

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**6N YÜKSEK İRTİFA PLATFORM SİSTEMLERİ İÇİN ANTİPODAL VİVALDİ
ANTEN TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Alperen KILIÇ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**6N YÜKSEK İRTİFA PLATFORM SİSTEMLERİ İÇİN ANTİPODAL VİVALDİ
ANTEN TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali Alperen KILIÇ
(504201306)**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Funda AKLEMAN YAPAR

ŞUBAT 2024

İSTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**ANTIPODAL VIVALDI ANTENNA DESIGN FOR 6G HIGH ALTITUDE
PLATFORM SYSTEM (HAPS)**

M.Sc. THESIS

**Ali Alperen KILIÇ
(504201306)**

Department of Electronics and Communication Engineering

Telecommunications Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Funda AKLEMAN YAPAR

FEBRUARY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504201306 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ali Alperen KILIÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “6N YÜKSEK İRTİFA PLATFORM SİSTEMLERİ İÇİN ANTİPODAL VİVALDİ ANTEN TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Funda AKLEMAN YAPAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mesut KARTAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Evrim TETİK
Arel Üniversitesi

Teslim Tarihi : 05 Ocak 2024
Savunma Tarihi : 02 Şubat 2024





Eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının oluşmasında ve başarılı bir şekilde sonuçlanmasında büyük pay sahibi olan, çalışma boyunca bilgisini ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Funda AKLEMAN YAPAR'a, değerli varlığı ile bana her zaman destek olan sevgili eşim Elif KILIÇ'a ve bu günlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmada kullanılan test ekipmanları ile benzetim programı konularında destek olan PROFEN ve ERA Savunma şirketlerine, aynı zamanda çalışma sırasında yardımlarını esirgemeyen tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Şubat 2024

Ali Alperen Kılıç
(Elektronik ve Haberleşme Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
2. 6N DİKEY HETEROJEN AĞ YAPISI VE YÜKSEK İRTİFA PLATFORM SİSTEMİ	3
2.1 Dikey Heterojen Ağ (VHetNet)	4
2.2 Yüksek İrtifa Platform Sistemi (YİPS)	5
3. ANTEN PARAMETRELERİ VE ANTİPODAL VİVALDİ ANTEN	11
3.1 Anten Parametreleri	11
3.1.1 Işıma örüntüsü	12
3.1.2 Polarizasyon	13
3.1.3 Yönlülük	13
3.1.4 Anten ışıma verimliliği	14
3.1.5 Anten kazancı	14
3.1.6 Yansıma katsayısı	14
3.1.7 Geri dönüş kaybı	14
3.1.8 Gerilim duran dalga oranı	15
3.1.9 Bant genişliği	15
3.2 Dizi Antenler	16
3.3 Antipodal Vivaldi Anten	18
4. ANTİPODAL VİVALDİ ANTEN TASARIMLARI	21
4.1 Sade Yapıda AVA Tasarımı	22
4.2 Tarak Şeklinde Yarıklı AVA Tasarımı	28
4.3 1x2 Dizi Yapıda AVA Tasarımı	36
4.4 1x4 Dizi Yapıda AVA Tasarımı	48
5. ÜRETİM VE TEST	59
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	77



KISALTMALAR

5N	: 5. Nesil
6N	: 6. Nesil
AVA	: Antipodal Vivaldi Anten
HAPS	: High Altitude Platform System
HAPS-SMBS	: HAPS Super Macro Base Station
HPBW	: Half Power Beam Width
ICAO	: International Civil Aviation Organization
IoE	: Internet of Everything
IoT	: Internet of Things
ITU	: International Telecommunication Union
ITU-R	: ITU Radiocommunication Sector
LEO	: Low Earth orbit
LOS	: Line of sight
MIMO	: Multiple-input multiple-output
M-MIMO	: Massive multiple-input multiple-output
TSA	: Tapered slot antenna
UWB	: Ultra-wideband
VHetNet	: Vertical Heterogeneous Network
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio
YİPS	: Yüksek İrtifa Platform Sistemi
YİPS-SMBİ	: YİPS Süper Makro Baz İstasyonu



SEMBOLLER

DR	: Anten yönlülüğü
f	: Frekans
G	: Anten kazancı
P	: Güç
R_L	: Geri dönüş kaybı
U	: Anten ışıma yoğunluğu
Z	: Empedans
Γ	: Yansıma katsayısı
ε_r	: Dielektrik sabiti
η	: Verim
Ω	: Direnç (ohm)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Sade yapıda AVA 21.7 GHz parametrik benzetim sonuçları.....	26
Çizelge 4.2 : Sade yapıda AVA 25.8 GHz parametrik benzetim sonuçları.....	26
Çizelge 4.3 : 21.7 GHz’de antenlerin önemli ışıma parametreleri.	33
Çizelge 4.4 : 25.8 GHz’de antenlerin önemli ışıma parametreleri.	33
Çizelge 4.5 : On yarık AVA önemli ışıma parametreleri.....	35
Çizelge 4.6 : Mikroşerit çeyrek dalga dönüştürücüsü boyutları.....	39
Çizelge 4.7 : Mikroşerit dönemeç parametreleri.	41
Çizelge 4.8 : Mikroşerit dönemeç parametreleri.	41
Çizelge 4.9 : 1x2 dizi AVA ışıma örüntüsü parametreleri-I.....	45
Çizelge 4.10 : 1x2 dizi AVA ışıma örüntüsü parametreleri-II.	47
Çizelge 4.11 : 21.7 GHz’de tekil AVA ile 1x2 dizi AVA karşılaştırılması.	47
Çizelge 4.12 : 25.8 GHz’de tekil AVA ile 1x2 dizi AVA karşılaştırılması.	47
Çizelge 4.13 : 1x4 dizi AVA boyut parametreleri.....	50
Çizelge 4.14 : 1x4 dizi AVA ışıma örüntüsü parametreleri-I.....	52
Çizelge 4.15 : 1x4 dizi AVA ışıma örüntüsü parametreleri-II.	54
Çizelge 4.16 : 1x2 ve 1x4 yapıda dizi antenlerin karşılaştırılması.....	55



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Mevcut 5N ağı ve 6N VHetNet yapısı [6].	5
Şekil 2.2 : Örnek YİPS görseli [26].	6
Şekil 2.3 : Akıllı şehir uygulamalarında YİPS-SMBİ kullanımı [30].	9
Şekil 2.4 : YİPS kullanımına ayrılmış frekans bantları.	10
Şekil 3.1 : Örnek anten ışıma örüntüsü.	12
Şekil 3.2 : Anten polarizasyon çeşitleri [47].	13
Şekil 3.3 : Örnek bant genişliği tanımlaması [48].	15
Şekil 3.4 : Örnek dizi anten uygulaması [49].	16
Şekil 3.5 : Broadside dizi anten yapısı [50].	17
Şekil 3.6 : Dizi anten seri ve paralel besleme yapıları [51].	17
Şekil 3.7 : Örnek geleneksel Vivaldi anten [58].	18
Şekil 3.8 : Örnek antipodal Vivaldi anten (AVA) [62].	19
Şekil 4.1 : Sade yapıda AVA boyutları.	23
Şekil 4.2 : $\alpha=0.163$ olan sade yapıda AVA S_{11} grafiği.	24
Şekil 4.3 : $\alpha=0.163$ olan sade yapıda AVA 21.7 GHz ışıma örüntüsü.	25
Şekil 4.4 : $\alpha=0.163$ olan sade yapıda AVA 25.8 GHz ışıma örüntüsü.	25
Şekil 4.5 : α parametresi için yapılan parametrik benzetim sonuçları.	26
Şekil 4.6 : $\alpha=0.14$ olan sade yapıda AVA 21.7 GHz ışıma örüntüsü.	27
Şekil 4.7 : $\alpha=0.14$ olan sade yapıda AVA 25.8 GHz ışıma örüntüsü.	28
Şekil 4.8 : Yirmi yarık AVA üstten görünümü.	29
Şekil 4.9 : Yirmi yarık ve sade yapı AVA S_{11} karşılaştırması ($\alpha=0.14$).	29
Şekil 4.10 : Yirmi yarık AVA 21.7 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.	30
Şekil 4.11 : Yirmi yarık AVA 25.8 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.	30
Şekil 4.12 : On yarık AVA üstten görünümü.	31
Şekil 4.13 : On yarık AVA S_{11} grafiği.	31
Şekil 4.14 : On yarık AVA 21.7 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.	32
Şekil 4.15 : On yarık AVA 25.8 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.	32
Şekil 4.16 : On yarık AVA 21.7 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.	34
Şekil 4.17 : On yarık AVA 25.8 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.	34
Şekil 4.18 : On yarık AVA VSWR grafiği.	35
Şekil 4.19 : İki elemanlı dizi ve boşluk yapısı benzetimi.	37
Şekil 4.20 : 1x2 dizi AVA F parametresi grafiği.	38
Şekil 4.21 : Çeyrek dalga dönüştürücü boyutları.	39
Şekil 4.22 : Mikroşerit dönemeç boyutları.	40
Şekil 4.23 : 1x2 dizi AVA besleme yapısı.	41
Şekil 4.24 : 1x2 dizi AVA üst yüzey boyutları.	42
Şekil 4.25 : 1x2 dizi AVA alt yüzey boyutları (toprak düzlemi).	42
Şekil 4.26 : 1x2 dizi AVA S_{11} grafiği.	43
Şekil 4.27 : 1x2 dizi AVA 21.7 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.	44
Şekil 4.28 : 1x2 dizi AVA 25.8 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.	44
Şekil 4.29 : 1x2 dizi AVA VSWR grafiği.	45

Şekil 4.30 : 1x2 dizi AVA 21.7 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.	46
Şekil 4.31 : 1x2 dizi AVA 25.8 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.	46
Şekil 4.32 : 1x4 dizi AVA boyutları.	49
Şekil 4.33 : 1x4 dizi AVA toprak düzlemi.	50
Şekil 4.34 : 1x4 dizi AVA S_{11} grafiği.	51
Şekil 4.35 : 1x4 dizi AVA 21.7 GHz ışıma örüntüsü.	52
Şekil 4.36 : 1x4 dizi AVA 25.8 GHz ışıma örüntüsü.	52
Şekil 4.37 : 1x4 dizi AVA VSWR grafiği.	53
Şekil 4.38 : 1x4 dizi AVA 21.7 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.	53
Şekil 4.39 : 1x4 dizi AVA 25.8 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.	54
Şekil 5.1 : 1x4 dizi AVA üretime hazır üstten görünüm.	59
Şekil 5.2 : 1x4 dizi AVA baskı viaları.	60
Şekil 5.3 : 1x4 dizi AVA baskı viaları.	60
Şekil 5.4 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 21.7 GHz copolar ışıma örüntüsü.	61
Şekil 5.5 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 21.7 GHz crosspolar ışıma örüntüsü.	61
Şekil 5.6 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 25.8 GHz copolar ışıma örüntüsü.	62
Şekil 5.7 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 25.8 GHz crosspolar ışıma örüntüsü.	62
Şekil 5.8 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 21.7 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.	63
Şekil 5.9 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 25.8 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.	63
Şekil 5.10 : Üretilen 1x4 dizi AVA boyutları.	64
Şekil 5.11 : 1x4 dizi AVA teste hazır üstten görünümü.	64
Şekil 5.12 : 1x4 dizi AVA teste hazır alttan görünümü (toprak düzlemi).	65
Şekil 5.13 : 1x4 dizi AVA S_{11} test düzeneği.	65
Şekil 5.14 : 1x4 dizi AVA S_{11} ölçümü.	66
Şekil 5.15 : 1x4 dizi AVA ölçüm ve benzetim S_{11} grafiği.	66

6N YÜKSEK İRTİFA PLATFORM SİSTEMLERİ İÇİN ANTİPODAL VİVALDİ ANTEN TASARIMI

ÖZET

Günümüz haberleşme teknolojilerinde gelişmeler son hızda devam etmektedir. Yaklaşık on senede bir açıklanan haberleşme teknolojisi nesillerinin aktif olarak en yenisi 5. Nesil (5N) haberleşmedir. 2019 yılında çeşitli ülkelerde hizmet vermeye başlayan 5N’de bir önceki haberleşme nesli olan 4N’ye nazaran daha yüksek veri hızları, daha büyük trafik kapasitesi, daha yüksek spektrum verimliliği ve daha düşük gecikme süresi elde edilmiştir. Ancak tüm bu gelişmelere rağmen 5N çıkış yaptığı ilk dönemde vadettiği bazı konseptlerde yeterli performansı gösterememektedir. Araştırmacılar bazı bölgelerde 5N ağ kurulumu ve dağıtımını devam ederken 6. Nesil (6N) ağları için birtakım çalışmalara başlamışlardır. Yapılan çalışmalarda ana hedef 5N’de görülen eksikliklerin 6N döneminde giderilmesidir. Henüz başlangıç aşamasında sayılabilecek bu çalışmalarda “her zaman ve her yerde bağlantı” parolasının sağlanması amaçtır. Bu bağlamda uzay ağı, hava ağı ve karasal ağın başarılı entegrasyonu ile ortaya çıkması planlanan Dikey Heterojen Ağ (VHetNet) çerçevesi işlenmektedir. VHetNet yapısında son derece yüksek veri hızı, küresel kablosuz kapsama alanı ve mobilitenin sağlanacağı düşünülmektedir. Hava ağı katmanı, bahsi geçen performans gereksinimlerini gerçekleştirmek için çok kritik bir role sahiptir. Hem uzay ağına hem de karasal ağına arayüzü bulunan bu katman, her iki katmanın entegre çalışabilmesini sağlama yeteneğine sahiptir. Hava ağı katmanında insansız hava aracı (İHA) ve Yüksek İrtifa Platform Sistemi (YİPS) yapılarının birlikte görev alması beklenmektedir.

YİPS, VHetNet yapısı içerisinde bulunan karasal ağıdaki kullanıcılar ile uzay katmanında bulunan uydular arasında bağlantı kurmada görev alabilecektir. Stratosfer katmanında görev yapacak olan YİPS, karasal ağ ve uzay ağı ile kuracak olduğu veri bağlarında, bulunduğu ortam koşullarının avantajlarını kullanarak oldukça verimli sonuçlar elde edebilecektir. Ayrıca YİPS karasal ağlara ve uydu ağlarına olan bağımlılığın da azalmasında rol oynayabilecektir. Bunların yanında, YİPS kapsamında süren araştırmalar sayesinde Stratosfer katmanının haberleşme sektöründeki kullanımının irdelenmesi konusunda gelişmeler yaşanması beklenmektedir. Enerji sistemlerinde, anten sistemlerinde ve haberleşme ağlarında gerçekleşen ilerlemelerin ışığında 2030’larda YİPS’in VHetNet yapısı içerisinde aktif rol oynaması beklenmektedir.

Geniş operasyonel bantları ve yüksek kazançları ile yüksek frekans bölgelerinde de hizmet vermesi beklenen YİPS’in hem İHA hem de mevcut LEO uygulamalarına göre birtakım avantajlara sahip olması beklenmektedir. LEO uydularına göre avantajlarının en temel nedenlerinden birisi yeryüzüne daha yakın konumlarıdır. Bu sayede daha düşük yol kaybı ve gecikme süreleri elde edilecek olup link bütçeleri daha uygun hale gelebilecektir. YİPS, daha maliyetli olmasına rağmen kapasite ve kapsama alanı bakımından İHA yapısından çok daha güçlü olacaktır. Ayrıca İHA birimlerine nazaran

çok daha büyük boyutta olması planlandığı için yüzeyinde fazla sayıda güneş paneli bulundurma avantajı sayesinde enerji sorunlarının çözümünde cevapsız kalmayacaktır.

YİPS hibrit model bir ağ iletişimi vadetmektedir. VHetNet içerisinde röle görevinde kullanılabileceği gibi Süper Makro Baz İstasyonu (YİPS-SMBİ) olarak da görev alabilir. Bu tanımlama yapılırken geniş kapsama alanı, büyük kapasite ve güçlü veri toplama özellikleri etkili olmuştur. YİPS-SMBİ, kapasite ve kapsama alanında yaşanılacak acil sorunlarda karasal ağlara yardım amacıyla kullanılabileceği gibi IoT uygulamalarının daha verimli hale getirebilecek bir baz istasyonu olarak kullanılabilecektir. YİPS-SMBİ için öngörülen diğer uygulamalar ise hava ağında yer alacak bir veri merkezi olarak görev alabilecek ve akıllı şehir uygulamaları çerçevesinde otonom trafik yapısına katkıda bulunabilecek olmasıdır.

YİPS'in uyumlu ve güvenli çalışabilmesi için havacılık sektöründeki düzenlemelere tabi tutulması gerekmektedir. Sıklıkla 17-18 km irtifalarına konuşlandırılacağı planlanan YİPS için ülkeler kendi hava sahalarının maksimum irtifalarını belirlemektedir ve bu değer genellikle 20 km olarak açıklanmaktadır. HAPS Alliance konsorsiyumu dünya genelinde etkin bir YİPS ekosistemi oluşturabilmek için faaliyetlerini sürdürmektedir. YİPS çerçevesinde düzenleme faaliyetleri ise genellikle Uluslararası Telekomünikasyon Birliği-Radyokomünikasyon Sektörü (ITU-R) ve Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) tarafından belirlenmektedir. Spektrum dağılımları konusunda gerekli düzenlemeyi ITU-R üstlenirken, güvenlik ve sivil havacılık ile alakalı düzenlemeler ise ICAO'nun görevidir. ICAO iki farklı YİPS sınıfı olduğunu belirtir ve bu YİPS türlerini tanımlar. ITU ise çeşitli raporlar vasıtasıyla YİPS çerçevesinde yaptığı çalışmaları ortaya koymaktadır. Kuzey ve Güney Amerika ile Grönland'ı da içeren ITU Bölge 2'yi (Region 2) kapsayan raporlarda belirli frekans aralıkları YİPS kullanımı için duyurulmuş olup yerden YİPS'e yukarı bağlantı ve YİPS'ten yere aşağı bağlantının bant genişliği gereksinimlerini ifade etmiştir. ITU Bölge 2 için YİPS frekans bantları 21.4-22 GHz ve 24.25-27.5 GHz olarak açıklanmıştır. Gerekli bant genişliği değerleri ise yukarı bağlantı için 396-2969 MHz, aşağı bağlantı için 324-1505 MHz olarak belirlenmiştir. Bu frekans bantları haricinde K, S, C, K, Ka ve V bantlarında da YİPS kullanımı adına ayrılmış frekans bantları mevcuttur.

Antenler kablosuz haberleşme sistemlerinin en önemli yapı taşlarındandır. Verilerin uzak mesafelere iletilmesi ve alınması adına geçmişten günümüze ihtiyaç duyulan antenler, gelişen haberleşme teknolojileri ile değişen gereksinimlere ayak uydurmak için farklı şekillerde tasarlanmaktadır. Amaca uygun farklı yapılara sahip antenler, 6N kablosuz haberleşme çerçevesinde de önemli bir konumda yer alacaktır. 1979 yılında kullanılmaya başlayan Vivaldi anten, geniş bir çalışma bandının yanında sağladığı yüksek yönlülük ve kazanç değerleri ile farklı uygulamalarda görev almaktadır. Daha geniş bantlarda hizmet verebilme, Vivaldi antenin zayıf noktası olarak gözüken besleme yapısını basitleştirme ve daha fazla bant genişliği elde edebilme amacıyla 1988 yılında antipodal Vivaldi anten (AVA) yapısı tanıtılmıştır. AVA geleneksel Vivaldi antene nazaran daha kompakt bir profil haricinde besleme yapısında daha düşük yansımaya sahiptir. Ayrıca ufak yapısı ve hafifliği sayesinde devre kartlara kolaylıkla entegre edilebilen AVA, yüksek verimlilik ve kazançla sahip geniş bantlı bir anten türü olarak literatürde yerini almıştır.

6N döneminde VHetNet yapısı içerisinde görev alacak YİPS'in taşıyacağı faydalı yüklerden biri de şüphesiz antenler olacaktır. YİPS içinde görev alacak antenler için

antipodal Vivaldi anten aday gösterilebilir. Çünkü AVA, YİPS'in görev alacağı stratosferik ortam koşullarında yüksek yönlülük ve yüksek kazanç özellikleri sayesinde geniş frekans bantlarında çalışabilir. Bunun yanında kompakt yapıları sayesinde hafiflik ve boyut gereksinimlerine cevap verebilmesinin yanında, kolaylıkla dizi anten yapısına çevrilebilecekleri için dar ışıma hüzmesi istenen 6N uygulamalarına kolaylıkla uyarlanabilir.

Bu çalışmada, 6N haberleşme teknolojilerinde aktif olması beklenen VHetNet yapısı içerisinde hava ağı katmanında hizmet vermesi planlanan YİPS'te görev alabilecek AVA tasarlanmıştır. Antenin çalışma frekansları ITU Bölge 2'de YİPS kullanımı için açıklanan 21.4-22 GHz ve 24.25-27.5 GHz olarak seçilmiştir. Tasarıma ilk olarak tekil yapıda başlanmış olup en başarılı tekil AVA elde edilirken gerçekleştirilen tasarım hamleleri açıklanmıştır. Sonrasında, en iyi performansa sahip tekil anten birim eleman olarak kullanılmış ve dizi AVA haline getirilmiştir. Dizi anten yapısı ilk olarak iki elemanlı (1x2), sonrasında ise dört elemanlı (1x4) olacak şekilde oluşturulmuştur. Dizi yapıları oluşturulurken tasarlanan besleme yapısı hakkında detaylar sunulmuştur. Son olarak yönlülük, kazanç ve dar ışıma hüzmesi parametrelerinde en iyi sonucun elde edildiği 1x4 dizi AVA ürettirilmiştir. Üretim sonrasında bazı performans testleri gerçekleştirilmiş olup test sonuçları benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



ANTIPODAL VIVALDI ANTENNA DESIGN FOR 6G HIGH ALTITUDE PLATFORM SYSTEM (HAPS)

SUMMARY

Developments and changes in today's communication technologies continue at full speed. 5th Generation (5G) is actively the newest of the communication technology generations that are announced approximately every ten years. 5G, which started to serve in various countries in 2019, achieved higher data speeds, larger traffic capacity, higher spectrum efficiency and lower latency compared to 4G, the previous communication generation. In addition, while previous communication generations took simple measures such as increasing the number of base stations to solve the problems caused by the increase in network traffic, in 5G, multiple input multiple output (MIMO) technology was used. However, despite all these developments, 5G cannot show sufficient performance in some of the concepts it promised in the first period of its release. For example, although the Internet of Things (IoT) brings several advantages compared to previous generations, the expected progress in the smart city concept planned within the framework of the Internet of Everything (IoE) has not yet been achieved. Moreover, although more than half of the global population has internet access, the need for high-bandwidth telecommunications services continues in rural and isolated areas.

While 5G network installation and distribution continues in some regions, researchers have started some studies for 6th Generation (6G) communication technologies. The main goal of the studies is to eliminate the deficiencies seen in the 5G period. Another aim of these studies, which can still be considered at the initial stage, is to provide the password of "connection anytime and anywhere". In this context, The Vertical Heterogeneous Network (VHetNet) framework, which is planned to emerge with the successful integration of the space network, aerial network, and terrestrial network, is being discussed. It is thought that extremely high data speed, global wireless coverage and mobility will be provided in the VHetNet structure. The aerial network layer, which is a member of the three-layer structure created for this purpose, has a very critical role in achieving the mentioned performance requirements. This layer, which has an interface to both the space network and the terrestrial network, could ensure that both layers work integratedly. It is expected that unmanned aerial vehicle (UAV) and High Altitude Platform System (HAPS) structures will work together in the aerial network layer. Some studies in which unmanned aerial vehicles are integrated within the 5G structure have become a trend recently. In these studies, the main goals are to reach areas that need telecommunication services and to provide an uninterrupted connection.

With its mobile structures and easy-to-charge structures, UAV will continue to take part in various areas within the 6G VHetNet structure. However, UAV network units may have difficulties in meeting high capacity and energy requirements. In order to meet these two requirements, HAPS will be able to carry more payload due to its large

size and will be able to effectively benefit from solar energy at the altitudes where it will operate. In addition, HAPS will be able to take part in establishing a connection between the users in the terrestrial network within the VHetNet structure and the satellites in the space network layer. The International Telecommunication Union (ITU) defines HAPS as a station operating on an object at an altitude of 20-50 km. HAPS, which will operate in the stratospheric layer (in the data links it will establish with the terrestrial network and space network), will be able to obtain efficient results by using the advantages of stratospheric conditions. In addition, HAPS may play a role in reducing the dependence on terrestrial networks and satellite networks. Due to ongoing research within the scope of HAPS, developments are expected to be made in examining the use of the Stratosphere layer in the communication sector. In fact, HAPS has become a popular subject of many studies since the late 1990s, but despite the advantages it promises, it has remained limited in its application area. Nevertheless, with the advances in energy systems, antenna systems and communication networks, it is expected that HAPS will play an active role in the aerial network layer within the VHetNet structure in the 2030s.

HAPS, which is expected to serve in high frequency regions with its wide operational bands and high gains, is expected to have some advantages over both UAV and LEO applications. One of the most basic advantages over LEO satellites is, (due to their location close to the earth) they will bring a lower path loss and a higher signal-to-noise ratio (SNR). Because of this feature, it will be able to provide service with more affordable link budgets. In addition, HAPS could compensate for the negative effects caused by high mobility, which is seen as one of the biggest challenges of LEO applications. In this context, YIPS will have advantages in matters such as satellite passes and Doppler shift, thanks to its almost geostationary positioning. With another advantage of their location relative to the Earth, it is predicted that HAPS will have a delay time of around 0.13-0.33 ms. Although HAPS is more costly, it will be much stronger than the UAV structure in terms of capacity and coverage area. Moreover, since it is planned to be much larger in size than UAV units, it will not remain unanswered in solving energy problems, because of the advantage of having many solar panels on its surface.

HAPS promises a hybrid model network communication. While it can be used as a relay within VHetNet, it can also serve as a Super Macro Base Station (HAPS-SMBS). Wide coverage area, large capacity and powerful data collection features were effective in making this definition. HAPS, which is thought to provide communication services within a radius of 60 km, can be used to assist terrestrial networks in case of urgent problems in capacity and coverage. In addition, the HAPS-SMBS structure will be able to serve as a base station that can make IoT applications more efficient and convenient. In another prediction, HAPS-SMBS, which will continue its operations between LEO satellites and terrestrial networks, will have the capacity to handle the need for users to communicate directly with LEO satellites. Another application foreseen for HAPS-SMBS is that it can serve as a data center in the aerial network. The reason why this application is recommended is that the average temperature in the stratospheric environment is -15°C to -50°C . Because of that, HAPS-SMBS is in an advantageous position in terms of cooling, which is considered one of the most important requirements of data centers. In addition, it is estimated that the HAPS-SMBS structure can take part in autonomous vehicles within the framework of smart city applications. The design difficulties caused by the need for autonomous vehicles

to communicate with both their drivers and each other can be alleviated with the role of HAPS-SMBI in the offloading process.

For HAPS to operate harmoniously and safely, it is mandatory that it be subject to regulations in the aviation industry. Countries determine the maximum altitude of their airspace for HAPS, which is planned to be deployed frequently at altitudes of 17-18 km, and this value is generally announced as 20 km. HAPS Alliance continues its activities to create an effective HAPS ecosystem worldwide. Considering these studies, commercial breakthroughs of HAPS technologies are expected to accelerate. Regulatory activities within the framework of HAPS are generally determined by ITU Radiocommunication Sector (ITU-R) and the International Civil Aviation Organization (ICAO). While ITU-R undertakes the necessary regulation regarding spectrum distribution, regulations related to security and civil aviation are the duty of ICAO. ICAO states that there are two different classes of HAPS. While one of these classes is defined as a non-powered, balloon-type aircraft; The other is defined as an unmanned aerial vehicle intended to fly without a pilot. The most obvious difference between these two classes is that balloon-type aircraft are excluded from real-time management. On the other hand, ITU has revealed its work within the framework of HAPS through various reports. In reports covering the ITU Region 2, certain frequency ranges are announced for the use of HAPS and express the bandwidth requirements of uplinks from the ground to the HAPS and downlinks from the HAPS to the ground. HAPS frequency bands for the ITU Region 2 are announced as 21.4-22 GHz and 24.25-27.5 GHz. The required bandwidth values are determined as 396-2969 MHz for the uplink and 324-1505 MHz for the downlink. Apart from these frequency bands, there are also frequency bands reserved for HAPS use in the K, S, C, K, Ka, and V bands.

Antennas are one of the most important parts of wireless communication systems. Antennas, which have been needed from past to present to transmit and receive data over long distances, are designed in different ways to keep up with the changing requirements with developing communication technologies. Antennas with different structures suitable for the purpose will also have an important position within the framework of 6G wireless communication. Introduced by Gibson in 1979, the Vivaldi antenna serves in different applications with its high directivity value as well as a wide operating band. Additionally, the Vivaldi antenna has the advantages of easy fabrication and integration. In 1988, the antipodal Vivaldi antenna (AVA) structure was introduced by Gazit to operate in wider bands and to simplify the feed structure, which seems to be the weak point of the Vivaldi antenna. AVA has a more compact profile compared to the traditional Vivaldi antenna, as well as lower reflection in the feed structure. In addition, AVA, which can be easily integrated into circuit boards since its small structure and lightness, has taken its place in the literature as a broadband antenna type with high efficiency and gain.

One of the useful loads to be carried by HAPS, which will operate within the VHetNet structure in the 6G period, will undoubtedly be antennas. Antipodal Vivaldi antenna can be nominated for the antenna that will work in HAPS. Because AVA can operate in wide frequency bands since its high directivity and high gain features in stratospheric environmental conditions. In addition, due to their compact structure, they can be easily converted into an array antenna structure and can be easily adapted to 6G applications where narrow radiation beams are required.

In this study, the AVA was designed that could operate in HAPS, which is planned to work in the aerial network layer within the VHetNet structure, which is expected to be active in 6G communication technologies. The operating frequencies of the antenna were selected as 21.4-22 GHz and 24.25-27.5 GHz, which are declared for HAPS use in the ITU Region 2. The design first started with a singular structure. The design improvements made to obtain the most successful single AVA are explained. Afterwards, the single antenna with the best performance was used as the unit element and the array was converted into AVA. The array antenna structure was first created with two elements (1x2) and then with four elements (1x4). Details about the feed structure, while creating the array structures, are presented. Finally, 1x4 array AVA was produced, which achieved the best results in directivity, gain, and narrow beam parameters. Some performance tests performed after production and the test results were compared with simulation results.



1. GİRİŞ

Günümüzde haberleşme teknolojilerinin gelişimi tüm hızıyla devam etmektedir. Bu gelişime bağlı olarak yaklaşık on yılda bir haberleşme teknolojisi nesilleri güncellenmektedir. Aktif en yeni nesil ise 5. Nesil (5N) haberleşmedir. 5N konusunda dünyanın çeşitli bölgelerinde ağ kurulumu ve dağıtımı devam ederken araştırmacılar 6. Nesil (6N) haberleşme için çalışmalara başlamışlardır [1]. Bu çalışmalarda esas amaç 5N’de görülen eksikliklere yönelik adımlar atmaktır. Henüz başlangıç aşamasında sayılan bu çalışmalarda uzay, hava ve kara ağlarında bulunan ağ birimlerinin verimli entegrasyonu ile “her zaman ve her yerde bağlantı” hedefinin Dikey Heterojen Ağ (Vertical Heterogeneous Network, VHetNet) yapısı çerçevesinde gerçekleşmesi planlanmaktadır [2]. VHetNet yapısı içerisinde en kritik bileşenlerden biri hava ağı katmanıdır. Bu katmanda insansız hava araçları (İHA) ve yüksek irtifa platform sistemlerinin (YİPS) birlikte görev alması beklenmektedir [3].

YİPS önceki nesil haberleşme teknolojileri çerçevesinde bazı uygulamalarda denenmiş olmasına rağmen uzun soluklu bir başarıya imza atamamıştır. Ancak 6.Nesil haberleşmenin katkılarıyla gelişmesi beklenen VHetNet yapısı sayesinde bu durumun kırılması beklenmektedir. Bunun yanında YİPS’in Stratosfer katmanının haberleşmede kullanımına yönelik yaşanması beklenen gelişmelere öncülük etme potansiyeli mevcuttur. Ayrıca önceki YİPS uygulama denemelerinde en büyük sorunlardan biri olarak gözüken enerji sistemlerinde yaşanan gelişmelerin, araştırmacıları YİPS için çalışmalar gerçekleştirme yönünde teşvik edeceği öngörülmektedir.

Elektromanyetik dalgaları elektriksel işarete dönüştürdüğü gibi elektriksel işareti de elektromanyetik dalgalara dönüştürerek veri aktarımını sağlayan antenler, neredeyse tüm kablosuz haberleşme sistemlerinde olduğu gibi, YİPS yapısının faydalı yükü içerisinde yer alacaktır. YİPS içerisinde görev alacak antenlerin stratosferik koşullara ve 6N isterlerine uygun olma gerekliliği kaçınılmazdır. Örneğin YİPS içerisinde görev alacak antenin boyut olarak büyük olmaması gerekmektedir çünkü büyük anten yapıları istenmeyen hacim ve ağırlık oluşturabilir, bunun sonucunda stratosferik

yükseklikte daha az platform stabilitesi ortaya çıkabilir [4]. Ayrıca ince profil, hafiflik, düşük maliyet ve entegrasyon kolaylığı diğer fiziksel gereksinimler olarak görülmektedir [4]. Yüksek frekansta yol kayıplarının artması sebebiyle link bütçelerinin sağlanması zorlaşmakta ve yüksek kazanç mutlak bir gereksinim haline gelmektedir. Bunun yanında YİPS yapısında kullanılacak antenlerin ortak kanal girişimlerini azaltmak ve yüksek sinyal-gürültü oranlarını yakalayabilmek için yüksek yönlülüğe sahip olması gerekmektedir [4].

Geleneksel Vivaldi antenin gelişmiş versiyonu olan Antipodal Vivaldi antenler (AVA) hem yüksek yönlülük, yüksek kazanç ve ultra geniş bant (Ultra-Wideband, UWB) getirileriyle hem de kolay entegrasyonlarıyla YİPS içerisinde çalışabilecek anten türlerinden biridir [5]. Bu çalışma kapsamında 6N hava ağı katmanında yer alacak olan YİPS içerisinde işlem yapabilecek, istelere uygun antipodal Vivaldi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Tezin amacı 6N haberleşme teknolojisinde uygulanması planlanan VHETNet yapısı içerisinde görev alması beklenen YİPS biriminde görev yapabilecek yüksek yönlülük ve kazançta sahip, geniş bantta hizmet verebilecek antipodal Vivaldi anten tasarımı sunmaktır. Bunun yanında tasarımda maliyet, boyut ve entegrasyon kolaylığı gibi parametreler de göz önünde bulundurulmuştur.

Antenin çalışma aralıklarının YİPS kullanımı için ITU Bölge 2'de (Region 2) açıkladığı 21.4-22 GHz ve 24.25-27.5 GHz olması hedeflenmiştir [6]. Tasarım önce tekil sonra dizi anten yapısında olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. En iyi performansı veren antenler literatürdeki benzer yapılar ile fiziksel yapı ve performans olarak kıyaslanmıştır. Bunun yanında tekil, 1x2 dizi ve 1x4 dizi antenler tek çizelge altında karşılaştırmaya tabi tutulmuştur. Son olarak performans olarak en yüksek seviyede olan antenin (1x4 dizi yapısında AVA) üretimi yaptırılıp test faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen antenin test sonuçları benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. 6N DİKEY HETEROJEN AĞ YAPISI VE YÜKSEK İRTİFA PLATFORM SİSTEMİ

Bilindiği üzere kablosuz haberleşme ile ilgili zamanla gelişen ihtiyaçlara cevap verme arayışları sürmektedir. Bu bağlamda 2019 yılı yakınlarında çeşitli ülkelerde 5N haberleşme teknolojileri iletişim altyapılarının yaygınlaşması başlamıştır [3]. Dördüncü Nesil (4N) haberleşme ile kıyaslandığında spektrum verimliliği, veri hızı, veri trafiği kapasitesi ve gecikme süresi gibi parametrelerde önemli ölçüde ilerleme kaydedilmiştir.

Geçmişte bahsi geçen haberleşme gereksinimlerinin üstesinden gelebilmek için daha büyük bant genişliklerinden yararlanma ve baz istasyonu sayısını artırma gibi çözümler kullanılmıştır. 5N ağlarında ise bu yöntemin yerine çoklu giriş çoklu çıkış (Multiple-input multiple-output, MIMO) teknolojisinden yararlanılmaktadır [7, 8]. Ancak 5N, gelecek yıllar için öngörülen ağların ve uygulamaların gereksinimlerini karşılama konusunda hala birçok zorlukla karşı karşıyadır [9]. 5N standardı “Her Şeyin İnterneti (Internet of Everything, IoE)” sistemini etkinleştirecek unsur olarak tanıtılmış ve pazarlanmış olsa da bu başlıkta istenen gelişimi henüz gerçekleştirememiştir. Bu başlık altında gelişimini sürdüreceği planlanan akıllı şehir uygulamaları için beklenen adımı atıp atamayacağı da tartışma konusudur [10].

Yeni nesil haberleşme sistemlerinde düşük gecikme süresi, geniş kapsama alanı ve sürekli bağlantı gerektiren uygulamalar popülerdir. Bu uygulamaların getirdiği ağ trafiği yüksek seviyede bir hızla artmaktadır. Bu durumun etkisiyle mevcut ana taşıyıcı ağların yakın zamanda haberleşme trafiğinin taleplerini karşılamada zorlanacağı veya başarısız olacağı öngörülmektedir [11]. Bu bağlamda karasal ağ alt yapıları günden güne geliştirilse de artan kullanıcı sayısı ve talepleri karşısında yetersiz kalabileceği değerlendirilmektedir [12]. Ayrıca 5N’nin hedeflerinden biri olan “her zaman ve her yerde bağlantı” olgusu yalnızca karasal ağlardan faydalanılarak karşılanamaz [13]. Günümüzde küresel nüfusun yarısından fazlası internete bağlı olmasına karşın yeterince hizmet alamayan kırsal ve izole bölgelerde daha yüksek bant genişliğiyle telekomünikasyon hizmetlerine ihtiyaç vardır [11].

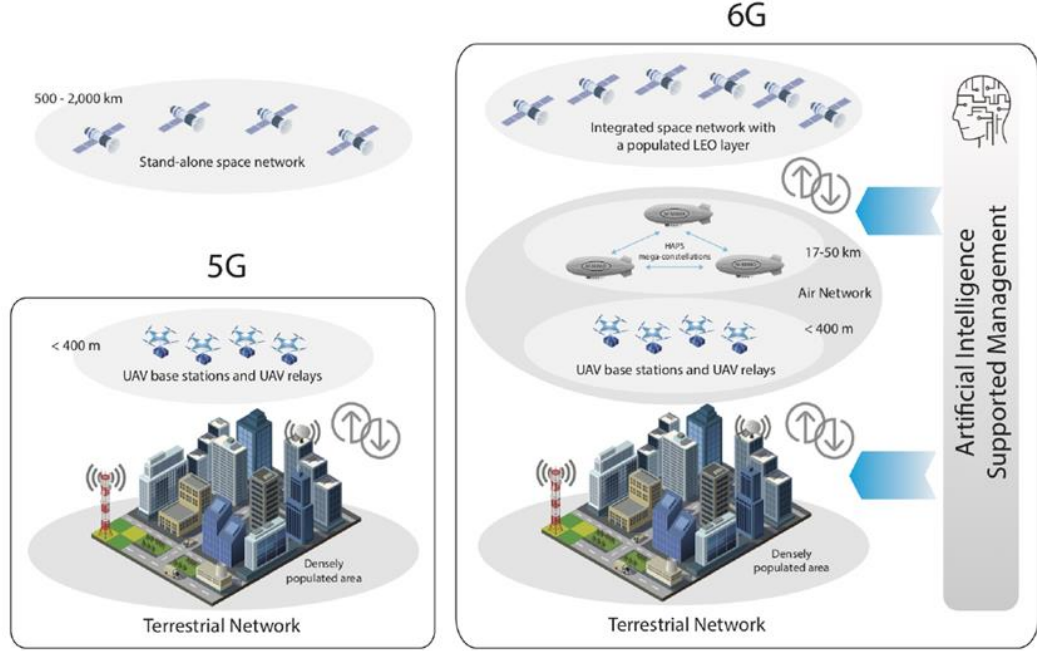
2.1 Dikey Heterojen Ağ (VHetNet)

6N standardının, önceki bölümde değinilen 5N ağlarının yaşadığı sorunlara cevap verebilmesi beklenmektedir. Bu bağlamda üç katmanlı VHetNet yapısı tartışılmaktadır. VHetNet çerçevesinde bahsi geçen üç katman olan uzay, hava ve karasal ağ katmanlarının verimli entegrasyonu ile dünyanın her yerinden kesintisiz ağ erişimi çerçevesinde çılgır açacağı öngörülmektedir [2]. Son derece yüksek veri hızı, küresel kablosuz kapsama alanı ve mobilite gibi kritik iletişim parametrelerinin sağlanması adına hava ağı katmanı önemli bir aracı olarak görülmektedir [14, 15]. Hava ağı segmenti kendi içerisinde iki katmana ayrılabilir. Bu katmanlar: düşük irtifa katmanı (İHA katmanı da denebilir) ve yüksek irtifa katmanıdır [6]. Düşük irtifa katmanında görev alacak ağ birimleri, insansız hava aracı olarak tanımlanabilir. Düşük irtifaya sahip İHA onlarca metreden birkaç kilometreye kadar yükseklikte uçabilir. Getirdiği en büyük avantaj ise hızlı hareket kabiliyetinin yanında esnek uygulanabilirliğidir [16]. İHA ağ elemanları kolayca değiştirilebilir veya şarj edilebilirler.

5N ağ yapısı içerisinde de son dönemlerde insansız hava araçlarının entegre olduğu sistemlere ilgi artmaktadır [17-19]. Bu çalışmalara göre her yerde kapsama alanına ulaşabilmek ve kesintisiz bir bağlantı sağlayabilmek adına uydu ve İHA ağları karasal iletişim ağlarına entegre edilecektir [20]. 6N'de ise VHetNet yapısı içerisinde insansız hava araçlarıyla birlikte hava katmanında YİPS yapısının görev alması beklenmektedir. Bu bağlamda insansız hava araçlarının nispeten düşük irtifada görev yapması planlanırken YİPS yapıları ise yüksek irtifalarda görev yapacak daha büyük ağ birimleri olacaktır. İHA'ların özellikle yüksek kapasite ve enerji gereksinimlerine yanıt vermede zorluk yaşayacağı değerlendirilmektedir. Bu açıdan YİPS, daha büyük boyutları ile daha fazla faydalı yük içermesinin yanı sıra bahsi geçen irtifalarda bulut, fırtına veya herhangi olumsuz hava koşulunun bulunmaması nedeniyle güneş enerjisini etkin şekilde kullanabilecektir [13]. Çalışmanın sonraki bölümünde YİPS hakkında detaylı açıklamalara yer verilmiştir.

5N'de insansız hava araçlarının görev aldığı haberleşme yapısı ile 6N VHetNet yapısının karşılaştırılması Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere 5N yapısında karasal ağa yakın İHA birimleri haricinde uydu ağı katmanı bulunurken 6N'de VHetNet yapısının tanımına uygun şekilde karasal, hava ve uzay ağları

birbirlerine entegre şekilde çalışması tasarlanmıştır. Örneğin bu yapı içerisinde YİPS, karasal ağda yer alan kullanıcılar ile LEO katmanında yer alan takımyıldızları (KÜPSAT gibi) arasında bağlantı kurma görevinde olabilecektir [21].



Şekil 2.1 : Mevcut 5N ağı ve 6N VHetNet yapısı [6].

2.2 Yüksek İrtifa Platform Sistemi (YİPS)

Yüksek İrtifa Platform Sistemi (High Altitude Platform System, HAPS) getirdiği bazı önemli avantajların sayesinde 6N mobil haberleşme ağı planlamalarında, önceki bölümde açıklanan VHetNet yapısının hava ağı katmanı içerisinde bahsi geçen kullanıcı gereksinimleri adına değerli bir yarı durağan ağ elemanı olarak değerlendirilmektedir [6]. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU) Article 1.66A’da YİPS’i, “20 ila 50 km yükseklikte ve Dünya’ya göre belirli, nominal, sabit bir noktada bulunan bir nesne üzerindeki istasyon” olarak tanımlamaktadır [22]. YİPS’in Stratosfer katmanındaki yarı statik konumu göz önüne alındığında karasal ve uzay ağı ile kuracağı veri bağlarında, özellikle stratosferik ılıman hava ile yarı sabit rüzgâr hızı özelliklerinin de hesaba katıldığı senaryoda, veri toplama ve hesaplama açısından oldukça verimli sonuçların elde edilmesi beklenmektedir [11]. Bir başka açıdan değerlendirmek gerekirse YİPS, karasal ağlara ve uydu ağlarına olan bağımlılığın azalması yönünde önemli bir role sahip olacaktır. Hava ağı katmanına yönelik araştırmalar yalnızca YİPS değil diğer ağ birimleri ölçeğinde de devam etmekte ve çeşitli projeler tarafından

değerlendirilmektedir [23, 24]. Bunun yanında planlanan YİPS projelerinin gerçekleşmesi ile bilim insanlarının Stratosfer hakkındaki değerlendirmelerine ve keşiflerine oldukça büyük katkı sağlanması beklenmektedir [11]. Esasen YİPS 1990'ların son kısmında ve aynı şekilde 2000'lerin başlarında birçok araştırmanın popüler konusuydu. Buna karşın bahsi geçen dönemde, getirdiği birçok avantaja rağmen, YİPS yapısı uygulamaları çok sınırlı kalmıştır [25]. Mevcut 5N ağ yapısı içerisinde de çeşitli araştırmaların bulunmasına karşın önerilen potansiyel uygulama alanları kısıtlıdır [15]. Bunların aksine YİPS konusu, hem haberleşme ağlarında ve anten sistemlerde hem de otonom aviyonik sistemlerde ve güneş panellerinde gerçekleşen gelişmelerin ışığında 2030'larda öngörülen akıllı şehir başlığı altında yeniden popüler hale gelmiştir. YİPS'in, Dikey Heterojen Ağ yapısı içerisinde yer alan hava ağı katmanı içerisinde insansız hava araçları ile görev yapması beklenmektedir. YİPS'in yüksek frekans bölgelerinde, yüksek kazançla ve geniş bantlarda hizmet etmesi planlanmaktadır [13]. Örnek bir YİPS görseli Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Örnek YİPS görseli [26].

YİPS yapısı hem İHA hem de mevcut LEO takımyıldızı uygulamalarına karşı birtakım avantajlar vadetmektedir. Bunlardan bir tanesi, yeryüzüne LEO uydularından daha yakın bir mesafede yer almalarından dolayı daha düşük bir yol kaybı ve daha yüksek bir sinyal-gürültü oranı (SNR) getirecek olmalarıdır [6]. Bu sayede LEO uydulara nazaran daha uygun kanal koşulları ile uygulanabilir link bütçesi sağlanmış olacaktır. Ayrıca YİPS, LEO uyduların yüksek hareketliliklerinden kaynaklı negatif etkilerini örtme yeteneğine sahiptir [27]. Neredeyse yer sabit bir uygulama olarak değerlendirilen YİPS, bu sayede LEO uygulamalarının en zor yanlarından görülen

uydu geçişleri ve Doppler kayması gibi konularda avantajlı görülmektedir [28]. Yine konumlarının Dünya’ya yakınlığından dolayı uydu haberleşmesine oranla daha düşük seviyede (0.13-0.33 ms) gecikme süresi getireceği öngörülmektedir. Bunların haricinde, neredeyse sabit konumlarının getirisi olarak yoğun nüfusun olmadığı alanların üzerinde vakit geirmeyecekleri için (yörünge dolanımı olmadığından) kapasitelerini boşa harcama gibi bir dezavantajları olmamaktadır. İHA yapılarına göre maliyetli olsalar da kapasite ve kapsama alanı bakımından insansız hava araçlarının çok  n ndelerdir. Bir binadan bile büyük şekilde tasarlanabilecek YİPS, bu sayede MIMO ve çok büyük MIMO (Massive MIMO, M-MIMO) yapıları için uygun olacaktır [13]. Ayrıca büyüklüğü sayesinde yüzeyinde fazla sayıda enerji paneli bulundurabilecek YİPS, bu özelliğiyle en büyük sorunlarından biri olarak değerlendirilen enerji konusunda da cevapsız kalmamaktadır.

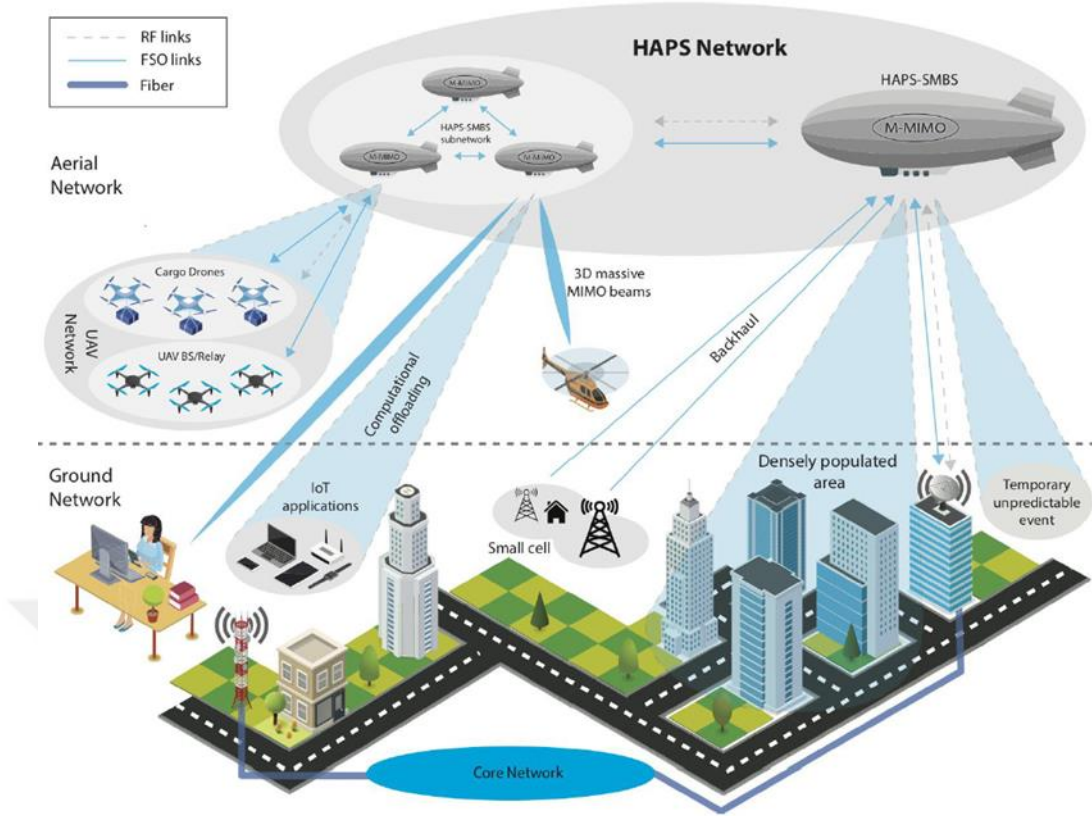
YİPS hibrit yapıda bir ağ iletişimi vadetmektedir. Daha önce tanımlanan VHetNet içerisinde tüm iletişim sistemine yardımcı olmak için röle görevinde değerlendirilebilir olmasının yanında, her yerde kesintisiz iletişim amacıyla “Süper Makro Baz İstasyonu (YİPS-SMBİ)” olarak da tanımlanmaktadır [29]. Bu tanımlama yapılırken, M-MIMO ile artırılmış kapasite ve veri toplama yeteneklerinin yanı sıra geniş kapmasa alanlarına sahip olmaları etkili olmuştur [30]. Öyle ki YİPS’in 60 km’lik bir yarıçap içerisinde haberleşme hizmeti verebileceğinin mümkün olduğu değerlendirilmektedir [31]. Bu bağlamda bazı hizmet ve senaryolarda kapasitenin artırılması gereken (ok yoğun) veya kapsamanın yetersiz olduğu alanlarda karasal alt yapıyı desteklemek adına YİPS-SMBİ kullanılabilir [13].

YİPS-SMBİ yapısının birçok alanda faaliyet göstermesi beklenmektedir. Örneğin 5N teknolojisi ile birlikte oldukça yaygın hale gelen Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) uygulamalarında kullanılan çok sayıda cihazın geniş kapsama alanlı tek bir büyük baz istasyonu ile çalışması öngörülmektedir. Bu sayede IoT uygulamalarında daha verimli ve uygun maliyetli, kesintisiz bir haberleşme yapılabilir [32, 33]. Bir başka öngörü ise yoğun nüfuslu alanlarda anlık kapasite gereksinimlerini sağlamak için ( rneğin doğal afet sonrasında) destek niteliğinde kullanılmalarıdır [34]. Hızlı konuşlandırmalarıyla hava ağı katmanı birimlerinin bu konuda fayda sağlayacağı düşünülmektedir [30]. Bu tip olağan dışı ağ tıkanıklığı anlarında İHA’ya monte edilmiş baz istasyonları kullanımı bulunsa da YİPS-SMBİ

yapısı, İHA'ya oranla sağladığı avantajlar sayesinde sorunun çözümü adına daha uygun gözükmektedir.

YİPS-SMBİ, Şekil 2.1'de görülebileceği üzere, bir takımyıldızı olarak LEO uyduların arayüzü göreviyle Dikey Heterojen Ağ içerisinde yer alabilecektir. YİPS-SMBİ, LEO uyduların geçişlerinin daha kolay şekilde sağlanabilmesi adına karasal ağlar ile uydu arasında bir katman olarak görev yapabilecektir. Karasal ağlar ve LEO uyduların arasında konumlanacak YİPS-SMBİ, kullanıcıların LEO uydular ile doğrudan haberleşmesi gereksinimini ortadan kaldıracak kapasiteye sahip olabilecektir.

YİPS-SMBİ sistemlerinin bir başka öngörülen uygulaması ise hava ağında yer alacak bir veri merkezi olarak görev almalarıdır. Bazı yüksek hesaplama gerektiren yapılarda hizmet sağlayabilecek YİPS-SMBİ, yine görüş hattı (Line of Sight, LOS) bağlantıları ile geniş kapsama alanı sağlayarak veri aktarımı sırasında bağlantı kesilmesinin önüne geçebilir [6]. Ayrıca veri merkezlerinin en önemli gereksinimlerinden biri olan soğutmaya yönelik doğal avantaj sahibidirler. Çünkü YİPS-SMBİ yapısının görev alacağı irtifalarda sıcaklık ortalama olarak -15°C ile -50°C derece aralığında değişmektedir [35]. Bu özellik sayesinde öngörülen hava veri merkezinin soğutması için fazla enerjiye ihtiyaç doğmayabilir. Tüm bunların yanında akıllı ulaşım çözümlerinde de YİPS-SMBİ yapısının kullanımı değerlendirilmektedir. Bilindiği üzere otonom araç konusunda birçok araç üreticisi atılım yapmaktadır. Fakat bu atılımlar otonom araçların hem sürücüleri hem de birbirleri ile haberleşmesi başlığında birçok tasarımsal zorluğu da beraberinde getirecektir. Bu bağlamda YİPS-SMBİ, geniş kapsama alanı ve yüksek kapasitesiyle yük boşaltma (offloading) işlemi açısından ulaşım yapısında görev alabilecektir [36]. Şekil 2.3'te YİPS-SMBİ ağları ile akıllı şehir uygulamalarına dair bir özet gösterilmiştir.



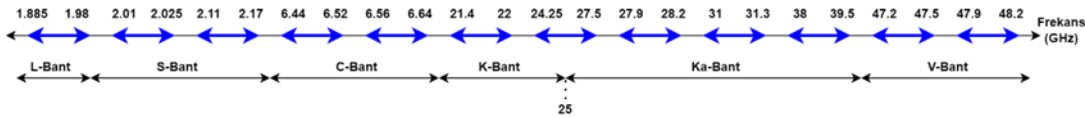
Şekil 2.3 : Akıllı şehir uygulamalarında YİPS-SMBİ kullanımı [30].

Genel özellikleri, avantajları ve öngörülen uygulamaları açıklanan YİPS'in güvenli ve uyumlu çalışabilmesi için havacılık sektöründeki düzenlemeleri kritiktir. Son değerlendirmelerde YİPS sıklıkla 17-18 km irtifalarına konuşlandırılmıştır [37]. Ülkeler kendi hava sahaları için maksimum irtifaları belirlemektedir ve genelde bu değer 20 kilometredir [38]. Yakın zamanda kurulan HAPS Alliance konsorsiyumu, güçlü ve etkin bir YİPS ekosistemi oluşturma amacıyla faaliyetlerini sürdürmektedir. HAPS Alliance hedef olarak YİPS teknolojilerinin ticari olarak benimsenme sürecini hızlandırmayı belirlemiştir. Dünya çapında daha fazla kullanıcıya bağlantı sağlamayı vizyon, gelecek dönemin ağ yapısına güç katacağına inanılan Stratosfer katmanının potansiyelini açığa çıkarmayı ise misyon edinmiştir [39].

YİPS'in düzenleme faaliyetleri çoğunlukla ITU Radyotelekomünikasyon Sektörü (ITU Radiocommunication Sector, ITU-R) ve Uluslararası Sivil havacılık Örgütü (International Civil Aviation Organization, ICAO) tarafından belirlenmektedir. ITU-R YİPS spektrum dağılımlarını düzenlerken ICAO ise güvenlik ve sivil havacılık faaliyeti bölümleri ile ilgilenmektedir [6]. Örneğin ICAO iki farklı YİPS sınıfı tanımlamaktadır. Bu sınıfların ilki güçle tahrik edilmeyen, insansız, havadan hafif ve

serbest uçuş yapan balon tarzı hava aracı olarak tanımlanırken; ikincisi ise içinde pilot olmadan uçuşması amaçlanan insansız hava aracıdır [40]. Her iki sınıf özelinde de düzenleyici rehberler gelişim sürecindedir. İki sınıfın en önemli farkı ise balon tarzı hava araçlarının gerçek zamanlı yönetimin dışında tutulmasıdır. Bu bağlamda ulusal sivil havacılık yönetmeliklerine göre gerçekleşen YİPS dağılım ve konuşlandırmalarının ilerleyen dönemler adına daha düzenli ve büyük ölçekli şekilde kontrol edilmeye ihtiyacı olduğu gerçeği açıktır.

ITU ise F.2471, F.2472 ve F.2475 raporlarında yaptığı teknik araştırmaları bildirmiştir [41-43]. Raporlar sırasıyla 21.4-22 GHz, 24.25-27.5 GHz ve 38-39.5 GHz frekans bölgelerindeki çalışmaları içermektedir. F.2471 ve F.2472, Amerika kıtalarını ve Grönland'ı içeren ITU Bölge 2'yi kapsayan raporlardır. Bu raporlar doğrultusunda yerden YİPS'e yukarı bağlantılarda 396 MHz ila 2969 MHz, YİPS'ten yere aşağı bağlantılarda ise 324 MHz ila 1505 MHz bant genişliğinin gerekliliğine karar verilmiştir. YİPS ve jeosenkron olmayan uydu sistemlerine yönelik düzenleyici çerçevenin yenilenmesi hedeflenen 2019 Dünya Radyokomünikasyon Konferansı'nda (WRC-19), daha önce açıklanan 47.2-47.5 GHz ve 47.9-48.2 GHz frekans bantlarına ek olarak 31-31.3 GHz ve 38-39.5 GHz bantları da dünya çapında YİPS kullanımına açılmıştır. YİPS operasyonlarında kullanılması planlanan frekans bantları Şekil 2.4'te gösterilmiştir [6].



Şekil 2.4 : YİPS kullanımına ayrılmış frekans bantları.

Şekilden de görülebileceği üzere L, S, C, K, Ka ve V bantlarında ayrılmış frekans bölgeleri olup bu bantların bir kısmı farklı uygulamalara da hizmet etmektedir. Örneğin L ve S bantları aynı zamanda karasal Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (International Mobile Telecommunications, IMT) hizmetlerinde de kullanılmaktadır [44].

3. ANTEN PARAMETRELERİ VE ANTİPODAL VİVALDİ ANTEN

Anten alıcı veya verici ile uzay arasında empedans uyumunu sağlayan, elektromanyetik dalgaları elektriksel enerjiye dönüştürebileceği gibi elektriksel enerjiyi de elektromanyetik dalgalara çevirebilen pasif bir devre elemanıdır [45]. Anten radyo dalgalarının tüm yatay yönde veya belirli yönde iletilmesini ve alınmasını sağlar. Heinrich Hertz 1886 yılında anteni geliştiren ilk kişidir [46].

Kablosuz haberleşme teknolojilerinin temel taşlarından biri olan anten, geçmişte ve günümüzde olduğu gibi, gelecek yıllarda görev alması beklenen haberleşme sistemleri içinde de kendisine yer bulacaktır. Antenlerin haberleşme sistemlerinin değişen gereksinimlerini karşılamaya yönelik farklı türleri mevcuttur. Bu anten türlerine tel anten, açıklık anten, mikroşerit anten ve lens anten gibi örnekler verilebilir. Bahsi geçen türlerinin yanında amaca uygun farklı anten yapıları da mevcuttur. Ayrıca bazı uygulamalarda gereksinimleri karşılamak adına kompakt anten türlerinin dizi anten yapıları kullanılmaktadır.

Bölüm 3.1’de bu çalışmada da kullanılan bazı önemli anten parametreleri açıklanmıştır. Bölüm 3.2’de ise dizi antenler ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Son olarak Bölüm 3.3’te çalışmada tasarlanan ve sonrasında üretimi yapılan antipodal Vivaldi anten ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde, AVA yapısının güçlü yönlerinden bahsedilmiş ve YİPS yapısı içerisinde kullanımı adına önerilmesinin nedenleri açıklanmıştır.

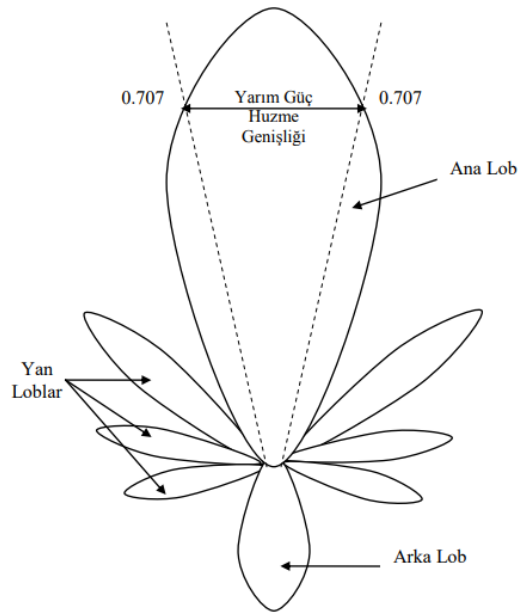
3.1 Anten Parametreleri

Antenlerin amaca uygun tasarımlarında yalnızca seçilen anten çeşidinin değil performans parametrelerinin de önemli rolü bulunmaktadır. Tasarımda öncelik verilecek performans parametrelerinde, sistemsel gereksinimlerin yanında çevresel faktörler de önem arz edebilir. Bu bölümde bazı önemli anten parametreleri açıklanmıştır.

3.1.1 Işıma örüntüsü

Uzak alanda antenden yayılan elektromanyetik alan şiddetinin, matematiksel veya grafik şeklinde uzay koordinatlarının bir fonksiyonu olarak tanımlanması sonucunda ışıma örüntüsü elde edilir. Bu örüntüden antenin hangi yönde ve hangi seviyede ışıma yapabildiği anlaşılır. Işıma örüntüsü temel olarak merkez (ana) lob, yan lob ve arka lobdan oluşmaktadır. Ana lob antenin esas ışıma yönünü gösterirken; yan loblar ise istenmeyen ışıma yönlerini temsil etmektedir. Arka lob ise ana lobun 180° tersinde oluşan ışıma karakteristiğini tanımlamaktadır.

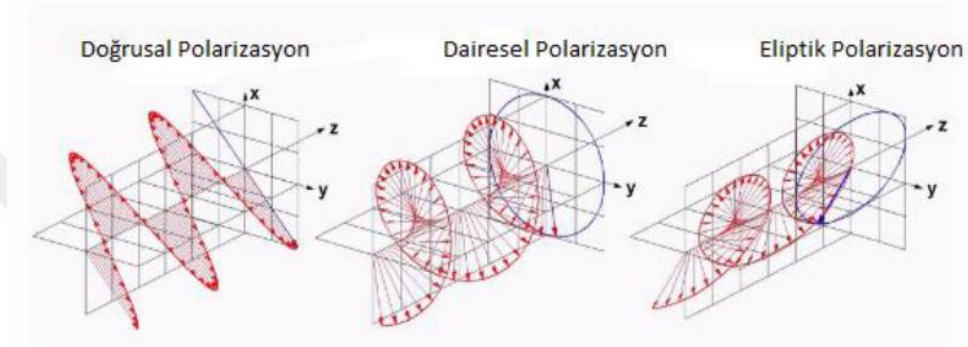
Antenin ışıma örüntüsüne göre tanımlanan belli türleri mevcuttur. Bunlar yönlü anten, çok yönlü anten ve izotropik (yönsüz) anten olarak ifade edilebilir. İzotropik antende her yönde eşit miktarda ışıma mevcuttur. Genelde izotropik anten, anten performans parametrelerinde referans olarak kullanılır. Bu referansta yapılan simülasyon ve ölçümlerde dBi birimi kullanılır. Yönlü anten ise belirli bir yönde çok daha kuvvetli bir ışımaya sahiptir. Çok yönlü antende ise ışıma, birkaç farklı yönde gerçekleşebilmektedir. Şekil 3.1’de örnek bir ışıma örüntüsü üzerinde bahsi geçen loblar gösterilmiştir. Işıma örüntüsü içerisinde bir başka önemli parametre ise maksimum ışıma gücünün yarıya düştüğü noktaların arasındaki açı ile tanımlanan yarı güç hüzmeye genişliğidir (Half Power Beamwidth, HPBW). Bu açı da Şekil 3.1 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Örnek anten ışıma örüntüsü.

3.1.2 Polarizasyon

Polarizasyon, iletim sinyali alanlarının hangi düzlemde değiştiğini belirleyen parametredir. Anten polarizasyonunun doğrusal, dairesel ve eliptik olmak üzere üç çeşidi mevcuttur. Bir kablosuz haberleşme sisteminde alıcı-verici polarizasyon uyumluluğu önemli bir gereksinimdir. Farklı polarizasyonların kullanılması alınan siyal seviyesinde azalmalara yol açmaktadır. Bu tarz durumlarda anten tasarımlarına bağlı olarak çeşitli polarizasyon dönüştürücüleri kullanılabilir.



Şekil 3.2 : Anten polarizasyon çeşitleri [47].

3.1.3 Yönlülük

Antenin yönlülüğü (DR) antenden belirli yöndeki ışıma yoğunluğunun (U), ortalama ışıma yoğunluğuna oranı olarak tanımlanabilir. Ortalama ışıma yoğunluğu antenin yaydığı toplam gücün (P_{rad}) 4π 'ye bölümünü eşittir. Bir başka deyişle izotropik olmayan bir antenin yönlülüğü, belirli yöndeki ışıma yoğunluğunun izotropik bir kaynağına oranı olarak tanımlanabilir. Yönlülük denklem (3.1) ile hesaplanır. Eğer doğrultu spesifik olarak belirtilmemişse, maksimum ışıma yoğunluğu kullanılarak denklem (3.2) ile maksimum yönlülük elde edilir. Burada D_{max} maksimum yönlülüğü, U_{max} maksimum ışıma yoğunluğunu, U_0 ise izotropik kaynağın ışıma yoğunluğunu temsil etmektedir [45].

$$DR = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3.1)$$

$$DR_{max} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (3.2)$$

3.1.4 Anten ışıma verimliliği

İşıma verimliliği (η) antenin yaydığı toplam gücün giriş gücüne (P_{in}) oranı olarak tanımlanabilir. Işıma verimi bu tanıma uygun şekilde denklem (3.3) ile elde edilir [45]. Birimsiz bir parametre olan ışıma verimliliği 0 ile 1 arasında değer almaktadır. İdeal senaryoda (kayıpsız) anten girişine uygulanmış tüm güç anten tarafından ışıdır. Bu senaryoda verimlilik 1 değerini almaktadır ancak gerçek dünyada ideal durum mümkün değildir.

$$\eta = \frac{P_{Rad}}{P_{in}} \quad (3.3)$$

3.1.5 Anten kazancı

Anten kazancı (G) yönlülük ile ışıma veriminin çarpımına eşittir. Kayıpsız durumda ışıma verimliliği 1 değerini aldığı için anten kazancı ile yönlülük aynı değere sahip olmaktadır. Anten kazancı aynı güç seviyesiyle sağlanan kayıpsız izotropik antenin sağladığıyla karşılaştırıldığında antenin ürettiği maksimum radyasyon yoğunluğu olarak tanımlanabilir. Buna göre, anten kazancı denklem (3.4) ile ifade edilebilir [45].

$$G = \eta D \quad (3.4)$$

3.1.6 Yansıma katsayısı

Yansıma katsayısı (Γ), bir antenden yansıyan işaretin genlik değerinin (V_0^-) antene gönderilen işaretin genliğine (V_0^+) olan oranı olarak tanımlanır. Sistemde empedans uyumluluğu tamamen sağlandıysa (ideal, kusursuz senaryo) yansıma katsayısı 0 değerini alır. Yansıma katsayısının 0 değerini alması antene aktarılan gücün tamamen alındığını, herhangi bir kaybın yaşanmadığını gösterir. Yansıma katsayısı denklem (3.5) kullanılarak elde edilebilir. Burada Z_L anten (yük) empedansı, Z_0 ise karakteristik empedans değeridir.

$$\Gamma = \frac{V_0^-}{V_0^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3.5)$$

3.1.7 Geri dönüş kaybı

Geri dönüş kaybı (R_L), uyumsuzluk nedeniyle giriş gücünün ne kadarının antenden yansıdığını belirten parametredir. Bir başka ifade ile geri dönüş kaybı, antene iletilen

gücün antenden yansıyan güce (P_r) olan orandır. Anten geri dönüş kaybı denklem (3.6) kullanılarak ifade edilebilir.

$$R_L = \frac{P_{in}}{P_r} = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \quad (3.6)$$

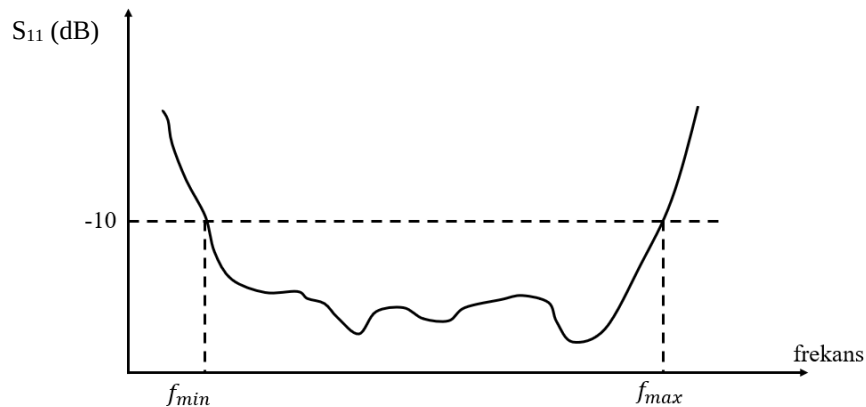
3.1.8 Gerilim duran dalga oranı

Yansıyan sinyal, besleme sinyaliyle birlikte duran dalga adı verilen tek bir dalgaya dönüşmektedir. Duran dalganın maksimum (V_{max}) ve minimum değerinin (V_{min}) oranı gerilim duran dalga oranını (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) vermektedir. Anten girişindeki empedans ile iletim hattı empedans uyumunun bir ölçütü olan bu parametre, 1 değerine eşit olduğunda empedans uyumu tamamen sağlanmış kabul edilir. VSWR yansıma katsayısı yardımı ile de gösterilebilir. Denklem (3.7), VSWR formülünü içermektedir.

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.7)$$

3.1.9 Bant genişliği

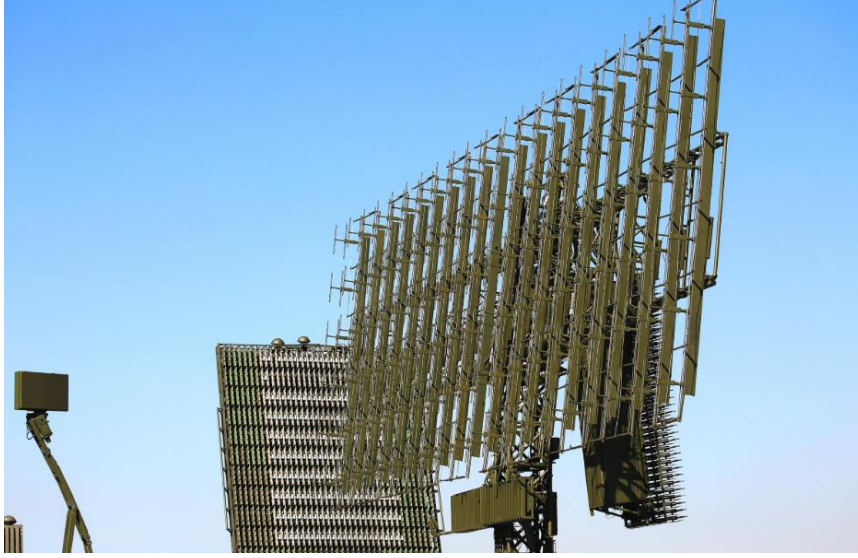
Bant genişliği, antenin kabul edilebilir performans sağladığı frekans aralığı olarak tanımlanır [45]. Genelde bu başarı sınırı olarak benzetim programlarında sık sık kullanılan S_{11} parametresinin -10 dB ve altını aldığı durum referans alınmaktadır. Örneğin Şekil 3.3'te S_{11} parametresinin -10 dB ve altında olduğu f_{min} ile f_{max} frekans aralığı, ilgili antenin ışıma yaptığı bant genişliği olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.3 : Örnek bant genişliği tanımlaması [48].

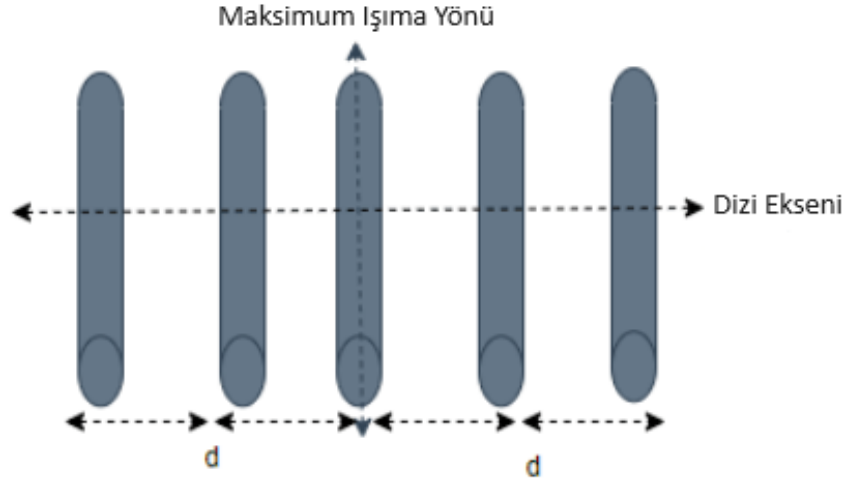
3.2 Dizi Antenler

Günümüz haberleşme teknolojilerinin bazı uygulamalarında yüksek yönlülük ve kazanç ile dar hüzmeye gereksinimi mevcuttur. Bu gereksinimleri karşılamada tek elemanlı kompakt antenler yetersiz kalabilmektedir. Dizi antenler bahsi geçen gereksinimleri sağlamak için sıklıkla kullanılan anten türüdür. Dizi antenlerin tasarımları, tekil yapıdaki antenlerin çeşitli yöntemler kullanılarak geometrik ve elektriksel konfigürasyonlar ile bir arada kullanılması sonucunda gerçekleştirilir. Yalnızca tek boyutlu değil iki veya daha fazla boyutlu dizi antenler de literatürde mevcuttur. Dizi antenin birimleri arasında faz farkı oluşturulabileceği gibi eş fazda çalışan yapılar da tasarlanmaktadır. Şekil 3.4'te askeri alanda kullanılan bir anten dizisi örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.4 : Örnek dizi anten uygulaması [49].

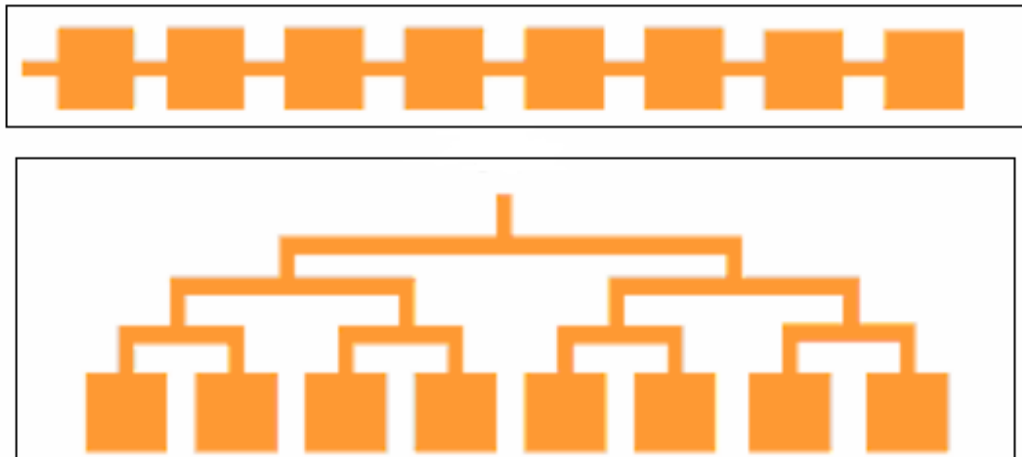
Dizi antenler genel olarak 4 türe ayrılabilir. Bunlar geniş taraf (broadside), uçtan ışımalı (end-fire), kolineer ve parazitik tipte dizi antenlerdir [50]. Bu çalışmada broadside tipte dizi yapısı kullanılmıştır. Bu tür dizi antenlerde birim elemanlar, antenin eksenine dik olan tüm hat boyunca aralarındaki mesafe aynı kalacak şekilde yerleştirilir [50]. Dizideki her elemana benzer faz ve büyüklüğe sahip akım sağlanmaktadır. Şekil 3.5 bahsi geçen dizi anten yapısını göstermektedir.



Şekil 3.5 : Broadside dizi anten yapısı [50].

Dizi antenin performansını kullanılan birim anten sayısı ve birimler arasındaki mesafe doğrudan etkiler. Bunun yanında besleme yapısı oluşturulurken gerekli empedans uyumuna dikkat edilmelidir. Dizi anten besleme yapısı genel olarak iki farklı kategoriye ayrılabilir. Bunlardan ilki seri besleme yapısı iken diğeri paralel besleme yapısıdır.

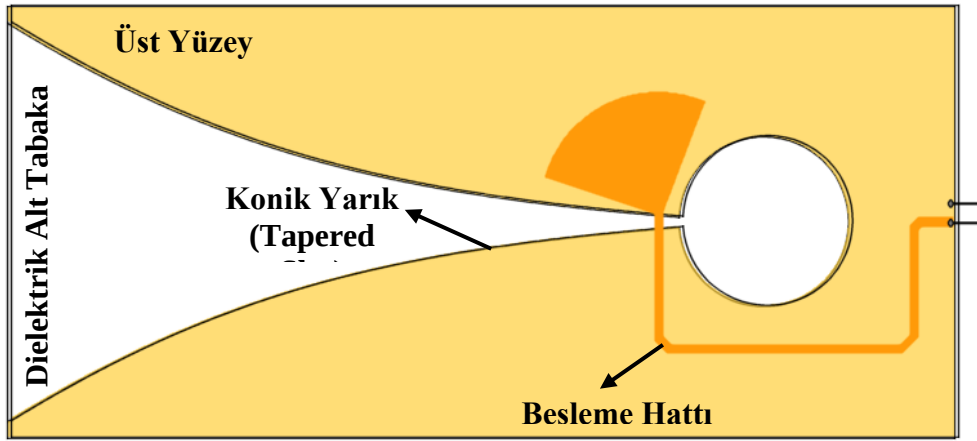
Şekil 3.6'nın üst tarafında gösterilen seri besleme yapısında, tek bir besleme noktası ile seri mikroşerit iletim hatları kullanılmaktadır. Aynı şeklin alt tarafında yer alan paralel besleme yapısında ise güç bölücüler kullanılır. Bu bölücüler; mikroşerit iletim hatları, çeyrek dalga dönüştürücüleri ve mikroşerit dönemeçlerden meydana gelir.



Şekil 3.6 : Dizi anten seri ve paralel besleme yapıları [51].

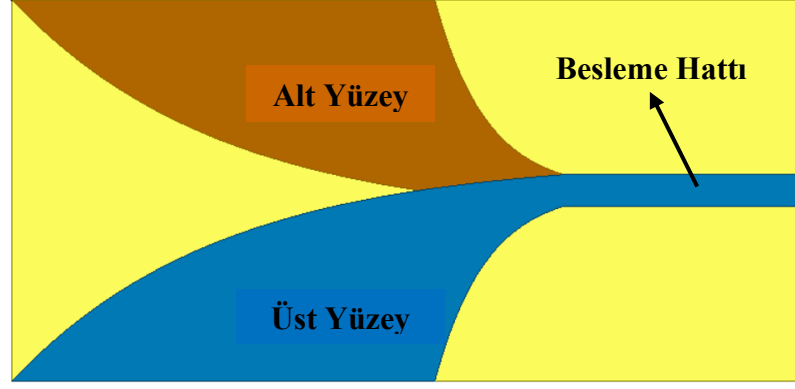
3.3 Antipodal Vivaldi Anten

Haberleşme teknolojilerinde yaşanan gelişmelerle birlikte hem sivil hem de askeri uygulamalarda geniş bantlı ve işlevsel antenlere olan ihtiyaç doğmuştur. Bu amaçla 1979 yılında P. J. Gibson Vivaldi anteni tanıtmıştır [52]. Konik yarıklı anten (Tapered Slot Antenna, TSA) olarak da bilinen Vivaldi geniş çalışma bandı sağlamak adına üstel bir açıklığa sahiptir [53]. Geniş çalışma bandının yanında yüksek yönlülük ve düşük çapraz polarizasyon değerleri sayesinde radar uygulamaları ile mikrodalga görüntüleme alanlarında kullanılmaktadır [54, 55]. Bunun yanında Vivaldi anten uygun maliyeti, kolay fabrikasyon ve entegrasyon avantajlarına da sahiptir [56]. Vivaldi antenlerin bir diğer özellikleri lineer polarizasyona sahip olmalarıdır [57]. Geleneksel Vivaldi antene ait görsel Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Örnek geleneksel Vivaldi anten [58].

1988 yılında Gazit, Vivaldi antenin zayıf karnı olarak görülen besleme yapısını sadeleştirmek ve hizmet verebildiği bant genişliğini daha da artırabilmek adına antipodal bir Vivaldi anten yapısı önermiştir [5]. AVA, konik yuvalı Vivaldi antene göre besleme yapısında daha düşük yansımaları beraberinde getirmiştir [59]. Ayrıca AVA, kompaktlığı ve hafifliğiyle dizi halinde de çeşitli uygulamalarda kullanılabilir bir yapıdır. Doğrudan devre kartlarına entegre edilebilen AVA, yüksek verimlilik ve kazanca sahip geniş bantlı çalışabilen bir anten türüdür [60, 61]. Tüm bunların ışığında, daha önce isterleri açıklanan Stratosfer katmanında görev alması beklenen YİPS yapısı içerisinde yer alabilecek bir anten türü olarak AVA önerilebilir. Şekil 3.8 örnek bir antipodal Vivaldi anteni göstermektedir.



Şekil 3.8 : Örnek antipodal Vivaldi anten (AVA) [62].

Esasen AVA mevcut 5N haberleşme teknolojileri literatürü içinde de kendisine yer edinmiştir. Antipodal Vivaldi anten, yüksek frekanslarda propagasyon kayıplarını minimize etmek ve yüksek kazanç elde etmek için 5N haberleşme ağlarında iyi bir seçim olarak değerlendirilmektedir [63]. Ayrıca AVA 5N için gerekli kapasite ile spektrum eksikliği arasındaki tutarsızlığa cevap üretebilecek bir anten türü olarak gösterilmektedir [63]. 5N çerçevesindeki bu yaklaşım referans alındığında AVA birimi, 6N iletişim ağları içinde yer alacak sistemlerde kullanılacak bir alternatif olarak değerlendirilebilir.



4. ANTİPODAL VİVALDİ ANTEN TASARIMLARI

YİPS yapısı içerisinde görev alması adına gerçekleştirilen AVA tasarımı için önceki bölümde de belirtilen ITU'nun Bölge 2 (Region 2) kapsamında açıklamış olduğu frekans bantlarından 21.4-22 GHz ve 24.25-27.5 GHz aralıkları hedef ışıma bölgeleri olarak seçilmiştir. Antenin iki ışıma aralığında da operasyon sürdürebileceği frekans bölgelerinin mevcut olması hedefinin yanı sıra Vivaldi antenin temel özelliklerinden olan geniş frekans bandının da sağlanması amaçlanmıştır. Bunun haricinde Stratosfer katmanından yürütülecek 6N hizmetleri için antenin dar ışıma hüzmeye ve yüksek yönlülük ile kazanca sahip olması da hedeflenmiştir. Proje planına göre ilk olarak tekil yapıda antipodal Vivaldi anten tasarlanmış olup sonrasında ise gereksinimlere olan uygunluğunu artırabilmek adına dizi anten tasarımları da gerçekleştirilmiştir.

Tekil yapıdaki AVA dizi anten tasarımları için birim eleman olarak değerlendirilmiştir. Dizi antipodal Vivaldi antenler ise hem iki elemanlı hem de dört elemanlı (1x2 ve 1x4) olacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm çalışmaların sonunda tekil yapıda performansı en yüksek anten ile bu antenin birim eleman olarak kullanıldığı dizi antenler karşılaştırılmış ve dizi tasarımı ile istenen performans farklılıklarının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Anten tasarımları literatürde bulunan benzer yapılar ile kıyaslanmıştır. Tasarımın ardından 1x4 yapıdaki dizi anten üretime hazır formata getirilmiş ve ürettirilmiştir. Anten bazı performans testlerine tabi tutulmuş ve test sonuçları ile benzetim sonuçları kıyaslanmıştır.

Tekil yapıda AVA tasarımında ilk olarak sade yapıda (herhangi bir yarık bulundurmayan) bir anten elde edilmiştir. Yönlülük, kazanç ve yan lob seviyesi gibi kritik parametrelerde optimum performansın sağlanabilmesi amacıyla gerçekleştirilen parametrik benzetimler işlenmiştir. Bu adımın ardından sade yapıdaki antenin performans parametrelerinde daha fazla gelişim gösterebilmesi için tasarımsal hamleler değerlendirilmiştir. Yapılan hamlelerinin detaylarına ilgili bölümde yer verilmiştir. Gereksinimleri karşılayabilecek tekil yapıda antenin tasarımının tamamlanmasının ardından tekil birimi olarak görev alacağı iki elemanlı dizi anten tasarımına

başlanmıştır. 1x2 yapıda dizi anten tasarımında ilk olarak iki birim elemanın hangi mesafe ile yerleştirileceği parametrik benzetim yöntemi ile bulunmuş, ardından antenler arasındaki besleme yapısı oluşturulmaya başlanmıştır. Besleme yapılarının tasarımlarında kullanılan formüller ve gerçekleştirilen parametrik benzetimlere dair detaylar, ilgili dizi antenin tasarım bölümünde işlenmiştir. İki elemana sahip dizi antenin tasarımının ardından bu yapının 1x4 versiyonuna ait benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 1x4 yapıda dizi anten tasarlanırken iki anten birimi arasındaki mesafe 1x2 yapıda dizi antenle birebir aynı tutulmuş olup iki adet 1x2 yapı arasındaki besleme hattı tasarımı açıklanmıştır. Tüm anten tasarımları CST Studio Suite programında gerçekleştirilmiştir. Tekil ve dizi anten yapıları arasındaki karşılaştırmalara bu bölümün sonunda yer verilmiştir. Bunun haricinde hem tekil hem de dizi anten yapısında elde edilen en iyi sonuçlar literatürde bulunan birkaç benzer çalışma ile performans parametreleri ve fiziksel boyutları yönünden kıyaslanmıştır.

4.1 Sade Yapıda AVA Tasarımı

Sade yapıda AVA tasarlanırken ilk olarak alt tabaka malzemesine karar verilmiştir. Tasarımda önemli görülen parametrelerden biri de performansın yanı sıra maliyettir. Buna istinaden, alt tabaka malzemesi olarak yüksek frekanslarda görev yapabilen ve nispeten uygun maliyete sahip Rogers RO4003C madde ($\epsilon_r=3.55$) seçilmiştir. Alt tabaka kalınlığı RO4003C hammaddesinin üretim ölçülerinden biri olan 0.508 mm olarak belirlenmiştir. Antenin yama ve toprak düzlemleri ise 0.035 mm kalınlığında bakır malzemedir. Üstel bir yapıya sahip olan antipodal Vivaldi antende bu yapının parametrelerini ve dolayısıyla alt tabakanın yaklaşık ölçülerini belirlemek için aşağıdaki formüller kullanılmıştır [64]:

$$x = \omega_0 - 0.5\omega_0 e^{\alpha y} \quad (4.1)$$

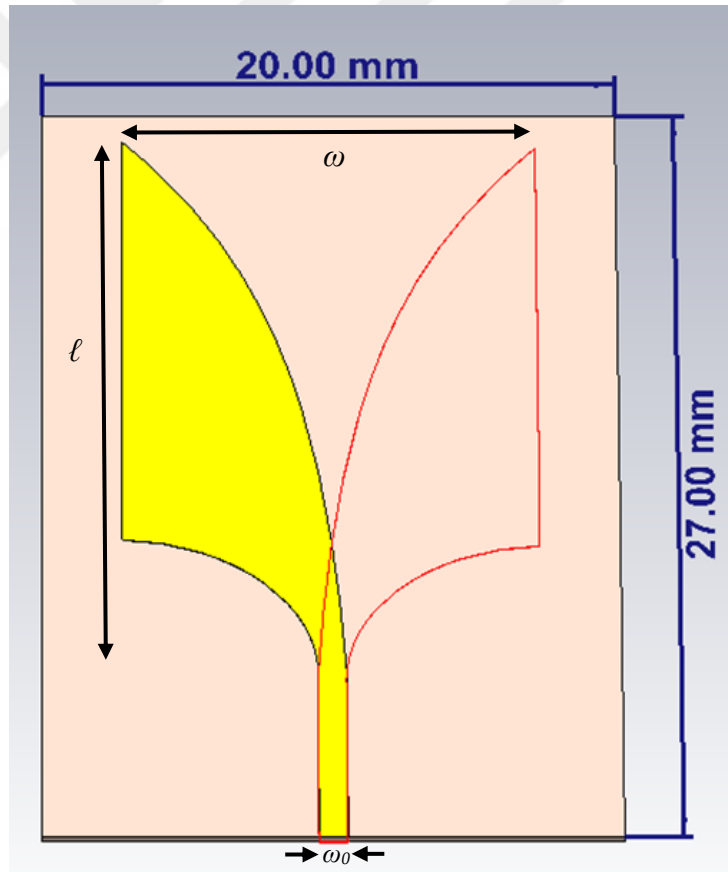
$$x = -\omega_0 + 0.5\omega_0 e^{\alpha y} \quad (4.2)$$

Burada antenin üst yüzeyi için denklem (4.1), alt yüzeyi için ise denklem (4.2) kullanılmaktadır.

Denklemlerde bulunan ω_0 parametresi 50Ω olarak uyumlanan besleme hattının kalınlığını, α ise üstel oranı temsil etmektedir. Üstel oranı belirlemek için ise (4.3) formülü kullanılmıştır [64].

$$\alpha = \frac{1}{\ell} \ln \frac{0.5\omega_0 + \omega}{0.5\omega_0} \quad (4.3)$$

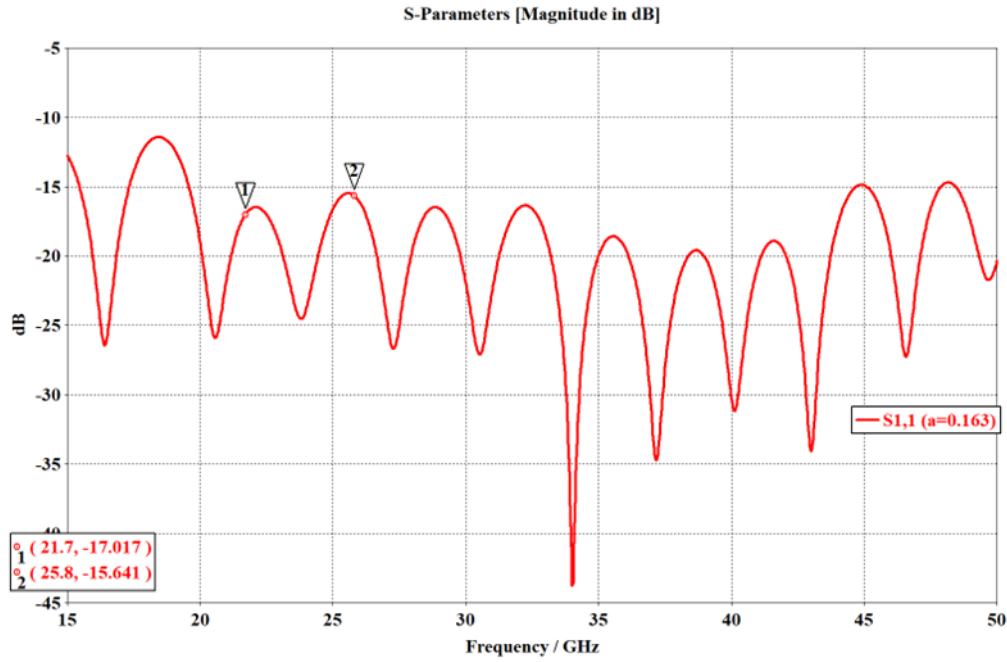
Denklem 4.3'te ℓ parametresi etkin ışıma uzunluğu, ω parametresi ise açıklık boyutudur. Tasarımın başlangıcında $\omega=15\text{mm}$ ve $\ell=20\text{mm}$ olarak kararlaştırılmıştır. Yapının karakteristik empedansı 50Ω olarak seçildiği için $\omega_0=1\text{mm}$ olarak hesaplanmıştır. Alt tabaka boyutu ise $20\text{ mm} \times 27\text{ mm}$ olacak şekilde tasarıma başlanmıştır. Denklemlere göre üstel oran α değeri 0.163 olarak bulunmuştur. Sonrasında α değeri denklem (4.1) ve denklem (4.2)'de yerine konulduğunda üstel denklemler elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda tasarlanan sade yapılı antipodal Vivaldi antenin boyutları Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Sade yapıda AVA boyutları.

Üstel oranı belirleyen α parametresinin 0.163 hesaplandığı durumda ilk olarak $15\text{-}50\text{ GHz}$ olacak şekilde geniş bir frekans aralığında benzetim yapılmıştır. Yapılan benzetimin ardından elde edilen S_{11} grafiği Şekil 4.2'de gösterilmiştir. AVA, doğal

yapısından beklenildiği gibi oldukça geniş bir ışıma bölgesinde çalışmaktadır. Işıma örüntüsü çıkartılacak frekanslar, tasarımın ilerleyen adımlarında daha rahat karşılaştırma yapılabilmesi adına hedeflenen iki ışıma bölgesinin orta noktaları olan 21.7 GHz ve 25.8 GHz olarak seçilmiştir. Bu frekanslarda bulunan S_{11} değerleri grafik üzerinde işaretlenmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere teorik olarak -10 dB değerinden daha düşük olması beklenen S_{11} değeri hedeflenen tüm frekans bandında bu gereksinimi sağlamaktadır.

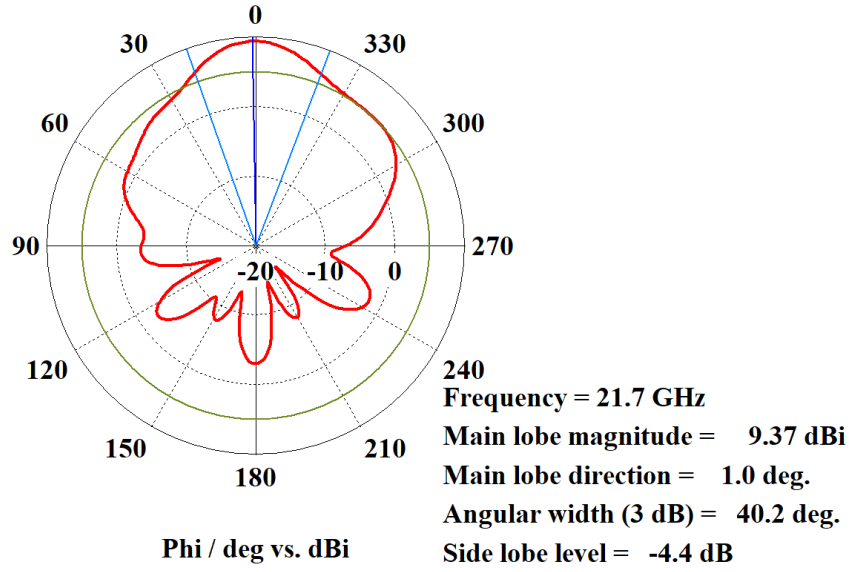


Şekil 4.2 : $\alpha=0.163$ olan sade yapıda AVA S_{11} grafiği.

Bunun yanında $\alpha=0.163$ hesaplandığı durumda 21.7 GHz ve 25.8 GHz frekanslarında elde edilen ışıma örüntüleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sırasıyla verilmiştir. Buna göre antenin yönlülük değerleri iki orta bant frekansında sırasıyla 9.37 dBi ve 9.34 dBi olarak bulunmuştur.

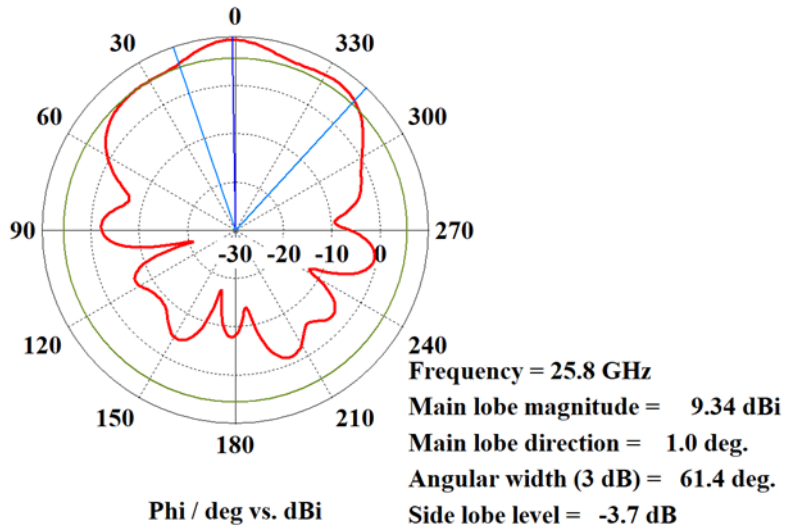
Ek olarak şekillerden de okunabileceği üzere yan lob seviyeleri ve yarı güç hüzm genişlikleri de elde edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde daha yüksek yönlülük ve kazanç ile daha düşük yan lob seviyesi veya görece daha dar hüzm genişliği elde edebilmek adına α parametresi üzerinde parametrik benzetim yapılması kararı alınmıştır. Parametrik benzetim için aday α değerleri 0.163 etrafında yer alan 0.14, 0.15 ve 0.16 seçilmiştir. Benzetimlerde iterasyon miktarının artması sebebiyle bu adımdan itibaren tasarımın kalan tüm işlemlerinde benzetim yapılan frekans bandı 21-28 GHz aralığına çekilmiştir.

Farfield Directivity Abs (Theta=90)



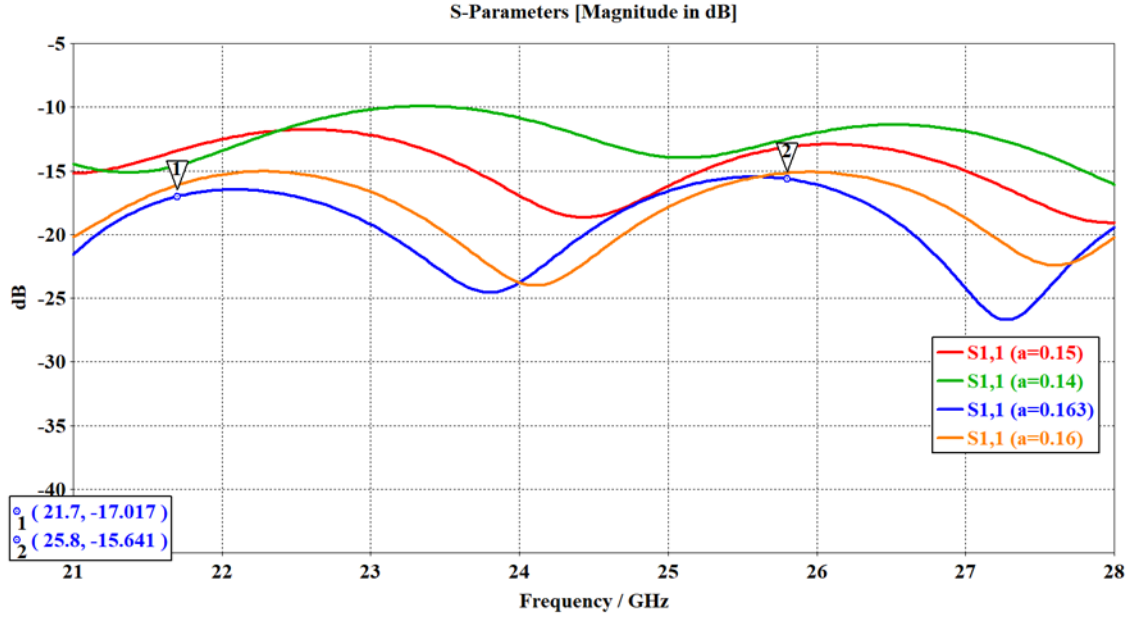
Şekil 4.3 : $\alpha=0.163$ olan sade yapıda AVA 21.7 GHz ışıma örüntüsü.

Farfield Directivity Abs (Theta=90)



Şekil 4.4 : $\alpha=0.163$ olan sade yapıda AVA 25.8 GHz ışıma örüntüsü.

Belirlenen üç değer kullanılarak benzetim yapıldığında elde edilen S_{11} parametreleri, Şekil 4.5'te α parametresinin 0.163 hesaplandığında bulunan sonuçlar ile aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Buna göre α parametresinin ilgili tüm değerlerinde gerekli frekans aralıklarında ışıma yaptığı saptanmıştır. Ayrıca $\alpha=0.163$ olduğu durumda diğer durumlara göre iki frekansta da daha düşük S_{11} değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.5 : α parametresi için yapılan parametrik benzetim sonuçları.

Buna karşın diğer önemli performans parametreleri adına derinlemesine değerlendirme gerekliliği açıktır. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2, sırasıyla 21.7 GHz ve 25.8 GHz'deki parametrik benzetim sonuçlarını göstermektedir. Tabloda antenlerin yönlülük, yan lob seviyesi ve yarı güç hüzmeye genişliği gibi performans parametreleri listelenmiştir.

Çizelge 4.1 : Sade yapıda AVA 21.7 GHz parametrik benzetim sonuçları.

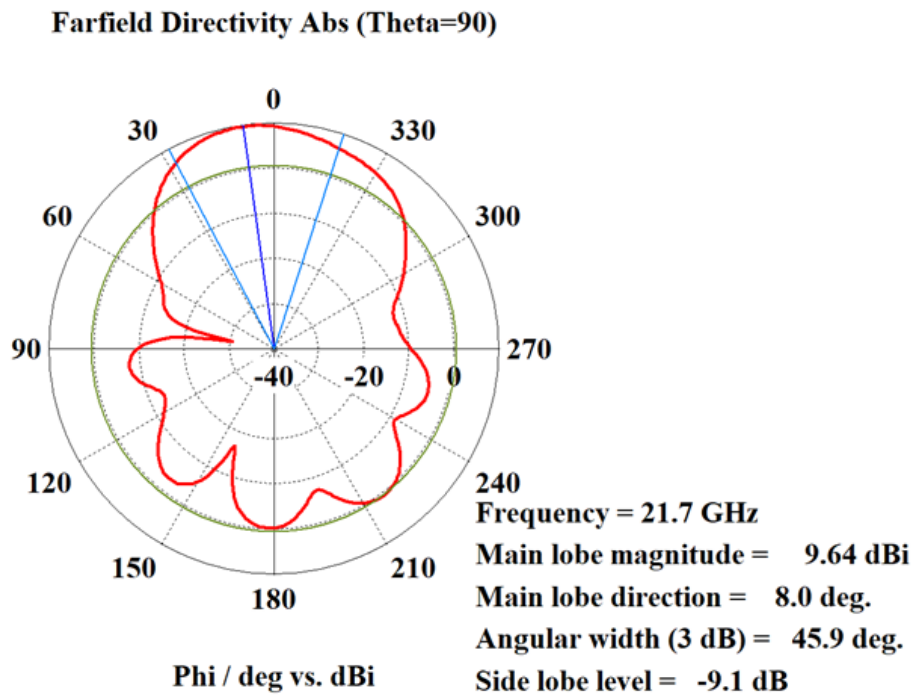
α Değeri	Yönlülük (dBi)	Yan Lob Seviyesi (dB)	HPBW
0.14	9.64	-9.1	45.9°
0.15	9.92	-7.2	37.4°
0.16	9.50	-4.5	37.9°
0.163	9.37	-4.4	40.2°

Çizelge 4.2 : Sade yapıda AVA 25.8 GHz parametrik benzetim sonuçları.

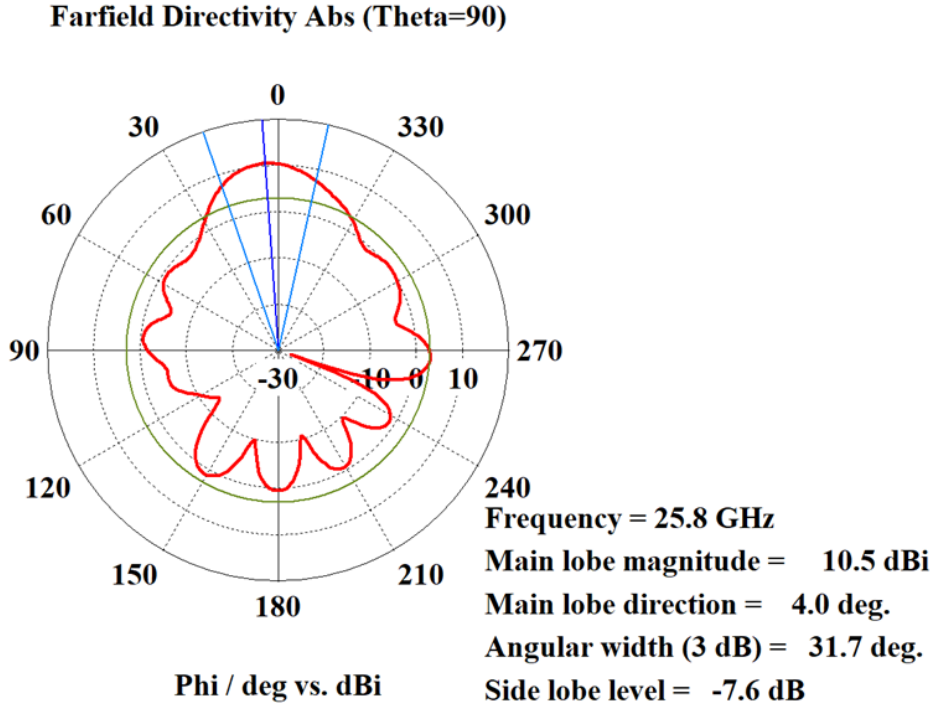
α Değeri	Yönlülük (dBi)	Yan Lob Seviyesi (dB)	HPBW
0.14	10.5	-7.6	31.7°
0.15	10.8	-6.2	30.3°
0.16	9.92	-3.5	34.7°
0.163	9.34	-3.7	61.4°

Tabloda yer alan parametrelerin haricinde S_{11} parametresi de göz önüne alındığında her iki orta frekans değerinde optimum performansı veren yapının $\alpha=0.14$ olan durumda elde edildiği değerlendirilmiştir. Bu kararın alınmasındaki etkenlerden biri, S_{11} seviyesi olarak 0.163 ve 0.16 parametrik değerleri daha iyi sonuç veriyor olmasına rağmen hem yönlülük seviyesinde hem de yan lob seviyesinde α parametresinin 0.14 alındığı durumdan daha zayıf sonuçların elde edilmesidir. Bunun yanında $\alpha=0.15$ olduğu durumda daha yüksek yönlülük değeri elde edilmesine rağmen hem S_{11} değeri hem de yan lob seviyesinin daha düşük olması sebebiyle tasarıma aynı boyut alt tabaka ve aynı besleme genişliğiyle $\alpha=0.14$ alınarak devam edilmesine karar verilmiştir.

Sonuçları görsel olarak daha detaylı değerlendirebilmek adına Şekil 4.6 ve Şekil 4.7, $\alpha=0.14$ alındığında sırasıyla 21.7 GHz ve 25.8 GHz frekanslarında elde edilen ışıma örüntülerini göstermektedir.



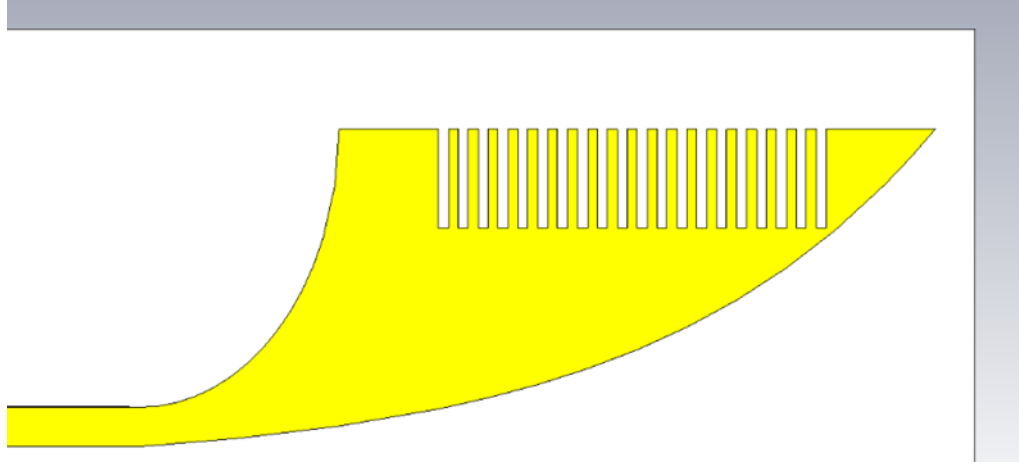
Şekil 4.6 : $\alpha=0.14$ olan sade yapıda AVA 21.7 GHz ışıma örüntüsü.



Şekil 4.7 : $\alpha=0.14$ olan sade yapıda AVA 25.8 GHz ışıma örüntüsü.

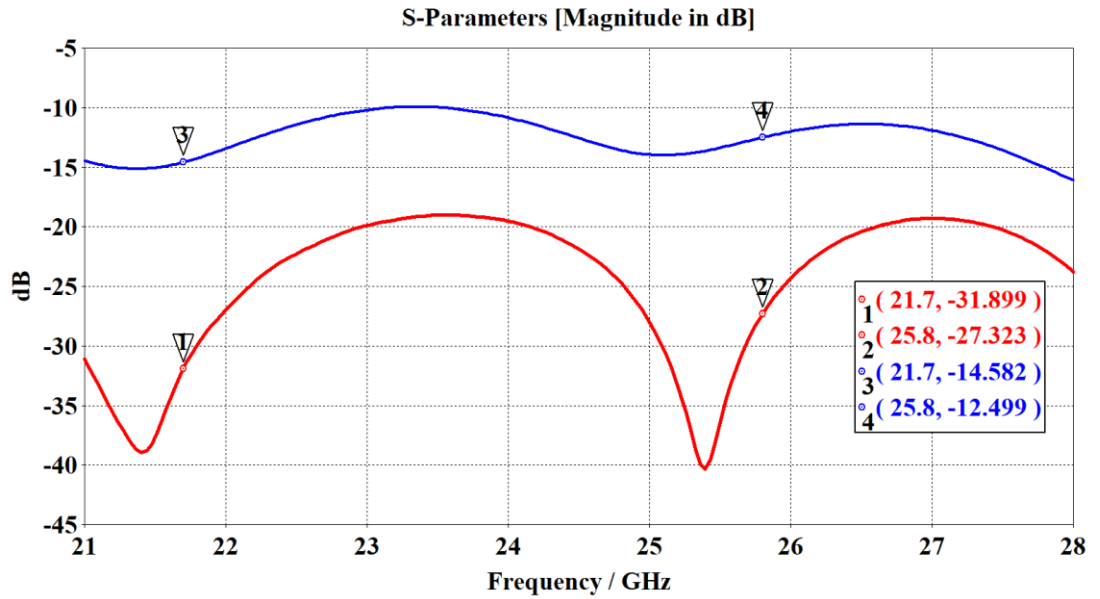
4.2 Tarak Şeklinde Yarıklı AVA Tasarımı

Antipodal Vivaldi antenin kabul gören karakteristik sorunlarından biri iyi bir ışıma performansı adına görece büyük boyutlara ihtiyaç duymasıdır [65]. Ancak YİPS gereksinimleri göz önüne alındığında ufak boyutlarda da S_{11} değerlerinde ve yan lob seviyelerinde daha fazla azalma ihtiyacı mevcuttur. Bahsi geçen parametrelerde performans artırımı adına tarak yapıda, dairesel yapıda, karesel yapıda veya daha farklı şekillerde yarıklar denenmektedir [63, 65-67]. Bu bağlamda ilgili performans parametrelerinde daha iyi sonuçlar elde edilmesi amacıyla antenin hem üst hem alt kısmına her bir anten biriminin aynı konumlarına yerleşecek şekilde tarak benzeri yarıklar açılmasına karar verilmiştir. Bu işlemde gerekli parametrik girdiler yarıkların sayısı ve yarıkların genişliğidir. Yarıkların genişliği besleme hattının çeyreği olacak şekilde 0.25 mm olarak seçilmiştir. Yarık sayısı ise ilk adımda yirmi olarak belirlenmiştir. Sade yapıda parametrik benzetimi yapılan α parametresi ise 0.14 değerinde tutulmuştur. Antenin alt tabaka boyutlarında herhangi bir değişikliğe gidilmemiş, sade yapıda AVA ile aynı boyutlarda tasarıma devam edilmiştir. Yirmi adet yarığa sahip antenin üstten görünümü Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Yirmi yarıklı AVA üstten görünümü.

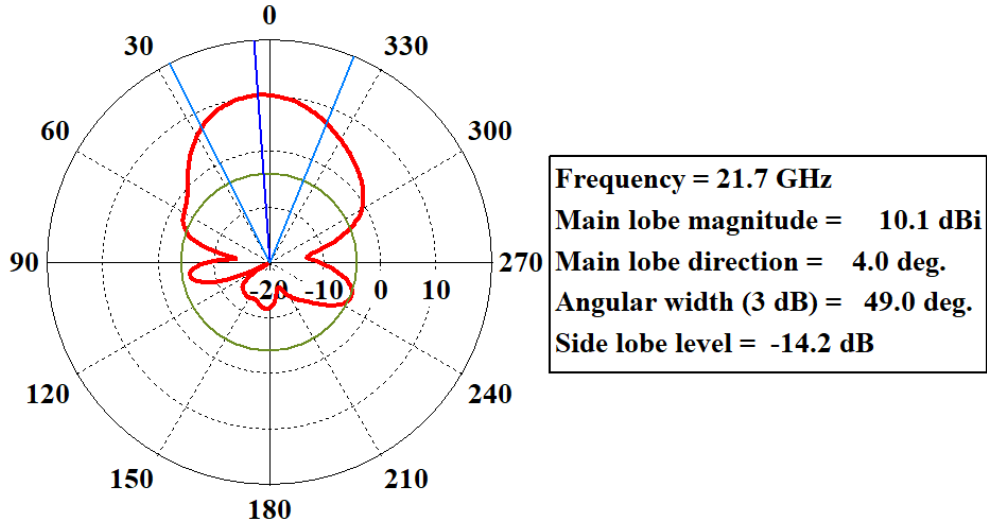
Elde edilen yapının S_{11} grafiği ise (sade yapıda elde edilen sonuçlarla beraber) Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Şekilde mavi eğri sade yapıyı, kırmızı eğri ise yirmi adet yarıklı yapıyı temsil etmektedir. Buna göre hedeflenen tüm ışıma bölgesinde S_{11} değerinde azalma sağlanmıştır. Orta frekanslara bakılacak olursa 21.7 GHz'de S_{11} değeri -14.5 dB değerinden -31.9 dB seviyesine, 25.8 GHz'de ise -12.5 dB değerinden -27.3 dB değerine inmiştir.



Şekil 4.9 : Yirmi yarıklı ve sade yapı AVA S_{11} karşılaştırması ($\alpha=0.14$).

Bu grafiğin haricinde yirmi yarıklı AVA yapısında elde edilen ışıma örüntüleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Buna göre 21.7 GHz'de hem yönlülük değeri yükselmiş hem de yan lob seviyesi azalmıştır. 25.8 GHz'de ise istenen iyileştirme gerçekleşmemiştir.

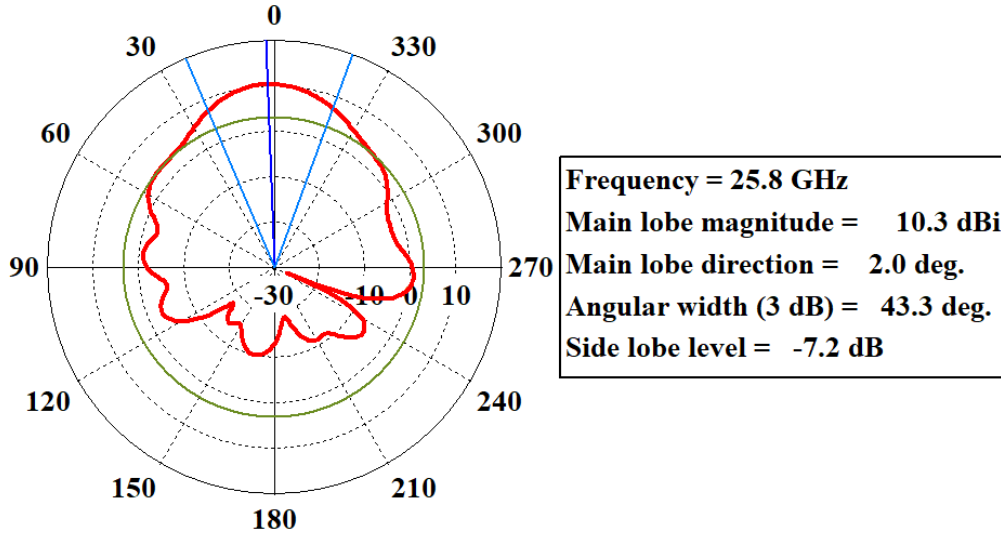
Farfield Directivity Abs (Theta=90)



Phi / Degree vs. dBi

Şekil 4.10 : Yirmi yarıklı AVA 21.7 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.

Farfield Directivity Abs (Theta=90)

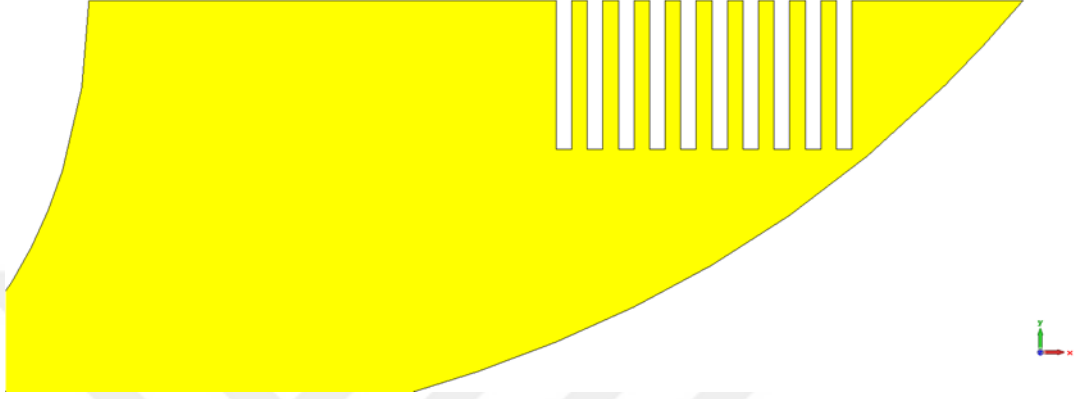


Phi / Degree vs. dBi

Şekil 4.11 : Yirmi yarıklı AVA 25.8 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.

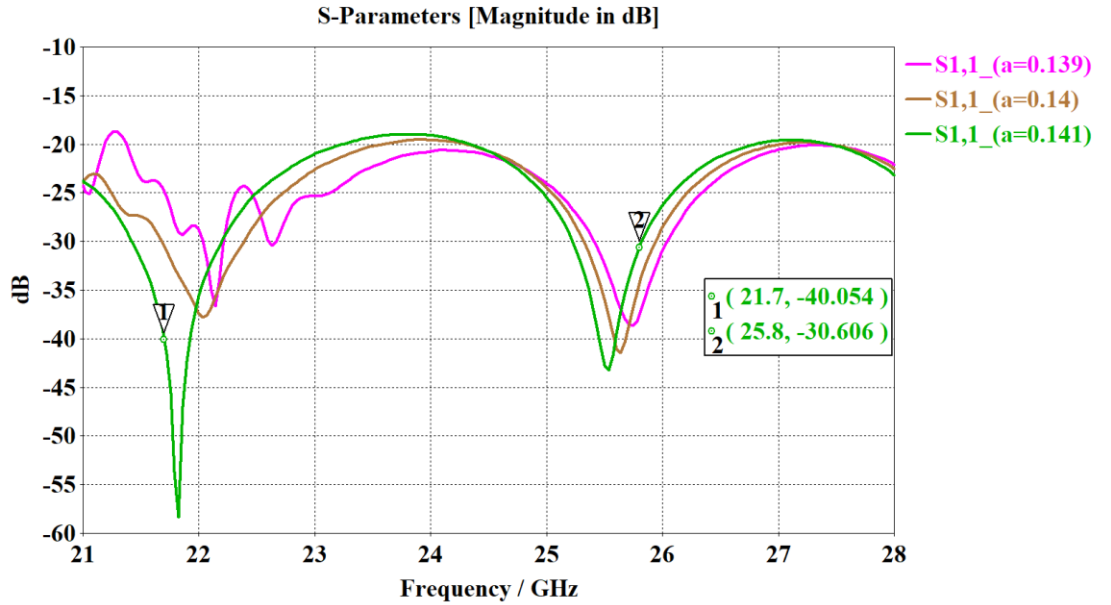
Elde edilen bu sonuçların ardından, yirmi adet yarığa sahip yapıdan on adet yarığa sahip yapıya geçilmesine ve yarıkların uzunluklarıyla ufak adımlarla oynanması için α parametresi etrafında parametrik benzetim yapılmasına karar verilmiştir. Tıpkı yirmi yarıklı yapıda olduğu gibi on yarıklı yapı oluşturulurken de alt tabaka boyutları sade

yapıda AVA ile aynı tutulmuştur. On adet yarığa sahip antenin üstten görünümü Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



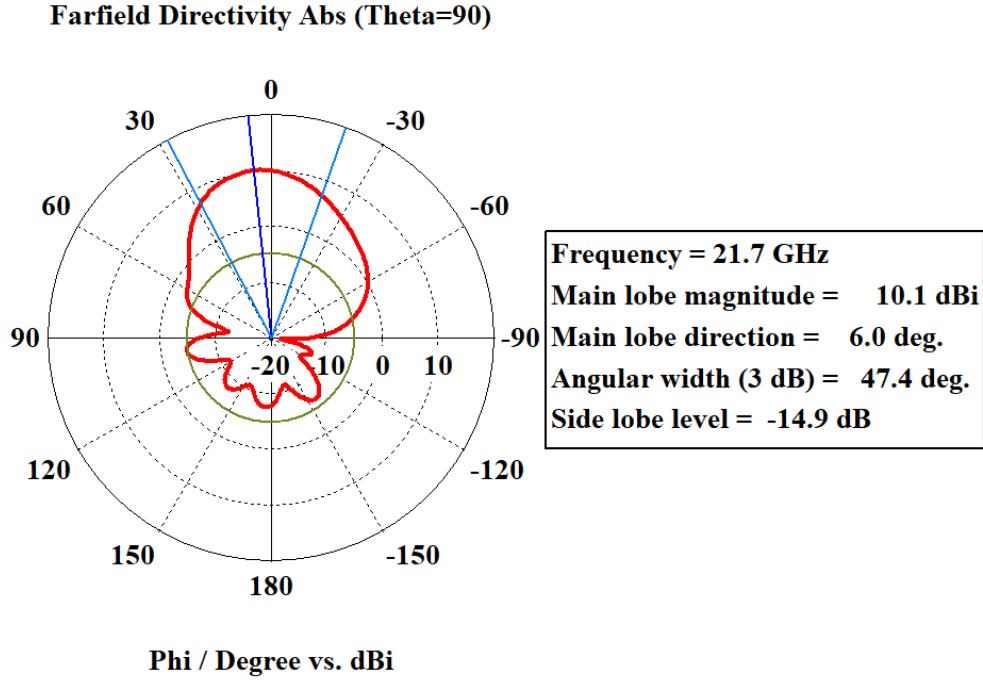
Şekil 4.12 : On yarıklı AVA üstten görünümü.

Yapılan benzetim sonuçlarına göre on yarıklı yapılar içerisinde $\alpha=0.141$ değerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen S_{11} grafiği Şekil 4.13’te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ilk ışınma bölgesinin orta frekansı 21.7 GHz’de S_{11} değeri -31.9 dB değerinden -40 dB değerine, diğer orta frekans 25.8 GHz’de ise S_{11} değeri -27.3 dB değerinden -30.6 dB değerine inmiştir.

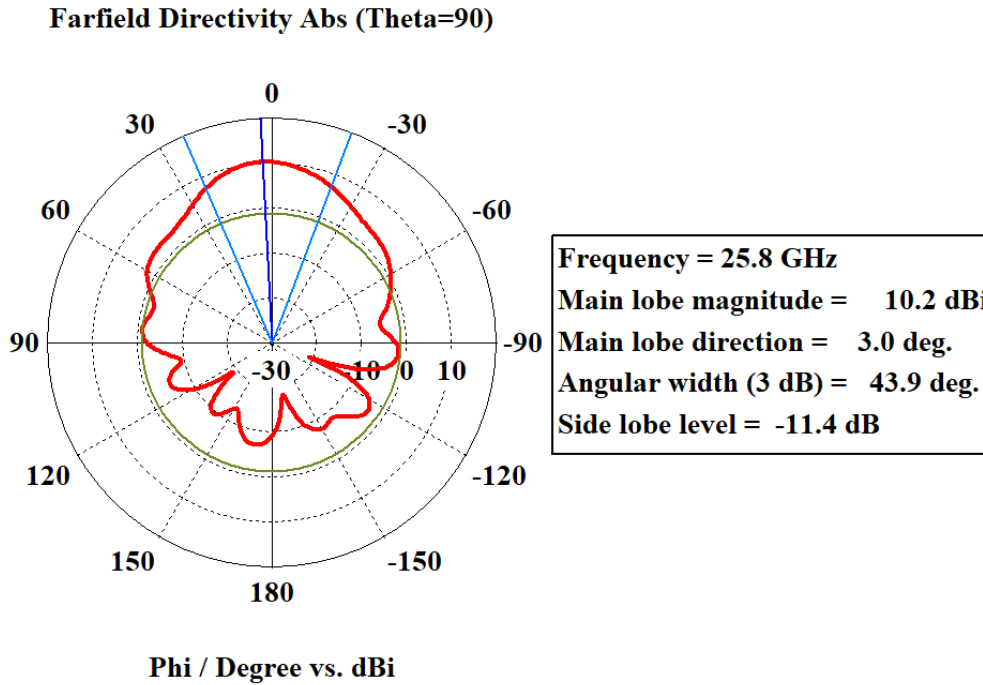


Şekil 4.13 : On yarıklı AVA S_{11} grafiği.

Bu sonucun yanında ışıma performanslarının detaylı şekilde değerlendirebilmesi için ışıma örüntüleri çıkarılmıştır. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 sırasıyla 21.7 GHz ve 25.8 GHz frekanslarında elde edilen kutupsal ışıma örüntülerini göstermektedir.



Şekil 4.14 : On yarıkli AVA 21.7 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.



Şekil 4.15 : On yarıkli AVA 25.8 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.

Yirmi yarıkli yapı ile sonrasında benzetimi yapılan on yarıkli yapı kıyaslanacak olursa, ilk orta frekans olan 21.7 GHz’de yönlülük değeri 10.1 dBi seviyesinde eşit elde

edilmiştir. Yan lob seviyesi olarak ise yirmi yarığa sahip anten -14.2 dB değerine sahipken on yarığa sahip antende bu değer -14.9 dB olarak elde edilmiştir. İki anten 25.8 GHz’de karşılaştırıldığında ise yönlülük değeri tıpkı ilk orta frekansta olduğu gibi neredeyse eşit kalmıştır. Yan lob seviyesi ise yirmi yarıklı antene göre 4.2 dB azalmıştır. Yarı güç hüzmeye genişliği parametresinde ise iki frekansta da dramatik bir değişim yaşanmamıştır. Sonuçların daha kolay kıyaslanması için Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’te iki orta frekansta da antenlerin önemli parametreler listelenmiştir.

Çizelge 4.3 : 21.7 GHz’de antenlerin önemli ışıma parametreleri.

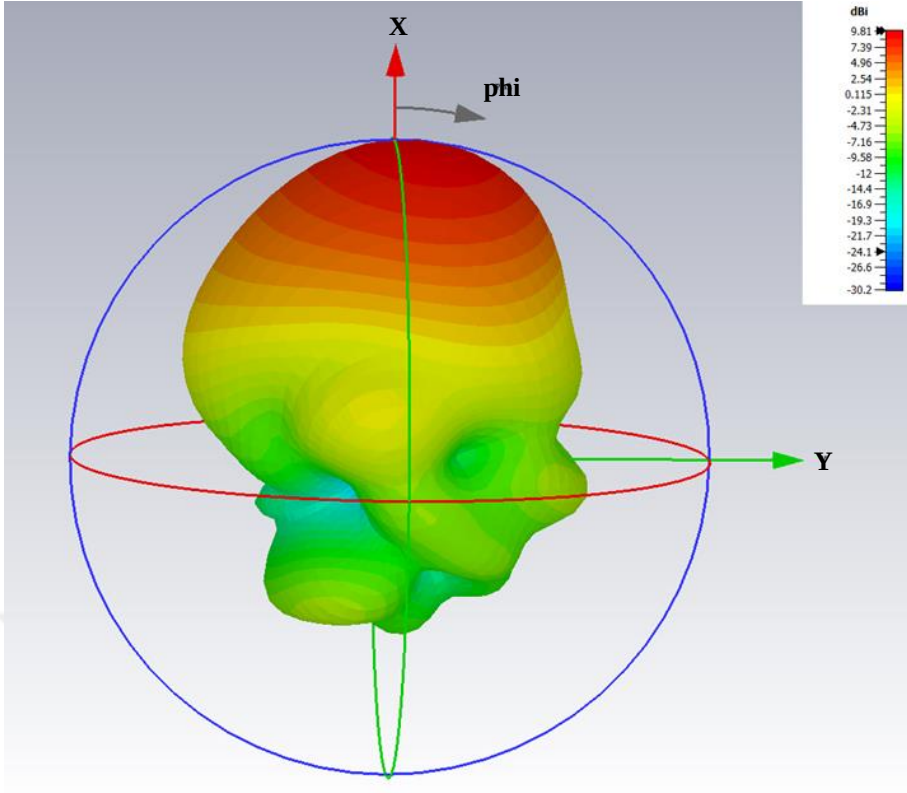
Yapı	S_{11} (dB)	Yönlülük (dBi)	Yan Lob Seviyesi (dB)
20 yarıklı	-31.9	10.1	-14.2
10 yarıklı	-40	10.1	-14.9

Çizelge 4.4 : 25.8 GHz’de antenlerin önemli ışıma parametreleri.

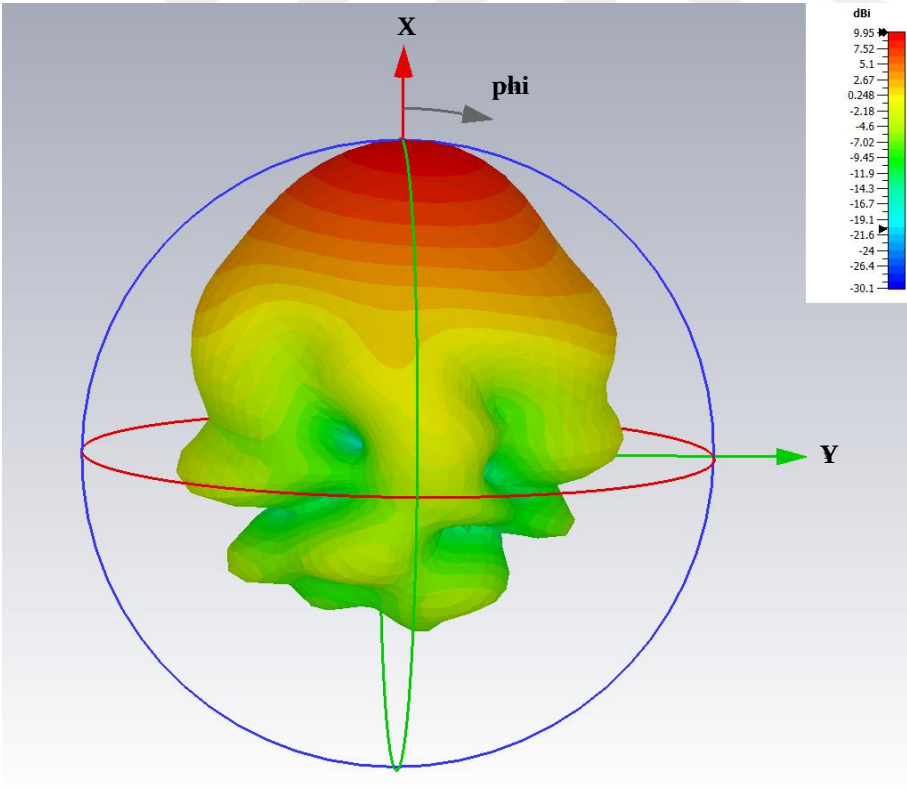
Yapı	S_{11} (dB)	Yönlülük (dBi)	Yan Lob Seviyesi (dB)
20 yarıklı	-27.3	10.3	-7.2
10 yarıklı	-30.6	10.2	-11.4

Sonuçlar analiz edildiğinde on yarıklı antenin optimum performans veren yapı olduğu değerlendirilmiştir. Bu nedenle dizi anten tasarımlarında on yarıklı antenin birim eleman olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

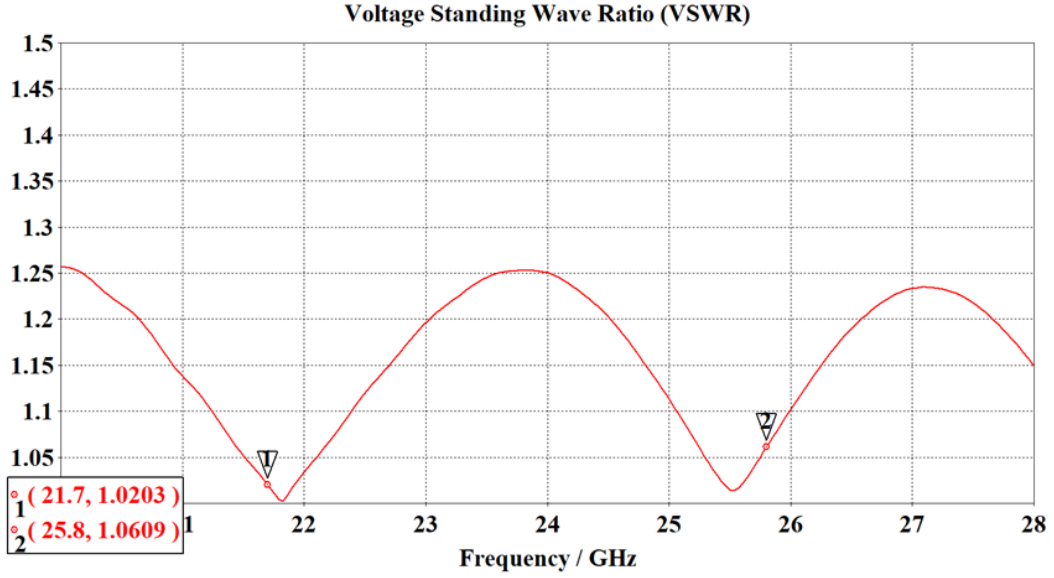
Dizi anten yapısının oluşturulmasından önce tekil yapı olarak kullanılması kararlaştırılan antenin kazanç ve VSWR gibi diğer önemli grafiklerinin çıkarılması kararlaştırılmıştır. Bu bağlamda elde edilen son antenin iki orta frekanstaki üç boyutlu kazanç grafikleri sırasıyla Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Buna göre 21.7 GHz frekansında 9.81 dBi olan kazanç değeri 25.8 GHz’de ise 9.95 dBi elde edilmiştir. Antenin VSWR grafiği ise Şekil 4.18’de gösterilmiştir. İki frekansta da teorik olarak ideal olan 1 değerine yakın VSWR değerleri bulunmuştur. Ayrıca yönlülük ve kazanç parametreleri kullanılarak antenin teorik ışıma verimliliği hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre antenin ilgili frekanslardaki kazanç, VSWR ve teorik ışıma verimliliklerinin listelendiği Çizelge 4.5 oluşturulmuştur.



Şekil 4.16 : On yarıklı AVA 21.7 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.



Şekil 4.17 : On yarıklı AVA 25.8 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.



Şekil 4.18 : On yarıklı AVA VSWR grafiği.

Çizelge 4.5 : On yarıklı AVA önemli ışıma parametreleri.

Frekans (GHz)	Kazanç (dBi)	İşıma Verimliliği	VSWR
21.7	9.81	%93	1.02
25.8	9.95	%94	1.06

Çizelgeden de görülebileceği üzere antenin teorik ışıma verimliliği her iki orta frekansta da %93 ve üzerinde elde edilmiştir. Parametrelerin ortaya konmasıyla tekil yapıda AVA tasarımı tamamlanmıştır. Tasarımın tamamlanmasının ardından tekil yapıda en başarılı sonucu veren on adet yarığa sahip bu antenin, literatürde bulunan benzer yapıdaki antenler ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Literatürde bulunan çalışmalardan birinde, tıpkı bizim çalışmamızda olduğu gibi, alt tabaka malzemesi olarak Rogers RO4000C kullanılan ve tarak şeklinde yarıklara sahip AVA tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan anten, ITU Bölge 2 için açıklanan YİPS hizmet bölgelerinden 24.25-27.5 GHz frekans aralığında da ışıma yapabilmektedir. İlgili kaynakta tasarlanan AVA, yaptığımız çalışmada tasarladığımız tekil antenden daha büyük boyuttadır ($50 \times 24.21 \times 0.8 \text{ mm}^3$) ve ilgili frekans bandında 9-9.8 dBi aralığında kazanç değerlerine sahiptir. Antenin 25.8 GHz frekansında ise yaklaşık 9.5 dBi seviyesinde kazancı vardır [62]. Çalışmamızda tasarlanan AVA boyut parametresinde daha avantajlı konumdadır. Ayrıca 25.8 GHz orta frekans değerinde 9.95 dBi kazanç elde edilmiş olup bu parametrede de daha başarılıdır.

Bir başka çalışmada FR-4 alt tabaka malzemesi ile tasarlanan ve yine aynı frekans aralığında çalışabilen bir antipodal Vivaldi anten mevcuttur. Tarak şeklinde yarıklarının yanında metamalzeme de kullanılan bu antenin boyutu 40 mm x 24 mm x 1.6 mm olup 24.25-27.5 GHz frekans bandında 7-9 dB aralığında kazanç değerine sahiptir. Bunun yanında antenin, ilgili ışıma bölgesinin orta frekansı olan 25.8 GHz’de ise kazancı 7 dB seviyesindedir [63]. Bu anten, yaptığımız çalışmada tasarlanan AVA karşısında maliyet olarak avantajlı olsa da kazanç ve boyut parametrelerinde daha zayıf kalmaktadır.

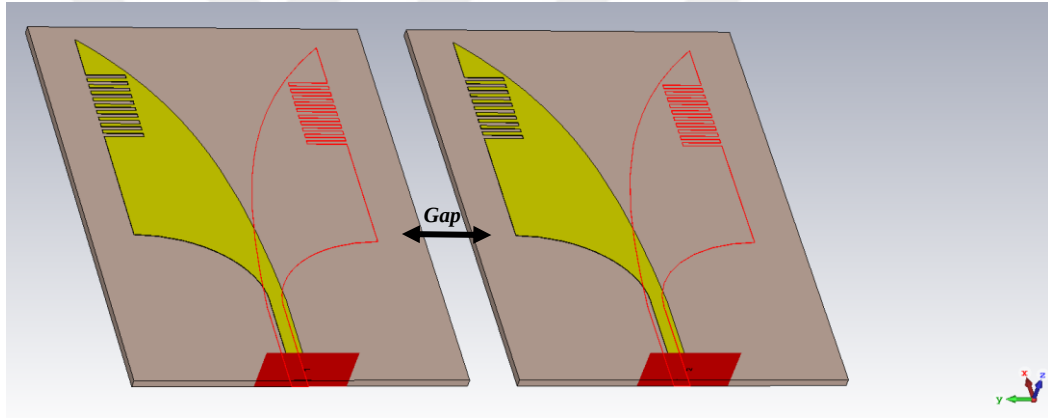
Bir diğer çalışmada tasarlanan tekil yapıdaki AVA ise yine 24.25-27.5 GHz frekans aralığında ışıma yapabilmektedir. Nispeten pahalı bir malzeme olan Rogers RT/Duroid 5880 ile tasarlanan antenin boyutları 13.5 mm x 6.8 mm x 0.508 mm şeklindedir. İlgili antenin kazancı bu frekans bölgesinde 8 dBi ila 9.5 dBi arasında değişmektedir ve 25.8 GHz orta frekansında ise yaklaşık 9 dBi seviyesindedir [65]. İlgili çalışmadaki anten, boyut olarak çalışmamızda tasarlanan tekil antenden ufak olmasına rağmen maliyeti yüksektir. Ayrıca bahsi geçen çalışmadaki AVA, kazanç parametresi açısından gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada tasarlanan tekil AVA ile kıyaslandığında yaklaşık 1 dB oranında düşüktür.

Son olarak başka bir kaynakta tasarlanan ve 24.25-27.5 GHz aralığında ışıma yapabilen tekil yapıdaki AVA’nın boyutları 6 mm x 20 mm x 0.254 olup Rogers RT/Duroid 5880 alt tabaka malzemesi kullanılmıştır. Antenin ilgili frekans aralığının tamamında kazancı yaklaşık 4.1 dBi seviyesindedir [67]. Boyut olarak oldukça küçük ve kompakt olan anten, maliyet açısından çalışmamızda tasarlanan antene nazaran dezavantajlıdır. Bunun yanında kazanç parametresinde (orta frekans baz alındığında) yaklaşık 6 dB oranında daha düşük seviyededir. Literatür karşılaştırmasının ardından tasarımın sonraki aşamasında performans parametreleri açısından en iyi sonucun elde edildiği on adet yarıklı bu anten kullanılarak iki elemanlı dizi AVA elde edilmiştir.

4.3 1x2 Dizi Yapıda AVA Tasarımı

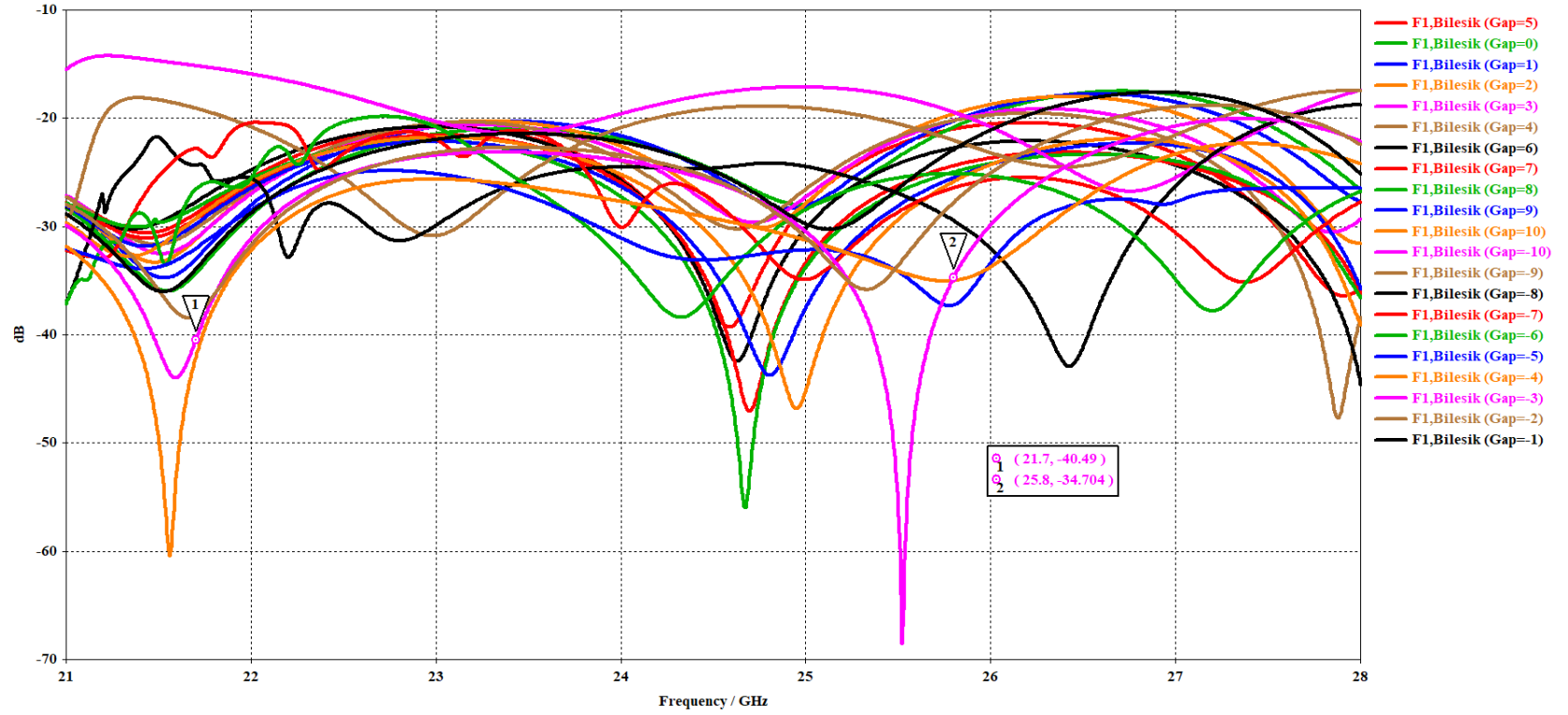
Tekil antene oranla daha yüksek yönlülük ve kazancın haricinde daha dar ışık hüzmesini de bir arada getirmesinin beklendiği 1x2 dizi AVA tasarımında, en iyi ışıma performansının sağlandığı on adet yarığa sahip tekil yapıdaki anten birim eleman olarak kullanılmıştır. İki birimli yapıya geçişte ilk olarak Şekil 4.19’da gösterildiği

üzere, tekil anten yapısı birebir şekilde kopyalanmış olup iki birim arasındaki mesafeye “Gap” isminde bir parametre atanmıştır. Parametrenin pozitif sonuçlarında bahsi geçen boşluk alt tabaka ile kaplanacak, negatif değerlerde ise iki birimin alt tabakaları birbiri içerisinde geçecektir. Parametrenin 0 değerini aldığı durumda ise iki anten birimi yan yana eklenmiş olacaktır. Buna göre bahsi geçen benzetim işleminde, iki birim antenin ideal koşullarda birlikte nasıl bir performans vereceğinin saptanması amaçlanmıştır. Antenlerin eş besleme genlikleri ayarlanırken benzetim programının rehberinde bulunan denklemler kullanılmıştır [68]. Gerçekleştirilen benzetimde bu portların aynı anda çalıştığı durum ele alınmıştır. CST Studio Suite programında iki portun aynı anda benzetimi yapılırken yansımaları değerlendirmek adına S parametresi kullanılmaz. Bunun yerine, gelen ve yansıyan spektrumlar, tamamı referans sinyalinin spektrumuna göre normalize edilmiş olan gelen ve yansıyan F parametreleri olarak verilir [69]. Portların aynı anda çalıştığı senaryoya “Bileşik” ismi verilmiştir.



Şekil 4.19 : İki elemanlı dizi ve boşluk yapısı benzetimi.

“Gap” parametresinin -10 ile 10 değerleri arasında değişeceği şekilde parametrik benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemle 1x2 yapıdaki dizi antenin alt tabaka boyutları belirlenmiştir. Buna göre tüm boşluk mesafelerinde elde edilen F parametreleri Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, özellikle hedef frekans bölgelerinden ikincisinde daha iyi sonuç elde edilen, “Gap” parametresinin -3 değerini aldığı benzetimin en optimum yapısıdır. Bu durumda 21.7 GHz’de F parametresinin değeri -40.49 dB bulunurken 25.8 GHz’de ise -34.7 dB değerini almıştır. Böylece optimum senaryoda antenin her iki yüzeyinde bulunan eş anten yamaları arasındaki mesafe 17 mm olmuştur ve alt tabaka boyutu ise 37 mm x 27 mm haline gelmiştir.

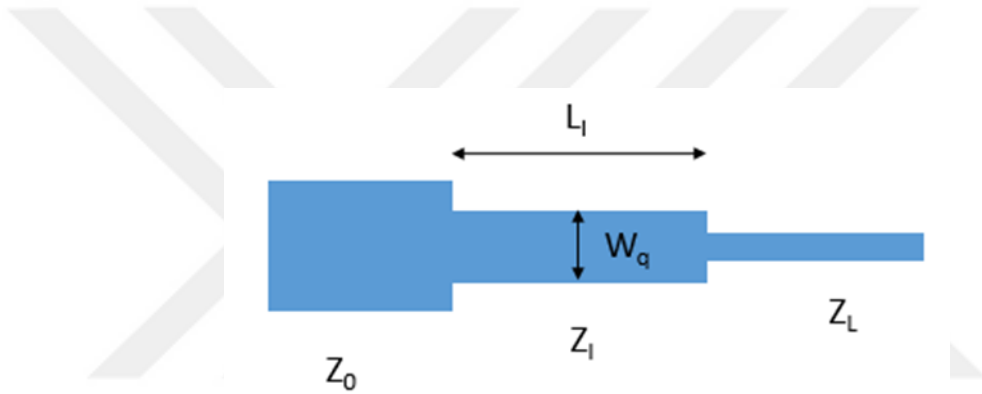


Şekil 4.20 : 1x2 dizi AVA F parametresi grafiği.

Bu işlemin ardından besleme yapısının teke düşeceği senaryoda iki birim anten arasındaki besleme yapısının oluşturulması aşamasına geçilmiştir. 1x2 dizi antenin besleme yapısı oluşturulurken literatürde bulunan iki adet mikroşerit yapıdan yararlanılmıştır. Bunlardan biri çeyrek dalga dönüştürücüsü diğeri ise mikroşerit dönemeçtir. Çeyrek dalga dönüştürücünün temsili çizimi Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Dönüştürücünün empedansının ve uzunluğunun hesaplamasında ise aşağıda tanımlanan (4.4) ve (4.5) denklemleri kullanılmıştır [70].

$$Z_I = \sqrt{Z_0 Z_L} \quad (4.4)$$

$$L_I = \frac{\lambda}{4} \quad (4.5)$$



Şekil 4.21 : Çeyrek dalga dönüştürücü boyutları.

Buna göre tasarımın en başında kararlaştırılmış olan 50 Ω karakteristik empedans (Z_0) ve 100 Ω olacak yük empedansı (Z_L) formülde yerlerine konularak Z_I değeri 70.71 Ω olarak bulunmuştur. λ değeri belirlenirken antenin çalışacağı tüm frekans bandının ortak noktası düşünülmüştür. Bu bağlamda λ değeri 12 mm seçilmiş ve L_I uzunluğu 3 mm olarak belirlenmiştir. W_q kalınlık parametresi ise CST Studio Suite programının kendi hesaplayıcısı ile 70.7 Ω değeri adına 0.62 mm olarak bulunmuştur. Bunun haricinde benzetim programının aynı özelliğinden yararlanılarak Z_L empedansına sahip mikroşerit hattın kalınlığı 0.28 mm hesaplanmıştır. Çeyrek dalga dönüştürücünün tüm boyutları Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 : Mikroşerit çeyrek dalga dönüştürücüsü boyutları.

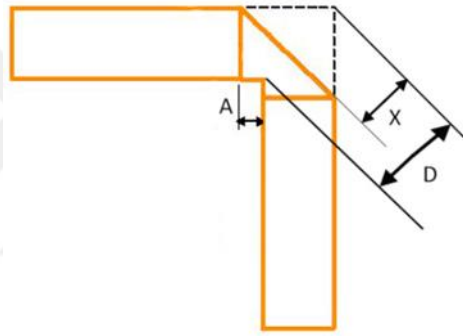
Z_I	L_I	W_q
70.71 Ω	3 mm	0.62 mm

Bu hesaplamanın ardından T-jonksiyon şeklinde oluşturulacak besleme yapısının 90° döndüğü yerlerde yansımaları azaltmak için mikroşerit dönemeç modeli hesaplamaları yapılmıştır [71]. Bu görev için tasarlanacak dönemeçin şeklinin gönyeburun olmasına karar verilmiştir. Mikroşerit gönyeburun dönemeçin parametreleri denklem (4.6), denklem (4.7) ve denklem (4.8) ile belirlenmiştir [72]. Mikroşerit dönemeçin temsili görseli Şekil 4.22’de verilmiştir.

$$D = W_L \sqrt{2} \quad (4.6)$$

$$X = D \left(0.52 + 0.65 \exp \left(-1.35 \frac{W_L}{h} \right) \right) \quad (4.7)$$

$$A = \left(X - \frac{D}{2} \right) \sqrt{2} \quad (4.8)$$



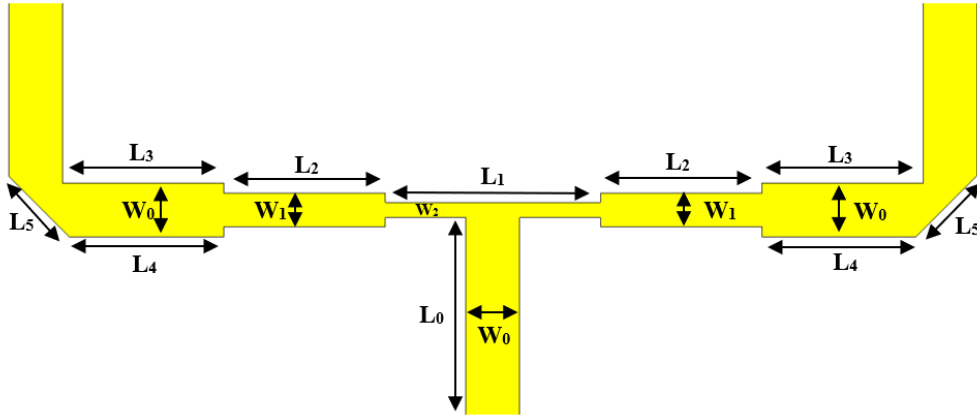
Şekil 4.22 : Mikroşerit dönemeç boyutları.

Burada (4.6) denkleminde D kare köşegenin uzunluğunu temsil ederken, W_L iletim hattının genişliğini ifade etmektedir. Sonraki formülde ise merkez köşe dönemeç yüksekliği X ile belirtilmiştir. En uygun bükülme alan kenar uzunluğu ise A ile ifade edilmiştir. 1x2 dizi AVA yapısında bu dönemeç 50Ω mikroşerit hatta yer alacağından W_L değeri tıpkı antenin beslemesi gibi 1 mm olarak alınmıştır. Buna göre D değeri (4.6) eşitliğinden 1.41 mm olarak bulunmuştur. Bu sonucun ardından W_L ve D parametrelerinin yanında, tasarımda 0.508 mm değerinde olan h parametresi de hesaba katılarak (4.7) eşitliği yardımı ile X değeri 0.79 mm olarak hesaplanmıştır. Son olarak X ve D parametreleri ile (4.8) denklemi kullanılarak A parametresi 0.13 mm olarak elde edilmiştir. Mikroşerit gönyeburun dönemeç modeli tüm parametreleri Çizelge 4.7’de listelenmiştir.

Çizelge 4.7 : Mikroşerit dönemeç parametreleri.

D	X	A
1.41 mm	0.79 mm	0.13 mm

Mikroşerit çeyrek dalga dönüştürücüsü ve dönemeç modellerinin belirlenmesinin ardından bu iki yapı kullanılarak bir T-jonksiyon besleme yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yapının boyutları parametrik halde Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



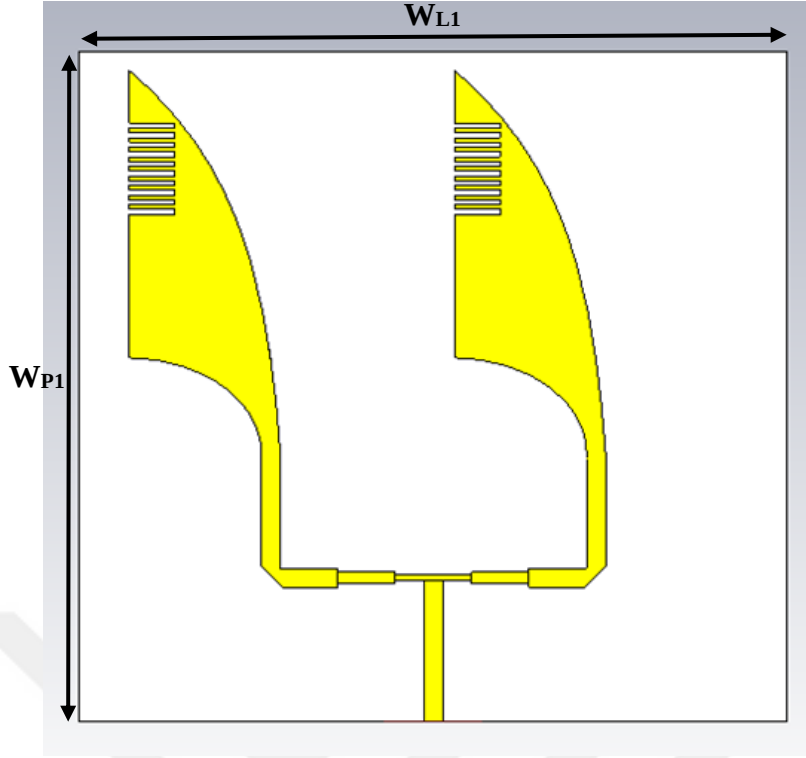
Şekil 4.23 : 1x2 dizi AVA besleme yapısı.

Şekilde verilen genişlik ve uzunlukları temsil eden parametrelerin değerlerini Çizelge 4.8'de listelenmiştir.

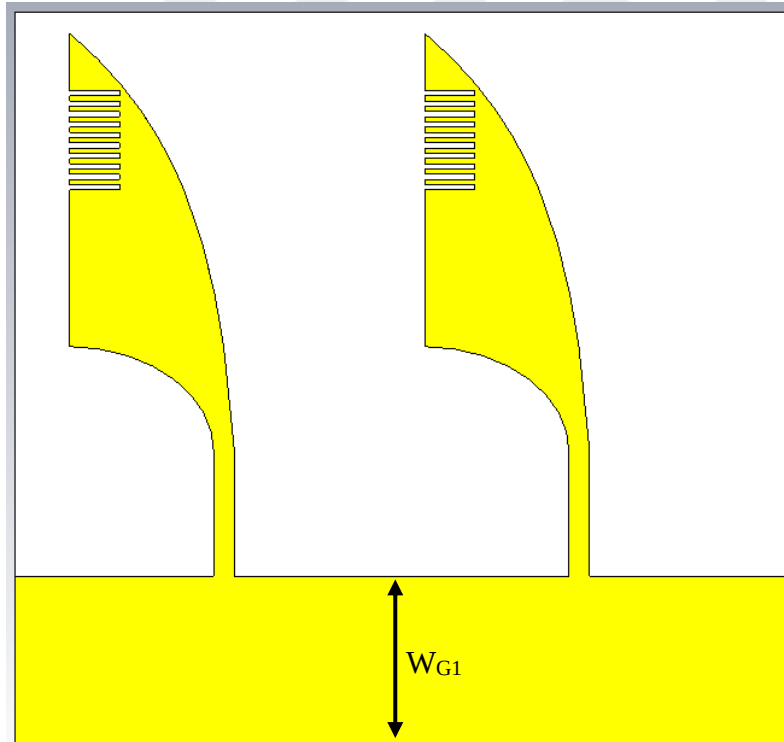
Çizelge 4.8 : Mikroşerit dönemeç parametreleri.

Parametre	Uzunluk (mm)
W_0	1
W_1	0.62
W_2	0.28
L_0	7.36
L_1	4
L_2	3
L_3	3
L_4	2.87
L_5	1.60

Besleme yapısı için yapılan bu hamlelerin ardından 1x2 dizi AVA toprak düzleminde ise üretim aşamasında kullanılabilecek olan konnektörler araştırılmış ve ilgili konnektörlerin ayaklarının tutturulması işlemi düşünülerek 8 mm artırıma gidilmiştir ($W_{G1}=8\text{mm}$). Besleme hattı ve toprak düzlemi yapısı oluşturulan 1x2 dizi antipodal Vivaldi antenin ilgili boyutları sırasıyla Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Buna göre 1x2 dizi AVA alt tabaka yüzey boyutları 37 mm x 35 mm olacak şekilde ($W_{L1}=37\text{mm}$, $W_{P1}=35\text{mm}$) tasarım tamamlanmıştır.

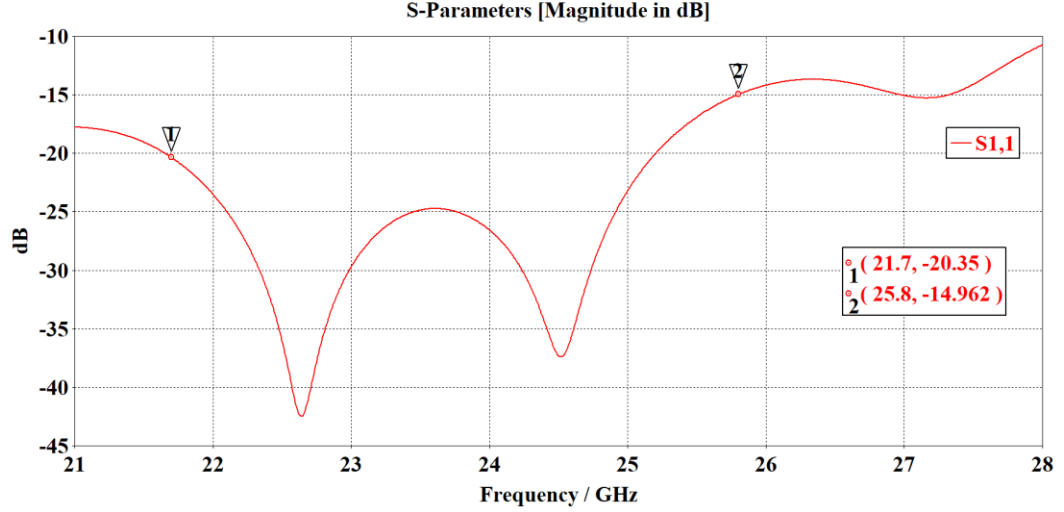


Şekil 4.24 : 1x2 dizi AVA üst yüzey boyutları.



Şekil 4.25 : 1x2 dizi AVA alt yüzey boyutları (toprak düzlemi).

Anten yapısının tamamlanmasının ardından 21-28 GHz aralığında benzetimi yapılmıştır. Yapılan benzetim sonucunda elde edilen S_{11} grafiği Şekil 4.26'da verilmiştir.

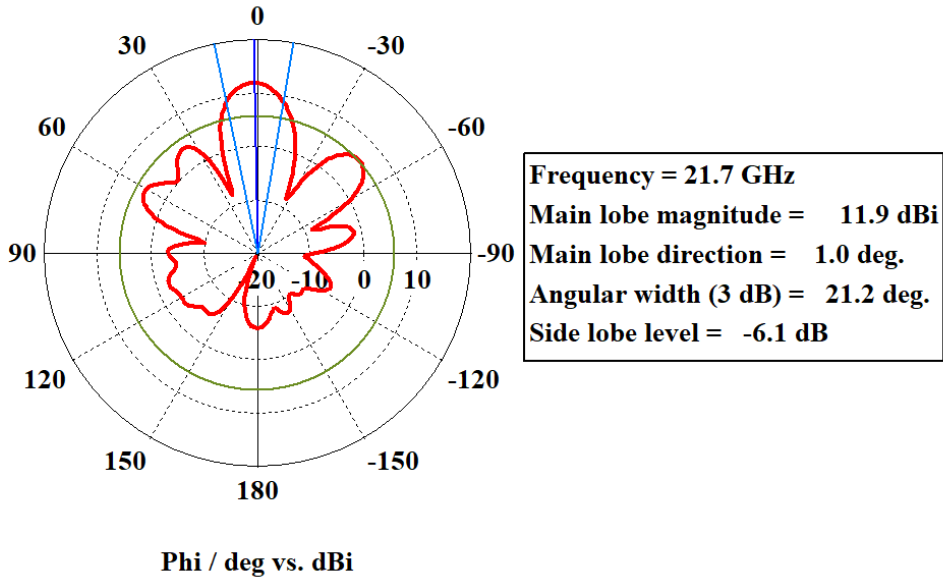


Şekil 4.26 : 1x2 dizi AVA S₁₁ grafiği.

Şekilden de görülebileceği üzere hedeflenen iki ışıma bölgesinin tamamında S₁₁ değeri -10 dB'nin altında kalmıştır. 21.7 GHz'de S₁₁ değeri -20.35 dB bulunurken 25.8 GHz'de bu parametre yaklaşık -15 dB seviyesinde elde edilmiştir.

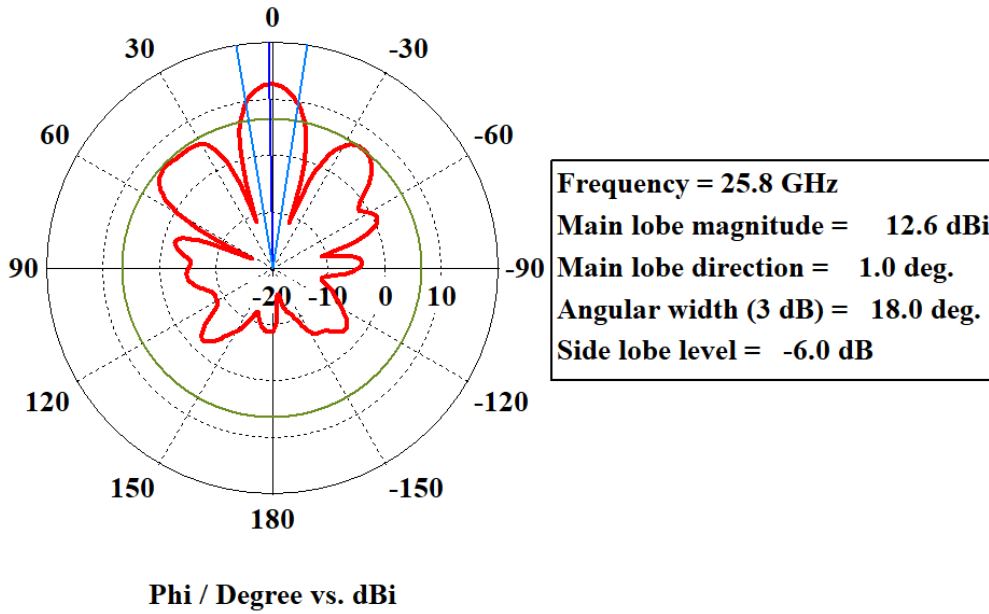
Tasarlanan 1x2 dizi antenin 21.7 GHz ve 25.8 GHz'deki yönlülük değerlerini gösteren ışıma örüntüleri ise sırasıyla Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği üzere 1x2 dizi antenin 21.7 GHz'deki yönlülük değeri 11.9 dBi iken 25.8 GHz'deki yönlülük değeri 12.6 dBi olarak bulunmuştur. Ayrıca 21.7 GHz'de yan lob seviyesi -6.1 dB seviyesindeyken 25.8 GHz'de yine bu değere çok yakın şekilde -6 dB olarak elde edilmiştir. Bunların haricinde 21.7 GHz'de yarım güç hüzmeye genişliği 21.2° olarak bulunurken 25.8 GHz'de bu parametre 18° ile daha düşük bir değer almıştır.

Farfield Directivity Abs (Theta=90)



Şekil 4.27 : 1x2 dizi AVA 21.7 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.

Farfield Directivity Abs (Theta=90)



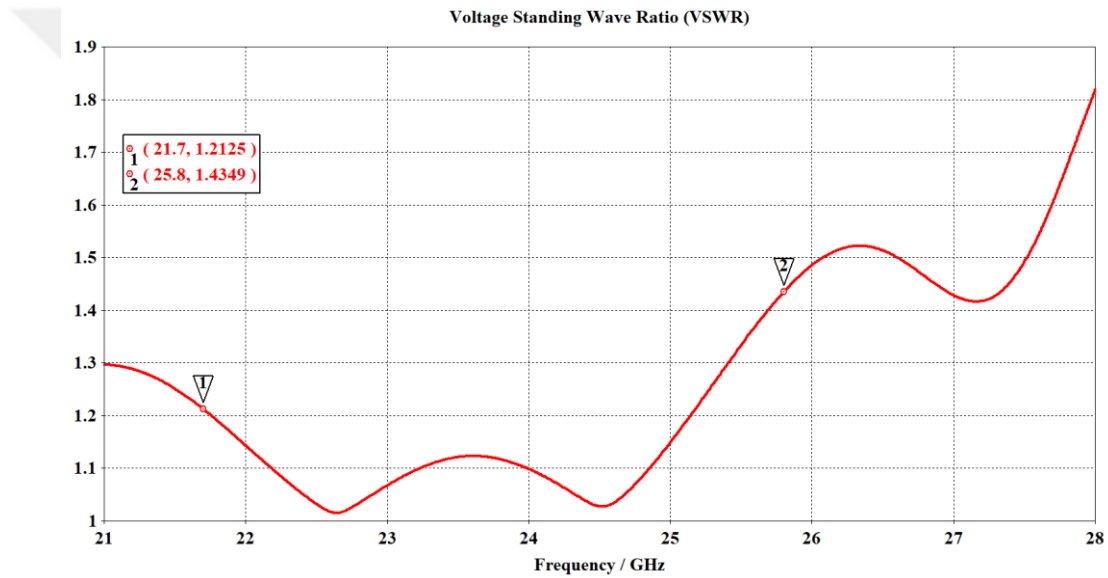
Şekil 4.28 : 1x2 dizi AVA 25.8 GHz kutupsal ışıma örüntüsü.

Çizelge 4.9'da 1x2 dizi yapısının hem tekil yapı hem de 1x4 dizi yapısı ile karşılaştırmasının daha kolay yapılabilmesi için yönlülük, yan lob seviyesi ve yarım güç hüzmeye genişliği gibi parametreleri listelenmiştir. Bahsi geçen karşılaştırmaya 1x4 dizi AVA yapısının tasarım aşamalarının anlatıldığı bölümün ardından yer verilmiştir.

Çizelge 4.9 : 1x2 dizi AVA ışıma örüntüsü parametreleri-I.

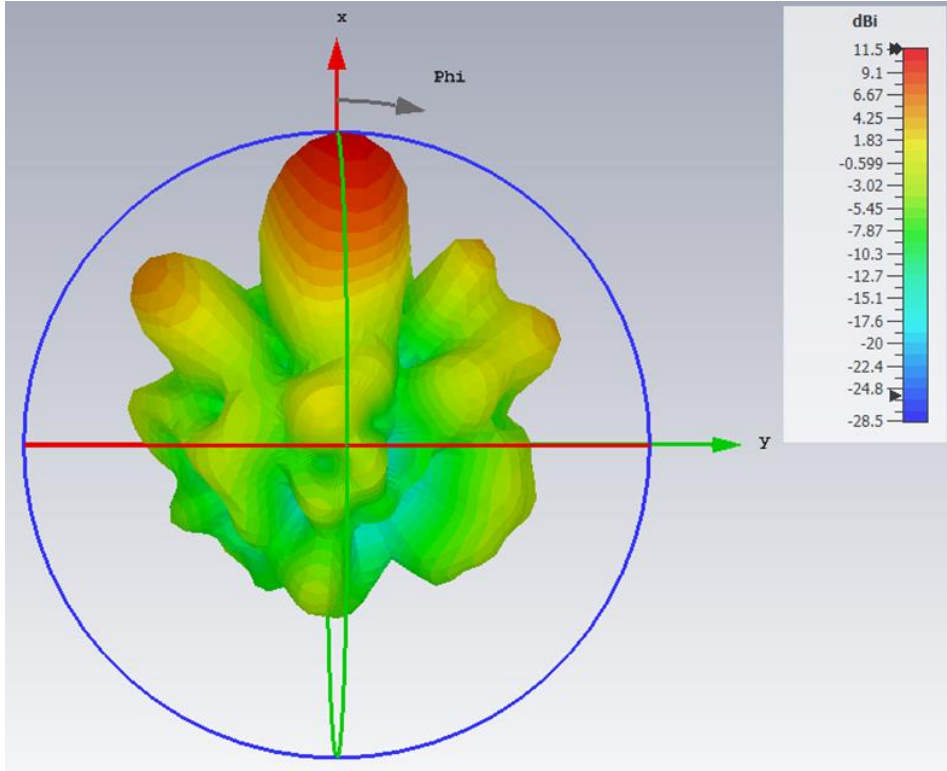
Frekans	Yönlülük (dBi)	Yan Lob Seviyesi (dB)	HPBW
21.7 GHz	11.9	-6.1	21.2°
25.8 GHz	12.6	-6	18°

Bu sonuçların yanı sıra tıpkı tekil yapıda AVA tasarımında olduğu gibi 1x2 dizi AVA yapısının da VSWR ve kazanç gibi diğer önemli parametrelerinin gösterildiği benzetim sonuçları çıkartılmıştır. Bu bağlamda ilgili yapının VSWR grafiği Şekil 4.29'da gösterilmiştir. İyi bir ışıma adına teorik olarak maksimum 2 olarak hesaplanması gereken VSWR, 21.7 GHz'de 1.21 değerini alırken 25.8 GHz'de 1.4 seviyesindedir.

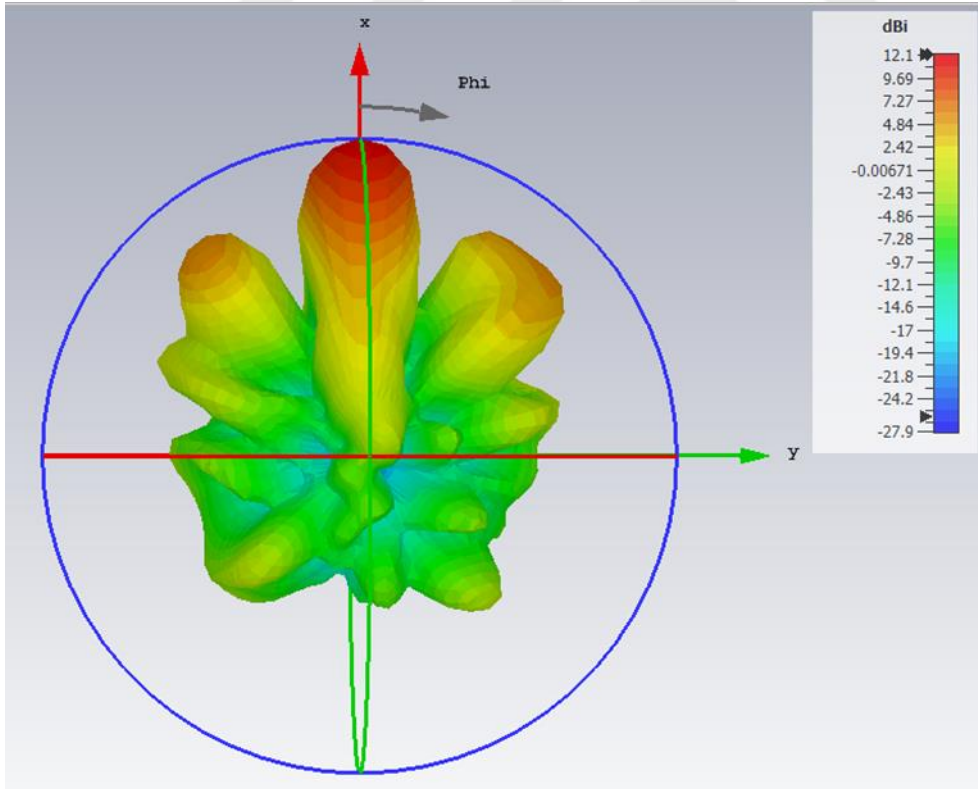


Şekil 4.29 : 1x2 dizi AVA VSWR grafiği.

1x2 dizi AVA yapısının hedef ışıma bölgelerinin merkez frekanslarındaki üç boyutlu kazanç grafikleri ise sırasıyla Şekil 4.30 ve Şekil 31'de gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği üzere 21.7 GHz'de kazanç değeri 11.5 dBi, 25.8 GHz'de ise kazanç değeri 12.1 dBi olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.30 : 1x2 dizi AVA 21.7 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.



Şekil 4.31 : 1x2 dizi AVA 25.8 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.

Bu sonuçlara binaen dizi antenin orta frekanslardaki kazanç ve VSWR değerlerinin haricinde teorik ışıma verimliliklerini de listelendiği Çizelge 4.10 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.10 : 1x2 dizi AVA ışıma örüntüsü parametreleri-II.

Frekans (GHz)	Kazanç (dBi)	İşıma Verimliliği	VSWR
21.7	11.5	%91	1.21
25.8	12.1	%89	1.4

Performans parametrelerinin hem tekil yapıdaki AVA hem de 1x2 dizi AVA için elde edilmesinin ardından 1x2 dizi antenin beklenen sonuçları verip veremediğinin değerlendirilmesi aşamasına geçilmiştir. Bu bağlamda her iki orta frekansta tekil yapıya göre artması beklenen yönlülük ve kazanç parametrelerinin yanı sıra azalması beklenen yarı güç hüzmeye genişliği parametresinin de sonuçlarının işlendiği Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12 oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre 21.7 GHz’de tekil yapıda 10.1 dBi değerini alan yönlülük 11.9 dBi mertebesine yükselirken, kazanç parametresi ise 9.81 dBi değerinden 11.5 dBi değerine gelmiştir. İlgili frekansta ışıma verimliliğinin neredeyse korunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca daha dar ışıma hüzmeye isteyen uygulamaları hedefleyecek olan dizi anten yapısında ilgili frekansta yarı güç hüzmeye genişliği 47.4° değerinden 21.2° değerine inmiş olup hedeflenen doğrultuda gelişim gösterilmiştir. 25.8 GHz frekansında ise antenin yönlülük parametresi 10.2 dBi’den 12.6 dBi seviyesine yükselmiştir. Bunun yanında kazanç değeri tekil yapıda 9.95 dBi iken 1x2 dizi yapısında bu parametre 12.1 dBi değerine gelmiştir. Antenin teorik ışıma verimliliği ise %94’ten %89’a gerilemiştir. Yarı güç hüzmeye genişliği ise önceki durumda 43.9° olarak elde edilmiş iken 1x2 dizi yapısında 18°’ye kadar düşmüştür.

Çizelge 4.11 : 21.7 GHz’de tekil AVA ile 1x2 dizi AVA karşılaştırılması.

Anten Yapısı	Yönlülük (dBi)	Kazanç (dBi)	İşıma Verimliliği	HPBW
Tekil	10.1	9.81	%93	47.4°
Dizi (1x2)	11.9	11.5	%91	21.2°

Çizelge 4.12 : 25.8 GHz’de tekil AVA ile 1x2 dizi AVA karşılaştırılması.

Anten Yapısı	Yönlülük (dBi)	Kazanç (dBi)	İşıma Verimliliği	HPBW
Tekil	10.2	9.95	%94	43.9°
Dizi (1x2)	12.6	12.1	%89	18°

Her iki hedef ışıma bölgesinin orta frekanslarındaki sonuçlar değerlendirildiğinde, dizi AVA yapısı tasarlanırken hedeflenen yönlülük ve kazanç artışının yanı sıra daha dar hüzmeye açısı kriteri de sağlandığı görülmektedir. Tasarımın sonraki aşamasında ise

hedef, 1x2 dizi yapısını çoğullayarak üretimi planlanan 1x4 dizi yapısına geçilmesi ve 1x2 dizi yapısında gelişim gözlenen parametrelerin daha da iyi seviyeye gelmesi olmuştur. Bu bağlamda tasarlanan 1x4 dizi AVA yapısına dair detaylar bir sonraki bölümde işlenmiştir.

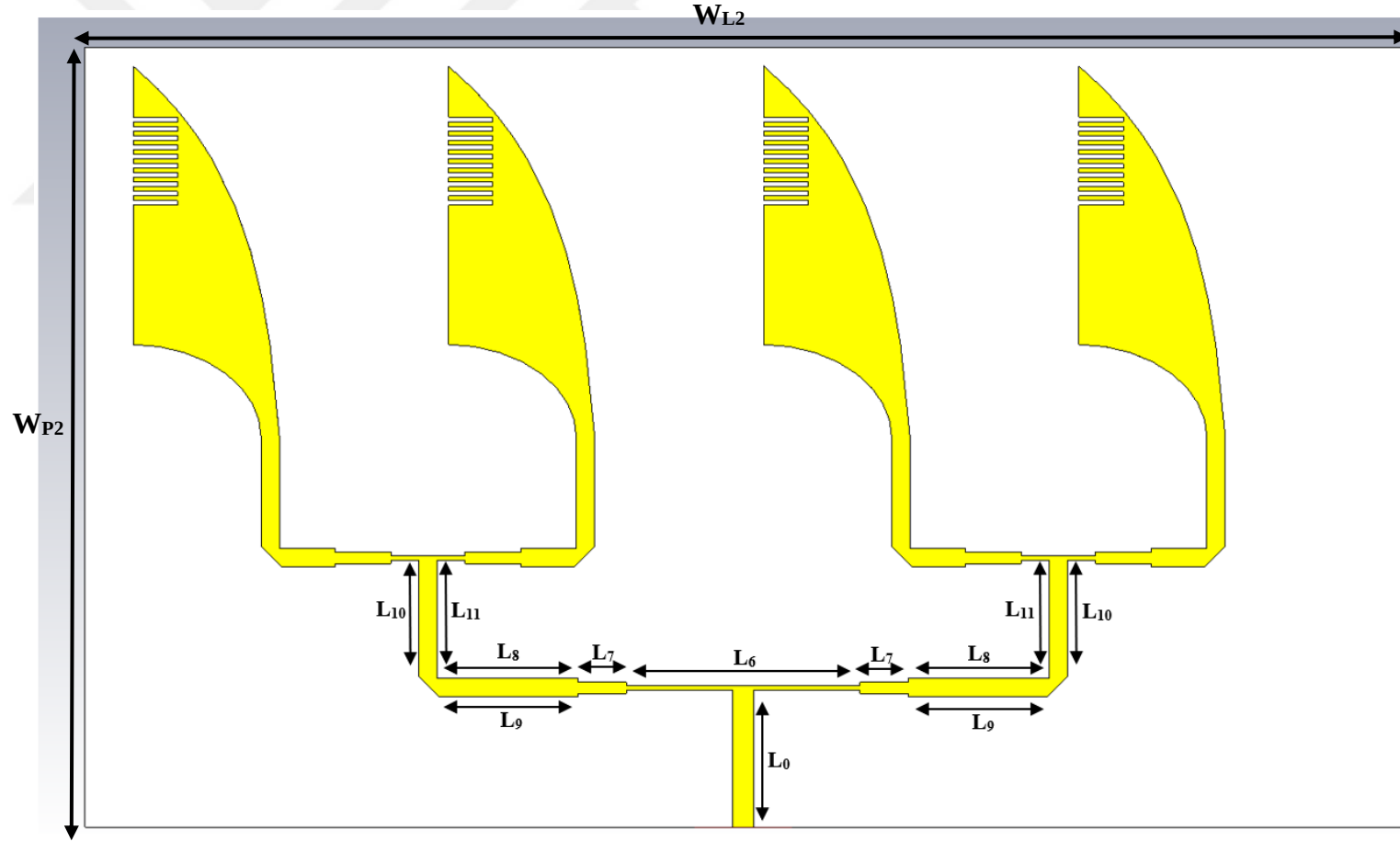
4.4 1x4 Dizi Yapıda AVA Tasarımı

Tekil anten yapısının çoğullanması ve toprak düzleminin genişletilmesi suretiyle tasarlanan 1x2 dizi AVA yapısında daha yüksek yönlülük ve kazanç ile daha dar ışıma hüzmesi gereksinimi karşılanmıştır. Ancak uygulama alanı olarak hedeflenen 6N YİPS operasyonlarında 1x2 dizi AVA yapısının da uygun olmayacağı veya performans bakımından yetersiz kalacağı durumlar için tasarım bir adım daha ilerletilip 1x4 dizi yapısına geçilmesi planlanmıştır. 1x4 dizi AVA oluşturulurken birim anten elemanları arasındaki mesafe 1x2 dizi anten ile eşit tutulmuştur. Bir başka deyişle 1x4 dizi AVA, 1x2 dizi AVA yapısının bir kopyasını daha içeren yapıdadır.

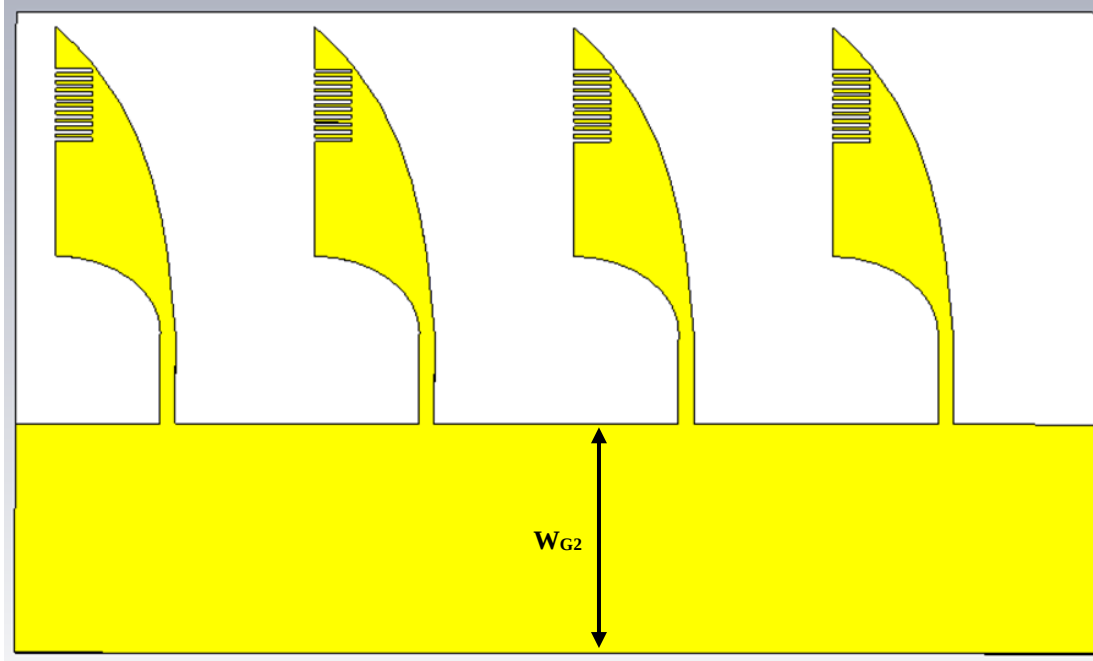
1x4 dizi AVA besleme yapısı oluşturulurken, tıpkı 1x2 dizi yapısında olduğu gibi, mikroşerit çeyrek dalga dönüştürücüsü ve mikroşerit gönyeburun dönemeç modelleri kullanılmıştır. Dönemeç için kullanılan parametreler (Şekil 4.22), aynı empedans koşulunda tasarlandığı için sabit kalmıştır. Benzer şekilde, çeyrek dalga dönüştürücü tasarımında da 50Ω , 70.71Ω ve 100Ω değerinde empedanslara sahip hatların genişlikleri Çizelge 4.8’de gösterilen değerler ile eşittir.

Bunun yanında çeyrek dalga dönüştürücünün uzunluk boyutları alt tabaka malzemesine uygun şekilde değişikliğe uğramıştır. Besleme hattı uzunlukları parametrik benzetim ile belirlenerek optimize edilmiştir. 1x4 dizi antenin toprak düzlemi oluşturulurken 1x2 dizi AVA alt tabaka genişliğinde yaşanan 7 mm artış aynen yansıtılmış olup toprak düzlemi genişliği 8 mm değerinden ($W_{G1}=8 \text{ mm}$) 15 mm değerine ($W_{G2}=15 \text{ mm}$) getirilmiştir.

1x4 dizi yapısının besleme hattının boyutları Şekil 4.32’de, antenin toprak düzlemi ise Şekil 4.33’te gösterilmiştir. Bahsi geçen iki şekilde tanımlanan antenin boyutları ise Çizelge 4.13’te listelenmiştir. Besleme hattı boyutları numaralandırma işlemi, 1x2 dizi antende kullanılan numaraların devamı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. (Örneğin son olarak L_5 ile ifade edilen uzunluk parametrelerine L_6 ile devam edilmiştir.)



Şekil 4.32 : 1x4 dizi AVA boyutları.

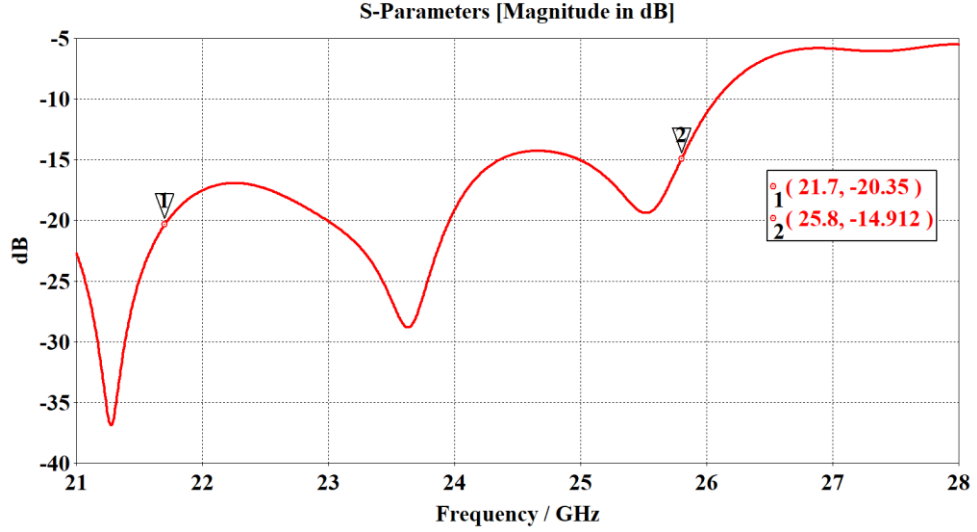


Şekil 4.33 : 1x4 dizi AVA toprak düzlemi.

Çizelge 4.13 : 1x4 dizi AVA boyut parametreleri.

Parametre	Uzunluk (mm)
W_{G2}	15
W_{L2}	71
W_{P2}	42
L_6	12.6
L_7	2.6
L_8	7.6
L_9	7.47
L_{10}	6.23
L_{11}	6.36

Anten benzetimi sonucunda elde edilen S_{11} grafiği ise Şekil 4.34'te gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere antenin S_{11} değeri 21.7 GHz'de -20.35 dB olarak bulunurken 25.8 GHz'de -14.91 dB olarak elde edilmiştir. Burada dikkat çeken bir husus ikinci ışıma bölgesinde yaklaşık 26 GHz'den sonra antenin S_{11} değerinin -10 dB'nin üzerine çıkmasıdır. Yapının gittikçe karmaşıklaşması ve hat empedansının optimizasyonunun zorlaşması sonucunda bu durumun oluştuğu yorumlanmıştır. Buna karşın anten, ilk ışıma frekans aralığı olan 21.4-22 GHz aralığının tamamında çalışabilmenin yanı sıra ikinci ışıma bölgesinin de 24.25-26 GHz aralığında da ışıma yapabilmekte ve bant genişliği gereksinimine uygunluğunu sürdürmektedir.

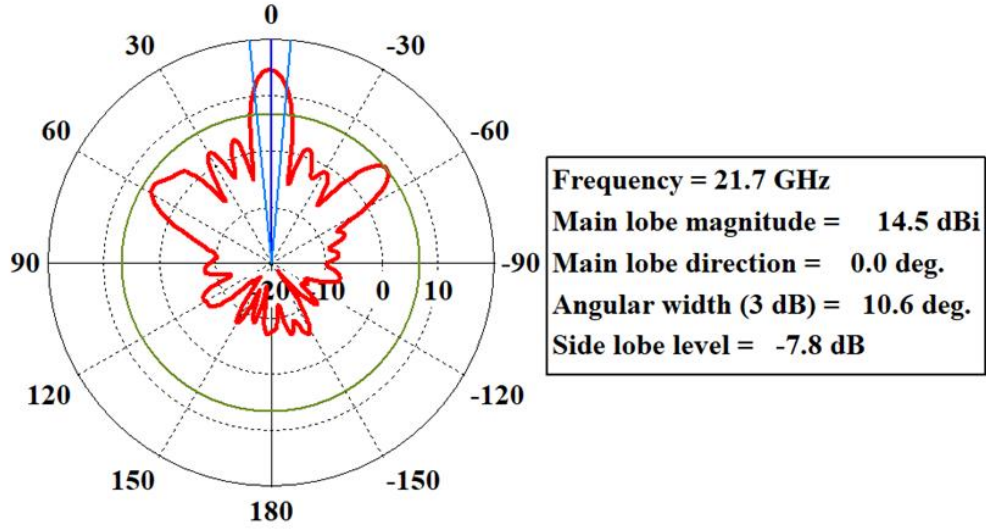


Şekil 4.34 : 1x4 dizi AVA S_{11} grafiği.

Bu parametrenin değerlendirilmesinin ardından hedeflenen daha dar ışıma hüzmesi ve daha yüksek yönlülük değeri kontrolü adına antenin ışıma örüntüleri çıkarılmıştır. İlgili ışıma örüntüleri 21.7 GHz ve 25.8 GHz frekanslarında sırasıyla Şekil 4.35 ve Şekil 4.36’da gösterilmiştir. Grafiklerden de görülebileceği üzere, 21.7 GHz frekansında yönlülük değeri 14.5 dBi olarak elde edilmiştir. Bunun yanında, yarı güç hüzme genişliği değeri 10.6° olarak bulunmuştur. Yan lob seviyesi ise ilgili frekansta -7.8 dB olarak elde edilmiştir.

25.8 GHz’de ise yönlülük değeri 14.7 dBi mertebesinde elde edilmiştir. Yarı güç hüzme genişliği ise 8.5° değerine kadar inmiştir. Bunların haricinde, yan lob seviyesi ise ilgili frekansta -6.7 dB olarak elde edilmiştir. Her iki frekansta elde edilen ışıma örüntüsü parametreleri (hem tekil yapı ile hem de 1x2 dizi AVA yapısı ile daha kolay karşılaştırmak için) Çizelge 4.14’te listelenmiştir.

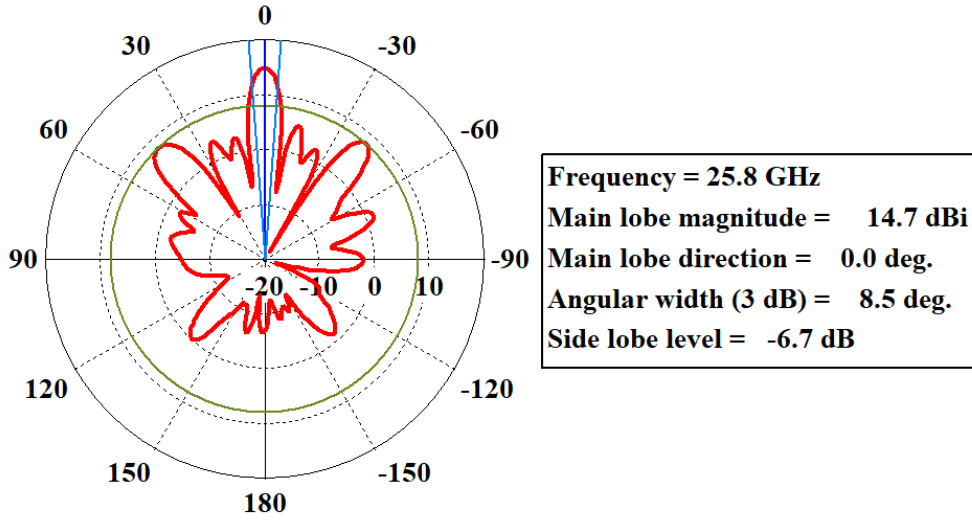
Farfield Directivity Abs (Theta=90)



Phi / Degree vs. dBi

Şekil 4.35 : 1x4 dizi AVA 21.7 GHz ışırma örüntüsü.

Farfield Directivity Abs (Theta=90)



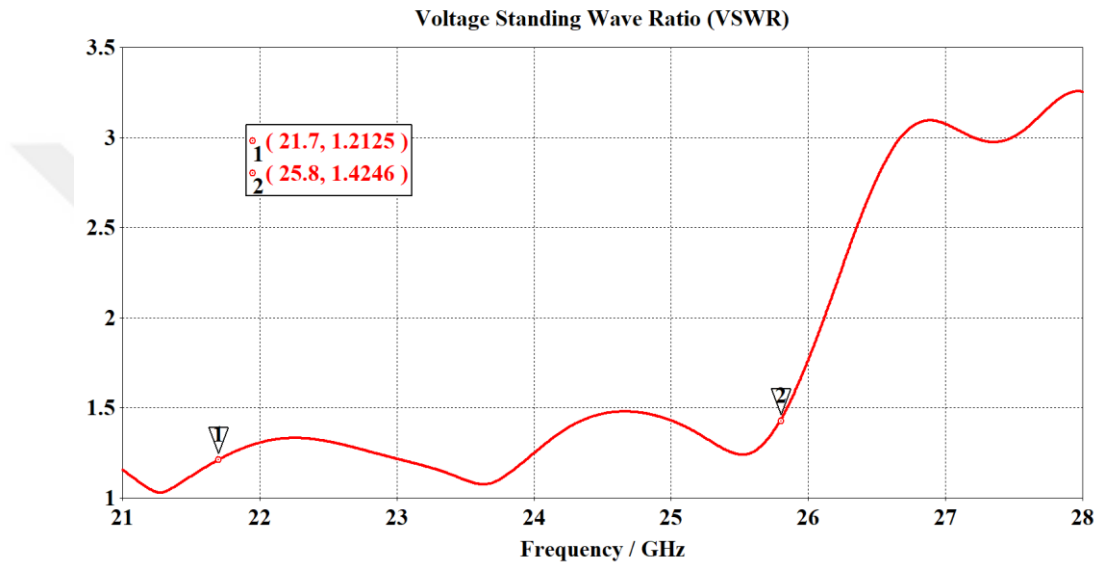
Phi / Degree vs. dBi

Şekil 4.36 : 1x4 dizi AVA 25.8 GHz ışırma örüntüsü.

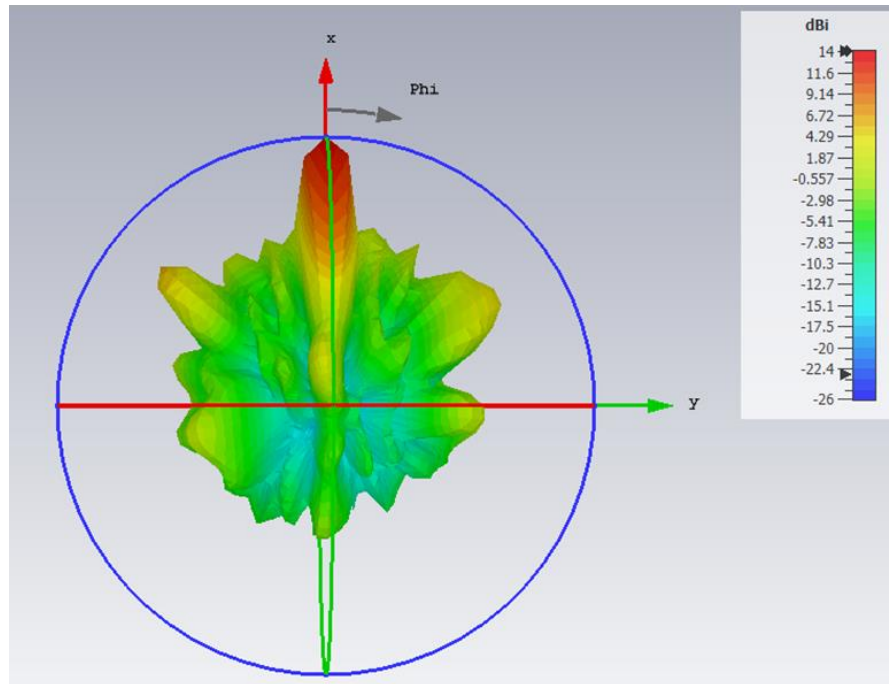
Çizelge 4.14 : 1x4 dizi AVA ışırma örüntüsü parametreleri-I.

Frekans	Yönlülük (dBi)	Yan Lob Seviyesi (dB)	HPBW
21.7 GHz	14.5	-7.8	10.6°
25.8 GHz	14.7	-6.7	8.5°

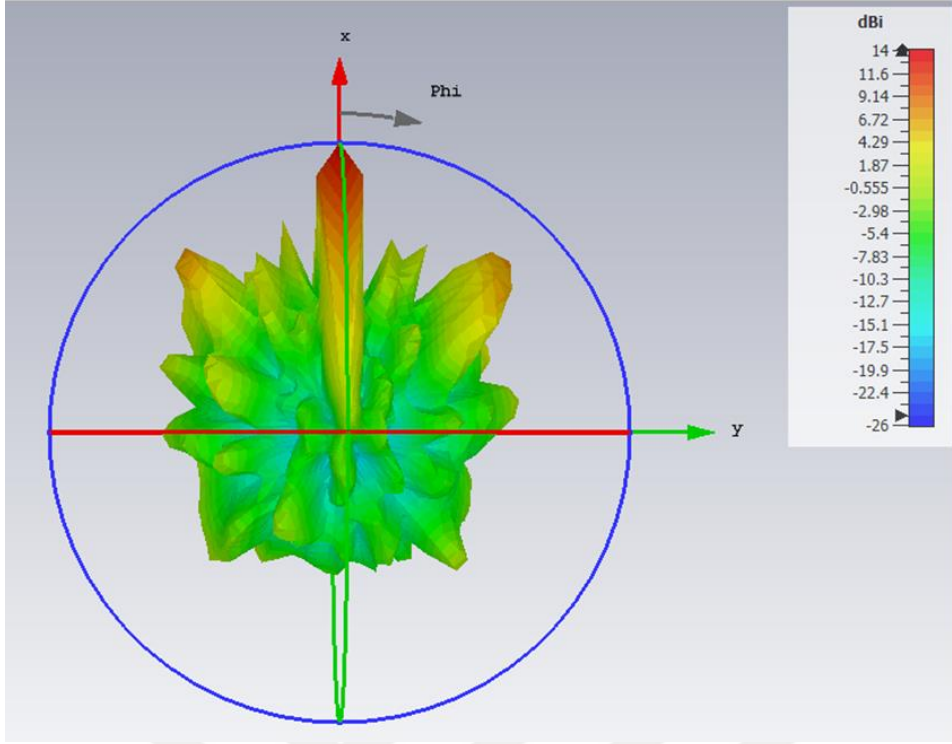
Bu sonuçların yanı sıra tıpkı tekil yapıda ve 1x2 dizi yapıda AVA tasarımlarında olduğu gibi 1x4 dizi AVA yapısının da diğer önemli parametrelerinin gösterildiği benzetimler yapılmıştır. Bu bağlamda ilgili yapının VSWR grafiği çıkarılmış olup Şekil 4.37’de gösterilmiştir. VSWR parametresi, 21.7 GHz’de 1.21 değerini alırken 25.8 GHz’de 1.42 seviyesindedir. Bu sonuçlara göre VSWR parametresi her iki frekansta da teorik olarak alması gereken aralığın içerisinde değerlere sahiptir. Bir başka önemli parametre olan kazanç ise 21.7 GHz ve 25.8 GHz frekansları için sırasıyla Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da yer alan üç boyutlu grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 4.37 : 1x4 dizi AVA VSWR grafiği.



Şekil 4.38 : 1x4 dizi AVA 21.7 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.



Şekil 4.39 : 1x4 dizi AVA 25.8 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.

Şekillerden de görülebileceği üzere kazanç parametresi her iki orta frekansta da eşit şekilde 14 dBi mertebesinde bulunmuştur. Buna göre 1x4 dizi antenin orta frekanslardaki kazanç ve VSWR değerlerinin haricinde teorik ışıma verimliliklerinin de listelendiği Çizelge 4.15 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.15 : 1x4 dizi AVA ışıma örüntüsü parametreleri-II.

Frekans (GHz)	Kazanç (dBi)	İşıma Verimliliği	VSWR
21.7	14	%89	1.21
25.8	14	%85	1.42

Listelenen parametrelerle birlikte 1x4 dizi AVA tasarımı da tamamlanmıştır. Bir sonraki adımda ise tekil, 1x2 dizi ve 1x4 dizi yapıların kıyaslandığı bir başka çizelge oluşturulmuştur (Çizelge 4.16). İlgili çizelgede alt tabaka boyutu gibi fiziksel parametrenin yanı sıra yönlülük, kazanç, ışıma verimliliği, bant genişliği ve yarı güç hüzme genişliği gibi çeşitli boyut ve performans parametrelerine yer verilmiştir.

Çizelge 4.16 : 1x2 ve 1x4 yapıda dizi antenlerin karşılaştırılması.

Parametre	21.7 GHz Merkezli İlk Işıma Bölgesi			25.8 GHz Merkezli İkinci Işıma Bölgesi		
	Tekil AVA	1x2 dizi AVA	1x4 dizi AVA	Tekil AVA	1x2 dizi AVA	1x4 dizi AVA
Alt tabaka boyutu (mm x mm x mm)	20x27x0.508	37x35x0.508	71x42x0.508	20x27x0.508	37x35x0.508	71x42x0.508
S ₁₁ (dB)	-40	-20.35	-20.35	-30.6	-14.96	-14.91
Yönlülük (dBi)	10.1	11.9	14.5	10.2	12.6	14.7
Kazanç (dBi)	9.81	11.5	14	9.95	12.1	14
Bant Genişliği (MHz)	600	600	600	3250	3250	1750
VSWR	1.02	1.21	1.21	1.06	1.4	1.42
Yarı Güç Hüzme Genişliği	47.4°	21.2°	10.6°	43.9°	18°	8.5°
Yan Lob Seviyesi (dB)	-14.9	-6.1	-7.8	-11.4	-6	-6.7
Teorik Işıma Verimliliği	%93	%91	%89	%94	%89	%85

Sonuçlar değerlendirildiğinde kritik gereksinimlerden biri olan yönlülük parametresinde 21.7 GHz frekansında tekil yapıdan 1x2 dizi yapısına geçerken 1.8 dB artış ile 11.9 dBi değeri edilmiştir. Bu parametre 25.8 GHz frekansında 2.4 dB artış göstermiş ve 12.6 dBi değerini almıştır. 1x2 diziden 1x4 diziye geçişte ise yönlülük değeri 21.7 GHz frekansında 2.6 dB oranında artışla 14.5 dBi olarak elde edilmiştir. Aynı işlemde 25.8 GHz frekansında ise 2.1 dB oranda artış elde edilmiş ve 14.7 dBi yönlülük değeri sağlanmıştır.

Kazanç parametresinde ise tekil anten ilk orta frekansta 9.81 dBi değerini sağlarken ikinci orta frekansta ise 9.95 dBi değerini almıştır. 1x2 dizi anten yapısında 21.7 GHz'de 1.69 dB artarak 11.5 dBi değerine yükselen kazanç, 25.8 GHz'de ise 2.15 dB artışla 12.1 dBi değerine yükselmiştir. 1x4 dizi yapısında 21.7 GHz'de elde edilen kazanç değeri ise 1x2 dizi yapısına oranla 2.5 dB artmış ve 14 dBi değerine ulaşmıştır. Aynı şekilde 25.8 GHz frekansında da 14 dBi değerine yükselen kazanç, bu frekansta ise 1.9 dB oranında artış göstermiştir.

Bir diğer önemli parametre olan bant genişliğinde ise tekil AVA yapısında istenen iki ışıma bölgesi de tamamen kapsamaktadır. 1x2 dizi AVA yine aynı şekilde istenen iki frekans bölgesinin tamamında hizmet verebilir durumdadır. 1x4 dizi AVA yapısında ise ilk frekans bölgesi tamamen kapsanırken, ikinci frekans bandında ise 1750 MHz bant genişliği elde edilmiştir. Bu değer diğer iki tasarıma göre düşük olsa da gereksinimlere uygunluk açısından bir problem teşkil etmemektedir.

Antenlerin ışıma hüzme genişlikleri değerlendirildiğinde, tekil yapıda iki orta frekans için sırasıyla 47.4° ve 43.9° sonuçları elde edilmiştir. 1x2 dizi AVA yapısında bu açı değerleri 21.2° ve 18° seviyelerine inmiştir. 1x4 dizi AVA yapısında ise 21.7 GHz'de 10.6° HPBW ile 1x2 dizi AVA tasarımında elde edilen HPBW değerinin tam yarısı edilmiştir. 25.8 GHz'de ise 8.5° yarı güç hüzme genişliği elde edilmiş olup bu değer tasarım aşamasında (orta frekanslar için) elde edilmiş en dar ışıma hüzmesidir. Genel itibarıyla değerlendirildiğinde kritik parametrelerde dizi anten tasarımı ile istenen sonuçlar elde edilmiştir.

Üretim ve test aşamasına geçmeden önce 1x4 dizi AVA benzetiminde elde edilen sonuçlar literatürde bulunan benzer dizi yapıları ile karşılaştırılmıştır. Daha önce tekil yapıda AVA ile karşılaştırmak için de kullanılan bir çalışmada, ilgili tekil antenin birim eleman olarak kullanıldığı 1x4 dizi AVA tasarımı da bulunmaktadır. RO4003C

($\epsilon_r=3.55$) alt tabaka malzemeli 1x4 dizi anten 97.2 mm x 71.72 mm x 0.8 mm boyutlara sahiptir. Dizi konfigürasyonu ile 24.6-25 GHz frekans bandında ışıma yapabilen antenin 24.8 GHz'deki kazanç değeri ise yaklaşık 12 dBi olarak bulunmuştur [62]. Buna göre bizim çalışmamızda tasarlanan anten (alt tabaka malzemeleri eş olmasına rağmen) hem boyut hem de kazanç parametrelerinde daha avantajlı konumdadır.

Bir diğer kaynakta ise tarak şeklinde yarıklar ve metal yönelticiler içeren 1x8 dizi AVA tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dizi anten tasarlanırken tez çalışmamızda kullanılan besleme yapısına benzer bir yapı kullanılmıştır. Bu tasarımda dielektrik sabiti daha düşük ve daha maliyetli bir alt tabaka malzeme (RT / Duroid 5880 ($\epsilon_r=2.2$)) kullanılmış olup anten boyutları 54.4 mm x 28.2 mm x 0.508 mm olarak tasarlanmıştır. Antenin 24.25-27.5 GHz bandında elde edilen kazanç değerleri 11 dBi ile 13.5 dBi arasında değişmekte ve 25.8 GHz frekansında yaklaşık 13.25 dBi değerini almaktadır [65]. İlgili anten, çalışmamızda tasarlanan 1x4 dizi AVA'ya nazaran boyut olarak daha kompakt yapıda olmasına rağmen kazanç olarak daha düşük seviyede ve daha maliyetlidir. Ayrıca 1x8 yapıdaki dizi antenin besleme yapısının karmaşıklığı daha fazladır.

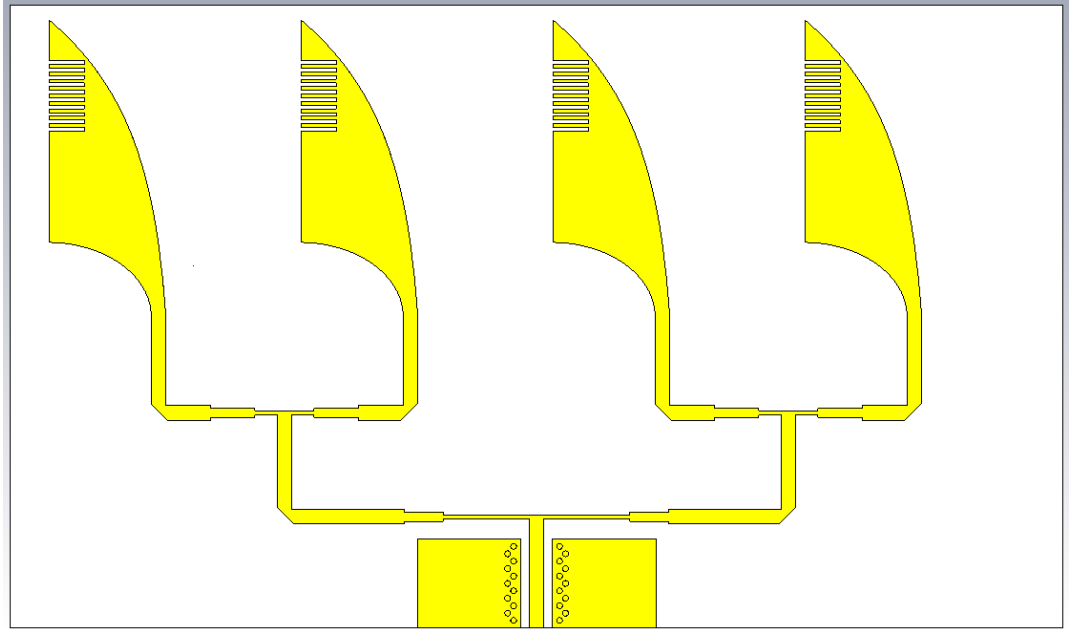
Son olarak çalışmamızda tasarlanan 1x4 dizi AVA, literatürde bulunan benzer yapıdaki bir başka RT / Duroid 5880 ($\epsilon_r=2.2$) malzemenin kullanıldığı dizi AVA ile kıyaslanmıştır. İlgili antenin boyutları 24 mm x 28.8 mm x 0.254 mm olarak tasarlanmıştır. Bunun yanında kaynaktaki dizi antenin kazancı, 24.25-27.5 GHz bandında 8 dBi ila 9.5 dBi arasında değerler almaktadır. 25.8 GHz frekansında ise kazanç değeri yaklaşık 9.5 dBi seviyesindedir [67]. İlgili kaynaktaki tasarım, boyut olarak tez çalışmamızda tasarlanan 1x4 dizi AVA karşısında avantajlı konumda olmasına rağmen alt tabaka olarak kullanılan malzemenin maliyeti daha yüksektir. Bunun yanında ilgili kaynaktaki dizi anten, kazanç parametresi açısından orta frekans 25.8 GHz'de yaklaşık 4.5 dB oranında daha düşük mertebededir.

Tasarım adımlarının tamamlanmasıyla birlikte 1x4 dizi AVA üretimi adımına geçilmiş ve sonraki bölümde detayları verilmiştir. Antenin üretim sonrası test sonuçları ile benzetim program sonuçlarının kıyaslaması da aynı bölümde işlenmiştir.

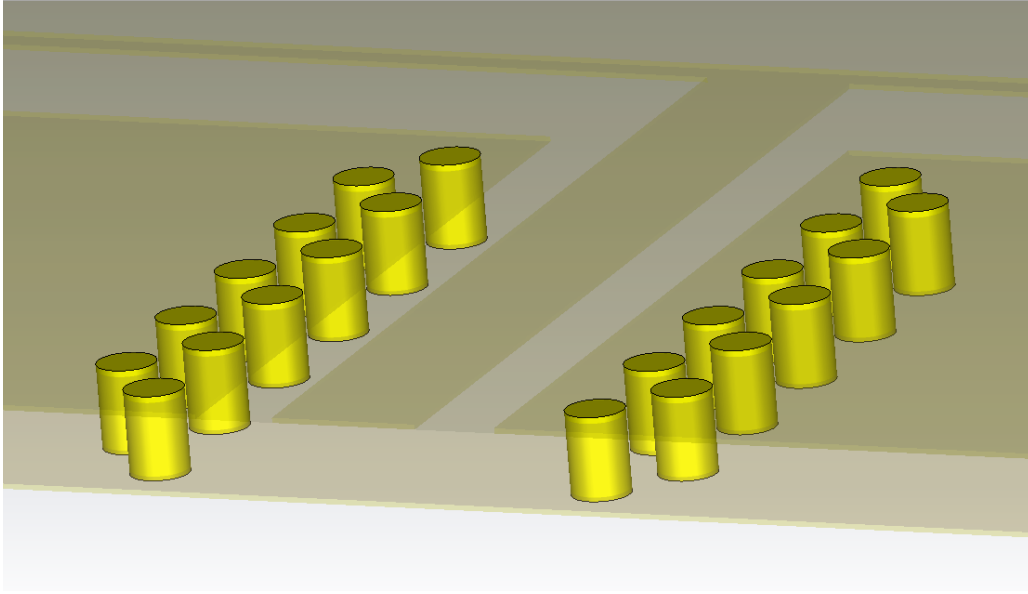


5. ÜRETİM VE TEST

Tasarım aşamasının tamamlanmasının ardından 1x4 dizi AVA üretimi için çalışmalara başlanmıştır. İlk olarak antenin çalışma frekans bandına ve alt tabaka kalınlığına uyacak konnektör seçilmiştir. Ardından benzetim programında, konnektörün antenin üst kısmında vidalanacağı bölgeye toprak yapısı eklenmiş ve baskılı devre kartı yapısında yama yüzeyi ile toprak düzlemini birleştirecek vialar eklenmiştir. Bunun haricinde toprak düzleminde bir değişiklik yapılmamıştır. Bu aşamaların ardından yığın (stackup) tasarımı tamamlanmış ve anten üretime hazır hale getirilmiştir. Antenin üretim öncesi benzetim programından alınmış üstten görünümü Şekil 5.1’de, eklenen via tasarım bağlantıları ise Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

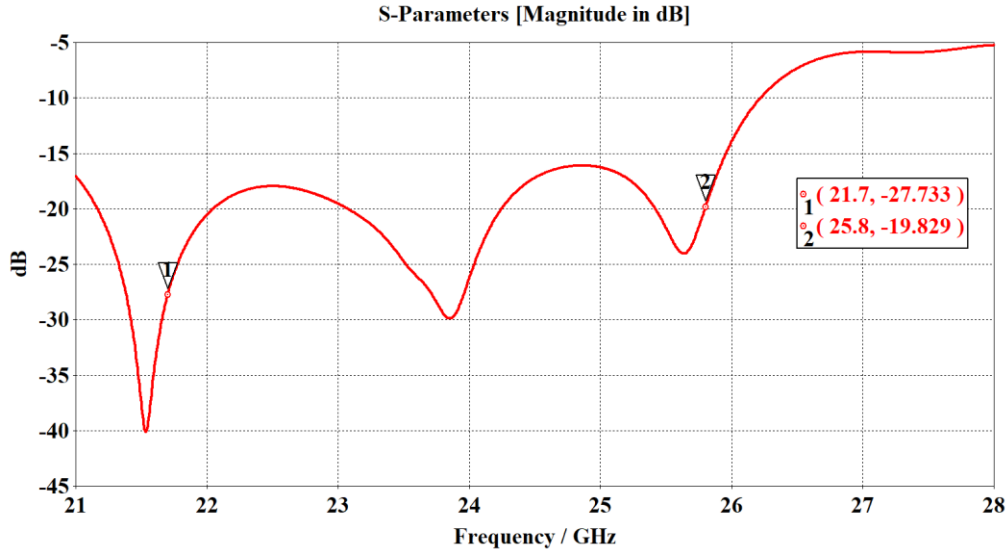


Şekil 5.1 : 1x4 dizi AVA üretime hazır üstten görünüm.



Şekil 5.2 : 1x4 dizi AVA baskı viaları.

Üretime hazır 1x4 dizi AVA'nın test sonuçları ile kıyaslanabilmesi adına benzetimi gerçekleştirilmiştir. Buna göre üretime hazır AVA'nın S_{11} grafiği Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Buna göre 21.7 GHz'de elde edilen S_{11} değeri -27.73 dB iken 25.8 GHz'de bu parametre -19.83 dB olarak bulunmuştur.

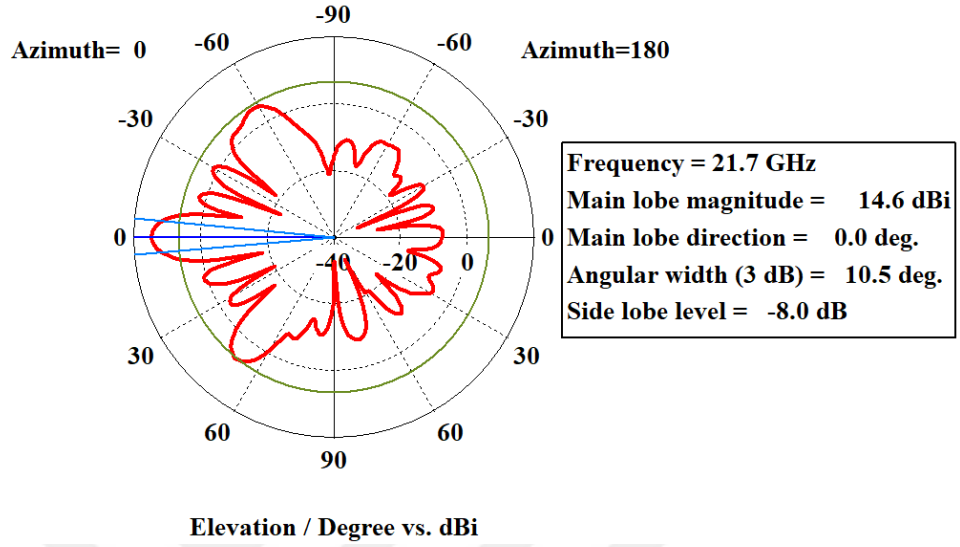


Şekil 5.3 : 1x4 dizi AVA baskı viaları.

Bunun yanında üretilecek 1x4 dizi antenin her iki orta frekansta da copolar ve crosspolar ışıma örüntüleri çıkarılmıştır. 21.7 GHz'de elde edilen copolar ışıma örüntüsü Şekil 5.4'te, crosspolar ışıma örüntüsü ise Şekil 5.5'te gösterilmiştir.

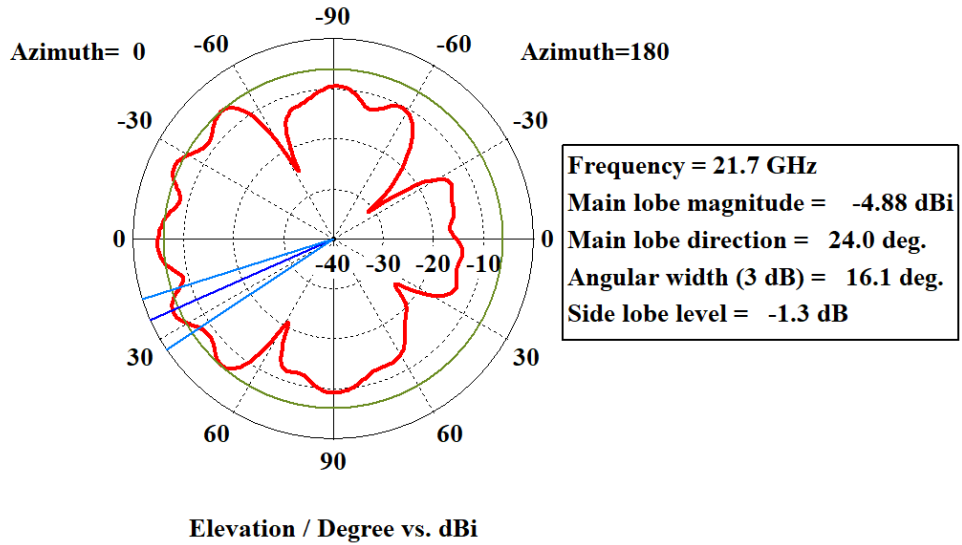
Şekillerden de görülebileceği üzere 14.6 dBi copolar yönlülüğe karşılık -4.88 dBi crosspolar yönlülük elde edilmiştir.

Farfield Directivity Ludwig 2AE Copolar (Azimuth=0)



Şekil 5.4 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 21.7 GHz copolar ışıma örüntüsü.

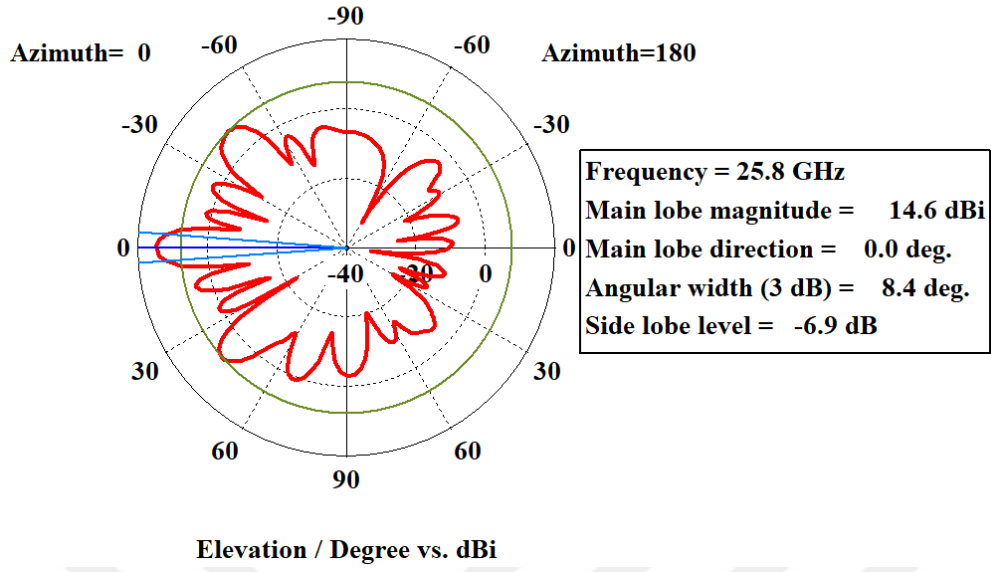
Farfield Directivity Ludwig 2AE Crosspolar (Azimuth=0)



Şekil 5.5 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 21.7 GHz crosspolar ışıma örüntüsü.

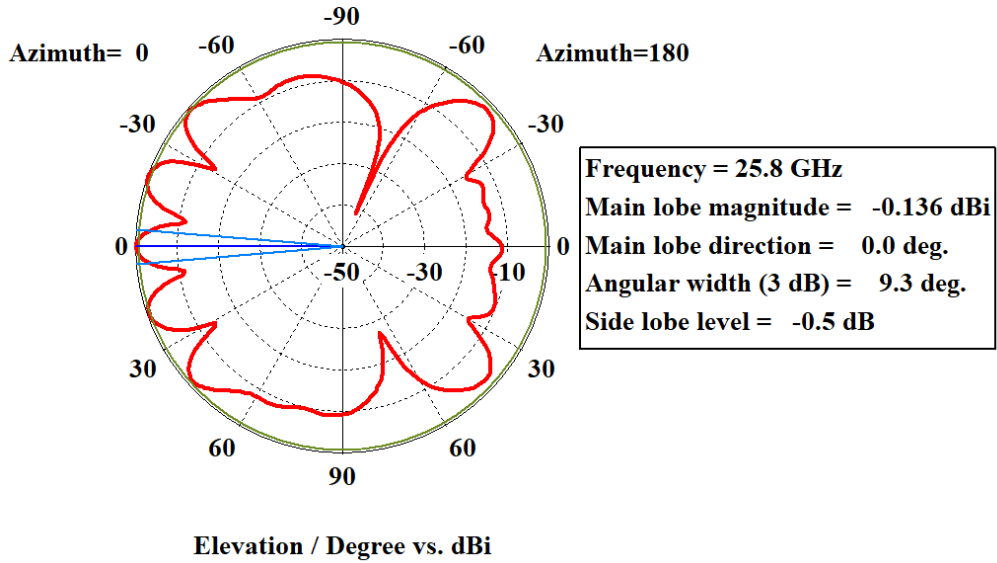
İkinci orta frekans olan 25.8 GHz’de Şekil 5.6’da gösterilen ışıma örüntüsü elde edilirken aynı frekansta antenin crosspolar ışıma örüntüsü ise Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Buna göre 14.6 dBi copolar, -0.136 dBi crosspolar yönlülük değerleri elde edilmiştir.

Farfield Directivity Ludwig 2AE Copolar (Azimuth=0)



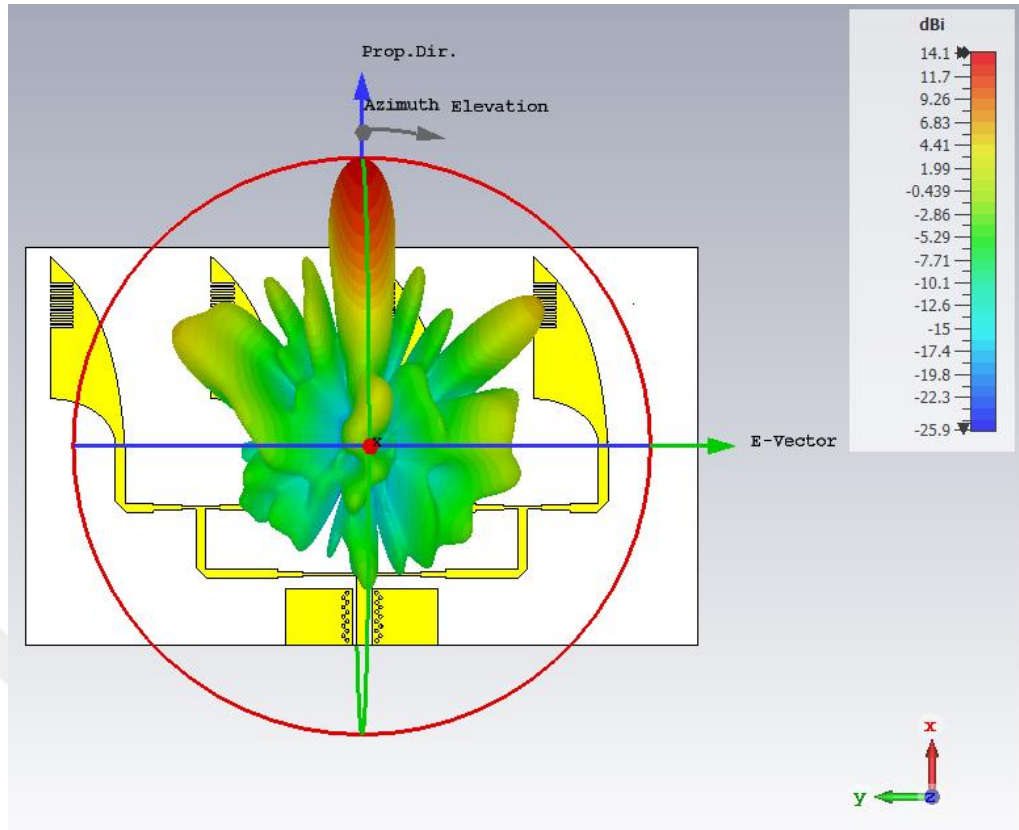
Şekil 5.6 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 25.8 GHz copolar ışıma örüntüsü.

Farfield Directivity Ludwig 2AE Crosspolar (Azimuth=0)

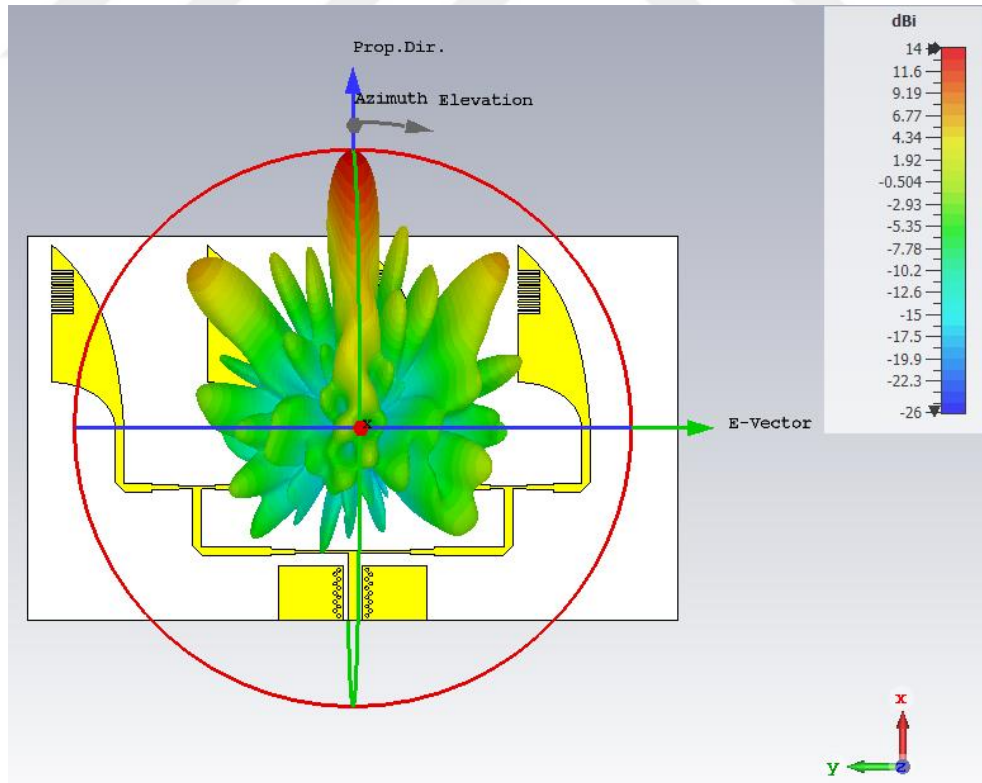


Şekil 5.7 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 25.8 GHz crosspolar ışıma örüntüsü.

Son olarak antenin üretimine geçmeden önce benzetim programı üzerinden 1x4 dizi AVA'nın üç boyutlu kazanç grafikleri elde edilmiştir. Benzetim programından alınan grafiklerin üzerine anten yapısı da yerleştirilmiş olup bu sayede antenin ışıma yaptığı yön, elektrik alan vektörünün yönü ve azimut-elevasyon doğrultuları ifade edilmiştir. Buna göre 21.7 GHz'de elde edilen üç boyutlu kazanç grafiği Şekil 5.8'de, 25.8 GHz'de elde edilen grafik ise Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

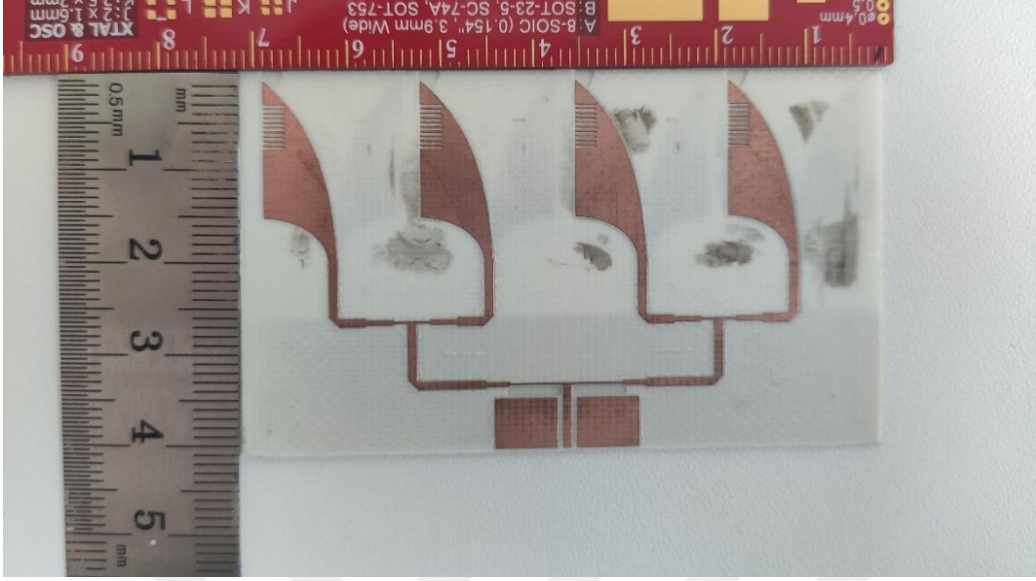


Şekil 5.8 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 21.7 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.



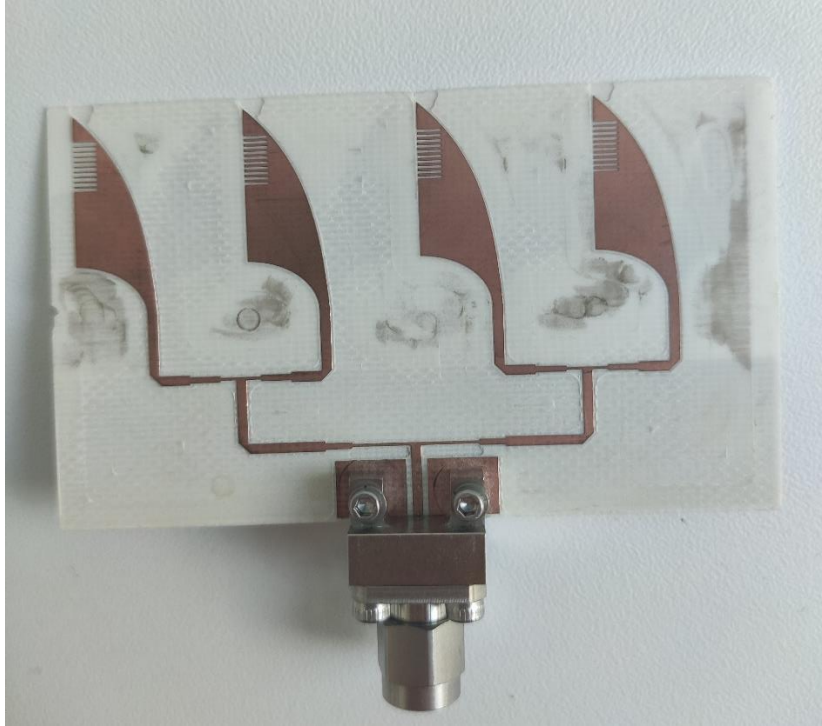
Şekil 5.9 : Üretime hazır 1x4 dizi AVA 25.8 GHz üç boyutlu kazanç grafiği.

Antenin üretiminin ardından boyutları Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Önceki bölümde belirtildiği üzere 1x4 dizi AVA, 71 mm x 42 mm x 0.508 mm boyutlara sahiptir.

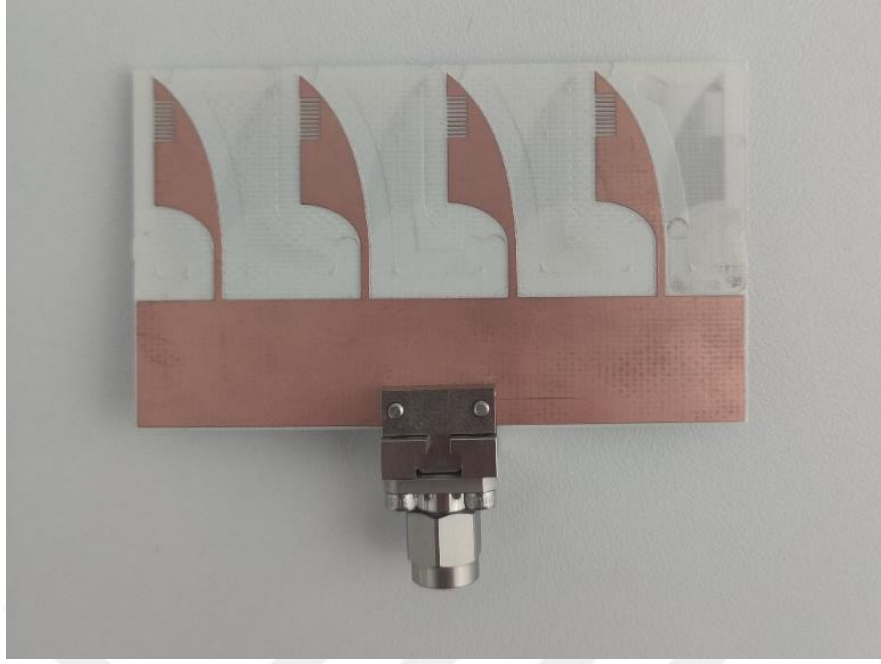


Şekil 5.10 : Üretilen 1x4 dizi AVA boyutları.

Üretim aşamasının tamamlanmasının ardından testlerinin yapılabilmesi için gerekli konnektör lehimlenmiş olup antenin test öncesi son halinin üstten görünümü Şekil 5.11'de, toprak düzlemi ise Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 : 1x4 dizi AVA teste hazır üstten görünümü.

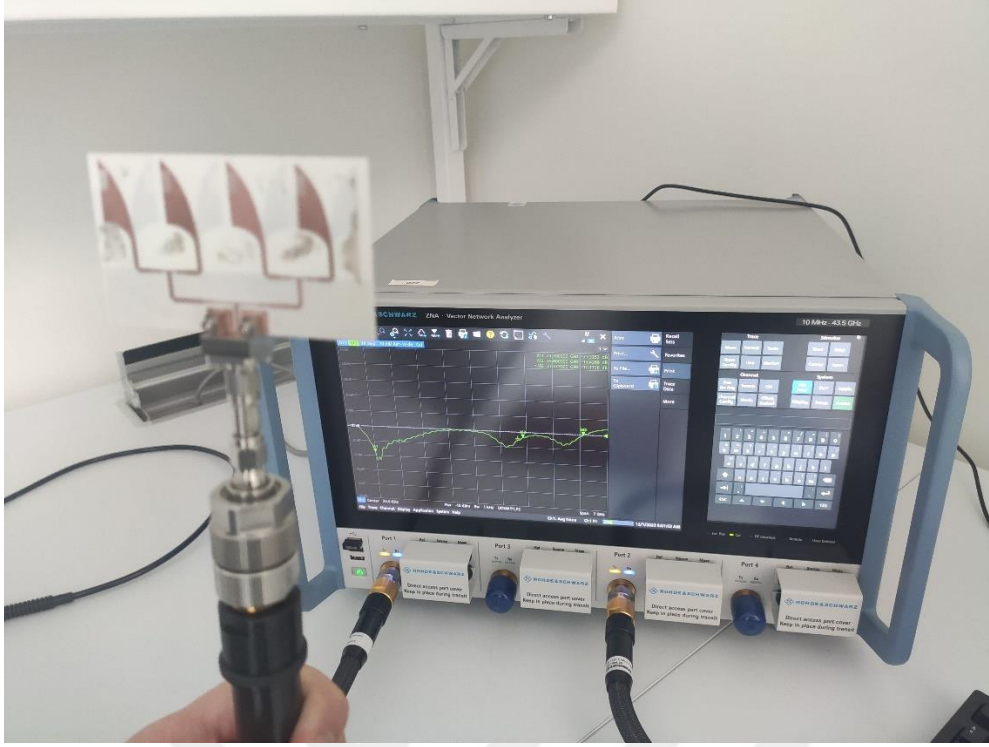


Şekil 5.12 : 1x4 dizi AVA teste hazır alttan görünümü (toprak düzlemi).

Konnektörün monte edilmesinin ardından S_{11} parametresi için gerekli testler network analizör cihazı ile tamamlanmıştır. Test düzeneği ve testin yapılmasına ait görseller sırasıyla Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te verilmiştir.

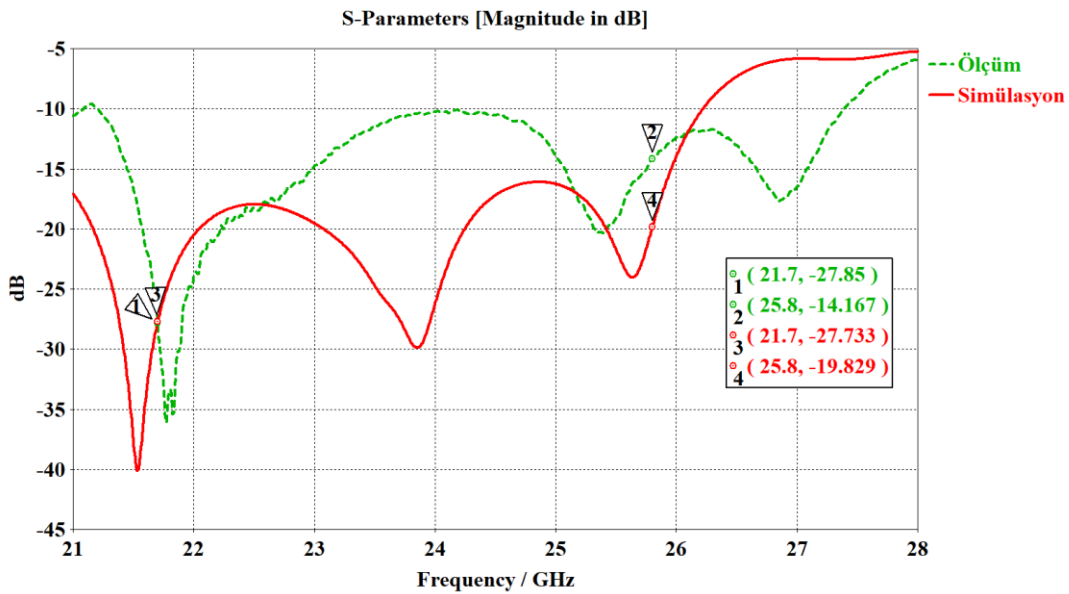


Şekil 5.13 : 1x4 dizi AVA S_{11} test düzeneği.



Şekil 5.14 : 1x4 dizi AVA S_{11} ölçümü.

Ölçüm sonucu elde edilen S_{11} değerleri ile üretime hazır durumdaki antenin S_{11} benzetim sonuçları aynı grafik üzerinde Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.15 : 1x4 dizi AVA ölçüm ve benzetim S_{11} grafiği.

Buna göre, ilk orta bant olan 21.7 GHz'de benzetim ve ölçüm sonuçları birbirine çok yakın elde edilmiştir. İkinci orta bant olan 25.8 GHz'de ise S_{11} ölçüm sonucu simülasyon sonucundan yaklaşık 5 dB daha yüksektir. Bunun yanında benzetim

sonucunda ikinci ışıma bölgesinde yaklaşık 26.2 GHz sonrasında S_{11} değerleri -10 dB'nin üstünde kalmışken üretim sonucunda elde edilen antende ise yaklaşık 27.4 GHz'e kadar S_{11} parametresi -10 dB eşiğinin altında kalmıştır. Bir başka ifade ile 24.25-27.5 GHz frekanslarını kapsayan ikinci bantta ışıma gerçekleşebilen bant genişliği 1.2 GHz artmıştır. İlk ışıma bölgesinde ise ölçüm sonuçlarına göre anten, tıpkı benzetim sonucunda olduğu gibi, tüm bantta ışıma yapabilmektedir. Ayrıca, her iki ışıma bölgesinin ilk kısımlarında üretim sonrasında S_{11} değerleri artmıştır.





6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Haberleşme teknolojileri değişen beklentiler ve gereksinimler ışığında gelişmektedir. Bu bağlamda 2030'lu yıllarda 6N haberleşmenin aktif hale gelmesi beklenmektedir. 6N haberleşmede VHetNet yapısı kullanılarak kırsal ve izole yerlerde kapsama alanının artırılmasının yanında yüksek hızlarda geniş frekans bantlarında ağların kurulması planlanmaktadır. Üç katmanlı VHetNet içerisinde yer alan hava ağı katmanında görev alacak YİPS, bu ağ yapısının en değerli birimlerinden biri olacaktır. YİPS, İHA ve LEO uydularına göre getirdiği avantajlarla geniş bir kullanım alanı vadetmektedir. IoT uygulamalarından otonom araçlara kadar uzanan uygulama yelpazesiyle YİPS, ağ trafiğinde kritik görevleri üzerine alabilecektir. YİPS'in 6N frekans spektrumu ITU tarafından belirlenmekte iken ICAO ise güvenlik konusu ile ilgilenmektedir.

Kablosuz haberleşmenin her neslinde olduğu gibi 6N haberleşmede de antenlerin önemli bir rol edinecekleri aşikardır. Bu bağlamda antenlerin, YİPS yapısında yer alacak faydalı yükler içerisinde yer alacak olması yadsınamaz bir durumdur. Yaklaşık 35 yıldır literatürde yer alan antipodal Vivaldi anten, aktif en yeni nesil haberleşme olan 5N'de olduğu gibi 6N'nin de bir parçası olacaktır. AVA ufak boyutu ve kolay entegrasyonunun yanında, geniş frekans bantlarında yüksek yönlülük ve kazançlar ile hizmet verebilmesi sayesinde 6N YİPS içerisinde de hizmet vermeye aday anten yapılarından biri olabilir. Ayrıca AVA kompakt yapısının sayesinde kolayca dizi anten formuna dönüştürülebilir ve YİPS sisteminde zorlu link bütçesi senaryolarında görev alabilir.

Bu çalışmada, YİPS faydalı yükü içerisinde yer alabilecek AVA tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenin Amerika kıtaları ve Grönland'ı kapsayan ITU Bölge 2'de YİPS kullanımına açılan 21.4-22 GHz ve 24.25-27.5 GHz frekans bölgelerinde hizmet verebilmesi hedeflenmiştir. Bu bölgede, yine ITU raporlarında açıklanan, bant genişliği gereksinimlerine uyulmuştur.

Tasarıma tekil anten yapısı ile başlanmış olup 1x2 dizi yapısının tasarımı ile devam edilmiştir. Son olarak üretimi de gerçekleştirilen 1x4 dizi AVA benzetimi

gerçekleştirilmiştir. 1x4 dizi AVA üretildikten sonra network analizör ile teste tabi tutulmuş olup benzetim programında elde edilen ışıma bölgesinin sağlanabildiği hatta üretim öncesi yapılan birkaç zorunlu hamle neticesinde bant genişliğinin artırıldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar benzetim sonuçları ile üst üste bindirilmiş şekilde sunulmuştur. Benzetim programında elde edilen sonuçlar ile test sonuçları arasındaki farkın, küçük boyutlara sahip olan antenin üretimi sırasında meydana gelmiş aksaklık ve zorluklardan dolayı gerçekleştiği yorumlanabilir. Buna rağmen üretilen anten, hedef gereksinimlere uygun şekilde ışıma yapabilmektedir.

Bu çalışmada yapılan tüm benzetimler CST Studio Suite programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Üretilen 1x4 dizi antipodal Vivaldi antenin laboratuvar ortamında ışıma örüntüsü ve kazanç testlerinin gerçekleştirilmesi, birim eleman olarak kullanıldığı daha büyük anten yapılarının tasarlanması ve YİPS harici başka hangi sistemlerde değerlendirilebileceğinin araştırılması gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **You, X., Wang, CX., Huang, J. et al.** (2021). Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Sci. China Inf. Sci.* 64, 110301. doi: 10.1007/s11432-020-2955-6.
- [2] **Baltaci, A., Dinc, E., Ozger, M., Alabbasi, A., Cavdar, C., Schupke, D.** (2021). A Survey of Wireless Networks for Future Aerial Communications (FACOM). *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 23, 2833–2884
- [3] **Huang, T., Yang, W., Wu, J., Ma, J., Zhang, X., Zhang, D.** (2019). A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies. *IEEE Access*, 7, 175758–175768.
- [4] **Aragón-Zavala, A., Cuevas-Riz J. L., Delgado-Penín, J.** (2008) High-Altitude Platforms for Wireless Communications. Doi: 10.1002/9780470997437.
- [5] **Gazit, E.** (1988) Improved design of the Vivaldi antenna. *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, 135, pp. 89-92. doi: 10.1049/ip-h-2.1988.0020.
- [6] **Karabulut Kurt, G., Khoshkholgh, M. G., Alfattani, S., Ibrahim, A., Darwish, T.S.J., Alam, M.S., Yanikomeroglu, H., Yongacoglu, A.** (2021). A Vision and Framework for the High Altitude Platform Station (HAPS) Networks of the Future. *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 23, no. 2, pp. 729-779, doi: 10.1109/COMST.2021.3066905.
- [7] **Lu, L., Li, G.Y., Swindlehurst, A.L., Ashikhmin, A., Zhang, R.** (2014). An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [8] **Dicandia, F.A., Genovesi, S., Monorchio, A.** (2017). Analysis of the Performance Enhancement of MIMO Systems Employing Circular Polarization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 9, pp. 4824-4835, doi: 10.1109/TAP.2017.2723083.
- [9] **Jiang, X., Sheng, M., Zhao, N., Xing, C., Lu, W., Wang, X.** (2021). Green UAV Communications for 6G: A Survey. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35, doi: 10.1016/j.cja.2021.04.025.
- [10] **Saad, W., Bennis, M., Chen, M.** (2020). A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems. *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, doi: 10.1109/MNET.001.1900287.
- [11] **Mershad, K., Dahrouj, H., Sardeddeen, H., Shihada, B., Al-Naffouri, T., Alouini, M.** (2021). Cloud-Enabled High-Altitude Platform Systems:

Challenges and Opportunities. *Frontiers in Communications and Networks*, 2:1-21, doi: 10.3389/frcmn.2021.716265.

- [12] **Bhushan, N. et al.** (2014). Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G. *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 82–89, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736747.
- [13] **Dicandia, F.A., Fonseca, N.J.G., Bacco, M., Mugnaini, S., Genovesi, S.** (2022). Space-Air-Ground Integrated 6G Wireless Communication Networks: A Review of Antenna Technologies and Application Scenarios. *Sensors*, 22, 3136, doi: 10.3390/s22093136
- [14] **Shibata, Y., Kanazawa, N., Konishi, M., Hoshino, K., Ohta, Y., Nagate, A.** (2020). System Design of Gigabit HAPS Mobile Communications. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 157995-158007, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019820.
- [15] **Qiu, J., Grace, D., Ding, G., Zakaria, M.D., Wu, Q.** (2019). Air-Ground Heterogeneous Networks for 5G and Beyond via Integrating High and Low Altitude Platforms. *IEEE Wireess. Communications*, 26, 140–148, doi: 10.1109/MWC.0001.1800575
- [16] **Samseemoung, G.; Soni, P.; Jayasuriya, H.P.W.; Salokhe, V.M.** (2012). Application of Low Altitude Remote Sensing (LARS) Platform for Monitoring Crop Growth and Weed Infestation in a Soybean Plantation. *Precision Agriculture*, 13(6), 611-627, doi: 10.1007/s11119-012-9271-8.
- [17] **Zeng, Y., Wu, Q., Zhang, R.** (2019). Accessing From the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and beyond. *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 12, pp. 2327-2375, doi: 10.1109/JPROC.2019.2952892.
- [18] **Azari, M.M., Geraci, G., Garcia-Rodriguez, A., Pollin, S.** (2020). UAV-to-UAV Communications in Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 9, pp. 6130-6144, doi: 10.1109/TWC.2020.3000303.
- [19] **Alzahrani, B., Oubbati, O.S., Barnawi, A., Atiquzzaman, M., Alghazzawi, D.** (2020). UAV Assistance Paradigm: State-of-the-Art in Applications and Challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, 166, doi: 10.1016/j.jnca.2020.102706.
- [20] **Liu, J., Shi, Y., Fadlullah, Z. M., Sato, N.** (2018). Space-Air-Ground Integrated Network: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2714-2741, doi: 10.1109/COMST.2018.2841996.
- [21] **Dicandia, F.A., Genovesi, S.** (2020). A Compact CubeSat Antenna with Beamsteering Capability and Polarization Agility: Characteristic Modes Theory for Breakthrough Antenna Design. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 62, no. 4, pp. 82-93, doi: 10.1109/MAP.2020.2965015.
- [22] **Url-1** <<https://life.itu.int/radioclub/rr/art1.pdf>>, erişim tarihi 16.10.2023.
- [23] **Alsamhi, S. H., Almalki, F., Ma, O., Ansari, M. S., Lee, B.** (2023). Predictive Estimation of Optimal Signal Strength from Drones over IoT

Frameworks in Smart Cities. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 22, no. 1, pp. 402-416, doi: 10.1109/TMC.2021.3074442.

- [24] **Knodler, M. A. et al.** (2019). *The Application of Unmanned Aerial Systems in Surface Transportation-Volume I: Executive Summary* (Report No: 19-010). Boston: Massachusetts Department of Transportation.
- [25] **Arum, S. C., Grace, D., Mitchell, P. D.** (2020). A review of wireless communication using high-altitude platforms for extended coverage and capacity. *Computer Commun.*, vol. 157, no. 1, pp. 232–256.
- [26] **Url-2** <<https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx>>, erişim tarihi 14.10.2023.
- [27] **Zhou, H., Liu, L., Ma, H.** (2019) Coverage and capacity analysis of LEO satellite network supporting internet of things. *2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Shanghai, China, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC.2019.8761682.
- [28] **Wang, J., Cho, J., Lee, S., Ma, T.** (2011) Real time services for future cloud computing enabled vehicle networks. *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, China, pp. 1-5, doi: 10.1109/WCSP.2011.6096957.
- [29] **Jiang, W., Han, B., Habibi, M.A., Schotten, H.D.** (2021). The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 334-366, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3057679.
- [30] **Alam, M. S., Karabulut Kurt, G., Yanikomeroglu, H., Zhu, P., Dao, N. D.** (2020) High Altitude Platform Station based Super Macro Base Station (HAPS-SMBS) Constellations. *IEEE Communications Magazine*, 59, 103-109, doi: 10.1109/MCOM.001.2000542.
- [31] **Arum, S. C., Grace, D., Mitchell, P. D., Zakaria, D., Morozs, N.** (2020). Energy management of solar-powered aircraft-based high altitude platform for wireless communications. *Electronics*, vol. 9, no. 179, pp. 1–25, doi: 10.3390/electronics9010179
- [32] **Andrews, J. G., Zhang, X., Durgin, G. D., Gupta, A. K.** (2016). Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification? *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 10, pp. 184–190, doi: 10.1109/MCOM.2016.7588290.
- [33] **Sibiya, S. & Olugbara, O. O.** (2019). Reliable internet of things network architecture based on high altitude platforms. *IEEE Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS)*, Durban, South Africa, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTAS.2019.8703519.
- [34] **Alsharoa, A. & Alouini, M. -S.** (2019). Facilitating satellite-airborne-terrestrial integration for dynamic and infrastructure-less networks.
- [35] **Url-3** <<http://www.weather.gov>>, erişim tarihi 07.11.2023.
- [36] **Messous, M. -A., Sedjelmaci, H., Houari, N., Senouci, S. -M.** (2017). Computation offloading game for an UAV network in mobile edge computing. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC.2017.7996483.

- [37] **d'Oliveira, F. A., d. Melo, F. C. L., Devezas, T. C.** (2016). High-altitude platforms—present situation and technology trends. *Journal of Aerospace Technology and Management*. vol. 8, no. 3, pp. 249–262, doi: 10.5028/jatm.v8i3.699
- [38] **Widiawan, A. K. & Tafazolli, R.** (2007). High altitude platform station (HAPS): A review of new infrastructure development for future wireless communications. *Wireless Personal Communications*, vol. 42, no. 3, pp. 387–404, doi: 10.1007/s11277-006-9184-9
- [39] **Url-4** <<https://hapsalliance.org/overview/>>, erişim tarihi 13.09.2023.
- [40] **ICAO.** (2019). *Draft Regulatory Guidance for Unmanned Aircraft Operations—General Regulations*, APUAS/TF/3—WP/08. Montreal: ICAO.
- [41] **ITU.** (2019). *Sharing and compatibility studies of HAPS systems in the fixed service in the 21.4-22 GHz frequency range for region 2* (Report No: F.2471-0). Geneva: ITU.
- [42] **ITU.** (2019). *Sharing and compatibility studies of HAPS systems in the fixed service in the 24.25-27.5 Ghz frequency range in region 2* (Report No: F.2472-0). Geneva: ITU.
- [43] **ITU.** (2019). *Sharing and compatibility studies of high altitude platform station systems in the fixed service in the 38-39.5 Ghz frequency range* (Report No: F.2475-0). Geneva: ITU.
- [44] **Url-5** <<https://www.itu.int/ITU-D/tech/MobileCommunications/Spectrum-IMT.pdf>>, erişim tarihi 09.08.2023.
- [45] **Balanis, C.A. (2005).** Antenna theory: analysis and design, Wiley-Interscience, 3rd edition.
- [46] **Ramsay, J.** (1981). Highlights of antenna history. *IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter*, vol. 23, no. 6, pp. 7-20, doi: 10.1109/MAP.1981.27575.
- [47] **Url-6** <<https://www.microwaves101.com/encyclopedias/polarization>>, erişim tarihi 08.07.2023.
- [48] **Dirlik, T.** (2020). *Metamalzeme kullanılarak eş benzetim ile mikroşerit anten tasarımı ve optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi). Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [49] **Even, R.** (2019). How Phased Array Antenna Manufacturers Benefit from Rapid Prototyping. *nano-di.com*. Retrieved July 07, 2023, from <https://www.nano-di.com/resources/blog/2019-how-phased-array-antenna-manufacturers-benefit-from-rapid-prototyping>.
- [50] **Url-7** <<https://www.watelectronics.com/antenna-array>>, erişim tarihi 22.05.2023.
- [51] **Sanchez-Barberty, M. (2005).** *Design and implementation of a transceiver and a microstrip corporate feed for solid state x-band radar* (Master's thesis). Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.11801/2413>

- [52] **Gibson, P. J. (1979).** The Vivaldi Aerial. *9th European Microwave Conference*, Brighton, UK, pp. 101-105, doi: 10.1109/EUMA.1979.332681.
- [53] **Baş, R. & Kızılay, A. (2022).** Asymmetrical Coplanar Vivaldi Antenna Design. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, (34), 724-728, doi: 10.31590/ejosat.1084442
- [54] **Reid, E., Ortiz-Balbuena, L., Ghadiri, A., Moez, K. (2012).** A 324-Element Vivaldi Antenna Array for Radio Astronomy Instrumentation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 1, pp. 241-250, doi: 10.1109/TIM.2011.2159414.
- [55] **Warathe, S., Tanti, R. K., Anveshkumar, N. (2019).** Compact Vivaldi Antenna Design at 500MHz for GPR Applications. *2019 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, Ahmedabad, India, pp. 1-5, doi: 10.1109/InCAP47789.2019.9134522.
- [56] **Yngvesson, K. S., Korzeniowski, T. L., Kim, Y.-S., Kollberg, E. L., Johansson, J. F. (1989).** The tapered slot antenna-a new integrated element for millimeter-wave applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 37, no. 2, pp. 365-374, doi: 10.1109/22.20062.
- [57] **Url-8** <<https://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/vivaldi.php>>, erişim tarihi 21.10.2023.
- [58] **Url-9** <<https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Tapered%20Slot%20Antenna.en.html>>, erişim tarihi 03.09.2023.
- [59] **Bourqui, J., Campbell, M. A., Sill, J., Shenouda, M., Fear, E. C. (2009).** Investigation of antenna performance for ultra-wideband microwave breast imaging. *Proc. IEEE Radio Wireless Symp.*, San Diego, CA, 2009, pp. 522–525.
- [60] **Yang, Y., Wang, Y., Fathy, A.E. (2008).** Design of compact Vivaldi antenna arrays for UWB see through wall applications. *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 82, pp. 401–418, doi: 10.2528/PIER08040601.
- [61] **Hood, A. Z., Karacolak, T., Topsakal, E. (2008).** A small antipodal Vivaldi antenna for ultrawide-band applications. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 656–660, doi: 10.1109/LAWP.2008.921352.
- [62] **Dixit, A. S. & Kumar, S. (2021).** Design of a high-gain dual-band antipodal Vivaldi antenna array for 5G communications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 14, 1-9, doi: 10.1017/S175907872100163X.
- [63] **Dixit, A. S. & Kumar, S. (2020).** The enhanced gain and cost-effective antipodal Vivaldi antenna for 5G communication applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62, doi: 10.1002/mop.32335.
- [64] **Bai, J., Shi, S., Prather, D. W. (2011).** Modified Compact Antipodal Vivaldi Antenna for 4–50-GHz UWB Application. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no 4, pp. 1051-1057, doi: 10.1109/TMTT.2011.2113970
- [65] **Liu, H., Yang, W., A. Zhang, Zhu, S., Wang, Z., Huang, T. (2018).** A Miniaturized Gain-Enhanced Antipodal Vivaldi Antenna and Its Array

for 5G Communication Applications. *IEEE Access*, vol. 6, pp. 76282-76288, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2882914.

- [66] **Moosazadeh, M., Kharkovsky, S., Case, J. T., Samali, B.** (2016). Antipodal Vivaldi antenna with improved radiation characteristics for civil engineering applications. *IET Microw., Antennas Propagation*, vol. 11, no. 6, pp. 796–803, doi: 10.1049/iet-map.2016.0720.
- [67] **Dixit, A. S., Kumar, S., Urooj, S., Malibari, A. J.** (2021). A Highly Compact Antipodal Vivaldi Antenna Array for 5G Millimeter Wave Applications. *Sensors*, 21, 2360, doi: 10.3390/s21072360
- [68] **Url-10** <https://space.mit.edu/RADIO/CST_online/mergedProjects/3D/special_postpr/special_postpr_power_view.htm >, erişim tarihi 21.11.2023
- [69] **Url-11** <https://space.mit.edu/RADIO/CST_online/mergedProjects/3D/special_postpr/special_postpr_reference_value_and_normalizing.htm>, erişim tarihi 28.11.2023.
- [70] **Bancroft, R.** (2009). *Microstrip and Printed Antenna Design, 2nd Ed.* Scitech Publishing, Raleigh, NC, p. 30.
- [71] **Abramowicz, A.** (2008). Nearly perfect right angle bends. *MIKON 2008 - 17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Wroclaw, Poland, 2008, pp. 1-3.
- [72] **Wadell, B. (1991).** *Transmission Line Design Handbook*. p. 294.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ali Alperen Kılıç

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kılıç, A. A., Yapar, F. A.** 2023. Antipodal Vivaldi Antenna Design for 6G High Altitude Platform System (HAPS), *2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Istanbul, Türkiye, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU59756.2023.10223817.