



Radyo Frekansı Tanımlama Uygulamaları İçin Inkjet Anten Optimizasyonları

Program Kodu: 1002

Proje No: 116E871

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Özgür ERGÜL

EYLÜL 2018
ANKARA

Önsöz

1002 programı kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenen “Radyo Frekansı Tanımlama Uygulamaları İçin Inkjet Anten Optimizasyonları” başlıklı bu projede, son yıllarda artarak kullanılan radyo-frekanslarında tanımlama (RFID) sistemleri için özgün ve etkin antenlerin tasarlanması amaçlanmıştır. Özellikle ucuz inkjet baskı yöntemine uygun olarak tasarlanan RFID antenlerinin benzetim ve tasarımları, proje kapsamında geliştirilen ve sonlu yapıların analizlerini sağlayan bir integral denklemi yönteminin genetik algoritmalarla içiçe geçtiği yeni bir optimizasyon mekanizmasıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tasarımların üretilmesi ve RFID uygulamaları kapsamında test edilmesiyle, optimizasyon mekanizmasının etkinliği kanıtlanmıştır. Optimizasyon mekanizması, sadece inkjet baskıya uygun RFID antenlerinin değil, aynı zamanda benzeri radyo-frekans ve mikrodalga bileşenlerinin de gerçekçi olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır.

İçindekiler

Önsöz.....	i
İçindekiler.....	ii
Tablo ve Şekil Listeleri.....	iii
Kısaltmalar.....	v
Özet.....	vi
Abstract.....	vii
1. Giriş.....	1
2. Konu ve Literatür Özeti.....	2
2.1. Anten Benzetimleri.....	2
2.2. Anten Optimizasyonları.....	3
2.3. Inkjet Üretim Yöntemleri ve Inkjet Antenler.....	4
3. Gereç ve Yöntem.....	6
3.1. Yüksek Kabiliyetli Benzetim Aracı.....	6
3.2. Yüksek Kabiliyetli Optimizasyon Mekanizması.....	8
3.3. Ucuz Inkjet Baskı Yöntemi.....	10
3.4. Yüksek Kabiliyetli Inkjet Antenler.....	12
4. Bulgular.....	13
4.1 Kafes-Dipol Antenler.....	14
4.2 Piksel Antenler.....	16
4.3 Takılabilir Piksel Yapılar.....	19
4.4 Kesilebilir Log-Periyodik Antenler.....	22
4.5 Diğer Radyo-Frekans ve Mikrodalga Bileşenlerinin Tasarlanması ve Üretilmesi.....	24
5. Tartışma ve Sonuç.....	33
Referanslar.....	34

Tablo ve Şekil Listeleri

Şekil 1. Inkjet tipi antenlerin ucuz üretimleri için kurulmuş olan ve proje kapsamındaki üretimler için de kullanılmış olan mekanizma.	6
Şekil 2. Proje kapsamında geliştirilmiş ve kullanılmış olan optimizasyon mekanizmasının genel gösterimi.....	7
Şekil 3. Proje kapsamında geliştirilmiş ve kullanılmış olan optimizasyon mekanizmasının bazı detayları.	8
Şekil 4. Ucuz inkjet baskı yöntemiyle üretilen baskılarda çözünürlük kalite testleri.	11
Şekil 5. Proje öncesinde tasarlanmış ve üretilmiş olan antenlere bazı örnekler.	12
Şekil 6. Proje kapsamında geliştirilmiş olan kafes dipol antenler. Bu tür antenlerin geometrilerine ek olarak, baskı, ısıtma işlem ve bağlantı işlemleri de gösterilmiştir.	13
Şekil 7. 50 Ohm giriş empedansına uyum sağlayacak şekilde tasarlanmış bir kafes-dipol anten ve elde edilen sonuçlar.	14
Şekil 8. Mikroçipe uyum sağlayacak şekilde tasarlanan bir kafes-dipol anten ve bu antenin mikroçipe bağlandığı durumda elde edilen sonuçlar.....	15
Şekil 9. Proje kapsamında geliştirilmiş olan piksel antenlere bir örnek. Sağdaki fotoğrafta antenin mikroçipe bağlandığı bir RFID etiketi gösterilmiştir.	16
Şekil 10. Piksel antenlerin optimizasyonlarına 10 örnek ve en iyi tasarım için elde edilen güç yansıma katsayısı sonuçları.....	17
Şekil 11. Mikroçipe uyum sağlayacak biçimde tasarlanmış bir piksel anten yapısı ve bu yapının mikroçipe bağlanmasıyla elde edilen etikete ait okuma menzili sonuçları.	18
Şekil 12. Yüksek frekanslarda çalışabilen bazı piksel anten tasarımları.....	19
Şekil 13. Takılabilir piksel yapıların uygulandığı orijinal anten tasarımı ve ilgili sonuçlar.....	20
Şekil 14. Şekil 13'te gösterilen orijinal yapıda, iki tarafta kalan topraklama bölgelerinin optimizasyonları ile tüm yapının mikroçipe uyumlu hale getirilmesi.....	21
Şekil 15. Şekil 14'teki optimizasyonlar sonucu tasarlanan yapılardan biri için gerçekleştirilen okuma mesafesi testleri.	21
Şekil 16. Kesilebilir olarak tasarlanan bir log-periyodik anten üzerinde frekansa bağlı olarak indüklenen elektrik akımı dağılımları.....	22
Şekil 17. Kesilebilir olarak tasarlanan bir log-periyodik antene ait frekansa bağlı ışınım karakteristiği.....	23
Şekil 18. Kesilebilir olarak tasarlanan bir log-periyodik anten ve bu antene ait güç yansıma katsayısı değerleri.....	23

Şekil 19. Kesilebilir olarak tasarlanan log-periyodik antenin, büyük kollardan başlayarak kesilmesi ve geri kalan kısım için elde edilen güç yansımaya katsayısı değerleri (50 Ohm).	24
Şekil 20. Proje kapsamında geliştirilmiş olan bir AHR dizgesi ve bu dizgenin ucuz inkjet baskı ile üretilmiş prototipi.	25
Şekil 21. Tasarlanan AHR dizgesinin elektromanyetik tepkisi. Yapının etrafındaki elektrik alanı şiddeti ve güç yoğunluğu dağılımlarına ek olarak, güç yansımaya katsayısı gösterilmiştir.	25
Şekil 22. Proje kapsamında geliştirilmiş olan, AHR ve ince çubuklardan oluşan bir bileşik metamateryal.	26
Şekil 23. Geliştirilen bileşik metamateryal baskılarına bazı örnekler ve metamateryal bloğu için elde edilmiş olan güç yansımaya katsayısı değerleri.	27
Şekil 24. Proje kapsamında tasarlanmış ve test edilmiş olan çipsiz RFID etiketlerine bir örnek.	28
Şekil 25. 10 bitlik bir çipsiz RFID etiketinin sinyal seviyesini artırmak için çoklu olarak kullanılması.	29
Şekil 26. Proje kapsamında geliştirilmiş olan 20 bitlik çipsiz RFID etiketi tasarımı.	29
Şekil 27. Proje kapsamında geliştirilmiş olan harf şeklinde çipsiz RFID etiketi tasarımları.	30
Şekil 28. Proje kapsamında geliştirilmiş olan harf şeklinde çipsiz RFID etiketi tasarımları için elde edilen RKA değerlerinin standart harflerle elde edilenlerle karşılaştırılması.	30
Şekil 29. Proje kapsamında geliştirilmiş olan harf şeklinde çipsiz RFID etiketi tasarımlarının çoklu kullanıldığı durumlarda elde edilen yüzey akımları.	31
Şekil 30. Proje kapsamında geliştirilmiş olan harf şeklinde çipsiz RFID etiketi tasarımlarının çoklu kullanıldığı durumlarda elde edilen yüzey akımları ve RKA değerleri.	31
Şekil 31. Proje kapsamında geliştirilmiş olan bazı çipsiz RFID etiketlerinin ucuz inkjet baskı yöntemiyle üretilmiş prototipleri.	32

Kısaltmalar

- CTF: Combined Tangential Formulation / Birleşik Teğet Formülasyonu
- CNF: Combined Normal Formulation / Birleşik Normal Formülasyonu
- EFIE: Electric-Field Integral Equation / Elektrik Alan İntegral Denklemi
- GA: Genetic Algorithms / Genetik Algoritmalar
- JMCFIE: Electric and Magnetic Current Combined-Field Integral Equation / Elektrik ve Manyetik Akımı Birleşik-Alan İntegral Denklemi
- MLFMA: Multilevel Fast Multipole Algorithm / Çok Seviyeli Hızlı Çokkutup Yöntemi
- PMCHWT: Poggio-Miller-Chang-Harrington-Wu-Tsai (Formülasyonu)
- RFID: Radio-Frequency Identification / Radyo Frekanslarında Tanımlama
- RWG: Rao-Wilton-Glisson (Fonksiyonları)

Özet

Radyo frekanslarında tanımlama (RFID), sağlık, savunma, otomotiv, gıda, ve benzeri alanlarda, otomatik izleme gerektiren uygulamalarda artarak yaygınlaşan teknolojilerden biridir. Genel olarak, düşük maliyetli bir RFID sistemi, alıcı ve verici olarak çalışan bir okuyucu ve pasif kartlardan (etiketlerden) oluşmaktadır. Bu tür bir RFID sisteminin kullanışlı olabilmesi için, özellikle etiketlerin ucuz olmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda, bu alanda gerçekleşen ilerlemeler sayesinde, mikroçiplerin fiyatları son derece düşürülmüştür. Ancak bu yeterli değildir, ve mikroçiplere ek olarak, kullanılan etiket antenlerinin de ucuz yollarla üretilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, standart yazıcıların içinde gümüş bazlı tonerlerin kullanılmasıyla üretilen inkjet tipi antenler, çeşitli RFID uygulamaları için geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Baskılarda karşılaşılan düşük iletkenlik ve hassasiyet sorunları ısıtma ve pişirme yöntemleriyle aşılrken, antenlerin mikroçiplerle bağlantılarında iletken yapıştırıcılar kullanılmış ve lehimlemelerde çıkan sorunlar da bu şekilde çözülmüştür. Öte yandan, inkjet üretimlerle elde edilen antenlerin kalitesinin, baskı parametreleri, tonerlerdeki gümüş oranları, kağıt malzemenin özellikleri, pişirme sıcaklığı ve süresi gibi pek çok etkene bağlı olması, kapsamlı parametrik analizlerin yapılmasını gerektirmektedir. Tüm bu analizlere rağmen, aynı anda üretilen iki antenin bile görece farklı çalışabildikleri (örneğin frekanslarda kayma ve güç yansıma diplerinde seviye farkı gösterdikleri) bilinmektedir.

Literatürde, inkjet tipi antenler yaklaşık 10 yıldır çalışılmaktadır. Öte yandan, bu yolla üretilen antenlerde görülen ve yukarıda özetlenen problemler, bu tip antenlerin (ucuzluk avantajlarına rağmen) yaygınlaşmasını engellemiştir. Bu kapsamda, RFID sistemlerinin dar bantlı olması, üretilen antenlerin de dar bantlı olabileceği yönünde yanıltıcı olmuştur. Görece basit benzetimlerde bile diyelektrik etkilerin dahil edilmemesi ve kaynak bölgelerinin hassas modellenmemesinden dolayı, bu çalışmalar sonucunda elde edilen antenlerin kullanımı sınırlı olmuştur. Bu doğrultuda, bu projenin özgün unsurları, inkjet tipi antenlerin hassas analizleri için metalik ve diyelektrik kısımları tam olarak modelleyebilen bir tam-dalga çözücüsünün geliştirilmesi ve kullanılması, geliştirilen çözücünün keşifsel metotlarla birleştirilmesiyle etkin bir optimizasyon mekanizmasının geliştirilmesi, ve bu mekanizmanın kullanılmasıyla yeni inkjet antenlerin tasarlanması ve RFID sistemlerinde test edilmesi olmuştur. Prototiplerin üretilmesi ve gerçek RFID senaryolarında incelenmesi, sadece tasarımların değil, bu amaç doğrultusunda geliştirilmiş olan optimizasyon mekanizmasının etkinliğini de kanıtlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Radyo frekanslarında tanımlama (RFID), inkjet antenler, hesaplamalı elektromanyetik, elektromanyetik optimizasyon.

Abstract

Radio-frequency identification (RFID) is a technology that is becoming increasingly popular particularly for automated tracking applications in healthcare, defense, automotive, food, and similar service sectors. In general, a low-cost RFID system consists of a receiver/transmitter reader and passive cards (tags). This kind of an RFID system can be useful particularly when tags are inexpensive. Developments in recent years have greatly reduced the cost of the microchips. However, this is not sufficient, and the tag antennas should also be produced via low-cost methods. In this direction, inkjet antennas, which can be produced by using silver-based toners in standard printers, have been proposed and used in RFID applications. Low conductivity and sensitivity problems encountered in printing have been solved via heating and curing, while issues in soldering to connect antennas to microchips have been overcome by resorting to conductive epoxy. On the other hand, since the quality of inkjet antennas heavily depends on many factors, such as printer parameters, silver ratios in inks, paper types, heating temperature and duration, detailed parametric analyses are required. Despite these analyses, it is known that even two antennas that are produced simultaneously may possess different characteristics (shifting in operating frequencies and different power reflection dip values).

In the literature, inkjet antennas have been studied for nearly 10 years. Nevertheless, the problems encountered in these antennas described above have restricted their widespread usage (despite their cost advantages). In this context, the narrowband nature of RFID systems has been misleading, as if the antennas can also be narrowband. Even in relatively simple simulations, omitting dielectric effects and neglecting precise feed models have made the designed antennas impractical in real life. In this direction, the novel aspects of this project have been developing and using a full-wave solver that can model both metallic and dielectric parts for precise analysis of inkjet antennas, combining the developed solver with heuristic algorithms for a robust optimization mechanism, and designing novel inkjet antennas using this mechanism, as well as testing them in RFID systems. The fabrication of prototypes and their investigation in realistic RFID scenarios have demonstrated the effectiveness of the optimization mechanism, in addition to the effectiveness of the designs.

Keywords: Radio-frequency identification (RFID), inkjet antennas, computational electromagnetics, electromagnetic optimizations.

1. Giriş

Radyo frekanslarında tanımlama (RFID), barkod ve benzeri sistemlere alternatif olarak son yıllarda çeşitli alanlarda kullanılmaya başlamıştır. Özellikle optik görüş hattı gerektirmemesi, bu sistemleri, sağlık, savunma, otomotiv, gıda, ve benzeri sektörlerde barkod sistemlerine göre avantajlı kılmaktadır. Ancak, RFID sistemlerinin yaygınlaşabilmesi için ekonomik olmaları şarttır. Düşük maliyetli bir RFID sistemi, alıcı ve verici olarak çalışan bir okuyucu ve pasif kartlardan oluşmaktadır. Kullanılan alana bağlı olarak, okuyucular az sayıda ve genellikle sabit olurken, kartların çok sayıda ve hareketli olması beklenmektedir. Her bir kart ise, yine alıcı ve verici olarak çalışan bir anten ile, antenin terminallerine bağlı ve tanımlamaya uygun bir ID'ye sahip mikroçipten meydana gelmektedir. Bu tür bir RFID sistemi şu şekilde çalışmaktadır:

- (1) Okuyucu dar bir frekans bandında sinyal gönderir.
- (2) Sinyal kart üzerindeki anten tarafından alınır ve mikroçipe iletilir. Mikroçip pasif olduğundan, çalışması için gerekli güç de bu sinyalde bulunur.
- (3) Mikroçip, içindeki ID'ye bağlı olarak değiştirilmiş olan sinyali geri antene aktarır.
- (4) Anten mikroçipten gelen sinyali ışınım yoluyla yayınlar ve okuyucuya gönderir.
- (5) Gelen sinyal okuyucu tarafından tanımlanır.

RFID etiketlerinin ucuz yollarla üretilebilmesi için en uygun yöntemlerden biri inkjet baskı teknolojisidir. Yine son yıllarda artarak yaygınlaşan bu üretim stratejisinde, inkjet metal baskı için geliştirilmiş özel yazıcıların kullanılması mümkündür. Ancak, üretim maliyetinin daha da düşürülmesi doğrultusunda, gümüş bazlı tonerlerin standart yazıcılar içinde kullanıldığı yöntemler son derece pratik çözümler sunmaktadır. Öte yandan, bu tür bir sistemin de kendi dezavantajları bulunmaktadır. Özellikle, elde edilen antenlerin kalitesinin pek çok etkene bağlı olması ve aynı anda üretilen antenlerin bile görece farklı çalışabilmesi, kapsamlı parametrik benzetimlerin ve analizlerin yapılmasını gerektirmektedir. Bu projenin temel amacı da, yüksek performanslı RFID sistemlerinin elde edilmesi doğrultusunda inkjet antenlerin hassas benzetimleri ve optimizasyonları olmuştur. Başlangıç geometrileri olarak dipol ve yama yapılar gibi temel antenler ele alınmış, bu antenlerden çıkartılması veya deforme edilmesi gereken metal kısımlar optimizasyonlarla belirlenmiş, ve sonuç olarak da istenilen frekans bantlarında maksimum kazanç ve verim veren özgün anten tasarımları elde edilmiştir. Optimizasyonlar çok seviyeli hızlı çokkutup yöntemi (MLFMA) ile desteklenen genetik algoritmalarla (GA) gerçekleştirilmiştir. Bir başka deyişle, optimizasyonlar esnasında gerekli olan denemeler, bir tam dalga çözücüsü olan MLFMA ile hızlı ve hassas olarak hesaplanmıştır. Hassas benzetimler ve optimizasyonlarla elde edilen tasarımların etkinliği,

bu antenlerin üretilmesi ve deneysel ortamda test edilmesiyle kanıtlanmıştır. Uygun şekilde tasarlanıp üretilen antenler, RFID mikroçipleriyle birleştirilmiş ve yeterli menzillerde çalışabilen RFID etiketleri elde edilmiştir.

2. Konu ve Literatür Özeti

Konusu RFID sistemleri için inkjet baskıya uygun antenlerin tasarlanması olan bu projenin kapsamı ve ilgili literatür üç ana başlıkta incelenmelidir: (1) Anten benzetimleri. (2) Anten optimizasyonları. (3) Düşük maliyetli inkjet üretim yöntemleri ve inkjet antenler.

2.1. Anten Benzetimleri

Anten benzetimleri literatürde çok iyi bilinen temel konulardan biridir. Bu alanda pek çok ticari yazılım, farklı çözüm teknikleriyle alternatif yaklaşımlar sunmaktadır. Özellikle alandaki verimli literatürden faydalanan bu yazılımlar, karmaşık antenlerin ışınım ve saçılım özelliklerinin elde edilmesine, ve aynı zamanda güç yansıma, verimlilik, yönlülük, ve kazanç değerlerinin hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Bu benzetimlerde, metalik kısımlara ek olarak, antenlerin diyelik ve kayıplı diyelik kısımları da ele alınabilmekte ve bu doğrultuda hassas çözümler gerçekleştirilebilmektedir. Öte yandan, bu tür hassas benzetimlere karşın, imal edilen antenlerde ortaya çıkan pratik problemler sonucunda, ölçüm ve tasarım sonuçları tutarsız çıkabilmekte ve dolayısıyla benzetim-prototip döngülerinin kurulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu döngülerdeki iterasyonlarda kimi benzetim senaryolarının (örneğin standart olmayan girişlerin kullanıldığı durumların) ticari yazılımlarla incelenememesi, bu yazılımların ilk yetersizliği olarak göze çarpmaktadır.

Literatürde yüksek performansıyla bilinen tam dalga çözücülerinden olan MLFMA (Chew vd., 2001; Ergül ve Gürel, 2014), bu proje kapsamında optimizasyonlar esnasında ihtiyaç duyulan tüm denemeler ve elde edilen tasarımların analizleri ve testleri için kullanılmıştır. MLFMA elektromanyetik etkileşimlerin hızlı ve hassas olarak gerçekleştirilmesine olanak sağlayan bir yöntemdir. Ancak, antenlerin nasıl modelleneceğiyle ve elektromanyetik problemin formülasyonu ile doğrudan ilgili değildir. Antenlerin formülasyonları için ise farklı opsiyonlar mevcuttur. Örneğin iletken kısımların mükemmel iletken olarak modellenmesi literatürde sıkça takip edilen bir yöntemdir. Bu kapsamda, özellikle açık yüzeylere uygulanabilen elektrik alan integral denklemi (EFIE) ön plana çıkmaktadır (Karaosmanoğlu ve Ergül, 2017). Öte yandan, diyelik kısımların modellenmesinde birbirinden ayrılan teknikler mevcuttur. Özellikle, diyelik kısımların sonsuz olarak modellendiği benzetimler, çözüm verimliliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Efektif ortam modellenmesi de, yine mükemmel iletken yaklaşımının çok fazla değiştirilmeden kullanılmasını sağlamaktadır.

Bu proje kapsamında ise, dielektrik kısımların sonlu, üç boyutlu, ve gerçekçi olarak modellendiği benzetimler gerçekleştirilmiştir. Sonlu dielektrikler için, PMCHWT, Müller, birleşik normal formülasyon (CNF), birleşik teğet formülasyon (CTF), JM birleşik alan integral denklemi (JMCFIE) ve benzeri çok çeşitli yüzey formülasyonları literatürde zaten mevcuttur (Ergül ve Gürel, 2009a, 2009b; Yla-Oijala ve Taskinen, 2005; Yla-Oijala vd., 2005). Ancak, bunların anten malzemeleri gibi ince yapılarda sayısal problemlere yol açtıkları bilinmektedir. Özellikle antenlerin tasarlanmasında metal ve dielektrik kısımların sonradan birleştirildiği çözümler, metalin ince dielektrik malzemeye emildiği hassas yapıların analizleri için uygun değildir. Yüzey-hacim hibrid yaklaşımlarının ise, kaynak noktalarında modelleme hataları içerdiği gösterilmiştir. Bu doğrultuda, proje kapsamında, elektrik ve manyetik akımların bölgesel olarak elenebildiği bir CTF versiyonu geliştirilmiştir. Bu versiyon, metal yüzeyler üzerinde, standart formülasyondan manyetik etkileşimlerin çıkartılmasıyla elde edilmiş, sınır koşullarının uygulanmasında kaynak ayrıklaştırma elemanları yerine ince hat integralleri kullanılmıştır. Ayrıklaştırmalar üçgenler üzerinde tanımlanan ve literatürde iyi bilinen Rao-Wilton-Glisson fonksiyonlarıyla (Rao vd., 1982) gerçekleştirilmiş, ihtiyaç duyulan integrallerin hesaplanmasında analitik yöntemlerden (Graglia, 1993; Hodges ve Rahmat-Samii, 1997; Yla-Oijala ve Taskinen, 2003) faydalanılmıştır.

