



## Yüksek Kazançlı ve Dairesel Polarizasyonlu Mikroşerit Yakınlık Kuplaj Anten Dizisi Kullanılan Bir Telemetri Sisteminin Tasarımı ve Üretimi

### Design and Production of Telemetry System with a Proximity Coupled Patch Antenna Array Having High Gain and Circular Polarization

Ceyhan TÜRKMEN, Umut ONUŞ, Mustafa SEÇMEN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Yaşar Üniversitesi, Bornova, İzmir

turkmen.ceyhan@gmail.com, umutonus@hotmail.com, mustafa.secmen@yasar.edu.tr

#### Özet

Bu bildiride, uzun menzilli kablosuz haberleşme amacıyla ISM2400 (2.4-2.48 GHz) bandında çalışan yüksek kazançlı bir mikroşerit yama anten dizisi ile bir telemetri sisteminin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu sistemin hem verici hem alıcı kısmında sabit duracak şekilde yüksek kazançlı yakınlık kuplaj beslemeli 4x4'lük iki boyutlu bir mikroşerit yama anten dizisi ve arkasındaki güç bölücü devre tasarlanmıştır. Sabit alıcılara yönelik tasarlanan anten dizisi yapısında polarizasyon ve sönmüleme (fading) kayıplarını azaltabilmek için dairesel polarizasyon amaçlanmıştır. Belirtilen anten dizisi ve güç bölücü devre, CST (Computer Simulation Technology) Microwave Studio programında tasarlanarak benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Antenin benzetim ve ölçüm sonuçları birbirlerine yakın ve tutarlı olup elde edilen sonuçlara göre ISM2400 bandının çoğu bölgesinde anten dizisi kazancının bant içerisinde 12-15 dB ve polarizasyon eksen oranının 3-8 dB civarlarında olduğu görülmüştür. Telemetri uygulaması olarak uzaktan kablosuz izleme ve kontrol yapılabilen bir fırın kullanılmıştır. Yapılan testlerde fırındaki sıcaklığın görüntülenmesi ve kontrolü 80 metre mesafeye kadar sorunsuz bir şekilde sağlanmıştır.

#### Abstract

In this paper, the design and production of a telemetry system with a high gain microstrip patch antenna array is realized for the purpose of long range wireless communication. A high gain, proximity coupled 4x4 microstrip patch antenna array and its power divider, which is stationary at both receiver and transmitter parts of the communication system is designed. The polarization of the antenna is chosen as circular polarization to reduce fading and polarization losses. The indicated antenna array and power divider are designed in CST Microwave Studio by performing simulations. The simulation and measurement results of the antenna are consistent. It is observed within the most of the region of ISM2400 band that antenna gain is 12-15 dB, and the axial ratio is around 3-8 dB. As being a telemetry application, an oven on which wireless monitoring and controlling can be done is used. In the tests, the monitoring and control of the temperature in the oven is safely provided up to 80 meters.

#### 1. Giriş

Kablosuz haberleşme sistemleri, sivil ve askeri uygulamalarda aktif olarak kullanılmaktadırlar [1]. Bu sistemlerin başlıca iki temel bileşeni vardır. Bunlar; anten ve haberleşme modülleri olarak sıralanabilir. Antenler, elektriksel sinyalleri ortamda kablosuz olarak iletilebilen elektromanyetik dalgalara çeviren yapılardır. Ayrıca ortamdaki elektromanyetik dalgaları anlamlı elektriksel sinyallere çevirebilirler. Antenler sistemlerin ihtiyaçlarına cevap verebilecek şekilde tasarlanırlar. Bu sebepten ötürü farklı uygulamalarda, farklı tipte antenler kullanılır. Örneğin, cep telefonu antenleri ile uydu antenler ya da radyo antenleri birbirlerinden tamamen farklı yapıdadırlar. Kablosuz haberleşme sistemlerinin bir diğer önemli bileşeni ise haberleşme modülleridir. Bu modüller, sistemlerde gönderilecek parametreleri, antenle iletilebilecek elektriksel sinyallerine çeviren elektronik cihazlardır. Sözü edilen haberleşme sistemlerinden özellikle uzaktan ölçüm ve kontrol yapmaya olanak sağlayanlara telemetri sistemleri denilir. Bu yolla uzaktan izleme ve kontrol yapma olanağı sağlayan bu telemetri sistemleri formula 1 yarışları, havacılık, denizcilik ve uydu haberleşme uygulamaları gibi pek çok alanda kendilerine yer bulmaktadırlar [2, 3].

