



Metamalzeme tabanlı geniş bant ışıma emici yapılar kullanılarak radar kesit alanının azaltılması

Kadir Özden^{1*}, Ahmet Özer², Okan Mert Yücedağ³, Hasan Koçer²

¹Kara Harp Okulu, Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 06654, Türkiye

²Kara Harp Okulu, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06654, Türkiye

³TÜBİTAK, Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi, Kocaeli, 41470, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Metamalzemeler, bilinen doğal malzemelerin aksine farklı elektromanyetik özellikler gösteren yapay malzemelerdir
- Bu çalışmada radarların yoğun olarak çalıştığı X bant (8-12 GHz) frekans bölgesinde etkili, geniş bant metamalzeme ışıma emici yapının tasarım, optimizasyon, üretim ve ölçümü incelenmiştir
- Radar kesit alanının en az 10 dB seviyesinde azaltıldığı nümerik ve deneysel sonuçlarla gösterilmiştir

Makale Bilgileri

Geliş: 11.11.2015

Kabul: 19.04.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.278466

Anahtar Kelimeler:

Görünmezlik teknolojileri, radar kesit alanı azaltımı, metamalzemeler, süper hücre tasarımı, geniş bant emici yapılar, kaplama

ÖZET

Metamalzemeler, bilinen doğal malzemelerin aksine farklı elektromanyetik özellikler gösteren yapay malzemelerdir. Son yıllarda keşfedilen özelliklerinden bir tanesi de gelen elektromanyetik dalgaya karşı mükemmel emilim göstermeleridir. Bu özellikleri sayesinde uzaktan algılama sistemlerine karşı mikrodalga bandından optik banda kadar görünmezlik uygulamalarında kullanılabilecekleri değerlendirilmektedir. Buna göre bir platformun metamalzeme ile kaplanması, o platformun radarda görünürlüğünü temsil eden radar kesit alanı (RKA) değerini azaltabilecektir. Bu çalışmada radarların yoğun olarak çalıştığı X bant (8-12 GHz) frekans bölgesinde etkili, geniş bant metamalzeme ışıma emici yapının tasarım, optimizasyon, üretim ve ölçümü incelenmiştir. Geniş bantta emilimi elde edebilmek için öncelikle iki farklı frekansta rezonans gösteren metamalzeme tasarlanmış ve daha sonra bu metamalzemeye ilişkin birim hücrenin ölçeklenebilirlik özelliği kullanılarak X bandında farklı frekanslarda rezonans etki gösteren 16 adet birim hücreden oluşan süper hücre yapısına geçilmiştir. Bu birim hücrelerin, ölçekleme faktörünün ve süper hücre içerisindeki yerleşim yerlerinin optimizasyonu neticesinde 8,7–11,4 GHz frekans aralığında geniş bantta emilim sağlayan metamalzeme tabanlı ışıma emici yapı tasarlanmıştır. Simülasyon ve deney sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen metamalzeme emici yapının, aynı boyutlardaki iletken yapıya göre atış kontrol ve keşif gözetleme radarlarının yoğun olarak çalıştığı frekans aralığında, radar kesit alanını en az 10 dB seviyesinde azalttığı nümerik ve deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Reduction of radar cross section using metamaterial based broadband absorbers

H I G H L I G H T S

- Metamaterials are artificial structures which exhibit different electromagnetic properties contrary to the known materials
- In this paper; design, simulation and measurements of a novel X band metamaterial broadband absorber are investigated
- At least a 10 dB radar cross section reduction of the metamaterial absorber is demonstrated both numerically and experimentally

Article Info

Received: 11.11.2015

Accepted: 19.04.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.278466

Keywords:

Stealth technology, reduction of radar cross section, metamaterials, design of super cell, broadband absorbers, coating

ABSTRACT

Metamaterials are artificial structures which exhibit different electromagnetic properties contrary to the known materials. One of the features discovered in recent years is performing perfect absorption against the incident electromagnetic wave. Metamaterial absorbers with this property can be used in stealth technology against remote sensing applications over a significant range of electromagnetic spectrum from microwave to optics. According to this, radar cross section of relevant targets representing the visibility in radar can be reduced by coating target with metamaterial absorber. In this paper; design, simulation and measurements of a novel X band metamaterial broadband absorber are investigated. Primarily, a dual band metamaterial absorber is obtained and then, depending on superposition of the different neighboring resonant frequencies of the differently sized unit cells, a super cell of metamaterial absorber has been demonstrated at X band. Due to the optimization of size and location of unit cell, a broadband metamaterial absorber is designed in the frequency range of 8.7 to 11.4 GHz. It is observed that the simulation results are in good agreement with the measurements. At least a 10 dB radar cross section reduction of the metamaterial absorber compared with a fully metallic plate with comparable dimensions is demonstrated both numerically and experimentally in the frequency range of fire control and surveillance radars.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: kozden@kho.edu.tr / Tel: +90 312 417 5190