2.2. Anten Optimizasyonları

Teknolojinin son geldiği noktada, antenlerin sadece teorik olarak incelenmesi ve/veya benzetimleri, yeni anten tasarımlarının geliştirilmesi için yeterli gözükmemektedir. Özellikle analitik ve sayısal incelemelere ek olarak, pek çok uygulamada optimizasyonlar gerekmektedir. Bunu takiben bazı ticari yazılımlar, giriş portlarının optimizasyonu gibi bazı mecburi teknikleri programlara eklemiştir. Ancak, tüm antenin optimizasyonu gibi çok geniş uzaylı optimizasyonların, kullanıcı-dostu olmaya çalışan ticari yazılımlara eklenmesi mümkün gözükmemektedir. Bu tür optimizasyonların gerektiğinde çok çekirdekli sunucular üzerinde çalışması ve optimizasyon sonucu elde edilen değerlerin sağlamlasının yapılması ek yükler olarak karşımıza çıkmaktadır. Optimizasyon algoritmasının ve parametrelerin uygun seçimi konusundaki bilinmezlikler de, özelden ziyade genel yazılmaya çalışılan ticari programları zorlamaktadır. Bu doğrultuda, kullanılan ticari yazılımın kapalı bir kutu olarak kabul edilmesi ve optimizasyon mekanizmasına bu şekilde dahil edilmesi, son derece verimsiz ve kararsız çözümlere yol açmaktadır.

Literatür incelendiğinde ise anten optimizasyonları konusunda pek çok çalışma olduğu görülmektedir. Özellikle anten dizgeleri için uygulanan analitik ve yarı-analitik tekniklere

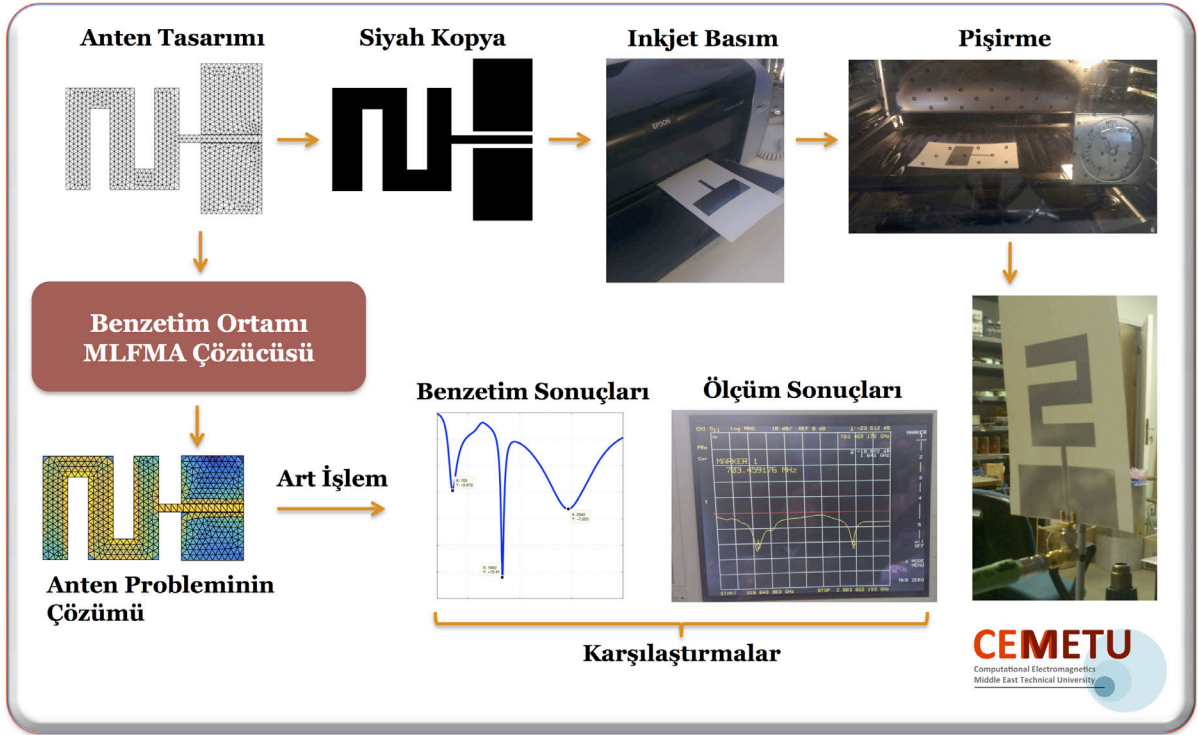
(Bevelacqua ve Balanis, 2007, 2009; Orchard vd., 1985; Vaskelainen, 2000; Yang, 2011) ek olarak, antenlerin devre elemanlarıyla modellendiği ve bu şekilde optimize edildiği çalışmalar iyi bilinmektedir (Araque Quijano ve Vecchi, 2009, 2012; Song, 2014). Öte yandan, hem yaygınlaşan antenlerin karmaşık hale dönüşmesi, hem de arzu edilen çalışma (kazanç, yönlülük, frekans bandı, vb.) kriterlerinin günden güne sıkılaşmasıyla birlikte, antenlerin tam-dalga çözücülerle modellendiği benzetimlere ve optimizasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, GA (Haupt ve Werner, 2007) gibi keşifsel yöntemlerin, momentler metodu ve MLFMA gibi çözücülerle birleştirildiği çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Erdil vd., 2007; Ergül ve Gürel, 2007; Kataja, 2014; Ozgun vd., 2003; Öno1 ve Ergül, 2014; Pringle vd., 2004; Rodrigo ve Jofre, 2012). Keşifsel yöntemler analitik ifade edilen fonksiyonlara ihtiyaç duymadığından, antenlerin çok amaçlı optimizasyonları da mümkün hale gelmektedir (Rajagopalan vd., 2014; Yuan vd., 2012). Öte yandan, keşifsel algoritmaların çok fazla denemeye ihtiyaç duyması, gerçekleştirilen denemelerin hızlı yapılabilmesini gerektirmektedir. Bu kapsamda, MLFMA gibi hızlı algoritmaların kullanılmasına ek olarak, dinamik hata kontrolü gibi mekanizmaların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Öno1 vd., 2016a). Bu proje kapsamında, optimizasyon mekanizması, parça hareketi, dönme, ayırma, boşluk açma ve serbest deformasyon gibi yapılandırma opsiyonlarına olanak sağlayacak şekilde geliştirilmiştir. Bu olanaklara sahip olarak literatürde örneği bulunmayan bu mekanizma, keşifsel algoritmalarla çözücünün (MLFMA) içiçe geçerek yazılmasıyla elde edilmiştir.

2.3. Inkjet Üretim Yöntemleri ve Inkjet Antenler

Inkjet baskı konusunda son 10 yılda önemli bilimsel gelişmeler sağlanmıştır (Nikitin vd., 2005). Bu teknikle gerçekleştirilen baskıların diğer yöntemlere göre ucuz olması, inkjet antenleri RFID teknolojisi gibi uygulamalarda kullanılmasını sağlamıştır (Rida vd., 2009). Öte yandan, özellikle son yıllarda inkjet baskı tekniğinin bu alanda özelleşen materyal yazıcılarla gerçekleştirilmesi (Cook ve Shamim, 2012; Maza vd., 2012; Subbaraman vd., 2013; Vyas vd., 2009; Yang vd., 2009), bu antenlerin daha da yaygınlaşmasını aslında engellemektedir. Beklendiği üzere, özel tasarlanmış materyal yazıcılar ile ciddi bir çabaya gerek kalmadan yüksek kalitede baskılar elde edilebilmektedir. Ancak, bu tür yazıcılar pahalıdır ve düzenli bakım servislerine ihtiyaç duymaktadır. Bu projede de takip edilmiş olan diğer yolda ise, standart yazıcılar kullanılmakta, ancak bunların başlıkları değiştirilerek metal-bazlı tonerlerin kullanımı için uygun hale getirilmektedir. Proje öncesindeki çalışmalarda (Çiftçi vd., 2016; Öno1 vd., 2015), uygun kullanıldıkları durumda, standart yazıcıların alternatif üretim araçları olabildikleri gösterilmiştir. Şekil 1'de bu tür bir üretim yönteminin ana hatları verilmiştir. Proje kapsamında kullanılan bu yöntemde, (1) tasarlanan antenlerin siyah kopyaları üretilmekte, (2) bu kopyalar Epson marka yazıcılarda gümüş bazlı tonerlerin kullanılmasıyla basılmakta,

ve (3) basılan antenlerin kalitesinin artırılması amacıyla basit ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Elde edilen antenler, her uygulamada olduğu gibi ölçüm ortamında test edilmekte ve elde edilen sonuçlar beklenen elektriksel özelliklere göre değerlendirilmektedir. Karşılaştırma sonuçlarına bağlı olarak, tasarımlar iyileştirilmekte ve daha kullanışlı hale getirilmektedir. Ayrıca, elde edilen antenler fiziksel (bükülme, dayanıklılık, vb.) testlerden geçirilmektedir.

Yukarıda özetlenen ucuz üretim yöntemlerinin literatürde yaygınlaşması beklenmektedir. Özellikle ucuz RFID sistemlerine her gün daha çok ihtiyaç duyulması, standart yazıcıların kullanıldığı yöntemlerin iyileştirilerek kullanılabilmesi fikrini pekiştirmektedir. Öte yandan, bu tür bir yaklaşım ile anten üretimlerinde çeşitli güçlükler bulunmaktadır. Standart yazıcılar, baskının eşit dağılımı olmasından ziyade “okunabilir” olmasını sağlayacak şekilde üretilmişlerdir. Dolayısıyla, gümüş bazlı tonerlerin kullanılmasıyla elde edilen baskılarda elektriksel iletim sorunları gözlemlenmektedir. Şekil 1’de de gösterilen pişirme yöntemleriyle, iletim kabiliyetinin önemli ölçülerde artırılması mümkündür. Öte yandan, iletim kalitesi bir kenara bırakıldığında, gerçekleştirilen (hem literatürde hem de bu projenin öncesindeki) çalışmalarda yapılan başlıca hatanın kaynağı RFID uygulamalarının dar bantlı olmasıdır. Örneğin bu proje kapsamında kullanılan mikroçipler 865-866 MHz’te çalışmaktadır. Bu durum, yanlış bir şekilde, kullanılan antenlerin de dar bantlı olabileceği yönünde yanıltıcı olmuştur. Antenlerin dar bantlı olması, standart üretim yöntemleri için uygundur ve bu şekilde antenlerin diğer özelliklerinin iyileştirilmesine ağırlık verilebilmektedir. Ancak, RFID uygulamaları için literatürde var olan tasarımların dar bantlı olması, düşük maliyetli üretim kapsamında ciddi problemlere yol açmaktadır. Baskılar sonucu elde edilen antenlerin ideal tasarımlardan çok az farklılaşması bile, anten ve okuyucu arasında uyumsuzluklara neden olmaktadır. Bu tür problemlerin ortadan kalkması için gerçekleştirilen çalışmalarda, pişirmenin lazer yöntemleriyle değiştirilmesi gibi farklı yaklaşımlar da kullanılmıştır. Öte yandan, kullanım açısından bakıldığında, ucuz inkjet antenlerin en önemli sorunu halen tekrarlanabilirliktir. Tamamen aynı anda üretilen iki anten bile farklı frekanslarda mikroçiplere uyum sağlayabilmektedir. Normal antenlere göre çok daha yüksek seyreden bu duyarlılık, genel olarak dar bantlı olarak üretilen antenlerin istenilen frekans bantlarında çalışmamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, ucuz inkjet antenlerin iyileştirilmesi doğrultusunda, umut vadedilen üretim yöntemlerinin değiştirilmesi yerine, geliştirilen antenlerin geniş bantlı olarak tasarlanmasına, ama aynı zamanda kullanılacakları uygulamaya bağlı olarak optimize edilmesine (örneğin küçültülmesine) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacın tespiti ve bu doğrultuda gerçekleştirilmiş olan çalışmalar bu projenin temelini oluşturmuştur.



Şekil 1. İnkjet tipi antenlerin ucuz üretimleri için kurulmuş olan ve proje kapsamındaki üretimler için de kullanılmış olan mekanizma.

3. Gereç ve Yöntem

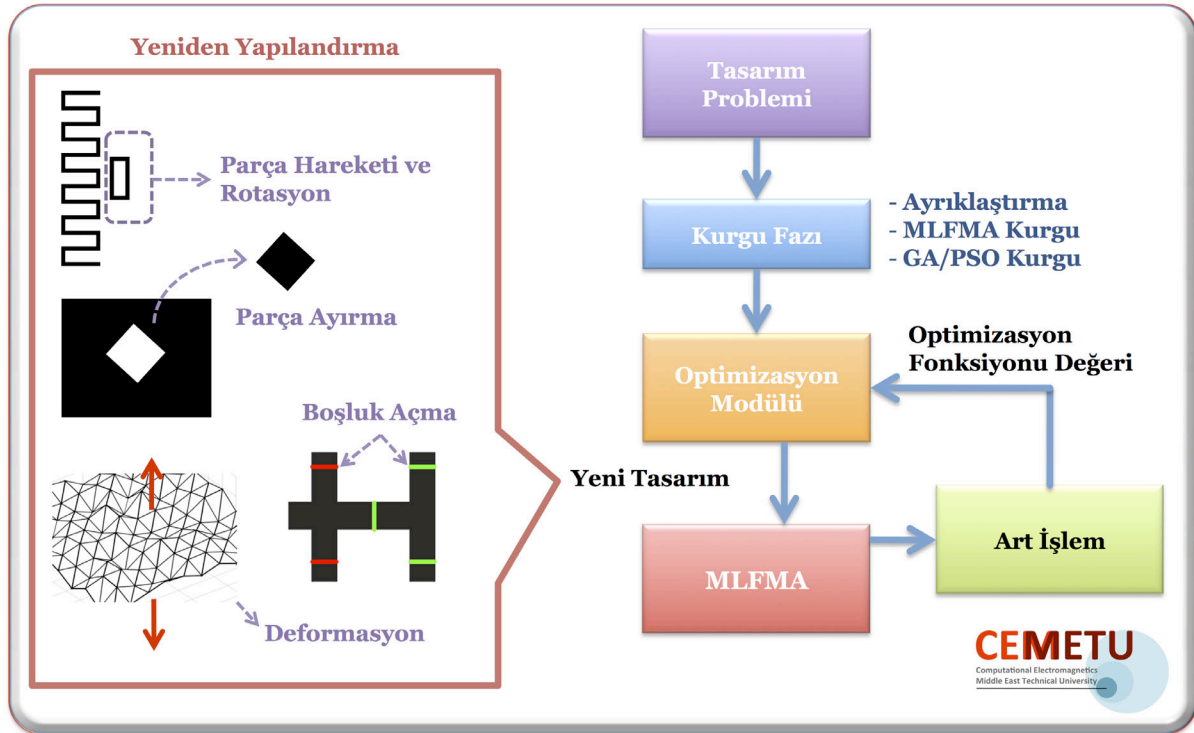
Bazıları ilk defa proje kapsamında geliştirilmiş ve kullanılmış olan gereç ve yöntemler yine üç ana başlık altında incelenebilir.

3.1. Yüksek Kabiliyetli Benzetim Aracı

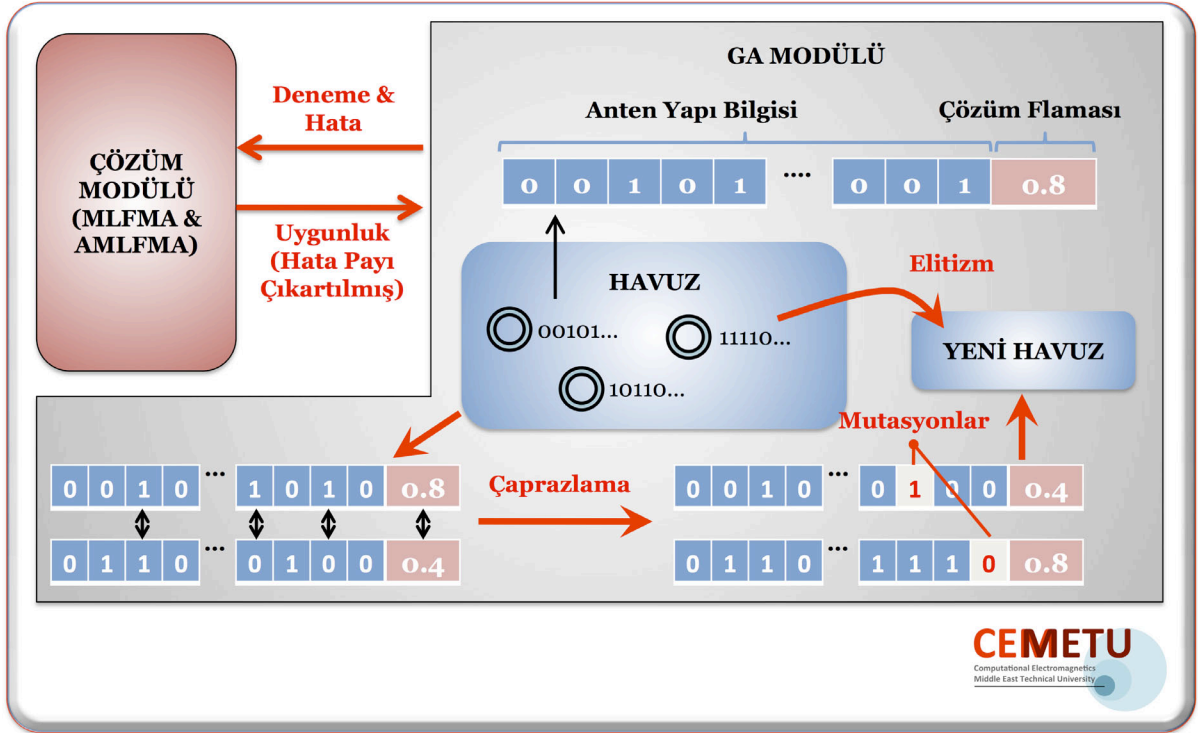
İnkjet tipi antenlerin hassas benzetimleri için yüzey formülasyonlarından oluşan yeni bir çözücü geliştirilmiştir. Diyelektrik ve metal kısımların içiçe geçmesine izin veren çözücü, teğet elektrik ve manyetik alanların test edildiği bir CTF uygulamasıdır. Genel olarak, teğet EFIE ve teğet manyetik alan integral denklemi (MFIE) kısımlarının birleştirilmesinden oluşan orijinal CTF, güçlü test edilen birim operatörü içermediğinden yüksek doğrulukta ve hassas çözümler vermektedir (Ergül ve Gürel, 2009c). Bu integral denkleminin homojen diyelektriklere nasıl uygulanabileceği de literatürde iyi bilinmektedir (Ergül ve Gürel L., 2009a; Yla-Oijala vd., 2005). Ayrıca, CTF doğru limit değerleriyle metaller üzerinde kendiliğinden EFIE'ye dönüşmektedir (Karaosmanoğlu vd., 2017). Öte yandan, bu projede gerçekleştirilen manyetik akım eleme yöntemiyle birlikte, CTF ilk defa bileşik cisimlere uygulanmıştır. Denklem Galerkin yöntemiyle ve RWG fonksiyonlarının kullanılmasıyla ayrıklaştırılmıştır. Dolayısıyla, metal-dielektrik kesişim noktalarında, manyetik akımlarda süreksizlik oluşmaktadır. Bu süreksizliğin aşılması için, sınır hatları boyunca integraller tanımlanmıştır. Bu integraller, EFIE'nin rotasyonel RWG ayrıklaştırmalarında çıkanlarla aynı doğadadır.

Dolayısıyla, var olan integral rutinlerinin ve kodların değiştirilmesiyle formülasyon yazılımı elde edilebilmiştir.

Değiştirilmiş CTF ile elde edilen matris denklemlerinde, yakın alan etkileşimleri doğrudan özyinelemeli (adaptif) integraller ve teklik çıkarma metotlarıyla (Yla-Oijala ve Taskinen, 2003) hesaplanmıştır. Uzak alan etkileşimleri için ise, çarpanlara ayırma (multipole factorization) ve köşegenleştirme (diagonalization) kullanılmıştır. Köşegenleştirme için standart düzlem dalgalar bantgenişiği formülleriyle elde edilen örnekleme sayılarına bağlı olarak kullanılmıştır (Sheng vd., 1998). Ancak, genellikle yoğun ayrıklaştırmalar içeren RFID antenleri için düşük frekans tekniklerine de ihtiyaç duyulmuştur (Jiang ve Chew, 2005; Ergül ve Karaosmanoğlu, 2014, 2015). MLFMA seviyeleri arasındaki geçişlerde Lagrange aradeğerleme (Ergül ve Gürel, 2006) ve ters aradeğerleme (Brandt, 1991) fonksiyonları kullanılmıştır. Anten benzetimlerinde genel olarak %1 etkileşim hata payı ile çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda dalgaboyunun 20'de biri ve daha küçük üçgenlemeler kullanılmış, giriş empedansı hesaplamalarında ise ilgili bölgelerde daha da yoğun üçgenlemelere (dalgaboyunun 100'de birine kadar) gidilmiştir. Son olarak, değiştirilmiş CTF birinci türden matris denklemleri ürettiğinden, iteratif çözümler öniyleştiricilerle, özellikle iç-dış iteratif mekanizmalarla (Ergül vd., 2010; Önoğlu vd., 2017) hızlandırılmıştır.



Şekil 2. Proje kapsamında geliştirilmiş ve kullanılmış olan optimizasyon mekanizmasının genel gösterimi.



Şekil 3. Proje kapsamında geliştirilmiş ve kullanılmış olan optimizasyon mekanizmasının bazı detayları.