Telemetri sistemlerinde dairesel polarizasyonlu anten yapıları doğrusal polarizasyonlu antenlere göre daha avantajlıdır. Elektrik alan vektörünün dönerek ilerlemesi alıcının her açıdan kolaylıkla sinyali yakalayabilmesine olanak sağlar. Bu nedenle baz istasyonlarında, askeri ve uzay haberleşme sistemlerinde özellikle verici kısımlarında dairesel polarizasyon ile yayın yapan antenler kullanılmaktadır [4]. Bu sayede kablosuz haberleşmenin, hareket halindeki ve genelde doğrusal polarizasyona sahip alıcının konumuna, pozisyonuna ve çevredeki yansımalara olan bağımlılığı en aza indirilir ki doğrusal polarizasyonun açısı ne olursa olsun mutlaka bir sinyal alımı mevcuttur [5]. Yeryüzünden yansımının (çok yönlü yansımının) çok önemli olmadığı hava ve kara istasyonları içeren bu tür sistemlerde alıcı ve verici kısımlarının biri dairesel diğeri de doğrusal kutuplu olmakla beraber durum polarizasyon kaybına sebebiyet vermektedir. Fakat özellikle bizim çalışmamızdaki gibi yeryüzüne yakın ve sabit konumdaki iki istasyonun arasındaki kablosuz

haberleşmede yeryüzünden yansımalar oldukça önemlidir. Haberleşme mesafesinin uzun ve özellikle anten radyasyon hüzmelerinin geniş olduğu durumlarda, istasyonların birinin dairesel birinin doğrusal polarizasyona sahip olması, iki anten arası direk gelen sinyalin yeryüzünden yansıtılarak gelen sinyal ile yaklaşık aynı genlikli ve ters fazlı olarak toplanmasına bir başka deyişle toplam sinyal seviyesinin oldukça düşmesine sebep olabilir. Bu anlamda bizim çalışmamızda her iki antenin de mümkün olduğunca dairesel polarizasyonlu olması sağlanmıştır. Böylece polarizasyon kayıpları da en aza indirilmeye çalışılmıştır.

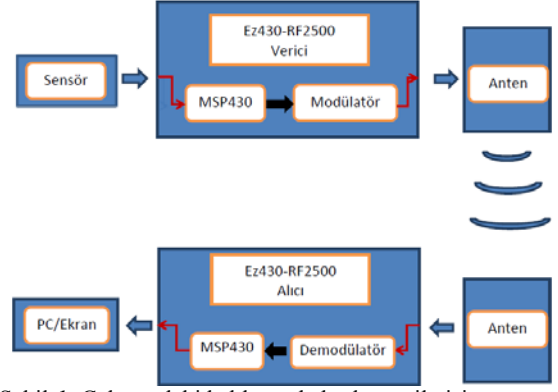
Bahsedilen bu antenlerin kazanç değerleri sabit tutularak telemetri sistemlerinde kullanılmalari halinde haberleşme mesafesini 5 katına çıkarmak için verici gücün yaklaşık 25 katına çıkartılması gerekmektedir. Bu durum ise, ya daha fazla çıkış gücü olan RF güç kaynaklarının (osilatörlerin) tasarlanmasına ve üretimine ya da yüksek kazançlı ve yüksek çıkış güçlü amfilerin (power amplifier) üretimine neden olacaktır. Her iki durumda da, sistemin maliyetinde ciddi miktarlarda artış problemi olacaktır. Ayrıca, gerek osilatörlerden gerekse amfilerden elde edilen RF güç, belli bir verim (kayıp) oranı ile DC güçten dönüştürüldüğü için bu durum dışarıdan çok daha fazla DC gücün çekilmesine bu anlamda gereksiz DC güç ve enerji israfına neden olacaktır. Bu problemlere çözüm olarak uzak mesafelerde haberleşme sağlayan telemetri sistemlerinde yüksek kazançlı anten sistemleri (dizileri) kullanılması gerekmektedir. Bizim çalışmamızda özellikle üretilmesi ve temininin kolay olması sebebiyle mikroşerit yama anten dizisi tercih edilmiştir. Tasarlanan antenin dizisi iki boyutlu (4x4'lük) olup ISM2400 bandında yaklaşık 13-14 dB kazançta sahiptir. Radyasyon ışımasında asimetri yaratabilecek istenmeyen yansımaları ve dairesel polarizasyonluğu bozabilecek çapraz polarizasyon etkilerini en aza indirilebilmek için güç bölücü devrelerle desteklenmiş yakınlık kuplaj besleme yöntemi kullanılmıştır [6]. Bu besleme yöntemi, klasik besleme yöntemlerine göre daha geniş bantlı bir yapı (yüzde 13'e kadar [7]) sağlamakta olup temassız yapısı gereği lehimleme ihtiyacı duymamaktadır.