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

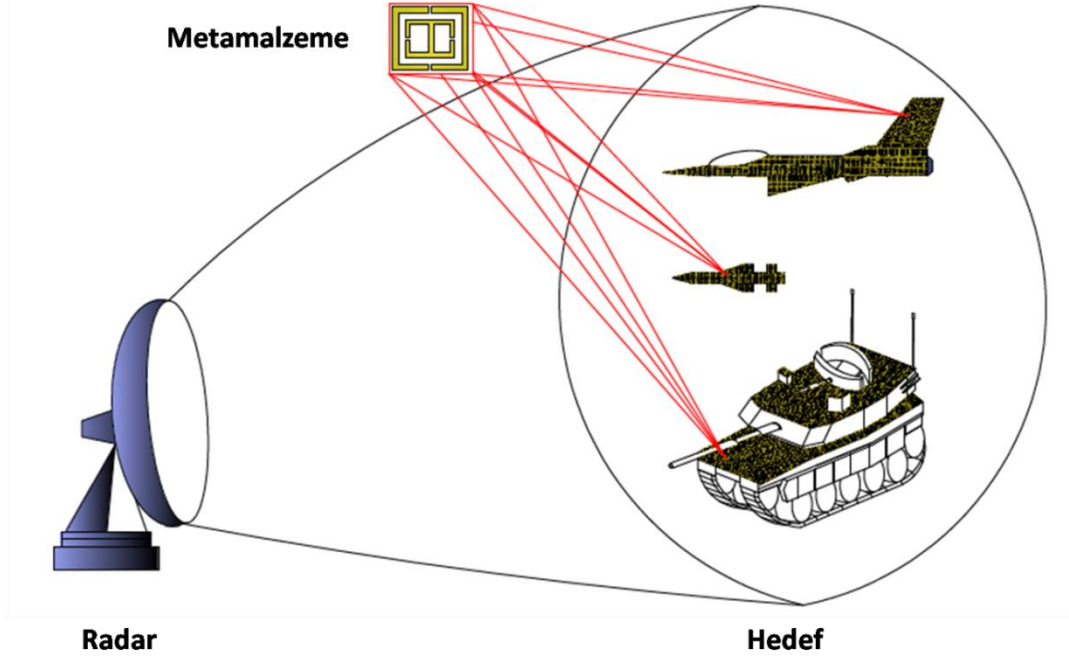
Radar temel olarak ortama elektromanyetik dalga (sinyal) gönderip, bu dalgaların hedeflere çarpıp radara geri dönen yansımalarını değerlendirerek, hedefler hakkında menzil, açı, hız gibi bilgileri elde etmek için kullanılan bir cihazdır. Radar tarafından bir hedefin tespit edilebilmesi için, hedeften yansıyan dalgaların radarın alıcısına ulaşması ve radar alıcısındaki iç gürültü ve kargaşa (clutter) gücünden yüksek bir güce sahip olması gerekmektedir. Bir hedefin radar tarafından tespit edilmesinde o hedef tarafından kontrol edilebilen tek ölçüt radar kesit alanı (RKA-Radar Cross Section)'dir ve RKA, hedefin radar vericisi tarafından gönderilen sinyali radar alıcısı yönünde yansıtma oranı olarak tanımlanabilir [1]. Hedefe ait yüksek RKA değeri, radar tarafından hedefin kolayca algılanması ve tanınması, düşük RKA değeri ise hedefin radar tarafından belirli frekans aralığında neredeyse görünmez olması anlamına gelmektedir. Bu bakımdan, RKA'nın azaltılması hedef açısından önem arz etmektedir. Hedef platformun şekillendirilmesi ve radar soğurucu malzeme ile kaplanması (Radar Absorbing Material), RKA'nın azaltılmasında en bilinen yöntemlerdir. Hedef platformun şekillendirilmesi, alıcı ve verici antenleri aynı yerde olan monostatik radarlar için etkili iken, alıcı ve verici antenleri farklı yerde olan bistatik radarlar için uygun değildir. Bu nedenle, radar soğurucu malzeme kullanılarak RKA azaltımına yönelik araştırmalar yoğun ilgi görmüştür [2-5]. Radar soğurucu malzemelerde RKA azaltımı temelde, elektromanyetik dalganın emilim, rezonans ve saçılım mekanizmalarının kontrolü ile gerçekleştirilmektedir. Elektromanyetik yayınları emici özelliğe sahip bu malzemeler, RKA'nın azaltılmasında [6], anten ışınım yan loblarının bastırılmasında ve elektromanyetik girişimin önlenmesinde [7] yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar neticesinde metamalzeme tabanlı mükemmel ışınım emici yapıların [8] da bu maksatla kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Düşük maliyetli, kolay üretilebilir ve yüksek verimliliği olan metamalzeme tabanlı mükemmel sinyal emici yapılar, RKA kavramına farklı bir bakış açısı getirmektedirler [9, 10]. Süper lens [11], görünmezlik pelerini [12], anten ışınımı [13] ve frekans seçici yüzey [14] gibi uygulamaları da bulunan metamalzemeler doğada bulunan malzemelerin göstermediği oldukça farklı elektromanyetik özelliklere sahiptirler. Bir ortamın elektromanyetik özelliklerini belirleyen elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) katsayıları belirli bir frekans aralığında metamalzemelerde negatif değer almaktadır. Bu da elektromanyetik sinyalin malzeme içerisinde farklı özellikler göstermesine neden olmaktadır. Metamalzemeler, kimyasal boyutta bir değişim yerine doğada mevcut malzemelerin farklı şekillerde tasarlanması ile bu avantajları sağlayan malzemelerdir. Rus bilim adamı V.G. Veselago tarafından negatif ϵ ve μ değerlerine sahip malzemelerin doğal malzemelerin aksine kırılma indisinin negatif olacağı teorik olarak gösterilmiştir [15]. Yaklaşık 30 yıl sonra, Pendry ve arkadaşları deneysel olarak negatif kırılma indisli malzemeyi gerçekleştirmişlerdir [16].

Metamalzemelerin mükemmel emilim uygulamalarına ilişkin ilk çalışma Landy ve arkadaşları tarafından 2008 yılında gerçekleştirilmiştir [8]. Literatürde bu çalışmadan sonra metamalzemelerin elektromanyetik spektrumun mikrodalga bandından optik bandına kadar geniş bir bantta mükemmel emilim göstermeleri bu yapılarla ilişkin araştırmalarda önemli bir artışa sebep olmuştur [17, 18]. Landy'nin yaptığı tek bir rezonans gösteren çalışmanın ardından, iki ya da daha fazla rezonans frekansta emilim gösteren, polarizasyondan ve açıdan bağımsız yapılarla geçilmiştir [19-21]. Ancak bu yapılarda emilim dar bir bantta kendisini göstermektedir. Birim hücrenin dikey ve yatayda çoğullanması ile geniş bantta emilim gerçekleştirilmiştir [22-25]. Metamalzemelerin, uzaktan algılama sistemlerine karşı uygulanabileceğine ilişkin gösterim Şekil 1'dedir. Metamalzeme tabanlı ışınım emici yapılarla hedef platformunu kaplamak suretiyle RKA'nın azaltılarak radarlara karşı görünmezlik sağlanabilecektir. Bu maksatla, metamalzeme tabanlı ışınım emici yapıların parametrik inceleme çalışmasının yapılarak hedefe yönelik bir emici yapının tasarlanmasının uygun olacağı [26] ve karşı tedbir olarak emilen dalganın optik algılama sistemlerine karşı bir dezavantaj [27] sağlayabileceği hususunun da göz önünde bulundurulması gerektiği değerlendirilmektedir.