3.2. Yüksek Kabiliyetli Optimizasyon Mekanizması

MLFMA çözücüsü ilk versiyonları dizge problemleri için geliştirilmiş olan (Önol vd., 2016b) bir GA yazılımıyla birleştirilmiştir. Bu bakımdan, GA yazılımının kendisi projenin yeniliklerinden değildir. Öte yandan, GA ve MLFMA yazılımlarının içiçe geçerek birleştirilmesi ve bu doğrultuda geometrik deformasyonların optimizasyonlara dahil edilebilmesi bu projenin en önemli katkılarından. Elde edilen mekanizma, sadece proje kapsamındaki RFID antenlerinin optimizasyonları için değil, aynı zamanda optik frekanslarında çalışan yapıların tasarlanmasında da kullanılmıştır (Altınoklu vd., 2017; Karaova vd., 2018).

Şekil 2’de, proje kapsamında geliştirilmiş olan optimizasyon mekanizması ana hatlarıyla gösterilmiştir. GA modülünün bazı detayları ise Şekil 3’te verilmiştir. Genel olarak, her optimizasyon problemi, yakın-alan etkileşimleri, önyileştiriciler, öteleme fonksiyonları, ve genetik algoritma havuzları gibi optimizasyon esnasında kullanılan öğelerin hesaplandığı kurgu fazı ile başlamaktadır. Optimizasyonlar için ayrıklaştırma elemanları (üçgenler veya RWG fonksiyonları) ve/veya bu elemanların koordinatları kromozomlara dönüştürülmektedir. Yukarıda da bahsedildiği üzere, optimizasyon modülü ana çözücü olan MLFMA ile içiçe geçmiştir. Bu doğrultuda, geometrik değişiklikler (parça hareketi ve dönme, ayırma, boşluk açma, ve serbest deformasyon), hareket eden ayrıklaştırma elemanlarına karşılık gelen

matris elemanlarının güncellenmesi anlamına gelmektedir. Örneğin, boşlukların açılması matris denklemlerinde ilgili baz ve test fonksiyonlarının çıkartılması ile gerçekleştirilmektedir. Rotasyon hareketleri ise hareketli kısmın ana geometriyle olan yakın-alan ve uzak-alan etkileşimlerini etkilemektedir. Bu tür bir güncelleme, yakın-alan etkileşimlerinde doğrudan, uzak alan etkileşimlerinde ise ilgili elemanların ışınım ve alıcı örüntülerinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Çözümler iteratif olarak yapıldığından, tüm bu operasyonların sayısal düzeyde yapılması mümkün hale gelmiştir. Son olarak, Şekil 2’de gösterildiği gibi, art işlemler (giriş empedansı, yönlülük, kazanç, vb. hesaplamalar) sonucunda optimizasyon modülüne geri dönen çözüm, aynı zamanda çözüm havuzunda tutulmakta ve çözümler arası bilgi aktarımı (ardışık çözümlerin iteratif tahmin ile hızlandırılması) sağlanmaktadır.

Proje kapsamında geliştirilen özgün optimizasyon mekanizması, istenilen elektriksel özelliklere bağlı olarak, inkjet tipi antenlerin hızlı, hassas, ve doğru olarak tasarlanmasını sağlamıştır. Optimizasyon mekanizmasında kullanılmış olan “yeniden yapılandırma” opsiyonlarının çeşitliliği, kapalı kutu optimizasyon programlarıyla ele alınamayacak senaryoların incelenebilmesini kolaylaştırmıştır. Dolayısıyla, optimizasyonlar sonucunda elde edilen ve bazıları bu raporda verilmiş olan antenlerin çeşitliliği son derece yüksek olmuştur. Bu çeşitlilik sayesinde, RFID uygulamaları için literatürdekilerden çok daha kabiliyetli antenler üretilebilmiş ve proje hedefine ulaşılmıştır.

Proje kapsamında, ortalama bir optimizasyon için yaklaşık olarak 2000-3000 tam-dalga çözümü gerçekleştirilmiştir. Yukarıda da bahsedildiği üzere, iterasyonların hızlandırılması amacıyla, çözümler arası bilgi aktarımı yapılmıştır. Ayrıca, çözümlerde basit paralelleştirmeye gidilmiştir. Örneğin, 40 bireyden oluşan bir genetik havuzdaki bireylerden birçoğu aynı anda çözülmüştür. Anten boyutları göz önüne alındığında, MLFMA’nın kendisinin (tek bir çözümün) çekirdeklere bölünmesi gerekmemiştir. Optimizasyonlardaki başarı oranları optimizasyonlar esnasında görüntülenmiştir. Başarı bazlı mutasyonlarla (Önol vd., 2016b) yakınsama hızları iyileştirilmiştir. Ayrıca, Şekil 3’te gösterildiği gibi, çözüm flamasıyla kontrol edilen parametrik hassasiyet ve böylece mümkün hale gelen dinamik hata kontrolüyle optimizasyon süreleri önemli miktarlarda azaltılmıştır (Önol vd., 2016a). Optimizasyonlar sonucu elde edilen anten tasarımları dışarıda tekrar modellenmiş ve çözücü ile analiz edilmiştir. Böylece, optimizasyonlar esnasında gerçekleştirilen deformasyonlar bir kez daha kontrol edilmiştir. Bu son benzetimlerde aynı zamanda hata analizleri (özellikle ayrıklaştırma yakınsaması testleri) gerçekleştirilmiştir.

Konu ve literatür özetinde belirtildiği üzere, literatürde antenlerin geliştirilmesinde çok çeşitli optimizasyon mekanizmaları kullanılmıştır. Ancak, inkjet antenlerin hassasiyeti söz konusu olduğunda, bu tür optimizasyonların çoklu parametre ile (kazanç, empedans, yönlülük, vb.) gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu raporda sunulan mikroçipli RFID anten tasarımlarında, giriş empedansı (güç yansımaları) ve anten örüntüsü aynı anda optimize edilmiştir.

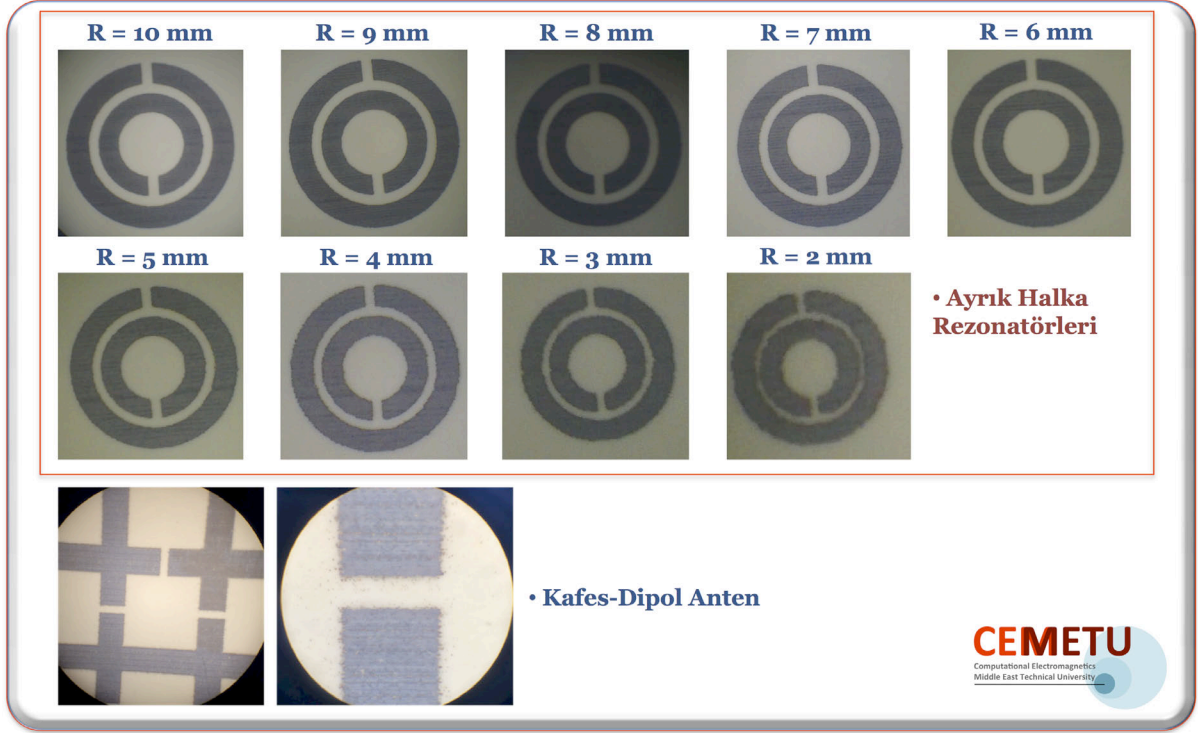
3.3. Ucuz Inkjet Baskı Yöntemi

Standart yazıcıların kullanıldığı baskı mekanizmalarında, kullanılan kağıt ve gümüş bazlı tonerlerin seçimleri son derece kritiktir (Çiftçi vd., 2016; Mutlu vd., 2017). Örneğin tonerlerdeki gümüş oranının az olması iletkenliği doğrudan azaltırken, çok olması (kağıdın toneri emmesini engellediğinden) yine iletkenliği olumsuz yönde etkilemektedir. Kağıttaki plastik miktarı ise hem tonere uyumluluk hem de pişirme işleminde dayanıklılık açısından önemlidir. Dayanıklılık bakımından plastik oranı yüksek kağıt çeşitleri tercih edilebilecekken, bunların pişirme esnasında bükülerek metal kısımları çatlatması ciddi bir problemdir. Tüm bunlara, yazıcı parametreleri de eklenince, inkjet tipi antenlerin üretimi için ucuz mekanizmaların kolaylıkla tasarlanamayacağı ve çeşitli unsurların bir arada olduğu bir sistemin ele alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Elde edilen inkjet tipi antenlerin hem test edilmesi hem de mikroçiplerle birleştirilmesi kolay değildir. Klasik lehimleme yöntemleri uygulanamayacağından, antenlerin test cihazlarına bağlanmasında iletken yapıştırıcılar kullanılmıştır. Bu da, üretilen bir antenin eşeksenli uç ile birleştirilip tekrar fırınlanması anlamına gelmektedir. Yapıştırıcının geri çıkartılmasında ise ciddi problemler bulunmaktadır; temizleme aşamalarında uçlar kolaylıkla kullanışsız hale gelebilmektedir. Antenlerin mikroçiplerle birleştirilmesinde de yine iletken yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Bu tür bir prototipten çıkartılan anten veya mikroçip ikinci bir kullanım için uygun olmamaktadır. Standart yazıcılarda gümüş içerikli tonerlerin kullanılması, ancak özel başlıklarla mümkün olmaktadır. Bu başlıklar ise, ilk kullanımlarından itibaren, gümüşün oksitlenmesinden dolayı, hızla eskimektedir. Tüm temizleme prosedürlerine karşın, bu eskilemelerin yarattığı etkiler, üretilen antenlerin kalitesini de etkilemektedir.

Şekil 4'te gösterildiği üzere, ucuz inkjet baskı yöntemiyle elde edilebilecek çözünürlük sınırlıdır. Daha önceden tespit edilmiş olan bu sınır (Mutlu vd., 2017), proje kapsamındaki optimizasyonlara (GA gibi keşifsel bir algoritmanın kullanılması sayesinde) dahil edilmiştir. Örneğin, hatlardan oluşan bir anten için, hat kalınlıklarının olabileceği minimum değer, optimizasyon kriterlerinde kullanılmıştır. Bunlara ek olarak, çözünürlük sorunlarından dolayı

oluşabilecek geometrik deformasyonlar, optimizasyonlar sonucu elde edilen tasarımlar üzerinde gerçekleştirilen hassasiyet analizleriyle incelenmiştir.

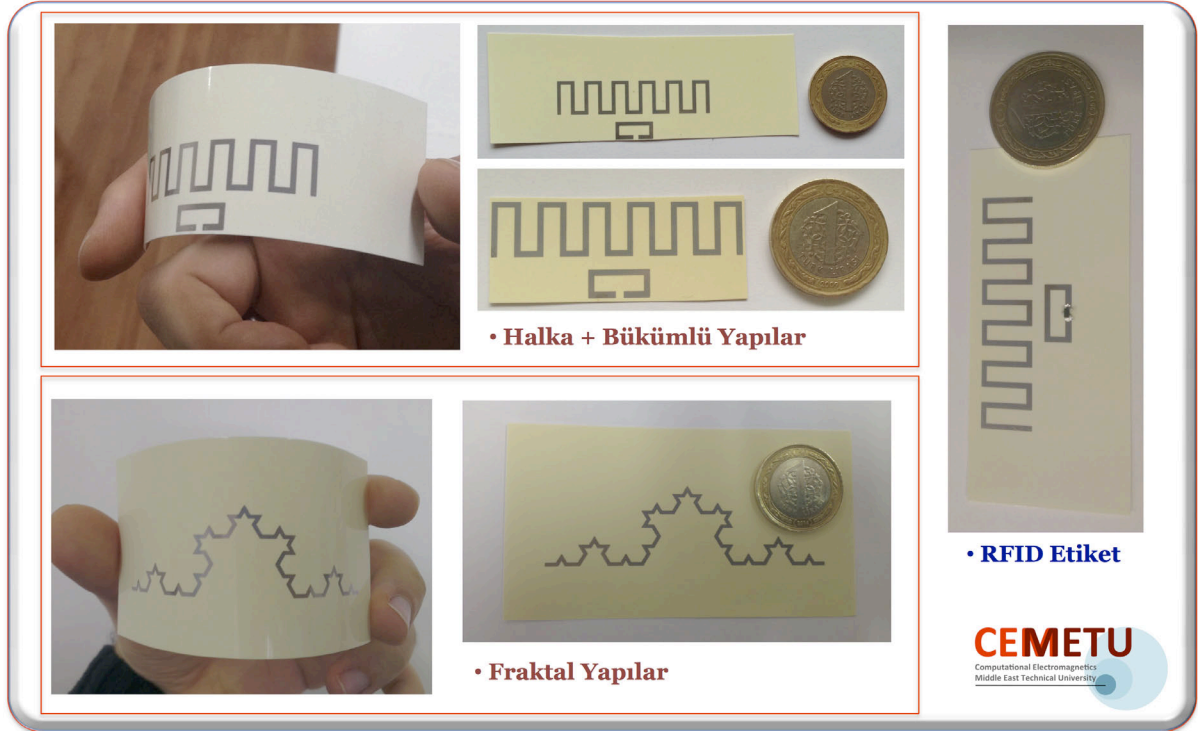


Şekil 4. Ucuz inkjet baskı yöntemiyle üretilen baskılarda çözünürlük kalite testleri.

Antenlerin imalatında, bu proje öncesinde oturtulmuş olan üretim prosedürleri kullanılmıştır. Standart Epson (Epson Stylus C88+) yazıcılarda gümüş bazlı tonerlerin (25% silver Novacentrix) kullanılmasıyla fotoğraf kağıtlarına (0.254 mm) basılan antenler, yaklaşık 1 saat 160 derecede ısıtılarak işlemden geçirilmiştir. İletkenlik testlerinden geçen antenler üzerinde fiziksel deformasyon testleri uygulanmıştır. Her bir modelden aynı anda 10'a yakın baskı yapılmıştır. Bu baskılardan bir kısmı iletken yapıştırıcı ile eşeksenli uçlara bağlanarak ölçüm ortamında test edilmiştir. Antenlerin giriş empedansları ağ analizörü ile ölçülürken, ışınım örüntüleri sessiz odada elde edilmiştir. Antenlerin bir kısmı ise, yine iletken yapıştırıcı ile mikroçiplere bağlanmış ve nihai hedef olan RFID kapsamında test edilmiştir. Bu rapordaki tüm sonuçlarda mikroçip olarak Alien Higgs-3 (20.55 -191.2iΩ) kullanılmıştır. Genellikle açısal olarak gerçekleştirilen menzil testlerinde, geniş bir alanda standart bir okuyucuyla (ATiD 870 Hand-Held UHF) okuma mesafesi ölçülmüştür. Ayrıca, menzil testlerinde farklı senaryolar ele alınmış ve deneylere insan etkileşimleri de dahil edilmiştir.

3.4. Yüksek Kabiliyetli Inkjet Antenler

Bulgular kısmında detaylandıracağı üzere, proje kapsamında çok farklı anten tasarımları elde edilmiştir. Ancak, projede kapsamındaki yeniliklerin gösterilebilmesi açısından, bu tasarımlardan önce gerçekleştirilen çalışmalarda geliştirilen ve kullanılan antenlerden kısaca bahsetmekte fayda görmektedir.



Şekil 5. Proje öncesinde tasarlanmış ve üretilmiş olan antenlere bazı örnekler.

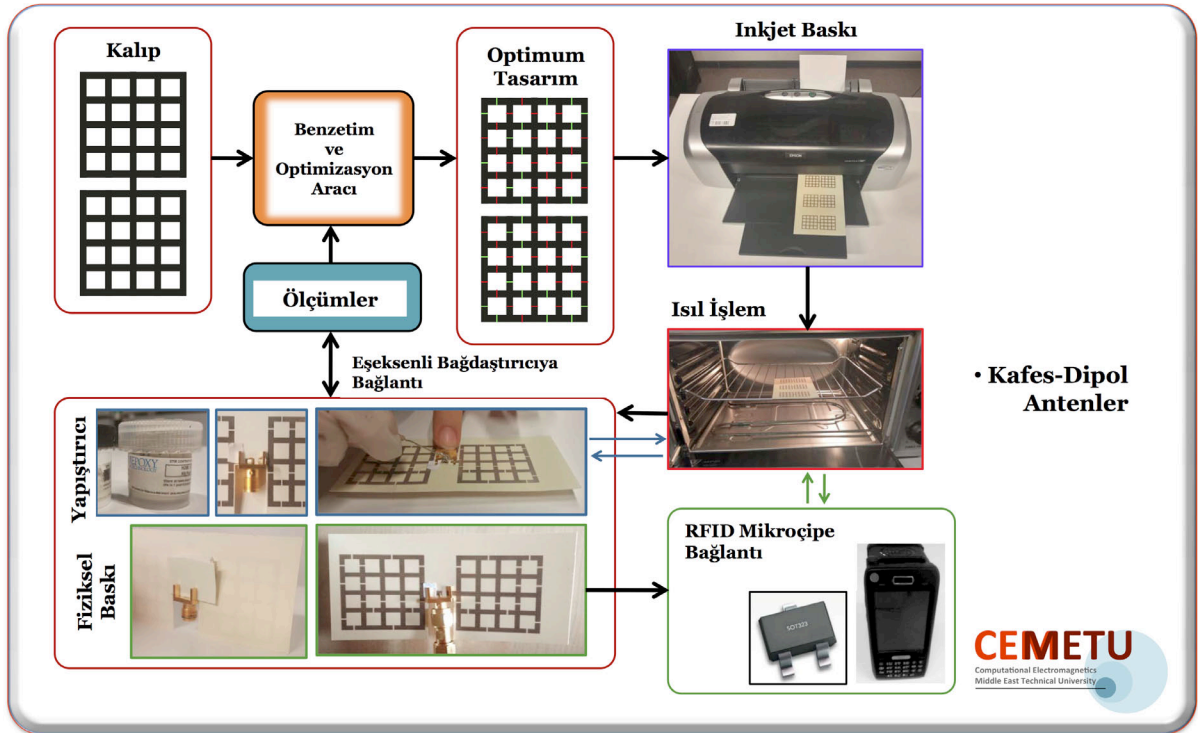
Şekil 5'te proje kapsamında da kullanılan inkjet baskı mekanizmasıyla üretilen bazı önceki antenlere örnekler verilmiştir. Yine yazıcı parametrelerinin, kağıt çeşitinin, ve toner çeşitinin özenle seçilmesiyle, ve pişirme tekniklerinin uygulanmasıyla elde edilen bu antenler, radyo frekanslarında çalışmak üzere üretilmiştir. Bunlardan meander/loop tipi bir antenin RFID mikroçipine bağlandığı prototip de yine aynı şekilde gösterilmiştir. Literatürde de bulunabilecek tüm bu antenler, yeterli iletkenlik, esneklik ve sağlamlık özellikleri gösterdikleri halde, RFID uygulamaları için uygun değildir. Örneğin fraktal tipi antenler çok bantlı özellik gösterebilirler bile kapasitif bir mikroçipe uyum göstermemektedir. Meander/loop tipi antenler mikroçipe iyi uyum sağlasalar bile, dar bantlarından dolayı, doğru RFID frekanslarına denk getirilmeleri (inkjet baskılar kapsamında) son derece zordur. Ardışık tasarım-üretim-ölçüm döngüleriyle defalarca ölçeklenmesine rağmen, Şekil 5'te gösterilen kart prototipinin menzili sadece 15 cm'dir.

Bu proje kapsamında tasarlanan ve bu raporda gösterilen başlıca anten tipleri şunlardır:

- Kafes-Dipol Antenler
- Piksel Antenler
- Takılabilir Piksel Yapılar
- Kesilebilir Log-Periyodik Antenler

Ayrıca, proje başında öngörülmediği halde, elde edilen optimizasyon mekanizmasının etkinliği sayesinde, şu tür radyo-frekanslı bileşenleri de tasarlanmış ve üretilmiştir:

- AHR Dizgeleri (Metamalzemeler)
- Bileşik Metamalzemeler
- Çipsiz RFID Etiketleri
- Harf Şeklinde Çipsiz RFID Etiketleri



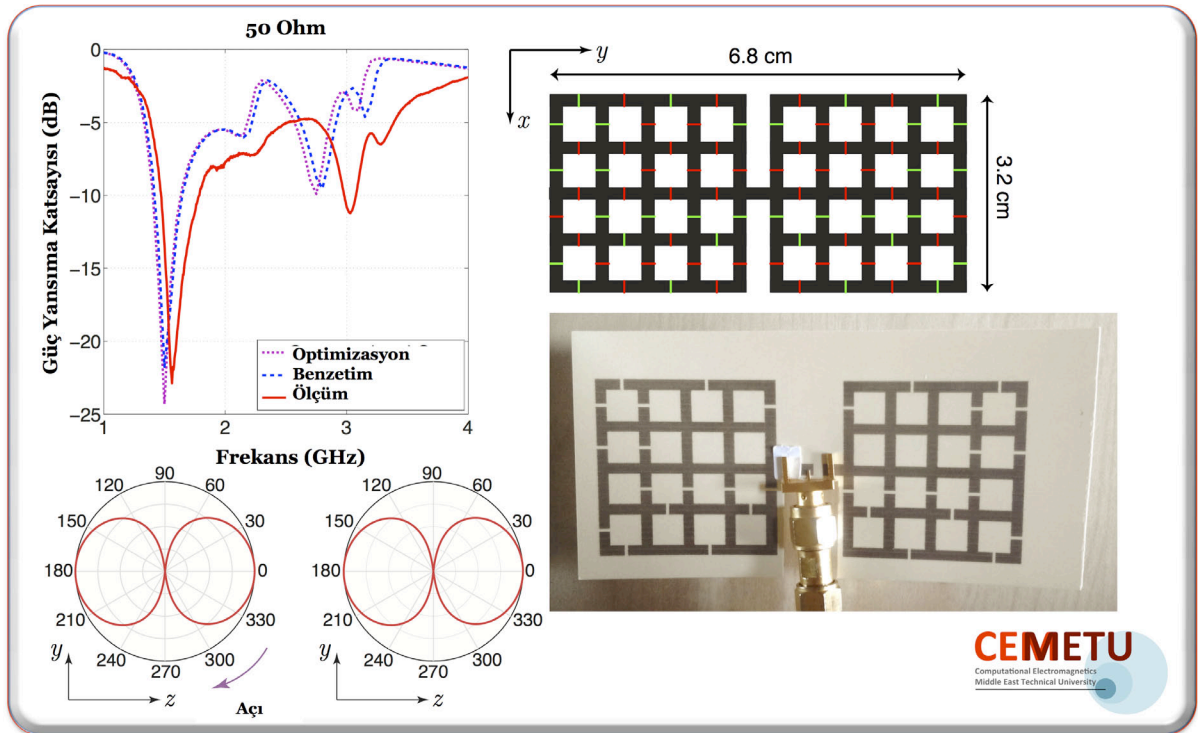
Şekil 6. Proje kapsamında geliştirilmiş olan kafes dipol antenler. Bu tür antenlerin geometrilerine ek olarak, baskı, ısıl işlem ve bağlantı işlemleri de gösterilmiştir.

4. Bulgular

Çalışma kapsamında elde edilmiş olan en önemli bulgular, yukarıda listelenen anten tipleri ve bileşenler göz önüne alınarak sunulabilir.

4.1 Kafes-Dipol Antenler

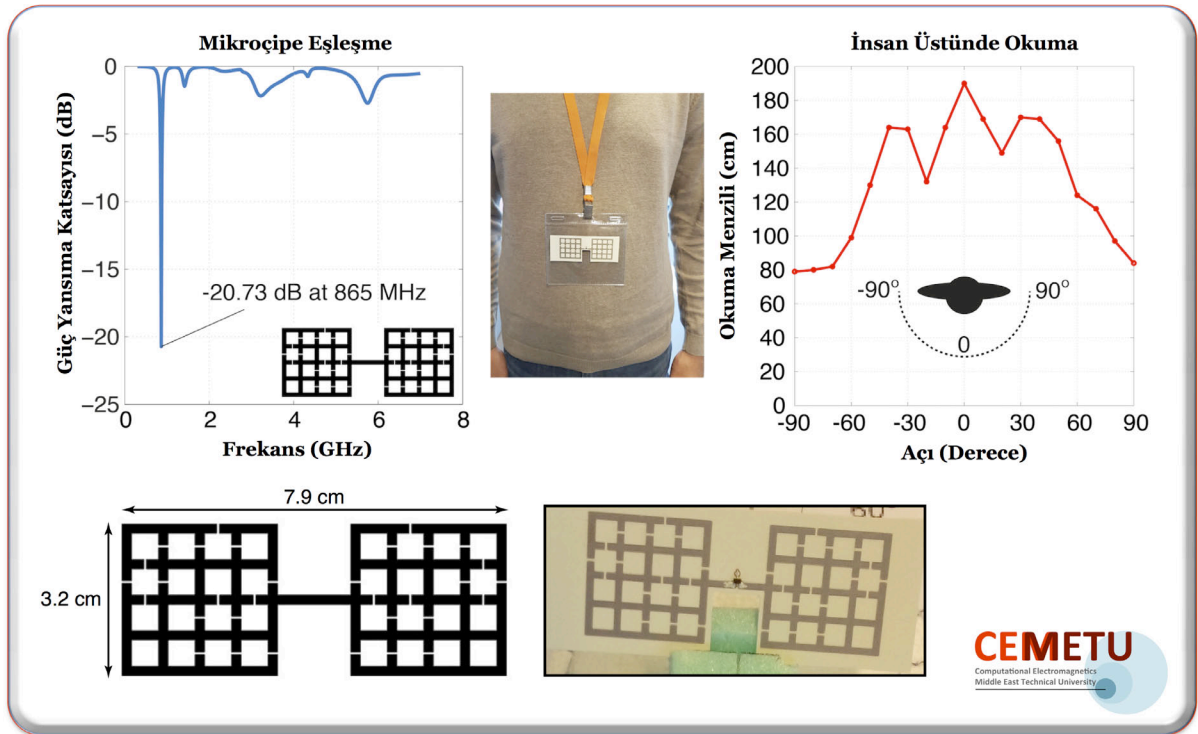
Proje kapsamında geliştirilmiş olan ve hem optimizasyonlara hem de ucuz inkjet baskıya uygun olan kafes-dipol antenler (Mutlu vd., 2017; Dolapçı vd., 2018), Şekil 6'da gösterildiği gibi ince hatlardan oluşmaktadır. Kalıp geometrisinde tüm bağlantılar mevcutken, optimizasyonlar sonucunda bazı bağlantıların kopartılması ve bu şekilde istenilen optimal tasarımların elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için, daha önceden belirlenmiş olan pasif anahtar noktaları (bağlantılar), optimizasyona bağlı olarak kapalı (kısadevre, yani "1") veya açık (açık devre, yani "0") olarak bırakılmaktadır. Örneğin Şekil 6'da gösterilen kafes-dipol geometrisinin her bir kolunda 40 bağlantı noktası bulunmaktadır. Bu da kolların simetrik olarak tasarlandığı durumda, 2^{40} farklı ihtimalin bulunduğu anlamına gelmektedir. Bu çeşitlilik sayesinde, istenilen çalışma parametrelerine uygun olan ve çalıştıkları frekanslara göre son derece az yer kaplayan özgün yapılar optimizasyonlar vasıtasıyla tasarlanabilmektedir.



Şekil 7. 50 Ohm giriş empedansına uyum sağlayacak şekilde tasarlanmış bir kafes-dipol anten ve elde edilen sonuçlar.

Şekil 7'de yaklaşık 1.5 GHz'te 50 Ohm giriş empedansına sahip bir kafes-dipol antenin tasarımı ve elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Boyutları 6.8 x 3.2 cm olan bu yapının üzerinde kapalı kalan ve açılan bağlantı noktaları sırasıyla yeşil ve kırmızı ile gösterilmiştir. Optimizasyon ve benzetimlerle elde edilen güç yansımaya katsayısı değerleri, antenin üretilmesi ve deneysel olarak test edilmesiyle elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 7'de

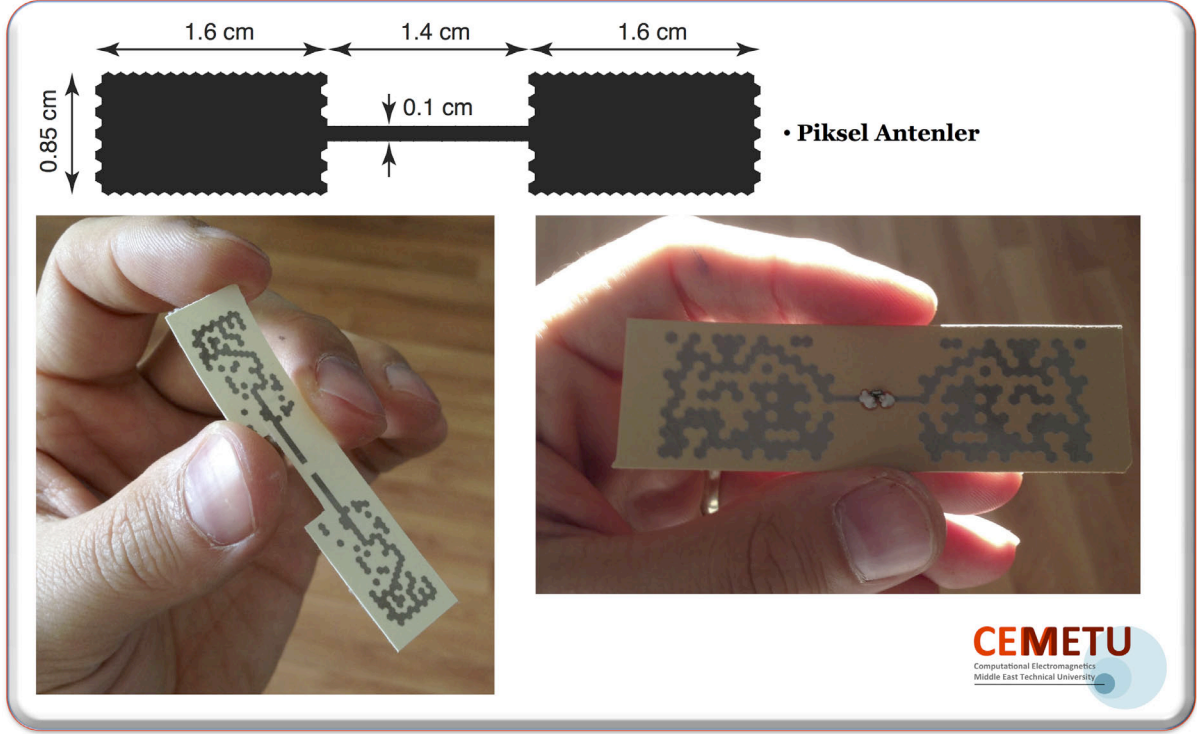
gösterildiği gibi, ölçümlerde anten eşeksenli uca fiziksel baskı ile tutturulmuştur. Güç yansıma katsayısı incelendiğinde, ölçümle elde edilen değerlerin benzetim sonuçlarına oldukça yakın olduğu ve antenin ilgili frekansta (1.5 GHz) çalıştığı gözlemlenmektedir. Benzetim ve ölçüm sonuçları arasındaki farklar, ucuz inkjet baskı üretim mekanizmasının kullanıldığı durumlarda beklenen seviyelerdedir. Zaten bu farkların olacağı bilindiğinden, antenin tasarlanmasında sadece dip noktasındaki yansıma değerleri minimize edilmemiş, aynı zamanda 1.5 GHz etrafındaki 200 MHz'lik aralıkta değerlerin -10 dB'den az olması hedef olarak verilmiştir. Son olarak, yine Şekil 7'deki benzetim sonuçlarında gösterildiği üzere, antenin standart bir dipole benzer ışıma örüntüsü vardır.



Şekil 8. Mikroçipe uyum sağlayacak şekilde tasarlanan bir kafes-dipol anten ve bu antenin mikroçipe bağlandığı durumda elde edilen sonuçlar.

Kafes dipol antenlerin 50 Ohm gerektiren uygulamalar için çalışabildiği Şekil 7'deki gibi sonuçlarla gösterilmiştir. Ancak, bu tip antenlerin avantajları RFID kapsamında ortaya çıkmaktadır. Şekil 8'de, proje kapsamında kullanılan mikroçipe uygun olarak tasarlanmış bir kafes-dipol anten ve bu tasarım için elde edilen bazı sonuçlar gösterilmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere, mikroçipin son derece kapasitif (865 MHz'te $20.55-191.2i\Omega$) bir giriş empedansı vardır ve empedansa uyumlu (özellikle çalışma bandının da ucuz inkjet baskıya izin verecek kadar geniş olduğu) antenlerin geliştirilmesi oldukça güçtür. Öte yandan, Şekil 8'de gösterildiği üzere, elde edilen tasarım 865 MHz'te mikroçipe mükemmel bir uyum

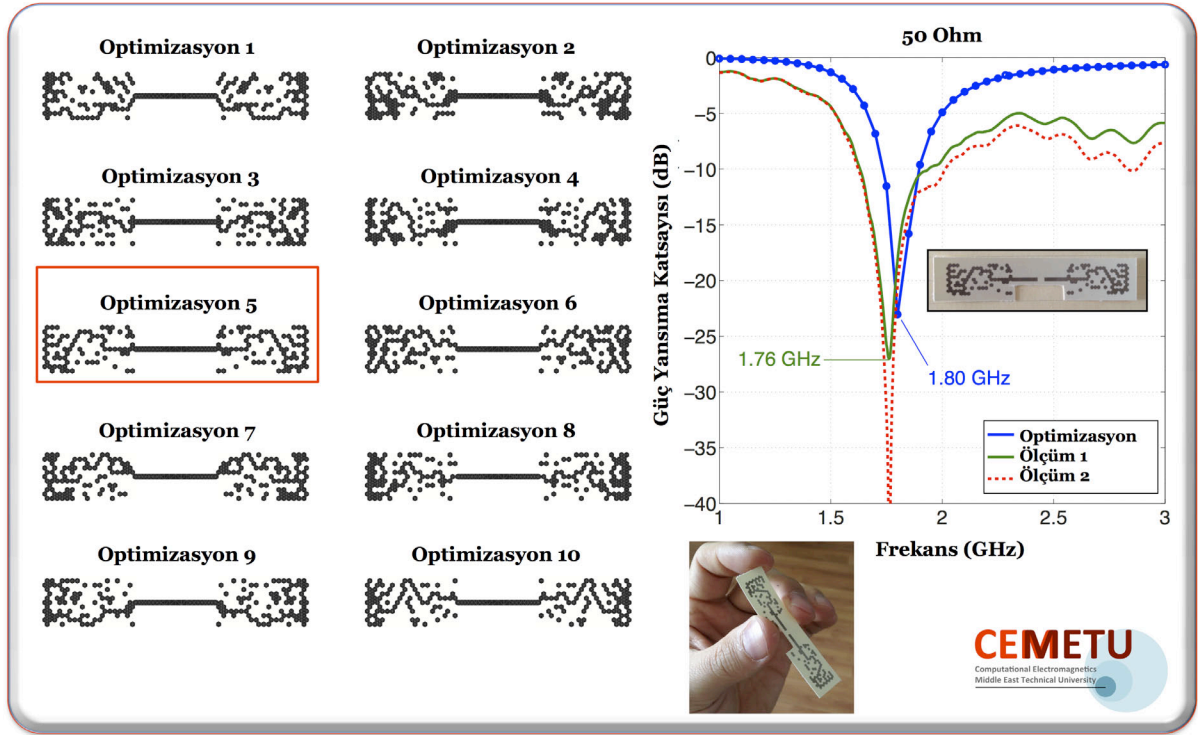
sağlamaktadır. Tasarım ucuz inkjet baskı yöntemiyle üretilmiş ve yine Şekil 8’de gösterildiği üzere mikroçipe bağlanmıştır. İnsan üzerinde gerçekleştirilen ölçüm testlerinde [-90,90] derecelik alanda 80 cm’nin üzerinde menzil elde edilirken, bu değer tam karşıdan (0 derece) okumalarda 2 metreye yaklaşmaktadır.



Şekil 9. Proje kapsamında geliştirilmiş olan piksel antenlere bir örnek. Sağdaki fotoğrafta antenin mikroçipe bağlandığı bir RFID etiketi gösterilmiştir.

4.2 Pksel Antenler

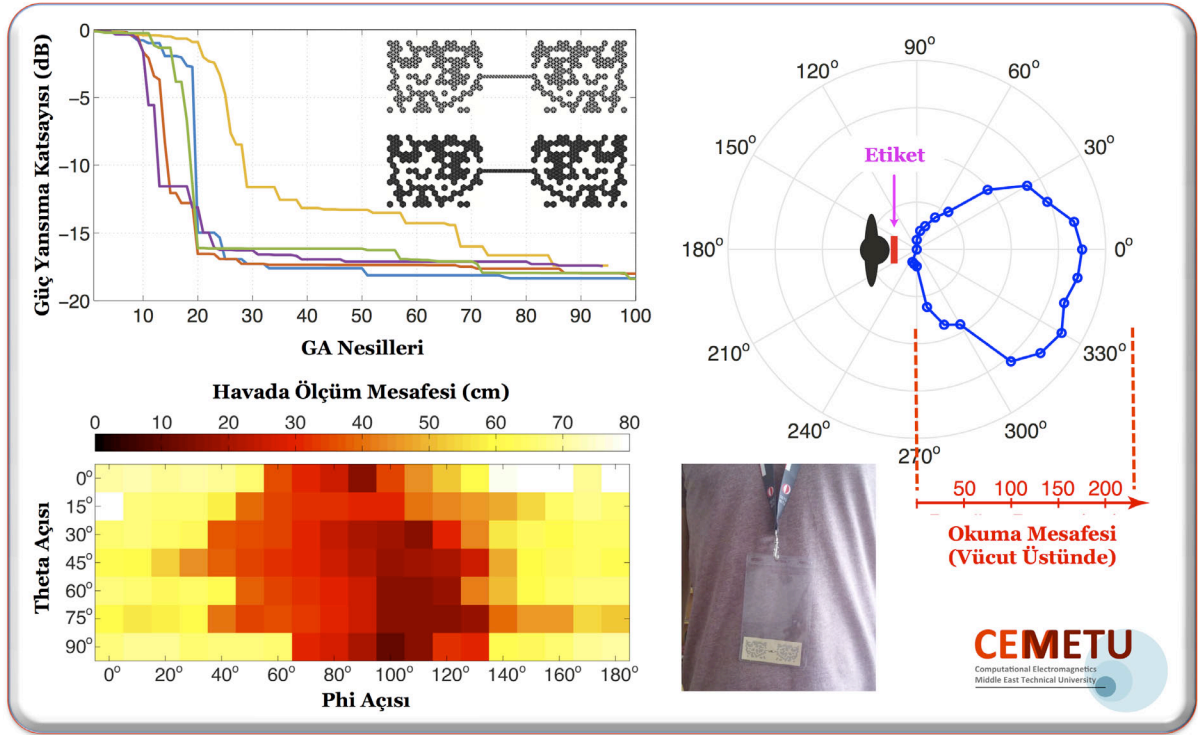
Proje kapsamında tasarlanmış olan ikinci tip antenler ise piksellerden oluşmaktadır (Güler vd., 2016). Şekil 9’da gösterildiği üzere, piksel antenler, piksellere bölünen yüzeylerden oluşmaktadır. Dipol veya benzeri bir yapıdan başlayarak, tasarım parametrelerine bağlı olarak, pikseller tutulmakta veya çıkartılmakta ve böylece optimal tasarımlar elde edilmektedir. Kafes-dipol antenlerde olduğu gibi, çok küçük alanlarda bile çeşitlilik son derece yüksektir (p pikseli bir yapı için 2^p). Şekil 9’da proje kapsamında tasarlanmış bir anten ve bu antenin mikroçipe bağlandığı bir fotoğraf gösterilmiştir. Antenin boyutları sadece 4.6 x 0.85 cm’dir. Piksel sayısı ve boyutları, ucuz inkjet baskı yönteminde elde edilen çözünürlüğe göre seçilmiştir.



Şekil 10. Piksel antenlerin optimizasyonlarına 10 örnek ve en iyi tasarım için elde edilen güç yansımaya katsayısı sonuçları.

Şekil 10'da 10 farklı piksel anten optimizasyonu gösterilmiştir. Optimizasyonlar sonucu elde edilen geometrilere ek olarak, seçilen bir tasarım (optimizasyon 5) için güç yansımaya katsayısı değerleri gösterilmiştir. Bu anten 1.8 GHz'te 50 Ohm giriş empendansına sahip olacak şekilde tasarlanmış ve benzetimlerde -20 dB'nin altına inilebilmiştir. İki farklı baskı sonucu elde edilen protiplerin testlerinde gözlemlendiği üzere, gerçekleştirilen ölçümlerde son derece iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, ucuz inkjet baskı yöntemiyle üretilen antenler arasında farklılıklar gözlenmektedir ve bu durum piksel antenler için de geçerlidir. Ayrıca, metal kayıplarından dolayı güç yansımaya katsayısı değerleri genel olarak düşük değerlere kaymaktadır. Yine de, aşağıda da gösterildiği üzere, elde edilen tasarımlar, etkin RFID etiketlerinin geliştirilmesi için oldukça yeterlidir.

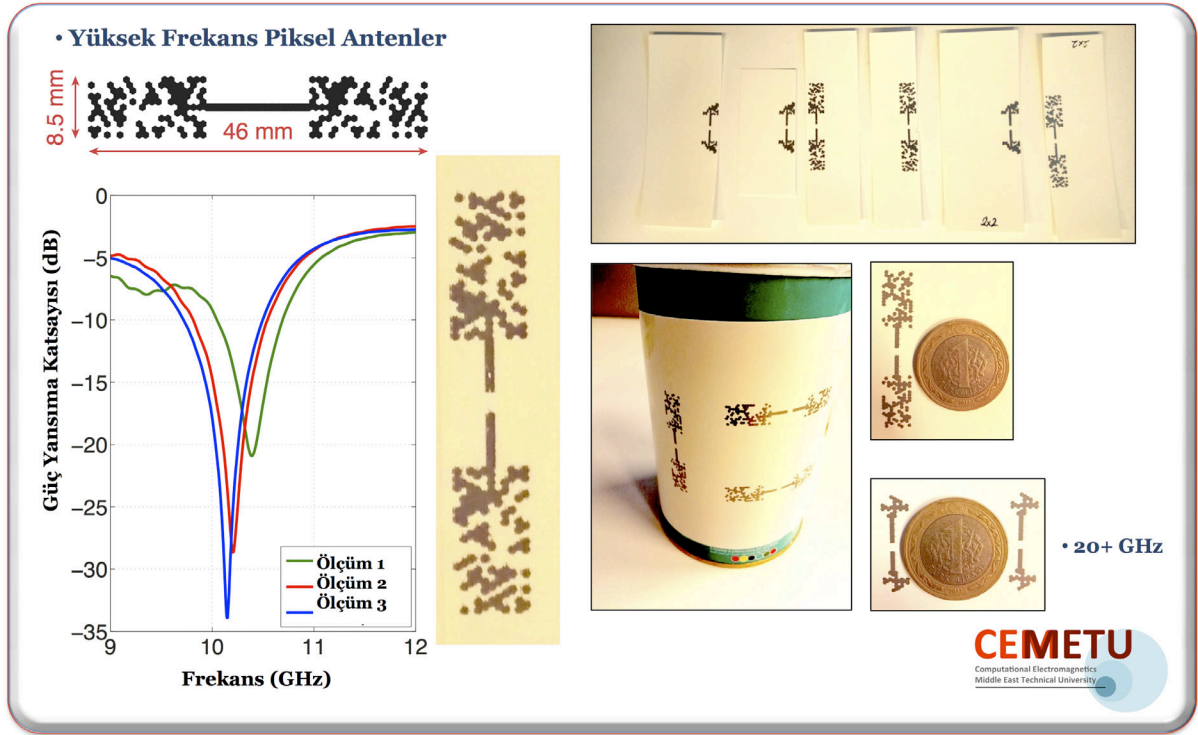
Şekil 11'de mikroçipe uyum sağlayan tasarımlar için gerçekleştirilen bazı piksel anten optimizasyonları, bu optimizasyonlarla tasarlanan bir piksel anten yapısı, ve bu antenin bir RFID etiketinde kullanıldığı durumda elde edilen ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Ölçüm sonuçlarında gözlemlendiği üzere, insan üzerinde kullanıldığı durumda okuma menzili 150 cm'nin üzerindedir. Bu menzil, etiketin pasif ve antenin sadece 4.6 x 0.85 cm olmasıyla beraber değerlendirildiğinde, son derece tatmin edici seviyedir.



Şekil 11. Mikroçipe uyum sağlayacak biçimde tasarlanmış bir piksel anten yapısı ve bu yapının mikroçipe bağlanmasıyla elde edilen etikete ait okuma menzili sonuçları.

Şekil 10 ve 11’de gösterilen piksel yapılar incelendiğinde, çıkartılan piksellere bağlı olarak bazı anten yüzeylerinin parazitik hale dönüştükleri gözlemlenmektedir. Kaynak noktasına doğrudan bağlantıları kopan bu yüzeyler detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle bu yüzeylerin son tasarımdan çıkartıldığı geometrilerin incelendiği benzetimlerde, antenin çalışabilmesi için parazitik kısımların korunması gerektiği ortaya çıkmıştır.

Piksel antenler, kafes-dipole antenlerden farklı olarak, yüksek frekanslar için de uygun yapılardır. Proje kapsamında doğrudan hedeflenmeyen bu frekanslar için tasarlanan bazı piksel yapılar Şekil 12’de gösterilmiştir. Boyutların, yukarıdaki piksel yapılar gibi 4.6 x 0.85 cm tutulduğu durumda, çalışma frekansı 10 GHz’in üzerine çıkartılabilmektedir. Yine Şekil 12’de gösterildiği üzere, daha küçük yapıların kullanılmasıyla 20 GHz’in üzerine çıkılması mümkün gözükmektedir. Ancak, bir noktadan sonra, piksellerin minimum boyutları sınırlı olduğundan, daha da yüksek frekanslara çıkılması sorunlu gözükmektedir. Zaten, ilginç biçimde, hedef frekanslarının yükseltilmesiyle birlikte, optimizasyonlar sonucu elde edilen piksel antenlerin geometrileri kendiliğinden dipol yapılara dönüşmektedir.



Şekil 12. Yüksek frekanslarda çalışabilen bazı piksel anten tasarımları.

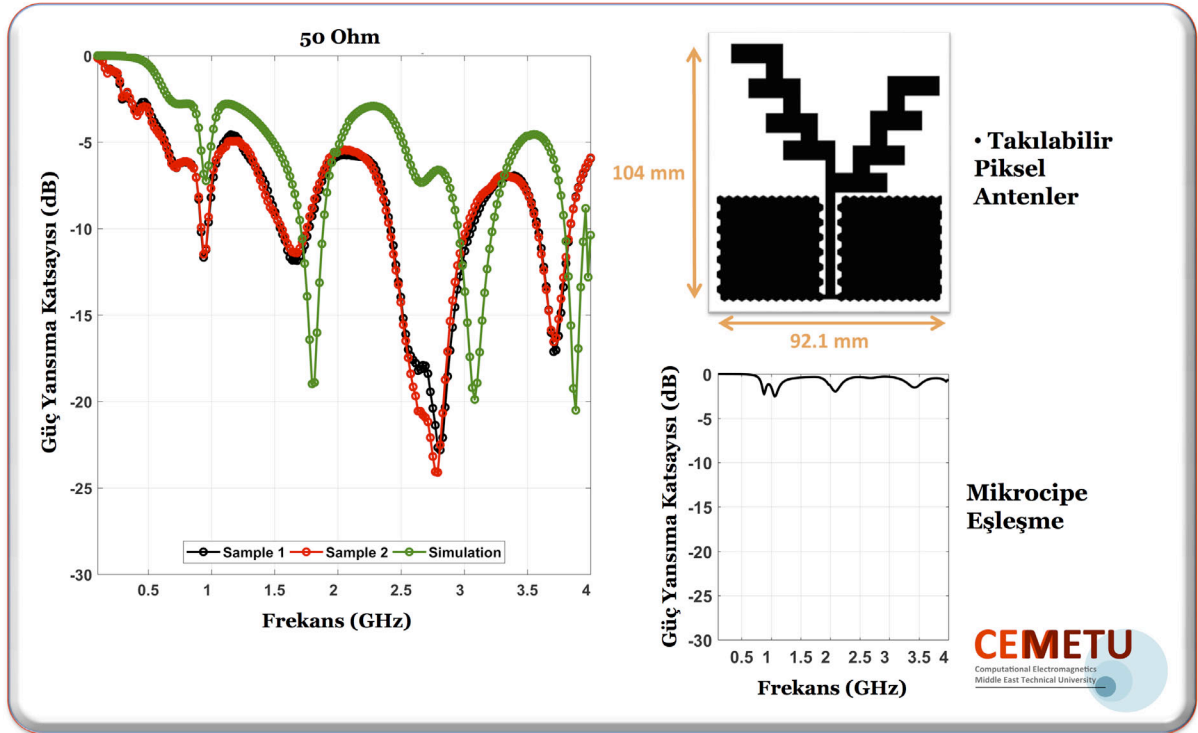
4.3 Takılabilir Pksel Yapılar

Takılabilir piksel yapılar, yukarıda anlatılan piksel antenlerden farklıdır. Yine optimize edilen piksellerden oluşsa da, takılabilir bir yapı kendi başına bir anten olmayıp, var olan bir antenin çalışmasını değiştiren bir eklentidir (Güler vd., 2018). Bilindiği üzere, inkjet tipi antenler gerçekçi bir uygulamada çok sayıda üretilmektedir. Ancak, kullanımı biten veya hiç kullanılmadığı halde atıl kalan antenlerin geri dönüşümü literatürde üzerinde durulan ciddi bir problemdir. Özellikle gümüş baskıların geri dönüştürülemezliği, sadece malzeme kayıplarına yol açmamakta, aynı zamanda çevreyi kirletme riski oluşturmaktadır. Takılabilir piksel yapılar, varolan bir anteni, mümkün olduğunca az (yeni) malzeme kullanarak, başka bir uygulama için kullanışlı hale getirebilmektedir. Genellikle topraklama gibi gözükken bu yapıların kendileri verimli ışınım karakteristiği göstermemekte ve değiştirilmiş yapının esas ışınımı halen orijinal parçadan gelmektedir. Ancak piksel yapıların takılmasıyla antenin farklı frekanslarda farklı giriş empedanslarına sahip olması sağlanmaktadır. Dolayısıyla, bu yapılar bir bakıma iki boyutlu bağlaştırıcılar olarak düşünülebilir.

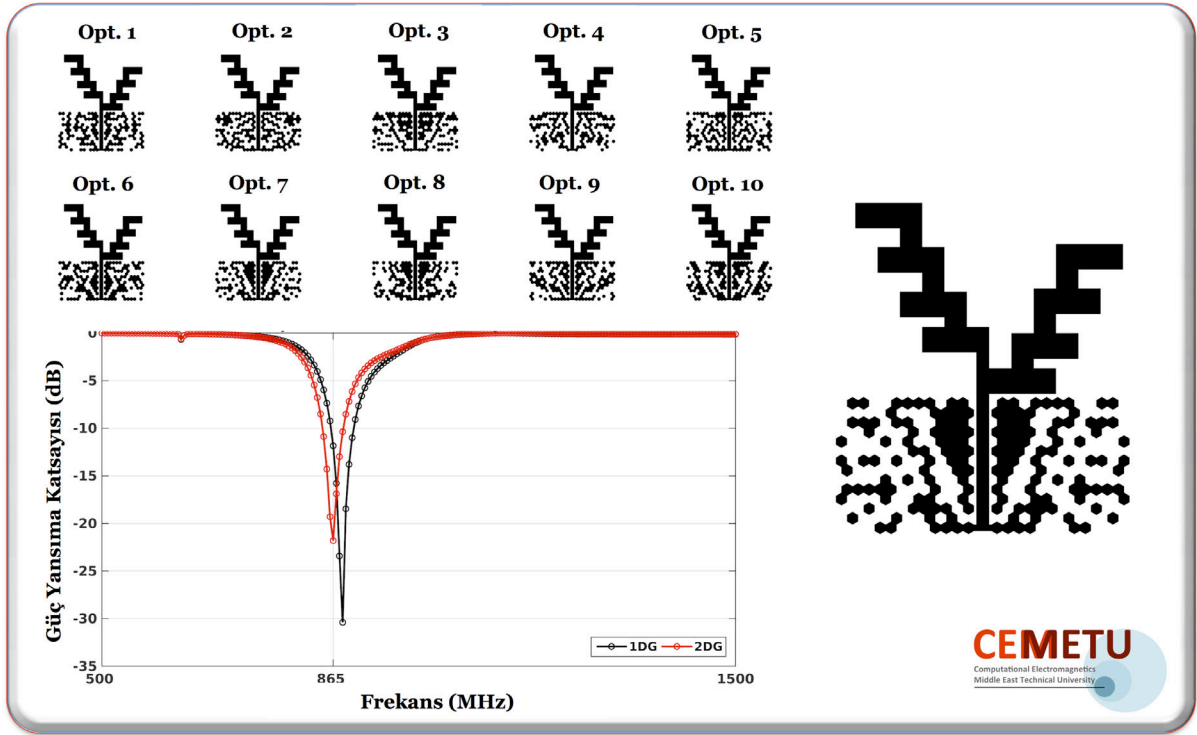
Takılabilir piksel yapılar örnek olarak, Şekil 13'te literatürden esinlenen bir fraktal anten ele alınmıştır. Hem benzetim hem de inkjet baskıyla üretilen prototipler üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçlarında gözüktüğü üzere, anten 1.6 GHz'te 50 Ohm giriş empedansına uyumlu

olarak çalışmaktadır. Ayrıca, yine Şekil 13'te gösterildiği üzere, bu orijinal yapı 0.5-4 GHz aralığında hiçbir şekilde mikroçipe uyum sağlamamaktadır.

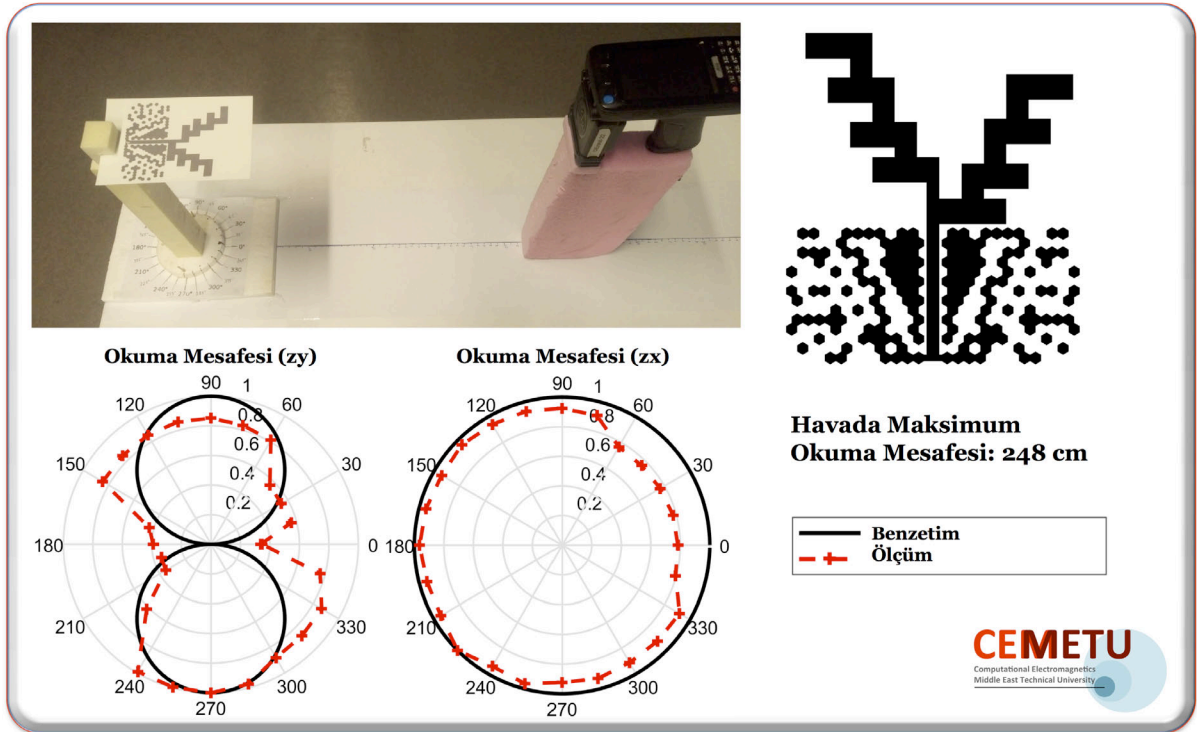
Şekil 13'teki antende iki tarafta gözükten topraklama bölgeleri takılabilir kısımlardır ve bunlar piksel optimizasyonlarına uygun olarak seçilmiştir. Şekil 14'te bu kısımların optimizasyonları sonucu elde edilen 10 farklı tasarım gösterilmiştir. Optimizasyonlarda tüm yapının 865 MHz'te mikroçipe uyum sağlaması amaçlanmıştır. Elde edilen piksel yapılardan birinin kullanılmasıyla elde edilen güç yansıma katsayısı değerleri (mikroçipe takıldığında) frekansa bağlı olarak incelendiğinde, tüm yapının başarılı biçimde mikroçipe uyum sağladığı gözlemlenmektedir. Şekil 15'te gösterildiği üzere, elde edilen yeni etiket havada 2.5 metreye kadar okuma menzili sağlayabilmektedir. Ayrıca, orijinal fraktal yapının dipol benzeri ışınım örüntüsü de bozulmamıştır. Takılabilir piksel yapıların en önemli avantajlarından biri olarak, eklenen kısmın çıkartılmasıyla anten orijinal çalışma biçimine (1.6 GHz'te 50 Ohm'a uyumlu olmaya) geri dönebilmektedir.



Şekil 13. Takılabilir piksel yapıların uygulandığı orijinal anten tasarımı ve ilgili sonuçlar.



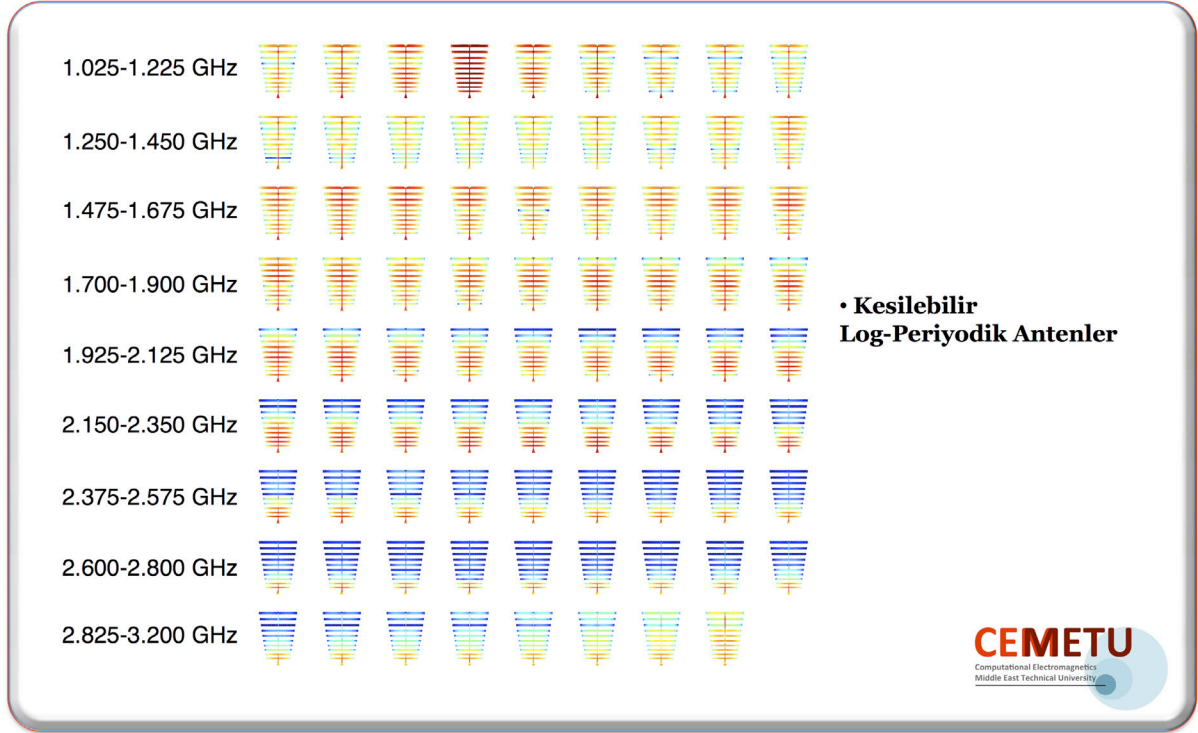
Şekil 14. Şekil 13'te gösterilen orijinal yapıda, iki tarafta kalan topraklama bölgelerinin optimizasyonları ile tüm yapının mikroçipe uyumlu hale getirilmesi.



Şekil 15. Şekil 14'teki optimizasyonlar sonucu tasarlanan yapılardan biri için gerçekleştirilen okuma mesafesi testleri.

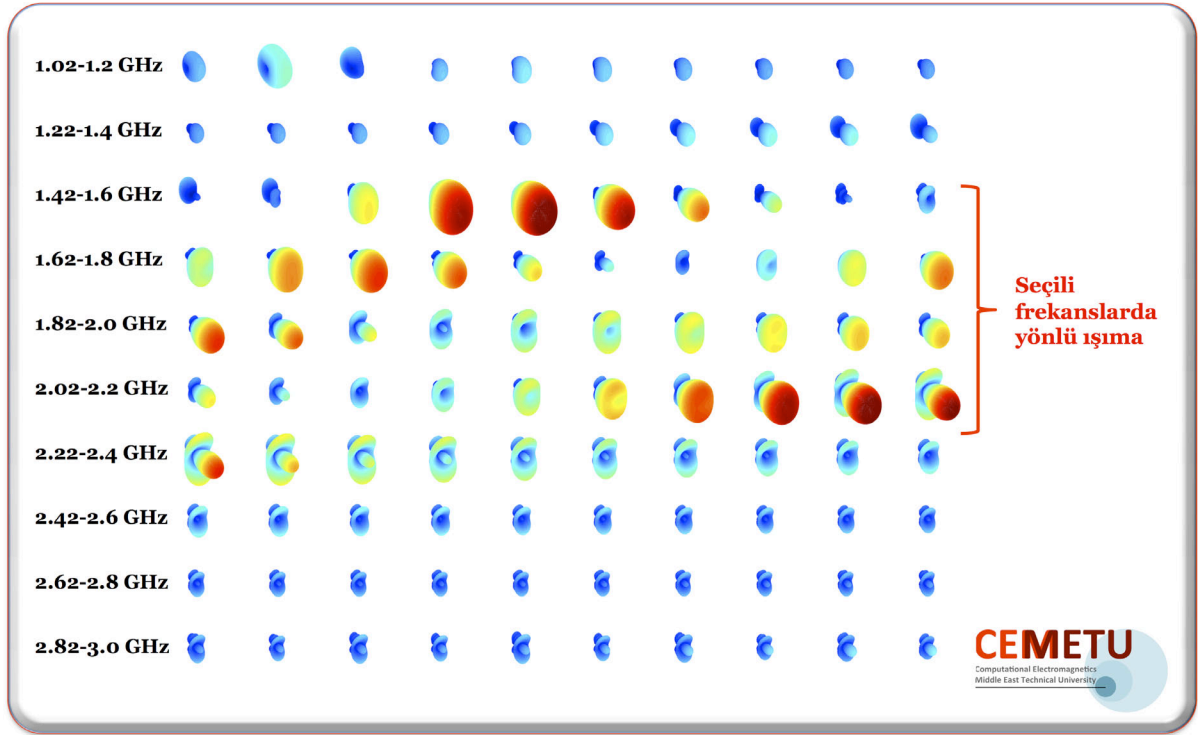
4.4 Kesilebilir Log-Periyodik Antenler

İnkjet baskı yöntemiyle elde edilebilecek ilginç tasarımlara bir başka örnek de, yine bu proje kapsamında geliştirilen kesilebilir antenlerdir. Bu yapılar, başlangıçta farklı şekillerde çalışırken, sadece kesilme yöntemiyle değiştirilebilen antenler olarak tarif edilebilir. Bu şekilde bir konfigürasyon yöntemiyle, antenler teknik bilgisi olmayan kullanıcılar tarafından uygulamaya bağlı olarak değiştirilebilmektedir.

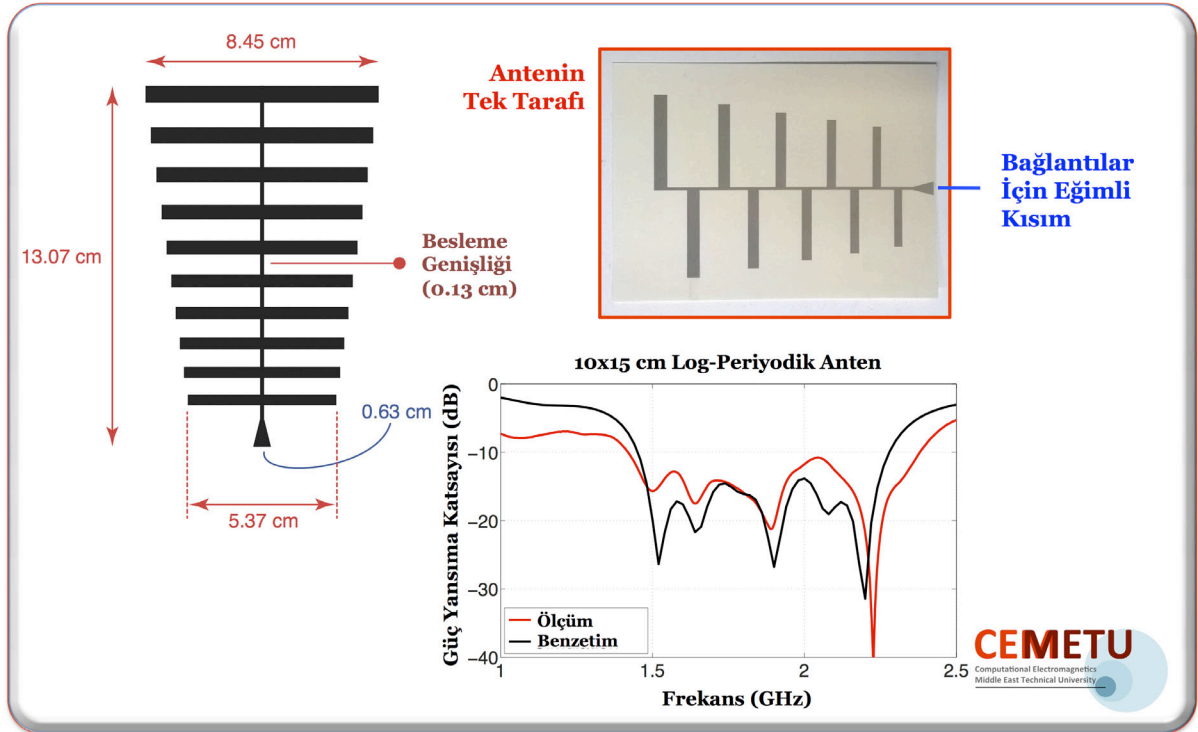


Şekil 16. Kesilebilir olarak tasarlanan bir log-periyodik anten üzerinde frekansa bağlı olarak indüklenen elektrik akımı dağılımları.

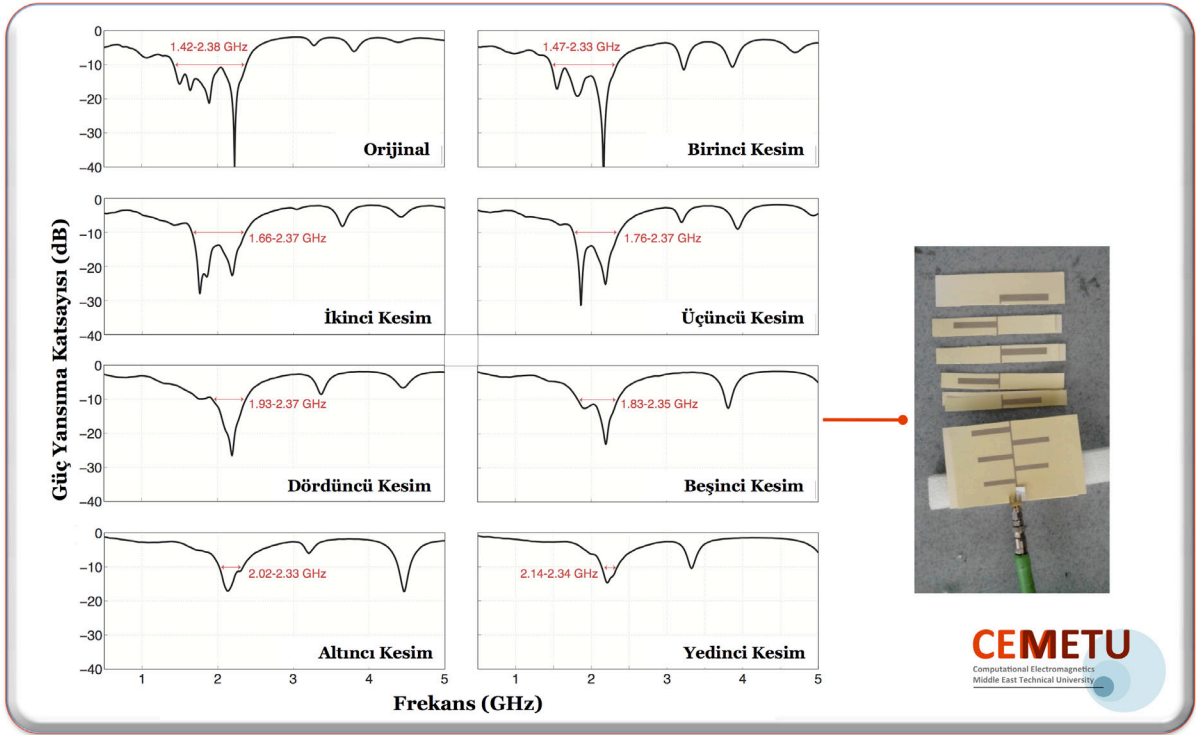
Kesilebilir antenlere başarılı bir örnek Şekil 16'da gösterilmiştir. Log-periyodik yapıya sahip olan bu anten, kollarının kademeli olarak kesilmesiyle değiştirilebilmektedir (Mutlu ve Ergül, 2018). Yapıda, kolların uzunlukları, genişlikleri, ve periyotları optimizasyonlar ile elde edilirken, anten ve kesilmiş halleri aynı anda ele alınmış ve hepsinin yüksek performanslı olması hedeflenmiştir. Şekil 16'da, tüm (kesilmemiş) anten üzerinde indüklenen elektrik akımı dağılımları gösterilmiştir. Bu dağılımlar incelendiğinde, beklendiği üzere, frekansın yükselmesiyle birlikte, antenin aktif (yüksek akım) bölgesinin büyük kollardan küçük kollara yayıldığı gözlemlenmektedir. Bu sonuçları tamamlayıcı olarak Şekil 17'de, yine tüm yapının ışımaya karakteristiği gösterilmiştir. Anten, hedeflenmiş olan 1.5-2.25 GHz aralığında çalışmaktadır. Diş sayısının görece az olmasından dolayı bazı frekanslarda yönlülük bozulsa da, malzemenin az tutulabilmesi de hedeflendiği için bu tür bir karakteristik ortaya çıkmıştır.



Şekil 17. Kesilebilir olarak tasarlanan bir log-periyodik antene ait frekansa bağlı ışınım karakteristiği.



Şekil 18. Kesilebilir olarak tasarlanan bir log-periyodik anten ve bu antene ait güç yansımaya katsayısı değerleri.

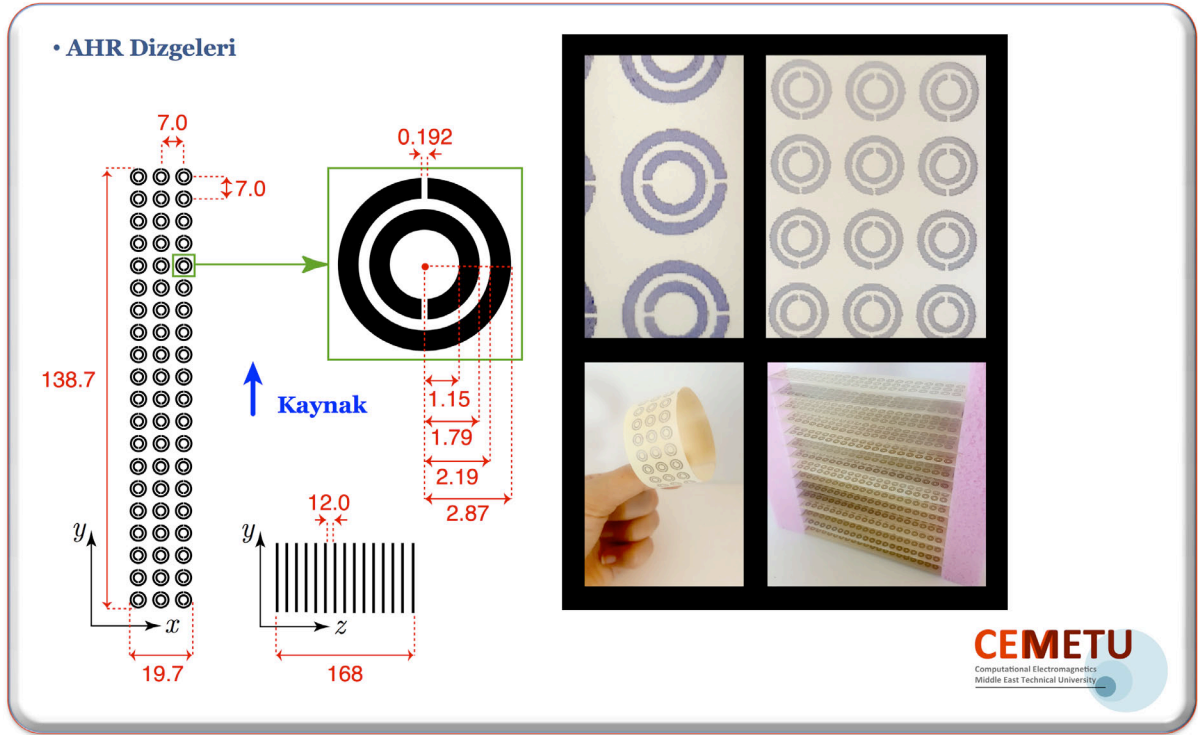


Şekil 19. Kesilebilir olarak tasarlanan log-periyodik antenin, büyük kollarından başlayarak kesilmesi ve geri kalan kısım için elde edilen güç yansımaya katsayısı değerleri (50 Ohm).

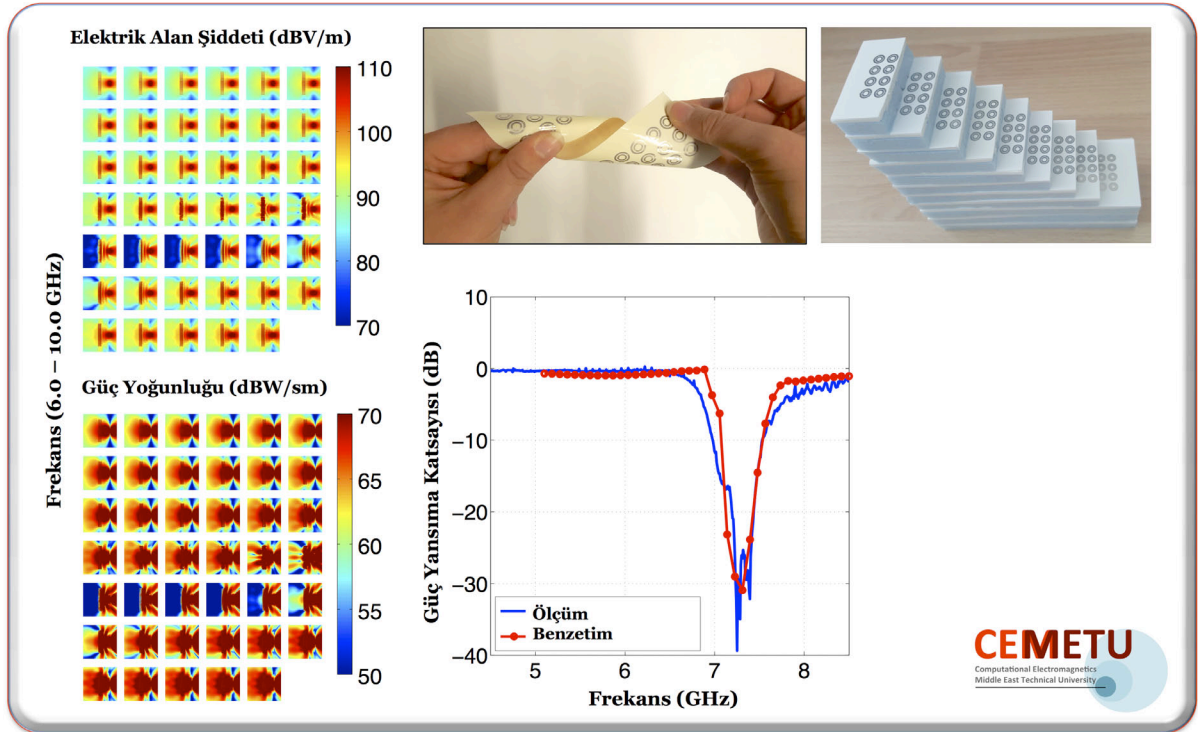
Şekil 18’de tüm antenin geometrisi, inkjet baskı ile üretilmiş bir prototip, ve 50 Ohm empedansa bağlandığı durumda elde edilen güç yansımaya katsayısı değerleri gösterilmiştir. Antenin boyutları 13.07 x 8.45 cm’dir ve 1.5-2.25 GHz aralığında -10 dB’nin altında yansımaya vermektedir. Şekil 19’da, antenin büyük kollarının kademeli olarak kesilmesi gösterilmiştir. Kolların kesilmesiyle birlikte, antenin çalışma frekansı daralmaktadır. Büyük kollar kesildiğinden, daralma özellikle yüksek frekanslardan itibaren olmaktadır. Öte yandan, kesilip atılan kısımlar sayesinde anten küçülmektedir. Dolayısıyla, kesim işlemiyle, frekans bandı ve boyut arasında oynamalar yapılabilmektedir. Geniş bantlı bir uygulama için daha az kesilmiş veya tam olan anten kullanılabilirken, bantın daraltılabileceği uygulamalarda küçültülmüş modellerin tercih edilmesi beklenmektedir.

4.5 Diğer Radyo-Frekans ve Mikrodalga Bileşenlerinin Tasarlanması ve Üretilmesi

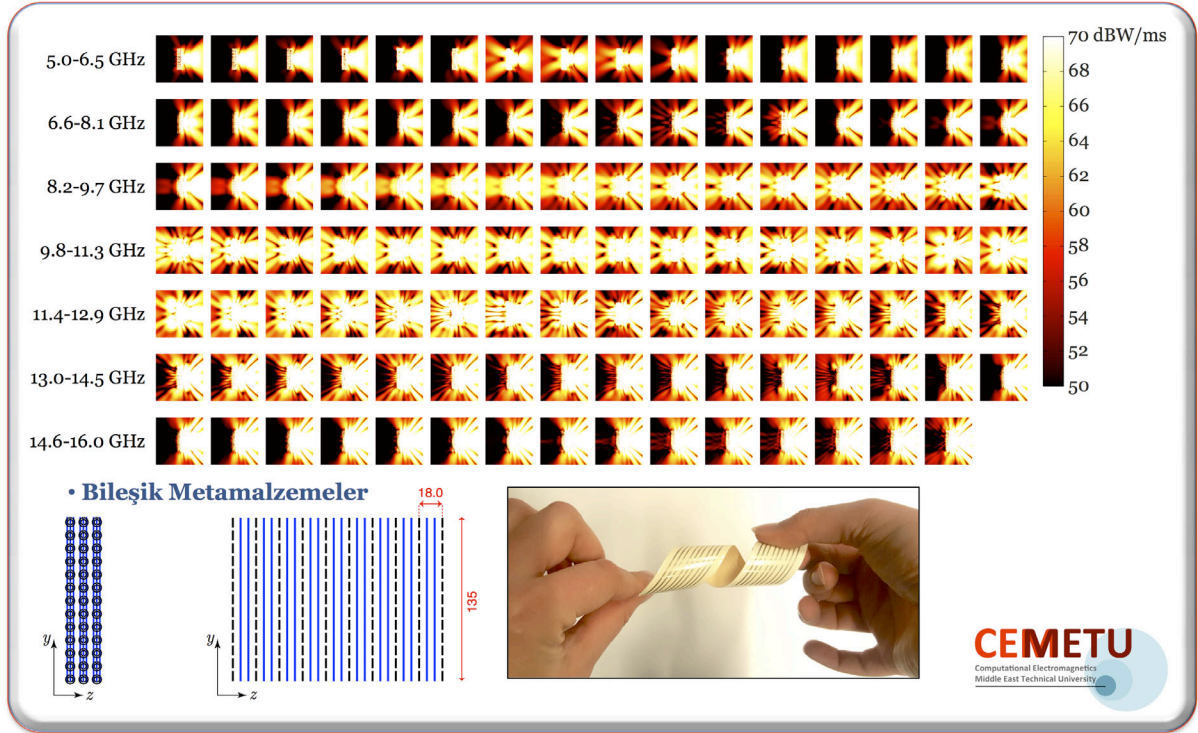
Yukarıda bahsedildiği üzere, bu projede geliştirilmiş olan optimizasyon mekanizmasının uygulama kapsamı genişletilmiş ve bu mekanizma mikroçipli RFID bileşenlerinden farklı yapıların tasarlanması için de kullanılmıştır (İbili vd., 2018d). Bu bölümde anlatılacağı üzere, bu bileşenlerin bir kısmı halen RFID ile ilgiliyken, bir kısmı metalmalzemeye uygulamalarıyla ilgilidir.



Şekil 20. Proje kapsamında geliştirilmiş olan bir AHR dizgesi ve bu dizgenin ucuz inkjet baskı ile üretilmiş prototipi.



Şekil 21. Tasarlanan AHR dizgesinin elektromanyetik tepkisi. Yapının etrafındaki elektrik alanı şiddeti ve güç yoğunluğu dağılımlarına ek olarak, güç yansımaya katsayısı gösterilmiştir.

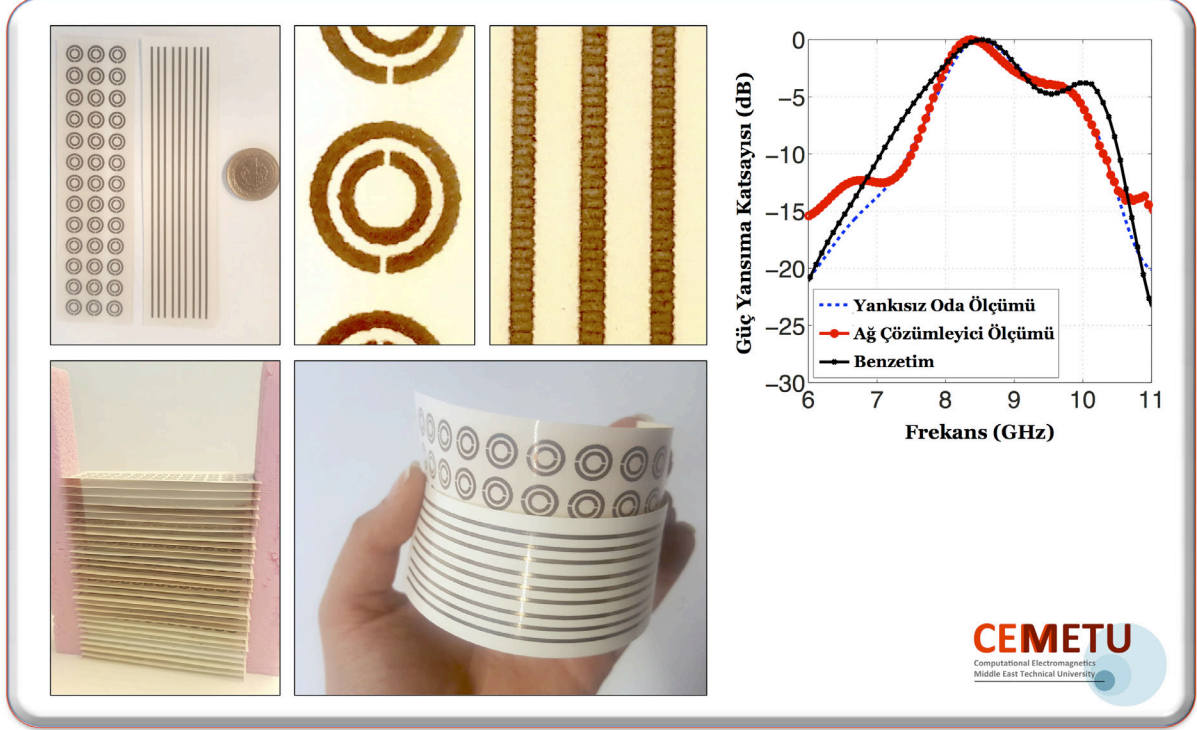


Şekil 22. Proje kapsamında geliştirilmiş olan, AHR ve ince çubuklardan oluşan bir bileşik metamalzeme.

Şekil 20’de ayrıık halka rezonatörlerinden (AHR) oluşan ve 7 GHz civarında çalışan bir mikrodalga metamalzeme tasarımı gösterilmiştir. AHR’lerin tasarımı sabit olarak tutulurken (İbili vd., 2018b, 2018c), bunların adeti, yerleşimi ve aralarındaki mesafeler optimize edilmiştir. Şekil 20’deki fotoğraflarda bazı prototipler gösterilirken, Şekil 21’de baskıların esnekliği ve dizgenin elektromanyetik karakteristiği gösterilmiştir. Elektrik alanı şiddeti ve güç yoğunluğu grafiklerinden anlaşılacağı üzere, AHR dizgesi 7.2 GHz civarında opak hale gelip elektromanyetik dalgaları sönlendirmektedir. Frekansa bağlı güç yansıma katsayısı grafiğinde gözüktüğü üzere, bu bloklaşma özelliği hem ölçüm hem de benzetim sonuçlarında gözlemlenebilmektedir.

Şekil 22’de, tasarlanan bir AHR dizgesinin ince şeritlerle birleştirildiği bir bileşik metamalzeme gösterilmiştir (İbili vd., 2018a). İnce şeritlerin geniş bir frekans bandında negatif elektrik geçirgenlik özelliği oluşturması sayesinde, bu yapı ilginç biçimde negatif indis özelliği gösterebilmektedir. Bu durum AHR’lerin rezonansa girmesi ve böylece ortamda negatif manyetik geçirgenlik oluşturmasıyla meydana gelmektedir. Yaklaşık 9 GHz’te bu özelliği göstermesi beklenen tasarımın etrafında oluşan frekansa bağlı güç yoğunluğu dağılımları Şekil 22’de verilmiştir. Yapının düşük ve yüksek frekanslarda opak davranırken, 9 GHz etrafındaki frekanslarda şeffaflaştığı gözlemlenmektedir. Şekil 23’te

bileşik metamalzeme bloğu ile ilgili bazı prototip fotoğrafları ve frekansa bağlı güç yansımaya katsayısı gösterilmiştir. Hem yankısız oda hem de ağ çözümleyici ölçümlerinde, metamalzemenin başarılı biçimde negatif indis özelliği gösterdiği tespit edilmiştir.



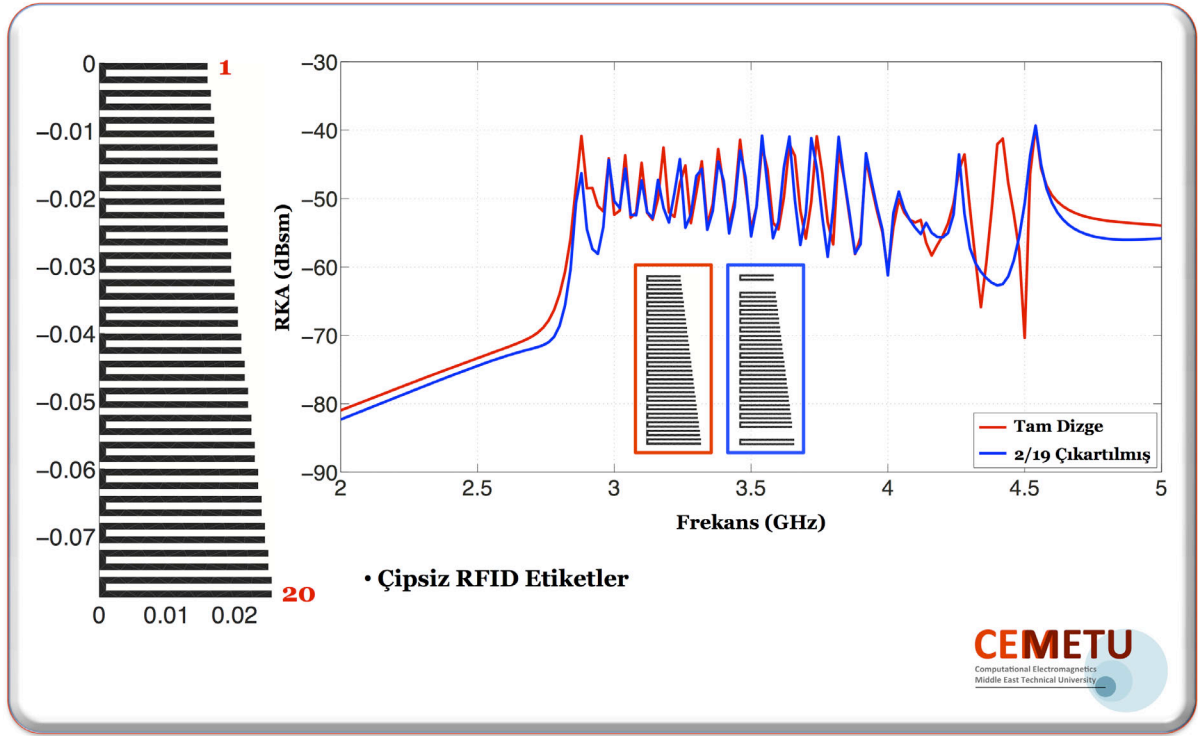
Şekil 23. Geliştirilen bileşik metamalzeme baskılarına bazı örnekler ve metamalzeme bloğu için elde edilmiş olan güç yansımaya katsayısı değerleri.

Bu projede de gösterildiği üzere, RFID etiketlerinde mikroçiplerin kullanılması oldukça zahmetlidir ve ucuz inkjet baskı yönteminin kullanıldığı durumlarda en zorlayıcı unsurdur. Bu bakımdan, son yıllarda çipsiz RFID etiketlerinin geliştirilmesi konusunda bazı çalışmalar başlatılmıştır (Çetin vd., 2018a, 2018b). Bu doğrultuda, proje kapsamında, çipsiz RFID etiketleri olarak kullanılacak bazı tasarımlar ortaya konulmuştur. Şekil 24-26'da geliştirilen tasarımlara bazı örnekler verilmiştir. Şekil 24'te gösterilen tasarım, U şeklinde rezonatörlerden oluşan 20 bitlik bir yapıdır. Her bitin bir rezonatörle temsil edildiği bu yapıda, herhangi bir rezonatörün var olması ilgili frekansta rezonansa yol açmakta ve "1" değerini ifade etmektedir. Dolayısıyla, mikroçipli yapıların kullanıldığı uygulamalardan farklı olarak, çipsiz RFID uygulamalarında görece geniş bir frekans bandının kullanılmasına ihtiyaç vardır.

Çipsiz etiketlerin tepkileri genel olarak düşük seviyelerdedir. Örneğin, Şekil 24'te verilen radar kesit alanı değerleri incelendiğinde, maksimum 40 dBsm seviyesine ulaşabildiği gözlemlenmektedir. Bu bakımdan, etiketlerin çoklu olarak kullanılması ve tanımlama işlemlerinin iyileştirilmesi gündeme gelmiştir. Özellikle ucuz inkjet baskı kapsamında, bu tür

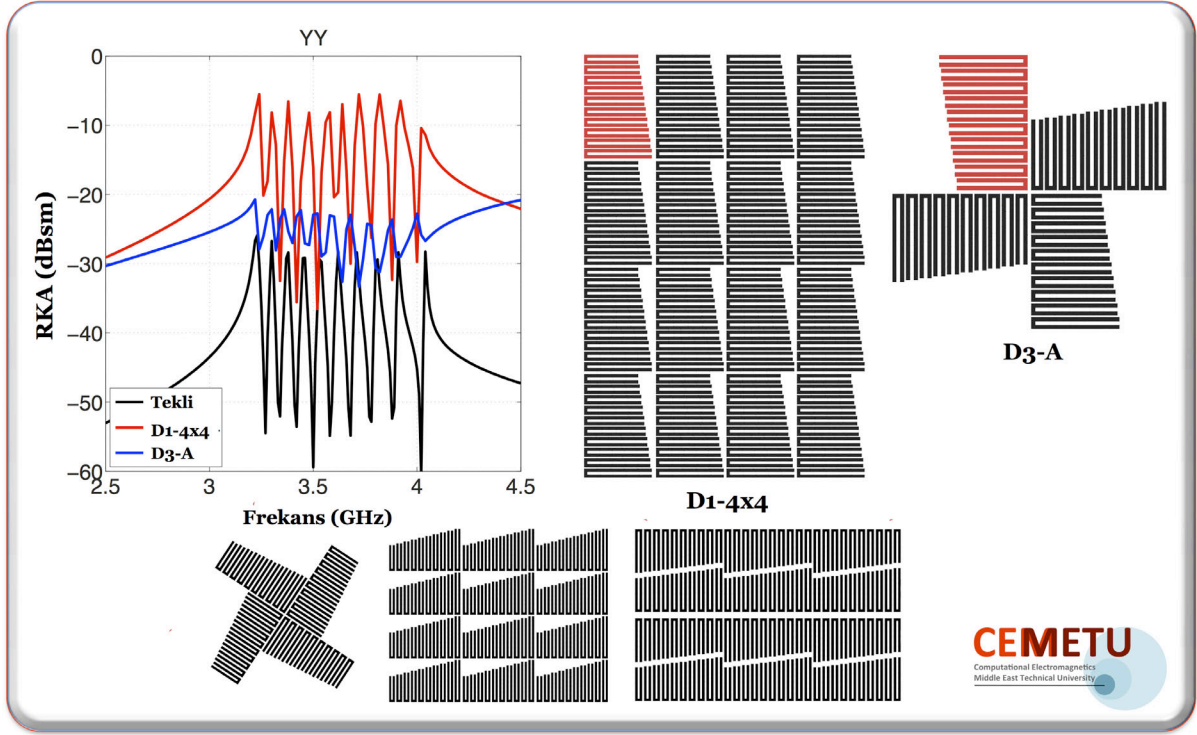
çoklu yapıların üretilmesinde ek bir güçlük bulunmamaktadır. Şekil 25'te, proje kapsamında geliştirilmiş olan bu tür dizgelere bazı örnekler gösterilmiştir. Toplam 10 bitlik bir uygulama için, uygun yapıların kullanılmasıyla birlikte, A5 boyutlarındaki bir etiketle -10 dBms seviyelerine çıkılabileceği tespit edilmiştir.

Şekil 24 ve 25'te gösterilen dizgeler optimal olarak tasarlanmamıştır. Gerçekleştirilen çeşitli benzetimler sonucunda, Şekil 26'da gösterilen iyileştirilmiş yapılara ulaşılmış ve bu yapılarda rezonatörlerin yerleşimleri (temel olarak mesafeler) optimize edilmiştir. Şekil 26'da gösterildiği üzere, optimal bir tasarımın kullanıldığı ve sadece 4.1 x 7.9 cm'ye sığabilen 20 bitlik bir etiketle, -10 dBsm sinyal seviyesine ulaşmak mümkün gözükmektedir.

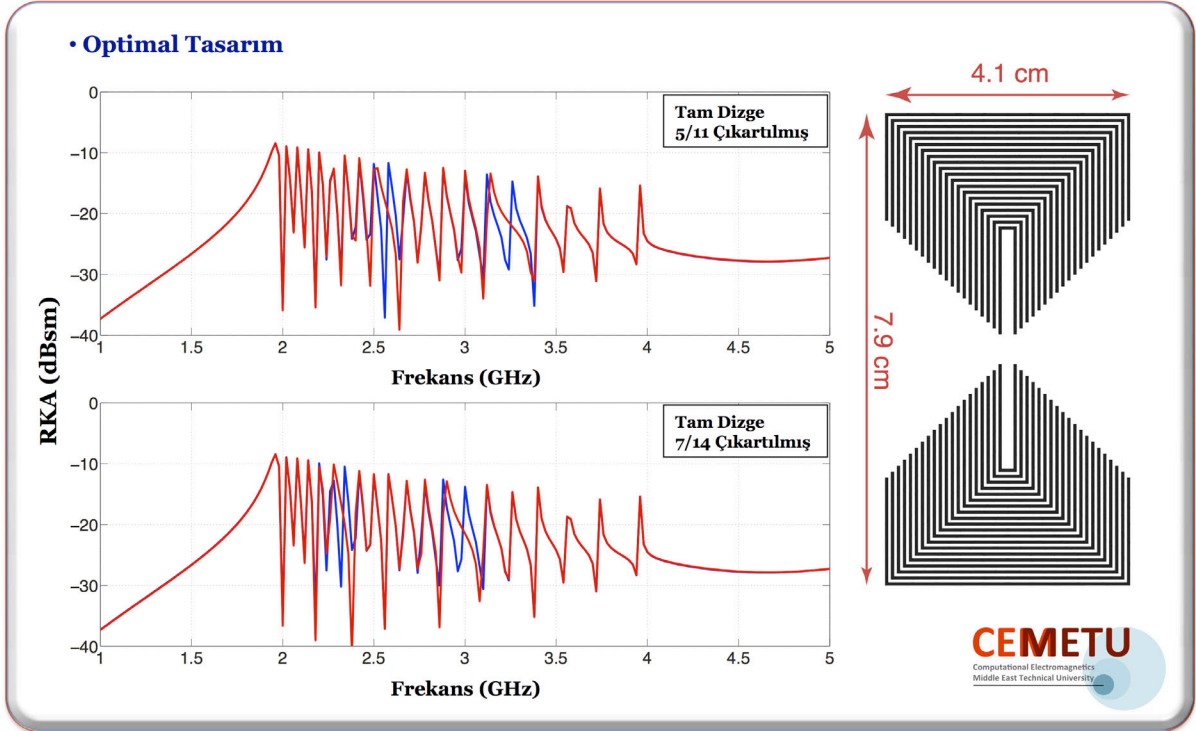


Şekil 24. Proje kapsamında tasarlanmış ve test edilmiş olan çipsiz RFID etiketlerine bir örnek.

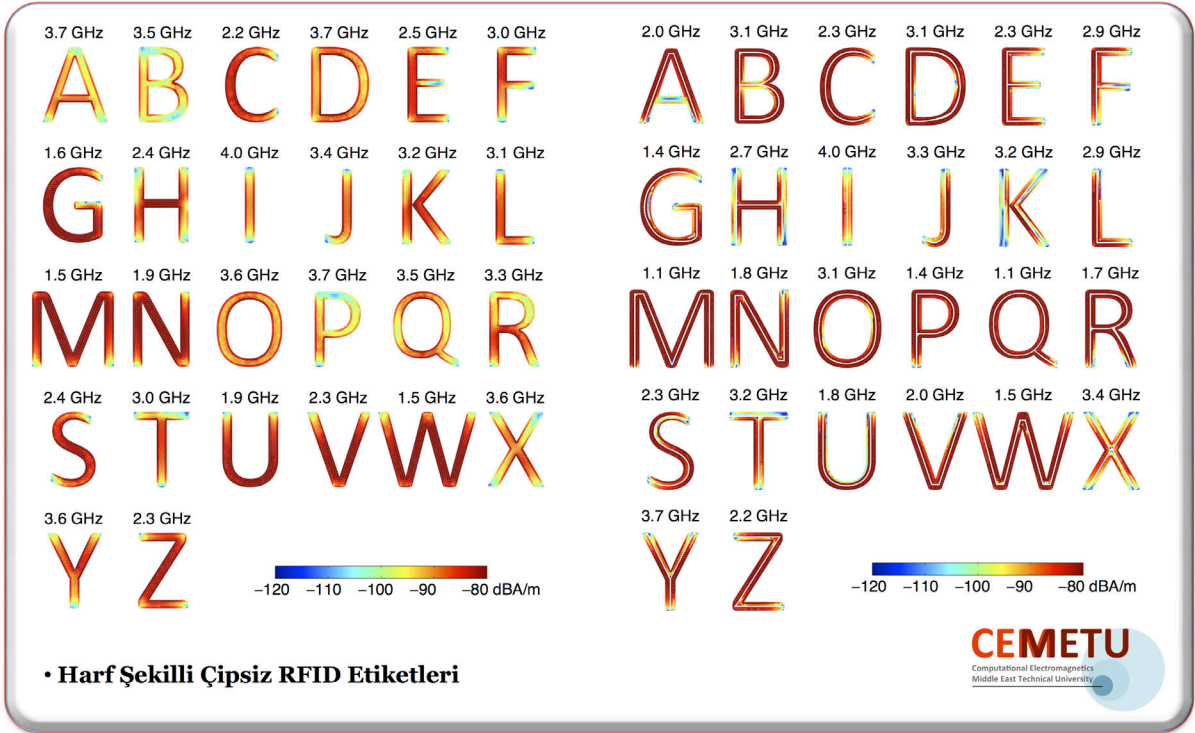
Çipsiz RFID etiketlerinin alfabe fontlarından oluşması ve böylece radyo frekanslarında tanımlanabilmelerine ek olarak görsel olarak da okunabilmeleri ilginç bir uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır (Demir vd., 2018; Mutlu vd., 2018). Proje kapsamında incelenen bu tür yapılara bazı örnekler ve elde edilen sonuçlar Şekil 27-30'da gösterilmiştir.



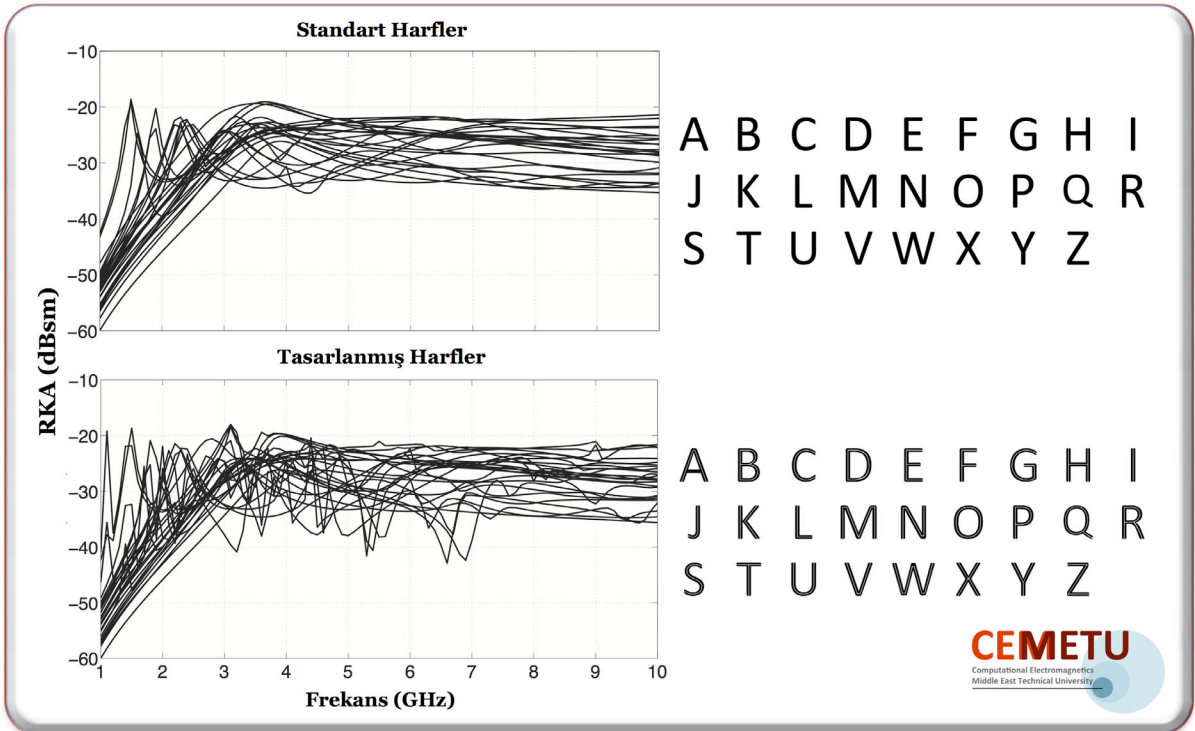
Şekil 25. 10 bitlik bir çipsiz RFID etiketinin sinyal seviyesini artırmak için çoklu olarak kullanılması.



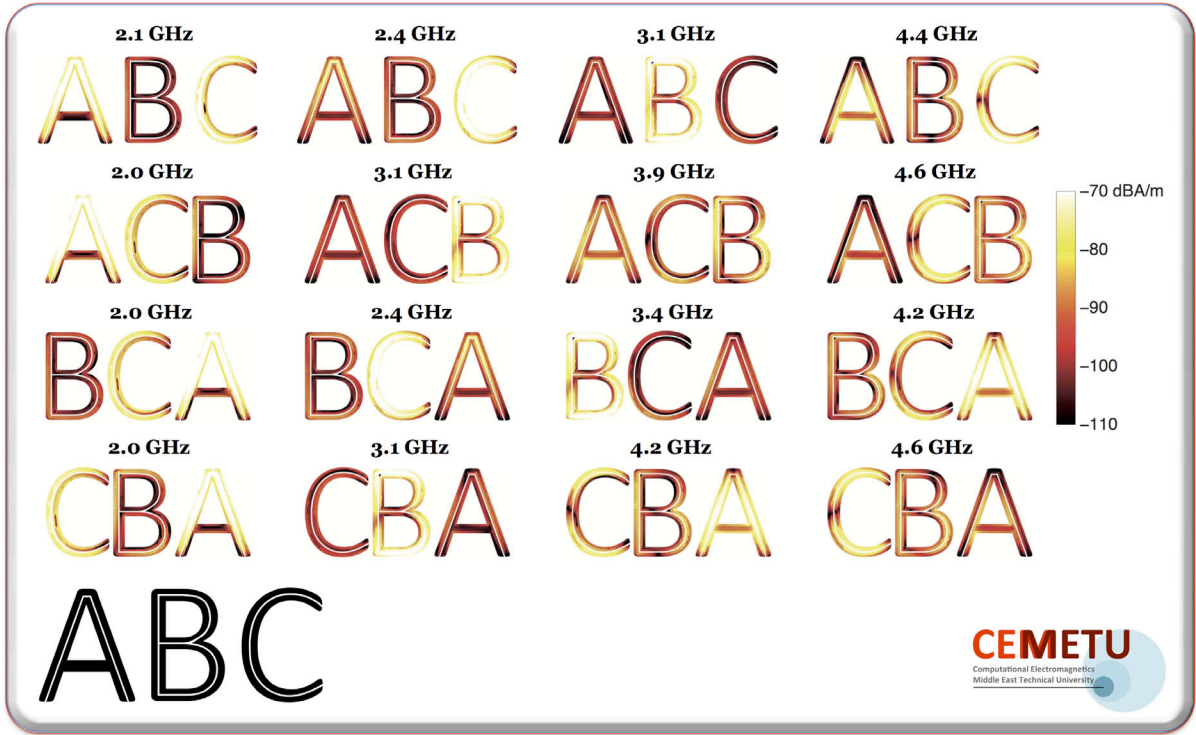
Şekil 26. Proje kapsamında geliştirilmiş olan 20 bitlik çipsiz RFID etiketi tasarımı.



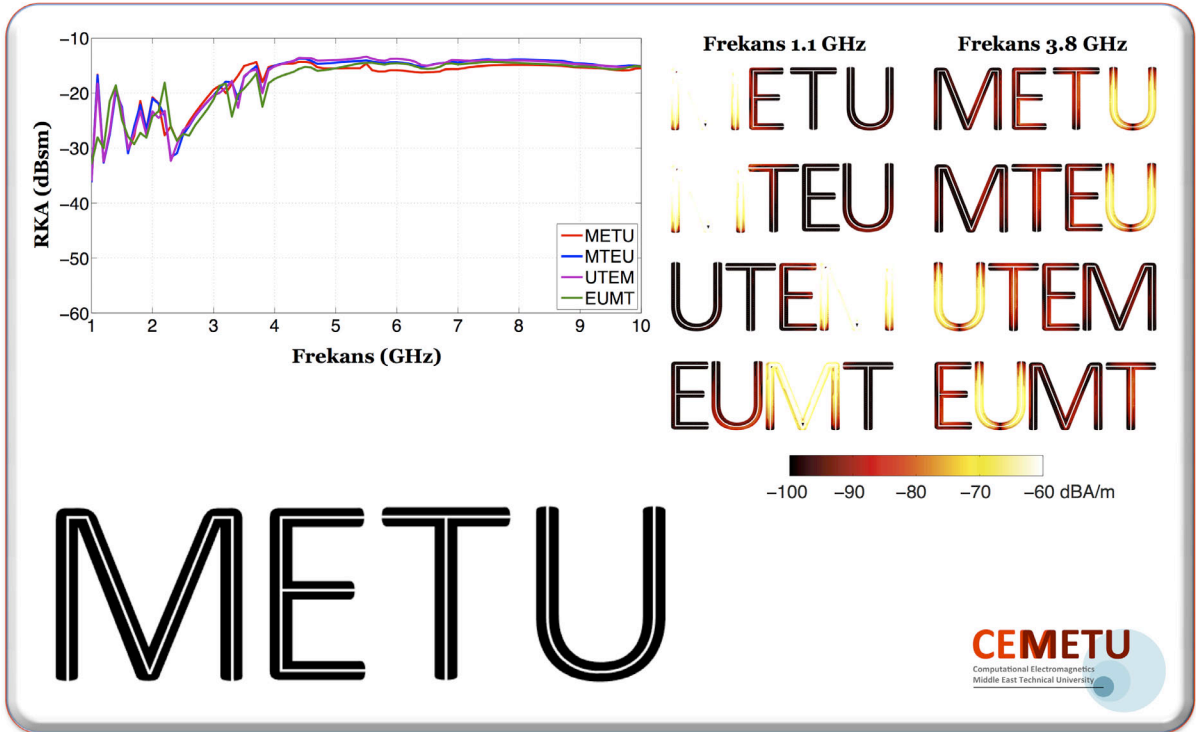
Şekil 27. Proje kapsamında geliştirilmiş olan harf şeklinde çipsiz RFID etiketi tasarımları.



Şekil 28. Proje kapsamında geliştirilmiş olan harf şeklinde çipsiz RFID etiketi tasarımları için elde edilen RKA değerlerinin standart harflerle elde edilenlerle karşılaştırılması.



Şekil 29. Proje kapsamında geliştirilmiş olan harf şeklinde çipsiz RFID etiketi tasarımlarının çoklu kullanıldığı durumlarda elde edilen yüzey akımları.



Şekil 30. Proje kapsamında geliştirilmiş olan harf şeklinde çipsiz RFID etiketi tasarımlarının çoklu kullanıldığı durumlarda elde edilen yüzey akımları ve RKA değerleri.

Şekil 27’de, proje kapsamında geliştirilmiş olan harf şeklinde çipsiz RFID etiketleri, standart bir fontun kullanıldığı harflerle karşılaştırılmıştır. Tasarımlarda harf yüzeylerinin üzerinde optimal yarıklar açılmış ve böylece frekansa bağlı saçılım tepkilerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Önemli rezonans frekanslarında yüzeyler üzerinde indüklenen akımların gösterildiği bu grafiklerde tasarlanmış etiketlerin (sağ), standart olanlara (sol) göre çok daha yüksek tepkiler verdiği gözlemlenmektedir. Tamamlayıcı sonuçların gösterildiği Şekil 28’deki grafikler incelendiğinde, tasarlanmış harflerin frekansa göre çok daha hızlı değişimler gösteren RKA değerlerine sahip oldukları anlaşılmaktadır. Bu sayede, etiketlerin RFID uygulamaları kapsamında ayırt edilebilirlikleri yükseltilmiştir. Şekil 29’da etiketlerin çoklu olarak kullanıldıkları bazı senaryolar gösterilmiştir. Genel olarak, akım sonuçları incelendiğinde, sözcüklerin tepkilerinin kendilerini oluşturan harflerin tepkilerini taşıdıkları söylenebilmektedir. Şekil 30’da METU kelimesini oluşturan harflerin kullanıldığı etiketlerin tepkileri incelendiğinde de bu durum gözlemlenmektedir. Bir başka deyişle anagram kelimelerin benzer tepkiler verdiği anlaşılmakta ve kurulacak olan RFID sistemlerinin bu benzeşmeyi göz önüne alması gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 31. Proje kapsamında geliştirilmiş olan bazı çipsiz RFID etiketlerinin ucuz inket baskı yöntemiyle üretilmiş prototipleri.

Son olarak, Şekil 31’de, üretilmiş olan bazı çipsiz RFID etiketleri gösterilmiştir. Doğrudan proje önerisinde öngörülmediği halde ele alınmış olan bu tip yeni nesil etiketlerin incelenmesine proje sonrasında da devam edilecektir.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sonuçlar özet olarak şu şunlardır.

- RFID uygulamalarında kullanılacak inkjet tipi antenlerin tasarımı için kabiliyetli bir benzetim ve optimizasyon mekanizması geliştirilmiştir. Geliştirilen çözücü birleşik metal ve dielektrik parçalara sahip, üç boyutlu, karmaşık cisimlere uygulanabilmektedir. Bu doğrultuda, çok ince kağıt üzerine metal baskıyla elde edilen inkjet tipi antenler çok hassas olarak incelenebilmektedir. Geliştirilen çözücü, optimizasyonlar için GA ile birleştirilmiş, bu işlemde kapalı kutu yaklaşımlarından farklı olarak optimizasyon ve çözücü modülleri içiçe geçmiştir. Bu doğrultuda, çözücü kurulumunun ayrılması, çözümler arası bilgi aktarımı, çözüm havuzu kullanımı ve dinamik hata kontrolü gibi performans artırıcı yöntemlerden faydalanılmıştır. Geliştirilen mekanizma, sadece proje kapsamındaki inkjet tipi antenler için değil, benzeri karmaşıklıkta farklı antenler için de kullanılabilir. Geliştirilen mekanizma, sadece proje kapsamındaki inkjet tipi antenler için değil, benzeri karmaşıklıkta farklı antenler için de kullanılabilir.
- Geliştirilen benzetim ve optimizasyon mekanizmasının etkin biçimde kullanılmasıyla, RFID uygulamaları için uygun ve aynı zamanda ucuz inkjet baskı yöntemiyle üretilebilecek antenler tasarlanmıştır. Literatürdeki örneklerinden farklı olarak, geliştirilen özgün optimizasyon mekanizması, parça hareketi, rotasyon, ayırma, boşluk açma ve serbest deformasyon gibi yapılandırma opsiyonlarına sahiptir. Böylece, dar alanda, yüksek çeşitlilikte ve arzu edilen kriterleri sağlayan anten tasarımları verimli ve hassas olarak elde edilebilmektedir. Dipol ve yama antenler gibi temel geometrilerden başlanarak, optimizasyonlar ile bu antenlerin geometrileri değiştirilmiş ve istenilen elektriksel özelliklere sahip yapılara ulaşılmıştır. Anten geometrileri bakımından hiçbir basitleştirici varsayıma gidilmemiş ve bu doğrultuda optimizasyonların verimli olarak tamamlanması sağlanmıştır. RFID uygulamalarına uygun olarak, antenlerin izotropik ışınımlı, yüksek kazançlı, giriş empedansları kapasitif olan RFID çiplerine uyumlu, ve aynı zamanda rastgele baskı sorunlarından etkilenmeyecek şekilde geniş bantlı olmaları sağlanmıştır.

- Tasarlanan RFID antenlerinin üstün özellikleri, bunların mikroçiplere bağlanmasıyla ve elde edilen etiket prototiplerinin okuyucularla test edilmesiyle açıkça gösterilmiştir. Özellikle elde edilen okuma menzili, literatürdeki örneklerine göre oldukça yüksek seviyelerdedir.
- Geliştirilen benzetim ve optimizasyon mekanizmasının kullanılmasıyla, sadece proje başındaki hedefler olan mikroçiplere uyumlu RFID antenler değil, aynı zamanda metalmalzemeler ve çipsiz RFID etiketleri de tasarlanmıştır. Bu alanda literatürde yapılan çalışmalar ve boşluklar göz önüne alındığında, ucuz inkjet baskıya uygun ve optimize edilmiş radyo-frekans ve mikrodalga bileşenlerinin tasarlanması konusundaki çalışmalara proje sonrasında da devam edecektir.

Sonuç olarak, başarılı olarak tamamlanan bu proje, ucuz inkjet baskıya uygun RFID antenlerinin benzetimleri, optimizasyonları ve tasarımları konusunda bilimsel ve teknik literatüre önemli katkılar sunmuştur.

Referanslar

Altınoklu, A., Karaosmanoğlu B., Ergül Ö. 2017. “Electromagnetic optimizations of corrugated metallic sheets for maximum power focusing”, J. Electromagn. Waves Appl., 31 (8), 837–849.

Araque Quijano, J. L., Vecchi G. 2009. “Optimization of an innovative type of compact frequency-reconfigurable antenna”, IEEE Trans. Antennas Propag., 57 (1), 9–18.

Araque Quijano, J. L., Vecchi G. 2012. “Optimization of a compact frequency- and environment-reconfigurable antenna”, IEEE Trans. Antennas Propag., 60 (6), 2682–2689.

Bevelacqua, P. J., Balanis C. A. 2007. “Optimizing antenna array geometry for interference suppression”, IEEE Trans. Antennas Propag., 55 (3), 637–641.

Bevelacqua, P. J., Balanis C. A. 2009. “Geometry and weight optimization for minimizing sidelobes in wideband planar arrays”, IEEE Trans. Antennas Propag., 57 (4), 1285–1289.

Brandt, A. 1991. “Multilevel computations of integral transforms and particle interactions with oscillatory kernels”, Comput. Phys. Comm., 65, 24–38.

Chew, W. C., J.-M. Jin, E. Michielssen, and J. Song. 2001. Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics. Artech House, 2001.

Cook, B. S., Shamim A. 2012. “Inkjet printing of novel wideband and high gain antennas on low-cost paper substrate”, IEEE Trans. Antennas Propag., 60 (9), 4148–4156.

Çetin, E., Şahin M. B., Ergül Ö. 2018a. “Array strategies for improving the performances of chipless RFID tags”, Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp., 2015–2016.

Çetin, E., Şahin M. B., Ergül Ö. 2018b. “Design of highly distinguishable chipless tags for radio-frequency-identification applications”, URSI-Turkey Scientific Symp.

Çiftçi, T., Karaosmanoğlu B., Ergül Ö. 2016. “Low-cost inkjet antennas for RFID applications”, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 120 (1).

Demir, M. A. Mutlu F., Ergül Ö. 2018. “Design of highly distinguishable letters for inkjet-printed chipless RFID tags”, IEEE-APS Topical Conf. on Antennas and Propagation in Wireless Communications (IEEE APWC).

Dolapçı, T., Baloğlu M. S., Ergül Ö. 2018. “Design and fabrication of antennas with alternative materials for radio-frequency applications”, 9th Congress of Defense Technologies, 653–659.

Erdil, E., Topalli K., Unlu M., Civi O. A., Akin T. 2007. “Frequency tunable microstrip patch antenna using RF MEMS technology”, IEEE Trans. Antennas Propag., 55 (4), 1193–1196.

Ergül, Ö., Gürel L. 2006. “Enhancing the accuracy of the interpolations and antepolations in MLFMA”, IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 5, 467–470.

Ergül, Ö., Gürel L. 2007. “Modeling and synthesis of circular-sectoral arrays of log-periodic antennas using multilevel fast multipole algorithm and genetic algorithms”, Radio Sci., 42 (3018).

Ergül, Ö., Gürel L. 2009a. “Comparison of integral-equation formulations for the fast and accurate solution of scattering problems involving dielectric objects with the multilevel fast multipole algorithm”, IEEE Trans. Antennas Propag., 57 (1), 176–187.

Ergül, Ö., Gürel L. 2009b. “Efficient solution of the electric and magnetic current combined-field integral equation with the multilevel fast multipole algorithm and block-diagonal preconditioning”, *Radio Sci.*, 44 (6001).

Ergül, Ö., Gürel L. 2009c. “Discretization error due to the identity operator in surface integral equations”, *Comput. Phys. Comm.*, 180 (10), 1746–1752.

Ergül, Ö., Gürel L. 2014. *The Multilevel Fast Multipole Algorithm (MLFMA) for Solving Large-Scale Computational Electromagnetics Problems*. Wiley-IEEE.

Ergül, Ö., Karaosmanoğlu B. 2014. “Approximate stable diagonalization of the Green’s function for low frequencies”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 13, 1054–1056.

Ergül, Ö., Karaosmanoğlu B. 2015. “Broadband multilevel fast multipole algorithm based on an approximate diagonalization of the Green’s function”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 63 (7), 3035–3041.

Ergül, Ö., Malas T., Gürel L. 2010. “Solutions of large-scale electromagnetics problems using an iterative inner-outer scheme with ordinary and approximate multilevel fast multipole algorithms”, *Prog. Electromagn. Res.*, 106, 203–223.

Graglia, R. D. 1993. “On the numerical integration of the linear shape functions times the 3-D Green’s function or its gradient on a plane triangle”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 41 (10), 1448–1455.

Güler, S., Karaosmanoğlu B., Ergül Ö. 2016. “Design, simulation, and fabrication of a novel type of inkjet-printed pixel antennas”, *PIER Lett.*, 64, 51–55.

Güler, S., Ceylan H. A., Ergül Ö. 2018. “Hexagonal-pixel surfaces for the reconfiguration of inkjet-printed antennas,” *Proc. Mediterranean Microwave Symp. (MMS)*.

Haupt, L., Werner D. H. 2007. *Genetic Algorithms in Electromagnetics*. New Jersey: Wiley.

Hodges, R. E., Rahmat-Samii Y. 1997. “The evaluation of MFIE integrals with the use of vector triangle basis functions”, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 14 (1), 9–14.

İbili, H., Karaosmanoğlu B., Ergül Ö. 2018a. “Demonstration of negative refractive index with low-cost inkjet-printed microwave metamaterials”, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 60 (1), 187–191.

İbili, H., Karaosmanoğlu B., Ergül Ö. 2018b. “Homogenization of microwave metamaterial structures using full-wave solutions and genetic algorithms”, *Proc. Mediterranean Microwave Symp. (MMS)*.

İbili, H., Keleş S., Ergül Ö. 2018c. “Design of three-dimensional multiband microwave metamaterials”, *URSI-Turkey Scientific Symp.*

İbili, H., Güler S., Mutlu F., Ergül Ö. 2018d. “Fabrication of radio-frequency components using inkjet printing technology”, *9th Congress of Defense Technologies*, 661–666.

Jiang, L. J., Chew W. C. 2005. “A mixed-form fast multipole algorithm”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 53 (12), 4145–4156.

Kataja, J., Jarvenpaa S., Toivanen J. I., Makinen R. A. E., Yla-Oijala P. 2014. “Shape sensitivity analysis and gradient-based optimization of large structures using MLFMA”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 62 (11), 5610–5618.

Karaosmanoğlu, B., Ergül Ö. 2017. “EFIE-tuned testing functions for MFIE and CFIE”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 16, 968–970.

Karaosmanoğlu, B., Yılmaz A., Ergül Ö. 2017. “Accurate and efficient analysis of plasmonic structures using surface integral equations”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 65 (6), 3049–3057.

Karaova, G., Altınoklu A., Ergül Ö. 2018. “Full-wave electromagnetic optimisation of corrugated metallic reflectors using a multigrid approach”, *Sci. Rep.*, 8 (1267).

Maza, A. R., Cook B., Jabbour G., Shamim A. 2012. “Paper-based inkjet-printed ultra-wideband fractal antennas”, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 6 (12), 1366–1373.

Mutlu, F., Ergül Ö. 2018. “Cuttable inkjet-printed log-periodic antennas,” *URSI-Turkey Scientific Symp.*

Mutlu, F., Önel C., Karaosmanoğlu B., Ergül Ö. 2017. “Inkjet-printed cage-dipole antennas for radio-frequency applications”, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 11(14), 2016–2020.

Mutlu, F., Demir M. A., Ergül Ö. 2018. “Improved fonts for chipless radio-frequency-identification tags based on letters”, *Proc. Mediterranean Microwave Symp. (MMS)*.

Nikitin, P. V., Lam S., Rao K. V. S. 2005. “Low cost silver ink RFID tag antennas”, *Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp.*, 353–356.

Orchard, H. J., Elliott R. S., Stern G. J. 1985. “Optimising the synthesis of shaped beam antenna patterns”, *IEEE Proc. Microw. Antennas Propag.*, 132 (1), 63–68.

Ozgun, O., Mutlu S., Aksun M. I., Alatan L. 2003. “Design of dual-frequency probe-fed microstrip antennas with genetic optimization algorithm”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 51 (8), 1947–1954.

Önel, C., Ergül Ö. 2014. “Optimizations of patch antenna arrays using genetic algorithms supported by the multilevel fast multipole algorithm”, *Radioengineering*, 23 (4), 1005–1014.

Önel, C., Çiftçi T., Küçük S., Karaosmanoğlu B., Ergül Ö. 2015. “Design, simulation, and fabrication of low-cost inkjet antennas”, *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS)*.

Önel, C., Karaosmanoğlu B., Ergül Ö. 2016a. “Efficient and accurate electromagnetic optimizations based on approximate forms of the multilevel fast multipole algorithm”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 15, 1113–1115.

Önel, C., Alkış S., Gökçe Ö., Ergül Ö. 2016b. “Multi-frequency and multi-direction optimizations of antenna arrays using heuristic algorithms and the multilevel fast multipole algorithm”, *Radio Sci.*, 51 (7), 1094–1108.

Önel, C., Üçüncü A., Ergül Ö. 2017. “Efficient multilayer iterative solutions of electromagnetic problems using approximate forms of the multilevel fast multipole algorithm,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 16, 3253–3256.

Pringle, L. N., Harms P. H., Blalock S. P., Kiesel G. N., Kuster E. J., Friederich P. G., Prado R. J., Morris J. M., Smith G. S. 2004. "A Reconfigurable aperture antenna based on switched links between electrically small metallic patches", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 52 (6), 1434–1445.

Rajagopalan, H., Kovitz J. M., Rahmat-Samii Y. 2014. "MEMS reconfigurable optimized E-shaped patch antenna design for cognitive radio", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 62 (3), 1056–1064.

Rao, S. M., Wilton D. R., Glisson A. W. 1982. "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 30 (3), 409–418.

Rida, A., Yang L., Vyas R., Tentzeris M. M. 2009. "Conductive inkjet printed antennas on flexible low-cost paper-based substrates for RFID and WSN applications", *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 51 (3), 13–23.

Rodrigo, D., Jofre L. 2012. "Frequency and radiation pattern reconfigurability of a multi-size pixel antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 60 (5), 2219–2225.

Sheng, X.-Q., Jin J.-M., Song J., Chew W. C., Lu C.-C. 1998. "Solution of combined-field integral equation using multilevel fast multipole algorithm for scattering by homogeneous bodies", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 46 (11), 1718–1726.

Song S., Murch R. D. 2014. "An efficient approach for optimizing frequency reconfigurable pixel antennas using genetic algorithms", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 62 (2), 609–620.

Subbaraman, H., Pham D. T., Xu X., Chen M. Y., Hosseini A., Lu X., Chen R. T. 2013. "Inkjet-printed two-dimensional phased-array antenna on a flexible substrate", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 12, 170–173.

Vaskelainen, L. I. 2000. "Phase synthesis of conformal array antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 48 (6), 987–991.

Vyas, R., Lakafosis V., Rida A., Chaisilwattana N., Travis S., Pan J., Tentzeris M. M. 2009. "Paper-based RFID-enabled wireless platforms for sensing applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 57 (5), 1370–1382.

Yang, K., Zhao Z., Nie Z., Ouyang J., Liu Q. H. 2011. “Synthesis of conformal phased arrays with embedded element pattern decomposition”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 59 (8), 2882–2888.

Yang, L., Zhang R. W., Staiculescu D., Wong C. P., Tentzeris M. M. 2009. “Novel conformal RFID-enabled module utilizing inkjet-printed antennas and carbon nanotubes for gas-detection applications”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 8, 653–656.

Yla-Oijala, P., Taskinen M. 2003. “Calculation of CFIE impedance matrix elements with RWG and nxRWG functions”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 51 (8), 1837–1846.

Yla-Oijala, P., Taskinen M. 2005. “Application of combined field integral equation for electromagnetic scattering by dielectric and composite objects”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 53 (3), 1168–1173.

Yla-Oijala, P., Taskinen M., Jarvenpaa S. 2005. “Surface integral equation formulations for solving electromagnetic scattering problems with iterative methods”, *Radio Sci.*, 40 (6002).

Yuan, X., Li Z., Rodrigo D., Mopidevi H. S., Kaynar O., Jofre L., Cetiner B. A. 2012. “A parasitic layer-based reconfigurable antenna design by multi-objective optimization”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 60 (6), 2690–2701.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ÖZGÜR SALİH ERGÜL
Proje No:	116E871
Proje Başlığı:	Radyo Frekansı Tanımlama Uygulamaları İçin Inkjet Anten Optimizasyonları (Ratio)
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK FAK. ELEKTRİK MÜH.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/09/2017 - 15/09/2018
Onaylanan Bütçe:	30000.0
Harcanan Bütçe:	17746.66
Öz:	<p>1002 programı kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenen Radyo Frekansı Tanımlama Uygulamaları İçin Inkjet Anten Optimizasyonları başlıklı bu projede, son yıllarda artarak kullanılan radyo-frekanslarında tanımlama (RFID) sistemleri için özgu?n ve etkin antenlerin tasarlanması amaçlanmıştır. Özellikle ucuz inkjet baskı yöntemine uygun olarak tasarlanan RFID antenlerinin benzetim ve tasarımları, proje kapsamında geliştirilen ve sonlu yapıların analizlerini sağlayan bir integral denklemi yönteminin genetik algoritmalarla içiçe geçtiği yeni bir optimizasyon mekanizmasıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tasarımların u?retilmesi ve RFID uygulamaları kapsamında test edilmesiyle, optimizasyon mekanizmasının etkinliği kanıtlanmıştır. Optimizasyon mekanizması, sadece inkjet baskıya uygun RFID antenlerinin değil, aynı zamanda benzeri radyo-frekans ve mikrodalga bileşenlerinin de gerçekçi olarak tasarlanmasına olanak sağlamaktadır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Radyo frekanslarında tanımlama, inkjet antenler, hesaplamalı elektromanyetik, optimizasyon
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır