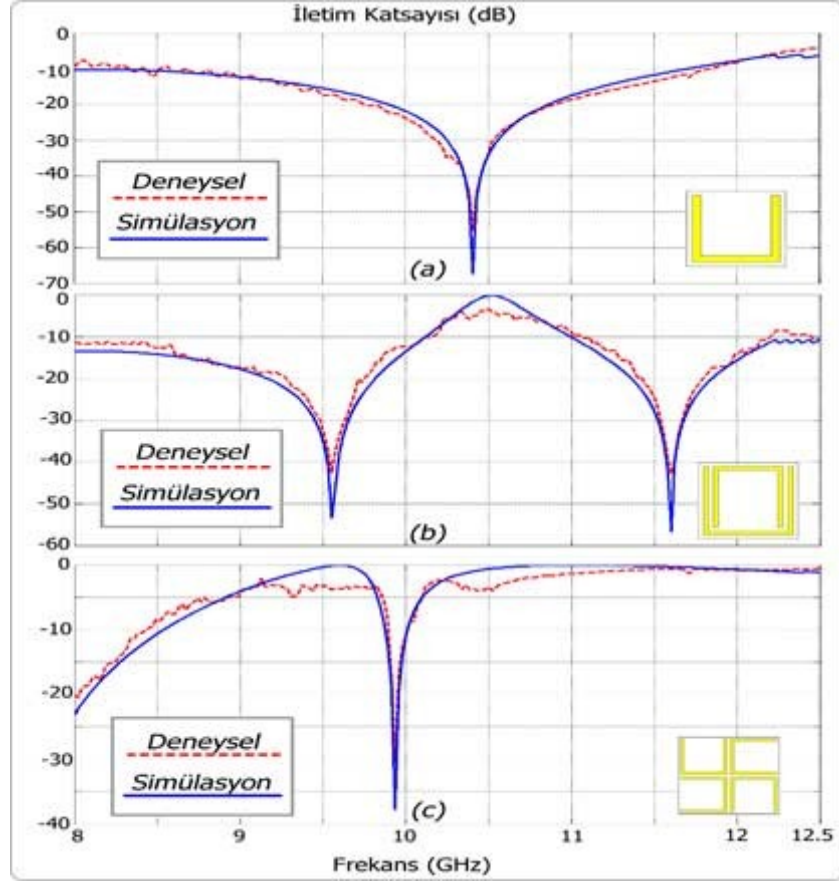


Şekil 3.3. TE ve TM dalga polarizasyon modunda nümerik ve deneysel iletim katsayı değerleri (a) tek, (b) çift, (c) dört U-şekilli yapı

### 3.3 Dalga Kılavuzu Sınır Koşullarında İletim Katsayıları

Dalga kılavuzlu ölçümler sonucu elde edilecek FSY filtre yapılarının küçük boyutlu, düşük maliyetli, kolay üretim ve hafiflik gibi birçok avantajı vardır. Bu bağlamda yapıların ölçümü dalga kılavuzu içerisinde gerçekleştirileceğinden dalga kılavuzunun ebatları önem arz etmektedir. Bu çalışmada WR90 dalga kılavuzunun kullanılması tasarlandığı FSY tabanlı yapılar WR90 dalga kılavuzunun ebatları olan  $22.86 \times 10.16$ mm 'ye uygun ve X bandında çalışmak üzere tasarlanmıştır. İletim katsayısı değerleri WR90 dalga kılavuzu kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar TE dalga polarizasyonu modunda bir network analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 1.5.'te gösterilmektedir.

Deneysel koşullardan kaynaklı küçük farklılıklar olmasına rağmen sonuçların birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmektedir. Tek ve dört U şekilli yapı için Şekil 3.4(a) ve Şekil 3.4(c)'de görüldüğü üzere 10.37 GHz ve 9.9 GHz'de tek rezonans frekansı noktası meydana gelmiştir. Çift U şekilli yapı için ise 9.508GHz ve 11.51GHz'de iki ayrı rezonans frekansı noktası elde edilmiştir. Bu durumdan anlaşılacağı üzere, tek ve dört U şekilli FSY yapısının X bandda tek frekans noktasında band durduran filtre özelliği taşıırken, çift U şekilli yapı iki ayrı frekans noktasında bu özelliği taşımaktadır.

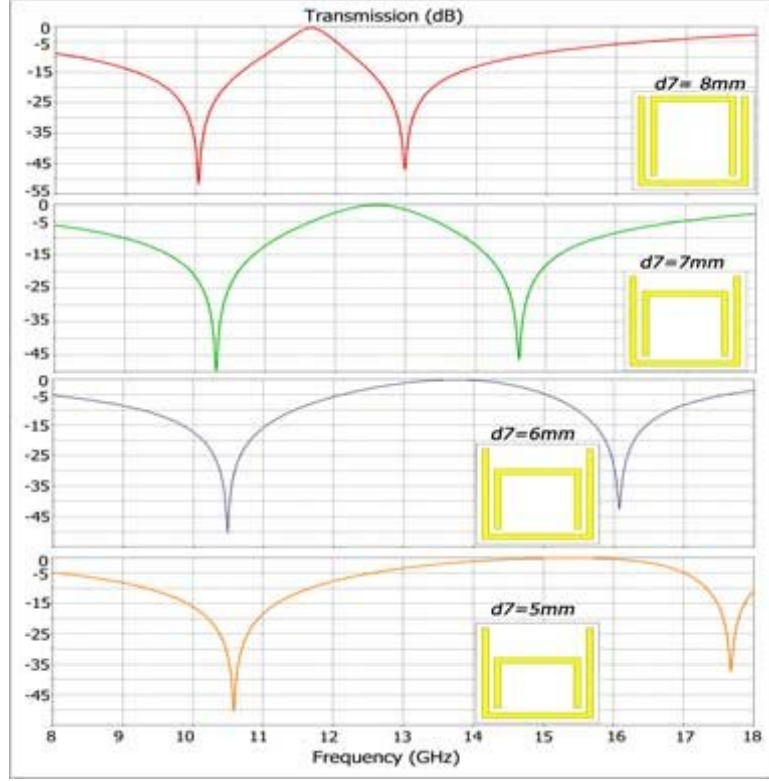


Şekil 3.4. Dalga kılavuzu sınır koşullarında iletim katsayısı değerleri (a) tek, (b) çift, (c) dört U-şekilli FSY yapısı

### 3.4 İletim Katsayılarının Yapı Boyutlarına Göre Elde Edilmesi

U şekilli yapıların boyutlarının iletim katsayısı üzerine etkisini incelemek için  $d7$  ve  $d10$  parametrelerinin farklı değerlerdeki durumları periyodik sınır koşullarına göre nümerik olarak analiz edilmiştir. Parametrelerin çift ve dört U şekilli yapılar üzerine olan etkisi sırasıyla Şekil 3.5. ve Şekil 3.6.'da gösterilmektedir. Çift U şekilli yapı hem periyodik sınır koşullarında hem de dalga kılavuzu sınır koşullarında iki farklı rezonans frekansı noktasında bant durduran filtre özelliği göstermektedir. Çift U şekilli FSY yapısının iç tarafındaki U şeklinin kol uzunluğunu temsil eden  $d7$  parametresinin iletim katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 3.5.'te gösterilmektedir. Bu parametre  $5\text{ mm} - 8\text{ mm}$  arasında  $1\text{ mm}$ 'lik aralıklarla değiştirilmektedir.

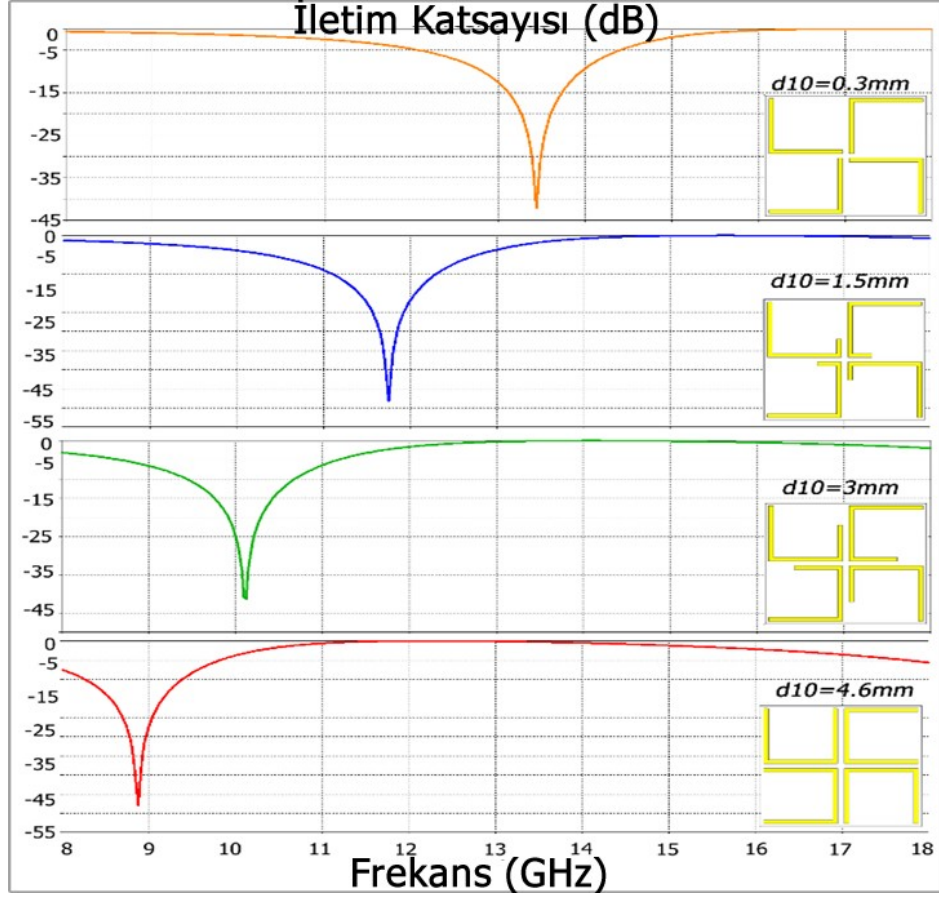
Şekil 3.5.'de görüldüğü üzere çift U şekilli yapının ikinci rezonans frekansı 13GHz - 18GHz frekansları arasında değişmektedir. Böylece çift U şekilli yapının parametreleri değiştirilerek  $X-\zeta$  Bant ve  $Ku-\zeta$  Bantta bant durduran filtre olarak kullanılabilceği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.5. d7 parametresinin iki U-şekilli FSY iletim katsayısı üzerindeki etkisi

Dört U şekilli FSY yapısı üzerinde ise d10 parametresinin farklı değerlerdeki durumları için iletim katsayılarının nasıl değişeceği ile ilgili bir nümerik çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere iç kol uzunluğu olarak adlandırılan d10 parametresi rezonans frekansı noktasını 8–18 GHz aralığında değiştirmektedir. Bu değer sırasıyla 0.3mm ve 4.6mm değerlerini aldığıında 13.43 GHz ve 8.87 GHz rezonans frekansı değerleri elde edilmektedir. Böylece iç kol uzunluğu arttıkça rezonans frekansı değerinin düşeceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda dört U şekilli yapı ayarlanabilir yaklaşık 3.60 GHz çalışma frekansı aralığına sahiptir. Yapının tasarım parametrelerinin değiştirilmesi  $X-\zeta$  bandı içerisinde geniş bir band aralığında ayarlama yapılması imkanı sunmaktadır.

Rezonans frekansı değeri  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  şeklinde hesaplandığından dolayı kol uzunluğunun bu değerle ters orantılı bir ilişki içinde olduğu açıktır.

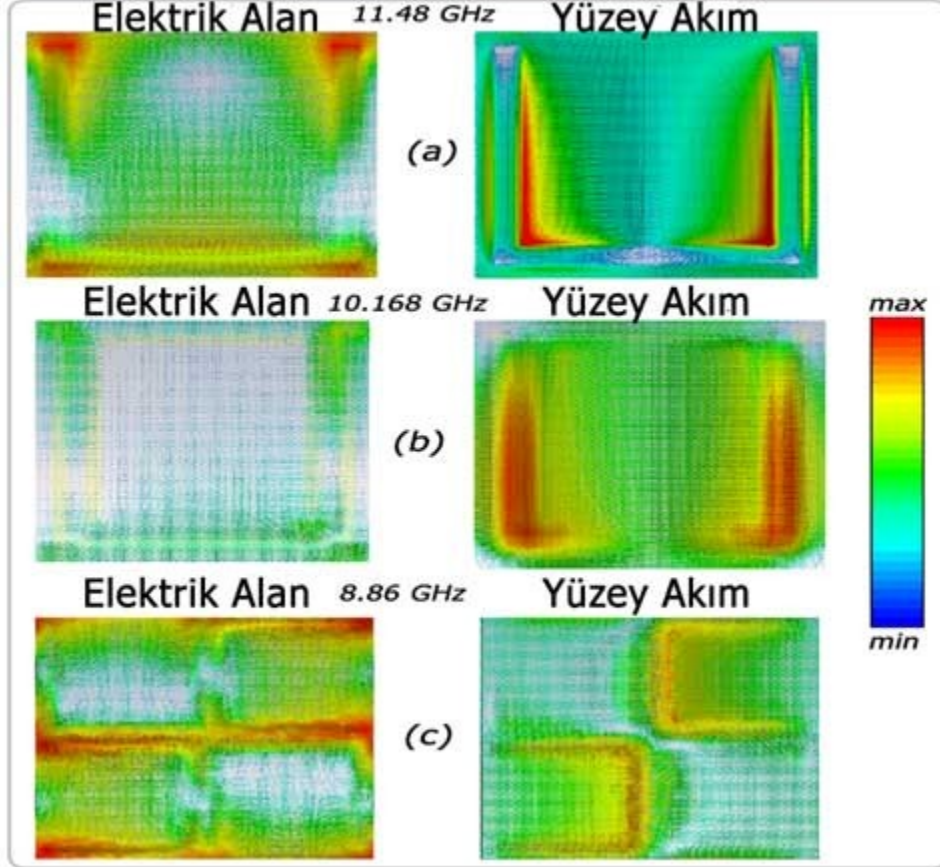


Şekil 3.6.  $d_{10}$  parametresinin dört U-şekilli FSY iletim katsayısı üzerindeki etkisi

### 3.5 Elektrik Alan Dağılımının ve Yüzey Akım Yoğunluğunun Elde Edilmesi

Şekil 3.7.'de tek çift ve dört U şekilli yapılarının periyodik sınır koşullarında ve sırasıyla rezonans frekansları olan 11.48 GHz, 10.168 GHz ve 8.86 GHz'de elektrik alan dağılımları ve yüzey akım yoğunlukları verilmiştir. Şekil 3.7. (a)'da görüldüğü üzere elektrik alan dağılımı tek U şekilli yapının yan kollarının üst ucunda yoğunlaşmıştır. Yüzey akım yoğunluğu ise yine birbirine paralel olan yan kollar üzerinde bir dağılım göstermektedir. Paralel akım yoğunluklarının simetrik biçimde ve rezonans frekansında sağ ve sol kollarda olduğu gözlemlenmektedir. Elektrik alan dağılımı dikkate alındığında, elektrik dipolleri arasında bir kuplaj oluşmakta ve ayrıca paralel akım yoğunlukları meydana gelmektedir. Şekil 3.7. (b)'de çift U-şekilli FSY yapısının sağ ve sol kısımlarında zıt yönlü akım yoğunluğu olduğu görülmektedir. Manyetik dipollerin sebep olduğu bu durum 10.168 GHz rezonans frekansında ortaya çıkmakta ve asimetric rezonans moduna sebep olmaktadır. Rezonatörler arasındaki endüktif ve kapasitif etkiden kaynaklanan güçlü manyetik rezonansın manyetik alan tarafından uyarılmakta olduğu açıktır. Tasarımın üst ve alt katmanlarındaki yüzey akım yoğunlukları simetrik rezonans modunu desteklemektedir. Bu ise rezonans frekansındaki zayıf elektrik alan dağılımından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.7. (c)'de dört U şekilli FSY

yapısının rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımları sağ üst ve sol alt katmanlarında ve yatay kollarında meydana geldiği görülmektedir. Yine yüzey akım yoğunlukları ise sağ üst ve sol alt kısımlarda belirginleşmiştir. Şekil 3.7'den anlaşılacağı üzere paralel ve zıt yönlü akım dağılımları simetrik ve asimetrik rezonans modları oluşturacak şekildedir. Elektrik dipollerin kuplajlarından kaynaklanan güçlü elektrik alan dağılımı simetrik rezonans modunu desteklemektedir. Böylece rezonansın elektrik alan tarafından uyarıldığı anlaşılmaktadır. Zıt yüzey akım yoğunlukları ise manyetik rezonansa sebep olmaktadır.