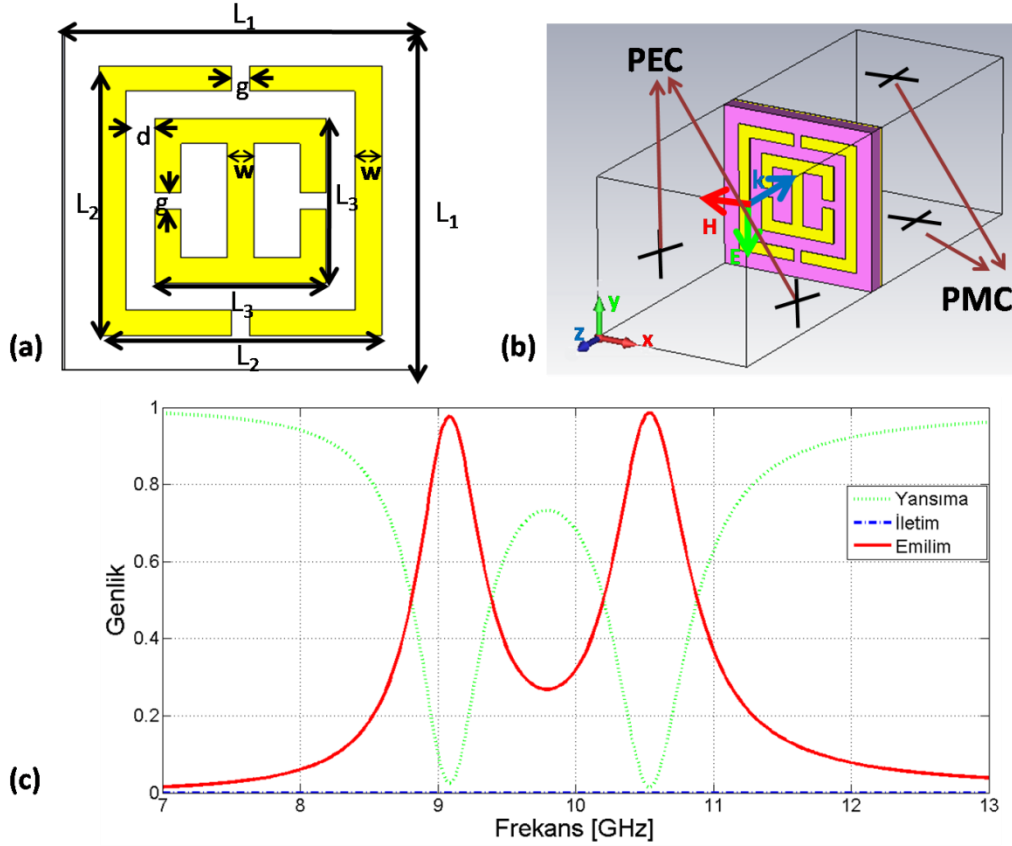
Bu çalışmanın ikinci bölümünde geniş bantlı metamalzeme tabanlı ışınım emici yapının tasarımı, optimizasyonu ve simülasyonu gerçekleştirilmekte, üçüncü bölümünde üretimi gerçekleştirilen metamalzeme ışınım emici yapının simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmakta, dördüncü bölümünde geniş bantlı metamalzeme tabanlı ışınım emici yapının RKA üzerindeki etkisi incelenmekte ve son bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir.

2. METAMALZEME IŞINIM EMİCİ YAPININ TASARIM, OPTİMİZASYON VE SİMÜLASYONU (DESIGN, OPTIMIZATION AND SIMULATION OF METAMATERIAL RADIATION ABSORBER)

Tasarımı gerçekleştirilen metamalzeme tabanlı ışınım emici yapı, iki adet metal tabaka arasına dielektrik malzemenin yerleştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Metal tabakalar, $5,8 \times 10^7 S/m$ elektriksel iletkenliğe ve $0,017 mm$ kalınlığa sahip bakır malzemeden oluşmaktadır [8, 23]. Dielektrik malzeme, bağıl dielektrik geçirgenliği (ϵ_r) 3,9, kayıp tanjant değeri 0,03 ve kalınlığı $0,75 mm$ olan FR4 malzemeden oluşmaktadır [28]. Şekil 2 (a)'da tasarlanan birim hücre gösterilmektedir. En üst katman, iç içe geçmiş ortak merkezli iki adet ayrık halka kareden oluşmaktadır. İçteki kare yapı, zıt yönlü açıklığa ve açıklıklara paralel ortak bir endüktif şeritli halkadan oluşmakta iken [7], dıştaki halka yapı içteki karenin açıklıklarına zıt olarak, yine iki zıt açıklığa sahip kareden oluşmaktadır. Bu birim hücrede, g açıklık, w halka, d halkalar arası genişliği sembolize ederken, L_1 dış birim hücrenin, L_2 dış kare halkanın ve L_3 iç kare halkanın kenar uzunluklarını ifade etmektedir. Bu topolojideki söz konusu değerler mm cinsinden, $g=0,33$, $w=0,50$, $d=0,54$, $L_1=6,67$, $L_2=5,33$ ve $L_3=3,25$ 'dir.



