



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ÇOK MODLU REZONATÖRLER KULLANARAK ÇİPSİZ RFID ETİKETLERİN
TASARIMI

ENGİN DOĞAN

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ÇOK MODLU REZONATÖRLER KULLANARAK ÇİPSİZ RFID ETİKETLERİN
TASARIMI

ENGİN DOĞAN

Doktora Tezi

Danışman

Prof. Dr. Adnan GÖRÜR

Aralık 2023

Engin DOĞAN tarafından **Prof. Dr. Adnan GÖRÜR** danışmanlığında hazırlanan “**ÇOK MODLU REZONATÖRLER KULLANARAK ÇİPSİZ RFID ETİKETLERİN TASARIMI**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik - Elektronik Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Celal YILDIZ, Erciyes Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Adnan GÖRÜR, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Ceyhun KARPUZ, Pamukkale Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU, Erciyes Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Yasemin ALTUNCU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Mustafa KARATEPE
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Engin DOĞAN

ÖZET

ÇOK MODLU REZONATÖRLER KULLANARAK ÇİPSİZ RFID ETİKETLERİN TASARIMI

DOĞAN, Engin

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Adnan GÖRÜR

Aralık 2023, 140 sayfa

Modern kablosuz iletişim sistemlerinde önemli bir yere sahip olan RFID (Radio Frequency Identification – Radyo Frekansı ile Tanımlama) teknolojisinde yaşanan gelişmeler, nesnelerin takip ve tanımlama işlemleri için oldukça önem arz etmektedir. RFID teknolojisi, daha geniş görüş alanı ve uzun okuma menzili performansına sahip olması bakımından günümüzde neredeyse her sektörde kullanılan barkod teknolojisine kıyasla önemli üstünlüklere sahiptir. Bu kapsamda, düşük maliyetli mikroşerit çipsiz RFID etiket tasarımlarında kod çeşitliliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar da oldukça önem kazanmıştır. Bu tez çalışmasında çipsiz RFID etiket için üç frekans kodu üretebilen çift modlu rezonatör, beş frekans kodu üretebilen üç modlu rezonatör ve sekiz frekans kodu üretebilen kuplaj mekanizmasına sahip üç modlu rezonatör devre modelleri teorik analizleri ile birlikte ortaya konulmuştur. Bit sayısının artırılması amacıyla, önerilen rezonatör modelleri kullanılarak çoklu rezonatör devreleri tasarlanmıştır. Bu devrelerin giriş ve çıkış kapılarına bit frekanslarını kapsayacak şekilde geliştirilen geniş bant monopol antenler eklenerek çipsiz RFID etiket tasarımları gerçekleştirilmiştir. Önerilen etiketlerin performanslarını test etmek için farklı frekans kodlarına sahip etiketler üretilmiş ve farklı koşullarda başarıyla test edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Mikroşerit, çift-modlu rezonatör, üç-modlu rezonatör, çoklu rezonatör, geniş bant, monopol anten, çipsiz, RFID etiket.

SUMMARY

DESIGN OF CHIPLESS RFID TAGS USING MULTI-MODE RESONATORS

DOGAN, Engin

Nigde Omer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Adnan GORUR

December 2023, 140 pages

Developments in RFID (Radio Frequency Identification) technology which has an important place in modern wireless communication systems, are very important for tracking and identification of objects. RFID technology has significant advantages compared to barcode technology which is used in almost every sector today, in terms of its wider sight and long reading range performance. In this context, studies to increase code variation in low-cost chipless RFID tag designs have gained importance. In this thesis, circuit models of a dual-mode resonator that can generate three frequency codes with an easy method, triple-mode resonator that can generate five frequency codes, and triple-mode resonator circuit with coupling mechanism that can generate eight frequency codes have presented with their theoretical analysis for the chipless RFID tags. In order to increase the number of bits, multi-resonator circuits have been designed using the proposed resonator models. Chipless RFID tag designs have been presented by integrating wideband monopole antennas developed to cover bit frequencies to the input and output ports of these circuits. To test the performance of the proposed tags, tags with different frequency codes have been fabricated and successfully tested under different circumstances.

Keywords: Microstrip, dual-mode resonator, triple-mode resonator, multi-resonator, wide band, monopole antenna, chipless, RFID tag.

ÖN SÖZ

Doktora tez sürecimde araştırma ve çalışmalarına engin bilgi birikimi ve tecrübeleri ile ışık tutup yol gösteren yine bu süreçte yaşadığım her türlü zorlukta bana vermiş olduğu desteklerinden dolayı ve son olarak da öğrencisi olmaktan her zaman gurur ve mutluluk duyacağım danışmanım Sayın Prof. Dr. Adnan GÖRÜR'e sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunuyorum.

Bulduğum noktaya gelmemde üzerimde çok emeği olan, her zaman kendime örnek olarak aldığım, gerek tez çalışmalarında gerekse hayatımda bana vermiş olduğu destek ve paylaşmış olduğu değerli fikirleri için Sayın Doç. Dr. Ali Kürşad GÖRÜR'e teşekkürlerimi içtenlikle sunuyorum.

Tez döneminde, bilgi birikimleriyle değerlendirme ve katkıda bulunan saygıdeğer jüri üyelerine şükranlarımı sunarım.

Tezimin son döneminde hayatıma giren ve bu zorlu süreçte yanımda olup vermiş olduğu destekle hem moral hem de motivasyon kaynağım olan yol arkadaşım İmran Aybüke POLAT'a çok teşekkür ediyorum.

Doktora tezimi hayatım boyunca yanımda olan, beni her durumda destekleyen, güvenlerini her zaman arkamda hissederek güç aldığım sevgili annem Füsun DOĞAN'a, babam Yusuf DOĞAN'a ve ablam Gülin DOĞAN'a büyük bir teşekkürle ithaf ediyorum.

Bu çalışmaya 119E476 numaralı proje ile finansal destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xv
SİMGE VE KISALTMALAR	xvi
BÖLÜM I.....	1
GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
1.2. Literatür Özeti	3
BÖLÜM II	29
ÇİFT MODLU ÜÇ FREKANS KODLU REZONATÖR MODELİ ve ÇİPSİZ RFID ETİKET TASARIMI	29
2.1. Dikdörtgen Yama Elemanlı Geniş Bant Monopol Anten Tasarımı	30
2.2. Önerilen Çift Modlu Üç Frekans Kodlu Rezonatör Modeli ve Çipsiz RFID Etiket Tasarımı	33
2.2.1. Önerilen Çift Modlu Rezonatör Modeli	33
2.2.2. Rezonatör Analizi ve Kodlama Tekniği	35
2.2.3. Önerilen Rezonatör Modeli Kullanılarak Çoklu Rezonatör Devresi Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar	40
2.2.4. Çipsiz RFID Etiket Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar	45
BÖLÜM III	50
ÜÇ MODLU BEŞ VE SEKİZ FREKANS KODLU REZONATÖR MODELLERİ ve ÇİPSİZ RFID ETİKET TASARIMLARI	50
3.1. Dairesel Yama Elemanlı Geniş Bant Monopol Anten Tasarımı	50
3.2. Önerilen 5 Frekans Kodlu Rezonatör Modeli ve Çipsiz RFID Etiket Tasarımı	55
3.2.1. Simetrik Rezonatör Analizi	56
3.2.2.5 Frekans Kodu Üretebilen Üç Modlu Rezonatör Tasarımı	61

3.2.2.1. Saplama Geometrisinin Belirlenmesi	64
3.2.2.2. Üç Modlu Rezonatörde Modların Kontrolü	69
3.2.3. Çoklu Rezonatör Devresi Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar.....	72
3.2.4. Çipsiz RFID Etiket Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar	79
3.3. Üç Modlu Sekiz Frekans Kodlu Rezonatör Modeli ve Çipsiz RFID Etiket Tasarımı.	84
3.3.1. Rezonatör Analizi ve Kodlama Tekniği	85
3.3.2. Yedi ve Sekiz Frekans Kodu Üretebilen Üç Modlu Rezonatör Tasarımı....	95
3.3.2.1. Yedi Frekans Kodu Üretebilen Rezonatör Tasarımı ve Çoklu Rezonatör Devresi.....	95
3.3.2.2. Sekiz Frekans Kodu Üretebilen Rezonatör Tasarımı ve Parametrik Değişimlerin İncelenmesi	104
3.3.3. 8 Frekans Kodlu Rezonatör Modeli Kullanılarak Çoklu Rezonatör Devresi Tasarımı	115
3.3.4. Çipsiz RFID Etiket Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar	117
BÖLÜM V	125
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	125
KAYNAKLAR	128
ÖZGEÇMİŞ	140
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN YAYINLAR.....	141

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. 4 rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri	41
Çizelge 2.2. 7 rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri (mm)	44
Çizelge 3.1. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinde bulunan 3 modlu rezonatörlere ait boyut bilgileri (mm)	74
Çizelge 3.2. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinde bulunan 3 modlu rezonatörlere ait boyut bilgileri (mm)	79
Çizelge 3.3. İki rezonatörlü devre tasarımına ait boyut bilgileri (mm)	102
Çizelge 3.4. Dört rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri (mm).....	104
Çizelge 3.5. Beş rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri (mm).....	117

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çipsiz RFID etiket tabanlı temel RFID sistem şeması	2
Şekil 1.2. 35 spiral rezonatör içeren çipsiz RFID etiket tasarımı	9
Şekil 1.3. Önerilen çoklu rezonatöre ait devre modeli (a) ve frekans cevabı (b)	10
Şekil 1.4. Önerilen spiral rezonatör modeli (a) ve frekans cevabı (b)	10
Şekil 1.5. Önerilen rezonatör modeli kullanılarak iki rezonatörlü devre modeli (a) ve (b) frekans cevabı.....	11
Şekil 1.6. Üç spiral rezonatörlü devre (a) tasarımı (b) araya girme kaybı (S_{21}) cevabı..	11
Şekil 1.7. Üç spiral rezonatörlü alıcı/verici anten olarak tek kare yama antene sahip çipsiz RFID etiket modeli.....	12
Şekil 1.8. Önerilen altıgen şekilli bölünmüş rezonatör modeli ile oluşturulan çoklu rezonatör devresi	13
Şekil 1.9. 4 GHz (a), 5 GHz (b), 6 GHz (c) ve 7.5 GHz (d) frekanslarında çoklu rezonatör devresine ilişkin yük dağılımları	13
Şekil 1.10. Parçalanmış tip açık halka rezonatör yapısı	14
Şekil 1.11. Önerilen 7 sapsamalı rezonatör modeli (a) ve frekans cevabı (b).....	16
Şekil 1.12. Çoklu rezonatör devre tasarımı (a) ve frekans cevabı (b)	17
Şekil 1.13. 4 frekans kodu üretebilen önerilen rezonatör devresi (Abdulkawi ve Sheta, 2019)	19
Şekil 1.14. 4 frekans kodlu rezonatöre ait frekans cevapları (Abdulkawi ve Sheta, 2019)	19
Şekil 1.15. Önerilen spiral rezonatörlü devre modeli (a) ve elde edilebilen üç koda ait frekans cevabı (b).....	20
Şekil 1.16. İki rezonatörlü devre modeli (a) ve $wısı kol2$ değişiminin araya girme kaybı (S_{21}) cevabına etkisi (b)	21
Şekil 1.17. Isı kontrol kolu ve sapsama bağlı rezonatörler içeren çoklu rezonatör devresi modeli (a) ve (b) frekans cevabı	21
Şekil 1.18. Çoklu rezonatör devresi modeli (a) ve frekans cevabı (b) (Dinesh vd., 2014b)	23
Şekil 1.19. 5 bitli çipsiz etiket devre modeli (a) ve frekans cevabı (b) (Zhang vd., 2019)	23

Şekil 1.20. Tasarlanan '000000000' kodlu 9-bit çipsiz RFID etiket tasarımı	24
Şekil 1.21. '10101010101' kodlu etiket tasarımına ait, saplamalar kaldırılmış model (a), saplamalar kuplajlı olacak şekilde modifiye edilmiş model (b), geniş bant frekans cevabı (c) ve dar bant frekans cevabı (d)	24
Şekil 1.22. Tasarlanan 4-bit çipsiz RFID etiket modeli (a) ve frekans cevabı (b).....	25
Şekil 2.1. Önerilen geniş bant anten modeli (a) ve S_{11} - kazanç grafiği (b)	31
Şekil 2.2. 6.5 GHz (a), 7.5 GHz (b) ve 8.5 GHz (c) frekanslarında önerilen antene ait ışınım örüntüleri simülasyon cevabı (düz çizgi: eş-pol., kesik çizgi: çapraz-pol.)	32
Şekil 2.3. 3D ışınım üstü simülasyon cevabı (Sol: Önden görünüm, Sağ: Arkadan görünüm).....	33
Şekil 2.4. Yama elemanlı üç kod kapasiteli açık ve kapalı halka rezonatörler arasındaki geçiş	34
Şekil 2.5. Farklı topolojilerin sağladıkları kodlama türleri.....	35
Şekil 2.6. Halka rezonatöre ait eşdeğer devre modeli (a), çift mod yarı-devre eşdeğer devre modeli (b) ve tek mod yarı-devre eşdeğer devre modeli (c)	36
Şekil 2.7. Çift-tek mod karakteristik empedans değişiminin teorik normalize frekans cevabına etkisi (a) ve farklı frekans kodlarına ait teorik normalize frekans cevapları (b)	40
Şekil 2.8. Tasarlanan 4-rezonatörlü çoklu rezonatör devresi.....	41
Şekil 2.9. Çoklu rezonatör devresinden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları.....	42
Şekil 2.10. Üretilen çoklu rezonatör devrelerine ait simülasyon ve ölçüm sonuçları a) rezonatör kodu: 00, b) rezonatör kodu: 01	43
Şekil 2.11. Önerilen rezonatör modeli kullanarak tasarlanan çoklu rezonatör devresi ..	44
Şekil 2.12. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinden elde edilen bazı frekans kodları ...	45
Şekil 2.13. Önerilen çipsiz RFID etiketin üst (a) ve alt (b) görünümü.....	46
Şekil 2.14. Frekans kodu: 0000000000000000 (a) ve frekans kodu: 01010101010101 (b) olan çipsiz RFID etikete ait simülasyon ve ölçüm sonuçları.....	48
Şekil 3.1. Tasarlanan geniş bant monopol anten tasarımı.....	51
Şekil 3.2. Bölüm 3.2 (a) ve Bölüm 3.3 (b)'de kullanılan antene ait yansıma katsayısı ve maksimum kazanç frekans cevabı	52
Şekil 3.3. Şekil 2.5.(a)'da frekans cevabı verilen monopol antenin farklı frekanslarda ve farklı düzlemlerdeki ışınım örüntüleri.....	54

Şekil 3.4. Şekil 2.5.(b)'de frekans cevabı verilen monopol antenin farklı frekanslarda ve farklı düzlemlerdeki ışınma örüntüleri.....	55
Şekil 3.5. Önerilen üç modlu rezonatörün simetrik durumuna ait eşdeğer devre modeli (a), çift mod yarı-devre eşdeğer devre modeli (b) ve tek mod yarı-devre eşdeğer devre modeli (c).....	57
Şekil 3.6. Farklı l_s ve l_c uzunluklarının normalize frekanslarda araya girme kaybına (S_{21}) üzerinde etkisi; simülasyon sonuçları (a) ve teorik analiz sonuçları (b).....	60
Şekil 3.7. Rezonatör tasarımı: açık halka rezonatör modeli (a), tek saplama yüklü açık halka rezonatör modeli (b) ve çift saplama yüklü açık halka rezonatör modeli (c).....	62
Şekil 3.8. Önerilen rezonatör modeline ait farklı konfigürasyonlarda elde edilen frekans cevabı.....	63
Şekil 3.9. Önerilen çipsiz RFID etikete ait frekans kodları.....	63
Şekil 3.10. Önerilen rezonatörün simetrik ve asimetrik saplamalı devre tasarımları (a) ve devrelere ait frekans cevapları (b).....	65
Şekil 3.11. Dikdörtgen yama saplama (a) ve halka saplama (b) modelinin kullanıldığı rezonatör modeli ve farklı frekans kodlarına ait frekans cevapları.....	66
Şekil 3.12. Halka saplama ve köşe kenarlı saplama kullanılan rezonatör modeli (a) ve iki saplama için de elde edilen frekans cevapları (b).....	67
Şekil 3.13. Köşe kenarlı saplamalı iki rezonatörlü devre modeli (a) ve devreden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları (b).....	68
Şekil 3.14. Önerilen üç modlu rezonatör modeli.....	69
Şekil 3.15. Kuplajlı hat genişliğinin (w_{rf}) frekans cevabına olan etkisi.....	70
Şekil 3.16. l_{s1} ve l_{s2} (a) ve l_r (b) kolu uzunluklarının rezonans frekansları üzerindeki etkisi.....	71
Şekil 3.17. Önerilen rezonatör modeli tarafından elde edilen beş frekans koduna ait frekans cevapları.....	72
Şekil 3.18. Önerilen üç modlu rezonatörlü çoklu rezonatör devresi tasarımı.....	73
Şekil 3.19. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları.....	75
Şekil 3.20. Üretilen çoklu rezonatör devrelerine ait fotoğraflar, simülasyon ve ölçüm sonuçları a) rezonatör kodu: 000, b) rezonatör kodu: 110, c) rezonatör kodu: 010.....	76
Şekil 3.21. 8 rezonatörlü çoklu rezonatör devresi.....	77

Şekil 3.22. Geliştirilmiş 8 rezonatörlü çoklu rezonatör devresi	78
Şekil 3.23. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinden elde edilen farklı frekans kodlarına ait frekans cevapları	78
Şekil 3.24. Önerilen Çipsiz RFID etiket tasarımına ait üst ve alt görünüm	80
Şekil 3.25. Frekans kodu: 000000000000000000000000 (a) ve frekans kodu: 01010101010101010101010101010101 (b) olan önerilen çipsiz RFID etikete ait simülasyon ve ölçüm sonuçları	82
Şekil 3.26. Cam malzeme (a), plastik su şişesi (b), sert plastik malzeme (c) ve metalik malzeme (d) için kurulan test düzeneği ve elde edilen ölçüm sonucunun simülasyon sonucu ile karşılaştırılması	83
Şekil 3.27. Sekiz frekans kodu üretebilen önerilen üç modlu rezonatör konfigürasyonu ve kuplaj mekanizmasına ait eşdeğer devre modeli	86
Şekil 3.28. d_{21} (a), d_{22} (b) ve d_{23} (c) değişiminin rezonans frekansları üstündeki etkisi .	92
Şekil 3.29. d_{21} (a), d_{22} (b) ve d_{23} (c) değişiminin rezonans frekansları üstündeki birbirinden bağımsız şekilde etkisi	93
Şekil 3.30. “000”-“001”-“011”-“110” frekans kodları (a) ve “010”-“100”-“101”-“111” frekans kodları (b) için elde edilen normalize frekans cevapları	95
Şekil 3.31. 7 frekans kodu sağlayan rezonatör kullanılan devre modeli	96
Şekil 3.32. “000”-“100”-“011”frekans kodları (a) ve “010”-“001”-“101”-“111” frekans kodları (b) için elde edilen frekans cevapları.....	97
Şekil 3.33. Önerilen revize edilmiş 7 frekans kodu sağlayan rezonatör modeli.....	98
Şekil 3.34. Önerilen rezonatöre ait eşdeğer devre modeli	98
Şekil 3.35. “000”-“001”-“010” frekans kodları (a) ve “011”-“100”-“101”-“111” frekans kodları (b) için elde edilen normalize frekans cevapları.....	100
Şekil 3.36. 7 frekans kodu üreten rezonatör modeli kullanılarak iki rezonatörlü devre modeli	101
Şekil 3.37. 7 frekans kodu sağlayan iki rezonatörlü devrenin bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları	101
Şekil 3.38. 7 frekans kodu üreten rezonatör modeli kullanılan çoklu rezonatör devresi modeli (a) ve çoklu rezonatör devresinden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları (b)	103
Şekil 3.39. 8 frekans kodu üretebilen rezonatör konfigürasyonu	105
Şekil 3.40. g mesafesinin (a) 0.3 mm, (b) 1.0 mm ve (c) 1.6 mm olması durumunda elde edilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları.....	107

Şekil 3.41. 0.3 (a), 0.5 (b), 0.7 (c) ve 1.0 mm (d) “wc” değerleri için elde edilen için sekiz frekans koduna ait frekans cevapları.....	108
Şekil 3.42. Simülasyon sonuçlarından elde edilen 8 frekans koduna ait frekans cevabı (a) ve üç modlu rezonatöre ait teorik ve simüle edilen frekans cevabı (b)	110
Şekil 3.43. Yama elemansız saplamaların kullanıldığı önerilen üç modlu rezonatör modeli (a) ve rezonatörden elde edilebilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları (b).....	111
Şekil 3.44. 0.3 (a), 0.5 (b), 1.2 (c), 1.6 (d) ve 2.0 mm (e) “w _s ” genişliği için elde edilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları	114
Şekil 3.45. 8 frekans kodu üreten rezonatör modeli kullanılan çoklu rezonatör devresi tasarımı (a) ve çoklu rezonatör devresinden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları (b)	116
Şekil 3.46. Tasarlanan çipsiz RFID etiket devresinin üst ve alt görünümü.....	117
Şekil 3.47. Etiketlere ait simülasyon ve ölçüm sonuçları: 0000000000000000 kodlu etiket (a), 0101010101010101 kodlu etiket (b) ve 0000000000000000 frekans kodlu etikete ait farklı mesafe ve konumlandırmadan elde edilen ölçüm sonuçları (c)	120
Şekil 3.48. Düz pozisyon için (a) ve bükülmüş pozisyon için (b) plastik yüzey üzerine yerleştirilmiş etiketin farklı pozisyonlardaki ölçüm düzeneği ve elde edilen ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması	121
Şekil 3.49. Bükülmüş pozisyonda plastik su şişesi için (a) ve düz pozisyonda tahta malzeme için (b) kurulan ölçüm düzeneği ve elde edilen ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması	122
Şekil 3.50. Düz pozisyonda (a) ve bükülmüş pozisyonda (b) Metalik yüzey üzerine yerleştirilmiş etiketin farklı pozisyonlardaki ölçüm düzeneği ve elde edilen ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması	124

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. İmal edilen çoklu rezonatör devreleri	80
Fotoğraf 2.2. Tasarlanan çipsiz RFID etikete ait ölçüm düzeneği.....	80
Fotoğraf 3.1. Tüm bitlerin “0” olduğu etiketin üst görünümü (a), bitlerin sırasıyla “01” olduğu etiketin üst görünümü (b), üretilen etiketlerin alt görünümü (c).	80
Fotoğraf 3.2. Etiketlerin test edildiği ölçüm düzeneği.....	81
Fotoğraf 3.3. Test ortamı (a) ve imal edilen çipsiz RFID etiketler (b).....	118



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
V	Gerilim
I	Akım
Z	Empedans
L	İndüktans
C	Kapasitans
ϵ	Dielektrik sabiti
ϵ_r	Bağıl dielektrik sabiti
ϵ_{eff}	Efektif dielektrik sabiti
λ_g	Kılavuzlanmış dalga boyu
λ	Dalga boyu
f	Frekans
c	Işık hızı
Ω	Ohm
θ	Elektriksel Uzunluk
β	Faz sabiti
°	Derece
S ₁₁	Geri dönme kaybı (Saçılma parametresi)
S ₂₁	Araya girme kaybı (Saçılma parametresi)
Kısaltmalar	Açıklama
RFID	Radio Frequency Identification (Radyo Frekansı ile Tanımlama)
GHz	Giga Hertz
MHz	Mega Hertz
QR	Quick Response (Hızlı Tepki)
UWB	Ultra Wide Band (Ultra Geniş Bant)
dB	Desibel
dBi	Desibel İzotropik
mm	Milimetre

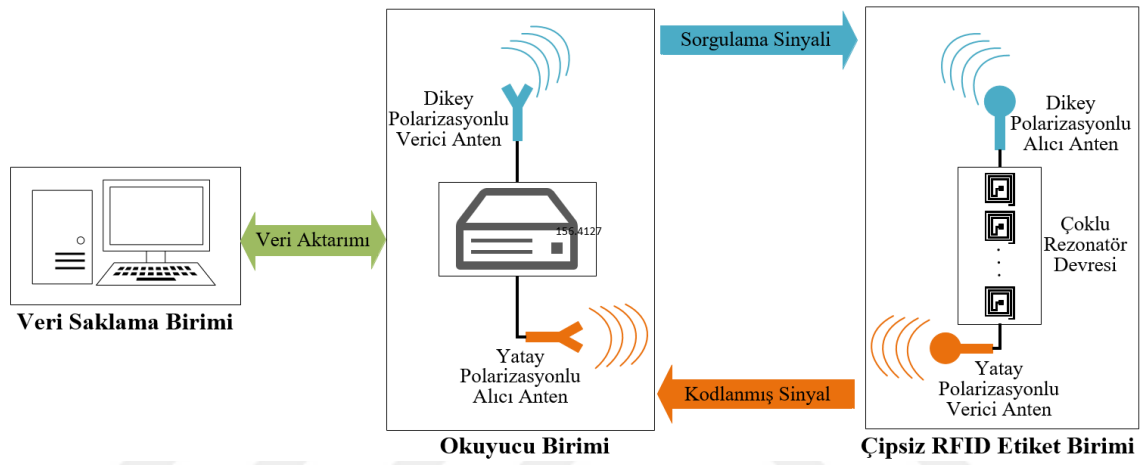
BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Günümüzde, gelişen teknoloji ile birlikte ihtiyaçların giderilmesine yönelik sağlık, gıda, giyim, eğitim gibi hemen her sektörde üretim hızı ve ürün çeşitliliği hızla artmaktadır. Bu artış, sadece üretim bakımından değil, ürünleri tanımlayan etiket çeşitliliği, ürünlerin depolanması ve alışveriş sürecindeki takip işlemlerinde de zorluklar meydana getirmektedir. Bu yüzden, üretimin yanı sıra ürünlerin tanımlanması ve takip işlemleri de oldukça önemlidir. Günümüzde, ürün tanımlama ve takip işlemleri çoğunlukla barkodlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Barkodlar, görüş alanı teknolojisine dayalı bir sisteme sahip olmakla birlikte okuma menzili açısından oldukça kısıtlıdır. Son yıllarda, modern kablosuz haberleşme sistemlerindeki gelişmeler ile birlikte RFID (Radio Frequency Identification–Radyo Frekansı ile Tanılama) sistem teknolojisi önem kazanmıştır. RFID sistem teknolojisinde nesne tanımlama ve takip işlemleri, radyo / mikrodalga frekanslarındaki elektromanyetik dalgalar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu sayede, hem daha uzun okuma menzili hem de aynı anda birden çok tarama işleminin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır. Çipsiz RFID etiket tabanlı temel bir çipsiz RFID sistem tasarımı Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, sistem üç ana birimden meydana gelmektedir. Çipsiz RFID etikete sorgulama sinyalinin gönderen verici anten ve etiketten geri gönderilen kodlanmış sinyali alan alıcı anten okuyucu birim içerisinde bulunmaktadır. Ayrıca bu sinyallerin analog-dijital/dijital-analog dönüşüm işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlayan dönüştürücülerin yer aldığı RFID okuyucu modülü de bu birimde yer almaktadır. Veri saklama birimi ise, okuyucu birimi tarafından elde edilen bu verilerin depolandığı ve veri takibinin gerçekleştirildiği birimdir. Son olarak çipsiz RFID etiket birimi ise çoklu rezonatör devresi ile bu devrenin giriş ve çıkışlarına bağlı bulunan yatay/dikey polarizasyona sahip geniş bant monopol antenler içermektedir. Etiket üzerinde yer alan alıcı monopol anten, okuyucu birimindeki verici antenden gönderilen sorgulama sinyalinin alınmasını ve çoklu rezonatör devresine aktarılmasını sağlar. Yine etiket üzerinde yer alan verici anten ise çoklu rezonatör devresi tarafından kodlanmış olan sinyalin okuyucu tarafındaki alıcı antene aktarılması görevini görür. Bu birimin en önemli parçası sinyal üzerinde etiketin kodunu belirleyen çoklu

rezonatör devresinde yer alan rezonatör modelidir. Etikete ait bit sayısı, frekans kodu sayısı, boyut, frekans spektrum verimliliği gibi birçok önemli parametre kullanılan rezonatör modeli tarafından tayin edilmektedir. Ayrıca, bir rezonatör tarafından elde edilebilecek bit ve frekans kodu sayısının artırılması etiket boyutu bakımından da büyük önem arz etmektedir. Dolayısıyla, çipsiz RFID etiket birimi üzerinde yer alan en önemli bölümün kullanılan rezonatör modeli olduğu açıkça söylenebilir. Bu kapsamda literatürde çipsiz RFID etiketler için önemli üstünlüklere sahip birçok rezonatör modeli ve kodlama tekniği sunulmuştur.



Şekil 1.1. Çipsiz RFID etiket tabanlı temel RFID sistem şeması

Tez kapsamında, RFID sistemlerde kullanılmak üzere takip edilecek ürün sayısının önemli ölçüde artırılması amacıyla yüksek kod çeşitliliği sağlayan rezonatör modelleri geliştirilmiş ve bu rezonatörlerin kullanıldığı spektral imza tabanlı (SİT) çipsiz RFID etiket tasarımları ortaya konulmuştur. SİT etiketlerde, rezonatörler tarafından sağlanan rezonans frekansları etikete ait bitleri temsil etmektedir. Etiket kodlanmasında, bit frekansında rezonansın mevcut olması durumunda ilgili bitin değeri lojik “0” ve rezonansın olmadığı durumda ise lojik “1” olarak tanımlanmaktadır. Tezin bundan sonraki bölümlerinde lojik “0” ve lojik “1”, sadece “0” ve “1” olarak ifade edilecektir.

Etikete ait kod çeşitliliğinin artırılması bit sayısının artırılması ile mümkündür. Bu kapsamda tez çalışmasında, çok modlu rezonatör yapıları üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak açık ve kapalı halka rezonatör modeli arasında geçiş sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, etiket için bir rezonatörden 3 adet frekans kodunun elde edilmesine imkan sağlamıştır. Önerilen devre konfigürasyonuna ait frekans

cevabı teorik olarak elde edilmiştir. Daha sonra, çoklu rezonatör devresi ve geniş bant monopol anten devresi tek bir devrede birleştirilerek çipsiz RFID etiket tasarımı gerçekleştirilmiştir. Test edilmesi bakımından iki farklı koda sahip etiket üretilmiş ve ölçüm sonuçları simülasyon sonuçları ile uyumlu olarak elde edilmiştir.

Tez kapsamında yer alan diğer bir çalışmada, çipsiz RFID etiketlerde kullanılmak üzere üç modlu asimetrik saplama yüklü açık halka rezonatör tasarımı geliştirilmiştir. Önerilen rezonatör modeli, saplamaların ve rezonatörün varlığına bağlı olarak etiket için 5 adet frekans kodu sağlamaktadır. Tek rezonatörlü devreye ait teorik analiz çalışmaları gerçekleştirildikten sonra farklı elektriksel uzunlukta 8 adet üç modlu rezonatörün yer aldığı 5^8 adet frekans kodu kapasiteli çipsiz RFID etiket tasarlanmıştır. Etikete ait test işlemleri, etiketin farklı özellikte malzemeler üzerine yerleştirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, etiketin eğrisel ve düz formda farklı malzemeler üzerinde kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Son olarak tez kapsamında, bir başka üç modlu asimetrik saplama yüklü açık halka rezonatör tasarımı geliştirilmiştir. Bu rezonatör modelinin kullanıldığı devre, 5 frekans kodu üretebilen rezonatör modelinin yer aldığı devre ile karşılaştırıldığında hem saplama bağlantısı hem de kuplaj mekanizması bakımından farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar önerilen rezonatör modelinden etiket için 8 adet frekans kodunun üretilmesine imkan sağlamaktadır. Önerilen üç modlu rezonatör devresine ait frekans cevabı ve bu üç modun frekans sahasında birbirinden bağımsız bir şekilde arzu edilen frekanslarda elde edilebildiği teorik analiz sonucunda elde edilen normalize frekans cevaplarında gösterilmiştir. Toplamda 15 bit ve 8^5 adet frekans kodu üretebilen 5 adet rezonatörün yer aldığı çipsiz RFID etiket tasarlanmış ve test işlemleri için farklı frekans koduna sahip iki adet etiket üretilmiştir. Üretilen etiketlerin test işlemleri, hem düz hem de eğrisel biçimli farklı tip ürünler üzerinde başarıyla gerçekleştirilmiştir.

1.2. Literatür Özeti

Son yıllarda çipsiz RFID etiket sistemleri teknolojisinde yaşanan gelişmelerle birlikte günümüzde çipsiz RFID etiketler market, depo, kütüphane gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Preradovic ve Karmakar, 2010b; Subrahmannian ve Behera, 2022a; Patre, 2022). Çipsiz RFID etiketler bu kullanım alanlarının yanı sıra, giyilebilir teknoloji,

sağlık ve medikal alanlarında da kendisine kullanım alanı bulmaktadır (Behera, 2022; Subrahmannian ve Behera, 2022b). Yapılan araştırmalar sonucunda, çipsiz RFID etiketlerin hemen hemen her sektörde ürün takip ve tanımlama işlemleri için kullanılan barkod teknolojisine bir alternatif olacağı söylenebilir. Bilindiği üzere, barkodlar 1970'lerin başından itibaren ürün ve stok takip işlemleri için kullanılmaktadır. Barkodlar, oldukça düşük maliyetli bir teknoloji olsa da okuma işlemi görüş açısı tabanlı gerçekleştirildiğinden hem kısıtlı tarama açısı hem de kısa okuma menzili gibi önemli dezavantajlara sahiptir. RFID teknolojisinin kullanıldığı sistemde pasif etiket sınıfında yer alan çipsiz RFID etiketler, herhangi bir çip maliyetine sahip olmadığından barkodlar ile kıyaslanabilir bir maliyete sahiptir (Karmakar, 2010). Ayrıca, barkod teknolojisi okuma işlemi görüş açısı tabanlı gerçekleştirilmesinden dolayı büyük şirketler için oldukça yüksek işçilik ve insan hatası kaynaklı maliyetler ortaya çıkarmaktadır. RFID etiket sistemleri, görüş açısı yerine yakın alan teknolojisi ile otomatik takip işlemi gerçekleştirilmesi sayesinde işçilik maliyetini oldukça azaltmanın yanı sıra insan kaynaklı hataları da ortadan kaldırmaktadır (D'Hont, 2006).

RFID sistemlerinde veri kodlama kısmı çipli ve çipsiz olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Üzerinde çip bulunan aktif etiketler, çipsiz pasif etiketlere kıyasla daha yüksek kodlama kapasitesi ve daha esnek çalışma bandı avantajlarına sahiptir. Ancak, bu etiketlerde çip nedeniyle hem yüksek maliyet hem de çevresel koşullara bağlı olarak olası arızalanma gibi olumsuz durumlar söz konusudur (Sharma ve Hashmi, 2021). Çipsiz RFID etiketler çipli RFID etiketlere göre maliyet açısından büyük bir avantaj sağladığı için daha çok tercih edilmektedir. Literatürde bulunan çipsiz RFID etiketler, zaman domeni reflektometri (Time-Domain Reflectometry - TDR) tabanlı, genlik/faz geri saçılım modülasyonu tabanlı ve SİT olmak üzere üç ana başlık altında toplanmıştır. Bu üç başlıkta yer alan çalışmalara ait detaylı açıklamalara aşağıda yer verilmiştir.

Zaman domeni reflektometri tabanlı etiketlerde veri kodlama işlemi zaman domeninde ve etiketten yansıyan yankı darbeleri dinlenerek gerçekleştirilir (Harma vd., 2009; Harma vd., 2008a; Liu ve Yao, 2008; Harma vd., 2008b; Plessky vd., 2006). Bu tür etiketler düşük maliyet ve uzun okuma menzili avantajlarına sahiptir. Ancak, etiket tarafından sağlanan bit sayılarının artırılması bakımından kısıtlıdırlar. Bu da etiket için kod çeşitliliğinin artırılmasına engel olmaktadır. Kod çeşitliliğinin artırılması konusunda

kısıtlı olan bu tür etiketler yüksek nesne çeşitliliğine sahip sektörler için kullanışlı değillerdir.

Genlik-Faz Modülasyon tabanlı etiketlerde, etiketten geri saçılan sinyalin genlik veya faz bilgisi kontrol edilerek veri kodlaması gerçekleştirilmektedir (Mukherjee, 2007; Schussler vd., 2009; Mandel vd., 2009; Balbin ve Karmakar, 2009; Yang vd., 2009; Jheng vd., 2012). Bu tür etiketler, indüktif ve kapasitif devre elemanlarıyla, bir başka deyişle LC devreler ile tasarlanırlar ve dar bant genişliğine sahiptirler. Bu nedenle, bu başlık altında yer alan etiketler de TDR tabanlı etiketler gibi düşük bit sayısı performansına sahiptir ve kod çeşitliliği bakımından kısıtlıdır.

SİT RFID etiketlerde veri kodlama işlemi, önceden tanımlanmış bir frekans spektrumunda yer alan bazı durumlara göre gerçekleştirilebilmektedir. Bu durumlara rezonansın mevcudiyeti, rezonans frekansında meydana gelen faz ve genlik seviyesindeki değişim, rezonans frekansının kaydırılması gibi durumlar örnek olarak verilebilir. Bu tür etiketlerde rezonans frekanslarının mevcudiyeti, veri kodlama işleminde en sık kullanılan parametredir. Etiket üzerinde yer alan devreye ait her bir rezonans frekansı çipsiz RFID etiket için bir biti temsil etmektedir. Rezonans frekanslarının mevcut olup olmamasına bağlı olarak bit durumu "0" veya "1" olarak kabul edilmekte ve buna bağlı olarak kodlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Rezonans frekanslarının elde edilmesine yönelik literatürde çoklu rezonatör devreleri (Preradovic vd., 2009; Koswatta ve Karmakar, 2012; Bhuiyan vd., 2013; Dinesh vd., 2014a; Habib vd., 2016; Song vd., 2017; Abdulkawi ve Sheta, 2018; Ferreira vd., 2018), LC rezonant devreleri (Shao vd., 2011; Shao vd., 2013; Kim vd., 2014; Dinesh vd., 2014b; Sharma ve Hashmi, 2017; Herrojo vd., 2017; Lopes ve Matos, 2019; Zhang vd., 2019; Athauda ve Karmakar, 2019), boşluk doldurma devreleri (McVay vd., 2006; Wang vd., 2018), kapasitif olarak ayarlanabilen rezonatörler (Jalaly ve Robertson, 2005a, 2005b; Girbau vd., 2012) gibi farklı yaklaşımlar yer almaktadır. Bölümün ilerleyen kısımlarında bu yaklaşımlara ait detaylı incelemelere yer verilmiştir.

SİT etiketler, veri kodlama işleminde kullanılan parametrenin türüne bağlı olarak iki sınıfa ayrılabilir. Bunlardan ilki, etiket üzerinde alıcı ve verici antenler kullanılması durumunda kodlama işleminin Saçılma parametrelerinden birisi olan araya girme kaybına (S_{21}) ait frekans cevabı üzerinden gerçekleştirildiği etiketlerdir. Bu tür etiketlerde

rezonatörler giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattına kuplajlı olacak şekilde yerleştirilerek iletim sıfırları bir başka ifadeyle rezonans frekansları elde edilmektedir. Okuyucu ve etiketin haberleşebilmesi için ise tasarlanan çoklu rezonatör devresinin giriş ve çıkış kapılarına yatay ve dikey polarizasyona sahip geniş bant monopol antenler bağlı olmalıdır. Bu tür etiketlerde, okuyucudan gelen sorgulayıcı sinyal etiketin alıcı anteni tarafından alınır ve çoklu rezonatör devresine aktarılır. Bu sinyal, çoklu rezonatör devresinin sahip olduğu rezonans frekanslarına bağlı olarak kodlanır. Kodlanmış sinyal, çoklu rezonatör devresinin çıkış kapısında ve alıcı antene dik olarak yerleştirilmiş verici anten yardımıyla okuyucu tarafındaki alıcı antene iletilir. Yatay ve dikey polarizasyonlu iki antene sahip çipsiz RFID etiketler, alınan sinyalin tekrar geri iletimine dayalı olduğu için yeniden iletim tabanlı çipsiz RFID etiketler olarak da adlandırılırlar. Bu tür etiketlerde antenlerin yatay ve dikey polarizasyona sahip olacak şekilde yerleştirilmesinin sebebi, birbirleri arasındaki girişimin mümkün olduğunca azaltılmak istenmesidir. Bu sayede, etikete gelen sorgulayıcı sinyal ve etiketten geri saçılan kodlanmış sinyalin birbirine girişimi ve etkisi en aza indirilmektedir. Çapraz polarizasyonlu olarak yerleştirilen monopol antenlerin çapraz polarizasyon kazancı ne kadar düşük olursa, antenler arasındaki girişimin daha az olması sağlanacaktır. Literatürde yer alan eş düzlemsel dalga kılavuzu beslemeli (Chang vd., 2008; Gautam vd., 2013; Pandey vd., 2016; Mohamed vd., 2017; Reha vd., 2018; Awadhwal ve Rengarajan, 2019, Karmakar, 2020) ve mikroşerit hat beslemeli (Jung vd., 2005; Sharma ve Hashmi, 2017; Kaur vd., 2018.) monopol antenler çipsiz RFID etiketlerde alıcı ve verici anten olarak sıklıkla kullanılmaktadır.

Çipsiz RFID etiketlerin diğer sınıfı ise kodlama işleminin radar kesit alanı (Radar-Cross Section, RCS) tabanlı gerçekleştirildiği etiketlerden oluşmaktadır. Bu tür etiketlerde, okuyucu sinyalinin alınması ve verilmesi işlemi için tek bir anten kullanılmaktadır. Nesnelerin tespit edilmesinde kullanılan bu teknikte radar kesit alanı, aslında nesnenin sorgulayıcı tarafından ne kadar algılanabilir olduğunu gösteren parametredir. Literatürde çok sayıda RCS-tabanlı çipsiz RFID etiket tasarımı yer almaktadır. Bu tasarımlarda; C-şekilli rezonatör (Vena vd., 2011), yarık rezonatör (Anam vd., 2017), yarıklı iletken yüklü açık halka rezonatör (Wang vd., 2018), L-şekilli rezonatör (Sharma vd., 2019; Drishyada vd., 2021), dairesel açık halka rezonatör (Athauda ve Karmakar, 2019), dairesel halka rezonatör (Gonzalez, vd., 2021), sekizgen-yuva rezonatör (Khan vd., 2021), basamak-empedanslı rezonatör (Helmy vd., 2021), artı(+)-şekilli rezonatör (Bhagure ve

Choudhory, 2021), açık halka rezonatör (Sai, vd., 2021) ve U-şekilli rezonatör (Lakshmanan, vd., 2021; Fathi vd., 2022) modelleri kullanılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan rezonatör modelleri tek bir rezonans frekansına sahip olup çipsiz RFID etiket için bir bit sağlamaktadır. Ayrıca, rezonatörün varlığı ve yokluğuna bağlı olarak bitin değeri “0” veya “1” olmak üzere 2 farklı değer alabilmektedir. Yine bu çalışmalarda, çipsiz RFID etiket için frekans kodu çeşitliliğinin artırılması amacıyla farklı elektriksel uzunluğa sahip olacak şekilde rezonatör sayısı artırılmış ve farklı frekanslarda bitlerin elde edilmesi sağlanmıştır. RCS tabanlı etiketlerde rezonatörler iç içe olacak şekilde yerleştirilerek tasarlanabilmektedir. Bu bakımdan, araya girme kaybı (S_{21}) cevabı üzerinden kodlama işleminin gerçekleştirildiği etiketlere göre daha kompakt devre boyutlarında olabilmektedirler. Bu kapsamda sunulan bir çalışmada Awan ve arkadaşları iki dikdörtgen halkanın birleştirilmesi ve sonrasında ortadan kesilmesi suretiyle kodlama işleminin gerçekleştirildiği halka rezonatör tasarımı önermişlerdir (Awan vd., 2020). Farklı elektriksel uzunlukta 10 adet rezonatör modelinin kullanıldığı çipsiz RFID etiket farklı taban malzemeleri kullanılarak üretilmiş ve etiketin esnek malzemeler üzerinde de kullanılabilirliği test edilmiştir. Hinduja ve ekibi ise 2021 yılında, etiket için bir bitin kontrolünü sağlayan eliptik halka rezonatör modeli geliştirmişlerdir (Hinduja, vd., 2021). Önerilen rezonatör modelinde, eliptik rezonatörde 1 mm’lik açıklık oluşturularak RCS seviyesinde artış olduğu gözlenmiştir. Daha sonra, oluşan açık halka rezonatörün belirli bölgelerinde köşeli bir form oluşturularak RCS seviyesinde önemli ölçüde iyileştirme sağlanmış ve kodun tespit edilebilirlik düzeyi artırılmıştır.

Yukarıda her iki kodlama parametresinin (S_{21} ve RCS) kullanıldığı çipsiz RFID etiketlerde yer alan rezonatör modelleri ve kodlama tekniği konusunda kısaca bilgilendirme yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında, çipsiz RFID etiketlerde kullanılan rezonatör modelleri daha ayrıntılı bir şekilde ele alınmış ve kodlama işlemlerinin de daha iyi anlaşılması bakımından literatürdeki bazı çalışmaların simülasyon cevapları incelenmiştir. Yukarıda da belirtildiği üzere, tüm çipsiz RFID etiketlerde en önemli parametrelerden biri etiketin sahip olduğu kod kombinasyonu sayısıdır. Bu sayının, rezonans frekansı sayısının, bir başka deyişle etikete ait bit sayısının artırılması ile yükseltilebileceği açıktır. Buna bağlı olarak, bit frekanslarını kapsayan geniş bir çalışma bandına ihtiyaç duyulmaktadır. SİT çipsiz RFID etiketler yüksek bant genişliği ve bit kapasitesine sahip olmaları sayesinde düşük maliyet ile daha yüksek veri depolama kapasitesi sağlamaları bakımından malzeme takip ve tanımlama uygulamalarında diğer

etiket türlerine göre üstünlüğe sahiptir. Ayrıca, bu tür etiketlerde yer alan çoklu rezonatör devreleri, sağlamış oldukları yüksek bit sayısı, düşük maliyet ve kompakt devre boyutu açısından önemli avantajlara sahiptir. Tasarım esnekliği açısından da yüksek sayıda bit elde etmek için uygun yapılardır. Aşağıda, çoklu rezonatör devreleri kullanılarak tasarlanan çipsiz RFID etiket çalışmalarına yönelik incelemeler yer almaktadır.

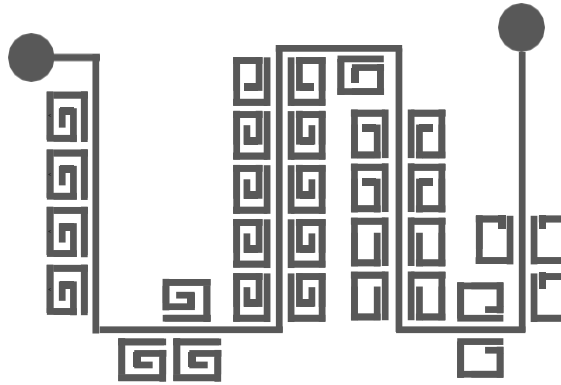
Çipsiz RFID etiketlerde yer alan çoklu rezonatör devrelerinde sıklıkla kullanılan açık halka rezonatör (open loop resonator, OLR) yapıları, etiket için bir bit sağlamakta ve “1” ya da “0” olmak üzere iki frekans kodu üretebilmektedir (Athauda ve Karmakar, 2019; Sharma ve Hashmi, 2017; Herrojo vd., 2017; Dinesh vd., 2014a; Girbau vd., 2012). Açık halka rezonatörlere kıyasla daha minyatür bir yapıya sahip olan spiral rezonatörler de etiket için bir bit ve iki farklı frekans kodu sağlamaktadır (Preradovic vd., 2009; Preradovic ve Karmakar, 2010a; Koswatta ve Karmakar, 2012, Karimi ve Majidifar, 2013; Necibi vd., 2015). Literatürde sıklıkla karşılaşılan ve yine etiket için bir bit ve iki frekans kodu sağlayan bir diğer rezonatör türü ise açık devre sonlandırılmış çeyrek dalga boyu rezonatörlerdir (Nijas vd., 2012; Dinesh vd., 2014b; Mousa vd., 2018; Prabavathi ve Rani, 2019; Karthikeyan vd., 2020). Bu tür rezonatör modellerinin çipsiz RFID etiket tasarımlarında kullanımına yönelik incelemeler aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Literatürdeki ilk çipsiz RFID etiket çalışması Jalaly ve Robertson tarafından 2005 yılında tanıtılmıştır (Jalaly ve Robertson, 2005a). Bu çalışmada, farklı elektriksel özellikte 5 adet açık devre sonlu düz iletim hattı kullanılarak 5 adet rezonans frekansı elde edilmiştir. Her bir hattın devrede olup olmamasına bağlı olarak ilgili bit sırasıyla “1” ve “0” kodunu almakta ve etiket toplamda 2^5 adet frekans kodu kapasitesine sahip olmaktadır.

Etiket ile okuyucu kısımda yer alan alıcı/verici anten arasındaki haberleşme işleminin etiket üzerinde yer alan yatay ve dikey polarizasyona sahip alıcı/verici anten ile gerçekleştirildiği ilk çipsiz RFID etiket ise 2008 yılında Preradovic ve arkadaşları tarafından ortaya konulmuştur (Preradovic vd., 2008). Bu çalışmada rezonans frekansları spiral rezonatörler kullanılarak elde edilmiştir. Önerilen çalışmada yer alan çoklu rezonatör konfigürasyonunda farklı elektriksel uzunluktaki her bir spiral rezonatör, etiket için 1 bitin kontrolünü sağlamaktadır. Rezonatörün varlığı ve yokluğu durumunda bu rezonans frekansının sırasıyla oluşup oluşmama durumuna göre bitin “0” veya “1” koduna sahip olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak, her bir bit “0” veya “1” olmak üzere 2

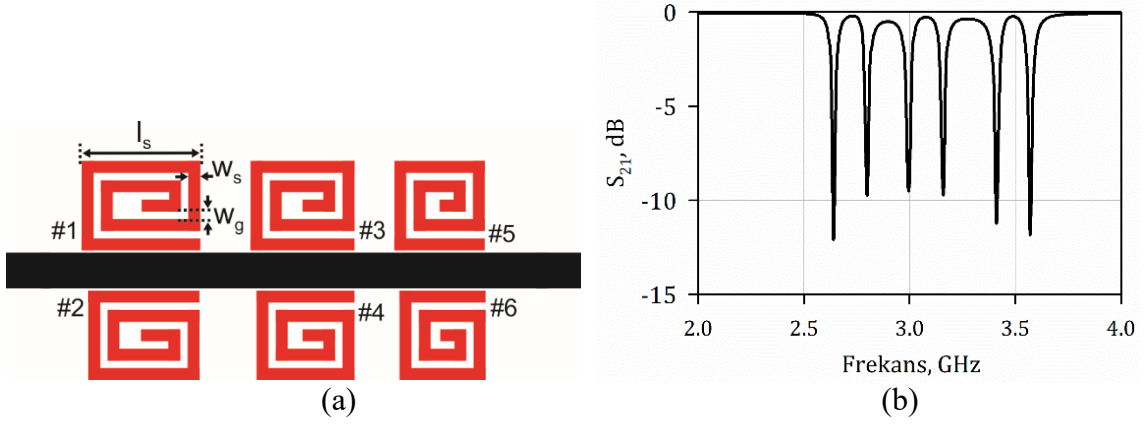
frekans koduna sahip olmaktadır. Farklı elektriksel uzunluğa sahip 6 adet spiral rezonatörün giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattına kuplajlanmasıyla toplamda 6 bit ve 2^6 frekans kodu kombinasyonu elde edilmiştir. Önerilen çalışmada, çoklu rezonatör devresinin giriş ve çıkış kapıları yatay ve dikey polarizasyonlu olacak şekilde dairesel yama elemanlı monopol antenlere bağlanarak çipsiz RFID etiket tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Spiral rezonatör kullanılarak tasarlanan bir diğer etiket çalışmasında düşük maliyetli, çok bitli ve buna bağlı olarak oldukça yüksek kodlama kombinasyonuna sahip bir RFID etiket tasarımı ele alınmıştır (Preradovic vd., 2009). Bu çalışmada toplam 35 adet spiral rezonatör giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattına kuplajlanmıştır. Kompaktlık sağlaması açısından bu iletim hattı kıvrımlı hat formunda kullanılmıştır. Bir spiral rezonatör her bit için 2 kod oluşturacağından önerilen etiket sayesinde 2^{35} farklı kodlama kombinasyonunun mümkün olduğu gösterilmiştir. Önerilen çalışma, bit ve frekans kodu sayısı bakımından literatürde oldukça önemli bir yere sahip olsa da kullanılan rezonatör sayısı devre boyutunda büyük bir artışa sebep olmaktadır. Önerilen 35 bitli etiket Şekil 1.2’ de gösterilmektedir.



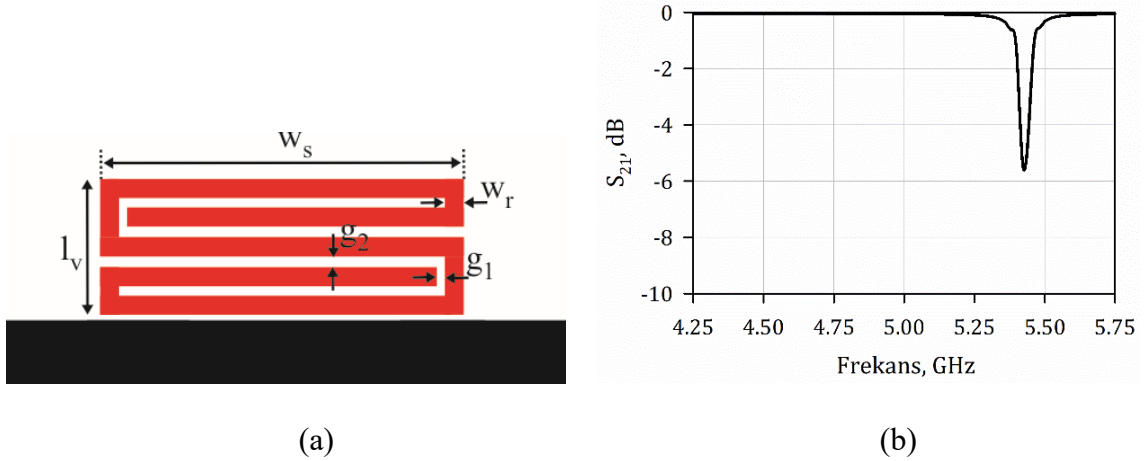
Şekil 1.2. 35 spiral rezonatör içeren çipsiz RFID etiket tasarımı

Spiral rezonatör kullanılan bir diğer çalışmada, Wan ve arkadaşları farklı elektriksel uzunluğa sahip altı adet spiral rezonatörlü devreden altı bit elde etmişlerdir (Wan, vd., 2021). Tasarlanan altı rezonatörlü devre modeli ve devrenin frekans cevabı sırasıyla Şekil 1.3(a) ve 1.3(b)’de gösterilmektedir. Şekildeki rezonatörler, “1” numaralı rezonatör, frekans cevabında en düşük frekanstaki rezonansı gösterecek şekilde sıralanmıştır. Rezonatörün varlığı durumunda ilgili bit “0” değerine sahip iken rezonatörün ortadan kaldırılması ile bitin “1” değerini aldığı belirtilmiştir.



Şekil 1.3. Önerilen çoklu rezonatöre ait devre modeli (a) ve frekans cevabı (b)

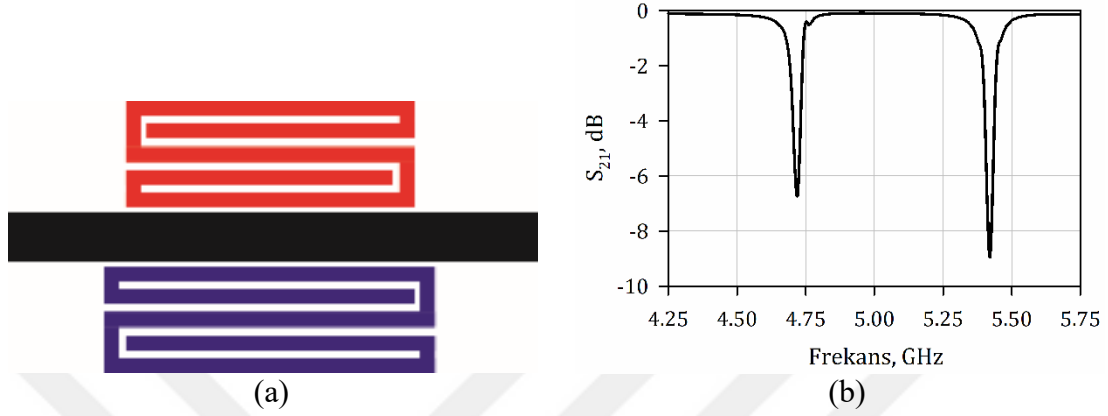
Shukoor ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptığı çalışmada, pasif 12-bit çoklu rezonatör tabanlı çipsiz bir RFID sistem tasarımı yer almaktadır (Shukoor vd., 2021). Önerilen spiral rezonatör yapısı Şekil 1.4(a)'da gösterilmektedir. Tasarlanan spiral rezonatör devresinin araya girme kaybı (S_{21}) cevabı Şekil 1.4(b)'de gösterilmektedir. Devrede ilgili rezonatör varken “0” değerine sahip olan bit değerini “1” yapmak için rezonatörün iç tarafındaki açık devre sonlandırılmış noktadan kısa devre yapılması önerilmiştir. Böylelikle, farklı frekans kodlarının elde edilmesi esnasında etiket üzerindeki devrenin mümkün olduğunca sabit kalması sağlanmıştır.



Şekil 1.4. Önerilen spiral rezonatör modeli (a) ve frekans cevabı (b)

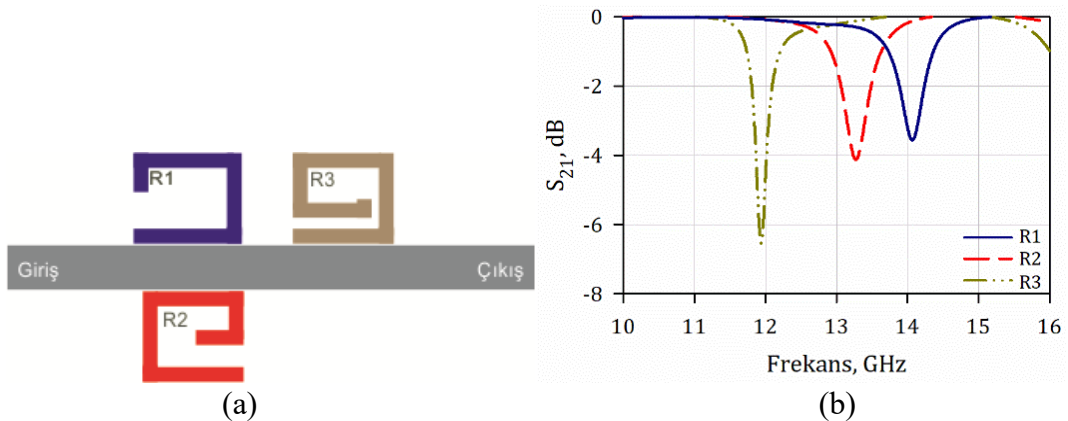
Şekil 1.5(a)'da, önerilen rezonatör modeli kullanılarak iki bitin elde edilebildiğini göstermek için tasarlanan iki rezonatörlü devre modeli yer almaktadır. Şekil 1.5(b) incelendiğinde alt tarafta yer alan elektriksel uzunluğu daha fazla olan ikinci rezonatörün etiket için daha düşük frekansta bir bit sağladığı görülmektedir. Bu doğrultuda, farklı

elektriksel uzunlukta 12 adet rezonatörün bulunduğu çoklu rezonatör devresi tasarlanmıştır. Giriş ve çıkış kaplarına geniş bant monopollü yama antenler eklenerek 12 bitli çipsiz RFID etiket tasarımı gerçekleştirilmiştir.