Bu çalışmada yukarıda anlatılan anten dizisi, sembolik bir uygulama olarak bir fırının içindeki sıcaklığının uzaktan görüntülenmesi ve kontrol edilmesine (belli sıcaklıklar arası sabit tutulmasına) yönelik bir telemetri sisteminde kullanılmıştır. Gerçekleştirilen telemetri sisteminin düşük çıkış gücü olmasına rağmen (yaklaşık -12 dBm) 80 metreye kadar sorunsuz çalıştığı gözlemlenmiştir.

## 2. Haberleşme Modülü ve Ön Hesaplamalar

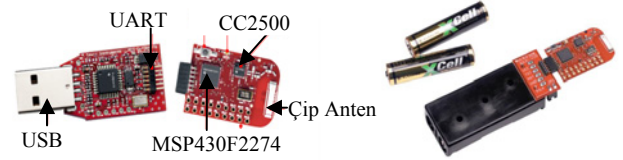
Bu çalışmada kullanılan telemetri sistemine ait kablosuz haberleşme çalışma prensibi ve ilgili akış şeması Şekil-1'de gösterilmiştir. Bu şekilde her ne kadar bir anten verici diğer anten alıcı olarak gösterilmiş olsa da özellikle fırın sıcaklığının kontrolü aşamasında her iki anten de hem verici hem alıcı (transceiver) olarak çalışmaktadırlar.

Basit haberleşme modüllerinin yüksek kazançlı antenler ile desteklendiğinde yüksek kablosuz haberleşme menzillerinin elde edilebileceğinin gösterilebilmesi açısından haberleşme modülleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda özellikle kolayca temin edilebilmesi, düşük güç tüketimine sahip olması, Şekil 22'de gösterilen ayrı ayrı her



Şekil 1: Çalışmadaki kablosuz haberleşme iletişim şeması.

iki parçasının da hem alıcı hem verici olarak çalışabilmesi ve dahili sıcaklık sensörü içermesinden dolayı telemetri sisteminde kullanılacak haberleşme modülü olarak Texas Instruments firmasının eZ430 RF2500 modülü seçilmiştir.



Şekil 2: eZ430 RF2500 haberleşme modülü [8].

Bu modül, sivil uygulamalara açık olan ISM2400 (2400-2484 MHz) bandında çalışmakta olup her iki kısımda kullanılan dahili çip antenlerin kazancı yaklaşık 1 dB'dir. Modülün varsayılan çıkış gücü -12 dBm olup bu güç yazılım ile 0 dBm'e kadar çıkarılabilmektedir. Modül, varsayılan çıkış gücü ile 5 metreye kadar sorunsuz bir şekilde kablosuz haberleşme yapabilmektedir.

Bu çalışmada, varsayılan çıkış gücü değiştirilmeden haberleşme modülünün dahili çip antenler ile 5 metreye kadar olan iletişim menzilinün 75-80 metrelere çıkarılması hedeflenmiştir. Hem verici hem alıcı olarak aynı antenlerin kullanılacağı düşünüldüğünde gerekli olan anten kazancı Friis iletim denkleminde faydalanılarak denklem (1)'deki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda G}{4\pi R} \right)^2 \quad (1)$$

Burada,  $P_r$  alınan gücü,  $P_t$  vericiden çıkış gücünü (-12 dBm = 63  $\mu$ W),  $\lambda$  dalga boyunu (2.4 GHz için 12.5 cm),  $G$  anten kazancını,  $R$  haberleşme mesafesini (80 metre) belirtmektedir. Kazancı bulunabilmesi için denklem (1)'deki tek bilinmeyen olan  $P_r$  ise aşağıdaki frekans bandı içerisindeki termal gürültünün sinyale oranından (SNR) denklem (2)'deki gibi hesaplanır.