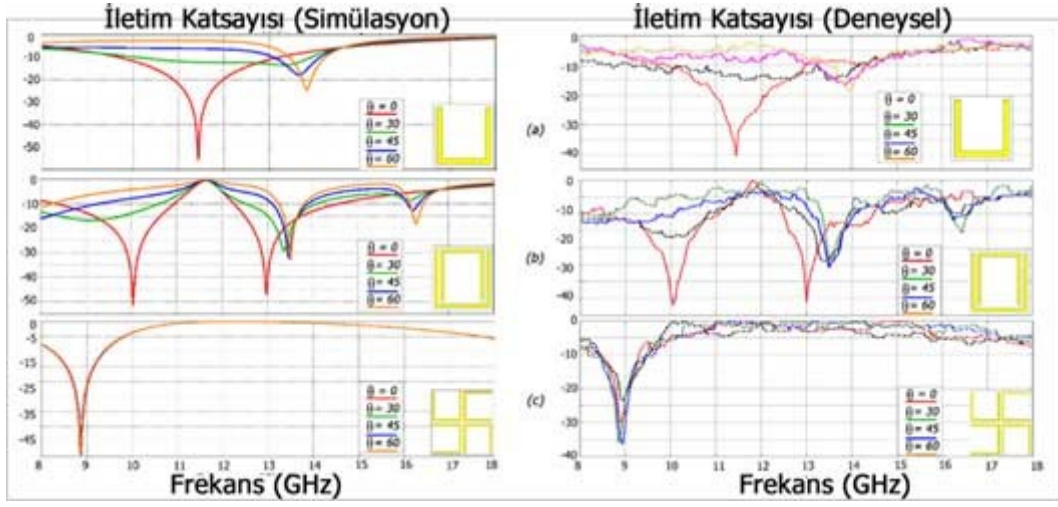


Şekil 3.7. (a) Tek, (b) çift, (c) dört U-şekilli FSY yapılarının rezonans frekansı noktalarındaki elektrik alan dağılımları ve yüzey akım yoğunlukları

### 3.6 Geliş Açısının İletim Parametreleri Üzerindeki Etkisi

Şekil 3.8.'de U şekilli yapıları için TE dalga polarizasyonu modunda farklı geliş açılarının iletim parametresi üzerindeki etkisi nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu işlem için  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  eğik açı durumları örneklendirilmiştir. Tek ve çift U şekilli FSY yapıları için geliş açısının değeri arttıkça rezonans frekansı noktası eksenin sağına doğru kaymakta ve rezonans genliği giderek azalmaktadır.  $90^\circ$ 'lik geliş açısı değerinde TM dalga polarizasyonu modu elde edileceğinden, bu açı için bu bölümde analiz yapılmamıştır. Dört U şekilli yapı, tasarımından dolayı U şekillerin birbirine  $90^\circ$ 'lik açı farkıyla yerleştirilmelerinden kaynaklı Şekil 3.8.(c)'de görüldüğü üzere polarizasyondan bağımsızlık özelliği gösterdiği

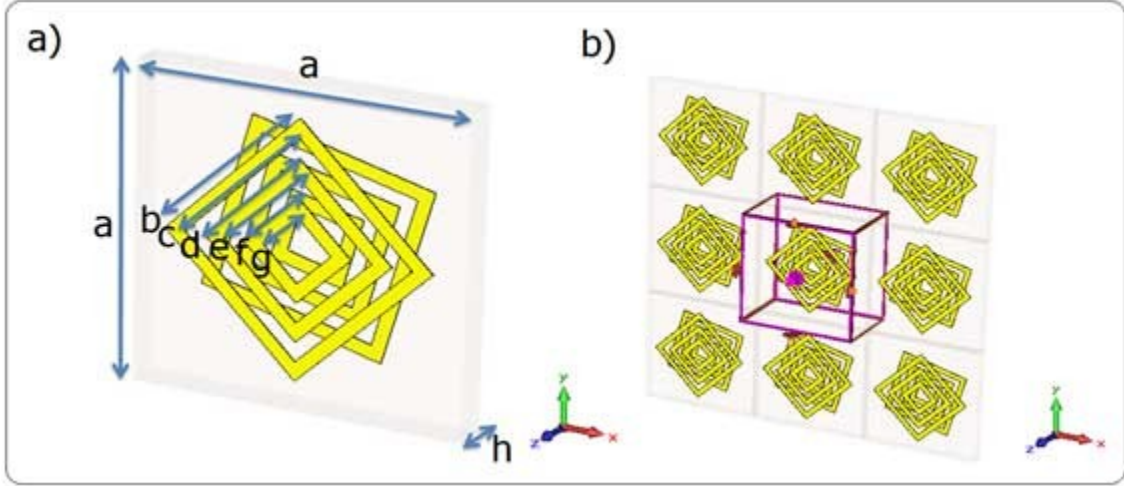
tespit edilmiştir. Bütün geliş açısının incelendiği çalışmalarda deneysel ve nümerik çalışmaların birbiriyle uyum içinde olduğu gözlemlenmektedir.



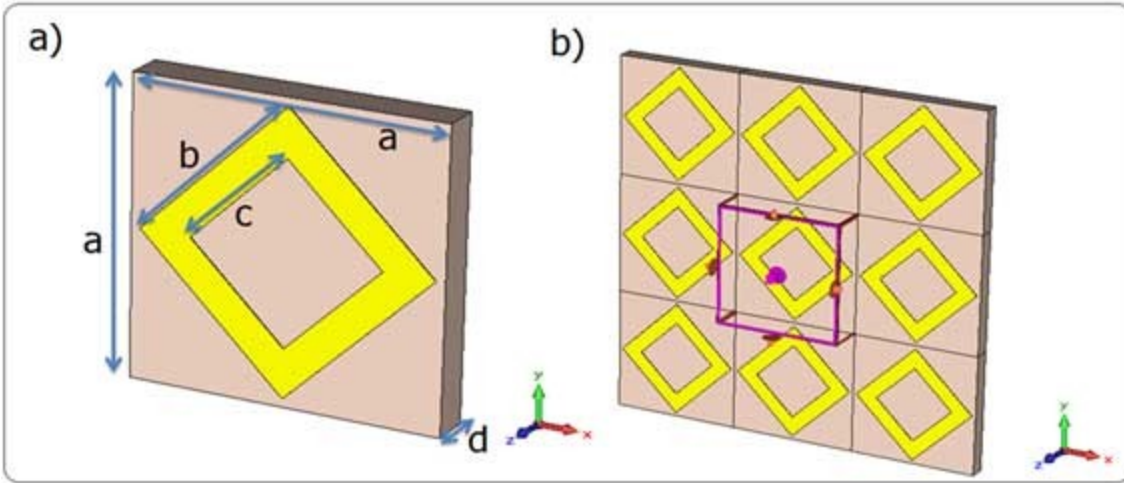
Şekil 3.8. TE dalga polarizasyonu modunda farklı geliş açılarında nümerik ve deneysel elde edilen iletim katsayıları (a) tek, (b) çift, (c) dört U-şekilli FSY yapısı

### 3.7Biyosensör Tasarımı

Bu çalışmada Şekil 3.9, 3.10. ve 3.11.' de sunulan büyük, küçük ve sıfır bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli biyo sensör olarak kullanılmak üzere üç farklı yapı tasarlanmıştır. Şekil 3.9' da, dielektrik alttaş tabakasının alt ve üst kısımlarına yerleştirilmiş aralarında 90°'lik fark olan dört adet içiçe geçmiş elmas şekilli rezonatör yapısı gösterilmektedir. Rezonatörler için kalınlığı ve iletkenliği sırasıyla 0.035 mm ve  $5.8001 \times 10^7 S/m$  olan bakır cinsi metal malzeme seçilmiştir. Alttaş için ise yapay elektromanyetik tasarımlarda sıkça kullanılan, bağlı dielektrik katsayısı ve kalınlığı sırasıyla 4.2 ve 1.6 mm olan FR4 dielektrik malzemesi seçilmiştir. Küçük bakışimsızlık değeri elde etmek için ise dielektrik alttaşı ve onun üzerine yerleştirilmiş rezonatörden oluşturulan ayırık halka tipi rezonatör tabanlı yeni jenerasyon iki farklı bakışimsız metamatizme tasarlanmıştır. Rezonatörleri için yine  $5.8001 \times 10^7 S/m$  elektriksel iletkenliğe ve 0.036 mm kalınlık değerine sahip bakır cinsi metal seçilmiştir. Yüksek frekanslarda iyi performansa sahip olduğundan yine dielektrik alttaş malzemesi olarak 1.6 mm kalınlığa, 4.2 dielektrik sabiti değerine ve 0.02' kayıp tanjant değerine sahip FR4 malzemesi tercih edilmiştir. Şekil 3.9.a'da görülen yapının parametrik boyutları  $a=14$  mm,  $b=8$  mm,  $c=6.8$ mm,  $d=5.6$  mm,  $e=4.4$  mm,  $f=3.2$ mm,  $g=2$  mm' şeklindedir. Tasarımın perspektif görünümü ise Şekil 3.9.b' deki gibidir.

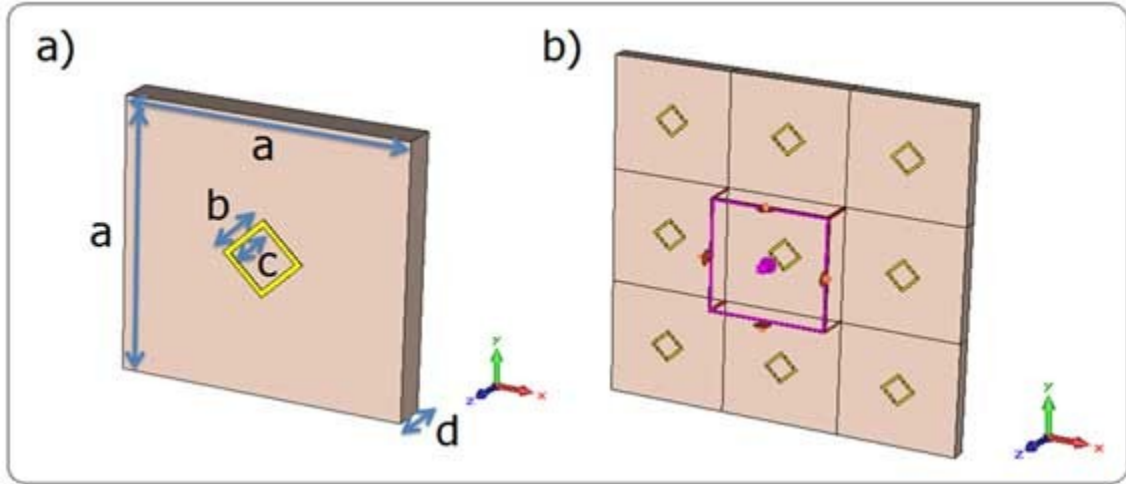


Şekil 3.9. Büyük bakışimsızlık tabanlı sensör uygulaması için tasarlanan yapı, (a) boyutlar, Birinci yapı için birim hücre boyutları, (b) büyük bakışimsızlık tabanlı tasarlanan yapının perspektif görünüşü



Şekil 3.10. Küçük bakışimsızlık tabanlı sensör uygulaması için tasarlanan yapı, (a) boyutlar, Birinci yapı için birim hücre boyutları, (b) küçük bakışimsızlık tabanlı tasarlanan yapının perspektif görünüşü

Şekil 3.10.'da görülmekte olan büyük bakışimsızlık tabanlı sensör uygulamasında olduğu gibi küçük bakışimsızlık tabanlı sensör uygulamasında da yine elmas şekilli rezonatörler tasarlanmıştır, fakat iç içe geçmiş dört elmas rezonatör yerine sadece bu defa bir tane elmas şekilli rezonatör kullanılmıştır. Rezonatör ve alttaş için seçilen malzemelerin elektriksel özellikleri, büyük bakışimsızlık tabanlı tasarlanan yapı ile aynı olup boyutları  $a=12$  mm,  $b=8$  mm,  $c=5.2$ mm dir. Şekil 3.10.b' de yapının perspektif görünüşü sunulmuştur.



Şekil 3.11. sıfır bakışimsızlık tabanlı sensör uygulaması için tasarlanan yapı, (a) boyutlar, Birinci yapı için birim hücre boyutları, (b) sıfır bakışimsızlık tabanlı tasarlanan yapının perspektif görünüşü

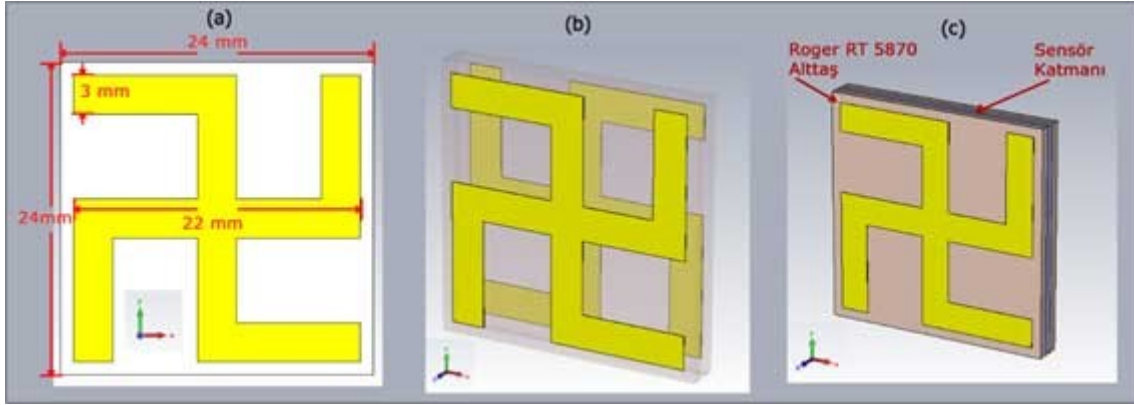
Sıfır bakışimsızlık değerine sahip bir diğer yapı, yine elmas şekilli bakışimsız metamalzeme tabanlı olarak tasarlanmıştır ve Şekil 3.11.'te gösterilmiştir. Tek elmas şekilli rezonatör tasarımı bu yapı içinde kullanılmış olup, rezonatör için bakır malzemesi dielektrik altaş için ise FR4 malzemesi tercih edilmiştir. Şekil 2.3a' da belirtilen boyutların değerleri;  $a=12.5$  mm,  $b=2.5$  mm,  $c=2$ mm şeklindedir. Şekil 3.11.b' de ise yapının perspektif görünüşü gösterilmektedir.

### 3.8 Bakışimsız Yokluk Tabanlı Metamalzeme Sensör Tasarımı

Sensör uygulaması için düşünülen yapı gamalı haç şekilli rezonatör ve bunun ayna görüntüsünün arka yüzeye  $180^\circ$  farkla yerleştirilmesi ile elde edilmiş ve oluşan tasarım şekil 3.12.' de ayrıntıları ile gösterilmiştir. Ön ve arka yüzeye yerleştirilen bu iki yapı birer altaş (Roger RT 5870) üzerinde bastırılmış olup bunların arasındaki alan sensör katmanı olarak adlandırılmış ve yoğunluk, nem, basınç ve sıcaklık algılama uygulamaları için bu katman kullanılmıştır. Rezonatör olarak adlandırılan bu yapıların farklı açılarla yerleştirilmesi ile güçlü bir kuplaj etkisi elde etmek ve bu etkiyi kullanarak bahsi geçen yaygın algılama uygulamalarını gerçekleştirmek bu çalışmada amaçlanmıştır. İlk aşama olarak tasarlanan rezonatör ve altaş kısımlarını değişmez kabul ederek aradaki algılamayı sağlayan katmanın önerilen yapının rezonans frekanslarının oluştuğu noktalardaki değişim incelenmiştir. Ek olarak algılayıcı kısmın içinde farklı elektromanyetik karakteristiğe sahip malzemeleri temsilen elektrik geçirgenliğinin ( $\epsilon_s$ ) farklı değerleri ve katman kalınlığı ( $d_s$ ) değiştirilerek sistemin cevabı kontrol edilmiş ve hedeflenen uygulamalar için uygun olduğu saptanmıştır. Daha etkin algılayıcı tasarımı için dielektrik kayıp miktarı oldukça düşük olan Roger RT5870



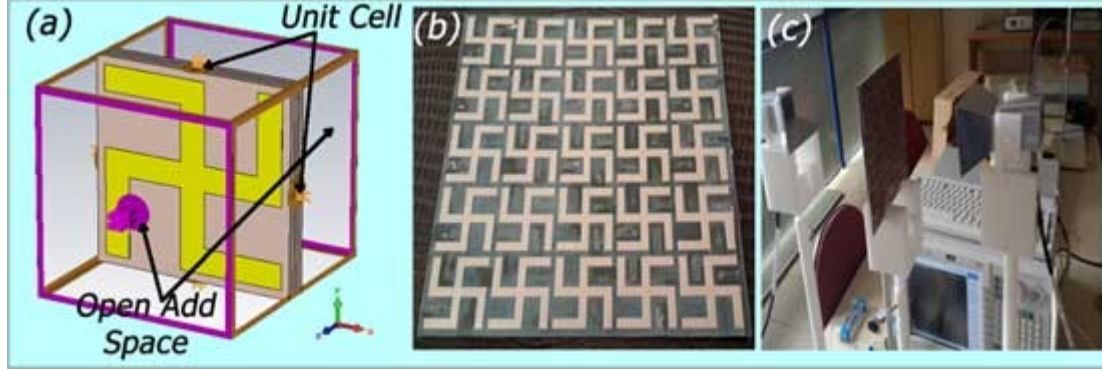
malzemesi alttaş olarak kullanılmıştır. Bu malzeme için elektriksel geçirgenlik değeri 2.33 ve kayıp tanjant miktarı ise 0.004'tür. Önerdiğimiz yapı için alttaş kalınlığını  $d_m=0.76\text{mm}$  olarak seçilmiş olup rezonatörler için bakır kullanılmıştır. Bakır rezonatörlerin kalınlığı 0.035mm standardında olup iletkenlik değeri ise  $\sigma_{cu}=58 \times 10^6 \text{ S/m}$  şeklindedir.



Şekil 3.12. Algılayıcı uygulaması için Gamalı haç tabanlı rezonatörler kullanılarak geliştirilen yapı ve detaylı ölçüleri.

