

**LTE, WiMAX ve WLAN İLETİŞİM SİSTEMLERİ
İÇİN MIMO ANTEN TASARIMLARI ve
PROTOTİPLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

ABDURRAHİM TOKTAŞ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**MERSİN
TEMMUZ – 2014**

**LTE, WiMAX ve WLAN İLETİŞİM SİSTEMLERİ
İÇİN MIMO ANTEN TASARIMLARI ve
PROTOTİPLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

ABDURRAHİM TOKTAŞ

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**Danışman
Prof. Dr. Ali AKDAĞLI**

**MERSİN
TEMMUZ – 2014**

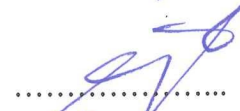
Abdurrahim TOKTAŞ tarafından Prof. Dr. Ali AKDAĞLI danışmanlığında “LTE, WiMAX ve WLAN iletişim sistemleri için MIMO anten tasarımları ve prototiplerinin gerçekleştirilmesi” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

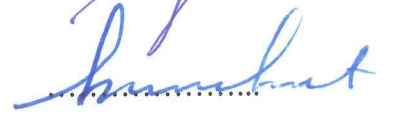
Prof. Dr. Ali AKDAĞLI



Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR



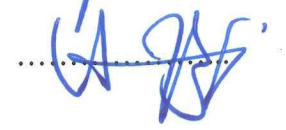
Doç. Dr. Kasım KURT



Yrd. Doç. Dr. Serhan YAMAÇLI



Yrd. Doç. Dr. Ali YILDIZ



Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .11../.08./2014. tarih ve ..2014..17...../...500..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Doç. Dr. Mehmet KÜÇÜKASLAN
Enstitü Müdürü



Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

LTE, WiMAX ve WLAN İLETİŞİM SİSTEMLERİ İÇİN MIMO ANTEN TASARIMLARI ve PROTOTİPLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Abdurrahim TOKTAŞ

ÖZ

Kablosuz iletişim sistemlerinin veri iletim hızı, multimedya servislerine ait büyük miktardaki veri transfer ihtiyacından dolayı son yıllarda oldukça artmıştır. MIMO (multiple input multiple output) sistemleri sınırlı kanal kapasitesini aşabildiği için modern kablosuz iletişim sistemlerinde bir çığır açmıştır. MIMO sistemi, izole edilmiş çoklu antenler arasında sağlanan uzaysal paralel kanallar üzerinden eş zamanlı veri transferi yapabilme kabiliyetine sahiptir. MIMO teknolojisi son yıllarda, LTE (long term evolution), WiMAX (worldwide interoperability for microwave access) ve WLAN (wireless local area network) gibi kablosuz iletişim standartlarına adapte edilmiştir. Bu durum, kompakt, geniş bant, anten elemanları arasında yüksek izolasyon bulunan MIMO antenlerin gezgin terminallere entegre edilmesini gerektirmiştir.

Bu tez çalışmasında, kompakt, geniş bant, düşük korelasyonlu anten elemanlarına sahip, üç yeni MIMO anten tasarlanmıştır ve prototipleri gerçekleştirilmiştir. Anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için yeni yöntemler uygulanmıştır. Antenlerin tasarım prosedürleri detaylı olarak açıklanmıştır. Birinci anten, UWB (ultrawideband) uygulamalarına yönelik iken; ikinci ve üçüncü antenler ise LTE, WiMAX ve WLAN standartlarına uyumlu gezgin terminaller için tasarlanmıştır. Antenler, sırasıyla, 3.1–12.3 GHz, 1.79–3.77 GHz ve 1.8–4.0 GHz frekans bantlarında çalışmaktadır. Birinci antenin yapısı, anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için birbirine göre dikey olarak konumlandırılmış iki özdeş düzlemsel ışılan elemandan oluşmaktadır. İkinci anten, her biri dört monopol koldan oluşmuş ve birbirine göre simetrik olarak yerleştirilmiş iki özdeş ışılan elemandan oluşmaktadır. Işıyan elemanlar arasındaki izolasyonu artırmak için toprak düzlemde yeni bir T şekilli parasitik eleman tasarlanmıştır. Üçüncü anten ise, dört monopol kolun bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş, simetrik ve dikey, iki özdeş elemandan ve elemanlar arasında korelasyonu azaltmak için toprak düzlemde yeni bir artı şekilli parasitik elemandan meydana gelmektedir. MIMO anten yapıları, MoM'a (method of moment) dayanan IE3D™ benzetim programı kullanılarak tasarlanmıştır. Antenlerin performansı; S-parametreleri, bant genişliği, ışılma örüntüsü, yüzey akım dağılımı, kazanç, ECC (envelope correlation coefficient), TARC (total active reflection coefficient) açılarından incelenmiştir. Tasarım aşaması başarılı olarak tamamlanan antenlerin, FR4 materyal üzerine CNC cihazı aracılığıyla prototipleri gerçekleştirilmiştir. Anten prototiplerinin S-parametre ölçümleri yapılarak benzetim sonuçları doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anten, mikroşerit anten, düzlemsel anten, geniş bant, UWB, MIMO, LTE, WiMAX ve WLAN

Danışman: Prof. Dr. Ali AKDAĞLI, Mersin Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

DESIGNING and FABRICATING PROTOTYPES OF MIMO ANTENNAS FOR LTE, WiMAX and WLAN COMMUNICATION SYSTEMS

Abdurrahim TOKTAŞ

ABSTRACT

Data transmitting rate of wireless communication systems has been remarkably increased in recent years owing to the transferring requirements of the enormous data belonging to the multimedia services. Multiple inputs multiple outputs (MIMO) systems have been one of the most significant breakthrough in modern wireless communication due to overcoming the limited channel capacity. A MIMO system is capable of simultaneously transmitting multiple signals through spatially parallel channels between isolated multiple antennas. The MIMO technology has been recently adapted to latest mobile communication standards such as long term evolution (LTE), worldwide interoperability for microwave access (WiMAX) and wireless local area network (WLAN). It is, therefore, necessary to incorporate compact, wideband MIMO antennas with high isolation between antenna elements to mobile terminals.

In this thesis, compact, wideband, three novel MIMO antennas with low correlation between antenna elements have been designed and fabricated. New techniques have been implemented to reduce the mutual coupling between antenna elements. Antenna design procedures have been described in detailed. The first antenna is designed for UWB (ultrawideband) applications, while second and third ones are designed for LTE, WiMAX and WLAN handheld terminals. The antennas operate over the frequency bands of 3.1–12.3 GHz, 1.79–3.77 GHz and 1.8–4.0 GHz, respectively. The first antenna consists of two identical radiating planar elements orthogonally placed for improving isolation between them. The second antenna is comprised of two identical and symmetrical radiating elements formed by four monopole branches with a meandered strip-fed. In order to enhance the isolation between radiating elements, a new T-shaped parasitic element is designed. The third antenna consists of two symmetrical and orthogonal identical radiating elements composed of four monopole branches, and a new plus-shaped parasitic element to reduce the correlation between radiating elements. The antennas are designed by means of simulation software IE3D™ based on MoM (method of moment). The performance of the MIMO antenna is investigated in terms of S-parameters, radiation pattern, surface current distribution, gain, envelope correlation coefficient (ECC) and total active reflection coefficient (TARC). The MIMO antenna prototypes which accomplished successfully through design processes are fabricated with the material of FR4 via a CNC router. The simulated S-parameter results have been verified through the measurements.

Key Words: Antenna, microstrip antenna, planar antenna, wideband, UWB, MIMO, LTE, WiMAX and WLAN

Advisor: Prof. Dr. Ali AKDAĞLI, Department of Electrical – Electronics Engineering, Mersin University

TEŞEKKÜR

Öncelikle, eğitimim boyunca bana verdiği destek ve gösterdiği sabrından dolayı sevgili eşime; biricik oğlum ve kızıma, manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının planlanmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendirdiğim çok değerli danışmanım Prof. Dr. Ali AKDAĞLI'ya çok teşekkür ederim.

Bu tezin hazırlanmasında bilgi ve deneyimleri ile katkılarını sunan, saygıdeğer hocam Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR'e, birlikte çalışmalar yaptığımız değerli doktora arkadaşlarım Ahmet KAYABAŞI, Deniz ÜSTÜN ve Mustafa Berkan BİÇER'e, ayrıca Dr. Enes YİĞİT ve Hakan IŞIKER'e çok teşekkür ederim.

Son olarak, bu tezin laboratuvar çalışmaları aşamasında, araştırma ve deneylerde yardımlarını esirgemeyen TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü, Uluslararası Yüksek Teknoloji Laboratuvarı personeli Mustafa TEKBAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
EKLER DİZİNİ	xii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	7
2.1. SISO SİSTEMLERİ	7
2.1.1. SISO Kanal Kapasitesi	8
2.2. MIMO SİSTEMLERİ	9
2.2.1. MIMO Kanal Kapasitesi	11
2.2.2. Çeşitleme Teknikleri	11
2.2.2.1. Alıcı çeşitleme teknikleri	12
<i>Birleştirmeli çeşitleme teknikleri</i>	13
<i>Seçmeli çeşitleme</i>	14
<i>Eşit kazançlı birleştirme</i>	14
<i>Azami oranlı birleştirme</i>	15
2.2.2.2. Verici çeşitleme teknikleri	16
<i>Uzay zaman blok kodlama (UZBK) çeşitleme tekniği</i>	17
2.2.3. Uzaysal Çoğullama Tekniği	19
2.2.4. Anten Seçme Tekniği	20
2.3. MIKROŞERİT ANTEN TİPLERİ VE MIMO UYGULAMALARI	21
2.3.1. Mikroşerit Anten Tipleri	21
2.3.1.1. Geleneksel mikroşerit anten	22
2.3.1.2. Yama ve toprak düzlemi modifiye edilmiş mikroşerit anten	23
2.3.1.3. CPW (coplanar-waveguide) beslemeli anten	24
2.3.1.4. IFA (inverted F antenna)	24
2.3.1.5. PIFA (planar inverted F antenna)	25
2.3.2. MIMO Anten Uygulamaları	26

2.3.3. Anten Performans Parametreleri	27
2.3.3.1. S-parametreleri	27
2.3.3.2. Empedans bant genişliği	29
2.3.3.3. Yönlülük ve kazanç	30
2.3.3.4. Verim	31
2.3.3.5. Işıma örüntüsü	31
2.3.3.6. ECC (envelope correlation coefficient)	31
2.3.3.7. TARC (total active reflection coefficient)	33
2.3.4. MIMO Anten Tasarım Zorlukları	33
2.3.4.1. Küçük anten tasarımı	34
2.3.4.2. Ortak etkileşim (mutual coupling)	34
<i>Literatürde uygulanmış bazı izolasyon yöntemleri</i>	<i>35</i>
<i>Parasitik eleman kullanımı</i>	<i>35</i>
<i>Toprak düzlemde boşluk açma</i>	<i>37</i>
<i>Dikey eleman yerleşimi</i>	<i>37</i>
2.4. MIMO UYUMLU KABLOSUZ İLETİŞİM STANDARTLARI.....	38
2.4.1. LTE (Long Term Evolution)	39
2.4.2. WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).....	41
2.4.3. WLAN (Wireless Local Area Network)	43
2.5. LİTERATÜRDE ÖNERİLEN MIMO ANTEN TASARIMLARI.....	44
2.5.1. UWB MIMO Anten Çalışmaları	49
2.5.2. Gezgin Terminallere Yönelik MIMO Anten Tasarımları	56
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	72
3.1. IE3D™ YAZILIMI	72
3.2. PCB MATERYAL	72
3.3. PCB CNC MAKİNESİ	73
3.4. NETWORK ANALİZÖR	74
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	76
4.1. DÜŞÜK KORELASYONLU KOMPAKT UWB MIMO ANTEN TASARIMI VE PROTOTİPİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	76

4.1.1. Anten Tasarımı.....	76
4.1.2. Anten Prototipinin Gerçekleştirilmesi.....	79
4.1.3. Performans Analizi	81
4.1.3.1. Işıma örüntüsü.....	81
4.1.3.2. Yüzey akım dağılımları.....	82
4.1.3.3. Kazanç ve ECC	83
4.1.3.4. TARC	84
4.1.4. Önerilen MIMO Anten ile Literatür Karşılaştırması	85
4.2. LTE, WiMAX ve WLAN STANDARTLARINA UYUMLU GEZGİN TERMİNALLER İÇİN T ŞEKİLLİ PARASİTİK ELEMAN KULLANARAK İZOLASYONU İYİLEŞTİRİLMİŞ GENİŞ BANT MIMO ANTEN TASARIMI VE PROTOTİPİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	87
4.2.1. Anten Tasarımı.....	87
4.2.2. Anten Prototipinin Gerçekleştirilmesi.....	90
4.2.3. Performans Analizi	92
4.2.3.1. Işıma örüntüsü.....	92
4.2.3.2. Yüzey akım dağılımları.....	93
4.2.3.3. Kazanç ve ECC	94
4.2.3.4. TARC	95
4.3. LTE, WiMAX ve WLAN STANDARTLARINA UYUMLU GEZGİN TERMİNALLER İÇİN ARTI ŞEKİLLİ PARASİTİK ELEMAN KULLANILARAK KORELASYONU DÜŞÜRÜLMÜŞ GENİŞ BANT DİKEY MIMO ANTEN TASARIMI VE PROTOTİPİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	95
4.3.1. Anten Tasarımı.....	96
4.3.2. Anten Prototipinin Gerçekleştirilmesi.....	99
4.3.3. Performans Analizi	101
4.3.3.1. Işıma örüntüsü.....	101
4.3.3.2. Yüzey akım dağılımları.....	103
4.3.3.3. Kazanç ve ECC	103
4.3.3.4. TARC	104
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	105
6. KAYNAKLAR	107
7. EK.....	114
7.1. EK-1: MOMENT METODU	114

7.2. EK-2: IE3D™ YAZILIMI İLE ANTEN TASARIMI VE BENZETİMİ	116
7.2.1. Geometrinin Oluşturulması	116
7.2.2. Izgaralama	121
7.2.3. Benzetimin Koşulması	123
7.2.4. Performans Ölçümü	126
7.2.4.1. S-parametreleri	126
7.2.4.2. Işıma örüntüsü	128
7.2.4.3. Kazanç	132
8. ÖZGEÇMİŞ.....	134

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. Hücresel iletişim sistemlerinin gelişimi.....	1
Çizelge 2.1. Verici ve alıcı antenlerin alışı ve verişi sırası	18
Çizelge 2.2. Ülkelere göre LTE uygulamasının TDD frekans bantları [3gpp.org] ...	40
Çizelge 2.3. Ülkelere göre LTE uygulamasının FDD frekans bantları [3gpp.org]....	41
Çizelge 2.4. WiMAX standardının çalışma frekans bantları [wimaxforum.org].....	42
Çizelge 2.5. WLAN standardının çalışma frekans bantları [ieee.org]	44
Çizelge 4.1. UWB MIMO antenin fiziksel parametreleri (mm)	79
Çizelge 4.2. Literatürde önerilmiş UWB MIMO antenler ile karşılaştırma	86
Çizelge 4.3. MIMO antenin fiziksel parametreleri (mm)	89
Çizelge 4.4. Antenin desteklediği LTE, WiMAX ve WLAN çalışma bantları (GHz)	91
Çizelge 4.5. Monopol kolların rezonans frekansları	98
Çizelge 4.6. MIMO antenin fiziksel parametreleri (mm)	99
Çizelge 4.7. Antenin desteklediği LTE, WiMAX ve WLAN çalışma bantları (GHz)	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Temel SISO mimarisi	8
Şekil 2.2. SNR değişiminin $\log_2(1 + \text{SNR})$ üzerindeki etkisi	8
Şekil 2.3. 2 x 2 MIMO mimarisi	9
Şekil 2.4. Çeşitleme senaryosu.....	12
Şekil 2.5. İki antenli alıcı çeşitleme tekniği	13
Şekil 2.6. Birleştirmeli çeşitleme tekniğinin genel çalışma prensibi	14
Şekil 2.7. Seçmeli çeşitleme tekniğinin genel çalışma prensibi.....	14
Şekil 2.8. Eşit kazançlı birleştirme tekniğinin genel çalışma prensibi.....	15
Şekil 2.9. Azami oranlı birleştirme tekniğinin genel çalışma prensibi	16
Şekil 2.10. İki antenli verici çeşitleme	16
Şekil 2.11. 2 x 2 antenli UZBK çeşitleme senaryosu [Alamouti, 1999].....	18
Şekil 2.12. Uzaysal çoğullama tekniğinin blok gösterimi.....	20
Şekil 2.13. Anten seçimi tekniğinin genel yapısı	21
Şekil 2.14. Dikdörtgen mikroşerit anten geometrisi	22
Şekil 2.15. Geleneksel mikroşerit anten geometrileri	22
Şekil 2.16. Temel besleme yöntemleri: a) mikroşerit hat besleme b) koaksiyel besleme.....	23
Şekil 2.17. Yama ve toprak düzlemi modifiye edilmiş bir anten geometrisi.....	24
Şekil 2.18. CPW beslemeli bir anten geometrisi.....	24
Şekil 2.19. IFA geometrisi	25
Şekil 2.20. PIFA geometrisi	26
Şekil 2.21. Tipik mikroşerit yapıları: a) bir elemanlı b) iki elemanlı	27
Şekil 2.22. İki antenli bir sistemin genel yapısı [Blanch, 2003]	28
Şekil 2.23. Bir antenin s_{11} parametresi ve empedans bant genişliği gösterimi	30
Şekil 2.24. Bir antenin ışınma örüntüsü	30
Şekil 2.25. İki elemanlı bir MIMO sisteminde antenler arasındaki ortak etkileşim [Zhengyi vd., 2012].....	34
Şekil 2.26. İki elemanlı dikdörtgen MIMO anten yapısı: a) anten geometrisi b) S-parametre eğrileri	35
Şekil 2.27. Parazitik eleman kullanılarak izolasyonun sağlanması [Zhengyi vd., 2012]	36
Şekil 2.28. Parazitik eleman uygulanmış bir PIFA: a) anten geometrisi b) s parametreleri [Zhengyi vd., 2012]	36
Şekil 2.29. Boşluk açma yöntemi uygulanmış bir PIFA: a) anten geometrisi b) S-parametreleri [Shuai vd., 2012].....	37
Şekil 2.30. Dikey elemanlı bir MIMO anten: a) anten geometrisi b) s_{11} parametresi c) s_{21} parametresi [Yao vd., 2012].....	38
Şekil 2.31. Geniş bant iletişim teknolojilerinin gelişimi [technewsworld.com]	39
Şekil 2.32. 3GPP yol haritası [3gpp.org]	40

Şekil 3.1. Çift yüzlü bakır FR4 PCB materyalinin temsili görüntüsü.....	73
Şekil 3.2. LPKF–ProtoMat H60 PCB CNC makinesi	74
Şekil 3.3. Agilent N5230A PNA–L Network analizör	75
Şekil 4.1. Anten tasarımındaki temel aşamalar: a) Model 1 b) Model 2 c) Model 3 d) Model 4	77
Şekil 4.2. Benzetilen anten elemanının geriye dönme eğrileri (s_{11} parametresi): a) Model 1, 2, 3 ve 4 için b) farklı d değerleri için	78
Şekil 4.3. UBW MIMO antenin geometrisi	79
Şekil 4.4. UWB MIMO antenin prototipi	80
Şekil 4.5. Ölçme düzeneğinden bir görüntü.....	80
Şekil 4.6. MIMO antenin benzetilen ve ölçülen S-parametreleri.....	81
Şekil 4.7. Üç farklı frekans noktası için Anten 1'in ışıma örüntüleri (dBi): a) xz düzleminde E_{θ} b) yz düzleminde E_{θ} c) xy düzleminde E_{ϕ}	82
Şekil 4.8. Port 1 enerjili iken MIMO antenin üç farklı frekans noktası için yüzey akım dağılımları: a) 4 GHz b) 6.28 GHz c) 9.08 GHz.....	83
Şekil 4.9. UWB MIMO antenin a) kazanç grafiği b) ECC grafiği	84
Şekil 4.10. UWB MIMO antene ait TARC grafiği	85
Şekil 4.11. Anten tasarımındaki temel aşamalar: a) Model 1 b) Model 2 c) Model 3 d) Model 4.....	88
Şekil 4.12. T şekilli parasitik elemanlı ve parasitik elemansız benzetilen MIMO antenin S-parametreleri	88
Şekil 4.13. MIMO antenin geometrisi: a) perspektif gösterimi b) özet gösterimi c) Anten 1'in detaylı gösterimi.....	89
Şekil 4.14. MIMO antenin prototipi.....	90
Şekil 4.16. Prototip MIMO antenin benzetilen ve ölçülen S-parametreleri.....	91
Şekil 4.19. Kazanç ve ECC eğrileri	94
Şekil 4.20. MIMO antene ait TARC grafiği	95
Şekil 4.22. Toprak düzlemin farklı geometrik formları: a) FORM1 b) FORM2 c) FORM3 d) FORM4.....	97
Şekil 4.23. Toprak düzlemin farklı geometrik formları için benzetilen S-parametreleri	98
Şekil 4.25. Tasarlanan MIMO antenin prototipi: a) önden görünüş b) arkadan görünüş.....	100
Şekil 4.27. Prototip MIMO antenin benzetim ve ölçüm ile elde edilen S-parametreleri	101
Şekil 4.30. Kazanç ve ECC eğrileri	104
Şekil 4.31. MIMO antene ait TARC grafiği	104
Şekil Ek 7.1. Bir mikroşeridin elektrik alan integral ifadelerinin elde edilmesi.....	114
Şekil Ek 7.2. Bir mikroşerit üzerinde bulunan akımdan elektrik alan ve vektör potansiyel ifadelerinin elde edilmesi.....	115
Şekil Ek 7.3. Temel parametrelerin ayarlanması	117
Şekil Ek 7.4. Sonlu toprak düzlemi bilgileri.....	118

Şekil Ek 7.5. Sonlu alttaş düzleminin tanımlanmasından sonra görülen temel parametreler.....	118
Şekil Ek 7.6. IE3D™ elektromanyetik benzetim programının ana penceresi	119
Şekil Ek 7.7. Tasarlanan antenin iki boyutlu görünümü.....	120
Şekil Ek 7.8. Antende besleme portunun oluşturulması	120
Şekil Ek 7.9. Izgaralama ayarları	121
Şekil Ek 7.10. Izgaralama işlemi sonrası bilgi ekranı	122
Şekil Ek 7.11. Izgaralama işlemi sonrası antenin iki boyutlu görünümü.....	123
Şekil Ek 7.12. Benzetim ayarlarının yapılması.....	124
Şekil Ek 7.13. Benzetimin yapılacağı frekans aralığı bilgileri.....	125
Şekil Ek 7.14. Benzetim ayarları penceresi	125
Şekil Ek 7.15. Benzetim işlemi ile ilgili bilgilerin görülmesi.....	126
Şekil Ek 7.16. S-parametre grafiklerinin açılması	127
Şekil Ek 7.18. Grafik türlerinin seçilmesi.....	128
Şekil Ek 7.19. S-parametrelerinin seçimi.....	128
Şekil Ek 7.20. Benzetim işlemi sonrası S-parametre grafiği	129
Şekil Ek 7.21. 2B ışıma örüntüsünü seçilmesi.....	130
Şekil Ek 7.22. Örüntü grafiklerinin eklenmesi.....	130
Şekil Ek 7.23. İstenilen örüntü grafiklerinin tanımlanması	130
Şekil Ek 7.24. Tanımlanmış örüntü grafiklerinin gösterimi	131
Şekil Ek 7.25. 2B'li örüntü eğrilerinin görüntülenmesi.....	132
Şekil Ek 7.26. Kazanç grafiğinin seçilmesi	132
Şekil Ek 7.27. Azami kazanç grafiğinin tanımlanması	133
Şekil Ek 7.28. Azami kazanç grafiğinin gösterilmesi	133

EKLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
7. EK	114
7.1. EK–1: MOMENT METODU	114
7.2. EK–2: IE3D™ YAZILIMI İLE ANTEN TASARIMI VE BENZETİMİ	116
7.2.1. Geometrinin Oluşturulması	116
7.2.2. Izgaralama	121
7.2.3. Benzetimin Koşulması	123
7.2.4. Performans Ölçümü	126
7.2.4.1. S-parametreleri	126
7.2.4.2. Işıma örüntüsü	128
7.2.4.3. Kazanç	132

SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ

1G	1 st Generation
2B	İki Boyutlu
2G	2 nd Generation
3B	Üç Boyutlu
3G	3 rd Generation
3GPP	The 3rd Generation Partnership Project
4G	4 th Generation
A/m	Amper/metre
APAC	Asia and Pacific
APT	Asia Pacific Telecommunity
b/sn	bit/saniye
BW	Bant Genişliği
CALA	Central Latin America
CDMA	Code Division Multiple Access
CNC	Computer Numerical Control
CPW	Coplanar Waveguide
dB	Decibel
dBi	Decibel izotropik
D-BLAST	Diagonal – Bell Laboratories Layered Space – Time
DCS	Digital Cross – Connect
DD	Digital dividend
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ECC	Envelope Correlation Coefficient
EDGE	Advanced Data Rates for GSM Evolution
EGC	Equal Gain Combining
EMEA	Europe Middle East and Africa
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Dublex)
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FR4	Flame Retardant – 4

Gb/sn	Giga bit/saniye
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile
HSPA	High Speed Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFA	Inverted F Antenna
IMT	International Mobile Telecommunications
ISM	Industrial, Scientific and Medical
kb/sn	kilo bit/saniye
KDB	Kanal Durum Bilgisi
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MAC	Media Access Control
MB	Mikroşerit Beslemeli
Mb/sn	Mega bit/saniye
ME	Monopol Eleman
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
MoM	Method of Moment
MRC	Maksimum Ratio Combining
NAR	North American Region
NLOS	Non-line of Sight
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
PCB	Printed Circuit Board
PIFA	Planar Inverted F Antenna
PS	Public Safety
RF	Radio Frequency
RFIC	Radio Frequency Integrated Circuit
RFID	Radio Frequency Identification
SAR	Specific Absorption Rate
SCI	State Channel Information
SISO	Single Input Single Output

SNR	Signal to Noise Ratio
STBC	Space Time Block Coding
STTC	Space Time Trellis Coding
TARC	Total Active Reflection Coefficient
TD	Toprak Düzlem
TDD	Time Division Dublex
TDMA	Time Division Multiplexing Access
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
UWB	Ultra-Wide-Band
UZBK	Uzay Zaman Blok Kodlama
UZKK	Uzay Zaman Kafes Kodlama
V-BLAST	Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time
W-CDMA	Wideband-Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

1. GİRİŞ

1980 yılında analog olarak kullanılmaya başlanılan 1G kablosuz telefon sistemi, on yıl sonra sayısallaştırılarak 2G olarak kullanılmaya devam etmiştir. Sadece telefon iletişiminin yapılabildiği 2G sistemleri, daha sonra veri alışverişi yapmak amacıyla 56 kb/sn veri iletim hızına sahip GPRS (general packet radio service) standardı eklenerek 2.5G'ye dönüştürülmüştür. 2.5G altyapısına 236.8 kb/sn veri iletim kapasitesine sahip EDGE (advanced data rates for GSM evolution) teknolojisi entegre edilerek 2.75G standardı oluşturulmuştur. Bu teknolojilerin gelişmesi, yüksek veri hızı gerektiren multimedya servislerine yönelik taleplerin artmasına neden olmuştur. 2000'li yılların başında UMTS/W-CDMA (universal mobile telecommunications system/ wideband-code division multiple access), CDMA2000 ve HSPA (high speed packet access) standartlarının geliştirilmesiyle 10 Mb/sn'e kadar gezgin geniş bant hizmeti verilebilen 3G altyapısı oluşturulmuştur. Kablosuz iletişim sistemlerinin kronolojik gelişimi Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Hücreli iletişim sistemlerinin gelişimi

G	Tarih	İsim	Modülasyon	MIMO	Azami veri hızı
1 G	1980	GSM	TDMA	1x1	–
2 G	1990	GSM	TDMA	1x1	–
2.5 G	1999	GPRS	TDMA	1x1	56 kb/sn
2.75 G	2000	EDGE	TDMA	1x1	236.8 kb/sn
3 G	2002	UMTS/W-CDMA	CDMA	1x1	10 Mb/sn
3 G	2005	HSPA	CDMA	1x1	10 Mb/sn
3.5 G	2008	HSPA+	CDMA	2x2	84 Mb/sn
3.9 G	2010	LTE	OFDMA	2x2	150 Mb/sn
4G	2011	LTE	OFDMA	4x4	300 Mb/sn
4G	2012	LTE -Advanced	OFDMA	8x8	1 Gb/sn

Bugüne kadar, tek kanala sahip geleneksel SISO (single input single output) sistemleri ile sadece zaman, frekans ve kod çoğullama teknikleri kullanılarak iletişim sistemlerinin kapasitesi artırılmaya çalışılmıştır. Kullanılan gücün kısıtlı olmasından, alıcı ve verici arasındaki mesafenin fazla olmasından, direk görüş (line of sight-LOS) olmamasından ve alıcının gezgin olmasından kaynaklanan nedenlerle iletilen sinyal saçılmalarına ve zayıflamaya uğramaktadır. Kapasite artırmaya yönelik çalışmalar, bu nedenle sınırlanmıştır. Bu sınırlamaya en iyi çözüm, son yıllarda geliştirilen MIMO (multiple input multiple output) sistemidir. MIMO'nun en önemli

özelliği, bugüne kadar kullanılmayan uzaysal alanı (spatial domain) kullanarak çoklu kanal üzerinden paralel veri iletişimi yapabilmesidir. Başka bir deyişle, MIMO sisteminde uzaysal alan kullanılarak aynı zaman ve frekansta çoklu anten üzerinden paralel veri iletimi yapılabilmektedir. MIMO'nun en önemli avantajları; sistemin *çeşitleme* (diversity) [Alamouti, 1999; Tarokh ve Seshadri, 1998; Brennan, 2003; Isomaki ve Isoaho, 2008] ve *uzaysal çoğullama* (spatial multiplexing) [Foschini, 1996; Wolniansky vd., 1998] yapabilmesidir. Uzaysal çoğullama ile veri, alt bantlara bölünerek paralel kanallar üzerinden transfer edildiğinden kanal kapasitesi artırılmaktadır. Uzaysal çoğullama tekniği üzerinde yapılan en önemli çalışmalar D-BLAST (Diagonal-Bell Laboratories layered space-time) [Foschini, 1996] ve V-BLAST'dır (Vertical-BLAST) [Wolniansky, 1998]. Verici tarafından iletilen sinyaller çoklu kanalların bulunduğu ortamdaki çeşitli yapılardan veya engellerden saçılmaktadır ve alıcı tarafına birbirinden farklı zayıflamaya uğramış sinyal kopyaları ulaşmaktadır. Alıcı tarafında çeşitleme teknikleri kullanılarak gönderilen sinyaller tekrar elde edilir. Ayrıca, en az zayıflama ve hata oranına sahip iletişim kanallarının seçimi esasına dayanan *anten seçme* (antenna selection) tekniği MIMO sistemlerinde kullanılır [Gore ve Paulraj, 2002; Gorogkhov, 2003]. Uzaysal çoğullama ile veri iletim oranı artırılırken, çeşitleme tekniği ile de hata oranı azaltılarak yüksek verim elde edilmektedir. Anten seçme tekniği, uzaysal çoğullama ve çeşitleme teknikleri ile birlikte kullanılmaktadır [Gore ve Paulraj, 2002; Gorogkhov, 2003]. MIMO sistemlerinde uzaysal çoğullama ve çeşitleme teknikleri ayrı ayrı kullanılabilirdiği gibi her iki teknik, *hibrit* olarak da kullanılmaktadır [Win ve Winter, 1999; Tse ve Wiswanath, 2004].

MIMO teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte kablosuz iletişim sistemlerinde yeni bir döneme girilmiştir. MIMO sistemlerinin uygulanması ile 4G'nin en önemli standardı olan LTE (long term evolution) geliştirilmiştir. LTE standardı, kullanıldığı ülkelere göre değişen 400 – 4000 MHz arasındaki frekanslarda, 1 Gb/sn'e kadar veri iletim kapasitesi vaat etmektedir. LTE standardı, diğer teknolojilerin dayandığı TDMA (time division multiplexing access) ve CDMA modülasyon tekniklerinden farklı olarak OFDMA (orthogonal frequency division multiplexing access) tekniğini kullanmaktadır. Bugüne kadar, MIMO teknolojisi, LTE'nin yanı sıra WiMAX (worldwide interoperability for microwave access), HSPA+ (high speed packet

access) ve WLAN (wireless local area network) gibi yeni nesil radyo frekans standartlarına adapte edilmiştir [3gpp.org, 2014; E-UTRA, 2014; Tse ve Viswanath, 2005; Hanzo vd., 2011; Kaise ve Zheng, 2010; Balanis, 2007].

MIMO sistemlerinin kablosuz iletişim standartlara hızla adapte edilmesiyle birlikte, bu sistemlerin en önemli özelliği olan fiziksel ara yüzde çalışan MIMO antenlere ihtiyaç duyulmuştur. Günümüz iletişim sistemleri, küçük ve ince gezgin terminaller kullandığı için bu cihazların içine yerleştirilebilen MIMO anten tasarımları oldukça zordur. Çünkü, ışıyan anten elemanları, küçük alanda birbirine yakın çalıştıkları için bu elemanlar arasında ortak etkileşimden dolayı korelasyon katsayısında (envelope correlation coefficient–ECC) artış meydana gelmektedir. Bu durum, anten elemanlarının MIMO olarak çalışmasına engel olmaktadır. Verimli bir MIMO sistemi için anten elemanları arasındaki izolasyonun iyileştirilmesi gerekmektedir. Literatürde, anten elemanları arasındaki izolasyonunu iyileştirmeye yönelik bazı yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemlerden en etkili olanları, anten elemanlarının dikey olarak yerleştirilmesi [Mallahzadeh vd., 2009], ışıyan düzlemde veya toprak düzlemde parazitik eleman kullanılması [Zhengyi vd., 2012] ve boşluk açılmasıdır [Zhang vd., 2012]. Işıyan elemanlara ilave olarak uygun parazitik eleman ve boşlukların tasarlanması da MIMO anten tasarımında önemli bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

UWB (ultrawideband) sistemler, düşük enerji seviyesinde geniş bant sinyal iletimine olanak sağladığı için son yıllarda büyük ilgi görmektedir [Liang vd., 2005; Sadat vd., 2007; Zaker vd., 2007; Kaiser vd., 2009; FCC, 2002]. Bu sistemler daha çok, yüksek hızlı iletişim, radar görüntüleme ve kanser algılama gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [Kaiser vd., 2009]. Özellikle, FCC'nin (Federal Communications Commission) 3.1 GHz'den 10.6 GHz'e kadarki frekans aralığını lisanssız kullanıma izin verdikten sonra UWB sistemler daha çok ilgi görmüştür [FCC, 2002]. UWB SISO antenler literatürde çok çalışılmıştır [Liang vd., 2005; Sadat vd., 2007; Zaker vd., 2007; Kaiser vd., 2009]. UWB MIMO antenler ile ilgili ölçüleri ve geometrileri farklı, anten boyutlarının küçültülmesi, izolasyon ve empedans bant genişliğini artırmaya yönelik literatürde çalışmalar yapılmıştır. Detaylı bir karşılaştırma ayrıca bölüm 4.1.4'de verilmiştir. Burada, yalnızca literatürde önerilen antenlerin öne çıkan özellikleri verilecektir. Özdeş monopol elementler kullanılarak oluşturulmuş MIMO

anten dizileri [Zhang vd., 2009; Lee vd., 2012; Antonino-Daviu vd., 2010; Li vd., 2012; Liu vd., 2013; Cheng vd., 2008; Cheng vd., 2008; Chacko vd., 2012] ve aynı özelliklerde ancak parasitik yapılar kullanılarak elde edilmiş antenler [Najam vd., 2009; Wang ve Huang, 2012; Mohammad vd., 2013; Jusoh vd., 2012] literatürde önerilmiştir. Parasitik yapılar genellikle giriş portları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için kullanılmaktadır. [Lu ve Lin, 2010; Zhang vd., 2012] tarafından özdeş olmayan elementlerden oluşmuş iki portlu antenler önerilmiştir. [Jusoh vd., 2012] ve [Zhang vd., 2012] tarafından yapılmış çalışmalarda sunulan antenler, sırasıyla UWB frekans aralığını karşılayamayan 2.8–8.0 GHz ve 3.1–5.15 GHz frekans aralığında çalışmaktadır.

Gezgin terminaller için literatürde son yıllarda birkaç MIMO anten tasarımı önerilmiştir. [Ling ve Li, 2011] tarafından, 15 x 50 mm² boyutlarında, 2.4 ve 5.8 GHz frekanslarında çalışan sırt sırta yerleştirilmiş iki monopol elemandan oluşan bir MIMO anten tasarımı sunulmuştur. Bu çalışmada, anten elemanları arasındaki izolasyonu artırmak için kısa devre pin uygulaması yapılmıştır. 15 x 25 mm² boyutlarında iki simetrik ışık elemandan meydana gelen kompakt bir MIMO anten ve anten elemanları arasındaki izolasyonu ve empedans uyumunu artırmak için toprak düzlemde iki ince boşluk, [Li vd., 2012] tarafından önerilmiştir. LTE uygulamasına yönelik çift bantlı 803–823 MHz ve 2440–2900 MHz frekans bantlarını destekleyen “4” şekilli bir MIMO anten, [Sharawi vd., 2012] tarafından geliştirilmiştir. Diğer taraftan, anten tasarımı büyük olduğu için gezgin kartın büyük bir bölümünü kapsamaktadır. [Rao ve Wilson, 2011] tarafından, iki kollu bükülmüş monopollerden oluşan çok bantlı bir anten sunulmuştur. Burgulu iki hatlı, parasitik halkalı ve kısa devre şeritli simetrik iki monopol elemandan oluşan bir MIMO anten, [Shoaib vd., 2014] tarafından tasarlanmıştır. Bu çalışmada, anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için toprak düzlemde iki ters-L şekilli kol ve bir dikdörtgen boşluk önerilmiştir. Literatürde önerilen MIMO anten tasarımları, geometri ve boyut olarak değişmekle birlikte, antenlerin çoğu belirli bir frekans aralığını desteklemektedir ve gezgin terminallerde kullanmak için nispeten büyüktür. Bu nedenle, literatürde ve endüstride taşınabilir cihazlara yerleştirilebilen, LTE, WiMAX ve WLAN standartlarına uyumlu küçük, ince ve geniş bant MIMO anten tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kompakt, geniş bant, üç yeni MIMO anten tasarlanmıştır ve prototipleri gerçekleştirilmiştir. Anten elemanları arasındaki etkileşimi azaltmak için yeni teknikler geliştirilmiştir. Birinci anten, UWB uygulamalarına yönelik iken ikinci ve üçüncü MIMO antenler ise LTE, WiMAX ve WLAN standartlarına uyumlu gezgin terminaller için tasarlanmıştır.

Birinci MIMO anten yapısı, iki özdeş elemandan oluşmaktadır. Her eleman, bir düzlemsel monopol ve yaklaşık yarı ölçülere sahip iki toprak düzlemden oluşmaktadır. Anten elemanları arasındaki korelasyonu azaltmak için elemanlar birbirine göre dikey olarak konumlandırılmıştır. $26 \times 55 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki anten, 3.1–12.3 GHz frekans bandında çalışmaktadır. Bu çalışma frekans aralığı, UWB bandı için FCC tarafından belirlenen 3.1–10.6 GHz frekans aralığını desteklemektedir.

İkinci anten, simetrik olarak yerleştirilmiş iki özdeş ışık saçan elemandan oluşmaktadır. Geniş bir çalışma bandı elde edebilmek için her eleman, farklı çalışma frekansına sahip şerit beslemeli dört monopol kolun yan yana yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Işıyan elemanlar arasındaki izolasyonu artırmak için toprak düzleminde yeni bir T şekilli parasitik eleman geliştirilmiştir. Böylece, $10 \times 17.7 \text{ mm}^2$ boyutlarında ve 1.79–3.77 GHz frekans bandında çalışan bir MIMO anten elde edilmiştir. Küçük boyutlarda olan anten, LTE, WiMAX ve WLAN standartlarının önemli bantlarını desteklemektedir.

Üçüncü anten ise özdeş iki ışık saçan elemandan meydana gelmiş ve her eleman, koaksiyel beslemeli, şerit hatlı, bükülmüş dört ışık saçan monopol kolun bir araya getirilmesiyle oluşmuştur. Monopol kollar, geniş bir çalışma bandı sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. Anten elemanları arasında korelasyonu azaltmak için, anten elemanları gezgin kartın köşelerine simetrik ve dikey olarak yerleştirilmiştir. Anten, bu geometrik formda iken MIMO olarak çalışması için antenler arasında yeterli izolasyon seviyesini karşılamasına rağmen, izolasyonu daha da artırmak için toprak düzleminde bir T şekilli parasitik eleman tasarlanmıştır. Her elemanı $15.5 \times 16.5 \text{ mm}^2$ boyutlarında olan MIMO anten, 1.8–4.0 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Bu frekans aralığı, LTE, WiMAX ve WLAN gibi çok önemli kablosuz iletişim standartlarının çalıştığı bantları kapsamaktadır.

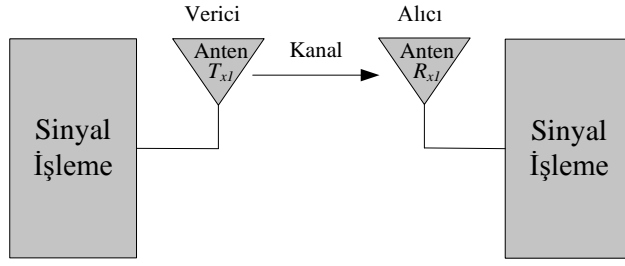
Bu tez çalışmasında tasarlanan MIMO anten yapıları, MoM'a (method of moment) [Harrington, 1993] dayanan IE3D™ [IE3D™, versiyon 14] isimli bilgisayar tabanlı bir paket program kullanılarak tasarlanmıştır. Antenlerin performansları, S-parametreleri, ışınma örüntüsü, yüzey akım dağılımı, kazanç, ECC ve TARC (total active reflection coefficient) yönünden incelenmiştir. Anten tasarım prosedürleri detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca, anten geometrilerinin S-parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tasarım aşaması başarılı olarak tamamlanan antenlerin, çift yüzü bakır, 1.6 mm kalınlığında ve 4.4 dielektrik sabitine sahip FR4 materyal üzerine LPKF-ProtoMat H60 CNC (computer numerical control) cihazı kullanılarak prototipleri gerçekleştirilmiştir. Anten prototiplerinin S-parametre ölçümleri, Agilent Technologies N5230A PNA-L RF network analizör kullanılarak elde edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Bu bölümde, öncelikle klasik SISO sistemleri ve bu sistemlerin özelliklerinden bahsedilecektir. MIMO sistemleri ve bu sistemlerde kullanılan iletişim teknikleri anlatılacaktır. Sonra, kablosuz iletişim standartlarına giriş yapılacak ve bu standartların kullandıkları frekans bantları verilecektir. Son olarak, MIMO sistemlerinin en önemli kısmı olan anten tasarımı, mikroşerit anten tipleri, MIMO uygulamaları ve literatürde önerilmiş bazı MIMO antenler sunulacaktır.

2.1. SISO SİSTEMLERİ

SISO sisteminde karşılıklı tekli antenler arasındaki tek kanal üzerinden kablosuz iletişim sağlanmaktadır. Şekil 2.1’de temel bir SISO mimarisi gösterilmiştir. Veri alışverişi sırasında antenler arasında direk görüş olmadığı (non-line of sight–NLOS) durumda, ortamda bulunan yapılardan yansıma ve saçılmalarından dolayı alıcıya ulaşan sinyal sönmeye (fading), gecikmeye, faz ve açı bozulmasına uğramaktadır. İletilen sinyalin gücünün kontrol edilmesi ile bu durumun önüne kısmen geçilebilmektedir. Diğer taraftan, ortamda bulunan istenmeyen diğer elektromanyetik kaynaklar da gürültü olarak bozucu etki yapmaktadır. Kanal durumu bilgisi (KDB: state channel information–SCI) verici tarafından biliniyorsa, sinyal verici tarafında gürültüyü azaltacak şekilde gönderilerek gürültü etkisi azaltılabilmektedir. Bu durumda, verici sönmeye etkisini yok etmek için aynı şekilde verici gücünün ve dinamik aralığının artırılması gerekmektedir. Pratikte güç artırımı, gerek yayılan güç sınırlaması gerekse kullanılan güçlendiricilerin maliyeti ve büyüklüğü açısından istenmemektedir. Ayrıca, verici ile alıcı arasında çift yönlü bir iletişimin olmadığı sistemlerde KDB bilinmemektedir. Bu ise çift yönlü (kapalı) sistemler kullanılarak yapılabilsede bu durum sistemin karmaşıklığını arttırdığından ve sisteme yük getirdiğinden istenmemektedir [Örtlek ve Taşpınar, 2005].



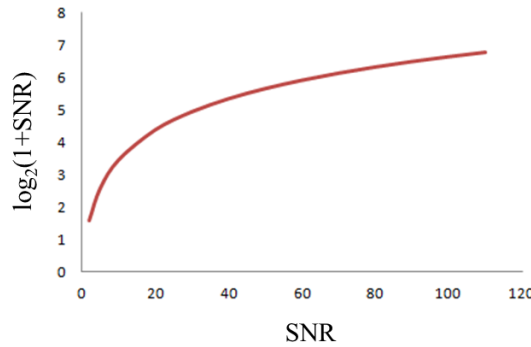
Şekil 2.1. Temel SISO mimarisi

2.1.1. SISO Kanal Kapasitesi

[Shannon, 1948], güvenli iletişimin limitlerini belirleyen iletişim teorisini ortaya koymuştur. Shannon'dan önce gürültülü bir kanaldan güvenli iletişim yapmanın yolunun sadece, hata olasılığını istenilen seviyeye düşürmek için veri iletim oranının düşürülmesi (tekrar kodlama) ile yapılabileceğine inanılıyordu. Shannon, bunun doğru olmadığını ve daha akıllı veri kodlaması yardımıyla istenilen hata olasılığı ile iletişim yapılabileceğini gösterdi [Tse ve Viswanath, 2005]. İletişimde, bir kanalın gürültüye bağlı azami bir hızı (throughput) vardır. Bunun hesabı, aşağıdaki kanal kapasitesi formülü ile yapılır [Shannon, 1948].

$$C = W \log_2(1 + SNR) \quad (2.1)$$

Burada; W , kanalın bant genişliğini ve SNR (signal to noise ratio) ortama sinyal gücünün ortalama gürültü gücüne oranını ifade etmektedir. Şekil 2.2'de SNR değişiminin $\log_2(1 + SNR)$ üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

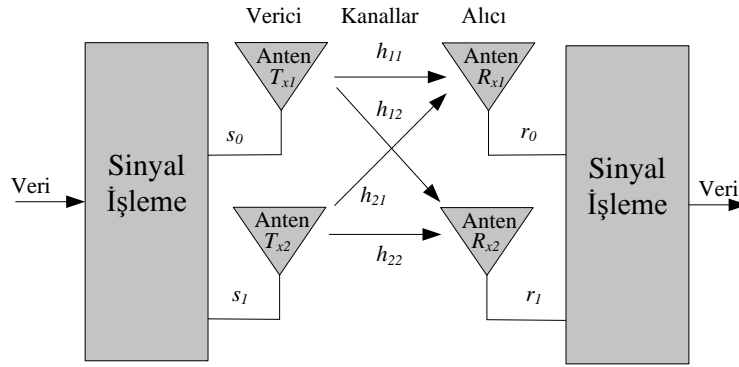


Şekil 2.2. SNR değişiminin $\log_2(1 + SNR)$ üzerindeki etkisi

Şekilde görüldüğü gibi düşük SNR değerlerinde kapasite doğrusal olarak, yüksek SNR değerlerinde ise logaritmik olarak artmaktadır [Tse ve Viswanath, 2005].

2.2. MIMO SİSTEMLERİ

SISO sisteminde bulunan sinyal sönümlenme ve bozulma etkilerini azaltmaya yönelik en etkili çözüm, çeşitleme ve uzaysal çoğullama tekniklerini kullanan MIMO teknolojisidir [3gpp.org, 2014; E-UTRA, 2014; Tse ve Viswanath, 2005; Hanzo vd., 2011; Kaise ve Zheng, 2010; Balanis, 2007]. Uzaysal çoğullama, fiziksel ara yüz elemanları olan antenler üzerinden yapılmaktadır. Şekil 2.3'te temel bir 2 x 2 MIMO mimarisi gösterilmiştir. Karşılıklı olarak, verici tarafında M adet anten elemanının ve alıcı tarafında N adet anten elemanının kullanıldığı $M \times N$ MIMO sisteminde $M \times N$ adet kanal bulunmaktadır.



Şekil 2.3. 2 x 2 MIMO mimarisi

Şekil 2.3'de gösterilen dört kanallı MIMO sistemi modelinde, alıcı tarafından alınan sinyallere ilave olarak gürültü parametreleri eklenir. Bu sinyaller, şu şekilde ifade edilir [Alamouti, 1999].

$$\begin{aligned} r_0 &= h_{11}s_0 + h_{12}s_1 + n_0 \\ r_1 &= h_{21}s_0 + h_{22}s_1 + n_1 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Burada; h_{11} , h_{12} , h_{21} ve h_{22} , kanal karakteristiklerini; n_0 ve n_1 gürültü katsayılarını ifade etmektedir. Eşitlik (2.2)'nin matris formu şöyle olur.

$$R = HS + N \quad (2.3)$$

Bu eşitlikteki matrisler aşağıdaki gibidir.

$$R = \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} n_0 \\ n_1 \end{bmatrix} \text{ ve } S = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

SISO sisteminde dezavantaj olarak bilinen çeşitleme etkisi, MIMO’da önemli bir avantaja dönüşmektedir. Verici tarafından gönderilen sinyal, ortamda bulunan yapılardan dolayı saçılmaya uğrar. Alıcı terminalin gezgin olduğu düşünülürse kanal durumu anlık olarak değişebilmektedir. Bu etkiler, sinyalin bağımsız olarak her kanalda farklı sönümlenmesine neden olacaktır. Anlık değişen olumsuz etkilerden dolayı, iletilen sinyal bazı kanallarda az, bazı kanallarda ise çok sönümlenmektedir. Böylece, alıcı tarafına her biri farklı sönümlemeye uğramış sinyal kopyaları ulaşacaktır. Alıcı tarafında, bu kopyalar *çeşitleme teknikleri* kullanılmak suretiyle birleştirilerek orijinal sinyal tekrar elde edilir [Alamouti, 1999; Tarokh ve Seshadri, 1998; Brennan, 2003; Isomaki ve Isoaho, 2008]. Çeşitleme tekniklerinin veri iletim oranına (hızına) bir etkisi yoktur. Bu teknikler ile hata oranı büyük ölçüde azaltılarak sinyalin tekrar gönderilmesinin önüne geçilebilir. Çeşitleme teknikleri, alıcıda ve vericide çoklu anten kullanımına bağlı olarak, *alıcı çeşitleme* ve *verici çeşitleme* olarak ikiye ayrılır. Alıcı çeşitleme teknikleri, alıcı tarafında çoklu antenler üzerinden alınan farklı seviyelerde bozulmaya uğramış sinyal kopyalarından, orijinal sinyalin elde edilmesinde kullanılır. Verici çeşitleme teknikleri ise, bunun tersi olarak, verici tarafında çoklu antenler üzerinde iletilen sinyal kopyalarının, alıcı tarafında tekrar elde edilmesini sağlar. Önceleri, alıcı çeşitleme teknikleri KDB’ye ihtiyaç duymadığı için daha çok kullanılmaktaydı. Daha sonra, uzay zaman blok kodlama (UZBK) [Alamouti, 1999] ve uzay zaman kafes kodlama (UZKK) [Tarokh ve Seshadri, 1998] gibi KDB’ye ihtiyaç duymayan verici çeşitleme tekniklerinin geliştirilmesiyle son yıllarda bu teknikler daha çok kullanılmaya başlamıştır.