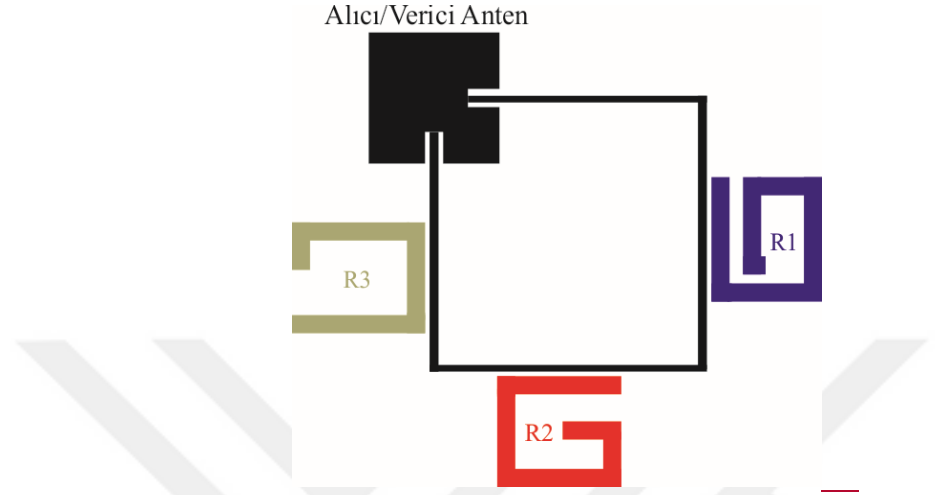
Şekil 1.5. Önerilen rezonatör modeli kullanılarak iki rezonatörlü devre modeli (a) ve (b) frekans cevabı

Ku-bandında (12.4-18 GHz) çalışan, hem alıcı hem de verici antenin tek bir yapı olarak yer aldığı ve bitlerin spiral rezonatörler tarafından sağlandığı yeni bir çipsiz RFID etiket Gao ve arkadaşları tarafından 2022 yılında sunulmuştur (Gao, vd., 2022). Yapılan çalışmada, alıcı/verici anten olarak tek bir antenin kullanılmasıyla daha kompakt bir tasarım elde edilmiştir. Bitlerin elde edilmesi için besleme hattına kuplajlı olacak şekilde farklı elektriksel uzunlukta spiral rezonatörler yerleştirilmiştir. Şekil 1.6(a)'da üç spiral rezonatörlü devre modeli gösterilmiştir. Rezonans frekanslarını tayin etmek için üç rezonatör giriş/çıkış kaplarını birbirine bağlayan düz iletim hattına kuplajlı olacak şekilde yerleştirilmiş ve arzu edilen frekansta rezonansa sahip olacak şekilde boyutları optimize edilmiştir.



Şekil 1.6. Üç spiral rezonatörlü devre (a) tasarımı (b) araya girme kaybı (S_{21}) cevabı

Şekil 1.6(b)'de üç rezonatörlü devreye ait araya girme kaybı (S_{21}) cevabı gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, yaklaşık olarak 12, 13 ve 14 GHz frekanslarında rezonanslar üretilmiştir. Şekil 1.7'de, alıcı/verici anten olarak tek bir yama antenin kullanıldığı üç rezonatörlü önerilen çipsiz RFID etiket modeli gösterilmiştir.

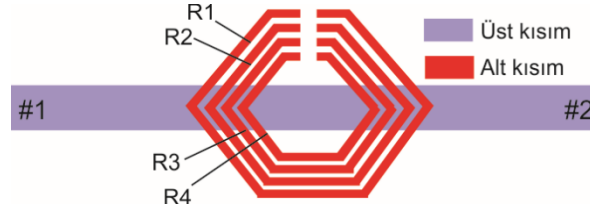


Şekil 1.7. Üç spiral rezonatörlü alıcı/verici anten olarak tek kare yama antene sahip çipsiz RFID etiket modeli

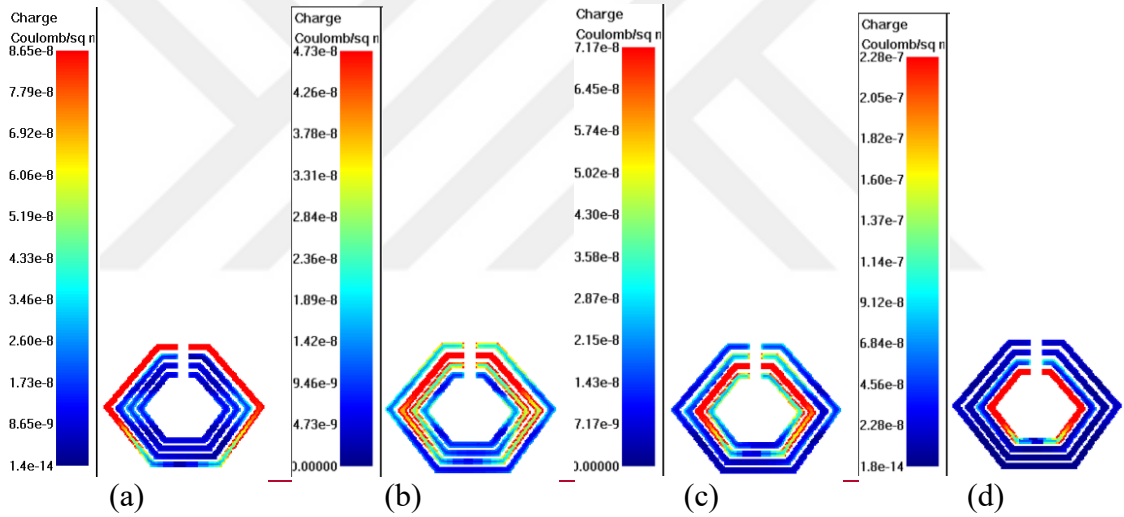
Bu çalışmaların dışında spiral rezonatörler farklı formlarda birçok çipsiz RFID etiket tasarımında kullanılmıştır (Preradovic vd. 2009; Preradovic ve Karmakar, 2010a; Karimi ve Majidifar, 2013; Necibi vd., 2015; Dinesh vd., 2014a; Ashraf vd., 2015; Mishra vd., 2020; Shukoor vd., 2021; Malhat vd., 2021; Wan vd., 2021).

Wu ve arkadaşlarının 2019 yılında gerçekleştirdiği çalışmada 4-8 GHz çalışma bandına sahip, etiket için bir adet bit ve iki adet frekans kodu sağlayan altıgen-şekilli açık halka rezonatör modelinin kullanıldığı çipsiz RFID etiket önerilmiştir (Wu, vd., 2019). Taban malzemesinin üst düzleminde giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan 50 Ω karakteristik empedansa sahip 2.2 mm genişliğinde düz besleme hattı bulunmaktadır. Rezonatörler ise kullanılan taban malzemesinin alt düzleminde ve düz besleme hattına göre simetrik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 1.8'de iç içe yerleştirilmiş 4 adet açık-halka altıgen rezonatörün bulunduğu devre modeli gösterilmiştir. Her bir rezonatör, 2 bitlik bir kodlama kapasitesine sahip olmanın yanı sıra frekans sahasında 800 MHz'lik bir bandı da çalışma sahası olarak kullanmaktadır. Altıgen-şekilli rezonatörlere ait açıklığın artırılıp azaltılmasıyla, yani rezonatörün elektriksel uzunluğunun değiştirilmesiyle ilgili rezonans frekansının 800 MHz'lik bir frekans bandında

kaydırılması mümkün olmaktadır. Böylelikle, 800 MHz'lik bir bantta bir rezonatör tarafından birden fazla frekans kodunun elde edilebileceği belirtilmiştir. Ancak, elde edilen bu kodlarda yalnızca bir rezonans frekansı mevcut olduğuna dikkat edilmelidir. Bu yöntem, bir rezonatörden elde edilebilen frekans kodu sayısını artırmış olsa bile çok geniş bant gereksinimi ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 1.8. Önerilen altıgen şekilli bölünmüş rezonatör modeli ile oluşturulan çoklu rezonatör devresi



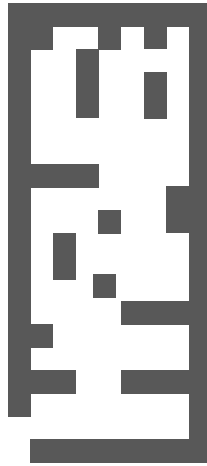
Şekil 1.9. 4 GHz (a), 5 GHz (b), 6 GHz (c) ve 7.5 GHz (d) frekanslarında çoklu rezonatör devresine ilişkin yük dağılımları

Şekil 1.8'de gösterilen çoklu rezonatör devresinde R1, R2, R3 ve R4 rezonatörleri sırasıyla yaklaşık olarak 4 GHz, 5 GHz, 6 GHz ve 7.5 GHz frekanslarında rezonans üretmektedir. Şekil 1.9'da rezonans frekanslarında oluşan yük dağılımları gösterilmiştir. Şekilden, rezonans frekanslarında yük dağılımının ilgili rezonatör üzerinde yoğunlaştığı açıkça görülmektedir.

Bir açık halka rezonatörden elde edilebilecek frekans kodu sayısını artırmak için kullanılan bir diğer yöntem ise boşluk-doldurma eğrileri yöntemidir. Bu yöntem ilk defa 2006 yılında Mcvay ve ekibi tarafından önerilerek çipsiz RFID etiket tasarımında

kullanılmıştır (Mcvay, vd., 2006). Boşluk doldurma eğrisi tekniğiyle Piyano-eğrileri ve Hilbert-dizileri kullanılarak geliştirilen açık halka rezonatör, kaplamış olduğu alandan çok daha büyük dalga boyuna sahip bir frekansta rezonans üretmektedir. Bu özelliği sayesinde yüksek frekanslarda çok daha az yer kaplayan etiketlerin geliştirilmesine imkan vermektedir. Çalışmada, Piyano-eğrileri formunda 3 açık halka rezonatörlü etiket ve Hilbert-dizisi formunda kullanılan 3 açık halka rezonatörlü etiket tasarımları gerçekleştirilmiştir. Etiketler test edilmek üzere üretilmiş ve deneysel çalışmalarda iki etikette yer alan her bir rezonatöre ait rezonans frekansı da radar kesit alanı üzerinden tespit edilerek etiketlere ait kodların tespiti gerçekleştirilmiştir.

Benzer yöntemin kullanıldığı bir diğer çalışmada, Wang ve ekibi 2018 yılında çipsiz RFID etiket için çok sayıda frekans kodu elde edilmesine imkan tanıyan parçalanmış tip (fragment type) açık halka rezonatör yapısını önermişlerdir (Wang vd., 2018). Şekil 1.10'da gösterilen modelde, açık halka rezonatör içerisine küçük parçalar yerleştirilmesiyle etiket için farklı frekanslarda rezonanslar elde edilmiştir. Bu sayede, etiketin kod çeşitliliği artırılmıştır. Yukarıda incelenen literatür çalışmalarında kullanılan rezonatör modelleri etiket için yalnızca bir frekansta rezonansın varlığına bağlı olarak 2 frekans kodu sağlamaktaydı. Önerilen yapı sayesinde rezonans frekansının kaydırılması suretiyle kod çeşitliliği artırılmış olsa bile, farklı frekans kodlarının elde edilmesi esnasında hem devre karmaşıklığı hem de küçük parçaların konum ve boyutlarında yüksek hassasiyet gereksinimi gibi zorluklar bulunmaktadır. Yapılan çalışmada kodlama işlemi yaklaşık 2.8-6 GHz frekansları arasında radar kesit alanı üzerinden gerçekleştirilmiştir.



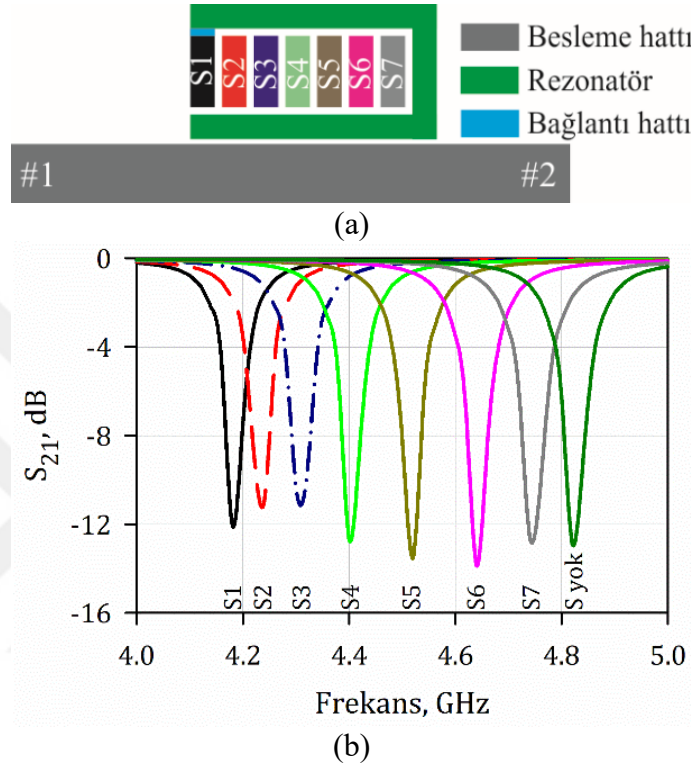
Şekil 1.10. Parçalanmış tip açık halka rezonatör yapısı

Boşluk doldurma tekniği ile benzerlik gösteren bir diğer çalışma, 2022 yılında Wang ve ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir (Wang vd., 2022). Yapılan çalışmada rezonans frekansının mümkün olduğunca düşük frekansta ve keskin bir şekilde elde edilmesini sağlayan aynı zamanda harmonik rezonansının da mümkün olduğunca yüksek frekansta olmasını sağlayan metal yüklü bir açık halka rezonatör optimize edilmiştir. Bu sayede, keskin rezonans frekansı, kodun tespit edilebilirliğini artırırken harmonik frekansının üst frekanslarda olması da çipsiz RFID etiket için geniş bir frekans sahası sağlamıştır. Yükleme elemanlarının uygun bir şekilde dağıtılması suretiyle rezonans frekansının kaydırılması yöntemi kullanılarak yüksek kod kapasiteli QR (Quick Response) kod tekniğine sahip çipsiz RFID etiket sunulmuştur. Çalışmada 9 farklı yükleme kombinasyonu incelenmiş ve her bir konfigürasyonda 1.2 - 1.9 GHz bandında farklı frekanslarda rezonans frekansı sağlandığı, yani 9 farklı frekans kodunun üretebildiği görülmüştür. Normalize kod çeşitliliğinin $501.78 \text{ bit}/\lambda_g/\text{GHz}$ olarak elde edildiği çalışmada kodlama işlemi radar kesiti üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Literatürde rezonans frekansının mevcudiyetinin yanı sıra frekans kayması (Vena vd., 2011; Abdulkawi ve Sheta, 2019a; Wang vd., 2022), rezonans frekanslarında meydana gelen faz farkı (Genovesi, vd., 2014; Genovesi vd., 2016) ve aynı rezonans frekansında elde edilen farklı faz farkı değerleri (Karimi ve Majidifar, 2013) gibi parametrelerin kodlama işlemi için kullanıldığı rezonatör yapıları da bulunmaktadır. Aşağıda, frekans kayması yöntemi kullanılarak kodlama işleminin gerçekleştirildiği bazı çipsiz RFID etiket çalışmalarına detaylıca yer verilmiştir.

Abdulkawi ve Sheta, tek bir rezonans frekansına sahip rezonatör kullanarak elde edilebilen frekans kodu sayısının artırılmasına yönelik yüksek kodlama kapasiteli kompakt bir rezonatör modeli ortaya koymuşlardır (Abdulkawi ve Sheta, 2019a). Şekil 1.11(a)'da gösterilen rezonatör modeli, U-şekilli açık halka rezonatör ve rezonatör içerisine birbirinden ve rezonatörden izole olacak şekilde yerleştirilen K-1 adet saplamadan oluşmaktadır. Farklı frekans kodlarının elde edilmesi rezonatöre ait rezonans frekansının kaydırılması ile elde edilmektedir. Bu frekans kayması ise her seferinde farklı saplamanın rezonatöre bağlanmasıyla rezonatör uzunluğunda oluşturulan uzunluk değişimi sayesinde sağlanmaktadır. K-1 adet saplama içeren U-şekilli rezonatör K adet farklı frekanstan bir tanesinde rezonansa sahip olabilmektedir. Böylece çipsiz RFID etiket K adet kod kapasitesine sahip olmaktadır. Önerilen yöntemin kullanıldığı bir etikette N

adet rezonatör olması durumunda etiket K^N adet frekans koduna sahip olmaktadır. Ancak, burada rezonatörün her bir kod için K adet frekanstan yalnızca bir tanesinde rezonans sağladığına dikkat edilmelidir. Yani, saplamalardan hangisi bağlıysa o saplamayla ilgili frekansta bit, “0” değerini almaktadır. Bu sırada etikete ait diğer frekanslardaki bitler “1” değerinden başka değer alamayacaktır.

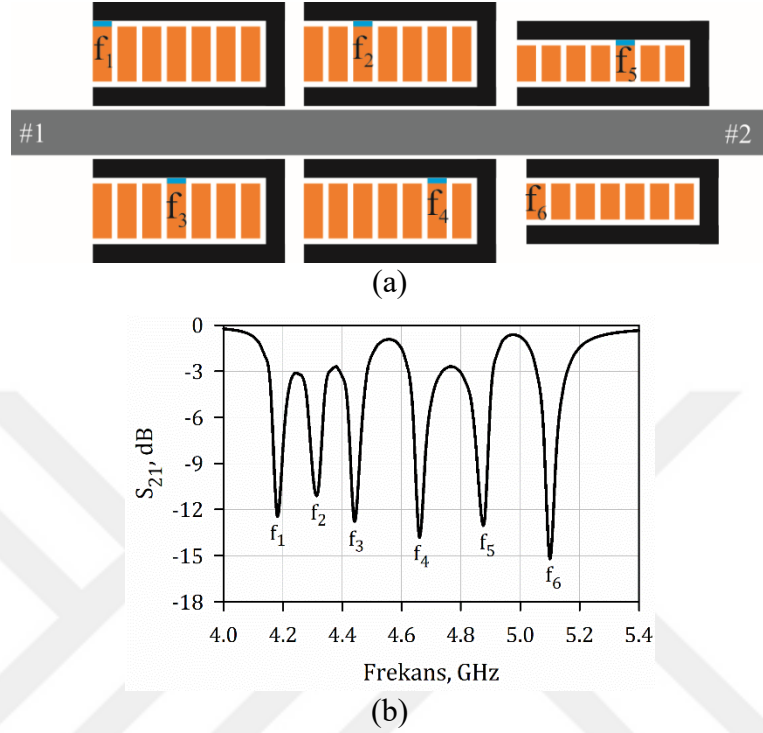


Şekil 1.11. Önerilen 7 saplamalı rezonatör modeli (a) ve frekans cevabı (b)

7 adet saplamanın bulunduğu rezonatör modeli Şekil 1.11(a)'da gösterilmektedir. Hiçbir saplamanın bağlı olmadığı ve saplamaların sırasıyla bağlı bulunması durumlarına ait araya girme kaybı (S_{21}) cevabı Şekil 1.11(b)'de gösterilmektedir. Önerilen yapıda 8 farklı frekans kodunun elde edilmesi için frekans sahasında 8 adet farklı frekansta bit olmalıdır. Dolayısıyla kod sayısının artırılması için yüksek bant genişliği gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Diğer yandan, rezonans frekanslarının birbirine yakın olması durumunda farklı frekans kodlarının tespiti de zor olacaktır.

Her bir rezonatörün 7 adet saplama içerdiği 6 rezonatör içeren çoklu rezonatör devresi Şekil 1.12(a)'da gösterilmiştir. Çoklu rezonatör devresinde f_1, f_2, f_3 ve f_4 frekanslarında rezonans üreten rezonatörler aynı boyutta seçilmiştir. Benzer şekilde, f_5 ve f_6 frekanslarında rezonans üreten rezonatörler de aynı boyuta sahiptirler. Her bir

rezonatörde, arzu edilen bit frekansında rezonans elde edilmesini sağlayan saplama rezonatöre bağlanmıştır. Devreye ait frekans cevabı Şekil 1.12(b)'de verilmiştir. Tasarlanan çoklu rezonatör devresi etiket için 8^6 adet kod kombinasyonu sağlamaktadır.



Şekil 1.12. Çoklu rezonatör devre tasarımı (a) ve frekans cevabı (b)

Farklı frekans kodunun elde edilmesinde frekans kayması yönteminin kullanıldığı bir diğer çalışma, 2022 yılında literatüre girmiştir (Wang vd., 2022). Bu çalışmada geliştirilmiş olan U şekilli rezonatör tarafından 2 adet rezonans üretilmektedir. Farklı elektriksel uzunlukta 4 adet rezonatörün iç içe yerleştirilmesiyle tasarlanan etiket toplamda 8 adet rezonansa sahiptir. Her bir rezonatörde, parametrik değişimler yapılarak rezonatöre ait rezonans frekansları farklı frekanslara kaydırılmakta ve bu sayede rezonatörden elde edilen frekans kodu sayısı artırılmaktadır. Kod çeşitliliğinin rezonans frekansının kaydırılmasına dayalı olması sebebiyle çalışma frekans aralığı 1.5-10.5 GHz gibi oldukça yüksek bir bant genişliği olarak gerçekleşmiştir. Bu çalışmada esnek bir taban malzemesi olan polyimid kullanılarak etiketin kullanım sahası artırılmıştır.

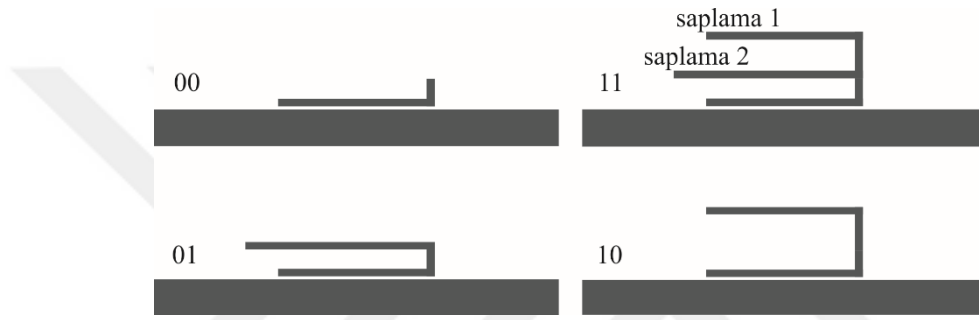
Şimdiye kadar tek bir rezonans frekansını üreten rezonatör modellerinin çipsiz RFID etiket tasarımlarındaki kullanımları incelenmiştir. Özetle, bu tür rezonatörler etiket için rezonans frekansının mevcudiyetine bağlı olarak “0” ve “1” olmak üzere iki frekans kodu

sağlamalarının yanı sıra, rezonans frekansının kaydırılması ile daha fazla sayıda frekans kodunun elde edilmesine imkan vermektedir. Ancak bu durumda, tek bir rezonatör için daha geniş bir çalışma bandı gereksinimi ortaya çıkmaktadır.

Çipsiz RFID etiketler için birden fazla frekans kodu sağlayabilen bir diğer rezonatör çeşidi, en az iki rezonans frekansına sahip çok modlu rezonatörlerdir. Çok modlu rezonatöre ait her bir mod rezonatöre ait bir rezonans frekansını, diğer yandan da etiket için bir biti temsil etmektedir. Çok modlu rezonatörler, kendisine ait rezonans frekanslarının birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesi suretiyle etiket için frekans kodu çeşitliliğini dar bir çalışma bandı içerisinde artırmaktadır. Örneğin, iki rezonans frekansı için iki adet tek modlu bir rezonatör kullanmak yerine bir adet çift modlu rezonatör kullanılabilir. Bir başka deyişle, aynı sayıda bit ve buna bağlı olarak frekans kodu sayısı, iki rezonatör yerine tek bir rezonatör kullanarak elde edilmektedir. Bu sayede, etiket boyutunda ciddi anlamda minyatürizasyon sağlanabilir. Bu doğrultuda 2012 yılında Girbau ve ekibi, çift modlu rezonatörü çipsiz RFID etiketlerde kullanmıştır (Girbau vd., 2012). Yapılan çalışmada, açık devre sonlandırılmış saplama yüklü açık halka rezonatör giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattına kuplajlanmıştır. Daha önce belirtildiği gibi çift modlu rezonatörün her bir rezonans frekansı, etiket için bir biti temsil etmektedir. Önerilen rezonatör modelinde saplamanın kaldırılması durumunda, tek rezonans frekansına sahip bir açık halka rezonatör elde edilmektedir. Sonuç olarak, çift modlu rezonatörün devrede olmadığı durumda, yani rezonansların olmadığı durumda “00”, çift modlu rezonatörün mevcut olduğu durumda “11” ve saplamanın açık halka rezonatörden çıkarıldığı yani sadece açık halka rezonatörün yer aldığı durumda ise “10” frekans kodlarının elde edilebildiği gösterilmiştir. Böylece tek bir rezonatör kullanarak çipsiz RFID etiket için 3 farklı frekans kodu elde edilmiştir. “01” kodu ise çift modlu rezonatörde yalnızca saplamanın olduğu ve açık halka rezonatörün olmadığı durumda elde edilebilir. Ancak, açık halka rezonatörün devrede olmadığı durumda bir kuplaj yapısı kalmayacağından saplamanın varlığı bir anlam ifade etmeyecektir. Bu nedenle, önerilen rezonatör modeli 3 adet frekans kodunun üretilmesine imkan vermektedir.

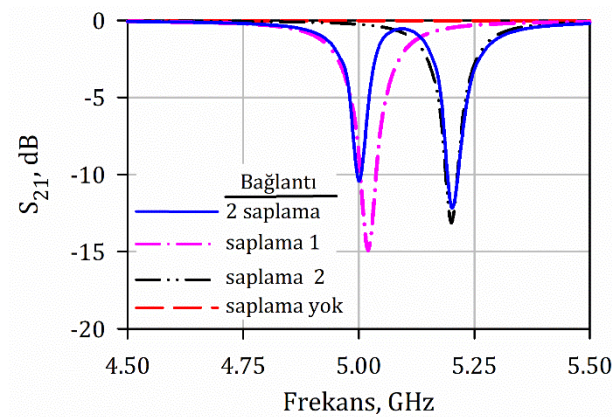
Abdulwaki ve Sheta 2019 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada, çipsiz RFID etiketler için bir rezonatörden 4 frekans kodunun elde edilememesi problemine çözüm getirmişlerdir (Abdulwaki ve Sheta, 2019b). Önerilen çalışmada, (Girbau vd., 2012)’da olduğu gibi açık devre sonlandırılmış saplama yüklü açık halka rezonatör kullanılmıştır. Ancak, bu

çalışmadan farklı olarak giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattına rezonatörün yan kolu kuplajlı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu sayede, rezonatöre bağlı olan saplama ve rezonatör kollarının rezonatörden çıkarılması durumunda kuplaj mekanizması bozulmadan 4 adet frekans kodunun elde edilebildiği gösterilmiştir. Şekil 1.13'te 4 frekans kodunun elde edilebildiği rezonatör konfigürasyonları gösterilmiştir. Yapılan çalışmada, rezonans frekansının varlığı durumunda ilgili bitin değeri "1" olarak kabul edilmiştir. Saplamların bağlı olmadığı durumda "00" frekans kodu üretilirken, iki saplamanın da bağlı olduğu durumda "11" kodu üretilmiştir. "10" ve "01" kodları ise sadece sırasıyla saplama 1 ve saplama 2'nin bağlı olduğu durumlarda elde edilmiştir.



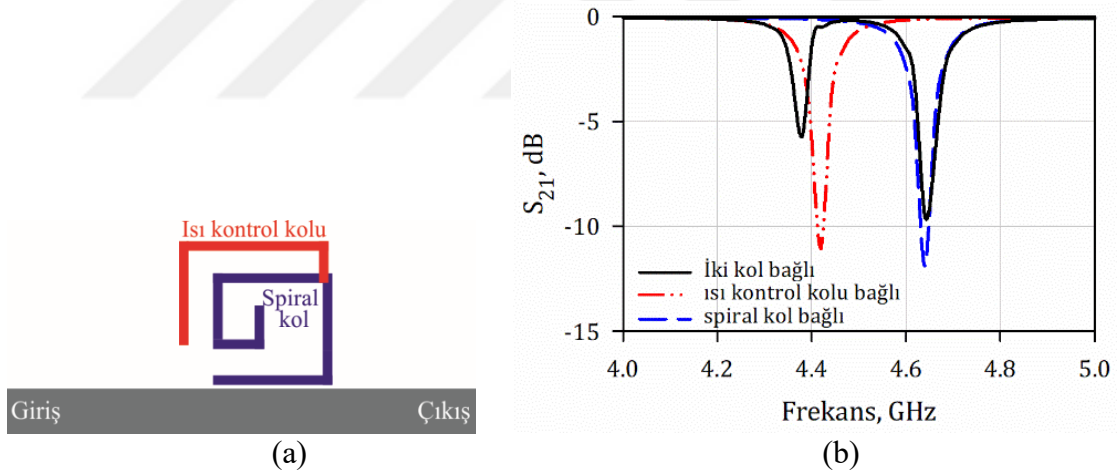
Şekil 1.13. 4 frekans kodu üretebilen önerilen rezonatör devresi (Abdulkawi ve Sheta, 2019)

Şekil 1.14'te, rezonatör devresinin ürettiği 4 frekans koduna ait frekans cevabı gösterilmektedir. Önerilen yöntem ile bir rezonatörden 4 frekans kodu elde edilmiş ve farklı elektriksel uzunlukta 6 rezonatör içeren çoklu rezonatör devresi tasarlanmıştır. 6^4 frekans kodu kapasiteli çoklu rezonatör devresi, giriş ve çıkış kapılarına Ultra Geniş Bant antenlerin bağlanmasıyla çipsiz RFID etiket haline getirilmiştir.



Şekil 1.14. 4 frekans kodlu rezonatöre ait frekans cevapları (Abdulkawi ve Sheta, 2019)

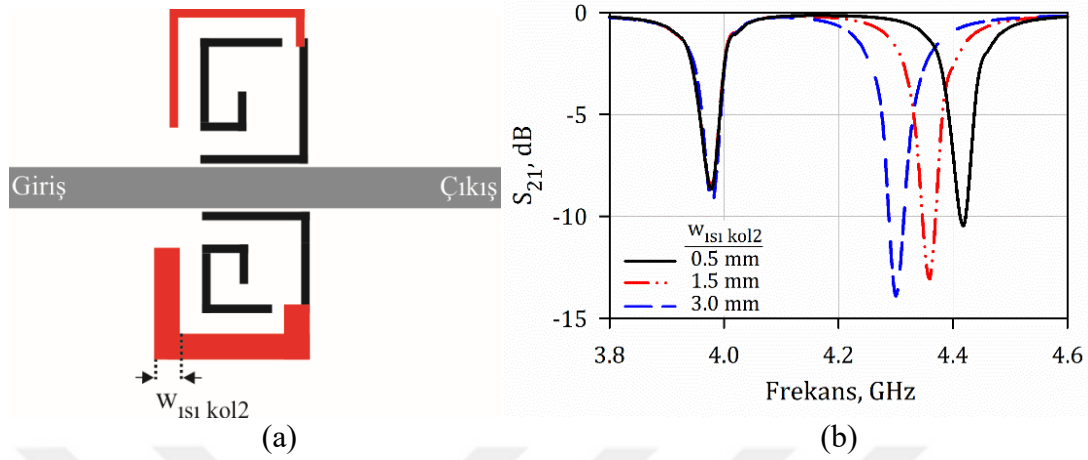
Abdulkawi ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları çalışmada, çipsiz RFID sensörler için sıcaklık değerine bağlı ve etiket için 4 adet frekans kodu üretebilen bir rezonatör modeli sunmuşlardır (Abdulkawi, vd., 2021). Önerilen rezonatör modelinde, rezonatörün uygun bir noktasında iki adet saplama bağlı bulunmaktadır ve rezonatör iki adet rezonans frekansı üretmektedir. Saplamalardan biri rezonatöre bağlı iken ilgili bit değeri “0”, rezonatörden çıkartıldığında “1” olmaktadır. Diğer saplama ise sıcaklığa çok duyarlı olan Poliamid Stany malzemesi ile kaplanmıştır. Bu saplama da rezonatöre bağlı olup olmamasına bağlı olarak diğer bite “0” ve “1” değerini kazandırmasının yanı sıra devreye bağlı olduğu durumda sıcaklığın değişimi ile bit frekansının kontrolünü sağlamaktadır. Şekil 1.15(a)’da önerilen rezonatör modeli gösterilmektedir. Şekil 1.15(b)’de önerilen rezonatör modelinde kolların bağlantı kombinasyonlarına ait araya girme kaybı (S_{21}) cevabı gösterilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere her kol etiket için birbirinden bağımsız olacak şekilde bir bitin kontrolünü sağlamaktadır. İki kolun da bağlı olmadığı durumda frekans sahasında bir rezonans oluşmamaktadır. Böylece, rezonatörden etiket için 4 kod elde edilebilmektedir.



Şekil 1.15. Önerilen spiral rezonatörlü devre modeli (a) ve elde edilebilen üç koda ait frekans cevabı (b)

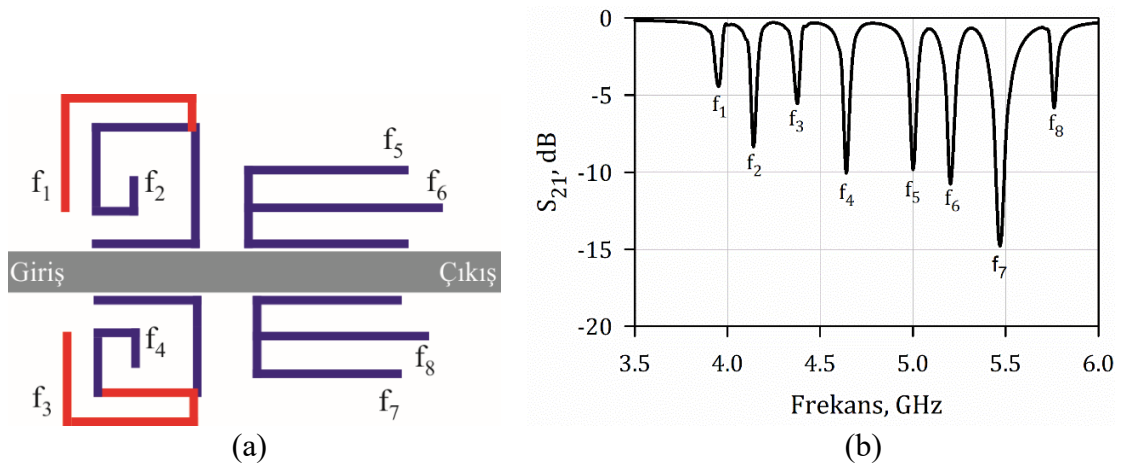
Şekil 1.16(a)’da iki rezonatörlü devre modeli gösterilmektedir. Yapılan çalışmada, ısı kontrol kolunun farklı ısı değerlerinde alacağı farklı dielektrik katsayısı değeri, “ $w_{\text{ısı kol2}}$ ” genişliği değiştirilerek kontrol edilmiştir. Şekil 1.16(b)’de farklı “ $w_{\text{ısı kol2}}$ ” genişlikleri için araya girme kaybı (S_{21}) cevabı gösterilmektedir. Isı kontrol kolu genişliğinin 0.15 mm, 1,5 mm ve 3 mm olması durumunda sırasıyla etkin dielektrik katsayısı 1.77, 1.88 ve 2 değerini almaktadır. Dielektrik katsayısının artması sonucunda ilgili rezonans

frekansının daha düşük frekanslara kaydığı ve elde edilebilecek frekans kodu sayısının artırılacağı Şekil 1.16(b)'den görülmektedir.



Şekil 1.16. İki rezonatörlü devre modeli (a) ve $w_{ısı kol2}$ değişiminin araya girme kaybı (S_{21}) cevabına etkisi (b)

Şekil 1.17(a)'da iki adet ısı kontrol kolu bağlı rezonatör ve iki adet saplama bağlı rezonatörün bulunduğu çoklu rezonatör devresi gösterilmektedir. Devrenin frekans cevabı da Şekil 1.17(b)'de gösterilmektedir. Rezonans frekanslarından f_1 ve f_3 , ısı değişimi ile belirli bir frekans bandında kaydırılabilecek olan rezonanslardır. Diğer rezonans frekansları ise ilişkili oldukları kolun devrede olup olmamasına bağlı olarak sırasıyla "0" ve "1" değerlerini almaktadır.



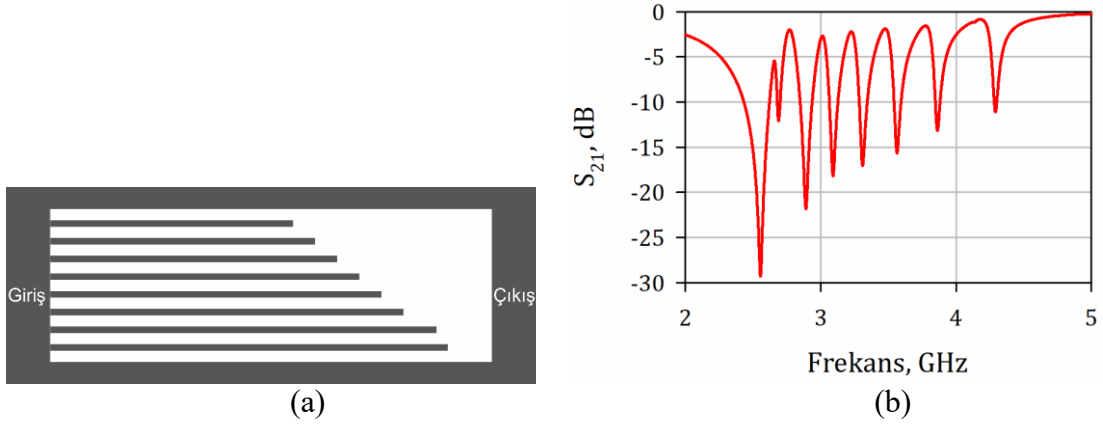
Şekil 1.17. Isı kontrol kolu ve saplama bağlı rezonatörler içeren çoklu rezonatör devresi modeli (a) ve (b) frekans cevabı

Çipsiz RFID etiket için 4 frekans kodunun elde edilmesine imkan sağlayan bir diğer rezonatör modeli Bhuiyan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada ortaya

konulmuş ve etiket üzerinde kullanılmıştır. (Bhuiyan vd., 2013). Bu çalışmada iki rezonans frekansı, iç içe yerleştirilmiş iki adet tek modlu rezonatör tarafından üretilmiştir. Bu rezonatörlerin her biri etiket için bir bit sağlamaktadır. Ayrık halka rezonatörlerin açık uçlarına yerleştirilen küçük elemanların bağlı olup olmamasına bağlı olarak 4 frekans kodunun elde edilebileceği gösterilmiştir. Sonuç olarak, iki adet rezonatör kullanılarak 4 frekans kodu elde edilebilir. Dolayısıyla, bu kodlama yönteminin çok modlu rezonatör yaklaşımı olduğu söylenemez. Ancak, önerilen konfigürasyonda rezonatörler iç içe olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu sayede boyut bakımından iyileştirme sağlanmıştır.

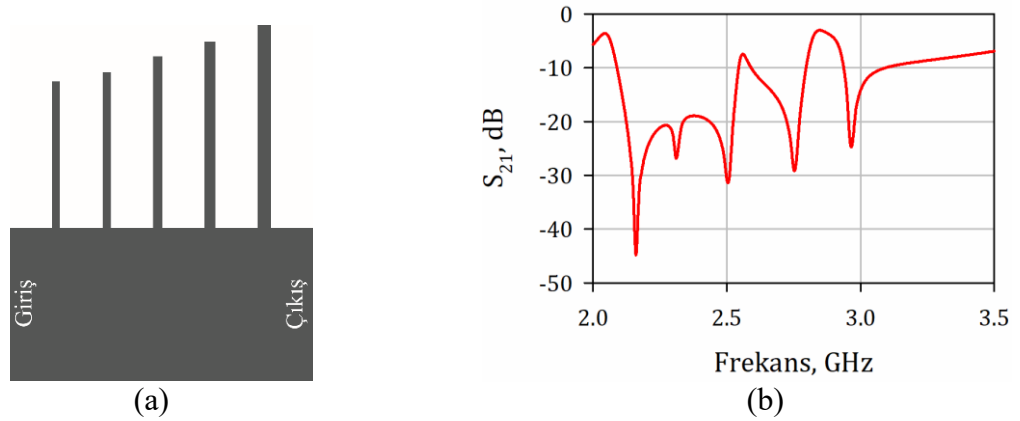
Çipsiz RFID etiketlerde rezonans devresi olarak tek veya çok modlu rezonatörler dışında bant durduran filtre yapıları da kullanılabilir. Bu bant durduran filtreler, giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hatlarına açık devre sonlandırılmış saplamalar bağlanarak tasarlanabilir (Pozar, 2014). Açık devre sonlandırılmış her bir saplama frekans cevabında bir iletim sıfırı sağlayarak rezonans frekansını oluşturur ve etiket için bir bitin kontrolüne imkan tanır. Bu yaklaşımın çipsiz RFID etiketlerde kullanıldığı ilk çalışma Nijas ve arkadaşları tarafından 2012 yılında gerçekleştirilmiştir (Nijas vd., 2012). Yapılan çalışmada, iletim hattına bağlı sekiz adet açık devre sonlandırılmış saplama kullanılarak etiket için 8 bit elde edilmiştir. Saplamaların devrede olması durumunda ilgili bitin “1” olduğu, devreden çıkarılması durumunda ise “0” olduğu belirtilmiştir. Böylece 2^8 adet frekans kodu sağlayan devre modeli ortaya konulmuştur. Devrenin çipsiz RFID etiket haline getirilmesi için giriş ve çıkış kapılarına dairesel yama monopol antenler entegre edilmiştir.

Benzer yaklaşımın kullanıldığı bir diğer çalışmada, Dinesh ve arkadaşları tarafından açık devre sonlandırılmış $\lambda/4$ saplamalar kullanılarak çoklu rezonatör tabanlı çipsiz RFID etiket tasarımı 2014 yılında sunulmuştur (Dinesh vd., 2014b). Şekil 1.18(a) 'da önerilen çoklu rezonatör devre konfigürasyonu, Şekil 1.18(b)'de ise devreye ait frekans cevabı gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, farklı elektriksel uzunluktaki 8 saplamanın devrede olması durumunda 8 rezonans frekansının da mevcut olduğu “00000000” frekans kodu elde edilmiştir. Bu çalışmada da, saplamanın mevcudiyetine bağlı olarak ilgili bit “0” veya “1” olduğundan kod kombinasyonu sayısı 2^8 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, çipsiz RFID etiket tasarımı için devrenin giriş ve çıkış kapılarına harici olarak verici/alıcı görevini sağlayan geniş bant monopol antenler bağlanmıştır.



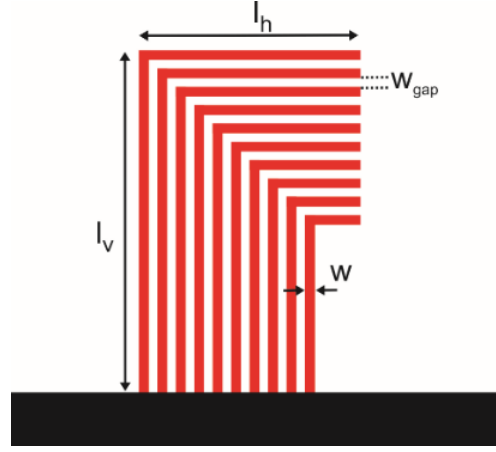
Şekil 1.18. Çoklu rezonatör devresi modeli (a) ve frekans cevabı (b) (Dinesh vd., 2014b)

$\lambda/4$ açık devre sonlandırılmış saplamalar kullanılarak tasarlanan bir diğer mikroserit hat tabanlı çipsiz RFID etiket çalışmasında 5 bit kapasiteli etiketler tasarlanmıştır (Zhang vd., 2019). Birinci dereceden 5 saplamalı devreye ait düzen ve frekans cevabı sırasıyla Şekil 1.19(a) ve Şekil 1.19(b)' de gösterilmektedir. Bu çalışmada uygun bant genişliği elde etmek için açık devre saplamalarının tekli ve ikili olarak kullanımı da incelenmiştir. Toplamda 5 bit ve 2^5 adet frekans kodu üretebilen bu devrenin giriş çıkış kapılarına monopol anten entegre edilerek çipsiz RFID etiket testleri gerçekleştirilmiştir.

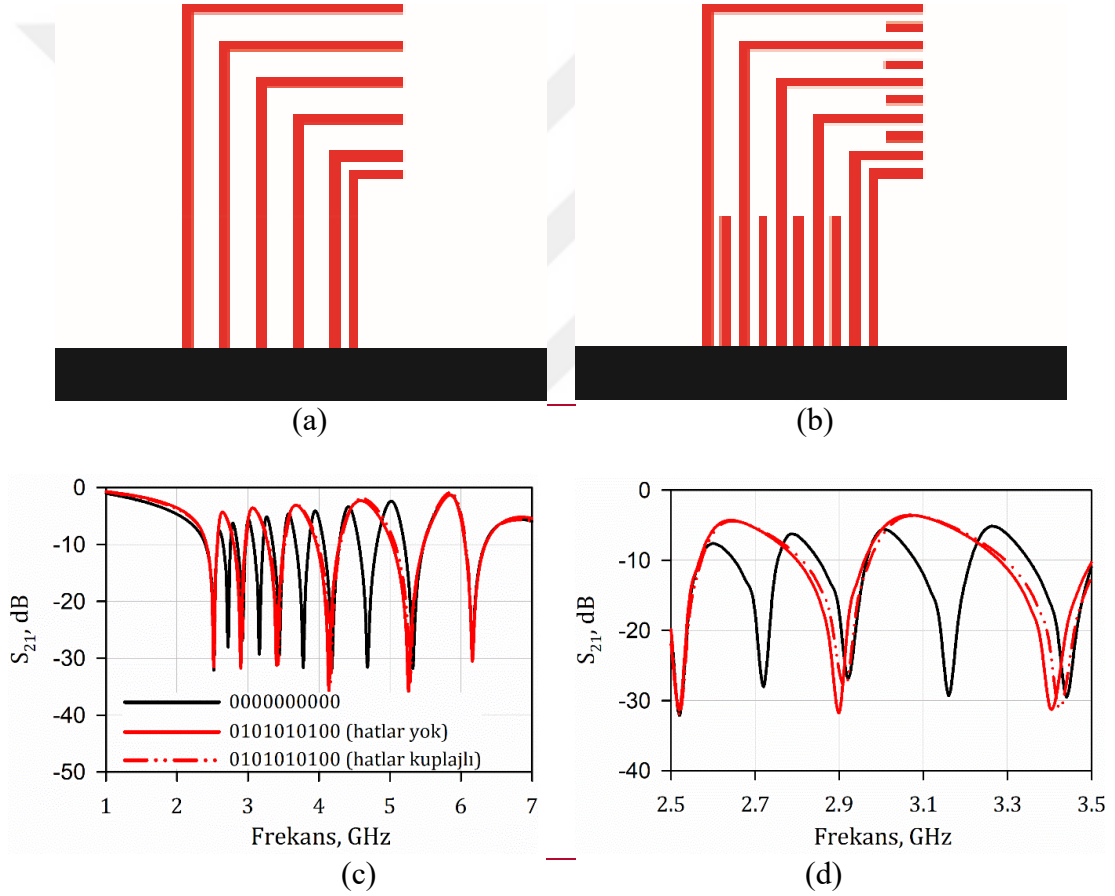


Şekil 1.19. 5 bitli çipsiz etiket devre modeli (a) ve frekans cevabı (b) (Zhang vd., 2019)

Açık devre sonlandırılmış saplama kullanılan bir diğer çalışmada Drishyada ve arkadaşları 2021 yılında, ultra geniş bantlı (UWB) L-şekilli rezonatör yapısı kullanarak 9 bitli çipsiz RFID etiket tasarlamıştır (Drishyada, vd., 2021). Tasarlanan devre modeli Şekil 1.20'de gösterildiği gibidir ve etikete ait bitler 5-11 GHz frekans aralığında yer almaktadır.



Şekil 1.20 Tasarlanan '000000000' kodlu 9-bit çipsiz RFID etiket tasarımı

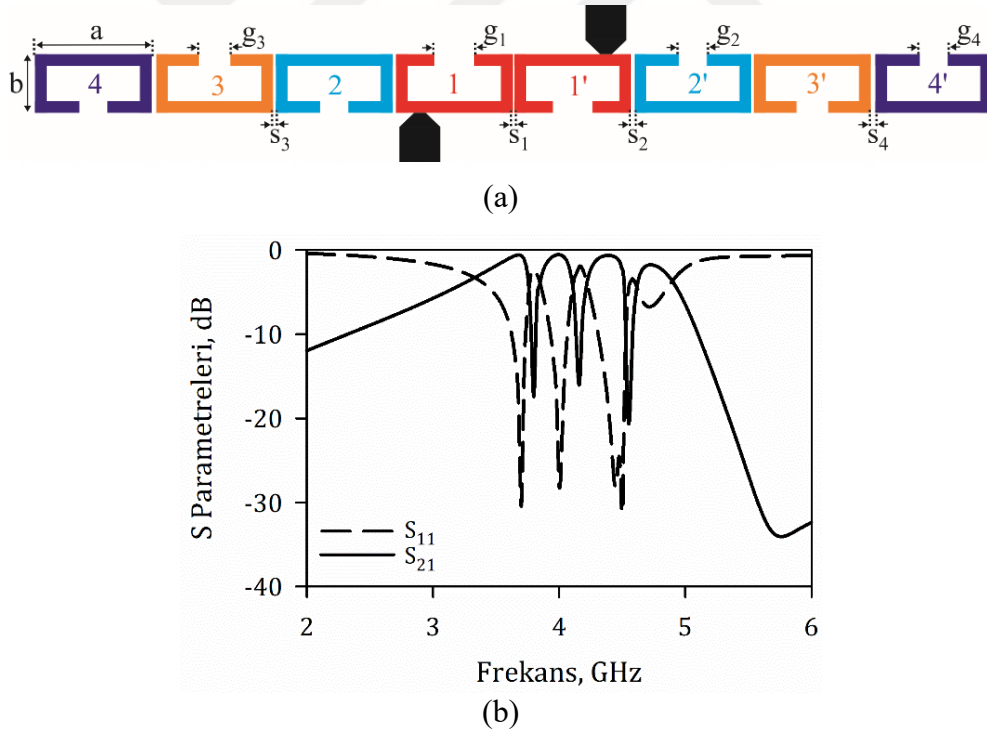


Şekil 1.21. '0101010101' kodlu etiket tasarımına ait, saplamalar kaldırılmış model (a), saplamalar kuplajlı olacak şekilde modifiye edilmiş model (b), geniş bant frekans cevabı (c) ve dar bant frekans cevabı (d)

Şekil 1.20’de verilen devreden “0101010101” kodunu elde etmek için tasarım üzerinde yapılan değişiklikler Şekil 1.21(a) ve Şekil 1.21(b)’de gösterilmektedir. Yapılan değişiklikler ile elde edilen etiketlere ait frekans cevabı geniş ve dar bantta sırasıyla Şekil

1.21(c) ve 1.21(d)'de gösterilmektedir. Şekil 1.21(b)'da ilgili biti kontrol eden açık devre sonlandırılmış hat tamamen ortadan kaldırılmak yerine hattın ortasında boşluk oluşturulmuştur. Bu sayede, farklı kodun elde edilmesi sırasında devredeki iletim hatları arasındaki kuplajın daha az etkilenmesi sağlanmıştır. Bu yöntem sayesinde Şekil 1.21(c) ve 1.21(d)'deki frekans cevabından görüleceği üzere farklı frekans kodunun elde edilmesi esnasında meydana gelen frekans kayması azaltılmıştır.

Khaliel ve arkadaşlarının 2021 yılında yaptığı çalışmada, çok bantlı bant geçiren filtre tabanlı açık halka rezonatör yapıları kullanılarak 4-bit çipsiz RFID etiket tasarlanmıştır (Khaliel, vd., 2021). Tasarlanan 4 bitli filtre tabanlı devre tasarımı Şekil 1.22(a)'da ve tasarlanan devreye ait frekans cevabı ise Şekil 1.22(b)'de gösterilmektedir. Şekilde gösterilen rezonatör numaraları, hangi rezonatörün kaçınıcı biti sağladığını belirtmektedir. Her bir bit birbirine eş iki rezonatör tarafından sağlanmaktadır. Bu sayede, bit frekanslarında meydana gelen rezonans genliğinin seviyesinde iyileştirme sağlanmıştır.



Şekil 1.22. Tasarlanan 4-bit çipsiz RFID etiket modeli (a) ve frekans cevabı (b)

Filtre tabanlı çipsiz RFID etiket çalışmaları başka ekipler tarafından farklı modifikasyonlar ve bit sayılarıyla da ele alınmıştır (Mousa vd., 2018; Prabavathi ve Rani, 2019).

Buraya kadar literatürde sunulmuş olan birçok çipsiz RFID etiket modeline ve kodlama yönteminin nasıl gerçekleştirildiğine dair ayrıntılı incelemelere yer verilmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere bir rezonatörün sahip olduğu rezonans frekansı sayısı, çipsiz RFID etiketin sahip olduğu kod kombinasyonu sayısı üzerinde oldukça etkilidir. Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında ortaya konulan çipsiz RFID etiketlerde üç modlu rezonatörler de kullanılarak kod çeşitliliğinin artması sağlanmıştır. Üç modlu rezonatörlere ait literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak, bu çalışmalarda sunulan rezonatörlerin çipsiz RFID etiketlerin çoklu rezonatör devrelerinde kullanılmaları konusunda bazı zorluklar ile karşılaşılmaktadır. Karşılaşılan zorluklar içerisinde en öne çıkan durum, rezonatörlerin giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattına etiket tasarımı için uygun biçimde kuplajlanamamasıdır. Bu durum, rezonans frekanslarının yani bir başka deyişle etikete ait bitlerin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesine engel olmaktadır. Bu da, bir rezonatörden elde edilen bit sayısı artmış olsa bile elde edilebilecek frekans kodu sayısındaki artışı kısıtlamaktadır.

Literatürde yer alan üç modlu rezonatör tasarımlarını incelediğimizde birçok farklı tekniğin kullanıldığı görülmektedir. Bu tekniklerden bazıları, saplama yüklü rezonatör (Torabi ve Forooghi, 2011; Zhang ve Zhu, 2011; Zhang ve Zhu, 2012; Gorur vd., 2015; Xu vd., 2016;), adım empedans rezonatör (stepped-impedance resonator) (Lin vd., 2011), üç modlu halka rezonatör (Srisathit vd., 2010) olarak tanımlanmaktadır.

Srisathit ve arkadaşları 2010 yılında bant geçiren filtre uygulamaları için yeni bir üç modlu mikroşerit halka rezonatör yapısı önermişlerdir (Srisathit vd., 2010). Önerilen rezonatör modelinde, geleneksel tek modlu açık halka rezonatörün iç kısmına rezonatörün yarısı ile kuplajlı olacak şekilde paralel bir iletim hattı yerleştirilmiştir. Simetri ekseninde açık devre saplama bulunan bu kuplajlı hat sayesinde rezonatör, üç modlu bant geçiren filtre karakteristiğine sahip olmaktadır.

Lin ve arkadaşlarının 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada ise, $\lambda/2$ uzunluğa sahip üç adet halka rezonatörün birbirine bağlanması ile üç modlu rezonatör yapısı tasarlanmıştır. (Lin vd., 2011). Birbirine bağlı olan bu halka rezonatörler arasında indüktif kuplaj sağlamak suretiyle rezonatörler yüksek empedanslı ince iletim hatlarına bağlanarak sonu kısa devre yapılmıştır.

Torabi ve Forooraghi tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada saplama tekniği kullanarak üç modlu rezonatör yapısı sunulmuştur (Torabi ve Forooraghi, 2011). 3 modlu rezonatör tasarımı, $\lambda/2$ uzunluktaki açık halka rezonatörün orta noktasından rezonatörün iç ve dış tarafına doğru olacak şekilde iki adet açık devre saplamanın bağlanmasıyla ortaya konulmuştur. Tasarımda filtreye ait birinci rezonans frekansı rezonatörün dış kısmında yer alacak şekilde bağlı olan adım empedans yapısındaki saplama tarafından sağlanırken, üçüncü rezonans frekansı rezonatörün iç kısmında yer alan sonu yama yüklü kıvrımlı saplama tarafından sağlanmaktadır. Ana rezonans frekansı ise ikinci rezonans frekansı olup açık halka rezonatör tarafından üretilmektedir.

Bant geçiren filtre uygulamaları için 2011 yılında Zhang ve Zhu tarafından sunulan çalışmada saplama yüklü 3 ve 4 modlu rezonatör yapıları önerilmiştir (Zhang ve Zhu, 2011). Önerilen 3 modlu rezonatörde iki adet $\lambda/2$ 'den daha kısa uzunlukta açık devre özdeş saplama, $\lambda/2$ uzunluğundaki rezonatörün alt tarafında ve merkezine göre simetrik olacak şekilde bağlanmıştır. Bu sayede, birbirine yakın üç modun uyarıldığı görülmüştür. Önerilen üç modlu rezonatörde $\lambda/2$ uzunluğundaki rezonatörün üst tarafında yer alan ve merkeze göre simetri noktasına bağlanan farklı elektriksel uzunlukta bir saplama sayesinde dördüncü modun da uyarılması sağlanarak dört modlu rezonatör yapısı ortaya konulmuştur. Zhang ve Zhu benzer rezonatör modelini kullandıkları bir diğer çalışmalarında yeni bir kuplaj düzeni geliştirmişlerdir ve bu sayede bant dışı reddetme seviyesini iyileştirmişlerdir (Zhang ve Zhu, 2012). Önceki çalışmada olduğu gibi $\lambda/4$ 'ten daha kısa olan açık devre özdeş saplama yine $\lambda/2$ uzunluğundaki rezonatörün merkezine göre simetrik olacak şekilde bağlanmıştır. Bu üç modlu rezonatör yapısındaki saplamalara U-şekilli hatlar kuplajlı olacak şekilde yerleştirilerek bant dışı reddetme seviyesinde iyileştirme sağlanmış ve filtrenin seçiciliği artırılmıştır. Seçiciliğin yüksek seviyede olduğu bir diğer çalışma 2015 yılında Görür ve arkadaşları tarafından sunulmuştur (Görür vd., 2015). Önerilen çalışmada üç modlu rezonatör tasarlamak için devrenin simetri eksenini üzerinde açık halka rezonatöre, sonunda farklı boyuta sahip kare yama elemanı bulunan iki adet yüksek empedanslı saplama bağlanmıştır. Bu saplamalardan biri rezonatörün içinde diğeri dışında yer almaktadır. Devrenin simetrik yapıda olması sayesinde çift (even) ve tek (odd) mod eşdeğer devre modeli üzerinden teorik filtre cevabı da hesaplanmıştır. Üç modlu rezonatör modelinin önerildiği bir başka filtre tasarımı, Xu ve arkadaşları tarafından 2016 yılında tanıtılmıştır. Çalışmada, $\lambda/2$ uzunluğunda spiral rezonatörün merkezine T-şekilli açık devre saplama bağlanmıştır.