Tasarlanan yapının boyutları ve kurulum şekli Şekil 3.12.' de görülmektedir. Metamalzeme yapılarından bakışsız yokluk tabanında tasarlanan yapımızın çeşitli çevresel parametrelerin algılanmasında kullanılmasını test etmek için, önerilen yapının sayısal analizleri tamamlanmış ve elde edilen sonuçların doğruluğu ilgili parametreye uygun deneysel çalışmalarla onaylanmıştır. Çalışmamızın temeli algılama katmanına bırakılan malzemenin elektromanyetik cevabına ve kalınlık değişiminin hassas bir şekilde algılanmasını içermektedir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği laboratuvar ortamı ve önerilen metamalzeme yapıları, uygulanan sınır koşulları Şekil 3.13.'de gösterilmiştir. Deneysel çalışma basınç ve yoğunluk algılama uygulamasını içermektedir fakat geriye kalan uygulamalarda sadece sayısal analizler yapıp yapıların çalışma hassasiyetleri ve doğrulukları doğrulanmıştır. Sayısal analizler ticari bir program olup FIT tabanlı simülasyon programı ile yapılmıştır. Sınır koşulları sırasıyla birim hücre sınır koşulları X ve Y eksenlerinde uygulanırken, Open Add Space şeklinde belirlenmiş boşluk sınırı Z eksenine uygulanmıştır. Sistemin çalışmasını test etmek için laboratuvarında bulunan network analizörün uçlarına bağlı geniş bantlı, yüksek kazançlı iki horn anten kullanılmıştır. Ölçümlere başlamadan önce kurulu deney düzeneği için sistem kalibrasyonu her iki port için yapılmış ve açık devre ve yük durumlarına bakılarak kalibrasyon işlemi tamamlanmıştır. Yapılan deneyler bulduğumuz sayısal analiz sonuçları ile paralellik göstermesine rağmen, ufak kaymalar ve uyumsuzluklar mükemmel olmayan laboratuvar koşullarından ve kullanılan

malzemelerin (kablo, horn antenler, adaptörler ve konnektörler vb.) ideal olmamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.13. Bakışimsız yokluk tabanında tasarlanan metamalzeme yapısı, (a)simülasyon ve sınır koşullarının yerleşimi, (b)5x5 şeklinde baskı devresine çıkarılmış durum, (c) Deneysel kurulum görüntüsü

Yaptığımız çalışmanın teorik olarak incelenmesi de daha açık anlaşılması açısından önemlidir. Yapımızın tabanını bakışimsızlık özelliği oluşturmaktadır ve algılayıcı ara kısmın çalışması maruz kaldığı elektromanyetik dalgalara karşı katmanın etkileşime girmesi şeklinde açıklanabilir. Aktif olan optik elektromanyetik dalga ile yapının ortasında bulunan algılayıcı katmanın teması daha güçlü olmaktadır. Bu katmanın arasında bulunduğu rezonatörler üzerinde elektrik ve manyetik alanlardan dolayı yüzey akımları oluşmaktadır. Tüm bu değişimlerin sonucu olarak yapımızın temelini oluşturduğu sistemin rezonansını etkilenmektedir. Bu etkilenme sonucu oluşan rezonans noktasındaki kayma algılayıcımızın çalışma temelini oluşturmaktadır. Bakışimsız yokluk tabanlı olan metamalzeme algılayıcı yapımızda yokluk kavramını Lindel ve ark.'ın yaptığı çalışmasında (Lindel ve ark., 1994) kayıpsız bir ortamda yapılan kurulum parametrelerini belirlediği şekilde aşağıdaki gibi açıklayabiliriz.

$$D = \epsilon E - j\xi H \quad (3.1)$$

$$B = \mu H + j\xi E \quad (3.2)$$

Burada  $\epsilon$  ve  $\mu$  elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri olup  $\xi = \xi_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  ifadesindeki  $\xi_0$  parametresi bakışimsızlık değeridir.  $\epsilon_0$  ve  $\mu_0$  ise boşluğa ait dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayılarıdır. Eğer ortam izotropik ise bu durumda oluşacak parametreler şöyle belirlenebilir.

$$D = -j\xi H \quad (3.3)$$

$$B = j\xi E \quad (3.4)$$

$$E_r = (R_{LCP}(a_1 + j a_2^r) + R_{RCP}(a_1 - j a_2^r)) e^{-jk_x x + jk_z z} \quad (3.5)$$

$$H_r = \frac{1}{\eta} (R_{LCP}(-j a_1 + j a_2^r) + R_{RCP}(j a_1 - j a_2^r)) e^{-jk_x x + jk_z z} \quad (3.6)$$

Birim vektörler,  $k_z = k_0 \cos \theta_i$ ,  $k_0 = w \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  ve  $a_{1,2}$  'dir. Sol ve sağ kutuplanmış yansıyan dalgalar  $R_{LCP}$  ve  $R_{RCP}$  ile karakterize edilmekte olup. Dalga empedansı  $\eta$ , ve uygulanan dalğanın geliş açısı ise  $\theta_i$  ile gösterilmektedir.  $w/k_R$  ve  $w/k_L$  ise sol ve sağ kutuplanmış dalgaların hızlarına karşılık gelmekte ve bunlara uygun dalga sayıları ise aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$k_{R,L} = w \sqrt{\epsilon \mu \pm \xi} \quad (3.7)$$

Bu eşitlikte  $w$  dairesel frekansı ifade etmektedir. Son olarak toplam elektrik ve manyetik alan ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E = A_L \dot{\zeta} + B_L \dot{\zeta} \quad (3.8)$$

$$H = \frac{1}{\eta} \dot{\zeta} \quad (3.9)$$

Burada  $A_{R,L}$  ve  $B_{R,L}$  sağ ve sol kutuplanmış dalgaların genliklerini verirken  $k_z^{R,L} = k_{R,L} \cos \theta_{R,L}$ , şeklinde bulunur ve kutuplanmış elektromanyetik dalgaların yansıma

açıları  $\theta_{R,L} = \sin^{-1} \left( \frac{k_0 \sin \theta_i}{k_{R,L}} \right)$ , ile bulunabilir.  $a_2^{a_{R,L}}$  ve  $a_2^{b_{R,L}}$  birim vektörler olup,

$$a_2^{a_{R,L}} = a_z \sin \theta_{R,L} - a_x \cos \theta_{R,L} \quad (3.10)$$

$$a_2^{b_{R,L}} = a_z \sin \theta_{R,L} - a_x \cos \theta_{R,L} \quad (3.11)$$

Burada  $a_2^{a_{R,L}}$  ve  $a_2^{b_{R,L}}$  birim vektörlerdir ve yansıyan dalgalar aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E_t = \left( T_{LCP}(a_1 + j a_2^i) + T_{RCP}(a_1 - j a_2^i) \right) e^{-j k_x x - j k_z z} \quad (3.12)$$

$$H_t = \frac{1}{\eta} \left( T_{LCP}(-j a_1 + a_2^i) + T_{RCP}(j a_1 - a_2^i) \right) e^{-j k_x x - j k_z z} \quad (3.13)$$

$T_{LCP}, T_{RCP}$  LCP ve RCP iletilen dalgaların genlikleridir.

Daha önceden de bahsedildiği gibi deneysel çalışma hem basınç hem de yoğunluk algılama uygulamaları için yapılmış fakat diğer bahsi geçen uygulamalar için (nem ve sıcaklık) deneysel çalışma yapılamamış ve sadece sayısal analizi gerçekleştirilmiştir.

## 4. BULGULAR VE SONUÇ

### 4.1U-Şekilli Frekans Seçici Yüzey Sensör Uygulamaları

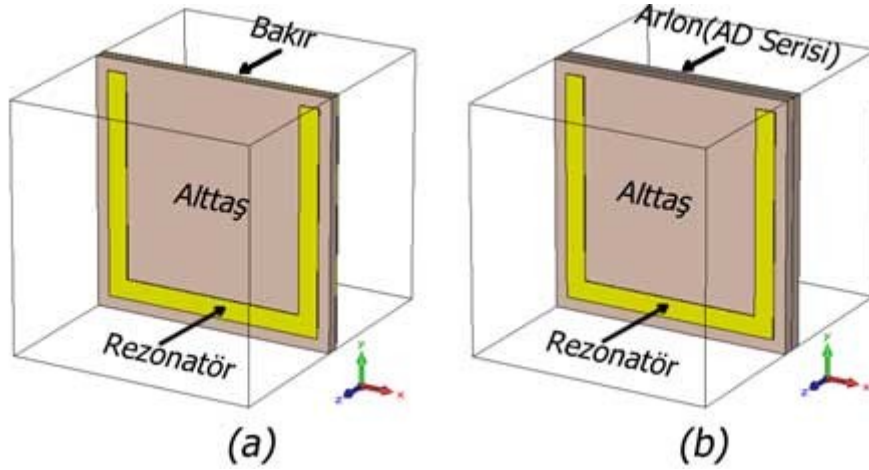
U şekilli frekans seçici yüzey yapılarının sensör uygulamaları için TE ve TM dalga polarizasyonu için iletim parametreleri simülasyon ortamında nümerik olarak elde edilmiş ve daha sonra bu veriler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Periyodik ve dalga kılavuzu ölçümleri için gerekli bütün yapılar PCB baskı devre cihazında üretilmiştir. Periyodik ölçümlerde doğru karşılaştırılmanın yapılabilmesi için yapılar 150x100mm boyutlarında ve dalga kılavuzu ölçümlerinde WR 90 dalga kılavuzunun ebatları olan 22.86x10.16 mm boyutlarda üretilmiştir. Tasarımların deneysel çalışmaları Agilent PNA-L N5234A model network analizörü, BBHA 9120 koni anten, X281A koaksiyel adaptör ve WR 90 dalga kılavuzu kullanılarak başarıyla gerçekleştirilmiştir. WR 90 dalga kılavuzunun seçilme nedeni ise çalışma frekansının 8.2–12.4 GHz aralığında olmasından dolayıdır. Şekil 4.1.'de deneysel ortam ile ilgili detaylar gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışma ortamı (a) periyodik üretilmiş bir U şekilli yapı (b) dalga kılavuzu ölçüm ortamı (c) dalga kılavuzu ölçümleri için üretilmiş U şekilli yapılar

Sinyal emici olarak kullanılan yapılar ilgili yapılar gelen elektromanyetik dalganın enerjisini zayıflatmaya yöneliktir ve çok geniş uygulama alanına sahiptirler. Elektromanyetik dalganın mükemmel emilimini sağlayabilmek için yansıma ve iletim katsayı değerlerinin sıfıra

çok elde etmek gerekmektedir ( $R(\omega) \& T(\omega) \rightarrow 0$ ). Bunun için gerekli formül ise şu şekilde ifade edilmektedir;  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ .  $A(\omega)$ ,  $R(\omega) = |S_{11}|^2$  ve  $T(\omega) = |S_{21}|^2$  sırasıyla; sinyal emilim değeri, yansımaya ve iletim oranlarını ifade etmektedir. U şekilli FSY yapılarının sinyal emici olarak kullanılabilmesi için dielektrik katmanlarının yani alttaşlarının arka tarafı metalik bir tabaka ile kaplanması gerekmektedir. Böylece sinyal iletimi engellenmiş olur ve sinyal iletim katsayısı değeri sıfır olur. Yapılar için alttaş olarak bağlı dielektrik katsayısı değeri  $\epsilon_r = 2.17$  ve kayıp tanjant değeri ise 0.0009 olan Arlon CuClad 217 malzemesi seçilmiştir. Bu malzemenin kalınlığı ise kayıpları azaltmak için 0.5mm olarak seçilmiştir. Tablo 4.1. de frekans değerlerine göre yapıların sinyal emilim değerleri gösterilmektedir. Çalışma için deneysel ve nümerik sonuçlar Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Şekil 4.2.'de gösterilen tek U şekilli yapı için tek frekans noktasında sinyal emilimi gerçekleştirirken çift U şekilli yapı için iki frekans noktasında sinyal emilim değerlerine ulaşılmıştır.



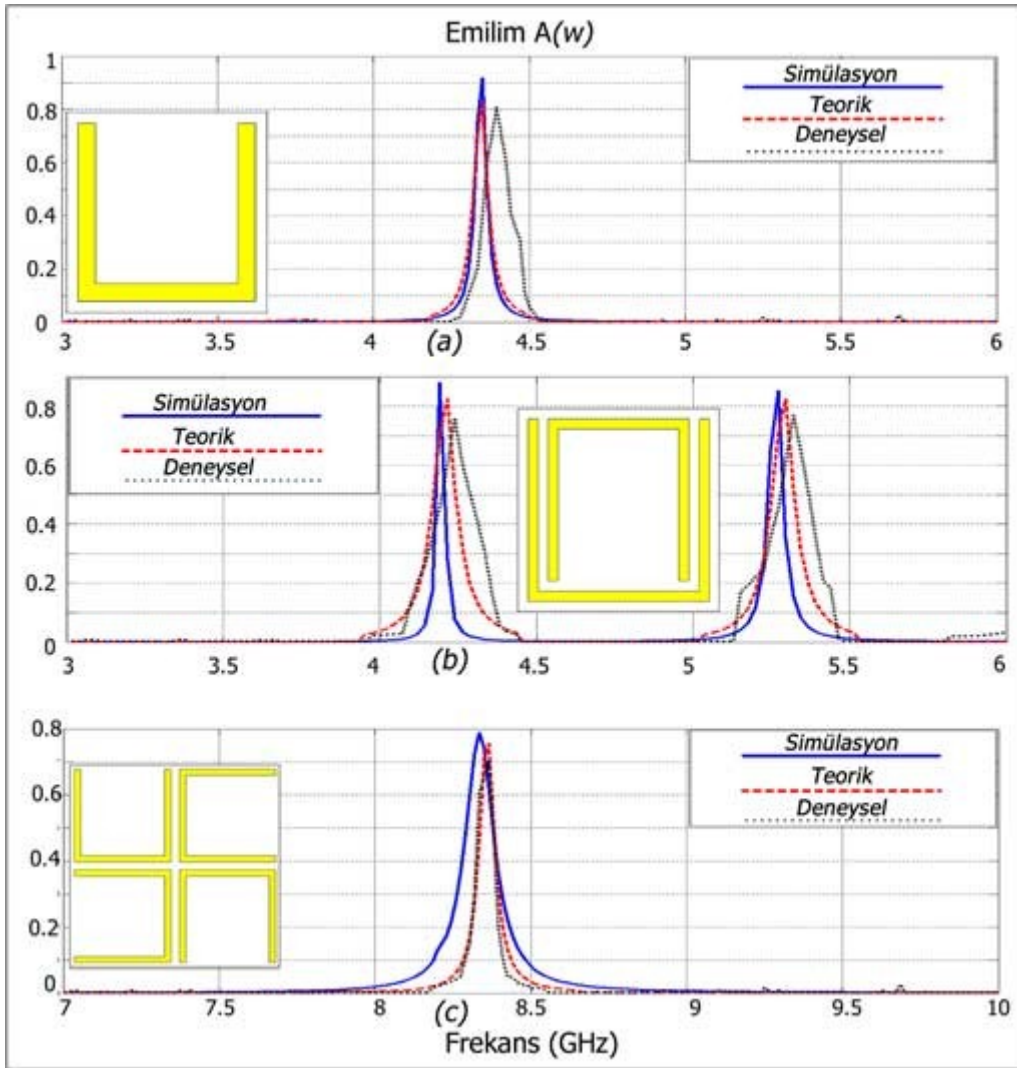
Şekil 4.2. Tek U şekilli FSY yapısı (a) sinyal emici uygulaması (b) sensör uygulaması

Tablo 4.1. Sinyal emici tabanlı U şekilli FSY yapıları için elde edilen sinyal emilim değerleri

U-Şekilli Sinyal Emici	Teorik Rezonans Frekansı/ Emilim/ BantGenişliği	Nümerik Rezonans Frekansı/ Emilim/ BantGenişliği	Deneysel Rezonans Frekansı/ Emilim/ BantGenişliği
Tek	4.35 / 0.83 / 20	4.35 / 0.91 / 20	4.39 / 0.80 / 30
Çift	4.21/0.82/35, 5.29/0.82/30	4.19/0.87/13, 5.27 /0.85/20	4.24 /0.75/20 , 5.32 / 0.76 / 20
Dört	8.36 / 0.75 / 15	8.33 / 0.78 / 20	8.36 / 0.70 / 20

Şekil 4.3.(a)' da görüldüğü gibi tek U-şekilli sinyal emici tabanlı FSY çalışmasında 90% değeri civarında sinyal emilimi gerçekleştiren tek rezonans frekansı elde edilmektedir. Belirtilen frekans aralığında dar bantta sinyal emilimi gerçekleşmektedir. Çift U-şekilli sinyal

emici tabanlı FSY çalışmasında ise baz alınan frekans bandı aralığında 4.19 ve 5.27 GHz değerlerinde rezonans elde edilmekte olup bu durum bir çok uygulama için avantaj teşkil etmektedir. Her ne kadar deneysel ve nümerik sinyal emilim değerleri arasında 10%'luk bir fark oluşsa da değerler istenilen seviyelerdedir ve teorik, nümerik ve deneysel sonuçlar birbiriyle uyum içindedir. Dört U-şekilli sinyal emici tabanlı FSY çalışmasında rezonans frekansı değeri 8.36 GHz civarında elde edilmiş ve sinyal emilim oranı ise 78%olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.3.'de görüldüğü her üç çeşit uygulamada dar frekans bandı aralığında sinyal emici özelliği göstermektedir. Dar bant sinyal emici yapıları biyomedikal ve algılayıcı alanları gibi birçok alanda kullanılmaya elverişlidir ( Lu ve ark. 2015).