MIMO sistemlerinde kullanılan diğer bir teknik *uzaysal çoğullama*dır (spatial multiplexing). Uzaysal çoğullamada, OFDM modülasyon tekniği kullanılarak birbirine dik alt bantlara bölünen veri, MIMO’nun çoklu kanalları üzerinden alıcıya iletilmektedir. Alıcı tarafında, bu veri bantları birleştirilerek orijinal sinyal elde edilmektedir. Böylece, toplam kanal kapasitesi olarak artmakta ve yüksek spektral

verim sağlanmaktadır. Uzaysal çoğullama ile veri iletim oranı artırılırken, çeşitleme tekniği ile hata oranı azaltılarak yüksek verim elde edilmektedir. MIMO sistemlerinde uzaysal çoğullama ve çeşitleme teknikleri ayrı ayrı kullanılabilirdiği gibi her iki teknik *hibrit* [Win ve Winter, 1999] olarak kullanılabilir.

Yukarıda bahsedildiği gibi karşılıklı verici tarafında M ve alıcı tarafında N adet antene sahip bir MIMO sisteminde $M \times N$ sayısı kadar bağımsız paralel kanal oluşmaktadır. Kanal sayısının artması, kullanılacak sistemin maliyetini artırmaktadır. Bu nedenle, MIMO’da kullanılan sözü edilen tekniklerin yanında, en az zayıflama ve hata oranına sahip iletişim kanallarının seçimi esasına dayanan *anten seçme* (antenna selection) teknikleri kullanılır [Gore ve Paulraj, 2002; Gorogkhov, 2003]. Anten seçme teknikleri en çok alıcı tarafında uygulanmaktadır. Verici tarafında, M antenden performansı yüksek olan M_s anten seçilmekte ve alıcı tarafında N antenden performansı yüksek olan N_s anten seçilmektedir. Böylece sistemin kanal sayısı $M_s \times N_s$ olmaktadır.

2.2.1. MIMO Kanal Kapasitesi

MIMO sisteminin kanal kapasitesinin hesaplamasına yönelik ilk çalışma [Teletar, 1999] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada önerilen ifade, aşağıda verilmiştir.

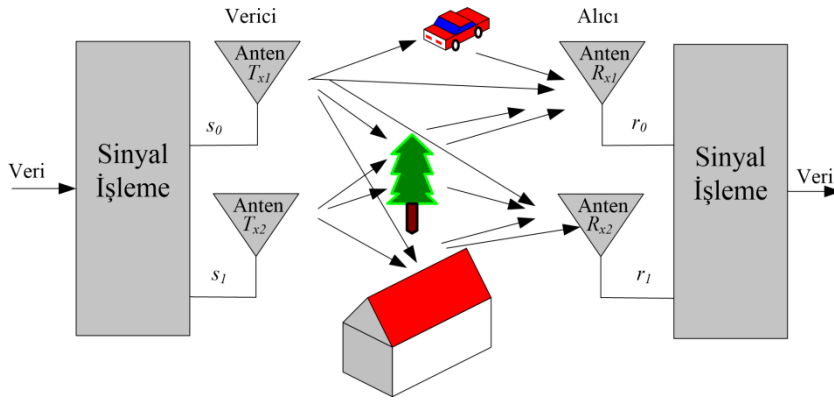
$$C = \log_2 \det \left[I_{N_r} + \frac{SNR}{N_t} H_n H_n^H \right] \quad (2.6)$$

Burada; N_r ve N_t , sırasıyla alıcı ve verici anten sayılarını; I_{N_r} , $N_r \times N_r$ boyutlarına sahip birim matrisini; SNR alıcı tarafındaki sinyal gürültü oranını; H_n , aynı polarizasyona sahip 1×1 dipol anten referans alınarak normalize edilmiş kanal matrisini ve H^H eşlenik transpozunu ifade etmektedir.

2.2.2. Çeşitleme Teknikleri

Kablosuz iletişim sistemlerinde güvenlik, zayıflamadan dolayı büyük oranda azalmaktadır. Şekil 2.4’de, örnek bir kablosuz iletişim ortamı gösterilmiştir. İletilen sinyal, ortamda bulan çeşitli yapılar ve objelerden saçılmak suretiyle alıcıya ulaşır. Alıcıya ulaşan bu sinyaller farklı seviyelerde bozulmaya uğrar. Sönümlenmenin

bozucu etkisini azaltarak haberleşme güvenliğini yeterli seviyede tutmanın en verimli yollarından biri, çeşitleme tekniklerini uygulamaktır. Uygulanma şekilleri ve uygulandıkları birimler farklı olsa da, bütün çeşitleme tekniklerinin dayandığı esas prensip, vericiden alıcıya gönderilmek istenen sinyalin, birbirinden bağımsız sönümlenme etkilerine maruz kalmış kopyalarından asıl sinyali oluşturmaktır [Alamouti, 1999; Tarokh ve Seshadri, 1998; Brennan, 2003; Isomaki ve Isoaho, 2008].

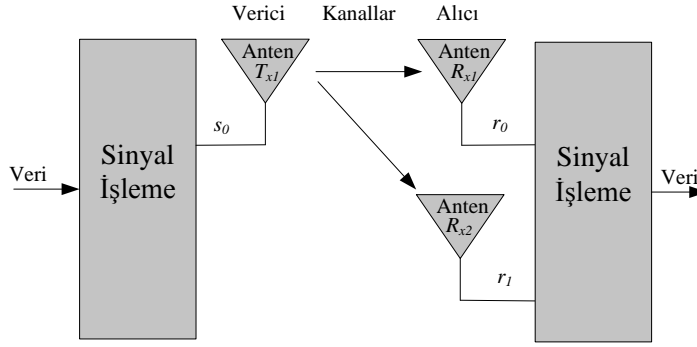


Şekil 2.4. Çeşitleme senaryosu

Çeşitlemede amaç, iletim hattını hatalara karşı daha güçlü duruma getirmektir. Çeşitleme tekniklerinin uygulanması ile veri oranı artmaz. Bu teknikte, farklı kanallar üzerinden daha fazla veri iletimi yapılarak alıcı tarafında asıl sinyalin yeniden oluşturulması sağlanmaktadır. Bu yapıda, aynı veri birden fazla kanaldan gönderilmektedir. Çeşitleme teknikleri, verici ve alıcı tarafındaki çoklu anten kullanımına bağlı olarak değişmektedir [Alamouti, 1999; Tarokh ve Seshadri, 1998; Brennan, 2003; Isomaki ve Isoaho, 2008]. Bu yöntemler, alıcı ve verici çeşitleme olarak ikiye ayrılmaktadır.

2.2.2.1. Alıcı çeşitleme teknikleri

Alıcı çeşitleme, Şekil 2.5’de gösterildiği gibi iletişim hattının alıcı tarafında çoklu anten kullanılması ile sağlanır (Receive Diversity) [Alamouti, 1999; Tarokh ve Seshadri, 1998; Brennan, 2003; Isomaki ve Isoaho, 2008]. Bu teknik, hata oranını iyileştirmek için alıcı tarafında farklı seviyelerde zayıflamaya uğramış sinyallerin ve farklı transfer fonksiyonlarının kullanımına dayanmaktadır. Sinyaller, daha sonra çeşitleme teknikleri yardımıyla birleştirilir.



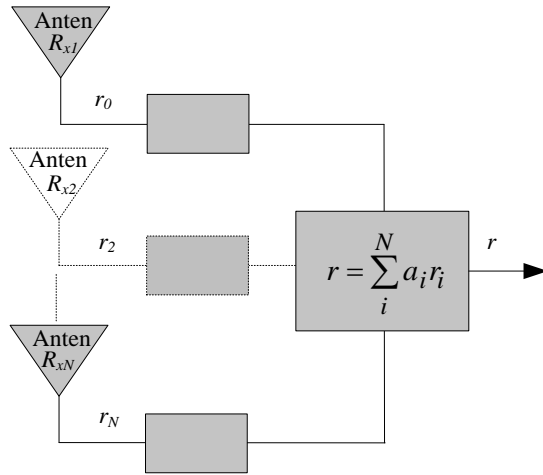
Şekil 2.5. İki antenli alıcı çeşitleme tekniği

Birleştirmeli çeşitleme teknikleri

Alıcı çeşitleme teknikleri içerisinde, çoklu alıcı antenden elde edilecek bağımsız etkilere maruz kalmış sinyallerin belirli ağırlık katsayıları ile seçilmesi veya birleştirilmesi esasına dayanan teknikler ön plandadır [Brennan, 2003; Isomaki ve Isoaho, 2008]. Şekil 2.6'da bu tekniğin genel çalışma şeması verilmiştir. Alıcı tarafında elde edilen toplam sinyal Eşitlik (2.7)'de verilen ifade kullanılarak birleştirilir. Genellikle birleştirmeli çeşitleme (Combining Diversity) teknikleri olarak adlandırılan bu tekniklerden en önemlileri; seçmeli birleştirme, eşit kazançlı birleştirme ve azami oranlı birleştirmedir [Isomaki ve Isoaho, 2008].

$$r = \sum_i^N a_i r_i \quad (2.7)$$

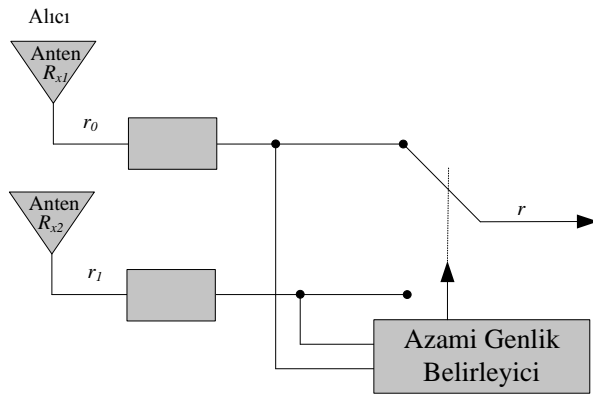
Burada; r_i , r , a_i ve N , sırasıyla, alıcı antenlerden alınan sinyal, birleştirilen sinyal, alının sinyal katsayısı ve anten sayısını ifade etmektedir. Sinyal katsayısının a_i belirlenmesi kullanılan tekniklere göre farklılık göstermektedir.



Şekil 2.6. Birleştirmeli çeşitleme tekniğinin genel çalışma prensibi

Seçmeli çeşitleme

Seçmeli çeşitleme (Selection Diversity) tekniğinin temel çalışma prensibi, Şekil 2.7’de gösterilmiştir [Brennan, 2003; Isomaki ve Isoaho, 2008]. Buna göre, iletim kanalları üzerinden alınan sinyaller faz uyumlaştırması yapıldıktan sonra, işaretler içerisinde en iyi yol kazancını sağlayan bir anten seçilmektedir ve çıkıştaki karar devresine uygulanmaktadır. Diğer sinyaller kullanılmamaktadır. Karmaşık devre elemanları kullanılmadan uygulanılabilen bir tekniktir. Ancak, devre karmaşıklığı açısından sağlanan bu avantaj, hata performansında daha düşük kazanç ile sonuçlanmaktadır.



Şekil 2.7. Seçmeli çeşitleme tekniğinin genel çalışma prensibi

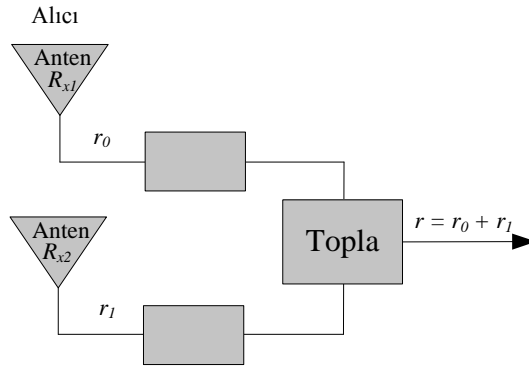
Eşit kazançlı birleştirme

Eşit kazançlı birleştirme (Equal Gain Combining–EGC) tekniğinde, Şekil 2.8’de gösterildiği gibi alıcı tarafında ağırlıklandırma yapılmaksızın sinyaller

birleştirilmektedir. Yani, alınan tüm sinyaller genliklerine bakılmaksızın aşağıda verilen eşit kazanç faktörü ile çarpılarak toplanması esasına dayanmaktadır [Brennan, 2003; Isomaki ve Isoaho, 2008].

$$a_i = e^{-j\varphi_i} \quad (2.8)$$

Burada; φ_i alınan sinyalin fazını ifade etmektedir. Sinyaller eş fazlıdır (co-phased) ve birlikte toplanır.

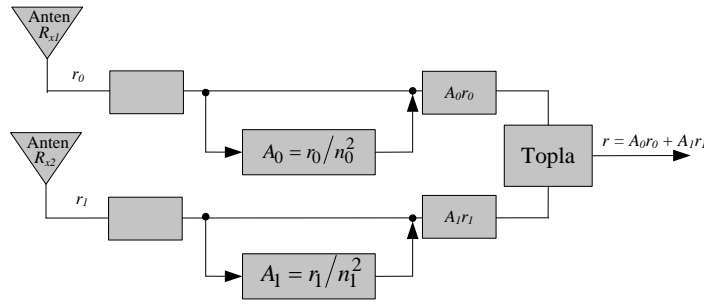


Şekil 2.8. Eşit kazançlı birleştirme tekniğinin genel çalışma prensibi

Azami oranlı birleştirme

Azami oranlı birleştirme (Maksimum Ratio Combining–MRC) tekniği, [Kahn, 1954] tarafından ortaya atılmıştır. Bu teknikte, her alıcı anten tarafından alınan sinyalin iletiildiği kanala ait KDB tahmini ve işaretler için faz uyumlaştırma işlemi yapılır. Daha sonra, her kanaldaki sinyal, kendi genliğine orantılı bir ağırlık faktörü ile ağırlıklandırılarak Şekil 2.9’da verildiği gibi birleştirilir. Ağırlık faktörü aşağıda verilmiştir. Böylece, güçlü sinyal daha da güçlendirilir ve zayıf sinyal daha da zayıflatılır [Isomaki ve Isoaho, 2008].

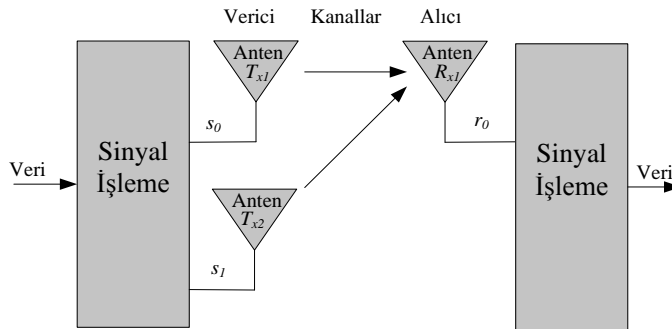
$$a_i = A_i e^{-j\phi_i} \quad (2.9)$$



Şekil 2.9. Azami oranlı birleştirme tekniğinin genel çalışma prensibi

2.2.2.2. Verici çeşitleme teknikleri

Verici çeşitleme (Transmit Diversity), Şekil 2.10'da gösterildiği gibi verici tarafında sinyalin çoklu antenler üzerinden gönderilmesi esasına dayanmaktadır. Alıcı çeşitleme teknikleri [Alamouti, 1999; Tarokh ve Seshadri, 1998], alıcı tarafında ilave devrelerin kullanılmasını gerektirdiği için güç ve sistem gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Gezgin sistemler göz önünde tutulduğunda, alıcı tarafında uygulamada zorluklar oraya çıkmaktadır. Verici anten çeşitleme tekniklerinin, baz istasyonu gibi, gezgin terminale kıyasla güç tüketimi ve devre karmaşıklığı açısından daha esnek olan merkezi birimlerde uygulanması çok daha kolaydır. Bu tekniklerin bazıları, vericiden iletilen işaretlerin alıcıda karışmadan alınabilmesi için bir kodlama veya işaret işleme tekniğine ihtiyaç duyarken, bazıları da alıcı birimde yapılan kanal tahmini sonucu elde edilen KDB'ye ihtiyaç duymaktadırlar. Bu da, alıcı birimden verici birime bir geri besleme yükü anlamına gelmektedir.



Şekil 2.10. İki antenli verici çeşitleme

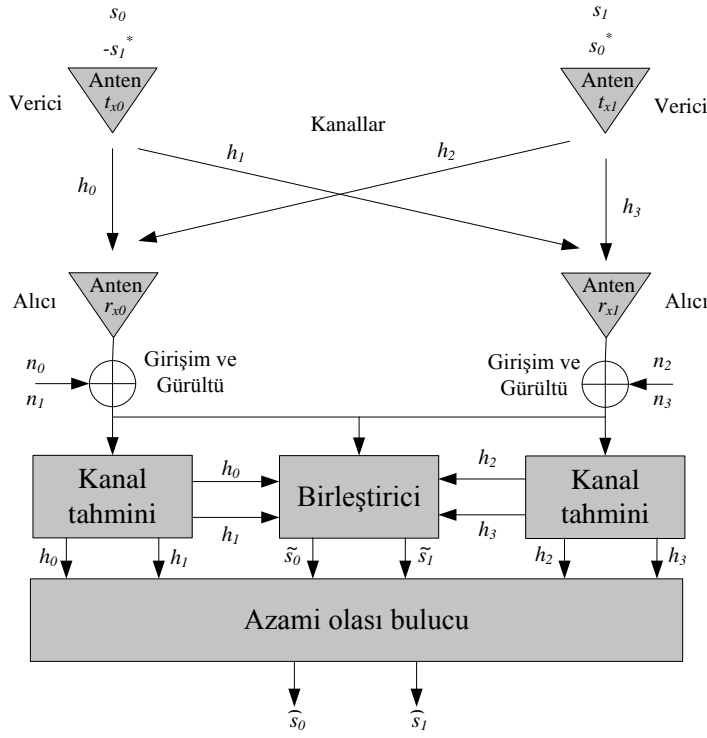
İletim için KDB'ye ihtiyaç duymadan çeşitleme sağlayan teknikler arasında en önemli payı, UZBK (Space Time Block Coding–STBC) [Alamouti, 1999] ve UZKK (Space Time Trellis Coding–STTC) [Tarokh ve Seshadri, 1998] almaktadır. Bu teknikler içerisinde, daha basit kodlayıcı ve kod çözücü devre yapıları ile gerçekleştirilebildikleri için UZBK ön planda olmuştur.

Uzay zaman blok kodlama (UZBK) çeşitleme tekniği

Alıcı tarafında gerçekleştirilen birleştirme tekniklerinden en önemlisi olan UZBK tekniği, vericide kullanılan çoklu antenlerin, belirli algoritmaları kullanarak iletim yapma esasına dayanmaktadır. Burada, iletim algoritmaları farklı işaretleşme anlarında verici antenlerin iletecekleri farklı veri sinyallerini belirten iletim matrisleridir. UZBK kod ailesinin reel ve kompleks formda birçok üyesi olmakla birlikte, tam çeşitleme sağlamaları nedeniyle kompleks tasarıma sahip 2 x 2 UZBK üyesi ele alınmıştır. Bu nedenle, Şekil 2.11'de bir 2 x 2 MIMO sistem modeli gösterilmektedir. Verici tarafında iletimin iki anten kullanılarak yapılmasını öngören yapı, [Alamouti, 1999] tarafından geliştirilmiştir. Bu yapı ile UZBK kodlayıcı girişindeki farklı iki sinyalin kompleks doğrusal kombinasyonları, iki zaman aralığında ve iki verici anten üzerinden iletilmektedir.

Bu sistemin kanal parametreleri, Eşitlik (2.10)'da verilmiştir. Sisteme girilen sinyallerin zamanı ve sırası Çizelge 2.1'de verilmiştir. t zamanında Anten 0'dan, s_0 ve Anten 1'den s_1 iletilirken, bu sinyaller alıcı tarafından sırasıyla, r_0 ve r_1 sinyalleri olarak alınmaktadır.

$$\begin{aligned} h_0(t) &= h_0(t+T) = h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0} \\ h_1(t) &= h_1(t+T) = h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \\ h_2(t) &= h_2(t+T) = h_2 = \alpha_2 e^{j\theta_2} \\ h_3(t) &= h_3(t+T) = h_3 = \alpha_3 e^{j\theta_3} \end{aligned} \quad (2.10)$$



Şekil 2.11. 2 x 2 antenli UZBK çeşitleme senaryosu [Alamouti, 1999]

Çizelge 2.1. Verici ve alıcı antenlerin alış ve veriş sırası

Zaman	Verici		Alıcı	
	Anten 0	Anten 1	Anten 0	Anten 1
t	s_0	s_1	r_0	r_2
$t+T$	$-s_1^*$	$-s_0^*$	r_1	r_3

Parametreleri Eşitlik (2.10)'da verilen kanallar üzerinden iletilen sinyallere gürültü ve karışım alıcı da eklenir. Neticede, oluşan alıcı temel bant sinyalleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 r_0 &= h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \\
 r_1 &= -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \\
 r_2 &= h_2 s_0 + h_3 s_1 + n_2 \\
 r_3 &= -h_2 s_1^* + h_3 s_0^* + n_3
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Burada; n_0 , n_1 , n_2 ve n_3 karmaşık rastgele termal gürültüyü ve girişimi ifade etmektedir. Bunların Gaussian dağılımlı olduğu varsayılmaktadır. Birleştiricide

(combiner) elde edilen aşağıdaki sinyaller, azami olası bulucuya (maximum likelihood detector) [Tse ve Viswanath, 2005; Alamouti, 1999] iletilir.

$$\begin{aligned}\tilde{s}_0 &= h_0^* r_0 + h_1^* r_1^* + h_2^* r_2 + h_3^* r_3 \\ \tilde{s}_1 &= h_1^* r_0 - h_0^* r_1^* + h_3^* r_2 - h_2^* r_3\end{aligned}\quad (2.12)$$

Eşitlik (2.10) ve (2.11)'de verilen ifadeler, Eşitlik (2.12)'de yerine konulduğunda aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\begin{aligned}\tilde{s}_0 &= (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2) s_0 + h_0^* n_0 + h_1^* n_1^* + h_2^* n_2 + h_3^* n_3 \\ \tilde{s}_1 &= (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2) s_1 - h_0^* n_0 + h_1^* n_0 - h_2^* n_3 + h_3^* n_2\end{aligned}\quad (2.13)$$

Bu birleşik sinyaller, azami olası bulucu çözücüsüne gönderilir ve s_0 sinyali için aşağıdaki karar kriteri kullanır. Eğer,

$$(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1) |s_i|^2 + d^2(\tilde{s}_0, \tilde{s}_i) \leq (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1) |s_k|^2 + d^2(\tilde{s}_0, \tilde{s}_k) \quad (2.14)$$

ise azami olası bulucu, s_i 'yi seçer. Benzer olarak, s_1 sinyali için aşağıdaki karar kuralı kullanılır. Eğer,

$$(\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1) |s_i|^2 + d^2(\tilde{s}_1, \tilde{s}_i) \leq (\alpha_0^2 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 - 1) |s_k|^2 + d^2(\tilde{s}_1, \tilde{s}_k) \quad (2.15)$$

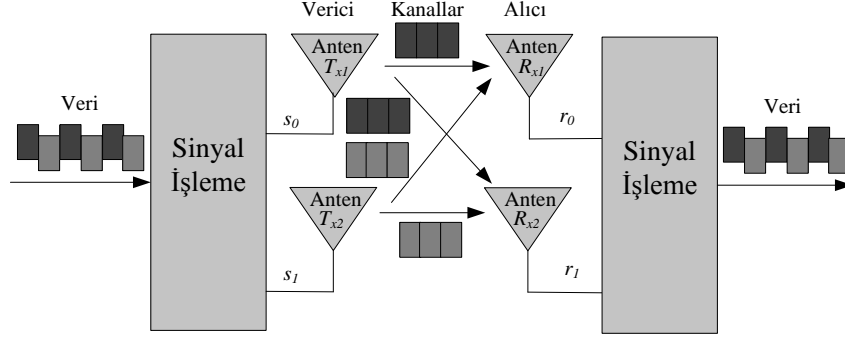
ise azami olası bulucu, s_i 'yi seçer. $d^2(x, y)$, x ve y arasındaki Euclidean mesafesinin karesini ifade etmektedir ve bu da aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanır.

$$d^2(x, y) = (x - y)(x^* - y^*) \quad (2.16)$$

2.2.3. Uzaysal Çoğullama Tekniği

Uzaysal çoğullamada amaç, veri iletim oranını artırmaktır. İletişim güvenilirliğine katkısı yoktur. Uzaysal çoğullama yapan çeşitli teknikler literatürde bulunmaktadır [Foschini, 1996; Wolniansky vd., 1998]. Bu metotların temel çalışma prensibi, Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Veri, çoklu parçalara ayrılır ve bu parçalar ayrı antenler üzerinden paralel olarak iletilir. Her kanal bağımsız olarak veri iletir ve bu

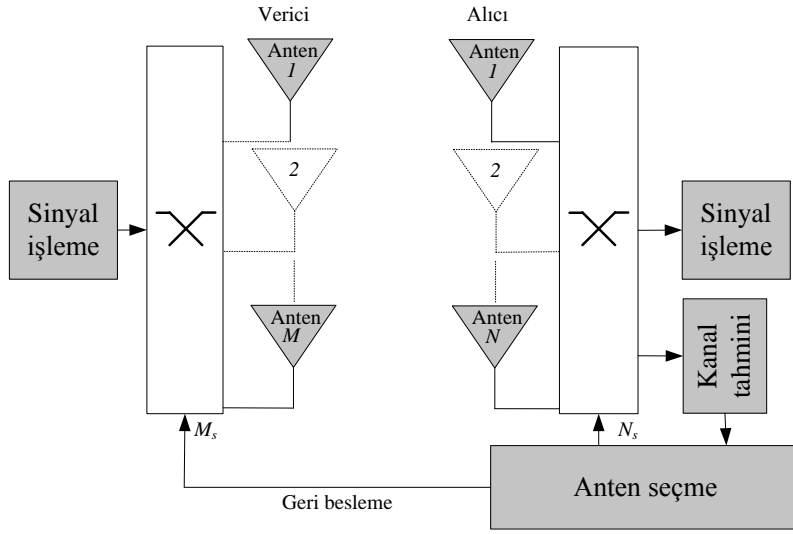
veriler alıcı tarafında birleştirilir. Böylece toplam kanal kapasitesi doğrusal olarak artırılmış olur.



Şekil 2.12. Uzaysal çoğullama tekniğinin blok gösterimi

2.2.4. Anten Seçme Tekniği

MIMO sisteminde karşılıklı anten sayısının artması kanal kapasitesini artırmaktadır. Çoklu anten kullanımında, her anten için oluşturulan donanımın maliyetli olması, bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Verici ve alıcı tarafında anten seçme tekniği [Gore ve Paulraj, 2002; Gorogkhov vd., 2003], gerekli olan *RF* zincirini, etkili ve verimli bir şekilde azaltan bir metottur. Anten seçme tekniğinin genel yapısını gösteren örnek şema, Şekil 2.13’de verilmiştir. Devre karmaşıklığının azalması, kullanılan terminallerin boyutlarını küçültmekte ve güç tüketimi açısından iyileştirici etki yapmaktadır. Bu yönüyle anten seçimi tekniği, çoklu antenli iletim tekniklerinin getirdiği çeşitleme kazancını daha düşük devre karmaşıklığı ve daha düşük güç tüketimi ile muhafaza edebildiği için önem kazanmış bir tekniktir. Bu teknikte en iyi iletimi sağlayabilecek tek bir anten seçilebileceği gibi, kanal kazançları iyi olan birkaç anten seçilerek uygun şekilde çeşitleme teknikleri uygulanabilmektedir. Bu yönüyle de, bu teknik hibrit çeşitlemeli yapılar oluşturmaya elverişli bir tekniktir.



Şekil 2.13. Anten seçimi tekniğinin genel yapısı

Şekil 2.13’de verilen sistemde, en iyi SNR değerine sahip kanallar, verici tarafında M anten içerisinde M_s ve alıcı tarafında N anten içerisinde N_s seçilerek alıcı-verici arasında kanallar oluşturulmaktadır. Verici birimde aktif olarak kullanılacak antenlerin belirlenmesi, alıcı birimde yapılan kanal tahmini işlemi sonrasında kullanılacak anten bilgilerinin geri besleme kanalı üzerinden verici tarafa iletilmesi şeklinde gerçekleşmektedir.

2.3. MIKROŞERİT ANTEN TİPLERİ VE MIMO UYGULAMALARI

MIMO sistemlerine uyumlu terminallerde genellikle, küçük boyut, hafiflik, düşük maliyet, üretim basitliği ve entegre devrelere kolay yerleşimi gibi özelliklerinden dolayı mikroşerit antenler, SISO sistemlerinde olduğu gibi MIMO anten yapılarında da tercih edilmektedir. Geometrisi, besleme yapısı ve performansı birbirine göre değişen mikroşerit anten tipleri literatürde sunulmuştur [Kumar ve Ray, 2003; Wong, 2002].

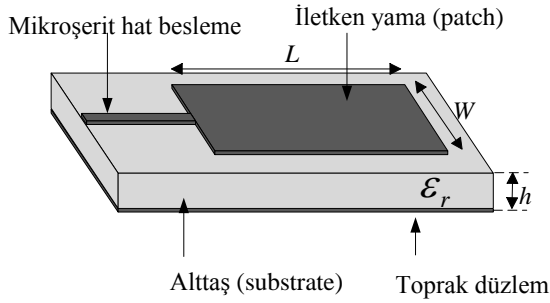
2.3.1. Mikroşerit Anten Tipleri

Tasarım ve analiz kolaylığı açısından önceleri dikdörtgen, üçgen ve daire şeklindeki yama antenler çokça kullanılmaktaydı [Kumar ve Ray, 2003; Wong, 2002]. Kablosuz gezgin cihazların küçülmesi ile birlikte kullanımının yaygınlaşması bu cihazlarda kullanılan mikroşerit antenlerin de yapı ve performans olarak bu

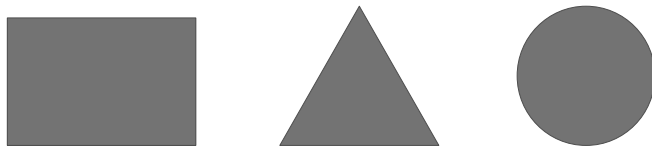
gelişmeye ayak uydurmasını gerektirmiştir. Geleneksel mikroşerit antenlere ilave olarak mikroşerit antenlerin kullanıldığı cihazlara uyumlandırılabilen, yüksek bant genişliği ve kazanç sağlayabilen CPW (coplanar waveguide) beslemeli, IFA (inverted F antenna), PIFA (planar inverted F antenna), yama ve toprak düzlemi modifiye edilmiş antenler ilgi çekmektedir.

2.3.1.1. Geleneksel mikroşerit anten

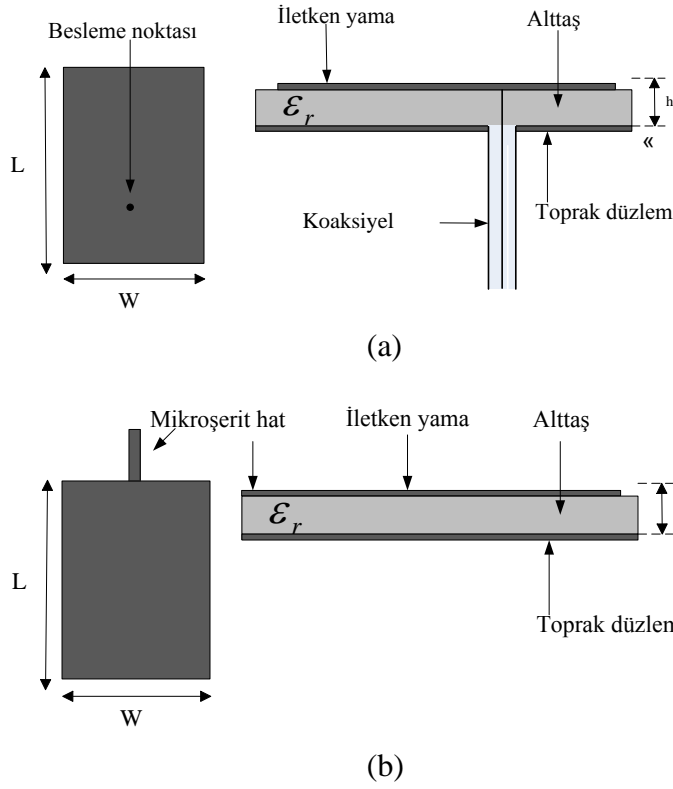
Geleneksel dikdörtgen mikroşerit anten, Şekil 2.14’te gösterildiği gibi, $L \times W$ boyutlarında dikdörtgen iletken yamanın, toprak düzlem üzerinde bulunan h yüksekliğindeki ϵ_r dielektrik sabitine sahip, alttaş malzemenin üzerine yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Şekil 2.15’de literatürde en çok kullanılan geleneksel mikroşerit anten geometrileri verilmiştir. Geleneksel mikroşerit antenler, tasarım ve analiz kolaylığına sahip oldukları için literatürde en çok incelenen anten geometrileridir. Bununla beraber bu antenler, yapı olarak nispeten büyüktür ve dar bant genişliğine sahiptir. Bu nedenle, farklı geometrilere sahip antenlerin veya geleneksel şekilli antenlerin modifiye edilmesi gerekmektedir. Şekil 2.16’da en çok kullanılan anten besleme yöntemleri olan; mikroşerit hat besleme ve koaksiyel besleme yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Dikdörtgen mikroşerit anten geometrisi



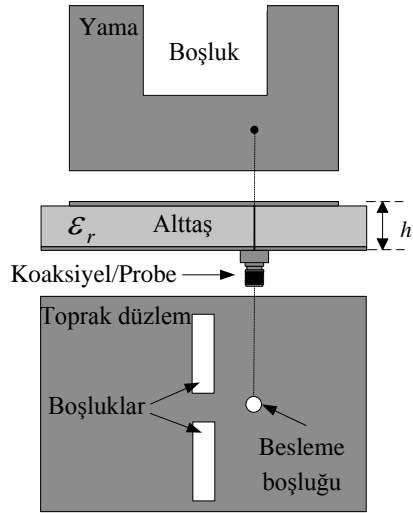
Şekil 2.15. Geleneksel mikroşerit anten geometrileri



Şekil 2.16. Temel besleme yöntemleri: a) mikroşerit hat besleme b) koaksiyel besleme

2.3.1.2. Yama ve toprak düzlemi modifiye edilmiş mikroşerit anten

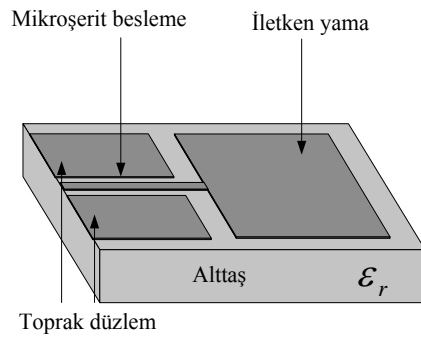
Yama ve/veya toprak düzlemi modifiye edilmiş mikroşerit antenler Şekil 2.17'de gösterildiği gibi, düzlemlere boşluk yükleme ve/veya kısa devre pin uygulanarak elde edilen anten geometrileridir. Bu yöntemleri uygun yerlerde kullanarak UWB, çoklu bant ve dairesel polarizasyonlu antenler elde etmek mümkündür. Bu özelliklere sahip anten tasarımlarını elde etmek oldukça zordur. Anten geometrisi karmaşıklaştığı için doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, el yordamı veya optimizasyon teknikleri kullanılarak çok sayıda deneme yapılarak istenilen özelliklere sahip anten tasarlanabilir.



Şekil 2.17. Yama ve toprak düzlemi modifiye edilmiş bir anten geometrisi

2.3.1.3. CPW (coplanar-waveguide) beslemeli anten

Şekil 2.18’de tipik bir CPW (coplanar waveguide) beslemeli anten geometrisi verilmiştir. Geleneksel mikroşerit antenden farklı olarak toprak düzlem de yama düzlem gibi alttaş üzerinde kullanılır. Bu antenin tasarlanmasında yukarıda anlatılan modifikasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu anten yapısının en önemli avantajı, uygun modifikasyon teknikleri kullanılarak geniş bantlı antenin elde edilebilmesidir.

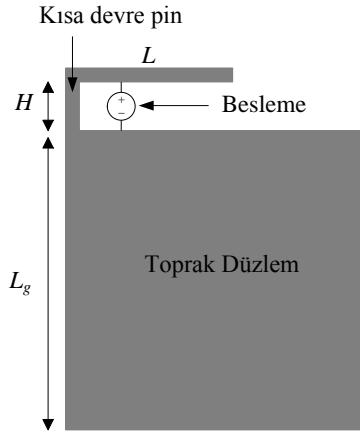


Şekil 2.18. CPW beslemeli bir anten geometrisi

2.3.1.4. IFA (inverted F Antenna)

IFA (Inverted F Antenna), toprak ile aynı düzleme bütünleşik olarak tasarlanan bir anten çeşididir. Şekil 2.19’da tipik bir IFA geometrisi verilmiştir. Ters yatmış *F* harfine benzediği için IFA olarak adlandırılmaktadır. Ana karta bütünleşik bir şekilde yerleştirilecek alanına uyumlandırılarak tasarlanabildiğinden, özellikle

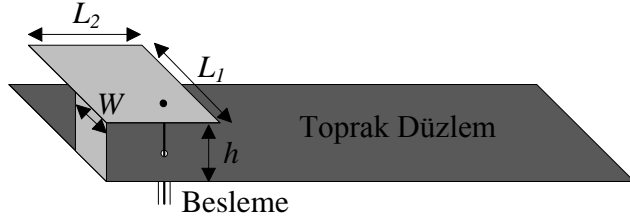
dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gibi gezgin kablosuz iletişim cihazlarında kullanılmaktadır. Işıma yapan yama kısmı, uygun boyutta ve geometride tasarlandığında istenilen frekansta çalışabilmektedir. IFA'nın boyu (L) ve toprak düzlemin uzunluğu, (L_g) en az $\lambda / 4$ olmalıdır. IFA'nın yüksekliği, dalga boyuna (λ) göre çok küçük olmalıdır.



Şekil 2.19. IFA geometrisi

2.3.1.5. PIFA (planar inverted F antenna)

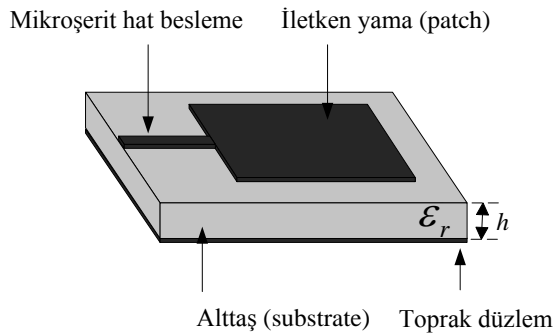
PIFA (Planar Inverted F Antenna), Şekil 2.20'de gösterildiği gibi toprak düzlemden h yüksekliğinde bir düzleme yerleştirilmiş ve toprak düzlem ile kısa devre yapılmış bir iletken yama yapısından oluşmaktadır. IFA'dan farklı olarak yama, toprak düzlemden ayrık ve paralel bir düzlemde konuşlandırılmaktadır. Bu nedenle, IFA anten isminin başında düzlem (planar) kelimesi kullanılmaktadır. Dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları gibi gezgin kablosuz iletişim cihazlarının ana kartına bütünleşik olarak tasarlanmaktadır. SAR (specific absorption rate) değeri düşük olduğu için son yıllarda cep telefonlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Işıma yapan yama kısmı, uygun boyutta ve geometride tasarlandığında istenilen frekansta çalışabilmektedir. Uygun geometrilere yönsüz ışına örüntüsüne sahiptir. PIFA'nın boyutlarına bağlı olan " $L_1 + L_2 - W$ " eşitliği, en az $\lambda / 4$ olmalıdır. PIFA'nın yüksekliği, dalga boyuna (λ) göre çok küçük olmalıdır.



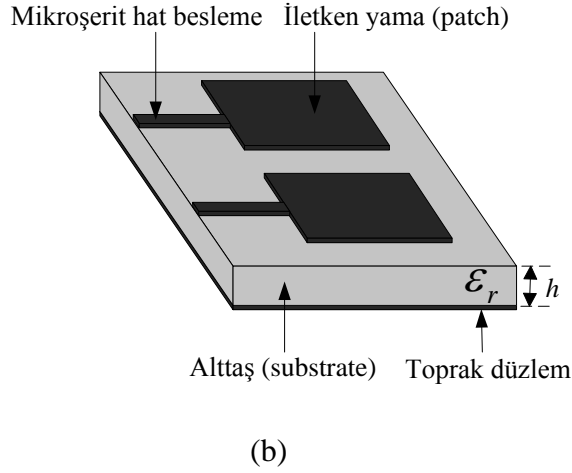
Şekil 2.20. PIFA geometrisi

2.3.2. MIMO Anten Uygulamaları

Şekil 2.21(a)'da geleneksel bir dikdörtgen mikroşerit anten yapısı gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, mikroşerit antenler, iletken yamanın (patch) toprak düzlem üzerindeki bir dielektrik malzeme üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulur. Işıyan iletken yamanın beslenmesinde; mikroşerit hat, koaksiyel veya kuplaj gibi yöntemler kullanılmaktadır [Kumar ve Ray, 2003; Wong, 2002]. Mikroşerit antenler aynı zamanda düşük kazanç, düşük güçte çalışma ve dar bant genişliği gibi dezavantajlara da sahiptir. Mikroşerit antenler, rezonans frekansı ve bant genişliği gibi performans parametrelerine bağlı olarak çeşitli geometrilere tasarlanmaktadır. Anten tasarımında kullanılan başlıca yöntemler; iletken yama veya toprak düzleminde boşluk açma (slot loading), kısa devre pin veya kısa devre duvar (shorting pin veya shorting wall) ve yama bükme (folded patch) metotlarıdır [Wong, 2002]. Bu yöntemler kullanılarak, anten boyutları küçültülmekle beraber istenilen çalışma frekansı ve bant genişliği elde edilebilir.



(a)



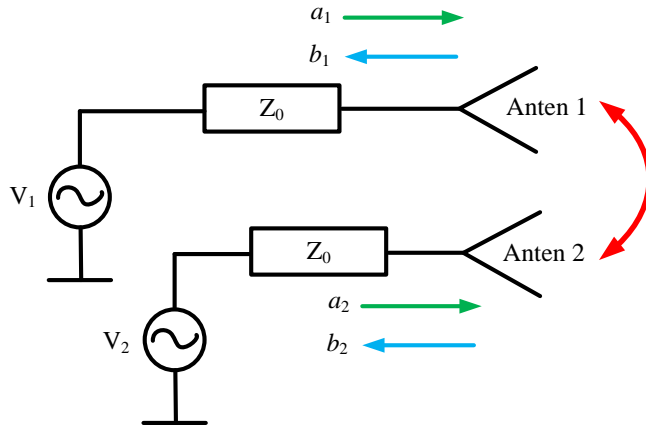
Şekil 2.21. Tipik mikroşerit yapıları: a) bir elemanlı b) iki elemanlı

Şekil 3.21(b)'de gösterildiği gibi MIMO antenler, karşılıklı iletim (alış-veriş) yapabilen, ayrı besleme girişlerine sahip birden fazla anten elemanının aynı altaş üzerinde birbirinden yalıtılmış olarak çalışan, yüksek spektral verim sağlayan antenlerdir [Hanzo vd., 2011; Kaise ve Zheng; 2010; Balanis, 2007]. Kablosuz iletişimde genellikle, baz istasyonu antenleri ile gezgin terminaller çeşitli yapılar sebebiyle direk olarak birbirlerini görememektedir (non-line of sight, NLOS). Bu nedenle, alıcıya ulaşan sinyal, gönderilen sinyalin çeşitli yapılardan saçılmış ve her biri farklı zayıflamaya uğramış (fading) kopyalarını içermektedir. MIMO sistemi; çoklu anten kullanımı sayesinde, çoklu iletim kanalı üzerinden yüksek spektral verim sağlamasına ilave olarak çeşitlemeye (diversity) imkan vermektedir.

2.3.3. Anten Performans Parametreleri

2.3.3.1. S-parametreleri

S-parametreleri, empedans uyumunu ve ışımaya performansını gösteren önemli anten parametrelerinden biridir. Şekil 2.22'de iki elemanlı bir MIMO sistemi gösterilmiştir. Buna göre, a_1 ve a_2 sırasıyla, birinci ve ikinci antenlerin portlara verilen sinyallerini ifade etmektedir. b_1 ve b_2 ise sırasıyla, birinci ve ikinci antenlerin portlarında geriye dönen sinyallerini ifade etmektedir.



Şekil 2.22. İki antenli bir sistemin genel yapısı [Blanch, 2003]

S-parametrelerinin, anten elemanlarına verilen ve geriye dönen sinyallere göre ifadeleri aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$s_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad (2.17a)$$

$$s_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad (2.17b)$$

$$s_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad (2.17c)$$

$$s_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad (2.17d)$$

Burada; s_{11} , birinci antenden geriye dönen sinyalin birinci antene verilen sinyale oranı iken s_{22} ise ikinci antenden geriye dönen sinyalin ikinci antene verilen sinyale oranı olarak ifade edilmektedir. İdeal bir antende, anten portlarında geri dönen sinyal istenmemektedir. Başka bir deyişle, antene giren bütün gücün ışılarak yayılması istenmektedir. Diğer S-parametreleri (s_{12} ve s_{21}), anten çiftleri arasındaki ortak etkileşimi değerlendiren parametrelerdir. s_{12} , ikinci anten ışmasının birinci anten üzerindeki etkisinden dolayı birinci antenden geri dönen sinyalin ikinci antene verilen sinyale oranıdır. Diğer taraftan, s_{21} , birinci anten ışmasının ikinci anten üzerindeki etkisinden dolayı ikinci antenden geri dönen sinyalin birinci antene verilen sinyale oranıdır. Pratikte anten elemanları arasında ortak etkileşim

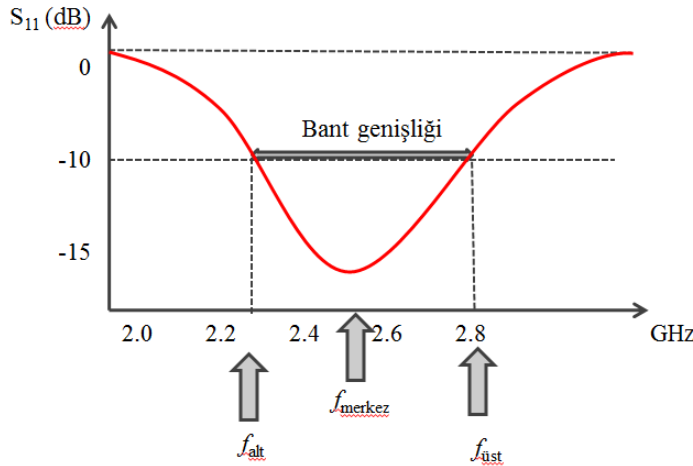
kaçınılmazdır. MIMO çalışma gereksinimleri için anten tasarımlarda bu etkiyi azaltacak yaklaşımlar kullanılmaktadır. S-parametreleri, genellikle dB (desibel) olarak ifade edilir ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$|s_{xy}|_{dB} = 20 \log_{10} |s_{xy}| \quad (2.18)$$

Burada; x ve y , S-parametrelerinin indislerini ifade etmektedir. Anten uygulamalarında, S-parametre değerlerinin düşürülmesine çalışılmaktadır. Verilen sinyalin %90'nı ışıyan bir antenin geriye dönme kaybı (s_{11}), -10 dB olarak hesaplanır. Bu nedenle anten tasarımlarında geriye dönme kaybının -10 dB'nin altına düşürülmeye çalışılmaktadır.

2.3.3.2. Empedans bant genişliği

Empedans bant genişliği, bir antene ait S-parametrelerinin frekansa karşı eğrileri kullanılarak belirlenir. S-parametreleri için genellikle -10 dB değeri baz alınarak hesaplanır. Şekil 2.23'de bir antenin s_{11} grafiği verilmiştir. Buna göre, anten ışımaya performansının -10 dB değerine düştüğü ilk frekans değeri, alt frekans değeri (f_{alt}) olarak; çıktığı son frekans değeri ise üst frekans değeri ($f_{üst}$) olarak tanımlanır. Eşitlik (2.19)'da verildiği gibi bant genişliği (BW), üst ve alt frekans değerleri arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır [Balanis, 2007]. Ayrıca bant genişliğini değerlendiren bir diğer parametre, Eşitlik (2.20)'de verilen yüzdelik bant genişliği ifadesidir. Genel olarak yüzdelik bant genişliği %20'nin üzerinden olan antenler geniş bant olarak ifade edilir.



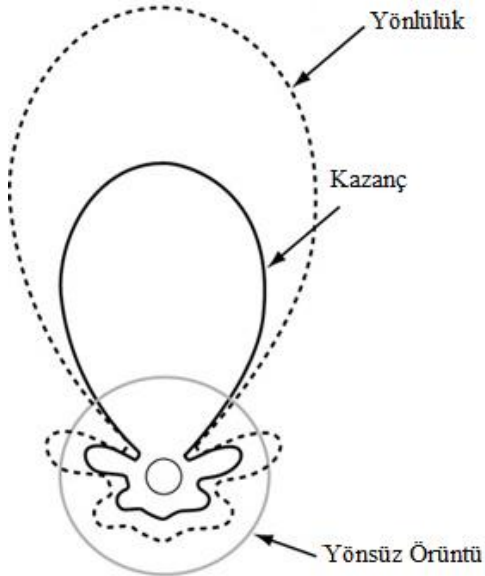
Şekil 2.23. Bir antenin s_{11} parametresi ve empedans bant genişliği gösterimi

$$BW = f_{üst} - f_{alt} \quad (2.19)$$

$$BW(\%) = 100 \cdot \left(\frac{f_{üst} - f_{alt}}{f_{merkez}} \right) \quad (2.20)$$

2.3.3.3. Yönlülük ve kazanç

Bir antenin yönlülüğü, Eşitlik (2.21)'de verildiği gibi azami ışımaya şiddetinin, yönsüz (izotropik) antenin ışımaya şiddetine oranı olarak hesaplanır. Yönlülük ve kazanç ilişkisi Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Yönsüz antenin ışımaya şiddeti, ışıyan gücün 4π 'ye bölünmesiyle elde edilir. Yönlülük her zaman 1'den büyüktür. Eşitlik (2.22)'de verildiği gibi bir antenin kazancı, verimlilik ile yönlülüğün çarpımı ile belirlenmektedir.



Şekil 2.24. Bir antenin ışımaya örüntüsü

$$Yönlülük (D) = \frac{U_{max}}{U_{izotropik}} \quad (2.21)$$

$$Kazanç (G) = e \cdot D \quad (2.22)$$

Burada; e , antenin verimini ve D , antenin yönlülüğünü temsil etmektedir. Verim, 0 ile 1 arasında değiştiğinden, kazanç en fazla yönlülüğe eşit olabilmektedir.

2.3.3.4. Verim

Verim, antenin elektromanyetik dalgaya dönüştürdüğü gücün, antene giren güce oranı olarak tanımlanabilir. Bir antenin verimi, Eşitlik (2.23) kullanılarak bulunur. Dielektrik kaybı, iletim kaybı, yansıma kaybı, polarizasyon kaybı ve herhangi bir yükte dağılan güç, antenin verimini etkileyen faktörlerdir.

$$Verim(e) = \frac{P_{ışıyan}}{P_{giren}} \quad (2.23)$$

Burada; $P_{ışıyan}$, antenden ışıyan gücü ve P_{giren} , antene verilen gücü temsil etmektedir.

2.3.3.5. Işıma örüntüsü

Işıma örüntüsü, bir antenin ışıma kabiliyetinin uzaysal koordinatlara bağlı fonksiyonunun grafiksel gösterimidir. Genellikle, ışıma örüntüsü uzak alan için ve yönlü koordinatlara bağlı fonksiyonun gösterimi olarak belirlenir. Işıma kabiliyeti, güç akış yoğunluğu, ışıma yoğunluğu, alan gücü, yönlülük ve faz veya kutuplaşmayı içermektedir. Işıma kabiliyeti çoğu zaman iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) olarak gösterilir.

2.3.3.6. ECC (envelope correlation coefficient)

MIMO anten dizisinde, elemanlar arasında, aradaki mesafeye bağlı olarak ortak etkileşim (mutual coupling) oluşmaktadır. Bu durum, MIMO kanal kapasitesini ve çeşitleme performansını olumsuz olarak etkilemektedir. Anten tasarımlarında elemanlar arasındaki etkileşimin mümkün olduğunca düşük olması gerekmektedir. En az etkileşimin olması için elemanlar arasındaki mesafenin $\lambda/2$ 'den büyük olması istenir [Winter, 1987; Foschini ve Gans, 1988]. Özellikle küçük boyutlu anten gereksinimi olan kişisel kablosuz iletişim cihazlarında kullanılan antenler arasındaki mesafenin az olmasından dolayı, anten elemanları arasında yüksek seviyede etkileşim oluşmaktadır. İki elemanlı bir MIMO sisteminde, anten elemanları

arasındaki korelasyon, aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır [Vaughan ve Andersen, 1987].

$$\rho_e = \frac{\left| \iint_{4\pi} \left[\vec{F}_1(\theta, \phi) \bullet \vec{F}_2(\theta, \phi) d\Omega \right] \right|^2}{\iint_{4\pi} \left| \vec{F}_1(\theta, \phi) \right|^2 d\Omega \iint_{4\pi} \left| \vec{F}_2(\theta, \phi) \right|^2 d\Omega} \quad (2.24)$$

Burada, $F(\theta, \phi)$ alan ışınma örüntüsünü ve “•” Hermitian çarpımını göstermektedir. Anten elemanları arasındaki alan korelasyonu, bu eşitliğin pay kısmındaki ifade ile hesaplanmaktadır. Payda kısmındaki ifade ise normalizasyon yapmak için hesaplanmaktadır. Pay kısmındaki Hermitian çarpımına göre ışınma örüntüsü $F(\theta, \phi)$, eşleniği $F(\theta, \phi)^*$ ile çarpılmaktadır ve güç yoğunluğunu elde etmek için bu çarpım sonucunun karesi alınmaktadır. Küre için yüzey integrali alınarak ortak etkileşime neden olan alanın gücü bulunmaktadır. Payda kısmında, ise her iki anten elemanının sahip olduğu güç ifadeleri birbiri ile çarpılarak azami korelasyon seviyesi hesaplanmaktadır. Eğer ışınma örüntüleri arasında korelasyon yoksa bu eşitliğin sonucu “0” çıkacaktır. Diğer taraftan, ışınma örüntüleri arasında eğer tam korelasyon varsa sonuç “1” çıkacaktır. Eşiklik (2.24)’te verilen ifade, anten elemanlarının ışınma örüntüsüne dayandığı için kullanımı pratik değildir. Özellikle, karmaşık geometrilere sahip MIMO anten sistemlerinde bu değer elde edilmesi çok zordur.

Anten elemanları arasındaki etkileşimi daha kolay hesaplamak için S-parametrelerine dayanan aşağıdaki ifade kullanılmaktadır.

$$\rho_e = \frac{\left| s_{11}^* s_{12} + s_{21} s_{22}^* \right|^2}{(1 - |s_{11}|^2 - |s_{21}|^2)(1 - |s_{22}|^2 - |s_{12}|^2)} \quad (2.25)$$

ECC (ρ_{12} : Envelope Correlation Coefficient–ECC), MIMO çeşitleme performansını değerlendiren önemli parametrelerden bir tanesidir. Bu ifade, [Blanch, 2003] tarafından Eşitlik (2.24)’ten türetilmiştir. Bu nedenle, Eşitlik (2.24)’teki gibi pay kısmındaki ifade ile elemanlar arasındaki korelasyon hesaplanmaktadır ve payda kısmındaki ifade ile normalize edilmektedir. ECC, 0 ile 1 arasında değişen değerlere sahiptir. 0, anten elemanları arasında hiç etkileşimin olmadığı, 1 ise elemanlar

arasında en yüksek seviyede etkileşimin olduğunu göstermektedir. Verimli bir MIMO sisteminde, hesaplanan etkileşim değerinin 0.5'den düşük olması gerekmektedir [Blanch, 2003]. Bu nedenle, antenler arasındaki etkileşimin azaltılması; küçük boyutlu antenlerin birbirine yakın olarak yerleştirildiği MIMO dizilerinde önemli bir tasarım parametresidir.

2.3.3.7. TARC (total active reflection coefficient)

TARC (Total active reflection coefficient), bir MIMO sisteminin hem antenler arasındaki etkileşimini hem de sinyal kombinasyonunu hesaba katan bir katsayıdır. Eşitlik (2.26)'da verildiği gibi TARC, N portlu bir MIMO sistemi için tüm portlardan geriye dönen sinyallerin gücünün toplamının portlara verilen sinyallerin toplam gücüne oranı olarak ifade edilir [Mallahzadeh vd., 2009].

$$\Gamma_a^t = \sqrt{\sum_i^N |b_i|^2} / \sqrt{\sum_i^N |a_i|^2} \quad (2.26)$$

Burada, a_i ve b_i , sırasıyla, verilen ve geriye dönen sinyalleri ifade etmektedir. Çok iyi bir empedans uyumu olan bir antenden geriye dönen sinyalin olmaması gerekmektedir. Yani, sinyallerin tamamının ışınması beklenmektedir. İdeal bir MIMO anteninde Eşitlik (2.26)'nın pay kısmı "0" olacaktır. Bu nedenle, TARC her zaman "0" ile "1" arasında bir değer alır. Antenin ışınması ne kadar iyi ise TARC o kadar düşük çıkacaktır. S-parametrelerinde olduğu gibi TARC değerinin de -10dB 'nin altında olması istenmektedir.

2.3.4. MIMO Anten Tasarım Zorlukları

Mikroşerit antenler dar bant genişliğine sahip oldukları için kablosuz iletişim uygulamalarına uyumlu, küçük boyutlu anten tasarımı zordur. Gezgin kablosuz iletişim cihazlarının işlevselliği arttıkça, anten için ayrılan alan azalmaktadır. Bu cihazların ihtiyaç duyduğu küçük boyutlu MIMO anten tasarımı önem kazanmakla birlikte çoklu anten elemanlarının bir arada kullanıldığı MIMO antenlerin, bu cihazlar için tasarımı birçok zorluğu barındırmaktadır. Birbirine yakın olarak çalışması gereken küçük anten elemanları arasında elektromanyetik ortak etkileşim

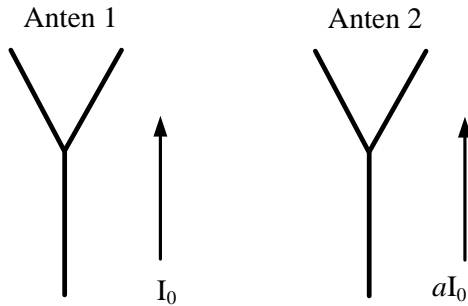
oluşmaktadır. Verimli bir MIMO sistemi için anten elemanları arasında elektriksel izolasyonun sağlanması önemli bir tasarım kriteri olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.3.4.1. Küçük anten tasarımı

Hücreli telefonlar, dizüstü bilgisayarlar, USB araçları, kablosuz iletişim araçları ve modemler gibi taşınabilir cihazlar her geçen gün küçülmekle birlikte işlevselliği de artmaktadır. Bu nedenle, bu sistemlere uyumlu küçük antenlere ihtiyaç duyulmaktadır.

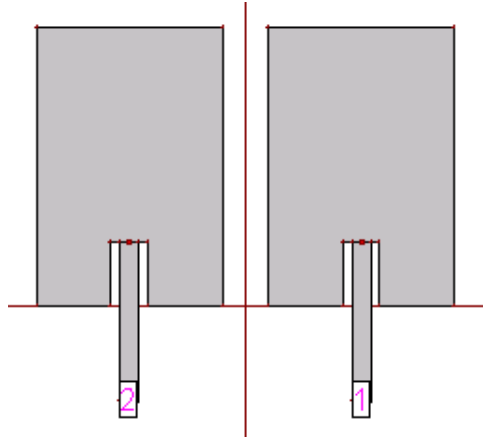
2.3.4.2. Ortak etkileşim (mutual coupling)

Birbirine yakın konuşlandırılmış anten elemanları arasında elektromanyetik ortak etkileşim oluşmaktadır. Şekil 2.25’de iki elemanlı bir MIMO sistemi gösterilmiştir. Birbirine yakın olarak yerleştirilmiş birinci antenin portundan verilen I_0 akımı ile meydana gelen ışıma, ikinci antenin portuna ilave bir aI_0 akımının indüklenmesine neden olmaktadır [Zhengyi vd., 2012].

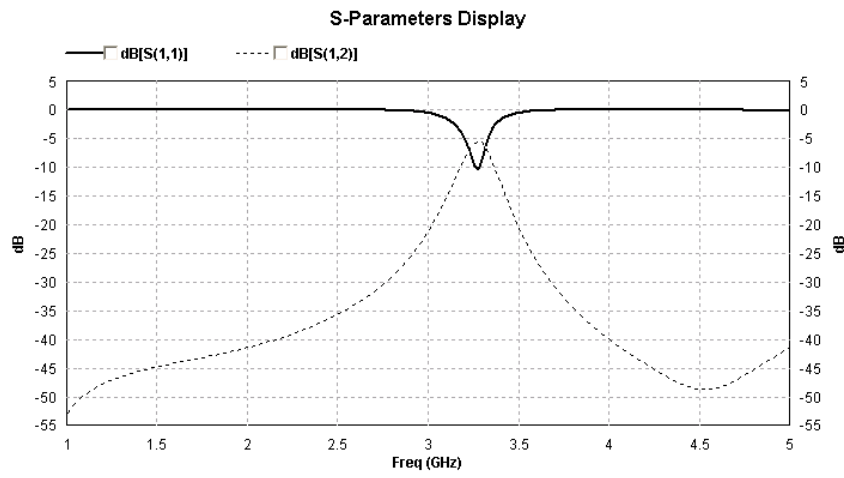


Şekil 2.25. İki elemanlı bir MIMO sisteminde antenler arasındaki ortak etkileşim [Zhengyi vd., 2012]

Anten elemanları arasındaki etkileşimi, benzetim ortamında görmek için, IE3D™ programı ile tasarlanmış iki elemanlı dikdörtgen mikroşerit MIMO anten sistemi Şekil 2.26(a)’da gösterilmiştir. Şekil 2.26(b)’de ise, bu antene ait S-parametre eğrileri verilmiştir. Elektromanyetik simetriden dolayı, s_{22} ve s_{21} parametreleri, sırasıyla, s_{11} ve s_{12} ile aynı olduğu için sadece bir anten elemanı için S-parametreleri elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, ortak etkileşimden dolayı s_{12} rezonans frekansı bölgesinde (3.3 GHz), -10 dB’nin üzerine çıkmıştır. Bu durum, antenin MIMO olarak çalışmasına engel olacaktır. Sonraki bölümde, anten elemanları arasındaki etkileşimi azaltmak için literatürde önerilmiş bazı izolasyon yöntemleri anlatılacaktır.



(a)



(b)

Şekil 2.26. İki elemanlı dikdörtgen MIMO anten yapısı: a) anten geometrisi b) S-parametre eğrileri

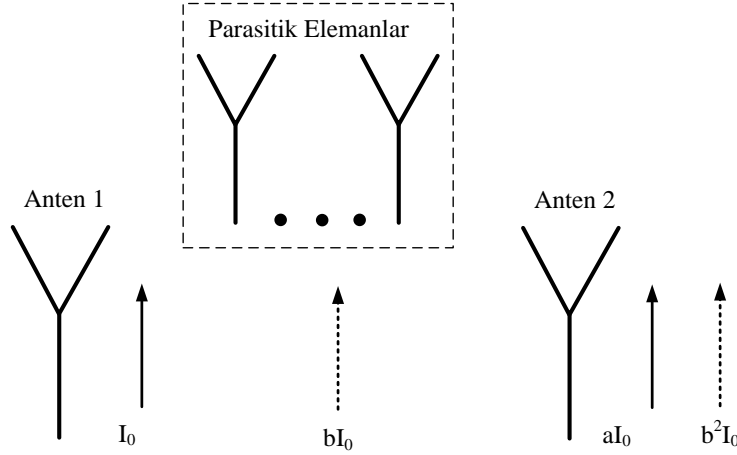
Literatürde uygulanmış bazı izolasyon yöntemleri

MIMO anten elemanlarının birbirine yakın olarak çalışmasından dolayı elemanlar arasında ortak etkileşim meydana geldiği yukarıda ifade edilmişti. Bu bölümde, ortak etkileşimi azaltmaya yönelik literatürde önerilmiş bazı izolasyon yöntemleri anlatılacaktır.

Parasitik eleman kullanımı

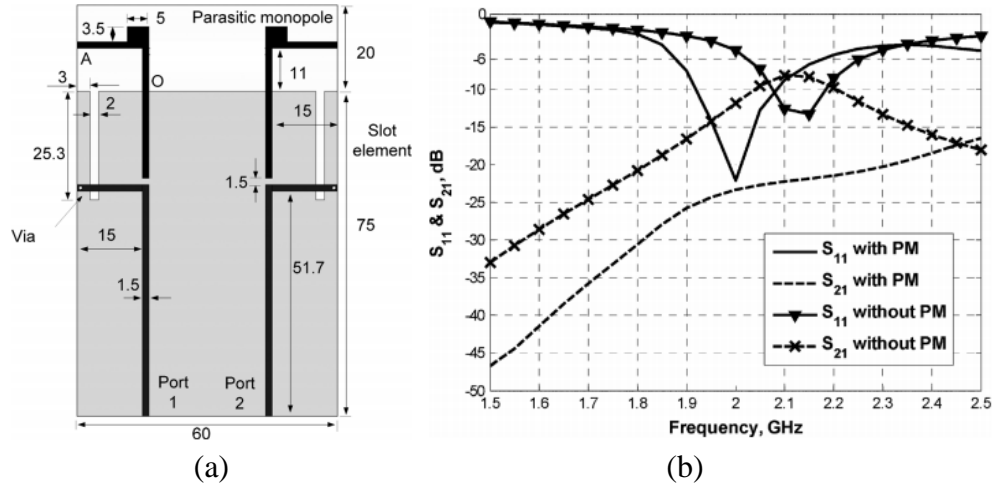
Parasitik eleman, Şekil 2.27’de gösterildiği gibi ortak etkileşimi azaltmak için MIMO anten dizisine fazladan eklenen elemana denir. Parasitik eleman, anten dizisindeki ortak etkileşimden dolayı kendi üzerinde yüzey akımları toplayacaktır. Bu teknikte, parasitik elemanın tasarlanmasının ve uygun yere yerleştirilmesinin çok

zor bir çalışma olduğu unutulmamalıdır. Uygun olarak tasarlanmış bir parazitik elemanın, anten dizisinde uygun yere yerleştirilmesi ile Eşitlik (2.27)'de verilen şartın sağlanması durumunda bu parazitik eleman anten elemanı üzerindeki ortak etkileşimi azaltabilmektedir. Şekil 2.28'de parazitik monopollü eleman uygulanmış bir PIFA ve S-parametreleri verilmiştir [Zhengyi vd., 2012]. Şekilde görüldüğü gibi önerilen parazitik eleman ile yaklaşık 10 dB'lik bir izolasyon elde edilmiştir.



Şekil 2.27. Parazitik eleman kullanılarak izolasyonun sağlanması [Zhengyi vd., 2012]

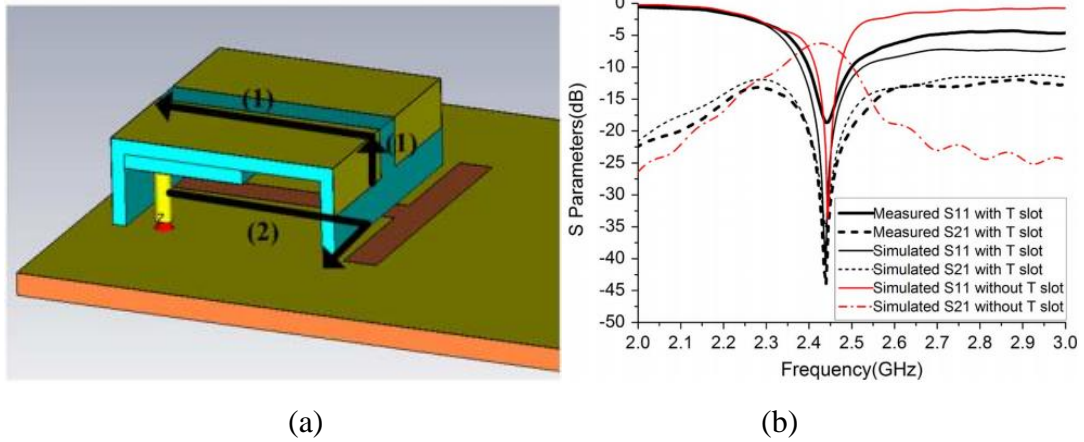
$$aI_0 + b^2I_0 = 0 \quad (2.27)$$



Şekil 2.28. Parazitik eleman uygulanmış bir PIFA: a) anten geometrisi b) s parametreleri [Zhengyi vd., 2012]

Toprak düzlemde boşluk açma

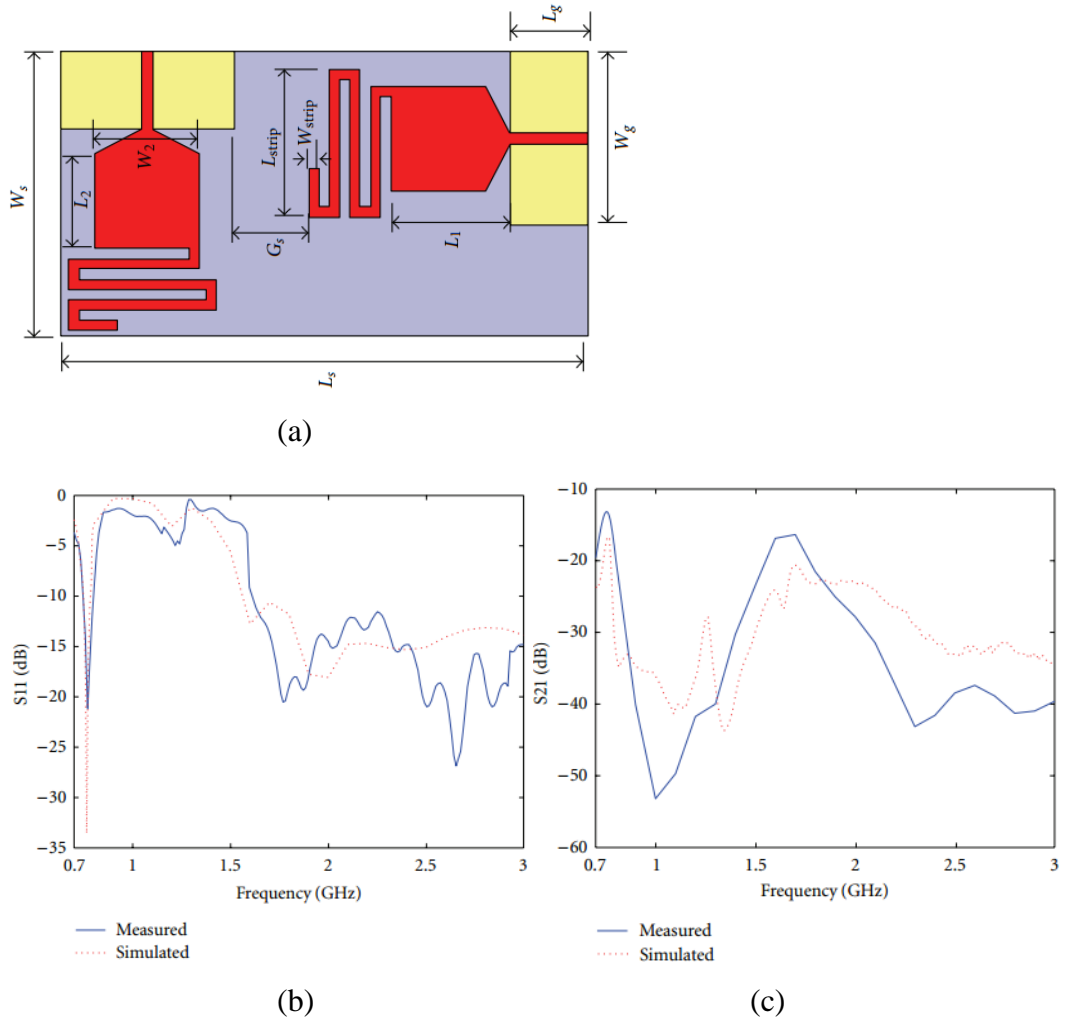
Anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmaya yönelik başarıyla uygulanan diğer bir teknik ise toprak düzleme boşluk açma yöntemidir. Toprak düzlemin uygun yerinde açılan doğru şekilli boşluklar bu etkileşimi azaltabilir. Şekil 2.29’da boşluk açma yöntemi uygulanmış bir PIFA ve S-parametreleri gösterilmiştir [Shuai vd., 2012]. Şekilde görüldüğü gibi uygun geometrili bir boşluğun açılması ile çalışma frekansı bölgesinde yüksek bir izolasyon sağlanmıştır. Dikkat edilecek husus, literatürde önerilen parasitik eleman ve boşluk açma tekniklerinin bütün MIMO anten yapılarında aynı başarıyı vermemesidir. Çünkü her anten geometrisi kendisine özgü çalışma mekanizmasına sahiptir. Her MIMO anten yapısına uygun parasitik elemanların ve boşlukların tasarlanması gerekmektedir, bu da başlı başına çok önemli bir tasarım problemidir.



Şekil 2.29. Boşluk açma yöntemi uygulanmış bir PIFA: a) anten geometrisi b) S-parametreleri [Shuai vd., 2012]

Dikey eleman yerleşimi

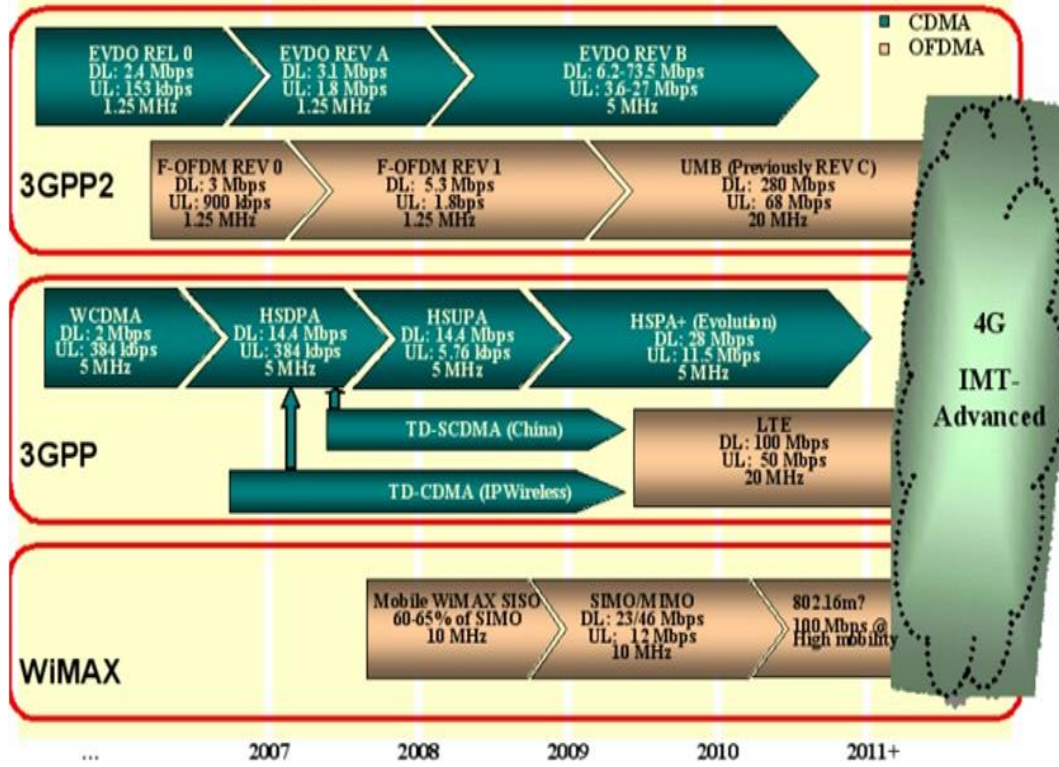
Aynı polarizasyona sahip antenler aynı düzlemde, birbirine göre dikey olarak yerleştirilerek ortak etkileşim azaltılabilmektedir [Yao vd., 2012]. Bu yöntem uygulanarak elde edilen bir MIMO anten, Şekil 2.30’da gösterilmiştir. Bu yöntem, literatürde sıkça kullanılmaktadır. Fakat gezgin cihazlarda, aynı kart üzerinde anten elemanlarının simetrik ve dikey olarak tasarlanması zordur.



Şekil 2.30. Dikey elemanlı bir MIMO anten: a) anten geometrisi b) s_{11} parametresi c) s_{21} parametresi [Yao vd., 2012].

2.4. MIMO UYUMLU KABLOSUZ İLETİŞİM STANDARTLARI

4G için düşünülen teknolojiler ile ilgili olarak üç ayrı yoldan standardizasyon aktiviteleri yapılmaktadır. Bu standardizasyon yolları Şekil 2.31’de gösterilmiştir. Kuzey Amerika bölgesi, gezgin haberleşme standartlarını oluşturan 3GPP2 UMB’yi 4G teknolojisi olarak seçmiştir. 3GPP ise LTE ile yoluna devam etmektedir. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ise gezgin WiMAX (802.16m) ve WLAN (802.11) standartlarını geliştirmektedir. Bu üç teknolojinin de ortak yanı MIMO ile birlikte OFDM modülasyon teknolojisini seçmiş olmalarıdır [Yavuz ve Soydaş, 2010].



Şekil 2.31. Geniş bant iletişim teknolojilerinin gelişimi [technewsworld.com]

2.4.1. LTE (Long Term Evolution)

LTE standardının geliştirilmesine 3GPP tarafından 2004 yılında başlanmıştır. LTE ile UTRA (Universal Terrestrial Radio Access) standardının geliştirilmesi ve radyo erişiminin optimize edilmesi hedeflenmiştir. 3GPP standartlarında ilk olarak fizibilitesi Rel-7’de çalışılmıştır ve Rel-8 ile de LTE/SAE standardı tanıtılmıştır. 2009’da ise ITU tarafından 4G olarak duyurulan LTE-Advanced, ilk olarak Rel-9’da çalışılmıştır ve 2011’de de tamamlanmıştır. Şekil 2.32’de 3GPP standartlarının ana fonksiyonları ve sağladığı veri hızları görülmektedir. 4G olarak kabul edilen LTE-Advanced sabit ortam için 1 Gbit/sn indirme hızını ve gezgin ortam için ise 100 Mb/sn’nin hedeflemektedir.

3GPP		R99	Rel-4	Rel-5	Rel-6	Rel-7	Rel-8	Rel-9	Rel-10
Frozen Time		Dec 1999	Mar 2001	Mar 2002	Mar 2005	Dec 2007	Dec 2008	Sept 2009	Mar 2011
WCDMA Mbps	DL	0.384	0.384	14.4	14.4	28.8	43.2 or 82*		
	UL	0.384	0.384	0.384	5.76	11.52	11.52		
LTE/LTE-A Mbps	DL						160	160	1000
	UL						50	50	500
Main Function		CS & PS, R99 Radio Bearers	BICC, TD- SCDMA	HSDPA, IMS	HSUPA, MBMS, WiLAN- UMTS iWk	HSPA+ Phase I, LTE/SAE Feasibility	HSPA+ Phase II, LTE/SAE	LTE/SAE Enhance- ment, LTE-Adv Feasibility Study	LTE-Adv

Şekil 2.32. 3GPP yol haritası [3gpp.org]

LTE uygulamasının ülkelere göre çalışma frekans bantları değişmektedir. Çizelge 2.2’de ülkelerin TDD (Time Division Duplex) ve Çizelge 2.3’de FDD (Frequency Division Duplex) kullanımına göre çalışma frekans bantları verilmiştir. LTE uyumlu anten tasarımında bu frekans bantlarının dikkate alınması gerekmektedir.

Çizelge 2.2. Ünelere göre LTE uygulamasının TDD frekans bantları [3gpp.org]

Bant Numarası	Bant ismi TDD	Downlink (MHz)		Bant genişliği (MHz)	Uplink (MHz)		Duplex boşluğu (MHz)	Coğrafik bölge
		Alt	Üst		Alt	Üst		
33	TD 1900 MHz	1900	1920	20				
34	TD 2000 MHz	2010	2025	15				EMEA
35	TD PCS Lower	1850	1910	60				NAR
36	TD PCS Upper	1930	1990	60				NAR
37	TD PCS Center gap	1910	1930	20				NAR
38	TD 2600 MHz	2570	2620	50				China
39	TD 1900 MHz +	1880	1920	40				China
40	TD 2300 MHz	2300	2400	100				China
41	TD 2600 MHz +	2496	2690	194				All
42	TD 3400 MHz	3400	3600	200				
43	TD 3600 MHz	3600	3800	200				
44	TD 700 MHz	703	803	100				APAC

APAC = Asia and Pacific; EMEA = Europe Middle East and Africa; NAR = North American Region; CALA = Central Latin America; APT = Asia Pacific Telecommunity; DD = Digital dividend; PS = Public Safety

Çizelge 2.3. Ülkelere göre LTE uygulamasının FDD frekans bantları [3gpp.org]

Bant No	Bant ismi	Downlink (MHz)		Bant genişliği (MHz)	Uplink (MHz)		Duplex boşluğu (MHz)	Coğrafik bölge
		Alt	Üst		Alt	Üst		
1	2100 MHz	2110	2170	60	1920	1980	190	All
2	1900 MHz PCS	1930	1990	60	1850	1910	80	NAR
3	1800 MHz +	1805	1880	75	1710	1785	95	All
4	AWS	2110	2155	45	1710	1755	400	NAR
5	850 MHz	869	894	25	824	849	45	NAR
6	UMTS only	875	885	10	830	840	45	APAC
7	2600 MHz	2620	2690	70	2500	2570	120	EMEA
8	900 MHz	925	960	35	880	915	45	All
9	1800 MHz	1844.9	1880	35	1749.9	1784.9	95	APAC
10	AWS +	2110	2170	60	1710	1770	400	NAR
11	1500 MHz Lower	1475.9	1496	20	1427.9	1447.9	48	Japan
12	700 MHz ac	729	746	17	699	716	30	NAR
13	700 MHz c	746	756	10	777	787	-31	NAR
14	700 MHz PS	758	768	10	788	798	-30	NAR
17	700 MHz bc	734	746	12	704	716	30	NAR
18	800 MHz Lower	860	875	15	815	830	45	Japan
19	800 MHz Upper	875	890	15	830	845	45	Japan
20	800 MHz DD	791	821	30	832	862	-41	EMEA
21	1500 MHz Upper	1495.9	1511	15	1447.9	1462.9	48	Japan
22	3500 Mhz	3510	3590	80	3410	3490	100	
23	2000 MHz S-Band	2180	2200	20	2000	2020	180	NAR
24	1600 MHz L-Band	1525	1559	34	1626.5	1660.5	-101.5	NAR
25	1900 MHz +	1930	1995	65	1850	1915	80	NAR
26	850 MHz +	859	894	35	814	849	45	NAR
27	800 MHz SMR	852	869	17	807	824	45	NAR
28	700 MHz APT	758	803	45	703	748	55	APAC
29	700 MHz de	717	728	11	Sadece Downlink			NAR
30	2300 MHz WCS	2350	2360	10	2305	2315	45	NAR
31	450 MHz	462.5	468	5	452.5	457.5	10	CALA

2.4.2. WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

Metropol şehirlerde, kullanılmak üzere tasarlanan WiMAX teknolojisi, gezgin ve sabit kullanıcılar için geniş bantlı, gerçek zamanlı son yıllarda ön plana çıkan ve diğer haberleşme sistemlerine alternatif oluşturacağı düşünülen bir teknolojidir. WiMAX teknolojisinin standartları, IEEE 802.16 ile belirlenmiştir. Yaklaşık 50 km çapındaki bir alanda 50 Mb/sn'e kadar bant genişliği ile haberleşme olanağı sağlamaktadır [Andrews vd., 2007].

1999 yılında IEEE tarafından, kentsel alanda kullanılacak, 10 – 60 GHz frekansları arasında, fiber optik haberleşmenin yerini alacak yüksek hızlı kablosuz iletişim için IEEE 802.16 standardı oluşturulmuştur. Yayınlanan ilk standart, tek

taşıyıcı modülasyon tekniğini kullanan fiziksel katmana ek olarak TDD veya FDD'yi destekleyen, ayrıca TDMA yapısını da barındıran MAC (Media Access Control) katmanlı bir yapıya sahiptir. İlk standardın yayımlanmasından sonra mevcut standardın iyileştirilmesine ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır [Andrews vd., 2007].

IEEE 802.16'nın, özellikleri oldukça geniş bir alana yayılmış standartlar topluluğuna dönüşmesi, aynı zamanda, tek bir standart isteyen sanayi için bir takım sorunlara yol açmıştır. Sertifikalaştırma ve standart fazlalığı sorununu çözmek, bunlara ek olarak standart tabanlı çözümler geliştirmek amacıyla, 2001 yılının Haziran ayında, ticari olmayan bir organizasyon olan WiMAX Forum kurulmuştur. WiMAX Forum tarafından oluşturulan çözümler ve cihaz üreticilerinin birlikte çalışmaları sayesinde 2.5 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekans bantları, farklı devletler tarafından lisanslanarak kullanılmaktadır [Andrews vd., 2007]. 2.5 GHz frekansı Amerika, Filipinler, Libya, Lübnan, Peru, Rusya, Sri Lanka ve Yunanistan; 3.5 GHz frekansı Amerika, İzlanda, Kanada, Mısır, Peru, Rusya ve Şili; 5.8 GHz Gürcistan, İngiltere, İtalya ve Rusya gibi devletler tarafından lisanslanmıştır [wimaxmaps.org]. Çizelge 2.4'de farklı ülkelerde kullanılan WiMAX standardının çalışma frekans bantları verilmiştir.

Çizelge 2.4. WiMAX standardının çalışma frekans bantları [wimaxforum.org]

Standart	Protokol	Çalışma frekansı (GHz)	Frekans aralığı (GHz)
WiMAX IEEE 802.16	<i>a, d</i> (sabit)	3.7	3.4–3.8
		5.8	5.725–5.850
	<i>e</i> (gezgin)	2.3	2.3–2.4
		2.5	2.5–2.69
		3.3	3.3–3.4
		3.5	3.4–3.6
		3.7	3.4–3.8

WiMAX, OFDM tekniğini kullanan bir teknolojidir. WiMAX'in başarısı, kullanılan kanal bant genişliğine bağlıdır. WiMAX teknolojisi, fiziksel katmanında OFDM kullandığından, CDMA kullanan 3G teknolojisine göre daha yüksek hızlara ulaşılmasını sağlar. WiMAX'ın bir avantajı da, MIMO uygulamalarına olan yatkınlığıdır. Daha fazla kanal kapasitesine, daha yüksek veri aktarım hızına ve daha

çok uygulama seçeneğine sahip olması, WiMAX'ın diğer avantajlarından [Andrews vd., 2007].

2.4.3. WLAN (Wireless Local Area Network)

WLAN, IEEE 802.11 standardı ile belirlenmiştir. WLAN, 30–300 metre aralığındaki mesafelerde yerel alan ağı (LAN) kurarak, iki yönlü kablosuz haberleşme sağlayan bir teknolojidir. Yüksek veri aktarım hızı, dünya çapında yaygın olma, ağ yapılarına kolayca uygulanabilme ve kablosuz iletişim kurma gibi avantajlara sahiptir. Kablosuz olmasının getirdiği avantaj, günümüzde cep telefonu, dizüstü bilgisayarlar, fotoğraf makineleri ve yazıcılar gibi WLAN teknolojisini kullanan cihazların hayatın her alanında yer almasını sağlamıştır. 3G iletişim sistemlerine göre daha yüksek haberleşme hızına sahip olan WLAN, ayrıca daha iyi servis kalitesi sağlamaktadır.

WLAN, CSMA (Carrier Sense Multiple Access) tekniğini kullanmaktadır. Bu teknik, veri aktarımına ciddi bir yük getirmekle birlikte güvenilir veri aktarımını sağlamaktadır.

IEEE 802.11 standardı çalışmaları ilk olarak 1990 yılında IEEE tarafından yapılmıştır. İlk protokolü 1997 yılında yayımlanmıştır. 2.4 GHz frekans bandını kullanan standart, yaklaşık 75 metre mesafede en fazla 2 Mb/sn hızında haberleşmeyi desteklemektedir. WLAN çalışma frekansı, ISM (Industrial, scientific and medical) bandı kapsamında olduğu frekans çakışmasından dolayı çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Çizelge 2.5’de WLAN standardının protokolleri ve frekans bantları verilmiştir. 1999 yılında 3.7 GHz ve 5 GHz frekans bantlarında, daha geniş bir alanda haberleşmeyi sağlayabilen IEEE 802.11a protokolü geliştirilmiştir. Aynı yıl, 2.4 GHz frekans bandında daha yüksek hızlarda ve IEEE 802.11a protokolüne göre biraz daha geniş bir alanda haberleşmeyi sağlayan IEEE 802.11b protokolü yayımlanmıştır.

2003 yılında, IEEE 802.11b protokolünde geliştirmeler yapılarak standardın 54 Mb/sn’ye kadar olan hızları desteklemesi sağlanmıştır ve bu protokol IEEE 802.11g olarak adlandırılmıştır. 2009 yılında standarda MIMO ile birlikte OFDM entegre edilerek IEEE 802.11n protokolü ortaya çıkmıştır ve bu standart daha geniş alanlarda, 150 Mb/sn’ye kadar bant genişliği sağlamaktadır. 2013 yılında IEEE

802.11ac protokolü yayınlanmıştır. Sekiz MIMO anten kullanımına izin verebilen bu standart 900 Mb/sn hızına kadar çıkabilmektedir.

Çizelge 2.5. WLAN standardının çalışma frekans bantları [ieee.org]

Standart	Protokol	Çalışma Frekansı (GHz)	Frekans aralığı (GHz)
WLAN IEEE 802.11	—	2.4	2.4–2.5
	a	5.0	5–6
		3.7	3.65–3.70
	b	2.4	2.4–2.5
	g	2.4	2.4–2.5
	n	2.4/5	2.4–2.5
			5.725–5.875
	ac	5.0	5.17–5.71
	ad	2.4 5 60	

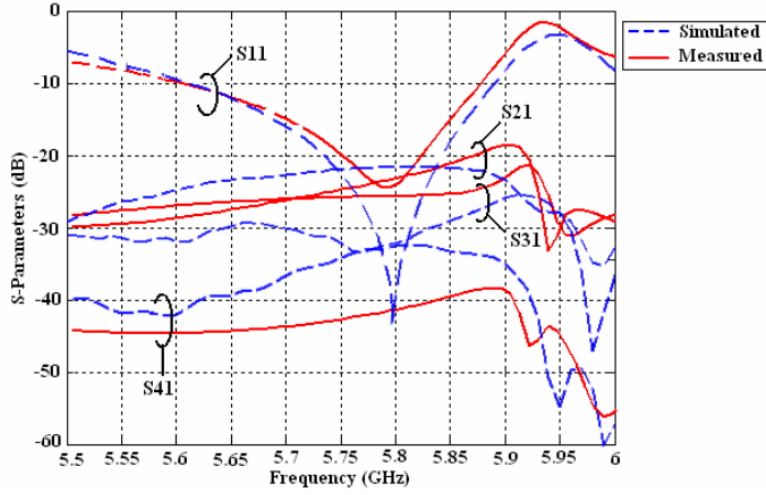
2.5. LİTERATÜRDE ÖNERİLEN MIMO ANTEN TASARIMLARI

Son yıllarda kablosuz kişisel iletişim cihazlarının gelişmesi ve yaygınlaşması, bu cihazlarda kullanılan antenlere olan ilgiyi artırmıştır. Cihazların küçülmesi ve özelliklerinin artması, bu cihazlarda anten için ayrılan alanın azalmasına neden olmuştur. Kısıtlı alana yerleştirilecek antenlerin, kompakt, anten elemanları arasında yüksek izolasyona sahip ve yüksek performanslı olması önemlidir. Tasarlanacak antenlerin bu kriterleri sağlaması gerekmektedir. Literatürde sunulan MIMO antenlerin birbirlerine göre üstünlükleri ve eksiklikleri bulunmaktadır. Bu antenler, genel olarak günümüzde kullanılan kablosuz cihazlar için nispeten büyüktür. Küçük boyutlu olarak tasarlanan antenler, kendi doğası gereği yüksek çalışma frekansına sahip olmaktadır. Bu nedenle anten modifikasyon yöntemleri kullanılarak küçük boyutlu ve günümüz kablosuz standartlara uyumlu antenlerin tasarlanması önemli bir araştırma konusudur. Literatürde önerilmiş bazı antenler aşağıda sunulmuştur.

[Mallahzadeh vd., 2009] tarafından sunulan çalışmada, 4 adet E şekilli mikroşerit antenin dizi olarak kullanılmasıyla 4 portlu bir MIMO anten oluşturulmuştur. Önerilen anten ve S-parametreleri Şekil 2.33'de gösterilmiştir. 16 x 82 mm² boyutlarında olan antenin çalışma frekansı 5.8 GHz'dir. Anten boyutları nispeten büyük ve çalışma frekansı yüksek olduğu için günümüzde kullanılan kablosuz gezgin uygulamalar için uygun olmayabilir.



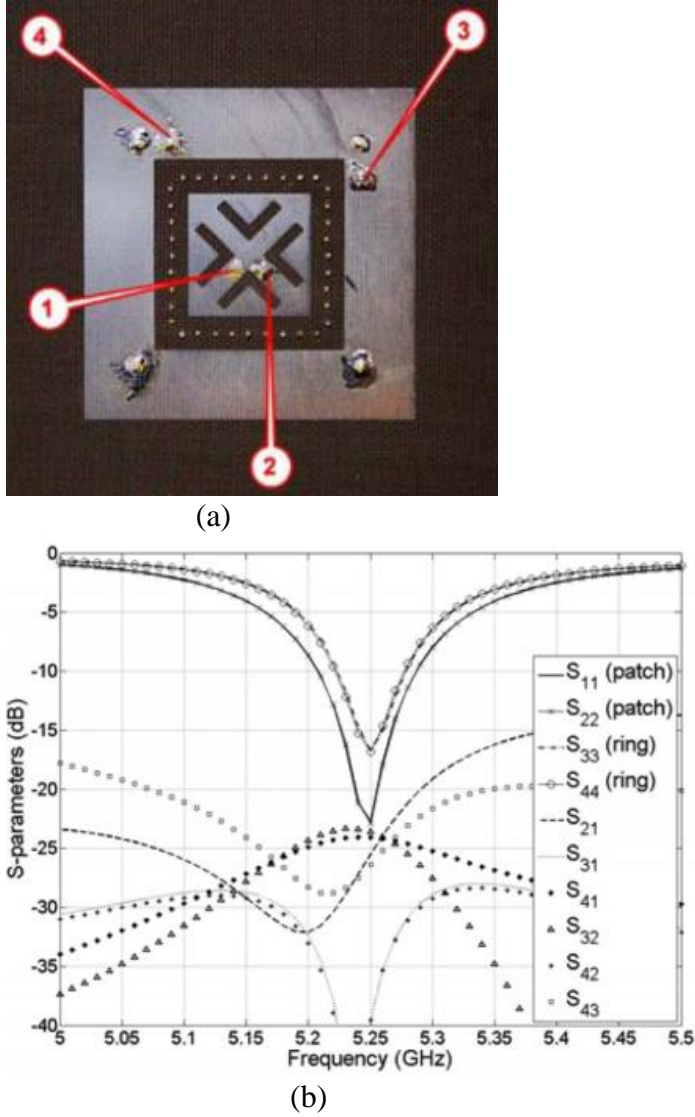
(a)



(b)

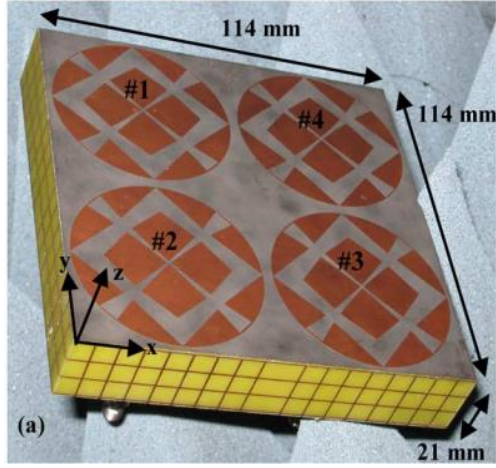
Şekil 2.33. a) 4 portlu E şekilli MIMO anten: a) anten prototipi b) S-parametreleri [Mallahzadeh vd., 2009]

[Sarrazin vd., 2010] tarafından eş merkezli 4 portlu bir MIMO anten sunulmuştur. Anten prototipi ve antene ait S-parametre eğrileri Şekil 2.34'de verilmiştir. $39.5 \times 39.5 \times 1.58 \text{ mm}^3$ boyutlarında olan antenin çalışma frekansı 5.25 GHz'dir. Boyutları küçük olan antenin rezonans frekansı günümüzde kullanılan kablosuz uygulamalar için yüksek olabilir.

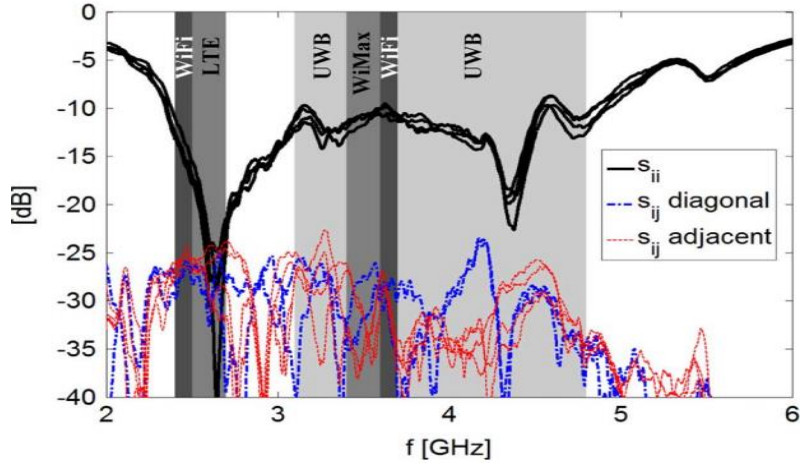


Şekil 2.34. 4 portlu MIMO anten: a) anten prototipi b) S-parametreleri [Sarrazin vd., 2010]

[Costa vd., 2011] tarafından $114 \times 114 \times 21 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahip 4 portlu MIMO anten önerilmiştir. Gerçekleştirilmiş antenin fotoğrafı ve S-parametreleri Şekil 2.35’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi antenin çalışma frekansı birçok kablosuz gezgin uygulamalar için uygun olmakla birlikte anten boyutları bu uygulamalar için çok büyüktür.



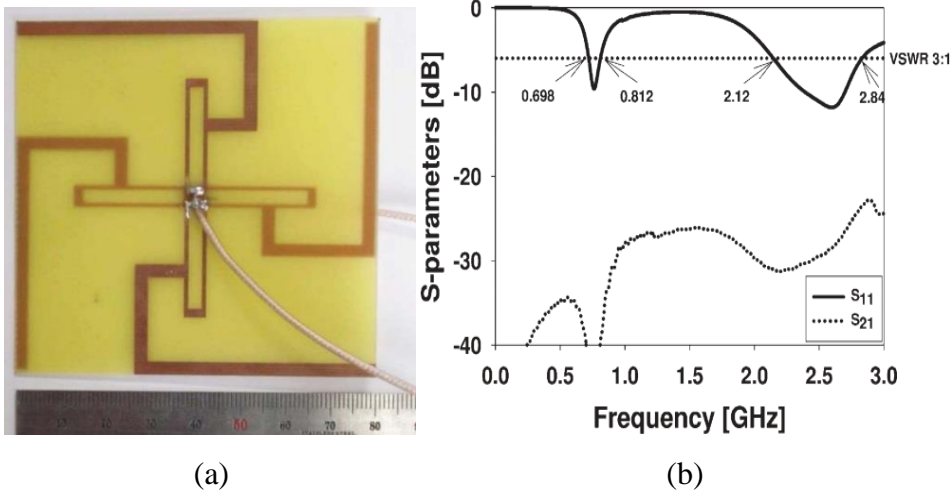
(a)



(b)

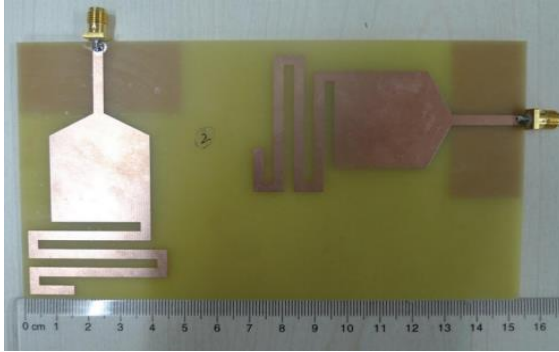
Şekil 2.35. Dört portlu MIMO anten: a) anten prototipi b) S-parametreleri [Costa vd., 2011]

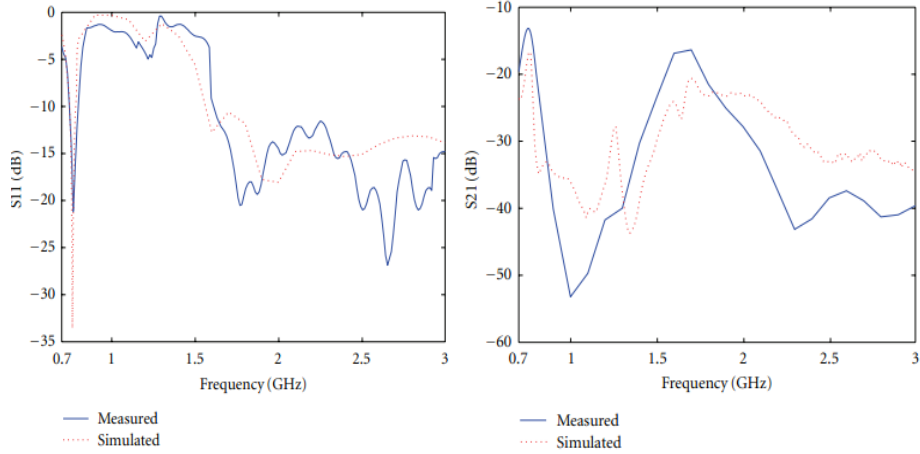
80 x 80 x 0.8 mm³ boyutlarına sahip iki portlu bir MIMO anten, [Han ve Choi, 2011] tarafından geliştirilmiştir. Şekil 2.36'da verilen anten yapısı, bükülmüş dört monopol mikroşerit kolun birleşmesinden meydana gelmiştir. 0.7 ve 2.5 GHz çift çalışma frekansına ve 0.5'in altında ECC'ye sahiptir. Anten boyutları kablosuz uygulamalar için nispeten büyüktür.



Şekil 2.36. MIMO anten: a) anten prototipi b) S-parametreleri [Han ve Choi, 2011]

[Yao vd., 2012] tarafından önerilen anten, $153 \times 83 \times 1.6 \text{ mm}^3$ boyutlarında ve aynı zamanda LTE standardına uyumlu; 0.7, 1.7, 2.1, 2.3 ve 2.5 GHz çalışma frekanslarına sahiptir. Anten yapısı, dikey olarak yerleştirilen iki ışıyan elemandan oluşmaktadır. Anten prototipi ve S-parametre eğrileri Şekil 2.37’de verilmiştir. MIMO anten LTE standardının bazı frekanslarına uyumlu olmakla birlikte anten boyutları çok büyüktür.



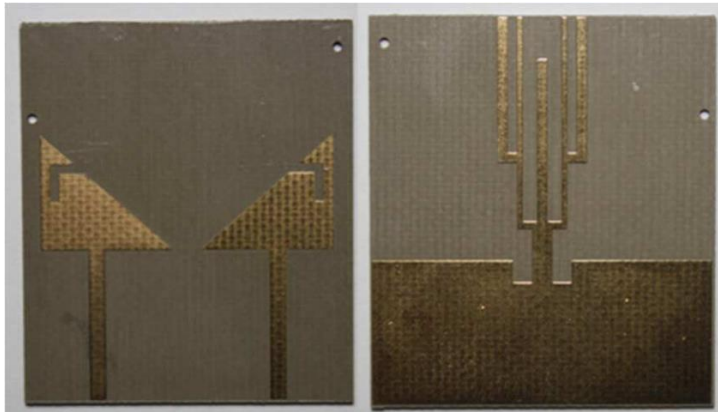


(b)

Şekil 2.37. Dikey MIMO anten: a) anten prototipi, b) S-parametreleri [Yao vd., 2012]

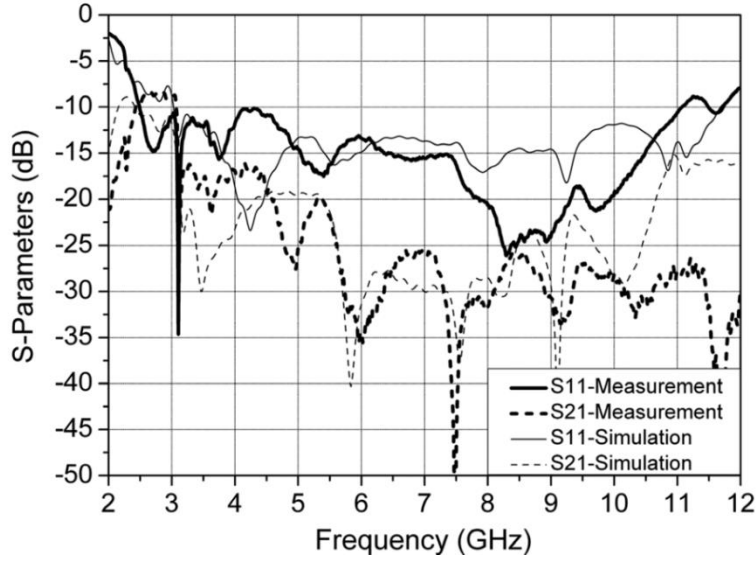
2.5.1. UWB MIMO Anten Çalışmaları

[Zhang vd., 2009] tarafından UWB uygulamalarına yönelik olarak önerilen bir anten Şekil 2.38’de verilmiştir. Karmaşık bir yapıya sahip olan anten, iki eş özellikli, mikroşerit beslemeli, boşluklu üçgensel bir monopolden ve toprak düzlemde beş dallı bir ağaç yapısından oluşmaktadır. 35 x 40 mm² boyutlarına sahip anten 3.1–10.6 GHz frekans bandında çalışmaktadır.



(a)

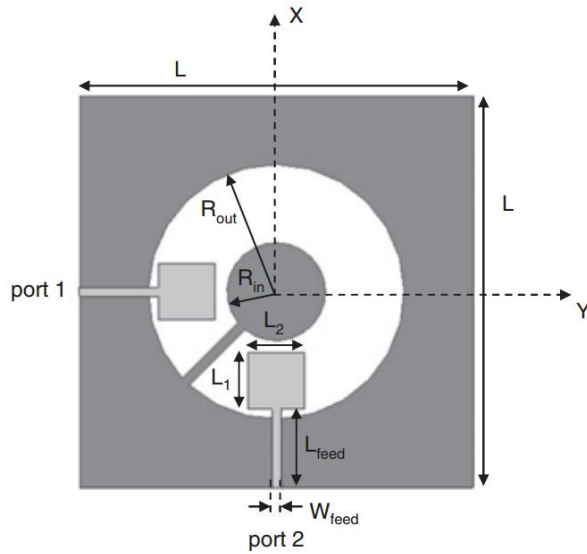
(b)

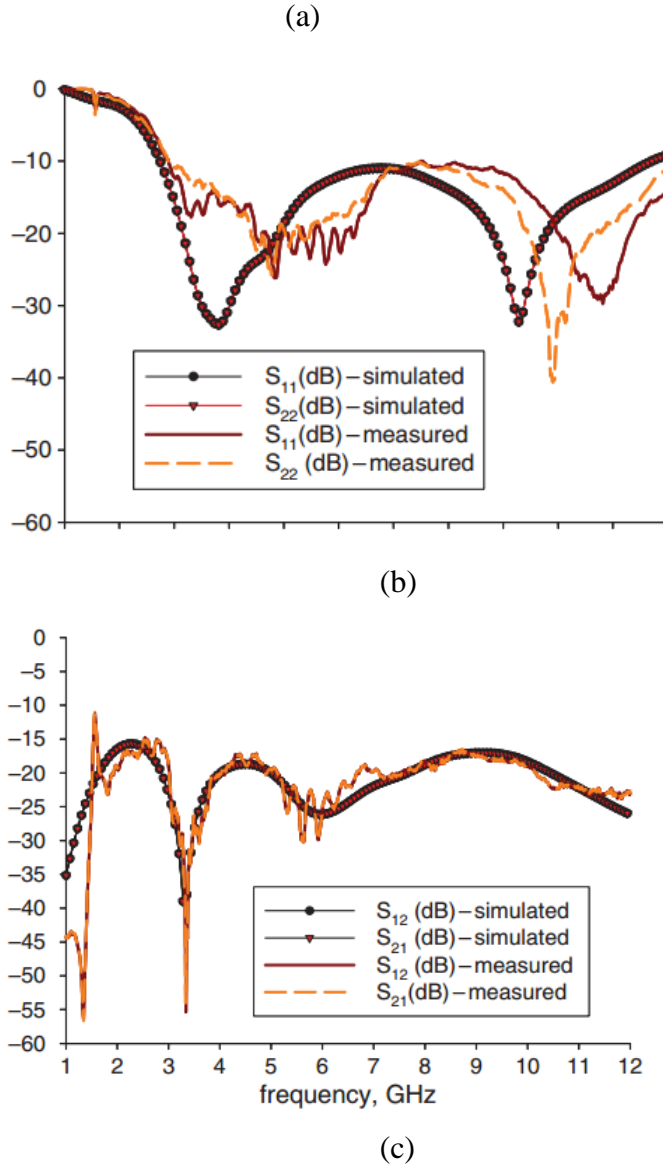


(c)

Şekil 2.38. a) UWB MIMO anten: a) anten prototipinin önden görünüşü b) arkadan görünüşü c) S-parametreleri [Zhang vd., 2009]

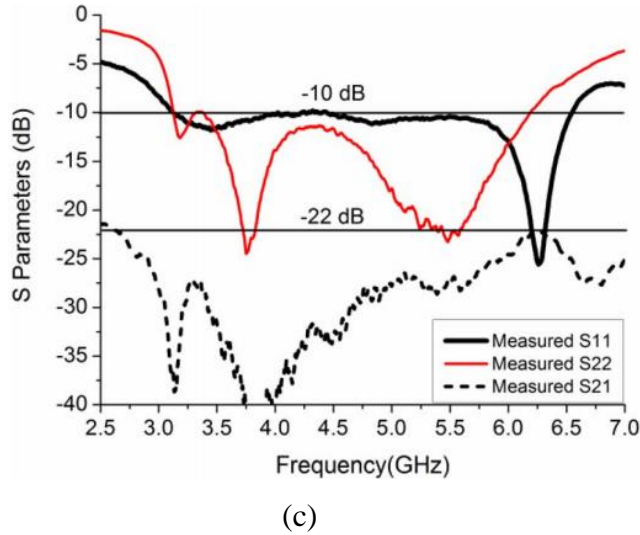
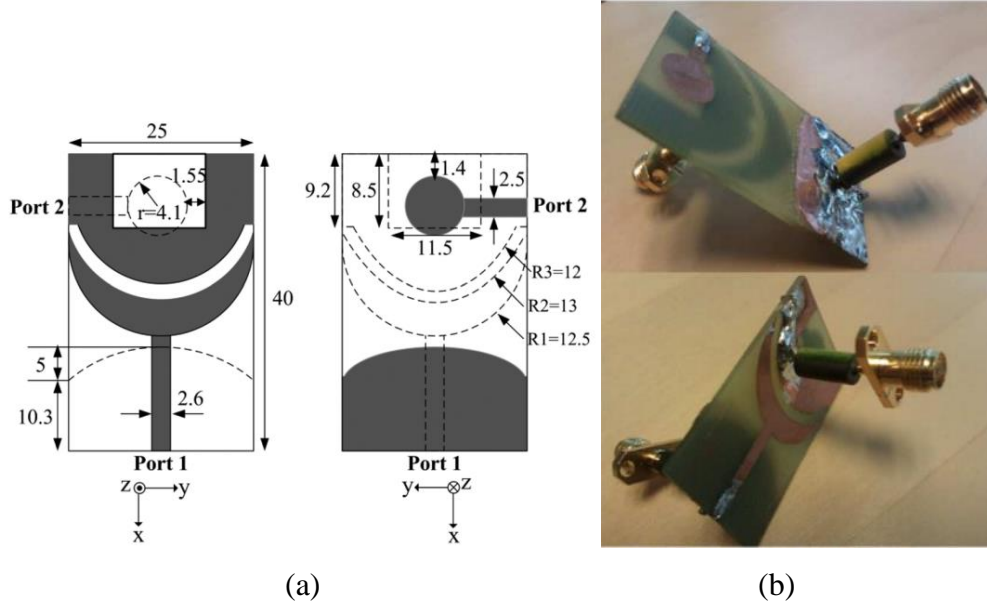
Şekil 2.39’da verilen UWB MIMO anten, [Antonino-D. vd., 2010] tarafından sunulmuştur. Anten yapısı, mikroşerit beslemeli iki eş dikdörtgen monopol ışığıyıcıdan ve merkezinde dairesel bir boşluk bulunan kare toprak düzlemden oluşmaktadır. Anten elemanları arasında korelasyonu düşürmek için elemanlar birbirine göre dikey olarak konumlandırılmıştır ve toprak düzlemin merkezine daire yerleştirilmiştir. $80 \times 80 \text{ mm}^2$ boyutlarına sahip olan MIMO anten, 3–12 GHz frekans bandında çalışmaktadır.





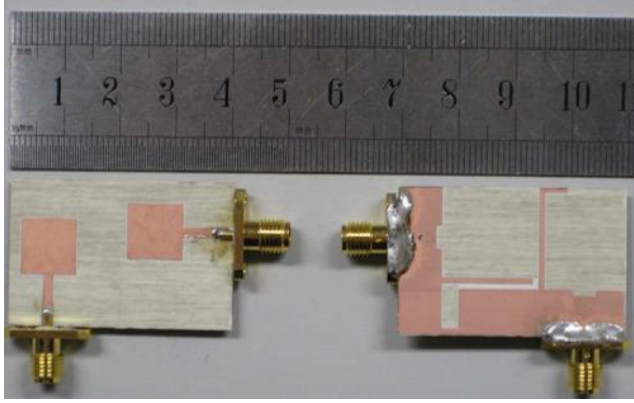
Şekil 2.39. UWB MIMO anten: a) anten geometrisi b) s_{11} ve s_{22} parametreleri b) s_{12} ve s_{21} parametreleri [Antonino-D. vd., 2010]

Şekil 2.40'da geometrisi, prototipi ve S-parametreleri verilen anten, [Zhang vd., 2012] tarafından önerilmiştir. Anten elemanları eş olmayan iç içe geçmiş iki ışıyıcıdan meydana gelmiştir. Anten yapısı, yarım elips şekilli toprak düzlem üzerinde iki boşluklu hilal şekilli monopollü ışıyıcıdan ve dairesel bir monopollü ışıyıcıdan oluşmaktadır. $25 \times 40 \text{ mm}^2$ boyutlarında olan anten, 3.1–5.15 GHz frekans bandında çalışmaktadır. UWB olarak sunulan anten, 3.1–10.6 GHz frekans bant genişliğini gereksinimini karşılayamamaktadır.

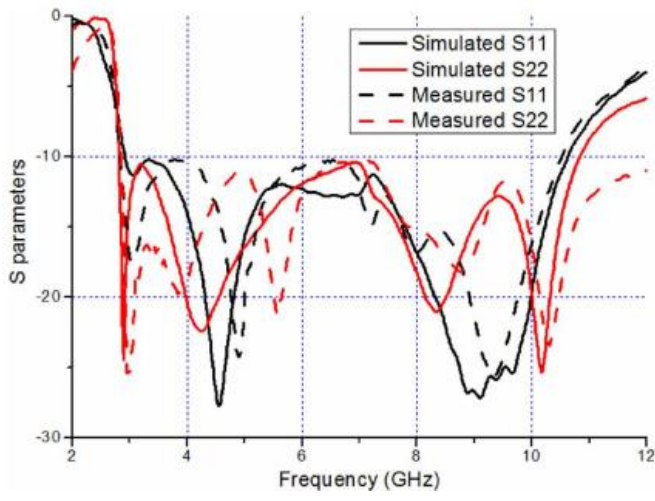


Şekil 2.40. Geniş bant MIMO anten: a) anten geometrisi b) anten prototipi b) S-parametreleri [Zhang vd., 2012]

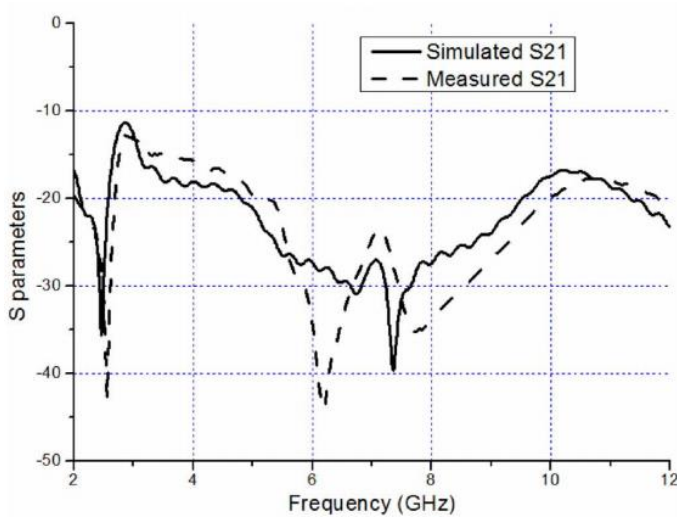
UWB uygulamalarına yönelik bir MIMO anten, [Liu vd., 2013] tarafından sunulmuştur. Anten prototipi ve S-parametreleri Şekil 2.41’de verilmiştir. Anten yapısı, iki eş özellikli dikdörtgen mikroşerit beslemeli ışığıcıdan ve toprak düzlemde ilave olarak iki mikroşerit hattın oluşmaktadır. $26 \times 40 \text{ mm}^2$ boyutlarına anten 3.1–10.6 GHz frekans bandında çalışmaktadır.



(a)



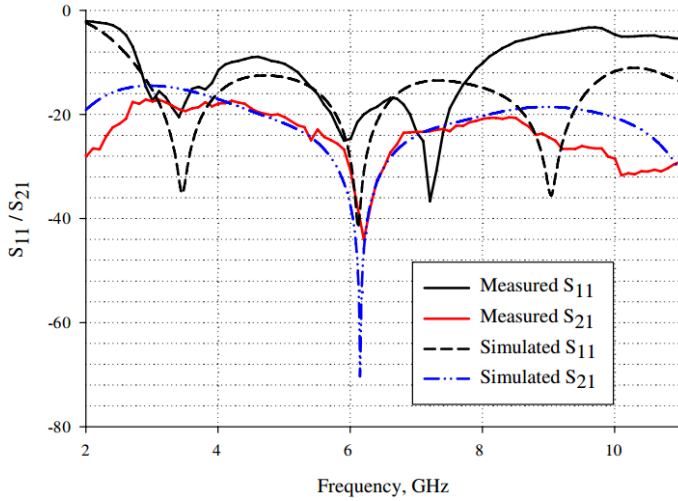
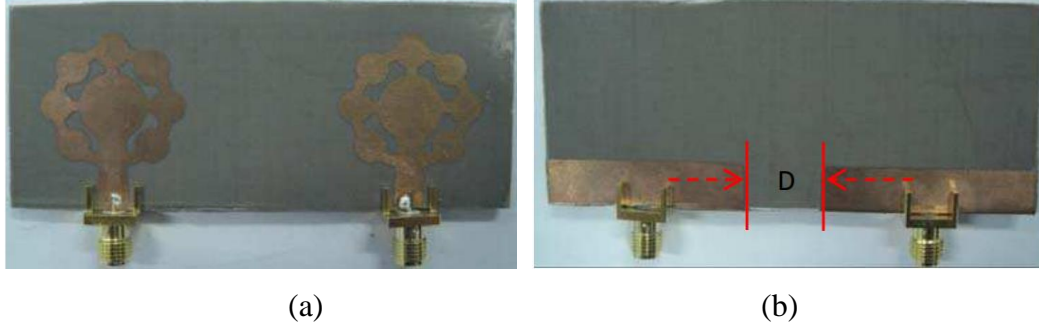
(b)



(c)

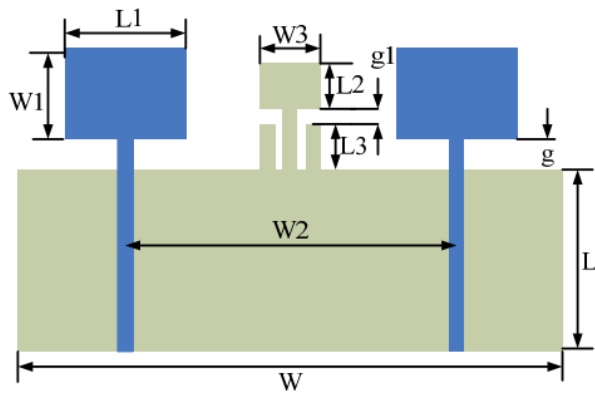
Şekil 2.41. UWB MIMO anten: a) anten prototipi b) s_{11} ve s_{22} parametreleri c) s_{21} parametresi [Liu vd., 2013]

İki eş ışıyıcıdan oluşan ve $38 \times 91 \text{ mm}^2$ boyutlarında MIMO anten [Jusoh vd., 2012] tarafından sunulmuştur. Şekil 2.42’de gösterildiği gibi her ışıyıcı, mikroşerit beslemeli dışında yedi daire ve ortasında bir daireden oluşmaktadır. Anten, UWB uygulamalarına yönelik tasarlanmasına rağmen 2.8–8 GHz bandında çalışmaktadır.

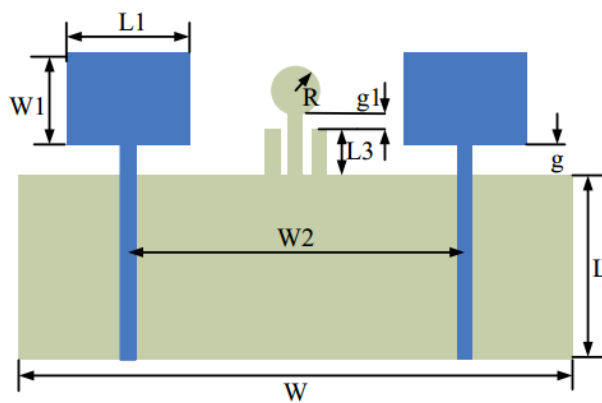


Şekil 2.42. MIMO anten: a) anten prototipinin önden görünüşü b) arkadan görünüşü c) S-parametreleri [Jusoh vd., 2012]

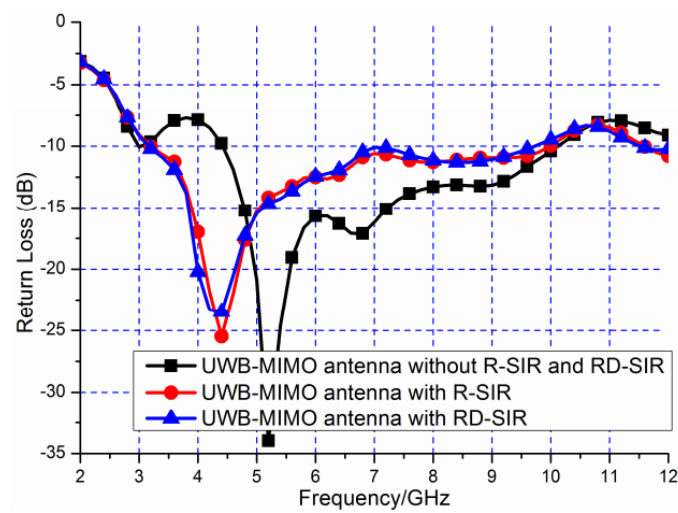
[Li vd.,2012] tarafından çalışılan iki MIMO anten tasarımı, Şekil 2.43’de verilmiştir. Anten tasarımları, mikroşerit beslemeli iki eş dikdörtgen ışıyıcıdan ve bu ışıyıcılar arasındaki izolasyonu artırmak için ikisinin arasında toprak düzlemde kollu bir yapıdan oluşmaktadır. 3.1– 10 GHz frekans bandında çalışan anten, $38 \times 62 \text{ mm}^2$ boyutlarına sahiptir.



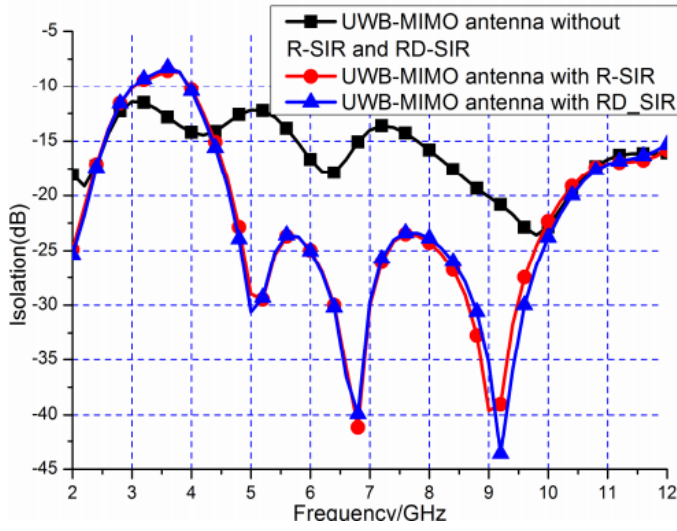
(a)



(b)



(c)

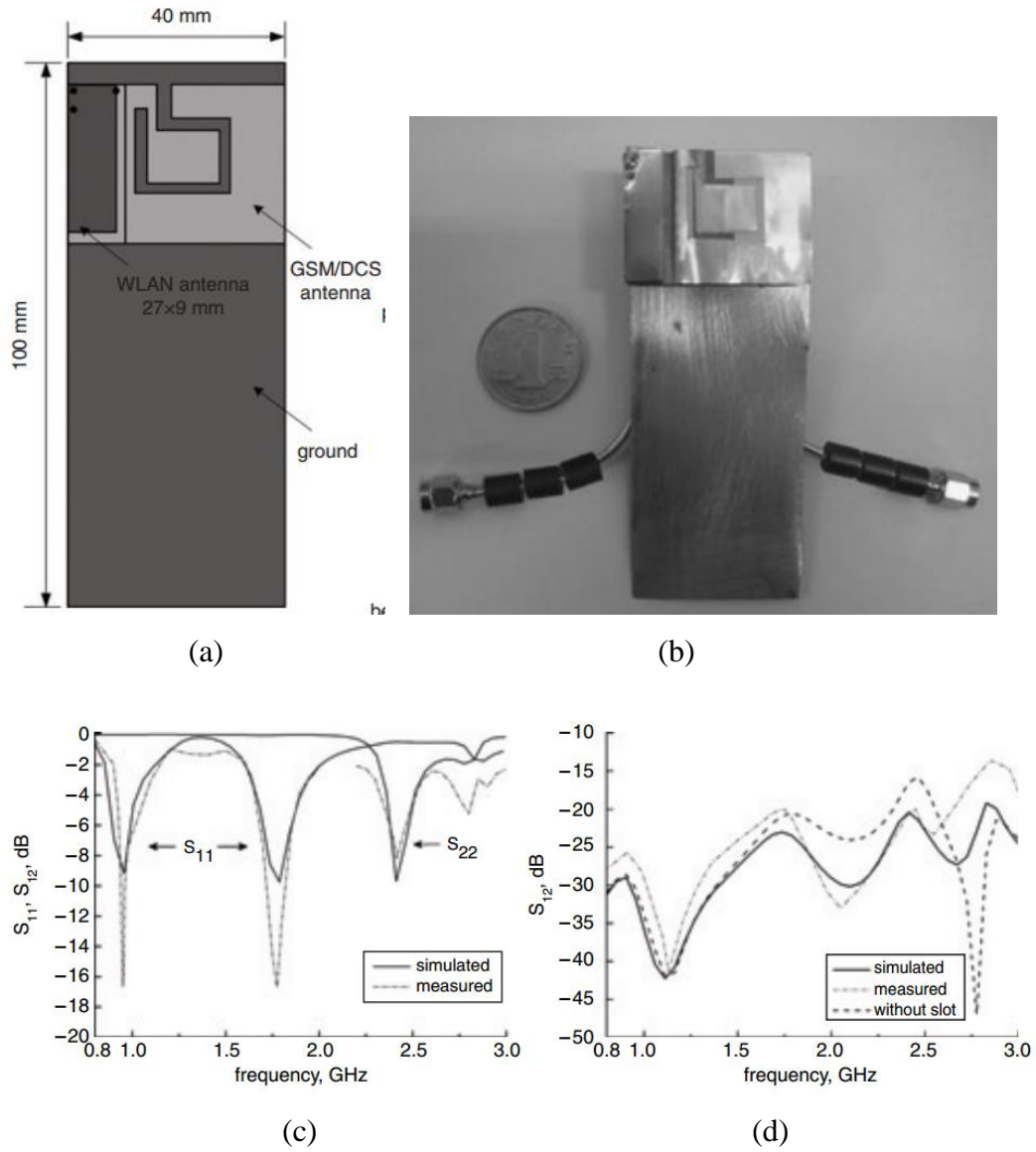


(d)

Şekil 2.43. UWB MIMO anten: a) anten geometrisi (R-SIR) b) anten geometrisi (RD-SIR) c) s_{11} parametresi b) s_{12} parametresi [Li vd.,2012]

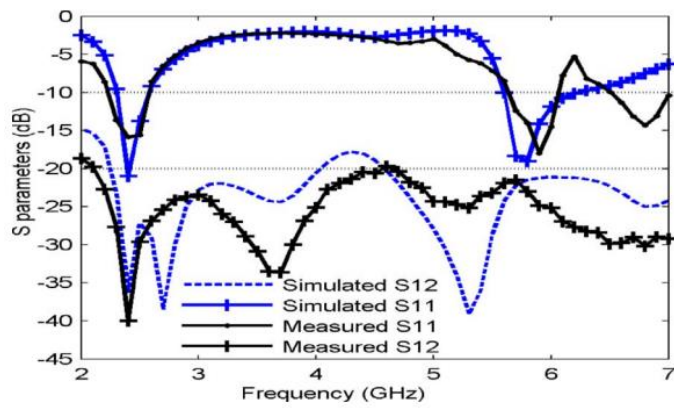
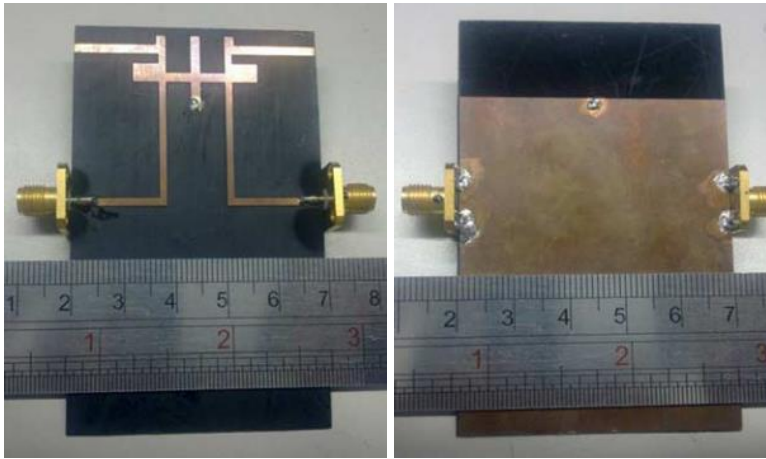
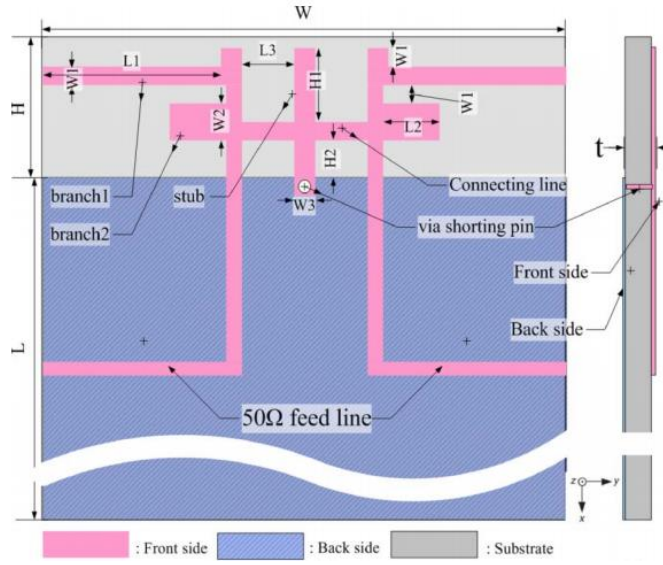
2.5.2. Gezgin Terminallere Yönelik MIMO Anten Tasarımları

[Li vd., 2009] tarafından, GSM/DCS ve WLAN uygulamaları için tasarlanan MIMO anten, Şekil 2.44'de verilmiştir. Anten yapısı temel olarak, iki PIFA ışıyıcıdan oluşmaktadır. Birinci anten, GSM900/DCS1800 bandında, diğeri, WLAN/2.4 GHz bandında çalışmaktadır. Portlar arasındaki izolasyonu artırmak için iki teknik kullanılmıştır: birinci teknikte koaksiyel besleme kablosunun dış iletkeni kısa devre şeridi gibi kullanılmıştır; ikinci teknikte ise GSM bandını sağlayan ışıyıcıda dikdörtgen bir boşluk açılmıştır. Böylece, 0.8–2.6 GHz frekans aralığında –20dB izolasyon sağlanmıştır.



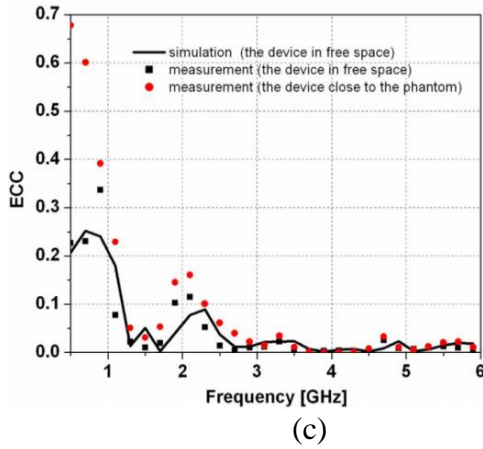
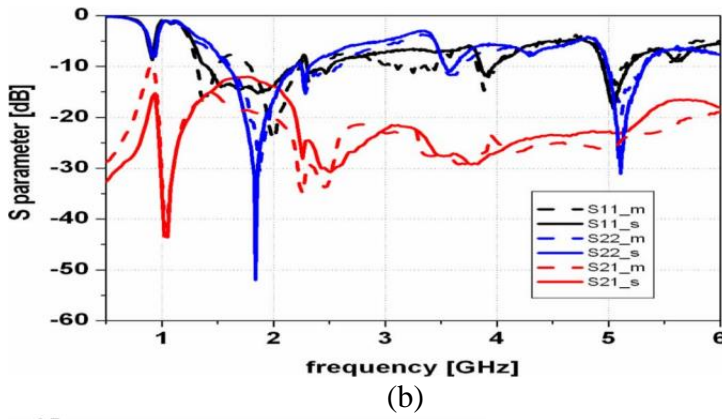
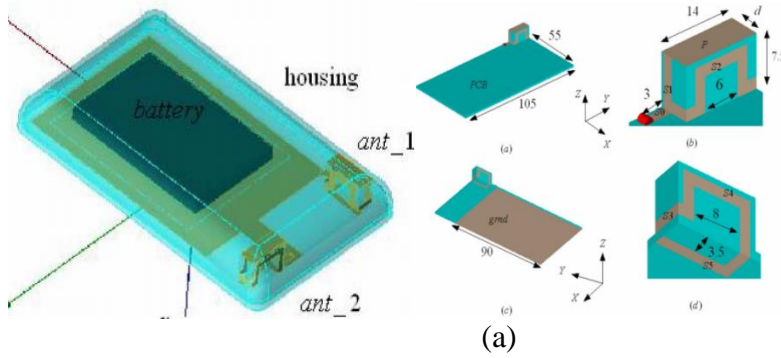
Şekil 2.44. MIMO PIFA: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) s_{11} ve s_{22} parametreleri d) s_{12} parametresi [Li vd., 2009]

[Ling ve Li, 2011] tarafından sunulan çalışmada, taşınabilir kablosuz cihazlar için çift bantlı bir MIMO anten sunulmuştur. Anten geometrisi, prototipi ve S-parametreleri, Şekil 2.45’de verilmiştir. $15 \times 50 \times 0.8 \text{ mm}^3$ boyutlarında olan anten dizisi, 2.45 GHz ve 5.8 GHz bantlarını kapsamaktadır. MIMO anten dizisi, aralarında $0.096 \lambda_0$ (havada 2.4 GHz için) mesafe olan sırt sırta yerleştirilmiş iki monopollü elemandan oluşmaktadır. Anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için kısa devre pin ve izolasyon şeridi kullanılmıştır.



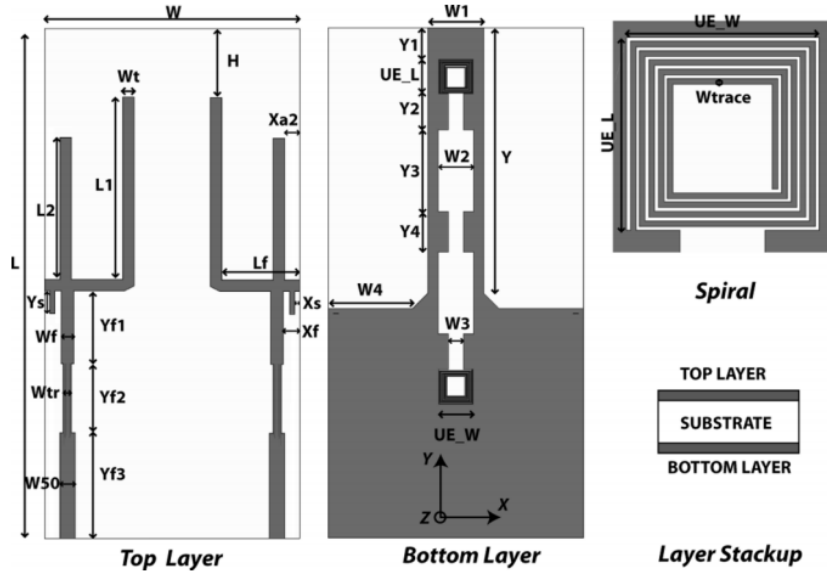
Şekil 2.45. MIMO anten: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) S-parametreleri [Ling ve Li, 2011]

Günümüz gezgin terminallere uyumlu, iki portlu dikey MIMO anten tasarımı, [Rao ve Wilson, 2011] tarafından yapılmıştır. Anten elemanları, gezgin kartın köşelerinde kıvrılmak suretiyle oluşmuştur. Anten geometrisi, ECC ve S-parametreleri Şekil 2.46'da verilmiştir. $7 \times 15 \times 7.5 \text{ mm}^3$ boyutlarında olan anten belirli bir gezgin terminale göre tasarlanmıştır. ECC, 0.5'in altında olan anten geniş bir çalışma bandına sahiptir. Ancak, antenin S-parametreleri çalışma bandı boyunca bazı yerlerde -10dB 'nin altına inememiştir.

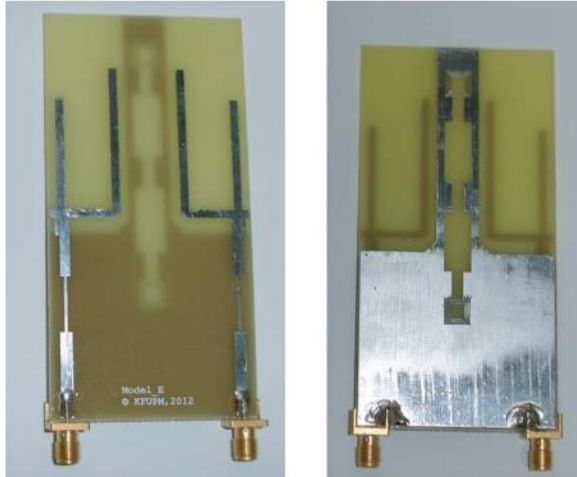


Şekil 2.46. MIMO anten: a) anten geometrisi b) s parametreleri c) ECC eğrileri [Rao ve Wilson, 2011]

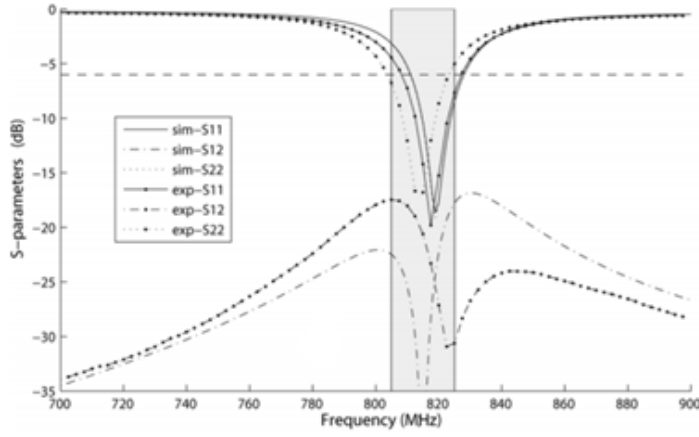
Çift bantlı, “4” şekilli bir MIMO antenin geometrisi, prototipi ve S-parametreleri Şekil 2.47’de verilmiştir. [Sharawi vd., 2012] tarafından LTE gezgin terminaller için önerilen bu anten, iki elemandan oluşmaktadır. Alt bant 803–823 MHz, üst bant 2440–2900 MHz aralığını kapsamaktadır. $50 \times 100 \times 1.56 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki anten, elemanları arasındaki izolasyonu sağlamak için toprak düzleminde karmaşık yapılar kullanılmıştır.



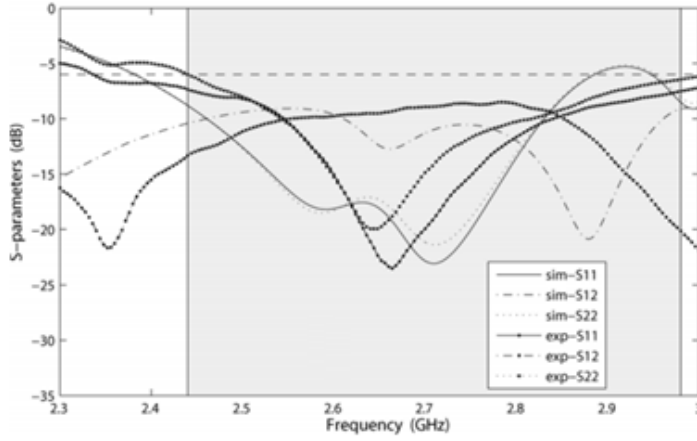
(a)



(b)



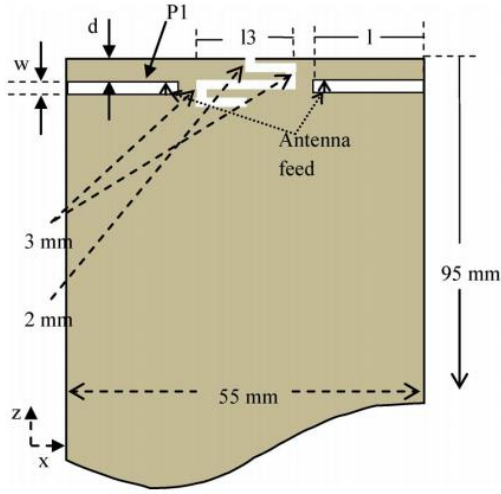
(c)



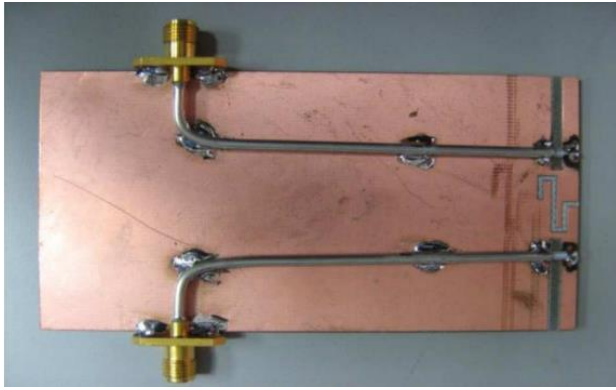
(d)

Şekil 2.47. MIMO anten: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) S-parametreleri (alt frekans bandı için) d) S-parametreleri (üst frekans bandı için) [Sharawi vd., 2012]

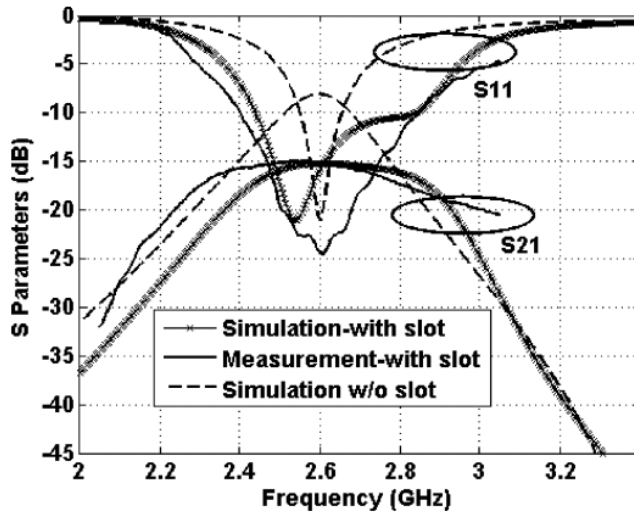
Şekil 2.48'de WLAN uyumlu gezgin terminallere yönelik bir MIMO IFA geometrisi, prototipi ve S-parametreleri gösterilmiştir. 2.4–2.84 GHz frekansında çalışan anten [Ayatollahi vd., 2012] tarafından tasarlanmıştır. Anten, PCB kart üzerinde çeyrek dalga monopolleri iki boşluktan ve bunların arasında bükülmüş bir boşluktan meydana gelmiştir. Aradaki bükülmüş boşluk hem empedans bant genişliğini artırmaktadır, hem de izolasyonu iyileştirmektedir.



(a)



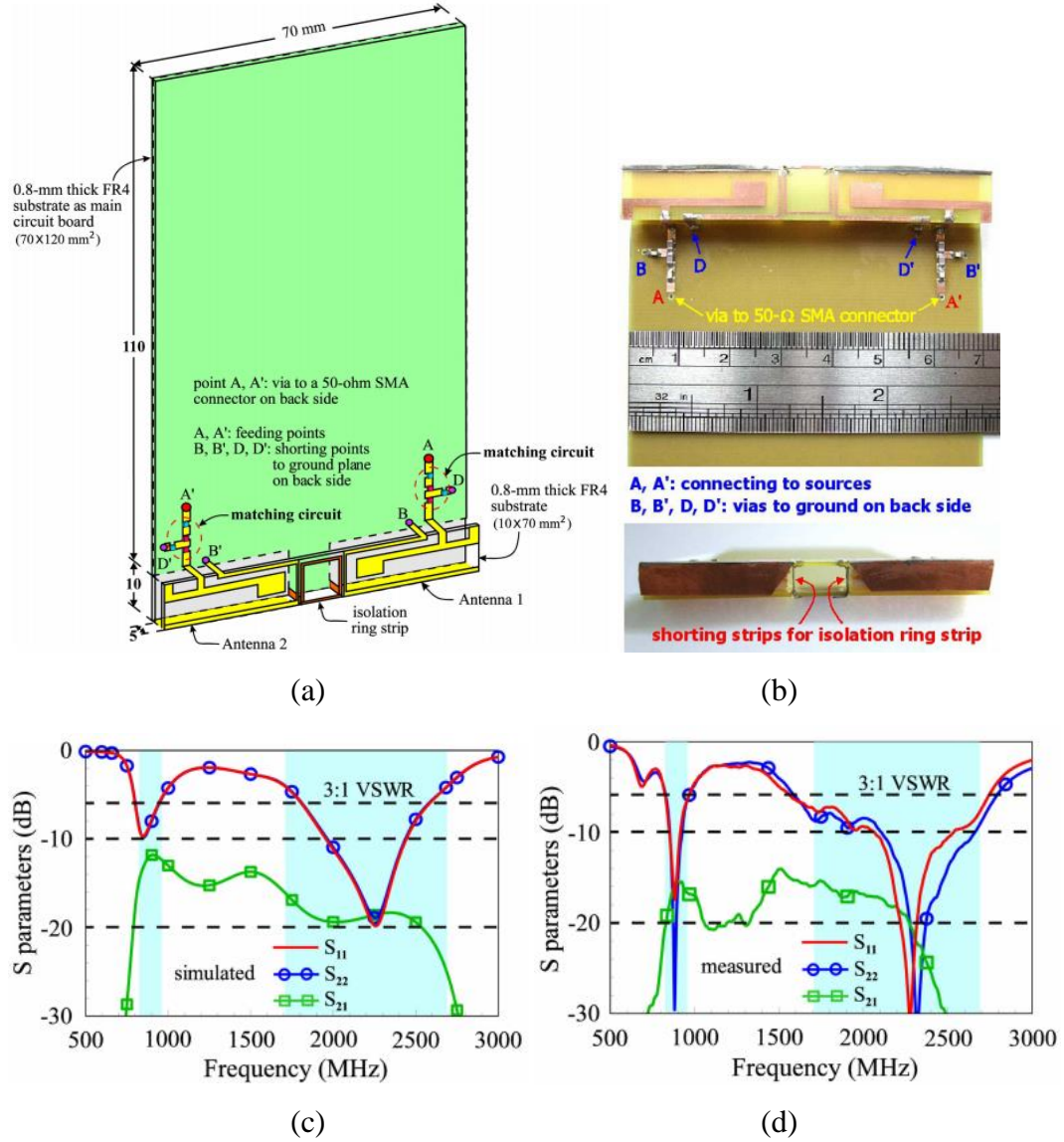
(b)



(c)

Şekil 2.48. MIMO IFA: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) S-parametreleri [Ayatollahi vd., 2012]

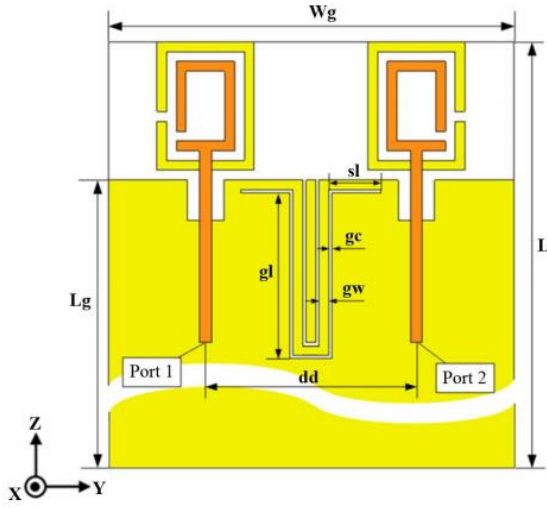
[Wong vd., 2013] tarafından önerilen çift bantlı MIMO anten Şekil 2.49'da verilmiştir. WLAN ve LTE uygulamalarına uyumlu tasarlanan ve $10 \times 70 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki anten dizisi, iki elemandan ve ikisinin arasında bir izolasyon halkadan oluşmaktadır. GSM 850/900, GSM 1800/1900 ve UMTS/LTE 2300/2500 bantları için tasarlanan anten, 824–960 ve 1710–2690 MHz frekans aralıklarını kapsamaktadır.



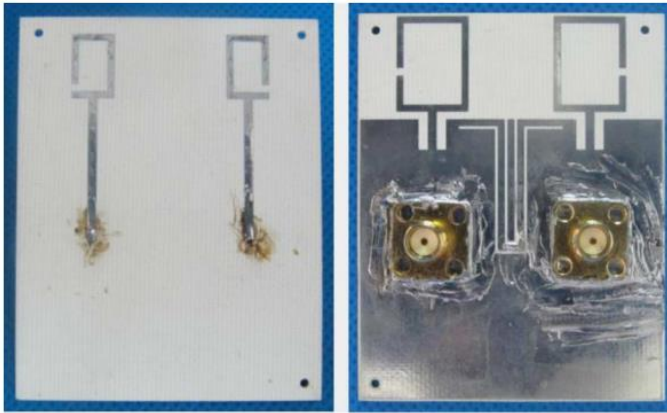
Şekil 2.49. MIMO anten: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) benzetilen S-parametreleri d) ölçülen S-parametreleri [Wong vd., 2013]

Anten geometrisi, gerçekleştirilmiş prototipi ve S-parametre eğrileri Şekil 2.50'de verilen MIMO anten, [Zhou vd., 2012] tarafından geliştirilmiştir. $50 \times 17 \times$

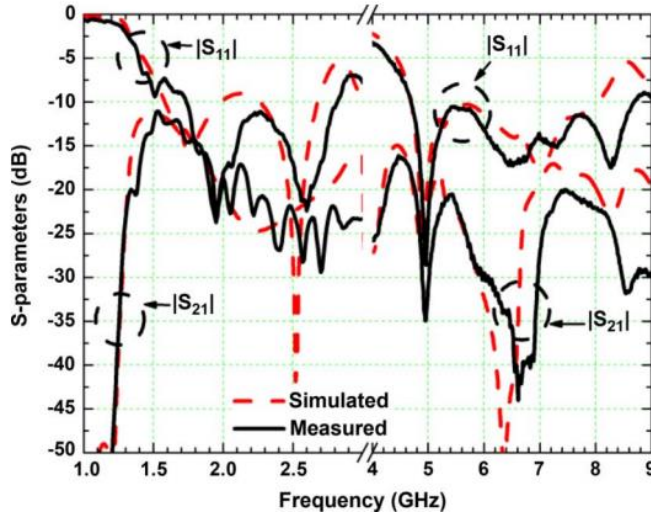
0.8 mm³ boyutlarına sahip anten, GSM, UMTS, LTE ve WLAN kablosuz iletişim standartlarını desteklemektedir. Çift bantta çalışan anten, iki geniş bant elemana sahiptir. Her eleman, iki açık uçlu halka şeritlerden oluşmaktadır. Dıştaki yarım dalga halka dipol, ışına yapan içteki halka tarafından uyarılmaktadır. Alt bant, 1.5–2.8 GHz ve üst bant 4.7–8.5 GHz frekans aralığını kapsamaktadır.



(a)



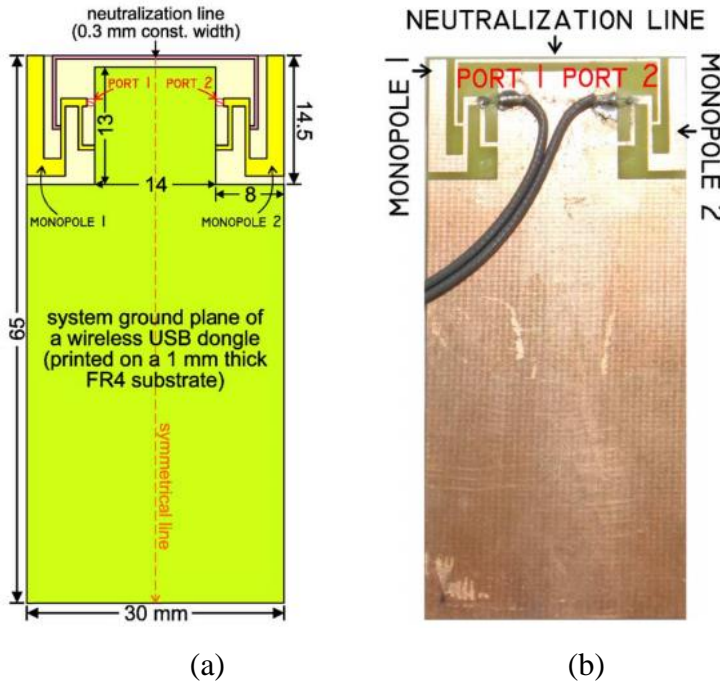
(b)



(c)

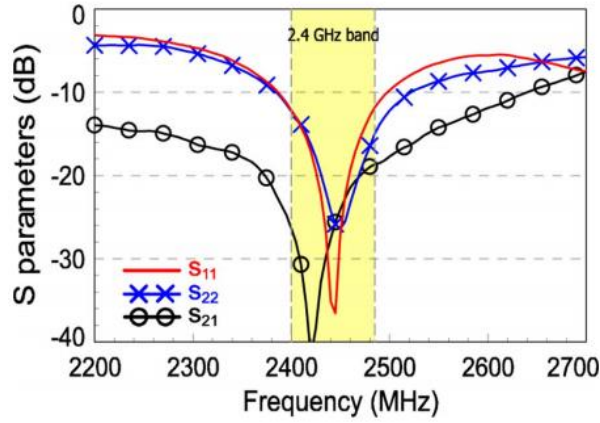
Şekil 2.50. MIMO anten: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) S-parametreleri [Zhou vd., 2012]

Şekil 2.51’de bir MIMO PIFA geometrisi, prototipi ve S-parametreleri verilmiştir. 14.5 x 30 mm² boyutlarındaki anten, [Su vd., 2012] tarafından WLAN/2400 USB uygulamaları için tasarlanmıştır. İki monopol anten elemanının bir PCB kartının köşelerine yerleştirilmesiyle oluşturulan MIMO dizisine, bir nötr şeridi entegre edilmiştir.



(a)

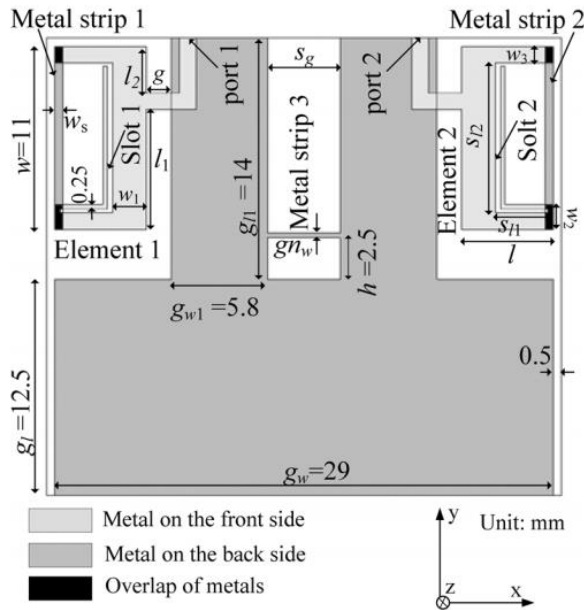
(b)



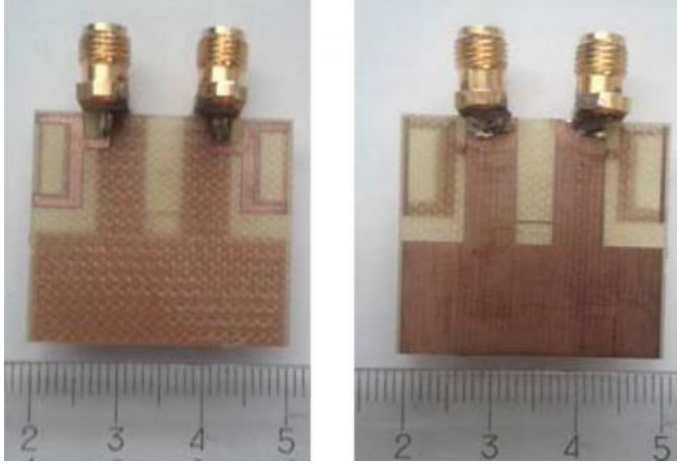
(c)

Şekil 2.51. MIMO IFA: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) S-parametreleri [Su vd., 2012]

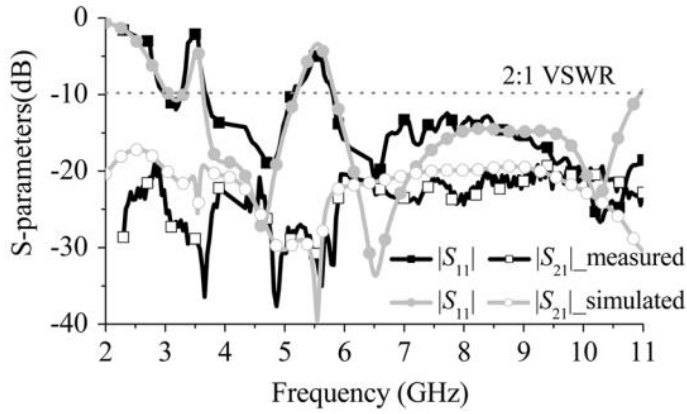
Şekil, 2.52’de [Li vd., 2013] tarafından tasarlanan çift bantlı bir UWB MIMO anten gösterilmiştir. Anten elemanları, $27 \times 30 \times 0.8 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki bir FR4 malzeme üzerinde tasarlanmıştır. İzolasyonu artırmak için $5.5 \times 11 \text{ mm}^2$ ebadındaki anten elemanları toprak düzlemindeki iki çıkıntıya bağlanmıştır. Anten elemanları bükülmüş iki koldan ve bu kolların arasına yerleştirilen şeritlerden oluşmuştur. Aradaki şeritlerden biri, 3.30–3.70 GHz bandını durdururken diğeri 5.15–5.85 GHz bandını durdurmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.52. MIMO anten: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) S-parametreleri [Li vd., 2013]

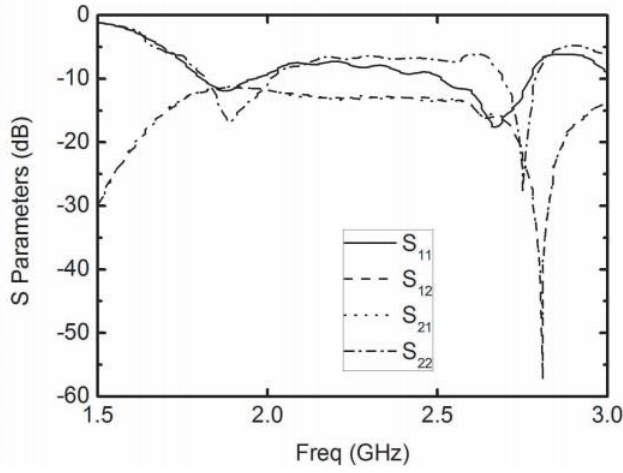
Şekil 2.53’de gösterilen MIMO anten [Li vd., 2014] tarafından kablosuz iletişim uygulamaları için önerilmiştir. $24.5 \times 15 \times 1.2 \text{ mm}^3$ boyutlarında olan anten, 1710–2690 MHz ($s_{11} = 6\text{dB}$ için) bandından çalışmaktadır. Anten yapısı, besleme düzlemine sahip iki eş elemandan ve ışıyan mikroşerit yapıdan oluşmaktadır. Anten, yaklaşık -10dB izolasyona sahiptir.



(a)



(b)

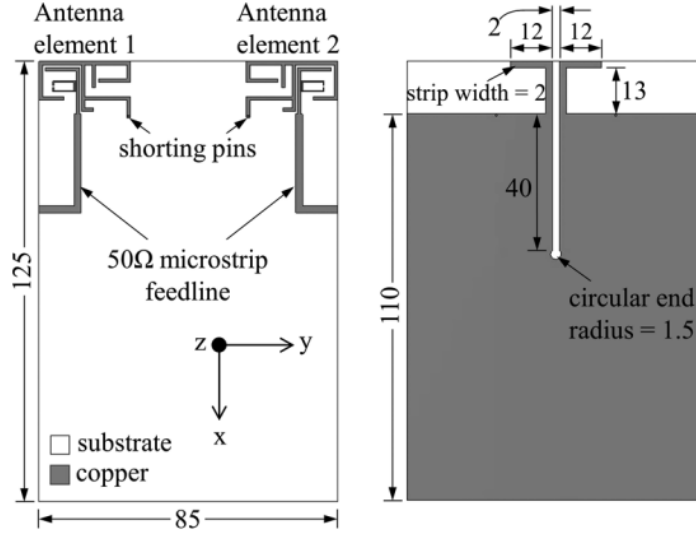


(c)

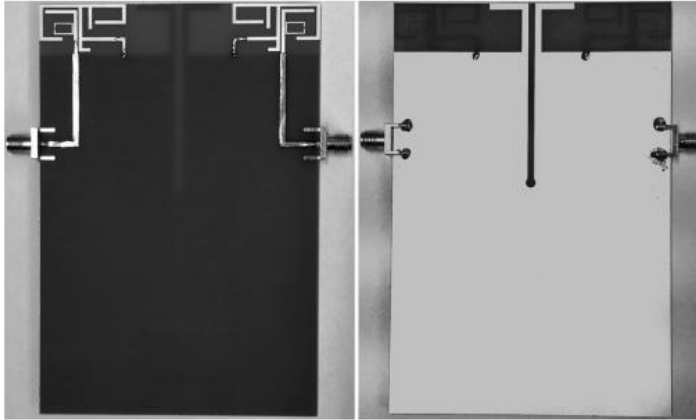
Şekil 2.53. MIMO anten: a) anten geometrisi b) anten prototipi b) S-parametreleri [Li vd., 2014]

Şekil 2.54’de gösterilen MIMO anten çalışması [Shoaib vd., 2014] tarafından önerilmiştir. Çok bantlı MIMO anten, 900 MHz’de $0.097\lambda_0$ aralıklı simetrik iki monopul elemandan oluşmaktadır. $16 \times 26.3 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki her eleman,

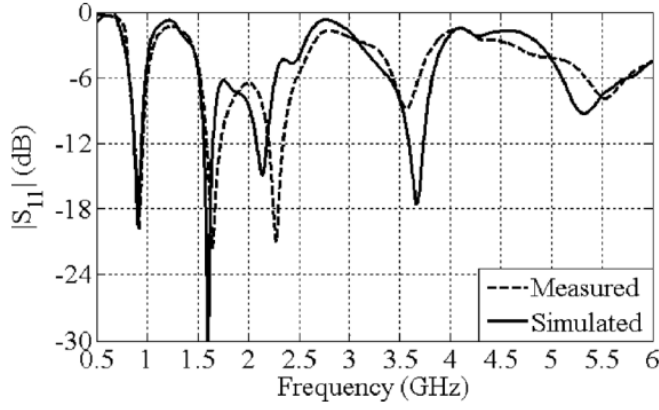
bükülmüş iki hattan, bir halka şeritten ve bir kısa devre şeritten meydana gelmiştir. Bu ışıyıcılar, 50 Ohm mikroşerit ile beslenmiştir. Böylece anten, GSM850/900, DCS, PCS, UMTS, WLAN ve WiMAX standartları olan 900, 1800, 2100, 3500 ve 5400 MHz frekans bantlarında çalışmaktadır.



(a)



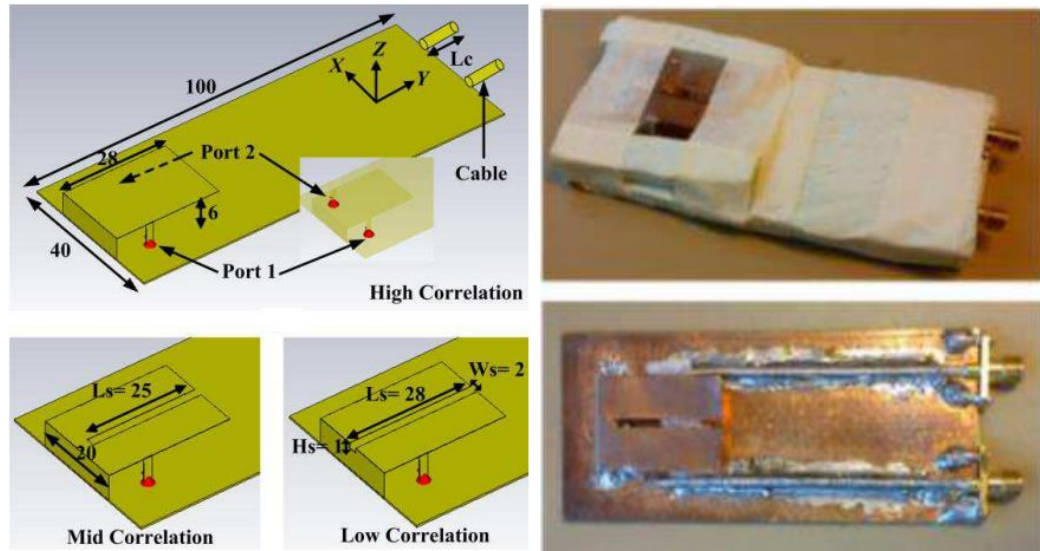
(b)



(c)

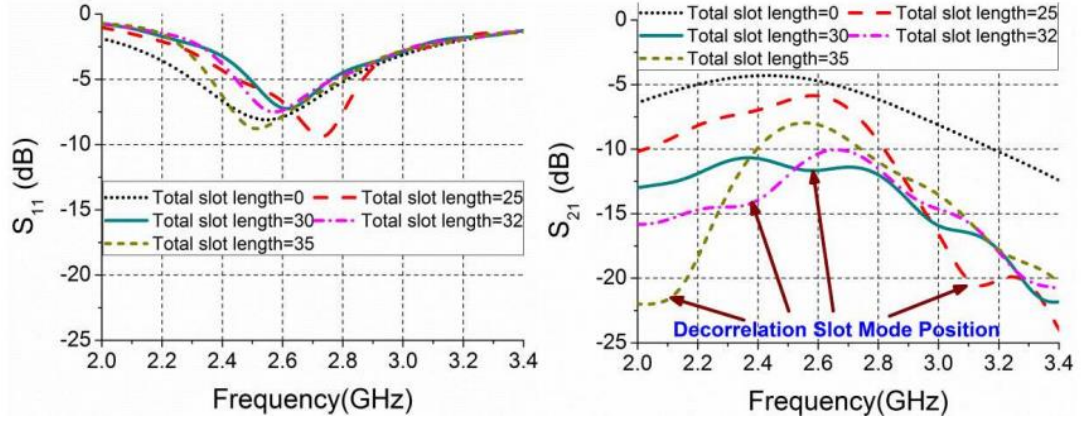
Şekil 2.54. MIMO anten: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) S-parametreleri [Shoaib vd., 2014]

[Zhang vd., 2014] tarafından geliştirilen referans MIMO PIFA, Şekil 2.55’de gösterilmiştir. Bu çalışmada, PIFA üzerinde açılan boşluğun boyu ile besleme kablosunun etkileri ve ECC değeri kontrol edilebilmektedir. Sadece ECC incelendiğinde, MIMO referans antenin veriminin %70’den %50’ye düşürülmesi karşılığında ECC’si 0.1’den 0.88’e yükseltilmiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 2.55. MIMO PIFA: a) anten geometrisi b) anten prototipi c) S-parametreleri [Zhang vd., 2014]

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, MIMO anten tasarımları IE3D™ paket programı aracılığıyla yapılmıştır. Tasarlanan antenlerin S-parametreleri, bant genişliği, ışınma örüntüsü, kazanç, ECC ve TARC yönünden performansı incelenmiştir. MIMO çalışma gereksinimlerini karşılayan antenlerin, her iki tarafı bakır olan PCB (printed circuit board) kartı üzerine LPKF-ProtoMat H60 CNC cihazı kullanılarak prototipleri gerçekleştirilmiştir. Anten prototiplerinin S-parametreleri ölçümleri, Agilent Technologies N5230A PNA-L RF network analizör kullanılarak elde edilmiştir.

3.1. IE3D™ YAZILIMI

Elektromanyetik benzetim programı, karmaşık mikrodalga, RF baskı devre, anten, yüksek hızlı sayısal devreler ve diğer elektronik parçaların doğru bir şekilde analizlerini ve tasarımlarını yapabilen ileri bir teknolojidir. IE3D™, üç boyutlu (3B), düzlemsel mikrodalga devreler, MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit), RFIC (Radio Frequency Integrated Circuit), RFID (Radio Frequency Identification), antenler, sayısal devreler, yüksek hızlı PCB'lerin tam dalga elektromanyetik benzetimini ve optimizasyonunu yapabilen MoM'a [Harrington, 1993] (Ek-1'e bakınız) dayanan bir paket yazılımdır. IE3D™ çok yönlü, kolay kullanılabilir, etkin ve doğru bir elektromanyetik benzetim aracı olmuştur. IE3D™ ile yakın ve uzak alan analizi, 2B ve 3B ışınma örüntüsü, 3B yüzey akım dağılımı, kazanç, yönlülük, verimlilik, gerilim duran dalga oranı ve S-parametreleri grafikleri elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında IE3D™ ile yapılan benzetimler detaylı olarak Ek-2 bölümünde anlatılmıştır.

3.2. PCB MATERYAL

Bu tez çalışmasında IE3D™ aracılığıyla tasarlanan MIMO antenlerin prototipleri, çift yüzlü bakır FR4 PCB materyali üzerine basılmıştır. Materyalin temsili bir görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu çalışmada, FR4'ün dielektrik sabiti 4.4 ve tanjant kaybı 0.017 olarak alınmıştır. FR4'ün en önemli avantajı, yaygın kullanımı ve kolay temin edilebilmesidir. Ayrıca, bu malzeme baskı devrelerin üretilmesinde de kullanıldığı için gezgin terminaller için tasarlanan MIMO antenler,

entegre devreler ile aynı kart üzerine yerleştirilebilmesi için genellikle FR4 materyali üzerine yerleştirilmektedir. Buna karşın, tanjant kaybı nispeten yüksektir. Aynı elektriksel özelliklere sahip daha düşük tanjant kaybı olan materyalin kullanılması halinde daha yüksek kazaca sahip antenler elde edilebilir.



Şekil 3.1. Çift yüzlü bakır FR4 PCB materyalinin temsili görüntüsü

3.3. PCB CNC MAKİNESİ

CNC makinesi, anten ve devre kartı prototiplerinin üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında MIMO anten prototiplerinin gerçekleştirilmesinde LPKF-ProtoMat H60 makinesi kullanılmıştır. Makineye ait bir görüntü Şekil 3.2’de verilmiştir. Makine, bir taban düzlemi, x/y hareket sistemi ve bir çizici başlıktan oluşmaktadır. Makine, x/y hareket sistemi sayesinde her iki eksende hareket edebilmektedir. Çizici başlık, aşağı-yukarı da hareket edebilmektedir. Bu sayede, gerçekleştirilmek istenilen tasarımda düzlemsel oyuklar ve delikler açılabilir. Makine bu işlemleri 1 mikro metre çözünürlük hassasiyet ile yapmaktadır. Böylece, tasarlanan yapı birebir gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, oyma ve delme işleminden dolayı ortaya çıkan partiküller, entegre olan vakum sistemi ile çekilmektedir. Cihazın daha detaylı teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

Minimum iletken genişliği	: 0.1 mm
Minimum iletken aralığı	: 0.1 mm
Minimum delik çapı	: 0.2 mm

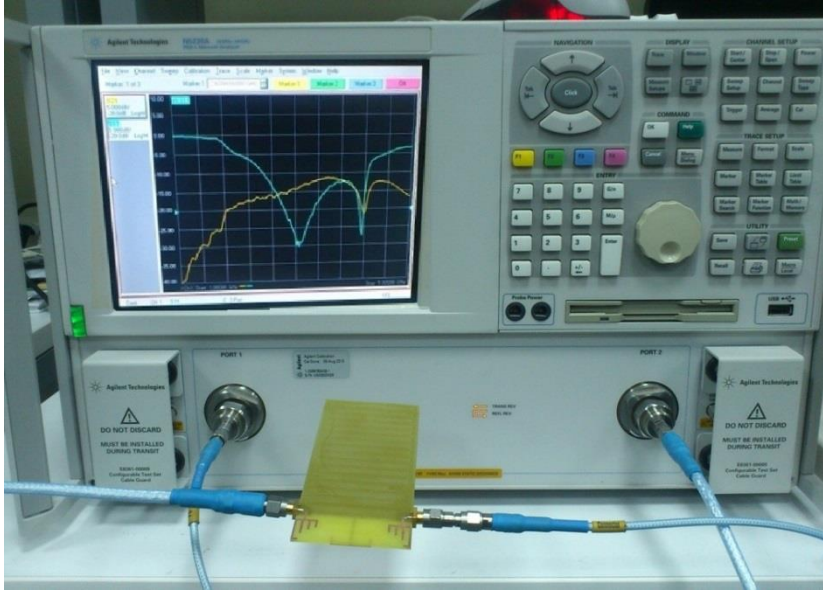
Hareket aralığı	: 420 mm x 380 mm
Tekrarlama doğruluğu	: +/- 0.001 mm
Makine mili	: 3-Phase-Motor 10,000-60,000/min.
Delme kapasitesi	: azami 120 adet/dakika
Çözünürlük (minimum hareket adımı)	: 0.001 mm
Hareket hızı	: 80 mm /saniye
X/Y sürücü	: Step motorlar, doğruluk mili
Z sürücü	: Pnömatik 15mm Z-eksen



Şekil 3.2. LPKF-ProtoMat H60 PCB CNC makinesi

3.4. NETWORK ANALİZÖR

Bu tez kapsamında, farklı parametrelere ayarlanabilme ve geniş spektrumda kullanılabilme gibi özelliklerinden dolayı Şekil 3.3’de gösterilen N5230A PNA-L Network analizör kullanılmıştır. Agilent N5230A PNA-L Network analizör, 2 portludur ve 50 GHz’e kadar ölçüm yapabilmektedir. Söz konusu cihaz ile MIMO antenlerin S-parametreleri ölçülmüştür.



Şekil 3.3. Agilent N5230A PNA–L Network analizör

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, düşük korelasyonlu, küçük boyutlu bir UWB MIMO anten ve LTE, WiMAX ve WLAN standartlarına uyumlu, anten elemanları arasındaki izolasyonu iyileştirilmiş, gezgin terminaller için geniş bant iki MIMO anten tasarlanmıştır ve prototipleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, bu antenlerin tasarım prosedürleri, çalışma prensipleri, benzetimleri ve anten prototiplerinin gerçekleştirilme aşamaları anlatılmıştır. Ayrıca, antenlerin ışınma örüntüsü, yüzey akım dağılımları, kazanç, ECC ve TARC yönünden performans incelemesi yapılmıştır.

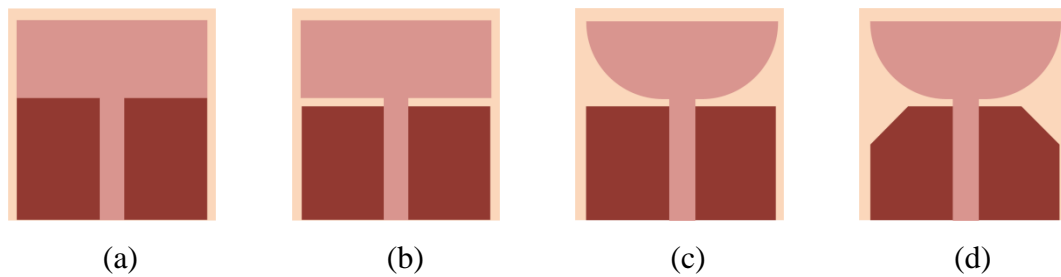
4.1. DÜŞÜK KORELASYONLU KOMPAKT UWB MIMO ANTEN TASARIMI VE PROTOTİPİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Bu bölümde, UWB uygulamalarına yönelik 3.1–12.3 GHz arasında çalışan 26 x 55 mm² boyutlarında bir MIMO anten tasarlanmıştır ve prototipi gerçekleştirilmiştir. MIMO anten dizisi, düzlemsel iki özdeş elemandan meydana gelmektedir. Her eleman, mikroşerit beslemeli bir düzlemsel ışıyıcıdan ve yaklaşık yarı ölçülere sahip bir toprak düzlemden oluşmaktadır. Anten elemanları, giriş portları arasında izolasyonu sağlamak için birbirine göre dikey olarak konumlandırılmıştır. MIMO antene ait bant genişliği, ışınma örüntüsü, yüzey akım dağılımı, kazanç, ECC ve TARC gibi performans parametreleri elde edilmiştir. Benzetim ve ölçüm sonuçları, bu antenin UWB frekans aralığında çalıştığını ve –20dB’den daha düşük ortak etkileşime sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, önerilen anten geometrisinin tasarım aşamaları ile ilgili daha fazla bilgi sağlamak için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Önerilen MIMO anten; boyut, bant genişliği, ortak etkileşim seviyesi, geometrinin karmaşıklığı ve izolasyonu iyileştirmek için ilave bir yapı kullanımı açısından literatürde sunulmuş birkaç anten ile detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

4.1.1. Anten Tasarımı

UWB MIMO antenin tasarım aşamaları hakkında daha fazla bilgi sunmak için oluşturulan ara modeller Şekil 4.1’de ve bu modellere ait geriye dönme kaybı eğrileri (s_{11} parametresi), Şekil 4.2(a)’da verilmiştir. Düzlemsel ışıyıcı ve toprak

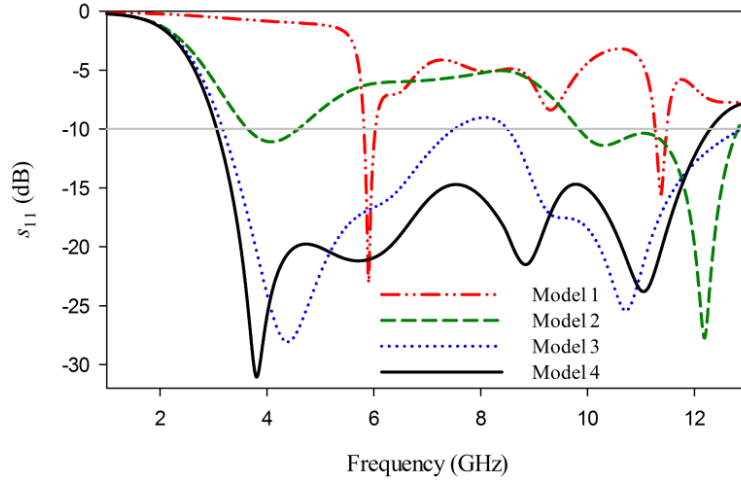
düzlem dielektrik sabiti 4.4 ve kalınlığı 1.6 mm olan bir alttaş üzerine yerleştirilmiştir. Antenin oluşturulmasına tek elemanlı bir modelin tasarlanmasıyla başlanmıştır. Model 1’de 50 Ohm mikroşerit beslemeli dikdörtgen düzlemsel bir ışıyıcı ve dikdörtgen bir toprak düzlem ele alınmıştır. Model 1’in geriye dönme kaybı genel olarak -10dB ’nin üzerinde kaldığı için UWB çalışma gereksinimini karşılamamaktadır. Mikroşerit antenlerde elektrik alan, ışıyıcı ile toprak düzlem kenarlarında meydana gelmektedir. Bu nedenle, düzlemsel ışıyıcının alt kenarlarında yapılan bir değişikliğin, rezonans uzunluğunu değiştirmede üst kenarlarında yapılan değişiklikten daha etkili olduğu benzetimlerde görülmüştür. Empedans uyumunun iyileştirilmesi için ışıyıcı ve toprak düzlem kenarlarının birbirine göre doğru olarak konumlandırılması gerekmektedir. Model 2’de toprak düzlemin üst kenarı, ışıyıcının alt kenarını aşacak şekilde kesilmiştir. Böylece, geniş bir frekans aralığında geriye dönme katsayısında düşme görülmüştür. Geniş bir frekans aralığında empedans uyumunu yakalamak için ışıma yapan kenar aralıkları doğrusal veya üstel olarak artırılmalıdır. Bu nedenle, Model 3’te düzlemsel ışıyıcının alt köşeleri dairesel olarak kesilmiştir. Böylece, empedans bant genişliği arttırılmıştır ve UWB frekans aralığında geriye dönme kaybı -10dB ’nin altına düşürülmüştür. Empedans uyumunu daha da iyileştirmek için toprak düzlemin üst köşeleri üçgen şekilde kesilmiştir. Nihai geometri olan Model 4’te 3.1–12.3 GHz frekans aralığında -15dB ’nin altında bir geriye dönme kaybı elde edilmiştir.



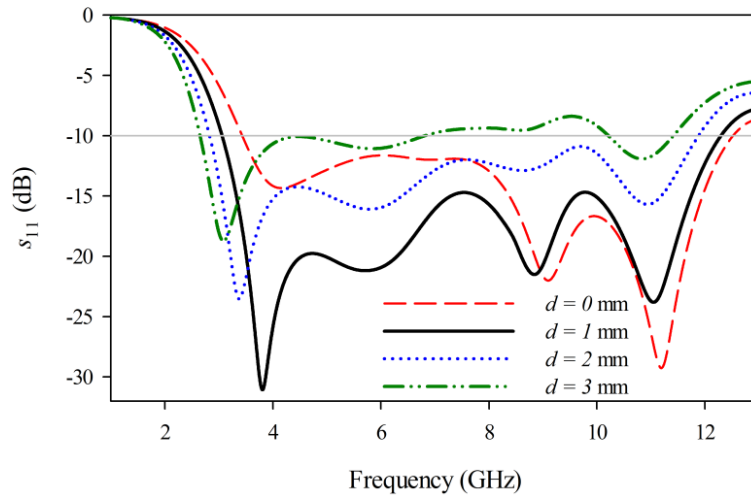
Şekil 4.1. Anten tasarımındaki temel aşamalar: a) Model 1 b) Model 2 c) Model 3 d) Model 4

İşyıcı ile toprak düzlem arasındaki boşluk genişliğinin (d) optimum değerini bulmak için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Dört farklı değer için elde edilen geriye dönme kaybı eğrileri Şekil 4.2(b)’de verilmiştir. Görüldüğü gibi empedans

bant genişliği büyük ölçüde, d değerine bağlıdır. Boşluk arttıkça empedans uyumsuzluğu artmaktadır. d değeri, UWB frekans aralığı için en iyi geri dönme kaybı -15dB 'de 1 mm olarak belirlenmiştir.



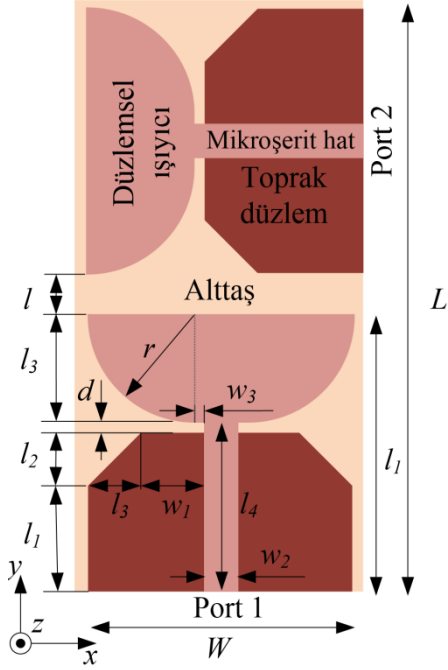
(a)



(b)

Şekil 4.2. Benzetilen anten elemanının geriye dönme eğrileri (s_{11} parametresi): a) Model 1, 2, 3 ve 4 için b) farklı d değerleri için

Şekil 4.1(d)'de elde edilen nihai anten elemanları, aralarında oluşacak ortak etkileşimi azaltmak için birbirine göre dikey olarak yerleştirilerek iki elemanlı bir UWB MIMO anten yapısı oluşturulmuştur. Elde edilen nihai MIMO anten geometrisi Şekil 4.3'de ve antene ait fiziksel parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.3. UBW MIMO antenin geometrisi

Çizelge 4.1. UWB MIMO antenin fiziksel parametreleri (mm)

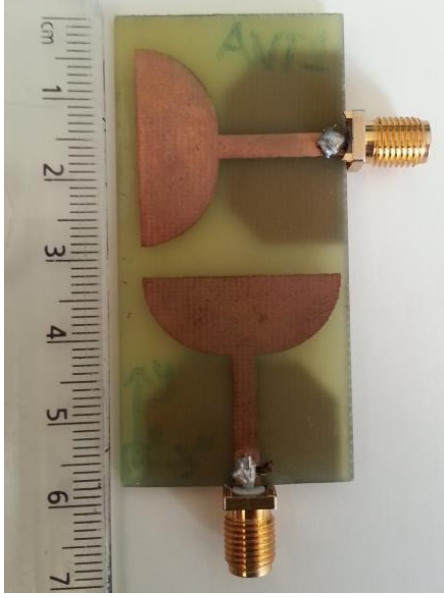
L	l	l_1	l_2	l_3	l_4	W	w_1	w_2	w_3	d	r	l
55	26	10	5	10	16	25	6	3	1	1	10	4

Benzetimlerde, azami 13 GHz için hücre sayısının dalga boyuna oranı, 20 olarak alınmıştır. Benzetimler, 1 GHz ile 13 GHz arasında 601 frekans noktasında gerçekleştirilmiştir. Anten, 1 Volt dalga kaynağı ile beslenmiştir.

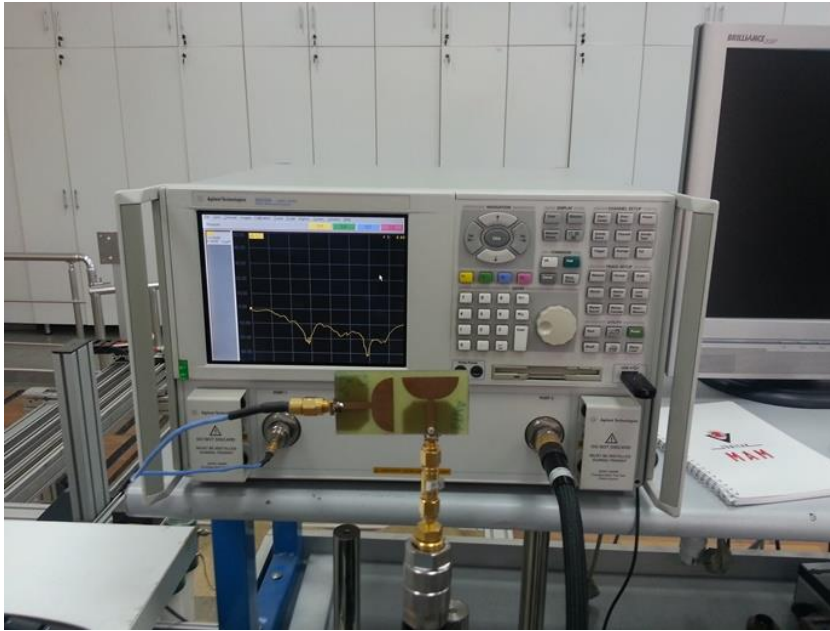
4.1.2. Anten Prototipinin Gerçekleştirilmesi

Benzetimlerle tasarlanan MIMO antenin bir prototipi, Çizelge 4.1’de verilen anten boyutları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalınlığı 1.6 mm, dielektrik sabiti 4.4 ve tanjant kaybı 0.017 olan bir FR4 PCB üzerine basılan antenin prototipi Şekil 4.4’de verilmiştir. Mikroşerit hat 50 Ohm SMA (SubMiniature version A) ile beslenmiştir. UWB MIMO antenin performansı deneysel ölçüm ile doğrulanmıştır. Şekil 4.5’te, ölçme düzeneğinden bir görüntü verilmiştir. Benzetim ve ölçüm ile elde edilen S-parametre eğrileri Şekil 4.6’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ölçülen S-parametreleri, antenin UWB gereksinimlerini karşıladığını teyit etmekle birlikte olası geometri boyutları, dielektrik, alttaş kalınlığı ve bakır kalınlığı gibi değerlerin birebir uyuşmamasından kaynaklı nedenlerle benzetim ve ölçüm ile elde edilen eğriler

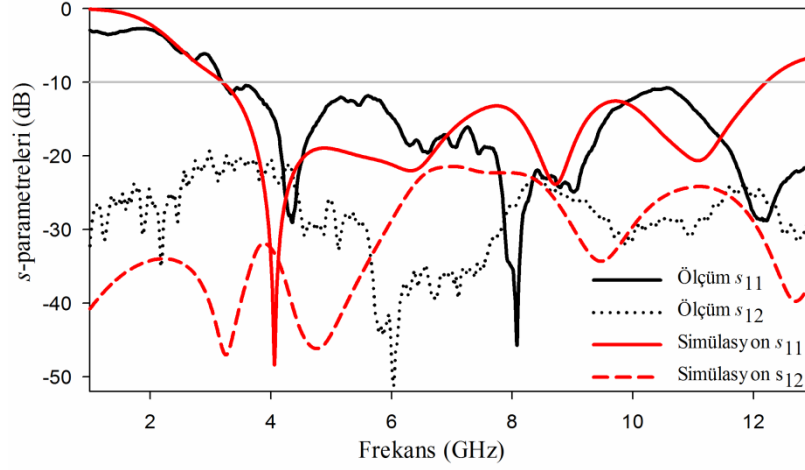
arasında az miktarda kaymalar meydana gelmiştir. Prototipi yapılan MIMO anten, – 20dB izolasyon sağlayarak 3 GHz’den 13 GHz’e (ölçme limiti) kadar olan bir frekans aralığında çalışmaktadır.



Şekil 4.4. UWB MIMO antenin prototipi



Şekil 4.5. Ölçme düzeneğinden bir görüntü

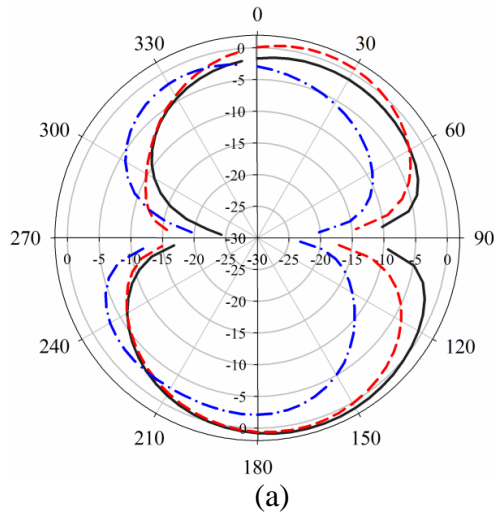


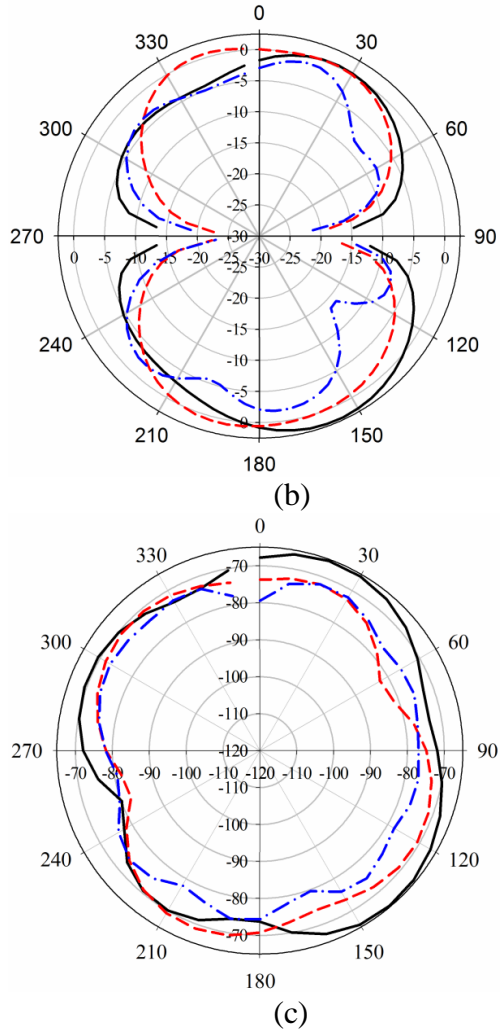
Şekil 4.6. MIMO antenin benzetilen ve ölçülen S-parametreleri

4.1.3. Performans Analizi

4.1.3.1. Işıma örüntüsü

Tasarlanan antene ait benzetim ile elde edilen 2B'li ışırma örüntüleri 4, 6.28 ve 9.08 GHz için Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu üç frekans noktası için ışırma örüntüleri birbirine benzemektedir. Toprak düzlem, xy düzleminde bulunduğu için xz ve yz düzlemleri için ışırma örüntüleri, 90° ve 270° haricinde çok yönlü özellik göstermektedir. Kazanç değerleri, 4, 6.28 ve 9.08 GHz frekans noktaları için sırasıyla, 2.15, 0.93 ve -1.07 dBi olarak elde edilmiştir.





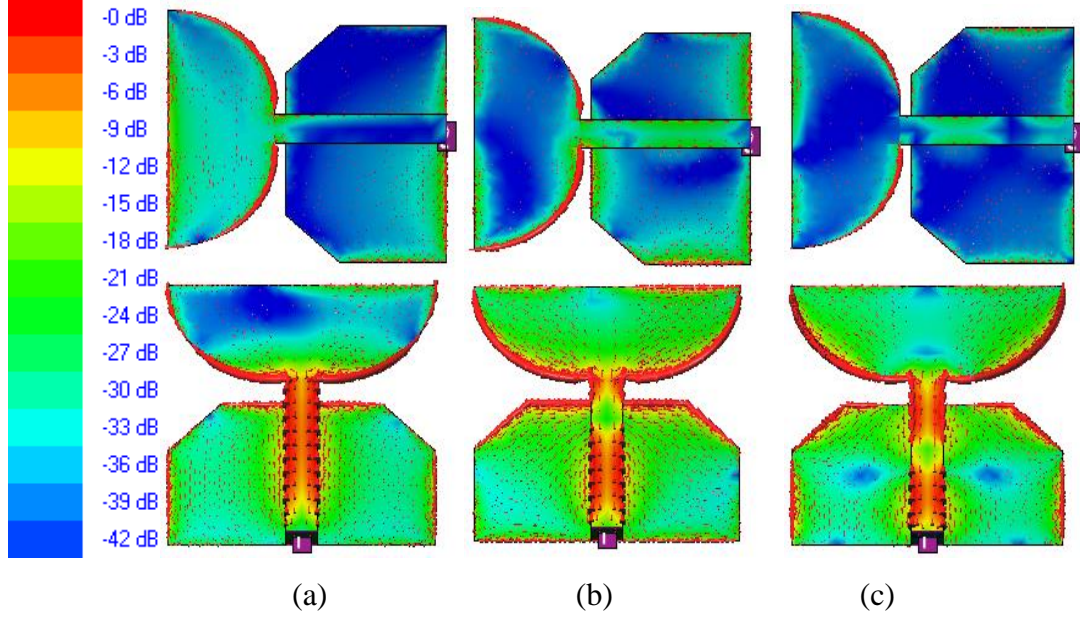
4.00 GHz : ———; 6.28 GHz : - - - - 9.08 GHz : - . . -

Şekil 4.7. Üç farklı frekans noktası için Anten 1'in ışınma örüntüleri (dBi): a) xz düzleminde E_θ b) yz düzleminde E_θ c) xy düzleminde E_ϕ

4.1.3.2. Yüzey akım dağılımları

Tasarlanan antenin akım dağılımı daha da incelemek için Port 1 enerjili iken 4, 6.28 ve 9.08 GHz frekans noktalarında benzetim ile elde edilen yüzey akım dağılım grafikleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekilden, elektrik akımının daha çok ışıyıcının dairesel alt kısmında ve toprak düzlemin üst kısmında yoğunlaştığı gözlenmektedir. Bu durum tasarım bölümünde anlatılanları doğrulamaktadır. Anten yüzeyinde oluşan azami akım, 4, 6.28 ve 9.08 GHz frekans noktaları için sırasıyla, 80.1, 77.4 ve 74.6 A/m olarak elde edilmiştir. Bunun yanında, anten elemanlarının

dikey olarak dizilişleri nedeniyle Anten 1'in diğer anten elemanına etkisi çok oldukça az olduğu görülmektedir.

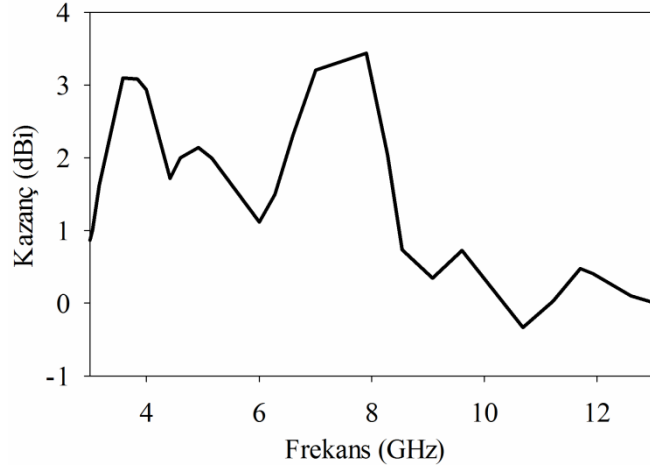


Şekil 4.8. Port 1 enerjili iken MIMO antenin üç farklı frekans noktası için yüzey akım dağılımları: a) 4 GHz b) 6.28 GHz c) 9.08 GHz

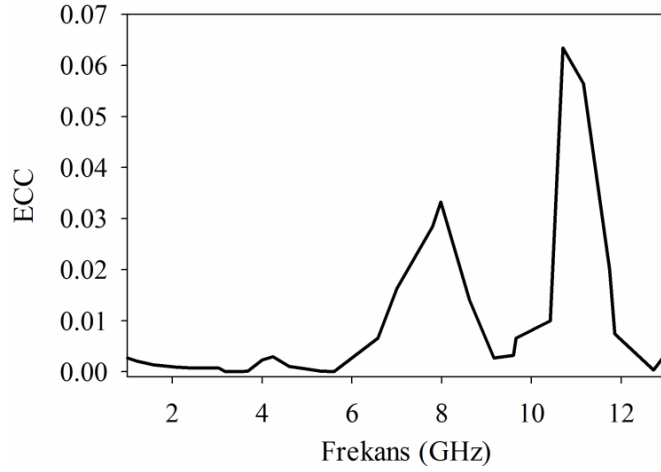
4.1.3.3. Kazanç ve ECC

Gerçekleştirilen antene ait kazanç–frekans grafiği, Şekil 4.9(a)'da verilmiştir. Azami kazanç, 3–13 GHz frekans aralığında 0dBi'nin üzerinde seyrederken, 3.7 GHz ve 8 GHz frekans noktalarında, sırasıyla 2.48dBi ve 2.75dBi olarak gerçekleşmiştir. Üretim aşamasında daha düşük tanjant kayıplı bir malzeme kullanılması halinde daha iyi bir kazanç elde edilebilir.

S-parametreleri kullanılarak elde edilen ECC grafiği Şekil 4.9(b)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ECC, 3.1–13 GHz frekans aralığı boyunca 0.07 değerinin altında seyretmektedir. İzolasyon ile ilgili olarak elde edilen bu iyi sonuçlar, anten tasarımının etkinliği göstermektedir.



(a)

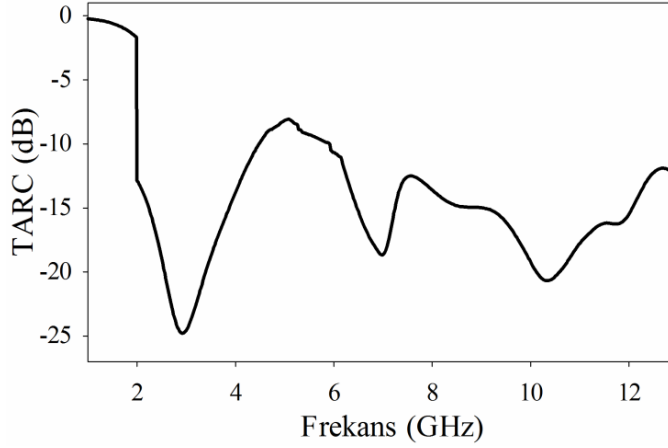


(b)

Şekil 4.9. UWB MIMO antenin a) kazanç grafiği b) ECC grafiği

4.1.3.4. TARC

UWB MIMO antene ait TARC grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi TARC seviyesi UWB çalışma bandı boyunca -10dB 'nin altında seyretmektedir. Bu durum, antene verilen sinyal gücünün çoğunluğunun yayıldığını göstermektedir.



Şekil 4.10. UWB MIMO antene ait TARC grafiği

4.1.4. Önerilen MIMO Anten ile Literatür Karşılaştırması

Bu çalışmada önerilen UWB MIMO anten ile literatürde daha önce yayınlanmış antenler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Antenler geometri, ilave yapı, geometrinin basitliği, çalışma frekans aralığı ve ortak etkileşim seviyesi gibi kriterler yönünden karşılaştırılmıştır. Antenler bu kriterlere göre birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Bütün kriterler açısından en iyi anteni belirlemek zordur. [Zhang vd., 2012] tarafından önerilen anten, küçük boyutlara ve geometrisinin orta seviyede basitliğe sahip olmasına rağmen UWB gereksinimini karşılayamayan bir frekans aralığı olan 3.1 – 5.15 GHz arasında çalışmaktadır. Diğer bir çalışmada [Liu vd., 2013] sunulan anten, küçük ve orta seviyede bir basitliğe sahip olmasına rağmen ilave bir anten yapısı kullanılarak –15dB’lik bir ortak etkileşim değeri elde edilmiştir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında tasarlanan anten, bu açılardan ön plana çıkmaktadır. Tüm bu sonuçlara göre önerilen anten, UWB uygulamaları kullanan gezgin terminallerde kullanılmak üzere değerlendirilebilir.

Çizelge 4.2. Literatürde önerilmiş UWB MIMO antenler ile karşılaştırma

Kaynak	Ana geometri	İlave yapı	Geometrinin karmaşıklığı	Boyut ($W \times L$) mm ²	Frekans aralığı -10dB (GHz)	Ortak etkileşim seviyesi (-dB)
Bu çalışma	İki eş özellikli alt köşeleri yuvarlatılmış MB'li ve TD'li ME	–	Basit	25 x 55	3.1 – 12.3	20
[Najam vd., 2009]	İki eş özellikli, boşluklu ve basamak şekilli MB'li ve TD'li ME	–	Orta	30 x 68	3.1 – 10.6	15
[Wang ve Huang, 2012]	TD üzerinde iki eş özellikli, boşluklu ve dairesel şekilli MB'li ME	–	Basit	35 x 70	2.3 – 12.2	15
[Mohammad vd., 2013]	TD üzerinde iki eş özellikli, U şekilli ve bir T monopole hatlı MB'li ME	–	Basit	56 x 56	3.1 – 10.6	20
[Jusoh vd., 2012]	İki eş özellikli, dışında yedi daire ve orasında bir daire bulunan MB'li ve TD'li ME	–	Orta	38 x 91	2.8 – 8	10
[Zhang vd, 2009]	İki eş özellikli, boşluklu üçgen MB'li ve TD'li ME	beş dallı ağaç yapısı	Karmaşık	35 x 40	3.1–10.6	16
[Lee vd., 2012]	TD üzerinde iki eş özellikli, bükülmüş MB'li bir IFA.	ardışık L şekilli elemanlar	Karmaşık	13.5 x 55 ^a	1.8– 5.15; 5.85– 11.9	17
[Antonino-D. vd. 2010]	TD üzerinde iki eş özellikli, dikdörtgen şekilli MB'li ME	TD üzerinde bir daire	Orta	80 x 80	3 – 12	15
[Li vd.,2012]	TD üzerinde iki eş özellikli, dikdörtgen şekilli MB'li ışığı	TD üzerinde kollu bir dikdörtgen	Orta	38 x 62	3.1 – 10	17 ^c
[Liu vd., 2013]	İki eş özellikli, dikdörtgen şekilli MB'li ve TD'li ME	TD üzerinde iki hat	Orta	26 x 40	3.1 – 10.6	15
[Cheng vd., 2008]	TD üzerinde iki eş özellikli, dikdörtgen şekilli MB'li ME	T şekilli bir kol	Basit	45 x 62	3.3 – 10.4	18
[Cheng vd., 2008]	TD üzerinde iki eş özellikli, dikdörtgen şekilli MB'li ME	çarpı şekilli bir kol	Basit	45 x 62	3.3 – 10.5	18
[Chacko vd., 2012]	Halka şekilli TD üzerinde iki eş ME	çarpı şekilli bir hat	Orta	62 x 62	2.6 – 11	12
[Lu ve Lin, 2010]	MB'li dikdörtgen boşluklu ve eksponansiyel azalan	–	Karmaşık	40 x 50	3.1– 10.6 ^b	20
[Zhang vd., 2012]	Yarım elips şekilli TD üzerinde iki boşluklu hilal şekilli monopol eleman	–	Orta	25 x 40	3.1 – 5.15	20

ME: Monopol eleman; MB: Mikroşerit beslemeli; TD: Toprak düzlem

^a: TD: 55 x 100 mm²^b: s-parametrelerinin bazı yerleri -10dB'nin üstünde^c: 4.5–10 GHz frekans aralığı için

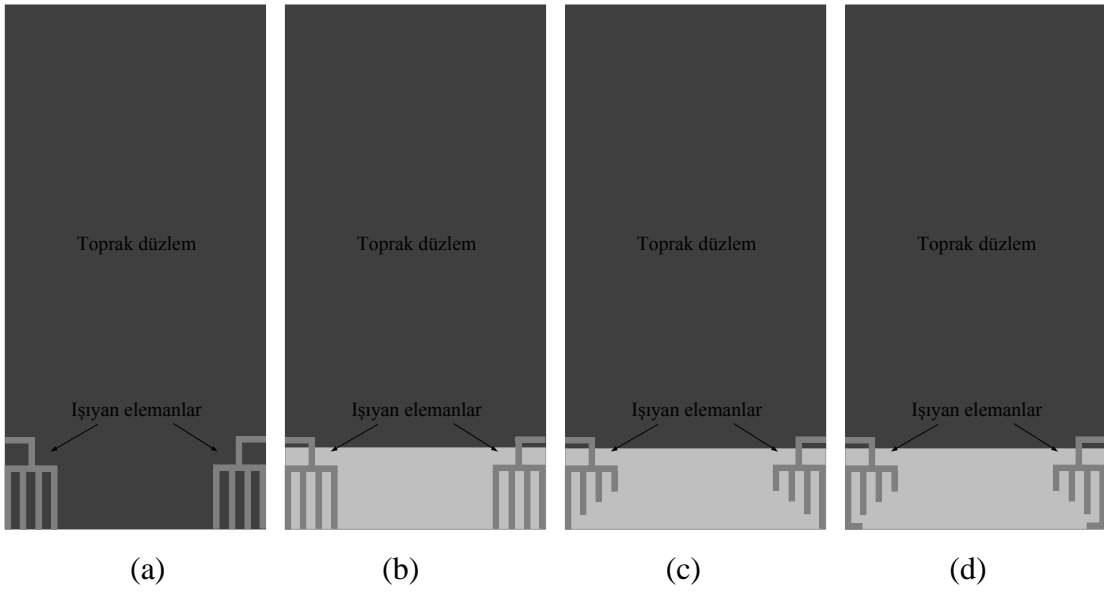
4.2. LTE, WiMAX ve WLAN STANDARTLARINA UYUMLU GEZGİN TERMİNALLER İÇİN T ŞEKLİ PARASİTİK ELEMAN KULLANARAK İZOLASYONU İYİLEŞTİRİLMİŞ GENİŞ BANT MIMO ANTEN TASARIMI VE PROTOTİPİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Bu bölümde, gezgin terminaller için kompakt, geniş bant bir MIMO anten tasarlanmış ve prototipi gerçekleştirilmiştir. Anten, LTE, WiMAX ve WLAN bantlarını kapsayan 1.79–3.77 GHz geniş frekans aralığında çalışmaktadır. MIMO anten yapısı, 10 x 17.7 mm² boyutlarına sahip iki özdeş ışığıcıdan ve toprak düzleminde T şekilli parasitik elemandan oluşmaktadır. Işıyııcılar, gezgin kartın iki köşesine simetrik olarak yerleştirilmiş, bükülmüş mikroşerit beslemeli dört koldan meydana gelmektedir. Yeni bir T şekilli parasitik eleman kullanılarak anten elemanları arasında daha iyi bir izolasyon performansı elde edilmiştir. Antenin performansı, S-parametreleri, ışımaya örüntüsü, kazanç, ECC ve TARC açılarından incelenmiş ve S-parametreleri ölçüm sonuçları ile doğrulanmıştır.

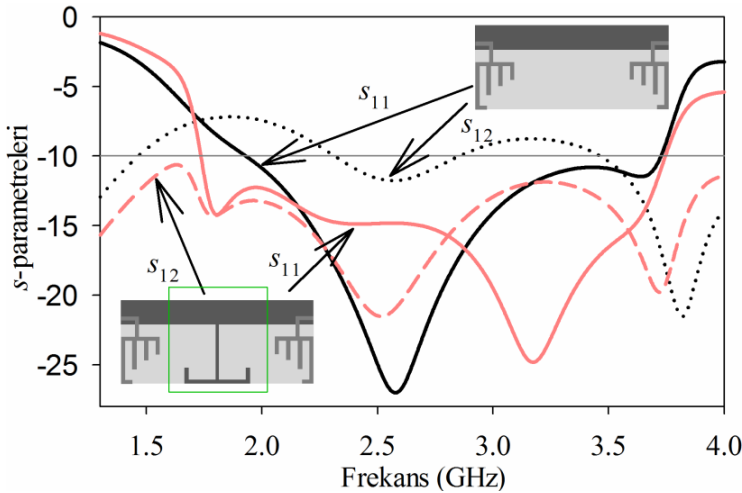
4.2.1. Anten Tasarımı

Gezgin terminaller için MIMO antenin tasarımı hakkında daha fazla bilgi sunmak için tasarım sürecinde elde edilen ara modeller Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.11(a)’de verilen Model 1, başlangıç modeli olarak ele alınmıştır. Farklı frekanslara sahip çoklu şerit kolların yan yana dizilmesiyle geniş bant antenin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Işıyan elemanlar mikroşerit ile beslenmiş ve gezgin kartın köşelerine simetrik olarak yerleştirilmiştir. Gezgin kart, 50 x 100 mm² boyutlarına, 1.6 mm kalınlığına ve 4.4 dielektrik katsayısına sahiptir. Işıma, ışıyan elemanlar ile toprak düzlemin kenarları arasında meydana geldiği için Model 2’de ışıyan elemanların altındaki toprak düzlem düzgün bir şekilde kesilmiştir. Kesilme miktarı IE3D™ ile optimize edilerek belirlenmiştir. Model 3’te her kolun farklı rezonans frekansında çalışması için kolların boy uzunlukları farklılaştırılmıştır ve uzunluklar IE3D™ ile optimize edilerek belirlenmiştir. Kollar, sırasıyla 2.61, 3.14, 3.21 ve 3.65 GHz frekanslarında çalışmaktadır. Bu kolların eş zamanlı birlikte çalışması ile her ışıyan eleman için 1.92–3.72 GHz aralığında çalışma frekans bandı elde edilmiştir. Rezonans uzunluğunu daha da artırmak ve çalışma frekans bandını düşürmek için birinci kol daha da uzatılmıştır. Elde edilen Model 4, Şekil 4.11(d)’de ve bu modele ait S-

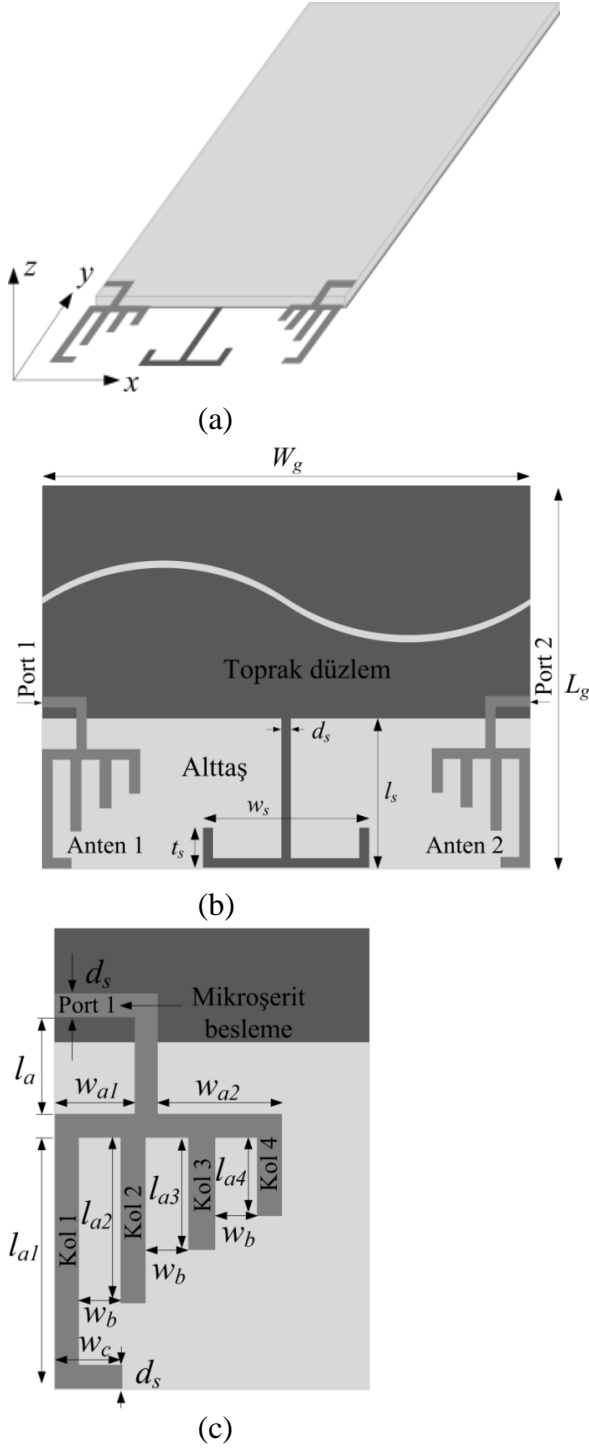
parametre eğrileri Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi iki ışıyan eleman arasında -7 dB civarında bir ortak etkileşim bulunmaktadır. Bu etkileşimi en aza indirmek için, toprak düzleme ekli bir T şekilli parasitik eleman tasarlanmıştır. Bu yolla, ortak etkileşim değeri olan s_{12} parametresinde, çalışma bandı boyunca en az 6 dB’lik bir azalma gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan nihai MIMO antenin geometrisi Şekil 4.13’de ve bu antene ait fiziksel parametreler Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Anten tasarımındaki temel aşamalar: a) Model 1 b) Model 2 c) Model 3 d) Model 4



Şekil 4.12. T şekilli parasitik elemanlı ve parasitik elemansız benzetilen MIMO antenin S-parametreleri



Şekil 4.13. MIMO antenin geometrisi: a) perspektif gösterimi b) özet gösterimi c) Anten 1'in detaylı gösterimi

Çizelge 4.3. MIMO antenin fiziksel parametreleri (mm)

L_g	W_g	t_s	w_s	w_{a1}	w_{a2}	w_b	w_c
100	50	4	17	3.5	5.5	3	3
d_s	l_s	l_a	l_{a1}	l_{a2}	l_{a3}	l_{a4}	
1	15	4.18	11	7.18	4.82	3.36	

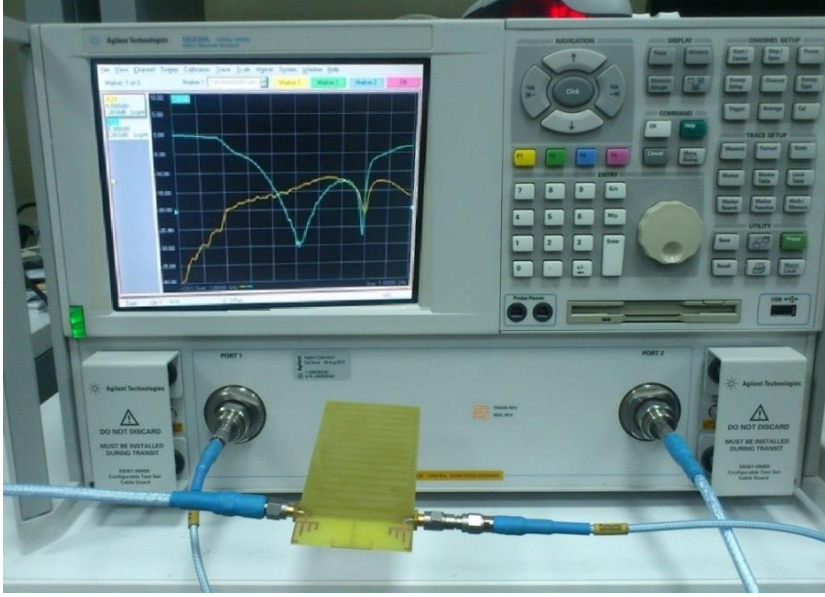
Benzetimlerde, azami 5 GHz için hücre sayısının dalga boyuna oranı 25 olarak alınmıştır. Benzetimler, 1 GHz ile 5 GHz arasında 201 frekans noktasında gerçekleştirilmiştir. Anten, 1 Volt dalga kaynağı ile beslenmiştir.

4.2.2. Anten Prototipinin Gerçekleştirilmesi

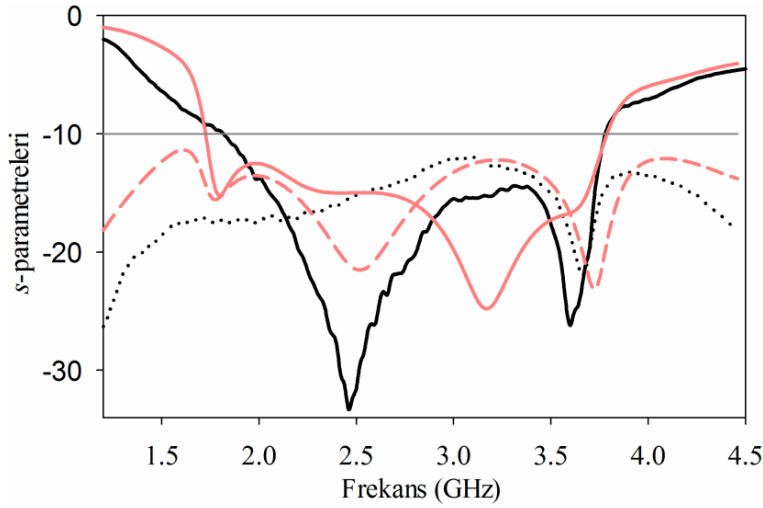
Şekil 4.14’de gösterilen prototip anten, Çizelge 4.3’de verilen fiziksel parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Işıyan kollar ve T şekilli parasitik elemanlı toprak düzlem, kalınlığı 1.6 mm, dielektrik sabiti 4.4 ve tanjant kaybı 0.017 olan bir FR4 PCB üzerine basılmıştır. Işıyan elemanlar 50 Ohm SMA ile beslenmiştir. Şekil 4.15’de ölçüm düzeneğinden bir görüntü verilmiştir. Benzetim ve ölçüm ile elde edilen S-parametre eğrileri Şekil 4.16’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Görüldüğü gibi, MIMO anten Çizelge 4.4’de verilen LTE, WiMAX ve WLAN çalışma bantlarını desteklemektedir. Prototip MIMO anten, 1.79–3.77 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Bu durum, benzetimi yapılan antenin çalışma frekans bandı olan 1.73–3.75 GHz ile uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ölçülen S-parametreleri, antenin MIMO çalışma gereksinimlerini karşıladığını teyit etmekle birlikte, olası geometri boyutları, dielektrik, alttaş kalınlığı ve bakır kalınlığı gibi değerlerin birebir uyuşmamasından kaynaklı nedenlerden dolayı benzetim ve ölçüm ile elde edilen eğriler arasında az miktarda kaymalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.14. MIMO antenin prototipi



Şekil 4.15. Ölçme düzeneğinden bir fotoğraf



Benzetim (——— s_{11} , - - - - s_{12})

Ölçüm (——— s_{11} , s_{12})

Şekil 4.16. Prototip MIMO antenin benzetilen ve ölçülen S-parametreleri

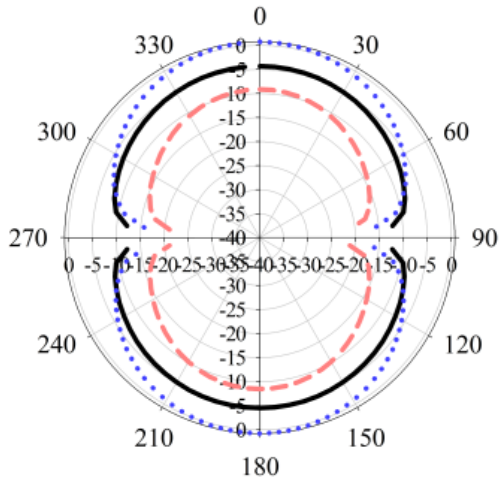
Çizelge 4.4. Antenin desteklediği LTE, WiMAX ve WLAN çalışma bantları (GHz)

LTE	WiMAX	WLAN
1.8; 1.9; 2.0; 2.1; 2.3; 2.5; 2.6; 3.5; 3.7	2.3; 2.5; 3.3; 3.5; 3.7	2.4; 3.7

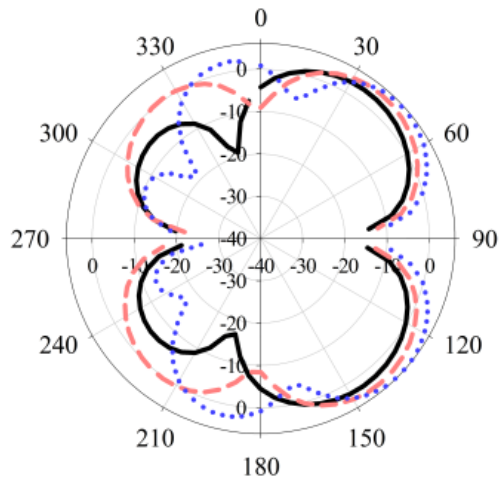
4.2.3. Performans Analizi

4.2.3.1. Işıma örüntüsü

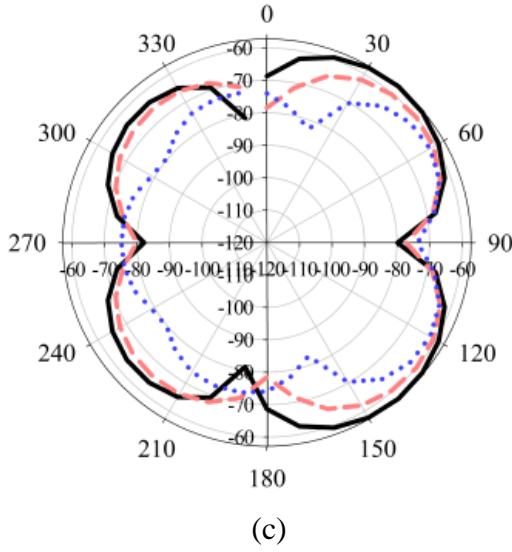
Şekil 4.17’de tasarlanan antene ait 1.8, 2.4 ve 3.17 GHz frekans noktaları için iki boyutlu ışırma örüntüleri gösterilmiştir. Her üç frekans noktası için ışırma örüntüleri birbirine benzemektedir. xz ve yz düzlemlerinde 90° ve 270° haricinde çok yönlü özellik göstermektedir. Çünkü toprak düzlem xy düzlemine yerleştirilmiştir. Azami kazanç seviyesi, 1.8, 2.4 ve 3.17 GHz frekans noktaları için sırasıyla, 2.86, 4.39 ve 6.07 dBi olarak elde edilmiştir.



(a)



(b)

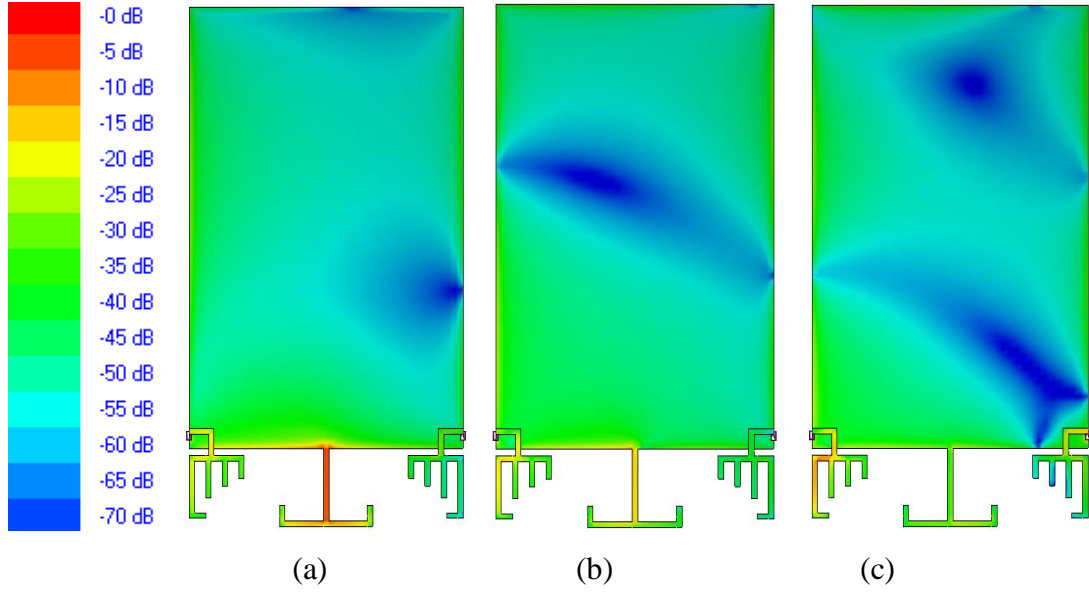


1.8 GHz : ———; 2.4 GHz : - - - ; 3.17 GHz :

Şekil 4.17. Üç farklı frekans noktası için Anten 1'in ışınma örüntüleri (dBi): a) xz düzleminde E_θ , b) yz düzleminde E_θ , c) xy düzleminde E_ϕ

4.2.3.2. Yüzey akım dağılımları

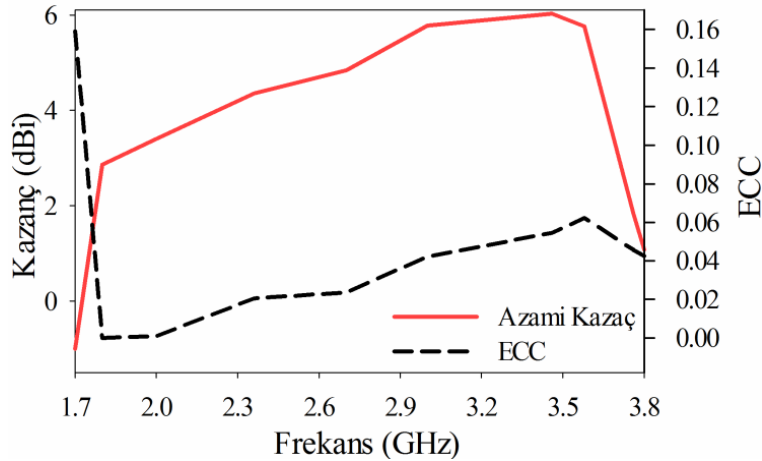
Anten tasarımının akım dağılımını daha iyi incelemek için Şekil 4.18'de, Port 1 enerjili iken 1.8, 2.4 ve 3.17 GHz'de yüzey akım dağılım grafikleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, yüzey akımı ışınan kollarda ve toprak düzlemin alt kenarlarında yoğunlaşmıştır. Bu durum, ışınımın bu kısımlar arasında olduğunu göstermektedir. Anten elemanları arasındaki izolasyonu artırmak için toprak düzleme eklenen T şeklindeki parasitik eleman, akımın büyük bir kısmını kendi üzerinde topladığı için ışınan elemandan diğer elemana etki eden akımı büyük oranda azaltmaktadır. Anten yüzeyinde oluşan azami akım, 1.8, 2.4 ve 3.17 GHz frekans noktaları için sırasıyla, 70.2, 52.1 ve 57.9 A/m olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.18. Port 1 enerjili iken MIMO antenin üç frekans noktaları için yüzey akım dağılımları: a) 1.8 GHz b) 2.4 GHz c) 3.17 GHz

4.2.3.3. Kazanç ve ECC

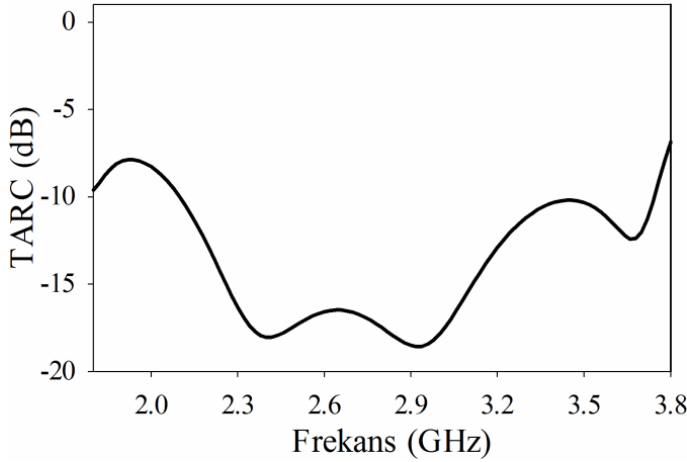
Şekil 4.19’da azami kazanç grafiği verilmiştir. Kazanç, 1.79–3.77 GHz frekans aralığında 2.5dBi’nin üzerinde seyrederken, 3.46 GHz’de 6.02dBi olarak en yüksek değerini yakalamıştır. Şekil 4.19, aynı zamanda ECC–frekans eğrisini içermektedir. Görüldüğü gibi ECC bütün çalışma bandı boyunca 0.16’nın altında kalmaktadır. Bu durum, antenin iyi bir çeşitleme performansına sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.19. Kazanç ve ECC eğrileri

4.2.3.4. TARC

MIMO antene ait TARC grafiği Şekil 4.20’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi TARC seviyesi çalışma bandı boyunca -10dB ’nin altında seyretmektedir. Bu durum, antene verilen sinyal gücünün çoğunluğunun yayıldığını göstermektedir.



Şekil 4.20. MIMO antene ait TARC grafiği

4.3. LTE, WiMAX ve WLAN STANDARTLARINA UYUMLU GEZGİN

TERMİNALLER İÇİN ARTI ŞEKİLLİ PARASİTİK ELEMAN

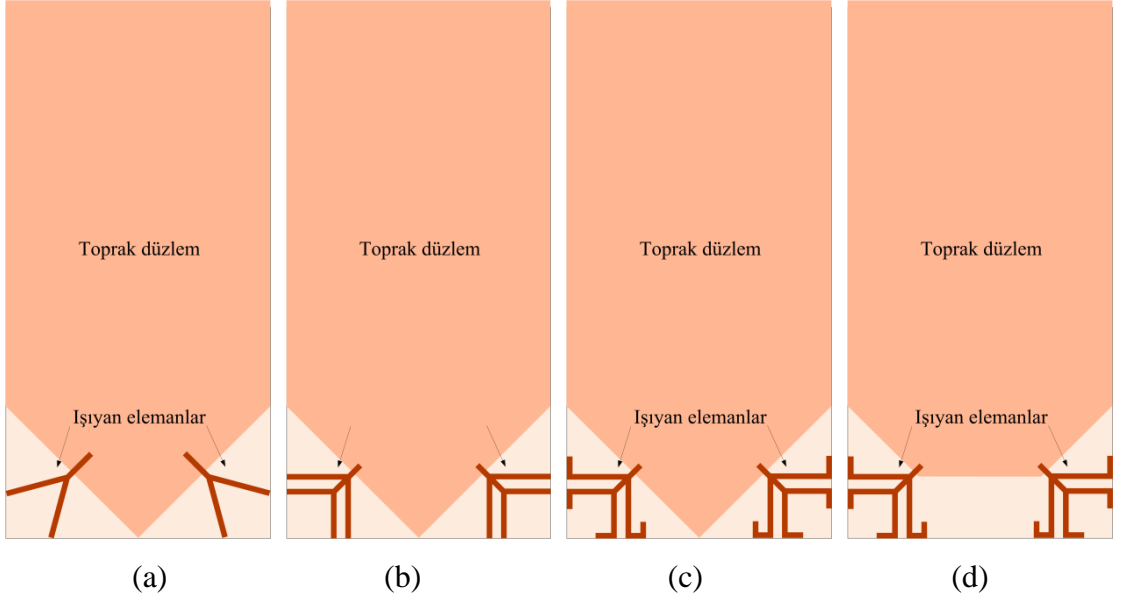
KULLANILARAK KORELASYONU DÜŞÜRÜLMÜŞ GENİŞ BANT DİKEY

MIMO ANTEN TASARIMI VE PROTOTİPİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

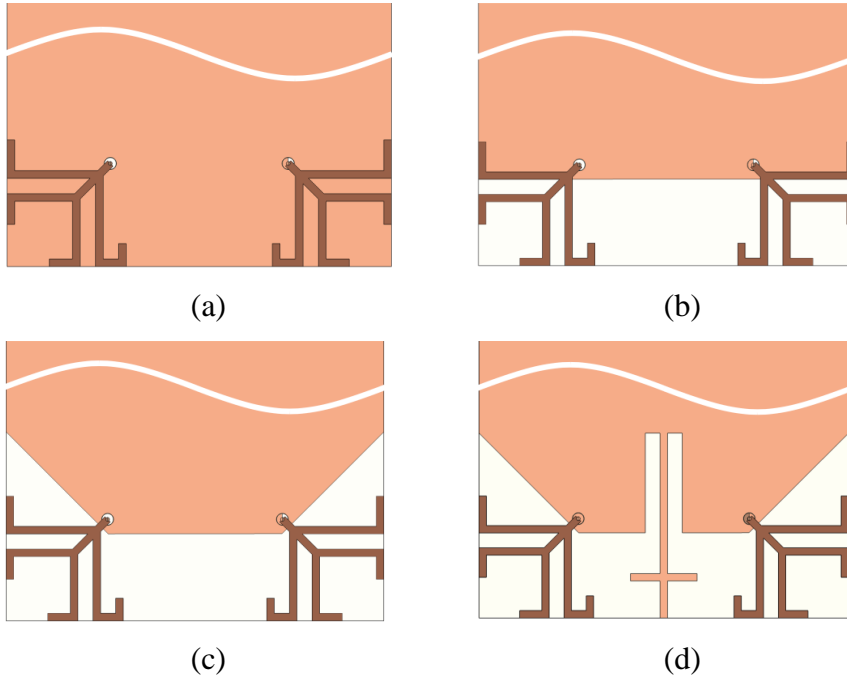
Bu bölümde, 1.8–4.0 GHz frekans aralığında çalışan, kompakt, geniş bant MIMO anten tasarımı sunulmaktadır. Anten, birbirine göre simetrik ve dikey olarak yerleştirilmiş iki özdeş ışıyan elemandan oluşmaktadır. $15.5 \times 16.5 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki ışıyan elemanlar ve toprak düzlem, gezgin bir kartın iki köşelerine yerleştirilmiştir. Işıyan eleman, koaksiyel beslemeli mikroşerit hatlı bükülmüş dört koldan meydana gelmiştir. Işıyan elemanların altındaki toprak düzlemin köşeleri üçgen olarak kesilmek suretiyle empedans bant genişliğinde önemli bir artış sağlanmıştır. Anten bu geometrik formda, elemanlar arasındaki korelasyon açısından MIMO çalışma gereksinimlerini karşılamasına rağmen korelasyonu daha da düşürmek için toprak düzlemde yeni artı şekilli bir parasitik elemanın tasarlanmıştır. S-parametreleri, ışıma örüntüsü, kazanç, ECC ve TARC yönünden antenin performans incelemesi yapılmış ve S-parametreleri sonuçları ölçüm ile doğrulanmıştır.

4.3.1. Anten Tasarımı

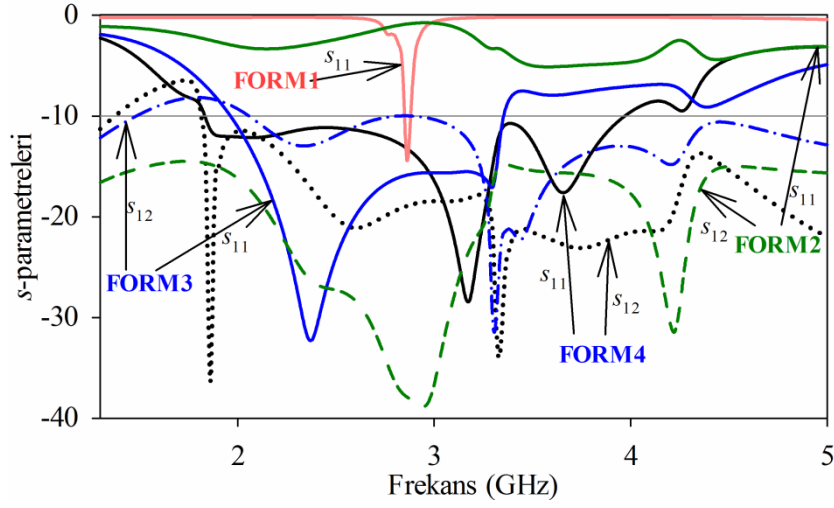
Daha önce geliştirilen MIMO anten tasarımında elde edilen bilgiler ışığında yeni bir MIMO anten tasarımı planlanmıştır. Tasarım sürecinde oluşturulan ara modeller Şekil 4.21’de verilmiştir. Model 1’de koaksiyel beslemeli, mikroşerit hatlı, iki kollu ışıyan elemanlar arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için gezgin kartın köşelerine dikey olarak yerleştirilmiş bir MIMO anten modeli ele alınmıştır. Gezgin kart, 50 x 100 mm² boyutlarına, 1.6 mm kalınlığına ve 4.4 dielektrik katsayısına sahiptir. Işıma performansını artırmak için ışıyıcının altında kalan toprak düzlemin köşeleri üçgen olarak kesilmiştir. Daha sonra, empedans bant genişliğini artırmak için anten kollarının geometrileri değiştirilerek Şekil 4.21(b)’de gösterilen Model 2 elde edilmiştir. Işıyan kollar için daha düşük rezonans frekansları elde etmek için Model 3’te, kollar bükülmüştür ve boyları farklılaştırılarak uzatılmıştır. Işıyan kollara ait rezonans frekansı değerleri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Bu kolların eş zamanlı birlikte çalışması ile MIMO antenin tamamı için geniş bir empedans bant genişliği elde edilmiştir. Bu değişikliklerin S-parametreleri üzerindeki etkilerini daha iyi göstermek için Şekil 4.22’de verilen toprak düzlemin bazı formları için elde edilen S-parametreleri Şekil 4.23’te verilmiştir. Model 3’te iyi bir empedans bant genişliği elde edilmiş olmasına rağmen anten elemanları arasındaki ortak etkileşimin yüksek olduğu görülmüştür. Model 4’te görüldüğü gibi toprak düzlemde bulunan üçgen kısmın alt kısmı kesilerek ortak etkileşim azaltılmıştır ve empedans bant genişliği 1.8–4.0 GHz’e çıkarılmıştır. Şekil 4.23’de görüldüğü gibi Form3, izolasyon açısından MIMO çalışma gereksinimlerini ($s_{12} \approx -10\text{dB}$) karşılamasına rağmen ortak etkileşimi daha da azaltmak için toprak düzlemde yeni bir artı şekilli parasitik eleman tasarlanmıştır. Böylece, Şekil 4.23’de gösterildiği gibi ortak etkileşim, çalışma bandı boyunca yaklaşık 10dB azaltılmıştır. Tasarlanan nihai MIMO antenin geometrisi Şekil 4.24’de gösterilmiştir ve bu antene ait fiziksel parametreler Çizelge 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.21. Anten tasarımındaki temel aşamalar: a) Model 1 b) Model 2 c) Model 3 d) Model 4



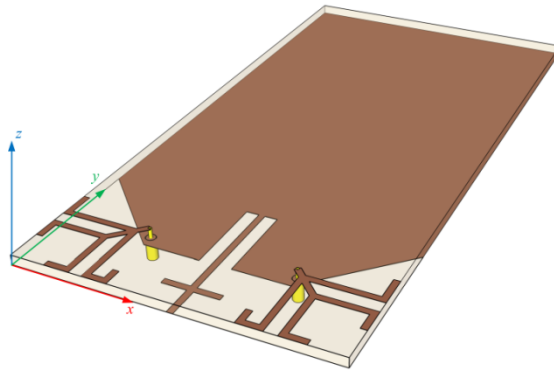
Şekil 4.22. Toprak düzlemin farklı geometrik formları: a) FORM1 b) FORM2 c) FORM3 d) FORM4



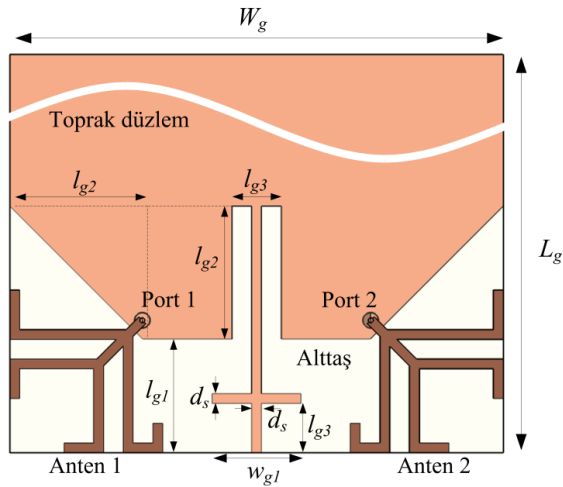
Şekil 4.23. Toprak düzlemin farklı geometrik formları için benzetilen S-parametreleri

Çizelge 4.5. Monopol kolların rezonans frekansları

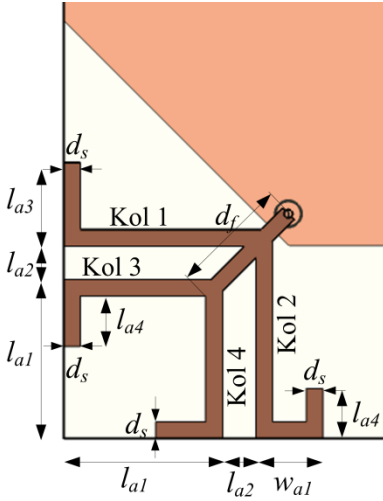
Kol	#1	#2	#3	#4
Rezonans frekansı (GHz)	3.15	1.85; 3.69	3.35	1.88; 3.56



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.24. MIMO antenin geometrisi: a) perspektif gösterimi b) özet gösterim b)

Anten 1'in detaylı gösterimi

Çizelge 4.6. MIMO antenin fiziksel parametreleri (mm)

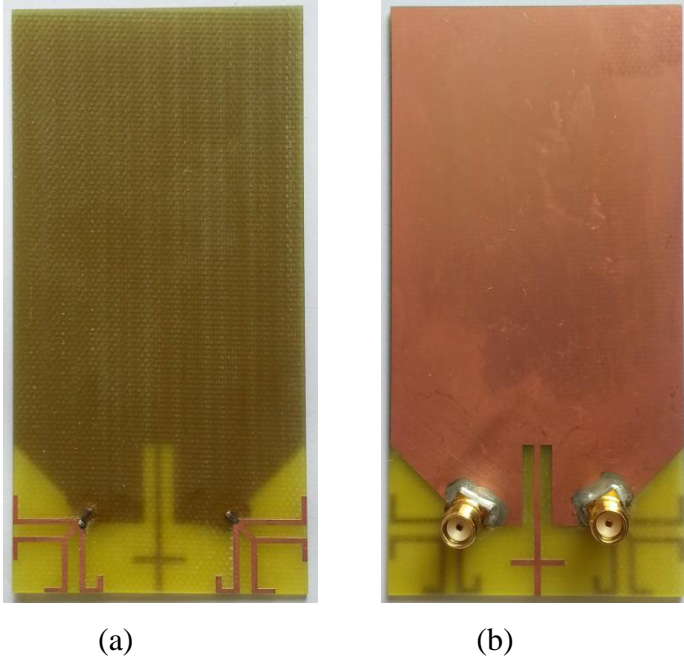
L_g	W_g	l_{g1}	l_{g2}	l_{g3}	w_{g1}	d_s
100	50	11.53	13.47	5	9	1
w_{a1}	d_f	l_{a1}	l_{a2}	l_{a3}	l_{a4}	
4	6.974	9.5	2	5	3	

Benzetimlerde, azami 5 GHz için hücre sayısını dalga boyuna oranı 30 olarak alınmıştır. Benzetimler, 1 GHz ile 5 GHz arasında 201 frekans noktasında gerçekleştirilmiştir. Anten, 1 Volt dalga kaynağı ile beslenmiştir.

4.3.2. Anten Prototipinin Gerçekleştirilmesi

Tasarlanan MIMO antenin bir prototipi, Çizelge 4.6'da verilen antenin fiziksel parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Prototip anten, kalınlığı 1.6 mm, dielektrik sabiti 4.4 ve tanjant kaybı 0.017 olan FR4 PCB üzerine CNC makinesi kullanılarak basılmıştır. Işıyan elemanlar, 50 Ohm SMA ile beslenmiştir. Şekil 4.25'de, prototip antenin fotoğrafı gösterilmiştir. Antenin S-parametreleri Agilent Technologies N5230A PNA-L RF network analizör aracılığıyla ölçülmüştür. Şekil 4.26'da ölçüm düzeneğinden bir görüntü verilmiştir. Benzetim ve ölçüm ile elde edilen S-parametre eğrileri Şekil 4.27'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tasarlanan MIMO antenin, Çizelge 4.7'de verilen LTE, WiMAX ve WLAN çalışma bantlarını desteklediği görülmektedir. Prototip MIMO anten, 1.8–5.0 GHz frekans aralığında

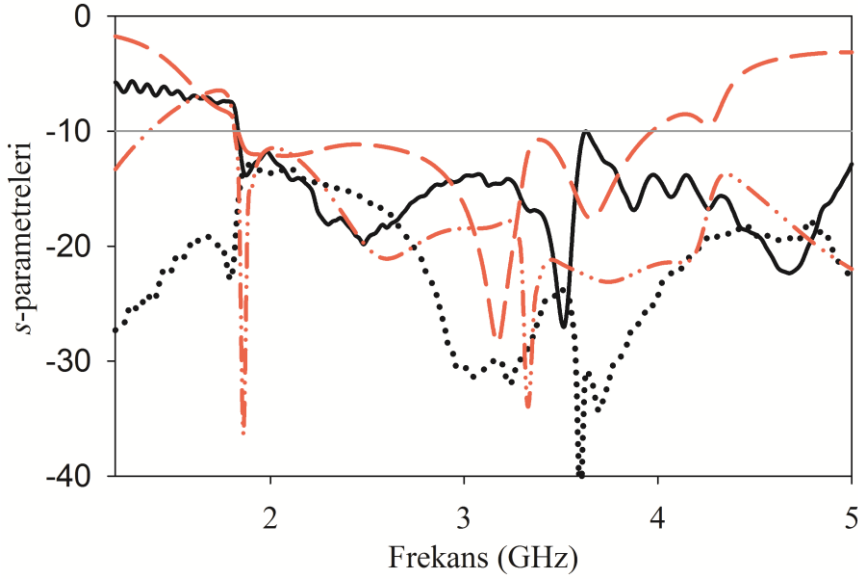
çalışmaktadır. Bu durum benzetimi yapılan antenin, çalışma frekans bandı ile uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ölçülen S-parametreleri, antenin MIMO çalışma gereksinimlerini karşıladığını teyit etmekle birlikte, olası geometri boyutları, dielektrik, alttaş kalınlığı ve bakır kalınlığı gibi değerlerin birebir uyuşmaması nedeniyle benzetim ve ölçüm ile elde edilen eğriler arasında az miktarda kaymalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.25. Tasarlanan MIMO antenin prototipi: a) önden görünüş b) arkadan görünüş



Şekil 4.26. Ölçme düzeneğinden bir fotoğraf



Benzetim (— — — s_{11} , ····· s_{12})

Ölçüm (——— s_{11} , ····· s_{12})

Şekil 4.27. Prototip MIMO antenin benzetim ve ölçüm ile elde edilen S-parametreleri

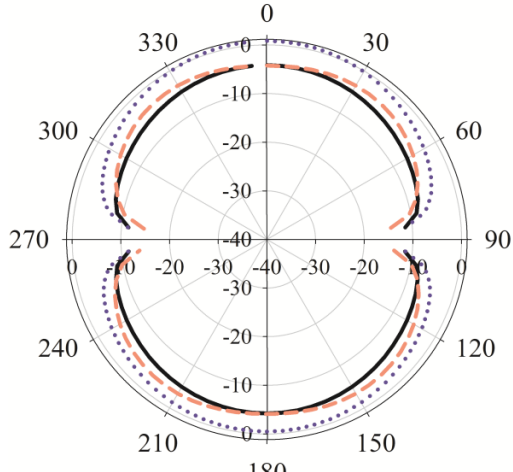
Çizelge 4.7. Antenin desteklediği LTE, WiMAX ve WLAN çalışma bantları (GHz)

LTE	WiMAX	WLAN
1.8; 1.9; 2.0; 2.1; 2.3; 2.5; 2.6; 3.5; 3.7	2.3; 2.5; 3.3; 3.5; 3.7	2.4; 3.7

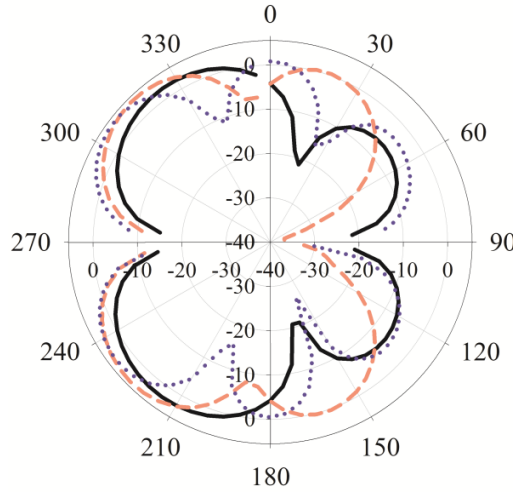
4.3.3. Performans Analizi

4.3.3.1. Işıma örüntüsü

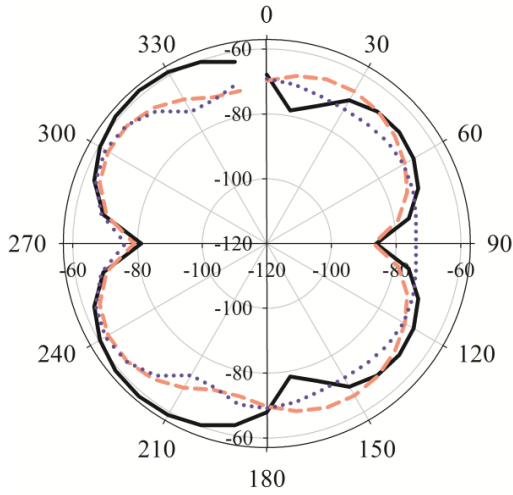
Tasarlanan antene ait 1.9, 3.17 ve 3.65 GHz frekans noktaları için 2B ışınma örüntüleri Şekil 4.28’de verilmiştir. Her üç frekans noktası için ışınma örüntüleri birbirine benzemektedir. Azami kazanç seviyesi, 1.9, 3.17 ve 3.65 GHz frekans noktaları için sırasıyla, 2.65, 4.62 ve 4.50dBi olarak elde edilmiştir. Toprak düzlem xy düzlemine yerleştirildiği için xz ve yz düzlemlerinde 90° ve 270° haricinde çok yönlü özellik göstermektedir.



(a)



(b)



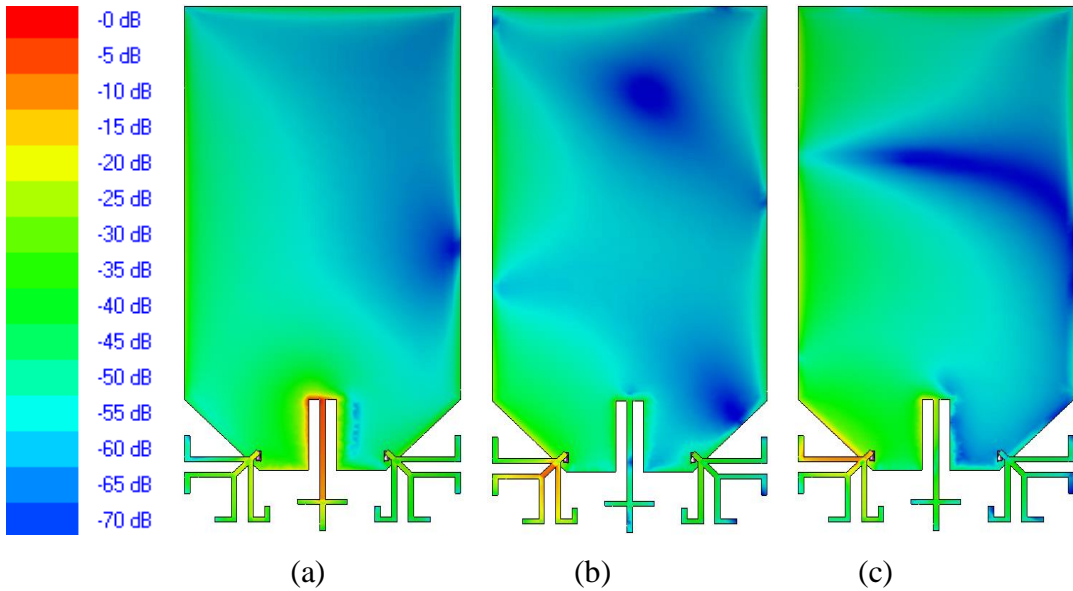
(c)

1.9 GHz : ———; 3.17 GHz : - - - - ; 3.65 GHz :

Şekil 4.28. Üç farklı frekans için Anten 1'in ışıma örüntüleri (dBi): a) xz düzleminde E_θ , b) yz düzleminde E_θ , c) xy düzleminde E_ϕ

4.3.3.2. Yüzey akım dağılımları

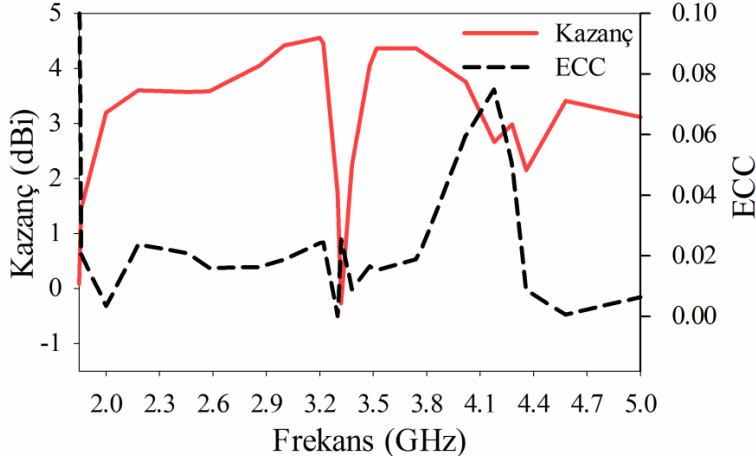
Anten tasarımının akım dağılımını daha iyi anlamak için Şekil 4.29'da, Port 1 enerjili iken 1.9, 3.17 ve 3.65 GHz'de yüzey akım dağılım grafikleri verilmiştir. Anten yüzeyinde oluşan azami akım, 1.9, 3.17 ve 3.65 GHz frekans noktaları için sırasıyla, 85.8, 86.84 ve 56.4 A/m olarak elde edilmiştir. Akımın, ışık kollarında ve toprak düzlemin üçgen kenarlarında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, elektrik alan çizgilerinin yoğunlukla bu bölümler arasında oluştuğunu göstermektedir. Toprak düzlemindeki artı şeklindeki parazitik eleman, akımı kendi üzerinde topladığı için Anten 2'ye atlayan akımı büyük ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 4.29. Port 1 enerjili iken MIMO antenin üç farklı frekans noktaları için yüzey akım dağılımları: a) 1.9 GHz b) 3.17 GHz c) 3.65 GHz.

4.3.3.3. Kazanç ve ECC

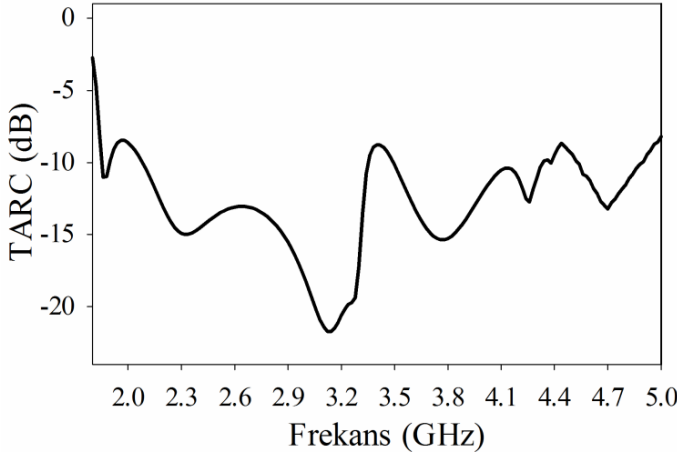
Şekil 4.30'da frekansa karşı kazanç ve ECC eğrileri verilmiştir. Kazanç, 1.8 – 4.0 GHz frekans aralığında 3dBi'nin üzerinde seyrederken, 3.2 GHz'de 4.56dBi olarak en yüksek değeri yakalamıştır. Ayrıca, şekilden görüldüğü gibi ECC, bütün çalışma bandı boyunca 0.1 değerinin altında kalmaktadır. Bu durum, antenin çeşitleme performansının iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.30. Kazanç ve ECC eğrileri

4.3.3.4. TARC

MIMO antene ait TARC grafiği Şekil 4.31'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi TARC seviyesi, çalışma bandı boyunca -10 dB değerinin altında seyretmektedir. Bu durum, antene verilen toplam sinyal gücünün çoğunluğunun yayıldığını göstermektedir.



Şekil 4.31. MIMO antene ait TARC grafiği

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan, zaman, frekans ve kod çoğullama tekniklerine ilave olarak uzaysal çoğullama ile veri iletim kapasitesinin ve veriminin artmasına imkan sağlayan MIMO sistemlerinin son yıllarda kullanılmaya başlanması, modern kablosuz iletişim sistemlerinde çok önemli bir dönüm noktası olmuştur. 2005 yılından sonra iletişim sistemlerine adapte edilmeye başlanan MIMO sistemlerinin verimli çalışması, uzaysal ara yüzün en önemli elemanları olan anten tasarımlarına bağlıdır. Bu nedenle, literatürde, yüksek performanslı MIMO anten tasarımlarına gereksinim duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında, öncelikle, MIMO sistemlerinin avantajları, getirdiği yenilikler ve temel çalışma prensipleri anlatılmıştır. Sonra, literatürde önerilmiş bazı anten tasarımları incelenmiştir. Literatürde sunulmuş anten çalışmaları, küçüklük, bant genişliği, kazanç ve anten elemanları arasındaki korelasyon gibi performans kriterleri açısından kendi içinde farklılıklar göstermekle birlikte, küçük, geniş bant ve çoklu kablosuz standartları destekleyen anten tasarımları çok azdır.

Bu tez çalışmasında, kompakt, geniş bant üç yeni MIMO anten tasarlanmıştır ve prototipleri gerçekleştirilmiştir. Anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için yeni yöntemler uygulanmıştır. Antenlerin tasarım prosedürleri detaylı olarak açıklanmıştır. Birinci anten, UWB uygulamalarına yönelik, düşük korelasyona sahip, küçük boyutlu bir MIMO antendir; ikinci ve üçüncü antenler ise, LTE, WiMAX ve WLAN gezgin terminallere uyumlu, anten elemanları arasındaki izolasyonu iyileştirilmiş, geniş bant MIMO antenlerdir.

Birinci UWB MIMO anten yapısı, anten elemanları arasındaki korelasyonu azaltmak için birbirine göre dikey olarak konumlandırılmış mikroşerit beslemeli iki özdeş monopol düzlemsel ışıyan elemandan ve yaklaşık yarım ölçülere sahip bir toprak düzlemden oluşmaktadır. $26 \times 55 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki MIMO anten 3.1–12.3 GHz frekans bandında çalışmaktadır. Bu frekans aralığı, UWB frekans bandı olan 3.1–10.6 GHz aralığını desteklemektedir.

İkinci MIMO anten, simetrik olarak yerleştirilmiş iki özdeş ve simetrik ışıyan elemandan oluşmaktadır. $10 \times 17.7 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki her eleman, bükülmüş şerit beslemeli dört monopol koldan meydana gelmiştir. Işıyan elemanlar arasındaki izolasyonu iyileştirmek için toprak düzlemde T şekilli parasitik eleman tasarlanmıştır.

Küçük boyutlarda olan MIMO anten, LTE, WiMAX ve WLAN standartlarının 1.79–3.77 GHz frekans aralığında çalışmaktadır.

Üçüncü MIMO anten ise 15.5 x 16.5 mm² boyutlarındaki iki özdeş ve simetrik ışılan elemandan meydana gelmiştir ve her eleman, koaksiyel beslemeli mikroşerit hatlı bükülmüş dört monopol kolun bir araya getirilmesiyle oluşmuştur. Anten elemanları, gezgin kartın köşelerine simetrik ve dikey olarak yerleştirilmiştir. Anten, MIMO olarak çalışması için bu geometrik formda bile antenler arasında yeterli izolasyon seviyesini karşılamasına rağmen izolasyonu daha da iyileştirmek için toprak düzleminde yeni bir artı şekilli parazitik eleman tasarlanmıştır. MIMO anten, 1.8–4.0 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Bu frekans aralığı, LTE, WiMAX ve WLAN gibi çok önemli kablosuz standartların çalıştığı bantları kapsamaktadır.

MIMO anten yapıları, IE3D™ paket programı kullanılarak tasarlanmıştır. Antenlerin performansları, S-parametreleri, bant genişliği, ışımaya örüntüsü, yüzey akım dağılımı, kazanç, ECC ve TARC yönünden araştırılmıştır. Ayrıca, anten geometrilerinin S-parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tasarım aşaması başarılı olarak tamamlanan antenler, çift yüzü bakır, 1.6 mm kalınlığında ve 4.4 dielektrik sabitine sahip FR4 materyal üzerine LPKF–ProtoMat H60 CNC cihazı kullanılarak prototipleri gerçekleştirilmiştir. Anten prototiplerinin S-parametreleri, Agilent Technologies N5230A PNA-L RF network analizör kullanılarak ölçülmüştür.

Bu sonuçlar açıkça gösteriyor ki, önerilen MIMO anten tasarımları, küçük boyut ve gezgin terminallere yerleştirilebilme gibi çok önemli fiziksel özelliklerin yanında geniş bant, yüksek izolasyon, iyi kazanç ve ışımaya örüntüsü gibi karakteristiklere sahiptir. Bu antenlerin, MIMO anten tasarımlarının geliştirilmesi açısından, literatüre ve endüstriye çok önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçları daha da geliştirmek için tasarlanan antenlerin pratik uygulamalara uygunluğunu incelemek için kasa (case), yakınlık (proximity), SAR gibi testlerin yapılması ileri bir çalışma olarak önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

3gpp.org/specifications

Alamouti, S. M., "A simple transmit diversity technique for wireless communications,"
IEEE J Sel Areas Commun, 17 (11): 1451–1458, (1999).

Alamouti, S., "A simple transmit diversity technique for wireless communications,"
IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16 (8), 451–458, (1998).

Andrews, J. G., Ghosh, A. and Muhamed, R., "Fundamentals of WiMAX
Understanding Broadband Wireless Networking", Prentice Hall, America,
(2007).

Antonino-Daviu, E., Gallo. M., Bernardo-Clemente, B. and Ferrando-Bataller M.,
"Ultra-wideband slot ring antenna for diversity applications", Electronics
Letters, 46(7), 478–480, (2010).

Ayatollahi, M., Rao, Q. and Wang, D., "A compact, high isolation and wide
bandwidth antenna array for long term evolution wireless devices", IEEE
Transactions on Antennas and Propagation, 60(10), 4960 –4963,(2012)

Balanis, C. A. and Loannides, P. I., "Introduction to smart antennas", Morgan &
Claypool, (2007).

Blanch, S., "Exact representation of antenna system diversity performance from input
parameter description", Electronics letters, 39(9), 705 – 707, (2003).

Brennan, D. G., "Linear Diversity Combining Techniques", Proceedings of the IEEE,
91(2), 331–356, (2003).

Chacko, B. P., Augustin, G., and Denidni, T. A., "Uniplanar UWB antenna for
diversity applications", IEEE Antennas and Propagation Society International
Symposium,1–2, (2012).

Cheng, Y., Lu ,W. -J., Cheng, C. -H., Cao, W. And Li, Y., "Printed diversity antenna
with cross shape stub for ultra-wideband applications", IEEE Singapore
International Conference on Communication Systems, 813–816, (2008).

- Cheng, Y., W. –J. Lu, C. –H. Cheng, W. Cao, ve Y. Li, "Compact diversity antenna with T shape stub for Ultra-wideband applications," Asia–Pacific Microwave Conference, 1–4, (2008).
- Costa, J. R., Medeiros, C. R. And Fernandes, C. A., "Evaluation of a new wideband slot array for MIMO performance enhancement in indoor WLANs", IEEE Trans Antennas and Propagat, 59(4), 1200 –1206, (2011).
- E-UTRA–Evolved Universal Terrestrial Radio Access, <http://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA>, (2014).
- FCC Report and Order for Part 15 Acceptance of ultra wideband (UWB) systems from 3.1–10.6 GHz, FCC, Washington, DC, (2002).
- Foschini, G. J. and Gans, M. J., "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", Wireless personal communications, 6, 311–335, (1998).
- Foschini, G. J., "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas", Bell labs tech J, 1(2), 41–59, (1996).
- Gore, D. A. and Paulraj, A. J., "MIMO antenna subset selection with space-time coding", IEEE Transaction on Signal Processing", 50(10), 2580–2588, (2002).
- Gorogkhov, A., Gore, D. A. and Paulraj, A. J., "Receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing: theory and algorithms", Transaction on Signal Processing, 51(11), 2796–2708, (2003).
- Han, M. and Choi. J., "Multiband MIMO antenna using orthogonally polarized dipole elements for mobile communications", Microwave Opt Technol Lett, 53(9), 2043–2048, (2011).
- Hanzo, L., Akhtman, Y., Wang, L. and Jiang, M., "MIMO–OFDM for WIFI and WiMAX", John Wiley & Sons Ltd., (2011).
- Harrington, R. F., "Field computation by moment methods", Piscataway, NJ, IEEE Press, (1993).

IE3D™: version 14, Menthor Graphics Corporation, Boeckman Road Wilsonville, OR 97070.

Isomaki, P. and Isoaho, J., “On diversity combining”, Technical Report, TUCS Communication Systems Laboratory, 884, (2008).

ieee.org

Jusoh, M., Jamlos, M. F. B., Kamarudin, M. R. And Malek, M. F. B. A., "A MIMO antenna design challenges for UWB application", Progress In Electromagnetics Research B, 36, 357–371, (2012).

Kahn, L. R., "Ratio squarer", Proc. IRE, 42, 1704, (1954)

Kaise, T. and Zheng, F., “ Ultra wideband systems with MIMO”, John Wiley & Sons Ltd., (2010).

Kaiser, T., Zheng, F. And Dimitrov, E., "An overview of ultra-wide-band systems with MIMO", Proceedings of the IEEE , 97(2), 285–312, (2009).

Kumar, G. and Ray, K. P., “Broadband microstrip antennas”, USA, Artech House, (2003).

Lee, J. –M., Kim, K. –B., Ryu , H. –K. and Woo, J. –M., "A compact ultrawideband MIMO antenna with WLAN band-rejected operation for mobile devices", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 11, 990–993,(2012).

Li, J. F., Sun, B. -H; Zuo, S. L. and Liu, Q. Z., "Design of combined PIFAs with high port-to-port isolation for GSM/DCS and WLAN mobile phones", Electronics Letters, 45(11), 532–533, (2009).

Li, J.-F., Chu, Q.-X., Li, Z.-H. and Xia, X.-X., "Compact dual band-notched UWB MIMO antenna with high isolation", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 61(9), 4759–4766, (2013).

Li, W., Lin, W. and Yang, G., "A compact MIMO antenna system design with low correlation from 1710 MHz to 2690 MHz", Progress In Electromagnetics Research, 144, 59–65, (2014).

- Li, Y., Li, W.-X., Liu, C. and Jiang, T., "Two UWB-MIMO antennas with high isolation using sleeve coupled stepped impedance resonators", IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, 21–22, (2012).
- Li, Z., Du, Z., Takahashi, M., Saito, K. and Ito, K., "Reducing mutual coupling of MIMO antennas with parasitic elements for mobile terminals", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60(2), 473–481, (2012).
- Li; J.-F., Chu, Q.-X.; and Huang, T.-G. "A Compact Wideband MIMO Antenna with Two Novel Bent Slits", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60(2), 482–489, (2012).
- Liang, J., Chiau, C. C., Chen, X. and Parini, C. G., "Study of a printed circular disc monopole antenna for UWB systems", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 53(11), 3500– 3504, (2005).
- Ling, X. and Li, R., "A novel dual-band MIMO antenna array with low mutual coupling for portable wireless devices", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 10, 1039–1042, (2011).
- Liu, L., Cheung, S. W. and Yuk, T. I., "Compact MIMO antenna for portable devices in UWB applications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 61(8), 4257–4264, (2013).
- Lu, Y. -C. and Lin, Y. -C., "A compact dual-polarized UWB antenna with high port isolation", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1–4, (2010).
- Mallahzadeh, A. R., Es'haghi, S. and Alipour, A., "Design of an E-shaped MIMO antenna using IWO algorithm for wireless application at 5.8 GHz", Progress in Electromagnetics Research, 90, 187–203, (2009).
- Mohammad, S., Nezhad, A., Hassani, H. R., and Foudazi, A., "A dual-band WLAN/UWB printed wide slot antenna for MIMO/diversity applications", Microwave and Optical Technology Letters, 55(3), 461–465, (2013).
- Najam, A. I., Duroc, Y., Leao, J. F. A. and Tedjini, S., "A novel co-located antennas system for UWB-MIMO applications", IEEE Radio and Wireless Symposium, RWS '09, 368–371, (2009).

- Örtlek, E. S. and Taşpınar, N., “Çok Girişli Çok Çıkışlı (MIMO) OFDM Sistemlerinde Kanal Kestirimi”, II. İletişim Teknolojileri Ulusal sempozyumu, (2005).
- Rao, Q. and Wilson, K., “Design, modeling, and evaluation of a multiband MIMO/Diversity antenna system for small wireless mobile terminals”, IEEE transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 1(3), 410–419, (2011).
- Sadat, S., Fardis, M., Gharakhili, F. G. and Dadashzadeh, G. R., "A compact microstrip square-ring slot antenna for UWB applications", Progress In Electromagnetics Research, 67, 173–179, (2007).
- Sarrazin, J., Mahé, Y., Avrillon, S. and Toutain, S., “Collocated microstrip antennas for MIMO systems with a low mutual coupling using mode confinement”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 58(2), (2010).
- Shannon, C. E., “A mathematical theory of communication”, Bell System Technical Journal, 27, 379–423 and 623–656, (1948).
- Sharawi, M. S., Numan, A. B., Khan, M. U. and Aloï, D. N., "A dual-element dual-band MIMO Antenna system with enhanced isolation for mobile terminals", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 11, 1006–1009,(2012)
- Shoaib, S., Shoaib, I., Shoaib, N., Chen, X. and Parini, C. G., "Design and performance study of a dual-element multiband printed monopole antenna array for MIMO terminals", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 13, 329–332, (2014).
- Su, S. -W., Lee, C. -T. and Chang, F.-S., "Printed MIMO-antenna system using neutralization-line technique for wireless USB-dongle applications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 60(2), 456–463, (2012).
- Tarokh, A. R. C. V. and Seshadri, N.,“Space time codes for high data rate communication: performance criteria and codeconstruction”, IEEE Trans Inf Theory, 44(2), 744–764, (1998).
- Technewsworld.com/story/58256.html

Teletar, I. E., "Capacity of multi-antenna gaussian channels," European Transactions on Telecommunications, 10(6), (1999).

Tse, D. and Wiswanath, P., "Fundamentals of wireless communication", Cambridge University Press, (2005).

Tse, D. N. C. and Wiswanath P., "Diversity–multiplexing tradeoff in multiple-access", Transaction on Signal Processing, 50(9), 1859–1874, (2004).

Vaughan, R.G. and Andersen, J.B., "Antenna diversity in mobile communications," , IEEE Transactions on Vehicular Technology, 36,(4), 149 –172, (1987)

Wang, L. And Huang, B., "Design of ultra-wideband MIMO antenna for breast tumor detection," International Journal of Antennas and Propagation, 2012, 7 pages, (2012).

wimaxforum.org

wimaxmaps.org/WiMAXMaps

Win, M. Z. and Winters, J. H., "Analysis of hybrid selection/maximal-ratio combining in rayleigh fading", IEEE Transactions on Communications, 47(12), 1773–1776, (1999).

Winters, J. H., "On the capacity of radio communication systems with diversity in a rayleigh fading environment", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 5(5), 871–878, (1987).

Wolniansky, P. W., Foschini, G. L., Golden, R. A. and Valenzuela, R. A., "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel", URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, ISSSE 98, 295–300, (1998).

Wong, K. L., "Compact and broadband microstrip antennas", John Wiley & Sons, Inc., (2002).

Wong, K. –L., Lin, P.-W. and Hsu, H.-J., "Decoupled WWAN/LTE antennas with an isolation ring strip embedded there between for smartphone application", Microwave and Optical Technology Letters, 55(7), 1470–1476, (2013).

- Yao, Y., Wang, X. and Yu, J., “Multiband planar monopole antenna for LTE MIMO system”, *Internation J Antenn Propogat*, (2012)
- Yavuz, B. and Soydaş, H., “Mobil genişbantın gelişimi ve 4. Nesil (4G) mobil haberleşme sistemi LTE'nin değerlendirilmesi”, *Akademik Bilişim, Muğla Üniversitesi*, (2010)
- Zaker, R., Ghobadi, C., and Nourinia, J., "A modified microstrip-fed two-step tapered monopole antenna for UWB and WLAN applications," *Progress In Electromagnetics Research*, 77, 137–148, (2007).
- Zhang, S., Lau, B. K., Sunesson, A. and He, S., "Closely-packed UWB MIMO/Diversity antenna with different patterns and polarizations for USB dongle applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(9), 4372–4380, (2012).
- Zhang, S., Lau, B. K., Tan, Y., Ying, Z. and He, S., "Mutual coupling reduction of two PIFAs with a T-Shape slot impedance transformer for MIMO mobile terminals", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(3), 1521–1531, (2012).
- Zhang, S., Ying, Z., Xiong, J. and He, S., "Ultrawideband MIMO/Diversity antennas with a tree-like structure to enhance wideband isolation", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 8, 1279–1282, (2009).
- Zhang, S., Zhao, K., Zhu, B., Ying, Z. and He, S., "MIMO reference antennas with controllable correlations and total efficiencies", *Progress In Electromagnetics Research*, 145, 115–121, (2014).
- Zhou, X., Quan, X. L. and Li, R. L., "A dual-broadband MIMO antenna system for GSM/UMTS/LTE and WLAN handsets", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 551–554, (2012).

7. EK

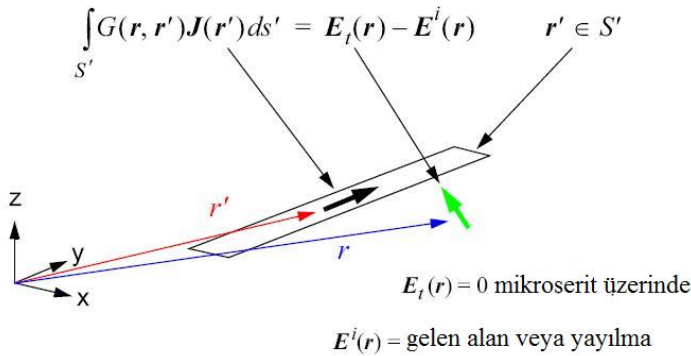
7.1. EK-1: MOMENT METODU

Moment Metodunun (Method of Moment–MoM) adı eski mekanik ve inşaat mühendisliği uygulamalarına dayanmaktadır. MoM, genişletilmiş pulse ve Dirac test fonksiyonlarını kullanmaktadır. [Harrington, 1993], bu konsepti eşdizimlilik içeren izdüşümsel yaklaşımları açıklayarak genişletmiştir. MoM, aşağıdaki elektrik alan integral ifadelerini (electric field integral equation–EFIE) veya manyetik alan integral ifadelerini (magnetic field integral equation–MFIE) çözmekte iyi bir tercihtir.

$$EFIE : L_e^{-1} \mathbf{J} = \mathbf{E} \quad (7.1)$$

$$MFIE : L_m^{-1} \mathbf{J} = \mathbf{H} \quad (7.2)$$

Burada, \mathbf{E} ve \mathbf{H} alan fonksiyonlarını ve \mathbf{J} kaynak fonksiyonunu (akım yoğunluğunu) ifade etmektedir. Bu ifadeler, problemin sınırlarına ve materyal dağılımlarına dayanan Green fonksiyonlarını içeren ters operatörlere dayanmaktadır. Bu integral ifadeleri genellikle frekans domaininde formüllerle ifade edilmektedir. Metodolojinin daha anlaşılır olması için bir örnek üzerinde gösterilecektir. Şekil Ek 7.1’de dielektrik malzeme üzerinde bulunan bir mikroşerit parçası gösterilmiştir. Problem, mikroşeride gelen elektrik alanın $\mathbf{E}_i(\mathbf{r})$ şerit üzerinde oluşturduğu akım yoğunluğunun \mathbf{J} bulunmasını içermektedir.



Şekil Ek 7.1. Bir mikroşeridin elektrik alan integral ifadelerinin elde edilmesi

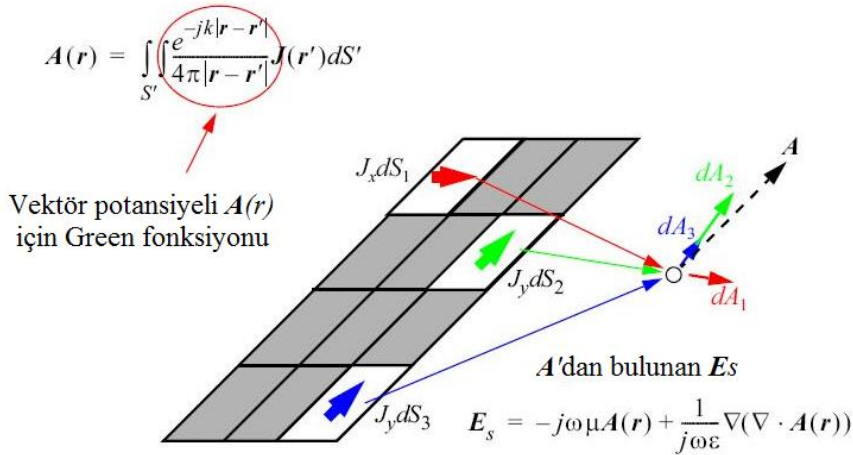
Gelen elektrik alan, şerit üzerinde akım dağılımının indüklenmesine neden olur. İndüklenen akım, saçılan elektrik alanının $\mathbf{E}_s(\mathbf{r})$ yayılmasına neden olur. Netice olarak her iki alan toplanarak toplam elektrik alanı $\mathbf{E}_t(\mathbf{r})$ meydana getirir. Burada, indüklenen akım yoğunluğu ve yayılan alan bilinmemektedir. Sadece, toplam elektrik alanın yatay bileşenlerinin her yerde sıfır olduğu bilinmektedir. Akım yoğunluğu ve alan fonksiyonları arasındaki ilişki, aşağıdaki elektrik integral ifadesinde verilmiştir.

$$\int_{S'} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS' = \mathbf{E}_t(\mathbf{r}) - \mathbf{E}^i(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_s(\mathbf{r}) \quad (7.3)$$

İntegral, şeridin S' yüzeyi üzerinde alınmalıdır. Çünkü toplam alanın yatay bileşenleri yüzey üzerinde sıfırdır. Yüzey üzerinde Eşitlik (7.3)'ün sağ tarafı $\mathbf{E}^i(\mathbf{r})$ 'e eşit olur ve böylece aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\int_{S'} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dS' = -\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) \quad (7.4)$$

Bu denklemi çözmeden önce, L^{-1} 'nin ters dönüşümünü bulmak için Green fonksiyonu $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ türetmemiz gerekiyor. Şekil Ek 7.2'de vektör potansiyel $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ 'dan yüzey akım yoğunluğu ile saçılan alan ilişkisi türetilmiştir.



Şekil Ek 7.2. Bir mikroşerit üzerinde bulunan akımdan elektrik alan ve vektör potansiyel ifadelerinin elde edilmesi

Şerit üzerindeki zaman harmonik akım yoğunluğu için öncelikle vektör potansiyel $\mathbf{A}(\mathbf{r})$, Şekil Ek 7.2’de gösterildiği gibi tüm akım elemanlarının şerit üzerinde toplanması ile belirlenir. Çok küçük akım elemanları için şerit yüzeyi için integralin alınması ile elde edilen vektör potansiyeli:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \iint_{s'} \frac{e^{-jk|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \mathbf{J}(\mathbf{r}) dS' \quad (7.5)$$

Burada, k boşluk için yayılma sabitidir. İntegralin kerneli, vektör potansiyel $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ için boşlukta Green fonksiyonudur. İkinci adımda, elektrik alan $\mathbf{E}_s(\mathbf{r})$, aşağıdaki gibi vektör potansiyelinden bulunmaktadır.

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = -j\omega\mu\mathbf{A}(\mathbf{r}) + \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}(\mathbf{r})) \quad (7.6)$$

Eşitlik (7.5), Eşitlik (7.6)’da yerine koyularak,

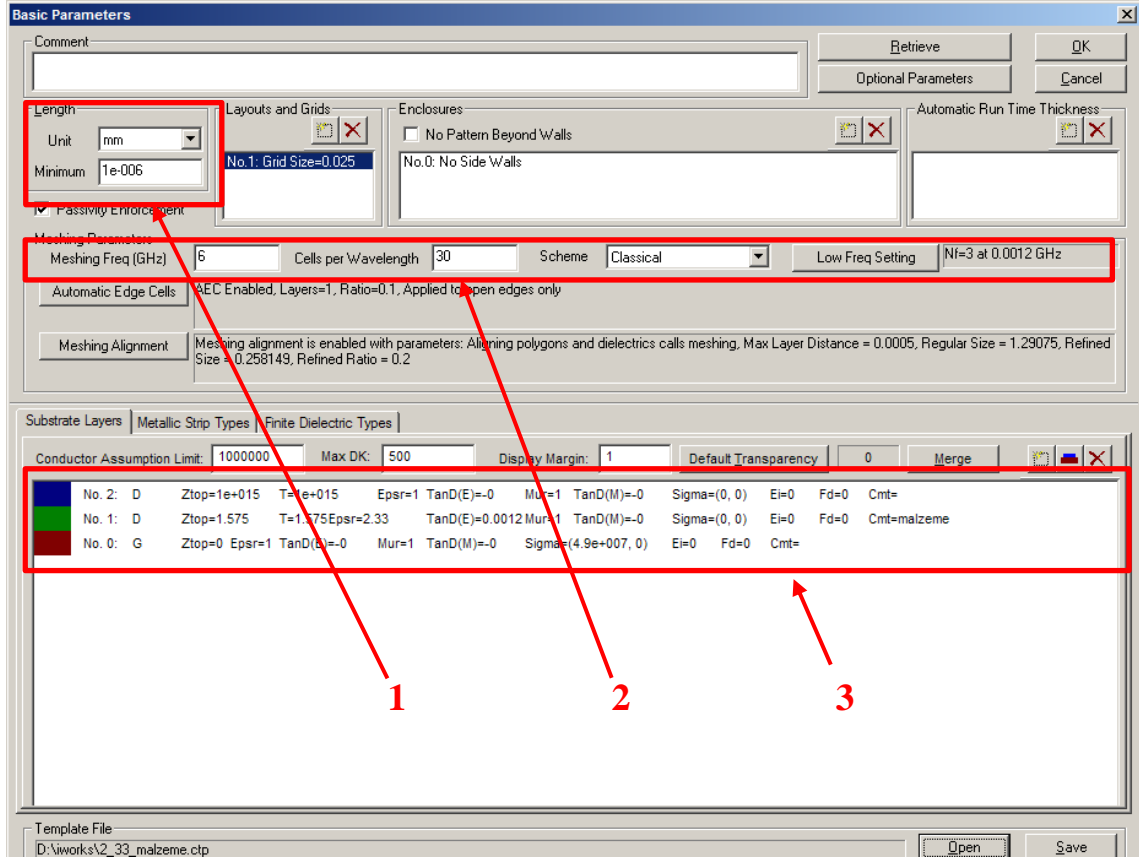
$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = \frac{1}{j4\rho\omega\epsilon} \iint_{s'} (k^2 + \nabla\nabla) \frac{e^{-jk|r-r'|}}{|r-r'|} \mathbf{J}(\mathbf{r}) dS' \quad (7.7)$$

elde edilir. Bu integral sadece bir şerit için geçerli değildir, boşluktaki farklı şekilli iletken objeler için de geçerlidir. Bu ifade aslında, boşluktaki iletken objeler için genel EFIE saçılma problem formülüdür. Dolayısıyla, karmaşık 3B’li geometriler için akım yoğunluk fonksiyonu, iki parametre yerine üç parametrelidir olacaktır ve vektör integralleri daha karmaşık yüzey şekilleri için hesaplanacaktır.

7.2. EK–2: IE3D™ YAZILIMI İLE ANTEN TASARIMI VE BENZETİMİ

7.2.1. Geometrinin Oluşturulması

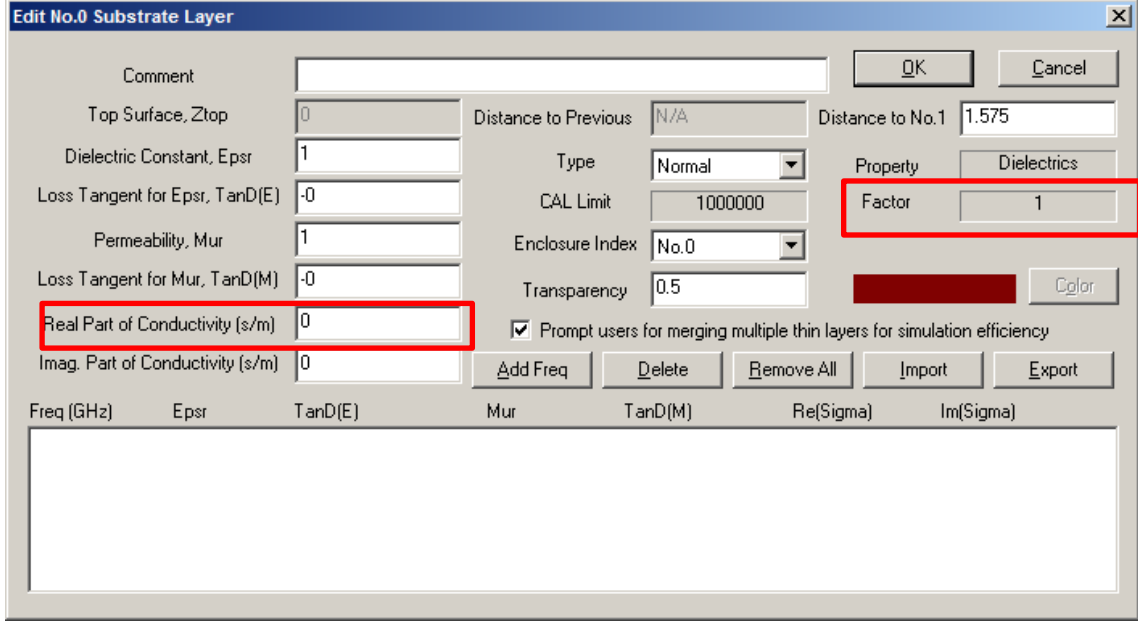
IE3D™ yazılımı ile anten tasarımı yapmak için, IE3D™’nin editörü açılarak yeni bir proje oluşturulur. Yeni proje oluşturulması sırasında ölçü birimi, ızgaralama seçenekleri ve alttaş katmanları gibi temel ayarların yapılabildiği Şekil Ek.7.3’de gösterilen pencere açılmaktadır.



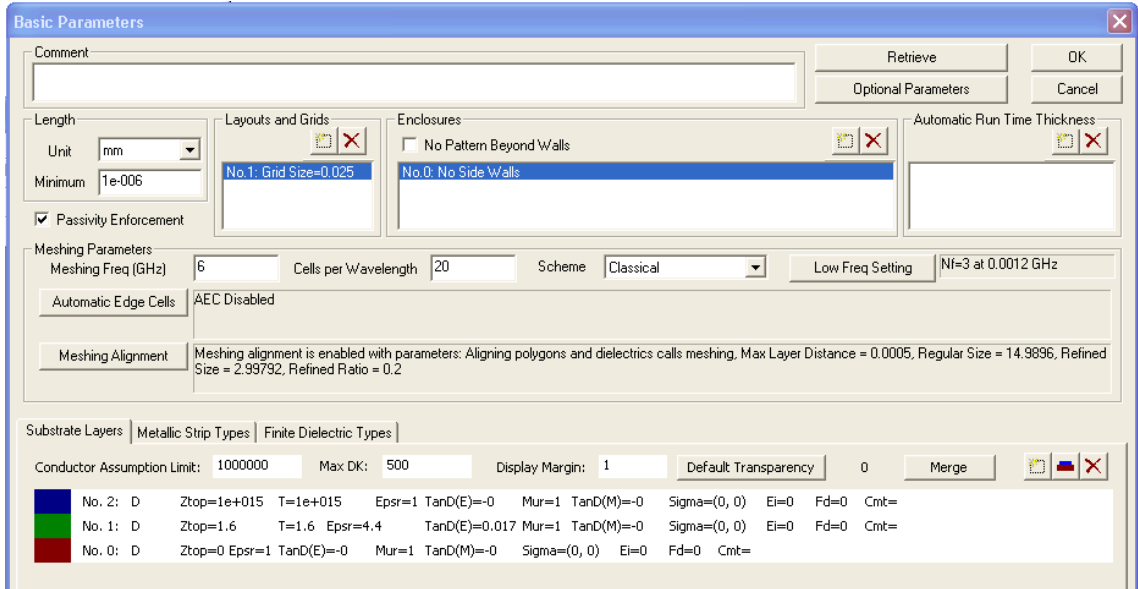
Şekil Ek 7.3. Temel parametrelerin ayarlanması

Şekil Ek 7.3’de verilen pencerede 1 numara ile belirtilmiş alan, anten geometrisinin oluşturulması sırasında kullanılacak fiziksel ölçü birimini belirtmektedir. Varsayılan olarak mm boyutu kullanılmıştır. 2 numara ile belirtilmiş alanda, ızgaralama ayarları yapılmaktadır. Benzetimin yapılacağı azami frekans ve hücre sayısının dalga boyu oranının belirtilmesi gerekmektedir. 3 numara ile belirtilmiş alan, katmanları göstermektedir. Antenin her düzlemi, birer katman olarak belirtilmektedir. Toprak düzlemi, altta, ışığıyan eleman düzlemi birer katman olarak kabul edilmektedir. No. 0 ile belirtilen katman, toprak düzlemini temsil etmektedir. *Sigma* değerine bakıldığında, toprak düzleminin belirli boyutlara sahip olmadığı, sonsuz bir toprak düzlemi olarak kabul edildiği görülmektedir. Toprak düzlemi sonlu yapmak için Şekil Ek 7.4’te gösterildiği gibi toprak düzlemini gösteren katmanın iletkenliğinin reel kısmı (Real Part of Conductivity (s/m)) değeri “0” olarak değiştirilmelidir. Toprak düzleminin sonlu yapıya sahip olmasından dolayı, anten beslemesinin yapılması sırasında toprak düzleminin geometrisinin çizilmesi ve toprak

olarak belirtilmesi gerekmektedir. No. 1 ile belirtilen katman, anten tasarımında kullanılacak olan alttaşı temsil etmektedir. Alttaş ile ilgili özellikler, yeni katman eklenirken girilmekte ve sonuç olarak burada görülmektedir. No. 2 ile belirtilen katman, alttaşın üzerinde yer alan boşluğu temsil etmektedir. Katmanlar ayarlandıktan sonraki görüntü Şekil Ek 7.5'te verilmiştir.

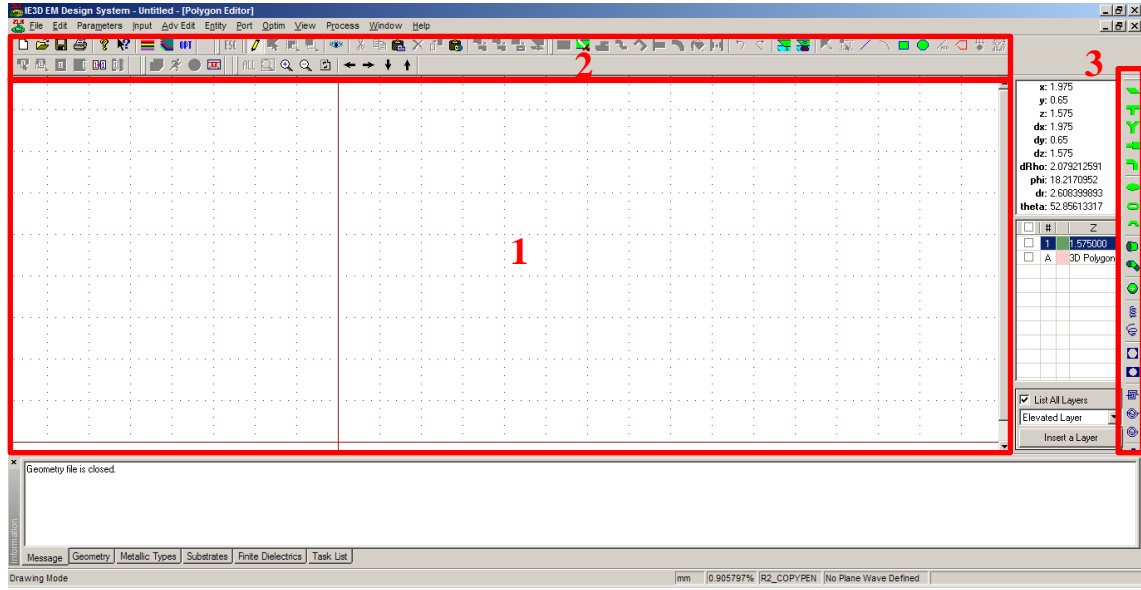


Şekil Ek 7.4. Sonlu toprak düzlemi bilgileri



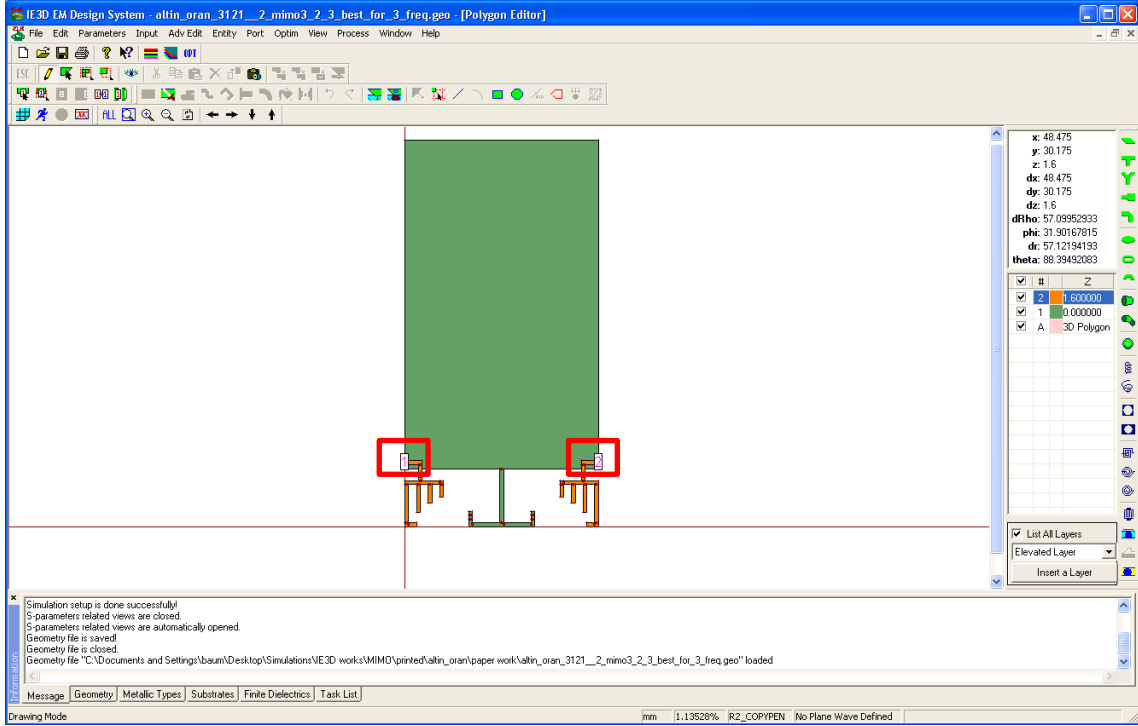
Şekil Ek 7.5. Sonlu alttaş düzleminin tanımlanmasından sonra görülen temel parametreler

Temel ayarların yapılmasından sonra iki boyutlu anten tasarım ekranı açılmaktadır. Şekil Ek 7.6'da görülen anten tasarımı ekranında 1 numaralı alan, tasarımın yapıldığı ve yapılan tasarımın görüldüğü bölümü göstermektedir. 2 numaralı alan, kaydetme, kesme, kopyalama, yapıştırma, poligon birleştirme, poligon taşıma, besleme yapma gibi işlemlerin yapılması için araçların bulunduğu araç kutularını göstermektedir. 3 numara ile belirtilen alan, anten geometrisinin çizilmesi için çeşitli geometrik şekillerin bulunduğu araç kutusunu göstermektedir.



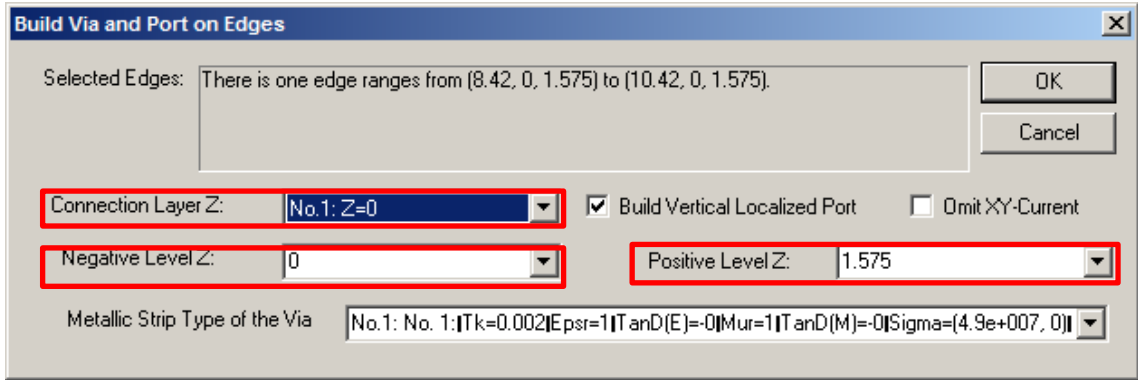
Şekil Ek 7.6. IE3D™ elektromanyetik benzetim programının ana penceresi

Gerekli araçlar kullanılarak tasarlanan anten, Şekil Ek 7.7'de görülmektedir. Turuncu renk ile gösterilen kısım, antenin ışımaya yapan iletkeni; yeşil renk ile gösterilen kısım ise antenin toprak iletkenini temsil etmektedir.



Şekil Ek 7.7. Tasarlanan antenin iki boyutlu görünümü

Şekil Ek 7.7’de, antenin alt kısmında kırmızı kutu ile belirtilen ve içerisinde 1 ve 2 yazan beyaz kutu, antenin o kısmında yer alan beslemeyi temsil etmektedir. Beslemenin yapılması için anten tasarımı yapıldıktan sonra bütün katmanlar seçilerek, antenin en altında besleme yapılacak noktalar işaretlenmeli ve menüden kenarlardan dikey bağlantı ve port oluştur (Build Via and Port on Edges) tıklanmalıdır. Böylece Şekil Ek 7.8’de görünen ekran açılmaktadır. Bağlantı katmanı (Connection Layer Z), No. 1: Z=0 seçilmelidir. Toprak düzlemi (Negative Level Z) 0 mm ve besleme düzlemi (Positive Level Z) 1.575 mm olarak seçilmelidir.

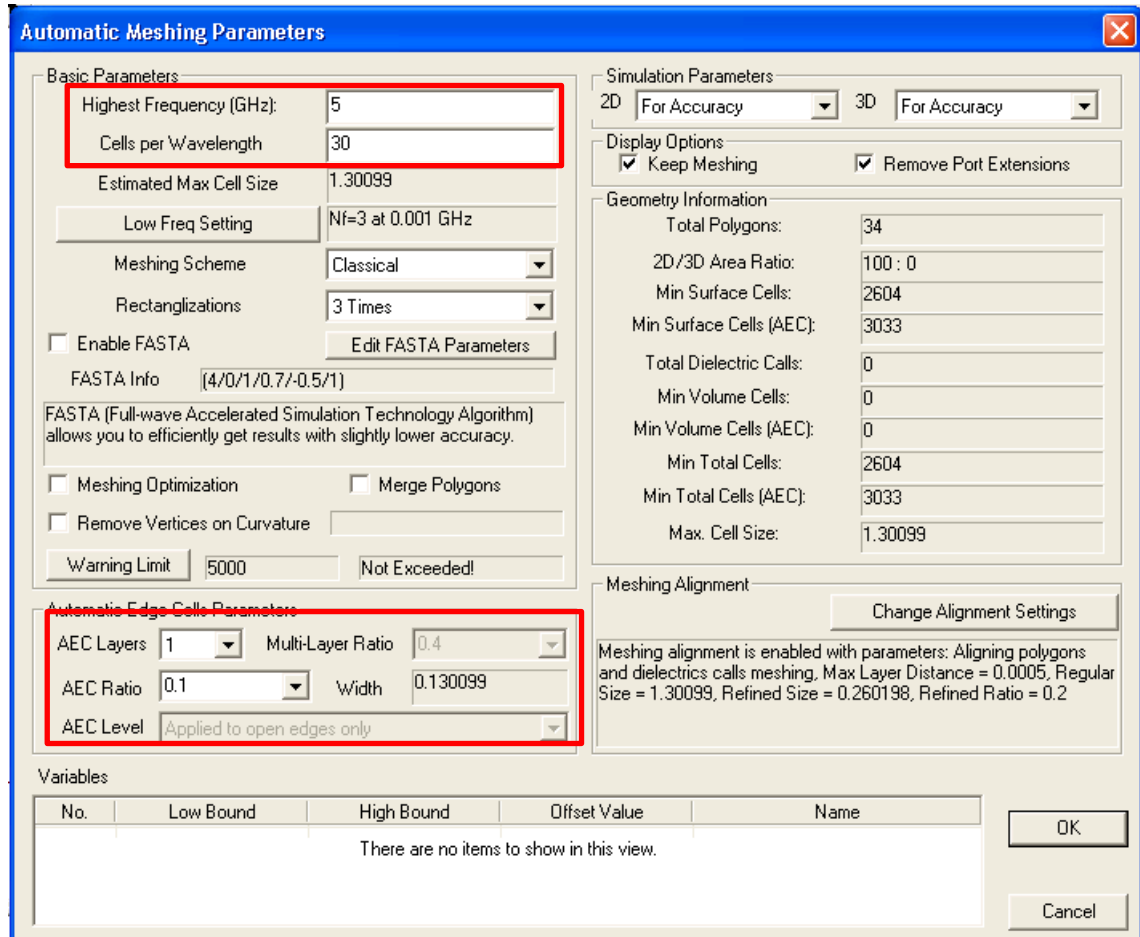


Şekil Ek 7.8. Antende besleme portunun oluşturulması

Bu ekrandan “OK” butonuna tıklanarak besleme portu oluşturulmaktadır. Anten geometrisinin çizimi ve beslemenin oluşturulmasından sonra antenin benzetimi yapılabilmektedir.

7.2.2. Izgaralama

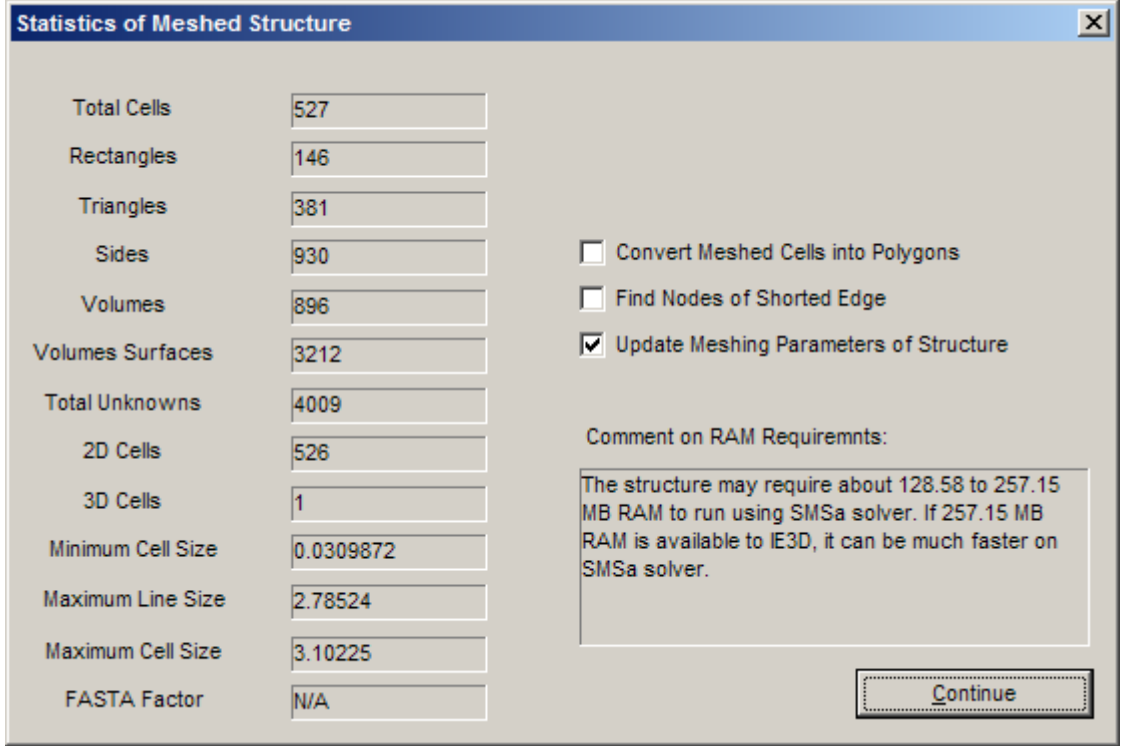
Anten benzetimini yapabilmek için öncelikle ızgaralama (meshing) işlemi yapılmalıdır. Izgaralama işlemi için araç çubuğundan ilgili araca tıklanmalıdır. Böylece Şekil Ek 7.9’da görülen ızgaralama özellikleri ile ilgili ekran açılabilir. Ayrıca, anten kenarlarının daha hassas hesaplanması için otomatik kenar hücre parametresi (Automatic Edge Cell Parameter) 1 olarak seçilmiştir. Bu pencerede “OK” butonuna tıklanarak ızgaralama ile ilgili bilgi penceresi görülebilir.



Şekil Ek 7.9. Izgaralama ayarları

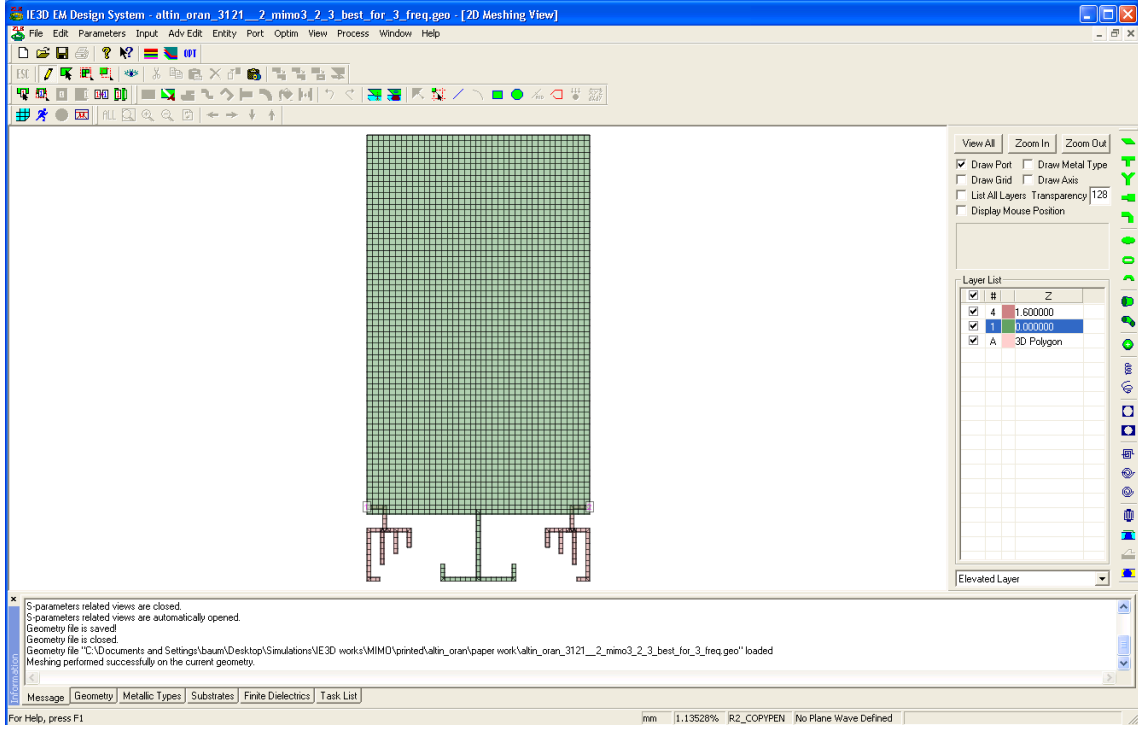
Izgaralama işlemi sonrası bilgi penceresi Şekil Ek 7.10’da görülmektedir. Bilgi penceresinde üçgen ve daire geometrilerine sahip hücre sayıları, toplam hücre

sayısı, en küçük ve en büyük hücre boyutları gibi bilgiler ile benzetim işlemi için gerekli bellek miktarı görülmektedir.



Şekil Ek 7.10. Izgaralama işlemi sonrası bilgi ekranı

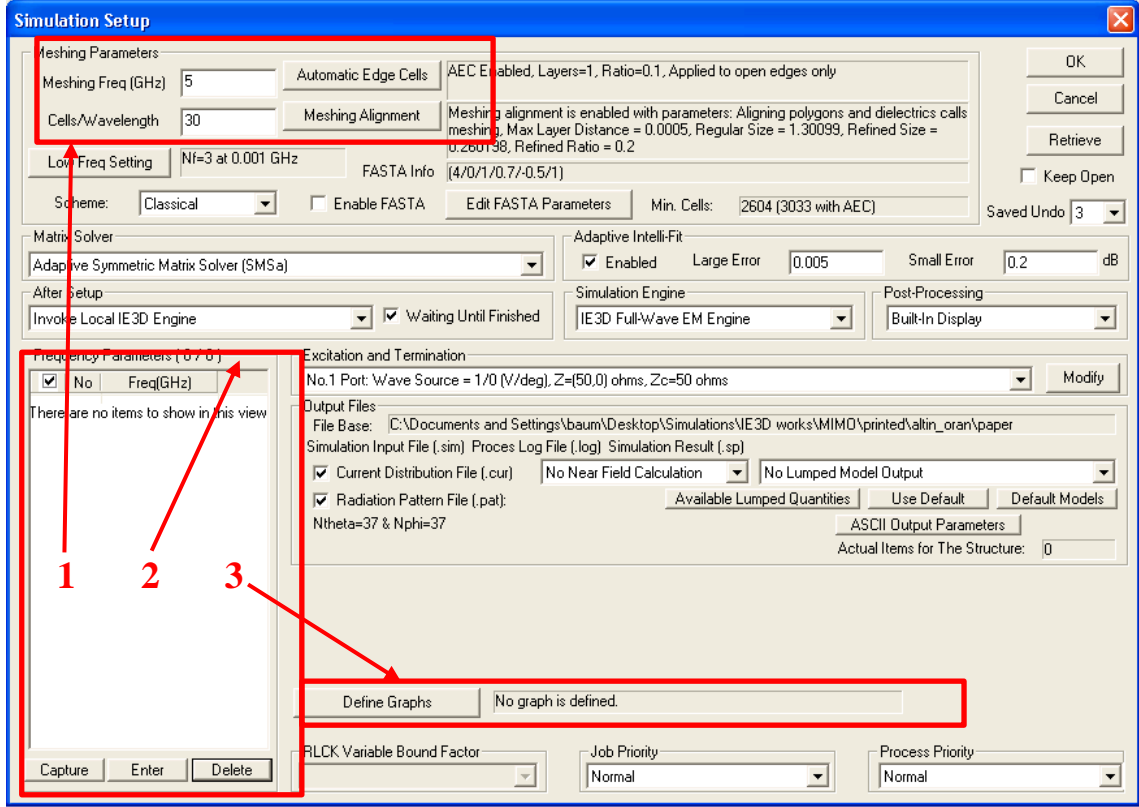
Bilgi ekranında devam (Continue) butonuna tıklanmasıyla ızgaralanmış anten tasarımı, Şekil Ek 7.11’de görüldüğü gibi açılacaktır.



Şekil Ek 7.11. Izgaralama işlemi sonrası antenin iki boyutlu görünümü

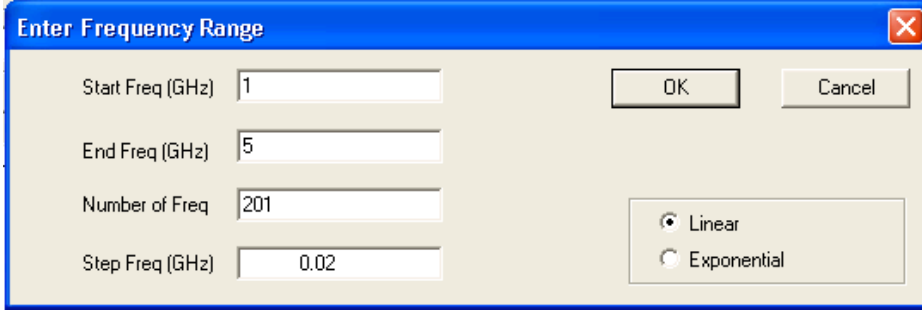
7.2.3. Benzetimin Koşulması

Izgaralama işleminden sonra benzetim işlemi yapılmaktadır. Bunun için araç menüleri kullanılarak benzetim (Simulate) işlemi seçilerek benzetim ayarlarının yapılmasına olanak sağlayan ekran açılmalıdır. Ekran görüntüsü Şekil Ek 7.12’de verilmiştir. Benzetim ayarlarının yapıldığı ekranda bazı ayarlar varsayılan olarak gelmektedir. Bu ekranda, eğer başlangıçta girilmemişse benzetimin yapılacağı maksimum frekans ve dalga boyu / hücre sayısı bilgileri girilmelidir. Aksi halde, sadece benzetimin yapılacağı frekans aralığı girilmeli ve benzetim sonucunda görüntülenmesi istenen grafikler seçilmelidir. Bu işlemler, Şekil Ek 7.12’de görülen kırmızı kutuların belirttiği yerlerden yapılmaktadır.



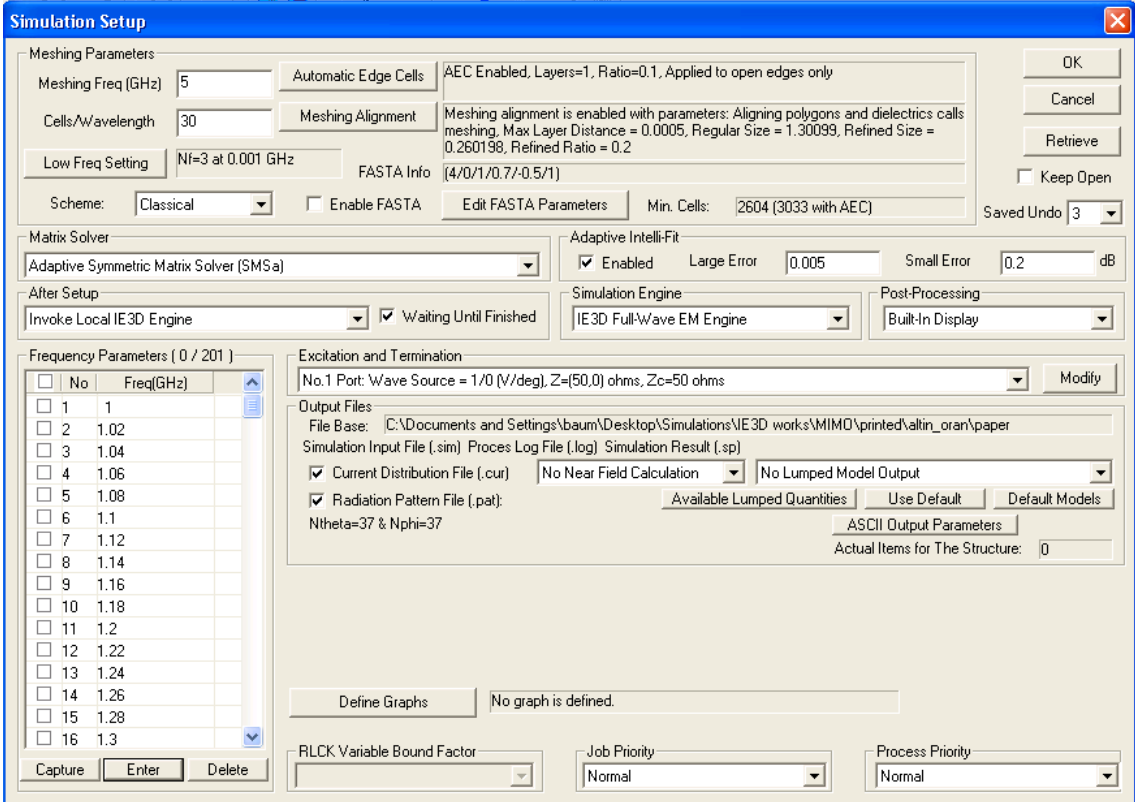
Şekil Ek 7.12. Benzetim ayarlarının yapılması

Şekil Ek 7.12’de 1 numara ile belirtilen alan, benzetimin yapılacağı azami frekansı ve dalga boyu / hücre sayısının ayarlanmasını sağlamaktadır. Başlangıçta bu ayarlamalar yapıldıysa bu kutularda değişiklik yapılmasına gerek bulunmamaktadır. 2 numara ile belirtilen alan, benzetimin yapılacağı frekans aralığını barındıran bir listedir. Benzetimi yapılması istenen frekans aralığı ve bu aralıktaki frekans adedi, giriş (Enter) butonuna tıklanarak Şekil Ek 7.13’de verilen pencereden girilmektedir. 3 numara ile belirtilen alan, benzetim sonucu görüntülenmesi istenen grafiklerin belirtilmesini sağlamaktadır. Bu kutunun gösterdiği grafik tanımla (Define Graph) butonu yardımı ile istenen grafikler seçilerek, benzetim sonrasında hızlı bir şekilde bu grafiklerin açılması sağlanmaktadır.



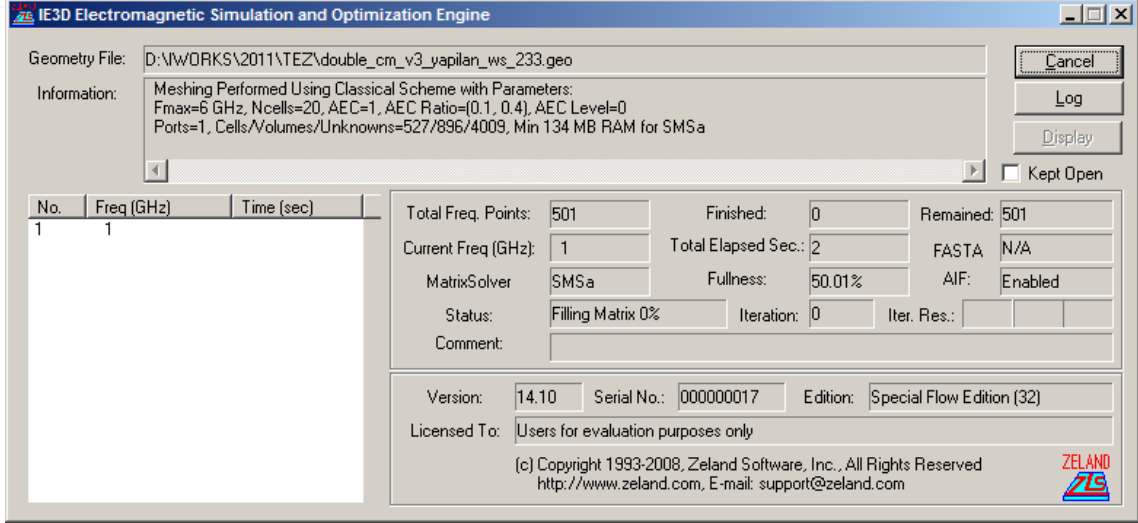
Şekil Ek 7.13. Benzetimin yapılacağı frekans aralığı bilgileri

Benzetimin yapılacağı frekans aralığı ve bu aralıktaki frekans sayısı, Şekil Ek 7.13'te verilen pencereden girilmektedir. Bu frekans aralığında ve belirtilen sayıdaki frekans, varsayılan olarak doğrusal olarak seçilmektedir. Frekans aralığı ve frekans sayısının girilmesinden sonra tamam (OK) butonuna tıklanarak, frekans listesinin dolması sağlanmaktadır. Bu listenin doldurulduğu benzetim ayarları ekranı, Şekil Ek 7.14'de görülmektedir.



Şekil Ek 7.14. Benzetim ayarları penceresi

Bütün ayarlamalar yapıldığından dolayı benzetim işlemine geçilebilir. Benzetim işleminin yapılması için benzetim ayarları ekranından “OK” butonuna tıklanmalıdır. Bu işlemden sonra, IE3D™ benzetim uygulaması çalışarak hesaplamalar yapılmaya başlanacak. Benzetim işleminin devam ettiğini gösteren ekran Şekil Ek 7.15’de verilmiştir.



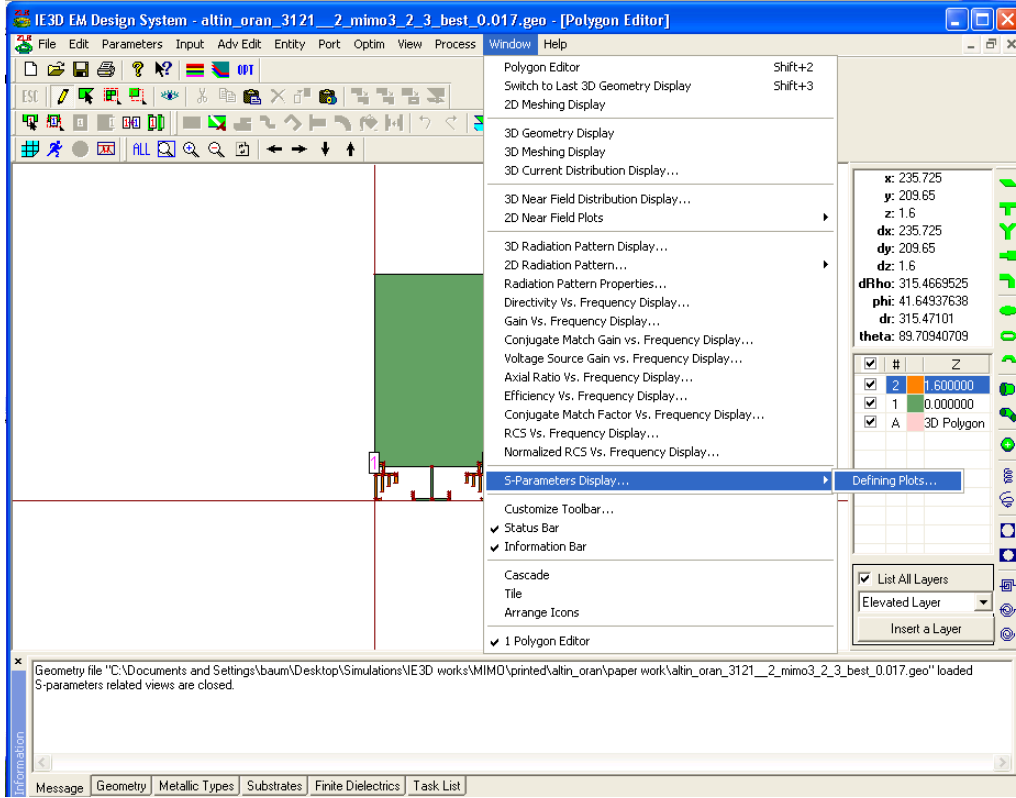
Şekil Ek 7.15. Benzetim işlemi ile ilgili bilgilerin görülmesi

7.2.4. Performans Ölçümü

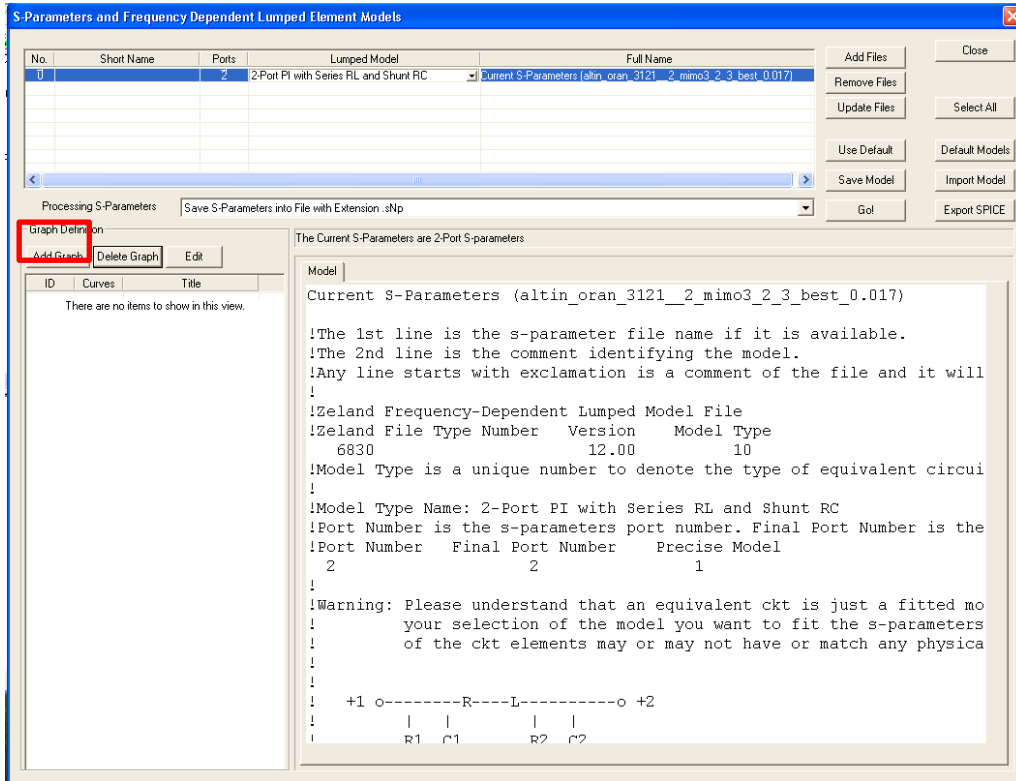
7.2.4.1. S-parametreleri

Benzetim işlemi sonunda S-parametrelerinin görüntülenmesi, Window sekmesinden Şekil Ek 7.16’da gösterildiği gibi yapılmaktadır. Daha sonra, Şekil Ek 7.17’de açılan pencerede (Add Graph) butonu tıklanmaktadır.

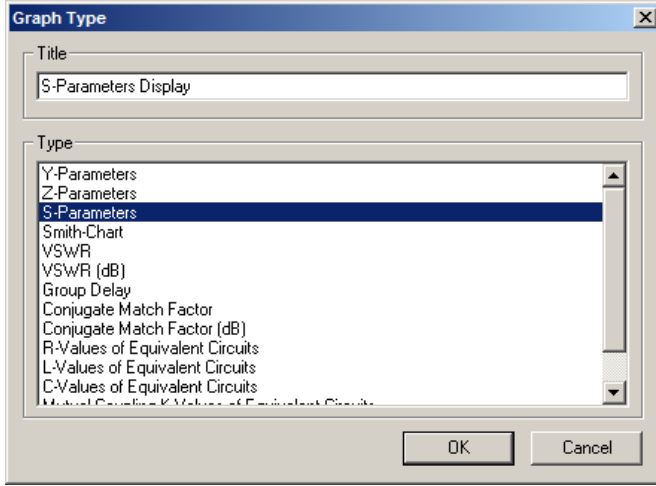
Şekil Ek 7.18’de gösterilen pencerede” S-parameters” seçilir ve OK tıklanır. Görüldüğü gibi bu pencereden, ayrıca diğer grafik türleri seçilebilir. Sonra, Şekil Ek 7.19’da görüldüğü gibi anten elemanları simetrik olduğu sadece s_{11} ve s_{12} parametreleri işaretlenir ve OK butonuna basılır.



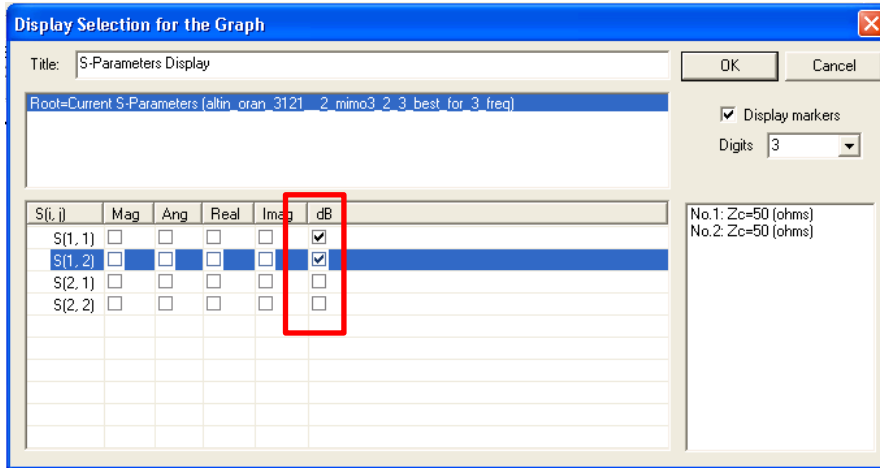
Şekil Ek 7.16. S-parametre grafiklerinin açılması



Şekil Ek 7.17. Grafik eklemenin yapıldığı pencere



Şekil Ek 7.18. Grafik türlerinin seçilmesi

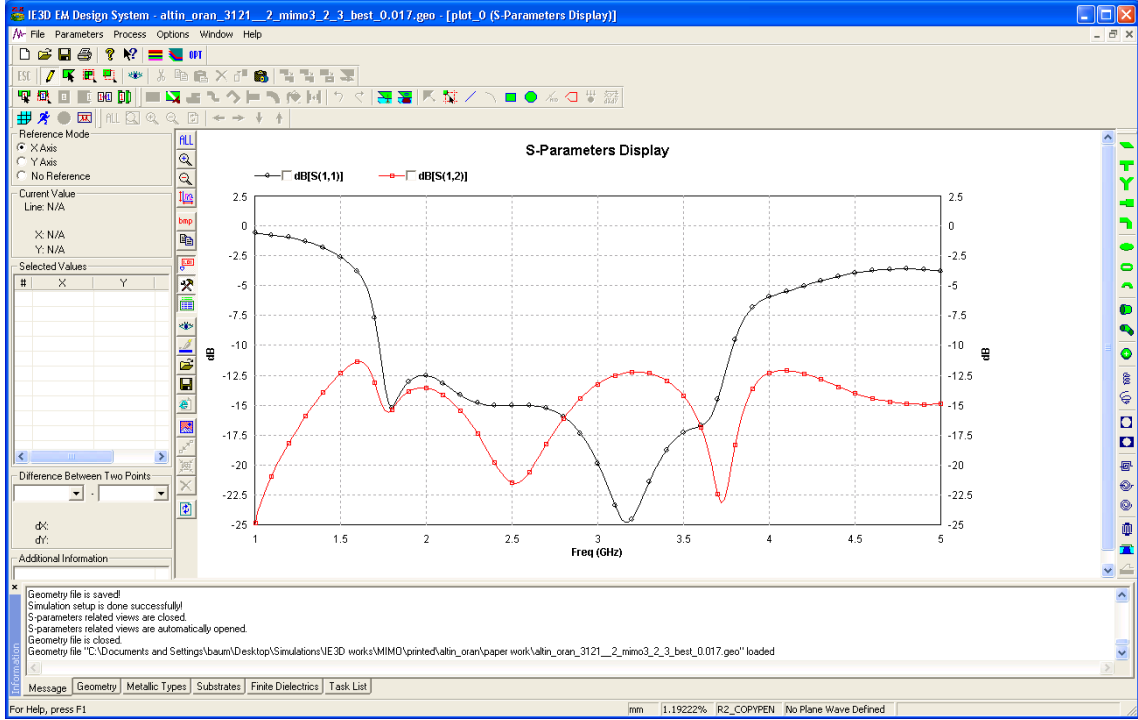


Şekil Ek 7.19. S-parametrelerinin seçimi

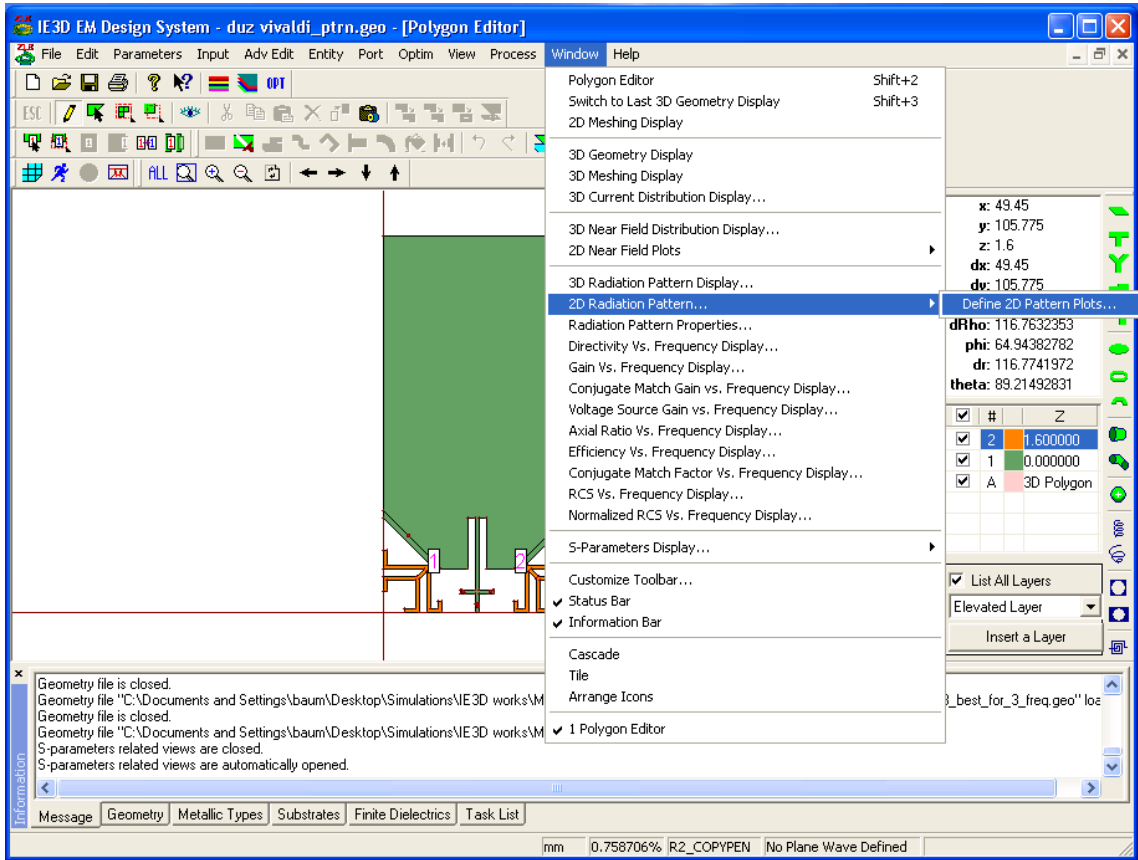
Benzetim işleminden sonra elde edilen S-parametre grafiği Şekil Ek 7.20’de görülmektedir.

7.2.4.2. Işıma örüntüsü

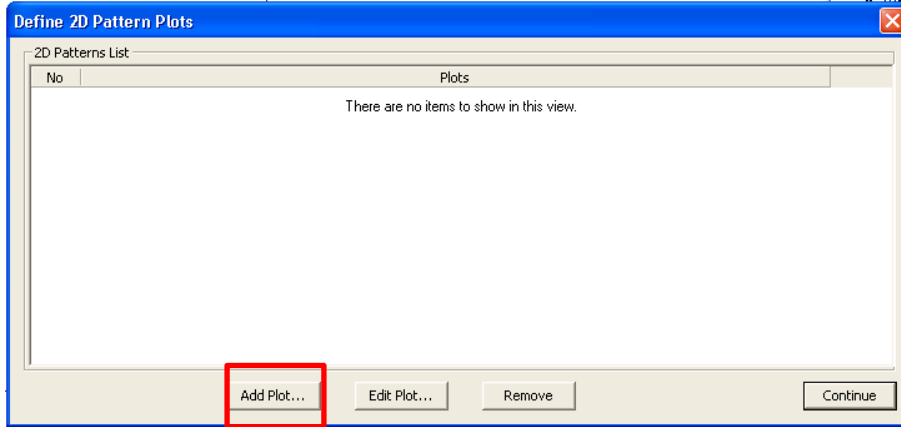
2B’li ışına örüntülerinin elde edilmesi için öncelikle Window sekmesinden Şekil Ek 7.21’de verilen pencereden “2D Radiation Pattern” seçilir ve “Define 2D Pattern Plot” tıklanır. Sonra, Şekil Ek 7.22’de verilen pencereden “Add Plot” butonuna tıklanarak grafik eklemesi yapılır.



Şekil Ek 7.20. Benzetim işlemi sonrası S-parametre grafiği

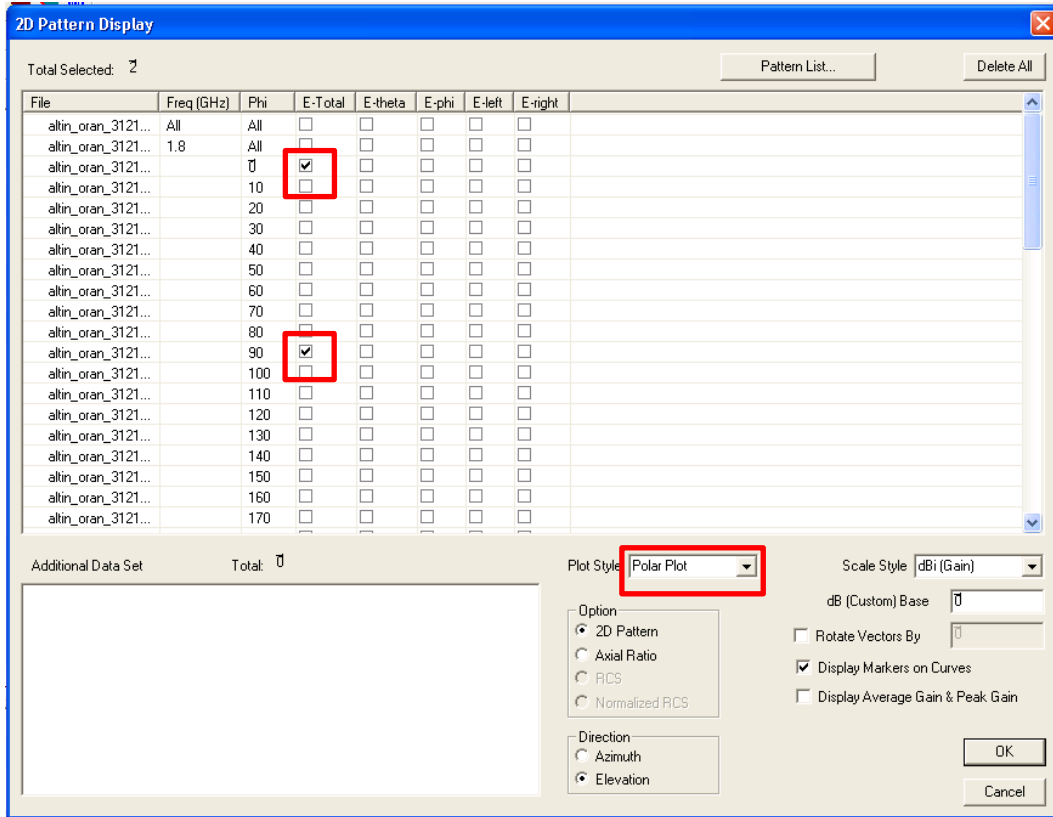


Şekil Ek 7.21. 2B ışına örüntüsünü seçilmesi

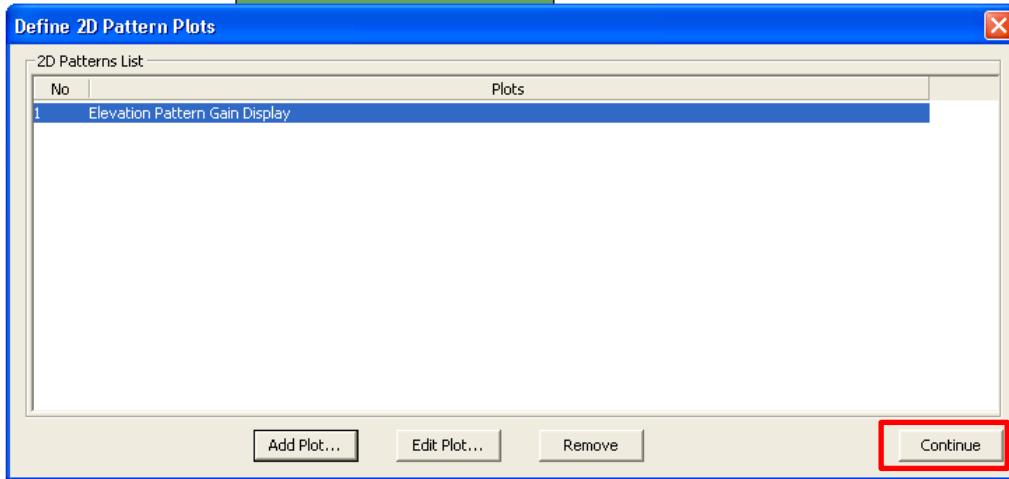


Şekil Ek 7.22. Örüntü grafiklerinin eklenmesi

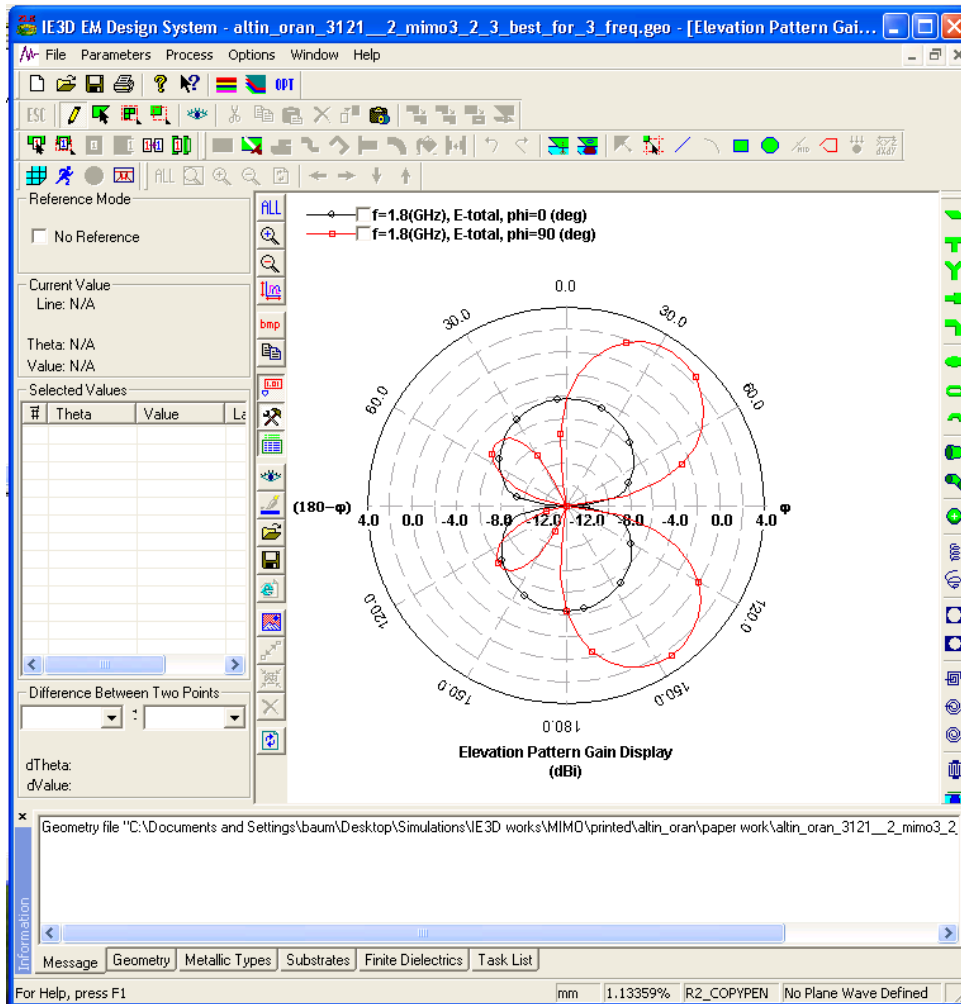
Aşağıda verilen Şekil Ek 7.23'deki pencereden istenilen ışına örüntüsü parametreleri tanımlanır. Bu tez çalışmasında, örüntüler "Polar" formda elde edilmiştir. OK butonuna tıklandıktan sonra Şekil Ek 7.24'de tanımları yapılmış ve çizilmeye hazır örüntü grafiği görülmektedir. Son olarak, önceki pencelerde tanımlanmış örüntü Şekil Ek 7.25'te gösterilmiştir.



Şekil Ek 7.23. İstenilen örüntü grafiklerinin tanımlanması



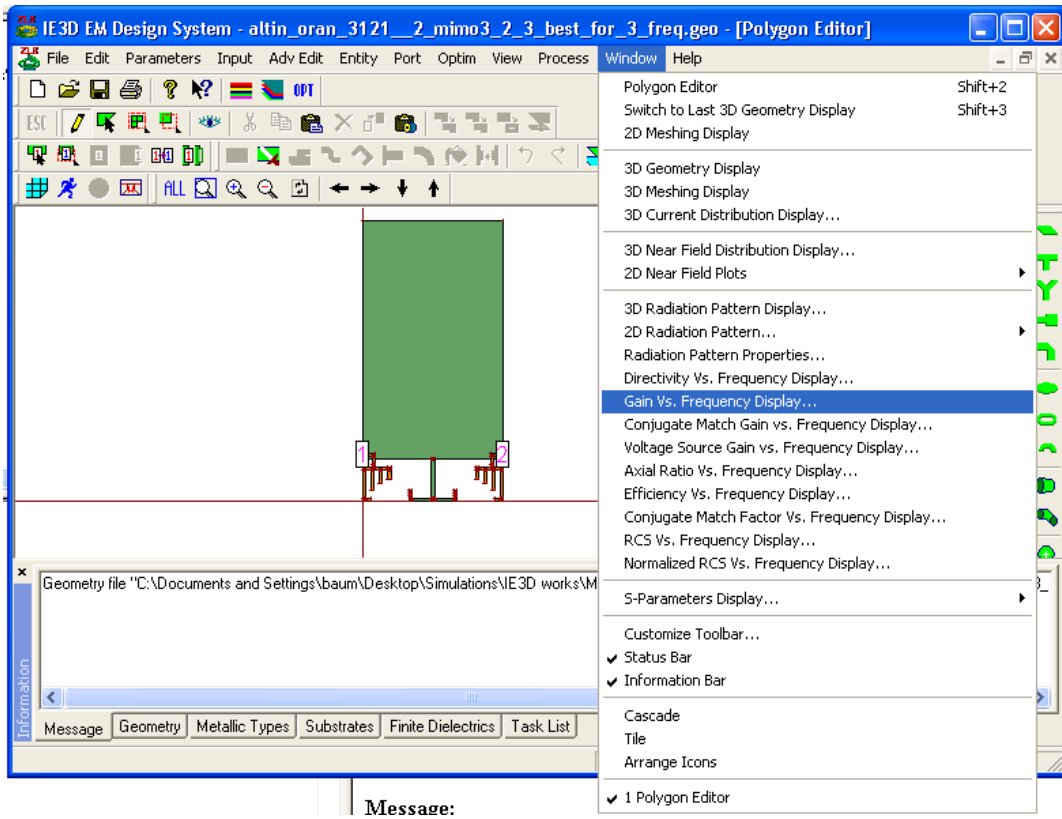
Şekil Ek 7.24. Tanımlanmış örüntü grafiklerinin gösterimi



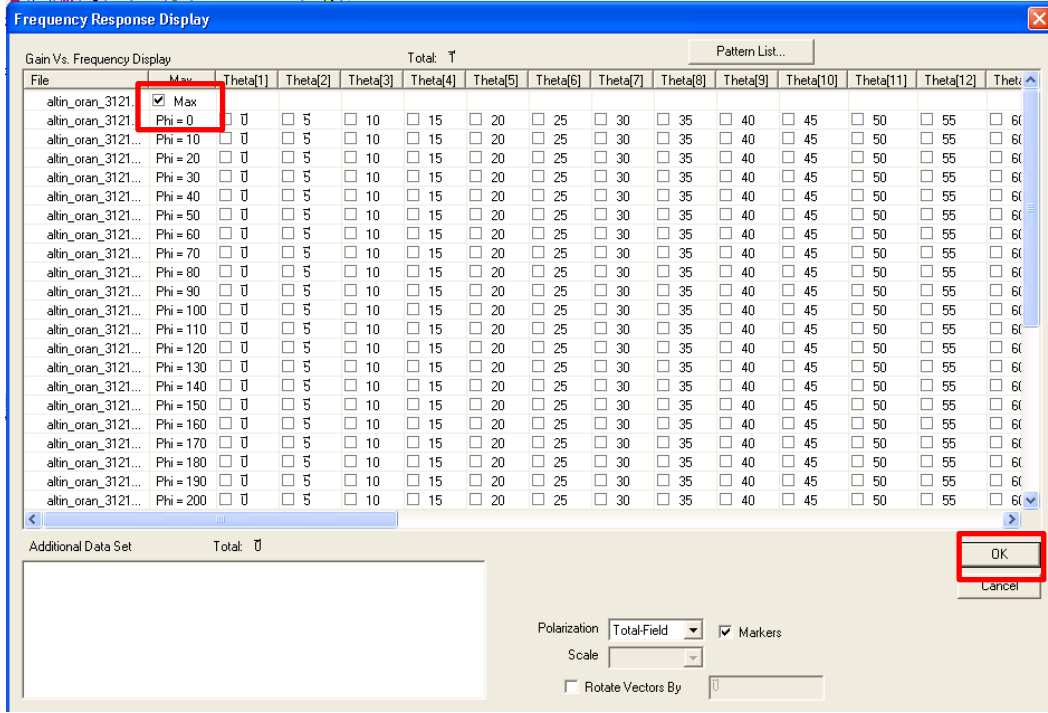
Şekil Ek 7.25. 2B’li örüntü eğrilerinin görüntülenmesi

7.2.4.3. Kazanç

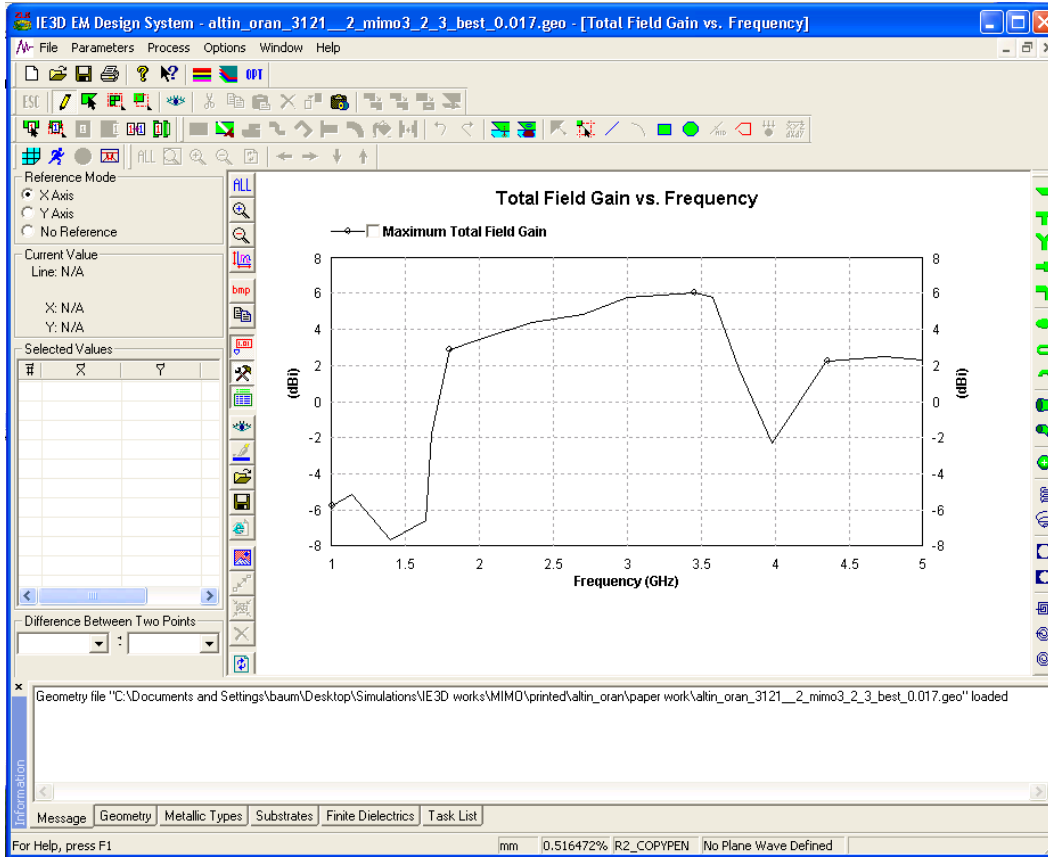
Azami kazanç grafiğinin elde edilmesi için öncelikle Window sekmesinden Şekil Ek 7.26’de verilen pencereden “Gain vs. Frequency Display” seçilir. Şekil Ek 7.27’de gösterilen pencereden “Max” işaretlenerek OK butonuna basılır. Şekil 7.28’de elde edilen azami kazanç grafiği gösterilmiştir.



Şekil Ek 7.26. Kazanç grafiğinin seçilmesi



Şekil Ek 7.27. Azami kazanç grafiğinin tanımlanması



Şekil Ek 7.28. Azami kazanç grafiğinin gösterilmesi

8. ÖZGEÇMİŞ

ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

Adı Soyadı: Abdurrahim TOKTAŞ

Doğum Tarihi: 25/06/1977

Öğrenim Durumu: Yüksek Lisans

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Fen Bilimleri	Atatürk Lisesi	1993-1996
Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Gaziantep Üniversitesi	1997-2002
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Mersin Üniversitesi	2007-2010

Görevler:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Proje Mühendisi	Etap Mühendislik, Gaziantep (Proje yönetimi, AG-OG elektrik projeleri)	Ağustos 2002 – Kasım 2003
Telekom Uzman Yardımcısı	Türk Telekom, İstanbul (Bilişim ağları, DSL, PSTN, Call Center supervisor)	Kasım 2003 – Ağustos 2006
Transmisyon Müdürü	Türk Telekom, Mersin Transmisyon, PDH, SDH, DWDM, fiber optik	Ağustos 2006 – Aralık 2009
Network Sorumlusu	Mersin Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı (Proje yönetimi, İnternet, bakır ve kablosuz ağ, switch, fiber optik)	Aralık 2009 – Devam Ediyor

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

Tezler

Toktaş, A. (2009), Farksal gelişim algoritması kullanarak H şekilli mikroşerit antenlerin rezonans frekansının hesaplanması, Yüksek lisans tezi, Mersin Üniversitesi

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Akdagli A. and **Toktas A.**, “A novel expression in calculating resonant frequency of H-shaped compact microstrip antennas obtained by using artificial bee colony algorithm (ABC)”, Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 24, 2049–2061, 2010.

2. **Toktas A.**, Bicer M. B., Akdagli A. and Kayabasi A., "Simple formulas for calculating resonant frequencies of C and H-shaped compact microstrip antennas obtained by using artificial bee colony algorithm" *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 25, 1718–1729, 2011.
3. Kayabasi A., Bicer M. B., Akdagli A. and **Toktas A.**, "Computing resonant frequency of H-shaped compact microstrip antennas operating at UHF band by using artificial neural networks", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol. 26, No 4, 833–840, 2011.
4. **Toktas A.**, Akdagli A., Ozdemir C., Bicer M. B., Toktas F. and Yilmaz B., "Selected patents on compact microstrip antennas", *Recent Patents on Electrical Engineering*, Vol. 5, No. 1, 1–10, 2012.
5. **Toktas A.** and Akdagli A., "Computation of resonant frequency of E-Shaped compact microstrip antennas", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol. 27, No 4, 849–856, 2012.
6. **Toktas A.**, Akdagli A. and Yagoub M. C. E., "Calculating the dual-Frequencies of equilateral triangular compact microstrip antennas with a shorting-pin", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 55, 6, 1227–1230, 2013.
7. Akdagli A., **Toktas A.**, Kayabasi A. and Develi I., "An application of artificial neural network to compute the resonant frequency of E-Shaped compact microstrip antennas", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 64, 5, 317–322, 2013.
8. **Toktas A.**, Akdagli A., Bicer M. B., Ozdemir C. and Yamacli V., "A comparative study for slot-loaded compact microstrip antennas by using methods based on FDTD, FEM and MoM", *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*, 2, 920–924, 2013.
9. Akdagli A., **Toktas A.**, Bicer M. B. , Kayabasi A. , Ustun D. and Kurt K., "ANFIS model for determining resonant frequency of rectangular ring compact microstrip antennas", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, in the status of pre-press, 2014. doi:10.3233/JAE-141784

10. **Toktas A.** and Akdagli A., “Wideband MIMO antenna with enhanced isolation for LTE, WiMAX and WLAN mobile handsets”, *Electronics Letters*, Vol. 10, 50, 723–724, May 2014.
11. Kayabasi A., **Toktas A.**, Akdagli, Bicer M. B. and Ustun D., “Applications of ANN and ANFIS to Predict the Resonant Frequency of L-shaped Compact Microstrip Antennas”, accepted for publication in *The Applied Computational Electromagnetics Society*, 2014.
12. **Toktas A.**, Bicer M. B., Kayabasi A., Ustun D., Akdagli A. and Kurt K., “A novel and simple expression to accurately calculate the resonant frequency of annular-ring microstrip antennas, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 1-7, 2014. doi: 0.1017/S1759078714000890
13. **Toktas A.** and Akdagli A., “A compact MIMO antenna with low correlation for UWB applications”, submitted to *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Feb. 2014.
14. Ustun D., Ozdemir C., Akdagli A., **Toktas A.** and Bicer M. B., “A powerful method based on artificial bee colony algorithm for translational motion compensation of ISAR image”, accepted for publication in *Microwave and Optical Technology Letters*, , 2014.
15. Akdagli A. and **Toktas A.** “Design of wideband orthogonal MIMO antenna with improved correlation using parasitic element for mobile handset”, accepted for publication in *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, , 2014.

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. **Toktaş A.** ve Akdağlı A., “E şekilli kompakt mikroşerit antenin tasarımı ve gerçekleştirilmesi” *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt. 30, 458–466, 2012.

Uluslararası Bildiriler

1. Kayabaşı A., Akdağlı A., Biçer M. B. ve **Toktaş A.**, “Yapay sinir ağları kullanarak UHF bandında çalışan C şekilli kompakt mikroşerit antenlerin rezonans frekansının

belirlenmesi”, V. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi - Kuzey Kıbrıs Kampusu, pp.120-123, 25 - 27 Ağustos 2010.

Ulusal Bildiriler

1. Toktaş A. ve Akdağlı A., “Alternatif geniş bant kablosuz erişim tekniği: WI-MAX”, III. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu, Adana, 2007.

Projeler

1. Araştırmacı, “LTE, WiMAX ve WLAN sistemleri için MIMO anten tasarımları ve prototiplerinin gerçekleştirilmesi”, Mersin Üniversitesi, BAP-FBE EEMB (AT) 2013-4 DR
2. Araştırmacı “Tahıl silolarında radar yardımı ile üç boyutlu seviye ölçümü”, TUBİTAK 1507, Proje No: 7140067

Verilen Dersler

Akademik Yıl	Yarıyıl	Üniversite	Bölüm	Ders
2012-2013	Bahar	Mersin Üni.	TBMYO Elektrik	Sensörler ve Transduserler
2013-2014	Güz	Mersin Üni.	TBMYO Elektronik ve Otomasyon	Telefon Anahtarlama ve İşletim Sistemleri
2013-2014	Güz	Mersin Üni.	TBMYO Elektronik ve Otomasyon	Elektronik Ölçme Tekniği ve İş Güvenliği
2013-2014	Bahar	Mersin Üni.	TBMYO Elektronik ve Otomasyon	Alternatif Akım Devre Analizi

Mesleki Sertifika ve Eğitimler

1. Interconnecting Cisco Network Devices, Cisco System-Netron, 1 Hafta, İstanbul
2. Temel Network ve DSLAM (digital subscriber line access multiplexer) Eğitimi, Alcatel, 2 Hafta, İstanbul
3. SDH (dynchronous digital hierarchy) Temel Eğitimi ve Sistem Yönetimi, Alcatel-Lucent, 2 Hafta, İstanbul
4. SDH Temel Eğitimi, Nortel-Netaş, 2 Hafta, İstanbul
5. SDH Yönetim Sistemi, Nortel-Netaş, 1 Hafta, İstanbul
6. Temel Transmisyon Eğitimi, Türk Telekom Akademi, 2 Hafta, Ankara
7. Fiber Optik Füzyon ve OTDR Eğitimi, Erat Telekom, 2 Gün, Mersin