Ayrıca, simetri eksenine yerleştirilmiş iki adet özdeş kısa devre saplamalı rezonatör üç modlu bant geçiren filtre cevabı sağlamaktadır (Xu vd., 2016). Bu çalışmada da filtrenin simetrik yapıda olması sayesinde filtreye ait modların analizi, çift-tek mod empedans analiziyle gerçekleştirilmiştir.

Literatürde yer alan üç modlu rezonatör çalışmaları incelendiğinde üç modun uyarılması işlemi için daha çok saplama yüklü açık halka rezonatörlerin kullanıldığı görülmektedir. Ancak, yapılan çalışmalarda sunulan üç modlu rezonatörler filtre uygulamaları için tasarlanmışlar ve filtreleme özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik geliştirilmişlerdir. Tez çalışmasında, çipsiz RFID etiketlerde farklı frekans kodlarının elde edilmesine imkan tanıyan saplama yüklü üç modlu açık halka rezonatör yapıları geliştirilmiştir. Rezonatörler üzerinde yapılan çalışmalar, etiket için bitleri temsil eden rezonatöre ait rezonans frekanslarının birbirinden bağımsız olacak şekilde kontrol edilebilmesine ve bu sayede farklı frekans kodlarının elde edilmesine imkan verecek uygun konfigürasyon ve kuplaj mekanizmasının sağlanmasına yönelik gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM II

ÇİFT MODLU ÜÇ FREKANS KODLU REZONATÖR MODELİ ve ÇİPSİZ RFID ETİKET TASARIMI

Bu bölümde, tez kapsamında ortaya konulan üç frekans kodlu rezonatör modelinin kullanıldığı çipsiz RFID etiket çalışmaları yer almaktadır. Kullanılan rezonatör modeli çift modlu halka rezonatördür ve etiket için kullanılması durumunda bu modların her biri bir biti temsil etmektedir. Rezonatör, devrenin giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan düz bir iletim hattına kuplajlı olacak şekilde yerleştirilmekte ve önerilen kodlama tekniği sayesinde 3 frekans kodu sağlamaktadır. Önerilen rezonatör modelinin simetrik bir yapıya sahip olması sayesinde teorik analiz çalışmaları için çift-tek mod empedans analizi kullanılmış ve frekans kodları normalize frekanslarda teorik olarak elde edilmiştir. Daha sonra, rezonatör modeli ve kodlama tekniği simülasyon çalışmaları ile desteklenmiştir. Çipsiz RFID etiket için daha fazla bit üretebilmesi açısından bu rezonatör modelinin kullanıldığı dört rezonatörlü çoklu rezonatör devresi tasarlanmıştır. Simülasyon çalışmaları yardımıyla önerilen kodlama tekniğinin çoklu rezonatör devresinde de uygulanabilir olduğu ortaya konulmuştur. Çoklu rezonatör devresi performansını görmek amacıyla farklı frekans koduna sahip iki adet devre üretilmiş ve elde edilen ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile oldukça iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Daha sonra, rezonatör sayısı artırılmış ve bu çoklu rezonatör devresi alıcı/verici anten olarak Bölüm 2.1’de anlatılan geniş bant monopol anten ile tek bir devrede birleştirilerek çipsiz RFID etiket haline getirilmiştir. Tasarlanan 14 bit kapasiteli çipsiz RFID etiket farklı elektriksel uzunlukta yedi adet rezonatör içermektedir ve 3^7 adet farklı frekans kodu sağlamaktadır. Çipsiz RFID etiketi test etmek amacıyla farklı frekans koduna sahip iki adet etiket üretilmiştir. Test işlemleri el yapımı bir yansız odada gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, okuyucu kısmında Vektör Ağ Analizörüne bağlı bulunan yüksek kazançlı geniş bant huni antenler kullanılmıştır. Test sırasında bu huni antenler ile etikette yer alan antenler, aynı polarizasyona sahip olanlar karşılıklı olacak şekilde yerleştirilmelidir. Verici huni anten tarafından gönderilen sorgulama sinyali etiket üzerindeki alıcı anten tarafından alınarak çoklu rezonatör devresine aktarılmaktadır. Bu devre tarafından kodlanmış sinyal, etiketteki verici anten vasıtasıyla okuyucu kısımdaki alıcı antene geri gönderilir. Ölçüm sonuçları, huni antenlerin bağlı bulunduğu Vektör Ağ Analizörü tarafından ölçülen araya girme kaybı (S_{21}) büyüklüğü üzerinden elde

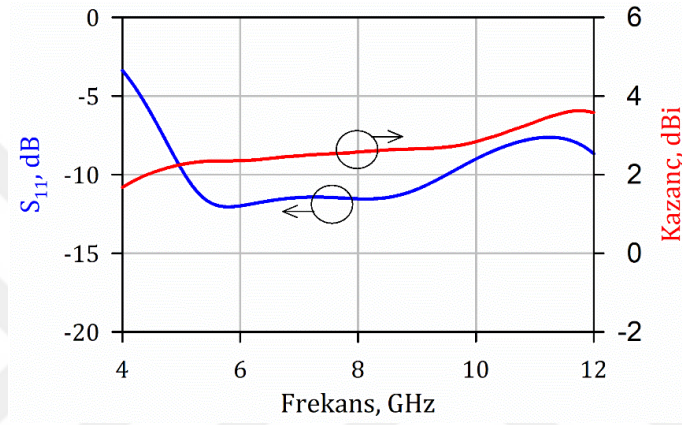
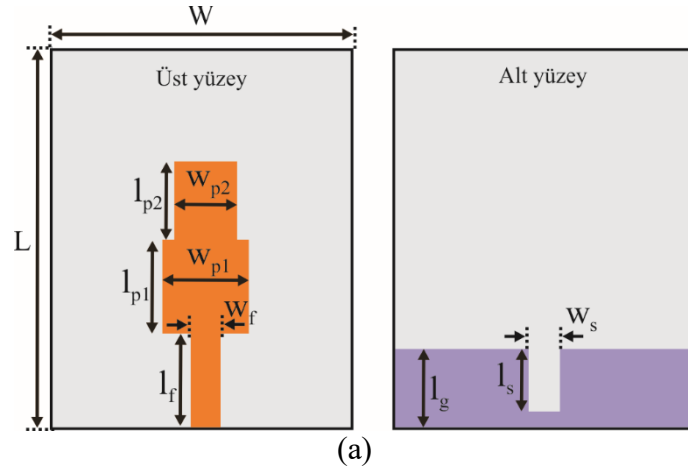
edilmektedir. Elde edilen ölçüm sonuçlarında “0” değerine sahip bit frekanslarında rezonansların gözlenebildiği ve frekans kodlarının açık bir şekilde tespit edilebildiği görülmüştür.

2.1. Dikdörtgen Yama Elemanlı Geniş Bant Monopol Anten Tasarımı

Bu bölümde, Bölüm 2.2’de önerilen üç kod kapasiteli rezonatör modelinin kullanıldığı çipsiz RFID etikette alıcı/verici anten olarak kullanılan geniş bant monopol anten tasarımı yer almaktadır. Tez çalışmasında asıl amacın etiket için yüksek kod kapasitesi sağlayan rezonatör modellerinin geliştirilmesi olduğundan kullanılacak anten için literatürde yer alan anten çalışmalarından faydalanılmıştır. Bu kapsamda Jung ve arkadaşları tarafından 2005 yılında ortaya konulan hem boyut hem de çalışma frekansı bakımından Bölüm 2.2.3’te yer alan çoklu rezonatör devresi ile uyumlu olan mikroşerit beslemeli monopol anten tasarımı (Jung vd., 2005) seçilmiştir. Şekil 2.1(a)’da yer alan geniş bant monopol anten tasarımından görüleceği üzere, üst düzlemde iki adet farklı boyuttaki yama, ardışık olarak birbirine bağlıdır ve 50Ω ’luk mikroşerit iletim hattı ile beslenmektedir. Toprak düzleminde ise antene ait bant genişliğini ve kazanç değerini artırmak için bir yarıkli hat bulunmaktadır. Antenin çalışma frekansı etikete ait bitlerin yer aldığı frekans sahasını kapsmalıdır. Bu doğrultuda antenin, bant genişliği ve kazanç bakımından uygun frekans sahasına sahip olması için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda antene ait elde edilen nihai boyutlar şu şekildedir: $L = 25 \text{ mm}$, $W = 19 \text{ mm}$, $w_f = 1.9 \text{ mm}$, $w_s = 1.9 \text{ mm}$, $l_g = 5 \text{ mm}$, $l_{p1} = 6 \text{ mm}$, $l_{p2} = 5 \text{ mm}$, $l_f = 6 \text{ mm}$, $l_s = 4 \text{ mm}$, $w_{p1} = 5.5 \text{ mm}$ ve $w_{p2} = 4 \text{ mm}$.

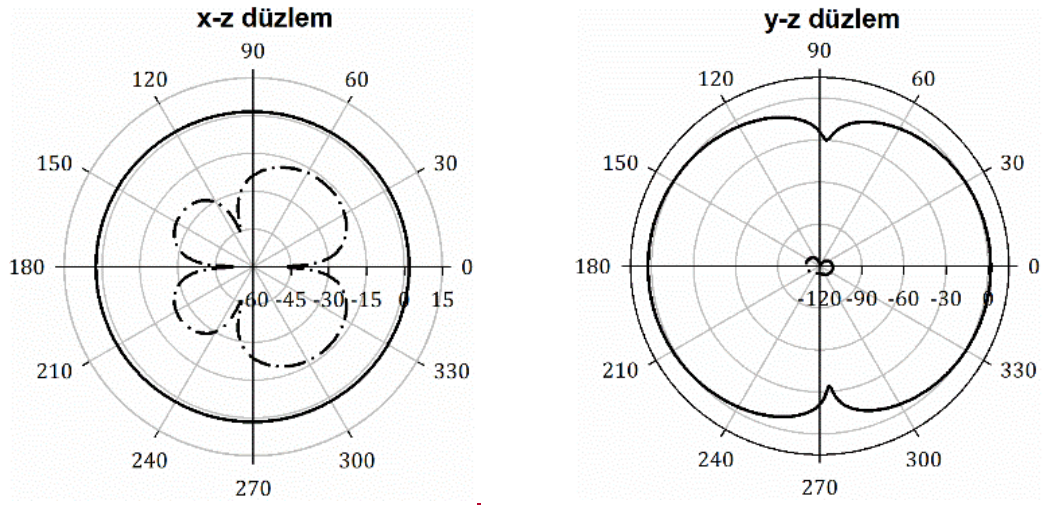
Tasarlanan antene ait frekansa bağlı geri dönme kaybı (S_{11}) ve kazanç grafiği Şekil 2.1(b)’de gösterilmektedir. Grafikten görüleceği üzere, 5 GHz frekansının üst bölgesinde S_{11} seviyesi -10 dB’den daha düşük seviyede elde edilmiştir. Daha önemlisi, antenin kullanılacak olduğu etikette yer alan çoklu rezonatör devresine ait bitlerin bulunduğu 6-9 GHz frekans aralığında S_{11} seviyesinin -10 dB’den düşük olarak elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, 6-9 GHz frekans aralığında anten kazancı yaklaşık olarak 3 dBi’dir. Bu da, etiket haberleşmesi için yeterli bir kazanç seviyesidir.

Üç farklı frekansta antenin xz- ve yz- düzlemlerine ait eş ve çapraz polarizasyon için elde edilen ışınma örüntüleri Şekil 2.2’de verilmiştir. Işınma örüntülerine ait simülasyon

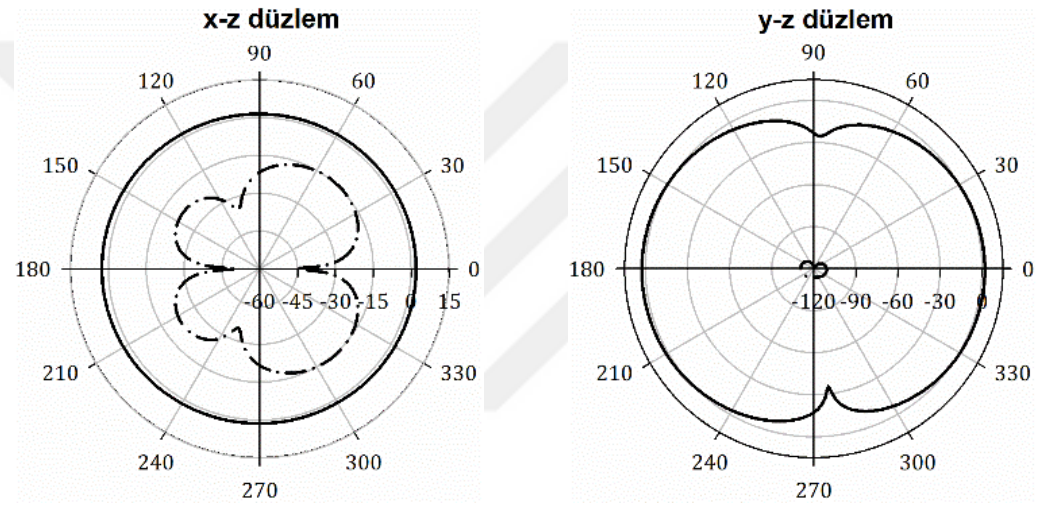


Şekil 2.1. Önerilen geniş bant anten modeli (a) ve S_{11} - kazanç grafiği (b)

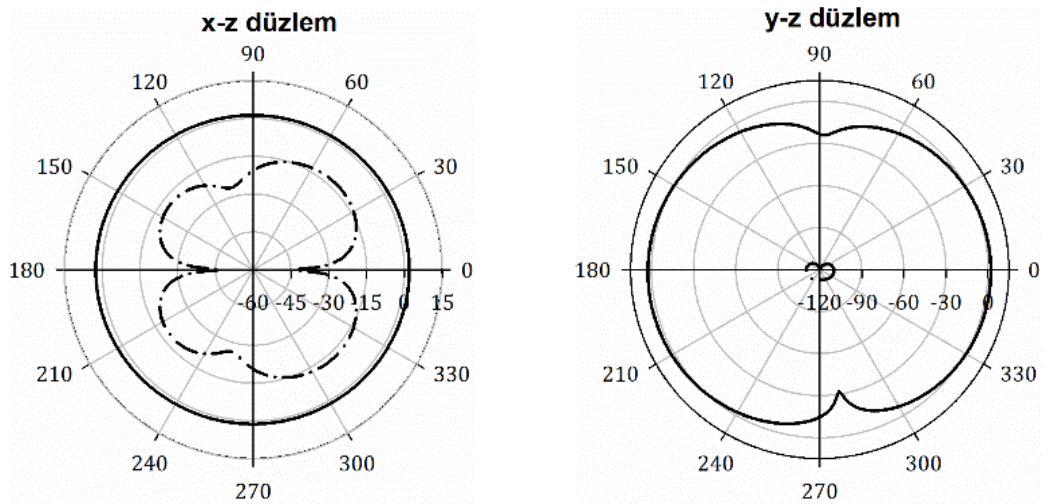
cevapları için çipsiz RFID etikete ait bitlerin de yer aldığı frekans sahası içerisinde örnekler alınmıştır. Şekil 2.2(a), 2.2(b) ve 2.2(c)' de sırasıyla 6.5 GHz, 7.5 GHz ve 8.5 GHz frekanslarındaki xz- ve yz- düzlemlerindeki “ θ ” açısındaki değişime göre ışınma örüntüleri gösterilmiştir. Işınma örüntülerine ait grafiklerde hem eş-polarizasyon (co-polarization) hem de çapraz-polarizasyon (cross-polarization) örüntüleri birlikte yer almaktadır. Işınma örüntülerinden görüleceği üzere yama anten xz- düzleminde çok yönlü bir ışınma örüntüsüne sahip iken yz- düzleminde monopollü ışınma örüntüsü karakteristiğine sahiptir. Tasarlanan geniş bant yama antenin tüm “ θ ” açı değerleri için örnek alınan frekans değerlerinde -10 dBi'dan daha düşük çapraz-polarizasyon kazancına sahip olduğu görülmektedir. Bu seviye etiket üzerine yatay ve dikey polarizasyonda yerleştirilecek olan antenlerin birbirleri arasındaki girişimin mümkün olduğunca az olması için yeterlidir. Şekil 2.3(a) ve Şekil 2.3(b)' de ise 7.5 GHz' deki 3 boyutlu ışınma örüntüsüne ait önden görünüm ve arkadan görünüm verilmektedir. Bu şekilden de antenin ışınma doğrultusu açık bir şekilde görülmektedir.



(a)

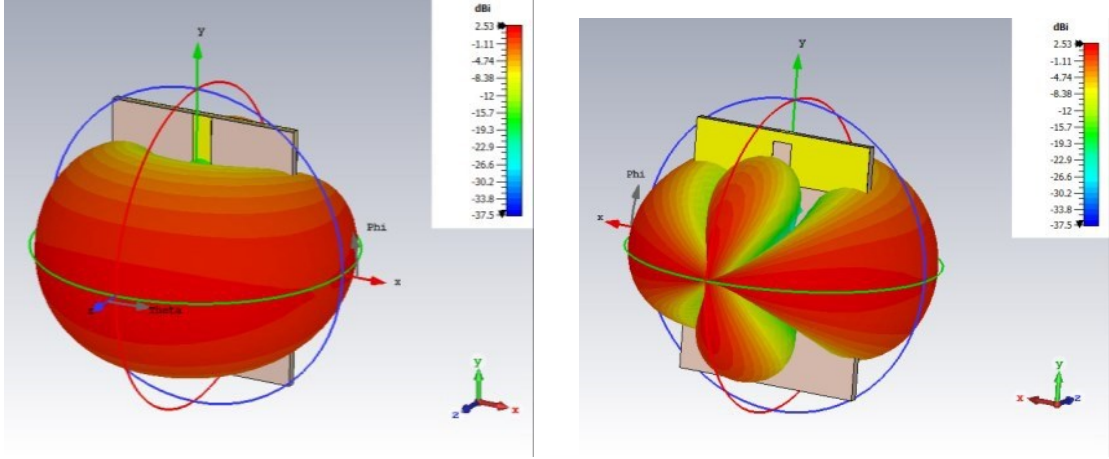


(b)



(c)

Şekil 2.2. 6.5 GHz (a), 7.5 GHz (b) ve 8.5 GHz (c) frekanslarında önerilen antene ait ışınma örüntüleri simülasyon cevabı (düz çizgi: eş-pol., kesik çizgi: çapraz-pol.)



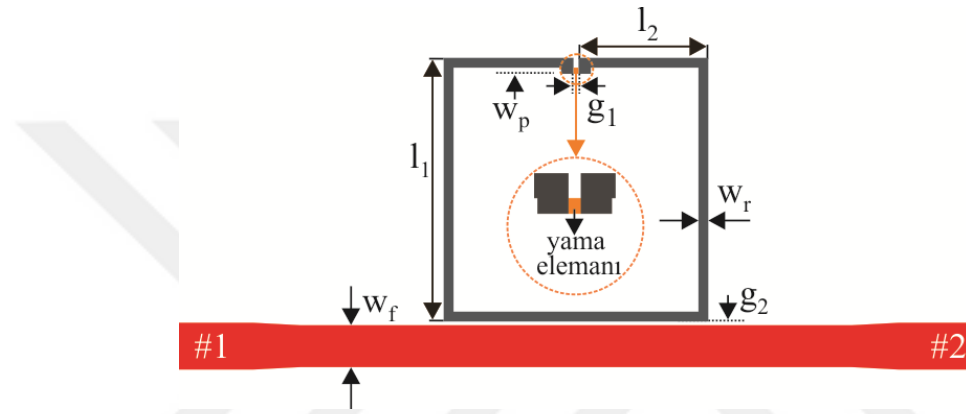
Şekil 2.3. 3D ışınma örüntüsü simülasyon cevabı (Sol: Önden görünüm, Sağ: Arkadan görünüm)

2.2. Önerilen Çift Modlu Üç Frekans Kodlu Rezonatör Modeli ve Çipsiz RFID Etiket Tasarımı

2.2.1. Önerilen Çift Modlu Rezonatör Modeli

Tez kapsamında sunulan çipsiz RFID etiket tasarımında kullanılan rezonatör modeli, etiket için iki bit ve üç frekans kodunun üretilmesine imkan vermektedir. Literatür özetinde de belirtildiği gibi saplama yüklü açık halka rezonatörler tarafından etiket için üç (Girbau vd., 2012) ve dört (Abdulkawi ve Sheta, 2019a) frekans kodu elde edilebilmekteydi. Ancak, bu tür rezonatör modelinin kullanıldığı etiketler için bit frekanslarının arzu edilen frekanslarda ve farklı frekans kodlarının da düzgün şekilde elde edilebilmesi için saplamanın oldukça hassas ayarlanması gerekmektedir. Bu hassasiyeti ortadan kaldırmak amacıyla etiket için iki bit üretebilecek olan bir başka çift modlu rezonatör yapısı kullanılmıştır. Kullanılan çift modlu rezonatör modeli kapalı kare halka rezonatördür. Bilindiği üzere, kapalı halka rezonatörler simetri eksenine pertürbasyon elemanı yerleştirilmesi ile uyarılan mod frekanslarına sahiptir (Gorur, 2004). Bu tür rezonatörlerde birisi çift diğeri tek mod olan bu iki modun ayrışabilmesi için simetri ekseninde yama veya köşe kesim biçimli bir pertürbasyon elemanı bulunmalıdır. Ancak, pertürbasyon elemanlı halka rezonatöre ait modların ikisi de eş zamanlı olarak uyarılmaktadır. Yani, modlardan biri mevcutken diğerrinin ortadan kaldırılması mümkün değildir. Bu da, her bir modun etiket için bir biti temsil ettiği düşünülürse rezonatörün devrede olup olmamasına bağlı olarak yalnızca “00” ve “11” frekans kodlarının elde edilebileceğini göstermektedir. Çift modlu rezonatörden üçüncü bir frekans kodu elde

etmek için tez kapsamında bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, rezonatörün simetri ekseninden küçük bir parça çıkarılması suretiyle çift modlu halka rezonatörün tek modlu açık halka rezonatör haline dönüştürülmesidir. Bu durumda, çift modlu rezonatöre ait ilk rezonans frekansında açık halka rezonatörün birinci harmoniği meydana gelmektedir ve “01” frekans kodu elde edilmektedir. Belirtilen geçiş durumunun küçük bir yama elemanı ile sağlandığı önerilen rezonatör modeli Şekil 2.4’te gösterilmektedir. Şekildeki devre tasarımı dielektrik sabiti 3.38 olan 0.813 mm kalınlığındaki Rogers 4003C taban malzemesi üzerinde gerçekleştirilmiştir.



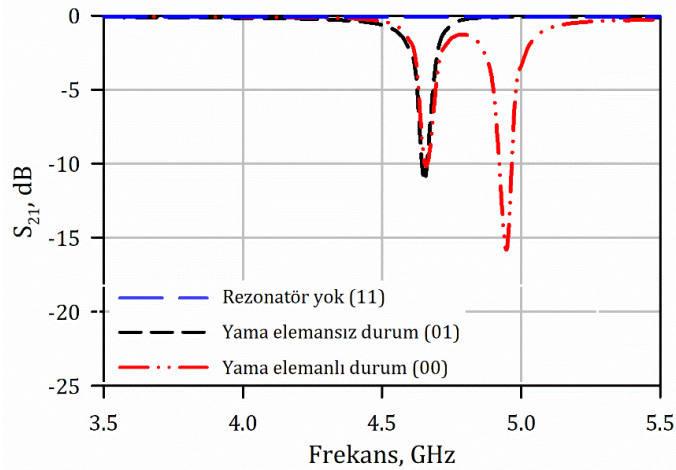
Şekil 2.4. Yama elemanlı üç kod kapasiteli açık ve kapalı halka rezonatörler arasındaki geçiş

Önerilen rezonatör modelinde ilk olarak açık halka rezonatör durumu ele alınacak olursa, bilindiği gibi, besleme hattına kuplajlanan bir açık halka, $\lambda/2$ (yarım dalga boyu) rezonatör olarak davranmaktadır. Dalga boyu,

$$\lambda = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2.1)$$

eşitliğiyle hesaplanabilir. Burada, c ışık hızını, f_0 açık halka rezonatöre ait rezonans frekansını, ϵ_{eff} ise kullanılan taban malzemesine ait etkin dielektrik sabitini temsil etmektedir. Yine bilindiği üzere açık halka rezonatör, f_0 frekansında ana rezonansa sahip iken nf_0 ($n = 2, 3, \dots$) frekanslarında harmonik rezonanslara sahiptir (Hong ve Lancaster, 2001). Önerilen yöntemde, harmonik frekanslarından $2f_0$ frekansında meydana gelen rezonans, etiket için birinci biti temsil etmektedir. Şekil 2.4’te gösterilen küçük yama elemanın devreye dahil edilmesiyle rezonatör, f_0 frekansına karşılık gelen dalga boyuna göre yarım dalga boyu ($\lambda/2$) uzunluğa sahip açık halka rezonatörden, $2f_0$ frekansına

karşılık gelen dalga boyuna göre bir tam dalga boyu (λ) uzunluğa sahip çift modlu kapalı halka rezonatör haline getirilmiş olacaktır. Kısaca, kapalı halka rezonatöre ait dalga boyunun Denklem (2.1)'de f_0 yerine $2f_0$ yazılarak hesaplandığına dikkat edilmelidir. Çünkü, çift modlu halka rezonatör, açık halka rezonatör için tanımlanan f_0 frekansı baz alınacak olursa $2f_0$ frekansında rezonans frekansına sahip olacaktır. Ayrıca, kullanılan küçük yama elemanı kapalı halka rezonatörün simetri ekseninde bir pertürbasyon sağladığından dolayı $2f_0 + f_s$ frekansında ikinci bir mod oluşmaktadır. Burada, f_s küçük bir değer olmakla birlikte kuplaj büyüklüğüne bağlı olarak artırılıp azaltılabilir. Bu durum, Bölüm 2.2.2'de yer alan kuplajlı hat analiz çalışmalarında teorik olarak da açıklanmaktadır. Şekil 2.5'te önerilen yöntem sayesinde bir rezonatörden elde edilebilecek üç farklı frekans koduna ait frekans cevabı gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, rezonatöre ait modların her biri etiket için bir biti temsil etmektedir. Buna göre, yama elemanlı olarak kabul edilen durum çift modlu halka rezonatöre ait frekans cevabıdır ve üretilen iki adet rezonans frekansı etiket için "00" frekans kodunu temsil etmektedir. Yama elemanının kaldırılması durumunda tek modlu açık halka rezonatöre ait $2f_0$ frekansındaki harmonik oluşmakta ve etiket için düşünüldüğünde "01" frekans kodu üretilmektedir. Son olarak, rezonatörün tamamen kaldırılması durumunda herhangi bir rezonans oluşmayacağından etiket için "11" frekans kodu elde edilmiş olacaktır.

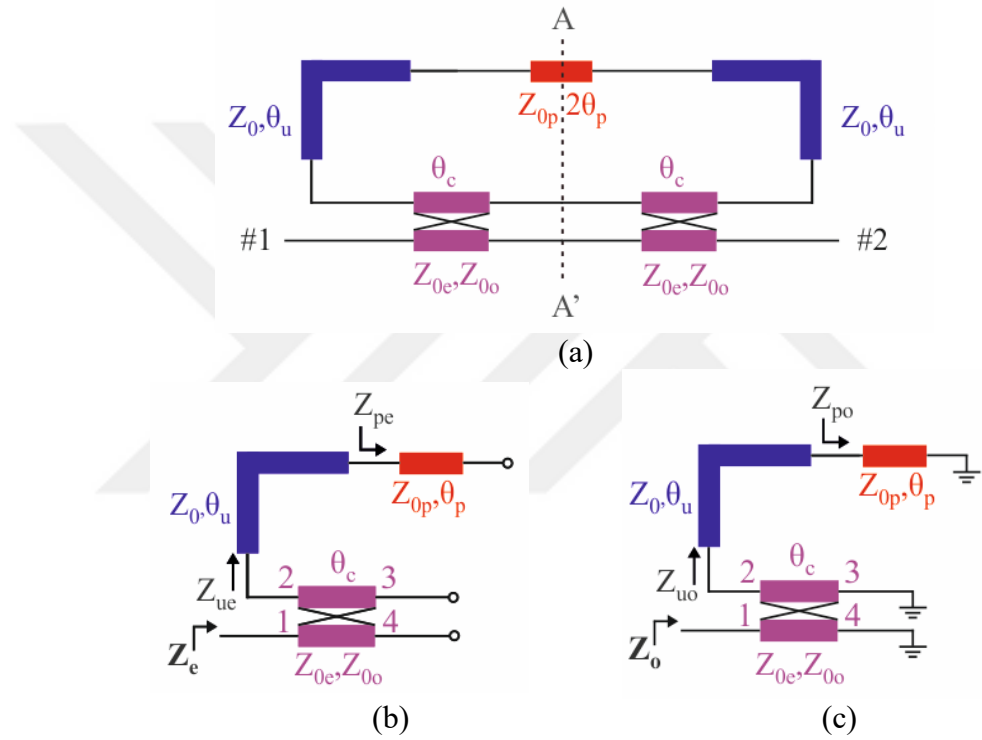


Şekil 2.5. Farklı topolojilerin sağladıkları kodlama türleri

2.2.2. Rezonatör Analizi ve Kodlama Tekniği

Bu bölümde, bir önceki kısımda tanıtılan üç frekans kodu üretebilen rezonatör devresine ait teorik analiz çalışmaları yer almaktadır. Çift modlu halka rezonatör devresine ait

eşdeğer devre modeli Şekil 2.6(a)'da gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere önerilen rezonatör devresi, AA' ile belirtilen eksene göre simetrik olduğundan çift-tek (even-odd: e-o) mod empedans analizi kullanılarak teorik olarak analiz edilebilir. Halka rezonatörün dalga boyu cinsinden toplam uzunluğu, bir önceki kısımda da belirtildiği gibi birinci modun bulunduğu $2f_0$ frekansına karşılık gelen bir dalga boyuna (λ) eşittir. Kare halka rezonatör olmasından dolayı rezonatörün iletim hattına kuplajlı olan kısmının uzunluğu $\lambda/4$ iken geriye kalan hatların toplam uzunluğu $3\lambda/4$ 'tür. Çift ve tek mod yarı-devre eşdeğer devre modelleri sırasıyla Şekil 2.6(b) ve 2.6(c)'de yer almaktadır.



Şekil 2.6. Halka rezonatöre ait eşdeğer devre modeli (a), çift mod yarı-devre eşdeğer devre modeli (b) ve tek mod yarı-devre eşdeğer devre modeli (c)

Eşdeğer devre modellerinde yer alan kuplajlı bölge, dört kapılı devre olarak modellenebilir. Bilindiği üzere, dört kapılı devre çift ve tek mod eşdeğer devrelerinin karakteristik empedansları ile analiz edilebilir. Böylece dört kapılı kuplajlı hattın empedans matrisi elemanları,

$$Z_{11} = Z_{22} = Z_{33} = Z_{44} = -\frac{j}{2} (Z_{0e} + Z_{0o}) \cot(\theta_c) \quad (2.2a)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{34} = Z_{43} = -\frac{j}{2} (Z_{0e} - Z_{0o}) \cot(\theta_c) \quad (2.2b)$$

$$Z_{13} = Z_{31} = Z_{24} = Z_{42} = -\frac{j}{2}(Z_{0e} - Z_{0o}) \csc(\theta_c) \quad (2.2c)$$

$$Z_{14} = Z_{41} = Z_{23} = Z_{32} = -\frac{j}{2}(Z_{0e} + Z_{0o}) \csc(\theta_c) \quad (2.2d)$$

şeklinde yazılabilir (Pozar 2003). Denklem (2.2)'de yer alan Z_{0e} ve Z_{0o} büyüklükleri sırasıyla çift ve tek mod karakteristik empedanslarını temsil etmektedir. Ayrıca dört kapılı devreye ait akım/gerilim ilişkileri ise

$$V_1 = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} + I_3 Z_{13} + I_4 Z_{14} \quad (2.3a)$$

$$V_2 = I_1 Z_{21} + I_2 Z_{22} + I_3 Z_{23} + I_4 Z_{24} \quad (2.3b)$$

$$V_3 = I_1 Z_{31} + I_2 Z_{32} + I_3 Z_{33} + I_4 Z_{34} \quad (2.3c)$$

$$V_4 = I_1 Z_{41} + I_2 Z_{42} + I_3 Z_{43} + I_4 Z_{44} \quad (2.3d)$$

olarak yazılabilir (Pozar, 2014). Şekil 2.6(a)'da yer alan θ_c , θ_u ve θ_p sırasıyla rezonatörün simetri ekseninden ayrılmış bir yarısına ait kuplajlı hattın, kuplajlı hat dışında kalan iletim hattının ve küçük yama elemanının elektriksel uzunluklarını temsil etmektedir. Çift ve tek mod eşdeğer devreleri simetri eksenine göre devrenin yarısı dikkate alınarak elde edilmektedir. Bu nedenle, θ_c uzunluğu $\lambda/8$ iken, $\theta_u + \theta_p$ uzunluğu $3\lambda/8$ uzunluğundadır. Şekil 2.6(b)'de gösterilen çift mod yarı-devre eşdeğer devre modeli incelendiğinde $V_2 = -I_2 Z_{ue}$, $I_3 = 0$ ve $I_4 = 0$ olduğu açıkça görülmektedir. Bu eşitliklerin Denklem (2.3) setinde kullanılmasıyla, 1 numaralı kapıdaki gerilim ve akım büyüklüğünün oranına eşit olan çift mod giriş empedansı (Z_e),

$$\frac{V_1}{I_1} = Z_e = Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22} + Z_{ue}} \quad (2.4)$$

olarak bulunur. Burada Z_{ue} , hattın girişinden görülen empedans formülü yardımıyla,

$$Z_{ue} = Z_0 \frac{Z_{pe} + jZ_0 \tan(\theta_u)}{Z_0 + jZ_{pe} \tan(\theta_u)}, \quad Z_{pe} = -jZ_{0p} \cot(\theta_p) \quad (2.5)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Tek mod eşdeğer devre modeli incelendiğinde ise Şekil 2.6(c)'den görüleceği üzere $V_2 = -I_2 Z_{u0}$, $V_3 = 0$, ve $V_4 = 0$ 'dır. Bu eşitlikler kullanılarak Denklem (2.3) setinin sadeleştirilmesiyle, tek mod giriş empedansı (Z_0),

$$\frac{V_1}{I_1} = Z_0 = Z_{11} - AZ_{12} - ABZ_{13} + BZ_{14} \quad (2.6)$$

olarak bulunur. Denklem (2.6)'da yer alan A, B, ve Z_{u0} büyüklükleri,

$$A = \frac{Z_{12} + BZ_{13}}{Z_{u0} + Z_{11} + BZ_{14}} \quad (2.7a)$$

$$B = \frac{Z_{11}Z_{12} - Z_{11}Z_{14}}{Z_{11}^2 - Z_{12}^2} \quad (2.7b)$$

$$Z_{u0} = Z_0 \frac{Z_{p0} + jZ_0 \tan(\theta_u)}{Z_0 + jZ_{p0} \tan(\theta_u)}, \quad Z_{p0} = jZ_{0p} \tan(\theta_p) \quad (2.7c)$$

şeklinde yazılabilir.

Şekil 2.6(a)'da verilen halka rezonatör eşdeğer devre modelinden küçük yama elemanın çıkarılması ile açık halka rezonatör eşdeğer devre modelinin elde edilebileceği açıkça görülmektedir. Bu durumda, simetri eksenine dikkate alındığında kuplajlı hattın dışında kalan iletim hattının giriş empedansı, hem çift mod hem de tek mod eşdeğer devre modellerinde aynı olmaktadır. Bu giriş empedansı, açık devre sonlandırılmış hattın girişinden görülen empedans olacaktır ve

$$Z_{ue} = Z_{u0} = -jZ_0 \cot(\theta_u) \quad (2.8)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Önerilen rezonatör devresine ait saçılma parametrelerinden araya girme kaybını temsil eden S_{21} büyüklüğü yukarıda elde edilen çift ve tek mod giriş empedansları kullanılarak

$$S_{21} = \frac{Z_0(Z_e - Z_o)}{(Z_0 + Z_e)(Z_0 + Z_o)} \quad (2.9)$$

denklemini yardımıyla hesaplanabilir (Hong ve Lancaster, 2001). Bu denklemden görüleceği üzere iletim sıfırları,

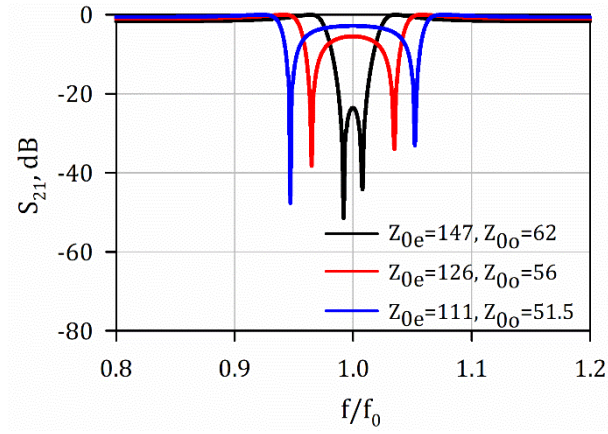
$$Z_e - Z_o = 0 \quad (2.10)$$

eşitliğinin sağlanması durumunda elde edilebilecektir. Rezonatöre ait iletim sıfırları da çipsiz RFID etiket için bitleri temsil ettiğinden dolayı, Denklem (2.10) kullanılarak bit frekanslarının konumlarının da belirlenebileceği görülmektedir.

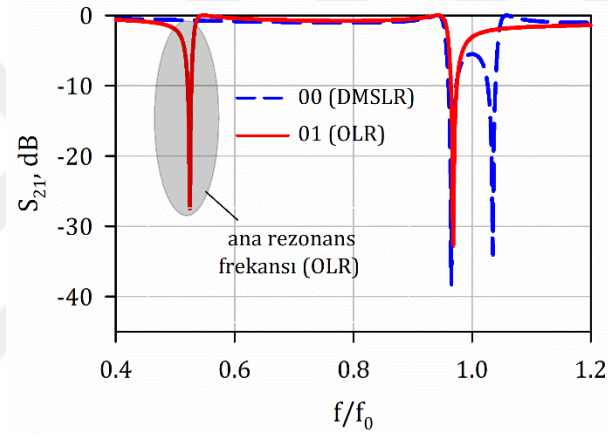
Şekil 2.7(a) ve 2.7(b)'de önerilen rezonatör modeline ait yukarıda gerçekleştirilen teorik analiz sonucunda elde edilen normalize frekans cevapları yer almaktadır. Kuplajlı bölgeye ait sırasıyla çift ve tek mod karakteristik empedansları temsil eden Z_{0e} ve Z_{0o} 'nun çift modlu halka rezonatöre ait rezonans frekansları üzerindeki etkileri Şekil 2.7(a)'da gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi, çift ve tek mod karakteristik empedansları, modların birbirine yaklaşıp uzaklaşmasını kontrol ettiği gibi araya girme kaybı üzerinde de büyük bir etkiye sahiptir. Bu modların, rezonatörün etikette kullanılması durumunda bitleri temsil ettiği yukarıda belirtilmişti. Böylece Z_{0e} ve Z_{0o} karakteristik empedanslarının, bitlerin arzu edilen frekanslarda elde edilmesine imkan sağladığı söylenebilir. Ayrıca Z_{0e} ve Z_{0o} karakteristik empedansları tarafından bit frekansları arasındaki araya girme kaybı seviyesinin ayarlanmasıyla frekans kodlarının daha kolay tespit edilebilir hale getirilmesi mümkündür. Şekil 2.7(b)'de ise rezonatörün hem açık halka rezonatör hem de yama elemanlı kapalı halka rezonatör olması durumunda teorik analiz sonucunda elde edilen frekans cevabı yer almaktadır. Açık halka rezonatöre ana rezonans frekansı grafik üzerinde belirtilmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere bu rezonans frekansı kodlama işlemi için herhangi bir anlam ifade etmemektedir.

Şekil 2.7(b) incelendiğinde etiketin birinci bitini temsil eden açık halka rezonatörün birinci harmoniği, birinci biti "0" yapmaktadır. Bu durumda, ikinci bitin "1" değerine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Yama elemanlı çift modlu halka rezonatöre ait frekans cevabından da görüleceği üzere bit frekanslarında meydana gelen rezonans frekansları, "00" frekans kodunun elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, rezonatörün

devreden tamamıyla kaldırılması durumunda herhangi bir mod oluşumu gözlenemeyeceği için iki bit de “1” değerini alarak “11” frekans kodu elde edilmektedir.



(a)



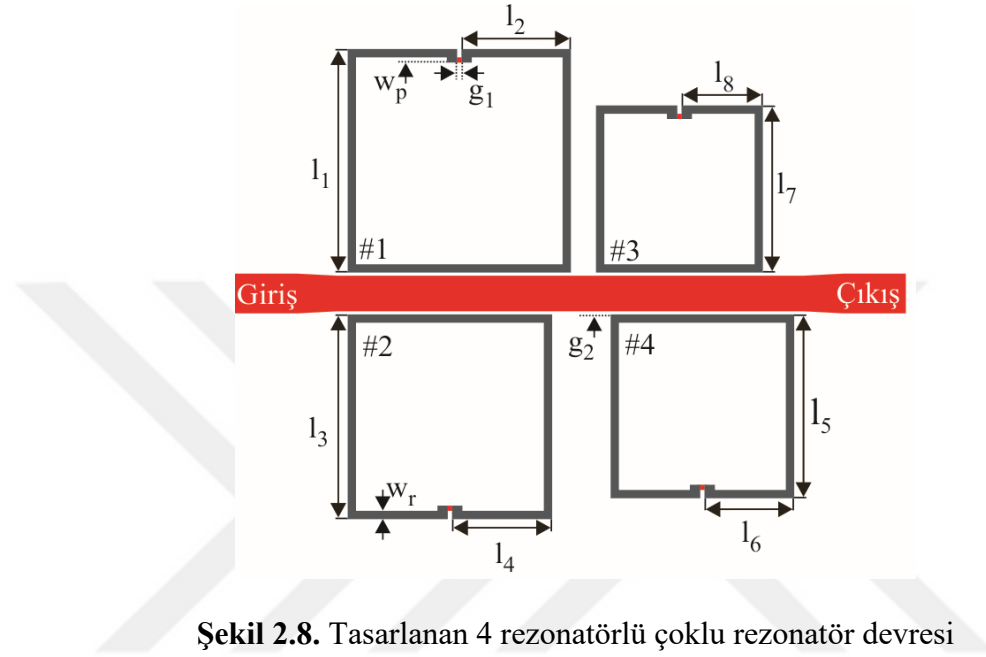
(b)

Şekil 2.7. Çift-tek mod karakteristik empedans değişiminin teorik normalize frekans cevabına etkisi (a) ve farklı frekans kodlarına ait teorik normalize frekans cevaplar (b)

2.2.3. Önerilen Rezonatör Modeli Kullanılarak Çoklu Rezonatör Devresi Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar

Yukarıda, önerilen rezonatör modeli ve kodlama tekniğine yönelik hem simülasyon hem de teorik çalışmalar yer almaktadır. Önerilen yöntem sayesinde bir rezonatörden üç frekans kodu elde edilebildiği gösterilmiştir. Çipsiz RFID etiket için daha fazla bit üretilmesi için devrede kullanılan rezonatör sayısının artırılması gerektiği açıktır. Bu düşünceyle, farklı elektriksel uzunlukta dört adet kare halka rezonatörün yer aldığı çoklu rezonatör devresi tasarlanmıştır. Bu dört rezonatör giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan düz iletim hattına kuplajlı olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Tasarlanan devre

modeli Şekil 2.8’te yer almaktadır. Şekilden de görüleceği üzere devre boyutu açısından kompaktlık sağlaması için rezonatörler yan yana değil karşılıklı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Devrede taban malzemesi olarak, dielektrik sabiti 3.38, dielektrik kalınlığı 0.813 mm olan Rogers 4003C kullanılmıştır. Devrenin toplam boyutu $21.4 \times 22.5 \text{ mm}^2$ olup, parametrik boyut bilgileri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

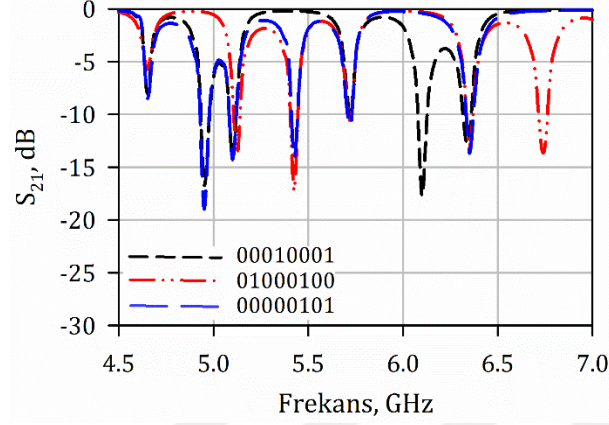


Çizelge 2.1. 4 rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri

Parametre	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
Boyut (mm)	10.70	5.25	9.80	4.80	8.80	4.30
Parametre	l_7	l_8	g_1	g_2	w_p	w_r
Boyut (mm)	8.00	3.90	0.20	0.15	0.25	0.40

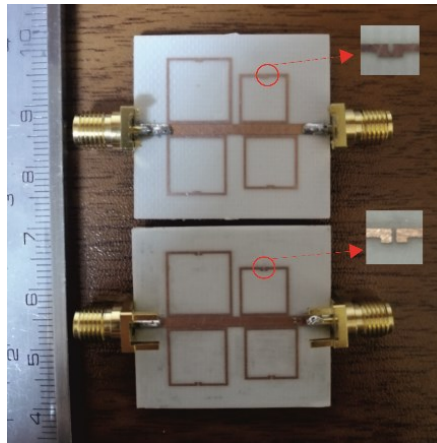
Devre tasarımı kadar tasarımın sağlamış olduğu farklı frekans kodlarının düzgün bir şekilde elde edilebilirliği de önemlidir. Bu sebeple, çoklu rezonatör devresinden elde edilebilecek bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları incelenmiştir. 4 rezonatörlü devre 8 bit sağlamakta ve her bir rezonatöre ait iki bit, frekans cevabında ardışık olarak yer almaktadır. Devreden elde edilebilen üç farklı frekans koduna ait frekans cevapları Şekil 2.9’da verilmiştir. Örnek olarak, “00010001” frekans kodunun elde edilebilmesi için Şekil 2.8’de #1 ve #3 olarak numaralandırılan rezonatörler “00” koduna sahip çift modlu halka rezonatör olarak seçili iken, #2 ve #4 olarak numaralandırılan rezonatörler “01” koduna sahip açık halka rezonatör olarak seçilmiştir. Gerekli rezonatör tipi

belirlenerek “01000100” ve “00000101” kodlarına ait frekans cevapları elde edilmiştir. Şekil 2.9’daki sonuçlardan görüleceği üzere farklı frekans kodları net bir şekilde tespit edilebilmektedir.



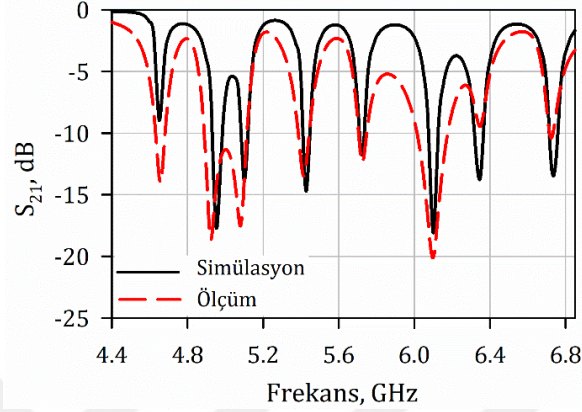
Şekil 2.9. Çoklu rezonatör devresinden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları

Tasarlanan dört rezonatörlü devrenin performansını test etmek amacıyla 2 farklı frekans kodu için çoklu rezonatör devresi imal edilmiş ve giriş/çıkış kapıları Vektör Ağ Analizörüne bağlanarak ölçüm sonuçları incelenmiştir. Fotoğraf 2.1’de imal edilen devrelerin görüntüsü verilmiştir. Devrelerden birinde tüm rezonatörler çift modlu kare halka rezonatör olarak seçilmiş ve devrenin “00000000” frekans koduna sahip olması sağlanmıştır. Diğer devrede ise tüm rezonatörler, küçük yama elemanın kaldırılmasıyla açık halka rezonatör haline getirilmiştir. Bu durumda her bir rezonatör “01” kodunu ürettiğinden devreye ait frekans kodu “01010101” olmuştur. Fotoğraf 2.1’de devrelerdeki yama elemanın bağlantı durumu yakınılaştırılmış şekilde gösterilmiştir.

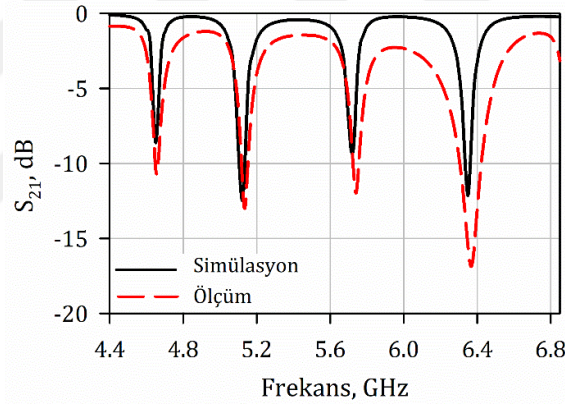


Fotoğraf 2.1. İmal edilen çoklu rezonatör devreleri

Şekil 2.10(a) ve Şekil 2.10(b)'de sırasıyla "00000000" ve "01010101" kodlu devrelere ait simülasyon ve ölçüm sonuçları verilmiştir. İki devrenin de ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile oldukça uyumlu bir şekilde elde edildiği görülmektedir. Ölçüm sonuçlarından görüleceği üzere "0" değerine sahip bit frekanslarında rezonanslar net bir şekilde gözlenmiş ve devrelere ait kodların tespit edilebildiği görülmüştür.



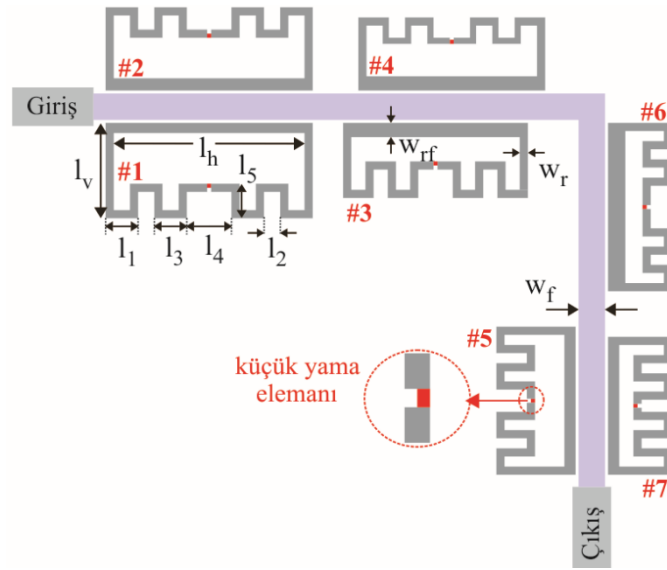
(a)



(b)

Şekil 2.10. Üretilen çoklu rezonatör devrelere ait simülasyon ve ölçüm sonuçları a) rezonatör kodu: 00, b) rezonatör kodu: 01

Dört rezonatörlü devre tasarımına ait yukarıda anlatılan çalışmalar, önerilen kodlama tekniğinin çoklu rezonatör devrelerinde kullanılabilir olduğunu ve çipsiz RFID etiketler için çok sayıda frekans kodunun elde edilebilirliğini göstermiştir. Bu düşünceyle, çipsiz RFID etikette kullanılmak üzere yeni bir 7 rezonatörlü çoklu rezonatör devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan devre konfigürasyonu Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Görüleceği üzere etiket tasarımında devreye entegre edilecek olan alıcı ve verici antenlerin yatay ve dikey polarizasyona sahip olmaları gerektiğinden giriş ve çıkış kapıları birbirine dik olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, minyatürizasyon bakımından Şekil 2.4'te önerilen kare halka rezonatör modeli kıvrımlı rezonatöre dönüştürülmüştür.



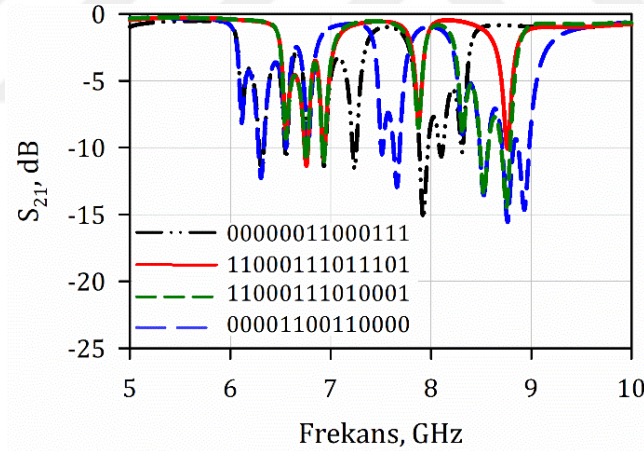
Şekil 2.11. Önerilen rezonatör modeli kullanan çoklu rezonatör devresi

Tasarlanan devrede farklı elektriksel uzunluğa sahip 7 adet rezonatör 90° bükülmüş iletim hattına kuplajlı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bit frekanslarının yer alacağı frekans sahası 6-9 GHz olarak tayin edilmiştir. Bu frekans aralığında bitlerin elde edilebilmesi için devrede yer alan tüm kıvrımlı halka rezonatör boyutları tek tek optimize edilmiştir. Bu işlemler sonucunda belirlenen çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri Çizelge 2.2’de verilmiştir. Şekil 2.11’de belirtilen rezonatör numaraları ise frekans sahasında yer alan bitlerin hangi rezonatörler tarafından oluşturulduğunu belirtmek için kullanılmıştır. Yedi rezonatörlü çoklu rezonatör devresi, ardışık olacak şekilde her bir halka rezonatörden 2 adet olmak üzere toplamda 14 bit üretmektedir. En düşük frekansta yer alan iki bit “1” numaralı rezonatör tarafından üretilirken en yüksek frekanstaki iki bit “7” numaralı rezonatörden elde edilmektedir. Arada yer alan bitler de bu numaralandırmaya bağlı olarak ilgili rezonatörler tarafından üretilmektedir.

Çizelge 2.2. 7 rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri (mm)

Rezonatör	l_h	l_v	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	w_{rf}	w_r
1	9.40	4.70	1.60	0.80	2.20	2.20	1.70	0.50	0.40
2	9.40	4.10	1.60	0.80	2.20	2.20	1.50	0.60	0.40
3	8.30	3.70	1.50	0.70	1.70	1.70	1.80	0.70	0.40
4	8.40	3.60	1.50	0.80	1.80	1.80	1.30	0.70	0.40
5	6.50	3.90	1.30	0.50	1.10	1.10	1.90	0.55	0.40
6	7.50	3.15	1.30	0.50	2.10	2.10	1.45	0.85	0.40
7	6.00	3.15	1.30	0.50	0.60	0.60	1.90	0.55	0.40

Bitlerin “0” değerini aldığı durumda meydana gelen araya girme kaybı seviyesindeki değişim ve “0” değerine sahip ardışık bitler arasındaki araya girme kaybı seviyesi frekans kodunun tespit edilebilmesi bakımından büyük öneme sahiptir. Bu sebeple, devrede yer alan rezonatörler arasındaki mesafe, bahsedilen araya girme kaybı seviyelerinin kodun daha net tespit edilebilmesini sağlayacak seviyede elde edilmesi bakımından optimizasyonla belirlenmiştir. Bu optimizasyonlar sonucunda, “1-3” “2-4” ve “6-7” numaralı rezonatörler arasındaki mesafe sırasıyla 1.50, 2.25 ve 2.25 mm olarak seçilmiştir. Daha sonra farklı frekans kodlarına ait frekans cevapları elde edilmiştir. Bir rezonatörden elde edilen iki bitin “0” değerinde olması için kapalı halka rezonatör kullanılırken, bitlerin “1” değerini almaları için rezonatör devreden kaldırılmıştır. Ayrıca, herhangi bir rezonatörün ikinci bitinin “1” değerini alması için küçük yama elemanın çıkartılması ve tek modlu açık halka rezonatör haline getirilmesi yeterlidir. Bu işlemler doğrultusunda elde edilen dört farklı frekans koduna ait frekans cevapları Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Şekilden, elde edilebilen farklı frekans kodlarının net şekilde okunabildiği görülmektedir.

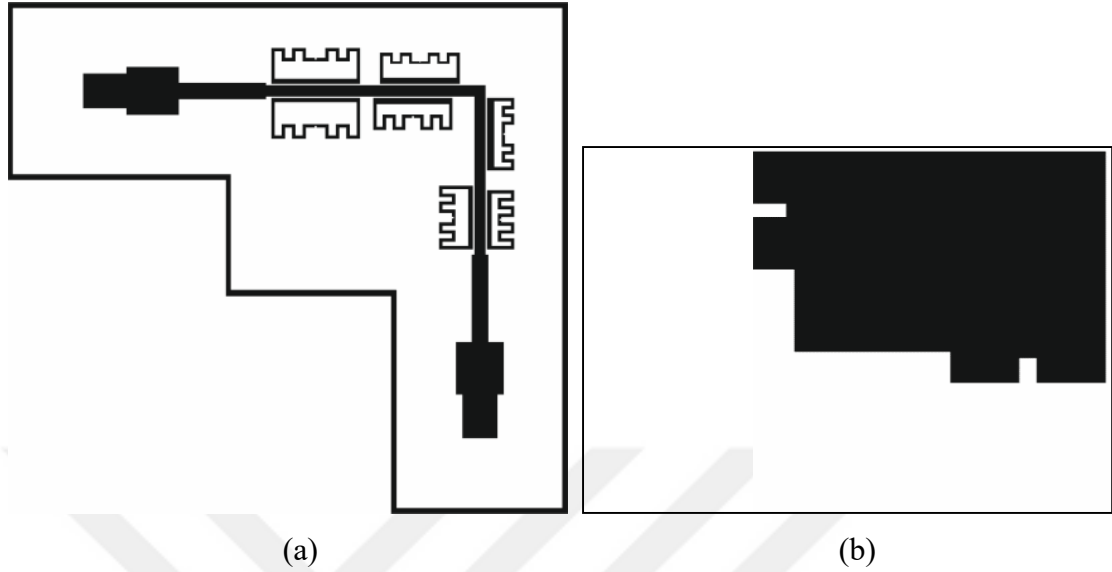


Şekil 2.12. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinden elde edilen bazı frekans kodları

2.2.4. Çipsiz RFID Etiket Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar

Çipsiz RFID etiket tasarımının nihai hale getirilmesi için Bölüm 2.2.3’te tasarlanan 7 rezonatörlü çoklu rezonatör devresi ve Bölüm 2.1’de tasarlanan geniş bant monopol anten tek bir devrede birleştirilmiştir. Bu işlem, monopol antenlerin çoklu rezonatör devresinin giriş ve çıkış kapılarına entegre edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan etikete ait üst ve alt görünüm sırasıyla Şekil 2.13(a) ve 2.13(b)’de gösterilmektedir. Farklı elektriksel

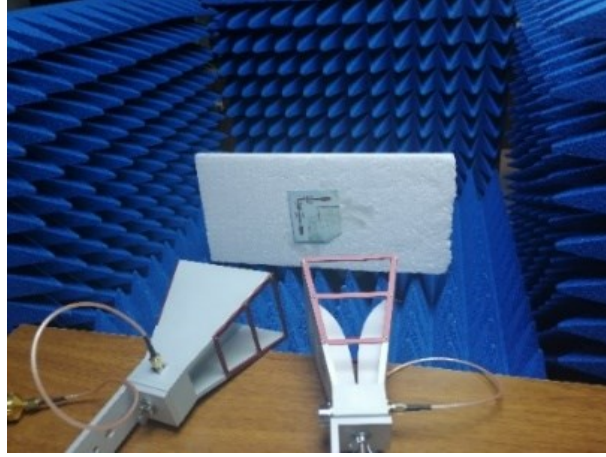
uzunluğa sahip 7 adet üç frekans kodu üretebilen rezonatörün bulunduğu etiket toplamda 14 bit ve 3^7 frekans kodu kapasitesine sahiptir.