Şekil 4.3. Teorik, nümerik ve deneysel sinyal emilim değerleri ve frekansları (a) tek, (b) çift, (c) dört U şekilli sinyal emici tabanlı FSY

Mikrodalga sensör yapıları, algılayıcı uygulamaları alanında kullanılmaya oldukça elverişli bir araç olarak ortaya çıkmışlardır. Kar tanelerinin yoğunluğunun ölçülmesi (Tiuri ve ark. 1982) ve granül malzemelerin neminin ölçülmesi (Trabelsi ve Nelson 2010) buna temel

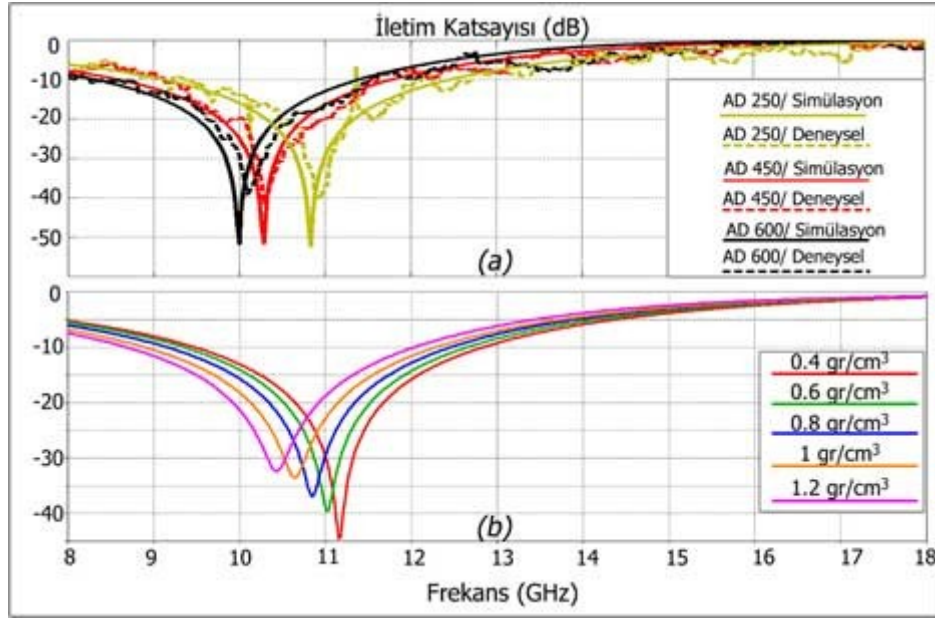
bir örnek olarak verilebilir. Bu kısımda ise yukarıda bahsedilen U-şekilli FSY tabanlı sensör yapılarının sensor tabakasına yerleştirilebilecek uygun malzemelerin dielektrik katsayılarının bulunması ve unun yoğunluğunun elde edilmesine kullanılışı birer uygulama örneği olarak verilmiştir. İlk yoğunluk uygulaması için U şekilli FSY yapısının sensor tabakasına farklı yoğunluk değerlerine sahip arlon malzemeleri yerleştirilmesi durumunda rezonans frekansındaki değişimler örneklenmiştir. Dielektrik katmanı (alttaş) olarak ise yine CuClad217 malzemesi seçilmiştir. Un yoğunluğu değerleri 0.4 gr/ cm<sup>3</sup> – 1.2 gr/ cm<sup>3</sup> arasında 0.2 gr/ cm<sup>3</sup> aralıklarla artırılarak alınmış olup gerekli dielektrik sabiti değerleri (Nelson, 1984) çalışmasından elde edilmiştir. İletim katsayısı değerlerinin deneysel ve simülasyon sonuçları elde edilerek malzemelerin dielektrik sabiti katsayısı ve yoğunluklarının tespitinin mümkün olduğunu ortaya çıkmıştır. İlk aşamada, tek U-şekilli frekans seçici yüzey yapısı basit bir yapıya sahip olmasından örnek olarak ele alınmış ve bu elemanın sensor tabakasına farklı yoğunluk değerlerine sahip Arlon malzemesi konularak iletim katsayısındaki değişimler gözlemlenmiştir. Bu uygulamada dielektrik katsayısı değerleri sırasıyla 2.5, 4.5 ve 6.0 olan AD 250, AD 450, ve AD 450 arlon malzemeleri seçilmiştir. Şekil 4.4 de gösterildiği gibi farklı yoğunluk değerlerine sahip arlon yapılarının FSY yapısının arkasına yerleştirilmesi durumunda rezonans frekansları doğrusal olarak değişmektedir. Rezonans frekansları Arlon 250, 450 ve 600 malzemeleri için sırasıyla 10.85 GHz, 10.71 GHz, 10.0 GHz olarak ölçülmüştür. Bu çalışma da nümerik simülasyon sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Şekil 4.4.(a)' da görüldüğü gibi 850 MHz'lik bant genişliğinde rezonans frekansları elde edilmiş ve dielektrik sabiti katsayısı değeri 2.5 den 6 ya doğru arttığında rezonans frekansı 10.85 GHz den 10 GHz' e düşmekte olduğu gözlemlenmektedir.

Diğer sensör çalışmasında ise kullanılarak bu yapının bio-sensör özelliği taşıdığı gösterilmiştir. Daha önceden belirtildiği gibi çalışmanın gerçekleştirilmesi için un yoğunluğuna göre dielektrik sabiti değerleri (Nelson, 1984) çalışmasından alınmıştır. Bu verilerden faydalanılarak elde edilen iletim katsayıları değerlerinin nümerik simülasyon çalışmasının sonuçları şekil 4.4(b)'de gösterilmiştir. Deneysel ortam sağlanamadığından bu bölüm sadece nümerik olarak analiz edilmiştir. Un yoğunluğu hassasiyetinin nümerik çalışmasında rezonans frekansı 0.74 GHz bant genişliğinde elde edilmiş ve yoğunluğun 0.4 den 1.2 gr/cm<sup>3</sup> artmasıyla rezonans frekansı değeri 11.16 GHz den 10.42 GHz değerine düşmüştür. Un yoğunluğunun değişimine göre rezonans frekansı değerlerinin değişimi Tablo 4.2'de özetlenmiştir.



Tablo 4.2. U şekilli FSY yapısının un yoğunluğuna göre elde edilen rezonans frekansı değişimleri

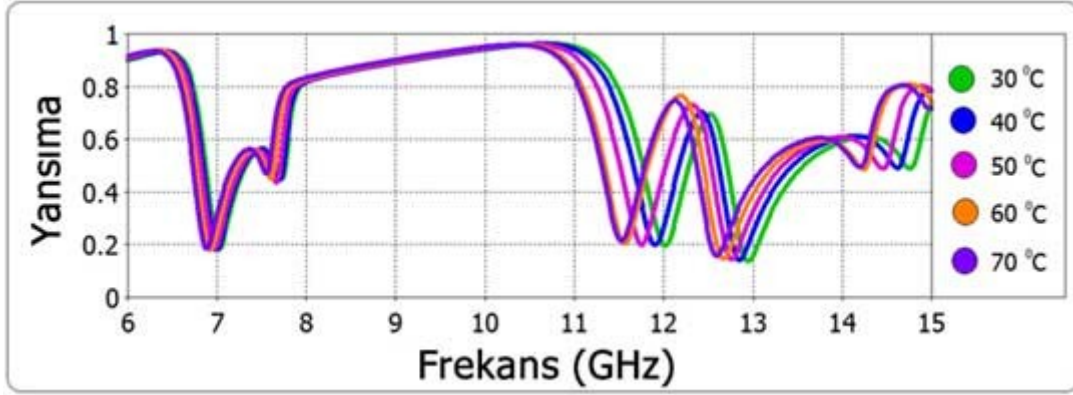
Un yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )
0,4	1,65	0,05	0,03	11.16
0,6	2,08	0,12	0,06	11.03
0,8	2,64	0,22	0,08	10.84
1,0	3,17	0,38	0,12	10.65
1,2	3,88	0,49	0,13	10.42



Şekil 4.4. (a) Farklı tip Arlon malzemelerin yoğunluk sensörü olarak kullanılması durumunda elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlar, (b) Farklı yoğunluklarda un malzemesinin sensör tabakasına yerleştirilmesi durumunda elde edilen iletim katsayısının nümerik sonuçları

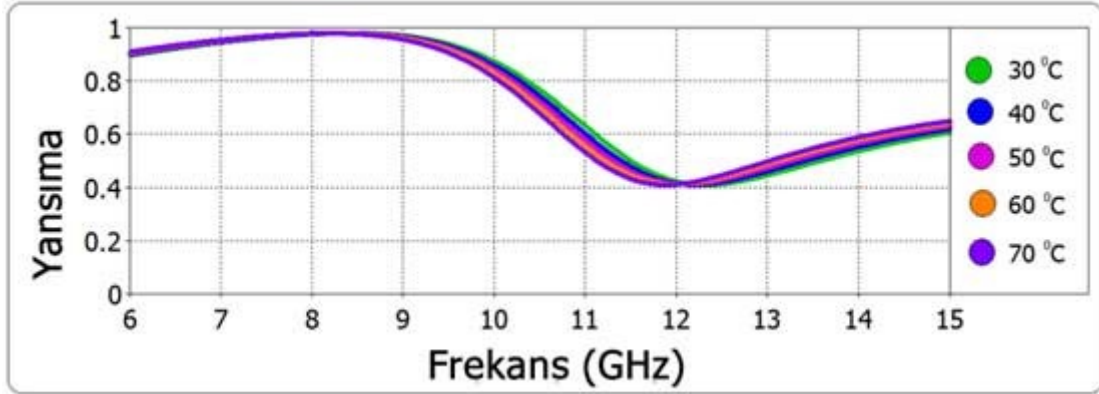
#### 4.2 Biyosensör Uygulamaları

Çalışması gerçekleştirilen biyosensör uygulamasında nümerik olarak tasarlanan bakışimsız metamalzemeler büyük, küçük ve sıfır bakışimsız özellikleri incelenerek sunulmuştur. Daha sonra iletim matrisi yöntemiyle yansımaya ve iletim katsayıları geniş band frekans aralığında hesaplanmıştır. Bakışimsız metamalzeme tasarımlarına ait elde edilen simülasyon bulguları incelenmiş ve önerilen yapılara için yansımaya katsayıları grafikleri Şekil 4.5.,4.6. ve 4.7.' de sunulmuştur.6.5–8GHz, 11–15 frekansları aralığında büyük bakışimsızlık özelliğine sahip olan yapıda yansımaya katsayısı düşük değerlerdedir, fakat 8–11GHz aralığında önerilen yapı üzerine gelen elektromagnetik enerji büyük oranda geri yansıtılmıştır. Ek olarak, Şekil 4.5'te görüldüğü gibi yansımaya katsayısında büyük oranda değişim gözlenmiş ve domuz biyolojik hücrelerinin sıcaklığının artmasıyla arttığında rezonans frekansı eksenin soluna doğru kaymıştır.



Şekil 4.5. Büyük bakışimsızlık özelliğine sahip elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıklarına göre yansımaya katsayısı değerleri

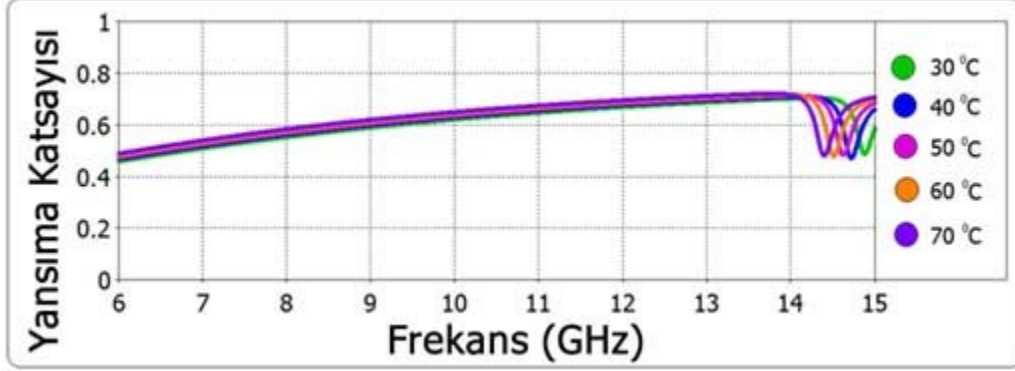
Küçük bakışimsızlık tabanlı metamalzeme yapısında ise, 9–15GHz frekans aralığında yansımaya katsayısı düşük seviyelerde elde edilirken 6–9GHz frekans aralığında gelen elektromanyetik dalganın büyük oranda geri yansıtılması gerçekleşmiştir. Bu yapı için elde edilen grafik bir önceki tasarıma göre çok daha yumuşak çizgilere sahiptir. Şekil 4.6.'te gösterildiği gibi küçük bakışimsızlık oranına sahip yapıda da büyük bakışimsızlık tabanlı metamalzeme gibi kemik iliği sıcaklığının artmasıyla elde edilen rezonans frekansı sola kaymaktadır.



Şekil 4.6. Küçük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile yansımaya katsayısı değerleri

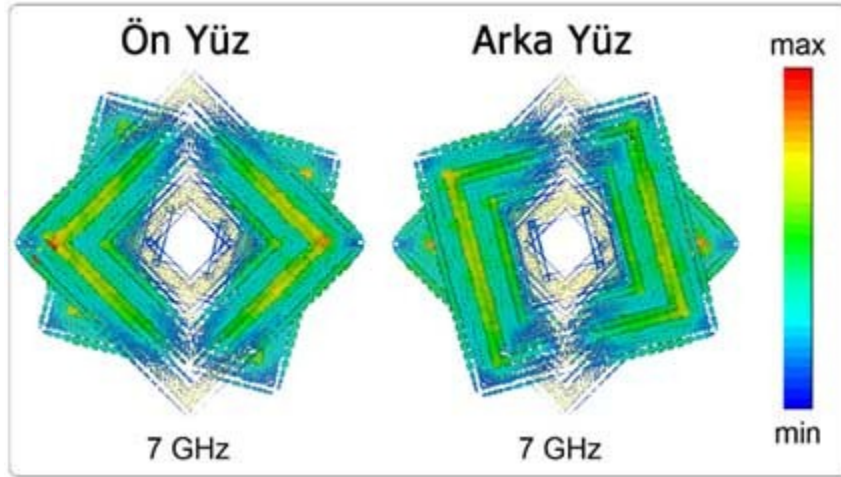
Şekil 4.7' da gösterildiği gibi, diğer bakışimsızlık tabanlı yapıların tersine sıfır bakışimsızlık tabanlı yapı, aynı frekans bandında daha farklı özellikler taşımaktadır. Gelen elektromanyetik dalga 6–14 GHz aralığında doğrusal olarak yansımaktadır. 14–15 GHz

frekans aralığında ise diğer yapılarda olduğu gibi kemik iliğinin sıcaklığının yükselmesi ile rezonans frekansı eksenin soluna kaymaktadır.

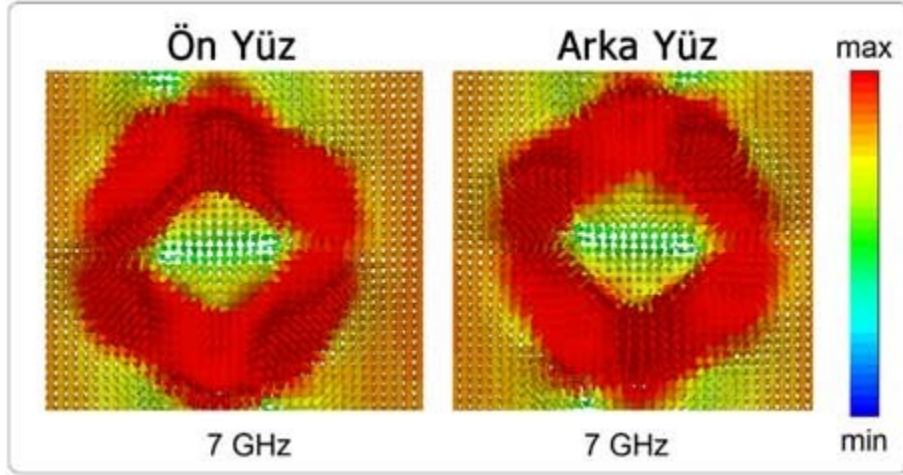


Şekil4.7.Sıfır bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile yansımaya katsayısı değerleri

Şekil4.8.veŞekil4.9.' de büyük bakışimsızlık tabanlı tasarımın fiziki özelliklerinin daha iyi anlaşılması için 7 GHz' de elektrik alan dağılımı ve yüzey akım yoğunluğu sunulmuştur. Şekil 4.8'de, büyük bakışimsızlık tabanlı metamalzeme yapısının rezonatörleri üzerinde yoğunlaşan, elektrik alan dağılımı ve yüzey akım yoğunluğu gösterilmektedir. Bu rezonatörler üzerinde yoğunlaşan elektrik alan dağılımı ve yüzey akım yoğunlukları büyük oranda elektrik alandan kaynaklanmaktadır.