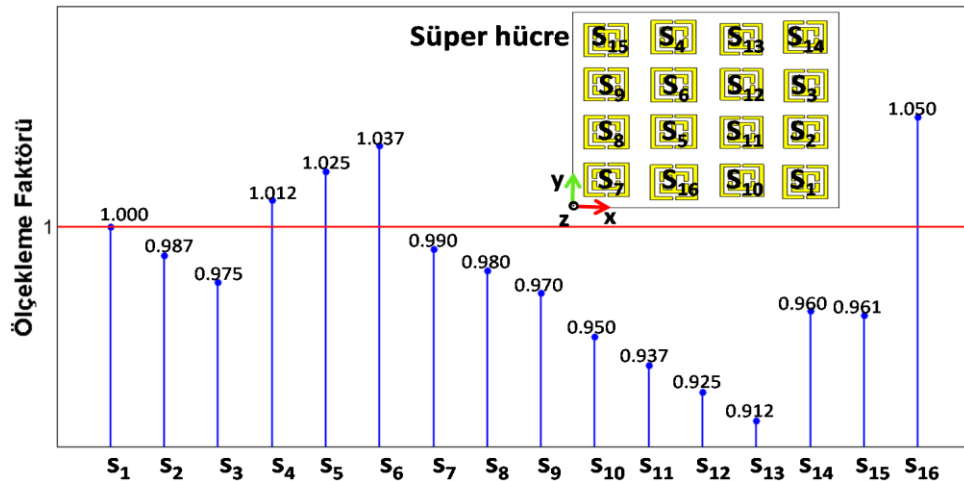
Şekil 1. Bir radar ışınması altındaki metamalzeme ışınma emici ile kaplı hedef platformların temsili gösterimi
(Illustration of target vehicles covered by metamaterial absorber under a radar illumination)



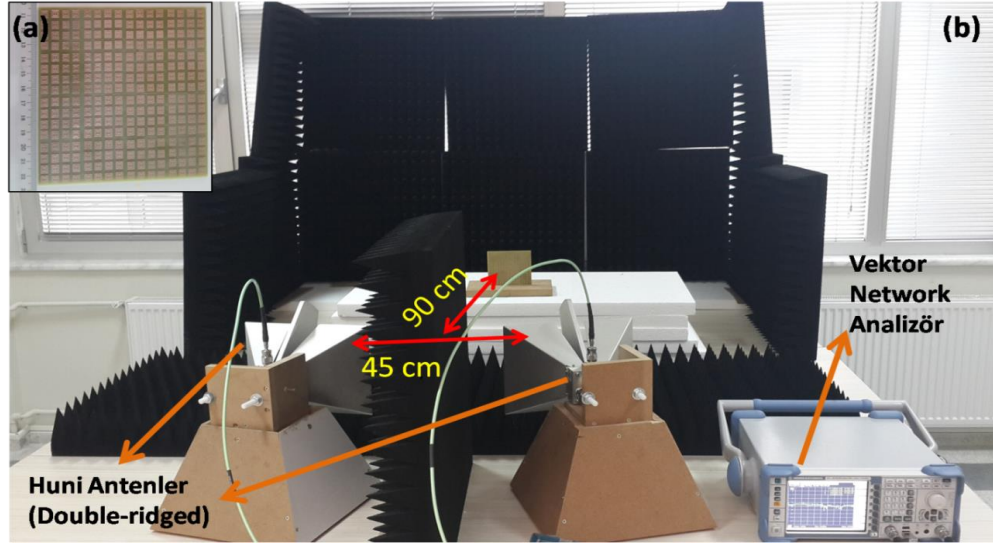
Şekil 2. (a) Birim hücrenin önden görünüşü (b) Birim hücrenin perspektif görünümü (c) Birim hücre simülasyon sonuçları
(a) Front view of the unit cell (b) Perspective view of the simulation (c) Simulation results of the unit cell)

Bu çalışmada, birim hücre sınır koşulları altında, metamalzeme tabanlı sinyal emici yapı CST Microwave Studio simülasyon programı kullanılarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Söz konusu program, Intel Core i7-3770 CPU 3.40 GHz işlemcili ve 16 GB RAM'a sahip yüksek hesaplama kapasiteli bir bilgisayar üzerinde çalıştırılmıştır. Şekil 2 (b)'de metamalzeme emici yapının sınır koşulları altındaki elektromanyetik uyarımı gösterilmektedir. Tasarlanan yapı, y yönünde elektrik alanı (E), x yönünde manyetik alanı (H) ve z yönünde ilerleme vektörü (k) olan elektromanyetik düzlemsel dalga ile 7-13 GHz frekans aralığında uyarılmıştır. Hesaplama hacminde, y - z düzlemi sınır koşulu, elektriksel alanın teğetsel bileşeninin sıfır olduğu ($E_t=0$) mükemmel elektrik iletken yüzey (PEC), x - z düzlemi sınır koşulu, manyetik alanın teğetsel bileşeninin sıfır olduğu ($H_t=0$) mükemmel manyetik iletken yüzey (PMC) ve x - y yüzeyleri ise ilerleme vektörüne dik olacak şekilde giriş ve çıkış kapıları olarak tanımlanmıştır. Verimli ve kararlı bir metamalzeme tabanlı ışına emicinin tasarımı için, metamalzeme ışına emici yapıya gelen elektromanyetik dalganın yansıma ve iletimini en aza indirmek gereklidir. Gelen EM dalganın frekansa bağlı emilimi $A(f)=1-(R(f)+T(f))$ formülü ile hesaplanır. $A(f)$, $R(f)$ ve $T(f)$ sırasıyla emilim, yansıma ve iletim oranlarını ifade etmektedir. Elde edilen S-parametreleri açısından, $R(f) = |S_{11}|^2$, $T(f) = |S_{22}|^2$ 'dir. En alttaki metal plaka nedeniyle iletim bloke edilmektedir. Böylece emilim oranı $A=1-R$ olarak hesaplanmış ve elde edilen emilim, yansıma ve iletim oranları Şekil 2 (c)'de gösterilmiştir. Tasarlanan yapıda, dış halkadaki yarıkların, iç halkadaki yarıklara zıt olarak yerleştirilmesi neticesinde, Landy ve arkadaşları tarafından tasarlanan yapıya [8] göre iki farklı birbirine yakın frekansta mükemmel emilime yakın sonuçlar elde edilmiştir. Söz konusu yapının gelen elektromanyetik dalgaya karşı, 9,10 ve 10,53 GHz frekanslarında sırasıyla %97,95 ve %98,40 olarak mükemmel emilime yakın seviyede emilim gösterdiği görülmektedir. Birim hücrenin ölçeklenebilirlik özelliği kullanılarak, öncelikli olarak 2x2 farklı birim hücrelerden oluşan süper hücre tasarlanmış ancak istenilen bant genişliğinin elde edilememesi neticesinde daha fazla birim hücreden oluşan yapılarla