$$\frac{P_r}{P_g} = SNR \quad (2)$$

Burada,  $P_g$  gürültünü gücünü

$$P_g = kT\Delta f \quad (3)$$

$P_g$  gürültü gücünü,  $k$  Boltzman sabitini ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K),  $\Delta f$  kullanılan frekans bandını (ISM2400 bandının tamamı düşünülerek 84 MHz),  $T$  ise ortam sıcaklığını (293 Kelvin) temsil etmektedir. Tüm bu denklemler birleştirildiğinde yaklaşık kazancı hesaplayabilmek için aşağıdaki denklem (4) elde edilir.

$$G = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \sqrt{\frac{kT\Delta f}{P_t}} SNR \quad (4)$$

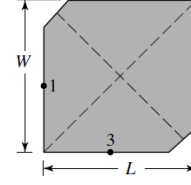
Haberleşme sisteminde sağlıklı veri alışverişi açısından SNR değerinin mümkün olduğunca yüksek olması istenir. Pratik uygulamalarda ise, 30 dB'lik bir SNR değeri oldukça iyi sayılmakta olup denklem (4)'teki hesaplamada SNR = 30 dB alınmıştır. İlgili değerler, denklem (4)'te yerine konulduğunda 80 metrelik haberleşme mesafesi için gerekli anten kazancı yaklaşık 13 dB  $\approx$  20 olarak bulunmuştur. Tasarımdaki mikroşerit yama antende kullanılan FR4 gibi kayıplı bir malzemeden ve geri dönüşten kaynaklanabilecek kayıplar düşüldüğünde, tasarlanacak antenin yönlülüğü (directivity) benzetimlerde 15 dB nin üzerinde olmalıdır. Bu sonucun ikinci bir yoldan sağlanması da şu şekilde yapılabilir. Kullanılacak haberleşme modülü (ez430-RF2500) üzerindeki hem alıcı hem verici kısmında kullanılan çip antenin yaklaşık 1 dB kazancı ve 5 metre menzili olduğu düşünüldüğünde, tasarlanacak 13 dB kazancı antenlerin 13 dB - 1 dB = 12 dB  $\approx$  15 kat daha fazla kazancı olacağından 5 metrelik etkin mesafe yaklaşık 75-80 metreye çıkacaktır.

### 3. Anten Dizisi ve Güç Bölücü Tasarımı

Bu çalışmadaki telemetri sistemi için seçilen haberleşme modülü ISM2400 bandında çalıştığı için, tasarlanacak anten dizisinin de bu frekans bandında çalışması gerekmektedir. Dielektrik katsayısı  $\epsilon_r$  olan bir malzeme üzerine yapılmış dikdörtgen yamalı tek bir mikroşerit antenin genişliği ( $W$ ) denklem (5)'teki formül ile hesaplanabilir [9].

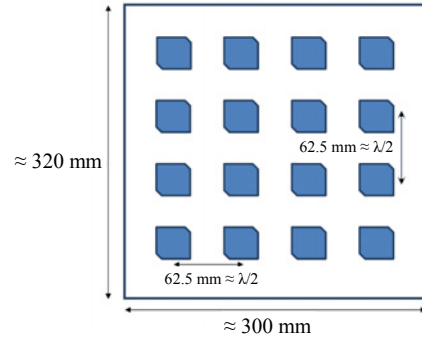
$$W = \sqrt{h\lambda/\sqrt{\epsilon_r}} \left[ \ln \left( \lambda/h\sqrt{\epsilon_r} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Burada  $h$  dielektrik malzemenin kalınlığını,  $f$  ise çalışma frekansını belirtmektedir. Üretim aşamasında temininin kolay ve maliyetinin düşük olması sebebiyle dielektrik malzemesi olarak FR4 ( $\epsilon_r = 4.3$ ,  $\tan \delta = 0.02$  ve  $h = 1.52$  mm) kullanılmıştır. Tasarlanan yama anten, özellikle dairesel polarizasyon yönünde modifikasyonu yapılabileceği için kare olması gerektiğinden uzunluk ( $L$ ) ve genişlik ( $W$ ) değerleri birbirlerine eşittir ve denklem (5) ile yaklaşık olarak 2.6 cm olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, CST Microwave Studio ile yapılan benzetimler ile de yaklaşık 2.8 cm olarak bulunmuştur. Kare şekilli yama anten herhangi bir modifikasyon yapılmadığında oldukça iyi bir doğrusal polarizasyona (yüksek polarizasyon eksen oranlarına) sahiptir. Anten polarizasyonunu dairesel yapabilmek adına mikroşerit antenin birbirine zıt iki köşesi Şekil 3'teki kırılmıştır. Bu kırma işleminin anten polarizasyonunu doğrusaldan dairesel çevirirken band genişliğini de arttırdığı gözlemlenmiştir. Örnek olarak 2.4 GHz frekansına ait benzetim sonuçlarında, dikine ışımda kırılmadan önce 40 dB olan polarizasyon eksen oranı kırıldıktan sonra 4 dB'ye kadar düşmüştür.



Şekil-3 Bir dairesel polarizasyonlu mikroşerit yama anten [5].

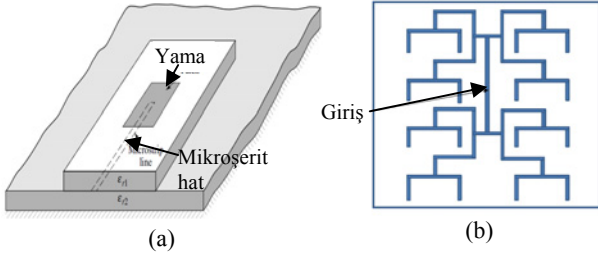
Mikroşerit yama antenlerin kazancı malzemelere göre değişiklik göstermekle beraber yaklaşık 5-6 dB civarındadır. 80 metre mesafe için ihtiyaç duyulan kazancın ise yaklaşık 13 dB kazancın yeterli olmasına rağmen kayıplar da düşünülerek 15-17 dB kazancı olan bir anten tasarımı yapılmasına karar verilmiştir. Tek bir mikroşerit antenin bu kazançları veremeyeceğinden anten kazancını arttırmak için anten dizilerinden faydalanılmıştır. CST MW programının dizi sentezleme araçlarından faydalanarak yaklaşık kazancı 17 dB olan bir mikroşerit yama anten dizisinin FR4 üzerindeki yerleşimi 4x4 olmak üzere 16 adet mikroşerit yama anten içerdiği görülmüştür. Antenlerin birbirlerine olan etkilerinin en aza indirilebilmesi için aralarına  $\lambda/2$  (6.25 cm) kadar boşluk bırakılmıştır. Bu başlangıç tasarımına ait şematik görüntü ve ilgili boyutlar Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil-4 Başlangıç anten dizisi tasarımı

Giriş bölümünde bahsedildiği üzere bu anten dizisinin beslemesi yakınlık kuplaj yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yakınlık kuplaj tarzı besleme yönteminde Şekil 5(a)'da görüldüğü gibi anten iki FR4 plakasının üst üste gelmesiyle oluşturulur. Alt plakanın dış yüzeyi topraktır ve tamamen iletken ile kaplıdır. Alt plakanın iç yüzünde güç bölücü ağ bulunmaktadır. Bu yüzün üzerine antenlerin bulunduğu plaka gelmektedir. Antenlerin bulunduğu tabakanın dış yüzünde antenler bulunurken güç bölücülerin olduğu iç tarafında hiç iletken yoktur.

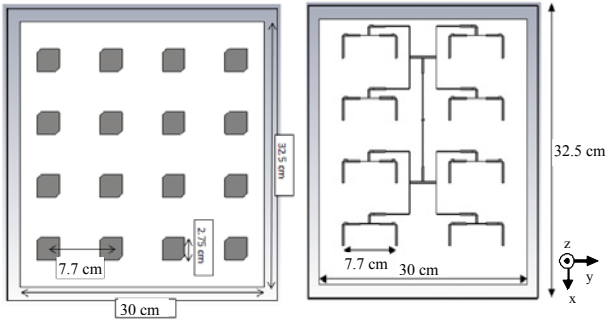
FR4 üzerine işlenen 16 mikroşerit yama antenin beslenmesi için güç bölücü yapıları tasarlanmıştır. Tasarlanan güç bölücüler konnektörden alınan gücü, eş 16 parçaya bölüp faz farkı olmaksızın her bir antene iletirler. Antenler arasında farz farkı oluşmaması için güç bölücünün konnektörden her bir antene giden kolları eşit uzunlukta tasarlanmıştır. Anteni beslemek için kullanılan SMA konnektörlerin empedansı 50  $\Omega$  dur. Antenlerin giriş empedansları da 50  $\Omega$  olmasına rağmen, iki 50  $\Omega$ 'luk iletim hattının birbirlerine paralel olduğu yerlerde 100  $\Omega$ 'luk hatlar kullanılmıştır. Bu hatları birbirine eşlemek için ise çeyrek dalga eşleme (quarterwave matching) tekniklerinden faydalanılmıştır. 50  $\Omega$  ve 100  $\Omega$ 'luk hatlar,  $\lambda/4$  (3.125 cm) uzunluğundaki 70  $\Omega$ 'luk hatlarla eşlenerek, geri dönüş kayıpları azaltılmaya çalışılmıştır.



Şekil-5 (a) Örnek bir yakınlık kuplaj beslemeli mikroşerit anten [5] (b) Yaklaşık güç bölücü tasarımı.

#### 4. Benzetim ve Ölçüm Sonuçları

Gerekli parametreleri hesaplanan ve yaklaşık boyutları yukarıda verilen anten dizisi ve güç bölücü yapıları CST MW programında koşturulmuştur. Daha sonra benzetim sonuçları referans alınarak yapılan optimizasyon işlemleri neticesinde anten ve güç bölücüye Şekil 6'da gösterilen son halleri verilmiştir.



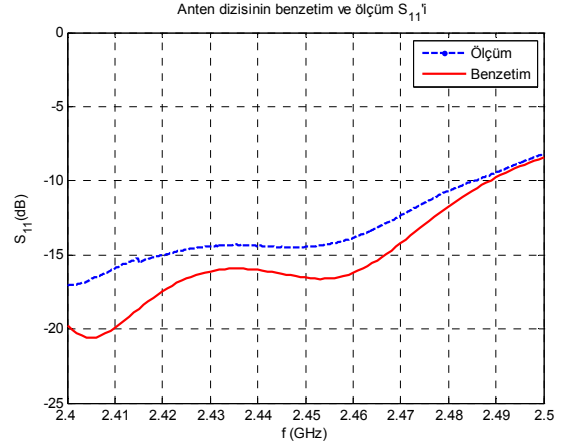
Şekil-6 Anten dizisi ve güç bölücünün son hali.

Tasarımı CST MW programında yapılan bu anten dizisi ve güç bölücü yapılan ODTÜ Ayaslı Araştırma Merkezi'nde Şekil 7'de görüldüğü üzere üretilmiştir. İlgili ölçümler, Yaşar Üniversitesi Anten ve Mikrodalga Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş ve ilgili sonuçları benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



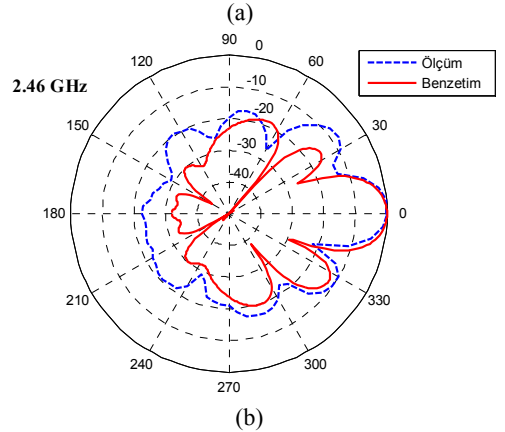
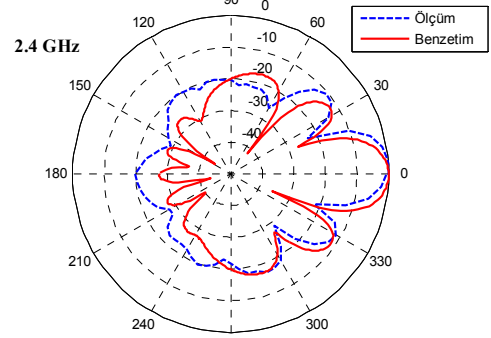
Şekil-7 Üretilen anten dizisi (en solda), güç bölücü (ortada) ve birleştirilmiş halleri (en sağda)

Birleştirilmiş anten dizisi ve güç bölücü yapı için geri dönüş kaybı bir başka deyişle  $S_{11}$  parametresine ait benzetim ve ölçüm sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8'deki sonuçlar incelendiğinde, ölçüm ve benzetim sonuçlarının oldukça tutarlı olduğu ve her iki sonuç için de ISM2400 bandı boyunca geri dönüş kaybının 10 dB'nin üstünde olduğu –ki bu anten uygulamalarında kabul edilen bir eşik değeridir– görülmektedir.



Şekil-8 ISM2400 bandı boyunca  $S_{11}$  grafiği.

Anten dizisinin ışınma örüntüsüne ait sonuçlar bazı frekanslar için Şekil 9'da verilmiştir. Burada sayfa sınırından dolayı yz düzlem örüntüleri verilmiş olup yapının simetrik olmasından dolayı xz düzlem örüntüleri de benzer şekilde bulunmuştur.

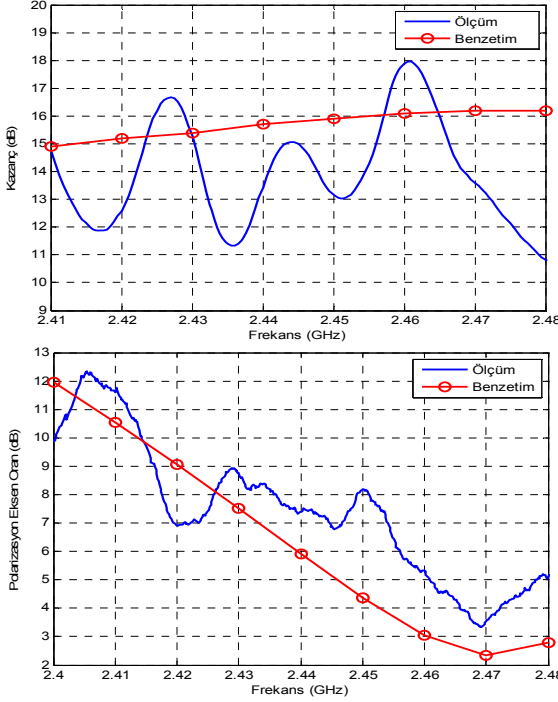


Şekil-9 Antenin şekil 6'ya göre yz düzlemindeki ışınma örüntü grafikleri (a) 2.4 GHz (b) 2.46 GHz.

Şekil 9'teki ölçüm ve benzetim sonuçlarının oldukça benzer olduğu ve tutarlı olduğu görülmektedir. Örnek vermek gerekirse, yarı güç hüzmeye genişlikleri, ölçüm ve benzetim ışınma örüntülerinde yaklaşık 20° olarak bulunmuştur.

İşınma örüntüleri ölçümlerinden sonra anten dizi ve arkasındaki güç bölücü ağ devresi ile beraber kazanç ve polarizasyon oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İlgili grafikler Şekil 10'da gösterilmiştir. Kazanç grafiği incelendiğinde hedeflenen 13 dB kazançta ISM2400 frekans bandının çoğu bölgesinde





Şekil-10 Bant boyunca anten kazancı (üste) polarizasyon eksensel oranı (altta).

ulaşmaktadır ya da çok yakındır. Ayrıca bazı frekanslarda 15-16 dB civarlarında kazanç gözlenmiştir ve bu anlamda benzetim sonuçları ile tutarlılık vardır. Polarizasyon grafiği incelendiğinde ISM2400 Bandının başlarında (2.4-2.42 GHz arası) beklenildiğinden biraz daha yüksek olan eksensel oran çıkmaktadır. Öte yandan bandın geri kalan bölümünde 3-8 dB arası eksensel oran vardır ki bu değerler benzetim sonuçları ile oldukça uyumludur. Hatta bandın sonlarına doğru (2.46 GHz'den sonra), eksensel oran 3-5 dB arasında olup uygulamalarda yeterli sayılabilecek dairesel polarizasyona ulaşılmaktadır. Benzetim ve ölçüm sonuçları arasındaki küçük farklar, dielektrik malzemenin katsayısındaki farklılık ve anten-güç bölücü tabakaların üstüste yerleşiminden kaynaklanan mekanik hatalardan meydana gelmektedir.

Tasarlanan antenler seçilen haberleşme modülüne entegre edilerek bir telemetri yapısı oluşturulmuştur. Bu sistem ile bir fırın otomasyonunun sıcaklık parametresi uzaktan izlenmiş ve kontrol edilmiştir. Tasarlanan telemetri sisteminin alıcı kısmı bilgisayara bağlanarak gelen sıcaklık bilgisi anlık olarak takip edilebilmektedir. Tasarlanan basit fırın otomasyonu Şekil 11'de verilmiştir. Fırın üzerinde bir ısıtıcı ve bir soğutucu bulunmaktadır. Fırın sıcaklığı 27 °C'nin altına düştüğü anlarda ısıtıcı çalışıp fırını ısıtmakta, 33 °C'nin üzerine çıktığı durumlarda ise soğutucu devreye girerek fırını soğutmaktadır. Sıcaklık 27-33°C arasında ise ne soğutucu ne de ısıtıcı çalışmamaktadır böylece sıcaklık bu değerler arası tutulur.

Haberleşme modülü dahili çip anteni ile en fazla 5 metreye kadar veri alışverişi sağlayabiliyorken, tasarlanan antenin haberleşme modülüne entegre edilmesiyle oluşturulan sistem 65 metreye kadar kusursuz iletişime imkan sağlamıştır. 65-80 metre arasında sistemin cevap verme süresi yavaşlamasına rağmen hiç bir bozulma olmaksızın veri alışverişi sürmüştür. 80-100 metre arasında gönderilen verilerde bozulmalar meydana gelmeye başlamıştır. 120-150 metreye kadar sinyal

gönderme alma işlemi yapılabilmiş fakat meydana gelen bozulmalar düşünüldüğünde anlamlı bir veri akışı 100 metreden sonra kesilmiştir.



Şekil-11 Fırın otomasyonu (solda) ve genel sistem (sağda).

## 5. Vargı

Üzerinde bulunan dahili çip anteni ile 5 metreye kadar haberleşmeye olanak sağlayan eZ430 RF2500 haberleşme modülünün anteni Yüksek kazançlı, dairesel polarizasyonlu, yakınlık kuplaj beslemeli 4×4 mikroserit yama anten dizisi ile değiştirilerek elde edilen bir kablosuz telemetri sistemi ile kablosuz haberleşme menzili 80-100 metreye kadar arttırılmıştır. Tasarlanan anten dizisinin geri dönüş kaybı ISM2400 bandı boyunca -10 dB den daha iyidir. Antenin yarı güç hüzmeye genişliği 20° civarında olup, kazancı band boyunca 12-15 dB arasındadır. Ayrıca antenin eksensel oranının da bandın büyük bir bölümünde 3-8 dB arasında olduğu gözlemlenmiştir. Tasarlanan bu anten dizisinin, seçilen haberleşme modülüne entegre edilmesiyle elde edilen telemetri sisteminin, sanayide uygulanabilirliğinin gösterilebilmesi amacıyla bir fırın otomasyonu tasarlanmıştır. Yapılan testlerde, fırın sıcaklığının 65-80 metre uzaktan sorunsuzca kontrol edilebildiği ve PC arayüz ile fırının sıcaklık bilgisinin anlık olarak takip edilebildiği görülmüştür.

## 6. Teşekkür

Bu çalışma 2209/A destek programı kapsamında TÜBİTAK tarafından maddi olarak desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

## 7. Kaynaklar

- [1] İnan, S. A. ve Çakmak, S., "RF (Radyo Frekansı) Uzaktan Kontrol / Ölçme Sistemi ve Uygulamaları", VII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi İzmir, 2008, s. 571-580.
- [2] <http://www.formula1-dictionary.net/telemetry.html>
- [3] <http://telemetryproducts.com/>
- [4] Stutzman, W. L. ve Thiele, G. A., *Antenna Theory and Design, 3rd Edition*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- [5] Balanis, C. A., *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
- [6] Oltman, H. G. ve Huebner, D. A., "Electromagnetically Coupled Microstrip Dipoles", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 29, s. 151-157, 1981.
- [7] Pozar, D. M. ve Kaufman, B., "Increasing the Bandwidth of a Microstrip Antenna by Proximity Coupling", *Electronics Letters*, vol. 23, s. 368-369, 1987.
- [8] eZ430-RF2500 Development Tool User's Guide, Texas Instruments, [www.ti.com/lit/ug/slau227e/slau227e.pdf](http://www.ti.com/lit/ug/slau227e/slau227e.pdf)
- [9] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. ve Ittipiboon, A., *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, Norwood, MA, 2001.