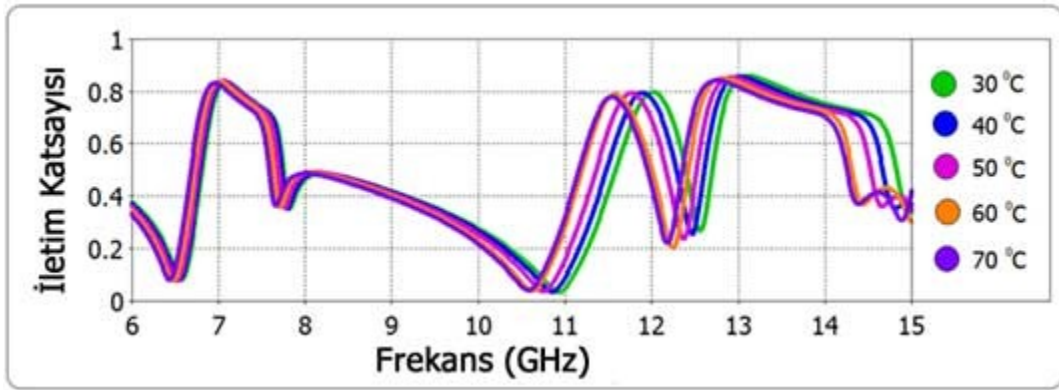


Şekil 4.8. Büyük bakışimsız özellikli yapı için 7 GHz' de ve 30 °C kemik iliği için analiz edilen elektrik alan dağılımının yapının ön ve arkayüzünden görünüş grafiği



Şekil 4.9. Büyük bakışimsız özellikli yapı için 7 GHz' de ve 30 °C kemik iliği için analiz edilen yüzey akım dağılımının yapının ön ve arkayüz üzerindeki görünüşü

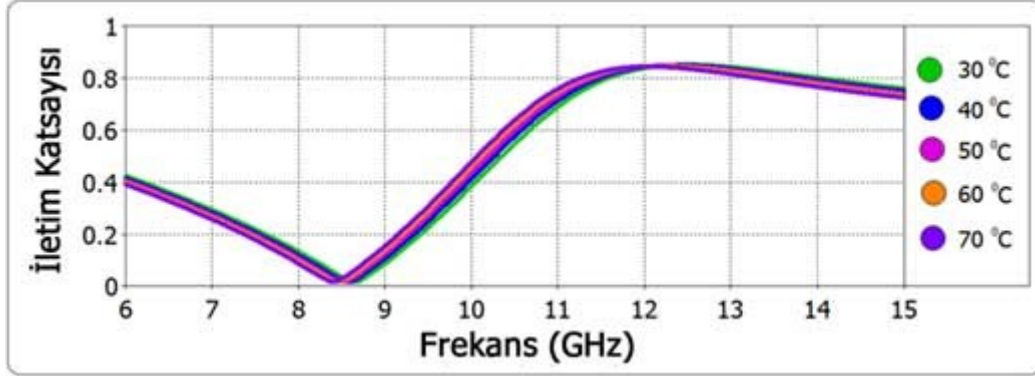
İletim katsayıları değerlerine bakıldığında, büyük bakışimsız özelliğe sahip yapı, Şekil4.10.'da görüldüğü üzere 6.5 GHz, 7.8 GHz, 10.8 GHz, 12.4 GHz ve 14.5 GHz' de birden fazla rezonans frekansına sahiptir. Buna göre elektromagnetik dalganın iletimi 7 GHz, 11.8 GHz ve 13–14 GHz aralığında yüksek oranda olduğu gözlemlenmektedir. İletim katsayısı değeri farklı sıcaklıktaki kemik iliği hücrelerinde gözle görülür oranda değişim göstermektedir, ayrıca minimum ve maksimum iletim katsayı değerleri için rezonans frekansları, kemik iliği sıcaklığı arttığında, yansıma katsayısında olduğu gibi eksenin soluna doğru kaymaktadır.



Şekil 4.10. Büyük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile iletim katsayısı değerleri değişimi

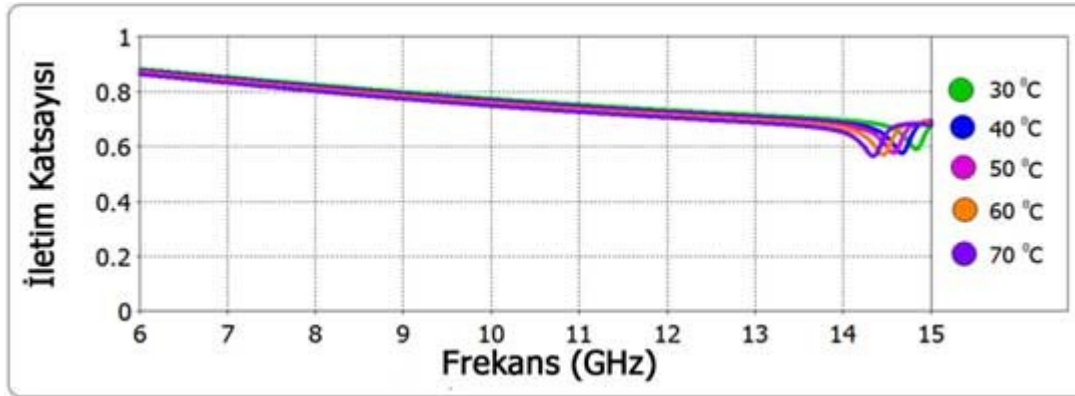
Küçük bakışimsızlık tabanlı tasarım için ise, 8.5 GHz'de iletim katsayısı değerinin sıfır olduğu Şekil4.11'de gösterilmektedir, fakat gelen elektromanyetik dalga 11–15 GHz frekans bandında büyük oranda iletilmektedir. Bunun yanı sıra, farklı sıcaklık değerine sahip kemik

ilikleri için, iletim katsayısı değeri çok az oranda değişse de, rezonans frekansı diğer tasarımlardaki gibi eksenin soluna kaymaktadır.



Şekil 4.11. Küçük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile iletim katsayısı değerleri değişimi

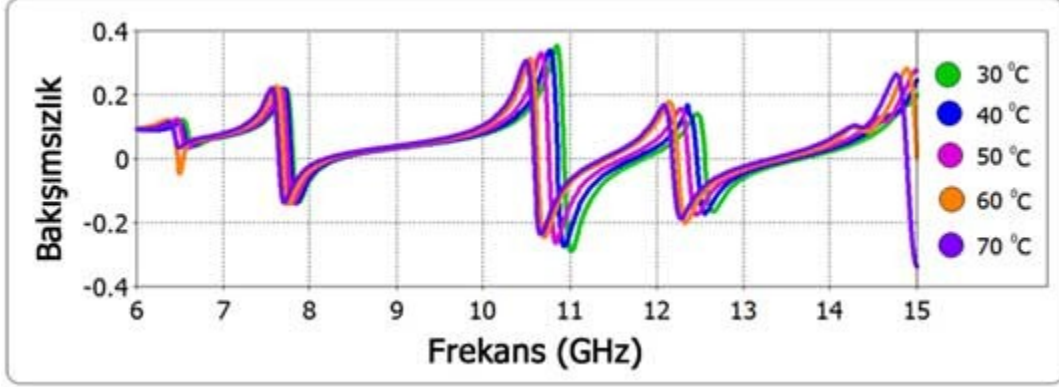
Sıfır bakışimsızlık tabanlı metamalzeme Şekil4.12' de gösterildiği gibi 14.5 GHz' de küçük bir rezonans frekansına sahiptir, fakat bu tasarım 6–14 GHz'lik geniş bir frekans aralığında gelen elektromanyetik dalgayı büyük bir oranda geri yansıtmaktadır. Farklı sıcaklık değerlileri için ise diğer tasarımlardaki sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmekte ve kemik iliği sıcaklığı artırıldığında rezonans frekansı sola doğru kaymaktadır.



Şekil 4.12. Sıfır bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli metamalzeme yapısına ait farklı kemik iliği sıcaklıkları ile iletim katsayısı değerleri değişimi

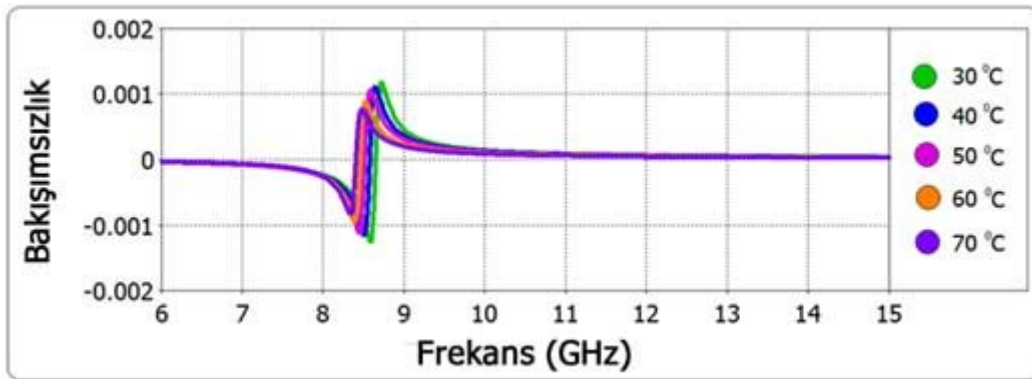
Bakışimsızlık ve sıcaklık arasında ilişki kurmak için, bakışimsızlık değerlerinin sıcaklık ile değişip değişmediğinin nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak öncelikle büyük bakışimsızlık tabanlı tasarım yapı incelenmiştir. Bu yapı için elde edilen rezonanslar Şekil4.13.'de gösterildiği gibi 6.5 GHz, 7.8 GHz, 10.8GHz, 12.5 GHz ve 15GHz civarlarında gerçekleşmiştir. Büyük bakışimsızlık değeri 10.8 GHz rezonans frekansında görülmektedir. Bunun yanı sıra, domuz kemik iliği hücrelerinin sıcaklık değişimlerine göre elde edilen

bakışimsızlık değerleri incelenmiş ve önceki grafiklerde olduğu gibi rezonans frekansının sıcaklık arttığında eksenin soluna doğru doğrusal olarak kaymakta olduğu gözlemlenmiştir. Bu da, bu tasarımın biyosensör olarak kullanılabilceğini göstermektedir.



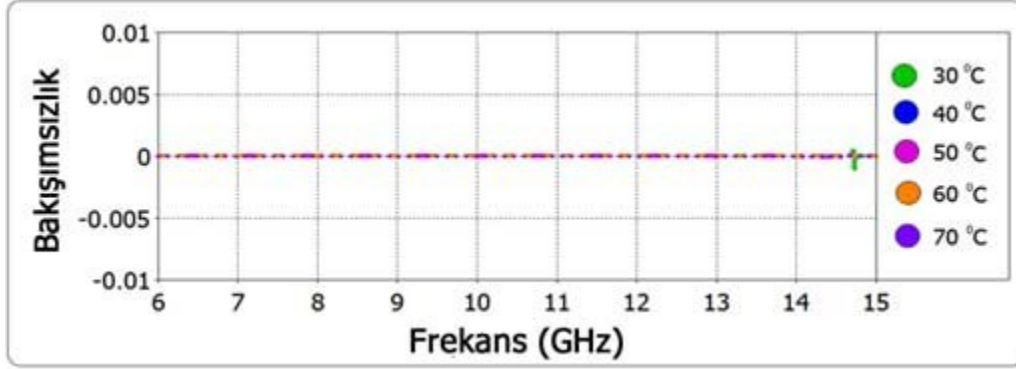
Şekil 4.13. Büyük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli yapı için nümerik olarak elde edilen bakışimsızlık değeri

Küçük bakışimsızlık tabanlı metalmalzeme yapısı için rezonans frekansı değeri 8.5 GHz seviyelerinde elde edilmektedir. Bakışimsızlık değerleri  $(|\kappa| \leq \sqrt{\epsilon/\mu})$  aralığında, çok düşük seviyelerde oluşmaktadır. Şekil 4.14'te gösterildiği gibi, bakışimsızlık değerleri büyük bir frekans aralığı boyunca (9–15 GHz) sabit değerlerde ve çok düşük seviyelerde elde edilmiştir. Böylece, hedeflenen frekans aralığında sürekli ve sabit bakışimsızlık elde edilmiştir. Ayrıca, domuz kemik iliği hücresinin sıcaklığı arttığında, elde edilen nümerik bakışimsızlık değeri doğrusal olarak kaymaktadır. Şekil 2.13.'te küçük bakışimsızlık tabanlı tasarımın biyosensör uygulamaları için kullanılması durumunda bakışimsızlık verisi görülmektedir.



Şekil 4.14. Küçük bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli yapı için nümerik olarak elde edilen bakışimsızlık değeri

Sıfır bakışsızlık tabanlı metamalzeme yapısı uygulamasında ise hedeflenen frekans bandında rezonans elde edilememektedir. Şekil4.15.'te gösterildiği gibi sıcaklığın değişmesiyle de rezonans frekansı oluşmamaktadır.



Şekil 4.15. Sıfır bakışsızlık tabanlı elmas şekilli yapı için nümerik olarak elde edilen bakışsızlık değeri

Bu kısımda, domuz kemik iliği sıcaklığının farklılaşması durumuna göre tasarımların rezonans frekanslarındaki değişim analiz edilmiştir. Tıp alanındaki uygulamalarda kemik iliği sıcaklığının tespit edilmesi önem arz etmektedir. Elektromagnetik dalgalar tıp alanında tedavi edici amaçlı kullanıldığında, sahip olduğu enerjinin vücut tarafından ne kadar emildiği bilgisi önem arz etmektedir ve bu emilen enerji ısı artışına sebep olduğundan dolayı sıcaklık artışıyla ilgili ciddi çalışmalar yapılmaktadır. Yağ ve kas hücreleri sıcaklığı az oranda emerken, deri hücreleri sıcaklığın emilimini daha büyük oranda gerçekleştirmektedir. Hücrelerdeki sıvı miktarı ile sıcaklığın yükselmesi yakından ilişkilidir. Diğer bir yönden ise, herhangi bir biyolojik hücrenin emilim oranı, doğrudan doğruya dielektrik katsayısı değeri ile ilgilidir. Bundan dolayı, biyolojik hücrelerin sıcaklığının algılanması belirlenebilmesi için elektromanyetik enerjinin emilim oranının belirlenmesi için çok önemlidir. Bu bağlamda domuz hücrelerinin kemik iliği sıcaklığının farklı değerlerine karşılık gelen dielektrik katsayısı değerlerinin belirlenmesine yönelik bir çalışma 30 °C – 70 °C arasında yapılmıştır (Factorava,

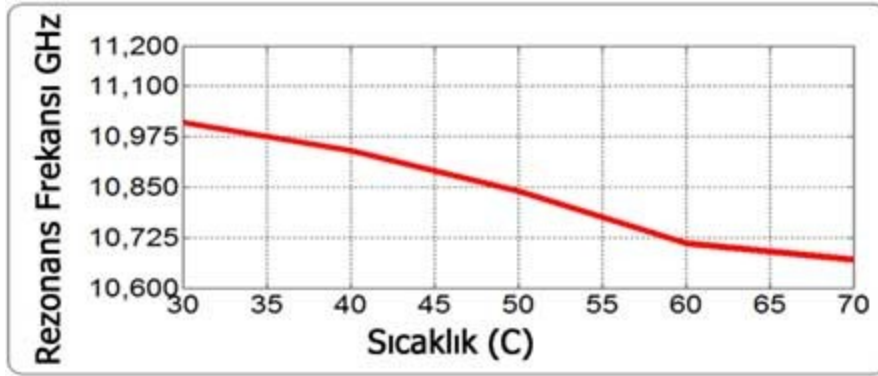
2008). Domuz kemik iliği'nin karmaşık dielektrik katsayısı değeri  $\epsilon_i = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$  denkleminde göre elde edilebilir. Buradan,

$$\epsilon' = \frac{k^2 + \beta^2 - \alpha^2}{\beta_0^2}$$

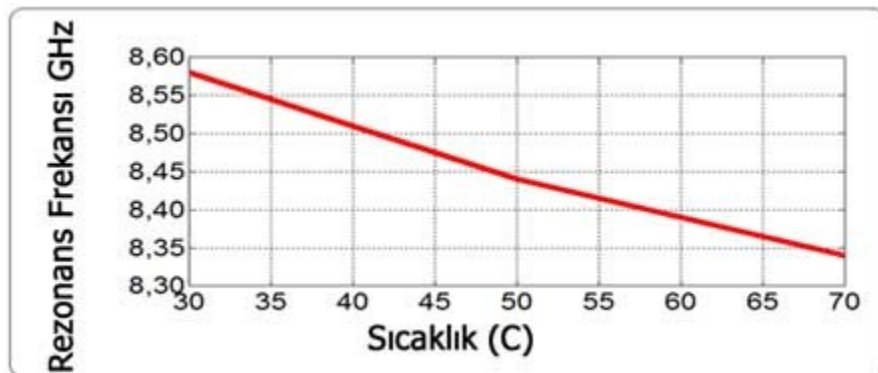
(4.1)

$$\text{Tan}\delta = \frac{2\alpha\beta}{k^2 + \beta^2 - \alpha^2} \quad (4.2)$$

$\alpha, \beta$  Elektromanyetik dalganın propagasyon sabiti bileşenleri,  $i\alpha + j\beta$ ,  $k = 2\pi/\lambda_c$  ve  $\beta_0 = 2\pi/\lambda$  sayesinde tanımlanmaktadır. Tasarlanan elmas şekilli yapıların biyosensör olarak uygulamaya konulabilmesi için kompleks dielektrik katsayısı değeri (Factorova, 2008) çalışmasından alınmıştır. Bu verilerden faydalanılarak, simülasyon programına sıcaklık algılanmasına yönelik bakışimsızlık tabanlı metalmalzeme biyosensör uygulaması için yeni malzeme olarak tanımlanmıştır. Bu sıcaklık değerinin  $30^\circ\text{C}$ ' den  $70^\circ\text{C}$ ' ye yükselmesi durumunda rezonans frekansı doğrusal bir şekilde Şekil4.16. - Şekil4.18.'de gösterildiği gibi eksenin sol tarafına doğru gitmektedir. Her üç bakışimsızlık tabanlı elmas şekilli yapının da rezonans frekansları aynı şekilde doğrusaldır.