Şekil 2.13. Önerilen çipsiz RFID etiketin üst (a) ve alt (b) görünümü

Tasarlanan çipsiz RFID etiketi test etmek için farklı frekans koduna sahip iki adet etiket üretilmiş ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Üretilen etiketlerden biri “00000000000000” frekans koduna sahiptir. Bu kod için, etikette tüm rezonatörlerin “00” koduna sahip olması gerektiğinden tüm rezonatörler, yama elemanlı çift modlu halka rezonatör formundadır. Diğer etikette yer alan rezonatörler ise tüm rezonatörlerden yama elemanın kaldırılmasıyla açık halka rezonatöre dönüştürülmüştür. Böylece, her bir rezonatörden “01” frekans kodunun üretilmesiyle etiketin “010101010101” frekans koduna sahip olması sağlanmıştır. Etiket tasarımında taban malzemesi olarak dielektrik kalınlığı 0.813 mm ve dielektrik katsayısı 3.38 olan Rogers 4003C kullanılmıştır.

Etiketleri test etmek için laboratuvar ortamında kurulan el yapımı yansız ölçüm düzeneği Fotoğraf 2.2’de gösterilmektedir. Fotoğrafta görülen ve okuyucu anten olarak kullanılan iki adet yüksek kazançlı huni anten Vektör Ağ Analizöre bağlı bulunmaktadır. Test düzeneğinde, aynı polarizasyona sahip olan huni anten ve etiket üzerinde yer alan monopol anten karşılıklı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yani, yatay polarizasyona sahip olan okuyucu anten etikette yer alan yatay polarizasyonlu anten ile karşılıklı iken diğer antenler de dikey polarizasyona sahiptir ve düzenekte karşılıklı bulunmaktadır.

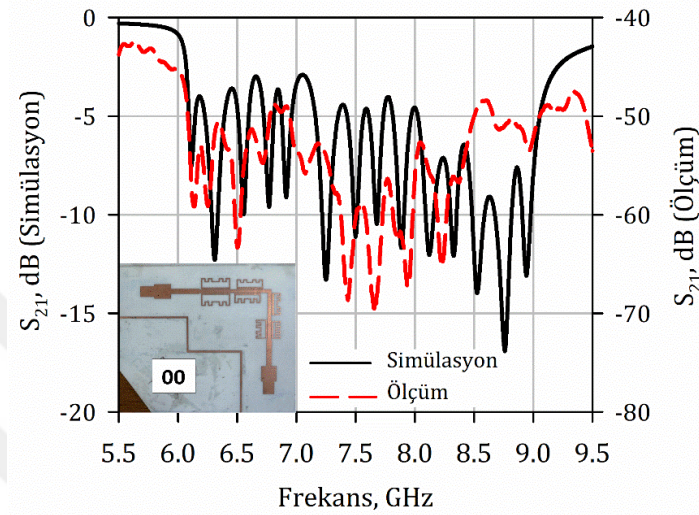


Fotoğraf 2.2. Tasarlanan çipsiz RFID etikete ait ölçüm düzeneği

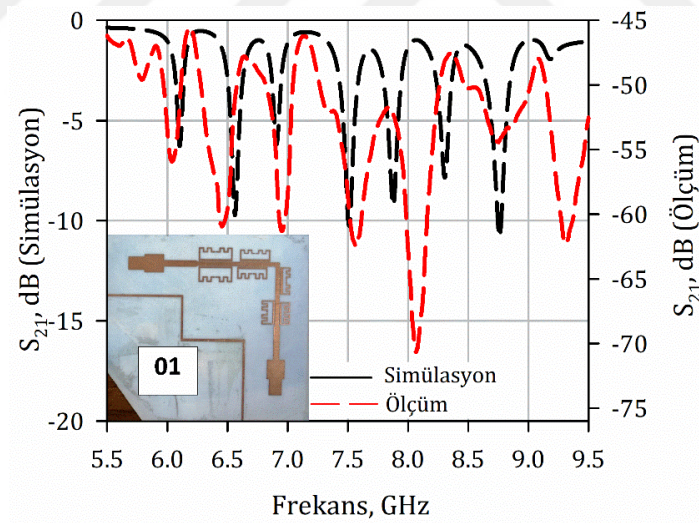
Şekil 2.14(a) ve Şekil 2.14(b)'de sırasıyla “00000000000000” ve “01010101010101” frekans kodlu etiketlere ait simülasyon ve ölçüm sonuçları gösterilmektedir. İki etiket için elde edilen sonuçlar incelendiğinde simülasyon sonuçlarına ait araya girme kaybı (S_{21}) seviyesi 0 – -20 dB değerleri arasında elde edilirken, ölçüm sonuçlarına ait araya girme kaybı (S_{21}) -45 dB'den daha düşük seviyelerde elde edilmiştir. Bunun sebebi, simülasyon cevaplarının anten içermeyen iki kapılı çoklu rezonatör devresine ait olması ve çevresel etkileri içermemesidir. Ölçüm sonuçları ise herhangi bir bağlantı olmadan sadece okuyucu ve etiket üzerindeki antenlerin haberleşmesine dayalı olduğu için daha düşük seviyelerde elde edilmektedir. Burada önemli olan, etikete ait frekans kodunun tespit edilebilirliğidir. Yani, araya girme kaybı (S_{21}) seviyesi düşük olsa bile bitlerin “0” olduğu frekanslarda rezonansın gözlenmesi çok daha önemlidir.

Şekil 2.14(a)'dan görüleceği üzere tüm rezonatörlerin “00” koduna sahip olduğu etikete ait ölçüm sonuçlarında 14 adet rezonans bit frekanslarında gözlenmiştir. Rezonans frekanslarındaki araya girme kaybı seviyelerinde 12 dB'lik çökmelerin olduğu görülmektedir. Burada çökme olarak belirtilen büyüklük, rezonans frekansının en dip noktası ile ardışık olduğu rezonans frekansları arasındaki döngü seviyesinin en üst noktası arasındaki farktır. Bu çökme seviyelerinin bazı rezonans frekansları için daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bu da, rezonansların net şekilde gözlenmesini zorlaştırmaktadır. Tüm bitlerin “0” olduğu etikette minimum çökme seviyesi 1 dB olarak gözlenmiştir. Üretilen “01010101010101” frekans kodlu etikete ait simülasyon ve ölçüm sonuçları ise Şekil 2.14(b)'de gösterilmektedir. Bu etikete ait sonuçlar incelendiğinde, yalnızca “0” değerine sahip olan bit frekanslarında rezonans frekansları gözlenmiştir.

Hatta, bu etiketteki “0” değerine sahip bitlerin diğer etikete göre daha iyi tespit edilebilir olduğu da görülmektedir. Bunun sebebi, frekans sahasında “0” değerine sahip olan bitin ardışığında yer alan bitlerin “1” değerine sahip olmasıdır. Yani, oluşan rezonanslar arasında daha geniş frekans aralığı bulunmasıdır. Bu da, frekans kodunun daha yüksek çökme seviyelerine sahip olacak şekilde elde edilmesine imkan vermektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.14. Frekans kodu: 00000000000000 (a) ve frekans kodu: 01010101010101 (b) olan çipsiz RFID etikete ait simülasyon ve ölçüm sonuçları

İki etikete ait ölçüm sonuçları incelendiğinde ardışık bitlerin “0” değerine sahip olduğu durumda tespit edilebilirliklerinin daha zor olduğu söylenebilir. Ayrıca, etiketlerin imal edilmesi esnasında meydana gelen boyut hataları rezonans frekanslarının kaymasına sebep olabilir. Rezonans frekanslarının tam olarak istenilen frekansta elde edilememesi özellikle ardışık olan rezonans frekanslarının birbirini etkilemesine yol açmakta ve

frekans kodunun okunabilirliğini zorlaştırmaktadır. Bu sorunu çözmek için daha hassas üretim teknikleri kullanılması faydalı olacaktır.

Sonuç olarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, önerilen kodlama tekniğine sahip rezonatör modelinin çipsiz RFID etiketler için kullanıma uygun olduğu görülmektedir. Önerilen yöntem sayesinde kod çeşitliliği oldukça kolay bir şekilde artırılabilir ve bu bakımdan çipsiz RFID etiket literatürü için büyük önem arz etmektedir.



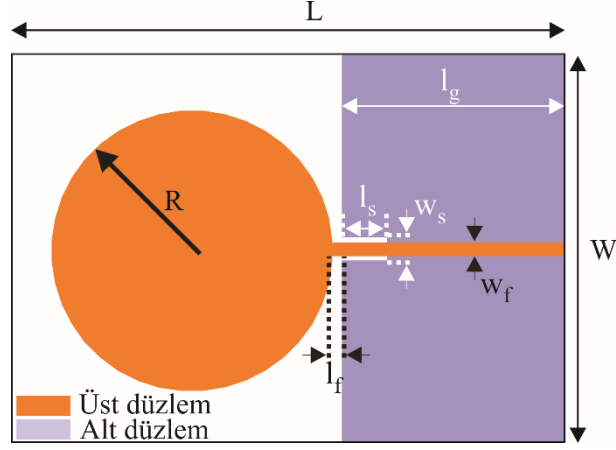
BÖLÜM III

ÜÇ MODLU BEŞ VE SEKİZ FREKANS KODLU REZONATÖR MODELLERİ ve ÇİPSİZ RFID ETİKET TASARIMLARI

Bu bölümde, tez kapsamında önerilen 5 ve 8 frekans kodu üretebilen rezonatör modellerinin kullanıldığı çipsiz RFID etiket tasarımları yer almaktadır. Önerilen rezonatör modellerinin ikisi de saplama yüklü açık halka rezonatördür ve etiket için 3 bit üretmektedir. Ancak farklı konfigürasyona sahip olmaları sebebiyle rezonatörlerden biri 5 kod üretirken diğeri 8 kod üretebilmektedir. Bu rezonatörlerin kullanıldığı çipsiz RFID etiket tasarımları Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3'te ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Bir önceki bölümde olduğu gibi bu etiketler için de literatürde yer alan geniş bant monopol anten tasarımından faydalanılmıştır. Ele alınan anten tasarımına yönelik çalışmalar Bölüm 3.1'de yer almaktadır.

3.1. Dairesel Yama Elemanlı Geniş Bant Monopol Anten Tasarımı

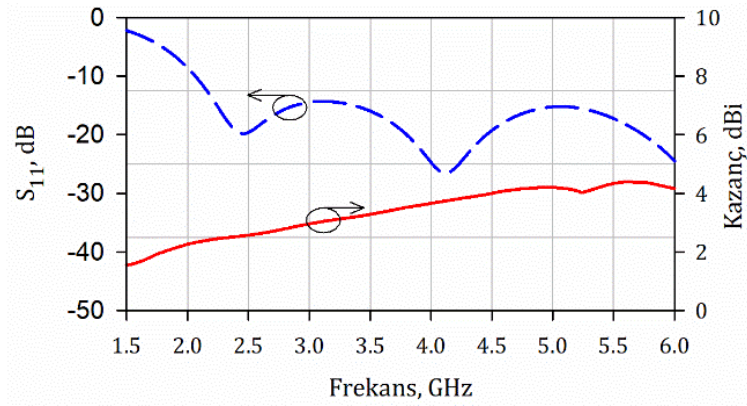
Literatürde yer alan çipsiz RFID etiketlerde sıklıkla kullanılan anten modellerinden biri dairesel yama antendir. Bu kapsamda, tez kapsamında tasarlanacak olan beş ve sekiz frekans kodlu rezonatör modellerinin kullanıldığı etiketlerde kullanılmak üzere 2013 yılında gerçekleştirilen çalışmada yer alan geniş bant monopol anten tasarımı (Sun vd., 2013) ele alınmıştır. Kullanılan antene ait devre konfigürasyonu Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Anten devresinde ışına elemanı tabanın üst yüzeyinde yer alan dairesel yama olmakla birlikte bu yama 50Ω 'luk düz iletim hattına bağlıdır. Bant genişliğinin ve kazancın artırılması için toprak düzleminde bir yarık bulunmaktadır. Toprak düzleminde daha fazla sayıda yarık kullanması suretiyle daha geniş çalışma bandı elde edilebildiği Sharma ve Hashmi tarafından 2016 yılında gösterilmiştir (Sharma ve Hashmi., 2016). Ancak, etiketlerde kullanılacak olan anten tasarımı toprak düzleminde tek yarık olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi, yarık sayısının çoğaltılması veya yarığın daha kompleks bir yapıda kullanılmasının çipsiz RFID etiket üzerindeki entegrasyon işleminde bazı zorluklar meydana getirebilecek olmasıdır. Çünkü etiket üzerinde bulunan çoklu rezonatör devresinin giriş ve çıkış kapılarının bağlı bulunduğu besleme hattı, aslında antenin de besleme hattı olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden, toprak düzlemindeki yarığın daha uzun olması veya çoğaltılması devre boyutunu artıracaktır.



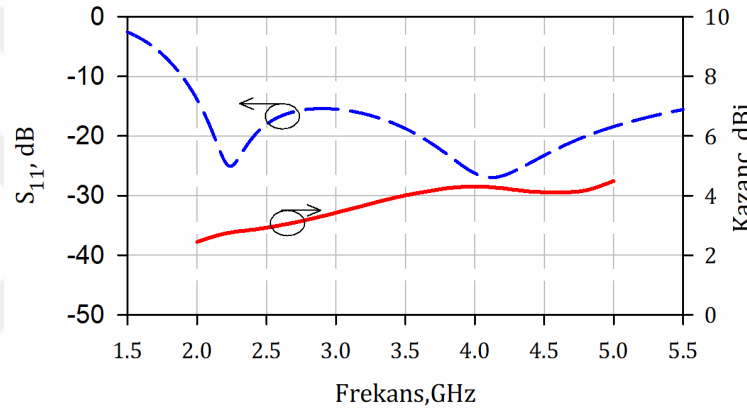
Şekil 3.1. Tasarlanan geniş bant monopol anten tasarımı

Tez kapsamında Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3'te yer alan etiketlerde Şekil 3.1'de verilen anten modeli kullanılmıştır. Ancak bu etiketler farklı frekans sahasında bitlere sahiptir. Bu yüzden iki etiket üzerinde aynı anten modeli kullanılmış olsa da boyut bakımından farklılık bulunmaktadır. Bölüm 3.2'deki beş kodlu rezonatör modelinin kullanıldığı çipsiz RFID etikete ait bitler 2.4-6 GHz frekansları aralığında yer almaktadır. Bu doğrultuda hem çalışma frekansının hem de kazanç seviyesinin etiket için uygun olması bakımından gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda elde edilen antene ait boyutlar şu şekildedir: $L = 50$, $W = 43$, $R = 15.50$, $w_f = 2.35$, $w_s = 2.55$, $l_s = 5.00$, $l_g = 17.75$ ve $l_f = 0.30$ mm. Diğer yandan, Bölüm 3.3'te yer alan etikete ait 15 adet bit ise 1.90-3.75 GHz aralığındadır. Antenin boyutları bu etiket için uygun çalışma frekansına sahip olması bakımından yeniden optimize edilmiştir. Optimizasyon işlemleri sonucunda elde edilen devre boyutları şu şekildedir: $L = 57$, $W = 43$, $R = 15$, $w_f = 2.35$, $w_s = 2.35$, $l_s = 5.25$, $l_g = 23.75$ ve $l_f = 0.25$ mm. Şekil 3.2(a) ve 3.2(b)'de bu iki geniş bant monopol antene ait maksimum kazanç ve yansıma katsayısına ilişkin frekans cevapları verilmiştir. İlk olarak Şekil 2.5(a)'dan 2.2-6 GHz arasında geriye dönme kaybının (S_{11}) -10 dB'den daha düşük ve maksimum kazancın da 2 dBi'den daha yüksek seviyede elde edildiği görülmektedir. Bu da optimize edilen antenin, Bölüm 3.2.3'te yer alan ve 2.4-5.8 GHz frekans aralığında 24 adet bit üreten 8 rezonatörlü devre ile etiket üzerinde birlikte kullanılmak için uygun olduğunu göstermektedir. Diğer yandan Şekil 3.2(b)'de, Bölüm 3.3.3'te yer alan ve 1.9-4 GHz frekans aralığında 15 adet bit üreten 5 rezonatörlü devre ile birlikte etiket tasarımında kullanılan antenin frekans cevabı verilmiştir. Bu cevap incelendiğinde geriye dönme kaybının (S_{11}) 1.9 GHz'den itibaren -10dB'den daha düşük

seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca, antenin 1.9-4 GHz frekansları arasında kazanç değeri en düşük 2.45 dBi olarak elde edilmiştir.



(a)

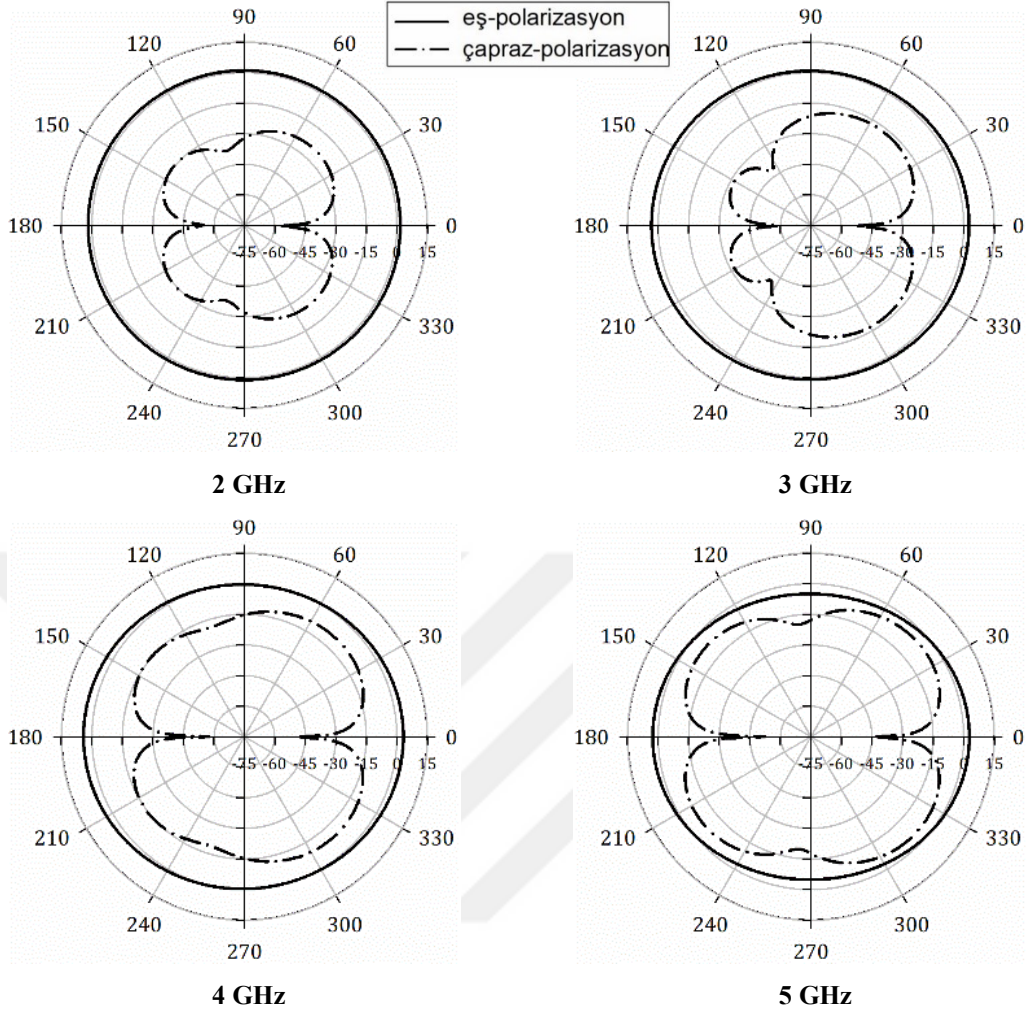


(b)

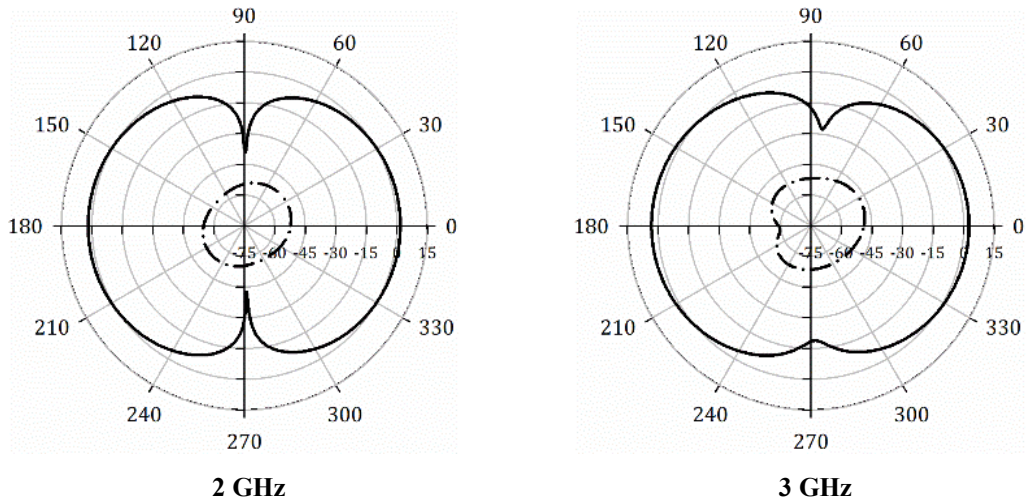
Şekil 3.2. Bölüm 3.2 (a) ve Bölüm 3.3 (b)'de kullanılan antene ait yansıma katsayısı ve maksimum kazanç frekans cevabı

İki antenin de eş ve çapraz polarizasyon performanslarını incelemek amacıyla bitlerin yer aldığı 4 farklı frekansta ışınma örüntüleri incelenmiştir. Şekil 3.2(a)'da frekans cevabı verilen anten için 2, 3, 4 ve 5 GHz frekanslarında, Şekil 3.2(b)'de frekans cevabı verilen anten için 2, 2.5, 3 ve 3.5 GHz frekanslarında hem xz- düzleminde hem de yz- düzleminde elde edilen ışınma örüntüleri sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir. Bu çapraz polarizasyon örüntüleri incelendiğinde antenlerin -10 dBi'den daha düşük seviyede çapraz polarizasyona sahip oldukları gözlenmektedir. Bu durum, antenlerin çipsiz RFID etiket tasarımında dikey ve yatay polarizasyona sahip olacak şekilde kullanılmasının uygun olduğunu göstermektedir. Çünkü bu çapraz polarizasyon kazancı seviyesi etiket ile okuyucu arasında gerçekleşecek sinyal alış-verişinde hem alınan hem de gönderilen sinyalin daha temiz bir şekilde iletilmesi anlamına gelmektedir.

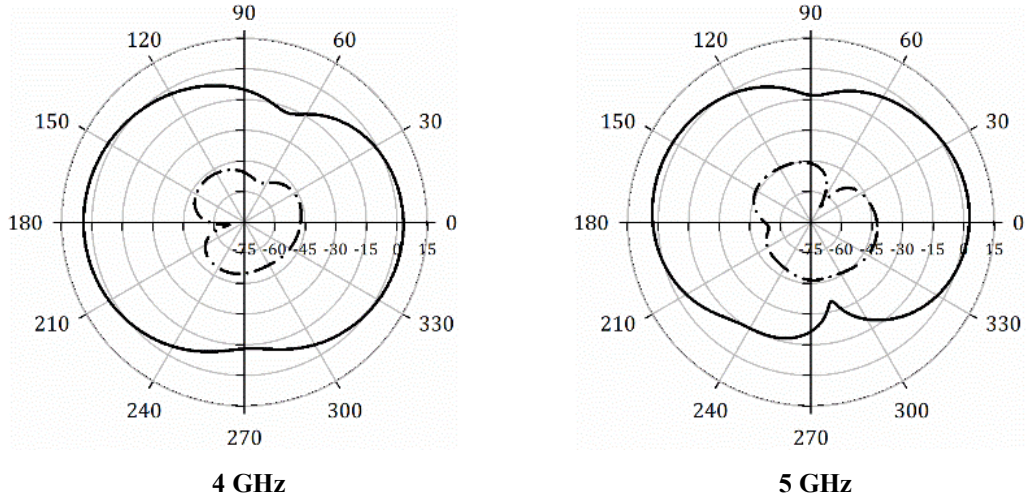
XZ



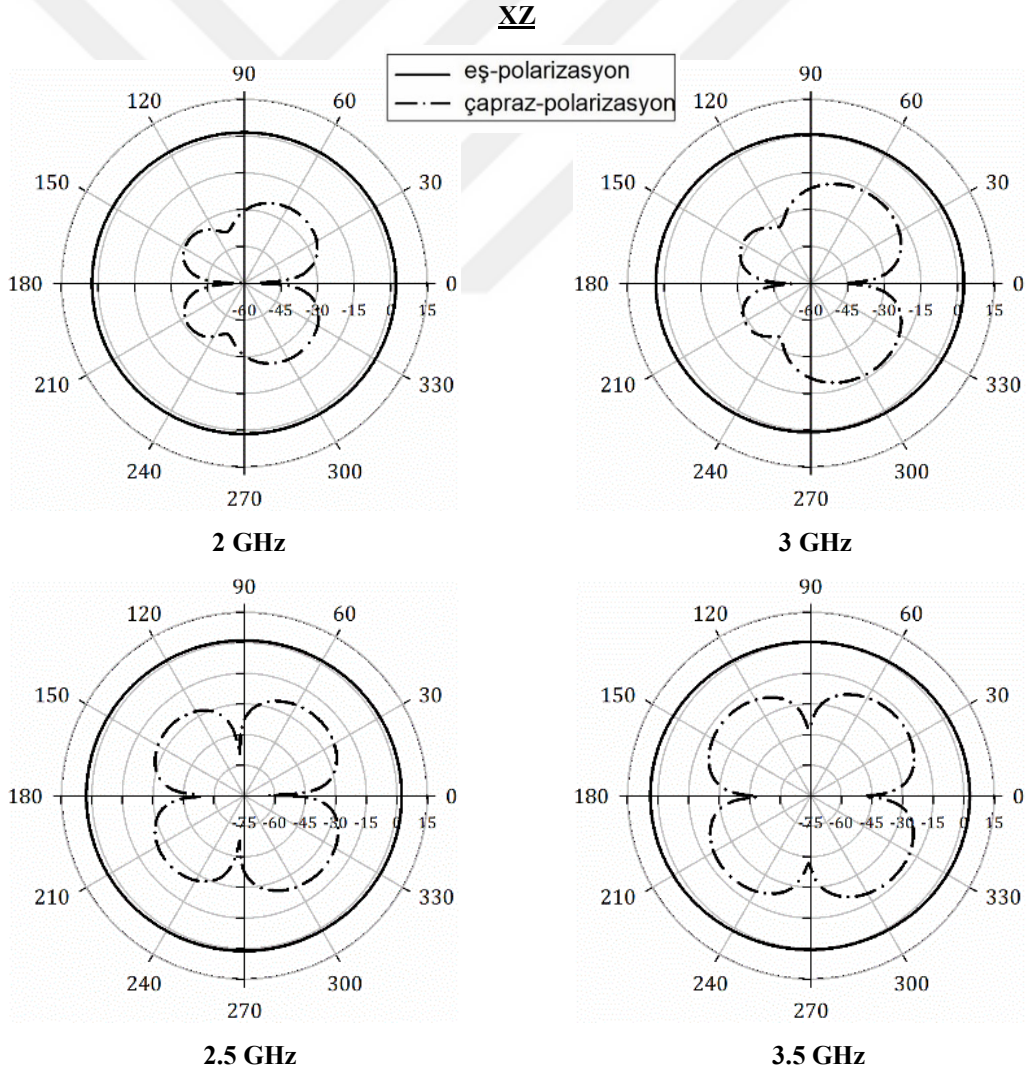
YZ



Şekil 3.3. Şekil 2.5.(a)'da frekans cevabı verilen monopol antenin farklı frekanslarda ve farklı düzlemlerdeki ışınma örüntüleri

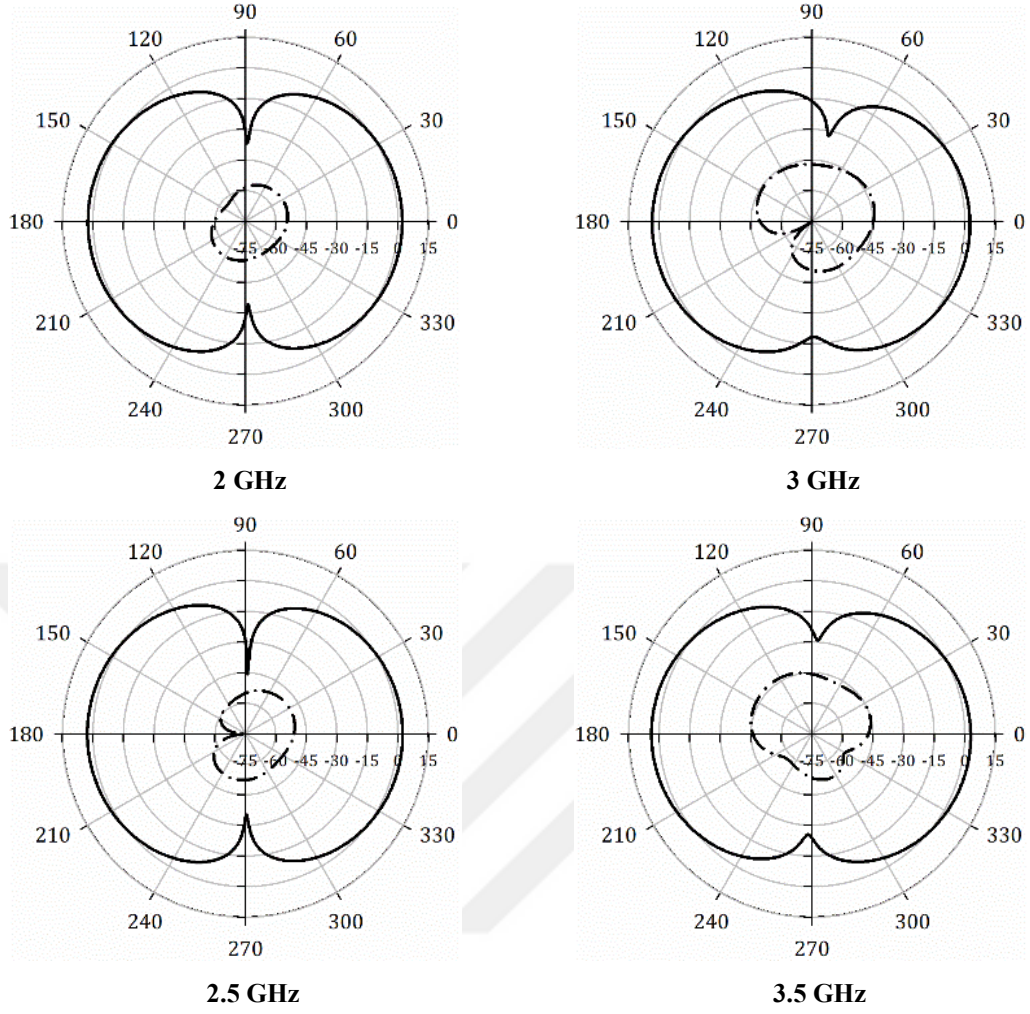


Şekil 3.3 (Devam) Şekil 2.5.(a)'da frekans cevabı verilen monopol antenin farklı frekanslarda ve farklı düzlemlerdeki ışıma örüntüleri



Şekil 3.4. Şekil 2.5.(b)'de frekans cevabı verilen monopol antenin farklı frekanslarda ve farklı düzlemlerdeki ışıma örüntüleri

YZ



Şekil 3.4. (Devam) Şekil 2.5.(b)'de frekans cevabı verilen monopol antenin farklı frekanslarda ve farklı düzlemlerdeki ışıma örüntüleri

3.2. Önerilen 5 Frekans Kodlu Rezonatör Modeli ve Çipsiz RFID Etiket Tasarımı

Bu bölümde 5 frekans kodu üretebilen rezonatör modelinde, tek modlu açık halka rezonatörün simetri eksenine yerleştirilen saplamalar sayesinde mod sayısının artırılması sağlanmaktadır. Saplamaların bağlantısı, rezonatörün çipsiz RFID etiket için kullanımı esnasında uygun kuplaj mekanizmasına sahip olacak şekilde gerçekleştirilmektedir. İlk olarak, önerilen rezonatör modelinin simetrik olması durumu ele alınarak teorik analiz çalışmalarına yer verilmektedir. Açık halka rezonatörün simetrik saplamalara sahip olması durumunda rezonatör çift mod özelliği sergilemektedir. Simetrik devre yapısına sahip olan rezonatör çift ve tek mod yöntemi ile teorik olarak analiz edilmektedir. Modların teorik analizi gerçekleştirildikten sonra rezonatörün üçüncü modu üretebilmesi için asimetrik saplamaların bağlı bulunduğu rezonatör modeline geçiş yapılmaktadır. Bu

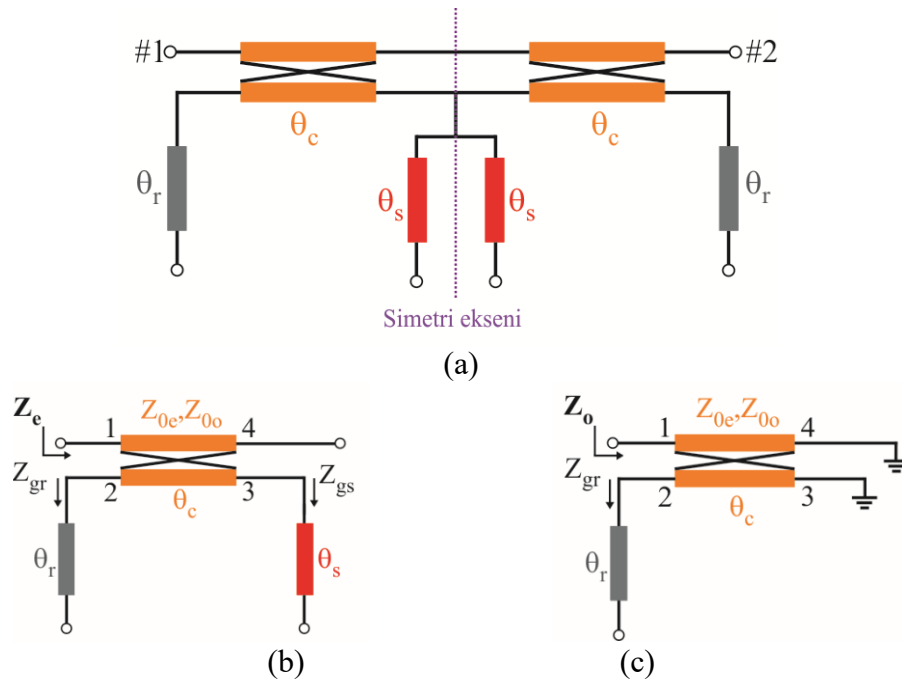
durumda, açık halka rezonatör ve rezonatörün simetri eksenine bağlı bulunan asimetric her bir saplama, birbirinden bağımsız olarak bir modun kontrolünü sağlamaktadır. Böylece, üç modun birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesiyle rezonatörden 5 frekans kodunun elde edilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, hem farklı frekans kodlarının elde edilmesi sırasında meydana gelen frekans kaymalarını azaltmak hem de minyatürizasyon sağlamak için yapılan simülasyon çalışmaları da detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Rezonatör tasarımı nihai olarak tamamlandıktan sonra, 6 rezonatörlü çoklu rezonatör devresi tasarımı gerçekleştirilerek farklı frekans kodlarının elde edilebilirliğine ait incelemelere ve deneysel çalışmalara yer verilmektedir. Sonrasında, çipsiz RFID etiket için daha fazla bit sağlanması için tasarlanan 8 rezonatörlü çoklu rezonatör devresi ve bu devre ile uyumlu çalışma frekansına sahip geniş bant monopol anten devresi tek bir devrede birleştirilmektedir. Tasarımı tamamlanan çipsiz RFID etiketten toplamda 24 bit ve 5^8 adet frekans kodu elde edilmektedir. Bu kodlardan iki tanesi için etiket üretimi gerçekleştirilmiş ve test edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları etiketin kodlanabilir, ürün tanımlama ve takip işlemi için uygun olduğu ortaya konulmuştur.

3.2.1. Simetrik Rezonatör Analizi

Bir açık halka rezonatörün simetri ekseninde bulunan asimetric iki açık devre saplama, rezonatöre iki rezonans frekansı daha kazandırmaktadır (Zhang ve Zhu, 2011). Böylelikle, bir rezonatörden üç adet rezonans frekansı bir başka deyişle rezonatörün çipsiz RFID etiket için kullanılması durumunda üç adet bit elde edilebilir. Ancak, üç modlu rezonatörün çipsiz RFID etiket tasarımında kullanılması durumunda kuplaj mekanizması ile saplamların konum ve yerleşimleri farklı frekans kodlarının elde edilebilmesi bakımından oldukça önemlidir. Bu doğrultuda, tez çalışmasında önerilen rezonatöre ait eşdeğer devre modeli Şekil 3.5(a)'da gösterilmiştir. Farklı kod kombinasyonlarının elde edilebilmesi için önerilen rezonatör modelinde saplamlar rezonatörün iç kısmında yer alacak şekilde bağlanmaktadır. Böylece, saplamların bağlı olduğu yarım dalga boyu ($\lambda/2$) açık halka rezonatör de, şekilde #1 ve #2 olarak belirtilen giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan besleme hattına kuplajlı olacak şekilde yerleştirilmektedir. Şekil 3.5(a)'da gösterilen eşdeğer devre modelinden anlaşılacağı üzere rezonatörün kuplajlı hatlarının ortasına iki adet özdeş saplama bağlanmıştır. Saplamların özdeş olması durumunda rezonatör, (Hong vd., 2007) çalışmasına benzer şekilde saplama yüklü çift modlu rezonatör olarak davranmaktadır. Ancak belirtildiği

üzere önerilen rezonatör modelinde, simetri ekseninde bulunan bir noktaya bağlı iki tane açık devre saplama bulunmaktadır ve bu bakımdan (Hong vd., 2007) tarafından yapılan çalışmadan farklıdır.

Önerilen rezonatör modeline ait teorik analiz çalışmaları simetrik saplamalı çift modlu rezonatör ve simetrik kuplajlı hat üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu devre modeli üzerinden üç modlu rezonatöre geçiş, simetri eksenine yerleştirilecek ve simetrik saplamalardan farklı elektriksel özellikte bir saplamanın daha yerleştirilmesi veya bu iki simetrik saplamanın asimetric olacak şekilde seçilmesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Üç modlu rezonatör modeline ait incelemeler bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak yer almaktadır. Şekil 3.5(a)'da yer alan eşdeğer devre modelinde elektriksel uzunluğu θ_c olarak belirtilen kuplajlı hatta ilişkin analiz kuplajlı hat teorisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Giriş ve çıkış kaplarına göre simetrik olan devrenin analizi için ise çift-tek mod empedans analizi kullanılmaktadır. Şekil 3.5(b) ve 3.5(c)'de sırasıyla çift ve tek mod yarı-devre eşdeğer devre modelleri gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere çift mod yarı-devre eşdeğer devre modeli, devrenin giriş ve çıkış kaplarına göre simetri ekseninden ikiye ayrılması ve simetri düzleminin açık devre yapılması suretiyle elde edilmektedir. Tek mod yarı-devre eşdeğer devre modeli ise aynı simetri düzleminin kısa devre yapılması ile elde edilmektedir.



Şekil 3.5. Önerilen üç modlu rezonatörün simetrik durumuna ait eşdeğer devre modeli (a), çift mod yarı-devre eşdeğer devre modeli (b) ve tek mod yarı-devre eşdeğer devre modeli (c)

Çift ve tek mod yarı-devre eşdeğer devre modellerinin girişinden görülen Z_e ve Z_o empedanslarının bulunmasıyla araya girme kaybı (S_{21}) elde edilebilir (Hong ve Lancaster, 2001). Bu sayede, iletim sıfırlarına ait frekans tayini sağlanmaktadır. Aynı zamanda, iletim sıfırları etikete ait bitler için “0” değerini temsil ettiğinden dolayı aslında bit frekanslarının tayin edildiği söylenebilir. Teorik olarak elde edilen bit frekanslarının kontrollerine ait detaylı incelemeler bölümün ilerleyen kısımlarında yer almaktadır.

Z_e ve Z_o empedanslarının hesaplanması için Şekil 3.5(b) ve Şekil 3.5(c)’de yer alan çift mod yarı-devre eşdeğer modeli ve tek mod yarı-devre eşdeğer devre modelleri dikkate alınacaktır. Bu yarı-devre modellerinde θ_s , θ_c ve θ_r elektriksel uzunlukları sırasıyla, açık devre saplama, rezonatörün kuplajlı hattı ve rezonatörün kuplajlı olmayan yan koluna karşılık gelmektedir. Dört kapılı kuplajlı hat analizi, çift ve tek mod eşdeğer devrelerinin giriş empedansları ile gerçekleştirilebilir ve dört kapılı kuplajlı hattın empedans matrisi elemanları Denklem (2.2) setinde verildiği gibi tanımlanabilir (Pozar, 2003). Hatırlanacağı üzere, Denklem (2.2)’de bulunan Z_{0e} ve Z_{0o} sırasıyla çift ve tek mod karakteristik empedanslarını temsil etmektedir. Ayrıca, dört kapılı devreye ait akım ve gerilim ilişkileri ise Denklem (2.3) setinde verildiği gibi yazılabilir (Pozar, 2014).

Çift mod yarı-devre eşdeğer devre modeli analizinde, Şekil 3.5(b)’de gösterilen çift mod giriş empedansı, Z_e , $V_2 = -I_2 Z_{gr}$, $V_3 = -I_3 Z_{gs}$ ve $I_4 = 0$ akım ve gerilim koşullarında Denklem (2.3) setinin basitleştirilmesiyle elde edilebilir. Çift mod yarı-devre eşdeğer devre modelinde bulunan rezonatör yan kolunun giriş empedansı Z_{gr} ve rezonatörün simetri ekseninde bağlı bulunan saplamanın giriş empedansı Z_{gs} , açık devre hattın girişinden görülen empedans olarak hesaplanabilir ve sırasıyla

$$Z_{gr} = -jZ_{0r} \cot(\theta_r) \quad (3.1a)$$

$$Z_{gs} = -jZ_{0s} \cot(\theta_s) \quad (3.1b)$$

şeklinde elde edilir. Burada Z_{0r} ve Z_{0s} sırasıyla, rezonatör yan koluna ve saplama hattına ait karakteristik empedansları temsil etmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda çift mod giriş empedansı Z_e ,

$$\frac{V_1}{I_1} = Z_e = Z_{11} - K \quad (3.2a)$$

$$K = \frac{Z_{12}^2(Z_{gs} + Z_{11}) + Z_{13}^2(Z_{gr} + Z_{11}) - Z_{12}Z_{13}(Z_{14} + Z_{11})}{(Z_{gs} + Z_{11})(Z_{gr} + Z_{11}) - Z_{14}^2} \quad (3.2b)$$

olarak elde edilir.

Şekil 3.5(c)'de gösterilen tek mod yarı-devre eşdeğer devre modelinden görüleceği üzere 2, 3 ve 4 numaralı kapılara ait gerilim ifadeleri; $V_2 = -I_2 Z_{gr}$, $V_3 = V_4 = 0$ olarak yazılabilir. Bu eşitliklerin Denklem (2.3) setinde kullanılmasıyla, tek mod giriş empedansı Z_o ,

$$\frac{V_1}{I_1} = Z_o = Z_{11} + MZ_{12} + LMZ_{13} + LZ_{14} \quad (3.3a)$$

$$L = \frac{Z_{12}Z_{13} - Z_{11}Z_{14}}{Z_{11}^2 - Z_{12}^2} \quad (3.3b)$$

$$M = \frac{-Z_{12} - LZ_{13}}{Z_{gr} + Z_{11} + LZ_{14}} \quad (3.3c)$$

olarak elde edilir.

Denklem (3.4a) ve Denklem (3.5a) kullanılarak, saçılma parametrelerinden iletim katsayısı (S_{21}),

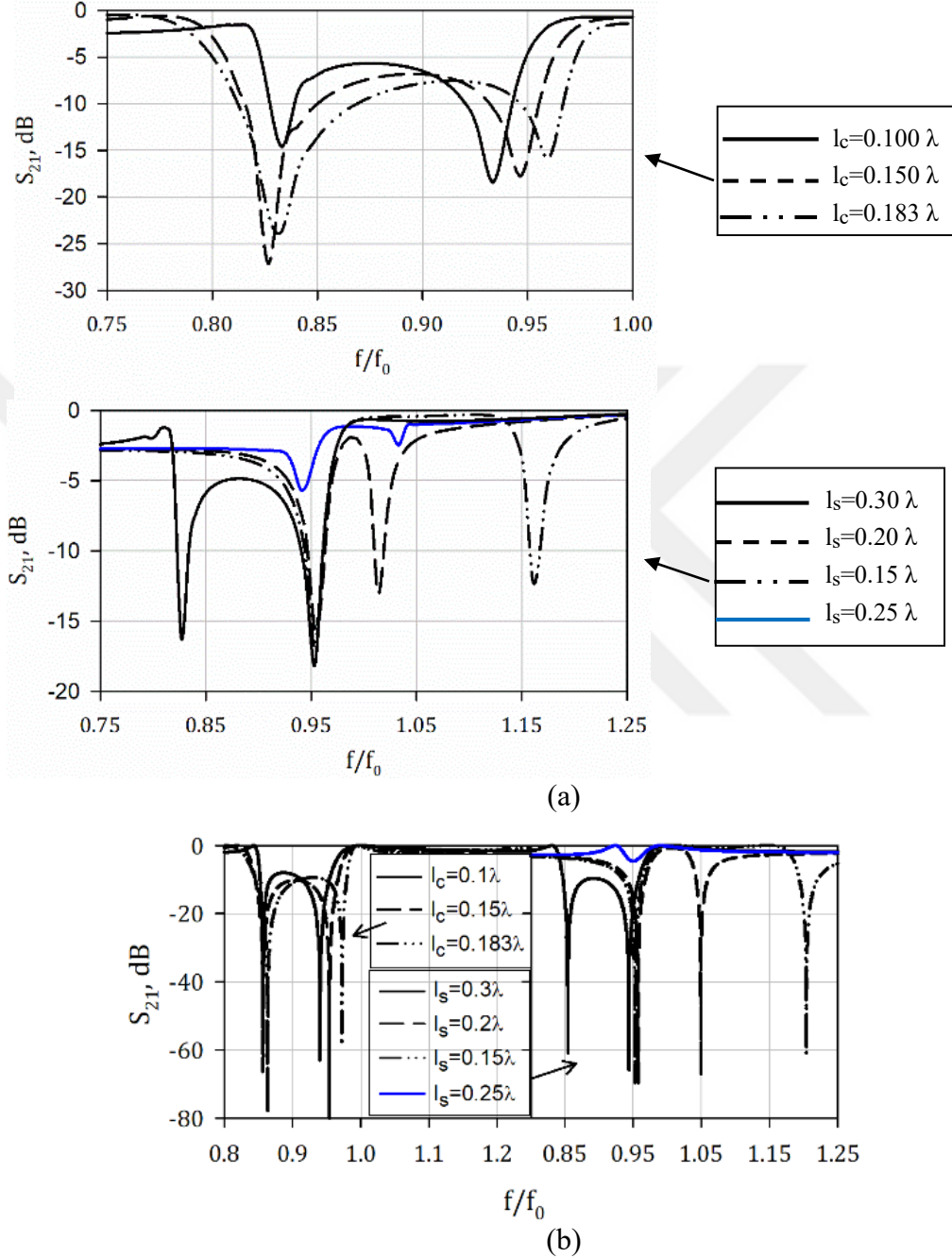
$$S_{21} = \frac{Z_0(Z_e - Z_0)}{(Z_e + Z_0)(Z_0 + Z_0)} \quad (3.4)$$

formülü ile hesaplanabilir (Hong ve Lancaster, 2001). Devreye ait rezonans frekansları bu denklemdeki iletim sıfırları olduğundan,

$$Z_e - Z_0 = 0 \quad (3.5)$$

eşitliği kullanılarak rezonans frekansları bir başka deyişle bit frekansları hesaplanabilir.

Elektriksel uzunlukları θ_s ve θ_c olan hatların fiziksel uzunlukları dalga boyu cinsinden l_s ve l_c olarak tanımlanarak farklı uzunluklarda olması durumunda araya girme kaybına etkileri normalize frekanslar üzerinden Şekil 3.6(a) ve Şekil 3.6(b)'de gösterilmektedir.



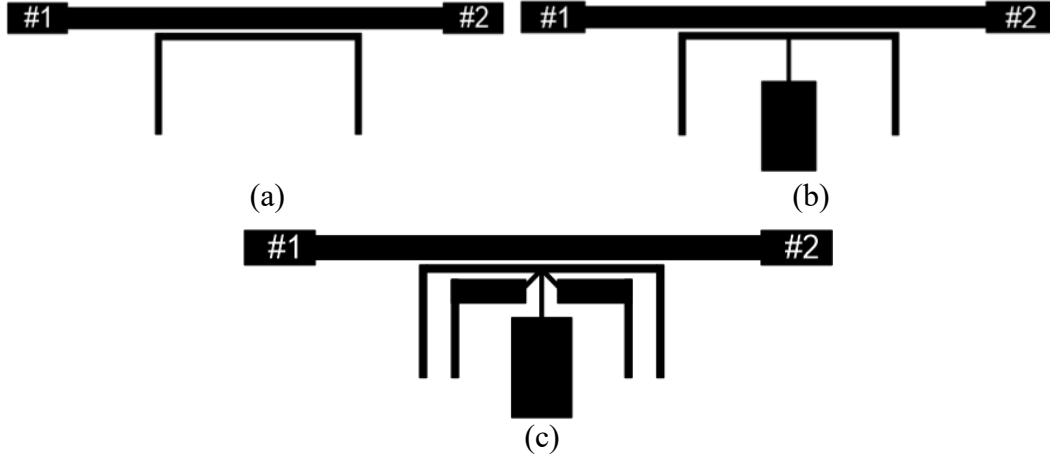
Şekil 3.6. Farklı l_s ve l_c uzunluklarının normalize frekanslarda araya girme kaybına (S_{21}) üzerinde etkisi; simülasyon sonuçları (a) ve teorik analiz sonuçları (b) ($l_c + l_r = 0.25\lambda$)

Şekil 3.6(a)'da simülasyon sonuçları yer alırken, Şekil 3.6(b)'de teorik olarak elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Ayrıca l_r uzunluğu da, θ_r elektriksel uzunluğu ile temsil edilen

rezonatör yan koluna ait fiziksel uzunluğu temsil etmektedir. Analiz işlemlerinde, açık halka rezonatörün uzunluğu yaklaşık olarak yarım dalga boyu ($\lambda/2$)'dur. Tüm incelemeler sırasında ise $l_c + l_r = 0.25\lambda$ eşitliği korunmaktadır. Şekil 3.6(a) ve (b)'den görüleceği üzere rezonatörün kuplajlı hat uzunluğu (l_c) değişimi, açık halka rezonatör tarafından üretilen ana rezonans frekansını etkilemektedir. Saplamaların ürettiği rezonans frekansının, l_c uzunluğundaki değişimden daha az etkilendiği açıkça görülmektedir. Yine Şekil 3.6(a) ve (b)'den görüleceği üzere ana rezonans frekansı sabit tutulurken saplama uzunluğu l_s 'nin değişimi ile saplamaların ürettiği rezonans frekansının ana rezonans frekansından bağımsız bir şekilde kontrol edilebildiği görülmektedir. Saplamaların ürettiği rezonans frekansının, saplamaların çeyrek dalga boyundan (0.25λ) daha uzun olması durumunda ana rezonans frekansından daha düşük frekansta meydana geldiği görülmektedir. Bu rezonans frekansının, saplama uzunluğunun çeyrek dalga boyundan (0.25λ) daha kısa seçilmesiyle ana rezonans frekansından daha yüksek frekanslarda elde edilebildiği de görülmektedir. Böylelikle, önerilen rezonatör modeliyle sağlanan bitlerin birbirinden bağımsız olarak arzu edilen frekanslarda elde edilebileceği açıkça görülmektedir. Buradan sonuçla, bit frekanslarının konumu dışında saplamaların ve rezonatörün varlığına bağlı olarak farklı kod kombinasyonlarının da elde edilebileceği öngörülebilir. Kodlama tekniği ve parametrik incelemeler 5 frekans kodu sağlayan asimetrik saplama yüklü rezonatör modeli üzerinden Bölüm 3.2.2'de ayrıntılı olarak yer almaktadır.

3.2.2. 5 Frekans Kodu Üretebilen Üç Modlu Rezonatör Tasarımı

Bu bölümde, Bölüm 3.2.1'de teorik analizi gerçekleştirilen saplama yüklü çift modlu rezonatör üzerinde yapılan geliştirmeler sayesinde önerilen rezonatör modeliyle etiket için 3 bit ve 5 frekans kodunun elde edilebilmesine yönelik çalışmalar ayrıntılı şekilde anlatılmaktadır. Bilindiği üzere simetrik saplama yüklü açık halka rezonatörün simetri eksenine farklı elektriksel özellikte bir saplamanın daha bağlantısı rezonatöre üç mod özelliği kazandırmaktadır (Zhang ve Zhu, 2011). Ancak, (Zhang ve Zhu, 2011)'deki saplama mekanizması çipsiz RFID etikette kullanıma uygun değildir. Tez kapsamında önerilen rezonatör modelinde yer alan saplamalar rezonatöre Şekil 3.7'de gösterildiği gibi bağlı bulunmaktadır. Şekil 3.7(a), 3.7(b) ve 3.7(c)'de önerilen rezonatör modelinin tasarımına ait aşamalar adım adım gösterilmektedir. Şekil 3.7(a)'dan görüleceği üzere,

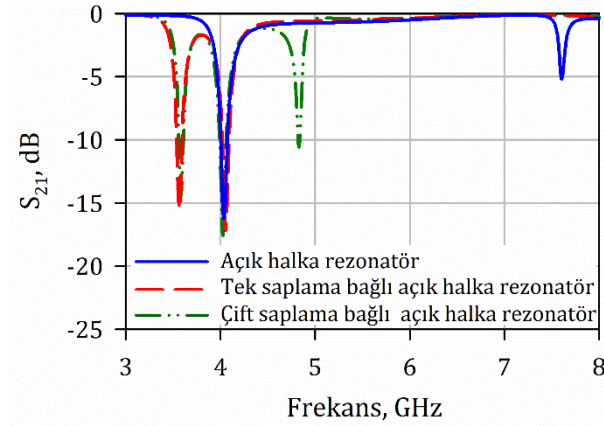


Şekil 3.7. Rezonatör tasarımı: açık halka rezonatör modeli (a), tek saplama yüklü açık halka rezonatör modeli (b) ve çift saplama yüklü açık halka rezonatör modeli (c)

etiket için bir bit oluşturması bakımından açık halka rezonatör giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattına kuplajlı olacak şekilde yerleştirilmektedir. Daha sonra, Şekil 3.7(b)'de rezonatörün simetri eksenine bir açık devre saplama bağlanması ile rezonatör çift modlu rezonatör haline getirilmektedir. Son olarak Şekil 3.7(c)'de yer alan rezonatör, Şekil 3.7(b)'de yer alan saplamadan farklı elektriksel özelliğe sahip olan ve simetrik iki yapıdan oluşan saplamanın, yine rezonatörün simetri eksenindeki noktaya devrenin simetrisini bozmayacak şekilde yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu simetrik iki saplama bir grup olarak düşünülerek rezonatöre bağlanan bir saplama olarak belirtilebilir. Bu sebeple, Şekil 3.7(b)'de yer alan rezonatör tek saplama yüklü rezonatör olarak ifade edilirken, Şekil 3.7(c)'deki rezonatör çift saplama yüklü rezonatör olarak tanımlanabilir. Açık halka rezonatöre bağlanan saplama ve saplama mekanizmasını bozmayacak şekilde rezonatörün iç kısmına doğru konumlandırılmış olmalarına dikkat edilmelidir. Bu durum, saplama ve saplama mekanizması bağli olup olmadıkları durumda üretilebilecek farklı frekans kodlarının elde edilmesine imkan vermektedir.

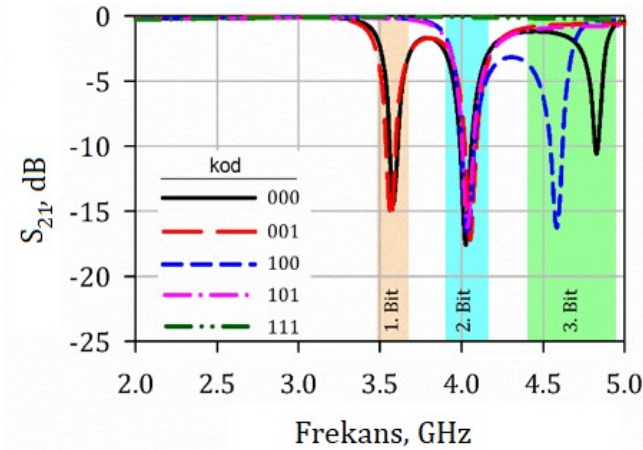
Şekil 3.8'de, Şekil 3.7(a),(b) ve (c)'de verilen rezonatör devrelerine ait frekans cevapları gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere sadece açık halka rezonatörün olduğu durumda bir, tek saplama yüklü rezonatör olması durumunda iki ve çift saplama yüklü rezonatör olması durumunda da üç adet rezonans elde edilmektedir. Ayrıca, yaklaşık $2f_0$ frekansında açık halka rezonatöre ait bir harmonik görülmektedir. Ancak bu harmonik,

frekans kodu için bir anlam ifade etmemekle birlikte, çalışma bandının dışında kalmasına dikkat edilmelidir.