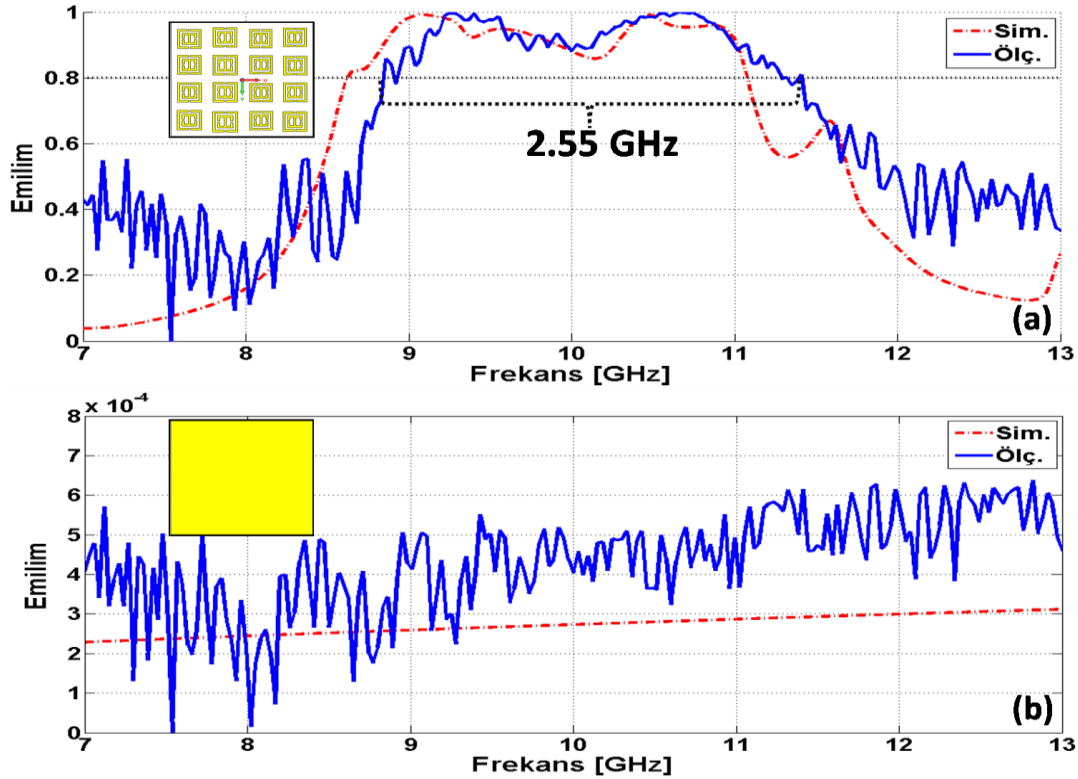
geçilmiştir. X bant frekans bölgesinde emilim gerçekleştirmek üzere, referans alınan birim hücrenin rezonans frekanslarının yan yana getirilmesi suretiyle 16 adet farklı birim hücreden oluşan süper hücre tasarımında geniş bant ve mükemmel yakın seviyede emilim elde edilmiştir. Her bir birim hücreye ilişkin ölçekleme faktörü (s_i) ve birim hücrelerin süper hücre içerisinde yerleşimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Orijinal birim hücre, x ve y eksenlerinde aynı ölçekleme faktörü s_i ile çarpılması durumunda, $s_i < 1$ olan birim hücrelerde elektromanyetik dalga yüksek frekanslarda rezonansa girmekte iken, $s_i > 1$ olan birim hücrelerde elektromanyetik dalga düşük frekanslarda rezonansa girmektedir. Söz konusu s_i 'ler arasında ($|s_{i+1}-s_i|$) 0,125 fark bulunmakta ve böylece emilim değeri ardışık olarak %90 seviyenin altına düşmemektedir. Hedef alınan X bant bölgesinin merkezinde s_i 'ler arasında 0,1 fark olacak şekilde ilave olarak birim hücreler seçilmiş ve emilim seviyesinin mükemmel yakın seviyeye yaklaşması hedeflenmiştir. Yapılan farklı simülasyonlar neticesinde birim hücre sayısının (12, 16, 18 adet) $|s_{i+1}-s_i|=0,125$ olacak şekilde artırılmasının bant genişliğini fark oluşturacak şekilde artırmadığı, ancak $|s_{i+1}-s_i|=0,1$ olacak şekilde birim hücre sayısının artırılmasının ise emilim değerini mükemmel seviyeye yaklaştırdığı görülmüştür. Elde edilen bu sonuçların, süper hücre boyutlarının çalışılan dalga boyu ile kıyaslanabilir hale gelmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Süper hücredeki s_i katsayılarının belirlenmesinden sonra, birim hücrelerin süper hücre içerisindeki yerleşim yerlerinin değiştirilerek yapılan simülasyonların neticesinde, X bantta geniş bant emilim gösteren metamalzeme ışına emici yapı elde edilmiştir. Bu analizlerde önemli bir husus da, tek bir birim hücreye ilişkin analiz süresi 27 s iken, 16 adet birim hücreden oluşan süper hücrenin analiz süresi 729 s'dir. Yapı büyüdükçe analiz süreside artmaktadır. Bu çalışmada iki farklı rezonansa sahip birim hücreden yola çıkılarak rezonans frekansların kaydırılması ve bir araya getirilmesi neticesinde geniş bant emilim gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımdan yola çıkılarak ikiden fazla birbirine yakın rezonansa sahip tasarımı gerçekleştirilen yapılarla daha geniş bantta emilim gerçekleştirmek mümkündür.



Şekil 3. Süper hücreye ilişkin ölçekleme faktörü (Scaling factors of the super cell)



Şekil 4. (a) Üretilen metamalzeme (b) Deney düzeneği ((a) Fabricated metamaterial (b) The experimental setup)



Şekil 5. (a) Metamalzeme emilim simülasyon ve ölçüm sonuçları (b) Tamamen metal plaka emilim simülasyon ve ölçüm sonuçları

((a) Simulated and measured absorption of the metamaterial absorber structure (b) Simulated and measured absorption of the continuous metallic plate)

3. ÜRETİM VE ÖLÇÜM (FABRICATION AND MEASUREMENT)

Simülasyon çalışmaları tamamlanan metamalzeme ışın emici yapı, baskı devre tekniği kullanılarak $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$ boyutlarında üretilmiş ve Şekil 4 (a)'da gösterilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen yapı emilim gerçekleştirilen bant aralığının merkez frekansına göre $\lambda/18$ kalınlığındadır.