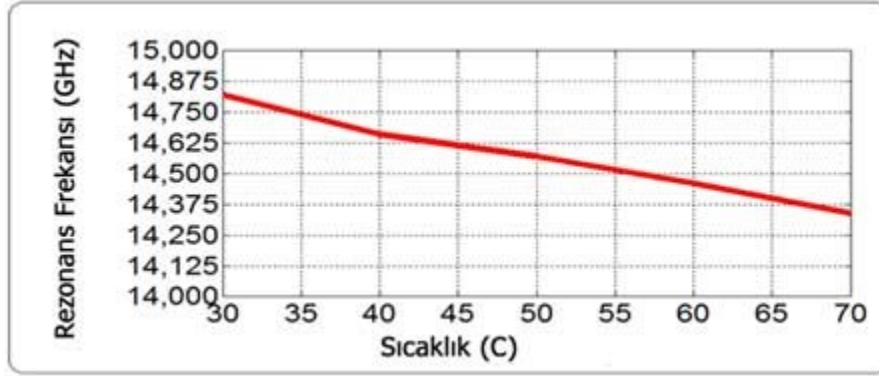


Şekil4.16. Elmas şekilli yapılardan büyük bakışimsızlık tabanlı yapının farklı kemik iliği sıcaklığı algılanması için biyosensör uygulaması olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan rezonans frekansları değerleri değişimi



Şekil4.17. Şekil4.16. Elmas şekilli yapılardan küçük bakışimsızlık tabanlı yapının farklı kemik iliği sıcaklığı algılanması için biyosensör uygulaması olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan rezonans frekansları değerleri değişimi



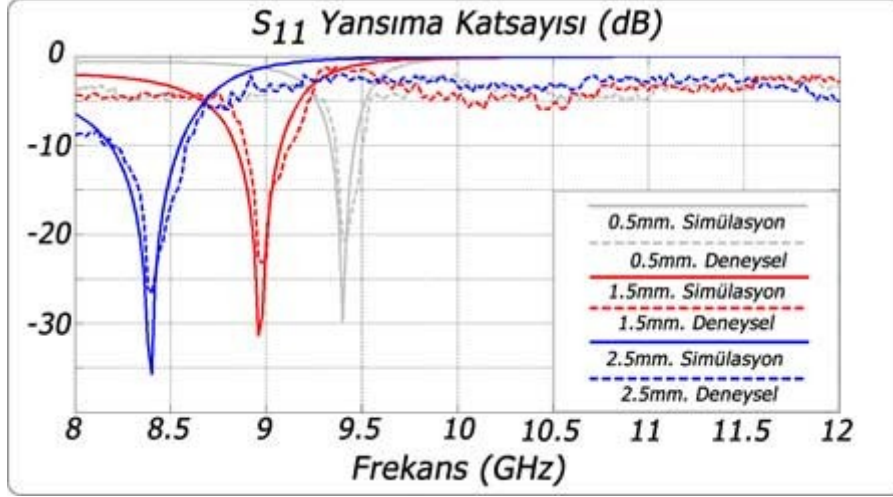


Şekil 4.18. Elmas şekilli yapılardan sıfır bakışimsızlık tabanlı yapının farklı kemik iliği sıcaklığı algılanması için biyosensör uygulaması olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan rezonans frekansları değerleri değişimi

### 4.3 Bakışimsız Yokluk Tabanlı Metamalzeme Sensör Uygulamaları

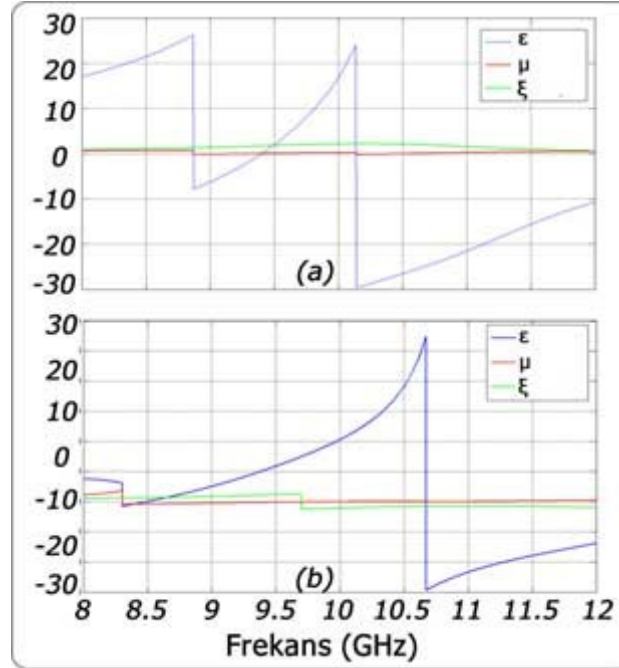
#### 4.3.1 Bakışimsız Yokluk Tabanlı Metamalzeme Basınç Sensörü

Basınç algılama uygulaması için önerilen MTM basınç sensörünün algılama katmanının hava ile doldurulduğu kabul edilmiştir (yani  $\epsilon_s=1$ ). Basınçta oluşacak değişimin gözlemlenmesinde algılayıcı katmanın kalınlığının değişimi göz önüne alınmış ve kalınlığın basıncın değişimiyle azalıp artması ile algılanmıştır. Yapının bu uygulamada kullanımında katmanın duvarları z-ekseni boyunca hareket etmektedir bu durumda sistemin yansımaya ve iletim davranışını değiştirip farklı noktalarda rezonans oluşmasını sağlamaktadır. Oluşan değişimleri göstermek ve değişimin lineer olup olmadığını gözlemlemek için sensör kalınlığının üç farklı değeri göz önüne alınmıştır (0.5, 1.5, 2.5 mm.). Elde edilen sonuçlar Şekil 4.19.'da gösterilmiştir. Rezonansın olduğu frekans değerleri göz önüne alınan algılayıcı katmanın 0.5 ve 2.5 mm. kalınlıklarına göre sırasıyla 9.40GHz ve 8.39 GHz şeklinde elde edilmiştir. İki kalınlığa karşılık gelen frekans değişimi 1GHz'den fazla olmuştur bunun nedeni ise yapının ön ve arka yüzeyleri arasındaki karşılıklı oluşan kapasitans değerlerinin algılayıcı katmanın kalınlığı ile değişmesidir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar sayısal analiz sonuçlarımızı destekler yönde olup bu kıyaslama Şekil 4.19.'da görülebilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi önerilen yapı algılayıcı katmanın kalınlığına karşı çok hassas olup yansımaya miktarı her üç değer için de -20dB'nin çok altında olmaktadır. Bu durum hassasiyetinin başka bir göstergesi olarak gösterilebilir.



Şekil 4.19. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün algılama katmanının kalınlığına göre rezonans değişimini veren nümerik ve deneysel yansımaya katsayısı verileri

Elektrik ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) ile birlikte bakışimsızlık ( $\xi$ ) parametreleri ele alınan algılayıcı katmanın kalınlığına 0.5 ve 2.5mm uygun olarak elde edilmiş ve Şekil 4.20.'de sunulmuştur.

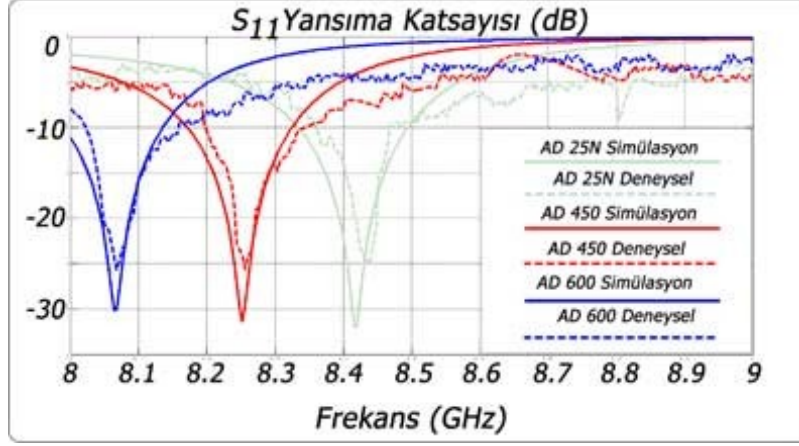


Şekil 4.20. Önerilen Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün basınç algılama uygulamasında oluşan (a) 0.5mm (b) 2.5mm' deki epsilon, mu ve bakışimsızlık değeri.

#### 4.3.2 Bakışimsız Yokluk Tabanlı Yoğunluk Sensörü

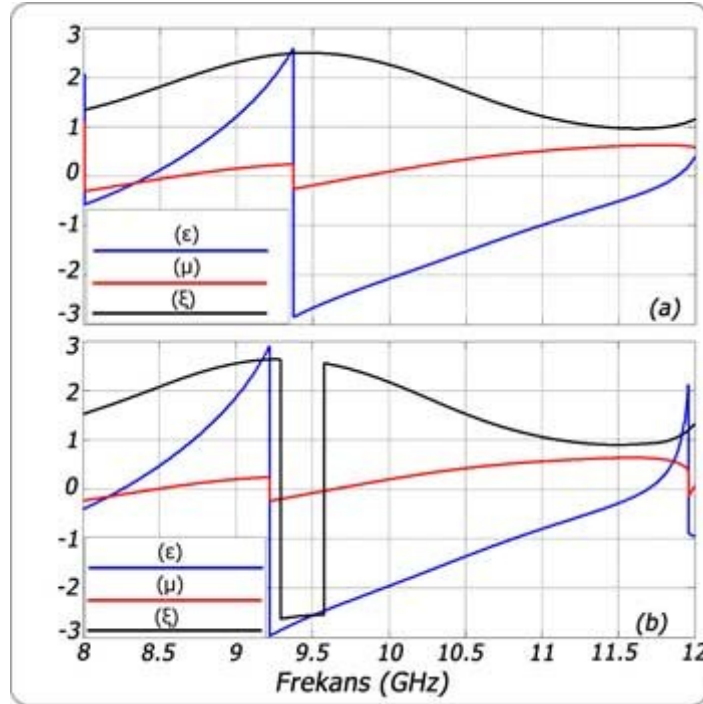
Bu bölümde bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensör yapısının yoğunluk sensörü olarak kullanılması durumundaki sonuçlar gösterilmiştir. Nümerik ve deneysel çalışma için oluşturulan modellemelerde, sensör katmanı, farklı dielektrik katsayısı değeri olan ve farklı

yoğunluklardaki ArlonAD 25N, Arlon AD 450 ve Arlon AD 600 malzemeleri kullanılmıştır. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzemenin rezonans frekansı kullanılan her üç malzeme için de lineer özellik gösteren sonuçlar vermiştir. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün öz-empedans ( $L_{self}$ ) değeri sadece rezonatör ve gelen elektromagnetik dalganın dalgaboyundan etkilendiğinden dolayı, bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörü öz-kapasitans ( $C_{self}$ ) değerinden etkilenmektedir. Bundan dolayı elektrik geçirgenliği değerindeki artış veya azalış, özindüktans değerini değiştirmemektedir. Yapının boyutları, dielektrik malzemenin kalınlığı ve sensör katmanının kalınlığı sabit kaldığı için, sensör yapısının ön ve arka yüzde bulunan rezonatörler arasında oluşan karşılıklı endüktans değeri değişmemiştir. Bununla birlikte öz-kapasitans ( $C_{self}$ ) değeri özellikle en dış ve en iç metal rezonatörler arasındaki kapasitans ve sensör katmanında bulunan malzemenin dielektrik katsayısı değerinden ve boşlukların kapasitans değerinden etkilenir. Bu çalışmada yoğunlukları sırasıyla 1.7, 2.40 ve 2.45 olan yukarıda bahsettiğimiz AD 25N, AD 450 ve AD 600 malzemeleri kullanılarak yoğunluk sensörü uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu numerik ve deneysel çalışmalara ilaveten bir diğer yoğunluk sensörü uygulaması da farklı yoğunluk değerlerindeki buğday unları için sadece nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. Elektrik geçirgenliği değerleri sırasıyla 3.38, 4.5 ve 6.0' olan AD 25N, AD 450 ve AD 600 malzemelerinin Şekil 4.21' de gösterilen nümerik analiz ve deneysel çalışma sonuçlarına bakıldığında kullanılan malzemenin dielektrik katsayısı değerine bağlı olarak rezonans frekansının açık bir şekilde değiştiği gözlemlenmektedir. AD 25N, AD 450 ve AD 600 malzemeleri kullanıldığında yapının rezonans frekansları sırasıyla, 8.42GHz, 8.25GHz ve 8.07GHz' dir. Kalibrasyon ve laboratuvar ortamından kaynaklanan farkın dışında deneysel ve nümerik çalışmada elde edilen sonuçlar birbirleriyle oldukça uyumludur. Ayrıca bu çalışma daha önce bu alanda benzeri yapılmış olan metamalzeme sensör çalışmalarından (Karaaslan ve Bakir, 2014, Ekmekçi ve Sayan, 2013) daha iyi sonuçlar vermektedir.



Şekil 4.21. Farklı malzemeler kullanılarak oluşturulan bakışsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörünün yoğunluk sensörü uygulamasının nümerik ve deneysel sonuçlarının gösterilmesi

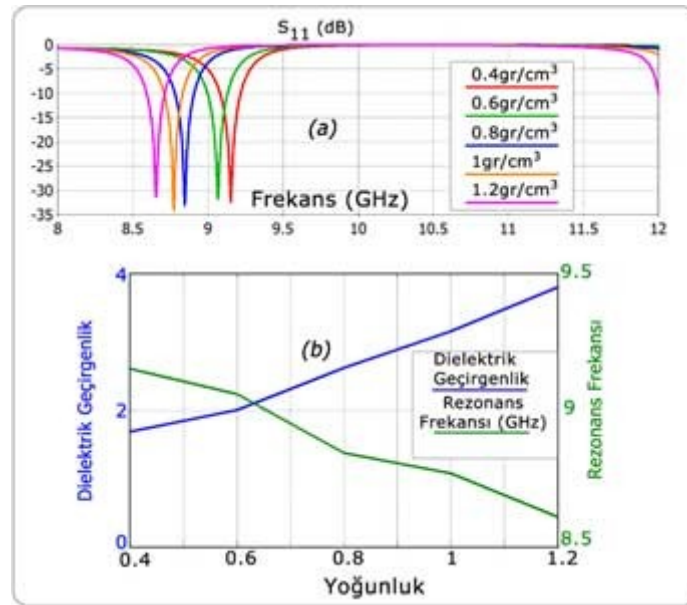
Bu çalışmada ise AD25N ve AD450 malzemelerinin nümerik sonuçları kullanılarak sensörün bakışsız yokluk özelliğinin vurgulanmış, bakışsızlık değerleri yeniden elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.22.' da gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Bakışsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörünün yoğunluk sensörü olarak kullanıldığında (a) AD 25N için epsilon, mu ve bakışsızlık değeri, (b) AD 450 için epsilon, mu ve kırılma indisi verileri

Buğday ununun yoğunluğundaki değişim, buğday ununun dielektrik katsayısı değerinde değişime sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı çalışmanın daha iyi anlaşılması için

nümerik analizlerde sensör katmanı olarak değişik yoğunluklarda buğday unlarının özellikleri tanımlanmıştır. Tüm nümerik analizlerde sensör katmanı kalınlığı ( $\epsilon_s$ ) sabit olup 0.76mm olarak alınmıştır ve nümerik analizler 5 farklı yoğunluğa (0.4, 0.6, 0.8, 1 ve 1.2  $gr/cm^3$ ) sahip buğday unları için yapılmıştır. Un yoğunluklarına ilişkin veriler (Nelson.S.A, 2005) çalışmasından alınmıştır. Nümerik çalışmalarda elde edilen sonuçlar Şekil 3.7' de gösterilmiştir. Şekil 4.23.a'da ki nümerik sonuçlara bakıldığında 0.4  $gr/cm^3$  un yoğunluğu karşılık yapının rezonans frekansı 9.152 GHz olduğu görülürken, 1.2  $gr/cm^3$  un yoğunluğuna karşılık yapının rezonans frekansının 8.61 GHz olduğu görülmektedir.  $C_{self}$  ve  $C_{mut}$  terimlerindeki artıştan dolayı dielektrik katsayısı verisindeki artış, rezonans frekansında azalmaya sebep olmaktadır. Buğday ununun yoğunluk, dielektrik katsayısı ve rezonans frekansı arasındaki ilişki Şekil 4.23.b' de gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere yoğunluğun her 0.2  $gr/cm^3$  değişime karşılık rezonans frekansında 150 MHz lik bir değişim meydana gelmektedir. Şekil 4.23.b' de görüldüğü üzere dielektrik katsayısı değeri lineer artış, rezonans frekansında lineer bir azalışa neden olmaktadır. Daha açık bir şekilde anlatılmak gerekirse un yoğunluğundaki 0.1  $gr/cm^3$  lük artış, rezonans frekansında 75MHz lik bir düşüşe neden olmaktadır.