Şekil 3.8. Önerilen rezonatör modeline ait farklı konfigürasyonlarda elde edilen frekans cevabı

Önerilen üç modlu rezonatör modelinde, Şekil 3.8’deki frekans cevaplarından da anlaşılacağı üzere açık halka rezonatör tarafından sağlanan ana rezonans frekansı üç bit içerisinde ortada yer alan biti temsil etmektedir. Dik bağlı olan tek saplama tarafından elde edilen rezonans frekansı ortadaki bitinkinden daha düşük frekanslarda bir bit sağlarken, simetrik iki saplama vasıtasıyla üretilen rezonans frekansı da ortadaki bit frekansından daha yüksek frekanslarda bir bit sağlamaktadır. Bu kapsamda, tüm saplamaların bağlı bulunması durumunda “000” frekans kodunun elde edilebileceği söylenebilir. Farklı bağlantı kombinasyonları ile elde edilebilen 5 frekans koduna ait frekans cevabı Şekil 3.9’da yer almaktadır. Dik saplamanın devreden çıkartılmasıyla birinci bitin değeri “1” yapılarak “100” frekans kodu elde edilmektedir. Ayrıca, üç modlu rezonatör modelinden simetrik saplamaların çıkartılmasıyla üçüncü bitin “1” değerini

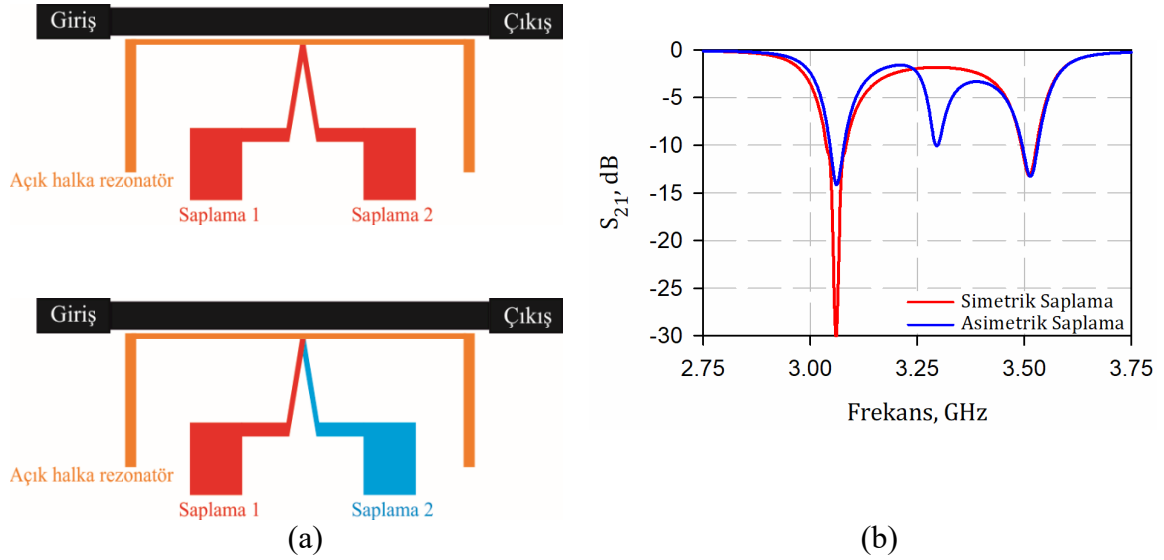


Şekil 3.9. Önerilen çipsiz RFID etikete ait frekans kodları

alması sağlanıp “001” kodu üretilmektedir. Son olarak, rezonatörden tüm saplamaların çıkartılmasıyla “101” frekans kodu üretilirken rezonatörün de devreden kaldırılması durumunda hiçbir rezonans oluşmayacağından “111” frekans kodu üretilenektir. Açık halka rezonatörün devrede olmadığı durumda mevcut kuplaj mekanizması ortadan kalkacağından dolayı sadece saplamaların mevcudiyeti bir anlam ifade etmeyecektir. Bu nedenle, açık halka rezonatör tarafından kontrol edilen ikinci bitin “1” olduğu durumda elde edilebilecek “010”, “011” ve “110” frekans kodlarının önerilen üç modlu rezonatör tarafından üretilmesi mümkün olmamaktadır. Bu eksiklik, Bölüm 3.3’te önerilen rezonatör ve kuplaj mekanizması ile giderilmiş ve ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3.2.2.1. Saplama Geometrisinin Belirlenmesi

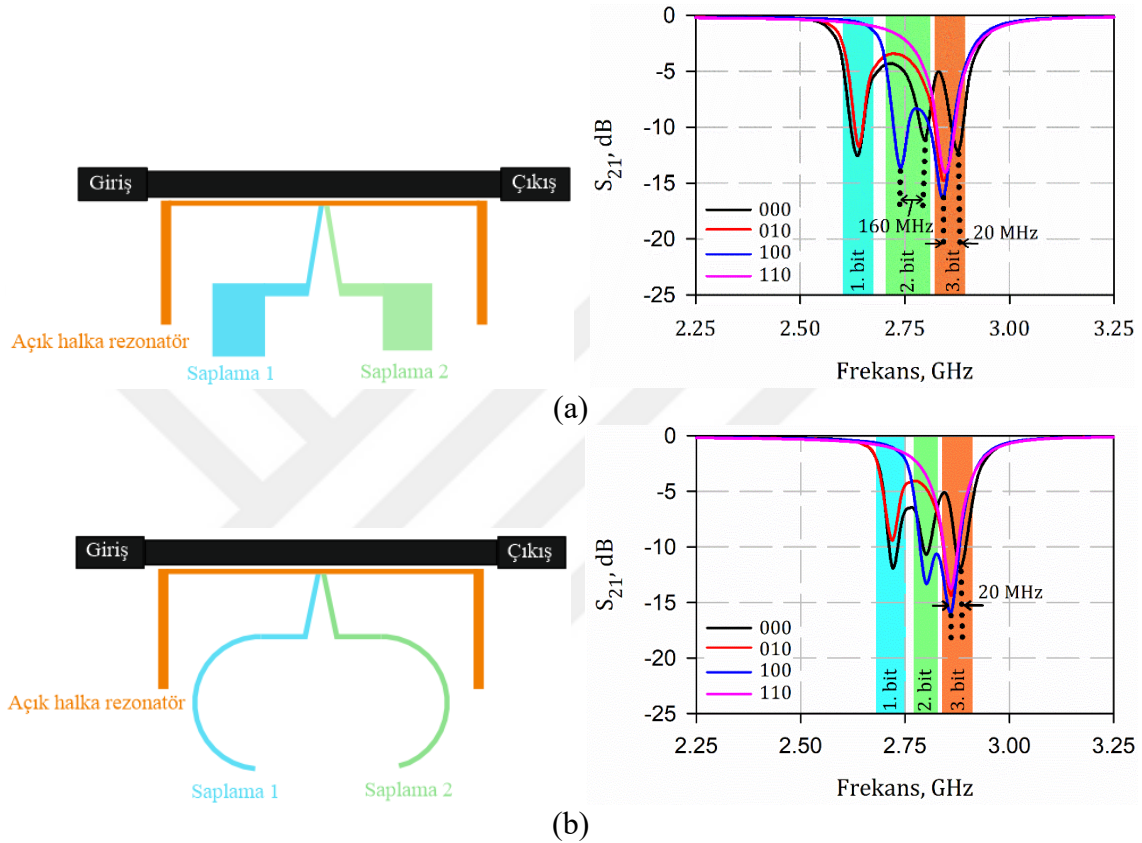
Bir önceki bölümde Şekil 3.7(c)’de gösterilen üç modlu rezonatör tasarımı, açık halka rezonatörün tam orta noktasında ve devrenin simetrisini bozmayacak şekilde bağlı bulunan iki adet saplama içermektedir. Ancak, bu saplamalardan bir tanesi birbiriyle tamamen aynı olan iki adet hattan oluşmakta diğeri ise elektriksel ve geometrik olarak farklı özellik göstermekteydi. Yani, rezonatöre ikisi birbiriyle aynı olan toplam üç adet hat bağlı bulunmaktaydı. Bu bölümde, önerilen üç modlu rezonatör modelinde yalnızca iki tane hattın kullanıldığı saplama ile de üç modlu rezonatör tasarımının elde edilebileceği gösterilecektir. Bu durum, Şekil 3.7(c)’deki açık halka rezonatöre çapraz hatlar ile bağlı bulunan ve birbiri ile aynı olan iki hattın, birbirinden farklı elektriksel uzunlukta seçilmesiyle mümkün olmaktadır. Böylece, üç mod karakteristiğinin elde edilmesi için Şekil 3.7(c)’de yer alan rezonatörün simetri eksenine dik olarak bağlanan saplama ile ilgili ihtiyaç giderilmiş olmaktadır. Bu sayede, hem daha az sayıda saplama kullanılarak devre karmaşıklığı azaltılmakta hem de devre boyutu bakımından avantaj sağlanmaktadır. Bu saplamaların simetrik ve asimetric olması durumuna ait devre modelleri Şekil 3.10(a)’da ve frekans cevapları Şekil 3.10(b)’de gösterilmiştir. Frekans cevaplarından görüleceği üzere önerilen rezonatör modeli, saplamaların asimetric olarak seçilmesi durumunda üç modlu rezonatör karakteristiği sergilerken, simetrik olarak seçilmeleri durumunda Bölüm 3.2.1’de teorik olarak da analiz edilen çift modlu rezonatör karakteristiğine sahip olmaktadır. Şekil 3.10(a)’da gösterilen asimetric saplama üç modlu rezonatörde açık halka rezonatör bir bitin kontrolünü sağlarken, Saplama 1 ve Saplama 2 ile belirtilen saplama da birbirinden bağımsız şekilde iki bitin kontrolünü sağlamaktadır.



Şekil 3.10. Önerilen rezonatörün simetrik ve asimetrik saplamalı devre tasarımları (a) ve devrelere ait frekans cevapları (b)

Önerilen asimetrik saplamalı üç modlu rezonatörde saplamaların geometrisi, farklı frekans kodlarının elde edilmesi sırasında meydana gelen frekans kaymaları üzerinde etkili olmaktadır. Bu bakımdan, saplamaların farklı geometrilere olması durumunda benzer frekans sahasında elde edilen farklı frekans kodlarına ait incelemeler gerçekleştirilmiştir. Saplamalar, Şekil 3.11(a)'da adım empedans (stepped impedance) modeline sahip iken Şekil 3.11(b)'de halka modeline sahiptir. Saplama uzunlukları, iki rezonatör için de bit frekanslarının benzer frekanslarda elde edilmesi bakımından optimize edilmiştir. Rezonatör modellerinde seçilen renklendirmeler frekans cevabındaki renklendirmeler ile uyumlu olacak şekilde verilmektedir. Yani, sarı renkle gösterilen açık halka rezonatör frekans cevabında sarı renkle işaretli alanda yer alan biti sağlamaktadır. Ayrıca, mavi renkle belirtilen Saplama 1 frekans cevabında mavi renkli bölgede yer alan birinci bitin kontrolünü sağlarken yeşil renkli Saplama 2 de frekans cevabında yeşil bölgede yer alan ikinci bitin kontrolünü sağlamaktadır. Burada, açık halka rezonatörün en yüksek frekansta yer alan biti sağlayacak şekilde seçilmesinin sebebi, Şekil 3.8'de verilen frekans cevabından görüleceği üzere açık halka rezonatöre ait üst frekans bölgesinde meydana gelen harmoniğin daha yüksek frekansa kaymasını sağlamaktır. Bu sayede üst frekans bölgesinde kullanılabilir daha geniş bir frekans sahası elde edilmektedir. İlerleyen aşamalarda çoklu rezonatör devresi tasarımlarına geçildiğinde bit sayısı artacak ve bu çok sayıdaki bit için temiz bir üst frekans sahasına ihtiyaç duyulacaktır. Bu bakımdan, açık halka rezonatör tarafından sağlanan rezonans frekansının en üst frekanstaki biti temsil etmesi önemlidir. Yukarıda da belirtildiği üzere,

açık halka rezonatörün devreden kaldırılması durumunda saplamalar tek başına bir anlam ifade etmez ve bazı frekans kodlarının elde edilmesi mümkün olmaz. Açık halka rezonatörün son biti temsil etmesi durumunda, önerilen rezonatör modelinden elde edilemeyen frekans kodları son bitin “1” değerine sahip olduğu ve diğer bitlerin “0” değerine sahip olduğu “001”, “011” ve “101” kodları olacaktır.

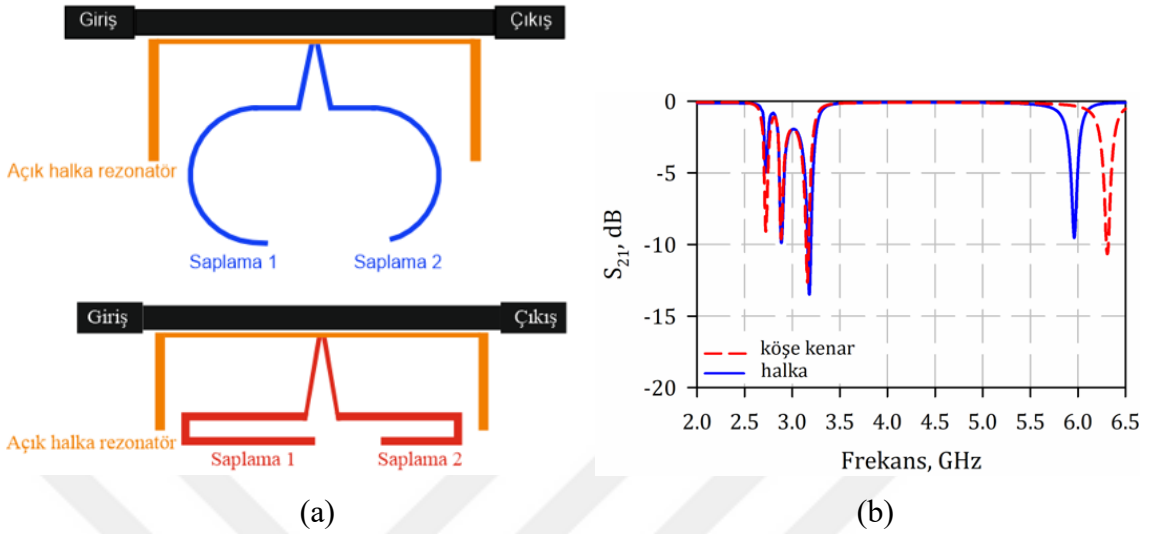


Şekil 3.11. Dikdörtgen yama saplama (a) ve halka saplama (b) modelinin kullanıldığı rezonatör modeli ve farklı frekans kodlarına ait frekans cevapları

Şekil 3.11(a) ve 3.11(b)'de yer alan farklı frekans kodlarına ait frekans cevapları incelendiğinde saplama genişliğinin az ve halka olarak seçilmesi durumunda meydana gelen frekans kaymaların daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, adım empedans formundaki saplamaların daha büyük bir kapasitif etkiye sahip olmalarından kaynaklı olmaktadır. Sonuç olarak, ince (yüksek empedanslı) saplamaların kullanılmasının daha iyi bir kodlama için avantaj sağladığı görülmektedir.

Saplama olarak ince (yüksek empedanslı) hat seçimine karar verdikten sonra saplama geometrisi üzerinde incelemeler yapılmıştır. Bu kapsamda Şekil 3.12(a)'da gösterilen halka ve köşe kenarlı saplamaların kullanıldığı iki rezonatör modeli ele alınmıştır.

Saplamanın köşeli hale getirilmesiyle daha kompakt bir devre boyutu sağlanmaktadır. Şekil 3.12(b)'de ise bu iki rezonatöre ait frekans cevaplarına birlikte yer verilmektedir.

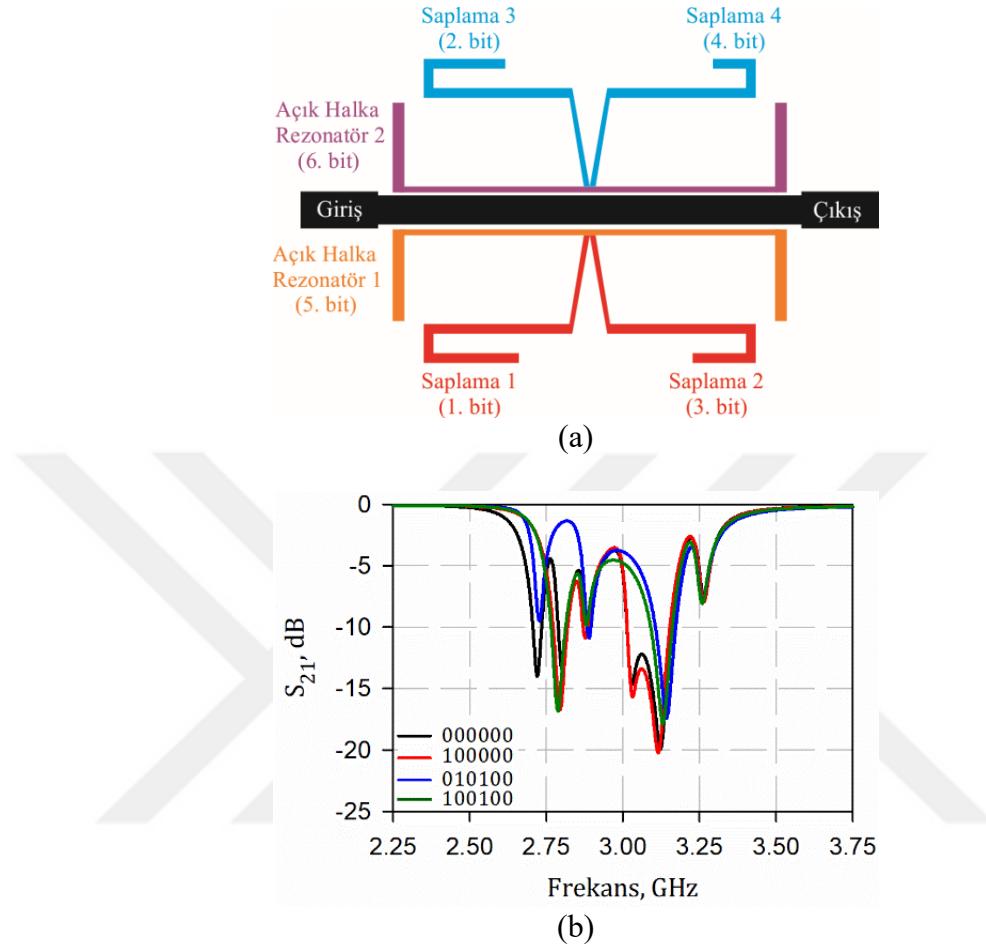


Şekil 3.12. Halka saplama ve köşe kenarlı saplama kullanılan rezonatör modeli (a) ve iki saplama için de elde edilen frekans cevapları (b)

Mavi renkli frekans cevabı halka formundaki saplamaların bulunduğu rezonatöre ait iken kırmızı renkli frekans cevabı köşe kenarlı saplamaların bulunduğu rezonatöre aittir. Frekans cevaplarından da görüleceği üzere, köşe kenarlı saplamaların bulunduğu rezonatöre ait rezonans frekanslarındaki çökme seviyesi daha yüksektir ve bu da kodlama işlemi esnasında bit değerinin daha net tespit edilebilirliğine imkan verecektir. Yine frekans cevabından görüleceği üzere köşe kenarlı saplamaların bağlı olduğu rezonatöre ait üst frekans sahasındaki harmonik daha yüksek frekanslarda meydana gelmektedir. Bu da, ihtiyaç olması durumunda daha geniş bir üst frekans sahasının kullanılabilmesi anlamına gelmektedir. Ayrıca, Şekil 3.12(a)'daki iki devre modeli de dikkatle incelendiğinde köşe kenarlı ve kıvrımlı saplamalara sahip rezonatörün halka formdaki saplamanın bulunduğu rezonatöre kıyasla daha kompakt bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, kıvrımlı ve köşe kenarlı saplamanın birçok açıdan avantaj sağladığı ve devrede kullanımının daha doğru bir seçim olacağı söylenebilir.

Önerilen üç modlu rezonatörün çipsiz RFID etiketler için daha fazla bit üretebilmesi için çoklu rezonatör devresi tasarımına ihtiyaç duyulacaktır. Bu düşünceyle, çok bitli farklı frekans kodlarına ait frekans cevaplarının elde edilmesini incelemek amacıyla iki rezonatörlü devre üzerinden incelemeler yapılmıştır. Şekil 3.13(a) ve 3.13(b)'de sırasıyla

köşe kenar sapslamalı iki rezonatörlü devre modeli ve bu devreden elde edilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları verilmektedir.



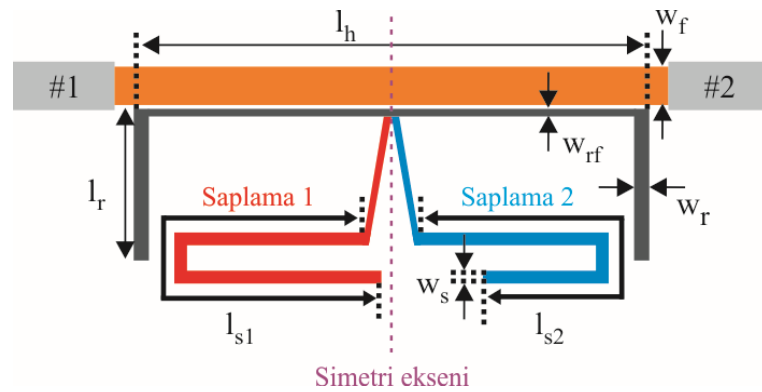
Şekil 3.13. Köşe kenar sapslamalı iki rezonatörlü devre modeli (a) ve devreden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları (b)

Frekans cevabında yer alan 1. ve 2. bitler sırasıyla şekilde de belirtildiği üzere Açık Halka Rezonatör 1'de bağlı bulunan Saplama 1 ve Açık Halka Rezonatör 2'de bağlı bulunan Saplama 3 olarak adlandırılan sapslamalar tarafından sağlanmaktadır. 3. ve 4. bitler ise yine sırasıyla Açık Halka Rezonatör 1'de bağlı bulunan Saplama 2 ve Açık Halka Rezonatör 2'de bağlı bulunan Saplama 4 olarak adlandırılan sapslamalar tarafından sağlanmaktadır. 5. ve 6. bitler ise sırasıyla Açık Halka Rezonatör 1 ve Açık Halka Rezonatör 2 olarak belirtilen rezonatörler tarafından kontrol edilmektedir. Bir rezonatörün rezonans frekanslarının frekans sahasında ardışık olarak yer almadığına dikkat edilmelidir. Belirtilen bit sıralamasının seçilmesinin sebebi, açık halka rezonatörlere ait harmonik frekanslarının daha yüksek frekanslara kaydırılmasıyla üst frekans bölgesinde kullanıma uygun daha geniş bir alan sağlamaktır. Şekil 3.13(b)'de yer

alan ve ilgili saplama veya saplamların devreden çıkartılmasıyla elde edilen dört farklı frekans koduna ait frekans cevapları incelendiğinde kodların net bir şekilde elde edilebildiği görülmektedir. Böylece, önerilen rezonatör modelinin çok bitli çipsiz RFID etiketler için tasarlanacak olan çoklu rezonatör devrelerinde kullanıma uygun olduğu söylenebilir.

3.2.2.2. Üç Modlu Rezonatörde Modların Kontrolü

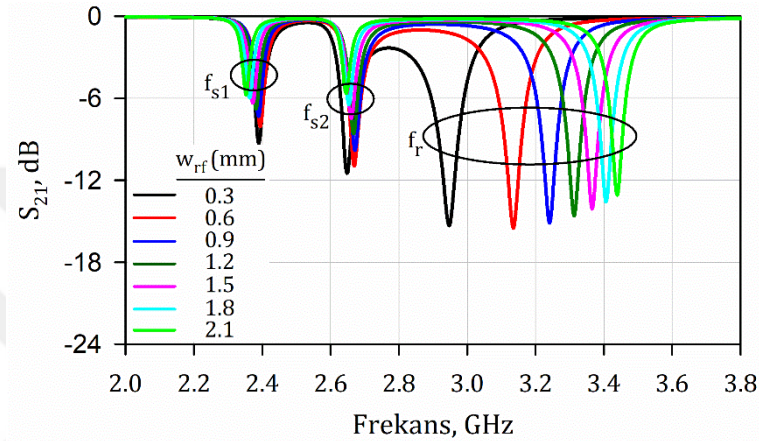
Önerilen üç modlu rezonatör tarafından üretilen üç bitin birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir olması, hem bit frekanslarının tayini hem de farklı frekans kodlarının elde edilmesi bakımından oldukça önemlidir. Şekil 3.14'te önerilen üç modlu rezonatör devresine ait parametreler devre modeli üzerinde gösterilmektedir. Aşağıda bitlerin kontrolünü sağlayan ilgili parametrelere ait incelemeler yer almaktadır. Yukarıda olduğu gibi, Şekil 3.14'te verilen devrede de Saplama 1 tarafından 1. bit, Saplama 2 tarafından 2. bit ve giriş/çıkış kapılarına kuplajlı olan açık halka rezonatör tarafından da 3. bit sağlanmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda 1. Bitin " l_{s1} " uzunluğu, 2. Bitin " l_{s2} " uzunluğu ve 3. bitin de açık halka rezonatörün giriş-çıkış kapılarını birbirine bağlayan düz iletim hattına kuplajlı olan bölümünün genişliği " w_{rf} " ile kontrol edilebileceği söylenebilir. Bu parametrelerle uyumlu olması bakımından frekans sahasında yer alan birinci bit " f_{s1} ", ikinci bit " f_{s2} " ve üçüncü bit " f_r " olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.14. Önerilen üç modlu rezonatör modeli

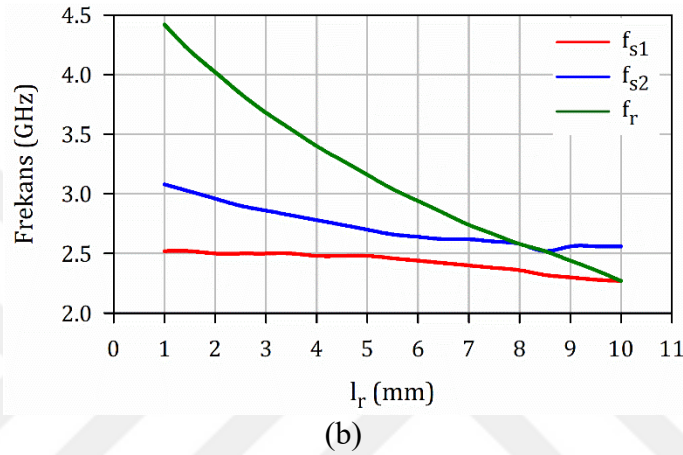
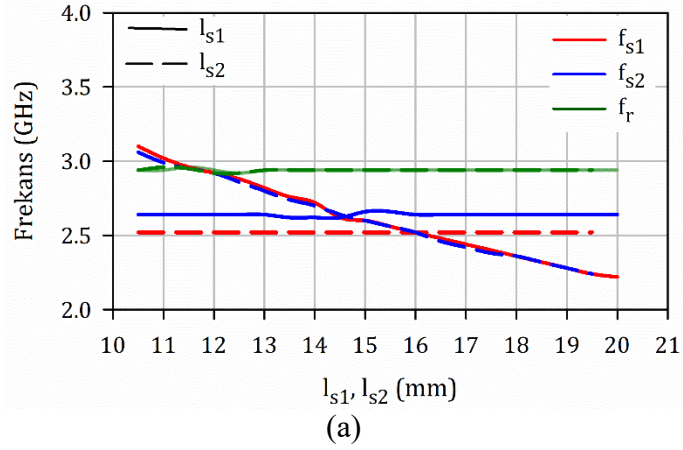
İlk olarak, " w_{rf} " değişimi incelenmiş olup üç modlu rezonatöre ait frekans cevabına olan etkisi Şekil 3.15'te gösterilmektedir. Düz iletim hattı ile rezonatör arasındaki kuplajın, özellikle açık halka rezonatör tarafından sağlanan ana rezonans frekansı " f_r " üzerinde

etkili olduğu açıkça görülmektedir. Yine şekilden görüleceği üzere, “ w_{rf} ” genişliği azaldıkça yani rezonatörde daha yüksek karakteristik empedansa sahip kuplajlı hattın kullanılması durumunda “ f_r ” frekansı daha düşük frekans değerlerine kaymaktadır. Ayrıca, “ w_{rf} ” genişliğindeki değişimin saplamalar tarafından kontrol edilen “ f_{s1} ” ve “ f_{s2} ” rezonans frekanslarına olan etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, açık halka rezonatör tarafından sağlanan rezonans frekansının, diğer rezonans frekanslarından bağımsız şekilde kontrol edilebildiği görülmektedir.



Şekil 3.15. Kuplajlı hat genişliğinin (w_{rf}) frekans cevabına olan etkisi

Şekil 3.14’te gösterilen sırasıyla Saplama 1 ve Saplama 2’ye ait “ l_{s1} ” ve “ l_{s2} ” ile belirtilen uzunluklardaki değişimin rezonans frekanslarına etkileri Şekil 3.16(a)’da gösterilirken, açık halka rezonatörün yan kol uzunluğu olan “ l_r ” değişiminin rezonans frekanslarına olan etkisi Şekil 3.16(b)’de gösterilmektedir. Şekil 3.16(a) incelendiğinde, “ l_{s1} ” ve “ l_{s2} ” uzunluk değişimlerinin, açık halka rezonatörün rezonans frekansı f_r ’ye etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir. Yine şekilden, Saplama 1’in ürettiği “ f_{s1} ” rezonans frekansının, “ l_{s1} ” uzunluğunun artmasıyla daha düşük frekanslara kaydığı görülmektedir. Aynı değişim sırasında Saplama 2 tarafından kontrol edilen “ f_{s2} ” rezonans frekansının değişmediği görülmektedir. Aynı grafikte “ l_{s2} ” uzunluk değişimi dikkate alındığında, uzunluğun artmasıyla Saplama 2’nin sağladığı “ f_{s2} ” rezonans frekansının daha düşük frekanslara doğru kaydığı ve “ f_{s1} ” rezonans frekansının sabit kaldığı görülmektedir. Sonuç olarak, üç rezonans frekansının birbirinden bağımsız olarak “ w_{rf} ”, “ l_{s1} ” ve “ l_{s2} ” parametrelerinin değiştirilmesiyle kontrol edilebildiği açıkça görülmektedir. Şekil 3.16(b)’de ise, açık halka rezonatörün yan kollarının uzunluğu l_r ’deki değişimin rezonans frekanslarına etkisi gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere “ l_r ” uzunluğunun

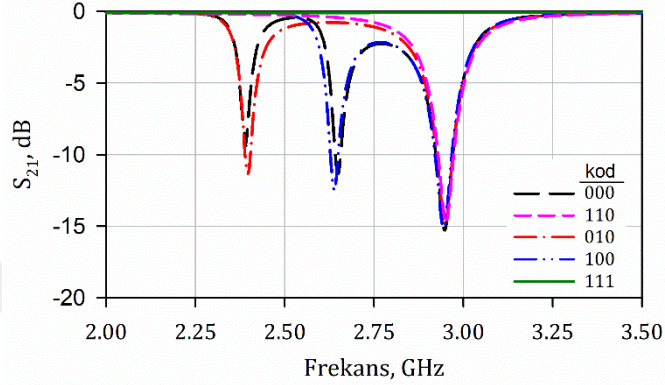


Şekil 3.16. l_{s1} ve l_{s2} (a) ve l_r (b) kolu uzunluklarının rezonans frekansları üzerindeki etkisi

artmasıyla özellikle “ f_r ” rezonans frekansı daha düşük frekanslara kaymaktadır. Ayrıca, bu değişim ile “ f_{s1} ” ve “ f_{s2} ” rezonans frekanslarının da “ f_r ” rezonans frekansı kadar etkilenmese de benzer değişim sergiledikleri görülmektedir. Bu nedenle, “ l_r ” parametresinin bit frekanslarının bağımsız olarak kontrol edilmesi işlemi için kullanılmayacağı açıkça söylenebilir.

Yukarıdaki incelemeler sonrasında, bit frekanslarının birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebileceği görülmüştür. Buradan sonuçla, arzu edilen frekanslarda üç bit oluşturması için önerilen üç modlu rezonatörün boyutları optimizasyonla elde edilmiştir. Şekil 3.14’teki önerilen devrenin 2.39, 2.65 ve 2.95 GHz frekanslarında rezonanslara sahip olması için optimize edilen boyutlar şu şekildedir: $l_h = 20.30$, $l_r = 5.95$, $l_{s1} = 16.65$, $l_{s2} = 13.45$, $w_f = 1.50$, $w_{rf} = 0.30$, $w_r = 0.60$ ve $w_s = 0.50$ mm. Ayrıca saplamaların rezonatöre bağlı bulunan çapraz bölmelerine ait genişlik ve uzunluk sırasıyla 0.30 ve 4.57 mm’dir. Önerilen rezonatör modeli kullanılarak elde edilen beş farklı frekans koduna ait

frekans cevabı Şekil 3.17’de gösterilmektedir. Burada, ilgili bitin “0” değerini alması için rezonatör ve ilgili saplamanın devrede bulunması yeterli iken bitin “1” değerini alması rezonatör veya ilgili saplamanın devreden çıkartılmasıyla elde edilmektedir. Bu sayede farklı elektriksel uzunlukta N adet beş frekans kodu üretebilen rezonatör modelinin kullanılması durumunda, toplamda 5^N adet frekans kodu kapasiteli çipsiz RFID etiket tasarımının gerçekleştirilmesi mümkündür.

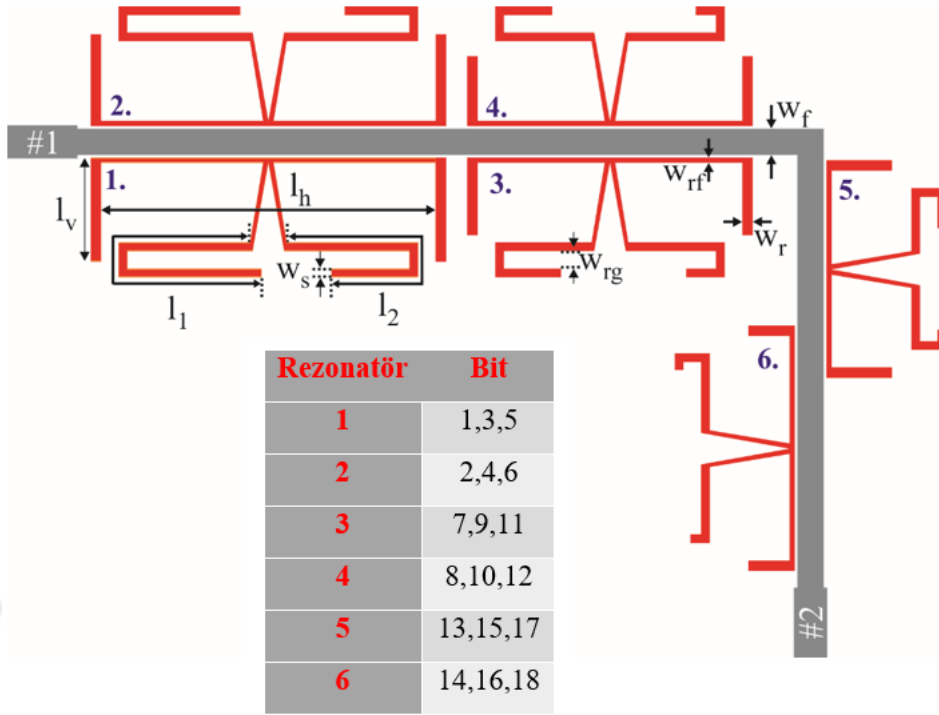


Şekil 3.17. Önerilen rezonatör modeli tarafından elde edilen beş frekans koduna ait frekans cevapları

3.2.3. Çoklu Rezonatör Devresi Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde, yukarıda hem teorik hem de parametrik analizleri detaylı olarak gerçekleştirilen üç modlu rezonatör kullanılarak çipsiz RFID etiketler için daha fazla bit üretebilmek amacıyla çoklu rezonatör devresi tasarımları ele alınmaktadır. İlk olarak, farklı elektriksel uzunluğa sahip 6 adet üç modlu rezonatörün bulunduğu 18 bit kapasiteli çoklu rezonatör devresi tasarlanmıştır. Şekil 3.18’te gösterilen tasarlanan devrede, giriş ve çıkış kapıları 90° bükülmüş iletim hattı ile birbirine bağlanmaktadır. Bu sayede etiket tasarımında yer alacak olan yatay ve dikey polarizasyonlu monopol antenler, çoklu rezonatör devresinin giriş ve çıkış kapılarına doğrudan entegre edilerek daha kompakt ve kolay bir etiket tasarımı sağlanacaktır.

Tasarımda yer alan farklı elektriksel uzunluktaki rezonatörler 90° bükülmüş iletim hattına kuplajlı olacak şekilde konumlandırılmaktadır. Rezonatörlerin devre içerisindeki yerleşimleri incelendiğinde, en düşük rezonans frekanslarına sahip rezonatörler 1 numaralı kapıya yakın olacak şekilde yerleştirilirken rezonans frekansları daha yukarı frekanslarda olan rezonatörlerin 2 numaralı kapıya doğru büyükten küçüğe olacak şekilde



Şekil 3.18. Önerilen üç modlu rezonatörlü çoklu rezonatör devresi tasarımı

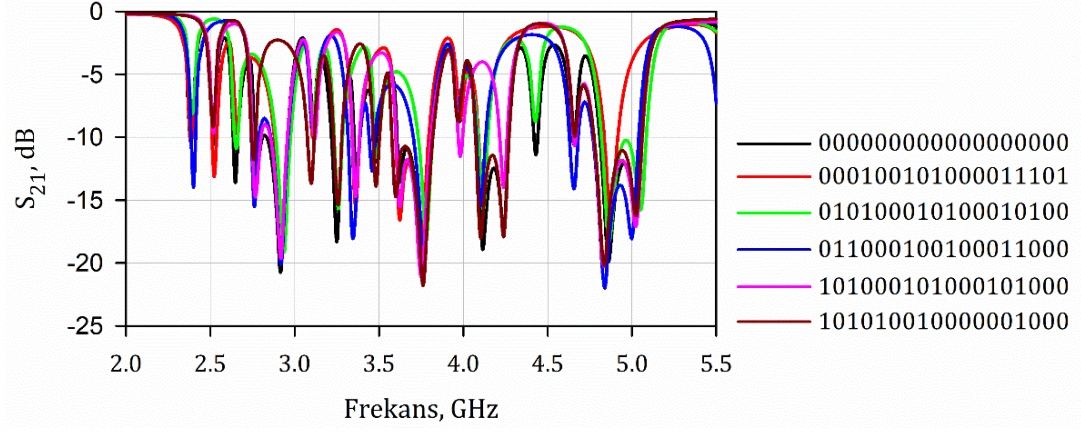
yerleştirildiği görülmektedir. Burada, üç modlu bir rezonatörden elde edilen üç adet rezonans frekansının etiket için belirlenen frekans bölgesinde ardışık olarak yer almadığına dikkat edilmelidir. Rezonans frekanslarına ait numaralandırma, 1'den 18'e kadar en düşük rezonans frekansından en yüksek rezonans frekansına doğru olacak şekilde yapılmıştır. Buna göre, kaç numaralı rezonatörün kaç numaralı rezonans frekanslarını sağladığı, Şekil 3.18'de bulunan tabloda verilmektedir. Tablodan görülebileceği üzere, tasarımda 1 numaralı rezonatör, 1., 3., ve 5. sıradaki rezonans frekanslarını üretmektedir. 1 numaralı rezonans frekansı, " l_1 " uzunluğundaki saplama tarafından üretilirken 3 numaralı rezonans frekansı " l_2 " uzunluğundaki saplama tarafından üretilmektedir. 5 numaralı rezonans frekansı ise " l_h " ve " l_v " uzunluklarına sahip açık halka rezonatör tarafından üretilmektedir. Diğer rezonatörlerin de sağladıkları rezonans frekanslarının elde edilme mantığı aynı şekildedir. Rezonans frekanslarının çalışma bandında bu düzende yerleştirilmesiyle, açık halka rezonatörün rezonans frekansı daha üst frekanslarda elde edilmekte ve kendisine ait olan ancak kodlamada kullanılmayan harmonik frekansının da daha üst frekanslara kayması sağlanmaktadır. Bu sayede, 18 adet rezonans frekansının harmonik frekanslarının bulunmadığı bir frekans sahasında elde edilmesi mümkün olmaktadır. Rezonatörler arasındaki mesafeler, rezonans frekanslarındaki araya girme kayıplarının daha derin

çökmeye sahip olması için optimize edilerek belirlenmiştir. Bütün rezonatörler, 90° bükümlü iletim hattına 0.15 mm boşluk olacak şekilde kuplajlanmaktadır. Bu iletim hattının uzatılarak daha fazla rezonatörün iletim hattına kuplajlanması ile çipsiz RFID etiket için üretilebilecek bit sayısının artırılabilmesi mümkündür. Ancak, üst frekans bölgesinde yer alan harmoniklerin kullanılacak rezonatör sayısını kısıtlayacağı unutulmamalıdır. Özetle, harmonik frekansına kadar olan frekans sahası yeni eklenecek rezonatörler tarafından üretilecek rezonans frekansları için kullanılabilir. Çizelge 3.1’de 6 rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait parametre büyüklükleri verilmektedir. Çoklu rezonatör devresi kalınlığı 0.813 mm ve bağlı dielektrik sabiti 3.55 olan Rogers 4003C taban malzemesi üzerinde tasarlanmıştır. Giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattının genişliği 1.50 mm, yatay uzunluğu 42.60 mm ve dikey uzunluğu 26.25 mm’dir. Ayrıca, devrenin toplam boyutu 49.60 x 33.25 mm²’dir.

Çizelge 3.1. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinde bulunan 3 modlu rezonatörlere ait boyut bilgileri (mm)

Rezonatör	l_h	l_v	l_1	l_2	w_{rg}	w_s	w_{rf}	w_r
1	19.10	5.95	17.65	14.45	1.00	0.50	0.30	0.60
2	19.10	5.25	16.45	13.70	1.00	0.50	0.30	0.60
3	15.10	4.45	11.25	9.70	1.00	0.50	0.30	0.60
4	15.10	4.00	10.75	9.15	1.00	0.50	0.30	0.60
5	11.25	3.75	7.90	6.70	1.00	0.50	0.30	0.60
6	12.85	2.65	7.35	5.45	1.00	0.50	0.30	0.60

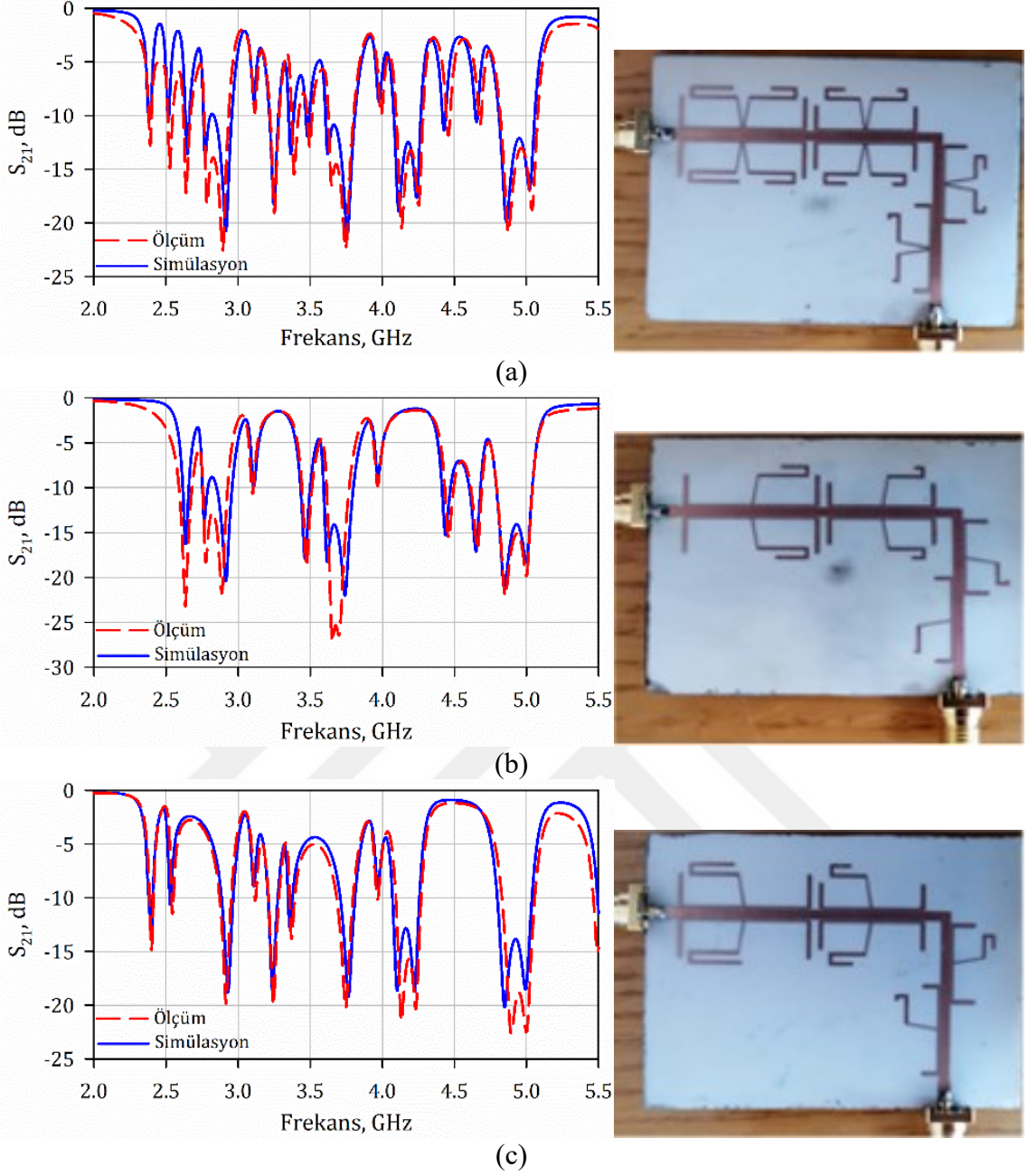
Yukarıda anlatılan kodlama tekniği dikkate alınarak ilgili rezonans frekansını üreten saplamalar veya rezonatörler devreden çıkartılarak o rezonans frekansı ortadan kaldırılmakta ve bitin “1” olması sağlanmaktadır. Bu yöntemle, elde edilen çoklu rezonatör devresine ait bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları Şekil 3.19’da gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, önerilen rezonatör modeli kullanılarak tespit edilebilir genlik seviyelerine sahip farklı frekans kodları elde edilmektedir. Böylece çoklu rezonatör devresinin, çipsiz RFID etiket tasarımında kullanıma uygun olduğu söylenebilir.



Şekil 3.19. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları

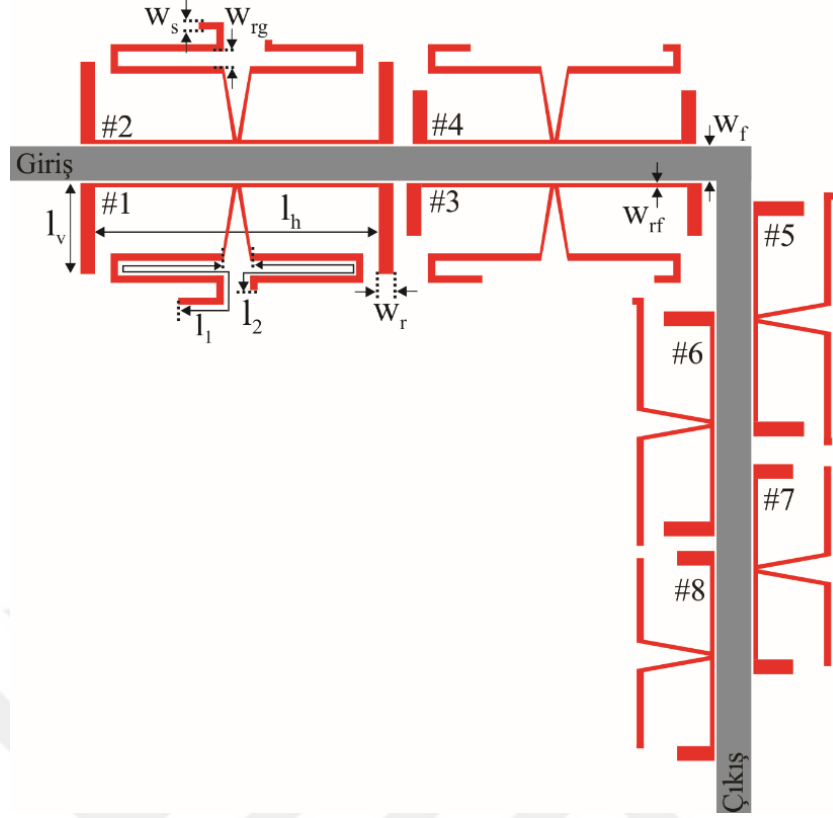
Tasarlanan çoklu rezonatör devresinin farklı frekans kodları için performansını test etmek amacıyla farklı frekans koduna sahip 3 adet çoklu rezonatör devresi üretilmiş ve giriş/çıkış kapıları Vektör Ağ Analizörüne bağlanarak ölçüm sonuçları elde edilmiştir.

Şekil 3.20’de üretilen devre fotoğrafı ile birlikte devreye ait simülasyon ve ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.20(a)’da tüm rezonatör ve saplamaların bulunduğu yani rezonatörlerin üç modlu rezonatör olarak kullanıldığı devreye ait sonuçlar verilmiştir. Bu devrede tüm rezonans frekansları üretilmekte ve devre tarafından üretilen frekans kodu “00000000000000000000”dır. Şekilden görüleceği üzere 18 adet rezonans frekansı da net bir şekilde gözlenmektedir. Çoklu rezonatör devresindeki saplamalar Şekil 3.14’teki gibi adlandırılmıştır. Yani, her bir rezonatöre bağlı ve elektriksel olarak daha uzun olan saplama “Saplama 1” olarak adlandırılırken daha kısa olan saplama “Saplama 2” olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.20(b) ve 3.20(c)’de sırasıyla tüm rezonatörlerden Saplama 1 ve Saplama 2’nin ortadan kaldırılması durumunda üretilen devre fotoğrafları ve bu devrelere ait sonuçlar gösterilmektedir. Şekil 3.18’de verilen tablodaki veriler ışığında, devreden “Saplama 1”lerin kaldırılmasıyla her bir üç modlu rezonatör “100” frekans kodunu üretmekte ve devre “110000110000110000” frekans kodunun üretilmesini sağlamaktadır. Tüm rezonatörlerden “Saplama 2”lerin çıkarılması durumunda ise her bir üç modlu rezonatör “010” frekans kodunu üretmekte ve devrenin “001100001100001100” frekans koduna sahip olması sağlanmaktadır. Şekil 3.20’de yer alan sonuçlardan, üretilen üç devreye ait ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile büyük bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.20. Üretilen çoklu rezonatör devrelerine ait fotoğraflar, simülasyon ve ölçüm sonuçları a) rezonatör kodu: 000, b) rezonatör kodu: 110, c) rezonatör kodu: 010.

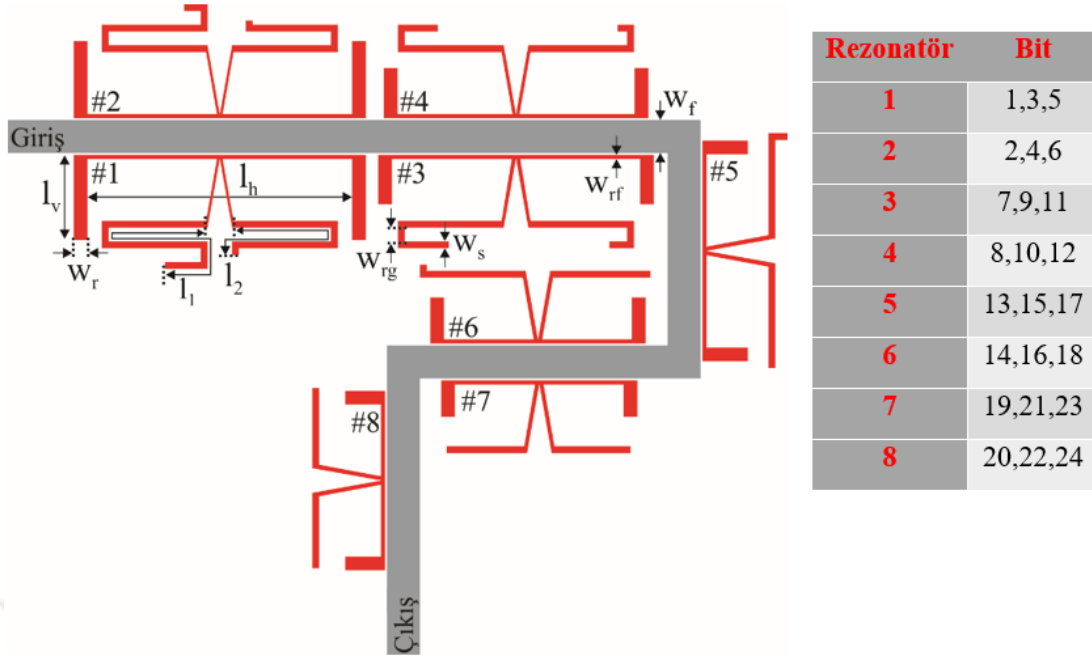
6 rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar sonucunda devrenin çipsiz RFID etiketler için kullanıma uygun olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, rezonatör sayısı 8'e çıkartılarak etiket için toplamda 24 bit ve 5^8 frekans kodu üretebilecek devre tasarımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca devre, daha geniş kullanım sahası için esnekliğe sahip, kalınlığı 0.79 mm ve bağıl dielektrik sabiti 2.33 olan Rogers RT5870 taban malzemesi üzerinde tasarlanmıştır. İlk aşamada tasarlanan 8 rezonatörlü çoklu rezonatör devre modeli Şekil 3.21'de gösterilmektedir.



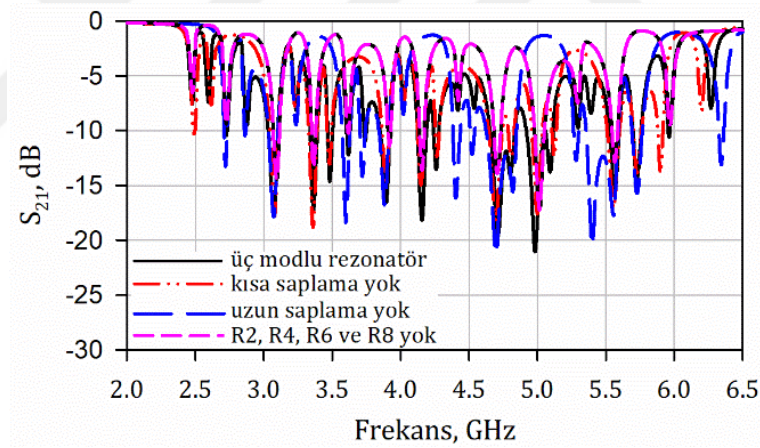
Şekil 3.21. 8 rezonatörlü çoklu rezonatör devresi

Şekil 3.21’de tasarlanan devrenin giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan 90° bükülmüş iletim hattı kıvrımlı duruma getirilerek daha kompakt bir devre tasarımı geliştirilmiştir. Geliştirilen çoklu rezonatör devresi Şekil 3.22’de gösterilmektedir. Şekil 3.21’deki devrenin toplam boyutu $56.70 \times 53.85 \text{ mm}^2$ iken Şekil 3.22’deki devrenin toplam boyutu $56.80 \times 44.25 \text{ mm}^2$ ’dir. Görüleceği üzere, aynı rezonatör sayısı yaklaşık 5.4 cm^2 daha küçük olan bir alana sığdırılmaktadır. Bu da, daha kompakt bir çipsiz RFID etiket tasarımına imkan tanıyacaktır. Şekil 3.22’deki rezonatörlerin yerleşimi Şekil 3.14’te verilen tasarıma benzer olarak, en düşük rezonans frekanslarına sahip rezonatörler giriş kapısına yakın olacak şekilde ve rezonans frekansları daha üst frekanslarda olan rezonatörler de çıkış kapısına doğru olacak şekilde büyükten küçüğe sıralı olarak yerleştirilmektedir. Rezonatör numaralandırmaları Şekil 3.22’deki devre modeli üzerinde gösterilirken, kaç numaralı rezonatörün çipsiz RFID etiket için kaç numaralı bitleri sağladığı da şekilde verilen tabloda belirtilmektedir.

Tasarlanan çoklu rezonatör devresinden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları Şekil 3.23’te verilmektedir. Tüm saplamaların bağlı olduğu durumda üç modlu



Şekil 3.22. Geliştirilmiş 8 rezonatörlü çoklu rezonatör devresi



Şekil 3.23. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinden elde edilen farklı frekans kodlarına ait frekans cevapları

rezonatörlerin her biri üç adet rezonans frekansına sahip olmakla birlikte çoklu rezonatör devresi toplam 24 adet rezonans frekansı sağlamaktadır. Bu tasarımda da ilgili bit ve biti kontrol eden rezonatör parametresi yukarıda belirtildiği gibidir. Şekil 3.23 incelendiğinde tüm rezonatörlerin üç modlu rezonatör modeline sahip olması durumunda 24 adet rezonans frekansı net bir şekilde gözlenmektedir. Ayrıca, tüm rezonatörlerin sadece kısa ve sadece uzun saplamalarının bağlı olması durumunda her bir rezonatörün sırasıyla “100” ve “010” kodunu ürettiği görülmektedir. Son olarak, 2, 4, 6 ve 8 numaralı rezonatörler devreden tamamen kaldırılarak “01010101010101010101” frekans

koduna ait frekans cevabının da elde edildiği açıkça görülmektedir. Böylece, çipsiz RFID etiket tasarımında kullanılmak üzere toplamda 24 bit ve 8^5 frekans kodu üretebilen çoklu rezonatör devresinin tasarımına ait incelemeler başarıyla tamamlanmıştır.

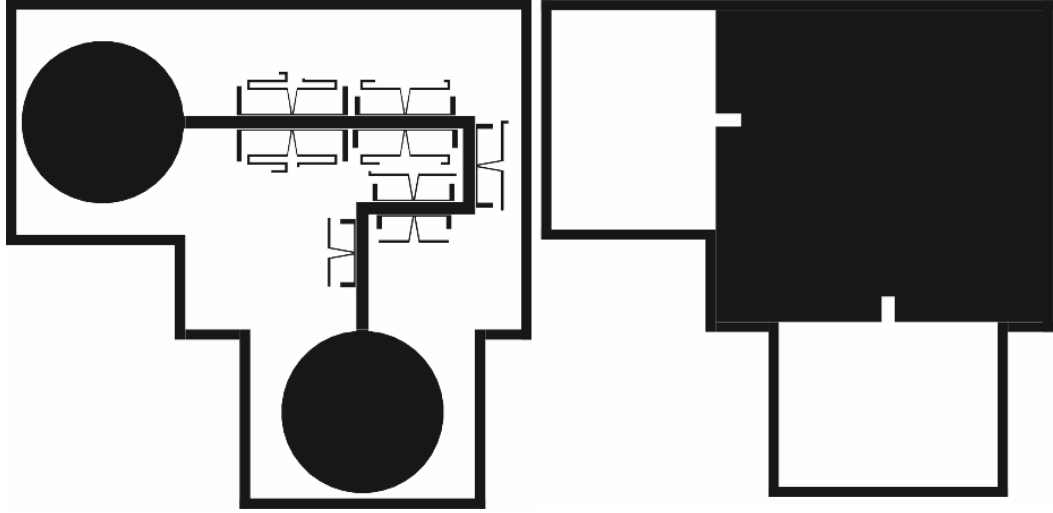
Çizelge 3.2’de çoklu rezonatör devresine ait parametrelerin büyüklükleri verilmiştir. Devredeki tüm rezonatörler 0.15 mm aralıkla, hat genişliği $w_f = 2.35$ mm olan ve giriş/çıkış kapılarını birbirine bağlayan 50Ω ’luk iletim hattına kuplajlanmıştır.

Çizelge 3.2. Tasarlanan çoklu rezonatör devresinde bulunan 3 modlu rezonatörlere ait boyut bilgileri (mm)

Rezonatör	l_h	l_v	l_1	l_2	w_{rg}	w_s	w_{rf}	w_r
1	19.30	6.20	21.80	16.80	1	0.5	0.3	1
2	19.30	5.60	20.00	15.60	1	0.5	0.3	1
3	18.10	3.60	12.30	10.40	1	0.5	0.3	1
4	17.30	3.65	11.50	9.80	1	0.5	0.3	1
5	14.10	3.30	8.40	7.45	1	0.5	0.3	1
6	13.70	3.35	7.95	7.10	1	0.5	0.3	1
7	12.30	2.65	5.65	5.55	1	0.5	0.3	1
8	11.10	2.9	5.65	5.30	1	0.5	0.3	1

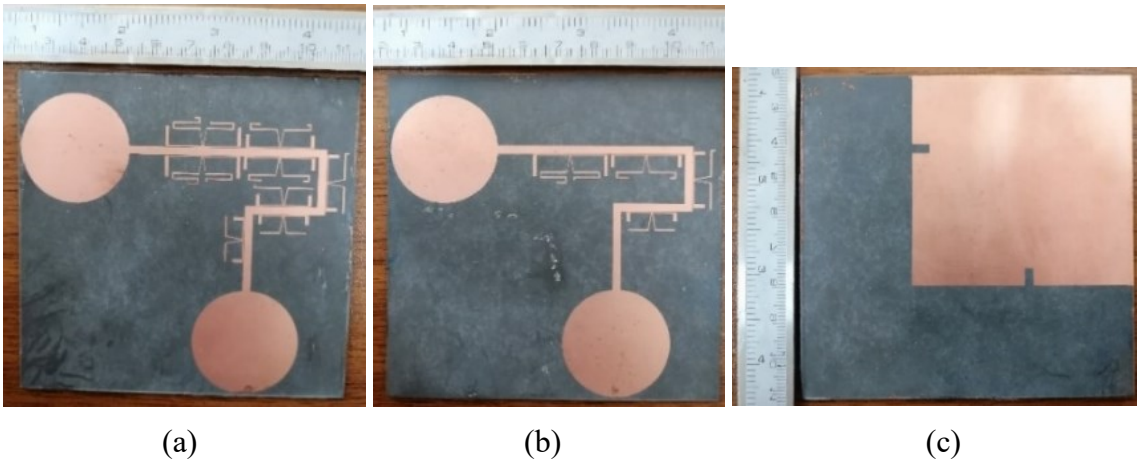
3.2.4. Çipsiz RFID Etiket Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar

Şekil 3.22’de gösterilen 8 adet üç modlu rezonatör içeren çoklu rezonatör devresinin giriş ve çıkış kapılarına geniş bant monopol antenin entegre edilmesiyle çipsiz RFID etiket tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.1’de tanımlanan monopol antenin boyutları çalışma frekansına uyumlu olacak şekilde optimize edilmiştir. Önerilen etikete ait üst ve alt görünüm Şekil 3.24’te gösterilmektedir. Etiket için, dikey polarize anten verici olarak kullanılabilirken, yatay polarize anten alıcı olarak kullanılabilir. Bu antenler için tersi durum da geçerlidir. Etiketinin toplam boyutu, monopol antenlerin dahil olduğu durumda $89.05 \times 82.90 \text{ mm}^2$ iken monopol antenlerin hesaba alınmadığı durumda $52.0 \times 41.2 \text{ mm}^2$ ’dir. Ayrıca bu fiziksel boyutlar, birinci bitin bulunduğu 2.48 GHz’e karşılık gelen dalga boyu cinsinden sırasıyla $1.00 \times 0.93 \lambda_g^2$ ve $0.58 \times 0.46 \lambda_g^2$ olarak hesaplanmıştır.



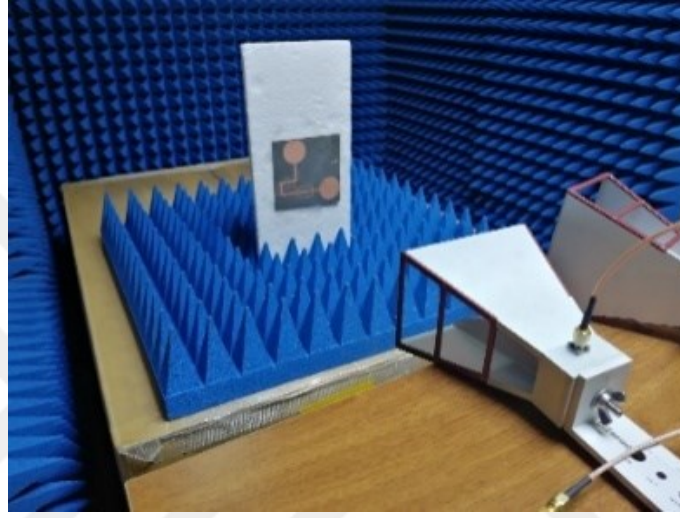
Şekil 3.24. Önerilen Çipsiz RFID etiket tasarımına ait üst ve alt görünüm

Önerilen çipsiz RFID etiket tasarımını test etmek için farklı frekans koduna sahip iki adet etiket üretilmiş ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen etiketlerin üst ve alt görünümlerine ait fotoğraflar Fotoğraf 3.1’de yer almaktadır. Fotoğraf 3.1(a)’da yer alan etikette tüm rezonatörler üç modlu rezonatör olarak kullanılmıştır ve etiket için 24 adet rezonans frekansı sağlamaktadır. Yani, tüm bitlerin “0” olduğu frekans koduna sahip etikettir. Fotoğraf 3.1(b)’de gösterilen diğer etiket ise Şekil 3.22’deki numaralandırma kullanılarak R2, R4, R6 ve R8 numaralı rezonatörlerin devreden çıkartıldığı ve 24 bit boyunca sırasıyla “01” kodunun elde edildiği etikettir. Toprak düzlemi her koda ait etiket için aynıdır ve Fotoğraf 3.1(c)’de gösterilmektedir. Etiketlerin tasarımında, kalınlığı 0.79 mm ve bağıl dielektrik katsayısı 2.33 olan Rogers 5870 taban malzemesi kullanılmıştır.



Fotoğraf 3.1. Tüm bitlerin “0” olduğu etiketin üst görünümü (a), bitlerin sırasıyla “01” olduğu etiketin üst görünümü (b), üretilen etiketlerin alt görünümü (c)

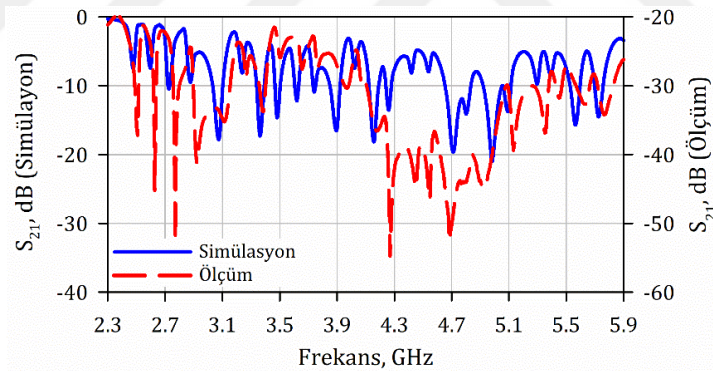
Etiketlerin test işlemleri laboratuvar ortamında oluşturulmuş el yapımı bir yansımaz oda içerisinde gerçekleştirilmiştir. Okuyucu antenler olarak, Vektör Ağ Analizörün iki kapısına bağlı bulunan yatay ve dikey polarizasyonlu olacak şekilde yerleştirilen iki tane yüksek kazançlı huni anten kullanılmıştır. Hazırlanan test ortamı Fotoğraf 3.2’de gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, okuyucu ve etiket üzerindeki antenlerden aynı polarizasyona sahip olanlar karşılıklı olacak şekilde yerleştirilerek okuma işlemi gerçekleştirilmiştir.



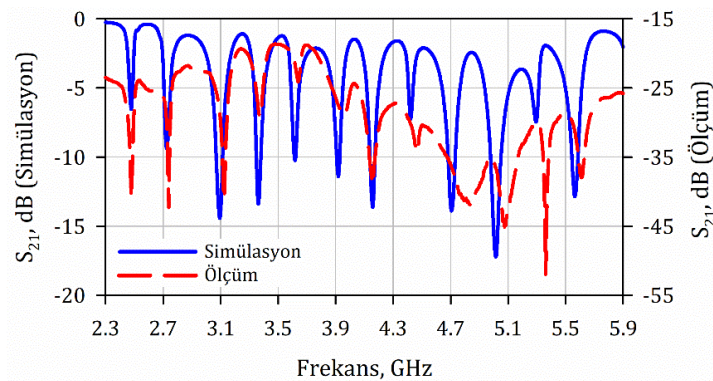
Fotoğraf 3.2. Etiketlerin test edildiği ölçüm düzeni

Şekil 3.25(a) ve Şekil 3.25(b)’de sırasıyla tüm bitlerin “0” ve sırasıyla “01” olduğu frekans kodlu etiketlere ait simülasyon ve ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Şekil 3.25(a)’dan görüleceği üzere, simülasyon sonuçlarında araya girme kaybı seviyesi 0 dB’nin altında elde edilirken ölçüm sonuçlarında -20 dB’den daha düşük seviyelerde elde edilmiştir. Hatırlanacağı üzere benzer durum ile Bölüm 2.2’de yer alan etiketin test çalışmalarında da karşılaşılıştı. Bunun sebebi, o bölümde açıklandığı gibi, simülasyon sonuçlarının iki kapılı çoklu rezonatör devresine ait olması, anten etkilerini içermemesi ve ortam kayıplarının hesaba katılmamasıdır. Ancak ölçüm sonuçlarında da her bit frekansında rezonansın gözlenebildiği ve tüm bitlerin “0” değerine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bazı rezonans frekanslarındaki çökme seviyelerinin düşük seviyede olması “0” değerindeki bitlerin net şekilde görülmesini zorlaştırmaktadır. Burada çökme seviyesi olarak tanımlanan büyüklük daha önce de belirtildiği üzere, “0” değerine sahip bir bitin en düşük araya girme kaybı seviyesi ile ilgili bitin ardışığında yer alan “0” değerindeki bitler arasındaki döngü seviyesindeki en yüksek araya girme kaybı seviyesi

arasındaki farktır. Tüm bitlerin “0” olduğu etikette 24 adet rezonans frekansı minimum 0.6 dB’lik çökme seviyesi ile elde edilmiştir. Böylece, tüm bitlerin “0” değerine sahip olduğu etiket ölçümü başarıyla tamamlanmıştır. Ayrıca, etiketlerin üretilmesi sırasında meydana gelen boyut hataları rezonans frekanslarında çok küçük kaymalara sebebiyet vermekte ve özellikle ardışık rezonans frekanslarının birbirini etkilemesine yol açmaktadır. Daha hassas üretim tekniği kullanılarak bitlerin tam olarak arzu edilen frekanslarda elde edilmesiyle daha iyi sonuçların alınabileceği öngörülmektedir. Üretilen diğer etikete ait simülasyon ve ölçüm sonuçları ise Şekil 3.25.(b)’de gösterilmektedir. 24 bit boyunca sırasıyla “01” koduna sahip olan bu etikete ait sonuçlar incelendiğinde 12 adet “0” değerine sahip bitlerin diğer etikete göre daha net gözlendiği görülmektedir. Bunun sebebi, bu etikette “0” değerine sahip olan bitlerin ardışığında yer alan bitlerin “1” değerine sahip olması ve dolayısıyla frekans sahasında meydana gelen rezonanslar arasında daha geniş frekans aralığının olmasıdır. Çökme seviyesinin en düşük -3.77 dB’lik seviye ile elde edildiği sonuçlar frekans kodunun çok net şekilde okunabilir olduğunu göstermektedir.

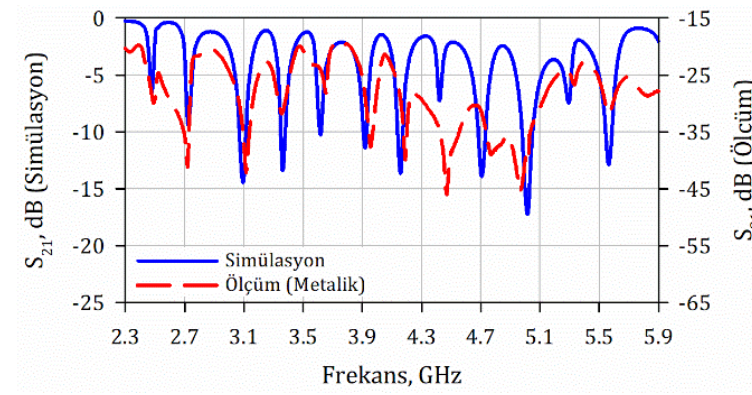
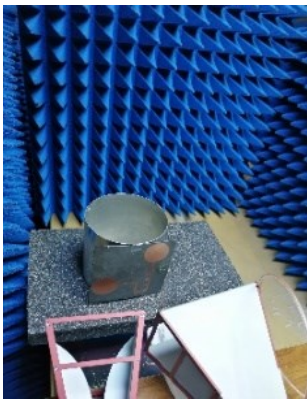
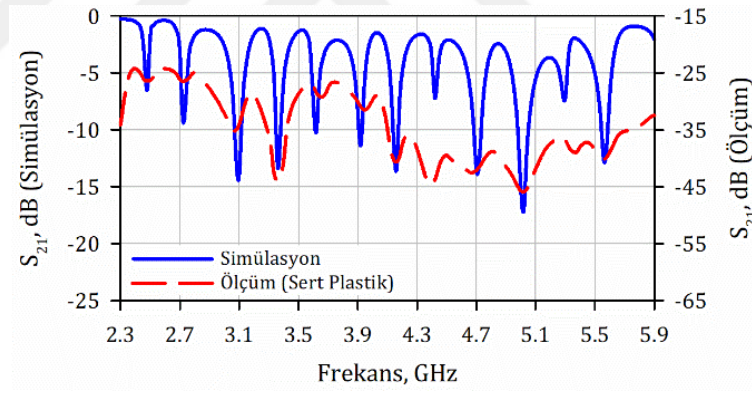
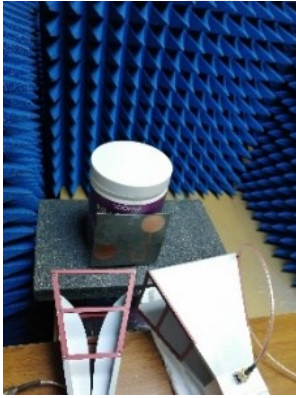
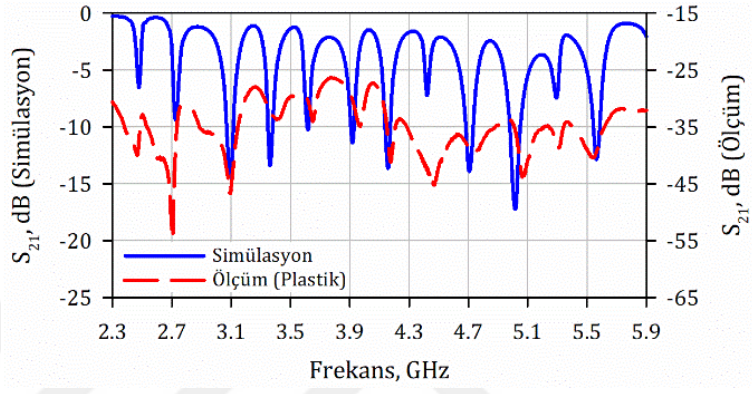
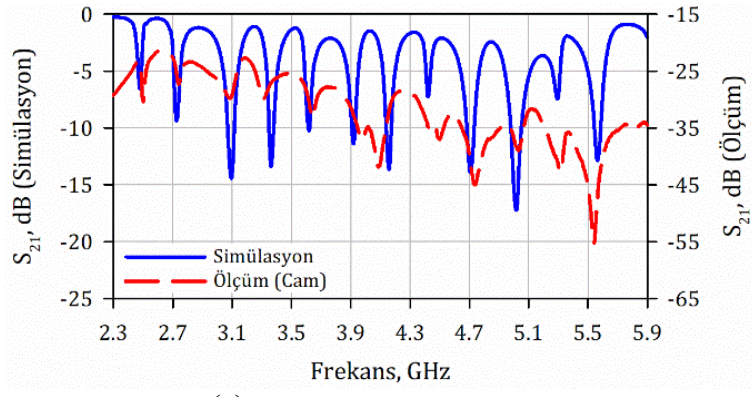
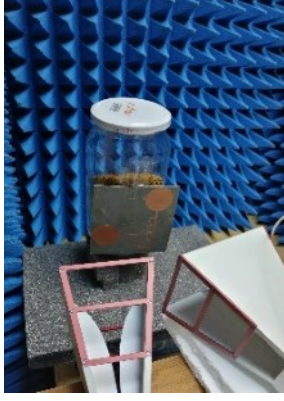


(a)



(b)

Şekil 3.25. Frekans kodu: 000000000000000000000000 (a) ve frekans kodu: 010101010101010101010101010101 (b) olan önerilen çipsiz RFID etikete ait simülasyon ve ölçüm sonuçları



Şekil 3.26. Cam malzeme (a), plastik su şişesi (b), sert plastik malzeme (c) ve metalik malzeme (d) için kurulan test düzeneği ve elde edilen ölçüm sonucunun simülasyon sonucu ile karşılaştırılması

Üretilen iki adet etikete ait ölçüm sonuçları Fotoğraf 3.2’de görüldüğü gibi etiketin straför köpük üzerine yapıştırılması durumunda elde edilmiştir. Önerilen etiketin kullanım alanı hakkında detaylı bilgi sahibi olmak amacıyla farklı tip malzemeler üzerinde de test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar esnasında “010101010101010101010101” frekans kodlu etiket kullanılmıştır. Şekil 3.26(a), 3.26(b), 3.26(c) ve 3.26(d)’de sırasıyla etiketin cam, plastik su şişesi, sert plastik ve metalik ürünler üzerine yerleştirildiği test ortamları ve bu durumlarda elde edilen ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması yer almaktadır. Dört tip malzeme için elde edilen ölçüm sonuçlarından görüleceği üzere etiketin “0” değerindeki bit frekanslarında meydana gelen rezonanslar net bir şekilde gözlenmektedir. Bir başka deyişle, rezonans frekanslarındaki araya girme kaybı $|S_{21}|$ seviyesinde meydana gelen çökme miktarı, etikete ait frekans kodunun tespit edilebilirliğini mümkün kılmaktadır. Bu durum, etiketin farklı özellikteki ürünler üzerinde de kullanılabilir olduğunu kanıtlamakla birlikte çok daha geniş bir ürün yelpazesinde takip ve tanılama işlemleri için kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, önerilen rezonatör modeli çipsiz RFID etiketler için bir rezonatörden beş adet frekans kodu sağlaması bakımından büyük önem arz etmektedir. Bu durum, çok daha fazla sayıda kod kapasitesine sahip kompakt boyuta sahip etiketlerin tasarlanmasına imkan tanımaktadır. Özetle, farklı frekanslarda rezonansa sahip N adet önerilen rezonatör modelinin kullanıldığı çipsiz RFID etiket tasarımı sayesinde 5^N adet farklı ürünün takip ve tanılama işlemini gerçekleştirmek mümkündür.

3.3. Üç Modlu Sekiz Frekans Kodlu Rezonatör Modeli ve Çipsiz RFID Etiket Tasarımı

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında çipsiz RFID etiket için sekiz frekans kodu üretebilen üç modlu rezonatör modeli önerilmiştir. Bu rezonatörün kullanıldığı çipsiz RFID etiket çalışmaları da bu bölümde yer almaktadır. Çalışmalar kapsamında ilk olarak, sekiz frekans kodunun elde edilmesine imkan veren kuplaj mekanizmasına sahip asimetrik saplama yüklü üç modlu rezonatör devresine ait teorik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Önerilen rezonatör, giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan besleme hattına kuplajlı olacak şekilde konumlandırılmaktadır. Kuplajlı bölgedeki besleme hattı ile rezonatörün iletim hattı bölmesi farklı genişlikte seçilmişlerdir. Bu asimetrik kuplajlı bölgenin teorik analizi asimetrik kuplajlı hat teorisi kullanılarak

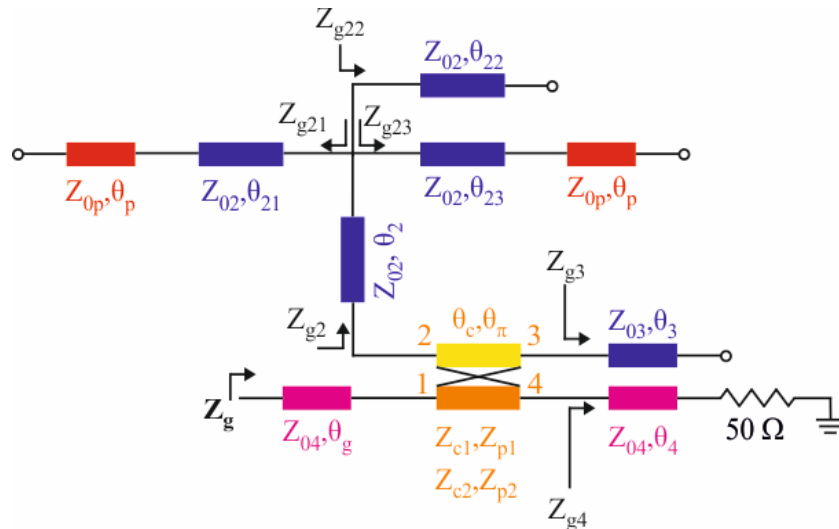
gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, devrenin giriş ve çıkış kapılarına göre asimetrik olmasından dolayı araya girme kaybına (S_{21}) ilişkin frekans cevabı bir önceki bölümde kullanılan çift ve tek mod empedans formülleri yardımıyla elde edilememektedir. Önerilen devre modelinde frekans cevabı, kuplajlı bölgenin 4-kapılı devre olarak kabul edilmesi ve devrenin giriş empedansının bulunması yardımıyla elde edilmektedir. Ayrıca teorik analiz çalışmalarında, üç modlu rezonatör modelinden elde edilebilen 8 frekans kodu normalize frekanslarda gösterilmiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda simülasyon çalışmalarına geçiş yapılmış ve optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları, farklı frekans kodlarının elde edilmesi sırasında meydana gelen kaymaları önlemek amacıyla devrede yer alan bazı parametrelerin detaylı incelemelerini içermektedir. Ayrıca, devre boyutu açısından iyileştirme sağlanması bakımından saplama geometrisi üzerinde yapılan çalışmalar da simülasyon çalışmaları ile ortaya konulmaktadır. Rezonatör tasarımına nihai olarak karar verildikten sonra çipsiz RFID etiket için daha fazla bit sağlanması bakımından çoklu rezonatör devresi tasarımı ortaya konulmaktadır. Daha sonra, bu etiket için Bölüm 3.1’de tasarlanan antenin yatay ve dikey polarizasyonlu olacak şekilde çoklu rezonatör devresinin giriş ve çıkış kapılarına entegre edilmesiyle çipsiz RFID etiket tasarımı tamamlanmaktadır. Önerilen çipsiz RFID etiketlerin performansını test etmek amacıyla üretilen farklı frekans koduna sahip iki adet etiketin deneysel çalışmaları bölümün sonunda yer almaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ölçüm sonuçları, önerilen etiketin oldukça iyi bir performansa sahip ve birçok farklı materyal üzerinde de kullanıma uygun olduğunu göstermektedir.

3.3.1. Rezonatör Analizi ve Kodlama Tekniği

Bu bölümde, tez kapsamında önerilen üç modlu ve çipsiz RFID etiket için sekiz frekans kodu üretebilen rezonatör tasarımına ait teorik analiz çalışmaları yer almaktadır. Aslında, önerilen rezonatör modeli hem yedi hem de sekiz frekans kodunun elde edilmesine imkan vermektedir. Frekans kodu sayısının yedi veya sekiz olması, rezonatöre ait rezonans frekanslarının frekans sahası üzerindeki sıralamasına bağlıdır. Bu iki durum Bölüm 3.3.2’de daha ayrıntılı şekilde ele alınmaktadır. Her iki durum için de kullanılan rezonatör modeli aynı olduğundan teorik analiz çalışmaları sekiz frekans kodunun elde edildiği duruma dayalı olarak gerçekleştirilmektedir.

Önerilen asimetrik saplamalı üç modlu rezonatör konfigürasyonu ve bu rezonatörün giriş/çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattına kuplajlanmış devre tasarımına ait

eşdeğer devre modeli Şekil 3.27’de gösterilmektedir. Şekilde, Z_g devrenin giriş empedansını ve 50Ω olarak belirtilen empedans da devrenin sonundaki çıkış kapısını temsil etmektedir. Dikkat edileceği üzere, giriş ve çıkış kapıları θ_g , θ_c , θ_π ve θ_4 elektriksel uzunluklarına sahip iletim hatlarıyla birbirine doğrudan bağlıdır. θ_g ve θ_4 elektriksel uzunlukları sırasıyla kuplajlı bölgenin önündeki ve sonrasındaki iletim hattına ait elektriksel uzunluklardır. Ayrıca, Şekil 3.27’den görüleceği üzere rezonatör ve giriş/çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattı arasında asimetrik kuplaj bulunmaktadır. θ_c ve θ_π ise sırasıyla asimetrik kuplajlı hat analizinde yer alan c- ve π -modlarına ait elektriksel uzunlukları temsil etmektedir. Bunlar dışında her bir iletim hattına ait karakteristik empedanslar ve elektriksel uzunluklar Şekil 3.27’de belirtilmektedir. Ayrıca şekil üzerinde, devre analizinin gerçekleştirilebilmesi için hesaplanması gereken bazı iletim hatlarının girişinden görülen empedans büyüklükleri ($Z_{g2}, Z_{g21}, Z_{g22}, Z_{g23}, Z_{g3}$ ve Z_{g4}) ve devrenin girişinden görülen empedans büyüklüğü (Z_g) de belirtilmektedir. Eşdeğer devre modelinde üst kısımda yer alan ve giriş empedansları Z_{g21} , Z_{g22} ve Z_{g23} ile temsil edilen iletim hatları üç rezonans frekansının, bir başka deyişle etiket için üç bitin kontrolünü sağlamaktadır. Yani, θ_{21} , θ_{22} ve θ_{23} elektriksel uzunluklarında yapılan değişimler sayesinde üç bit birbirinden bağımsız şekilde kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, Şekil 3.27’den görüleceği üzere θ_{21} ve θ_{23} elektriksel uzunluklarına sahip iletim hatlarının sonunda kırmızı renkle gösterilen θ_p elektriksel uzunluğuna sahip bir iletim hattı vardır. Bu iletim hattı da θ_{21} ve θ_{23} elektriksel uzunluklarına sahip olan iletim hatları ile aynı işleve sahiptir.



Şekil 3.27. Sekiz frekans kodu üretebilen önerilen üç modlu rezonatör konfigürasyonu ve kuplaj mekanizmasına ait eşdeğer devre modeli

Devre üzerinde yer alan her bir iletim hattına ait elektriksel uzunluklar $\theta = \beta d$ formülü kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu bilgi doğrultusunda, hattın girişinden görülen empedans formülü kullanılarak Şekil 3.27’de yer alan eşdeğer devre modelinin giriş empedansı,

$$Z_g = Z_{04} \frac{Z_1 + jZ_{04} \tan(\theta_g)}{Z_{04} + jZ_1 \tan(\theta_g)} \quad (3.6)$$

olarak yazılabilir. Bu eşitlikte yer alan Z_{04} ve θ_g büyüklükleri sırasıyla kuplajlı bölgenin sol tarafında yer alan girişteki iletim hattına ait karakteristik empedans ve elektriksel uzunluğu temsil etmektedir. Ayrıca, eşitlikte yer alan bir diğer büyüklük Z_1 ise bu iletim hattının sonunda görülen eşdeğer empedanstır ve iletim hattının yük empedansını temsil etmektedir. Şekil 3.27’den anlaşılacağı üzere Z_1 yük empedansı 4 kapılı devre olarak kabul edilen kuplajlı bölgenin 1 numaralı kapısında yer alan empedans değeridir ve kuplajlı bölgenin analiz edilmesi ile hesaplanabilir. Dört kapılı devreye ait akım/gerilim ilişkileri Denklem (2.3) setinde verildiği şekilde yazılabilir (Pozar, 2014). Denklem (2.3)’te yer alan empedans (Z) büyüklükleri, $[V] = [Z][I]$ formülündeki empedans matrisi elemanlarını temsil etmektedir. Asimetrik kuplajlı bölgeyi temsil eden dört kapılı devre için $[Z]$ matrisi elemanları, asimetrik şerit genişliğine sahip kuplajlı iletim hatlarının empedans matrisi kullanılarak,

$$Z_{11} = Z_{44} = \frac{Z_{c1} \coth(j\theta_c)}{1 - (R_c/R_\pi)} + \frac{Z_{\pi1} \coth(j\theta_\pi)}{1 - (R_\pi/R_c)} \quad (3.7a)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{34} = Z_{43} = \frac{Z_{c1} R_c \coth(j\theta_c)}{1 - (R_c/R_\pi)} + \frac{Z_{\pi1} R_\pi \coth(j\theta_\pi)}{1 - (R_\pi/R_c)} \quad (3.7b)$$

$$Z_{13} = Z_{31} = Z_{24} = Z_{42} = \frac{Z_{c1} R_c}{[1 - (R_c/R_\pi)] \sinh(j\theta_c)} + \frac{Z_{\pi1} R_\pi}{[1 - (R_\pi/R_c)] \sinh(j\theta_\pi)} \quad (3.7c)$$

$$Z_{14} = Z_{41} = \frac{Z_{c1}}{[1 - (R_c/R_\pi)] \sinh(j\theta_c)} + \frac{Z_{\pi1}}{[1 - (R_\pi/R_c)] \sinh(j\theta_\pi)} \quad (3.7d)$$

$$Z_{22} = Z_{33} = -\frac{R_c Z_{c2} \coth(j\theta_c)}{R_\pi [1 - (R_c/R_\pi)]} + \frac{R_\pi Z_{\pi2} \coth(j\theta_\pi)}{R_c [1 - (R_\pi/R_c)]} \quad (3.7e)$$

$$Z_{23} = Z_{32} = -\frac{R_c^2 Z_{c1}}{[1 - (R_c/R_\pi)] \sinh(j\theta_c)} + \frac{R_\pi^2 Z_{\pi1}}{[1 - (R_\pi/R_c)] \sinh(j\theta_\pi)} \quad (3.7f)$$

şeklinde yazılabilir (Tripathi, 1975).

Denklem (3.7) setinde yer alan R_c ve R_π büyüklükleri, asimetrik kuplajlı hatlara ait c- ve π - modlarının karakteristik empedanslarını belirlemek için kullanılan ve sırasıyla c- ve π - modları için asimetrik hatlar üzerindeki gerilimlerin oranını temsil etmektedir.

Şekil 3.27'de yer alan dört kapılı kuplajlı bölge incelendiğinde 2, 3 ve 4 numaralı kapılardaki akım-gerilim ilişkileri $V_2 = -I_2 Z_{g2}$, $V_3 = -I_3 Z_{g3}$ ve $V_4 = -I_4 Z_{g4}$ şeklinde yazılabilir. Bu ifadelerin Denklem (2.3) setinde yerlerine yazılmasıyla,

$$V_1 = I_1 Z_T \quad (3.8)$$

eşitliği elde edilebilir. Daha önce de belirtildiği üzere dört kapılı kuplajlı bölgenin 1 numaralı kapısındaki V_1/I_1 oranına karşılık gelen Z_T ,

$$Z_T = Z_{11} + NZ_{12} + MZ_{13} + \frac{LZ_{14}}{K} \quad (3.9)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (3.9)'de yer alan K, L, M ve N ifadeleri ise

$$K = 1 - \frac{Z_{24}Z_{42}}{AC} - \frac{(AZ_{43} + Z_{32}Z_{42})^2}{ACD} \quad (3.10a)$$

$$L = \frac{Z_{41}A + Z_{42}Z_{21}}{AC} + \frac{(AZ_{42} + Z_{21}Z_{32})(Z_{31}Z_{23} + AZ_{43})}{ACD} \quad (3.10b)$$

$$M = \frac{Z_{31}A + Z_{21}Z_{32}}{D} + \frac{LZ_{34}A + LZ_{32}Z_{24}}{KD} \quad (3.10c)$$

$$N = \frac{Z_{21}}{A} + M \frac{Z_{23}}{A} + L \frac{Z_{24}}{KA} \quad (3.10d)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada yer alan A, B, C ve D ifadeleri ise

$$A = -(Z_{g2} + Z_{22}) \quad (3.11a)$$

$$B = -(Z_{g3} + Z_{33}) \quad (3.11b)$$

$$C = -(Z_{g4} + Z_{44}) \quad (3.11c)$$

$$D = AB - Z_{23}^2 \quad (3.11d)$$

şeklinde yazılabilir. Eşitlik (3.11a)'da A'nın hesaplanmasında yer alan Z_{g2} büyüklüğü, Şekil 3.27'den de görüleceği üzere dört kapı ile temsil edilen kuplajlı bölgenin 2 numaralı kapısının sol tarafında yer alan ve sonunda üç farklı saplamanın bağlı bulunduğu iletim hattının girişinden görülen empedanstır. Bu giriş empedansı hattın girişinden görülen empedans formülü kullanılarak

$$Z_{g2} = Z_{02} \frac{Z_{g2L} + jZ_{02} \tan(\theta_2)}{Z_{02} + jZ_{g2L} \tan(\theta_2)} \quad (3.12)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Z_{g2} giriş empedansının hesaplanmasında yer alan Z_{g2L} empedansı ise hattın sonunda bağlı bulunan üç farklı saplamanın girişinden görülen empedansların eşdeğeridir. Şekil 3.27'den de görüleceği gibi üç saplama da bu iletim hattının sonunda aynı noktaya bağlı bulunmakta ve açık devreyle sonlandırılmışlardır. O halde, birbirine paralel olarak bağlı bulunan bu üç saplamanın girişinden görülen empedans değeri,

$$Z_{g2L} = Z_{g21} // Z_{g22} // Z_{g23} \quad (3.13)$$

olarak hesaplanabilir. Bu eşitlikte yer alan Z_{g21} , Z_{g22} ve Z_{g23} büyüklükleri, sırasıyla bağlı buldukları noktadan sol tarafta, üst tarafta ve sağ tarafta yer alan iletim hatlarının girişinden görülen empedanslardır ve

$$Z_{g21} = Z_{02} \frac{Z_{L21} + jZ_{02} \tan(\theta_{21})}{Z_{02} + jZ_{L21} \tan(\theta_{21})} \quad (3.14a)$$

$$Z_{g22} = -jZ_{02} \cot(\theta_{22}) \quad (3.14b)$$

$$Z_{g23} = Z_{02} \frac{Z_{L23} + jZ_{02} \tan(\theta_{23})}{Z_{02} + jZ_{L23} \tan(\theta_{23})} \quad (3.14c)$$

şeklinde hesaplanabilirler. Ayrıca, giriş empedansları Z_{g21} , Z_{g22} ve Z_{g23} olan saplamlar sırasıyla rezonatörün birinci, ikinci ve üçüncü rezonans frekansının kontrolünü sağlamaktadırlar. Şekil 3.27'den görüleceği üzere ikinci rezonans frekansını sağlayan açık halka rezonatörün üst kolu olan ve giriş empedansı Z_{g22} ile temsil edilen iletim hattının sonu açık devreyle sonlandırılmıştır. Bundan dolayı, Z_{g22} empedansı açık devre iletim hattının girişinden görülen empedans formülü kullanılarak Denklem (3.14b)'deki gibi hesaplanabilir. Ayrıca, birinci ve üçüncü rezonans frekansını üreten saplamların sonunda θ_p elektriksel uzunluğuna sahip açık devre iletim hattı bulunmaktadır. Bu iletim hattı, Denklem (3.14a) ve (3.14c)'de hattın sonundaki yük empedansı olarak Z_{L21} ve Z_{L23} büyüklükleri ile temsil edilmektedir. Bu büyüklüklerin ikisi de Z_{0p} karakteristik empedansına ve θ_p elektriksel uzunluğuna sahip iletim hattının girişinden görülen empedanstır ve açık devre sonlandırılmış iletim hattının girişinden görülen empedans formülü yardımıyla

$$Z_{L21} = Z_{L23} = -jZ_{0p} \cot(\theta_p) \quad (3.15)$$

olarak hesaplanabilir.

Denklem (3.11b)'de yer alan Z_{g3} ise Şekil 3.27'de gösterilen dört kapılı kuplajlı bölgenin 3 numaralı kapısının sağında bulunan açık halka rezonatöre ait açık devre kolun girişinden görülen empedanstır ve

$$Z_{g3} = -jZ_{03} \cot(\theta_3) \quad (3.16)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Son olarak, kuplajlı bölgedeki 4 numaralı kapının sağında kalan ve $Z_0 = 50 \Omega$ olan iletim hattına yani çıkış portuna bağlı bulunan hattın girişinden görülen empedans Z_{g4} ise

$$Z_{g4} = Z_{04} \frac{Z_0 + jZ_{04} \tan(\theta_4)}{Z_{04} + jZ_0 \tan(\theta_4)} \quad (3.17)$$

olarak hesaplanır. Böylelikle yukarıda yer alan teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen büyüklüklerin kullanılmasıyla devrenin giriş empedansını temsil eden Z_g büyüklüğü, Denklem (3.6) yardımıyla hesaplanabilir. Elde edilen Z_g büyüklüğünün Denklem (3.18a)'da kullanılmasıyla Şekil 3.27'de verilen eşdeğer devre modeline ait S parametreleri,

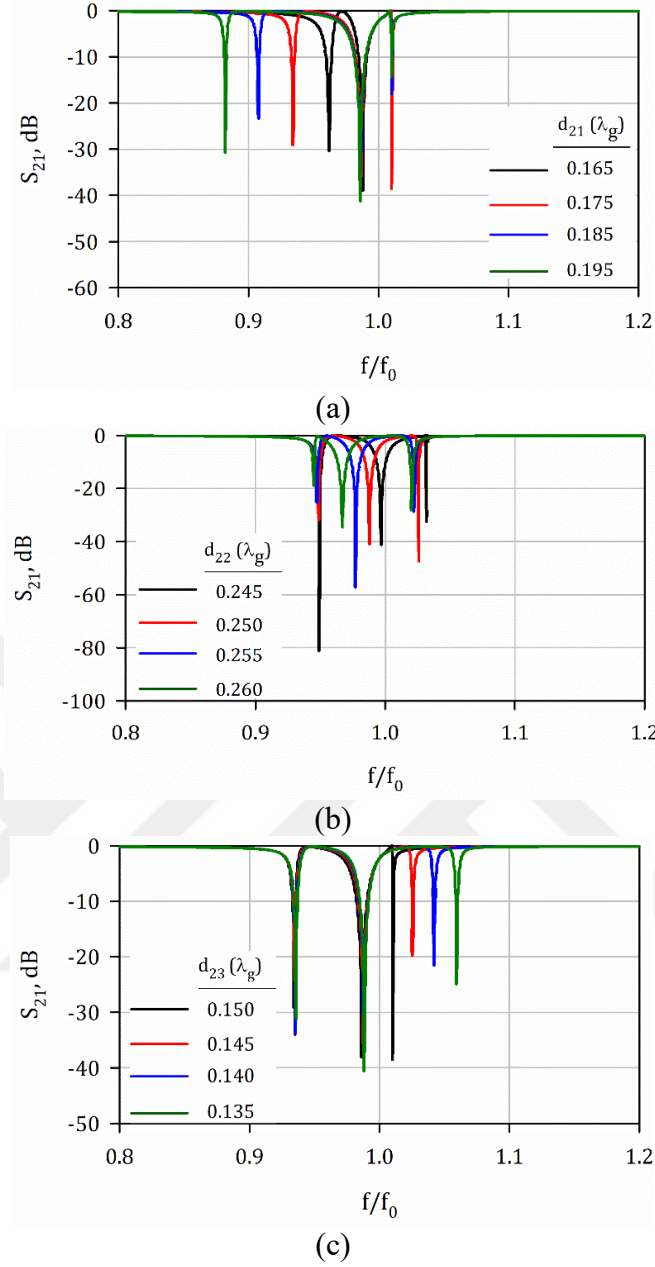
$$S_{11} = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0} \quad (3.18a)$$

$$|S_{21}| = \sqrt{1 - (|S_{11}|)^2} \quad (3.18b)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir (Hong ve Lancaster, 2012).

Her bir saplamaya ait dalga boyu (λ) cinsinden uzunluk değişimlerinin teorik olarak elde edilen normalize frekans cevabı üzerindeki etkileri Şekil 3.28'de yer almaktadır. Önerilen rezonatör modelinde birinci, ikinci ve üçüncü rezonans frekansını üreten iletim hatlarına ait elektriksel uzunluklar sırasıyla $\theta_{21} = \beta d_{21}$, $\theta_{22} = \beta d_{22}$ ve $\theta_{23} = \beta d_{23}$ 'dir. Burada, d_{21} , d_{22} ve d_{23} büyüklükleri ilgili hatların fiziksel uzunluğunu temsil etmektedir. Şekil 3.28(a), 3.28(b) ve 3.28(c)'de sırasıyla d_{21} , d_{22} ve d_{23} uzunluk değişimlerinin normalize frekans cevabına olan etkileri gösterilmektedir.

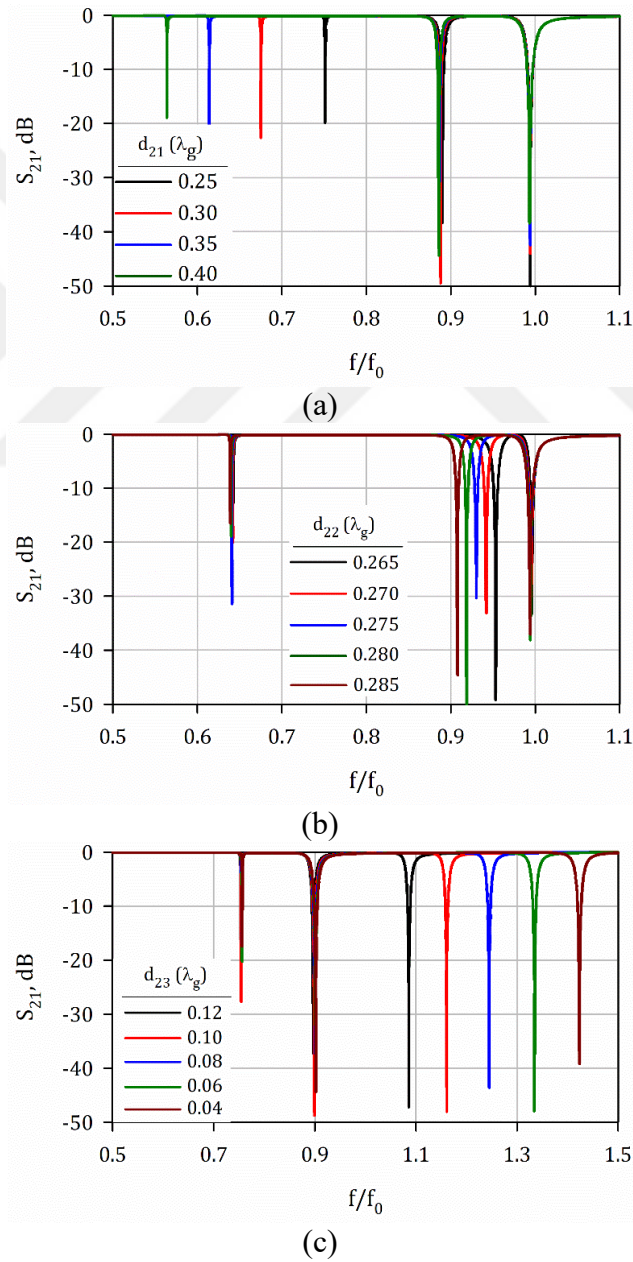
İlk olarak Şekil 3.28(a) incelendiğinde d_{21} uzunluğundaki değişim, yukarıda da belirtildiği üzere en düşük rezonans frekansını kontrol etmektedir. Yine bu kontrol sırasında diğer rezonans frekanslarında neredeyse hiç kayma olmadığı görülmektedir. Şekil 3.28(b)'de ise d_{22} uzunluğundaki değişimin rezonans frekansları üzerindeki etkisi gösterilmektedir. d_{22} uzunluğu, iletim hattına kuplajlı olan açık halka rezonatörün üst kolunu temsil etmektedir ve ana rezonans frekansı, bu açık halka rezonatör tarafından üretilmektedir. Bu rezonans frekansı, frekans bandı üzerinde ikinci sırada yer almaktadır ve ortadaki biti temsil etmektedir. Şekil 3.28(b) dikkatli incelendiğinde d_{22} uzunluğunun artması ile 2. rezonans frekansı daha düşük frekanslara kaymaktadır. Bu değişim sırasında ilk rezonans frekansında ihmal edilebilir düzeyde kayma meydana gelirken son rezonans



Şekil 3.28. d_{21} (a), d_{22} (b) ve d_{23} (c) değişiminin rezonans frekansları üstündeki etkisi

frekansında da az miktarda kayma mevcuttur. Diğer yandan, son rezonans frekansının diğer rezonans frekanslarından bağımsız bir şekilde d_{23} tarafından kontrol edilebildiği Şekil 3.28(c)'de gösterilmektedir. Buradan sonuçla, d_{22} uzunluğundaki değişimden az da olsa etkilenen birinci ve üçüncü rezonans frekansları, sırasıyla d_{21} ve d_{23} uzunluklarında yapılacak çok küçük değişimler ile arzu edilen frekans değerine tekrar getirilebilmektedir. Bu bağlamda, normalize rezonans frekansları arasında daha geniş aralıklar olacak şekilde d_{21} , d_{22} ve d_{23} değişimlerine ilişkin inceleme yapılmış ve istenmeyen frekans kaymalarının önüne geçilebileceği görülmüştür. Bu inceleme sırasında elde edilen d_{21} ,

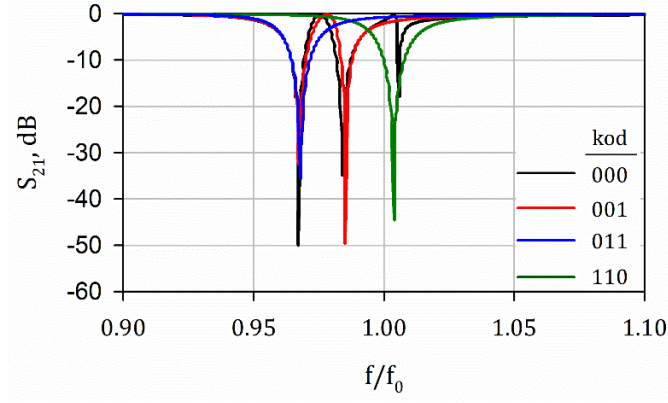
d_{22} ve d_{23} değişimlerine karşılık gelen normalize frekans cevapları sırasıyla Şekil 3.29(a), 3.29(b) ve 3.29(c)'de yer almaktadır. Üç değişim için de frekans cevapları incelendiğinde, rezonans frekansları arasındaki aralığın özellikle de saplamalar tarafından üretilen birinci ve üçüncü rezonans frekansları arasındaki aralığın artırılması sayesinde saplama uzunluklarının değişimi esnasında birbirlerine olan etkileri giderilmekte ve üç rezonans frekansının birbirinden tamamen bağımsız bir şekilde kontrolü sağlanmaktadır. Sonuç olarak, rezonans frekanslarının belirli bir aralığa sahip olacak şekilde seçilmeleri suretiyle istenmeyen küçük frekans kaymalarının önüne geçilebileceği teorik olarak söylenebilir.



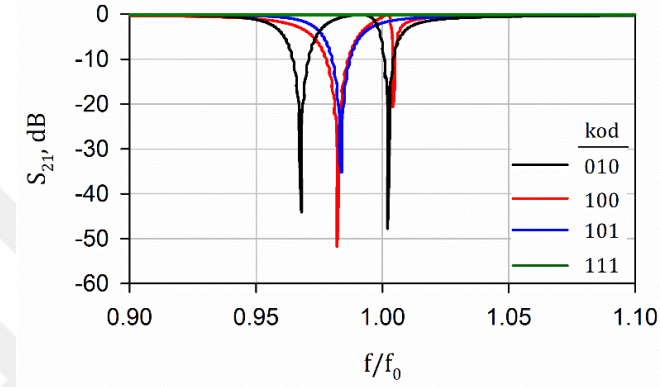
Şekil 3.29. d_{21} (a), d_{22} (b) ve d_{23} (c) değişiminin rezonans frekansları üstündeki birbirinden bağımsız şekilde etkisi

Rezonans frekanslarının birbirinden uzak olacak şekilde seçilmesi durumunda, özellikle çoklu rezonatör devreleri için çok daha geniş frekans sahası ihtiyacı ortaya çıkacaktır. Bu da, gerek etiket üzerinde kullanılacak monopol anten gerekse okuyucu tarafında kullanılacak anten seçiminde zorluğa sebep olacaktır. Bu yüzden, rezonans frekansları arasındaki boşluk optimum seviyede seçilmeli ve farklı frekans kodlarının elde edilmesi esnasında meydana gelebilecek az miktarda kaymalar, ilgili saplamaların boyutunda çok küçük değişimler yapılarak giderilmelidir. Böylece, daha dar bir frekans sahasında çok daha fazla bitin ve frekans kodu kombinasyonunun elde edilmesi mümkün olacaktır. Bu durum, çipsiz RFID etikete ait önemli parametrelerden biri olan spektral etkinlik, bir başka deyişle frekans sahası kullanım etkinliği bakımından avantaj sağlayacaktır.

Sonuç olarak, üç rezonans frekansının da birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol edilmesiyle istenilen frekanslarda elde edilebilecekleri söylenebilir. Ayrıca, daha önce de belirtildiği gibi her bir rezonans frekansı bir biti temsil etmektedir ve bitin “0” ve “1” değerlerini alabilmesi o biti kontrol eden saplamanın mevcudiyetine bağlıdır. Saplamanın rezonatöre bağlı bulunduğu durumda rezonans frekansı elde edilmekte ve bit “0” değerini almaktadır. Bitin “1” değerini alması için ilgili saplamanın devreden çıkartılması veya rezonatör ile olan bağlantısının kopartılması yeterlidir. Örneğin, “000” frekans kodu için Şekil 3.27’de gösterilen devre modelinde bulunan bütün iletim hatlarının mevcut olması gerekmektedir. Üç bitli kod kombinasyonunda ilk bitin değerini 1 yapmak için d_{21} uzunluğuna sahip saplamanın devreden çıkartılması gerekirken son bitin değerini “1” yapmak için d_{23} uzunluğuna sahip saplamanın devreden çıkartılması gerekmektedir. Ayrıca, ortadaki bitin “1” değerini alması için bir başka ifadeyle ana rezonans frekansının ortadan kaldırılması için açık halka rezonatörün üst kolu olarak belirtilen d_{22} kolunun devreden çıkartılması yeterli olacaktır. Devreden çıkartılma işlemleri teorik hesaplamalarda ilgili hat uzunluğunun “0” yapılması ile sağlanmaktadır. Bu şekilde teorik analiz sonucunda elde edilen 8 farklı frekans koduna ait normalize frekans cevapları Şekil 3.30’da gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere, “0” ve “1” olmak üzere iki farklı değer alabilen üç bitten elde edilebilecek maksimum yani 2^3 adet kod kombinasyonu elde edilmektedir. Böylece, tasarlanacak N adet önerilen rezonatör modelinin kullanıldığı bir çoklu rezonatör devresi toplamda 8^N adet frekans kodu üretebilecektir. Mevcut literatür incelendiğinde, önerilen modelin çipsiz RFID etiketler için bir rezonatörden sekiz adet frekans kodu sağlaması bakımından literatüre oldukça önemli bir katkıda bulunacağı öngörülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.30. “000”-“001”-“011”-“110” frekans kodları (a) ve “010”-“100”-“101”-“111” frekans kodları (b) için elde edilen normalize frekans cevapları

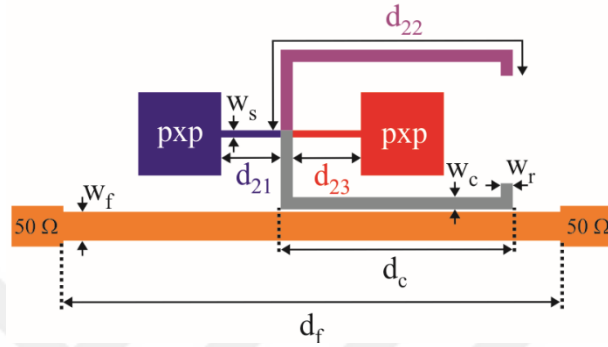
3.3.2. Yedi ve Sekiz Frekans Kodu Üretebilen Üç Modlu Rezonatör Tasarımı

Bu bölümde, yukarıda teorik analizi gerçekleştirilen rezonatör modeli kullanılarak bir rezonatörden yedi ve sekiz frekans kodunun elde edilmesine yönelik simülasyon çalışmaları yer almaktadır. Aynı rezonatör modelinden farklı sayıda frekans kodunun elde edilmesi, rezonatöre bağlı bulunan saplamalar tarafından kontrol edilen bitlerin frekans sahasındaki sıralamasına bağlıdır. Yedi ve sekiz frekans kodunun elde edildiği durumlara ait çalışmalar aşağıda ayrı başlıklar altında incelenmektedir.

3.3.2.1. Yedi Frekans Kodu Üretebilen Rezonatör Tasarımı ve Çoklu Rezonatör Devresi

Bu bölümde yer alan çalışmalarda önerilen üç modlu rezonatöre ait bit sıralaması yedi frekans kodunun elde edilmesine imkan vermektedir. Şekil 3.31’te yedi frekans kodu üretebilen rezonatör modeli gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü üzere üst kol uzunluğu

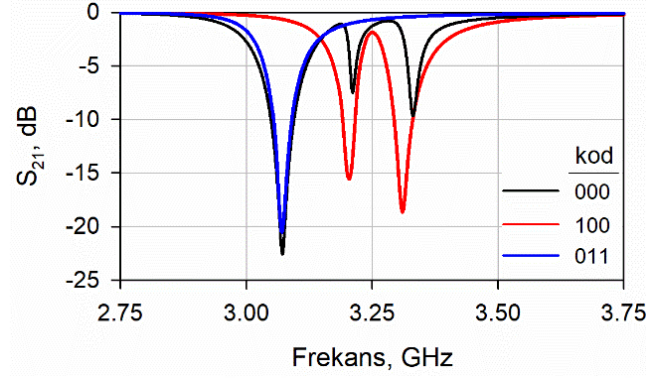
d_{22} olan bir yarım dalga boyu ($\lambda/2$) açık halka rezonatör, giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan düz bir iletim hattına asimetrik kuplajlı olacak şekilde yerleştirilmektedir. Açık halka rezonatöre ait ana rezonans frekansı teorik analizde olduğu gibi d_{22} uzunluğundaki hat tarafından kontrol edilmektedir. Rezonatöre bağlı bulunan yama yüklü açık devre saplamalar ise ana rezonans frekansının yakınlarında iki adet daha rezonans frekansı sağlamaktadır.



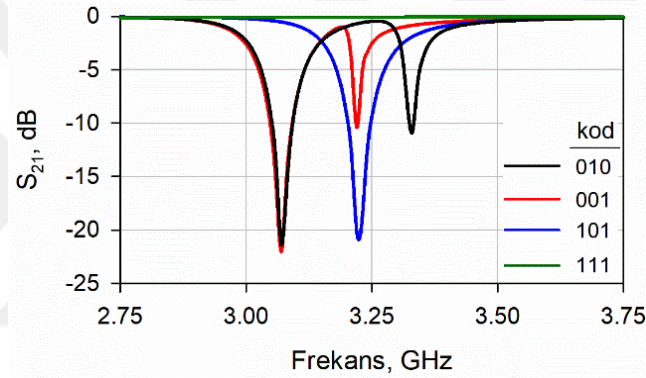
Şekil 3.31. 7 frekans kodu sağlayan rezonatör kullanılan devre modeli

Bölüm 3.3.1’de yer alan teorik analize göre d_{22} kolu, ilgili frekans sahasında üç bit içerisinde ortada yer alan 2. biti oluşturmaktaydı. Ayrıca 1. ve 3. bitler sırasıyla yama yüklü d_{21} ve d_{23} uzunluğundaki açık devre saplamalar tarafından kontrol edilmekteydi ve bu bit sıralaması kullanılarak 8 adet frekans kodu elde edilmekteydi. Ayrıca, yine teorik olarak üç bitin de frekans sahası içerisinde birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol edilebildiği ortaya konulmuştu. Bu kısımda; d_{22} uzunluğu, ana rezonans frekansı 1. biti temsil edecek şekilde ayarlanmıştır ve bu durumda incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler sırasında, 2. ve 3. bitler sırasıyla d_{23} ve d_{21} uzunluğuna sahip saplamalar tarafından üretilmekte ve frekans sahası üzerinde ardışık olarak yer almaktadır. Bu durumda d_{21} ve d_{23} uzunlukları birbirine oldukça yakın olmaktadır. Bu da, devrede d_{22} kolunun olmadığı durumda d_{21} veya d_{23} saplamalarından yalnızca bir tanesinin bağlı olması durumunda hangisinin bağlı olduğunun net bir şekilde tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Yani, yalnızca d_{21} bağlı iken “110” frekans kodunun elde edilmesi gerekirken yalnızca d_{23} bağlı olduğu durumda “101” frekans kodunun elde edilmesi beklenir. Ancak, d_{21} ve d_{23} uzunluklarının birbirine çok yakın olmasından dolayı bu iki durumda da “101” frekans kodu üretilmektedir. Şekil 3.31’de önerilen rezonatör modelinden elde edilebilen 7 frekans koduna ait frekans cevapları Şekil 3.32’de yer almaktadır. Önerilen devre tasarımında dielektrik kalınlığı 0.79 mm ve bağıl dielektrik

katsayısı 2.33 olan Rogers 5870 taban malzemesi kullanılmıştır. Ayrıca, devreye ait boyut bilgileri şu şekildedir: $d_{21} = 3.40$, $d_{22} = 17.95$, $d_{23} = 3.90$, $d_c = 13.65$, $d_f = 28.80$, $w_c = 0.70$, $w_s = 0.40$, $w_f = 1.65$ ve $p = 4.80$ mm.



(a)

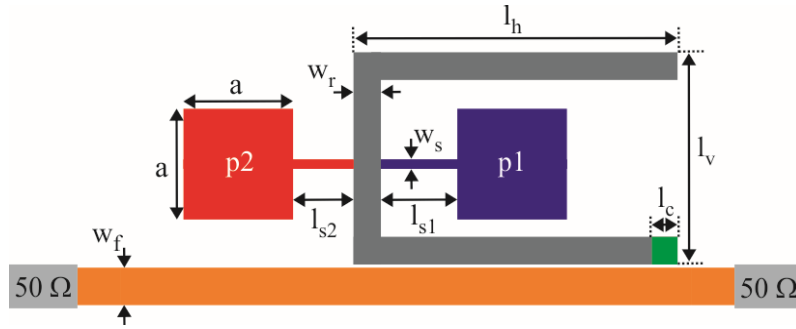


(b)

Şekil 3.32. “000”-“100”-“011” frekans kodları (a) ve “010”-“001”-“101”-“111” frekans kodları (b) için elde edilen frekans cevapları

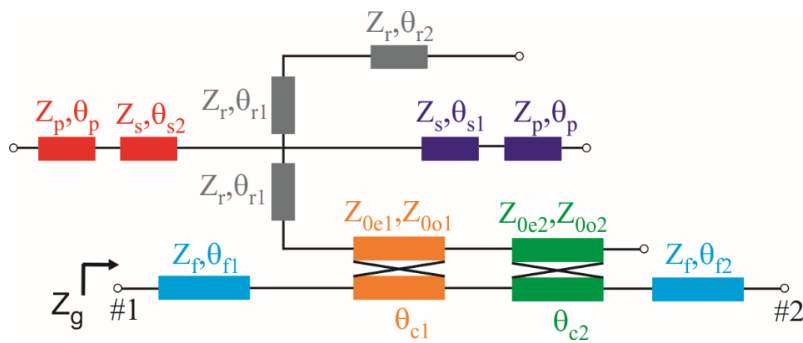
Şekil 3.32 dikkatli incelendiğinde bazı frekans kodlarının elde edilmesi sırasında bit frekanslarında kaymalar meydana gelmektedir. Bu durum, ilgili biti kontrol eden saptamada yapılacak çok küçük değişiklikler ile giderilebildiği gibi aşağıda bu duruma çözüm olması bakımından bir başka yöntem daha önerilmektedir. Ayrıca, bu yöntemin kullanıldığı rezonatör devresinde farklı bir taban malzemesi kullanılarak malzeme seçimi bakımından çeşitlilik de test edilmektedir. Şekil 3.33’te gösterilen devrede taban malzemesi olarak dielektrik kalınlığı 0.813 mm ve bağıl dielektrik katsayısı 3.55 olan Rogers 4003C kullanılmaktadır. Ayrıca, açık halka rezonatörün kuplajlı bölmesinin sonunda “ l_c ” uzunluğuna sahip küçük iletim hattı parçası farklı frekans kodlarında meydana gelen frekans kaymalarını gidermek amacıyla kullanılmaktadır. Bu iletim hattının kaymanın meydana geldiği frekans kodlarına ait devre konfigürasyonlarında

devreden çıkartılmasıyla sağlanacak elektriksel uzunluğun değişimi, rezonansın tekrar olması gereken frekansta olmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 3.33. Önerilen revize edilmiş 7 frekans kodu sağlayan rezonatör modeli

Şekil 3.33'te verilen devrede de giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan düz iletim hattına kuplajlı olan açık halka rezonatör frekans sahasında ilk sırada yer alan rezonans frekansını üretmekte ve böylece birinci biti temsil etmektedir. Rezonatöre ait diğer iki rezonans frekansı ise açık halka rezonatöre bağlı bulunan l_{s1} ve l_{s2} uzunluğuna sahip saplamalar tarafından üretilmektedir. Burada, rezonatörün iç tarafında yer alan yama yüklü açık devre saplama ortada yer alan rezonans frekansını kontrol ederken rezonatörün dış tarafından yer alan yama yüklü açık devre saplama üçüncü ve son rezonans frekansını kontrol etmektedir. Yani, saplamalar tarafından kontrol edilen rezonans frekansları yine frekans sahasında ardışık olacak şekildedir. Farklı taban malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen devre tasarımına ait boyut bilgileri; $l_h = 14.20$, $l_v = 9.20$, $l_{s1} = 3.35$, $l_{s2} = 2.65$, $l_c = 0.50$, $w_f = 1.60$, $w_r = 1.20$, $w_s = 0.40$ ve $a = 4.80$ mm şeklindedir.



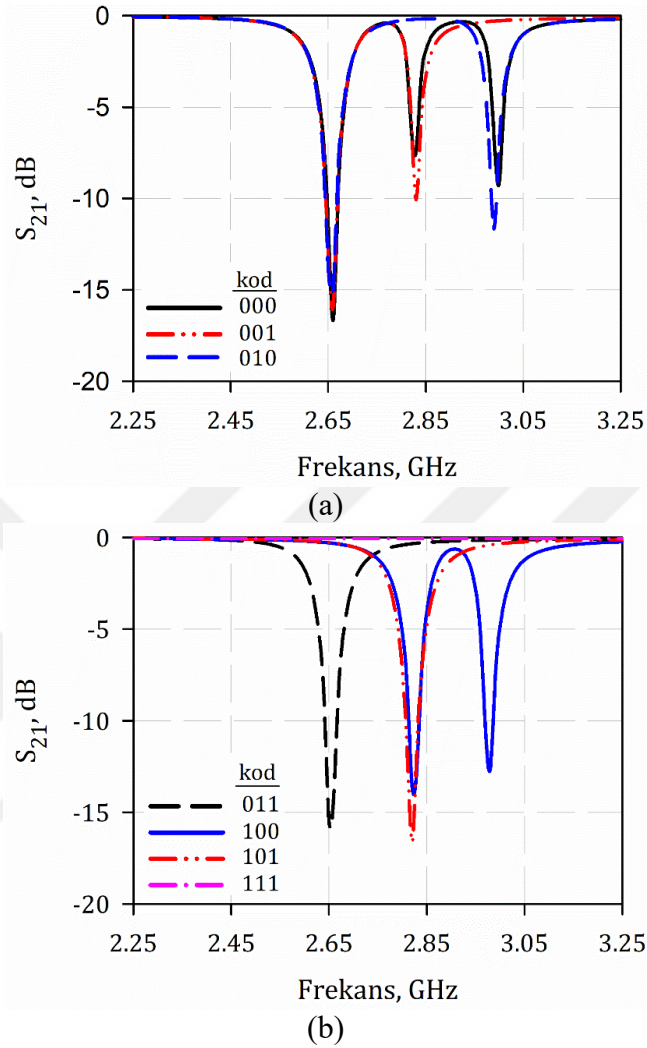
Şekil 3.34. Önerilen rezonatöre ait eşdeğer devre modeli

Frekans kaymasını engellemek için önerilen yöntemin kullanıldığı üç modlu rezonatöre ait eşdeğer devre modeli Şekil 3.34'te yer almaktadır. Şekilde, l_c uzunluğu ile gösterilen

hat parçasına ait kuplaj bölgesi Şekil 3.34'te gösterilmiştir. Ayrıca, devrede yer alan tüm iletim hatlarına ait karakteristik empedans ve elektriksel uzunluk bilgileri ilgili hat ile birlikte şekil üzerinde yer almaktadır. Z_r , Z_s , Z_p ve Z_f büyüklükleri, sırasıyla açık halka rezonatörün kuplajlı olmayan kollarına, açık halka rezonatöre bağlı bulunan saplamalara, saplamaların sonunda yer alan yamalara ve besleme hattının kuplajlı olmayan kısımda yer alan iletim hattına ait karakteristik empedansları temsil etmektedir. Ayrıca, θ_r , θ_s , θ_p , θ_f ve θ_c sırasıyla açık halka rezonatörün kuplajlı olmayan kolları, saplamalar, saplamaların sonunda bağlı bulunan yamalar, kuplajlı olmayan besleme hattı ve kuplajlı hatlara ait elektriksel uzunlukları temsil etmektedir. Rezonatörün iç ve dış kısmına doğru konumlandırılmış olan saplamalar, Z_s olarak belirtilen aynı karakteristik empedansa sahip olsa da iki farklı rezonans frekansı üretebilmeleri için θ_{s1} ve θ_{s2} olmak üzere farklı elektriksel uzunluğa sahip olacak şekilde seçilmelidir. Bir önceki kısımda yer alan ve Şekil 3.27'deki eşdeğer devre modelinde kullanılan teorik analiz, Şekil 3.34'te verilen eşdeğer devre modeline de uygulanabilir. Özellikle kuplaj mekanizmasındaki farklılık göz önüne alınarak gerçekleştirilecek analiz sonucunda devrenin girişinden görülen Z_g giriş empedansı bulunabilir. Daha sonra, Z_g empedansının Denklem (3.18a)'da yerine konulmasıyla eşdeğer devre modeline ait geriye dönme kaybı (S_{11}) ve hesaplanan S_{11} büyüklüğünün de Denklem (3.18b)'de kullanılmasıyla araya girme kaybı (S_{21}) parametrelerine ait frekans cevaplarının teorik olarak elde edilmesi mümkündür.

Önerilen rezonatör modelinde elde edilebilen 7 frekans koduna ait frekans cevabı Şekil 3.35'te gösterilmektedir. Şekil 3.31'deki devre ile aynı kodlama tekniğine sahip olan devrede, birinci bitin değerini "1" yapmak için açık halka rezonatörün üst kolu saplamaların bağlı bulunduğu noktadan itibaren devreden çıkartılmalıdır. Bu durumda "100" frekans kodu elde edilmektedir. Ayrıca, devre "100" frekans kodunu üretecek konfigürasyonda iken devreden " l_{s2} " hattı ve "p2" yamasının da çıkarılması ile "101" frekans kodu elde edilebilir. Elde edilebilen 7 frekans kodu içerisinde birinci bitin "1" değerinde olduğu "100" ve "101" frekans kodlarında rezonans frekanslarında bir miktar kayma meydana gelmektedir. Bu kodların elde edildiği devre konfigürasyonlarında, Şekil 3.32'de belirtilen " l_c " uzunluğuna sahip iletim hattı devreden çıkartılarak meydana gelen frekans kaymaları giderilmektedir. Şekil 3.35'teki frekans cevapları incelendiğinde 7 frekans kodunun da herhangi bir frekans kayması olmadan elde edilebildiği görülmektedir. Saplamalar tarafından kontrol edilen bitlerin ardışık olması durumunda

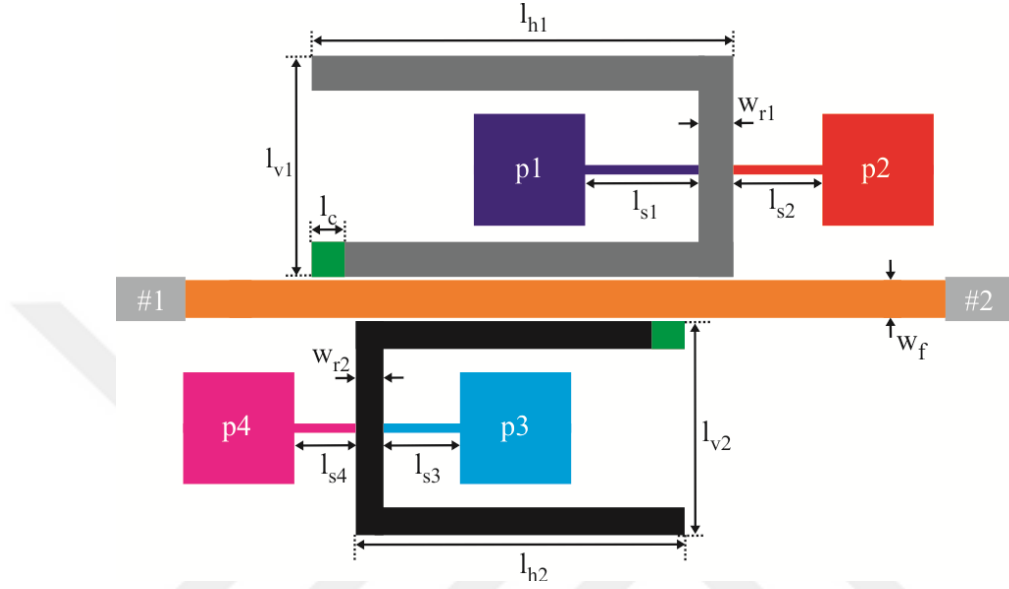
yukarıda da belirtildiği gibi saplama uzunlukları birbirine çok yakın olacağından “110” frekans kodu yerine de “101” kodu elde edilmektedir.



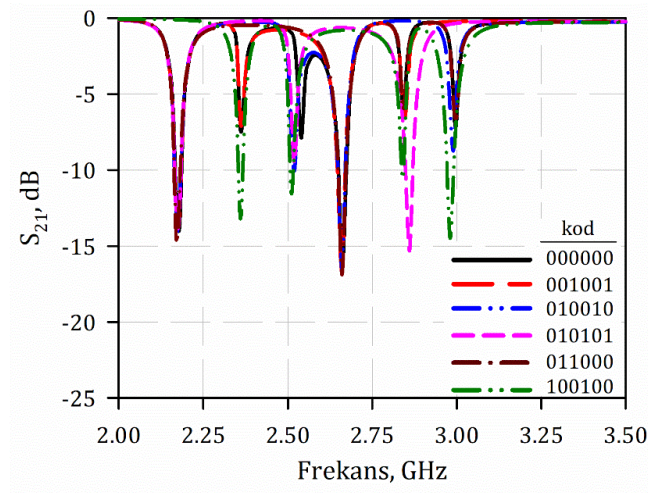
Şekil 3.35. “000”-“001”-“010” frekans kodları (a) ve “011”-“100”-“101”-“111” frekans kodları (b) için elde edilen normalize frekans cevapları

Önerilen rezonatör modelinin kullanıldığı iki rezonatörlü devre modeli Şekil 3.36’da gösterilmektedir. Bu sayede, daha fazla bit olması durumunda frekans kaymasını önlemek için önerilen tekniğin kullanılabilir olduğu gösterilmektedir. Farklı elektriksel uzunluktaki iki rezonatör giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattına, hattın üst ve alt kısmında yer alacak şekilde kuplajlanarak boyut avantajı sağlanmaktadır. Saplamaların sonunda bağlı bulunan yama elemanların tamamı aynı boyuttadır. Saplamalar ise aynı karakteristik empedansa sahip olmakla birlikte farklı uzunluğa sahiptirler. İki rezonatörlü devreden elde edilen farklı frekans kodlarına ait frekans cevapları Şekil 3.37’de gösterilmektedir. Frekans cevabında ilk üç bit üst kısımda

bulunan rezonatör tarafından üretilirken son üç bit alt kısımda yer alan rezonatör tarafından üretilmektedir. Her bir rezonatörün birinci, ikinci ve üçüncü biti sırasıyla, kuplajlı olan açık halka rezonatör, rezonatörün iç kısmında kalan yama yüklü açık devre saplama ve rezonatörün dış kısmında kalan yama yüklü açık devre saplama tarafından üretilmektedir.



Şekil 3.36. 7 frekans kodu üreten rezonatör modeli kullanılarak iki rezonatörlü devre modeli



Şekil 3.37. 7 frekans kodu sağlayan iki rezonatörlü devrenin bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları

Farklı frekans kodlarının elde edilmesi sırasında meydana gelen frekans kaymalarını önlemek için rezonatörlerin kuplajlı hatlarında yer alan “ l_c ” uzunluğundaki iletim hattı bölmesi devreden çıkartılmaktadır. Şekilden görüleceği üzere farklı frekans kodları,

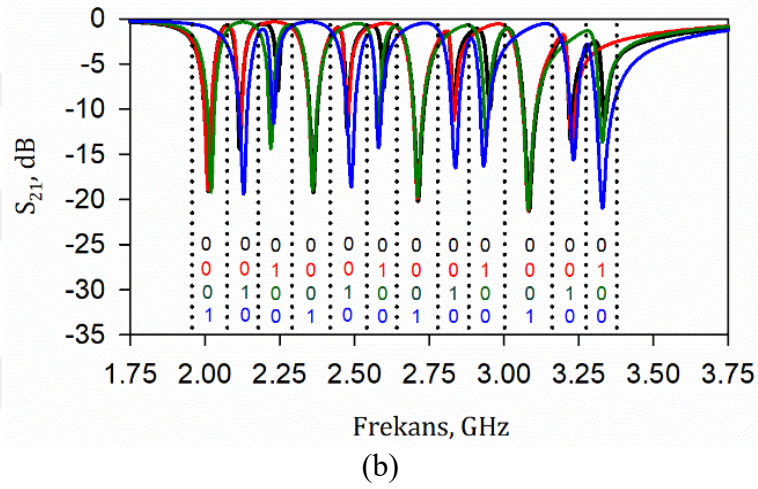
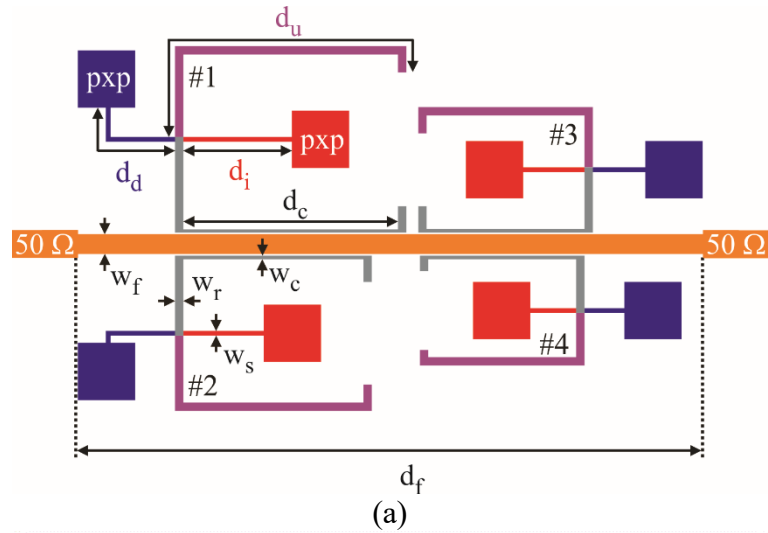
frekans kaymaları en az olacak şekilde ve net okunabilirlikte elde edilmektedir. İki rezonatörlü devrenin bir etikette kullanılması durumunda toplamda 6 bit ve 7^2 adet frekans kodu elde edilebilecektir. Devrenin tasarımında bağıl dielektrik sabiti 3.55 ve kalınlığı 0.813 mm olan Rogers 4003C taban malzemesi kullanılmaktadır. Şekil 3.36’da yer alan iki rezonatörlü devreye ait boyut bilgileri Çizelge 3.3’te mm cinsinden verilmektedir.

Çizelge 3.3. İki rezonatörlü devre tasarımına ait boyut bilgileri (mm)

l_{h1}	l_{v1}	l_{h2}	l_{v2}	l_{s1}	l_{s2}	l_{s3}
18.2	9.5	14.2	9.2	4.9	3.85	3.3
l_{s4}	l_c	w_{r1}	w_{r2}	w_s	w_f	a
2.65	1.0	1.5	1.2	0.4	1.6	4.8

Çipsiz RFID etiketlerde kullanılması durumunda daha fazla bit ve frekans kodu sağlaması bakımından Şekil 3.38’de yer alan dört rezonatörlü çoklu rezonatör devresi geliştirilmiştir. Ancak, bu devrede daha esnek bir taban malzeme olan bağıl dielektrik sabiti 2.33 ve dielektrik kalınlığı 0.79 mm olan Rogers 5870 taban malzemesi kullanılmaktadır. Bu sayede, çoklu rezonatör devresinin çipsiz RFID etikette kullanılması durumunda etiketin kullanılabilmesi ürün yelpazesi genişletilmiş olacaktır.

Şekil 3.38(a)’dan görüleceği üzere 7 frekans kodu üretebilen farklı elektriksel uzunlukta dört adet rezonatör besleme hattına kuplajlı olacak şekilde yerleştirilmektedir. Tasarlanan devre 12 bit kapasiteye sahiptir. Her bir rezonatör tarafından üretilen ve kontrol edilen bitler, frekans sahasında ardışık olarak yer almaktadır. Frekans sahasında yer alan ilk üç bit Şekil 3.38(a)’daki #1 numaralı rezonatör tarafından üretilirken numaralandırma doğrultusunda diğer 9 bit ilgili rezonatörler tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca, rezonatörlere ait bitlerin kontrol mekanizması yukarıda tek rezonatörlü durumda anlatıldığı şekildedir. Yani, her rezonatörün ana rezonans frekansı kendilerine ait birinci biti temsil etmekte ve “ d_u ” ile gösterilen açık halka rezonatörün üst kolu tarafından kontrol edilmektedir. Her bir rezonatörün ikinci biti ise sonunda $p \times p$ boyutunda yama bağlı olan ve rezonatörün iç kısmında yer alan d_i uzunluğuna sahip saplamlar tarafından sağlanmaktadır. Yine her rezonatörden elde edilen üçüncü ve son bit ise rezonatörün dış



Şekil 3.38. 7 frekans kodu üreten rezonatör modeli kullanılan çoklu rezonatör devresi modeli (a) ve çoklu rezonatör devresinden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları (b)

tarafında yer alan ve $p \times p$ boyutunda yama yüklü d_d uzunluğuna sahip saplama tarafından üretilmektedir. Çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri Çizelge 3.4’te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.38(a)’da verilen çoklu rezonatör devresinde 50Ω karakteristik empedanslı giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattı uzunluğu $d_f = 52.45$ mm iken hattın genişliği $w_f = 1.65$ mm’dir. Ayrıca, rezonatörlerin yan yana olmak yerine besleme hattının alt ve üst kısımlarında olacak şekilde karşılıklı olarak yerleştirilmesiyle devre boyutu bakımından avantaj sağlanmaktadır. Yine kompakt devre elde etmek için #1 ve #2 numaralı rezonatörlerin dış tarafında yer alan saplamalar kıvrımlı olarak kullanılmıştır.

Şekil 3.38(a)’da verilen dört rezonatörlü devreden elde edilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları Şekil 3.38(b)’de yer almaktadır. Tüm rezonatörlerin “000” frekans

koduna sahip olması için devrede yer alan rezonatörlerin üç modlu rezonatör konfigürasyonuna sahip olması gerekmektedir. Böylece, 12 adet rezonansın oluşmasıyla “000000000000” frekans kodu elde edilmektedir. Ayrıca, grafikte yer alan diğer frekans kodlarında her bir rezonatörün “001”, “010” ve “100” frekans kodlarına sahip olduğu görülmektedir. Bu kodlar için her bir rezonatörden sırasıyla, d_d ile belirtilen saplama, d_i ile belirtilen saplama ve d_u ile belirtilen saplamanın devreden çıkartılması gerekmektedir.

Çizelge 3.4. Dört rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri (mm)

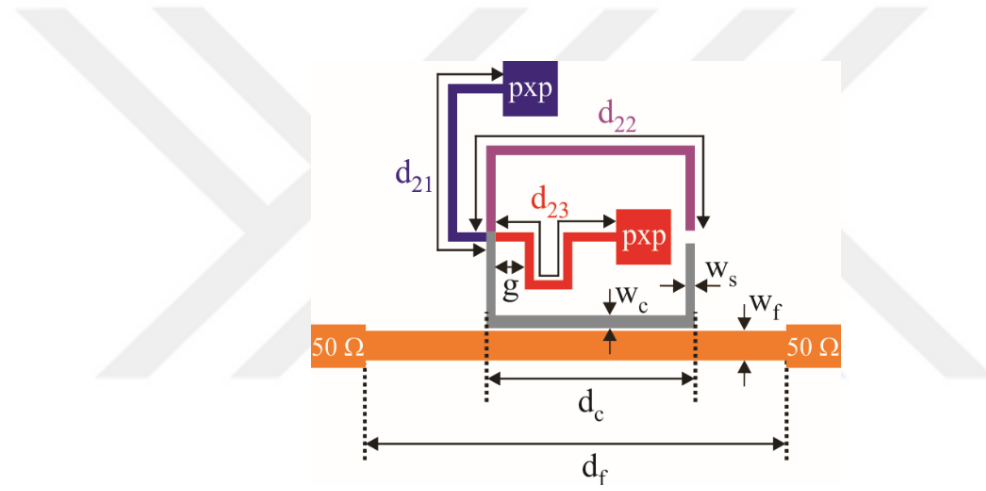
Rez.	d_i	d_d	d_u	d_c	w_c	w_r	w_s
1	9.10	7.85	27.80	18.00	0.25	0.7	0.4
2	6.75	6.40	23.60	15.10	0.30	0.7	0.4
3	5.15	4.40	20.50	13.25	0.30	0.7	0.4
4	3.85	3.35	18.20	12.40	0.30	0.7	0.4

Sonuç olarak, her bir rezonatörün 7 frekans kodu üretebildiği bit sıralamasına sahip çoklu rezonatör devresi 7^4 adet frekans kodu çeşitliliğine sahiptir. Farklı frekans kodlarının elde edilmesi esnasında meydana gelen küçük frekans kaymaları ilgili saplama uzunluğunda çok küçük değişiklikler yapılarak önlenabilir. Şekil 3.38(b)'de yer alan farklı kodlara ait frekans cevaplarından da görüleceği üzere araya girme kaybı seviyeleri ($|S_{21}|$), çipsiz RFID etiketlerde kodun tespit edilebilirliği açısından yeterlidir.

3.3.2.2. Sekiz Frekans Kodu Üretebilen Rezonatör Tasarımı ve Parametrik Değişimlerin İncelenmesi

Bu bölümde, sekiz frekans kodu üretebilen bit sıralamasına sahip üç modlu rezonatör önerilmiş ve ona ait simülasyon tabanlı incelemelere verilmiştir. Çipsiz RFID etiketler için üç bit ve sekiz frekans kodu üretebilen üç modlu rezonatör konfigürasyonunun kullanıldığı devre modeli Şekil 3.39'da gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere önerilen rezonatör modeli bir önceki bölümde önerilen yedi frekans kodu üretebilen rezonatör modeli ile neredeyse aynıdır. Buradaki tek fark, sonunda $p \times p$ boyutlu yama bulunan d_{21} ve d_{23} uzunluğuna sahip saplamalar arasında daha fazla uzunluk farkı olmasıdır. Bu sayede, saplamalar tarafından sağlanan rezonans frekansları arasındaki

frekans aralığı artmaktadır ve açık halka rezonatör tarafından üretilen ana rezonans frekansı, saplamalara ait rezonans frekanslarının arasında yer alacak şekilde ayarlanmaktadır. Bu sayede, d_{22} uzunluğundaki saplamanın bağlı olmadığı durumda bile devrede d_{21} ve d_{23} saplamalarından bir tanesinin bağlı olması durumunda hangi saplamanın bağlı olduğu net bir şekilde anlaşılabilir ve bir önceki kısımda elde edilemeyen sekizinci kodun da elde edilmesine imkan sağlanmış olacaktır. Sonuç olarak, uygun bit sıralamasının sağlanmasıyla önerilen rezonatörden sekiz frekans kodunun üretilmesi mümkün olmaktadır. Bu kapsamda, 8 kodlu rezonatör modeli için Bölüm 3.3.1’de teorik analiz çalışmaları ile desteklenmiş olan ve Şekil 3.27’de verilen eşdeğer devre modeline uygun olacak şekilde tasarlanan devreye ait simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmektedir.



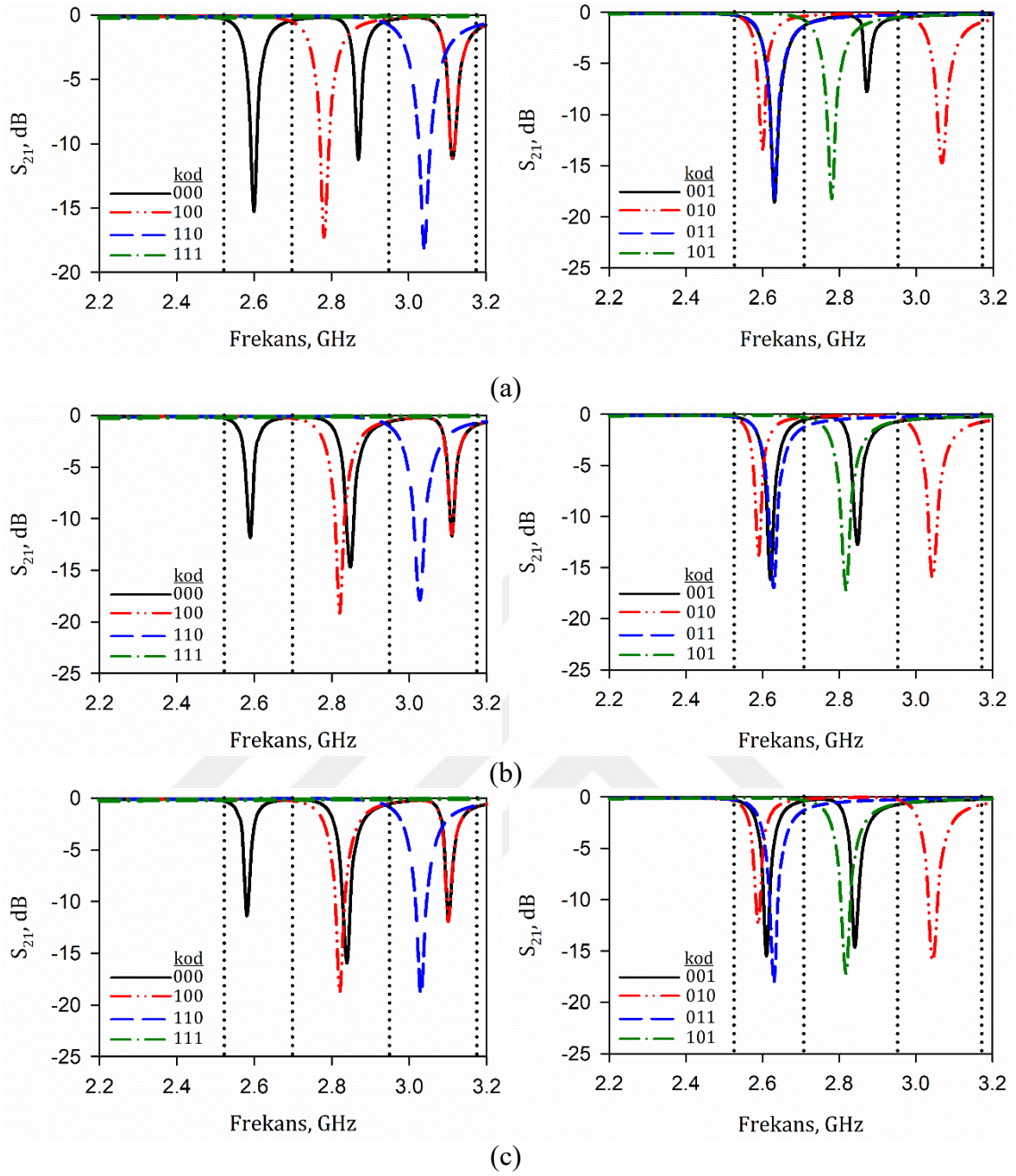
Şekil 3.39. 8 frekans kodu üretebilen rezonatör konfigürasyonu

Şekil 3.39’da, Şekil 3.27’de verilen eşdeğer devre modelinde yer alan θ_p elektriksel uzunluğundaki iletim hattının pxp boyutlarına sahip bir yama elemanla temsil edildiği görülmektedir. Söz konusu yama eleman hem d_{21} uzunluğundaki hem de d_{23} uzunluğundaki iletim hatlarının sonunda aynı boyutta olacak şekilde yer almaktadır. d_{21} ve d_{23} uzunluklarının eşit olması halinde yama elemanlarında yapılacak farklılık sayesinde de saplamalara ait rezonans frekansları üzerinde benzer etki sağlanabilir. Ancak, yama elemanı boyutunda yapılacak olan değişimler rezonatörün içinde bulunan kısımda boyutsal anlamda kısıtlamalar getirebileceği gibi dışında bulunan kısımda da devre boyutunun artmasına sebep olacaktır. Bu sebeple saplamaların sağlamış olduğu rezonanslara ait frekans kontrolünün, yama boyutu yerine d_{21} ve d_{23} iletim hatları uzunluğunda yapılacak değişiklikler ile sağlanması daha uygun olacaktır. Aşağıda, önerilen rezonatör devresiyle sekiz frekans kodunun elde edilmesi sırasında oluşan

frekans kaymalarını azaltmaya yönelik gerçekleştirilen bazı parametrik incelemeler yer almaktadır.

3.3.2.2.1. Önerilen Üç Modlu Rezonatörde “g” Aralığının Etkisi

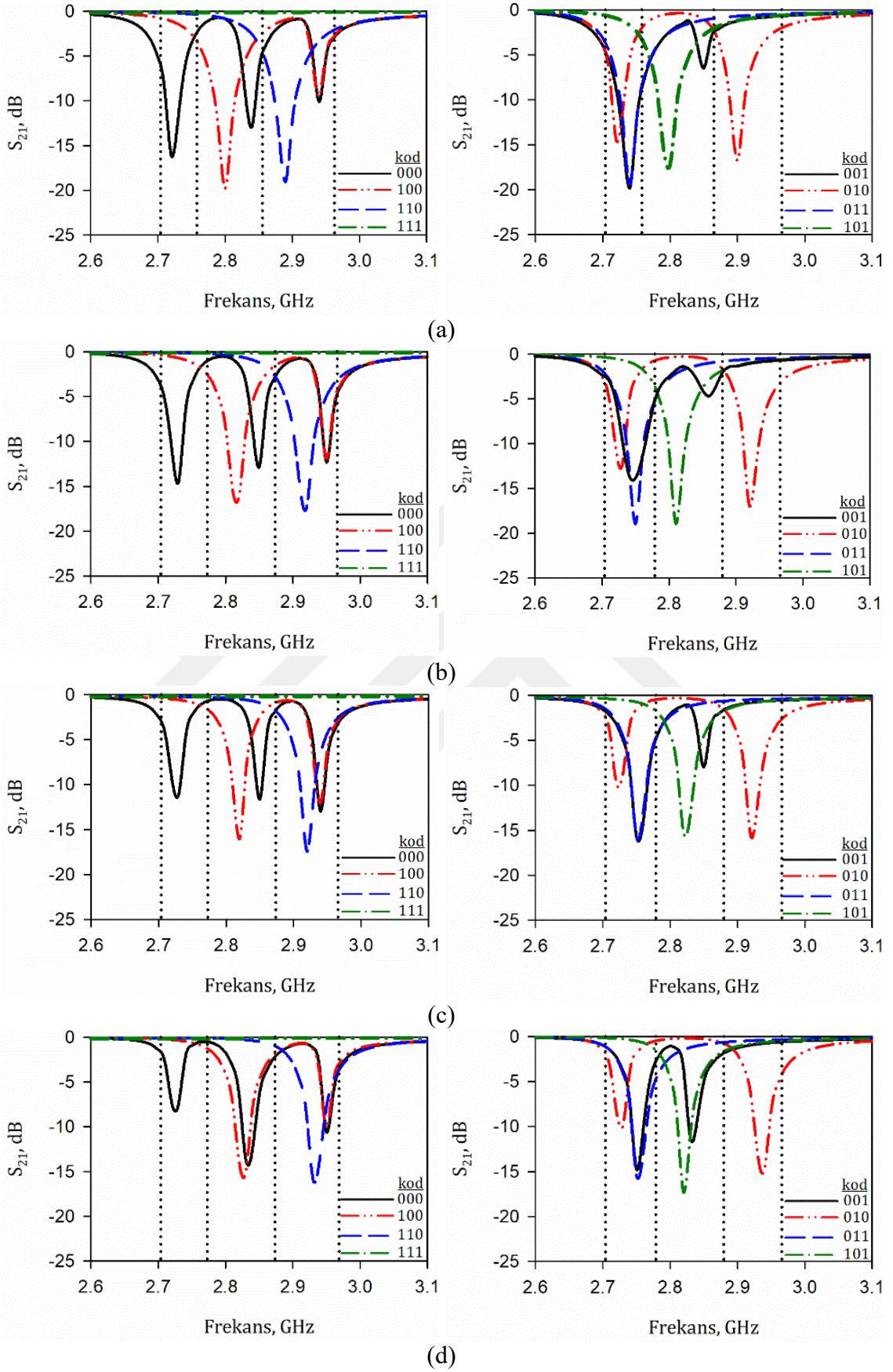
Çipsiz RFID etiketlerde kullanılan rezonatörlerden farklı frekans kodlarının elde edilmesi sırasında bit frekanslarında kaymalar meydana geldiği daha önce belirtilmişti. Bu kaymaları önlemek için de ilgili boyut parametrelerinde yapılacak çok küçük değişiklikler yeterli olmaktadır. Ancak, yapılan incelemeler sonucunda kayma miktarının tasarımda yer alan bazı parametrelere göre değişiklik gösterdiği görülmüştür. Bu yüzden, sekiz frekans kodunun en az kayma olacak şekilde elde edilmesini sağlayan parametrik optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, oluşan frekans kaymalarını gidermek için yapılacak olan küçük değişimlerin de en aza indirilmesi sağlanacaktır. Bu kapsamda ilk olarak, frekans kaymalarını azaltmak amacıyla Şekil 3.39’da gösterilen “g” mesafesinin farklı aralıkları için elde edilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları Şekil 3.40’da gösterilmektedir. Burada, “g” aralığı aynı zamanda d_{22} ve d_{23} saplamaları arasındaki boşluğa da karşılık gelmektedir. Şekil 3.40’da “g” aralığının 0.3, 1.0 ve 1.6 mm olduğu durumlarda elde edilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları gösterilmektedir. Şekil 3.40(a)’dan görüleceği üzere, “g” mesafesinin 0.3 mm olması, yani saplamalar ve saplama kıvrımları arasındaki aralığın birbirlerine oldukça yakın olması, farklı frekans kodlarının elde edilmesi sırasında özellikle ana rezonans frekansında (ikinci bit frekansında) ciddi düzeyde kaymaya sebep olmaktadır. Şekil 3.40(b)’de, “g” aralığının 1 mm olması durumunda elde edilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları incelendiğinde ise farklı kodların elde edilmesi sırasında birinci bitte 40 MHz, ikinci bitte 30 MHz ve üçüncü bitte 80 MHz’lik kaymalar meydana gelmektedir. Şekil 3.40(c)’de gösterilen frekans cevapları ise “g” mesafesinin 1.6 mm. olduğu duruma karşılık gelmektedir ve bu durumda birinci, ikinci ve üçüncü bitlerdeki frekans kaymaları sırasıyla 50, 20 ve 70 MHz olarak elde edilmektedir. Şekillerden görüleceği üzere, “g” aralığının artırılması, bir başka deyişle saplamalar arasındaki kuplaj etkisinin azaltılması sayesinde özellikle ikinci bit, sonrasında ise üçüncü bit frekansında meydana gelen kaymalarda gözler görülür bir azalma sağlanmaktadır. Buradan sonuçla, tasarım sırasında “g” aralığının mümkün mertebe büyük seçilmesi doğru olacaktır, ancak bu durumda özellikle rezonatörün iç kısmında boyutsal anlamda zorluk oluşabileceğinden “g” aralığı optimum boyutta seçilmelidir.



Şekil 3.40. g mesafesinin (a) 0.3 mm, (b) 1.0 mm ve (c) 1.6 mm olması durumunda elde edilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları

3.3.2.2.2. Önerilen Üç Modlu Rezonatörde “ w_c ” Genişliğinin Etkisi

Bit frekanslarında meydana gelen kaymaların azaltılmasına yönelik bir diğer parametrik inceleme, Şekil 3.39’da “ w_c ” ile gösterilen boyut üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu boyut, rezonatörün kuplajlı hat bölmesine ait genişliği temsil etmektedir ve frekans kayması üzerinde etkisi olan bir parametredir. Şekil 3.41’de “ w_c ” genişliğinin 0.3, 0.5, 0.7 ve 1.0 mm olması durumunda elde edilen sekiz frekans kodu gösterilmektedir.



Şekil 3.41. 0.3 (a), 0.5 (b), 0.7 (c) ve 1.0 mm (d) “ w_c ” değerleri için elde edilen için sekiz frekans koduna ait frekans cevapları

Şekil 3.39'da " w_f " ile gösterilen genişlik, rezonatöre kuplajlı olan düz iletim hattı genişliğidir ve 1.6 mm'dir. Şekillerden görüleceği üzere kuplajlı hatlar arasındaki genişlik farkının azalması, bir başka deyişle kuplajlı bölgedeki asimetrinin azalması, ikinci ve üçüncü bitlerde meydana gelen frekans kaymalarını azaltmaktadır. Ancak, " w_c " genişliğinin artması rezonatörün iç kısmında kalan boş alanı daraltacağından bu genişliğin de optimum değerde tutulması gerekmektedir.

Tasarlanan devreye ait simülasyon çalışmaları bağıl dielektrik sabiti 2.33 ve taban kalınlığı 0.79 mm olan Rogers RT5870 taban malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Devreye ait tüm boyutlar teorik modelde elde edilen dalga boylarından yola çıkılarak hesap edilebilir. Özetle, önerilen sekiz frekans kodu üretebilen üç modlu rezonatör modeline ilişkin bir tasarım prosedürü aşağıdaki gibi belirlenebilir.

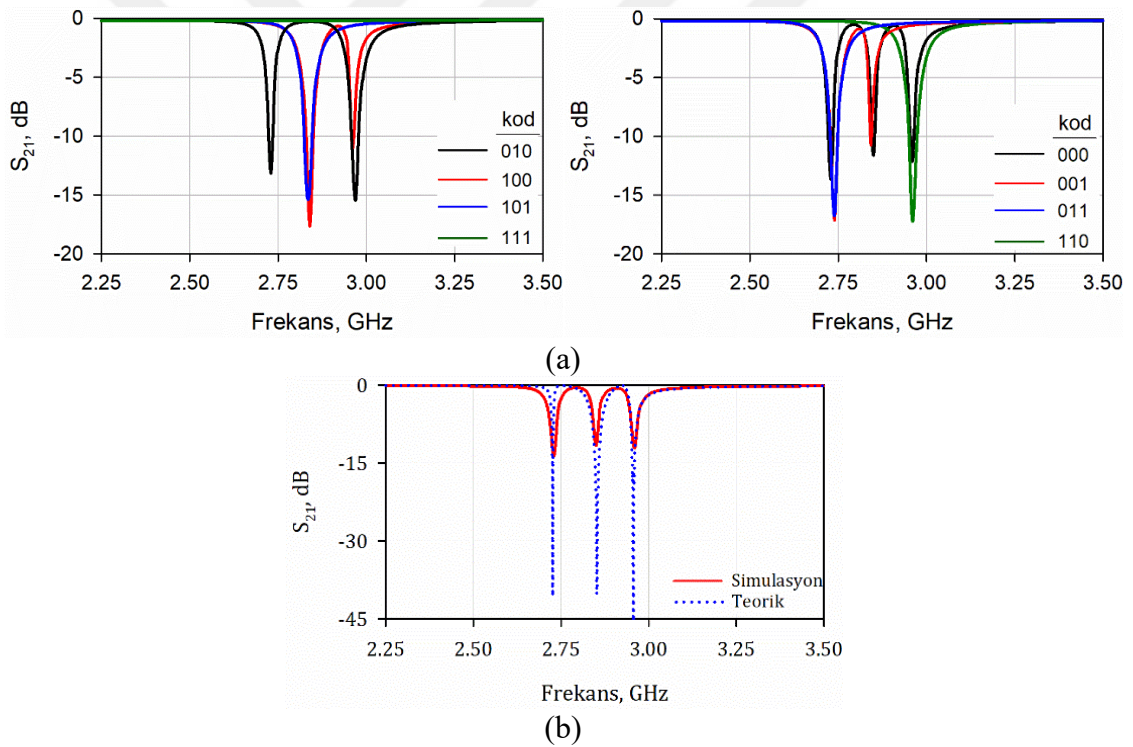
1. Bölüm 3.3.1'de anlatılan teorik model üzerinden gerçekleştirilen teorik analizler sonucunda frekans cevabı normalize frekanslarda elde edilmelidir. Burada, devredeki tüm uzunluklar dalga boyu cinsinden hesaplanmalıdır.

2. Teorik modelden elde edilen normalize frekans cevabındaki rezonans frekanslarından arzu edilen gerçek frekanslara geçiş sağlanmalı ve bu frekans değerlerine bağlı olarak gerçek fiziksel boyutlar teorik olarak elde edilmelidir.

3. Tam-Dalga Elektromanyetik Simülatör'de teorik olarak elde edilen devreye ait fiziksel boyutlar kullanılarak simülasyon işlemi yapılmalıdır. Elde edilen simülasyon sonucundaki rezonans frekanslarının, arzu edilen rezonans frekanslarında tam olarak elde etmek ve farklı kodların elde edilmesi sırasında oluşan frekans kaymalarını en aza indirmek için gerekli parametrik incelemeler gerçekleştirilmelidir.

4. Sekiz frekans kodu için gerekli devre boyutları, bit frekanslarında kayma olmadan elde edilebilecek şekilde simülasyon programında yapılacak optimizasyonlar sonucunda nihai olarak belirlenmelidir. Bu optimizasyonlar, bitlerin "0" veya "1" değerini almasını kontrol eden d_{21} , d_{22} ve d_{23} uzunluğundaki iletim hatlarında yapılacak çok küçük değişimlere karşılık gelmektedir.

Yukarıda verilen tasarım adımları dikkate alınarak 2.73, 2.85 ve 2.96 GHz frekanslarında rezonans frekansına sahip olan önerilen üç modlu rezonatör tasarımı için parametrik büyüklükler dalga boyu cinsinden şu şekilde elde edilmiştir: $d_{21} = 0.175$, $d_{22} = 0.262$, $d_{23} = 0.148$, $d_c = 0.147$, $d_f = 0.297$, ve $p = 0.040 \lambda_m$. Burada, λ_m 2.85 GHz'lik merkez frekansa karşılık gelen dalga boyudur. Buradan, devreye ait parametrelerin fiziksel boyutları ise şu şekilde hesaplanmıştır: $d_{21} = 12.95$, $d_{22} = 19.50$, $d_{23} = 10.95$, $d_c = 10.88$, $d_f = 21.99$, ve $p = 2.95$ mm. Boyutların teorik olarak elde edilmesinden sonra, rezonans frekanslarındaki araya girme kaybı seviyelerinin iyileştirilmesi için Tam Dalga Elektromanyetik Simülasyon programı kullanılarak optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonucunda, Şekil 3.39'da gösterilen devre için elde edilen nihai boyut bilgileri şu şekildedir: $d_{21} = 12.65$, $d_{22} = 19.70$, $d_{23} = 11.80$, $d_c = 11.40$, $d_f = 23.00$, $w_c = 0.70$, $w_s = 0.50$, $w_f = 1.60$ ve $p = 3.00$ mm.



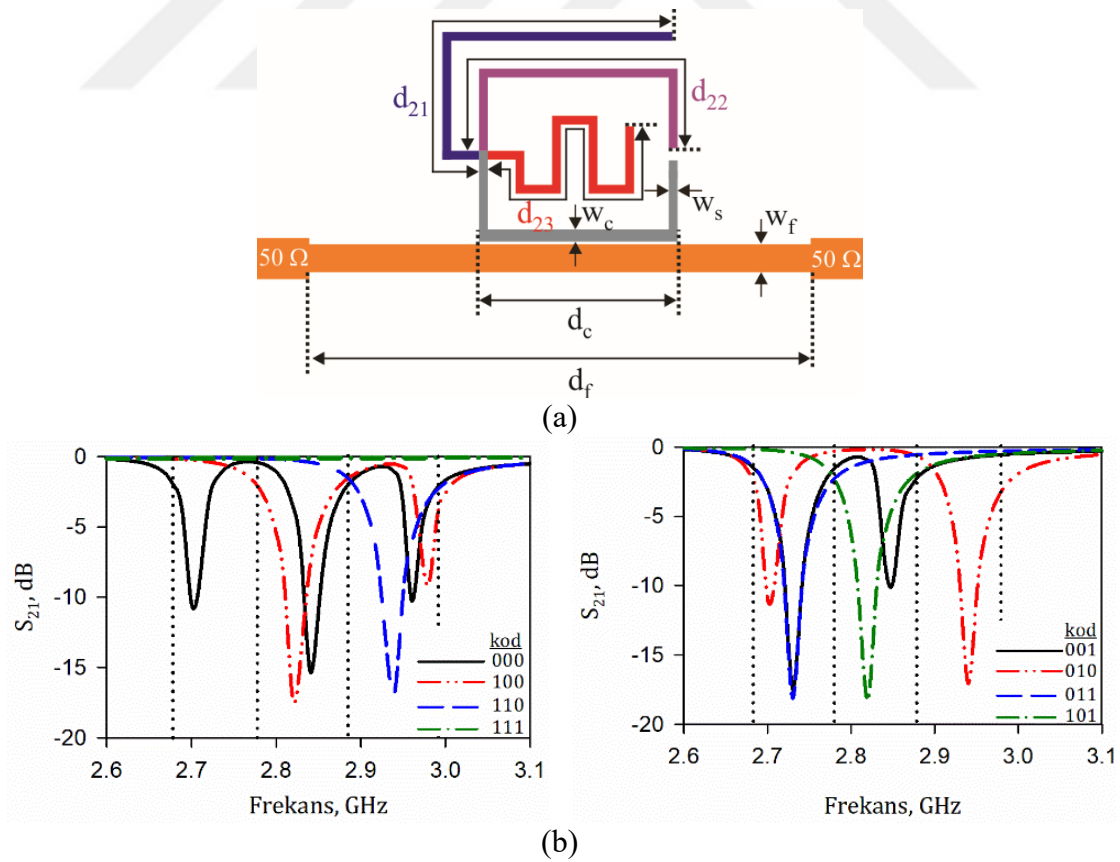
Şekil 3.42. Simülasyon sonuçlarından elde edilen 8 frekans koduna ait frekans cevabı (a) ve üç modlu rezonatöre ait teorik ve simüle edilen frekans cevabı (b)

Simülasyon sonuçlarından elde edilen 8 farklı frekans kodu Şekil 3.42(a)'da gösterilmektedir. Sekiz frekans kodunu üretmeye uygun bit sıralamasına sahip önerilen rezonatörün ürettiği kodların net bir şekilde gözlenebildiği ve okunabilirlik için yeterli araya girme kaybı seviyelerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, önerilen üç modlu

rezonatöre ait teorik ve simülasyon çalışmalarından elde edilen frekans cevapları da Şekil 3.42(b)'de verilmektedir.

3.3.2.2.3. Kıvrımlı ve Yama Elemansız Saplama Geometrisi ve Sekiz Frekans Kodu Üreten Rezonatör Modeli

Tez çalışmaları kapsamında sunulan ve Şekil 3.39'da gösterilen sekiz frekans kodu üretebilen üç modlu rezonatör modelinde, ana rezonans frekansı dışındaki rezonans frekanslarını üreten saplamalar pxp boyutunda bir yama içermektedir. Bu iletim hatları devrenin toplam boyutunda artışa, rezonatörün iç kısmında alan bakımından zorluğa sebep olmasının yanı sıra hat üzerinde süreksizliğe de sebep olmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek amacıyla pxp boyutlu yama yerine, bağlı bulunduğu iletim hattının uzunluğu artırılarak aynı etki sağlanabilir. Bu doğrultuda, revize edilen sekiz frekans kodu üretebilen üç modlu rezonatör modeli ve aynı kodlama tekniği kullanılarak rezonatörden elde edilebilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları Şekil 3.43'te gösterilmektedir.



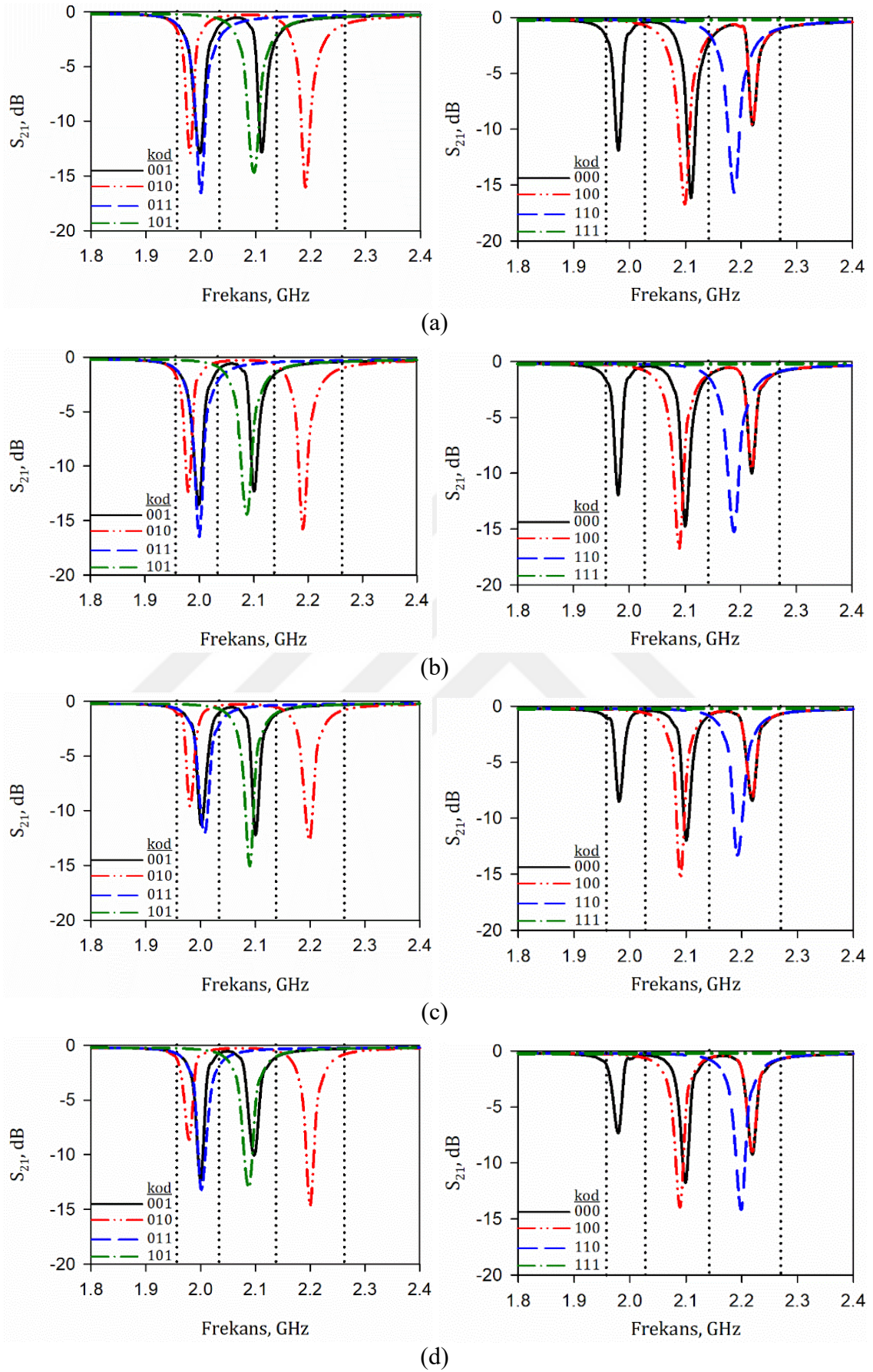
Şekil 3.43. Yama elemansız saplamaların kullanıldığı önerilen üç modlu rezonatör modeli (a) ve rezonatörden elde edilebilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları (b)

Rezonatör devresinde taban malzemesi olarak bağıl dielektrik sabiti 2.33 ve kalınlığı 0.79 mm olan Rogers RT5870 malzemesi kullanılmaktadır. Önceki bölümlerde anlatılan parametrik çalışmalar yapıldıktan sonra Şekil 3.43(a)'da gösterilen üç modlu rezonatör devresinin nihai boyutları; $d_{21} = 21.60$, $d_{22} = 19.65$, $d_{23} = 21.60$, $d_c = 11.40$, $d_f = 28.80$, $w_c = 0.70$ $w_s = 0.50$ ve $w_f = 1.60$ mm olarak elde edilmiştir.

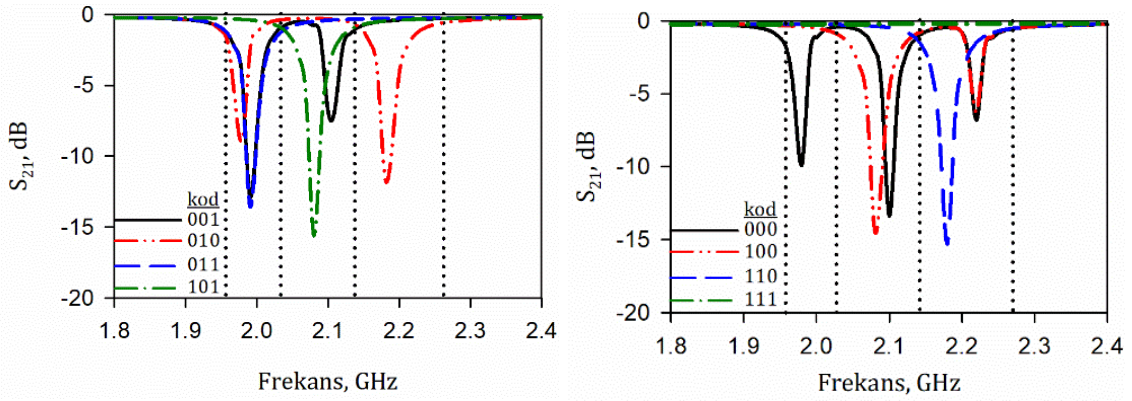
3.3.2.2.4. Önerilen Üç Modlu Rezonatörde “ w_s ” Genişliğinin Etkisi

Boyut ve süreksizlik bakımından iyileştirme sağlayan saplama geometrisine karar verildikten sonra, önerilen rezonatörün arzu edilen frekanslarda rezonans frekanslarına sahip olabilmesi için geriye sadece tasarıma ait boyutlarda yapılacak değişimler yeterli olacaktır. Tez çalışması kapsamında tasarlanması hedeflenen çipsiz RFID etikete ait bitlerin yaklaşık 2-4 GHz frekans aralığında yer alması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, etikette kullanılmak üzere tasarlanan ilk rezonatöre ait üç rezonans frekansının 1.98, 2.11 ve 2.22 GHz'de oluşması için gerekli hesaplama ve optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonucunda, Şekil 3.43.(a)'da yer alan devrenin boyutları; $d_{21} = 29.55$, $d_{22} = 26.55$, $d_{23} = 28.90$, $d_c = 16.15$, $d_f = 28.80$, $w_c = 0.70$ $w_s = 0.50$ ve $w_f = 1.60$ mm'dir.

Saplamaların yüksek empedanslı kıvrımlı bir iletim hattı olarak kullanıldığı rezonatör modelinde de farklı frekans kodlarının elde edilmesi sırasında rezonans frekanslarında kaymalar meydana gelmektedir. Yukarıda bu sorunu en aza indirmek için bazı parametrik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Yine bu amaç doğrultusunda, frekans kayması üzerinde etkili olan yarım dalga boyu açık halka rezonatörün açık kollarının genişliği w_s 'nin farklı değerleri için kayma seviyeleri incelenmiştir. Burada “ w_s ” genişliğinde yapılacak olan değişimin arzu edilen rezonans frekanslarında bir kayma meydana getireceği açıktır. Rezonans frekansları arasındaki aralığın, farklı frekans kodlarının elde edilmesi sırasında meydana gelen kayma üzerindeki etkisini engellemek amacıyla farklı “ w_s ” değerlerine ait incelemeler sırasında rezonans frekanslarının aynı frekanslarda elde edilmesi sağlanmıştır. Bu işlem, devrenin diğer parametrelerinde yapılan küçük değişimler ile gerçekleştirilmiştir. Farklı “ w_s ” genişliği olması durumunda bile rezonans frekanslarının aynı frekanslarda elde edildiği sekiz frekans koduna ait frekans cevapları Şekil 3.50'de verilmektedir.



Şekil 3.44. 0.3 (a), 0.5 (b), 1.2 (c), 1.6 (d) ve 2.0 mm (e) “ w_s ” genişliği için elde edilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları



(e)

Şekil 3.44. (Devam) 0.3 (a), 0.5 (b), 1.2 (c), 1.6 (d) ve 2.0 mm (e) “ w_s ” genişliği için elde edilen sekiz frekans koduna ait frekans cevapları

“ w_s ” genişliğinin 0.3, 0.5, 1.2 mm seçildiği durumlarda elde edilen frekans kodları sırasıyla Şekil 3.44(a), 3.44(b) ve 3.44(c)’de gösterilmektedir. Bu üç “ w_s ” genişliği için sekiz farklı frekans kodunun elde edilmesi sırasında en fazla 30 MHz’lik bir frekans kayması meydana gelmektedir. Şekil 3.44(d)’de ise “ w_s ” genişliğinin 1.6 mm olduğu rezonatör tarafından elde edilen sekiz frekans kodu yer almaktadır. Bu durumda, frekans kaymasının en fazla 20 MHz olduğu gözlenmektedir. Son olarak “ w_s ” genişliğinin 2.0 mm olması durumunda elde edilen sekiz frekans kodu Şekil 3.50(e)’de gösterilmektedir ve üçüncü rezonans frekansında 40 MHz’lik bir kayma olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, Şekil 3.44(e)’deki frekans cevaplarında, ikinci rezonans frekansında meydana gelen kaymanın Şekil 3.50(d)’de gözlenen kaymadan daha fazla olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda, çipsiz RFID etiket üzerinde kullanılarak en düşük frekanstaki bitleri üretecek olan bu rezonatörde “ w_s ” genişliğinin 1.6 mm olarak seçilmesi uygundur.

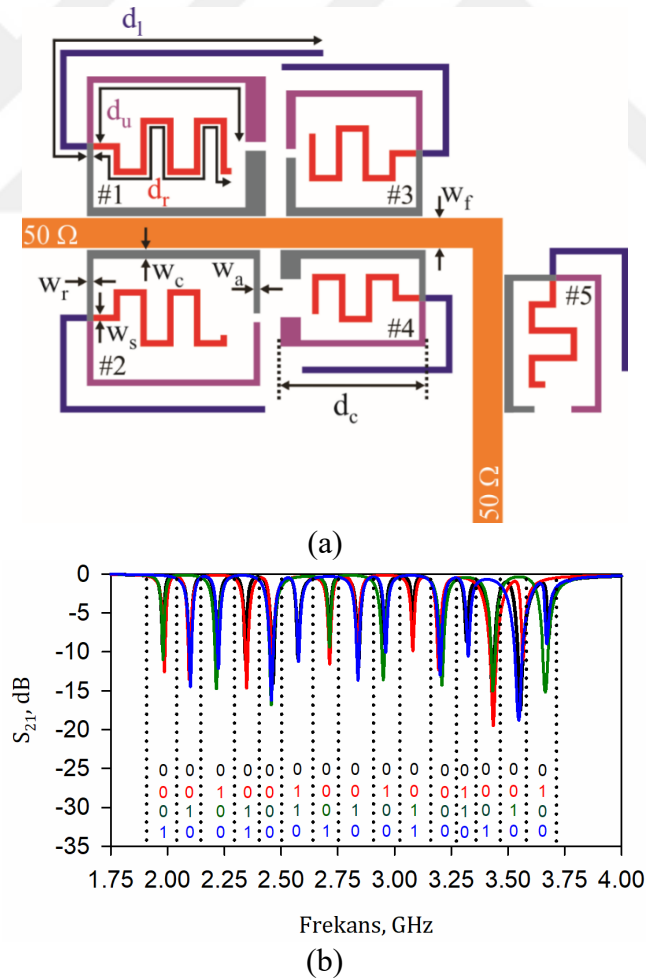
Sonuç olarak, çipsiz RFID etikette kullanılmak üzere tez kapsamında ortaya konulan sekiz frekans kodu üretebilen rezonatör modeline ait tasarım adımları ve detaylı parametrik değişimler incelenmiştir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda önerilen rezonatör modeli sayesinde tek bir rezonatörden sekiz frekans kodunun net bir şekilde elde edilebildiği gösterilmiştir. Böylelikle farklı elektriksel uzunluğa sahip N adet önerilen rezonatör modelinin kullanıldığı bir devre, etiket için 8^N adet frekans kodu sağlayacaktır. Ancak, devredeki rezonatör sayısı artırılırken üst frekans bölgesinde oluşan harmoniğin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

3.3.3.8 Frekans Kodlu Rezonatör Modeli Kullanılarak Çoklu Rezonatör Devresi Tasarımı

Bu bölümde, çipsiz RFID etiket için daha fazla bit ve frekans kodu üretmesi amacıyla yukarıda tanıtılan sekiz frekans kodu üretebilen rezonatör modelinin kullanıldığı çoklu rezonatör devresi tasarımı yer almaktadır. Tasarlanan devrede yer alacak olan her bir rezonatör için bir önceki kısımda anlatılan tasarım adımları ve optimizasyon işlemleri ayrı ayrı gerçekleştirilmelidir. Her bir rezonatör, parametrik incelemeler sonucunda arzu edilen frekanslarda rezonansa sahip ve frekans kaymaları en az seviyede olacak şekilde nihai boyutları tayin edildikten sonra çoklu rezonatör devresine dahil edilmektedir. Bu doğrultuda tasarlanan beş rezonatörlü ve 15 bit kapasiteli çoklu rezonatör devresi Şekil 3.46(a)'da gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere farklı elektriksel uzunlukta beş adet üç modlu rezonatör giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan 90° bükülmüş 50 Ω karakteristik empedansa sahip iletim hattına kuplajlı olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu sayede devrenin etiket haline getirilmesi durumunda boyut açısından avantaj sağlanmış olacaktır. Şekil 3.46(a)'da verilen devreye ait boyut bilgileri Çizelge 3.5'te mm cinsinden verilmektedir. Ayrıca, 90° kıvrımlı iletim hattına ait yatay uzunluk 37.75 mm iken dikey uzunluk 24 mm'dir. Dikey hat uzunluğunun 24 mm seçilmesinin sebebi, bir sonraki bölümde anlatılan ve etiket tasarımında kullanılacak olan geniş bant monopol antenin besleme hattı uzunluğunun 24 mm olmasıdır. Hem anten hem de rezonatör devresi için kullanılan bu iletim hattının genişliği w_f , karakteristik empedans değerinin 50 Ω olması için 2.35 mm olarak seçilmiştir. Çünkü etiket tasarımında, yatay ve dikey polarizasyonda kullanılacak olan antenlerin besleme hatları çoklu rezonatör devresindeki giriş ve çıkış kapılarını birbirine bağlayan iletim hattı içine gömülü olacak şekilde kullanılmaktadır. Bu sayede etiketin toplam boyutunda kompaktlık sağlanmaktadır.

Tasarlanan çoklu rezonatör devresindeki üç modlu rezonatörlerin her biri, etiket için üç bit üretmektedir ve bu bitler frekans sahasında ardışık olarak yer almaktadır. Üç bit içerisinden ortada yer alanı ana rezonans frekansıdır ve bir kolu kuplajlı olan açık halka rezonatör tarafından sağlanmaktadır. Bu bitin "0" ve "1" değerini alması Şekil 3.46(a)'da d_u ile gösterilen açık halka rezonatöre ait üst kolun rezonatöre olan bağlantısına bağlıdır. Yani, bağlantının olması rezonansın varlığını sağlayacağından biti "0" yapacaktır. Diğer yandan, bağlantının koparılması ise rezonansı ortadan kaldıracığından bit "1" olacaktır. Her bir rezonatöre ait birinci ve üçüncü bitler sırasıyla, yine Şekil 3.46(a)'da d_d ve d_i

uzunluğundaki saplamalar tarafından üretilmektedir. Yine bu bitler de, ilgili saplamaların rezonatöre bağlı olması durumunda “0” olurken rezonatörden çıkartılması durumunda “1” olmaktadır. Bu kodlama yöntemi kullanılarak çoklu rezonatör devresinden elde edilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları Şekil 3.46(b)’de verilmektedir. Şekildeki frekans cevaplarına bakıldığında tüm rezonatörlerin “000”, “001”, “010” ve “100” kodlarına sahip olduğu durumlar yer almaktadır. Tüm rezonatörlerin “000” frekans kodunu üretmesi için beş rezonatörde de d_d , d_u ve d_i ile belirtilen saplamaların bağlı bulunması gerekmektedir. Bir başka deyişle, tüm rezonatörlerin önerilen üç modlu rezonatör formunda olması gerekmektedir. Devredeki tüm rezonatörlerin “001” ve “100” frekans kodunu ürettiği frekans cevabı ise rezonatörlerden sırasıyla d_i ve d_d ile belirtilen saplamaların bağlantılarının kopartılmasıyla elde edilmektedir. Son olarak, rezonatörlerden sadece d_u ile belirtilen saplamaların kopartılması suretiyle her rezonatörün “010” frekans kodunu üretmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.45. 8 frekans kodu üreten rezonatör modeli kullanılan çoklu rezonatör devresi tasarımı (a) ve çoklu rezonatör devresinden elde edilebilen bazı frekans kodlarına ait frekans cevapları (b)

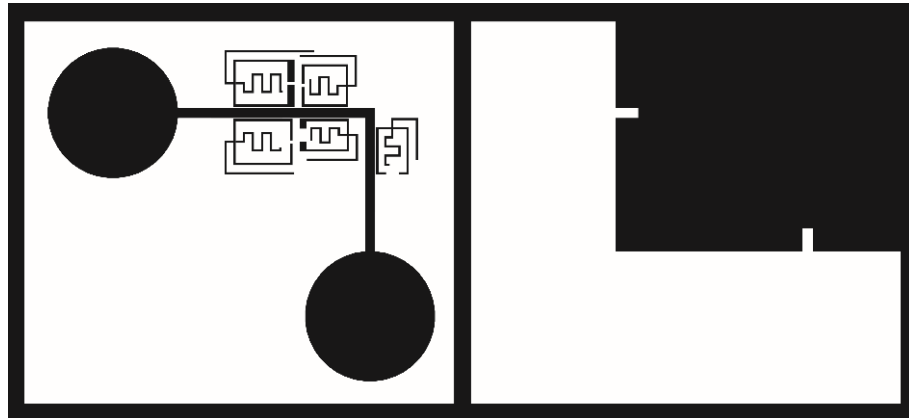
Çizelge 3.5. Beş rezonatörlü çoklu rezonatör devresine ait boyut bilgileri (mm)

Rez.	d_i	d_d	d_u	d_c	w_c	w_r	w_s	w_a
1	28.80	29.60	23.45	14.05	0.7	0.5	0.5	1.60
2	24.90	24.90	22.70	13.60	0.7	0.5	0.5	0.50
3	19.30	21.55	19.00	10.70	0.7	0.5	0.5	0.75
4	19.30	19.05	16.25	11.40	0.7	0.5	0.5	1.60
5	17.45	16.95	15.75	10.85	0.7	0.5	0.5	0.50

Sonuç olarak, tasarlanan beş adet rezonatör içeren etiket 15 adet bit ve 8^5 adet frekans kodu üretme kapasitesine ulaşacaktır. Yani, tasarlanan devre sayesinde 32768 adet farklı ürünün takibi mümkün olmaktadır. Ayrıca, kullanılan rezonatör sayısının artırılması suretiyle, örneğin N adet rezonatör olması durumunda 8^N adet ürünün takip işlemi gerçekleştirilebilecektir.

3.3.4. Çipsiz RFID Etiket Tasarımı ve Deneysel Çalışmalar

Çipsiz RFID etiket tasarımında kullanılmak üzere sekiz frekans kodu üretebilen önerilen rezonatör modelinin kullanıldığı 15 bit kapasiteli devre Şekil. 3.45(a)'da gösterilmiştir. Önerilen devrenin giriş ve çıkış kaplarına, Şekil 3.2(b)'de yer alan frekans cevabına sahip geniş bant monopol antenin yerleştirilmesi ile çipsiz RFID etiket tasarımı tamamlanmaktadır. Gerçekleştirilen 15 bit ve 8^5 frekans kodu kapasiteli çipsiz RFID etikete ait üst ve alt görünüm Şekil 3.46'da gösterilmektedir.

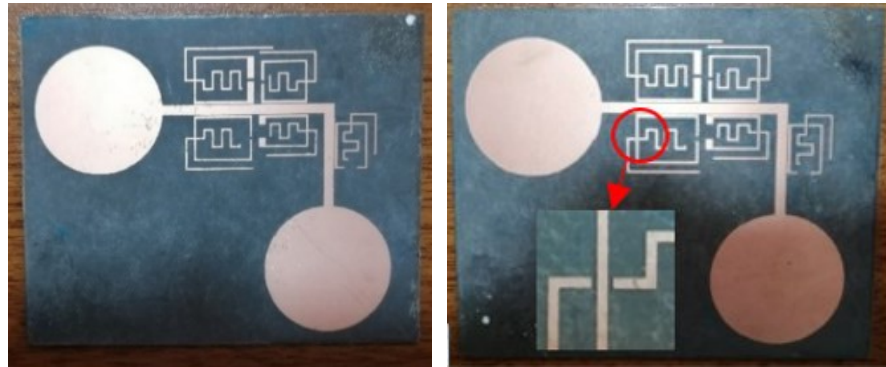


Şekil 3.46. Tasarlanan çipsiz RFID etiket devresinin üst ve alt görünümü

Bu bölümde son olarak, tasarlanan çipsiz RFID etiketlerin test edilmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar yer almaktadır. Bu kapsamda, ilk olarak önerilen çipsiz RFID etiketin farklı frekans kodlarındaki performansını test etmek amacıyla iki farklı kod için etiket üretimi gerçekleştirilmiştir. Etiketlerin üretiminde, bağıl dielektrik sabiti 2.33, dielektrik kalınlığı 0.79 mm ve esnek bir malzeme olan Rogers RT5870 taban malzemesi kullanılmıştır. Etiketlerin test işlemleri, Fotoğraf 3.3(a)'da gösterilen ve laboratuvar şartlarında oluşturulan bir yarı yansız oda içerisinde gerçekleştirilmiştir. Test işleminin okuyucu kısmı, Keysight PNA N5222A Vektör Ağ Analizör ve Analizör portlarına bağlı bulunan RF Spin-DRH20E huni antenlerden oluşmaktadır. Test sırasında, huni antenlerden ve etiket üzerinde yer alan monopol antenlerden aynı polarizasyona sahip olanlar karşılıklı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yani, etiket üzerinde yatay polarizasyonda bulunan monopol antenin karşısına yatay polarizasyona sahip huni anten yerleştirilirken, dikey polarizasyona sahip monopol antenin karşısına da dikey polarizasyonlu huni anten yerleştirilmektedir. Ayrıca test için üretilen iki etikete ait fotoğraflar Fotoğraf 3.3(b)'de gösterilmektedir.



(a)



(b)

Fotoğraf 3.3. Test ortamı (a) ve imal edilen çipsiz RFID etiketler (b)

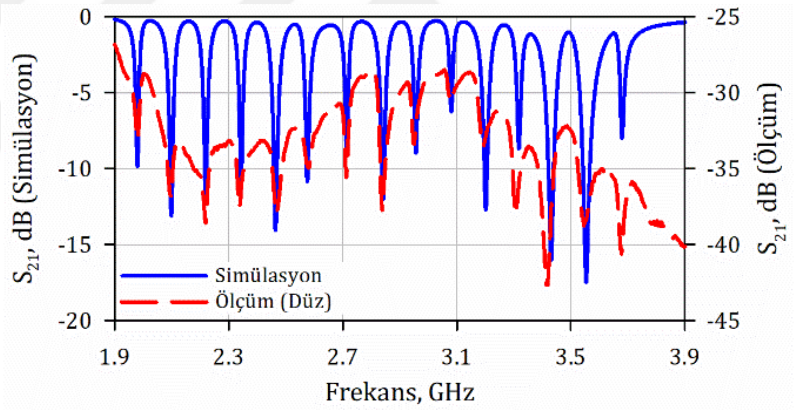
Etiketlerden birinde, etiket üzerindeki tüm rezonatörlerde iki saplama da bağlı bulunmaktadır. Böylece, her bir rezonatör “000” frekans kodunu üretmekte ve etiket “0000000000000000” koduna sahip olmaktadır. Diğer etiketin frekans kodu ise “010101010101010”dir. Bu kodun elde edilebilmesi için ise “1” değerine sahip bitleri kontrol eden saplamların rezonatörlere olan bağlantısı kopartılmıştır. Bağlantının koparıldığı bölgeye ait yakınlaştırılmış devre görüntüsü Fotoğraf 3.3(b)’de verilmiştir. Etiketle bulunan çoklu rezonatör devresi Şekil 3.45(a)’da verilen rezonatör devresi ile aynıdır ve boyut bilgileri Çizelge 3.5’te verilmiştir. Üretilen etiketlerin antenler dahil toplam boyutu $87.70 \times 67.85 \text{ mm}^2$ iken antenlerin olmadığı durumda toplam boyutu $47.60 \times 28.55 \text{ mm}^2$ ’dir. En düşük bit frekansı dikkate alınarak hesaplanan dalga boyu cinsinden devre boyutu ise sırasıyla antenli ve antensiz durum için 0.82×0.63 ve $0.44 \times 0.27 \lambda_g^2$ ’dir. 15 bit kapasiteli önerilen etiketin antensiz durumda bit yoğunluğu ise mm olarak 0.011 bit/mm^2 iken dalga boyu (λ_g) bakımından $126.26 \text{ bit}/\lambda_g^2$ ’dir.

Etiketin ölçüm işlemleri, araya girme kaybı ($|S_{21}|$) parametresi üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu işlem için ilk olarak, okuyucu tarafındaki verici antenden gönderilen sinyal, etiketin alıcı anteni tarafından alınarak çoklu rezonatör devresine iletilir. Çoklu rezonatör devresi kodlanmış olan bu sinyali etiket üzerindeki verici antene iletir. Son olarak, kodlanmış sinyal etiket üzerindeki verici antenden okuyucu tarafındaki alıcı antene iletilir. Bu sinyal, S_{21} parametresini temsil etmektedir ve etikete ait frekans kodu kimliğini taşımaktadır.

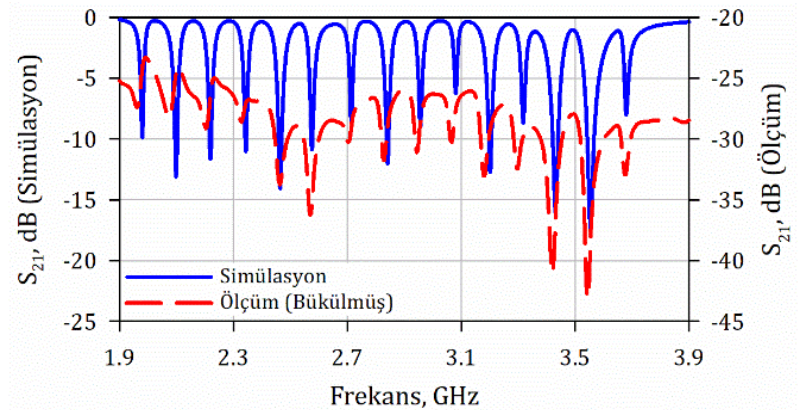
Ölçüm sırasında, etiket ve huni antenler arasındaki mesafe yaklaşık 10 cm olarak ayarlanmıştır. Bunun sebebi, etikette yer alan alıcı ve verici olarak kullanılan geniş bant monopollü antenin uzak alan mesafesinin 3 GHz için yaklaşık olarak 9 cm’nin biraz üzerinde olmasıdır. 2 farklı kod için üretilen etiketlere ait elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 3.47’de gösterilmektedir. “0000000000000000” frekans kodlu etikete ait sonuçlar Şekil 3.47(a)’da yer alırken “010101010101010” frekans kodlu etiketin sonuçları Şekil 3.47(b)’de yer almaktadır. Şekillerde yer alan simülasyon sonuçları Şekil 3.47(a)’da yer alan çoklu rezonatör devresinden elde edilen frekans kodlarına aittir. Bu yüzden, anten ve çevresel etkileri içermeyen simülasyon cevaplarında S_{21} seviyesi rezonansın olmadığı frekanslarda 0 dB seviyelerinde iken bu etkileri içeren ölçüm sonuçlarında S_{21} seviyesi çok daha düşük seviyelerdedir. Ancak, kodlama işleminde önemli olan rezonans frekanslarında meydana gelen çökme seviyesidir. İki

bir şekilde tayin edilmesini sağlayacak seviyededir. Bu çökme seviyeleri, Şekil 3.47(a) ve 3.47(b)'de gösterilen ölçüm sonuçlarında sırasıyla en az 1.7 dB ve 3.3 dB'dir. Meydana gelen çok küçük miktardaki frekans kaymalarının ise büyük ölçüde üretim sırasında meydana gelen hatalardan kaynaklı olduğu söylenebilir. Elde edilen deneysel sonuçlar, tasarlanan etiketlerin çipsiz RFID etiket teknolojisinde kullanılacak performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Üretilen etiketler, farklı mesafelerden ve etiketin arka tarafının okuyucu antenlere bakacak şekilde konumlandırılması ile de test edilmiştir. Tüm bitlerin "0" değerine sahip olduğu etiket üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmalar için elde edilen frekans cevapları Şekil 3.47(c)'de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlardan etikete ait frekans kodunun yaklaşık 20 cm'ye kadar okunabilir olduğu görülmektedir. Ayrıca, yine etiketin arkası döndürülmüş olsa bile frekans kodunun tespit edilebildiği açıkça görülmektedir.



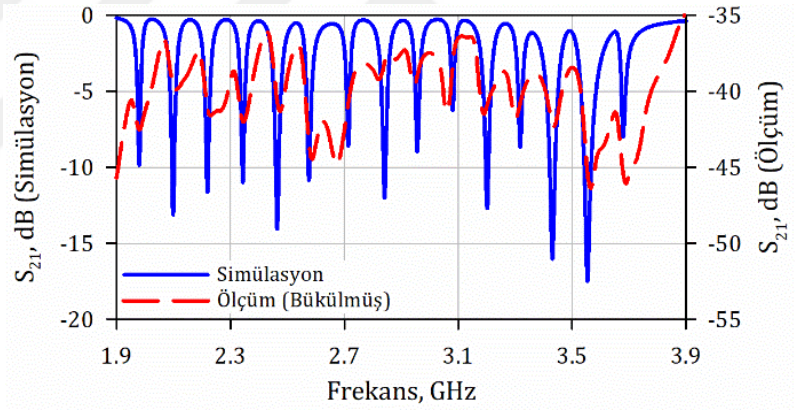
(a)



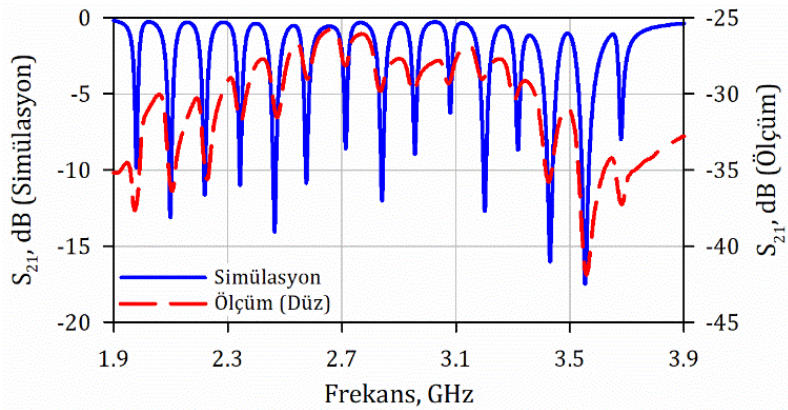
(b)

Şekil 3.48. Düz pozisyon için (a) ve bükülmüş pozisyon için (b) plastik yüzey üzerine yerleştirilmiş etiketin farklı pozisyonlardaki ölçüm düzeneği ve elde edilen ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması

Tez çalışmaları kapsamında, üretilen ve tüm bitlerin “0” olduğu etiketin farklı özellikte malzemeler üzerinde gerçekleştirilen test işlemlerine de yer verilmektedir. Bu sayede, önerilen etiketin kullanılan bu farklı tipteki malzemeler üzerinde kullanıma uygun olup olmadığı görülmektedir. Ayrıca, etiketin farklı tip malzemeler üzerinde test edilmesinin yanı sıra, etiketin esnek bir taban malzeme üzerine tasarlanmış olması sayesinde ürünün eğriliğine bağlı olarak hafif bükülmüş durumdaki performansı da ölçülmüştür. Bu doğrultuda, ilk olarak plastik bir çöp kovasının hem düz hem de oval tarafında etiketin düz ve bükülmüş pozisyonda olduğu deney düzeneği hazırlanarak iki durum için de etiket performansı test edilmiştir. Şekil 3.48(a) ve 3.48(b)’de sırasıyla düz ve bükülmüş pozisyon için ölçüm düzeneği fotoğrafları ile birlikte elde edilen ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığı frekans cevapları gösterilmektedir. Elde edilen ölçüm sonuçları incelendiğinde, iki durum için de tüm bit frekanslarındaki rezonansların net bir şekilde gözlemlendiği ve frekans kodunun tespit edilebilir olduğu görülmektedir.



(a)

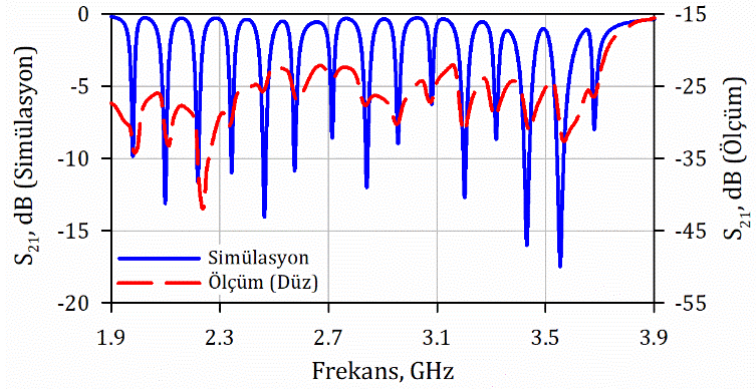


(b)

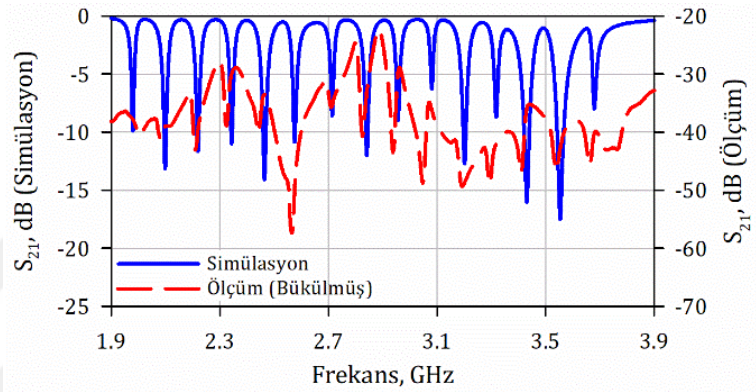
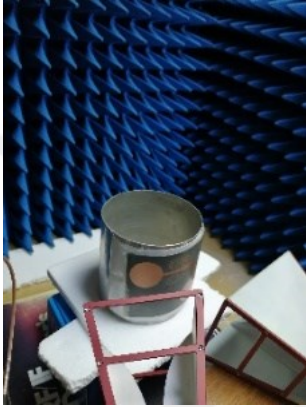
Şekil 3.49. Bükülmüş pozisyonda plastik su şişesi için (a) ve düz pozisyonda tahta malzeme için (b) kurulan ölçüm düzeneği ve elde edilen ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Sert bir plastik malzeme üzerinde yapılan çalışmalar sonrasında daha esnek özelliğe sahip içi dolu plastik su şişesi üzerine bükülmüş şekilde yerleştirilen etiket için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.49(a)'da bu duruma ait ölçüm düzeneği ve elde edilen ölçüm sonucunun simülasyon sonucu ile karşılaştırılması verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, etikete ait frekans kodu elde edilen ölçüm sonucundan açık bir şekilde tespit edilmektedir. Tüm rezonans frekansları, simülasyon cevabındaki rezonans frekansları ile neredeyse bire bir örtüşmektedir. Şekil 3.49(b)'de ise düz bir tahta malzeme üzerinde yer alan etikete ait ölçüm düzeneği fotoğrafı ve elde edilen ölçüm sonucuna yer verilmektedir. Frekans cevabından görüleceği üzere tüm rezonans frekansları açık bir şekilde gözlenebilen etiketin bu özellikte ürünler üzerinde de kullanılabilir olduğu söylenebilir.

Son olarak, etiketin metal ürünler üzerindeki performansını test etmek için ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.50(a) ve 3.50(b)'de sırasıyla düz ve oval yüzeye sahip metal malzemeler için kurulan ölçüm düzeneği ile elde edilen ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması yer almaktadır. Etiket metal malzemeler üzerinde test işlemi sırasında ürüne yerleştirilmesi bakımından diğer malzemelerden farklı olarak dikkat edilmesi gereken bir husus vardır. Bu husus, etiketin metal malzeme üzerine yerleştirilmesi işleminde arada bir dielektrik özelliğe sahip katman bulunması gerektiğidir. Bunun sebebi, etikete ait toprak düzleminin etiket üzerinde alıcı ve verici olarak kullanılan geniş bant monopol antenlerin performansına doğrudan etkide bulunmasıdır. Toprak düzleminin doğrudan metal bir yüzeye temas etmesi, bu monopol antenlerin ışıma performanslarında değişikliğe sebep olmaktadır. Bu sebeple, Şekil 3.50(a)'da verilen ölçüm düzeneği fotoğrafından da görüleceği üzere etiket ile metal malzeme arasında strafor köpük bulunmaktadır. Böylece, metal yüzeyin monopol antenlerin performansını etkilemesinin önüne geçilmiştir. Metal yüzey için uygun etiket yerleşimi sağlandıktan sonra test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.50(a)'da yer alan ölçüm sonucundan görüleceği üzere etikete ait frekans kodu net olarak tayin edilebilecek şekilde elde edilmiştir. Şekil 3.50(b)'de ise etiketin oval bir metal malzeme üzerine arada kağıt olacak şekilde yerleştirildiği duruma ait ölçüm düzeneği ve bu durumda elde edilen ölçüm sonucuna ait frekans cevabı yer almaktadır. Burada da, bit frekanslarında meydana gelen rezonanslardaki çökme seviyelerinin frekans kodunun okunabilmesi için yeterli olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.50. Düz pozisyonda (a) ve bükülmüş pozisyonda (b) Metalik yüzey üzerine yerleştirilmiş etiketin farklı pozisyonlardaki ölçüm düzeneği ve elde edilen ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması

Sonuç olarak tez kapsamında önerilen etiketin sert plastik, plastik su şişesi, tahta ve metal yüzeyler üzerinde gerçekleştirilen test işlemleri başarıyla tamamlanmıştır. Ayrıca, bu ölçümlerin bazılarında etiketin eğrisel ürün yüzeylerinde de kullanıma uygun olduğu ortaya konulmuştur. Yapılan bu çalışmalar sonucunda, esnek bir taban malzeme üzerine tasarlanan ve 8 frekans kodu üretebilen önerilen rezonatör modelinin kullanıldığı etiketlerin oldukça yüksek frekans kodu çeşitliliğine sahip olmasının yanı sıra çok geniş bir ürün yelpazesinde de kullanıma uygun olduğu açıkça görülmektedir.

BÖLÜM V

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında RFID ürün tanılama ve takip sistemlerinde kullanılmak üzere üç adet çipsiz RFID etiket tasarımı ortaya konulmuştur. Tez kapsamında, bu etiketlerde yer alan yüksek kod kapasitesi ve kolay kodlama işlemi sağlayan çok modlu rezonatör yapıları önerilmiştir. Önerilen 3 tip rezonatör modeli çipsiz RFID etiket için sırasıyla 3, 5 ve 8 frekans kodu üretebilmektedir.

3 frekans kodunun elde edilmesi için küçük bir yama elemanı kullanılarak açık halka rezonatörden çift modlu halka rezonatöre geçiş sağlayan yöntem önerilmiştir. Bu yöntem sayesinde 2 bit kapasiteli bir rezonatörden 3 frekans kodunun oldukça kolay bir şekilde elde edilebildiği gösterilmiştir. Önerilen rezonatör modelinin kullanıldığı farklı frekans koduna sahip iki adet etiket üretilerek test işlemleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında önerilen diğer rezonatör modelinde ise açık halka rezonatörün orta noktasına farklı elektriksel uzunluğa sahip saplamaların bağlanması ile üç modlu rezonatör modeli tasarlanmıştır. Etiket için 3 bit sağlayan bu rezonatörden sapsamaların ve rezonatörün devredeki mevcudiyetine bağlı olarak 5 frekans kodunun elde edilmesi sağlanmıştır. Önerilen rezonatör, çipsiz RFID etiket literatüründe ilk defa 3 bit frekansı kullanarak 5 frekans kodu sağlanması bakımından büyük öneme sahiptir.

5 frekans kodlu rezonatör modeline benzer kodlama tekniğinin kullanıldığı başka bir üç modlu rezonatör modeli önerilmiş ve 8 frekans kodunun elde edilmesine imkan veren bir kuplaj mekanizması geliştirilmiştir. Böylece, 3 modlu bir rezonatörden elde edilebilecek maksimum kod sayısına ulaşılmıştır. Önerilen rezonatör, kompakt boyutta çok daha yüksek kod kapasiteli etiket tasarımlarına imkan vermektedir. Bu doğrultuda, önerilen rezonatör modelinin kullanıldığı çipsiz RFID etiket tasarımının kod çeşitliliği bakımından literatüre oldukça önemli bir katkıda bulunmaktadır.

Önerilen rezonatör modellerinin teorik analiz çalışmalarında, çift-tek mod empedans analizi, devrenin giriş empedansının hesaplanması işlemi ve asimetrik kuplajlı hat tekniği

kullanılmıştır. Önerilen rezonatör devrelerine ilişkin frekans cevaplarının yanı sıra kodlama tekniği ve elde edilebilen frekans kodları da teorik olarak elde edilen frekans cevapları ile gösterilmiştir. Teorik çalışmalarda dalga boyu cinsinden kullanılan boyutların gerçek boyutlara dönüştürülmesi ile simülasyon çalışmalarına geçiş yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında devre boyutu, frekans kaymasının azaltılması, rezonanslar arası çökme seviyelerinin iyileştirilmesine yönelik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin devamında yüksek kod kapasiteli etiketler tasarlamak için çoklu rezonatör devre tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu devrelerin giriş ve çıkış kaplarına literatürde yer alan ancak boyutları optimize edilen geniş bant monopol antenler yatay ve dikey polarizasyona sahip olacak şekilde eklenerek çipsiz RFID etiket tasarımları tamamlanmıştır. Tasarlanan etiketlerden farklı frekans kodlarına sahip etiketler imal edilmiştir. Okuyucu kısmında alıcı/verici anten olarak Vektör Ağ Analizörüne bağlanan yüksek kazançlı huni antenler kullanılmıştır. Etiketlere ait kodlar, farklı mesafelerden başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Ayrıca, etiketler farklı tip (cam, plastik, metal ve tahta) malzemeler üzerine düz ve eğrisel şekilde yerleştirilerek test edilmiş ve frekans kodlarının başarılı bir şekilde tespit edildiği gösterilmiştir.

Sonuç olarak, tez kapsamında önerilen çok modlu rezonatör modelleri kullanılarak tasarlanan kolay kodlanabilir ve yüksek kod kapasitesine sahip çipsiz RFID etiketler literatüre kazandırılmıştır. Önerilen rezonatörlerden çift modlu rezonatör oldukça kolay bir kodlama işlemi sağlaması bakımından literatürde önemli bir yere sahiptir. Ayrıca, beş ve sekiz kodlu rezonatörler de literatürde ilk defa bir rezonatör tarafından bu kadar sayıda kod üretilebilmesine imkan vermeleri bakımından çipsiz RFID literatürüne önemli bir katkı sağlamaktadırlar.

İlerleyen süreçte, tez çalışmasında ortaya konulan 5 ve 8 frekans kodlu rezonatör modellerinin kullanıldığı çipsiz RFID etiketlerde meydana gelen frekans kaymalarının en aza indirilmesine yönelik çalışmaların yapılması planlanmaktadır. Böylece, farklı frekans koduna sahip etiketlerin en az parametre değişimi ile üretilmesi mümkün olacaktır. Bu da, etiket üretim hızına önemli bir katkı sağlayacaktır. Gelecekteki çalışmalar içerisinde saplama tiplerinin geliştirilmesi ile değişken parametre sayısının daha az olduğu çoklu rezonatör devrelerinin tasarlanması da yer almaktadır. Değişken parametre sayısının azaltılması farklı frekans kodlarının elde edilmesi işlemleri sırasında önemli ölçüde kolaylık sağlayacaktır. Etiket üzerinde yer alan rezonatör devresi üzerinde düşünülen

çalışmaların yanı sıra yine etiket üzerinde alıcı/verici görevi yapan antenler üzerinde de geliştirmeler yapılması düşünülmektedir. Bu kapsamda, özellikle daha yüksek kazançlı geniş bant monopollü anten tasarım çalışmalarının ele alınması planlanmaktadır. Böylece, etiketlerin okuyucu antenler ile daha verimli bir sinyal iletişimi sağlanarak kodların daha kolay ve net bir şekilde tespit edilebilirliği artırılabilecektir. Ayrıca, tez çalışmasında etiketlerin test işlemleri sırasında okuyucu kısmı Vektör Ağ Analizörü ve analizörün portlarına bağlanan yüksek kazançlı huni antenlerden oluşmaktaydı. Bu okuyucu sistem, etiketlerin kullanılmasının düşünüldüğü endüstriyel ortam için oldukça yüksek maliyete sahiptir. Bu yüzden, tez sonrasında etiketlerin endüstrideki kullanımını artırmak için daha düşük maliyetli bir okuyucu sistem tasarımına yönelik çalışmalar yapılması planlanmaktadır. Bu sistem, dijital ve RF olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Dijital kısımda, sorgulama sinyalinin oluşturulması ve etiketten geri gönderilen kodlanmış sinyalin işlenebilmesi için mikroişlemci, dijital-analog dönüştürücü ve analog-dijital dönüştürücü kullanılacaktır. RF kısımda ise, dijital kısımda oluşturulan analog sinyalin voltaj kontrollü osilatör kullanılarak bir RF sinyale dönüştürülmesinin ardından sinyal gücünün artırılması için güç yükselteci kullanılacaktır. Yine RF kısımda, etiketten okuyucu tarafa gönderilen sinyal bir düşük gürültülü yükselteç (Low Noise Amplifier-LNA) yardımıyla yükseltilecektir. Bu kodlanmış sinyal ile osilatör çıkışındaki sinyal arasındaki fark bir genlik/faz dedektörü yardımıyla tespit edilebilir. Dedektör çıkışındaki sinyal, bir analog-dijital dönüştürücü (Digital-Analog Converter, DAC) tarafından dijital kısımda işlenmek üzere dijital veri haline dönüştürülecektir. Bu verilerin kodlama işlemi bir mikroişlemci yardımıyla gerçekleştirilerek kodlanmış veriler bilgisayar ortamında depolanabilecektir. Sonuç olarak, planlanan okuyucu sistem tez çalışmasındaki vektör ağ analizörün kullanıldığı okuyucu sisteme kıyasla ürün takip ve tanımlama işlemleri için endüstriyel alanda hem maliyet hem de boyut anlamında çok daha fazla avantaj sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Abdulkawi, W. M. and Sheta, A. -F. A., "Printable Chipless RFID Tags for IoT Applications," *2018 1st International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, Riyadh, Saudi Arabia, s. 1-4, 4-6 April, 2018.

Abdulkawi, W. M. and Sheta, A. -F. A., "K-State Resonators for High-Coding-Capacity Chipless RFID Applications", *IEEE Access*, 7, 185868-185878, 2019a.

Abdulkawi, W. M., Sheta, A. -F. A., "Four-State Coupled-Line Resonator for Chipless RFID Tags Application", *Electronics*, 8 (5), 581, 2019b.

Anam, H., Habib, A., Jafri, S.I., Amin, Y. and Tenhunen, H., "Directly Printable Frequency Signed Chipless RFID Tag for IoT Applications", *Radioengineering*, 26 (1), 139-146, 2017.

Ashraf, M. A., Haraz, O. M., AlShareef, M. R., Behairy, H. M. and Alshebeili, S., "Design of a Chipless UWB RFID Tag Using CPW Circular Monopole Antennas and Multi-Resonators", *IEEE International Conf. on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, Montreal, QC, Canada, s. 1-4, 4-7 October, 2015.

Athauda, T., and Karmakar, N. C., "The realization of chipless RFID resonator for multiple physical parameter sensing", *IEEE Internet Things J.*, 6 (3), 5387–5396, 2019.

Awadhwal, G. and Rengarajan, S. R., "CPW Fed Slotted Patch Antenna for UWB Applications", *USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, Atlanta, GA, USA, s. 39-40, 7-12 July, 2019.

Awan, A. A., Salimi, M. N., Riaz, M. A., Shahid, H., Asghar, M. A. and Amin, Y., "An RFID Enabled Miniaturized Chipless Tag for IoT Applications", *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC)*, Bahawalpur, Pakistan, s. 1-5, 5-7 November, 2020.

Balbin, I. and Karmakar, N. C., “Phase-encoded chipless RFID transponder for large-scale low-cost applications”, *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 19 (8), 509–511, 2009.

Behera, S. K., “Chipless RFID Sensors for Wearable Applications: A Review”, *IEEE Sensors Journal*, 22 (2), 1105-1120, 2022.

Bhagure, V. G. and Choudhury, S. R., “Plus Shaped Chipless RFID Tag”, *International Conference on Automation, Computing and Communication 2021 (ICACC-2021)*, Nerul, Navi Mumbai, India, s. 6, 14-15 July, 2021.

Bhuiyan, M. S., Azad, A. and Karmakar, N., “Dual-band modified complementary split ring resonator (MCSR) based multi-resonator circuit for chipless RFID tag”, *2013 IEEE Eighth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, Melbourne, VIC, s. 277-281, 2-5 April, 2013.

Chang, D., Zeng, B. and Liu, J., “CPW-Fed Circular Fractal Slot Antenna Design for Dual-Band Applications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56 (12), 3630-3636, 2008.

D’Hont, S., “The cutting edge of RFID technology and applications for manufacturing and distribution”, *Texas Instruments*, USA, 2006.

Dinesh R., Anil, P. V., Nijas, C. M., Sumi, M. and Mohanan, P., “Open loop multi-resonator based chipless RFID tag”, *XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, Beijing, China, s.1-4, 16-23 August, 2014a.

Dinesh, R., Anil, P. V., Nijas, C. M., Sumi, M. and Mohanan, P., “Modified open stub multi-resonator based chipless RFID tag”, *Proc. 31th URSI Gen. Assem. Sci. Symp. (URSI GASS)*, Beijing, China, s.1–4, 19-26 August, 2014b.

Drishyada, M. S., Mishra, D. P. and Behera, S. K., “An Ultra-Wideband Chipless RFID Tag with L-Shaped Resonant Structures”, *2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET)*, Belagavi, India, s.1-5, 21-23 May, 2021.

Fathi, P., Aliasgari J., and Karmakar, N. C., "Analysis on Polarization Responses of Resonators for Frequency-Coded Chipless RFID Tags," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(2), 1198-1210, 2022.

Ferreira, H. de P. A., Serres, A. J. R., de Assis, F. M. and De Carvalho, J. N., "A multi-resonant circuit based on dual-band Matryoshka resonator for chipless RFID tag", *Proc. 12th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Londok, UK, s.1-4, 9-13 April, 2018.

Gao, Y., Mahmoodi, M. and Zoughi, R., "Design of a Novel Frequency-Coded Chipless RFID Tag," *IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement*, 1, 1-9, 2022.

Gautam, A. K., Yadav, S. and Kanaujia, B. K., "A CPW-Fed Compact UWB Microstrip Antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 151-154, 2013.

Genovesi, S., Costa, F., Monorchio, A. and Manara, G., "Phase-only encoding for novel chipless RFID tag", *2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA)*, Tampere, Finland, s. 68-71, 8-9 September, 2014.

Genovesi, S., Costa, F., Monorchio, A. and Manara, G., "Chipless RFID Tag Exploiting Multifrequency Delta-Phase Quantization Encoding", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 738-741, 2016.

Girbau, D., Lorenzo, J., Lazaro, A., Ferrater, C. and Villarino, R., "Frequency-Coded Chipless RFID Tag Based on Dual-Band Resonators", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 126-128, 2012.

Gonzalez, V. F., Rezola, A., Estevez, A., Diaz, J. and Valderas, D., "Chipless RFID Tag Detection with a Single Measurement in Presence of Multipath," *2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*, Singapore, Singapore, s.389-390, 4-10 December, 2021.

Gorur, A., "Description of coupling between degenerate modes of a dual-mode microstrip loop resonator using a novel perturbation arrangement and its dual-mode bandpass filter

applications”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 52(2), 671-677, 2004.

Gorur, A. K., Emur, M., Karpuz, C. and Ozek, A., “Design of high-selectivity microstrip bandpass filter using triple-mode stub loaded resonator”, *European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, s.809-812, 7-10 September, 2015.

Habib, A., Afzal, M. A., Sadia, H., Amin, Y. and Tenhunen, H., “Chipless RFID tag for IoT applications”, *Proc. IEEE 59th Int. Midwest Symp. Circuits Syst. (MWSCAS)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, s.1–4, 16-19 October, 2016.

Harma, S., Plessky, V. P., Li, X. and Hartogh, P., “Feasibility of ultrawideband SAW RFID tags meeting FCC rules”, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, 56 (4), 812–820, 2009.

Harma, S., Plessky, V. P., Hartmann, C. S. and Steichen, W., “Z-path SAW RFID tag”, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, 55 (1) 208–213, 2008a.

Harma, S., Arthur, W. G., Hartmann, C. S., Maev, R. G. and Plessky, V. P., “Inline SAW RFID tag using time position and phase encoding”, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control*, 55, (8), 1840–1846, 2008b.

Helmy, A. M., El-Khobby, H. A. and Hussein, A. H., “A New Nested Concentric Stepped Impedance Resonator Structure for the Implementation of High Capacity Chipless RFID Tags”, *2021 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt)*, Alexandria, Egypt, s.1-4, 13-15 July, 2021.

Herrojo, C., Mata-Contreras, J., Núñez, A., Paredes, F., Ramon, E. and Martín, F., “Near-field chipless-RFID system with high data capacity for security and authentication applications”, *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 65 (12), 5298–5308, 2017.

Hinduja, P., Mishra, D. P., and Behera, S. K., "7-Bit ChiplessTag for Ultra Wideband Applications", *2021 2nd International Conference on Range Technology (ICORT)*, Chandipur, Balasore, India, s. 1-4, 5-6 August, 2021.

Hong, J. S. and Lancaster, M. J., “Microstrip Filters for RF/Microwave Applications”, 1st ed., *Wiley*, New York, 2001.

Hong, J. -S., Shaman, H. and Chun, Y. -H., “Dual-Mode Microstrip Open-Loop Resonators and Filters”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55 (8), 1764-1770, 2007.

Jalaly, I. and Robertson, I. D., “RF barcodes using multiple frequency bands”, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Digest, Long Beach, CA, USA, s. 139-142, 12-14 June, 2005a.

Jalaly, I. and Robertson, I. D., “Capacitively-tuned split microstrip resonators for RFID barcodes”, *European Microwave Conference*, Paris, France, s. 1164-1168, 4-6 October, 2005b.

Jheng, J.-L., Chen, H.-D., Kuo, S.-H. and Yang, H.-W., “Circularly polarized RFID tag for metal surface mount”, *Proc. Asia Pacific Microw. Conf. Proc.*, Kaohsiung, Taiwan, s. 1037–1039, 4-7 December, 2012.

Jung, J., Choi, W. and Choi J., “A small wideband microstrip-fed monopole antenna”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 15 (10), 703-705, 2005.

Karimi, G. And Majidifar, S., “A novel chipless RFID tag using spiral resonator to achieve the pentamerous data encoding form”, *J. Electromagn. Waves Appl.*, 28 (1), 13–27, 2013.

Karmakar, A., “Fractal antennas and arrays: a review and recent developments”, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 13 (2), 173-197, 2020.

Karmakar, N. C., “Handbook of Smart Antennas for RFID Systems”, 1st ed., *Wiley*, Hoboken, NJ, USA, 2010.

Karthikeyan, V., Saravanakumar, U. and Suresh, P., “Frequency-Based Passive Chipless RFID Tag Using Microstrip Openstub Resonators”, In: Nath, V., Mandal, J. (eds)

Nanoelectronics, Circuits and Communication Systems. NCCS 2018, 642, s. 323-341, *Springer*, Singapore, 2020.

Kaur, I., Singh, A. K., Makhija, J., Gupta, S. and Singh, K. K., “Designing and Analysis of Microstrip Patch Antenna For UWB Applications”, *3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, Bhimtal, India, s. 1-3, 23-24 February, 2018.

Khaliel, M., Wen, J., Prokscha, A., El-Awamry, A., Fawky, A., and Kaiser, T., “Synthesis and Realization of Multiband Bandpass Filters Based on Frequency Transformation for the Encoding of Chipless RFID Tags”, *2021 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Honolulu, HI, USA, s.184-188, 9-13 August, 2021.

Khan, A.T., Riaz, M.A., Shadid, H. and Amin, Y., “Design of a Cobweb Shape Chipless RFID Tag”, *Microwave Journal*, 64, 90, 2021.

Kim, J., Wang, Z. and Kim, W. S. “Stretchable RFID for wireless strain sensing with silver nano ink”, *IEEE Sensors J.*, 14 (12), 4395–4401, 2014.

Koswatta, R. V. and Karmakar, N. C. “A Novel Reader Architecture Based on UWB Chirp Signal Interrogation for Multiresonator-Based Chipless RFID Tag Reading”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60 (9), 2925-2933, 2012.

Lakshmanan, R., Pradeep M. S. A., and Paul, B., “Novel Compact Flexible Chipless RFID Tags”, 2021 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS), Manchester, United Kingdom, s. 1-4, 20-23 June, 2021.

Lin, T., Kuo, J. and Chung, S., “New triple-mode ring resonator bandpass filter with source-load coupling”, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Baltimore, MD, USA, s., 1-4, 5-10 June, 2011.

Liu, J. C., Yao and J. H., “Wireless RF identification system based on SAW”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 55 (2) 958–961, 2008.

Lopes, B. and Matos, J. N. “Modelling of the multi-resonant circuit frequency behaviour in chipless RFID tags”, *Proc. IEEE Int. Conf. RFID Technol. Appl. (RFID-TA)*, Pisa, Italy, s. 145–150, 25-27 September, 2019.

Malhat, H. A., El-Refaay, E. A. and Zainud-Deen, S. H., “Compact Multi-bits Chipless-RFID Curl Resonator Tag with Temperature Sensing Capability”, *2021 38th National Radio Science Conference (NRSC)*, Mansoura, Egypt, pp. 72-79, 27-29 August, 2021.

Mandel, C., Schußler, M., Maasch, M. and Jakoby, R., “A novel passive phase modulator based on LH delay lines for chipless microwave RFID applications”, *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Boston, MA, USA, s. 1–4, 7-12 June, 2009.

McVay, J., Hoorfar, A. and Engheta, N., “Space-filling curve RFID tags”, *Proc. IEEE Radio Wireless Symp.*, San Diego, California, USA, s. 199–202, 17-19 January, 2006.

Mishra, D. P., Das, T. K. and Behera, S. K., “Design of a 3-bit Chipless RFID Tag using Circular Split-Ring Resonators for Retail and Healthcare applications”, *2020 National Conference on Communications (NCC)*, Kharagpur, India, s. 1-4, 21-23 February, 2020.

Mohamed, T., Abdelkebir, E. and Hanae, T., “Design, Realization and Measurements of Compact CPW-Fed Microstrip Octagonal Patch Antenna with H Slot for WLAN and WIMAX Applications”, *Intl. J. of Microwave and Opt Technol. lett.*, 12 (5), 389- 398, 2017.

Mousa, M. E., Abdullah, H. H. and El-Soud, M. E. d. A., “Compact Chipless RFID Tag Based on Fractal Antennas and Multiple Microstrip Open Stub Resonators”, *2018 The 40th Progress in Electromagnetics Research Symposium*, Toyama, Japan, s. 1332-1338, 1-4 August, 2018.

Mukherjee, S. “Chipless radio frequency identification by remote measurement of complex impedance”, *Proc. Eur. Microw. Conf.*, Munich, Germany, s. 249–252, 8-10 October, 2007.

Necibi, O., Beldi, S. and Gharsallah, A., “Design of a chipless RFID tag using cascaded and parallel spiral resonators at 30 GHz”, *2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN)*, Sousse, Tunisia, s. 1-5, 21-23 March, 2015.

Nijas, C.M., Dinesh, R., Deepak, U., Rasheed, A., Mridula, S., Vasudevan, K., and Mohanan, P., “Chipless RFID Tag Using Multiple Microstrip Open Stub Resonators”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60 (9), 4429-4432, 2012.

Pandey, A., Singhal, S. and Singh, A. K., “CPW-fed third iterative square-shaped fractal antenna for UWB applications”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 58, 92-99, 2016.

Patre, S. R., “Passive Chipless RFID Sensors: Concept to Applications—A Review”, *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 6, 64-76, 2022.

Plessky, V. P., Steichen, W., Harma, S. and Hartmann, C. S., “PS-1 SAW RFID tag with reduced size”, *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, Vancouver, Canada, s. 2389–2392, 3-6 October, 2006.

Pozar, D. M., *Microwave Engineering*, 3rd ed., **Wiley**, New York, NY, USA, 2003.

Pozar D. M., *Microwave Engineering*, 4th ed., **Wiley**, New York, USA, 2014.

Prabavathi, P. and Rani, S. S., “Design of Frequency-Signature Based Multiresonators Using Quarter Wavelength Open Ended Stub for Chipless RFID Tag”, *2019 National Conference on Communications (NCC)*, Bangalore, India, s. 1-6, 20-23 February, 2019.

Preradovic, S., Balbin, I., Karmakar, N. C. and Swiegers, G., “A Novel Chipless RFID System Based on Planar Multiresonators for Barcode Replacement”, *2008 IEEE International Conference on RFID*, Las Vegas, NV, USA, s. 289-296, 2008.

Preradovic, S., Balbin, I., Karmakar, N. C. and Swiegers, G. F., “Multiresonator-Based Chipless RFID System for Low-Cost Item Tracking”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 57 (5), 1411-1419, 2009.

Preradovic, S. and Karmakar, N. C., “4th generation multiresonator-based chipless RFID tag utilizing spiral EBGs”, *The 40th European Microwave Conference*, Paris, France, s. 1746-1749, 28-30 September, 2010a.

Preradovic, S. and Karmakar, N. C., “Chipless RFID: Bar Code of the Future”, *IEEE Microwave Magazine*, 11 (7), 87-97, 2010b.

Reha, A., Amri, A.E. and Bouchouirbat, M. “The Behavior of CPW-Fed Sierpinski Curve Fractal Antenna”, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 17 (3), 366-372, 2018.

Sai, D. M., Mishra, D. P., and Behera, S. K., “Frequency Shift Coded Chipless RFID Tag Design using Square Split Ring Resonators”, *2021 2nd International Conference on Range Technology (ICORT)*, Chandipur, Balasore, India, s. 1-4, 5-6 August, 2021,

Schubler, M., Mandel, C., Maasch, M., Giere, A. and Jakoby, R., “Phase modulation scheme for chipless RFID- and wireless sensor tags”, *Proc. Asia Pacific Microw. Conf.*, Singapore, s. 229–232, 7-10 December, 2009.

Shao, B., Chen, Q., Liu, R. and Zheng, L.-R., “A reconfigurable chipless RFID tag based on sympathetic oscillation for liquid-bearing applications”, *Proc. IEEE Int. Conf. RFID*, Orlando, Florida, USA, s. 170–175, 12-14 April, 2011.

Shao, B., Amin, Y., Chen, Q., Liu, R. and Zheng, L.-R., “Directly printed packaging-paper-based chipless RFID tag with coplanar LC resonator”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 12, 325–328, 2013.

Sharma, D., and Hashmi, M. S., “A miniaturized ultra wideband monopole antenna with defected ground”, *2016 IEEE Annual India Conference (INDICON)*, Bangalore, India, pp. 1-3, 16-18 December, 2016.

Sharma, V. and Hashmi, M., “Chipless RFID tag based on open-loop resonator”, *IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kuala Lumpur, s. 543-546, 13-16 November, 2017.

Sharma, V. and Hashmi, M., “Advances in the design techniques and applications of chipless RFIDs,” *IEEE Access*, 9, 79264–79277, 2021.

Sharma, V., Malhotra, S. and Hashmi, M. “Slot Resonator Based Novel Orientation Independent Chipless RFID Tag Configurations”, *IEEE Sensors Journal*, 19 (13), 5153-5160, 2019.

Shukoor, M. A., Mukeshbhai, S. S. and Dey, S., “12-Bit Multiresonator Based Chipless RFID System for Low-Cost Item Tracking”, *2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, Delhi, India, s. 136-138, 6-8 October, 2021.

Song, J., Li, X. and Zhu, H., “Multiresonator-based chipless RFID system for low-cost application”, *Prog. Electromagn. Res. Symp. Fall (PIERS-FALL)*, Singapore · Singapore, s. 543–547, 19-22 November, 2017.

Srisathit, K., Worapishet, A. and Surakamponorn, W., “Design of Triple-Mode Ring Resonator for Wideband Microstrip Bandpass Filters”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 58 (11), 2867-2877, 2010.

Subrahmannian, A. and Behera, S. K., “Chipless RFID: A Unique Technology for Mankind”, *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 6, 151-163, 2022a.

Subrahmannian, A. and Behera, S. K., “Chipless RFID Sensors for IoT-Based Healthcare Applications: A Review of State of the Art”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-20, 2022b.

Sun, Y.Y., Cheung, S.W. and Yuk, T.I., “Design of a Very Compact UWB Monopole Antenna with Microstrip-FED”, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 55: 2232-2236, 2013.

Torabi, A. and Forooghi, K., “Miniature Harmonic-Suppressed Microstrip Bandpass Filter Using a Triple-Mode Stub-Loaded Resonator and Spur Lines”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 21 (5), 255-257, 2011.

Tripathi, V. K., “Asymmetric Coupled Transmission Lines in an Inhomogeneous Medium”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 23 (9), 734-739, 1975.

Vena, A., Perret, E. and Tedjini, S. “Chipless RFID Tag Using Hybrid Coding Technique”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59 (12), 3356-3364, 2011.

Wan, G., Zhang, M., Li, W. and Chen, L., “A Novel Detection Method Based on Maximum-Likelihood Estimation Decoding of a 6-Bit Chipless Radio Frequency Identification Coded Tag”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-11, 2021.

Wang, L., Liu, T., Sidén, J. and Wang, G., “Design of Chipless RFID Tag by Using Miniaturized Open-Loop Resonators”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (2), 618-626, 2018.

Wang, Z., Zhang, Z., Hu, Y., Zhang, H. and Wang, X., “Design of a novel compact and flexible chipless RFID tag based on an improved U-shaped resonator”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36 (12), 1672-1684, 2022.

Wu, L., Sheng, J., Peng, S., Xiao, Z. and Gu, S., “Chipless RFID Tag using Complementary Hexagonal Split Ring Resonator”, *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Singapore, s. 1334-1336, 10-13 December, 2019.

Xu, H., Xu, K., Liu, Y. and Liu, Q. H., “Compact triple-mode bandpass filter using short- and open-stub loaded spiral resonator”, *IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES)*, Honolulu, HI, USA, s. 1-2, 13-18 March, 2016.

Yang, L., Zhang, R., Staiculescu, D., Wong, C. P. and Tentzeris, M. M., “A novel conformal RFID-enabled module utilizing inkjet-printed antennas and carbon nanotubes

for gas-detection applications”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 8, 653–656, 2009.

Zhang, Y. J., Gao, R. X., He, Y. and Tong, M. S., “Effective Design of Microstrip-Line Chipless RFID Tags Based on Filter Theory,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67 (3), 1428-1436, 2019.

Zhang, S. and Zhu, L., “Compact and High-Selectivity Microstrip Bandpass Filters Using Triple-/Quad-Mode Stub-Loaded Resonators”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 21 (10), 522-524, 2011.

Zhang, S. and Zhu, L. “Triple-mode bandpass filters on stub-loaded resonator with novel I/O coupling scheme”, *Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*, Kaohsiung, Taiwan, s. 532-534, 4-7 December, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Engin DOĞAN, ... yılında ...'de doğdu. İlk-Orta ve Lise eğitimini Nazilli'de tamamladı. 2016 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü lisans eğitimini tamamladı. 2016 yılında Pamukkale Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başlamış ancak 2018 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladığından dolayı Yüksek lisans eğitimini yatay geçiş yaptığı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'nde 2019 yılında tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini tamamladığı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde 2019'da doktora eğitimine başlamıştır.

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN YAYINLAR

1. SCI/SCIE dergilerde yayınlanan makale listesi

- Gorur,A. K., Dogan, E., Ayas, G., Karpuz, C. and Gorur, A., Multibit Chipless RFID Tags Based on the Transition Among Closed- and Open-Loop Resonators, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 70 (1), pp. 101-111, Jan. 2022, doi: 10.1109/TMTT.2021.3122795.
- Dogan, E., Gorur, A. K. and Gorur, A., “Novel flexible chipless RFID tags based on five state resonators,” *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 37:16, 1317-1329, 2023, DOI: 10.1080/09205071.2023.2239806.
- Dogan, E., Gorur, A. K. and Gorur, A., “Novel Chipless RFID Tags Using Eight State Triple-Mode Resonators,” *IEEE Access*, 11, pp. 107429-107440, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3320108.

2. Uluslararası konferanslarda sunulan bildiri listesi

- Dogan, E., Gorur, A. K., Karpuz, C. and Gorur, A., “A New and Simple Approach on Multi-Resonator Circuit Based Chipless RFID Tags for IoT Applications,” *2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Hong Kong, Hong Kong, 2020, pp. 1021-1023, doi: 10.1109/APMC47863.2020.9331378.
- Gorur, A. K., Dogan, E., Karpuz, C. and Gorur, A., “Novel Multi-Resonator Circuits for Chipless RFID Tags Using Asymmetrical Triple-Mode Resonators,” *2022 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Las Vegas, NV, USA, 2022, pp. 114-119, doi: 10.1109/RFID54732.2022.9795962.