Şekil 4 (b)'de Ankara Üniversitesi Sayısal Yöntemler ve Optimizasyon Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilen metamalzeme tabanlı ışın emici yapının ölçüm düzeneği görülmektedir. Ölçüm düzeneğinde bir adet vektör network analizör (Net Rohde & Schwarz ZVL, 9 KHz-13,6 GHz) ve iki adet huni anten (HF907, 800 MHz-18 GHz) kullanılmıştır. Yansıma etkilerini engellemek için anten-anten ve anten-metamalzeme arası mesafe 45 ve 90 cm

olarak belirlenmiştir. Ayrıca, elektromanyetik girişimleri önlemek için antenler arasına ve ölçüm düzeneğinin etrafına soğurucu malzemeler yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Metamalzeme yapının tamamen metal arka plaka ve ön kısımlarından ayrı ayrı yansımaya katsayıları ölçülmüştür. Geniş bantlı metamalzeme yapının ve tamamen metal plakanın emilim değerine ilişkin simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 5 (a, b)'de gösterilmiştir. Emilim oranı, 8,7-11,4 GHz frekans aralığında %80 seviyesinin üstündedir. Yapılan ölçüm sonuçlarının, simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Aralarındaki küçük uyumsuzluğun belirli frekanslardaki gerçek malzeme parametrelerinin simülasyon parametrelerinden olan farkı ve üretim hatalarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

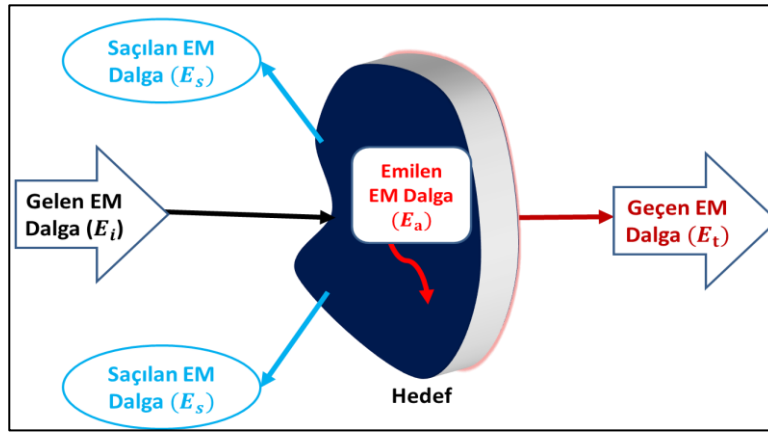
4. RADAR KESİT ALANI AZALTIMI (REDUCTION OF RADAR CROSS SECTION)

Askeri uygulamalarda hedef platformların radar tarafından tespit edilememesi çok önemlidir. Çünkü hedef platformun bekâsı buna bağlıdır. Bundan dolayı RKA'nın azaltımına yönelik çalışmalara yoğun ilgi bulunmaktadır. Radar

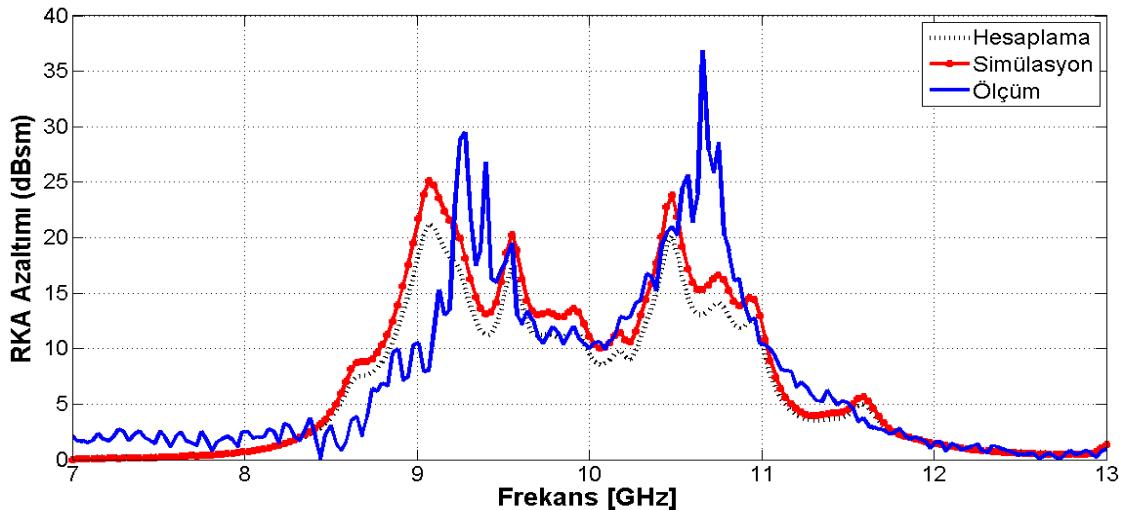
anteninden çıkan elektromanyetik dalga hedefe çarptığında üç durum meydana gelir. Birincisi, hedefe çarpan elektromanyetik dalga hedefin içinden geçer, ikincisi hedef tarafından bir miktar güç emilir, üçüncüsü hedefe çarparak çeşitli yönlere saçılır. Şekil 6'da söz konusu gelen elektromanyetik dalganın hedef ile olan etkileşimi gösterilmektedir. Bu prensipler çerçevesinde; hedeften doğrudan geçen sinyal miktarı artırılarak, hedef tarafından emilen sinyal miktarı artırılarak ya da hedeften saçılan sinyal miktarı azaltılarak radar kesit alanı azaltılmaya çalışılır. Radar kesit alanı radarın hedefe bakış açısına, radar tarafından gönderilen sinyalin frekans ve polarizasyonuna, hedefin geometrik şekline ve hedefin radar yönündeki saçıcılığına bağlıdır. Radar kesit alanı Eş. 1 ile gösterilir [2, 3].

$$RKA = \sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (\text{m}^2) \quad (1)$$

E_s , r mesafedeki hedeften saçılan elektrik alan, E_i , hedefe çarpan elektrik alandır. Hedeften saçılan elektrik alan radar yönündeki saçılan gücü belirler. Hedeften geometrik şekle



Şekil 6. Elektromanyetik dalganın hedef ile etkileşimi (Interaction of the electromagnetic wave with the target)



Şekil 7. Radar kesit alanı azaltımı (Reduction of the radar cross section)

bağlı olarak birçok yönde saçılmalar meydana gelir ve bu saçılan alanın radar yönündeki olanı radar için kıymetlidir. Eş. 1'de verilen formül, hedefin radar tarafından gönderilen sinyalin ne kadarını ve ne oranda radar alıcı ünitesi yönünde yansıttığı bilgisini içermektedir [2]. Alttası metal olan bir yapıda geçirgenlik oranı ($T=|S_{21}|^2$) sıfırdır ve yansıma ($R=|S_{11}|^2=|E_s|^2/|E_i|^2$) ile emilim (A) oranları arasındaki ilişki Eş. 2'de gösterilmiştir.

$$A = 1 - R - T = 1 - R = 1 - \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (2)$$

Eş. 2'de elde edilen $|E_s|^2/|E_i|^2=1-A$ ifadesi Eş. 1'de kullanılırsa Eş. 3 elde edilir.

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 (1-A) \quad (\text{m}^2) \quad (3)$$

Mükemmel iletken metal bir plakanın emilim oranı sıfırdır. Metamalzeme yapının oluşturduğu radar kesit alanı ile mükemmel iletken metal plakanın oluşturduğu radar kesit alanı farkı, metamalzeme yapının radar kesit alanını ne kadar azalttığı hakkında bilgi vermektedir. Eş. 4 radar kesit alanında meydana gelen farkı göstermektedir.

$$\Delta\sigma = 10\log(1-A) \Big|_{\substack{\text{Tamamen} \\ \text{Metal Plaka}}} - 10\log(1-A) \Big|_{\substack{\text{Metamalzeme} \\ \text{Emici Yapı}}} \quad (\text{dBsm}) \quad (4)$$

Eş. 4'te metalik plakanın emilim oranı sıfır kabul edilirse ($A=0$), Eş. 5'teki ifade elde edilir [10].

$$\Delta\sigma = 10\log(1-A) \Big|_{\substack{0 \\ \text{Tamamen} \\ \text{Metal Plaka}}} - 10\log(1-A) \Big|_{\substack{\text{Metamalzeme} \\ \text{Emici Yapı}}} = -10\log(1-A) \quad (\text{dBsm}) \quad (5)$$

Şekil 7'de hesaplanan, simülasyon ve ölçüm sonuçları neticesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Şekil 5'teki simülasyon emilim sonuçları Eş. 5'te yerine konularak, RKA azaltımı hesaplanmış ve Şekil 7'de hesaplanan olarak gösterilmiştir. Metamalzeme tabanlı ışımaya emici yapı ile aynı boyuttaki tamamen bakır kaplı metal plakanın simülasyon ve ölçüm emilim değerleri, ayrı ayrı Eş.4'te yerine konularak Şekil 7'deki simülasyon ve ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Şekil 7'den görüleceği üzere 8,7 – 11,4 GHz frekans aralığında en az 10 dB seviyesinde RKA azaltımı söz konusudur. Mükemmel yakın seviyede emilim karakteristiğinin genişletilmesi durumunda en az 10 dB seviyesinde gerçekleşen RKA azaltılmasının artırılması da mümkündür. Yapılan ölçüm ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu gözükmektedir. Aradaki farkın ölçümlerde tam yansız

oda koşullarının tam olarak sağlanmadığından ve üretim hatalarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elde edilen sonuçlar, metamalzeme tabanlı ışımaya emici yapının, mevcut haliyle aerodinamik yapıyı bozmayacak sistemlerde RKA azaltımında kullanılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca, söz konusu metamalzeme ışımaya emici yapı tasarımlarının esnek alttasılara uygulanması neticesinde [29], düşük maliyetli, kolay üretilebilir ve yüksek verimlilikleri ile gizleme (stealth) teknolojilerinde RKA azaltımında kendilerine yer bulabilecekleri değerlendirilmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Radarların yoğun olarak çalıştığı X bant (8-12 GHz) frekans bölgesinde 8,7 – 11,4 GHz frekans aralığında geniş bant emilim gösteren, metamalzeme tabanlı ışımaya emici yapının tasarım, optimizasyon, üretim ve ölçümü gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. İki farklı rezonans frekansına sahip birim hücre x ve y yönlerinde ölçeklenip çoğaltılarak süper hücre elde edilmiş ve bahse konu süper hücrenin optimizasyonu ölçekleme faktörü ve yerleşimsel olarak gerçekleştirilerek geniş bant emilim elde edilmiştir. Bu yöntem ile ikiden fazla birbirine yakın rezonansa sahip birim hücrelerden oluşan süper hücrelerle daha geniş bantta emilim gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir. Tasarımı gerçekleşen metamalzeme emici yapının, aynı boyutlardaki iletken yapıya göre emilimin gerçekleştiği frekans bölgesinde en az 10 dB seviyesinde radar kesit alanını azalttığı, nümerik ve deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Gelecek çalışma olarak RKA'nın tam yansız odada açılma ölçümlerini deneysel olarak gerçekleştirme hedeflenmektedir. Elde edilen sonuçlar neticesinde metamalzeme ışımaya emici yapıların görünmezlik teknolojilerinde düşük maliyetli, kolay üretilebilir ve yüksek emilim verimlilikleri ile kendilerine daha fazla uygulama alanı bulabilecekleri değerlendirilmektedir.

6. SİMGELER (SYMBOLS)

ϵ	Elektriksel geçirgenlik [F/m]
μ	Manyetik geçirgenlik [H/m]
ϵ_r	bağlı dielektrik geçirgenlik
s_i	Ölçekleme faktörü
E_i	Hedefe çarpan elektrik alan [V/m]
E_s	Hedeften saçılan elektrik alan [V/m]
σ	Radar kesit alanı [m^2]

Kısaltmalar (Abbreviations)

RKA	: Radar kesit alanı [m^2]
PEC	: Mükemmel elektrik iletken yüzey
PMC	: Mükemmel manyetik iletken yüzey
RAM	: Read only memory
s	: Saniye

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada, üretim ve ölçümde emeği geçen 3'üncü Hv. İkm. Bkm. Mrk. K.lığı ile Ankara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği öğretim üyesi Sn. Doç. Dr. Asım Egemen YILMAZ ve doktora öğrencisi Sn. Sultan CAN'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Skolnik M.I., Introduction to Radar Systems (3rd ed.), McGraw-Hill, New York, 2001.
- Barrick D.E., Stuart W.D., Krichbaum C.K., Radar Cross Section Handbook, Plenum Press, New York, 1970.
- Knott E., Shaeffer J., Tuley M., Radar Cross Section (2nd ed.), MA: Artech House, Boston, 1993.
- Saville P., Review of Radar Absorbing Materials, Tech. Rep., Defence Research and Development Atlantic Dartmouth, Canada, 2005.
- Aktas G., Aktas A., Guru M., Effect of Paint Properties on Radar Absorption Capacity, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (1), 87-93, 2016.
- Munk B.A., Frequency Selective Surfaces, John Wiley & Sons, New York, 2000.
- Emerson W.H., Electromagnetic Wave Absorbers and Anechoic Chambers Through the Years, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 21, 484-490, 1973.
- Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R., Padilla W.J., Perfect Metamaterial Absorber, Physical Review Letters, 100 (20), 207402, 2008.
- Culhaoglu A.E., Osipov A.V., Russer P., Mono- and Bistatic Scattering Reduction by a Metamaterial Low Reflection Coating, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 61 (1), 462-466, 2013.
- Yang H., Cao X.Y., Gao J., Li W., Yuan Z., Shang K., Low RCS Metamaterial Absorber and Extending Bandwidth Based on Electromagnetic Resonances, Progress in Electromagnetics Research M, 33, 31-44, 2013.
- Pendry J.B., Negative Refraction Makes a Perfect Lens, Physical Review Letters, 85 (18), 3966, 2000.
- Schurig D., Mock J.J., Justice B.J., Cummer S.A., Pendry J.B., Starr A.F., Smith D.R., Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies, Science, 314 (5801), 977-980, 2006.
- Si L.M., Lv X., CPW-FED Multi-band Omnidirectional Planar Microstrip Antenna Using Composite Metamaterial Resonators for Wireless Communications, Progress in Electromagnetics Research, 83, 133-146, 2008.
- Bayatpur F., Sarabandi K., A Tunable Metamaterial Frequency-selective Surface with Variable Modes of Operation, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 57 (6), 1433-1438, 2009.
- Veselago V.G., The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ , Physics-Uspokhi, 10 (4), 509-514, 1968.
- Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S., Experimental Verification of a Negative Index of Refraction, Science, 292 (5514), 77-79, 2001.
- Tao H., Landy N.I., Bingham C.M., Zhang X., Averitt R.D., Padilla W.J., A Metamaterial Absorber for the Terahertz Regime: Design, Fabrication and Characterization, Optics Express, 16 (10), 7181-7188, 2008.
- Avitzour Y., Urzhumov Y.A., Shvets G., Wide-angle Infrared Absorber Based on a Negative-index Plasmonic Metamaterial, Physical Review B, 79 (4), 045131, 2009.
- Li M., Yang H.L., Hou X.W., Tian Y., Hou D.Y., Perfect Metamaterial Absorber with Dual Bands, Progress In Electromagnetics Research, 108, 37-49, 2010.
- Lee J., Lim S., Bandwidth-enhanced and Polarisation-insensitive Metamaterial Absorber Using Double Resonance, Electronics Letters, 47 (1), 8-9, 2011.
- Bian B., Liu S., Wang S., Kong X., Zhang H., Ma B., Yang H., Novel Triple-band Polarization-insensitive Wide-angle Ultra-thin Microwave Metamaterial Absorber, Journal of Applied Physics, 114 (19), 194511, 2013.
- Ding F., Cui Y., Ge X., Jin Y., He S., Ultra-broadband Microwave Metamaterial Absorber, Applied Physics Letters, 100 (10), 103506, 2012.
- Gu S., Su B., Zhao X., Planar Isotropic Broadband Metamaterial Absorber, Journal of Applied Physics, 114 (16), 163702, 2013.
- Wang B.X., Wang L.L., Wang G.Z., Huang W.Q., Li X.F., Zhai X., Theoretical Investigation of Broadband and Wide-angle Terahertz Metamaterial Absorber, IEEE Photonics Technology Letters, 26 (2), 111-114, 2014.
- Soheilifar M.R., Sadeghzadeh R.A., Design, Fabrication and Characterization of Stacked Layers Planar Broadband Metamaterial Absorber at Microwave Frequency, International Journal of Electronics and Communications (AEU), 69 (1), 126-132, 2015.
- Özden K., Yücedağ O.M., Koçer H., Geometrical Parameter Investigation of Metamaterial Absorber for Space Based Remote Sensing Applications, Uluslararası Katılımlı 7. Uzay Teknolojilerindeki Son Gelişmeler, İstanbul-Türkiye, 229-232, 16-19 Haziran 2015.
- Özden K., Yücedağ O.M., Özer A., Bayrak H., Işık H., Koçer H., Thermal Imaging of RF Induced Heat Loss in a Microwave Metamaterial Absorber, Progress in Electromagnetics Research Symposium, Prag, Çek Cumhuriyeti, 793-796, 6-9 Temmuz 2015.
- Hartley R., Base Materials for High Speed, High frequency PC Boards, Conference Proceedings, PCB&A West, Mart 2002.
- Singh P.K., Mutzel C., MacNaughton S., Sonkusale S., In-situ Large Area Fabrication of Metamaterials on Arbitrary Substrates Using Paint Process, Progress in Electromagnetics Research, 141, 117-133, 2013.