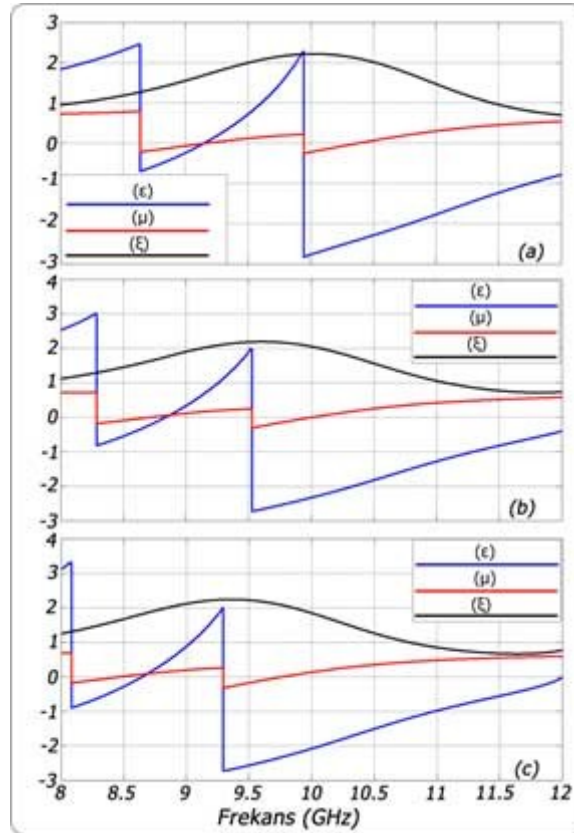
Şekil 4.23. Bakışsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün un yoğunluğu tespiti için kullanımı (a) farklı un yoğunluklarına göre rezonans frekansı değerleri (b) un yoğunluğundaki artışa göre rezonans frekansı ve elektrik geçirgenliği değerlerinin değişimi

Bakışsız yokluk özelliğinin açıklanması için 9.152 GHz, 8.844 GHz and 8.61 GHz rezonans frekansı değerlerine sahip sırasıyla 0.4  $gr/cm^3$ , 0.8  $gr/cm^3$  ve 1.2  $gr/cm^3$  yoğunluklardaki üç

değişik buğday unu örnek olarak alınmıştır. Şekil 4.24' e bakıldığında  $\epsilon$  ve  $\mu$  değeri sıfıra yakınken bakışimsızlık değerinin sıfırdan büyük olduğu görülmektedir.

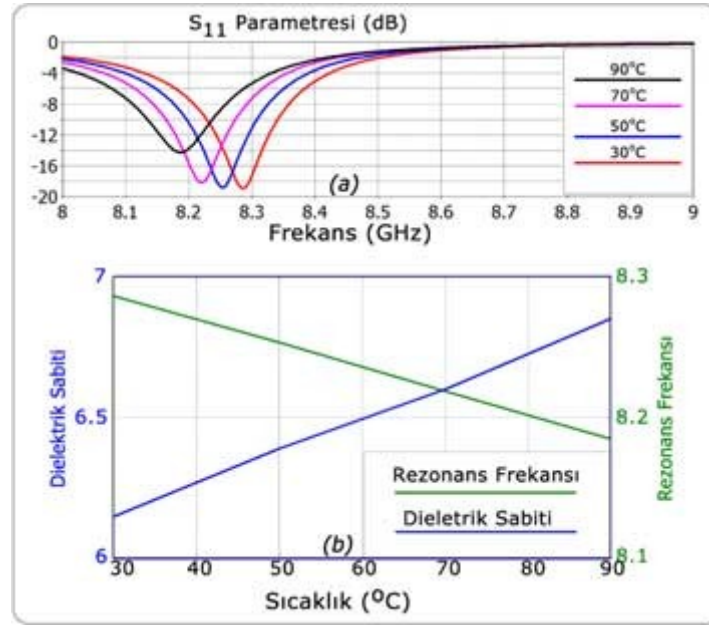
#### 4.3.3 Bakışimsız Yokluk Tabanlı Sıcaklık Sensörü

Bu çalışmada, bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensör, kemik iliğinin sıcaklığındaki değişimleri algılamak amacıyla kullanılmıştır. Bu uygulamada özellikle kemik iliği sıcaklığı seçilmesinin sebebi, bu sensörün biyo-sensör olarak kullanılabilmesi ve kullanılabileceği vurgulanmıştır. Eğer hücre sıcaklıklarındaki artış bilirse SAR değeri tespiti veya elektromagnetik dalganın tedavi edici etkilerinin araştırılabilir. Bundan dolayı bu uygulamada kemik iliği seçilmiştir. Bu çalışma için nümerik analizlerde sensör katmanı daha önce söylendiği gibi 0.76mm olarak alınmış ve sensör katmanı olarak değişik sıcaklıklardaki kemik iliğinin özellikleri tanımlanmıştır. Kemik iliğinin seçilen farklı sıcaklık değerlerindeki elektrik geçirgenliği değerleri (Factorova, 2008) çalışmasından alınmıştır. Kemik iliğinin sıcaklığındaki değişim elektrik geçirgenliği değerini değiştirmekte ve elektrik geçirgenliğindeki bu değişim sensör yapısının yansımaya ve iletim katsayılarını değiştirmektedir. Sıcaklık değişimi ve metamalzemenin yansımaya katsayısı Şekil 4.25.a' da gösterilmiş ve grafikten görüleceği üzere 30,50,70,ve90 °C' de kemik iliği sıcaklıkları alınmıştır. Bu sıcaklıklardaki kemik iliğinin dielektrik katsayısı değerleri sırasıyla, 6.15,6.39,6.60 ve 6.85' dir.



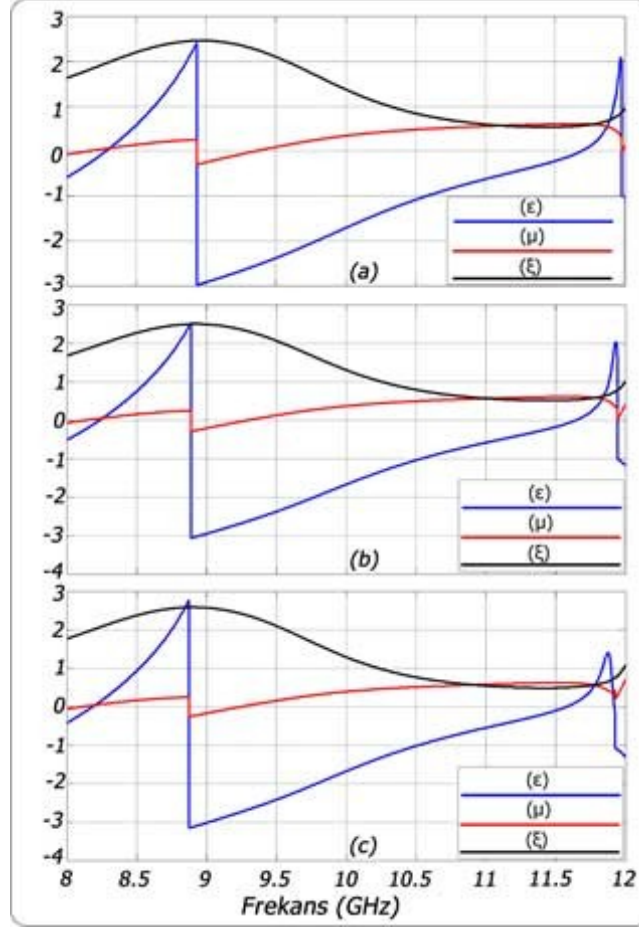
Şekil 4.24. Bakışsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün yoğunluk sensörü olarak kullanıldığında farklı yoğunluklardaki buğday unu için epsilon( $\epsilon$ ), mu( $\mu$ ) ve bakışsızlık( $\epsilon$ ) değerleri (a)  $0.4 \text{ gr/cm}^3$ , (b)  $0.8 \text{ gr/cm}^3$ , (c)  $1.2 \text{ gr/cm}^3$

Şekil 4.25.a' da Sıcaklık  $30^\circ\text{C}$  den  $90^\circ\text{C}$ ' ye çıktığında, rezonans frekansı  $8.284\text{GHz}$  den  $8.186\text{GHz}$  değerine düştüğü görülmektedir. Ayrıca, belirtilen sıcaklıklarda yansıma katsayısının genliğinin sıcaklık arttıkça azaldığı görülmektedir. Rezonans frekansı, kemik iliği sıcaklığı ve kemik iliğinin elektrik geçirgenliği verisi arasındaki ilişki Şekil 4.25.b' de sunulmuştur.



Şekil 4.25. Bakışsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün kemik iliği sıcaklığı tespitinde kullanımı (a) sıcaklık değişiminin sensörün yansıma katsayısına etkisi, (b) sıcaklık, rezonans frekansı ve elektrik geçirgenliği arasındaki bağlantı

Sıcaklık sensörü uygulamasında bakışsız yokluk özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesi için  $30^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  ve  $90^\circ\text{C}$  sıcaklıklarına sahip kemik ilikleri örnek olarak alınmıştır. Şekil 4.26.' dan da görüleceği üzere  $8.284$ ,  $8.220$  ve  $8.188\text{GHz}$  rezonans frekans değerlerine sahip sırasıyla  $30^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  ve  $90^\circ\text{C}$  sıcaklıklarına sahip kemik iliklerinin mu( $\mu$ ) değeri sıfıra yakın iken bakışsızlık değeri ( $\epsilon$ ) sıfırdan büyük bir değer çıkmaktadır.



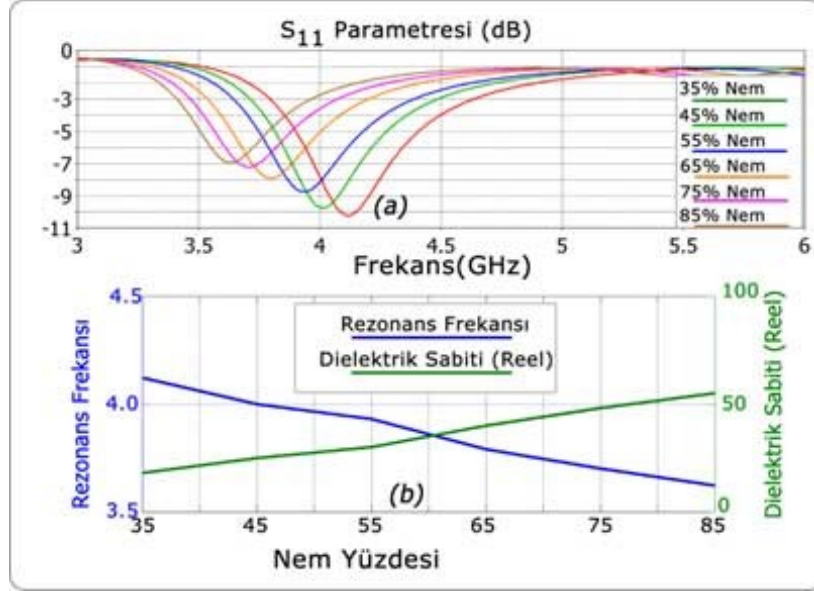
Şekil 4.26. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün sıcaklık sensörü olarak kullanıldığında farklı sıcak değerleri için epsilon( $\epsilon$ ), mu( $\mu$ ) ve bakışimsızlık( $\xi$ ) değerleri (a) 30 °C, (b) 70 °C, (c) 90 °C,

#### 4.3.4 Bakışimsız Yokluk Tabanlı Nem Sensörü

Son olarak, bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün yoğunluk ve sıcaklık sensörünün yanında nem sensörü uygulaması ele alınacaktır. Diğer uygulamalarda olduğu gibi bu bölümdeki çalışmada da sensör katmanı kalınlığı 0.76mm' de olacaktır. Nem sensörü uygulamasının yapılabilmesi için sensör katmanında 0.76mm kauçuk lateks malzeme dielektrik malzeme olarak konulmuş ve çeşitli nem değerlerinde nümerik analiz yapılmıştır. Kauçuk lateksin farklı nem değerlerindeki, verileri(Yahaya ve ark. 2014) çalışmasından elde edilmiştir. Nem sensörü uygulaması için 18,25,30,40,48 ve 55 gibi 6 farklı nem değeri kullanılmış olup bu nem değerlerinin kauçuk lateks malzemedeki yüzde olarak değerleri sırasıyla 35%, 45%, 55%, 65%, 75% ve 85%dir. Şekil 4.27.a' da farklı nem yüzdelere sahip sensör katmanının sahip olduğu rezonans frekans değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.27.b' de ise rezonans frekansı, kauçuk lateksin ve nem yüzdesi arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekil 4.27.b' de görüldüğü gibi nem oranı 35%den 85%' e çıkarıldığında

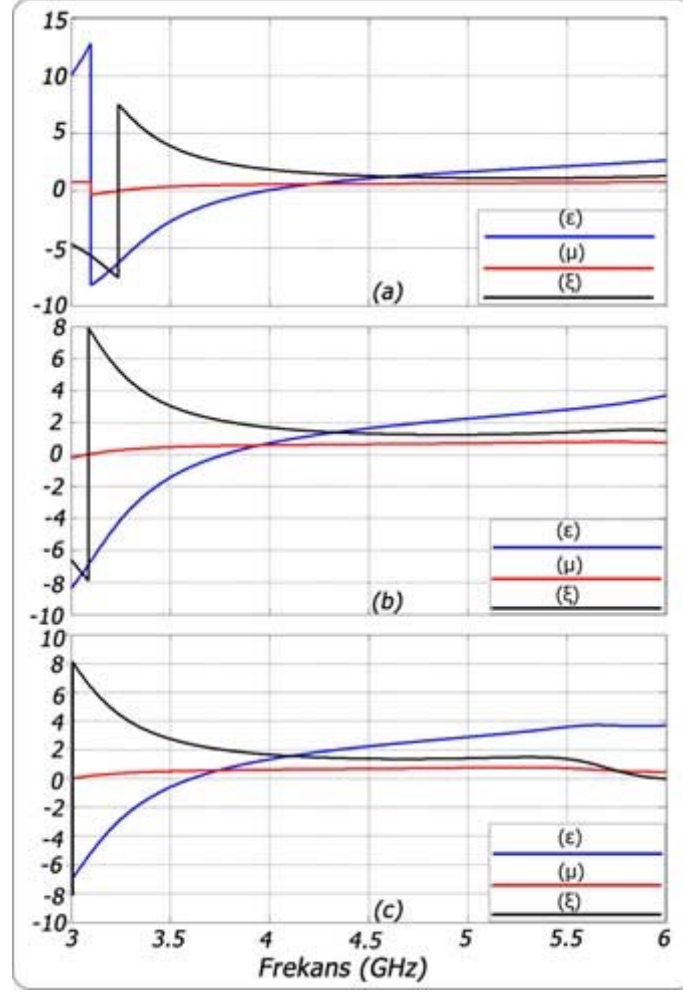


rezonans frekansı 4.122GHz den 3.62 GHz' e düşmüştür. Vektör network analizörü yardımı ile bu değişimler kolaylıkla gözlemlenebilir.



Şekil 4.27. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzemesensörün kauçuk lateks nem oranı tespiti için kullanımı (a) nem değişimi ile sensörün yansıma katsayısına etkisi, (b) nem yüzdesine bağlı olarak rezonans frekansı ve dielektrik sabitinin değişimi

Nem sensörü uygulamasında bakışimsız yokluk değerinin net olarak görülebilmesi için 45 %, 65% ve 85%' nem değerlerine sahip kauçuk lateks malzemeler seçilmiştir ve sensörün bu malzemeler için rezonans frekansları sırasıyla 4.014 GHz, 3.798 GHz ve 3.633 GHz dir. Şekil 4.28.' e bakıldığında de  $\mu$  ( $\mu$ ) değeri sıfıra yakın iken bakışimsızlık değerinin ( $\epsilon$ ) sıfırdan büyük bir değer çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.28. Bakışimsız yokluk tabanlı metamalzeme sensörün nem sensörü olarak kullanıldığında farklı nem değerleri için epsilon( $\epsilon$ ), mu( $\mu$ ) ve bakışimsızlık değerleri( $\xi$ ) (a) 45 %,(b) 65 %,(c) 85 %,

Tüm sistemin rezonans frekansındaki değişim hem bakışimsız metamalzeme sensör topolojilerine göre hem de eş değer devre modeline göre ayrı ayrı açıklanabilir. Metamalzeme sensör topolojisine göre, sensör katmanının dielektrik sabitindeki değişim, yansımaya katsayısının genliğini yükseltmekte ve rezonans frekansını daha yüksek frekanslara çıkarmaktadır. Eşdeğer devre modeli ile uyumluluğu açıklamak gerekirse, devrenin kapasitans değeri sensör katmanının dielektrik sabiti ( $\epsilon$ ) ile uyum içindedir. Kapasitansın artması sensör yapısının rezonans frekansını azalmasına sebep olmaktadır.

## Sonuçlar

Öncelikle farklı tipli sensör yapıları elektromanyetik simülatör ile tasarlanmıştır. Bu sensör tipleri, proje hedeflerini de içine alacak şekilde geniş spektrumlu olarak çok amaçlı basınç, yoğunluk, sıcaklık, nem sensörü olarak gerçekleştirilmiştir (İş Paketi-1). Sensör tasarımı gerçekleşmesi esnasında, efektif geometriler uygun frekanslar içerisinde tespit edilmiştir.

Benzetimler, U-Şekilli Frekans Seçici Yüzey kullanılarak farklı frekans değerlerinde absorpsiyonun maksimum olduğu frekanslar belirlenmesi ve biyosensör olarak un yoğunluğunun tespiti, elmas şekilli rezonatörler kullanılarak kemik iliği sıcaklığının tespinde kullanım amaçlı sıcaklık sensörü, Gamalı haç tabanlı absorber rezonatörler kullanılarak basınç, yoğunluk, sıcaklık ve nem sensörü kullanımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar esnasında oluşabilecek hataların belirlenmesi, geri besleme olarak kullanılması ve yapının revize edilmesi amacı ile önerilen yapılar (U-Şekilli Frekans Seçici Yüzey, gamalı haç ve elmas şekilli rezonatörler) farklı ebatlı olarak tasarlanmış ve geniş frekans aralığında benzetimler gerçekleştirilerek hatanın minimasyonu için doğru değerlere ulaşılmaya çalışılmıştır (İş paketi 2). Yapı ebatları, efektif sonuçlar için yansıma ve emilim cinsinden revize edilerek üretim aşamasından önce son hali belirlenmiştir. Bu tasarımlar esnasında parametrik çalışmalar ve genetik algoritma gömülü yazılımları kullanılarak sensör tasarımı için net değerlerle en uygun ebatlar yakalanmıştır (İş Paketi 2). Bu ebatlar , ilgili frekans değerleri çalışma içerisinde gösterilmiştir. Bu değerler ve sonuçlara göre bulguların değerlendirilmesi her sensör uygulaması ve önerilen her bir sensör yapısı için detaylı şekilde yapılarak gerekli görülen yerlerde optimizasyon işlemleri, frekans-ebat değerlerinin daraltılıp genişletilmesi şeklinde yinelenmiştir (İş Paketi 3).

Amaçlanan sensör yapıları, proje önerisinde de belirtildiği üzere U şekilli rezonatörler ile emilim-yoğunluk olarak gerçekleştirilmiş, gamalı haç ve elmas şekilli rezonatörler ile bakışimsızlık- yoğunluk/sıcaklık/nem/basınç olarak elde edilmiştir. Elde edilen bulgular her bir yapı ve sensör için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve tartılmıştır (İş paketi 3). Hedefler emilim-yoğunluk birlikte gerçekleştirilmesi ile karşılanmış, bakışimsızlık-yoğunluk/sıcaklık/nem/basınç sensörü uygulamaları ile aşılmıştır. Bu sonuçlar ile literatüre önemli katkılar sağlanmış ve konu ile ilgili çalışmalar yayınlanmış yada yayınlanmak üzere uluslar arası dergilere incelenmek üzere gönderilmiştir. Çalışmalar hedeflerin gerçekleştirilmesinde ki amaçlanan frekans aralıklarını da içine alacak şekilde geniş spektrumlu olarak numerik ve deneysel olarak test edilmiş, yapıların elektromanyetik özellikleri detayları ile ortaya konmuştur (İş Paketi 3).

Simülasyon programı kullanılarak optimum değerlerle son hali verilen yapılar, LPKF E33 Protomat PCB prototip üretim cihazı ile simülasyonla birebir uyumla üretilmiştir. Ortaya



çıkan metamalzeme yapıları, PNA-L Agilent vector network analyzer (VNA) ve yan ekipmanları kullanılarak ilgili frekans aralıklarında ölçülerek karakterize edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmak üzere bilgisayar ortamına alınmıştır (İş Paketi 4). Yapılan ölçümler, öz kaynaklar kullanılmak sureti ile sadece amaçlanan emilim ve yoğunluk sensörü için değil gamalı haç ve elmas şekilli rezonatörler ile bakışimsızlık- yoğunluk/sıcaklık/nem/basınç sensörleri içinde gerçekleşmiştir.

Ölçüm sonucunda elde edilen ve bilgisayar ortamına aktarılan değerler simülasyon sonuçları ile karşılaştırmak sureti ile değerlendirilmiş, gerekli raporlar hazırlanmış ve yayın çalışmaları ortaya konmuştur (İş Paketi 5).

## KAYNAKLAR

1. VESELAGO V. G., The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ , Soviet Physics Uspekhi, 10, 509–514, (1968).
2. PENDRY J. B., Holden A. J., Stewart W. J., Youngs I., Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures, Physical Review Letters, 76, 4773-4776, (1996).
3. PENDRY J. B., Holden A. J., Robbins D. J., Stewart W. J., Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47, 2075-2084, (1999).
4. SMITH D. R., Kroll N., Negative refraction index in left-handed materials, Phys. Rev. Lett., 85, 2933–2936, (2000).
5. SHELBY R. A., Smith D. R., Schultz S., Experimental Verification of a Negative Index of Refraction, Science, 292, 77-79, (2001).
6. PENDRY J. B., Schuri and D., Smith D. R., Controlling Electromagnetic Fields, Science, 312, 1780, (2006).
7. DINCER F., Karaaslan M., Unal E., Sabah C., Dual-Band Polarization Independent Metamaterial Absorber Based on Omega Resonator and Octa-Star Strip Configuration, Progress in Electromagnetics Research, 141, 219-231, (2013).
8. SZABO D. LI, Qing Z. , Li X. , E.-P.; Chen Z. N., A High Gain Antenna With an Optimized Metamaterial Inspired Superstrate, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60, 6018-6023, (2012).
9. FANG N., Lee H., Sun C., Zhang X., Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens, Science, 308, 534, (2005).
10. SABAH C., Roskos H. G., Terahertz sensing application by using planar split-ring-resonator structures, Microsyst Technol, 18,2071–2076, (2012).

11. SABAH C. and Roskos H. G., Broadside-coupled triangular split-ring-resonators for terahertz sensing, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 61, 30402, (2013).
12. YE, Y., He S., 90° Polarization rotator using a bilayered chiral metamaterial with giant optical activity, *Applied Physics Letters*, 96, 203501-3, (2010).
13. LI Z., Zhao R., Koschny T., Kafesaki M., Alici K., B., Colak E., Caglayan H., Ozbay E., Soukoulis C., M., Chiral metamaterials with negative refractive index based on four “U” split ring resonators, *Applied Physics Letters*, 97, 081901-3, (2010).
14. AYDIN K., Li Z., Sahin L., Ozbay E., Negative phase advance in polarization independent, multi-layer negative-index metamaterials, *Optics Express*, 16, 8835-4, (2008).
15. ALVES F., Grbovic D., Kearney B., Lavrik N. V. and Karunasiri G., Bi-material terahertz sensors using metamaterial structures, *Optics Express*, Vol. 21, Issue 11, pp. 13256-13271, (2013).
16. MELIK R., Unal E., Perkgoz N. K., Puttlitz C. and Demir H. V., Flexible metamaterials for wireless strain sensing, *Applied Physics Letters*, 95, 181105, (2009a)
17. MELIK R. Unal E., Perkgoz N.K., Puttlitz C. and Demir H.V., Metamaterial-based wireless strain sensors, *Appl. Phys. Lett.*, 95, 011106, (2009b).
18. YANG J. J., Huang M., Tang H., Zeng J. and Dong L., Metamaterial Sensors, *International Journal of Antennas and Propagation*, Volume,1-16, (2013).
19. WITHAYACHUMNANKULA W., Jaruwongrungseeb K. C., Tuantranontc A., Fumeaux C., Abbotta D., Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization, *Sensors and Actuators A*,189,233– 237, (2013).
20. CHEN T., Li S. and Sun H., Metamaterials Application in Sensing, *Sensors*,12, 2742-2765, (2012).

21. MELIK R., Unal E., Perkgoz N.K., Santoni B., Kamstock D., Puttlitz C. and Demir H. V., Nested Metamaterials for Wireless Strain Sensing, *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, 16, 450-458, (2010a).
22. MELIK R., Unal E., Perkgoz N.K., Puttlitz C., Demir H.V., Metamaterial based telemetric strain sensing in different materials, *Opt. Express* 18, 5000 (2010b).
23. CHANG Y. T., Lai Y. C., Li C. T., Chen C. K., Yen T. J., Plasmonic metallic nanostructures by direct nanoimprinting of gold nanoparticles, *Optics Express*, 18, 9561-69, (2010).
24. JEPPESEN C., Xiao S., Mortensen N. A., Kristensen A., Metamaterial localized resonance sensors: prospects and limitations, *Optics Express*, 18, 25075, (2010).
25. PRYCE M., Aydin K., Kelaita Y. A., Briggs R. M., Atwater H. A., Characterization of the tunable response of highly strained compliant optical metamaterials, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, 369, 3447, (2011).
26. HE X. J., Qiu L., Wang Y., Geng Z. X., Wang J. M., and Gui T. L., A compact thin film sensor based on nested split- ring-resonator (SRR) metamaterials for microwave applications," *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 32, 902-913, (2011).
27. HE X. J., Wang Y., Wang J. M., Gui T. L., Thin-film sensor based tip-shaped split ring resonator metamaterial for microwave application. *Microsyst. Technol.*, 16, 1735–1739, (2010).
28. HUANG M., Yang J. J., Sun J., Shi J. H. & Peng J. H., Modelling and analysis of  $\Omega$ -shaped double negative material-assisted microwave sensor. *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, 30, 1131-1138, (2009a).
29. TAYA S. A., Shabat M. M. & Khalil H. M., Enhancement of sensitivity in optical waveguide sensors using left-handed materials. *Optik*, 120, 504-508, (2009).

30. YANG J. J., Huang M., Xiao Z. & Peng J. H., Simulation and analysis of asymmetric metamaterial resonator-assisted microwave sensor. *Mod. Phys. Lett. B*, 24, 1207–1215, (2010).
31. HUANG, M., Yang, J. J., *Microwave Sensor Using Metamaterials*; Petrin, A., Ed.; Intech Press: Vienna, Austria, 13–36, (2011).
32. WITHAYACHUMNANKUI W., Jaruwongrungssee K., Fumeaux C., Abbott D., Metamaterial inspired multichannel thin-film sensor. *IEEE Sens. J.*, 99, 1–7, (2011).
33. SCHUELER M., Mandel C., Puentes M. and Jakoby R., “Metamaterial inspired microwave sensors,” *IEEE Microwave Magazine*, 13, 57–68, (2012).
34. NIU W., Huang M., Xiao Z., Zheng L. and Yang J., “Sensitivity enhancement in TE mode nonlinear planar optical waveguide sensor with metamaterial layer,” *Optik*, (2011a).
35. NIU W., Huang M., Xiao Z. and Yang J., “Nonlinear planar optical waveguide sensor loaded with metamaterials,” *Optoelectronics and Advanced Materials*, 5, 1039–1045, (2011b).
36. NIU W. W., Huang M., Sun J., J. Yang J., Yang J. and Yu J., “Microdisk sensor based on double negative metamaterials,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 22, 512–521, (2012).
37. YANG J. J., Huang M. and Sun J., “Double negative metamaterial sensor based on microring resonator,” *IEEE Sensor Journal*, 11, 2254–2259, (2011).
38. HUANG M., Yang J., Jun S., Mu S. and Lan Y., “Simulation and analysis of a metamaterial sensor based on a microring resonator,” *Sensors*, 11, 5886–5899, (2011).
39. HUANG M., Yang J., Sun J., Shi J. and Peng J., “Modelling and analysis of  $\omega$ -shaped double negative material-assisted microwave sensor,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 30, 1131–1138, (2009b).



40. YANG J. J., Huang M., Lan Y. and Li Y., "Microwave sensor based on a single stereo-complementary asymmetric split resonator," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 22, 545–551, (2012).
41. REINHARD B., Schmitt K. M., Wollrab V., Neu J., Beigang R. and Rahm M., "Metamaterial near-field sensor for deep-subwavelength thickness measurements and sensitive refractometry in the terahertz frequency range," *Applied Physics Letters*, 100, 221101–221104, (2012).
42. PUENTES M., Schuler M., Damm C. and Jakoby R., "Extraction of capacitive profiles with a planar metamaterial sensor," *Applied Physics A*, 103, 815–819, (2011).
43. TAO H., Strikwerda A. C., Liu M., Mondia J. P., Ekmekci E., Fan K., Kaplan D. L., Padilla W. J., Zhang X., Averitt R. D., Omenetto F. G., Performance enhancement of terahertz metamaterials on ultrathin substrates for sensing applications, *Appl. Phys. Lett.*, 97, 261909, (2010).
44. XU X., Peng B., Li D., Zhang J., Wong L.M., Zhang Q., Wang S., Xiong Q., Flexible Visible–Infrared Metamaterials and Their Applications in Highly Sensitive Chemical and Biological Sensing, *Nano Lett.*, 11, 3232, (2011).
45. DRISCOLL T., Andreev G. O., Basov D. N., Palit S., Cho S. Y., Jokerst N. M., Smith D. R., Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 062511, (2007).
46. WILTSHIRE M.C.K., Pendry J. B., Young I. R., Larkman D. J., Gilderdale D. J., Hajnal J. V., Microstructured Magnetic Materials for RF Flux Guides in Magnetic Resonance Imaging, *Science*, 291, 849-851, (2001).
47. SMITH D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S., Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, *Phys. Rev. Lett.*, 84, 4184-4187, (2000).

48. GOKKAVAS M., Guven K., Bulu I., Aydin K., Penciu R. S., Kafesaki M., Soukoulis C. M., Ozbay E., Experimental demonstration of a left-handed metamaterial operating at 100 GHz, *Phys. Rev. B*, 73,193103, (2006).
49. YEN T.J., Padilla W. J., Fang N., Vier D. C., Smith D. R., Pendry J. B., Basov D. N., Zhang X., Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials, *Science*, 303, 1494-1496, (2004).
50. LINDEN S., Enkrich C., Wegener M., Zhou J., Koschny T., Soukoulis C. M., Magnetic Response of Metamaterials at 100 Terahertz, *Science*, 306, 1351, (2004).
51. ZHANG S., Fan W., Panoiu N. C., Malloy K. J., Osgood R. M., Brueck S. R. J., Experimental Demonstration of Near-Infrared Negative-Index Metamaterials, *Phys. Rev. Lett.*, 95, 137404-4, (2005).
52. DOLLING G., Wegener M., Soukoulis C. M., Linden S., Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength, *Opt. Lett.*, 32, 53-55, (2007).
53. LEE J., Lim S., Bandwidth-enhanced and polarization-insensitive metamaterial absorber using double resonance, *Electron. Lett.*, 47, 8-9, (2011).
54. WANG B., Koschny T., Soukoulis C. M., Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber, *Phys. Rev. B*, 80, 033108-4, (2009).
55. ZHU B., Wang Z., Huang C., Feng Y., Zhao J., Jiang T., Polarization Insensitive Metamaterial Absorber With Wide Incident Angle, *Prog. Electromagn. Res.*, 101, 231-239, (2010).
56. DINCER F., Karaaslan M., Unal E. and Sabah C., Dual band polarization independent metamaterial absorber based on omega resonator and octa-star strip configuration, *Progress In Electromagnetics Research, PIER*, Vol. 141, pp.219-231, (2013).
57. LANDY N. I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R., Padilla W.J., A Perfect Metamaterial Absorber, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 207402-4, (2008).



58. PARK J. W., Tuong P. V., Rhee J. Y., Kim K. W., Jang W. H., Choi E. H., Chen L. Y., Lee Y., Multi-band metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators, *Opt. Express*, 21, 9691-9702, (2013).
59. BILOTTI F., Nucci L., Vegni L., An SRR-based microwave absorber, *Microw. Opt. Techn. Let.*, 48, 2171-2175, (2006).

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. OĞUZHAN AKGÖL
Proje No:	114E295
Proje Başlığı:	Metamalzemeler İle Çok Yönlü Özgün Entegre Sensör Uygulamaları Ve Tasarımları
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	ZAFER ÖZER, EMİN ÜNAL, MUHARREM KARAASLAN, FURKAN DİNÇER
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İSKENDERUN TEKNİK Ü. ELEKTRİK ELEKTRONİK F.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/11/2014 - 01/11/2016
Onaylanan Bütçe:	78864.0
Harcanan Bütçe:	50717.56
Öz:	<p>MTM?ler doğada bulunmayan, negatif kırılma gibi ayrıcalıklı ve egzotik özelliklere sahip periyodik yapıda tasarlanmış EM malzemelerdir. MTM?lerin sunmuş olduğu en önemli özelliklerinden birisi, EM dalganın polarizasyonunu değiştirerek optiksel etkinliği ve aktiviteyi sağlamasıdır. Böylece EM dalganın istenilen şekilde yönlendirilmesi, polarize edilmesi ve kontrol edilebilmesi gerçekleştirilebilmektedir.</p> <p>Günümüzde MTM?ler ile görünmezlik pelerini (cloaking), süper lens, anten, kalkanlama (absorber) ve sensör gibi savunma sanayi için büyük önem arz eden çalışmalar yapılabilmektedir. Ayrıca MTM?lerin bu ve benzeri uygulamalar için pratik olarak çok sayıda avantaj sunduğu (EM özelliklerinin kullanılması ile) bilim insanlarıncan kanıtlanmıştır. Bu proje kapsamında ise MTM ile tek bir yapıda hem yoğunluk sensörü (hassasiyet oranı, %99) hem de mükemmel sinyal emilimi (%99) gerçekleştirebilen entegre bir algılayıcının tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. MTM?lerin doğada bulunan malzemelere entegrasyonu ile sunmuş olduğu optiksel aktivite, polarizasyon kontrolü, elektrik alan ve manyetik alan arasında cross-coupling (çapraz-etkileşim) etkisi gibi EM özellikler MTM?li malzemelerin yüksek verim ve kazanç değerine sahip olmasını sağlamaktadır. MTM?lerin bu özelliklerinin kullanımı ile yüksek hassasiyete sahip bir entegre algılayıcının tasarlanması gerçekleştirilmiştir. Çünkü MTM?lerin gösterdiği egzotik EM özellikler ile algılayıcıda kazanç, hassasiyetinin artırılması, elektrikselsel yapı boyutlarının azaltılması gibi birçok önemli avantajlar elde edilebilmektedir.</p>
Anahtar Kelimeler:	metamalzeme, sensör, bakımsızlık, bakımsız yokluk, sıcaklık sensörü,
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır