

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN UZUN MENZİLLİ VERİ
LİNKİ TASARIMI**

İBRAHİM KARSU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI
HABERLEŞME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. V. EMRE ÖMÜRLÜ**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN UZUN MENZİLLİ VERİ
LİNKİ TASARIMI

İbrahim Karsu tarafından hazırlanan tez çalışması 17.03.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. V. Emre ÖMÜRLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. V. Emre ÖMÜRLÜ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Serdar TÜRK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Kadir ERKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Sanayi ve Ticaret Bakanlığı Sanayi Araştırma ve Geliştirme Genel Müdürlüğü' nün 00812 STZ 2001-1 nolu “ok Maksatlı Hibrid İnsansız Hava Aracı Sistemi Geliştirilmesi” isimli projesi kapsamında yapılmıştır.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bana olan yardımını ve desteğini eksik etmeyen saygıdeğer tez danışmanım Doç. Dr. V. Emre ÖMÜRLÜ' ye hadsiz minnettarlığımı takdim ederim. Ayrıca proje kapsamında anlayışını esirgemeyen değerli yöneticim Sn. Cenk NİKSARLI' ya da teşekkürlerimi borç bilirim.

Mart, 2014

İbrahim KARSU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT.....	xix
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	5
1.3 Hipotez.....	5
BÖLÜM 2	
İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI	6
2.1 İHA'ların Kullanım Amaçları.....	7
2.2 İHA'ların Tarihsel Gelişimi.....	9
2.3 İHA'ların Türkiye'deki Yeri.....	11
2.4 İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması.....	14
2.5 İHA Sistemlerinin Teknik Özellikleri ve Bileşenleri	21
2.5.1 İnsansız Hava Aracı	22
2.5.2 Faydalı Yükler	22
2.5.2.1 Sensörler	23
2.5.2.2 Haberleşme Röleleri	24
2.5.2.3 Silahlar	25
2.5.2.4 Kargo	25
2.5.3 İnsan Bileşeni.....	26
2.5.4 Kontrol Bileşeni.....	26
2.5.5 Veri Linki.....	27
2.5.6 Destek Bileşenleri	28

BÖLÜM 3

İHA' LARIN HABERLEŞME SİSTEMLERİ	29
3.1 Lazer Haberleşmesi.....	30
3.2 Fiber Optik Haberleşmesi	30
3.3 Radyo Haberleşmesi	31
3.3.1 LOS Veri Haberleşmesi	31
3.3.1.1 Hava Veri Rölesi.....	32
3.3.1.2 Haberleşme Rölesi	32
3.3.1.3 İleri Uç Haberleşme Rölesi.....	33
3.3.2 BLOS Haberleşmesi	33
3.3 Taktik Veri Haberleşmesi	34
3.4 Frekans Planlaması	34

BÖLÜM 4

İHA SİSTEMLERİNDE ANTENLER.....	36
4.1 İHA Sisteminde Kullanılan Antenler.....	38
4.1.1 Dipol Antenler	39
4.1.2 Yagi-Uda Antenleri.....	39
4.1.3 Prabolik Reflektör Antenler	39
4.1.4 Horn Antenler	41
4.1.5 Mikro Şerit Antenler.....	41

BÖLÜM 5

İHA SİSTEMLERİNDE VERİ LİNKİ.....	42
5.1 İHA Veri Linki Karakteristiği.....	45
5.1.1 Band Genişliği	46
5.1.2 Frekans Seçimi.....	46
5.2 Veri Linki Tasarım Teknikleri	47
5.3 Veri Linki Güvenliği.....	48

BÖLÜM 6

İHA ANTEN SİSTEMİ TASARIMI.....	49
6.1 Anten.....	52
6.1.1 Mikroşerit Antenin Çalışma Prensibi	54
6.1.2 Mikroşerit Antenin Analiz ve Tasarımı	54
6.1.3 Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri	55
6.1.3.1 Girintili Besleme Modeli	57
6.1.3.2 Çeyrek Dalga İletim Hattı Besleme Modeli	59
6.1.4 Dielektrik Bileşen Seçimi	61
6.1.5 Analiz Metodu	62
6.1.6 Anten Parametreleri	63
6.1.6.1 Anten Kazancı.....	63
6.1.6.2 Verim ve Kalite Faktörü	63
6.1.6.3 Yönlendiricilik Kazancı.....	64
6.1.6.4 Geri Dönüş Kaybı	64
6.1.6.5 Voltaj Duran Dalga Oranı.....	65

6.1.6.6 S_{11} Parametresi.....	66
6.1.6.7 Polarizasyon.....	66
6.1.6.8 Yarım Güç Huzme Genişliği	67
6.2 Kontrol Sistemi	67
6.2.1 DC Motor	68
6.2.1.1 DC Motorun Çalışma Prensibi.....	69
6.2.1.2 DC Motorun Modellenmesi	70
6.2.1.3 DC Motor Seçimi.....	76
6.2.1.4 Proje İçin Gereken DC Motorun Belirlenmesi	77
6.2.1.5 DC Motorun Simulink Modeli.....	79
6.2.2 Yönlendirme Sistemi	84
6.2.2.1 Koordinat Referans Düzlemleri	85
6.2.2.2 Koordinat Dönüşümleri	88
6.2.2.3 Yatay Açı Değerinin Elde edilmesi	91
6.3 Destek Elemanları.....	92
BÖLÜM 7	
MİKRO ŞERİT ANTEN TASARIMI	94
7.1 Anten materyallerinin belirlenmesi	96
7.2 Anten boyut parametrelerinin belirlenmesi	97
7.3 Dielektrik katmanının oluşturulması	99
7.4 Taban katmanının oluşturulması.....	99
7.5 Mikro şerit (Yama) katmanının oluşturulması.....	100
7.6 Besleme kısmının oluşturulması	100
7.7 Portun oluşturulması	101
7.8 Mikroşerit Antenin Analizi.....	101
7.9 Dizi Anten Tasarımı.....	109
BÖLÜM 8	
İHA VERİ LİNKİ TASARIMI.....	118
8.1 Video Vericisi	118
8.2 Anten Kazancı.....	120
8.3 Link Bütçe Hesabı	120
8.4 Link Parametreleri	121
8.4.1 Gürültü	121
8.4.2 Yağış Kayıpları	122
8.4.3 Kablo Kayıpları.....	123
8.4.4 Akım Bileziği Kayıpları.....	124
8.4.5 Anten Kazançları	125
8.4.6 BER Analizi	125
8.4.7 Modülasyon Seçimi	129
8.4.8 Güvenlik Seviyesi ve Sönümleme Marjini	131
8.4.9 Menzil Değerinin Elde Edilmesi.....	132
8.4.10 Kanal Modeli ve Serbest Uzay Yol Kaybı.....	133
8.4.11 Link Bütçe Hesabı için Matlab Uygulaması.....	135
BÖLÜM 9	

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	143
KAYNAKLAR	145
EK-A	
SİMÜLASYONDA KULLANILAN MATLAB KODLARI.....	147
EK-B	
MAXON 118749 DC MOTOR KATALOĞU	149
EK-C	
MİKROŞERİT ANTEN PARAMETRELERİ MATLAB KODU	150
EK-D	
MENZİL HESABI UYGULAMASI MATLAB KODU.....	152
ÖZGEÇMİŞ	154

SİMGE LİSTESİ

η	Band genişliği verimi
B	Band genişliği
B	Mekanik sistemin sürtünmesi
C	Taşıyıcı gücü
CN	Taşıyıcı gürültü oranı
d	Haberleşme menzili
D	Yönlendiricilik kazancı
e	Işıma verimi
e_A	Anten açıklık verimi
E_b	Bit enerjisi
e_p	Polarizasyon verimi
E_{reff}	Efektif dielektrik sabiti
e_T	Toplam verim
e_t	Verici verimi
G_{pf}	Mikroşerit antenin girinti genişliği
G_r	Alıcı anten kazancı
G_{sys}	Sistem kazancı
G_t	Verici anten kazancı
h	Mikroşerit antenin yalıtkan kısmının yüksekliği
$i(t)$	Armatüre akımı
J_L	Yükün eylemsizlik momenti
J_M	Motorun eylemsizlik momenti
K	Boltzman sabiti
K_b	Ters EMK sabiti
K_i	Tork sabiti
L	Mikroşerit antenin yama uzunluğu
L	Alıcıdaki eşik değer
L	Armatüre endüktansı
L_c	Kablo Kaybı
L_f	Mikroşerit antenin girinti uzunluğu
L_{fs}	Serbest uzay yol kaybı
L_g	Mikroşerit antenin taban genişliği
L_T	Toplam kayıp
M_l	Log normal marjini

M_r	Yağış marjini
M_t	Toplam marjin
N	Isıl gürültü gücü
N_0	Isıl gürültü
N_{th}	Isıl gürültü şiddeti
P_0	d_0 Referans noktasındaki güç
P_{di}	Ortalama güç
P_{dl}	Ortalama alıcıda alınan güç
P_{in}	İletilen gücün
P_r	Alıcıdaki güç
P_{rad}	Anten tarafından ışıyan güç
P_{rec}	Antene gelen güç
P_t	Verici gücü
Q_c	İletken kaybindan kaynaklı kalite faktörü
Q_d	Dielektrikten kaynaklı kalite faktörü
Q_{rad}	Işıma kayıplarından dolayı oluşan kalite faktörü
Q_{SW}	Yüzey dalgalarından kaynaklı kalite faktörü
Q_t	Toplam kalite faktörü.
r	Rolloff faktörü
R	Armatürün direnci
R_b	Bit hızı
R_b	Bit hızı
R_L	İletilen gücün yansıyan güce (P_{ref}) oranı
R_s	Sembol hızı
S_{11}	Geri dönüş kaybı
S_{rx}	Alıcı Hassasiyeti
t	Mikroşerit antenin iletken kısmının yüksekliği
T	Sıcaklık
$\tan\delta$	Kayıp tanjantı
T_L	Yük torku
T_M	Motor torku
V	Uygulanan voltaj
V_b	Ters elektromotor kuvveti
W	Mikroşerit antenin yama genişliği
W_f	Mikroşerit antenin iletim hattının genişliği
W_g	Mikroşerit antenin taban genişliği
Z_0	Transmisyon hattının empedansı
Z_{in}	Giriş empedansı
Γ	Yansıma katsayısıdır.
γ	Yol kaybı üssü
λ	Dalga boyu
σ	İletken katmanın iletkenliği
ω	Açısal hız

KISALTMA LİSTESİ

AWGN	Additional White Gaussian Noise
BER	Bit Error Ratio
BLOS	Beyond Line of Sight
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BW	Band Width
C2	Control and Command
ED/ET	Elektronik Destek / Elektronik Tanımlama
EIRP	Effective Isotropic Radiate Power
FI	Frame Imagery
FMV	Full Movie Video
GPS	Global Position System
HALE	High Altitude Long Endurance
HD	High Definition
HF	High Frequency
HPBW	Half Power Beam Width
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
IRL	Isotropic Receiver Level
ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar
ITU	International Telecommunication Union
İHA	İnsansız Hava Aracı
LOS	Line of Sight
MALE	Medium Altitude Long Endurance
MAPL	Maximum Allowable Path Loss
MPEG	Moving Pictures Experts Group
NF	Noise Figure
NLOS	Non Line of Sight
PD	Proportional Derivate
PI	Proportional Integral
PID	Proportional Integral Derivate
PSK	Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
SAR	Synthetic Aperture Radar
SATCOM	Satellite Communication
SNR	Signal to Noise Ratio

SSM	Savunma Sanayi Müsteşarlığı
TIA	Turkish Aerospace Industry
TİHA	Türk Özgün İnsansız Hava Aracı
UHV	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
WRC	World Radiocommunication Conference
YKİ	Yer Kontrol İstasyonu
YVT	Yer Veri Terminali

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2 .1 Projede kullanılan insansız hava aracı	6
Şekil 2 .2 İHA haberleşme sistemi	7
Şekil 2 .3 Scout insansız hava aracı	10
Şekil 2 .4 Anka insansız hava aracı.....	13
Şekil 2 .5 Silah faydalı yüklü insansız hava aracı	21
Şekil 2 .6 İHA faydalı yük sensörleri.....	24
Şekil 2 .7 İHA sisteminde silahlar.....	25
Şekil 2 .8 Yer kontrol istasyonu	27
Şekil 3 .1 İHA' ların fiber optik haberleşmesi	31
Şekil 3 .2 İHA LOS haberleşmesi	32
Şekil 3 .3 İHA BLOS haberleşmesi	33
Şekil 4 .1 İHA sistemlerinde kullanılan antenler	38
Şekil 4 .2 Parabolik reflektör anten.....	40
Şekil 4 .3 Parabolik reflektör antenin çalışma prensibi.....	40
Şekil 4 .4 Horn anten.....	41
Şekil 5 .1 İHA kontrollü ateşleme sistemi	43
Şekil 5 .2 İHA veri linki örneği.....	45
Şekil 5 .3 Jamming etkisi	47
Şekil 6 .1 Otomatik yönlendirilebilir anten sistemi	52
Şekil 6 .2 Mikro şerit anten bileşenleri	53
Şekil 6 .3 Mikro şerit anten şekilleri	53
Şekil 6 .4 Mikroşerit antenin ışınımı.....	54
Şekil 6 .5 Mikroşerit anten besleme teknikleri.....	56
Şekil 6 .6 Mikroşerit anten için inset besleme	58
Şekil 6 .7 Çeyrek dalga iletim hattı besleme modeli.....	60
Şekil 6 .8 Duran dalga voltaj değerinin iletim hattı boyunca ilerleyişi.....	66
Şekil 6 .9 Elektromanyetik dalganın polarizasyonu.....	67
Şekil 6 .10 DC Motorun elektriksel ve fiziksel model gösterimi.....	71
Şekil 6 .11 DC Motorun transfer fonksiyonunun blok diyagramı	72
Şekil 6 .12 DC Motorun darbe girişe verdiği cevap (hız)	74
Şekil 6 .13 DC Motorun basamak girişe verdiği cevap (hız)	74
Şekil 6 .14 DC Motorun darbe girişe verdiği cevap (konum).....	75
Şekil 6 .15 DC Motorun basamak girişe verdiği cevap (konum).....	76
Şekil 6 .16 Tork değerinin gösterimi.....	77
Şekil 6 .17 Proje kapsamında kullanılan DC motor	78
Şekil 6 .18 DC Motorun Simulink modeli	80

Şekil 6. 19 DC Motorun Simulink modelin step girişe karşılık hız çıkışı	80
Şekil 6. 20 DC Motorun PID kontrollü Simulink modeli	81
Şekil 6. 21 Oransal kontrollü DC motorun step yanıtı	82
Şekil 6. 22 PID kontrollü DC motorun step yanıtı	83
Şekil 6. 23 PID kontrol parametreleri	83
Şekil 6. 24 İHA' nın hareket manevraları	84
Şekil 6. 25 Lokal Teğet Koordinat Sistemi	86
Şekil 6. 26 NED Koordinat Sistemi	87
Şekil 6. 27 Göve Koordinat Sistemi	88
Şekil 6. 28 NED Koordinat Sistemi' nde bağıl vektörün elde edilmesi	90
Şekil 6. 29 Gövde Koordinat Sistemi' nde bağıl vektörün elde edilmesi	91
Şekil 6. 30 Slip-Ring	93
Şekil 7. 1 CST Microwave Studio simülasyon programı	95
Şekil 7. 2 Mikroşerit anten için hazırlanan Matlab uygulamasının çıktısı	98
Şekil 7. 3 Mikroşerit anten parametrelerinin CST programına girilmesi	98
Şekil 7. 4 Mikroşerit antenin dielektrik katmanı	99
Şekil 7. 5 Mikroşerit antenin taban katmanının oluşturulması	99
Şekil 7. 6 Mikroşerit antenin yama katmanı	100
Şekil 7. 7 Mikroşerit antenin besleme kısmı	101
Şekil 7. 8 Mikroşerit antenin besleme portu	101
Şekil 7. 9 Tasarlanan mikroşerit antenin uzak alan ışıma diyagramı	102
Şekil 7. 10 Tasarlanan antenin uzak alan ışıma diyagramının polar çizim	103
Şekil 7. 11 Tasarlanan antenin yönlendiricilik kazancının frekansa göre değişimi	103
Şekil 7. 12 Tasarlanan mikroşerit antenin kazancının frekansa göre değişimi	103
Şekil 7. 13 Tasarlanan mikroşerit antenin S_{11} değerinin frekansa göre değişimi	104
Şekil 7. 14 L_g parametresine göre S_{11} değerinin değişimi	105
Şekil 7. 15 L_g parametresine göre yönlendiricilik kazancının değişimi	105
Şekil 7. 16 L_g parametresine göre kazancın değerinin değişimi	105
Şekil 7. 17 L_f parametresine göre S_{11} değerinin değişimi	105
Şekil 7. 18 L_f parametresine göre yönlendiricilik kazancının değişimi	106
Şekil 7. 19 L_f parametresine göre kazancın değişimi	106
Şekil 7. 20 G_{pf} parametresine göre S_{11} değerinin değişimi	106
Şekil 7. 21 G_{pf} parametresine göre yönlendiricilik kazancının değişimi	106
Şekil 7. 22 G_{pf} parametresine göre kazancın değişimi	107
Şekil 7. 23 L parametresine göre S_{11} değerinin değişimi	107
Şekil 7. 24 L parametresine göre yönlendiricilik kazancının değişimi	107
Şekil 7. 25 L parametresine göre kazancın değişimi	107
Şekil 7. 26 Optimizasyon sonucu S_{11} değerinin frekansa göre değişimi	108
Şekil 7. 27 Optimizasyon sonucu yönlendiricilik kazancının frekansa göre değişimi	108
Şekil 7. 28 Optimizasyon sonucu kazancın frekansa göre değişimi	108
Şekil 7. 29 Tasarlanan 2x1 mikroşerit dizi anten	109
Şekil 7. 30 Dizi mikroşerit anten için tasarım parametrelerinin elde edilmesi	110
Şekil 7. 31 Tasarlanan antenin S_{11} değerinin frekansa göre değişimi	111
Şekil 7. 32 Tasarlanan antenin yönlendiricilik kazancının frekansa göre değişimi	111
Şekil 7. 33 Tasarlanan antenin kazancının frekansa göre değişimi	111
Şekil 7. 34 Optimize dizi antenin S_{11} değerinin frekansa göre değişimi	112
Şekil 7. 35 Optimize dizi antenin yönlendiricilik kazancının frekansa göre değişimi	112
Şekil 7. 36 Optimize dizi antenin kazancının frekansa göre değişimi	112
Şekil 7. 37 Optimize dizi antenin VSWR değerinin frekansa göre değişimi	113

Şekil 7. 38	Tasarlanan dizi antenin yatay düzlemde uzak alan ışıması	113
Şekil 7. 39	Tasarlanan dizi antenin düşey düzlemde uzak alan ışıması	114
Şekil 7. 40	Tasarlanan dizi antenin yatay düzlemde ışımasının polar çizimi	114
Şekil 7. 41	Tasarlanan dizi antenin düşey düzlemde ışımasının polar çizimi	115
Şekil 7. 42	Tasarlanan optimize mikroşerit dizi anten	116
Şekil 7. 43	S_{11} değerinden band genişliği hesabı	117
Şekil 8. 1	Video elde edilmesi ve YKİ' ye aktarım işlemi	120
Şekil 8. 2	Yağış zayıflatması	123
Şekil 8. 3	Yükselen kosinüs darbe biçimi	129
Şekil 8. 4	BER değerinin E_b/N_o ' a göre değişimi	130
Şekil 8. 5	Yol kaybı sönümlleme modelleri	134
Şekil 8. 6	İHA menzil değerinin hesaplanması	135
Şekil 8. 7	İHA menzil değerinin hesaplanamsı sonucu elde edilen değerler	136
Şekil 8. 8	İHA haberleşme menzilin alıcı anten kazancına göre değişimi	138
Şekil 8. 9	İHA haberleşme menzilin verici anten kazancına göre değişimi	139
Şekil 8. 10	İHA haberleşme menzilin yağış sönümlemesine göre değişimi	140
Şekil 8. 11	İHA haberleşme menzilin verici çıkış gücüne göre değişimi	141
Şekil 8. 12	Sistem tarafından gereken C/N değeri alıcı hassasiyeti	142

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2 .1 İHA' ların görevleri	8
Çizelge 2 .2 Türkiye'nin İHA envanteri	14
Çizelge 2 .3 İHA' ların sınıflandırılması	17
Çizelge 2 .4 İHA kategorileri ve özellikleri	18
Çizelge 3. 1 Frekans bandı standartları.....	35
Çizelge 6. 1 Haberleşme menzili parametreleri.....	50
Çizelge 6. 2 G_{pf} parametresinin mikroşerit anten tasarımında ki etkisi	58
Çizelge 6. 3 Dielektrik malzeme özellikleri	62
Çizelge 6. 4 DC Motor Terimleri.....	68
Çizelge 6. 5 DC Motorun matematiksel parametreleri	70
Çizelge 6. 6 Projede kullanılacak dc motorun parametreleri.....	79
Çizelge 7. 1 Mikroşerit anten parametreleri	96
Çizelge 7. 2 Projede kullanılan dielektrik malzemenin özelliği	97
Çizelge 7. 3 Optimizasyon sonucu elde edilen anten parametreleri	108
Çizelge 7. 4 Tasarımda kullanılan anten parametrelerinin optimize değeri	115
Çizelge 7. 5 Tasarlanan antenin parametre değerleri.....	116
Çizelge 8. 1 Proje kapsamında ki İHA' nın teknik özellikleri.....	118
Çizelge 8. 2 Projede kullanılan video vericisinin teknik özellikleri	119
Çizelge 8. 3 Farklı kablo modelleri için kayıplar.	124
Çizelge 8. 4 Modülasyon türüne göre BER değerinin elde edilmesi.....	125
Çizelge 8. 5 M-QAM modülasyonunun parametreleri	127
Çizelge 8. 6 M-PSK modülasyonunun parametreleri	128
Çizelge 8. 7 M-FSK modülasyonunun parametreleri	128
Çizelge 8. 8 QPSK modülasyonuna göre modülasyon parametreleri.....	130
Çizelge 8. 9 Link bütçe parametreleri.....	137

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN UZUN MENZİLLİ VERİ LİNKİ TASARIMI

İbrahim KARSU

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. V. Emre ÖMÜRLÜ

Son yıllarda elektronik ve mekanik donanımlardaki gelişim insansız sistemler üzerinde büyük ilerleme sağlamıştır. Bunda donanımların ebatlarının küçülmesi, kapasite ve yeteneklerinin artışı, dayanıklılık artışı ve üretim maliyetlerinde ki azalma oldukça etkili olmuştur. Bu kazanımların sonucunda kırk yıllık tarihinde insansız hava araçları (İHA, İnsansız Hava Araçları) kayda değer gelişmeler kat etmiştir. İstihbarat ve operasyon alanlarında hem sivil hem de askeri amaçlar için kullanılmakta olan İHA' lar vazgeçilmez araçlar olmuştur. İnsansız sistemler olması ve uzaktan komuta ve kontrol edilebilmeleri İHA' ların en önemli özellikleridir. Ayrıca uzun operasyon sürelerinde kullanılabilmesi bir diğer önemli özellikleridir. Türkiye stratejik konumu ve komşu ülkeleri ile olan sınırlarının coğrafi özellikleri İHA' ları ülkemiz için oldukça önemli hale getirmiştir. Son yıllarda da bu bağlamda ciddi projeler ve çalışmalar yürütülmektedir. Hem özel sektörde hem de resmi kurumlarda önemli teşebbüsler ardıl sıra devam etmektedir.

Ancak İHA' lar teknik özellikleri nedeniyle bazı kısıtlamaları da beraberinde getiren sistemlerdir. Örneğin ebat olarak küçük olması ve düşük ağırlıklarda olma zorunluluğu güç tüketimini önemli hale getirmektedir. Çünkü güç sağlayıcıları hem fiziksel alan kısıtlamalarından hem de aerodinamik koşullar gereği kısıtlıdır. Dolayısıyla İHA'nın uzun uçuş süresi boyunca ihtiyaç duyduğu gücü planlı ve iktisatlı kullanması gerekmektedir. Bir diğer gereklilik ise İHA' nın uzun menzil uçuşu gerçekleştirebilmesidir. Ancak İHA, uzun menzillerde yer veri istasyonuna (YVİ, Yer Veri İstasyonu) bilgi akışında bulunabilmesi için çok fazla güç tüketimine ihtiyaç duymaktadır. Bu durum zaten kısıtlı olan güç sağlayıcılarına olumsuz yönde etki

etmektedir. “Çok Maksatlı Hibrid İnsansız Hava Aracı Geliştirilmesi” isimli SANTEZ projesi için geliştirilecek olan İHA için uzun menzilin güç tüketimi artışı olmaksızın sağlanması amacıyla yüksek kazançlı otomatik yönlendirilebilir mikro şerit anten önerisinde bulunulmuştur. Proje kapsamında yaklaşık 150 Km menzile ihtiyaç duyulmaktadır. Öncelikle link bütçe hesabı yapılarak ihtiyaç duyulan mikro şerit antenin kazancı elde edilmiştir. Daha sonra ise bu bağlamda mikro şerit anten tasarımı yapılmış ve otomatik yönlendirme sistemine dahil edilmiştir. Son olarak da tasarlanan otomatik yönlendirilebilir anten sistemi için link bütçe hesaplamaları gerçek senaryolar dahilinde yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı, Otomatik Yönlendirilebilir Anten, Mikro Şerit Anten, Link Bütçe Hesabı, Veri Linki, Dc Motorlar.

ABSTRACT

DESIGN OF LONG RANG DATA LINK FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

İbrahim KARSU

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof V. Emre ÖMÜRLÜ

In recent years, the development of electronic and mechanical hardwares have led to great progress on the development of unmanned systems. The reduction in size of the hardware with time, increase of capacity and capabilities, increase of the durability and decrease of production costs have been quite effective on this case. As a result of these gains, forty-year history of unmanned aerial vehicles (UAV, Unmanned Aerial Vehicles) have made of many significant improvements. UAVs, which are being used for the both civilian and military purposes on the fields of intelligence and operation, have become indispensable vehicles for both the civilian applications and defense industry. Having unmanned of systems and being able to remote command and control are the most important characteristics of UAVs. Also, to use it in the long periods of operation is another one important features. Because of Turkey's strategic location and geographical features of the borders with neighboring countries, UAVs have been become very important for our country. The many significant projects and studies have carried out in this context. In the Both the private sector and official institutions, important undertakings have continued to as successor.

On the other hand, due to the technical characteristics of UAVs are systems which bring some limitations. For instance, they which are have size of small and have to be weigths of low, the power consumption brings the important situation. Because the power supplies are limited by not only the physical space of constraints, but also the aerodynamic conditions. Therefore, the power required of UAV need to use planned and economising for the during of the long flight time. An another requirement UAV's

can be go through with long rang flight. However, UAV requires a lot of power consumption in order to transfer the data of information to the Graund Data Station (GTS) on the long range. This situation has a negative effect on to be have already limited power providers. To be have high gain automatically routed microstrip antenna has been proposed,"Hybrid Multi-Purpose Unmanned Aerial Vehicle System Development" is named which is being developed for the project of SANTEZ, in order to ensuring without increase of power consumption to long range for unmanned aerial vehicles. The flight range of about 150 Km is needed part of the project for UAV. At first, automatically routed to the antenna was designed. As part of this system antenna and components of redirect was analyzed and designed. The system of antenna which is routed automatically for component of the antenna, high gain and narrow beam micro-strip antenna design be realized. As for the part of redirecting, DC motor and the control unit analyses were made. For the most appropriate system design, the automatic redirecting system mathematical analysis and modeling was performed. Consequently, all the communications link parameters are obtained for the real scenario the environment. In consequence of these parameters, the communication link design has been concluded with the link budget calculation. In a conclusion, Within the scope the project being needed the increase range, when at the current power consumption, is obtained with the system of antenna which is routed automatically. In this respect towards the UAV's requirements the most suitable communications link design were made.

Keywords: Ummanned Air Vehiche, Automated Directional Antenna, Micro Stript Antenna, Link Budget Calculation, Data Link, Dc Motors

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Proje kapsamında birbirinden tamamen bağımsız değişik konular incelenmiştir. Bu konular her ne kadar birbirinden bağımsız olsa da böyle bir çalışma için bütünleşmiştir. Diğer bir ifade ile düşünülen tasarım için farklı çalışmalar bir araya getirilerek özgün bir tasarım elde edilmeye çalışılmıştır. Projenin ilk kısmı İHA sistemleri hakkında genel ifadeleri içermektedir. Bu ifadeler İHA' nın tanımı, genel bilgiler, Türkiye ve Dünyadaki yeri, teknik özellikleri, bileşenleri ve standartlarıdır. Bu bağlamda birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Ancak gelişmekte olan İHA sistemleri için en doğru bilgiler belirli standardı olan kabul görmüş otoriteler tarafından elde edilebilmektedir. Bunun için yayımlanmış kitaplar [1], Savunma Sanayi Müsteşarlığı çalışmaları [2], Bilgi Teknolojileri yayınları [3], NATO [4] ve NASA [5] çalışmaları, İHA çalışmaları yürüten danışman kurumların yayınları [6], dergiler [7] ve üniversite yayınları [8] gibi kaynaklarından yararlanılmıştır.

İHA haberleşme sistemleri bu proje için temel çalışma konusu olmasından dolayı üzerinde daha fazla durulmuştur. Öncelikle İHA sistemlerinde kullanılan haberleşme sistemleri irdelenmiştir. Bunun için Savunma Sanayi Müsteşarlığı tarafından yayımlanan süreli dergi olan Savunma Sanayi Gündem Dergisi takip edilmiştir. Burada yer alan beklentiler, standartlar ve tanımlamalar dikkate alınmıştır. Teknik anlamda ise akademik çalışmalar [9] [10] ve [11] incelenmiştir. Bu çalışmalarda, İHA sistem haberleşme sistemlerinin sistem gerekliliklerinin tespiti noktasında incelenmiştir.

İHA anten sistemleri iki başlık altında incelenmiştir. Bunlar genel anlamda antenler ve İHA sistemlerinde kullanılan anten türleridir. Genel anlamda anten türlerinde

haberleşme sistemlerinde kullanılan antenlerin özellikleri ve parametreleri incelenmiştir. Anten parametreleri tüm anten sistemleri için veri linki tasarımında kullanılan parametre değerleridir. Balanis C. [12], Gark R. [13] ve Milligan T. [14] yazarlarına ait çalışmalar anten sistemlerinin genel özelliklerinin anlaşılmasında referans alınmıştır. Balanis C. anten ve haberleşme sistemleri için genel otorite olmuş bir akademisyendir. Yine aynı şekilde Milligan T. daha güncel çalışmalara yer vermektedir. Proje kapsamında haberleşme sistemi için mikro şerit anten sistemi kullanılması kanaatine varılmıştır. Bunda mikro şerit antenlerin önemli ölçüde ebat ve ağırlıklarının İHA sistemleri için en elverişli anten sistemleri olması etkili olmuştur. Dolayısıyla mikro şerit antenler daha detaylı incelenmiştir. Öncelikle mikro şerit anten sistemleri incelenmiştir. Mikro şerit anten sistemlerinin genel özelliklerinin incelenmesi Balanis C. [12]'nin kitabında detaylı bir şekilde yer almıştır. Ayrıca Gark R. [13]'nin çalışması mikro şerit antenler hakkında detaylı bilgilere yer vermektedir. Bu çalışma, proje için tasarlanacak olan anten parametrelerinin saptanmasında gerek duyulan denklemler ve matematiksel eşitliklerin elde edilmesi için kullanılmıştır. Mikro şerit anten sistemlerinin tasarımları tamamen optimize bir çalışmadır. Yani tasarlanan anten sistem gereksinimleri için antenin parametrelerine değişik değerler verilerek en uygun seçim yapılmaktadır. Bunun için daha önce yapılan çalışmaların incelenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmalarda elde edilen kazanımlar ve deneyimler mikro şerit anten tasarımı için gereken zamanı kısaltmaktadır ve istenen anten değerlerinin elde edilmesi noktasında önemli ölçüde fikir vermektedir. Bahsedilen [12], [13] ve [14] kitaplarında, anten sistemlerinin parametre değerinin matematiksel hesaplamaları incelenmiştir. Bu matematiksel hesaplamalar neticesinde veri linki tasarımında kullanılacak değerler elde edilmiştir. [10] çalışması ise İHA sistemlerinde kullanılan antenlerin gereksinimlerini ve standartlarını belirleme noktasında referans alınmıştır. İncelenen bu çalışma neticesinde haberleşme sistemi için ihtiyaç duyulacak en uygun antenin tespiti yapılmıştır.

Ayrıca [15] yüksek lisans tez çalışması İHA sistemlerinde kullanılan haberleşme teknikleri noktasında referans alınmıştır. Ek olarak [8] raporunda dünya genelinde kullanılan İHA türlerinin haberleşme sistemleri ve haberleşme bileşenleri verilmiştir. Bu çalışma detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çünkü mevcut İHA türlerinin haberleşme sistemlerinin teknik özellikleri ve bunun neticesinde elde edilen kazanımları çalışma

ortamları için verilmektedir. Bu çalışma sistem tasarımıda önemli bir öngörü sunmaktadır.

İHA veri linki tasarımıda ise haberleşme sistemleri ve haberleşme link bütçe hesaplamalarını içeren Abate Z.'nin kitabı [16] incelenmiştir. Bu çalışma İHA sistemleri için veri linki tasarımıda önemli bir referans olmuştur. Çalışmada WiMAX haberleşme teknolojisi üzerine analiz yapılmış olup, buradaki analizler İHA sistemlerine uyarlanmıştır.

Bu çalışmada otomatik yönlendirilebilir anten sistemi tasarımı yapılacaktır. Otomatik yönlendirilebilir anten sistemi için kullanılacak anten türünün saptanması önemli bir konudur. Projede mikro şerit anten düşünüldüğü için, mikro şerit antenin genel anlamda incelenmesi oldukça önemlidir. Bu bağlamda proje için düşünülen antenin yalıtkan kısmının bileşenin türü hakkında fikir temin edinilmiştir. Ayrıca mikro şerit antenin tasarımıda bir diğer önemli konu da antenin beslenmesidir. Besleme hattı antene iletilen gücün verimli bir şekilde ışıması için önemli bir noktadır. Bu nedenle [17] ve [18] çalışmaları bu bağlamda incelenmiştir.

Çalışmanın bir diğer bölümünde ise kontrol sistemi bulunmaktadır. Kontrol sistemi için [19] yüksek lisan tezi referans alınmıştır. Bu çalışmada insansız deniz aracı için hedef takip sistemi uygulaması yapılmıştır. Hedef takibi kamera kontrolü ile sağlanmaktadır. Hedef hareketli bir sistem olup koordinatları İHA tarafından temin edilmektedir. Proje kapsamında ise İHA video verici antenin Yer Veri Terminali'ni takip etmesi istenmektedir. Dolayısıyla Kandasamy J. 'nin çalışması böyle bir sistem için koordinat dönüşümleri ve yatay açı değerinin elde edilmesi noktasında referans olacak bir çalışma olmuştur.

Kontrol sisteminin ikinci kısmı ise DC motorlardır. DC motorların çalışma prensipleri ve matematiksel modelleri için önemli çalışmalar yer almaktadır. Bunlardan en yaygın olan iki çalışma referans alınmıştır. Kissell T.[20] ve Hughes A. [21]'nin kitapları bu bağlamda incelenmiştir. Bu kaynaklarda DC motorların türleri, çalışma prensipleri, parametreleri ve kontrol mekanizmaları incelenmiştir. DC motorun Matlab ve Simulink modeli ve analizleri için ise [22] ve [23] kaynakları referans alınmıştır. DC motor için kontrol sistemi olarak PI, PD ve PID kapalı çevrim kontrolleri kullanılmaktadır. Projede kullanılacak DC motorun kontrolüne karar verilmesi aşamasında [24] yüksek lisans tezi referans alınmıştır.

Bu çalışmanın son iki bölümünde tasarımlar yapılmıştır. Öncelikle mikro şerit anten sistemi tasarımı daha sonra ise veri linki tasarımı yapılmıştır. Mikro şerit antenler kullanıcı talebi doğrultusunda tamamen özelleştirilen özgün anten modelleridir. Mikro şerit anten sistemi tasarımında üzerinde durulması gereken konular için bazı referanslar incelenmiştir. Proje için kullanılacak anten kazancı tek elemanlı mikro şerit anten ile elde edilemeyeceğinden dizi mikro şerit anten tasarlanacaktır. Dizi anten tasarımı için dikkat edilmesi gereken önemli gereksinimler [25] yüksek lisans tezinde incelenmiştir. Tez kapsamında mikro şerit dizi anten tasarım parametrelerinin değişimleri ve elde edilen kazanımları mevcuttur. [26] yüksek lisans tezinde ise mikro şerit anten tasarım parametrelerinin anten kazancı ve merkez frekansı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Bu etkinin anlaşılması, link bütçe hesabında çok önemli değere sahip kazanç ve frekans parametreleri için çok önemlidir. Son olarak proje kapsamında tasarlanacak anten için yakın bir çalışma olan [27] makalesi incelenmiştir. Proje için tasarlanan anten bu çalışma da yer alan antenler ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

Veri linki tasarımı projenin en önemli aşamasıdır. Tasarlanan sistemin çalışılabilirliği ve güvenilirliği link bütçe parametrelerinin gerçek ortamla uyumlu olmasına ve İHA' nın çalışma bölgesinin şartlarına bağlıdır. Dolayısıyla link bütçe parametrelerinin seçimine oldukça fazla önem verilmelidir. Aksi halde gerçek ortam şartlarına uygun olmayan bir haberleşme sistemi çalışmayacaktır. Çünkü haberleşme sistemlerinde yer alan link parametrelerinde ki küçük bir değişim bile çok farklı sonuçlar doğurmaktadır. Link bütçe hesabında Abate Z.' nin çalışması incelenmiştir. Bu kitap WiMAX sistemleri için yapılan bir çalışma olsa da İHA haberleşme sistemine uyarlanabilmektedir. Ayrıca burada yer verilmeyen link parametreleri için [9] ve [1] kaynaklarından yararlanılmıştır. Ayrıca parametrelerin saptanması noktasında [28] bildirisi incelenmiştir. ITU (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği, International Telecommunication Union) çalışması olan bu bildiride belirli standart değerine ve İHA veri linki tasarımında ki sistem gereksinimlerine yer verilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen yorum ve kazanımlar neticesi veri linkinin güvenilirliği başka çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bunun için yüksek lisans tezi olan [15] çalışması incelenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

İHA' lar birçok avantaja sahip olmaları nedeniyle günümüzün vazgeçilmez araçları olmuştur. Savaş uçaklarına göre daha uzun süre havada kalmaları, pilot gibi üzerinde insan kontrolüne ihtiyaç duymamaları ve herhangi bir kazada veya vurulmalarında insan zayıatı olmaması en önemli farklılıklarıdır. Ancak İHA' ların da gelişmekte olan her sistem gibi avantajları ve dezavantajları vardır. İHA'nın en önemli dezavantajı kısıtlı güç kaynağına sahip olmasıdır. Dolayısıyla yapılacak olan her çalışma da bu kısıtlama dikkate alınmalıdır. BAYKAR makine ile ortak yürütülen İHA geliştirme projesi olan SANTEZ projesinde, İHA için yaklaşık 150 Km menzile ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacın güç tüketimini arttırmadan giderilmesi için otomatik yönlendirilebilir anten tasarımı düşünülmüştür. Böylece tasarlanan bir yüksek kazançlı anten ile aynı güç tüketiminde daha uzun menzil elde edinilebileceği düşünülmüştür. Bu çalışmada amaçlanan ihtiyaç duyulan menzil ihtiyacını karşılamak için yüksek kazançlı bir mikro şerit anten tasarlama ve bunun neticesinde uzun menzilli İHA veri linki tasarımıdır. Bunun için öncelikle link bütçe hesabı yapılacaktır. Bu hesaplama da projede kullanılan İHA'nın verilerinden yararlanılacaktır. Elde edilen veriler ışığında gereken anten parametreleri elde edilecektir. Daha sonra ise anten tasarımı CST Microwave programında gerçekleştirilecektir. Son olarak ise tasarlanan haberleşme linki için gerçek ortam senaryoları dahilinde link bütçe hesabı yapılacaktır.

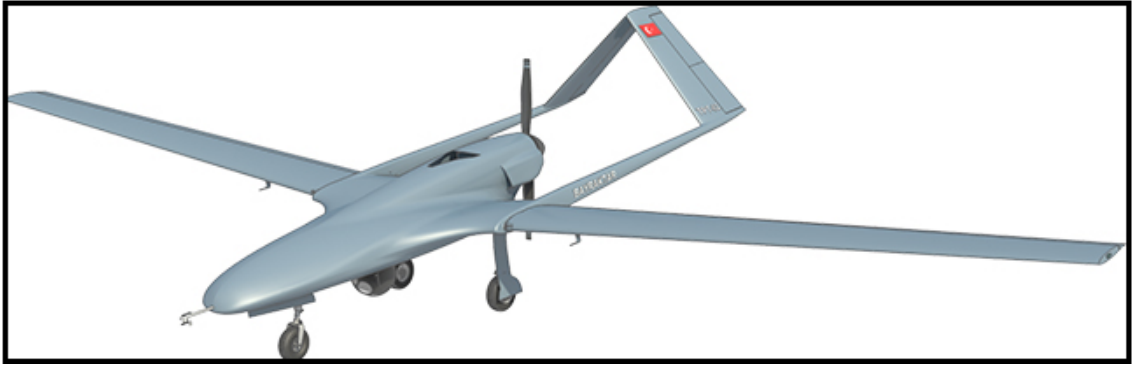
1.3 Hipotez

Bu çalışmada proje kapsamında gerek duyulan yaklaşık 150 Km uçuş menziline temini için otomatik yönlendirilebilir anten sistemine sahip veri linki önerisinde bulunulmuştur. Kontrol ünitesi ve anten tasarımı yapılacaktır. Daha sonra ise gerçek senaryolar dâhilinde link bütçe hesabı yapılarak istenen uçuş menzili elde edilecektir.

BÖLÜM 2

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI

İnsansız hava aracı uzaktan kumanda ve kontrol edilebilen ölümcül ve ya ölümcül olmayan sivil ve ya askeri kullanım alanlarına sahip sistemlerdir. Uzun yıllar boyunca insansız sistemler üzerinde çalışılmış ancak son yıllarda teknolojik gelişmeler ile İHA' lar belli bir yere gelebilmişlerdir. Bu teknolojik gelişmeler haberleşme teknolojilerinin ilerlemesi, elektronik donanımlarda ki kazanımlar ve sensör teknolojilerinde ki ilerlemelerdir. Bu sayede artık avuç içi büyüklüğünde İHA' ların geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Ayrıca görevi ve kullanım ihtiyaçları doğrultusunda muhtelif çeşit İHA' lara rastlamak artık mümkün hale gelmiştir.

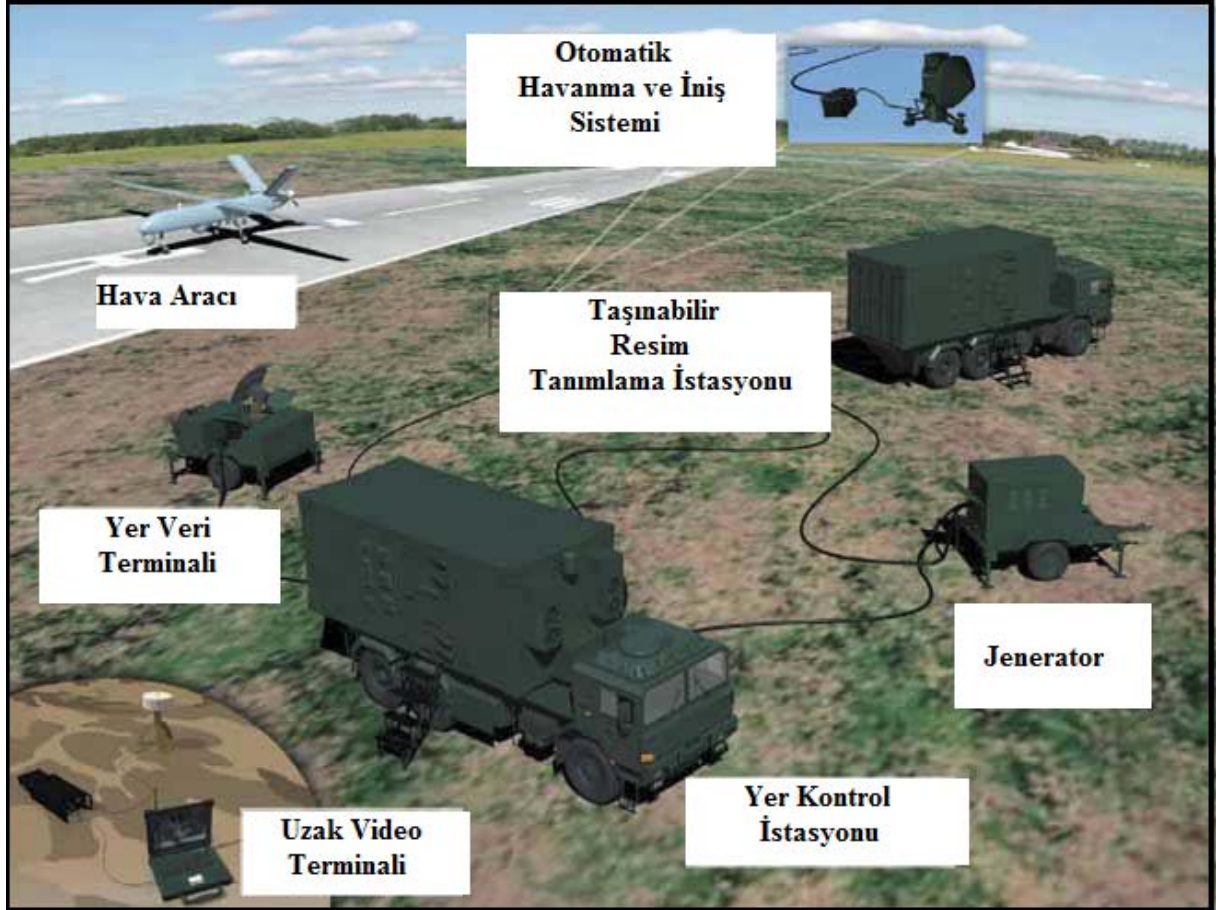


Şekil 2 .1 Projede kullanılan insansız hava aracı

İHA' ları genel olarak tanımlamak gerekirse; kalkış için ek bir sisteme ihtiyaç duyan, komuta ve kontrol için pilota ihtiyaç duymayan uzaktan radyo sinyaller ile yönlendirilebilen ve anlık bilgi aktarımında bulunabilen sistemlerdir [1].

İHA' lar genel anlamda hava aracı ve yer istasyonundan oluşur. Hava aracı adından da anlaşılacağı üzere uçuş kabiliyetinde ki araç sistemidir. Yer istasyonu ise iki kısımdan

oluşur. Bunlar yer veri istasyonu (YVİ) ve yer kontrol terminalidir (YKT). Yer veri istasyonu İHA tarafından sağlanan verilerin iletiildiği istasyondur. Yer kontrol terminali İHA' nın uzaktan radyo sinyalleri ile yönetildiği terminaldir. YKT sayesinde artık İHA' lar binlerce Km uzaklıktan uydu haberleşmesi ile yönetilebilmektedir [1].



Şekil 2 .2 İHA haberleşme sistemi

2.1 İHA'ların Kullanım Amaçları

İHA' lar üzerindeki donanımların özelliklerine göre muhtelif çeşitte bilgi toplayabilmektedir. İHA' ların kullanım amaçlarına gelince tasarım ve kullanım şekline göre değişebilmektedir. Genel anlamda kullanım amaçları aşağıda sıralanmıştır. Çizelge 2.1'de ise İHA'ların görevleri katogerize edilerek verilmiştir [2].

- İstihbarat ve gözlem
- Bomba veya füzeli hava saldırılar
- Endirekt atışlar için ileri gözetleyicilik

- Sınırların kontrolü ve korunması
- Mayın taraması ve imha
- Kaçakçılık ile mücadele
- Kimyasal, biyolojik ve radyolojik tarama
- Deniz ve sahil güvenliği
- Muharebe arama ve kurtarma
- Hava radyolink ve role görevi
- Hava durumu veri toplama
- Hava taşımacılığı ve ikmal

Çizelge 2 .1 İHA' ların görevleri

Keşif / Gözetleme Desteği	Taaruz	Hedef Benzetimi	Elektronik Harp	Özel Görevler
Taktik Saha / Keşif	İç Güvenlik(İG)	Hedef Uçak (HU)	Sinyal İstihbaratı	Haberleşme Desteği
Strateji Keşif / Gözetleme	Yakın Hava Desteği	Sahte Uçak	Radar Elektronik Harp	Mayın / Patlayıcı Tespiti
	Hava Sahası Savunma		Önleyici Elektronik Harp	KBRN Tespit
	Hava Savunma Sistemlerinin İmhası		Muharebe Elektronik Harp	Çoklu İHA Görevi
				Deniz Karakol/ Denizaltı Savunma Harbi
				Kargo Taşıma
				Kentsel Harp
				Arama - Kurtarma / Lojistik

Yukarda bahsedilen görevler Savunma Sanayi Müsteşarlığı tarafında İHA' ların yol haritasında tanımlanmıştır. Bu görev sistemlerinin gereksinimleri ise aşağıda verilmektedir [2].

- Elektro Optik/Kızıl Ötesi Görüntüleme Sistemi
- Radar Sistemleri (Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) Sistemi, Yerde Hareketli Hedef
- Belirtme Sistemi, Ters Sentetik Açıklıklı Radar (ISAR) Sistemi
- Otomatik Tanımlama Sistemi
- Elektronik İstihbarat Sistemi
- Haberleşme İstihbarat Sistemi
- Radar Elektronik Destek/Radar Elektronik Taarruz Sistemi
- Radyo Frekans Sahte Hedef Sistemi
- Haberleşme ED/ET Sistemi
- Radar ED/ET Sistemi
- RF Sahte Hedef Sistemi
- RF Köreltme/Karıştırma Sistemi
- Tetikleyici Sinyal Emülatörü
- Değişiklik Tespit Sistemi
- Haberleşme Röle Sistemi
- EO/KÖ Görüntüleme Sistemi
- Yere Girmeli Radar Sistemi (GPR, Graund Penetration Radar)
- Biyokimyasal Algılayıcı

2.2 İHA'ların Tarihsel Gelişimi

İHA fikri ilk olarak gerçek anlamda 1. Dünya savaşı sonlarında ortaya çıkmıştır. Daha önceleri saldırı amaçlı değişik yöntemlerde İHA' lar kullanılsa da bunlar basit yapılı uçan balonlar veya torpidolardan ibaretti. Ancak 1. Dünya savaşı sonlarında istihbarat ve düşmana saldırı amaçlanarak değişik İHA' lar geliştirilmek istenmiştir.

Günümüzde ki İHA' lara benzer düşünce ile ortaya atılan ilk İHA fikri 1916 yılında Amerikalı Elmer Sperry' nin Deniz Kuvvetlerine ait bir uçağı Jireskop (Jireskop, Gyro) kontrolü ile yönetmek istemesiyle ortaya çıkmıştır [3].

1930 yıllarda Alman saldırıları karşısında Avrupa devletleri savunma amaçlı değişik sınıfta İHA' lar geliştirmişlerdir. Bunlardan en bilineni Alman Nazi istihbarat uçaklarında veri kirliliği oluşturmak için kullanılan Jammer (Sinyal Bozucu, Jammer) tarzında ki mini İHA sistemleridir. 2. Dünya savaşından sonra ise İHA' larda ki gelişme hızlı bir şekilde devam etmiştir.

Günümüz tanımlarına uyan ilk İHA' lar 1970'li yıllarda İsrail tarafından geliştirilmiştir. İsrail Arap devletleri ile yaşamış olduğu sorunlar neticesinde istihbarat ve gözetim için İHA' ları geliştirmiştir. Bu hava araçları gerçek zamanlı çalışan ilk İHA' lardı. Anlık istihbarat verilerini yer veri istasyonlarına gerçek zamanlı olarak iletmekteydi.

1980'lere gelindiğinde ise İsrail mini İHA'ların miladı kabul edilen Scout'u üretmişlerdir. Scout fiberglass gövdesi sayesinde radara yakalanmamayı başarmıştır. Ayrıca boyutu küçük olması sebebiyle vurulması neredeyse imkansızdı [3].



Şekil 2 .3 Scout insansız hava aracı

Yakın tarihimizde ise Amerika Pioneer ve Pointer adlı iki İHA' sını ortaya çıkarmıştır. Bu İHA' lar Afganistan ve Irak savaşlarında kullanılmış ve 10.000 saatin üzerinde uçuş gerçekleştirmişlerdir.

Son dönemler İHA' lar askeri alanların dışında sivil amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Haberleşme sistemlerine altyapı sağlamak, meteoroloji, balıkçılık, sınır güvenliği ve çevre kirliliği takibi için de kullanımına oldukça sık rastlanmaktadır. İHA' ları ilk

geliştiren ülke İsrail olsa da günümüzde en önemli gelişmeler ve çalışmalar Amerika tarafından yürütülmektedir.

2.3 İHA'ların Türkiye'deki Yeri

Türkiye' de özellikle son on yılda İHA sanayinde önemli gelişmeler yaşandı. Hem kamusal desteklerle hem de özel sanayi teşebbüsleriyle değişik kategoride Türkiye'nin ilk İHA' ları geliştirildi. Bunda ana sebep Türkiye'nin stratejik konumu ve terörle mücadeledir. Komşularıyla olan sınır güvenliğinin sağlanmasında, terörle mücadelede, kaçakçılık faaliyetlerinin önlenmesinde ve orman yangınlarının önlenmesi gibi sivil kullanımlarda İHA' lar Türkiye için vazgeçilmez sistemler olmuştur [2]. Özellikle Güneydoğu bölgesinde sınır güvenliğinin sağlanması coğrafi şartlar ve güvenliksiz olması sebebiyle oldukça zordur. Ancak İHA kullanımı ile hem aralıksız hem de daha güvenli bir şekilde istihbarat sağlanmaktadır. Üstelik asker zayiatı da söz konusu değildir. Bu Türkiye'nin en çok ihtiyaç duyduğu bir özelliktir. Çünkü Türkiye, yıllarca sınır güvenliği ve arazi arama tarama faaliyetlerinden çok sayıda askerini kaybetmiştir.

Türkiye'de İHA projeleri Savunma Sanayi Müsteşarlığı (SSM) tarafından yürütülmektedir. SSM İHA'ların Türk Silahlı Kuvvetleri'nin (TSK) ihtiyaçlarını karşılaması için gerekliliklerini, standartlarını, bütçeleme ve tedarik edilebilme şartları gibi faaliyetlerde bulunmuştur. Bu faaliyetler kapsamında planlamalarda karar alma süreçlerini destekleyebilmek amacıyla 2011 yılında SSM tarafında İHA Sistemleri Yol Haritası hazırlanmıştır. SSM, İHA'ları daha iyi tanıyabilmek, kullanım kavramlarını belirleyebilmek ve gerek görülürse sanayileşme modelini belirlemek üzere 1980'li yıllarda çalışmalarına başlamıştır ve günümüze kadar uzanan süreçte bu çalışmalar ışığında İHA sistemleri için bir yol haritası hazırlamıştır. SSM tarafından bu yol haritasının hazırlanmasında ki amaç şu şekilde tanımlanmıştır;

“Savunma Sanayi Müsteşarlığı koordinasyonu ile TSK, Sanayi Kuruluşları ve Üniversitelerin işbirliği ile çalışmaları devam etmekte olan “İHA Sistemleri Yol Haritası” dokümanının amacı, 2010-2030 yılları arasındaki 20 yıllık süreyi kapsayan, İnsansız Hava Aracı (İHA) Sistemleri'ne yönelik Yol Haritası'nı tanımlamaktır. Yol Haritası ile bu alanda gelecek yıllara yönelik strateji, büyüme doğrultusu ve yapılanma planlaması, finans planlaması, insan kaynağı planlaması, eğitim/danışman planlaması, tesis/cihaz /yatırım planlaması, ortak kaynak kullanım planlaması ve pazarlama/iş

geliştirme stratejileri gibi üst seviye değerlendirmelerin desteklenmesi hedeflenmektedir.” [2].

Bu yol haritasında aşağıda ki konulara değinilmiştir.

- Türkiye’nin İHA Sistemleri ve teknolojilerine yönelik kabiliyetleri
- İHA teknolojileri için alt yapı ihtiyaçları
- Mevcut ve potansiyel İHA Sistemi projeleri
- Uluslararası mevzuatın ulusal olarak uygulanabilirliği, bu yönde atılması gereken adımlar, etkilenen kritik teknolojiler, odaklanması gereken kabiliyet/teknolojiler
- Temel sistem gereksinimleri
- Sistem görev gereksinimleri
- Alt teknolojilerin açılımları ve analizleri, planlamalara esas teşkil edecek şekilde ihtiyaçların geleceğe yansımaları
- Alt sistemlerde ve teknolojilerde gelecek yönelimleri ve öngörülen riskler göz önünde bulundurulmuştur

Milli ilk İHA 1990lı yıllarda TAI tarafından geliştirilmiştir. İHA-X1 Şahit isimli bu İHA’nın prototipi üretilmiş ancak seri üretime geçilememiştir. 2004 yılına gelindiğinde SSM yerli İHA üretimi kapsamında TSK’nın İHA ihtiyacını karşılamak üzere Türk Özgün İnsansız Hava Aracı (TİHA) geliştirme programını başlatmıştır. Böylece ana yüklenici olan TAI tarafından ANKA adını alacak olan İHA’nın temelleri atılmış oldu. Şuan ise operatif İHA sınıfında bulunan ANKA’nın uçuş testleri devam etmektedir.



Şekil 2 .4 Anka insansız hava aracı

Aynı yıl Baykar Makine ve Vestel Savunma İHA geliştirmelerine başlamıştır. Bu teşebbüsler bir kısım İHA çalışmalarıyla üretimde bulunsalar da Türkiye'nin İHA ihtiyacını gerçek manada karşılayamamışlardır. İlk aşamada HALE/MALE (High/Medium Altitude Long Endurance, Yüksek/Orta İrtifa Uzun Havada Kalış Süresi) sınıf İHA'dan çok Mini İHA geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Bu nedenle geliştirilen İHA'lar Heron ve ya Predator gibi İHA'larla yarışacak ölçüde olamamışlardır. Çizelge 2.2'de Türkiye'nin İHA envanteri verilmektedir [3].

Türkiye'de İHA projelerine katılan firmalar aşağıda verilmiştir [2].

- ASELSAN A.Ş.
- AYESAŞ A.Ş.
- BAYKAR MAKİNA
- GATE A.Ş.
- Gazi Makine Müh. Bölümü
- HAVELSAN A.Ş.
- İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi
- METEKSAN Savunma A.Ş.

- MİKES A.Ş.
- MilSOFT ICT A.Ş.
- MilSOFT A.Ş.
- ODTÜ Havacılık ve Uzay Müh. Bölümü
- ROKETSAN A.Ş.
- SAVRONİK A.Ş.
- SDT A.Ş.
- STM A.Ş.
- TEI A.Ş.
- TUSAŞ A.Ş.
- TÜBİTAK-SAGE
- VESTEL SAVUNMA A.Ş.

Çizelge 2 .2 Türkiye'nin İHA envanteri

Envanter kaynağı	Model	Sınıf	Envanter sayısı
Yabancı	Gnat 750	Operatif	18
	I-gnat	Operatif	6
	Heron	Operatif	10
	Mq-9 reaper	Stratejik	4
	Mq-1 predator	Stratejik	2
	Aerostar	Taktik	3
	Banshee		
	Harpy-1	Hedef uçak sistemi	108

Çizelge 2 .3 Türkiye'nin İHA envanteri (Devamı)

Envanter kaynağı	Model	Sınıf	Envanter sayısı
Yerli(envanterde olan)	Bayraktar	Mini	164
	Malazgirt	Mini-rotorlu	4
	Turna	Hedef uçak sistemi	
	Turna / g	Hedef uçak sistemi	
	Keklik	Hedef uçak sistemi	
Yerli (envanterde olmayan)	Gözcü	Mini	
	Efe	Mini	
	Taı anka	Operatif	
	Karayel	Taktik	
	Çaldıran	Taktik	
	Şimşek	Hedef uçak	
	Pelikan		
	R-iha(taı)	Rotorlu	
	Baykuş		
	Cl-89		
	Uav-x1		
	Arı	Mikro	

2.4 İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması

İHA' lar birden fazla kategoriye göre sınıflandırmak mümkündür. Bu kategoriler birçok alana sahip olabileceği gibi bir alana ait birçok kategori olabilmektedir. Genel anlamda İHA' ların sınıflandırılma kriterleri aşağıda verilmiştir [4].

- Büyüklükleri
- İrtifaları
- Uçuş süreleri
- Faydalı yük kapasiteleri
- Faydalı yük türleri
- Yakıt türleri
- Uçuş yöntemleri
- Komuta biçimleri
- Kullanım amaçları
- Kalkış ve iniş yöntemleri

İHA' lar büyüklüklerine ve diğer temel özelliklerine göre üç sınıfta altı farklı grupta sınıflandırılmıştır[5]. Bunlar;

- Mikro
- Mini
- Küçük
- Taktik
- Operatif
- Stratejik

Burada temel ayırt edici özellikler ve her bir gruba giren başlıca modeller Çizelge 2.3'de verilmiştir [2,4]. Türkiye'de İHA sınıflamasında temel kriter 'irtifa' iken NATO ve AB ülkelerinde 'ağırlık' baz alınmaktadır.

Çizelge 2 .4 İHA' ların sınıflandırılması

Sınıf	Kategori	Operasyon İrtifası (feet)	Menzil Yarıçapı (km)	Havada Kalma Süresi (saat)	Örnek Sistemler
Sınıf 1 (<150 kg)	Mikro <2 kg	AGL* + 200	5	1	Black Widow, MicroStar, QuattroCopter, M05quito, Mite, Arı
	Mini 2-20 kg	AGL + 3000	25	<2	ScanEagle, Skylark, DH3, Mikado, Aladin, Tracker, DragonEye, Raven, Pointer II, Carolo C40/P50, Skorpio, R-Max and R-50, RoboCopter, YH-3005L, Bayraktar, Efe, Gözcü
	Küçük >20 kg	AGL + 5000	50	3 - 6	Hermes 90, Scorpi 6/30, Luna, SilverFox, EyeView, Firebird, R-Max Agri/ Photo, Homet, Raven, phantom, GoldenEye 100, Flyrt, Neptune
Sınıf 2 (150-600) Kg	Taktik	AGL + 10000	200	6 - 10	Sperwer, İview 250, WatchkeeperHunter B, Mücke, Aerostar, Sniper, Falco, Smart UAV, UCAR, Eagle Eye+, Shadow 200/400 , Taktik (ODTÜ) Çaldıran, Karayel
Sınıf 3 (>600) kg	Operatif (MALE)	AGL + 45000	Sınırsız	24 - 48	Reaper, Hermes 900, Skyforce 1500, Heron TP, MQ-1 Predator Predator-IT, Eagle1/2, Darkstar Hunter, Dominator, Anka
	Stratejik (HALE)	AGL + 65000	Sınırsız	24 - 48	Global Hawk, Raptor, Condor, Theseus, Hellos,Predator B/C, Libellule, EuroHawk, Mercator, SensorCraft, Global Observer, Pathfinder Plus,
	Taarruz - Atak	AGL + 65000	Sınırsız	>48	Pegasus
*AGL: Zemin seviyesi (Above Ground Level)					

Çizelge 2.4’de ise dünyanın çeşitli bölgelerinde çeşitli katogorilerde üretilen İHA’ lar verilmiştir [6]. Genel anlamda takdikselsel ve stratejik İHA’ lara olan ilgi diğerlerine göre daha fazladır.

Çizelge 2 .5 İHA kategorileri ve özellikleri

Kategori	İsmi	İrtifa (Ft.)	Uçuş Süresi	Faydalı Yük (kg)	Ağırlık (kg)	Üretici Ülke
Mikro	Fancopter		25 dk.		1,5	
	Black Widow	769	2 dk.		0,05	ABD
	MicroStar				11,8	ABD
	Wasp	50-1000	45 dk.		0,43	ABD
	gMAV / T-Hawk	10000	50 dk.			ABD
	QuattroCopter		10 dk.	0,28	0,94	
Mini	ScanEagle	19500	24+	20	13,1	ABD
	Skylark	15000	2		5,5	İsrail
	DragonEye RQ-14A	1000	1		2,7	ABD
	Pointer 2 FQM-151A	985	1		4,3	ABD
	RoboCopter 300			294	500	Japonya
	Raven (RQ-11)	15000	1,5		1,9	ABD
	R-Max Type 2		1	30	58	Japonya
	Efe					Türkiye
	Gözcü (Bayraktar Mini)	12000	60dk.		3,5	Türkiye
	Aladin	14760	>1		<4	Almanya
Küçük	SUAS AECV Puma	100-500	2			ABD
	Hermes 900	15000	12-15	55	110	İsrail
	Scorpio 6/30	>6560	1		13	Fransa
	Luna	16400	6-8		<40	Almanya
	SilverFox	12000	>8	2,2	11,8	ABD
	Neptune	8000	4	92	613	ABD
	GoldenEye 80	15000	3	12	57	ABD
	Firebird	30000	40	14	90	ABD

Çizelge 2 .6 İHA katogorileri ve özellikleri (Devamı)

Kategori	İsmi	İrtifa (Ft.)	Uçuş Süresi	Faydalı Yük (kg)	Ağırlık (kg)	Üretici Ülke
Taktiksel	Sperwer	15000	>6	45	285	Fransa
	Watchkeeper	16000	17	150	450	İsrail/Fransa
	Hunter	20000	21	100	785	İsrail
	Aerostar	18000	<12	50	200	İsrail
	Falco	20000	14	70	420	Italy
	Shadow 200	15000	9	82	131	ABD
	Eagle Eye	20000	6	533	828	ABD
	Karayel	18000	10			Türkiye
	Çaldıran (Bayraktar-Çaldıran)	30000	16	40	350	Türkiye
	Mücke	11500	3,5	35	130	Almanya
Operatif (MALE)	Heron Tp	45000	36	1000	3650	İsrail
	Predator	25000	40	204	567	ABD
	Darkstar	65000	12	1880	1980	ABD
	Grey Eagle (MQ-1C)*	25000	40	1452	363	ABD
	Dominator	30000	28	410	790	İsrail
	ANKA	30000	24	200	1368	Türkiye
	Hermes 1500	33000	>26	350	1300	İsrail

Çizelge 2 .7 İHA kategorileri ve özellikleri (Devamı)

Kategori	İsmi	İrtifa (Ft.)	Uçuş Süresi	Faydalı Yük (kg)	Ağırlık (kg)	Üretici Ülke
Stratejik (HALE)	Global Hawk (RQ-4)	60000	28	1361	14630	ABD
	EuroHawk	65000	>30	1360		ABD/Almanya
	Predator (MQ-1)*	25000	24+	205	1021	ABD
	BAMS (RQ-7)	60000	34+	1450	14630	
	Reaper (MQ-9), Predator B*	50000	24	1700	4763	ABD
	Pathfinder Plus	81000	15	67,5	247,5	ABD
	Global Observer	70000	2 hafta	454	4536	ABD
	Helios	100000	40	330	600	ABD
	Mercator	70000	82	2,5	53	İngiltere
Saldırı	Pegasus X-47A	40000 +		472	1740	ABD
Rotorlu	Fire Scout (MQ-8)	20000	6+	273	1429	ABD
	Malazgirt	12000	90 dk.	2	12	Türkiye
	A160T Hummingbird	30000	20+	1850	1134	ABD
* Silahlı İHA olarak bilinmektedir.						

Tablo 2.4'den de görüldüğü üzere irtifa, havada kalış süresi, taşıyabileceği yük ve ağırlığına göre değişiklik gösteren ve daha birçok farklılığa sahip İHA' lar bulunmaktadır. Bu farklılık daha çok İHA' ların kullanım amacı ile ilgili olduğu gibi değişim ve gelişimiyle de doğrudan ilgilidir. Örneğin operatif İHA' ların taşıdığı yük en fazladır. Çünkü bu araçlar daha çok saldırı amaçlı kullanıldığı için üzerinde mühimmat bulundurmaktadır. Öte yandan operatif İHA' lar da kendi arasında farklı miktarda yük taşıma kabiliyetindedirler. Bu durum ise İHA' ların geliştirilmesi ve teknolojisiyle ilgilidir.



Şekil 2 .5 Silah faydalı yüklü insansız hava aracı

2.5 İHA Sistemlerinin Teknik Özellikleri ve Bileşenleri

İHA sistemleri genel anlamda uçuş, yer kontrol istasyonu, yük, haberleşme ve destek bileşenleri gibi alt sistemlerden oluşur. İHA'nın performans parametreleri doğrudan bu alt sistemlerin işleyişi ve teknolojileriyle alakalıdır. Genel anlamda İHA'ların aşağıda verilen özellikleri taşıması gerekmektedir [4].

- Minimum yük 2Kg
- Hizmet irtifası 200 ft ve ya daha fazla
- Havada kalış süresi en az 1 saat
- Yakıt türü tercihe bağlı ve ya batarya
- Menzil 10 Km ve ya daha fazla
- Otomatik pilot kontrollü ve ya uzaktan kontrol edilebilir

Bu gereksinimler İHA'nın kullanım amacıyla doğrudan etkilidir. Örneğin saldırı amaçlı kullanılacak olan bir İHA için yük ön plana çıkarken istihbarat amaçlı kullanılacak bir İHA da havada kalış süresi önemlidir. Dolayısıyla İHA'ların teknik özellikleri tamamen görev ve kullanım alanlarıyla alakalıdır.

İHA sistemleri yine görevlerine ve teknolojilerine bağlı olarak çok sayıda bileşene sahiptirler. İHA sisteminin bileşenleri genel olarak aşağıda sıralanmıştır [4].

- İnsansız Hava Aracı
- Faydalı Yükler
- İnsan Bileşeni
- Kontrol Bileşenleri
- Veri Linki
- Destek Bileşenleri

Bu bileşenler İHA sistemine uyumlu olduğu için hangisinin diğerine göre daha fazla değer sahip olduğu dikkate alınmalıdır. Yönlendirme, bilginin toplanması, işlenmesi ve ayrıştırılması İHA'nın teknik bileşeni kapsamında değildir. Ancak, İHA sisteminin kapasitesinin uyum ve optimizasyonu için çok kritik işlemlerdir [4].

2.5.1 İnsansız Hava Aracı

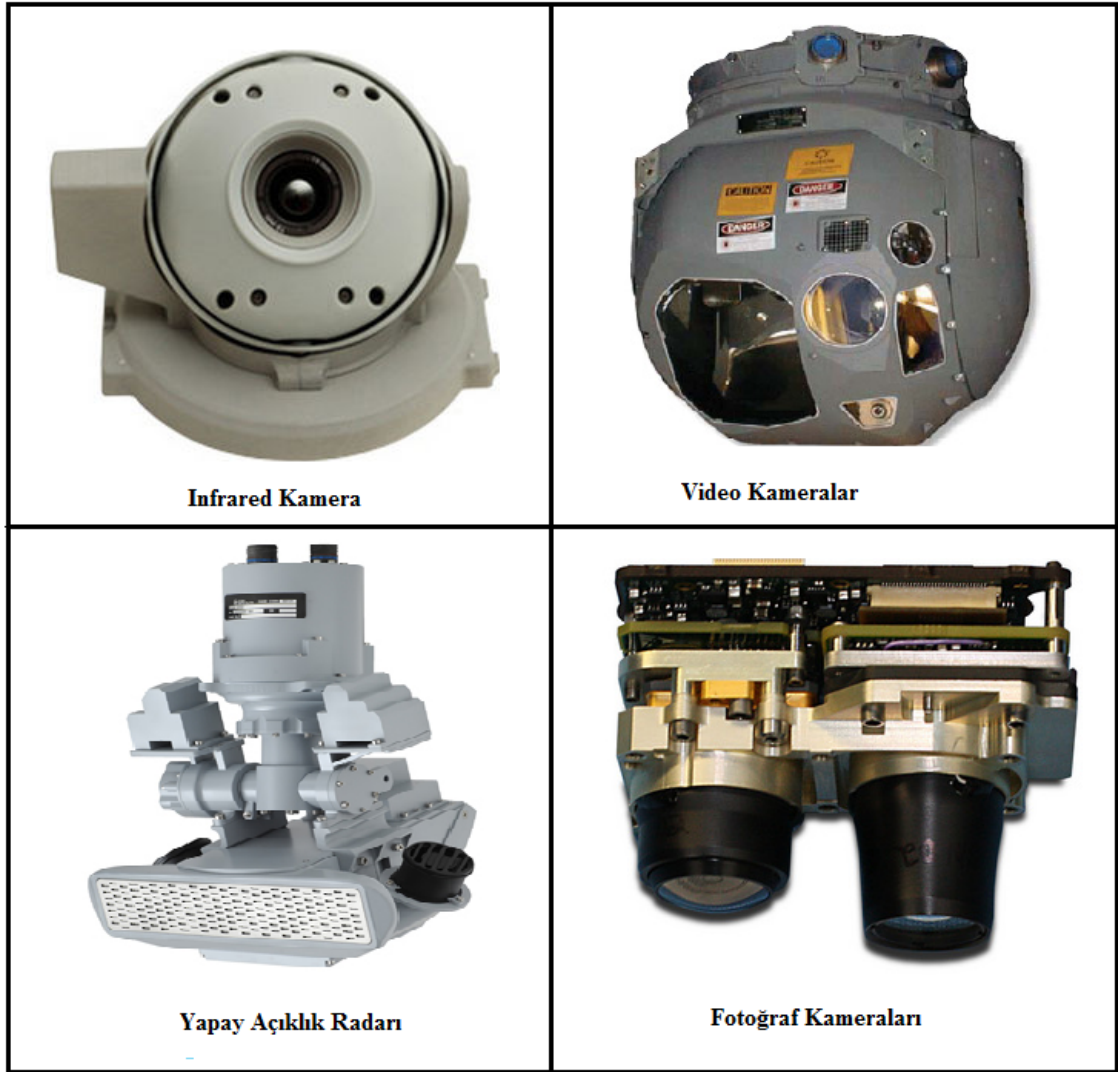
İHA üzerinde pilot taşımadan uzaktan kontrol veya otomatik bir şekilde uçuş kabiliyetine sahiptir. İHA sürekli kullanım amaçlı tasarlanır. Ancak üzerinde ölümcül veya ölümcül olmayan yük de taşıyabilmektedir. İHA'lar dönel ve ya sabit kanatlı araçlardır ve hava araçlarından daha hafiflerdir. Araçta herhangi bir personele ihtiyaç duymadan uçabilmektedirler. Bunun amacı İHA'nın karaya inişin sağlanması ve kullanım sürekliliğinin sağlanmasıdır. İHA uzaktan komuta ile veya otonom olarak çalıştırılabilir. İHA hava aracı ve haberleşme sistemleri, navigasyon, yakıt ve itici güç gibi bütünleşmiş komponentler içerir.

2.5.2 Faydalı Yükler

İHA yararlı yükleri sensörler, haberleşme röleleri, silahlar ve kargodur. Yararlı yükler İHA'nın iç ve ya dış kısmında yer alabilir. Modüler sensör standardı NATO arayüz standardına (STANAG 4586) uygun olmalıdır [4].

2.5.2.1 Sensörler

En önemli faydalı yükler, resimleme sensörü, elektro optik, infrared, SAR (Synthetic Aperture Radar, Yapay Açıklık Radarı) ve deniz araştırma radarlarıdır. Bunun yanında yer, yüzey ve deniz ortamı için hedef göstergeleri, ışık algılayıcılar ve mesafe ölçerler bulunmaktadır. Ayrıca İHA'lar kimyasal, biyolojik, radyolojik, nükleer ve ya yüksek enerjili patlamala algılayıcılar, otomatik kimlik tanıma sistemleri, ölçüm ve sinyal algılama sistemleri bulundurmaktadır. Ek olarak sensör grupları lazer mesafe ölçer ve lazer göstergeleri içerir. Bu darbe lazer sistemleri hedefin uzaklığının ve hızının tespitinde ve lazer güdümlü sistemler için hedef gösteriminde kullanılır. Güncel ve gelecek teknolojik çalışmalar ileri düzey çevresel, multispektral ve hiperspektral sensörleri içermektedir [1]. Şekil 2.6' da İHA'lar üzerinde kullanılan faydalı yükler gösterilmektedir.



Şekil 2 .6 İHA faydalı yük sensörleri

Sensör Downlink (Aşağı Link)' leri FMV (Full Motion Video, Full Hareketli Video) ve FI (Frame Imagery, Çerçevesel Görüntüleme) içerir. FI'lar düşük band genişliklerine ihtiyaç duysalar da FMV iletimi geniş miktarda band genişliği gerektirmektedir. Değişik amaçlar için dar ve ya geniş alanlı sensörler tercih edilmektedir. Bazı İHA'lar tomografik haritalama ve nesnelerin geometrik niceliklerini ölçme kabiliyetine sahip sensörlere sahiptirler.

2.5.2.2 Haberleşme Röleleri

Haberleşme röleleri İHA'lar ile ses ve veri iletimini uzatma yeteneğine sahiptirler. Örneğin, bu sensörler Yer ve Hava Tek Kanallı Radio Sistemleri, uzak sensör ve veri hattı için röle yeteneği sağlarlar. Bir operasyonun başarısı ve güvenilirliği için en önemli

faktor başarılı bir haberleşme ve bilgi paylaşımıdır. Gelecek haberleşme faydalı yüklerin, köprüleme, mesafe uzatma ve veri linki ve ağda farklı tip de radio kanalları arasında haberleşme imkanları sağlayacağı ön görülmektedir [7].

2.5.2.3 Silahlar

İHA'lar istenen etkiyi elde etmek için ölümcül ve ölümcül olmayan silah hizmeti verebilir.

Ölümcül silahlar GPS ve ya lazer güdüm teknolojileriyle kullanılan İHA'ya bütünleşmiş silahlardır. Burada hedef İHA'ya otonom sistem aracılığıyla tespit ettirilerek imha edileceği gibi uzaktan kontrolle de bu işlem yapılabilir. Şekil 2.7' de İHA'ların silah sistemleri görülmektedir.



Şekil 2.7 İHA sisteminde silahlar

Ölümcül olmayan silahlara gelince bunlar; elektriksel, yönlü enerji, kimyasal, kinetik enerji, yankı ve sistem karıştırıcıdır.

2.5.2.4 Kargo

Bazı İHA'lar destek ve donanım desteği ve ya teslimi için hizmet verme kapasitesine sahiptirler. Örneğin düşman hattının ötesine sağlık malzemesi teslimi olabilir. Günümüzde Amazon adlı ticari bir şirket İHA'ların ürün teslimi için kullanılacağı bir proje yürütmektedir.

2.5.3 İnsan Bileşeni

İnsan İHA sistemi için genel olarak ayrı bileşen olarak düşünülemez fakat İHA' nın başarısı için en kritik elementtir. İHA' lar için insansız olması bir yanılgıdır. Hava aracının kendisi insansızdır ve sistem insansız değildir [4]. İHA görevini tamamlamak veya görevine hazırlanmak için belirli miktarda insana ihtiyaç duymaktadır. Çoğu İHA için birincil personel görevi hava aracının ve faydalı yükün yürütücüsü, komuta ve analizdir. İHA personeli kendi alanlarında tecrübeli ve bilgi birikimine sahip olmalı ve operasyonlarda kesin görüşünü muhafaza edebilmelidir. Komuta personeli herhangi bir bozulma yaşamadan İHA operasyonunun güvenliğini ve eminliğini hesaba katmalıdır.

2.5.4 Kontrol Bileşeni

Kontrol bileşeni ister hava, ister kara ve ya ister deniz ortamı olsun C2 (Command and Control, Komuta ve Kontrol), görev planlama, faydalı yük kontrolü ve haberleşme gibi çoklu görevleri derlemektedir [4]. Kontrol bileşeni İHA için değişik seviyede C2'yi kapsamaktadır. Kontrol bileşeni bulunduğu bölüm İHA operatörünün fiziksel olarak bulunduğu bölüm olup kontrol istasyonu olarak gösterilir. Bazı İHA sistemleri İHA ve faydalı yüklerin kontrolü için birkaç personele ihtiyaç duysa da bazıları tek bir personelle görevlerini yürütebilmektedir. İHA ve faydalı yüklerin kontrolü İHA'nın tipine bağlı olarak kontrol istasyonu ve görev gereklilikleri arasında geçer. Şekil 2.8' de kontrol istasyonu görülmektedir.



Şekil 2 .8 Yer kontrol istasyonu

Kontrol istasyonunun büyüklüğü ve kontrol transferi görev ve komuta personelinin gereksinimlerine bağlı olarak çok büyük ölçüde değişkenlik gösterebilir. Kontrol istasyonu sistem optimizasyonuna dayalı olarak sabit ve ya mobil olabilmektedir. Bazı kontrol istasyonları LOS (Line Of Sight, Görüş Hattı) Haberleşme ile çalışırlar ve çalışma sahasına konuşlandırılırlar. Diğerleri ise BLOS (Beyond Line of Sight, Görüş Hattı Ötesi) Haberleşme aracılığıyla çalışmaktadırlar ve çalışma sahasının dışında konumlandırılırlar. Genelde BLOS sistemlerinde uydular kullanılmaktadır. Dolayısıyla SATCOM (Satellite Communication, Uydu Haberleşmesi) olarak da adlandırılabilir. İHA sisteminin ve çalışılacak olan ağın özelliğine bağlı olarak BLOS ve ya LOS haberleşmesi kullanılabilir.

2.5.5 Veri Linki

Veri linki, İHA kontrol bileşeni ve kullanıcıya ait tüm haberleşmeleri kapsamaktadır. Veriler kullanıcılar anında iletilebildiği gibi daha sonra kullanılmak üzere ve ya dağıtım amaçlı başka ağlara iletilebilmektedir. İHA' lar daha önceki bölümde belirtildiği gibi LOS ve ya BLOS Haberleşme ile iletişim sağlayabilmektedirler. İHA veri linki Bölüm 4' de daha detaylı anlatılacaktır.

2.5.6 Destek Bileşenleri

İnsanlı hava araçları gibi İHA’larda lojistik desteğe ihtiyaç duymaktadırlar. Bu destek elemanları İHA’yı harekete geçirme, taşıma, muhafaza etme, fırlatma ve geri döndürmek için gereken donanımların tümünü kapsar. Elle fırlatmalı sistem için bağlantılı olarak küçük destek elemanı gerektiği gibi büyük sistemler için büyük destek elemanları gerekmektedir [6].

İHA' LARIN HABERLEŞME SİSTEMLERİ

İHA haberleşme sistemleri İHA'nın diğer sistemlerinden çok daha fazla öneme sahiptir. Çünkü İHA'lar uzaktan komuta ve kontrol edildiğinden haberleşme İHA için hayati bir önem taşımaktadır [1]. Bu nedenle İHA ve YKT arasında ki yukarı link (Uplink) ve YVT arasındaki aşağı link (Downlink) haberleşme sağlıklı ve istikrarlı bir şekilde sağlanmalıdır. Çoğu uçuş için öncelikli amaç faydalı yüklerin amacına ve görevine uygun bir şekilde konumlandırılmış olmasıdır. Çünkü tüm görev, bu faydalı yüklerin etrafında cereyan etmektedir. Dolayısıyla faydalı yüklerin doğru kullanımı ve istenen görevlerin neticesinin temini noktasında haberleşme sistemlerinin doğruluğu ve istikrarlı çalışması yatmaktadır.

Bu noktada en önemli mesele, hangi frekans bandının kullanılacağı ve ne kadar veri iletimi olacağına karar vermektir. Dünya genelinde frekans bandının kısıtlı kullanılabilmesi İHA tasarımında bu kriteri çok daha önemli hale getirmektedir. Ayrıca veri iletiminin büyüklüğü de doğrudan frekans bandı kullanımıyla alakalıdır. Bu duruma çözüm olarak bazı sistemlerde (örneğin Global Hawk İHA) yüksek kapasiteli bilgisayarlar kullanılarak veri miktarında azalma sağlanmıştır [8].

İHA'ların yer istasyonu ile haberleşmesine gelince, bu yukarı link (Uplink) ve aşağı link (Downlink) olmak üzere iki yönlü olarak sağlanmaktadır. Bazı sistemler (yer kontrol sistemleri) tek yönlü haberleşirken bazıları da (video iletimi) iki yönlü haberleşmeye ihtiyaç duymaktadır. Haberleşme görevleri ise aşağıda tanımlandığı gibidir [1].

Yukarı Link (Yer Kontrol İstasyonu'ndan İHA'ya Doğru)

- Uçağın otonom uçuş kontrol sistemine uçuş alan bilgilerini iletmek
- Gerçek zamanlı uçuş kontrol komutlarını iletmek
- İHA'nın faydalı yüklerine ve yardımcı bileşenlerine kontrol komutlarını iletmek
- Uçağa güncel konum bilgilerini iletmek

Aşağı Link (İHA'da Yer Veri Terminali' ne Doğru)

- İHA'nın konum verilerini YVT' ye iletmek.
- Faydalı yük verilerini YVT' ye iletmek.
- İHA'nın yakıt durumu, motor sıcaklığı gibi durum bilgilerini iletmek.

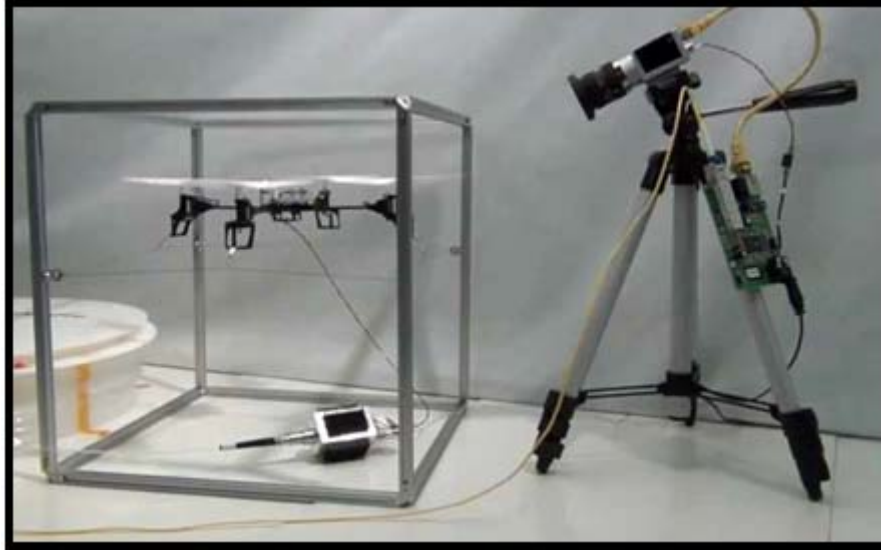
İHA, YKİ ve YVT arasında veya YKİ ve YVT, İHA arasında ki haberleşme üç farklı haberleşme ortamıyla sağlanmaktadır. Bunlar radyo haberleşmesi, fiber optik veya lazer haberleşme sistemleridir [1]. Hepsi veriyi uygun hızda, güvenlikte ve güvenilirlikte iletimini gerektirmektedir. Şu ana kadar bu üç sistemde İHA sistemlerinde kullanılmıştır.

3.1 Lazer Haberleşmesi

Günümüz itibariyle bu haberleşme sistemi terk edilmiş durumdadır. Bunun en büyük sebebi atmosferik sönümlenmeler, kayıplar ve güvenilirliğinin düşük olmasıdır.

3.2 Fiber Optik Haberleşmesi

Fiber optikle veri transferi düşük irtifada yüksek hızlı ve güvenli haberleşme sisteminin gerektiği özellikli uygulamalarda mümkündür. Fiber optik haberleşme savaş sahasının nükleer, biyolojik veya kimyasal saldırılara maruz kaldığında tespit ve ölçüm görevleri için kullanılan sistemlerde yer alabilir. Fiber kablolar İHA üzerinde sargılıdır ve YKİ'ye doğru sarkar. Bunun sebebi İHA'nın fiberi çekiştirmesinden bunun sonucunda fiberin kırılmasından ve yerde sürünmesinden kaçınmaktır. Bu sistem menzilin sınırlı bir mesafe olduğu VTOL İHA'larında kullanılmıştır. Şekil 3.1'de İHA'nın fiber optik haberleşmesi gösterilmektedir.



Şekil 3. 1 İHA' ların fiber optik haberleşmesi

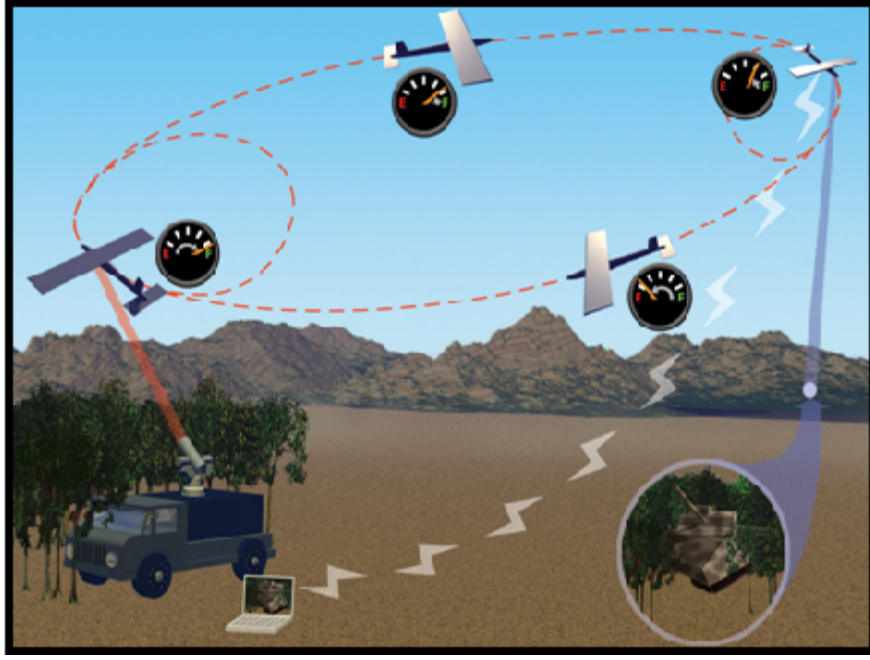
Veri güvenli bir şekilde YVT' ye iletilir ve görev tamamlandığında fiber İHA'dan ayrılacaktır. Örnek bir sistem 1990'larda Sprite İHA için test edilmiştir.

3.3 Radyo Haberleşmesi

Radyo haberleşmesi İHA ve onun kontrolörü arasında doğrudan ve uydu aracılığıyla haberleşmesinde kullanılan şuan ki haberleşme sistemidir. Haberleşme sistemi İHA sistemlerinde en önemli kısımdır. İHA'larda haberleşme sistemleri LOS (Line of Sight, Görüş Hattı), BLOS (Beyond Line of Sight, Görüş Hattı Ötesi) ve Taktik olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır.

3.3.1 LOS Veri Haberleşmesi

LOS (Line Of Sight, Görüş Hattı) haberleşme sistemleri noktadan noktaya veri iletimi sağlayan haberleşme sistemleridir. İHA'lar haberleşmesini görüş hattı içerisinde kalan noktalar ile sağlamaktadır. Görüş hattı içerisinde daha uzun menzilde ve daha yüksek hızlarda veri haberleşmesi sağlanmaktadır [3]. Bu sistemler YKİ, YVT ve İHA'dan oluşur. Yüksek menzil ve veri hızlarına ihtiyaç duymak için özel tasarımı antenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Haberleşme sistemleri görevlerine, YKİ ve YVT' nin platform özelliklerine ve haberleşme ağının tasarımına bağlı olarak kurgulanır. Özellikle hava aracında ki sistemler hafif, az güç tüketimine sahip ve modüler olması gerekmektedir. Bu tip sistemlerde çalışma menzili alıcı ve verici cihazların özellikleriyle doğrudan ilişkili olarak ortalama 150-200 Km değerine sahiptir [7].



Şekil 3. 2 İHA LOS haberleşmesi

Çalışma mesafesini arttırmak için Röle Haberleşme Sistemi kullanılır. Hava Veri Rölesi, Haberleşme Rölesi ve İleri Uç Haberleşme İstasyonu olarak üç kısımda toplanır.

3.3.1.1 Hava Veri Rölesi

İHA' lara bütünleşmiş ve doğrudan LOS haberleşmenin sağlanamadığı durumlarda hedef İHA ile YKİ ve YVT arasında kullanılır. En az iki tane İHA gerektiren sistemlerdir. Hedef İHA faydalı yüklerden elde ettiği verileri YVT' ye göndermesi için Röle İHA'ya iletir. İki yönlü haberleşme sağlayan Röle İHA Hedef İHA'dan aldığı verileri YVT ve YKİ' ye aktarır.

3.3.1.2 Haberleşme Rölesi

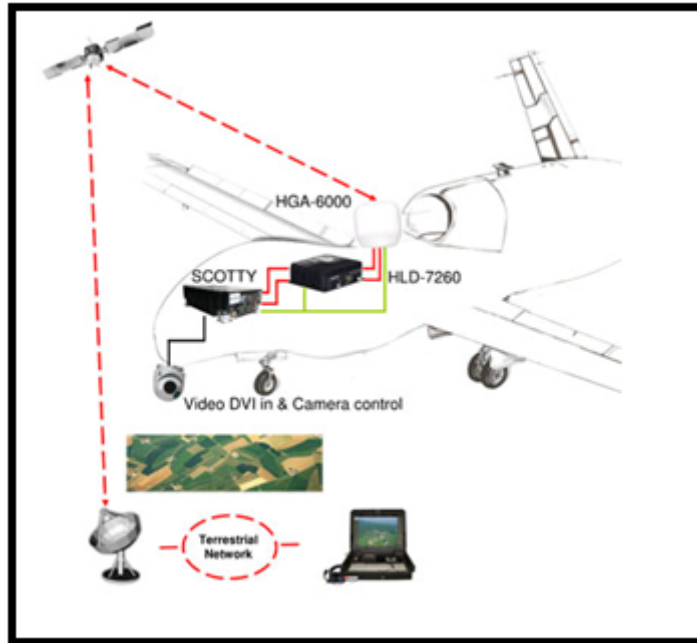
İHA ve YKİ arasında doğrudan görüş hattının sağlanamadığı durumlarda kullanılır. Hava-hava, yer-yer ve hava-yer arasında haberleşmeyi sağlamak için kullanılır. Telsis sistemlerinin kullanıldığı iki yönlü haberleşme sistemidir. Röle telsizi kullanılan birinci telsiz havadan aldığı sinyali ikinci telsize gönderir. İkinci telsizde module ettiği sinyali üçüncü telsize gönderir. Üçüncü telsiz ise bu sinyali yeniden module ederek YKİ veya YVT' ye ulaştırır.

3.3.1.3 İleri Uç Haberleşme Rölesi

İHA'ların gerekli sebeplerden ötürü çalışma menzili dışına çıkmaları veya arazi şartlarından ötürü YKİ veya YVT ile doğrudan haberleşme sağlayamamaları durumunda kullanılmaktadır. Mevcut YKİ veya YVT devre dışında kalır ve İHA ile YKİ ve YVT arasında laser, optik ve radyo olmak üzere değişik haberleşme yöntemleriyle görevlerini icra ederler. LOS veri haberleşmesi günümüzde İHA'larda en çok kullanılan haberleşme sistemleridir.

3.3.2 BLOS Haberleşmesi

Uydu haberleşmesi olarak bilinen BLOS haberleşmesi menzil artırımı sağlamak ve görüş hattı iletim zorluğunu ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır. Dünya ile uzay arasında doğrudan görüş hattı olduğundan uydu haberleşmesi uzak mesafeler ile en kolay mikrodalga haberleşmesine olanak sağlar. Oldukça uzak mesafeler için faydalı yüklerin temini veya İHA'nın uzaktan komuta ve kontrolü için kullanılan sistemlerdir. Ancak veri hızı LOS'a göre düşüktür. Uydu Hava Terminali ve Uydu Yer Terminali olmak üzere iki sitemden oluşur. Terminaller İHA üzerine ve YKİ'ye entegre olan sistemlerdir. Yer-hava ve hava-hava haberleşmesini iki yönlü olarak sağlarlar.



Şekil 3. 3 İHA BLOS haberleşmesi

3.3 Taktik Veri Haberleşmesi

Aynı çalışma sahası içinde birden fazla İHA ve yer sistemleri ile kurulan ağ yapısıdır. Bu sistemler birbirine girişim oluşturmada çalışabilmektedir. Taktik haberleşme sistemleri çoklu rölelerden oluşmaktadır ve her sistemin birbiriyle uyumlu çalışmasını sağlamaktadır. İHA'ların çoklu görevleri neticesinde ortaya çıkmıştır. Günümüzde Taktik Veri Haberleşmesi çalışmaları büyük önem taşımaktadır.

3.4 Frekans Planlaması

Elektromanyetik dalgalar için genellikle taşıyıcı olarak kullanılabilen frekans aralığı 3 Hz üstü ve Infrared spektrumun altı olan 300 GHz'in altıdır. 3-300 GHz frekans aralığında ki dalgalar genellikler mikrodalga olarak bilinir ve yansımadıkları için LOS haberleşmede kullanılırlar. Faydalı yüklerin verilerini yüksek veri hızında iletmek İHA için çok önemlidir. Hızlı veri iletimi ise yüksek frekanslarda ve LOS haberleşme de mümkündür.

Frekans band tasarımında kullanılan en sık referans alınan üç kurum vardır. Bu kurumların standart tablosu Tablo 3.1'de verilmektedir [8]. Bu otoriteler aşağıda verilmektedir.

- 1- Uluslar arası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU)
- 2- Elektrik Elektronik Mühendisliği Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineering, IEEE)
- 3- NATO ve EU Standartları

Radyo frekans kullanımına ve uydu yörüngesi konusundan global uzlaşa oluşturan kurum Dünya Radyokomünikasyon Konferansıdır (WRC, World Radiocommunication Conference). ITU ve Birleşik Devletler Organizasyon tarafından her iki yılda bir toplanılır.

Çizelge 3. 1 Frekans bandı standartları

IEEE		EU, NATO, US ECM.	
BAND	FREQUENCY RANGE	BAND	FREQUENCY RANGE
HF	3 to 30MHz	A	0 to 0,25 GHz
VHF	30 to 3MHz	B	0,25 to 0,5GHZ
UHF	0,3 to 1,0GHz	C	0,5 to 1,0GHz
L	1 to 2GHz	D	1 to 2GHz
S	2 to 4GHz	E	2 to 3GHz
C	4 to 8GHz	F	3 to 4GHz
X	8 to 12GHz	G	4 to 6GHz
KU	12 to 18GHz	H	6 to 8GHz
K	18 to 26GHz	I	8 to 10GHz
KA	26 to 40GHz	J	10 to 20GHz
V	40 to 75GHz	K	20 to 40GHz
W	75 to 111GHz	L	40 to 60GHz
		M	60 to 100GHz

Konferans, uluslar arası düzenli erişimi düzenlemek ve frekans bandlarını en efektif kullanımını yapmak için araştırmalar yapar. En efektif frekans kullanımı için teknolojik, ekonomik, endüstriyel ve diğer gelişmeleri hesaba katılmaktadır. Ticari, bilimsel ve diğer amaçlar için radyo frekanslarına erişim taleplerinin artışıyla konferansa katılanlar, telekomünikasyon sağlayıcıları, TV ve radyo yayını ve donanım endüstrileridir. Ayrıca savunma yeteneği de uygun frekans edinmeye bağlı olduğu için askeri kurumlarda konferansın katılımcılarıdır.

NATO, Avrupa Birliği'nin Radyo Spektrum Politikalarına ticari ve askeri spektrum gerekliliğinin arasındaki dengeyi sağlamasına katkıda bulunmaktadır. Bölgesel radyo spektrum planlaması Avrupa Posta ve Telekomünikasyon Konferansı (European Conference of Postal and Telecommunications) tarafından yürütülmektedir. En yaygın kullanılan NATO ve WRC görüşüne göre, İHA frekans bandları S, C, X ve Ku bandlarıdır [4].

İHA SİSTEMLERİNDE ANTENLER

RF sinyalin iletilmesinde ve alınmasında aynı anten konfigürasyonu kullanılır. Ancak İHA' larda yönsüz anten kullanımı çok nadirdir. Genelde yönlenebilen ve İHA ile YKİ ve YVT arasında LOS haberleşmesini İHA'nın her türlü manevrasında sağlayabilen yönlü antenler tercih edilmektedir [9]. Bazı durumlarda İHA üzerine birden çok yere konumlandırılmış antenler kullanılabilmektedir.

İHA sistemlerinde çok değişik ihtiyaçlar için antenler kullanılmaktadır. Antenlere ihtiyaç duyan bu sistemler aşağıda verilmiştir[10].

- Radar/Elektronik Harp
- Haberleşme
- Veri Linki
- GPS/Coğrafi Konum
- Biyolojik, Kimyasal veya Nükleer Sensörler

Anten tasarımı İHA'nın haberleşmesinde en kritik kısımdır. Çünkü pasif bir eleman olan alıcı veya verici antenler, tasarımına göre birçok haberleşme kriterini belirlemektedir. Aşağıda anten tasarımında üzerinde durulacak kıstaslar verilmektedir [9,10].

- Boyut, ağırlık ve güç tüketimi
- Güç boşaltma
- İHA üzerinde ki konumu ve görüş alanı gereksinimi
- Frekansı

- İzolasyon ve girişim
- Güvenilirlik ve bakılabilirlik
- Radom

Yeni teknolojik gelişmeler ve haberleşme üzerinde ki gereklilikler neticesinde değişik teknolojilerde birçok çeşit anten ortaya çıkmıştır. Özellikle İHA’larda kullanılan antenler çok yüksek gereksinimli antenlerdir. 1960’ lardan bu yana gelen anten konseptleri bilgisayar sistemlerinde ki gelişmeler ve mikro cihazların yaygınlaşmasıyla pratik uygulamalarda yer almaya başlamıştır. Aşağıda yeni anten teknolojileri ve mimarileri yer almaktadır [10].

- Katı hal (Aktif antenler)
- Uyumlu
- Smart Antenler
- Süper iletken
- Genetik algoritma
- Uyarlanabilir
- Konfigüre edilebilir
- Çok huzmeli
- Fotonik
- Dijital huzme taramalı
- Geniş band
- Frekans seçici yüzeyler ve cihazlar
- Yeni ve egzotik materyaller
- Parçalı anten

4.1 İHA Sisteminde Kullanılan Antenler

İHA sistemleri daha önce bahsedildiği gibi YKİ, YVT ve İHA'dan oluşur. Bu iki sistem ise sürekli birbiriyle veya başka sistemlerle haberleşmektedir. Haberleşme türleri ise tamamen farklılık göstermektedir. Örneğin YKİ' nin İHA'yı kontrol etme amacıyla yapmış olduğu kontrol haberleşmesi yüksek veri hızına ihtiyaç duymazken faydalı yükler tarafından elde edilen verilerin YVT' ye gönderilmesi yüksek hızlı haberleşme gerektirir. Dolayısıyla değişik haberleşme sistemlerinde kullanılan anten tipleri de farklıdır. İHA sistemlerinde en yaygın kullanılan anten tipleri [9,10,11];

- Dipol veya Monopol Antenler
- Yagi-Uda Antenleri
- Parabolik Antenler
- Horn Antenler
- Mikro şerit Antenler

Şekil 4.1'de bu anten türleri gösterilmektedir.



Şekil 4. 1 İHA sistemlerinde kullanılan antenler

4.1.1 Dipol Antenler

Artı ve eksi kutuplarla beslenen iki kısımdan oluşmaktadır. Dipol antenler yönsüzdür (Omni-Direction , Her Yöne Işıyan). Dolayısıyla yönlendiricilik kazançları 1'e eşittir yani yoktur. Maliyetleri oldukça düşüktür ve anten kazançları kullanılan iletkenin türüne bağlıdır [12,13]. Genelde tek başlarına kullanılmazlar dizi olarak kullanılmaktadırlar. Dizi antenler ile hem frekans bandları artar hemde yönlendiricilik kazançları artmaktadır. Ayrıca her yöne yapmış oldukları ışıma belirli bir yön kazanır.

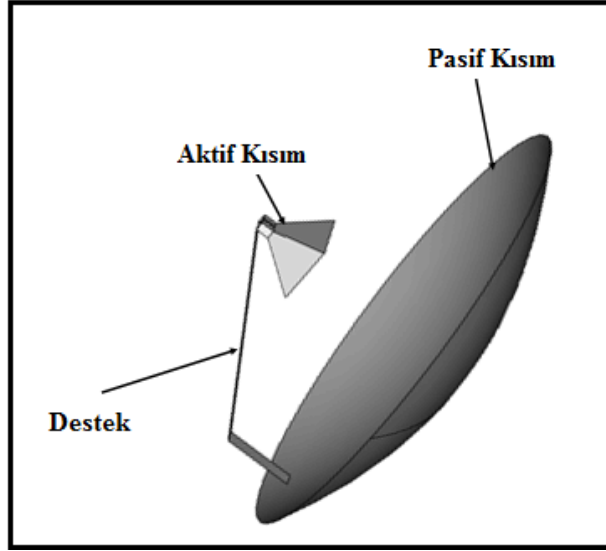
Çalışma frekansına göre dalga boyunun yarısında olan antenlere yarım dalga dipol anten denir. Çok sık kullanılmamaktadır.

4.1.2 Yagi-Uda Antenleri

Farklı frekanslarda çalışan birden çok dipol antenin bir araya getirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Farklı frekanslara sahip dipoller kullanıldığı için band genişliğinde artırım elde edilmektedir [12]. Bunun yanında yine çok sayıda anten kullanılarak dizi elde edilmektedir. Dolayısıyla yönlendiricilik kazancı arttırılmış olmaktadır. UHF ve VHF de çalışmasından dolayı boyutu büyüktür. İHA üzerinde kullanılması oldukça zordur ancak YKİ veya YVT' de kullanılabilir.

4.1.3 Parabolik Reflektör Antenler

İlk parabolik reflektör anten, Maxwell denklemlerinin oluşturulmasından 22 yıl sonra Hertz tarafından yapılmıştır. Parabolik antenler iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar aktif ve pasif kısımlardır. Şekil 4.1' de parabolik reflektör antenin bileşenleri gösterilmiştir. Pasif kısım sinyalin toplandığı veya ışındığı kısımdır. Sadece sinyali toplama görevine sahiptir. Aktif kısım ise odak uzaklığında yer alır ve toplanmış bu sinyali alır.

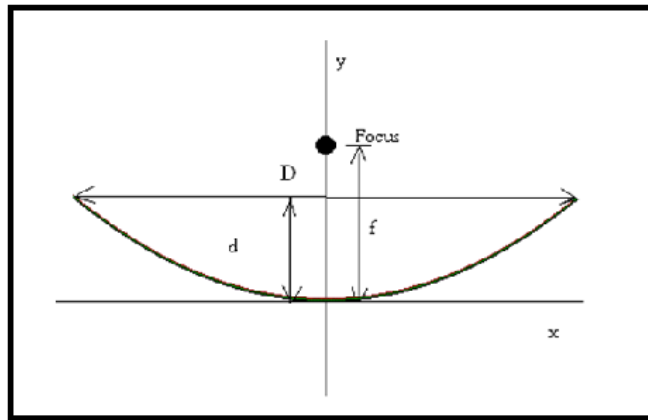


Şekil 4. 2 Parabolik reflektör anten

Parabolik antenler kalem demeti adı verilen çok dar huzmeli bir ışıma paternine sahiptirler. Dolayısıyla yarım güç huzme genişlikleri birkaç derecelik açıdır. Yüksek yönlendiricilik kazancına sahip olduklarından kazançları da çok yüksektir. Parabolik antenler için Şekilde 4.3’ de gösterildiği gibi üç önemli parametre vardır [12,14].

- Odak Uzaklığı (f)
- Çap Uzunluğu (D)
- Derinlik (d)

Dar huzmeli ve yüksek kazançlı olmasından dolayı uydu haberleşmesinde yoğun olarak kullanılmaktadır.

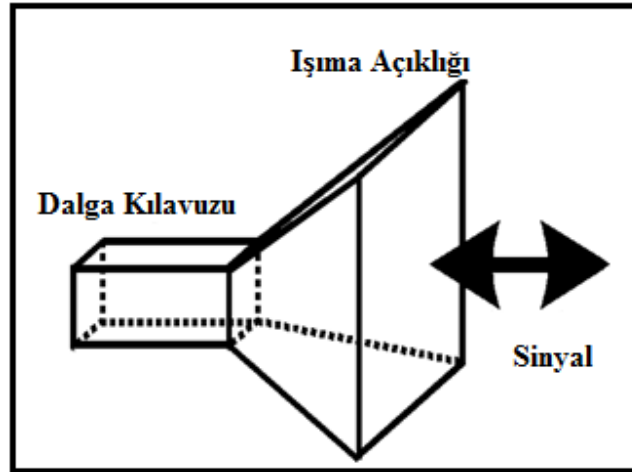


Şekil 4. 3 Parabolik reflektör antenin çalışma prensibi

4.1.4 Horn Antenler

Mikro dalga frekansında çalışan geniş bantlı antenlerdir. Boynuz şeklinde olduklarından bu isimle anılmaktadırlar. Açıklık prensibiyle çalışır. Şekil 4.4’ de görüldüğü gibi iki kısımdan oluşur. Bu kısımlar dalga kılavuzu ve ışıma açıklığıdır. Işıma açıklığının genişlemesi ile dalga kılavuzu ile meydana gelecek olan uyumsuzluk giderilmiş olur. Böylece elektromanyetik dalga belli bir yönde ışıma yapar. Antenin çalışma frekansı doğrudan ışıma açıklığının boyutuna bağlıdır [14]. Temel horn anten tipleri;

- H-plane
- E-plane
- Piramidal
- Konik



Şekil 4. 4 Horn anten

Kazançları ve band genişlikleri yüksektir. Ancak ağırlıkları ve üretim maliyetleri oldukça yüksek olduğundan pek tercih edilmemektedir.

4.1.5 Mikro Şerit Antenler

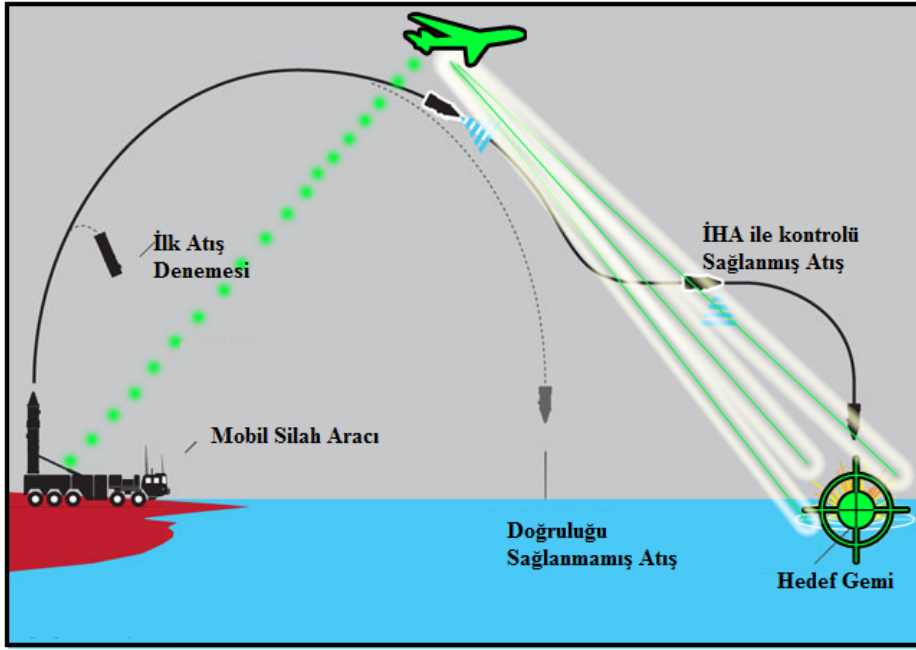
Bu çalışmada İHA downlink haberleşmesi için mikro şerit anten düşünülmektedir. Dolayısıyla Bölüm 6’ da mikro şerit antenin özelliklerine ve parametrelerine daha detaylı bir yaklaşım yapılacaktır.

İHA SİSTEMLERİNDE VERİ LİNKİ

İHA sistemleri hem askeri hem sivil alanda birçok farklı görevleri yerine getirmektedir. Askeri alanda İHA görevleri aşağıda verilmektedir [9].

- Keşif
- Hedef Tespiti
- Silah kontrol
- Saldırı
- Akıllı haberleşme ve elektronik
- Jamming (Haberleşme Sinyalini Boğma)

Silah kontrol aslında İHA'ların görevleri içerisinde en önemli olanlarından. Silah kontrolde değişik türde füzeler veya silah sistemlerinin yönlendirilmesi ve kontrolü İHA tarafından yapılmaktadır. Burada İHA hedef gösterici olarak kullanılmakta olup bu silah sistemlerini üzerinde bulundurmaz. Bu silah sistemlerinde destek elemanı olarak görev alır. Şekil 5.1' de İHA'nın destek elemanı olarak görevlendirildiği örnek bir silah kontrolü gösterilmektedir.



Şekil 5. 1 İHA kontrollü ateşleme sistemi

Bu görevlerin çoğu İHA ve YKİ arasında ki bilgi alış verişi ile yürütülür. İşte bu bilgi alış verişi veri linkleri ile sağlanmaktadır. Özel görevlere bağlı olarak aşağıda ki fonksiyonlar veri linki ile sağlanmaktadır [9].

- İHA' nın uçuş sahası YKİ tarafından kontrol edilmek zorundadır. Algılayıcılar yönlü olmalıdır. Bunun amacı Jammer (Sinyal Bozucu) gibi girişim yaratan sistemlerin girişim sinyalini etkisiz hale getirmektir. Bu kanal Telekomut Uplink (Telecommand Uplink, TU) olarak adlandırılır.
- İHA'nın konumu faydalı yük sağlayıcılar aracılığıyla YKİ' ye gönderilmektedir. İHA üzerinde ki algılayıcılar aracılığıyla alınan bilgi sınırlı miktarda veri ile YKİ' ye gönderilmektedir. Bu veriler yükseklik ve atalet ölçer (GPS, IMU) birimlerinden elde edilen verilerdir. Bu verilerin İHA'dan YKİ' ye gönderilmesi Telemetri Downlink olarak adlandırılan düşük kapasiteli kanallar aracılığıyla sağlanır.
- Gözetim, hedef araştırma, silah sistem kontrol veya taarruz gibi görevlerde SAR veya elektro-optik sensörlerden alınan geniş miktardaki veriler İHA'dan YVT' ye iletilmek zorundadır. Bu geniş miktarda ki veriler yüksek veri hızlı kanallar gerektirmektedir. Bu kanallar Downlink (Aşağı Link) olarak adlandırılır.

Veri linki menzili, İHA'nın sınıfına ve görevine bağlı olarak 20 Km' den yüzlerce Km ye ulaşabilmektedir. Veri hızı ise 100 bps' den 100 Mbps' a kadar ulaşmaktadır [9].

Veri linki farklı haberleşme modlarında çalışabilmektedir. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- **Simplex**, verici doğru bilgi aktarımında bulunduğu bilgisine sahip değildir.
- **Semi-Duplex**, küçük paketlerle doğrulama bilgisine sahiptir ve böylece iletim hataları minimum gecikme ile düzeltilebilir.
- **Full-Duplex**, iki taraflı sürekli haberleşme sağlar ve böylece güvenilir ve maksimum oranda hatasız bilgi aktarımı sağlar.

Veri linki donanımları hava aerodinamiğine ve çevresel şartlara uygun olmalıdır. Ayrıca bu donanımlar birbirini etkilemeyecek şekilde uyumlu çalışmalıdır. Taktik İHA' lar için veri linki donanımları 200 Kg' mı geçmeme ve güç tüketimleri 200 W' ın altında olmalıdır. Tabi bu değerlerin her zaman daha azı tercih edilir. İHA ile YKİ ve YVT için çevresel koşullar veri linkinin kendisini meydana getirir.

Frekans aralığına bağlı olarak haberleşme kanalının aşağıdaki karakteristik özelliklere sahip olması beklenir [9].

- LOS haberleşme
- Menzile, atmosfere ve havaya bağlı olarak zayıflama
- Solar aktivitelerden kaynaklı iyonosferik etkiler ve günlük değişkenler

Bu doğal etkenlere ek olarak haberleşme kanalı değişik tiplerde ki Jamerlar (Sinyal Boğucu) tarafından kısıtlı nüfuza tabidir. Bunlar;

- Geniş ve dar bantlı gürültü Jamer' ları
- Darbe Jammer' ı
- Tekrarlayıcı Jammer
- Akıllı Jammer

İHA görevinin kriter ve gerekliliklerine dayanan veri linkinde bu etkiler hesaba katılmalıdır. Şekil 5.2'de örnek bir veri linki görülmektedir.



Şekil 5. 2 İHA veri linki örneği

5.1 İHA Veri Linki Karakteristiği

Veri linki tasarımında kullanıcıların bakış açısında temel seçim kriteri ve gerekliliği aşağıdaki üç parametredir. Bu değişkenler veri linkinin karakteristiğini ortaya koyar. Veri linki kapsamında yapılan tüm çalışmalar neticesinde varılan sonuç aslında bu parametrelerdir.

- Menzil
- Veri Hızı
- Link Korunması

Veri linki için farklı değerlerde amaçlanan bu parametreler, tasarımcılar için aşağıdaki parametrelerin değişik değer almasıyla sağlanmaktadır.

- Band genişliği
- Çalışma Frekansı
- Anten özellikleri
- Sinyal işleme

5.1.1 Band Genişliği

Band genişliği iletilecek verinin doğrudan hızını etkilemektedir. Ek olarak bazı sinyal işleme teknikleri, band genişliğini tüketen grişim direnci koyar. Resim veya video iletiminde sinyallere veri sıkıştırma teknikleri uygulanır. Genel olarak veri hızı doğrudan band genişliğine eşittir. Radyo frekans sistemlerinde biręok komponent ęalıřma frekanslarının belirli bir kısmını kapsamaktadırlar. Bu nedenle ęalıřma frekansları %3'ü aşmamaktadır [9,15].

5.1.2 Frekans Seçimi

Veri linki için ęalıřma frekansı seğilirken aşağıdaki kriterler dikkate alınmalıdır.

- Işıma karakteristiği
- Güç kazanımı
- Anten karakteristiği
- Erişilebilir band genişliği

HF (High Frequency, Yüksek Frekans)' den mikrodalga frekanslarına, frekans spektrumu aşağıda ki gibi karakterize edilir.

- HF frekans (1-30 MHz) yer dalgaları, hava dalgaları veya doğrudan görüş hattıyla yayılım yapabilmektedir. Böylece geniş ve uzak mesafeleri kapsar. Ancak kullanılabilir band genişliği düşüktür ve anten boyları İHA'ların boyuna göre oldukęa büyüktür.
- VHF/UHF (Very High Frequency/Ultra High Frequency, ok Yüksek Frekans/Ultra Yüksek Frekans) frekansları (30 MHz – 1 GHz) spektrumun küçük bir kısmında kırınım ile yayılım sayesinde önemli bir mesafeyi kapsar. Ancak kırınım için güç seviyeleri yüksektir kazançlı antenler yine çok büyüktür.
- Mikro dalga spektrumu (1 GHz – 100 GHz) İHA uygulamaları için ilgilenilen temel frekanslardır. Yüksek band genişliği kullanımını mümkün kılar. İHA için minimum boyutlarda olması gereken anten tasarımları mümkündür. Ancak mikro dalga için yayılım karakteristiği LOS haberleşmesiyle sınırlı olup güç seviyesi birkaç watt ile sınırlıdır.

İHA uygulamalarında veri linki için aşağıdaki bandlar kullanılmaktadır [9].

- Ku-Band
- X-Band
- C-Band
- L/S-Band

İHA uygulamalarında mikro dalga spektrumunun kullanılmasında daha öncede bahsedildiği gibi üç temel özellik, yüksek band genişliği, yüksek kazanç ve küçük boyutlu anten tasarımlarının olmasıdır.

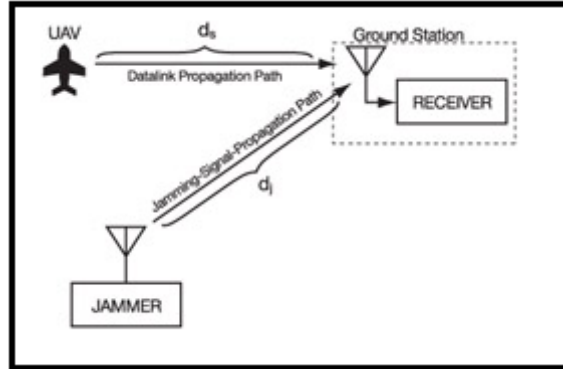
Mikro dalga spektrumunun tek dezavantajı, LOS veri haberleşmesine bağımlı olması ve menzilin en fazla 300 Km ile sınırlı olmasıdır. Bu dezavantajı tölere edebilmek için ise İHA' larda daha önce anlatıldığı gibi haberleşme rölelerinin kullanılmaktadır.

5.2 Veri Linki Tasarım Teknikleri

Veri linki tasarım tekniklerinde ki dikkat edilecek anahtar faktörler;

- Girişim Direnci
- Menzil
- Veri Hızıdır

Günümüzün savaş ortamlarında Girişim-Direnci (Jamming Resistance) ve veri linkinin engellenmesinin düşük olasılıklı olması görevin yerine başarı ile getirilmesinde son derece önemlidir. Girişim, doğrudan haberleşme kalitesini ve performansını etkilemektedir. Girişim, haberleşme sinyalini bastırabildiği gibi karıştırarak işlenemez hale de getirmektedir. Böylece sağlıklı ve sürekli bir haberleşme imkânını ortadan kaldırır. Şekil 5.2' de girişim (Jamming) etkisi gösterilmektedir.



Şekil 5. 3 Jamming etkisi

İHA tasarımında ki bu gereklilikleri YVT' den çok İHA' a yüklenmektedir. Dolayısıyla İHA veri linki tasarımında aşağıdaki kısıtlanan koşullar İHA veri linki tasarımında birer zorlunluluktur [1].

- Boyut
- Ağırlık
- Güç tüketimi
- Isınma
- Antenler

Bu kısıtlamalar bazı tasarım özelliklerini etkilemektedir. Bunlar;

- **Verici Gücü**, güç sağlayıcı tarafından sınırlandırılmaktadır. Çünkü güç sağlayıcılar ısıyı yaymakta, İHA üzerinde alan kaplamakta ve yük oluşturmaktadır.
- **Anten tipi ve kazancı**, ağırlık, boyut ve İHA üzerinde ki konumu nedeniyle kısıtlanmaktadır. Çünkü aerodinamik koşulları etkilemektedir.
- **Frekans bandı**, antenin çalışma frekansına ve verici gücüne göre seçilmelidir. Link bütçe uygunluğu girişim koşulları altında değerlendirilmelidir.

5.3 Veri Linki Güvenliği

Askeri uygulamalarda en kritik zorunluluk kaliteli bir veri linki oluşturmaktır. Genellikle zararlı saldırı altında ve girişime maruz, gürültü değeri yüksek haberleşme ortamı vardır. Veri Linki kalitesi kesintisiz, güvenli ve anlık haberleşme ile belirlenmektedir. Tipik veri linki koruma teknikleri aşağıda verilmiştir [9].

- Yönlü anten kullanımı
- Modülasyonun sağlamlığı
- Yaygın spektrum teknikleri
- Gelişmiş hata düzeltme

Yukarda ki tasarım kıstasları sonucunda oldukça karmaşık, esnek ve maliyetli bir yapı ortaya çıkmaktadır. Ancak bu kıstaslar doğrudan veri linkinin performansını etkilemektedir. Dolayısıyla iyi dengelenmiş, optimize ve en efektif maliyetli tasarımlar için çalışmalar yürütülmelidir.

İHA ANTEN SİSTEMİ TASARIMI

İHA sistemlerinde antenler oldukça kritik bir öneme sahiptir. İHA antenleri İHA'nın bazı gerekliliklerinden ötürü bir takım kısıtlamalara sahiptir. Örneğin boyutları ve ağırlıkları küçük olmalıdır. Ayrıca daha önceki konuda da bahsedildiği gibi yönlü anten kullanılmalıdır. Çünkü İHA'ların kullanım amaçları gereği haberleşmesinin güvenilir ve kesintisiz olması gerekmektedir [1, 9, 10]. Yönlü anten kullanımı ile antenin ışıma huzmesi daraltılmakta ve her yöne sinyal gönderiminden çok, belli bir doğrultuya odaklanması sağlanmaktadır. Dolayısıyla yönlü anten kullanımı ile YVT'ye iletilen faydalı yük verisi çok daha güvenilir bir veri linkine sahip olacaktır. Ancak yönlü anten kullanımı da başka bir gereksinimi beraberinde getirmektedir. İHA sürekli hareket halinde olduğu için ve bazen sık manevralar yapması gerektiğinden video akışını sağlayan anten sisteminin de YVT' i takip etmesi gerekmektedir. Çünkü yönlü anten yatay düzlemde belli bir ışıma açısına sahiptir ve YVT'nin bu güvenilir haberleşme açısı içinde tutulması gerekmektedir. Anten kazancı ile menzil arasında ki ilişki (6.1), (6.2), (6.3), (6.4) ve (6.5) eşitliklerinden elde edilmiştir [16].

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot L_{fs} \cdot e_T}{L_T} \quad (6.1)$$

$$e_T = e_A \cdot e_t \cdot e_p \quad (6.2)$$

$$L_{fs} = \frac{\lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot d)^2} \quad (6.3)$$

P_r , P_t , G_r , e_T , L_T , λ ve L_{fs} sabit kabul edilirse (6.3) eşitliği, (6.4) gibi yazılabilir.

$$d^2 \approx K \cdot Gt \quad (6.4)$$

$$d \approx \sqrt{K \cdot G_t} \quad (6.5)$$

Sonuçta elde edilen (6.5) eşitliğine göre anten kazancının karekökü ile menzil uzaklığı doğru orantılıdır. Yani verici anten kazancı 4 katına çıkarsa menzil uzaklığı yaklaşık iki katına çıkar. Çizelge 6.1’ de haberleşme menzil parametreleri verilmiştir [16].

Çizelge 6. 1 Haberleşme menzili parametreleri

Parametre	Açıklama	Birim
P_r	Alıcıdaki Güç	dB
P_t	Verici Gücü	dB
G_t	Verici Anten Kazancı	dBi
G_r	Alıcı Anten Kazancı	dBi
e_T	Toplam verim	-
e_A	Anten Açıklık Verimi	-
e_t	Verici Verimi	-
e_p	Polarizasyon Verimi	-
L_T	Toplam Kayıp	dB
L_{fs}	Serbest Uzay Yol Kaybı	dB
λ	Dalga Boyu	MHz
d	Haberleşme menzili	Km

Burada kazancı yüksek anten elde etmek için (6.6) eşitliği incelenmektedir.

$$G(\theta, \varphi) = e \cdot D(\theta, \varphi) \quad (6.6)$$

e, Işıma verimi

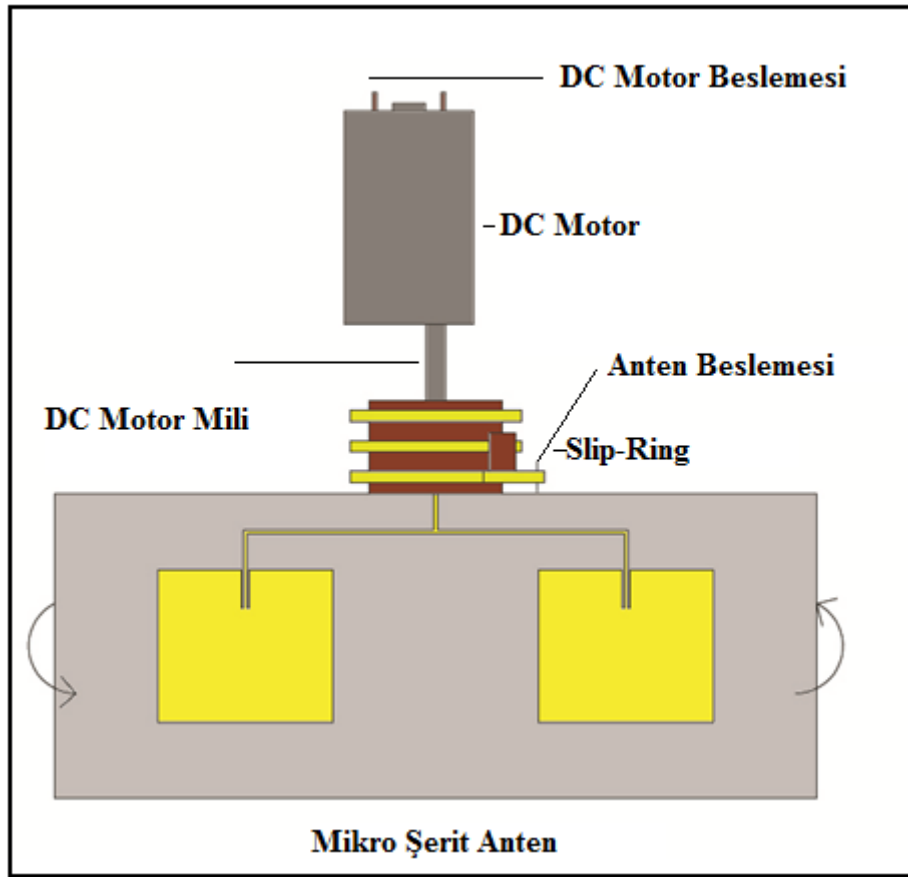
$D(\theta, \varphi)$, Yönlendiricilik kazancı

Antenin kazancı doğrudan $D(\theta, \varphi)$ yönlendiricilik kazancı ile alakalıdır. Yönlendiricilik kazancı belli bir açıya gönderilen gücün her yöne gönderilen güce oranıdır. Sonuçta belirli bir açıya gönderilen güç artarsa yönlendiricilik kazancı da artar ve dolayısıyla anten kazancı artar. Buda dar bir huzmeye tekabül etmektedir [12,14].

Ancak huzme daraldığı için İHA'nın anteni sürekli olarak YVT antenine odaklanmalıdır ve onu ana huzme (HPBW, Half Power Beam Width, Yarım Güç Huzme Genişliği) içinde tutmalıdır. Buda İHA' da kurulan bir sistemle YVT'nin sürekli olarak takip edilmesi anlamına gelmektedir.

Projede yüksek kazançlı ve bunun neticesinde dar huzmeli bir anten tasarımı yapılacaktır. Bu anten sistemi yatay ekseninde hareket yeteneğine sahiptir. Böylece YVT antenine yatay ekseninde kolayca odaklanma sağlanabilmektedir.

Otomatik yönlendirilebilir anten sistemleri yönlü antenlerin hareket yeteneği ile sürekli iletişimi sağlayan sistemlerdir. Şekil 6.1' de bu proje için düşünülen otomatik yönlendirilebilir anten sisteminin AutoCAD ortamında yapılan tasarımı gösterilmektedir.

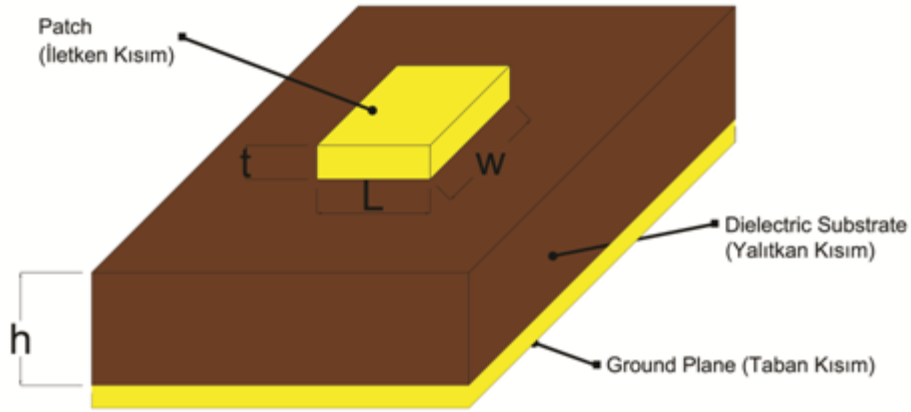


Şekil 6. 1 Otomatik yönlendirilebilir anten sistemi

Genel olarak otomatik yönlendirilebilir anten sistemi; anten, kontrol sistemi ve destek elemanları olarak üç kısımdan oluşurlar [11]. Anten için mikro şerit anten tasarlanmıştır. Kontrol sistemi ise yönlendirme mekanizması ve yönlendirme açısının elde edilmesi için kullanılan sistemlerdir. Destek elemanları otomatik yönlendirme sistemi için kullanılan bileşenlerdir.

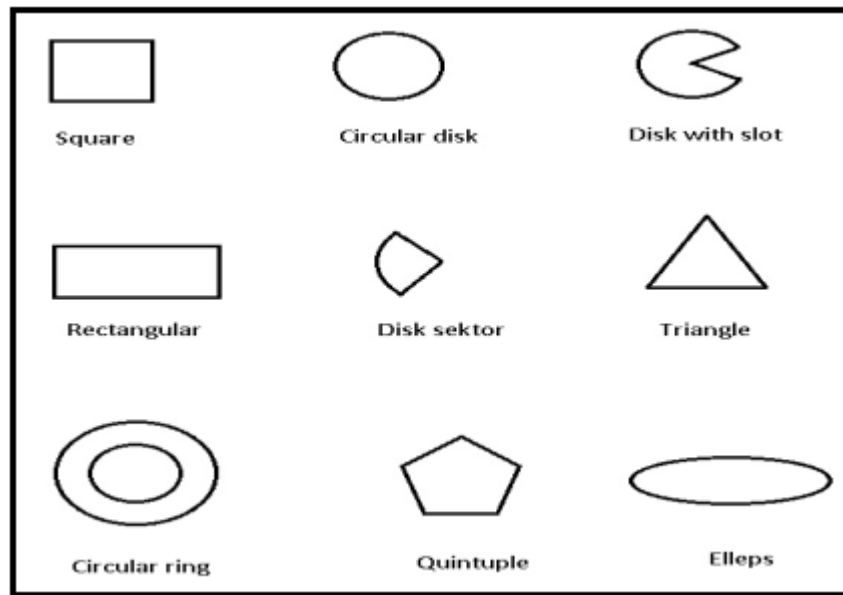
6.1 Anten

Bu proje için mikro şerit anten düşünülmektedir. Mikro şerit antenler aynı zamanda yama anten olarak da bilinir. Şekil 6.2’ de görüldüğü gibi en altta taban kısım (Taban Kısım, Ground) onun üstünde yalıtkan kısım (Yalıtkan Kısım, Substrate) ve onun üstünde de yama (Yama, Patch) bileşenlerinden oluşur. Burada taban ve yama iletken ve ortada kalan kısım ise yalıtkan malzemelerdir. Mikroşerit anten çeşitli amaçlar dâhilinde farklı konfigürasyonda olabilir.



Şekil 6. 2 Mikro şerit anten bileşenleri

Temel şekiller kare, dikdörtgen ve silindirik şeklindedir. Şekil 6.3’ de mikro şerit anten için kullanılan şekiller verilmektedir. Mikro şerit antenler küçük boyutlu, hafif, sağlam ve sistemlere kolay uyum sağlayacak boyuttadır. En önemli özelliği ise modern baskı teknolojileriyle çok rahat üretilebilir ve maliyetleri nispeten ucuzdur. Ayrıca tınlama (Tınlama, Rezonans) frekansı, giriş empedansı, ışıma paterni ve polarizasyon açısından çok yönlü olup istenilen parametre değerine getirilebilir. Tüm bunlar onu, mikrodalga bandında vazgeçilmez hale getirmiştir. En temel dezavantajları ise düşük verim, düşük güçlü uygulamalara uygunluğu ve dar bant genişliğine sahiptir [13]. Son günlerde anten konfigürasyonundaki ve komponentlerindeki gelişmelerle ve yapılan çalışmalarla bu dezavantajlar giderilebilmektedir. Sürekli gelişmeye açık olması onun geleceğinin parlak ve önemli olduğunu göstermektedir.

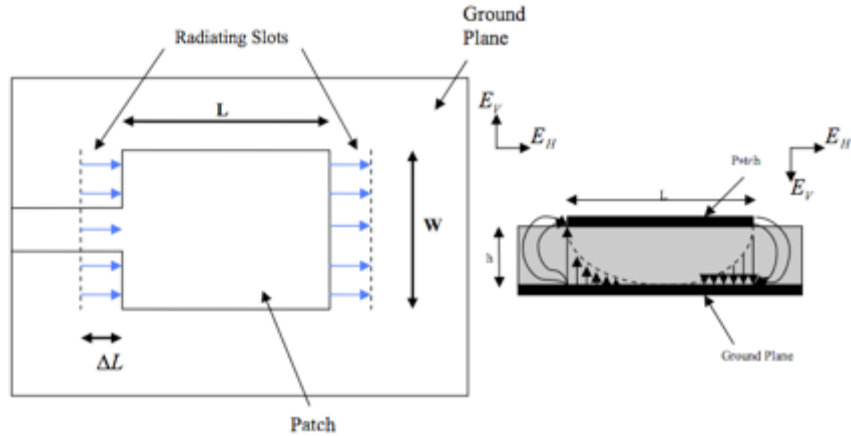


Şekil 6. 3 Mikro şerit anten şekilleri

6.1.1 Mikroşerit Antenin Çalışma Prensibi

Mikro şerit antenin boyutları Şekil 6.2’ de verilmektedir. Genellikle mikro şerit (Patch)’ in boyu $\lambda/2$ ile $\lambda/3$ arasında değişir. W değeri λ ’dan küçüktür. Ancak bu değer çok da küçük olamaz çünkü diğer taraftan anten ışınlam yapamaz hale gelir. Nitekim t kalınlığı son derece küçük olmalıdır. h (bazen d gösteriminde olabilir) ($\ll \lambda$), dielektrik (Substrate) kalınlığı ise 2 ile 24 arasında değişen dielektrik sabiti değerine sahiptir.

Rezonans anten elde etmek için, antenin boyu olan L değeri yarım dalga boyunda olmalıdır. Bu durumda anten $\lambda/2$ açık sonlu tınlışım kovuklu transmisyon hattı olarak dikkate alınabilir. Açık sonlarda saçaklı alanlar oluşur, bu elektrik alanının pmikro şeritin sonlarında tabana uzanmasıyla meydana gelir. Bu ışınlam slot hattı ile aynıdır. Böylece mikro şerit de iki slot’a sahiptir. Sonlarda ki saçaklanmış alan $\lambda/2$ ile ayrılır ve genlikleri aynı olmasına rağmen aralarında $\lambda/2$ ’ den dolayı 180 derece faz farkı vardır. Şekil 6.4’ de bu durum gösterilmektedir [12].



Şekil 6. 4 Mikroşerit antenin ışınlamı

Antenin tepesinden bakıldığında bu iki slottaki alanın x bileşenleri aynı fazdadır. Dolayısıyla maksimum ışınlam z yönünde gerçekleşir.

6.1.2 Mikroşerit Antenin Analiz ve Tasarımı

Rezonans kovuklu transmisyon hattında (mikro şerit anten) birçok mümkün olan mod vardır. Böylece anten çoklu modludur ve bir çok rezonans frekansına sahiptir. Temel ve baskın mod TM_{10} ’ dır. Yarım dalga, sadece x eksenini boyunca değişim gösterdiğinden bu mod mümkündür [12, 13, 14].

$$\Delta L = \frac{[0.412(e_{r_{eff}} + 0.3)(\frac{W}{d} + 0.264)]}{[(e_{r_{eff}} - 0.258)(\frac{W}{d} + 0.8)]} \quad (6.7)$$

$e_{r_{eff}}$, efektif dielektrik sabitidir.

$$e_{r_{eff}} = \frac{e_r + 1}{2} + \frac{e_r - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + 12 \cdot \frac{d}{W}}} \quad (6.8)$$

$$L_{eff} = \frac{1}{2 \cdot f_r \sqrt{e_{r_{eff}}} \sqrt{e_0 \mu_0}} \quad (6.9)$$

$$L = L_{eff} - 2 \cdot \Delta L \quad (6.10)$$

$$W = \frac{1}{2 \cdot f_r \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (6.11)$$

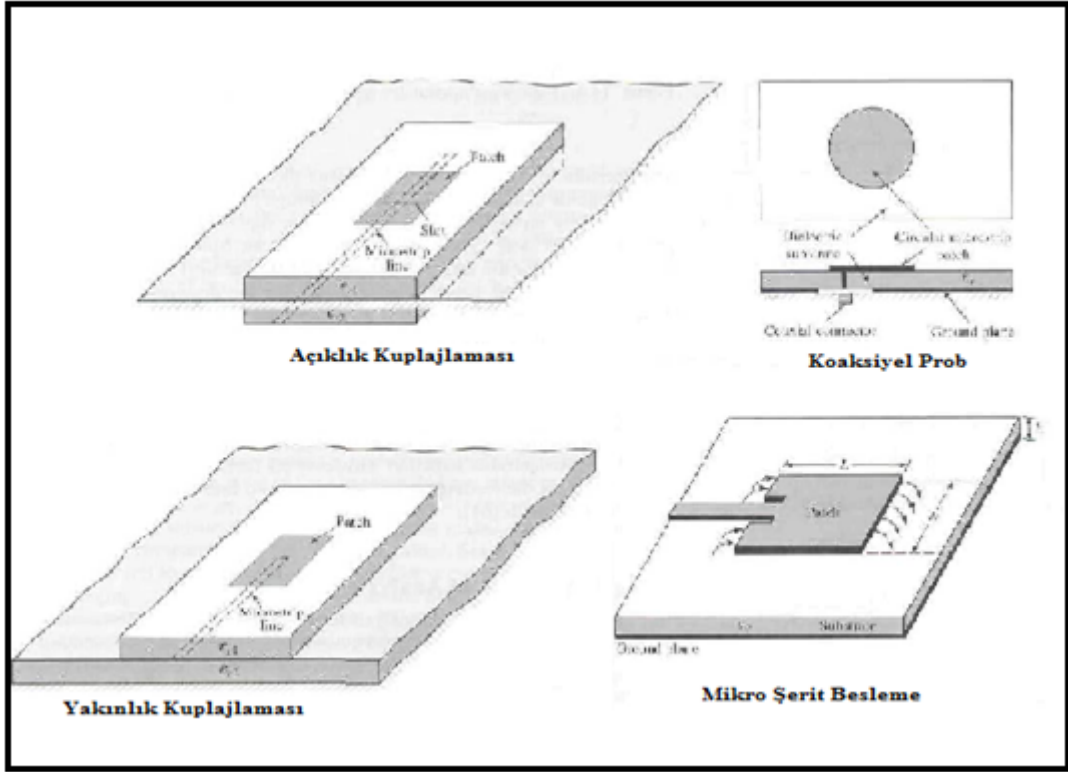
Eşitlik (6.10) ve (6.11)' e göre dielektrik katmanın dielektrik sabiti ϵ_r , kalınlığı ve çalışma frekansı biliniyorsa mikro şeritin uzunluk (L) ve genişlik (W) değerleri elde edilebilir.

6.1.3 Mikroşerit Anten Besleme Teknikleri

Mikro şerit anten beslemesi için bir çok konfigürasyon vardır. En çok revaçta olan dört besleme tekniği aşağıda verilmiştir.

- Koaksiyel besleme
- Mikro şerit hat besleme
- Açıklık kuplajlama
- Yakınlık kuplajlama

Bu besleme teknikleri gösterimi Şekil 6.5' de görülmektedir.



Şekil 6. 5 Mikroşerit anten besleme teknikleri

Besleme tekniklerinde dikkat edilecek husus empedans uyumudur. Empedans uyumu doğrudan verimliliği (Verimlilik, Efficiency) etkilediği için çok önemlidir. Verimlilik ileriki bölümlerde daha detaylı incelenecektir.

Mikro şerit hat genişliği mikro şerite göre küçük olan iletken bir şerittir. Yapımı kolay ve empedans uyumu kolaydır ve en basit metottur. Ancak dielektrik kalınlığı arttığında yüzey dalgalanması artar. Pratikte band genişliği limiti %2 ila 5 arasında değişir.

Koaksiyel hat ile beslemede içi iletken mikro şerit ile ve dışı iletken taban ile beslenir. Ancak bu güvenilir bir yöntem değildir. Üstelik empedans uyumu da zordur. Bunun yanında çok dar bir band genişliğine sahiptir. Genellikle dielektrik kalınlığı $d > 0.02 \lambda$ durumunda kullanılır.

Açıklık beslemesi ise üretimi en zor olan ve band genişliği en dar olandır. Açıklık beslemesi taban ile ayrılan iki dielektrik kısma sahiptir.

Yakınlık beslemesi en fazla band genişliğine sahiptir. Ancak üretimi oldukça zordur. Beslemenin uzunluğu ve genişliği ile empedans uyumu sağlanır. Bu çalışmada mikro şerit hat besleme kullanılacaktır ve analizi daha sonra yapılacaktır.

Bu çalışma da mikro şerit hat besleme tekniği kullanılacağından bunlar detaylı olarak incelenecektir. Mikro şerit hat besleme girintili (Girinti, Inset) besleme ve çeyrek dalga iletim hatlı besleme olarak ikiye ayrılmaktadır.

6.1.3.1 Girintili Besleme Modeli

Genelde giriş empedansı yüksek olduğu için besleme optimize edilir. Mikro şeritin kenarında akım düşük olduğu için giriş empedansı yüksektir. Ancak merkeze doğru akım yükseldiği için empedans düşer. Bunu yapmanın bir yolu da girintili beslemedir [17].

Girintili besleme gösterimi Şekil 6.6’da gösterildiği gibidir. Şekilden de görüldüğü gibi tasarım parametreleri girinti açıklığı G_{pf} , girinti yüksekliği y_0 transmisyon hattının yüksekliği L_f ve transmisyon hattının genişliği W_f ’dir.

Akım sinüzoidal dağılıma sahip olduğu için y_0 uzaklığı kadar hareket edildiğinde akım $\cos(\frac{2\pi y_0}{\lambda})$ şeklinde artış gösterir. Burada L uzaklığı $\lambda/2$ olduğu (Mikro şerit antenin boyu tercihen yarım dalga boyu seçilir.) için dalga boyu $\lambda=2L$ ’dir. Bu yüzden faz farkı (6.12)’ de ki gibi ifade edilir.

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot y_0}{2 \cdot L} = \pi \cdot \frac{y_0}{L} \quad (6.12)$$

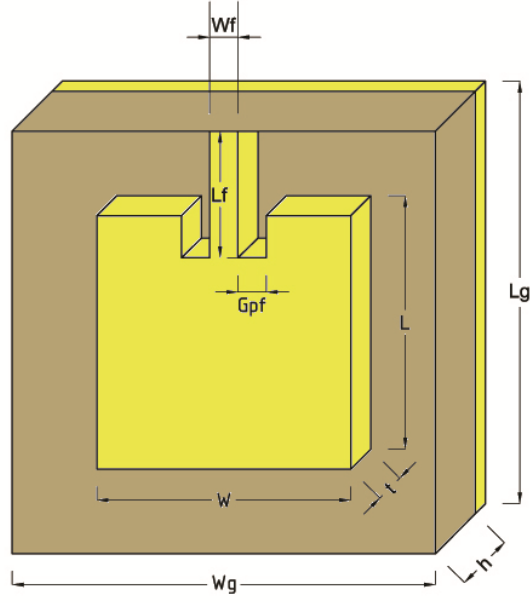
Aynı şekilde voltaj akımın düştüğü ölçüde artar. Böylece giriş empedansı (6.13)’ de verilen değer gibi olur.

$$Z_A(y_0) = \cos^2\left(\frac{\pi \cdot y_0}{L}\right) Z_A(0) \quad (6.13)$$

Burada $Z_A(0)$ eğer mikro şerit kenardan beslenirse oluşan empedanstır. Böylece mikro şerit girintili olarak beslenirse görüldüğü gibi giriş empedansı herhangi bir y_0 değerinde düşecek ve Z_0 ’a eşit olacaktır. Z_0 transmisyon hattının empedansıdır ve genellikle 50Ω ’dur. Örneğin $y_0 = L/4$ ise (6.13)’ e göre gerekli işlemler yapıldığında sonuçta (6.15)’ de ki eşitlik elde edilir. Böylece giriş empedansı yarıya düşmüş olur [13,17].

$$Z_A(y_0) = \cos^2\left(\frac{\pi}{4}\right) Z_A(0) \quad (6.14)$$

$$Z_A(y_0) = \frac{Z_A(0)}{2} \quad (6.15)$$



Şekil 6. 6 Mikroşerit anten için inset besleme

Girintili besleme empedans uyumu için kullanılır. Burada y_0 uzaklığı $Z_A(y_0) = Z_0$ eşitliği sağlanana kadar optimize edilir.

G_{pf} değeri ise $W/10 \dots W/40$ oranında değişim göstermektedir. G_{pf} değerinin değişimi ile tınlama frekansta aynı zamanda band genişliğinde de değişim görülmektedir. Bu değişim Çizelge 6.2' den anlaşılmaktadır. Çizelge 6.2' e bakıldığında G_{pf} değerindeki azalma ile band genişliğinde artışın, anten kazancında ise azalmanın olduğu görülmektedir [17].

Çizelge 6. 2 G_{pf} parametresinin mikroşerit anten tasarımında ki etkisi

Performance Properties	$W/10$	$W/15$	$W/20$	$W/25$	$W/30$	$W/35$	$W/40$
-10dB Bandwidth (GHz)	.65	.69	.83	.95	1.0	1.04	1.1
Antenna gain (dB)	7.167	7.028	6.921	6.842	6.781	6.734	6.695
S_{11} (dB)	-23.5	-24	-55	-34	-29	-26	-24.5

(6.16)' da G_{pf} 'nin optimize değerini elde etmek için kullanılacak formül verilmektedir.

$$G_{pf} = \frac{c \cdot 4.6 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{2 \cdot e_{r_{eff}} \cdot f}} \quad (6.16)$$

Burada c , ışık hızı (3×10^{11} mm/sn) ; f tınlaşım (Tınlaşım, Rezonans) frekansdır (GHz).

W_f değerine gelince (6.17) ve (6.18)' deki eşitliklerden bulunur [13].

$\frac{W_f}{d} < 1$ için W_f değeri (6.17) eşitliğinden elde edilir.

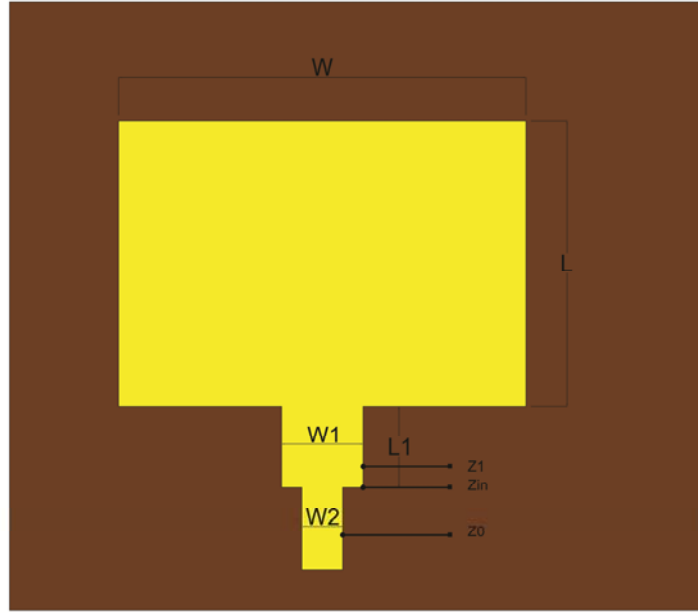
$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{e_{r_{eff}}}} \ln\left(\frac{8 \cdot d}{W} + \frac{W_f}{4 \cdot d}\right) \quad (6.17)$$

$\frac{W_f}{d} > 1$ için W_f değeri (6.18) eşitliğinden elde edilir.

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{e_{r_{eff}}} \left[\frac{W_f}{d} + 1.393 + 0.667 \left(\ln\left(\frac{W_f}{d} + 1.44\right) \right) \right]} \quad (6.18)$$

6.1.3.2 Çeyrek Dalga İletim Hattı Besleme Modeli

Mikro şerit antenin mikro şerit iletim hattı ile beslenmesinde ki bir diğer yolda çeyrek dalga dönüştürücü kullanarak beslemedir. Mikro şerit anten çeyrek dalga transmisyon hattı kullanılarak (Karakteristik empedansı Z_1) karakteristik empedansı Z_0 olan transmisyon hattına uydurulabilir. Şekil 6.7' de çeyrek dalga transmisyon hatlı beslemenin gösterimi verilmektedir.



Şekil 6. 7 Çeyrek dalga iletim hattı besleme modeli

Amaç giriş empedansı hat empedansı ile eşleştirmektir. Eğer antenin empedansı Z_A ise çeyrek dalga iletim hattının başında görülen empedans Z_{in} (6.19)' da verilen eşitlikler hesaplanır [13].

$$Z_{in} = \frac{Z_1^2}{Z_A} \quad (6.19)$$

$Z_{in} = Z_0$ eşitlenmek istendiğinden (6.20) eşitliği elde edilir.

$$Z_1 = \sqrt{Z_A Z_0} \quad (6.20)$$

Böylece giriş empedansı Z_{in} , Z_1 'in seçimi ile değiştirilebilir. Böylece $Z_{in} = Z_0$ sağlanabilir ve empedans uyumu sağlanır. Z_1 parametresi ise $\lambda/4$ transmisyon hattının genişliği W_1 değeri değiştirilerek hesaplanabilir.

$$Z_A = 90 \cdot \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \quad (6.21)$$

$$Z_1 = \sqrt{Z_A Z_0} \quad (6.22)$$

W_1 değeri ise (6.23)' de verilen eşitlikten sayısal olarak elde edilir.

$$Z_1 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{8 \cdot d}{W_1} + \frac{W_1}{4 \cdot d}\right) \quad (6.23)$$

W_2 değeri ise (6.23)' de verilen eşitlikten sayısal olarak elde edilir.

$$Z_0 = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{W_2}{d} + 1.393 + 0.667 \left(\ln\left(\frac{W_2}{d} + 1.44\right) \right) \right]} \quad (6.24)$$

L_1 ise (6.25)' de verilen hesaplama ile elde edilmektedir.

$$L_1 = \frac{\lambda}{4 \cdot \sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} \quad (6.25)$$

Böylece yarım dalga beslemeli mikroşerit anten tasarımında kullanılan parametreler elde edilmiştir.

6.1.4 Dielektrik Bileşen Seçimi

Tasarımda ilk adım uygun dielektrik malzemeyi, uygun kalınlık ve kayıp tanjantı değerine göre seçmektir. Daha kalın dielektrik seçimi mekanik olarak sağlamlığın yanında, ısıyan gücü artırır, iletken kaybını azaltır ve band genişliğini artırır. Ancak, genişliği (W), dielektrik kayıpları ve yüzey dalgalarını artırır. Dikdörtgen mikro şerit anten, eğer dielektrik kalınlığı 0.11λ 'yı geçerse rezonansı durdurur. Dielektriğin dielektrik sabiti ϵ_r kalınlığı ile aynı fonksiyona sahiptir. Düşük ϵ_r ' ye sahip dielektrik, saçak alanlarını arttıracığından ısıyan güç artmış olur. Böylece düşük boyutlu anten düşünülüyorsa $\epsilon_r < 2.5$ tavsiye edilmektedir. Kalınlığın (d) artması aynı değerlere sahip antende ϵ_r ' nin düşmesi anlamına gelmektedir. Büyük kayıp tanjant ($\tan\delta$) değeri dielektrik kaybının artacağı anlamına gelmektedir. Böylece antenin verimi düşmektedir. Çizelge 6.2' de dielektrik malzemelerin özelliklerini vermektedir [18].

Çizelge 6. 3 Dielektrik malzeme özellikleri

Parametreler	Bakelite	FR4 Glass Epoxy	RO4003	Taconic TLC	RT Duroid
Dielektrik Sabiti	4,78	4,36	3,4	3,2	2,2
Kayıp Tanjantı	0,03045	0,013	0,002	0,002	0,0004
Su Teması Bozulması	0,5-1,3%	< 0,25	0,06%	< 0,02	0,02%
Gerilme Gücü	60 MPa	MPa	141 MPa	-	450 MPa
Gerilim Direnci	3.10 ⁵ Mohm.cm	8.10 ⁷ Mohm.cm	17.10 ⁷ Mohm.cm	1.10 ⁷ Mohm.cm	2.10 ⁷ Mohm.cm
Yüzey Direnci	5.10 ¹⁰ Mohm	2.10 ⁵ Mohm	4,2.10 ⁹ Mohm	1.10 ⁷ Mohm	3.10 ⁷ Mohm
Maksimum Voltaj	20-28 kV	55 kV	-	-	> 60 KV
Kabuk Gücü	-	9 N/mm	1,05 N/mm	12 N/mm	5,5 N/mm
Yoğunluk	1810kg/m ³	1850 kg/m ³	1790 kg/m ³	-	2200 kg/m ³

Bu çalışma da Rogers firmasına ait RT/Duroid 5880 kullanılacaktır. Bu ürünün tercihi yukarda anlatıldığı gibi dielektrik sabiti ve düşük kayıp tanjantı'na sahip olması etkili olmuştur. Ayrıca maliyeti de diğerleri ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür.

6.1.5 Analiz Metodu

Mikro şerit anten için birçok analiz metodu vardır. En popüler model ise transmisyon hat, kovuklu ve tam dalga modelidir. Hepsinin içinde en kolay ve basit olanı transmisyon hat modelidir. Fiziksel olarak kavranması çok iyidir. Ancak kesinliği zayıftır ve modeli bağdaştırmak sistem açısından zordur. Transmisyon hat modeli diğerleri ile karşılaştırıldığında kovuklu modelin kesinliği yüksektir ancak çok komplekstir. Fiziksel olarak kavranması iyi olsa da modelin uyumu oldukça zordur. Tam dalga modeli ise iyi kavranılabilir, çok yönlüdür ve tek elemanlar sonlu ve sonsuz diziler için uygundur. Ancak çok komplekstir ve fiziksel olarak kavranması güçtür. Bu çalışma da kolay ve fiziksel olarak kavranması basit olan transmisyon hat modeli kullanılacaktır [13].

6.1.6 Anten Parametreleri

Anten parametreleri tasarlanacak olan antende dikkat edilecek değerlerin elde edilmesi için yorumlanacak ve hesaplanacak değerlerdir.

6.1.6.1 Anten Kazancı

e antenin etkinliği olmak üzere kazanç (6.26)' da ki gibi ifade edilir.

$$G = e \cdot D \quad (6.26)$$

Yani kazanç her zaman yönlendiricilikten (D) küçüktür. Çünkü verim 0 ile 1 arasında değişir. Yönlendiricilik, dielektrik yüksekliği d ve mikro şeritin genişliği W değeri arttıkça yönlendiricilik artmaktadır. Ancak bunun zıttı olarak band genişliği de düşmektedir [12,14].

6.1.6.2 Verim ve Kalite Faktörü

Mikro şerit anten için verimlilik, ışıyan gücün antenin girişinde alınan güce bölümü olarak tanımlanabilir. Antenin verimliliğini etkileyen ve onu düşük ya da yüksek değerde yapan faktörler; dielektrik kaybı, iletken kaybı, yansıyan güç, polarizasyon kaybı ve antendeki herhangi bir yerde gerçekleşen güç kaybıdır. Verimliliğin genel ifadesi (6.27)' de ki gibidir [16].

$$e = \frac{P_{rad}}{P_{rec}} \quad (6.27)$$

P_{rad} , Anten tarafından ışıyan güç.

P_{rec} , Antene gelen güç.

Verim kalite faktörünün bir terimi olarak da yazılabilmektedir.

$$e = \frac{Q_t}{Q_{rad}} \quad (6.28)$$

Q_t , toplam kalite faktörü.

Q_{rad} , ışıma kayıplarından dolayı oluşan kalite faktörü.

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (6.29)$$

Q_c , iletken kaybından kaynaklı kalite faktörü

Q_d , dielektrikten kaynaklı kalite faktörü

Q_{sw} , Yüzey dalgalarından kaynaklı kalite faktörü

Çoğu mikro şerit anten %80-90 arası verime sahiptir. Kalite faktörünü hesaplamada aşağıda bir yaklaşım verilmiştir.

$$Q_c = d\sqrt{\pi} \cdot f \cdot \mu \quad (6.30)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (6.31)$$

$$Q_{rad} = \frac{2 \cdot w \cdot \epsilon_r}{\frac{h \cdot G_t}{l}} \quad (6.32)$$

$\tan \delta$, kayıp tanjantı

σ , iletken katmanın iletkenliği

G_t / l , birim uzunluk başına iletkenlik

Dolayısıyla dielektrik katmanın seçiminde kayıp tanjantı düşük malzemeler tercih edilmektedir.

6.1.6.3 Yönlendiricilik Kazancı

Yönlendiricilik kazancı belli bir yöne gönderilen gücün her yöne gönderilen güce oranıdır. Yönlendiricilik kazancı tamamen antenin ışıma diyagramı ile alakalıdır. Belli bir açıya ışıyan güç $U(\theta, \varphi)$ olmak üzere belirli bir açıya yapılan güç, $D(\theta, \varphi)$ (6.33) eşitliğinden elde edilir [12].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_{ORT}(\theta, \varphi)} \quad (6.33)$$

$U_{ort}(\theta, \varphi)$ birim alan yapılan ortalama ışıma gücüdür.

6.1.6.4 Geri Dönüş Kaybı

Geri dönüş kaybı anteni test etmede önemli bir parametredir. Bu parametre empedans uyumu ve maksimum iletilen güçle alakalıdır. Ayrıca geri dönüş kaybı verimlilikle ve

kaynaktan antene gönderilen güçle alakalıdır. R_L iletilen gücün (P_{in}) yansıyan güce (P_{ref}) oranıdır.

$$R_L = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_{IN}}{P_{REF}} \quad (6.34)$$

İyi bir güç transferi için bu oran yüksek olmalıdır. Ayrıca R_L ' yi (6.35) eşitliğinde verildiği gibi VSWR (voltage standing wave Ratio, voltaj duran dalga oranı) değeri cinsinden de yazılabilir.

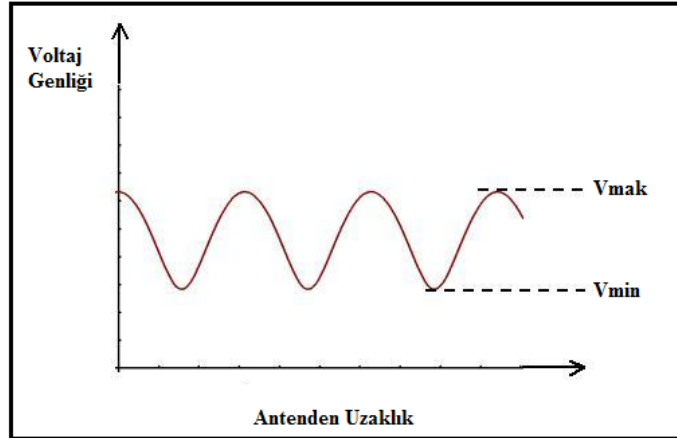
$$R_L = 20 \cdot \log_{10} \frac{VSWR + 1}{VSWR - 1} \quad (6.35)$$

6.1.6.5 Voltaj Duran Dalga Oranı

Anten tasarımında empedans uyumu çok önemli bir parametredir. Çünkü empedans uyumu antene verilen gücün ne kadarının ışıdığıнын göstergesidir. İyi bir güç iletimi için antenin ışıma empedansının ve anteni besleyen iletim hattının empedansının uyumlu olması gerekmektedir. VSWR (Voltage Standing Wave Ratio, Voltaj Duran Dalga Oranı) nicelik olarak empedans uyumunun bir göstergesidir. P_0 antene gelen güç olmak üzere ışıyan güç $P_{i\gamma}$ (6.36)' da ki gibi ifade edilir.

$$P_{i\gamma} = P_0 (1 - \Gamma^2) \quad (6.36)$$

Burada Γ yansıma katsayısıdır. S_{11} ve ya geri dönüş kaybı olarak da bilinir. Bir anten için VSWR değeri her zaman pozitif değere sahiptir. Küçük VSWR değeri iyi eşleşmiş anten anlamına gelmektedir. Eğer iletim hattı antenle iyi bir eşleşmeye sahip değilse iletilen güç yansır ve buda Şekil 6.8' de görüldüğü gibi iletim hattı boyunca duran dalgaya sebep olur. Sonuçta voltaj ilerleyişi boyunca tepe ve vadi görünümlü bir şekil ortaya koyar. Eğer VSWR değeri 1 ise kaynaktan çıkan voltaj maksimum genlikte ve düz bir görünümde antene ulaşmıştır [12].



Şekil 6. 8 Duran dalga voltaj değerinin iletim hattı boyunca ilerleyişi

6.1.6.6 S_{11} Parametresi

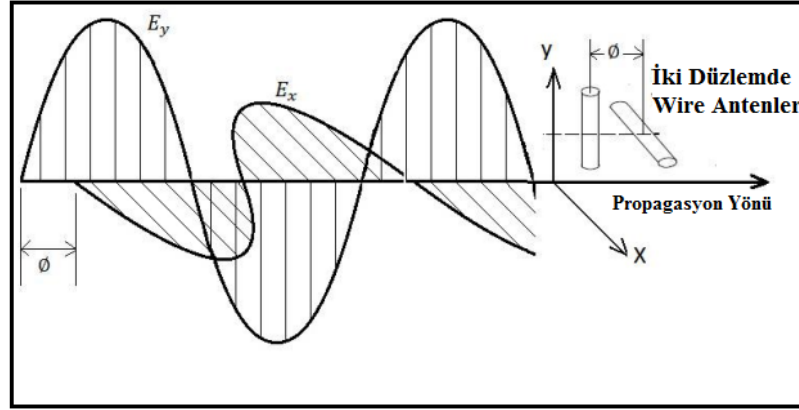
Bir radyo haberleşme sisteminde akım ve voltaj iletimi portlar aracılığıyla olmaktadır. Örneğin anten beslemesi için bir tane port kullanılmaktadır. S_{11} değeri ise bu porttan antene güç iletiminde ki verimi göstermektedir. Bu değer doğrudan antene iletilen ve yansıyan güç oranı hakkında bilgi verir. Dolayısıyla yansıma katsayısı olarak da bilinir. Eğer S_{11} değeri 0 dB ise antene gelen tüm güç yansıyor. Yani S_{11} değeri anten tarafından kabul edilen gücü ifade eder. Ancak bu ışıyan güç anlamına gelmemektedir. Çünkü ışıyan güç antenin verimi ile alakalı olup anten tasarımında kullanılan malzemelerin özellikleriyle alakalıdır. Dolayısıyla hem S_{11} değeri hem de VSWR değeri tek başına bir anten tasarımında yeterli değildir.

S_{11} değerinin anten tasarımında yaklaşık -20 dB olması beklenmektedir. Ayrıca S_{11} değeri band genişliği içinde önemli bir parametredir. Çünkü band genişliği merkez frekansın çalışma bölgesinde ki S_{11} değerinden elde edilmektedir. S_{11} değeri merkez frekansında vadi çizer. Bu vadinin düşüşteki aralıklarında -10 dB değerleri saptanır ve bu değerlere sahip frekanslar tespit edilir. Bu iki frekans arasında ki değer band genişliğini vermektedir [12]

6.1.6.7 Polarizasyon

Antenin polarizasyonu antenden ışıyan dalganın polarizasyonudur. Alıcı anten verici antenle aynı polarizasyona sahip olmalıdır aksi halde rasonant durumundan çıkar. Polarizasyon elektromanyetik dalganın bir özelliğidir. Polarizasyon elektrik alanının genliğini ve yönünü zamanın fonksiyonu olarak tanımlar. Diğer bir deyişle polarizasyon elektrik alanının yere göre konumudur. Basit bir tel anten, bir polarizasyona sahiptir ve

bunlar dikey ve ya düşey polarizasyon olarak bilinir. Şekil 6.9’ da bu durum gösterilmektedir. Polarizasyon lineer, dairesel ve eliptik olarak sınıflandırılabilir. Lineer polarizasyonda anten tek bir düzlemde ışıma yapar. Eğer bu düzlem yere dikeyse düşey polarizasyon yataysa yatay polarizasyon olarak bilinir. Dairesel polarizasyonlu anten ise her düzlemde ışıma yapar. Işıma düzlemi dairesel bir dönüş yapar ve dalganın bir periyodunda tam bir dönüş yapar.



Şekil 6. 9 Elektromanyetik dalganın polarizasyonu

6.1.6.8 Yarım Güç Huzme Genişliği

Yarım güç huzme genişliği (HPMW, Half Power Beam Width) ışıma paterninde gücün yarıya düştüğü açılar arasında ki farktır. Desibel olarak -3 dB güç değerine sahip ışıma bölgesidir. HPBW antenin ana huzmesinin genişliğini gösterir. Yani önemli ölçüde gücün iletildiği huzmedir. Anten tasarımında önemli bir parametredir.

6.2 Kontrol Sistemi

Kontrol sisteminin görevi İHA’nın hareket ve manevraları sonucunda koordinat ve açısal ivme değişimlerini elde etmek ve bu değişimler sonucu gerekli olan yatay açığı kullanarak DC motor ile antenin sürekli olarak YVT’ yi takibini sağlamaktır. Yatay açı İHA anteninin YVT’den haberleşmenin kesilmemesi için yönlendirilmesi gereken açıdır. Kontrol sistemi, IMU (Inertial Measurement Unit, Atalet Ölçme Birimi) ve GPS (Global Position System, Küresel Konum Sistemi) modülünden elde ettiği veriyi işleyerek yatay açı hareketini tespit eder [19]. Kontrol sistemi DC motor ve Yönlendirme Sistemi’nden oluşur. Yönlendirme sistemi tarafından YVT takibi ve odaklanması için gerekli olan yatay açı değeri elde edilir. Bu açı değeri daha sonra DC motor sürücülerine iletilir ve böylece DC motor da ilgili açı değeri kadar anteni

yönlendirir. Bunun sonucunda İHA' nın yatay düzlemde yapmış olduğu hareketler neticesinde YVT' nin haberleşme aralığında kalması sağlanır.

6.2.1 DC Motor

Doğru akım motorları (Direct Current Motor, Doğru Akım Motoru) doğru akımı dairesel mekanik enerjiye çevirirler. İki temel parça içerir. Bunlar elektromanyetik veya kalıcı manyetik parça statik alan olarak adlandırılan kısım, statör ve dönen armatür, rotör olarak adlandırılır [20]. Çizelge 6.3' de sıkça kullanılacak olan DC Motor terimleri verilmektedir.

Çizelge 6. 4 DC Motor Terimleri

Terim	Açıklama
Tork	Motordan yüke iletilen dönme momenti.
Devir	Motorun tam bir turu
RPM	Motorun bir dakikadaki devir sayısı
Kolektör	Motorun hareketli kısmına akımın aktarıldığı kısım
İndüktör	N-S kutuplarının oluşturulması için yapılmış olan sargıların yerleştiği bölüm
Açısal Hız	Bir saniyedeki attığı devirin radyan cinsinden değeri
Armatüre	Motorun hareketli kısmıdır. Rotor olarakta bilinir.
Statör	Motorun sabit kısmıdır.

DC Motorlar Fırçalı, Fırçasız ve Step Motorlar olmak üzere üç çeşittir.

- Fırçalı DC Motor, motorun hareketli olan parçalarında ki manyetik alan elektrik akımı ile oluşturulur. Fırça ve kolektör adı verilen özel bir düzenele motorun bu hareketli kısmına akım aktarılır.
- Fırçasız DC Motor, üzerinde ki dönen kısımların sabit mıknatıstan hareketsiz kısımların ise mini bôbinli sargılardan oluştuğu DC motorlardır. Kolektör ve fırça düzeneği bulunmaz.
- Adım (Step) DC Motor, sargılarına uygulanan elektrik darbeleri kadar istenen miktarda dönme yapan DC motorlardır. Güç ve momentleri sınırlıdır.

6.2.1.1 DC Motorun Çalışma Prensibi

DC motorda sabit manyetik parçanın ürettiği bir manyetik ortam vardır. Rotor bu manyetik alan altında tork üretir [21].

Motor torkunu kontrol edebilmek için iki yöntem vardır. Bunlar Alan Kontrol ve Armatür Kontrol' dür.

a. Alan Kontrolü

Alan kontrolde armatür akımı yaklaşık olarak sabittir. Alan akımı ise kontrol sinyali ile değişir. Böylece küçük bir akım yeterli olabilecektir. Bunun anlamı sabit mıknatıs yerine doğrudan elektronik kuvvetlendirici ile oluşturulur. Bu kontrol yöntemi ile çalışan servo motorlarda ayrı alanlar mevcuttur. Dolayısıyla push-pull kuvvetlendirici kullanılarak kontrol sağlanır.

Bu sistemlerin çoğu voltaj gerektiren hız geri beslemesi ile sönümlenir. Bu motorun ortak parçası olan Tachogenerator aracılığıyla elde edilir.

Alan kontrollü DC motorlar düşük güç gerektiren sistemlerde kullanılır. Kontrol gücü düşük olma avantajına sahiptir ancak düşük yanıt sinyaline sahiptir.

b. Armatür Kontrol

Armatür kontrolde alan akımı yaklaşık olarak eşittir ve armatüre akımı kontrol sinyali ile değişir. Bu tip kontrole sahip motorların kullanımda ki en yaygın şekli disk armatür kontrollü motorlardır. Bu sabit bir kalıcı manyetik alan ve disk armatüre içerir. Bu sistem ise armatür akım ile beslenir ve motor kontrolü sağlanır. Hafif bir sistemdir ve güçlü dönme kanatlarına sahiptir.

6.2.1.2 DC Motorun Modellenmesi

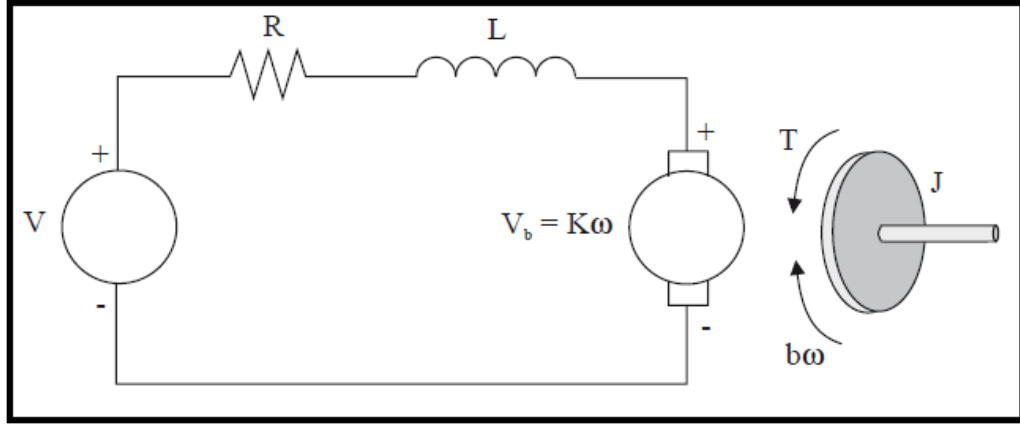
Bir DC Motor'un matematiksel modeli elektriksel ve mekanik iki eşitlikle ifade edilir. Burada birinci eşitlik armatür' ün elektriksel devresine Kirchhoff Yasası uygulanarak elde edilir. Diğer eşitlik ise rotorun mekanik hareketinin Newton Yasası' yla ifadesinde elde edilir [21,22].

DC Motorun Matematiksel Modeli

DC motorun matematiksel modeli Kirchhoff ve Newton Yasasından elde edilir. Şekil 6.10' da DC motorun armatürünün elektriksel devresi ve rotorun “Serbest Cisim” (Serbest Cisim, Free Body) diyagramı görülmektedir. Çizelge (6.5)' da ise DC motorun parametreleri tanımlanmıştır[23].

Çizelge 6. 5 DC Motorun matematiksel parametreleri

Parametre	Açıklama	Seçilen Değer / Birimi
R	Armatürün empedansı	1 Ohm
L	Armatür endüktansı	0,5 Henry (H)
i(t)	Armatüre akımı	Amper (A)
V	Uygulanan voltaj	Volt (V)
V_b	Ters elektromotor kuvveti	Volt (V)
K_v	Hız sabiti	V/rad/s
K_T	Tork sabiti	Newtonmetre/Amper(Nm/A)
T_M	Motor torku	Newtonmetre (Nm)
J_L	Yükün atalet momenti	Kilogram.metrekaire(Kgm ²)
J_m	Rotorun atalet momenti	Kilogram.metrekaire(Kgm ²)
b	Mekanik sistemin sürtünmesi	Kilogram.metrekaire(Kgm ²)
ω	Açısal Hız	Radyan/saniye (Rad/s)
η	Hız	rpm



Şekil 6. 10 DC Motorun elektriksel ve fiziksel model gösterimi

Aşağıda yapılan işlemlerle DC motorun matematiksel modeli elde edilmektedir.

$$T_M = K_T i(t) \quad (6.37)$$

$$V_b = K_V \omega = K_V \frac{d\theta}{dt} \quad (6.38)$$

Kirchoff Yasası' na göre elde edilen eşitlik (6.39)' da verilmektedir.

$$V = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + V_b \quad (6.39)$$

$$V = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + K_V \frac{d\theta}{dt} \quad (6.40)$$

Newton Yasası' na göre elde edilen eşitlik (6.41)' de verilmektedir.

$$T_M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + b \cdot \omega \quad (6.41)$$

$$K_T i(t) = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + b \cdot \omega \quad (6.42)$$

$$K_T i(t) = J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (6.43)$$

(6.40) ve (6.43)' de ki eşitliklere Laplace dönüşümü uygulanırsa (6.44) ve (6.45) eşitlikleri elde edilir

$$V(s) = R \cdot I(s) + L \cdot I(s) \cdot s + K \cdot s \cdot \theta(s) \quad (6.44)$$

$$K \cdot I(s) = J \cdot s^2 \cdot \theta(s) + b \cdot s \cdot \theta(s) \quad (6.45)$$

Burada tork sabiti K_T (Nm/A) ve ters emk sabiti K_V (V/rad/s) birbirine eşit alınmıştır.

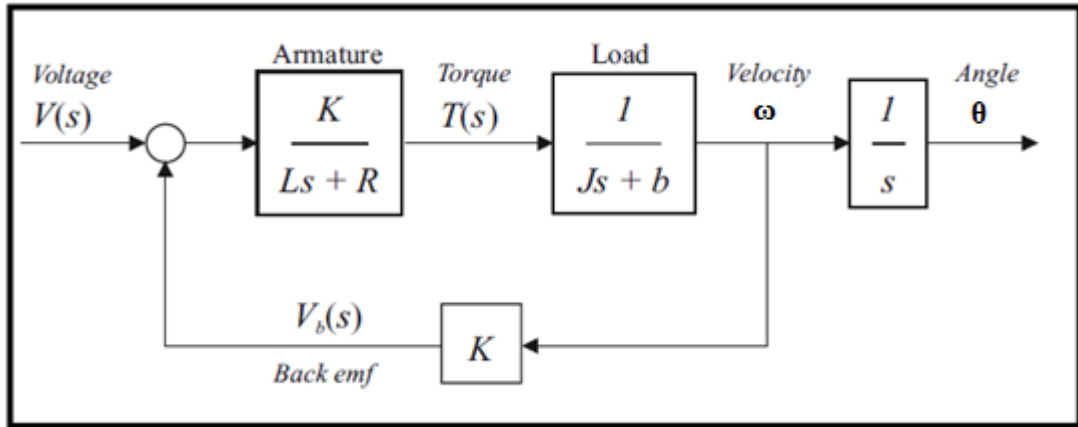
Daha sonra yapılan işlemlerle Transfer fonksiyonu eşitlik (6.46)' da ki gibi elde edilir [22].

$$G_p(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s \cdot [(R + L \cdot s)(J \cdot s + b) + K^2]} \quad (6.46)$$

Açısal konumun giriş voltajına göre Transfer fonksiyonu (6.46)' da verilmiştir.

$$G_v(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{[(R + L \cdot s)(J \cdot s + b) + K^2]} \quad (6.47)$$

Şekil 6.11' de açısal konumun giriş voltajına göre elde edilen Transfer fonksiyonu' nun blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 6. 11 DC Motorun transfer fonksiyonunun blok diyagramı

DC Motorun Matlab Modeli

Eşitlik (6.46) ve (6.47)' de ki transfer fonksiyonları Matlab' da pay ve paydası tanımlı polinom olarak ifade edilebilir [23]. Polinom katsayısı s, polinom ifadesi yazılırken Matlab' da azalan bir ifade ile yazılır. Örneğin;

$A = 3.s^3 + 2.s + 10$ ise $A = [3 \ 0 \ 2 \ 10]$ şeklinde yazılır.

Öncelikle sabit parametrelerin değerini girmelidir. Bunun için Matlab' da bir .m dosyası açıyoruz ve bu değerleri giriyoruz. Bu değerler proje kapsamında kullanılacak olan DC motorun kataloğundan ve yapılan hesaplamalardan elde edilmiştir.

$$J = 0.001 \text{ (Kgm}^2\text{)}$$

$$b = 0.002 \text{ (Kgm}^2\text{)}$$

$$K = 0.008 \text{ (Nm/A)}$$

$$R = 0.3 \text{ (Ohm)}$$

$$L = 0.00003 \text{ (Henry)}$$

Transfer fonksiyonları G_p veya G_A aşağıda ki üç yöntemle elde edilir.

$$\text{i. } G_p(s) = G_v(s) \cdot \frac{1}{s}$$

Bu iki fonksiyon ayrık ve tümleşik olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\text{aux} = \text{tf}(K, \text{conv}([L, R], [J, b]))$$

$$G_v = \text{feedback}(\text{aux}, K)$$

$$G_p = \text{tf}(1, [1, 0] * G_v)$$

Burada “feedback” fonksiyonu kullanılarak K ve “aux” fonksiyonu arasında bağlantı kurulmaya çalışılmıştır.

ii. Konvolüsyon kullanımı yerine aux aşağıda ki gibi elde edilir.

$$\text{aux} = \text{tf}(K, ([L, R])) * \text{tf}(1, [J, b])$$

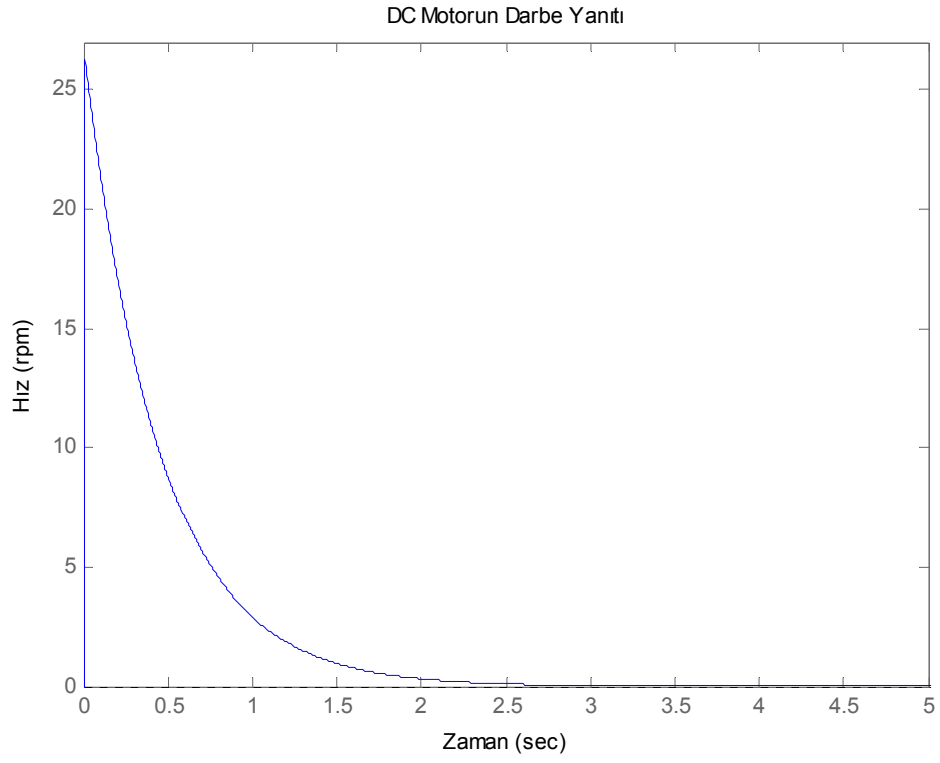
iii. Diğer bir ifade de transfer fonksiyonu sembolik olarak göstermektir. İlk olarak Laplace operatörü s tanımlanır ve daha sonra transfer fonksiyonu matematiksel olarak girilir.

$$s = \text{tf}([1, 0], 1)$$

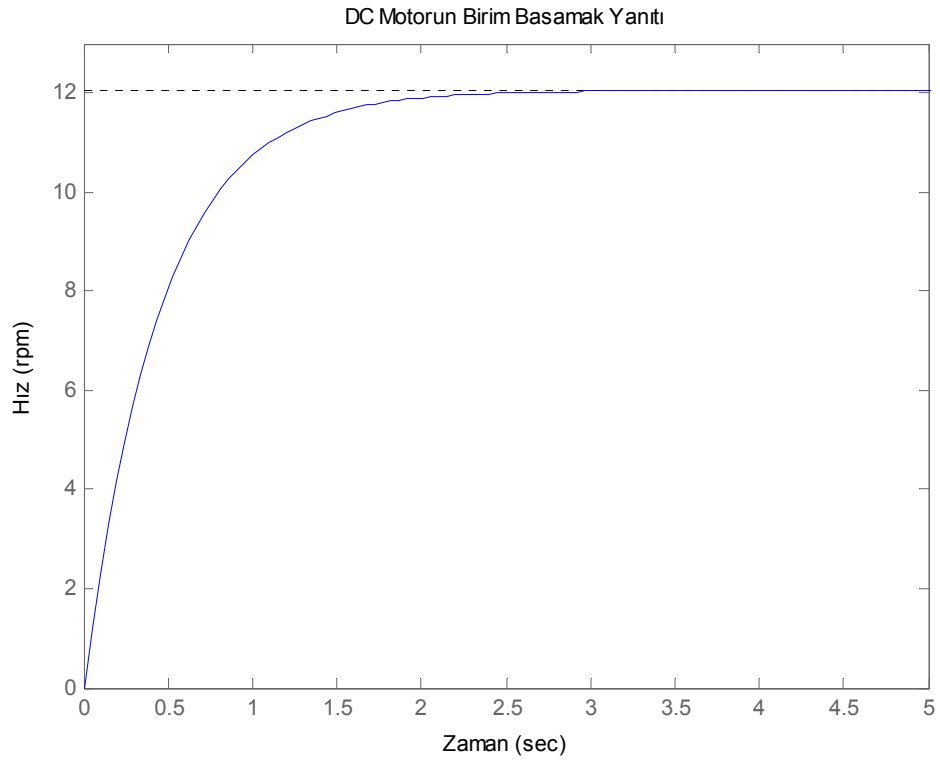
$$G_v = K / [(L*s+R)*(J*s + b) + K^2]$$

$$G_p = G_v / s$$

DC motor parametreleri girildikten ve transfer fonksiyonu seçimi yapıldıktan sonra simülasyonlar yapılabilecektir. Simülasyon kodları EK-A’ da verilmiştir. Öncelikle DC motorun hız ve açı değişiminin basamak (Basamak, Step) ve darbe (Darbe, Impuls) yanıtı incelenir. Şekil 6.12’ de darbe Şekil 6.13’ de ise basamak yanıtının hız olarak çıkışı görülmektedir.

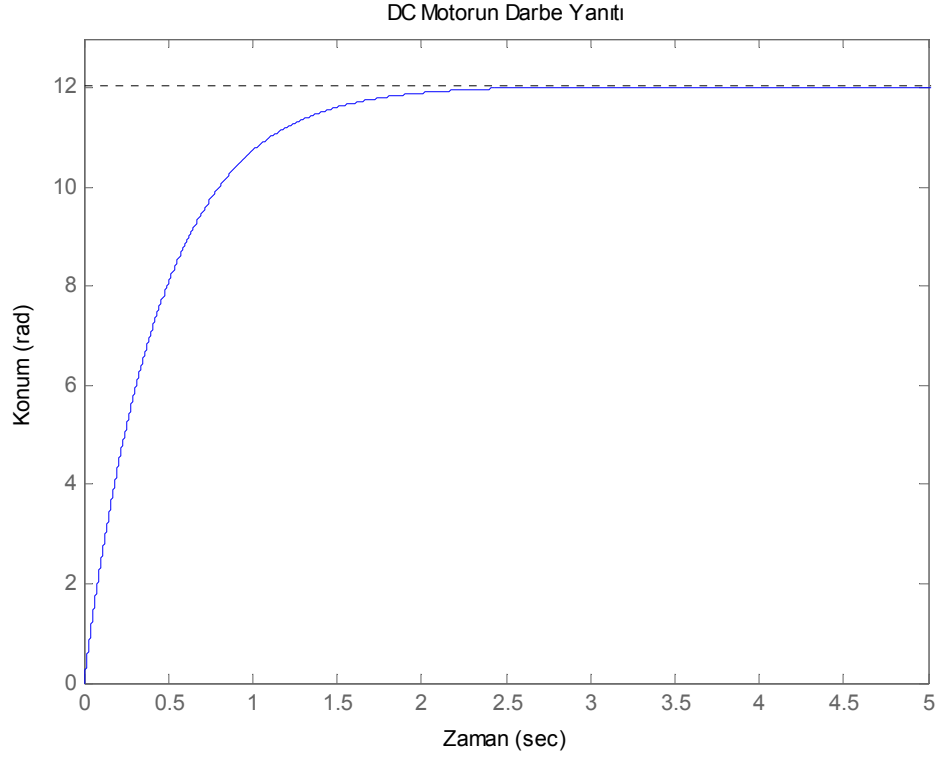


Şekil 6. 12 DC Motorun darbe girişe verdiği cevap (hız)

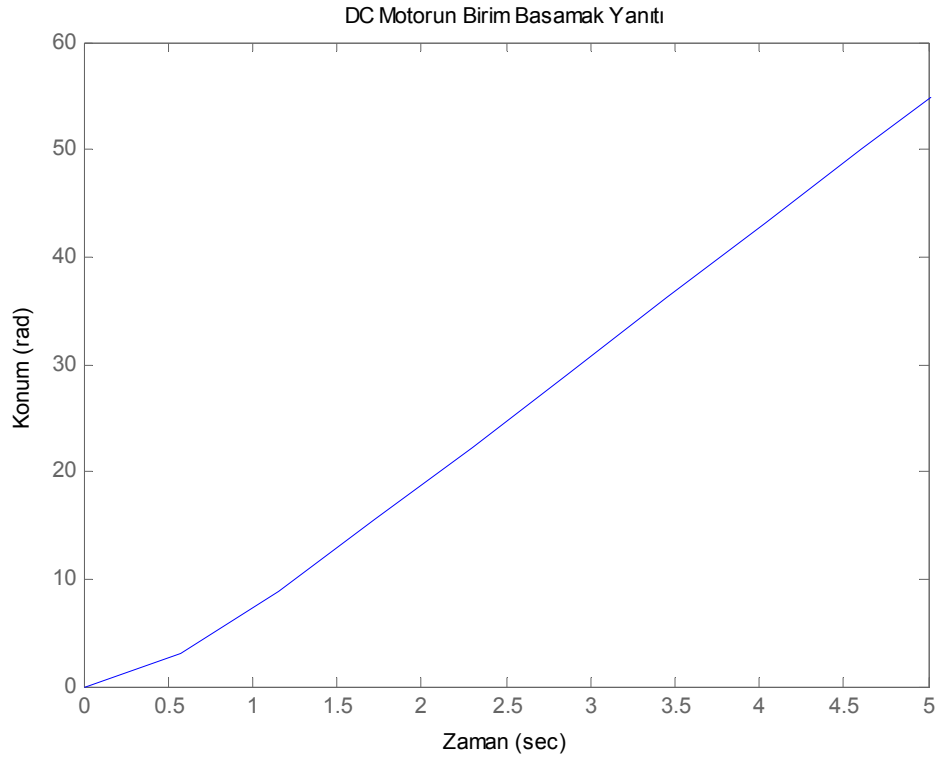


Şekil 6. 13 DC Motorun basamak girişe verdiği cevap (hız)

Şekil 6.14’ de darbe Şekil 6.15’ de ise basamak yanıtının açısal değişimi gösterilmektedir. Buna göre DC motor hareketi yukardaki şekillerde görüldüğü gibi 3 saniye gibi bir sürede stabil olmaktadır.



Şekil 6. 14 DC Motorun darbe girişe verdiği cevap (konum)



Şekil 6. 15 DC Motorun basamak girişe verdiği cevap (konum)

6.2.1.3 DC Motor Seçimi

DC motor seçiminde dikkat edilecek üç önemli parametre tork, hız ve güçtür. DC motorun kullanımına bağlı olarak bu üç parametre değerlendirilir. Örneğin yük fazla ise ve hız önemli değilse yüksek torklu motorlar seçilir. Aksi durumda ise düşük torklu yüksek hızlı motor seçilir [21].

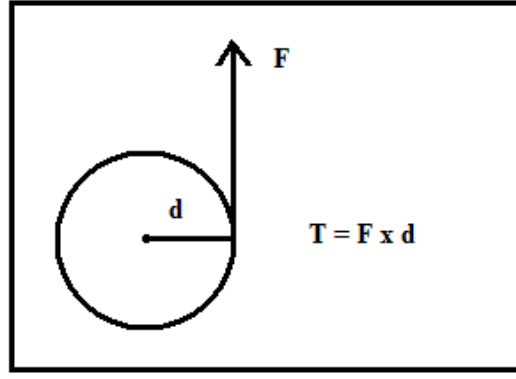
a. Tork Hesabı

Tork, motordan hareket parçasına iletilen itme momentidir. Şekil 6.16' da görüleceği gibi tork kuvvet ile kuvvet kolunun çarpımıdır.

Burada eylemsizlik momenti motorun (J_M) ve yükün (J_L) eylemsizlik momenti ile toplamıdır.

$$J_T = J_M + J_L \quad (6.48)$$

$$T = J_T \times \alpha \quad (6.49)$$



Şekil 6. 16 Tork değerinin gösterimi

b. Hız Hesabı

DC motorda hız iki şekilde ifade edilir. Birincisi açısal hızdır. Birimi rad/saniye'dir. İkincisi ise bir dakikadaki devir sayısıdır. Birimi rpm'dir. Literatürde, DC motorda hız olarak rpm kullanılır [20]. Açısal hızdan rpm elde edilmesi (6.50)' deki eşitlikte gösterilmektedir.

$$\eta(\text{dev} / \text{dak}) = \frac{30}{\pi} \times \omega = 30 \times \frac{\omega}{\pi} (\text{rad} / \text{sn}) \quad (6.50)$$

c. Güç Hesabı

DC motorun gücü motora uygulanan voltaj ile akımın çarpımıdır. Aynı zamanda tork ile açısal hızın çarpımıdır. Güç DC motorun kullanımında önemli bir parametredir. Çünkü doğrudan güç tüketimi ile alakalıdır ve bu da çoğu sistemler için sınırlayıcı bir etkindir [20]. DC motorun güç eşitliği (6.51)' de verilmektedir.

$$P = J_T \times \alpha \times \omega \quad (6.51)$$

6.2.1.4 Proje İçin Gereken DC Motorun Belirlenmesi

Projede kullanılacak DC motor için en kötü senaryo olarak 180°' yi 0,5 saniyede alması istensin. Bu durumda açısal hız eşitlik (6.52)' de verilmektedir.

$$\omega = 2 \cdot \pi \quad (6.52)$$

$$\eta = \frac{30}{\pi} \times \omega = 30 \times \frac{2 \cdot \pi}{\pi} = 60(\text{rpm}) \quad (6.53)$$

SOLID Simülasyon programında yapılan hesaplama sonucu $J_L = 0,001 \text{ kgm}^2$

J_L 'nin yanında J_T ihmal edilir. Çünkü J_T oldukça küçük bir değerdir ve DC motorun katalogundan elde edilir. α açısal ivme, açısal hız ve t açısal ivmelenme süresi (6.54)' de verilen eşitlikteki gibi elde edilir.

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad (6.54)$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{0.01} = 200 \cdot \pi (\text{rad} / \text{sn}^2) \quad (6.55)$$

Motor torku ise (6.55)' de verilen değer göz önünde bulundurulduğunda (6.56)' daki eşitlik ile elde edilir.

$$T = J_L \cdot \alpha = 0.001 \cdot 200 \cdot \pi = 0.2 \cdot \pi = 0.63 (\text{Nm}) \quad (6.56)$$

Eşitlik (6.56)' da elde edilen tork değerinden sonra (6.57) eşitliğinde dc motorun gücü hesaplanmıştır.

$$P = T \cdot \omega = 0.63 \cdot 2 \cdot \pi = 4 (\text{Watt}) \quad (6.57)$$

Elde edilen bu değerler kapsamında dc motor seçimi yapılmıştır. Projede Maxon 118749 ürün kodlu dc motor kullanılmıştır. Kullanılan dc motor Şekil 6.17' de verilmektedir.



Şekil 6. 17 Proje kapsamında kullanılan DC motor

Projede kullanılacak dc motor parametreleri Çizelge 6.5' da verilmiştir. Ayrıca katalog Ek-B' da verilmektedir. Sonraki bölümde yapılan simülasyonlarda da bu değerler dikkate alınacaktır.

Çizelge 6. 6 Projede kullanılacak dc motorun parametreleri

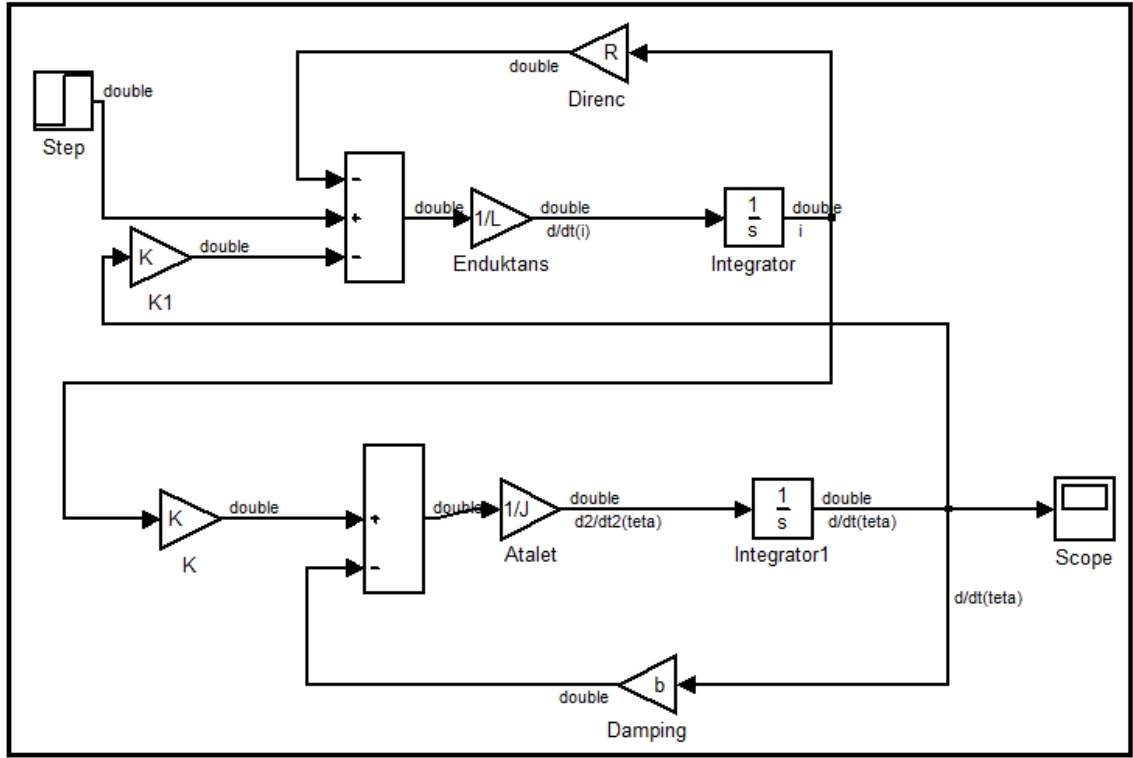
Parametre	Değer	Seçilen Değer / Birimi
R	0.03	Ohm
L	0.00003	Henry (H)
P	20	Watt
V	9	Volt (V)
K_v	0.008	V/rad/s
K_T	0.008	Newtonmetre/Amper(Nm/A)
T	11.8	Newtonmetre (Nm)
J_m	11.3×10^{-7}	Kilogram.metre(kare(Kgm ²))
b	0.002	Kilogram.metre(kare(Kgm ²))
V_t	10000	rpm
δ_m	0.005	Saniye (s)

6.2.1.5 DC Motorun Simulink Modeli

Öncelikle Simulink model tasarımında kullanılan dc motorun parametreleri için Matlab da bir .m dosyası açıyoruz ve parametre değerlerini kaydediyoruz.

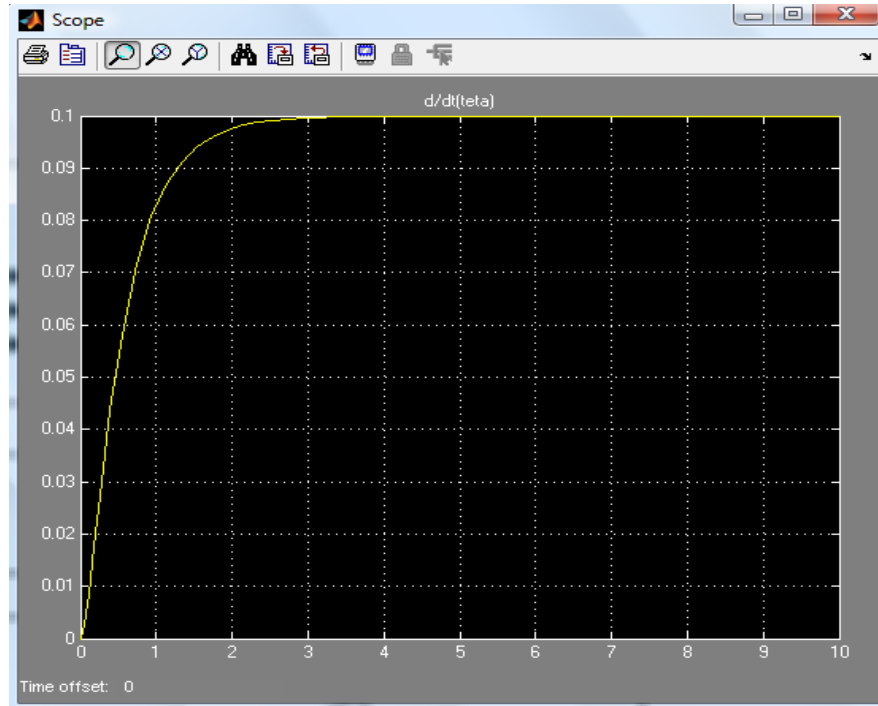
```
%DC_Motor_Parameter.m
%Parametreler
J=0.001;
b=0.002;
Kv=0.008;
R=0.3;
L=0.00003;
```

Daha sonra Simulink ortamında yeni bir proje dosyası açıp DC motorun tasarımı yapılır. Burada DC motorun bileşenleri Simulink kütüphanesinden seçilir ve parametre değerleri girilir. Şekil 6.18’ de DC motorun Simulink ortamındaki tasarımı görülmektedir.



Şekil 6. 18 DC Motorun Simulink modeli

Şekil 6.19’ de DC motorun çıkışı verilmiştir. Girişte birim basamak voltaja karşılık çıkış stabil hız değerine 3 sn de ulaşmaktadır. Burada alınan yanıt, DC motora herhangi bir kontrol elemanı eklenmeden DC motorun çıkışı hız değeridir.



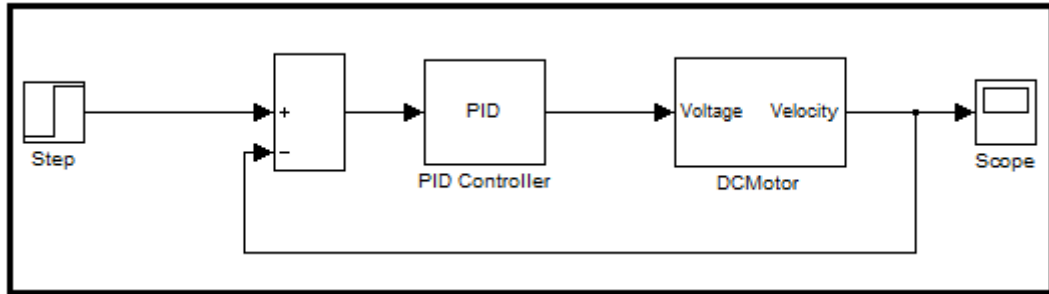
Şekil 6. 19 DC Motorun Simulink modelin step girişe karşılık hız çıkışı

Uygulanacak kontrol yöntemi için PID (Proportional Integral Derivative, Oransal, İntegral, Türev) kontrol uygulanacaktır. PID kontrolde oransal, integral ve türev denetim kazançlarının bileşiminden meydana gelmiştir. Dolayısıyla denetlenecek olan sistemin yapısı göz önüne alınarak PID denetleyicisinde ki P,I ve D denetleyicilerinin özelliklerine göre seçim yapılmalıdır. PID denetleyicisine girilecek olan P,I ve D parametrelerinin değerleri kontrol edilerek optimize edilir [24].

PI, Orantı etkiye integral etkisinin ilave edilmesi ile elde edilir. Sürekli hal hatasını ortadan kaldırır. Ayrıca sistemde ortaya çıkan gürültü işaretlerini ortadan kaldırır. Dezavantajı kararlı duruma geçiş süresinin biraz uzun sürmesidir.

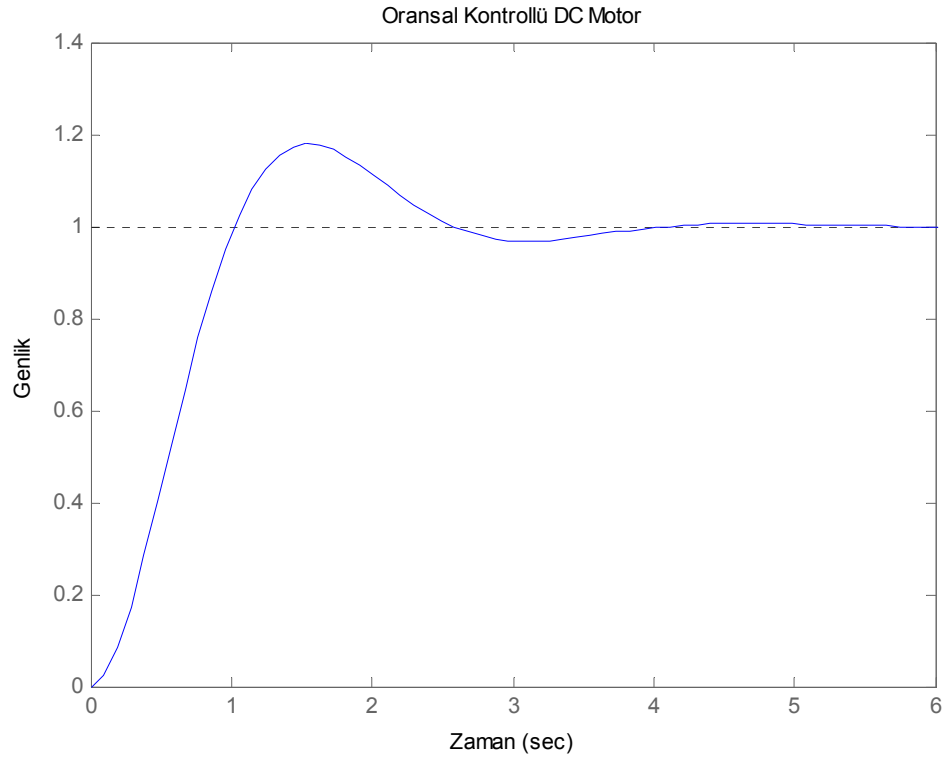
PD, orantı etkiye türev etkisinin ilave edilmesi ile elde edilir. PD denetleyici sürekli hal hatasını ortadan kaldırmamasına rağmen kararlı duruma geçiş süresi PI denetleyiciye göre çok daha kısadır. Dezavantajı gürültü işaretlerini de kuvvetlendirmesidir

PID, PI ve PD denetleyicilerinin iyi taraflarını toplayan ve kötü taraflarını ortadan kaldıran denetleyici türüdür. PD denetleyiciye göre sürekli hal hatasını ortadan kaldırırken, PI denetleyiciye göre de daha hızlı kararlı duruma ulaşabilmektedir. Özellikle uzun zaman gecikmesine sahip sistemlerin denetlenmesinde kullanılmaktadır. Tasarlanan PID kontrollü Simulink modeli Şekil 6.20’ de verilmiştir.



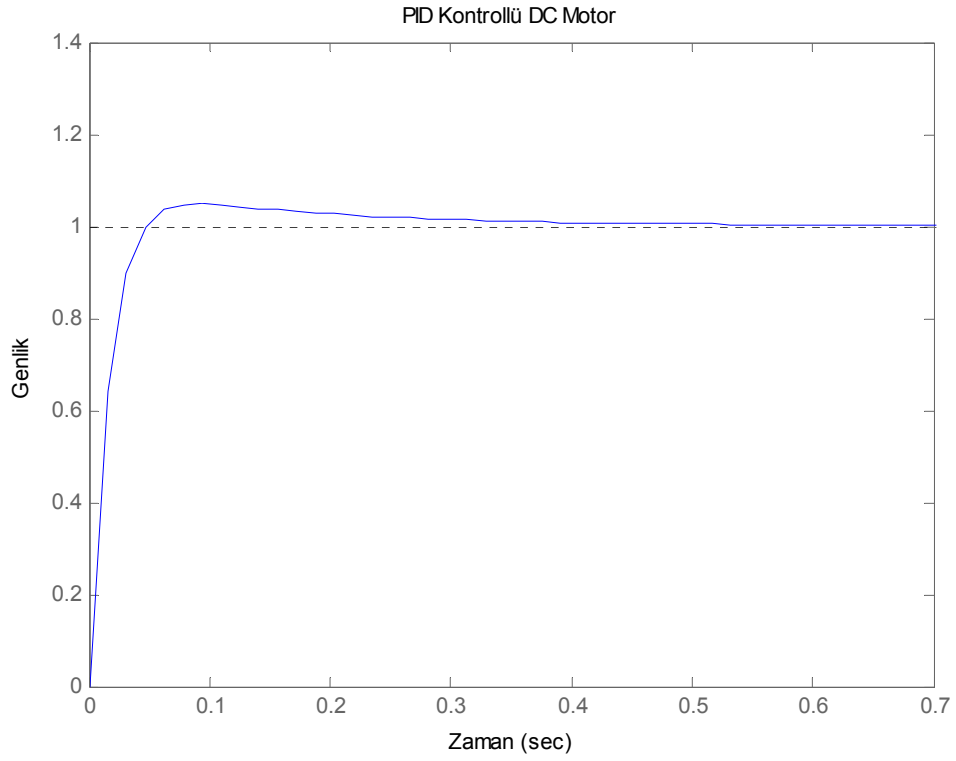
Şekil 6. 20 DC Motorun PID kontrollü Simulink modeli

Öncelikle DC motor modelinde kontrol için oransal kazanç uygulansın. Buna göre sonuç Şekil 6.21’ de verildiği gibi bir çıkışa sahiptir. Görüldüğü üzere çıkış değeri 0.25 saniye gibi kısa bir sürede istenen değere ulaşmaktadır. Ancak stabil durum hatası ve yüksek çıkışa sahiptir. Stabil durum hatasının düzeltilmesi için integral ve yüksek çıkış için ise türev kontrolü kullanılmalıdır. Dolayısıyla belli kazanç değerlerine sahip oransal, integral ve türev kontrolleri kullanılacaktır.



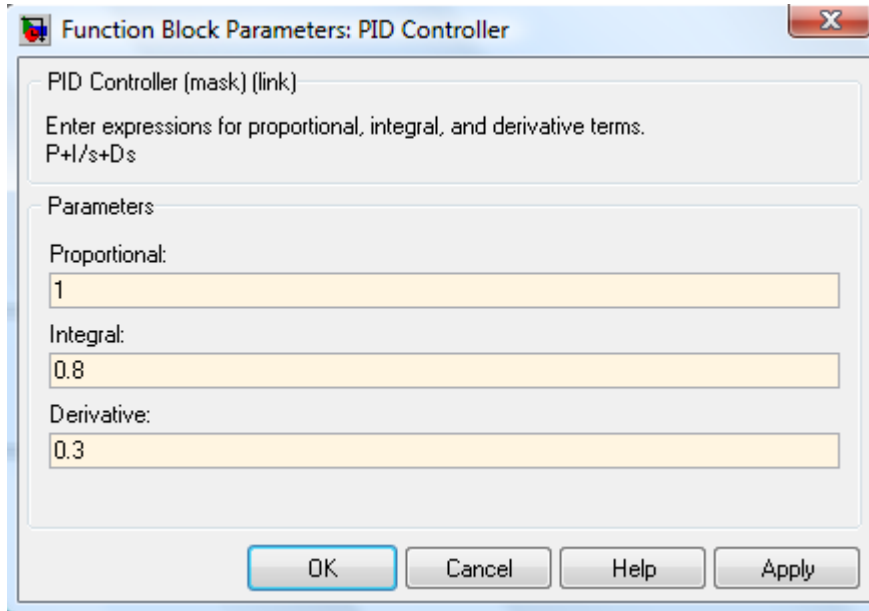
Şekil 6. 21 Oransal kontrollü DC motorun step yanıtı

PID kontrolü kullanılması için integral, türev ve oransal kontrolleri için belirli değerler girildikten sonra çıkış Şekil 6.22’ de ki gibi olmaktadır. Şekilden de anlaşıldığı üzere aşırı çıkışlar ve dalgalanmalar azaltılmış bunun yanında hata değeri sıfırlanmıştır.



Şekil 6. 22 PID kontrollü DC motorun step yanıtı

Şekil 6.23’ da PID kontrol tasarımında kullanılan parametreler gösterilmektedir. Bu değerler sonucunda elde edilen kararlı hal grafiği Şekil 6.22’ de verilmektedir.

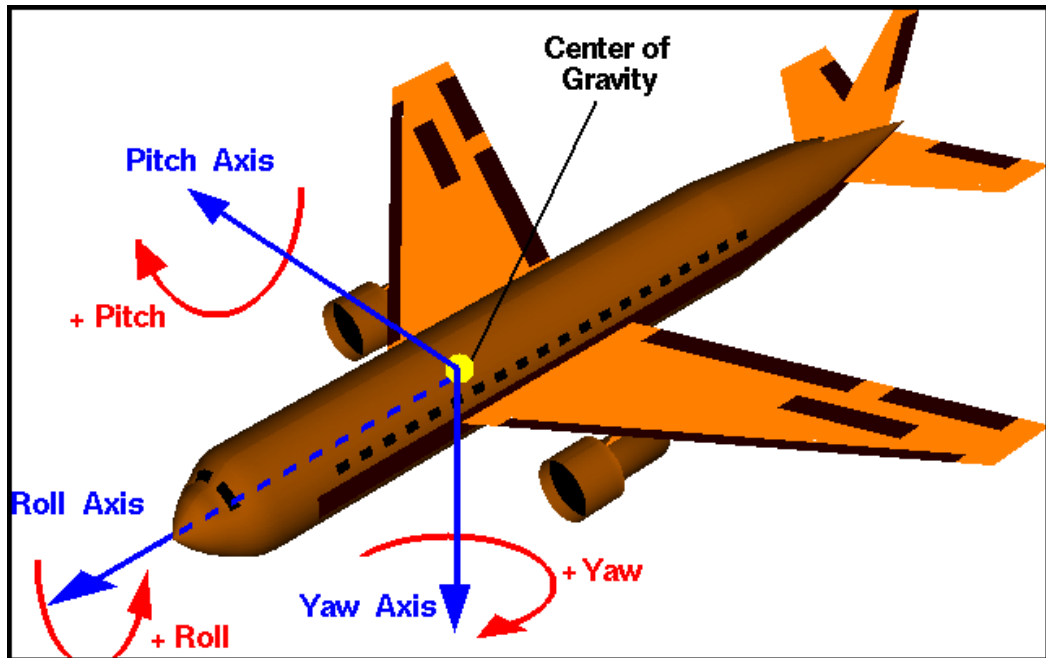


Şekil 6. 23 PID kontrol parametreleri

6.2.2 Yönlendirme Sistemi

Bu proje kapsamında İHA sisteminde kullanılan otomatik yönlendirilebilir anten sistemi yönlendirme sistemine ihtiyaç duymaktadır. Çünkü tasarlanacak olan antenin ışıma huzmesi yatay düzlemde dar bir açıya sahiptir. Yaklaşık 30° bir ışıma açısına sahip anten tasarımı düşünülmektedir. Dar huzmeli anten kullanmanın avantajı kazanç getirisi yanında güvenilirliktir. Çünkü her yöne haberleşme sinyali göndermek yerine gücün büyük bir kısmını belirli bir huzmede ışıtmaktadır. Dolayısıyla İHA faydalı yükleri tarafından elde edilen veriler sadece YVT' nin bulunduğu alana iletilmektedir. Ancak bunun yanında da tolere edilmesi gereken bir dezavantaja sahiptir. İHA uçuş esnasında hareketinden kaynaklanan manevralar ve hız neticesinde YVT' ye yönelimi sürekli değişmektedir. Dolayısıyla OYT anteninin sürekli olarak YVT' ye odaklaması için yönlendirme sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece antenin YVT' i takip etmesi ve odaklanması için gerekenler yapılmış olacaktır.

İHA uçuş esnasında üç değişik hareket manevrasına sahiptir. Bunlar Şekil 6.24' de görüldüğü gibi yaw, pitch ve roll açılarıyla ifade edilmektedir. Ancak anten yatayda dar bir huzmeye sahip olduğu için yaw açısındaki değişim ve ivme yönlendirme sistemini uyacaktır.



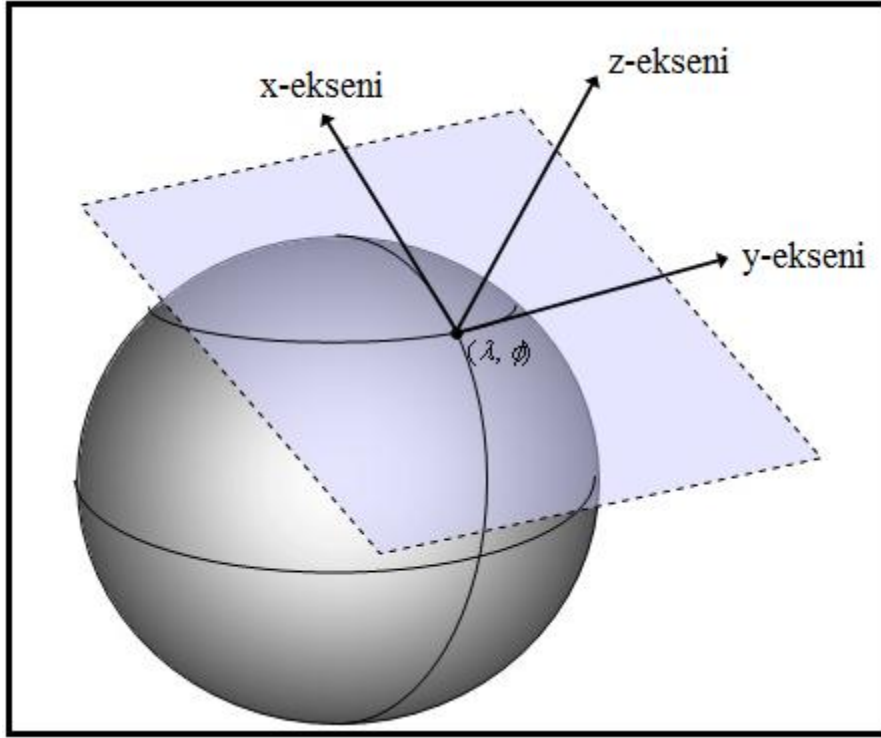
Şekil 6. 24 İHA' nın hareket manevraları

Yönlendirme sistemi iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım IMU (Inertial Measurement Unit, Ataletsel Ölçüm Birimi) sisteminden gerçek zamanlı olarak okunan ivme, açısal hız verileridir. IMU verileri İHA' nın üç dikey ekseninde hem ivme bilgisi elde edilmesini hem de bu üç eksenindeki rotasyonel hız bilgisinin elde edilmesini sağlar. Öncelikle IMU' den elde edilen rotasyonel hız bilgisi yer düzleminin rotasyonu için düzeltilir. Bu hız daha sonra Euler açılarının elde edilmesinde kullanılacaktır. Euler açıları ise İHA' nın uçuş hareketi ve ivmesi doğrultusunda ortaya çıkan değişimi hesaplamak için kullanılır [19].

Yönlendirme sisteminin ikinci kısmı ise OYT anteninin YVT' ye odaklanması için gereken yatay açı değerinin elde edilmesidir. Yatay açı değeri YVT ve İHA' nın jeolojik konumlarından elde edilir. İHA ve YVT' nin enlem, boylam ve yükseklik bilgileri GPS sisteminden anlık olarak elde edilmektedir. Bu konum bilgileri Lokal Teğet Koordinat Sistemi (Local Tangent Plane, Lokal Teğet Koordinat Sistemi)' i koordinatlarına çevrilir. Bu çalışmada Lokal Teğet Koordinat Sistemi için NED (North Earth Down, Kuzey Güney Aşağı) koordinat sistemi kullanılacaktır. Öncelikle koordinatlar NED Koordinat Sistemi için hesaplanmalıdır. Daha sonra NED Koordinat Sistemi YVT' nin İHA' ya göre bağıl vektörü (Relative Vektör, Bağıl Vektör) hesaplanır. Bu bağıl vektör İHA' nın Gövde Koordinat Sistemi' ne (Body Coordinate Frame, Gövde Koordinat Düzlemi) çevrilir. YVT' nin İHA' ya göre bağıl vektörünün bilinmesiyle yönlendirme sistemi için gereken yatay açı değeri elde edilmiş olur.

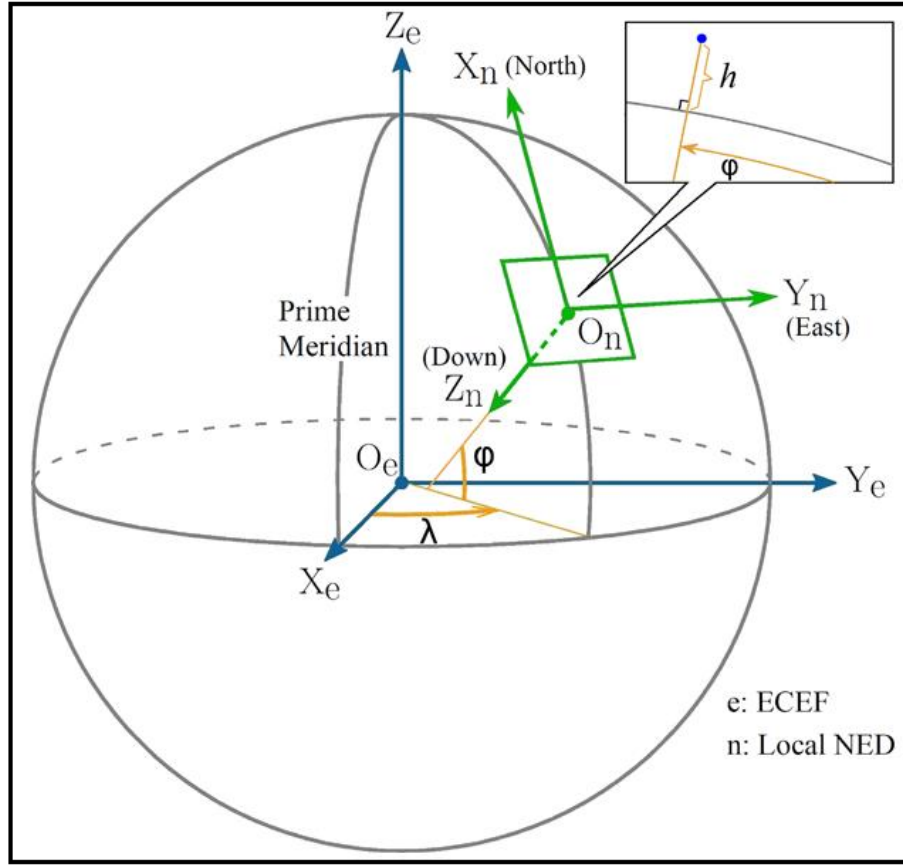
6.2.2.1 Koordinat Referans Düzlemleri

Bu çalışma da eylemsizlik yani başlangıç koordinat referans düzlemi için Lokal Teğet Koordinat Sistemi kullanılmıştır. Böylece yeryüzünün eğimi hesaba katılmamış ve düz yer düzlemi kabul edilmiştir. Şekil 6.25' de Lokal Teğet Koordinat Sistemi verilmiştir. Bu kabul bu çalışma için çok düşük hata oranı anlamına gelmektedir. Çünkü çalışma bölgesi yaklaşık 150 Km' lik bir alan menziline sahiptir. Dolayısıyla bu kısa menzilde yeryüzü eğimi önemli bir değer değildir [1].



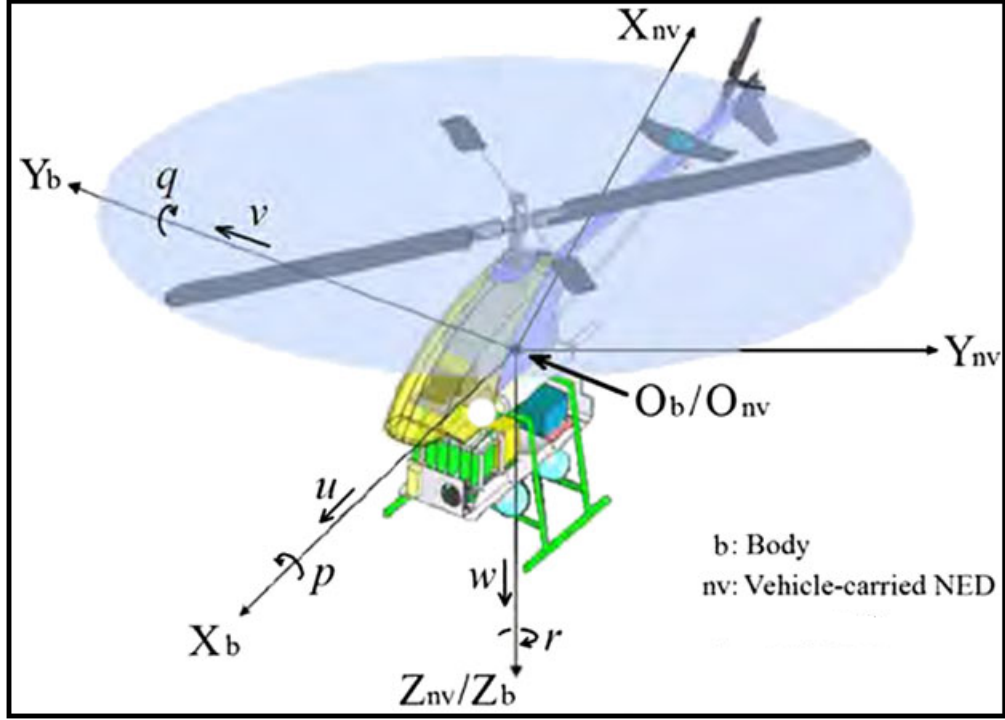
Şekil 6. 25 Lokal Teğet Koordinat Sistemi

Lokal Teğet Koordinat Sistemi için NED koordinat sistemi kullanılacaktır. NED koordinat sistemi dikey sağ el referanslı eksen sistemini kullanmaktadır. NED koordinat sistemine göre kuzey, x-eksenine doğu y-eksenine ve aşağı z-eksenine karşılık gelmektedir. Kuzey eksen yer düzleminin Kuzey yönünü, doğu eksen yer düzleminin Doğu yönünün ve aşağı ise yer merkezi doğrultusunu ifade etmektedir. Şekil 6.26' da NED koordinat sistemi gösterilmektedir [19].



Şekil 6. 26 NED Koordinat Sistemi

Gövde Koordinat Sistemi ise orijini İHA' nın ağırlık merkezi olan x-ekseni İHA' nın ön doğrultusu, y-ekseni yan doğrultusu ve z-ekseni ise yer merkezi doğrultusundadır. Yine sağ el referanslı dikey koordinat sistemini kullanır. Şekil 6.27' de Gövde Koordinat Sistemi daha detaylı verilmiştir.



Şekil 6. 27 Göve Koordinat Sistemi

6.2.2.2 Koordinat Dönüşümleri

Bir koordinat sisteminin başka bir koordinat sistemine göre açısal yönelimi üç Euler açısı ile kullanılarak tanımlanabilir. Euler açılar Φ , Ψ ve θ Lokal Teğet Koordinat Sistemin’ de İHA’ nın yaw, pitch ve roll açı değerlerini tanımlar. İki koordinat sisteminin bağıl yönelimlerini tanımlamak için Euler açılar en etkili ve verimli yöntemdir.

İHA’ nın yönelimi onun 3x1 konum vektörleriyle tanımlanır. Açısal yönelimi ise 3x3 rotasyon matristir. Rotasyon matrisi her bir eksen için eşitlik (6.58), (6.59) ve (6.60)’ da elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_z \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi & 0 \\ -\sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{bmatrix} \quad (6.58)$$

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = R_y \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (6.59)$$

$$\begin{bmatrix} x^b \\ y^b \\ z^b \end{bmatrix} = R_X \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad (6.60)$$

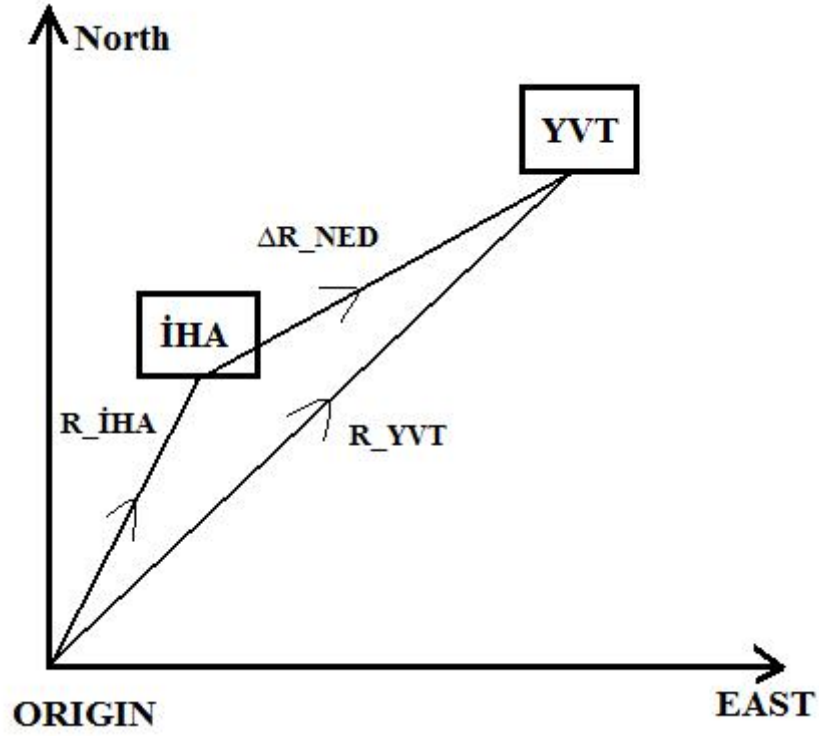
Yukarda verilen eşitliklerin kombinasyonuyla tek bir rotasyonel matris Lokal Teğet Koordinat Sistemin' den Gövde Koordinat Sistemi' ne dönüşüm yapmak için elde edilir. Rotasyon matrisi eşitlik (6.61)' de verildiği gibi elde edilir.

$${}^B_I R = R_X R_Y R_Z = \begin{pmatrix} C_\Psi C_\theta & S_\phi C_\theta & -S_\theta \\ C_\Psi S_\theta S_\phi - S_\Psi C_\phi & S_\Psi S_\theta S_\phi + S_\Psi C_\phi & S_\phi C_\theta \\ C_\Psi S_\theta S_\phi + S_\Psi C_\phi & S_\Psi S_\theta C_\phi - S_\Psi S_\phi & C_\phi \end{pmatrix} \quad (6.61)$$

Rotasyonel matris kullanarak koordinatlar Gövde Koordinat Sistemin' de elde edilir. Eşitlik (6.62) 'de bu koordinat dönüşümü verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} x^b \\ y^b \\ z^b \end{bmatrix} = {}^B_I R \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ z^i \end{bmatrix} \quad (6.62)$$

İHA' nın otomatik yönlendirilebilir anten sisteminin YVT' ye göre bağlı vektörü odaklanma olarak ifade edilmektedir. Bağlı vektör NED koordinatları kullanılarak Lokal Teğet Koordinat Sistemin' de elde edilmektedir. Bağlı vektörün elde edilmesi için hem İHA' nın hem de YVT' nin koordinatlarının bilinmesi gerekmektedir. Buna ek olarak İHA' nın çalışma bölgesi içinde yer alan orjin bilgisinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu bilgiler kullanılarak YVT' nin İHA' ya göre bağlı vektörü Şekil (6.28)' de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

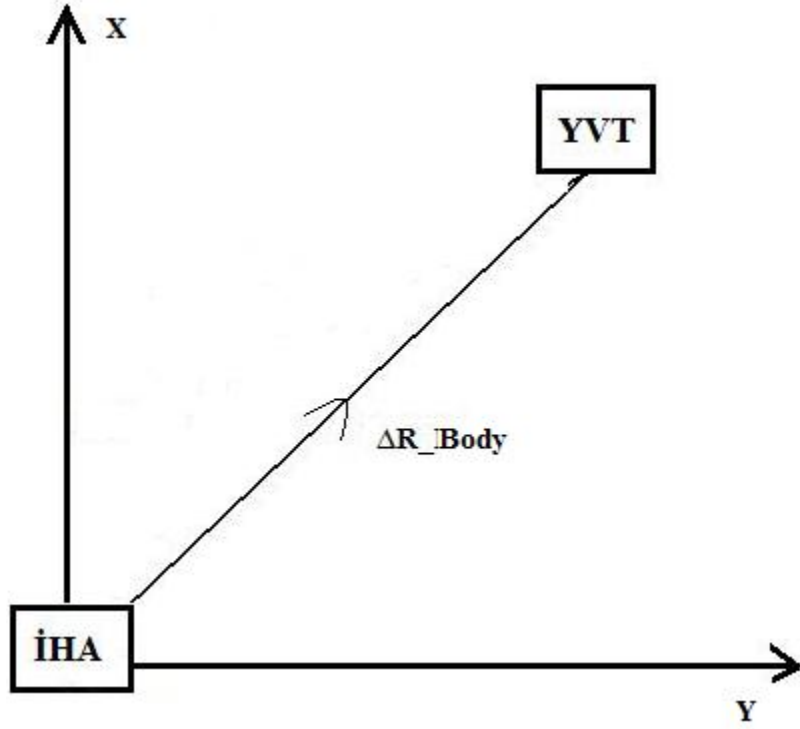


Şekil 6. 28 NED Koordinat Sistemi' nde bağıl vektörün elde edilmesi

Δ_{rNED} NED Koordinat Sistemin' de bağıl vektör olmak üzere (6.63)' deki eşitlikteki gibi elde edilebilir.

$$\Delta_{rNED} = r_{YVT} - r_{İHA} \quad (6.63)$$

Ancak Lokal Teğet Düzlemi'nde elde edilen bağıl vektör OYT sisteminin YVT' yi takip edebilmesi için ihtiyaç duyduğu doğru açığı vermeyecektir. Doğru açı değerini elde edebilmek için YVT' nin İHA' ya göre bağıl vektörü İHA' nın Gövde Koordinat Sistemi koordinatlarında elde edilmelidir. Şekil (6.29)' da doğru açı değerinin İHA Gövde Koordinat Sistemi koordinatlarındaki bağıl vektör kullanarak elde edilmesi verilmektedir.



Şekil 6. 29 Gövde Koordinat Sistemi' nde bağıl vektörün elde edilmesi

6.2.2.3 Yatay Açı Değerinin Elde edilmesi

Enlem, boylam ve irtifa bilgileri İHA ve YVT' nin NED koordinatlarını hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu model orjin noktasına ihtiyaç duymaktadır. Orjin noktası ise konum hatalarını azaltmak için İHA' nın çalışma bölgesi içinde seçilir. YVT ve İHA' nın elde edilen NED koordinatları arasında ki fark, gereken bağıl vektörü Lokal Teğet Koordinat Sistemi' nde vermektedir.

İHA' nın hareketine bağlı olarak ortaya çıkan ivme değerleri IMU' den RS232 bağlantı yoluyla elde edilir. IMU verileri RS232' den binary olarak elde edilmektedir. Bunun için ondalık değere çevrilir. Daha sonrada gürültüden arındırmak için filtelenir.

IMU' den elde edilen A_x ve A_y ivme değerleri ϕ (roll) ve θ (pitch) değerlerini hesaplamak için kullanılır. Bu açı değeri aşağıda verilen eşitlik (6.64) ve (6.65)' den elde edilir.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{A_x}{g}\right) \quad (6.64)$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{A_y}{g \cdot \cos(\theta)}\right) \quad (6.65)$$

θ ve φ açıları daha sonra rotasyonel hızlar p , q ve r ile birlikte Euler açısal hızları hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu hesaplama eşitlik (6.66)' da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \varphi \frac{\sin \theta}{\cos \theta} & \cos \varphi \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi \frac{1}{\cos \theta} & \cos \varphi \frac{1}{\cos \theta} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (6.66)$$

Euler açılarını elde etmek için Euler açısal hızların integrali alınır. Böylece Euler açıları 3x3 matris olarak elde edilir. Elde edilen bu 3x3 matris ile İHA' nın Gövde Koordinat Sistemi koordinatlarında YVT' nin İHA' ya göre bağlı vektörü elde edilir. Bu işlem eşitlik (6.67)' de verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} = R_{XYZ} \begin{bmatrix} dN \\ dE \\ dD \end{bmatrix} \quad (6.67)$$

R_{XYZ} rotasyonel matrisi Lokal Teğet Koordinat Sistemi ile Gövde Koordinat Sistemi koordinat değerlerinden elde edilmektedir. $R_{\varphi\theta\Psi}$ rotasyonel matris değeri eşitlik (6.61)' de elde edilmişti. (6.61) eşitliği kullanarak Bağlı Vektörü Gövde Koordinat Sistemi koordinatlarında İHA' nın yönünden bağımsız olarak elde edilir. Otomatik yönlendirilebilir anten sistemi için gerek duyulan yatay açı (Pan Angle, Yatay Açı) değeri ise (6.68) eşitliğinden elde edilir. Böylece İHA' nın hareketi sırasında otomatik yönlendirilebilir anten sisteminin YVT' ye odaklanması ve takibi için gerek duyulan yatay düzlemdeki değişim açısı α , elde edilmiş olur.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{dy}{dx} \right) \quad (6.68)$$

6.3 Destek Elemanları

Destek elemanları otomatik yönlendirilebilir anten sisteminin İHA üzerinde konumlanmasını ve hareketini sağlar. Destek elemanlarının en önemlisi Slip-Ring'lerdir. Slip-Ring'ler dönel bilezik olarak da bilinir. Slip-ringler aralıklı, kesintili veya sürekli dönmesi istenen her elektromekanik sistemde güç ve/veya veri iletimi için kullanılabilir. Bu ürünler mekanik performansı artırarak, çalışma esnasında dönen kısım

ile sabit kısım arasında kablo bağlantılarının zarar görmesi engellenerek hareketli sisteme veri ve güç akışı sağlanır.

Anten ve DC motor bağlantısı DC motorun miliyle sağlanmaktadır. Böylece DC motorun dönüş açısı miktarı kadar da anten dönüş yapabilmektedir. Ancak burada antenin beslenmesi sorunu ortaya çıkar. Çünkü anten koaksiyel kablo ile beslendiği için antenin kablo ile dönüşü sınırlıdır ve besleme kablosu antenin tam bir dönüş hareketini engeller. Bu noktada Slip-Ring devreye girer. Slip-ringler 360 derece dönme kabiliyetine sahip olan aynı zamanda akım iletimini sağlayan mekanik sistemlerdir. Slip-Ring'lerin kalitesi iletilen sinyalin kalitesini belirler. Çünkü bir miktar gürültüye sebep olmaktadır. Şekil 6.24' de bu proje için kullanılacak olan Slip-Ring gösterilmektedir.

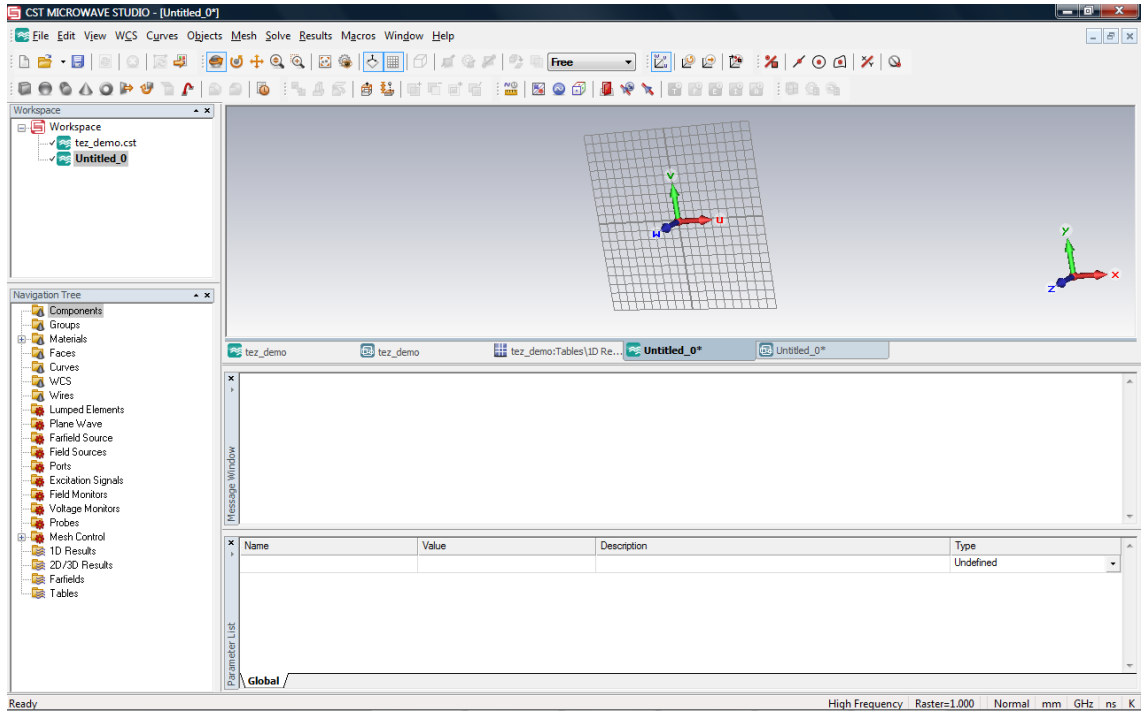


Şekil 6. 30 Slip-Ring

Döner elektrik arayüzleri, akım toplayıcı iletişim bileziği, fırça tutuculu bilezik sistemi, dönen elektrik konnektörleri, kollektör, firdöndü, döner mafsallı veya döner elektrik eklemleri olarak adlandırılır. Slip-ring'ler yaygın olarak motorlar, elektrik jeneratörleri, paketleme makineleri, kablo tamburları, döner kameralar, rüzgar türbinleri, döner sistemlere, kontrol devrelerine güç transferi ve analog veya dijital sinyaller içeren verileri iletmek için her sistemde kullanılabilir.

MİKRO ŞERİT ANTEN TASARIMI

Mikro şerit anten tasarımı için CST Microwave Studio programı kullanılmıştır. Mikro dalga frekansları gibi yüksek frekans çözümlerinde tercih edilen bu simülasyon ve tasarım programı üç boyutlu grafiksel bir çözüm önermektedir. Tek bir metot her zaman kesin bir sonuç ortaya koymadığı için CST Microwave programı, Geçici Cevap (Transiet), Frekans Ortamında (Frekans Domain), İntegral Eşitliği, Çok Katmanlı ve Özdeğer (Eigenmode) gibi çözümler sunmaktadır. En çok tercih edilen ve uygulanabilirliği yüksek olan Geçici Cevap çözümüdür. Bu çalışmada bu çözüm metodu kullanılacaktır. Ayrıca zengin ve güncel materyal kütüphanesi ile üretime uygun ürün tasarımında oldukça avantajlıdır. CST Microwave Studio, kullanıcıları Şekil 7.1’deki gibi bir ekranla karşılar.



Şekil 7. 1 CST Microwave Studio simülasyon programı

Şekil 7.1' den de görüldüğü gibi tasarım tamamen grafiksel ara yüz desteği ile yapılmaktadır. Burada tasarım mikro şerit anten olduğu için tasarım katman seçim ve boyutlandırılmasına dayanmaktadır [13]. Antenin boyut parametreleri çok önemlidir. Çünkü doğrudan antenin kazancını ve ışımasını etkilemektedir. Anten boyut parametrelerinin hesaplanması Bölüm 6.1' de anlatılmıştı. Çizelge 7.1' de mikro şerit antenin tasarımında kullanılan boyut parametreleri verilmektedir. Bu hesaplamalara uygun bir Matlab uygulaması hazırlandı. Bu uygulamanın giriş parametreleri antenin çalışma frekansı, hat empedansı, dielektrik katman (Substrate) yüksekliği ve dielektrik sabitidir. Bu değerler girildiğinde mikro şerit antenin tasarımı için gerekli olan tüm giriş parametrelerini hesaplamaktadır. Ancak bu değerler temel değerler olup simülasyon sonucuna göre optimize edilecektir.

Çizelge 7. 1 Mikroşerit anten parametreleri

Parametre	Değer
G_{pf}	0,28
L	42
L_f	14,6
L_g	50,8
W	50
W_f	5,3
W_g	59
h	1,575
t	0,1

Tasarım çalışmasına 2.4 GHz mikro şerit anten ile başlanmıştır. Daha sonra elde edilen sonuca göre projede kullanılacak anten tasarımı yapılmıştır. Dolayısıyla ilk olarak 2.4 GHz anten tasarımı yapılacaktır. Bu çalışmada yapılan tasarımlar için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir [26].

- Anten materyallerinin belirlenmesi
- Anten boyut parametrelerinin belirlenmesi
- Dielektrik katmanının oluşturulması
- Taban katmanının oluşturulması
- Mikro şerit (Patch) katmanının oluşturulması
- Besleme kısmının oluşturulması
- Portun oluşturulması
- Analiz

7.1 Anten materyallerinin belirlenmesi

Anten için seçilecek olan materyaller daha önce de değinildiği gibi, dielektrik katman (substrate), yama veya mikro şerit (patch), taban (ground) malzemesi ve iletim hattı için metal seçimidir [13,26]. Mikro şerit antende iletim hattı, yama ve taban aynı tür materyalden seçilmektedir. Genellikle kaybı düşük iletken metaller kullanılır. Bu çalışmada kayıplı bakır (lossy copper, kayıplı bakır) seçilmiştir. Dielektrik katman seçimi ise en kritik adımdır. Çünkü dielektriğin türüne göre anten kazancı, ışıması ve kaybı değişkenlik göstermektedir. Ayrıca antenin maksimum gücünü de belirler.

Bu çalışma için Rogers Duroid 5880 kullanılacaktır. Çizelge 7.2’ de bu materyalin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 7. 2 Projede kullanılan dielektrik malzemenin özelliği

Özellik	Değer	Birim
Dielektrik Sabiti	2.20 ± 0.02 spec	
Kayıp Tanjantı	0.0004, 0.0009	
Isıl Bozulma Sıcaklığı	>260	°C
Kalınlık	0.127, 0.254 0.381, 0.508, 0.787, 1.575 3.175	mm
Ebat Değişimine Uygunluğu	Var	
Gerilim Direnci	2 X 10 ⁷	Mohm
* RT/Duroid 5880 Ürün Özellikleri		

7.2 Anten boyut parametrelerinin belirlenmesi

Anten boyut parametrelerinin belirlenmesi Bölüm 6.1’ de anlatılmıştı. Bu bölümde anlatılan hesaplamalar tasarlanacak mikro şerit anten için yapılmış ve bu doğrultuda Matlab programında bir uygulama hazırlanmıştır. Bu uygulamaya giriş parametresi olarak antenin çalışma frekansı, hat empedansı, dielektrik katman yüksekliği ve dielektrik sabiti değerleri girildiğinde antenin tasarımı için ihtiyaç duyulan parametreleri elde etmektedir. Şekil 7.2’ de, hazırlanan programın, çıktı değerlerini elde etmesi görülmektedir. EK-C’ de ise hazırlanan Matlab kodları verilmiştir.

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
Substrate Yüksekliğini Giriniz (mm):1.575
Substrate Dielektrik Sabiti:2.2
Çalışma Frekansını Giriniz (GHz):2.4
Transmisyon Hat Empedansı ZO 1 Giriniz (Ohm) 50
*****
----Patch Verileri----
Dalga Boyu=125mm
Lenght (L)=41.3632mm
Weight (W)=49.4106mm
InputEmpedance=254.3868ohm
BandWidth=23.6698Mhz
----Graund Verileri----
WidthOfGraund (Wg)=58.8606mm
LenghtOfGraund (Lg)=50.8132mm
----Transmission Line Verileri----
Lenght of the Inset (Lf)=14.634mm
Width of the ZO ohm Line (Wf)=5.3mm
w01/d(>1)=3.3651
Width of the ZO ohm Line2 (Wf)=4.8832mm
w02/d(<1)=3.1004
Notch of Insert (Gpf)=0.28293
----Port Verileri----
WidthOfPort (Along-x-Axis)=31.8mm
WidthOfPort (Along-z-Axis)=5.3079mm
>>

```

Şekil 7. 2 Mikroşerit parametreleri için hazırlanan Matlab uygulamasının çıktısı

Bu değerler yaklaşık değerlerdir. Yapılan simülasyonlar sonucu optimize değerler elde edilecektir. Öncelikle bu değerler Şekil 7.3' de görüldüğü gibi CST Microwave programına girilecektir.

Name	Value
Gpf	0.28
L	42
Lf	14.6
Lg	50.8
W	50
Wf	5.3
Wg	59
h	1.575
t	0.1

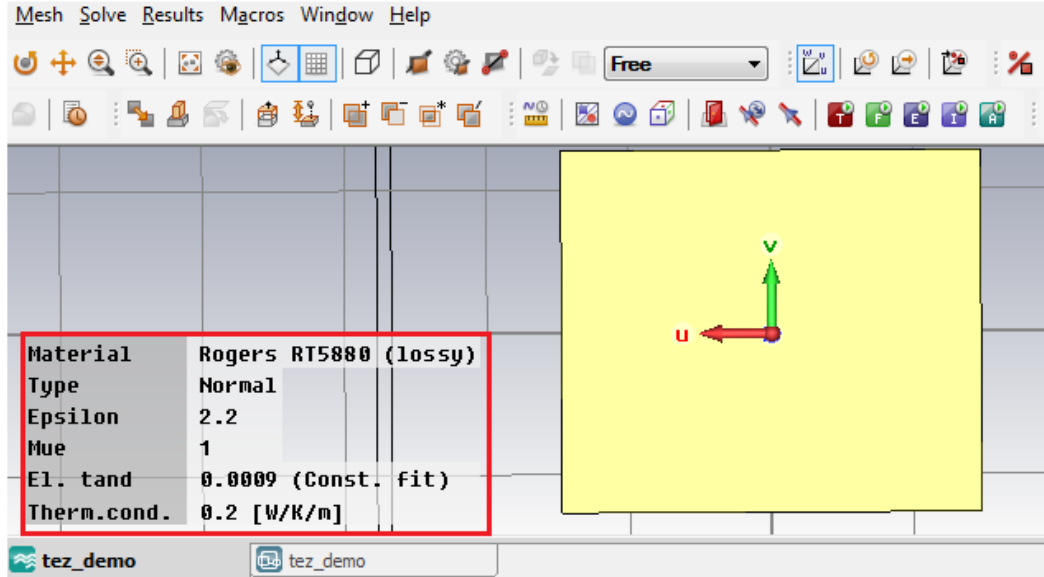
Parameter List

Global

Şekil 7. 3 Mikroşerit anten parametrelerinin CST programına girilmesi

7.3 Dielektrik katmanının oluşturulması

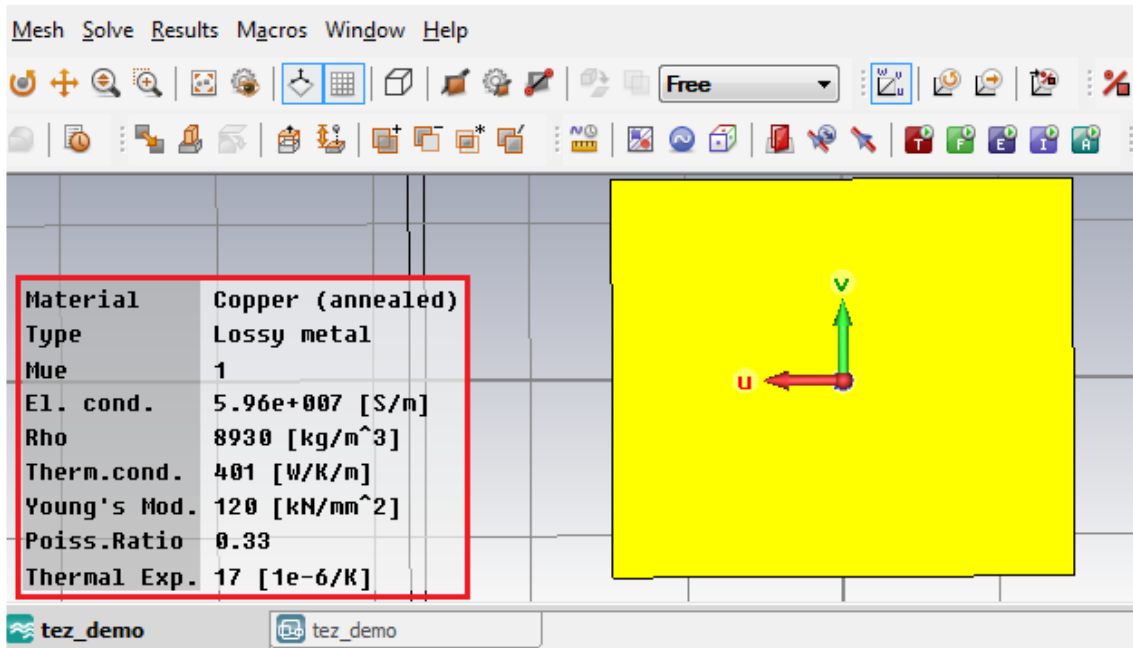
Dielektrik katmanı şekilde görüldüğü gibi elde edilen L_g , W_g ve h değerlerine göre oluşturulmuş olup Şekil 7.4’ de görülmektedir. Yine Şekil 7.4’ de görüldüğü gibi, materyal olarak Rogers RT5880 malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 7. 4 Mikroşerit antenin dielektrik katmanı

7.4 Taban katmanının oluşturulması

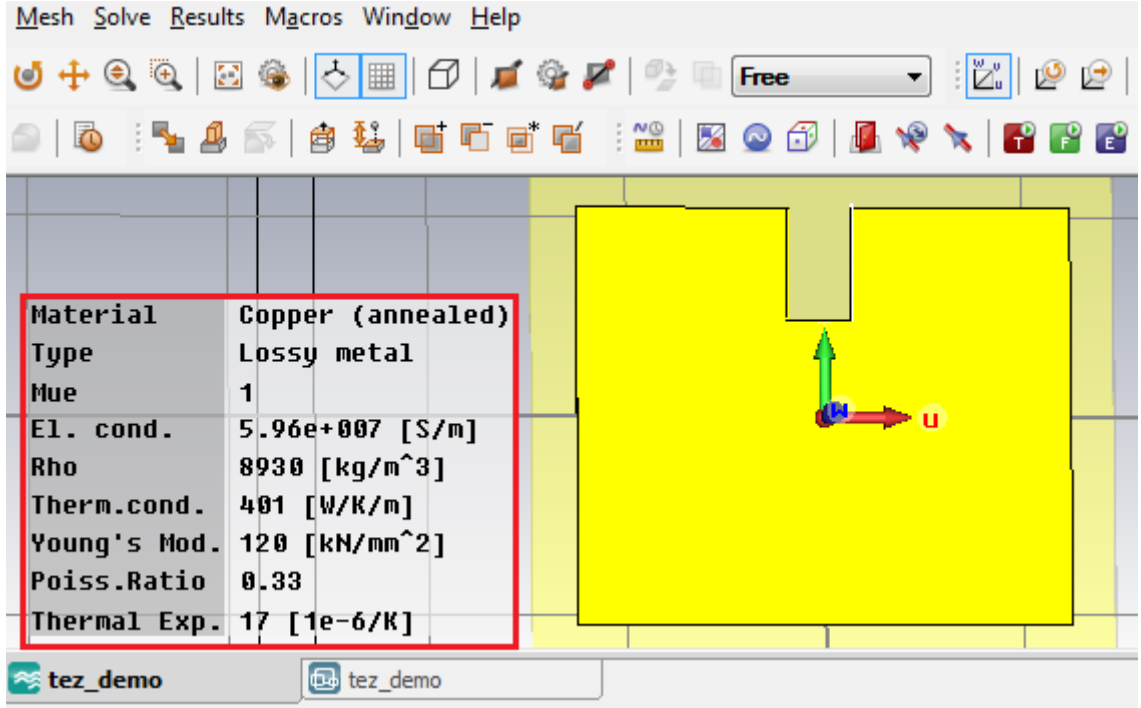
Taban malzemesi dielektrik katman ile aynı boyutlara sahiptir. Dielektrik katmandan tek farkı iletken bakır olmasıdır. Şekil 7.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 7. 5 Mikroşerit antenin taban katmanının oluşturulması

7.5 Mikro şerit (Yama) katmanının oluşturulması

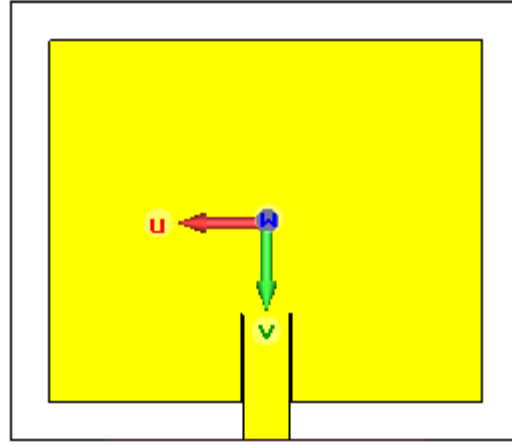
Mikro şerit veya yama (Patch, Yama) katmanı oluşturulurken L , W ve t değerleri kullanılmaktadır. Bu kısımdan daha sonra besleme hattı için besleme kısmı çıkarılmıştır. Yine Şekil 7.6' dan görüleceği gibi yama kısmı ve yamanın materyal özelliği verilmiştir.



Şekil 7. 6 Mikroşerit antenin yama katmanı

7.6 Besleme kısmının oluşturulması

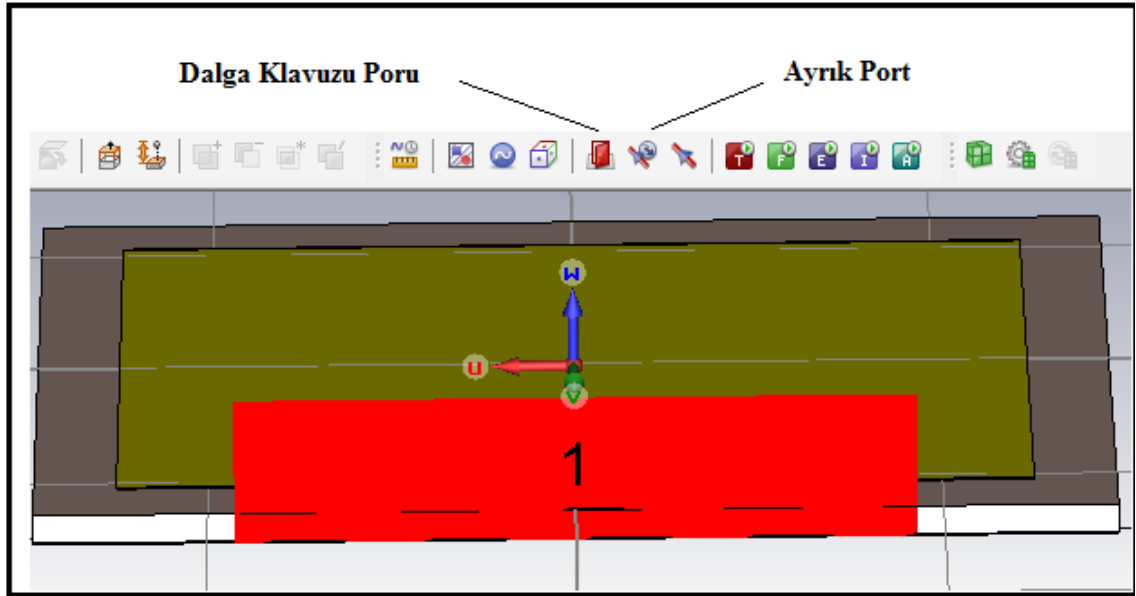
Mikro şerit antenin beslenmesinde önemli olan hat empedansı ile uyumluluktur. Hat empedansı ile giriş empedansının uyumluluğu doğrudan antenin verimliliğini dolaylı olarak da kazancını etkilemektedir [17]. Çünkü verimlilik ile yönlendiricilik kazancının çarpımı sonucu antenin kazancı elde edilir. Şekil 7.7' de besleme hattının da eklenmesi ile mikro şerit antenin son hali gösterilmektedir. Burada besleme hattının oluşturulması için L_f , W_f ve G_{pf} parametreleri kullanılmaktadır. L_f ve W_f giriş empedansını etkilerken G_{pf} band genişliği değerini etkilemektedir.



Şekil 7. 7 Mikroşerit antenin besleme kısmı

7.7 Portun oluşturulması

CST Microwave programı mikro şerit antenin beslemesi için dalga kılavuzu ve ayrık port olmak üzere iki seçenek sunar. Aralarında ciddi farklar yoktur. Bu çalışmada her ikisi de kullanılacaktır. Öncelikle dalga kılavuzu portu kullanılacaktır. Şekil 7.8’ de yapılan tasarım için dalga klavuzu portu ile besleme gösterilmiştir.



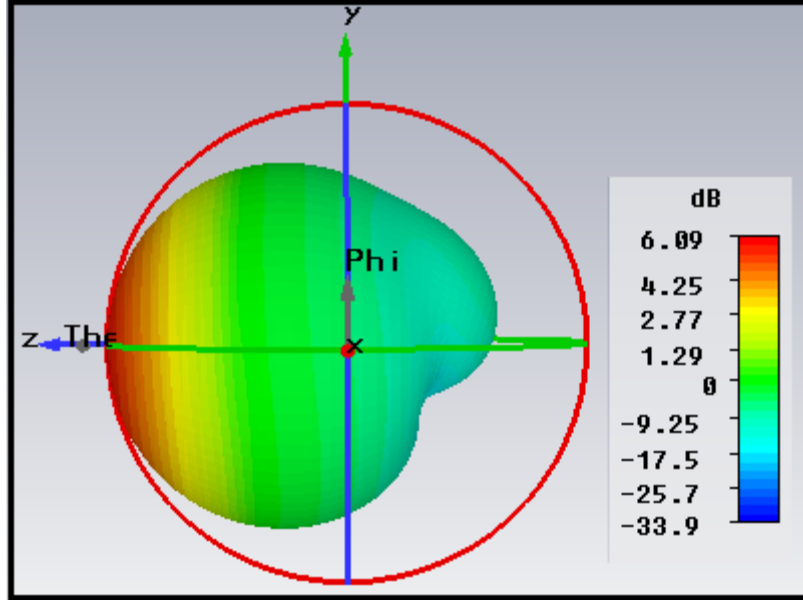
Şekil 7. 8 Mikroşerit antenin besleme portu

7.8 Mikroşerit Antenin Analizi

Port eklendikten sonra anten tasarımı tamamlanmış oldu. Artık tasarlanan anten için simülasyonlar başlatılabilir. Yapılacak olan simülasyon belli frekans aralığında Kazanç (Gain), Verimlilik (Efficiency) yani S_{11} değeri ve yönlendiricilik (Directivity)’ dir. Ayrıca antenin ışıma paterni de hem üç boyutlu hem de iki boyutlu (Polar)

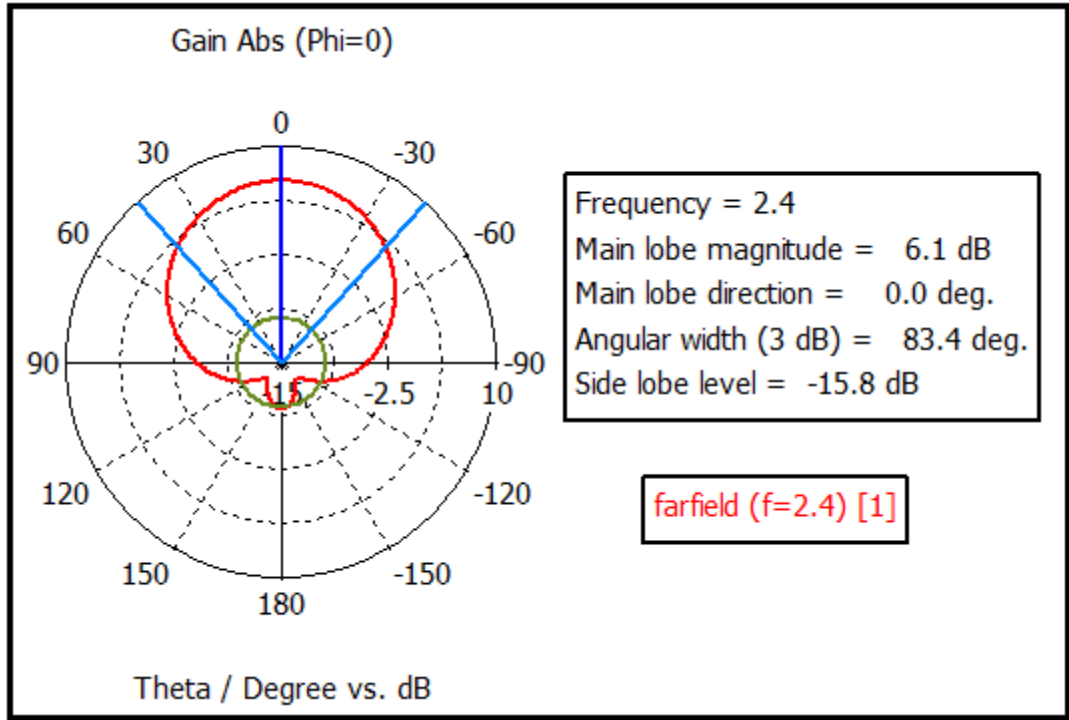
izdirilecektir. Geçici Yanıt (Transiet) zm yöntemi tercih edilecektir. Frekans aralığı 2-6 GHz seçilmiştir. Aşağıda simülasyon sonuçları verilmiştir.

şekil 7.9' da 2.4 GHz için tasarlanan mikro şerit antenin 2.4 GHz frekansında ki ışması verilmektedir. Görüldüğü gibi maksimum ışma z doğrultusunda olmaktadır. Anten kazancı ise maksimum 6.09 dB değerindedir.



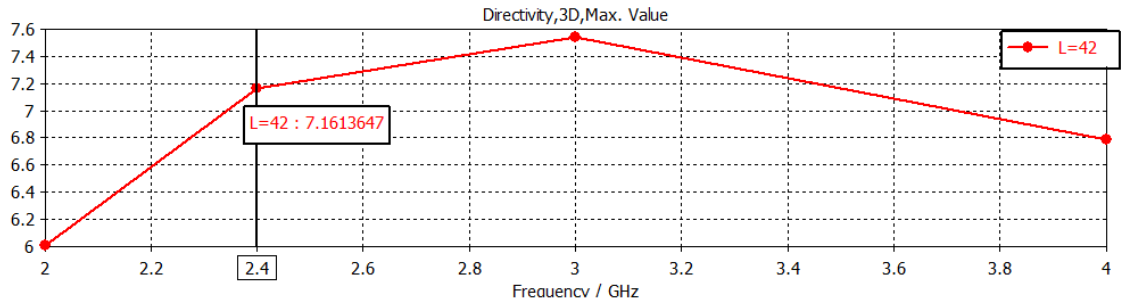
şekil 7. 9 Tasarlanan mikroşerit antenin uzak alan ışma diyagramı

şekil 7.10' da ise ışma diyagramının zox düzleminde yani yatay düzlemde ki görünümü verilmiştir. HPBW (Half Power Beam Width, Yarım G Huzme Genişliği) değeri yaklaşık 84 derecedir.



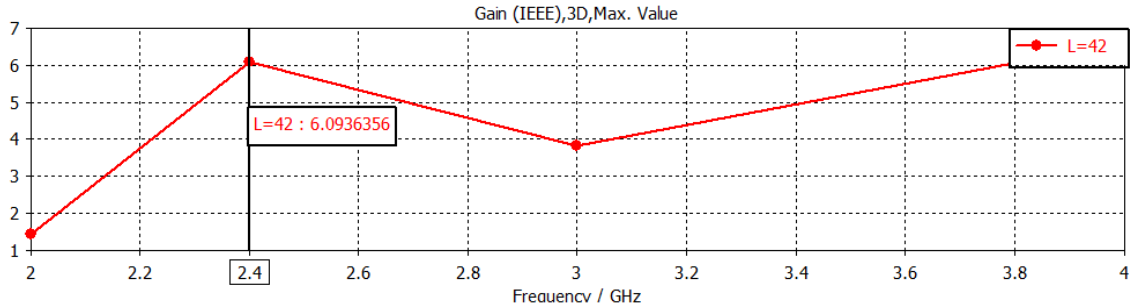
Şekil 7. 10 Tasarlanan antenin uzak alan ışıma diyagramının polar çizimi

Şekil 7.11' de ise Yönlendiricilik kazancının frekansa göre değişimi verilmektedir.



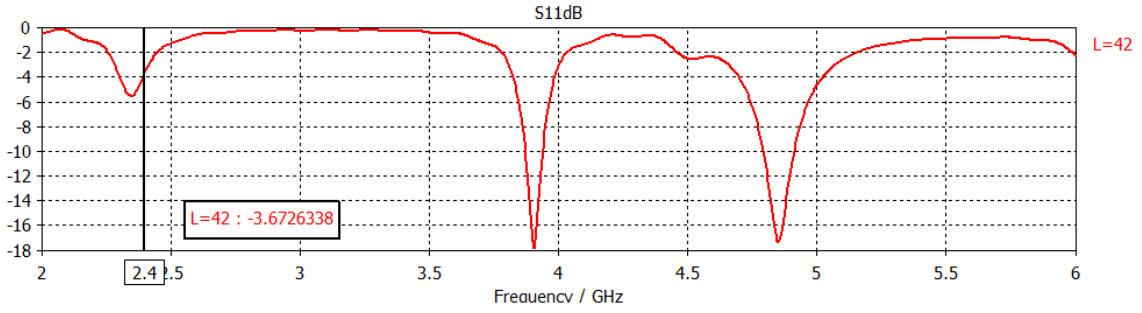
Şekil 7. 11 Tasarlanan antenin yönlendiricilik kazancının frekansa göre değişimi

Şekil 7.12' de anten kazancının frekansa göre değişimi verilmektedir.



Şekil 7. 12 Tasarlanan mikroşerit antenin kazancının frekansa göre değişimi

Şekil 7.13’ de S_{11} değerinin frekansa göre değişimi verilmektedir.

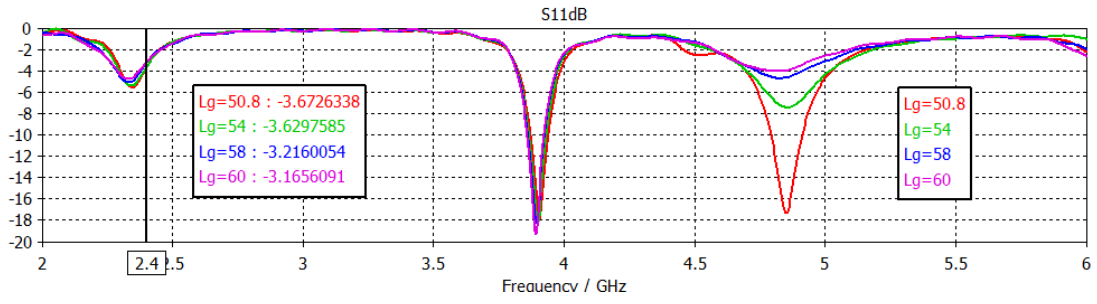


Şekil 7. 13 Tasarlanan mikroşerit antenin S_{11} değerinin frekansa göre değişimi

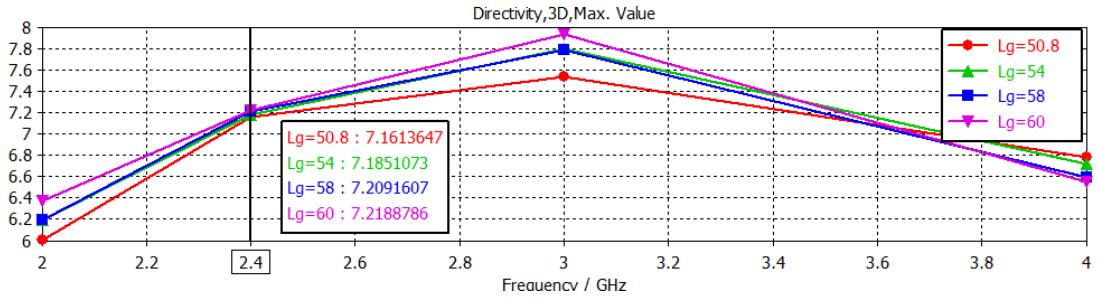
Yukarıda ki simülasyon sonuçlarından da anlaşılacağı gibi ilk aşamada beklenen bir anten tasarımı elde edilemedi. Çünkü yönlendiricilik kazancının ve verimliliğin daha yüksek, HPBW açısının ise daha düşük olması beklenmektedir. Verimlilik daha önce de söylendiği gibi doğrudan S_{11} parametresinin düşük olmasıyla alakalıdır. S_{11} parametresi için uygun görülen değer -20 dB değerinin altıdır [13]. HPBW açısı ise yaklaşık 30° olmalıdır. Anten kazancı ise 10 dBi seviyesinin üstünde olmalıdır. Bu talepler doğrultusunda öncelikle tasarlanan anten optimize edilecek daha sonra ise daha yüksek yönlendiricilik kazancı ve daha düşük HPBW açısı ve S_{11} değeri için dizi anten tasarımı yapılacaktır.

Optimizasyon çalışmasında mevcut antenin simülasyon sonuçlarından yola çıkılacaktır. Daha önceki konularda değinildiği gibi anten parametreleri değiştirilerek en uygun sonuç elde edilecektir. Öncelikle kazanç arttırılmaya çalışacak, bunun içinde L_g parametresi değiştirilecektir. Daha sonra ise S_{11} değerinin düşmesi için G_{pf} değeri arttırılacaktır. Şekil 7.13’ den de görüldüğü gibi S_{11} değeri merkez frekansın solunda kalmıştır. Bu nedenle L parametresinin değeri azaltılacaktır. Bu yaklaşımlar yapılan simülasyonlar neticesinde edinilmiş kazanımlardır.

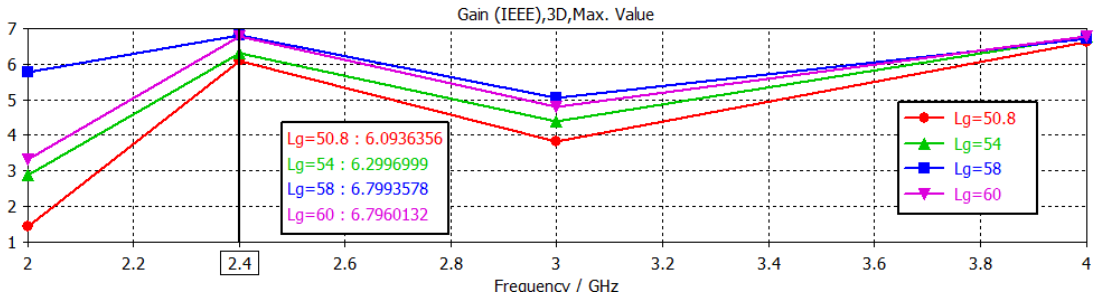
L_g parametresinin değişimine göre kazanç, yönlendiricilik kazancı ve S_{11} değerlerinin değişimi Şekil 7.14, 7.15 ve 7.16’ da verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi L_g parametresinin artışıyla kazanç ve yönlendiricilik kazancı artarken S_{11} değeri artmıştır.



Şekil 7. 14 L_g parametresine göre S_{11} değerinin değişimi

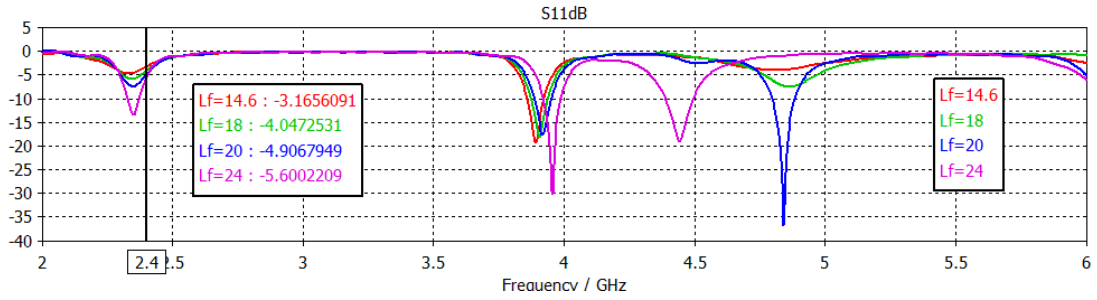


Şekil 7. 15 L_g parametresine göre yönlendiricilik kazancının değişimi

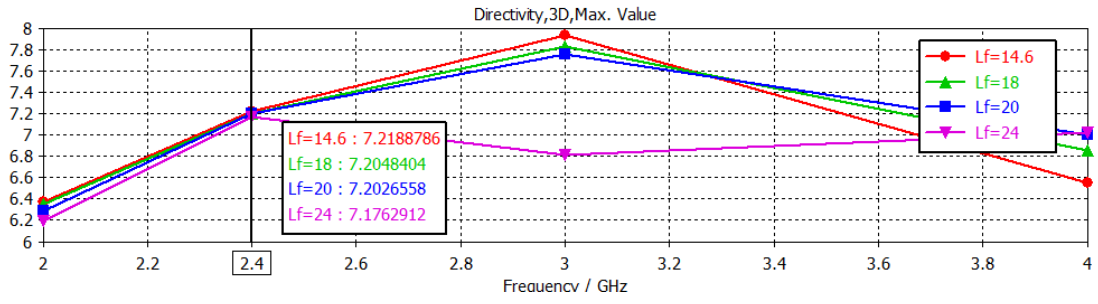


Şekil 7. 16 L_g parametresine göre kazancın değerinin değişimi

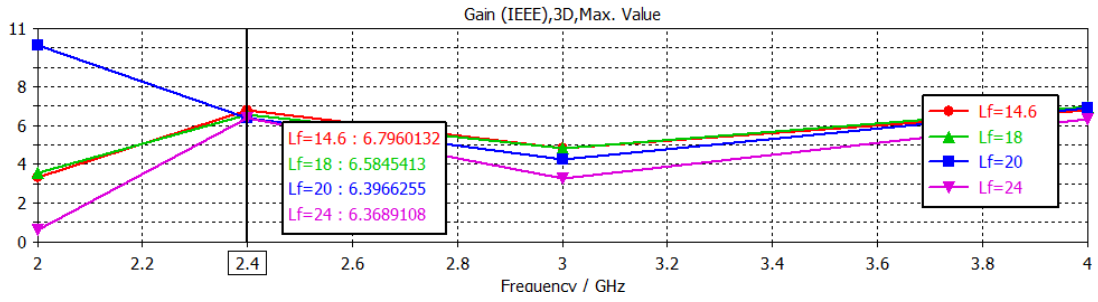
L_f değerinin artırılması ile de S_{11} değerinin düşürülmesi hedeflenmektedir. Şekil 7.17’ de bu değişim gözlenmiştir. Ayrıca Şekil 7.18 ve 7.19’ da L_f değerinin değişimine göre yönlendiricilik kazancı ve anten kazancının değişim verilmektedir.



Şekil 7. 17 L_f parametresine göre S_{11} değerinin değişimi

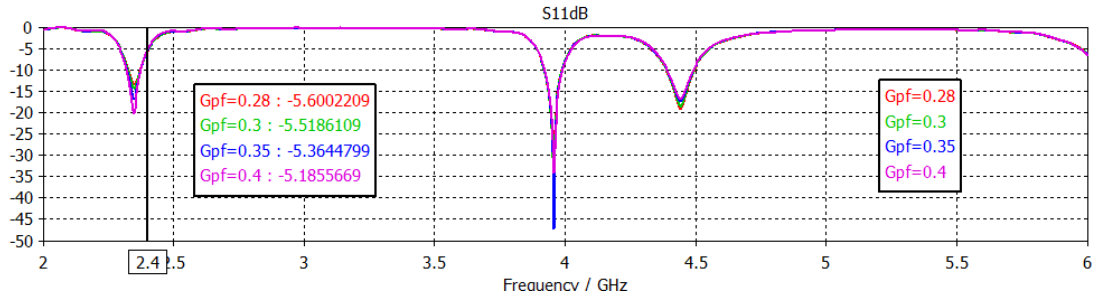


Şekil 7. 18 L_f parametresine göre yönlendiricilik kazancının değişimi

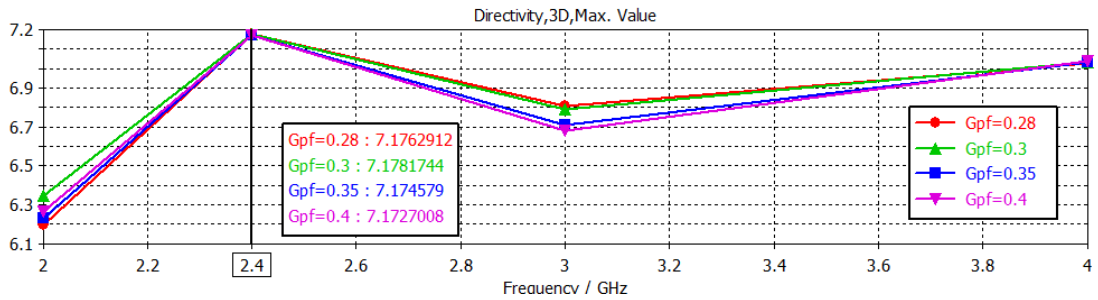


Şekil 7. 19 L_f parametresine göre kazancın değişimi

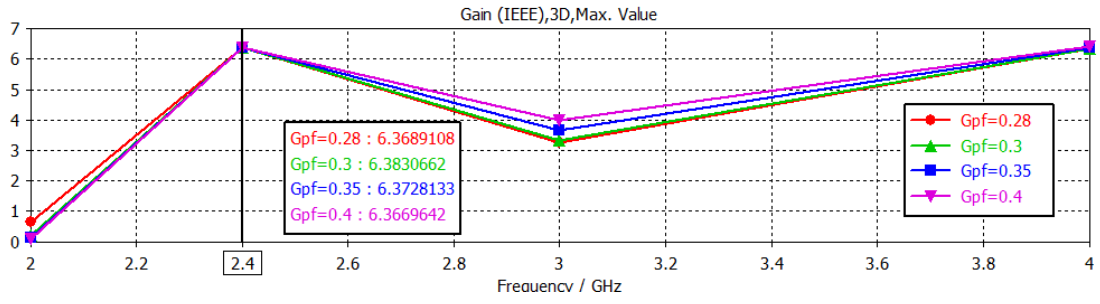
L_f değeri daha fazla arttırıldığında S_{11} değeri azalmakta ancak kazançta düşmektedir. Bu nedenle S_{11} değerini düşürmek için G_{pf} değeri arttırılacaktır.



Şekil 7. 20 G_{pf} parametresine göre S_{11} değerinin değişimi

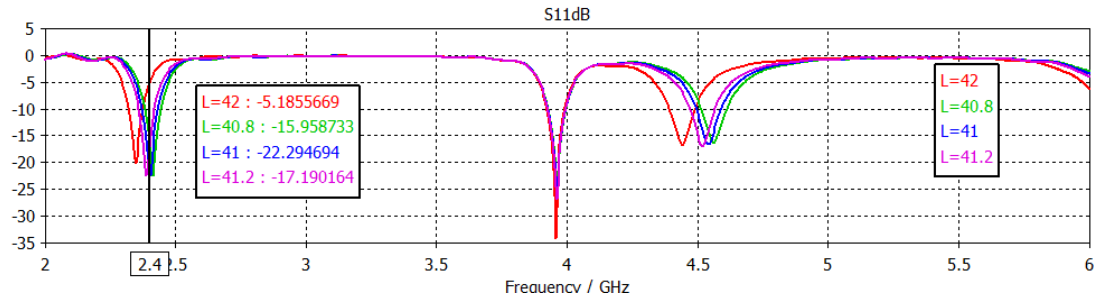


Şekil 7. 21 G_{pf} parametresine göre yönlendiricilik kazancının değişimi

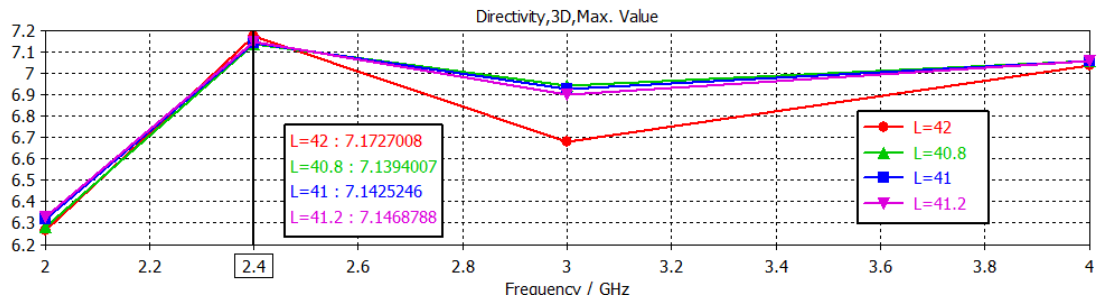


Şekil 7. 22 G_{pf} parametresine göre kazancın değişimi

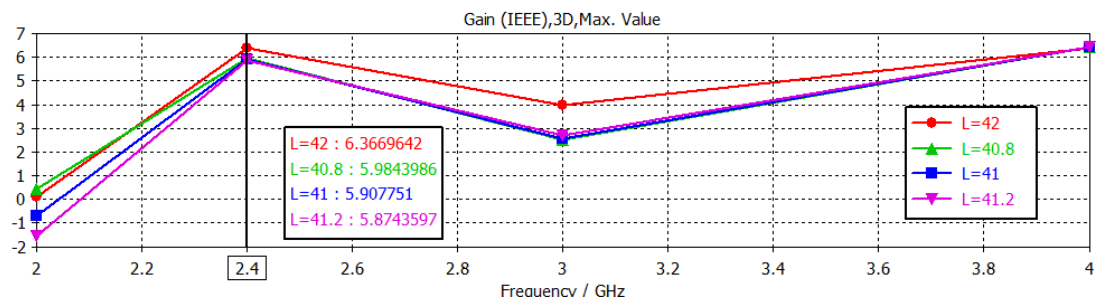
L değerini azaltarak minimumda olan S_{11} değerini merkez frekansa çekmeye çalışılacaktır. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 7.23, Şekil 7.24 ve Şekil 7.25’ de verilmektedir.



Şekil 7. 23 L parametresine göre S_{11} değerinin değişimi



Şekil 7. 24 L parametresine göre yönlendiricilik kazancının değişimi

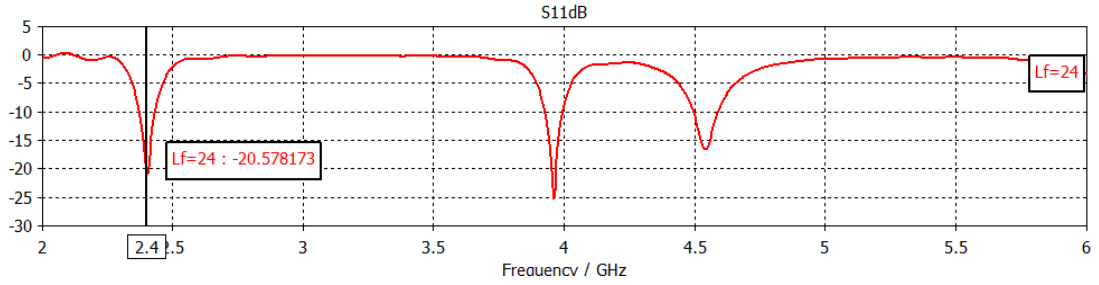


Şekil 7. 25 L parametresine göre kazancın değişimi

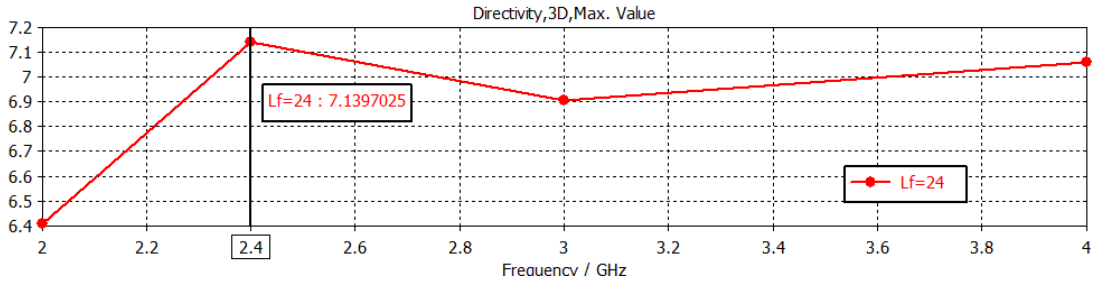
Yapılan bu işlemlerin sonucunda optimize değerler Çizelge 7.3’ de verilmektedir. Bu değerler göre elde edilen sonuçlar Şekil 7.26, Şekil 7.27 ve Şekil 7.28’ de verilmiştir.

Çizelge 7. 3 Optimizasyon sonucu elde edilen anten parametreleri

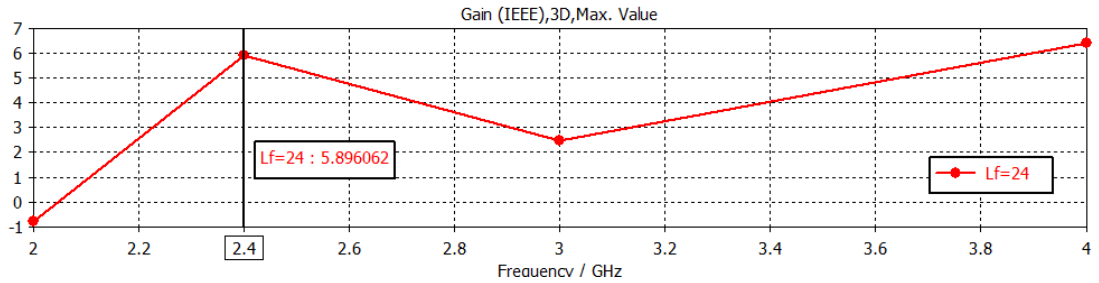
Parametre	Değer
G_{pf}	0,38
L	41
L_f	24
L_g	60
W	50
W_f	5,3
W_g	59
h	1,575
t	0,1



Şekil 7. 26 Optimizasyon sonucu S_{11} değerinin frekansa göre değişimi



Şekil 7. 27 Optimizasyon sonucu yönlendiricilik kazancının frekansa göre değişimi



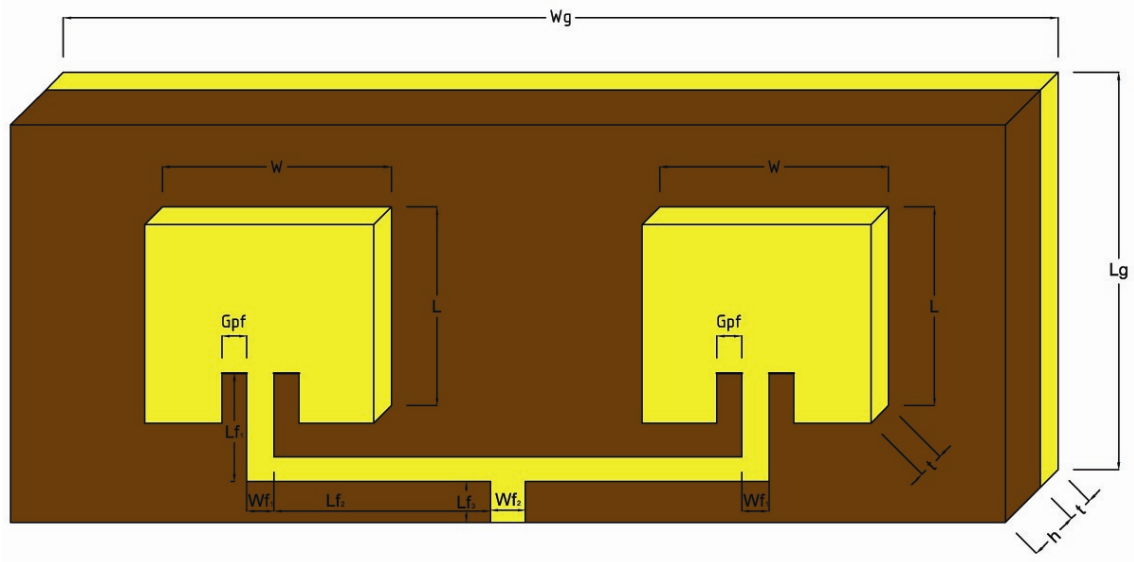
Şekil 7. 28 Optimizasyon sonucu kazancın frekansa göre değişimi

7.9 Dizi Anten Tasarımı

Yapılan optimizasyon sonucunda tek bir mikro şerit anten için en ideal tasarım elde edilmeye çalışıldı. Ancak S_{11} değeri ve band genişliği uygun değerlerde elde edilse de yeterli kazanç ve HPBW elde edilemedi. Çünkü mikro şerit antenin belli bir frekans değeri için bu kazanç değeri sınır değerindedir. Ancak dizi anten oluşturularak yönlendiricilik kazancı ve anten kazancı artırılabilir [25,27]. Bunun yanında HPBW değerinin de düşürülmesi mümkündür.

Bu bölümde yapılacak olan çalışmada 2x1 dizi anten tasarlanacaktır. Yani x0y düzleminde iki mikro şerit antenin x düzlemi boyunca dizilimi ile z eksenini doğrultusunda maksimum ışıma elde edilmeye çalışılacaktır. Burada eksenler için CST Microwave programı referans alınmıştır. Gerçek koordinat ekseninde z doğrultusu yatay düzleme denk gelmektedir.

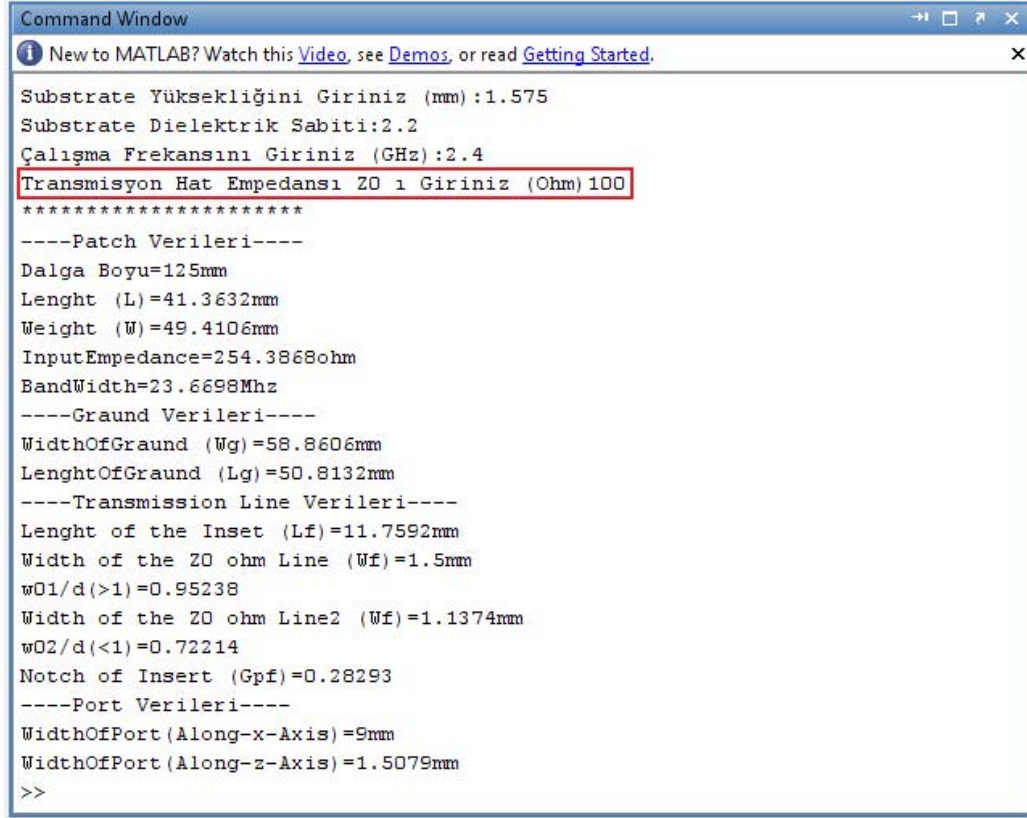
Şekil 7.29' da tasarımı yapılan 2x1 dizi anten gösterimi verilmektedir. Bu antenin tasarımında kullanılan parametreler daha önce tasarlanan mikro şerit antenin optimize değerlerinden yola çıkılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada kolaylık olması amacıyla ayrık port (discrete port, ayrık port) kullanılmıştır.



Şekil 7. 29 Tasarlanan 2x1 mikroşerit dizi anten

Her bir anten 100 Ohm'luk hatlar ile beslenmektedir. Çünkü bu hatlar daha sonra birleştirilip 50 Ohm'luk hatta bağlanacağı için 100 Ohm olması gerekmektedir [27]. Dolayısıyla hat empedansı 100 Ohm olan anten tasarımı kullanılmalıdır. Şekil 7.30' da Matlab programında hat empedansı 100 Ohm'a eşit olan 2.4 GHz anten tasarımı için

gerekli parametrelerin elde edilmesi gösterilmektedir. Şekil 7.30' dan da görüldüğü gibi iletim hattının empedansı, Z_0 değeri 100 Ohm olduğunda sadece iletim hattı için gerekli olan W_f ve L_f değerlerinde değişim olmuştur. Dizi anten tasarımında bu değerler kullanılacaktır.



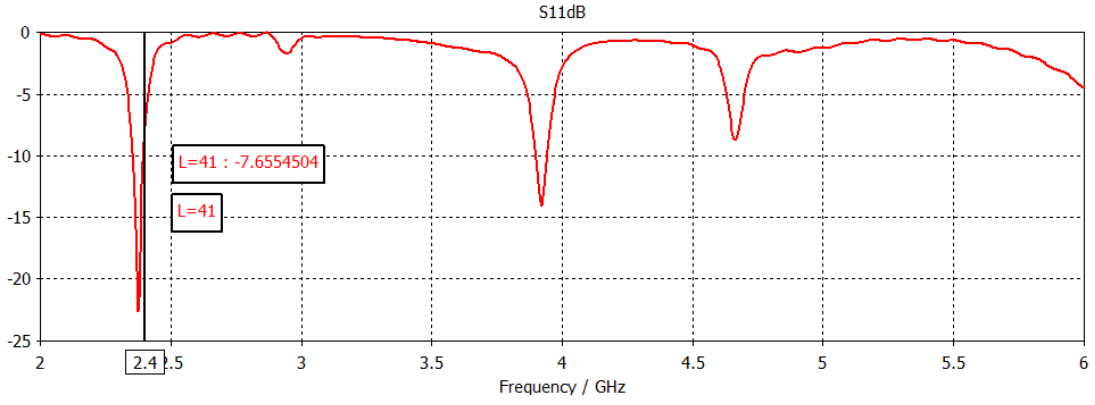
```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
Substrate Yüksekliğini Giriniz (mm):1.575
Substrate Dielektrik Sabiti:2.2
Çalışma Frekansını Giriniz (GHz):2.4
Transmission Hat Empedansı Z0 ı Giriniz (Ohm) 100
*****
----Patch Verileri----
Dalga Boyu=125mm
Lenght (L)=41.3632mm
Weight (W)=49.4106mm
InputEmpedance=254.3868ohm
BandWidth=23.6698Mhz
----Graund Verileri----
WidthOfGraund (Wg)=58.8606mm
LenghtOfGraund (Lg)=50.8132mm
----Transmission Line Verileri----
Lenght of the Inset (Lf)=11.7592mm
Width of the Z0 ohm Line (Wf)=1.5mm
w01/d(>1)=0.95238
Width of the Z0 ohm Line2 (Wf)=1.1374mm
w02/d(<1)=0.72214
Notch of Insert (Gpf)=0.28293
----Port Verileri----
WidthOfPort (Along-x-Axis)=9mm
WidthOfPort (Along-z-Axis)=1.5079mm
>>

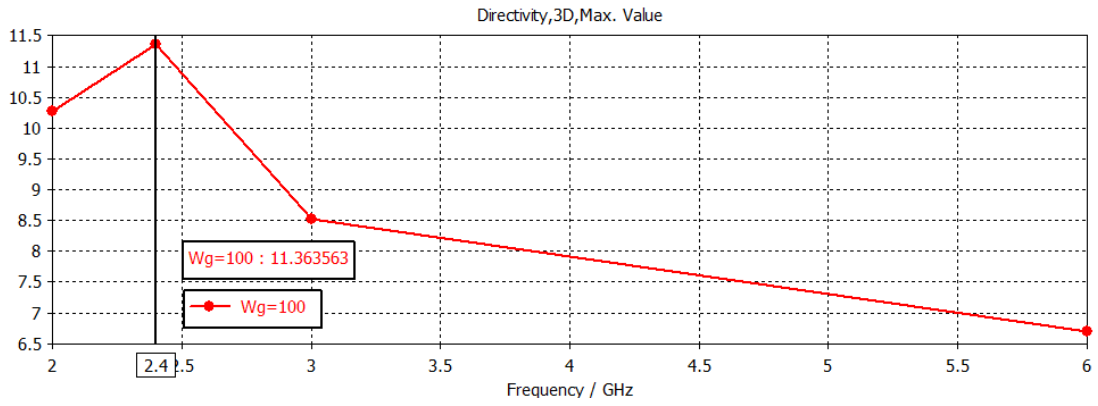
```

Şekil 7. 30 Dizi mikroşerit anten için tasarım parametrelerinin elde edilmesi

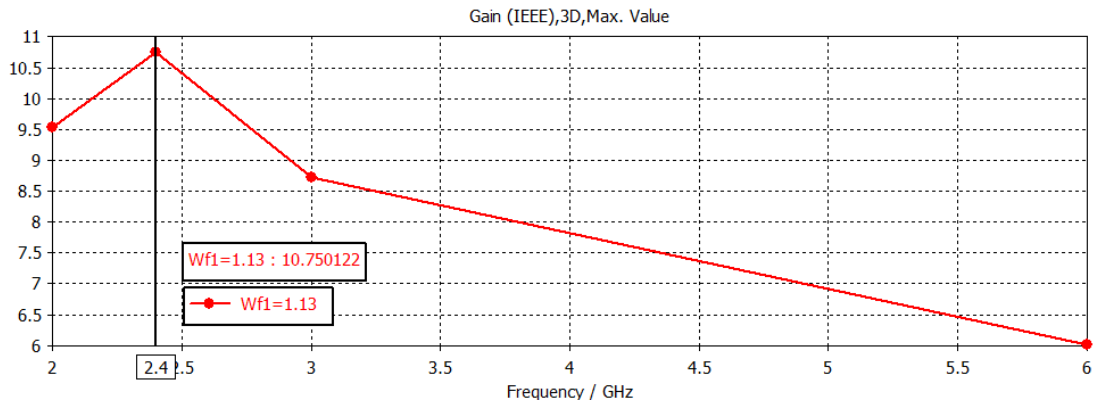
Elde edilen bu parametreler kullanılarak mikroşerit 2x1 dizi anten tasarımı yapılmıştır. Daha sonra bu tasarım simüle edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 7.31, Şekil 7.32 ve Şekil 7.33'de bu tasarım sonucu elde edilen simülasyon çıktıları verilmektedir. Şekil 7.31' de S_{11} değeri, Şekil 7.32' de yönlendiricilik kazancı ve Şekil 7.33' de anten kazancı değişimi frekansa göre verilmiştir.



Şekil 7. 31 Tasarlanan antenin S_{11} değerinin frekansa göre değişimi

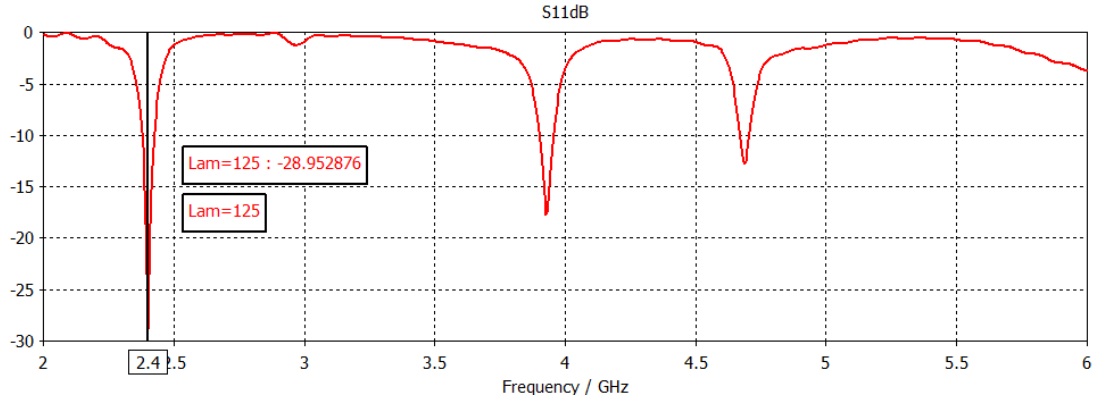


Şekil 7. 32 Tasarlanan antenin yönlendiricilik kazancının frekansa göre değişimi

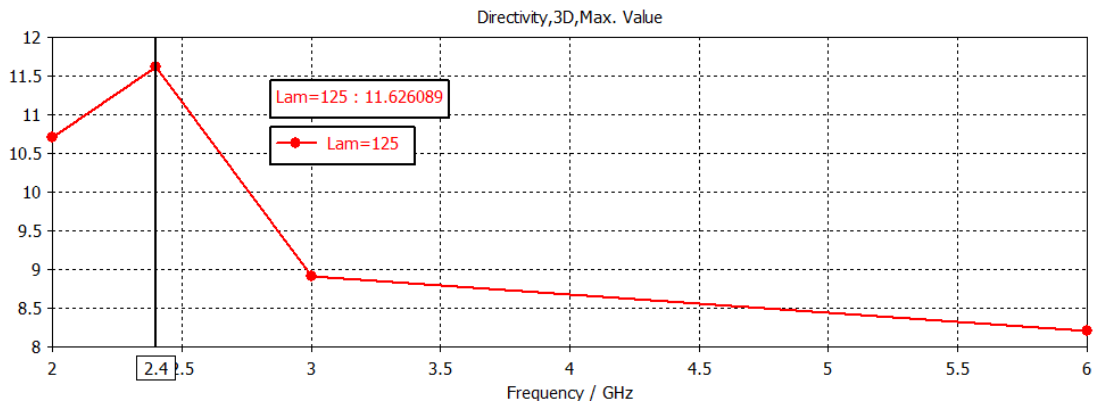


Şekil 7. 33 Tasarlanan antenin kazancının frekansa göre değişimi

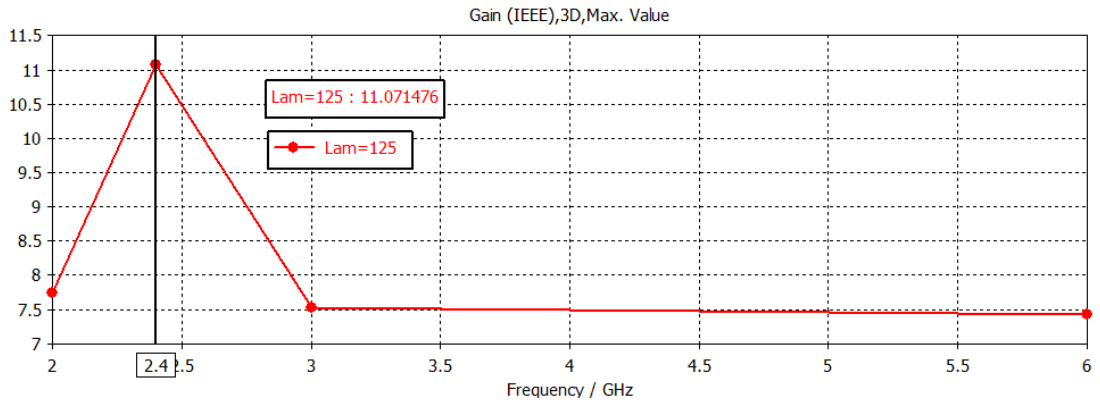
Simülasyon sonuçlarına göre en uygun değerleri elde etmek için W_g , W_{f1} ve L parametrelerinde değişiklik yapılmıştır. Bu değişik sonucu proje için tasarlanan mikroserit anten için en uygun S_{11} , VSWR, yönlendiricilik ve anten kazancı değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon sonucunda elde edilen S_{11} değeri Şekil 7.34’ de, yönlendiricilik kazancı Şekil 7.35’ de, anten kazancı Şekil 7.36’ de ve VSWR değeri Şekil 7.37’ de verilmiştir.



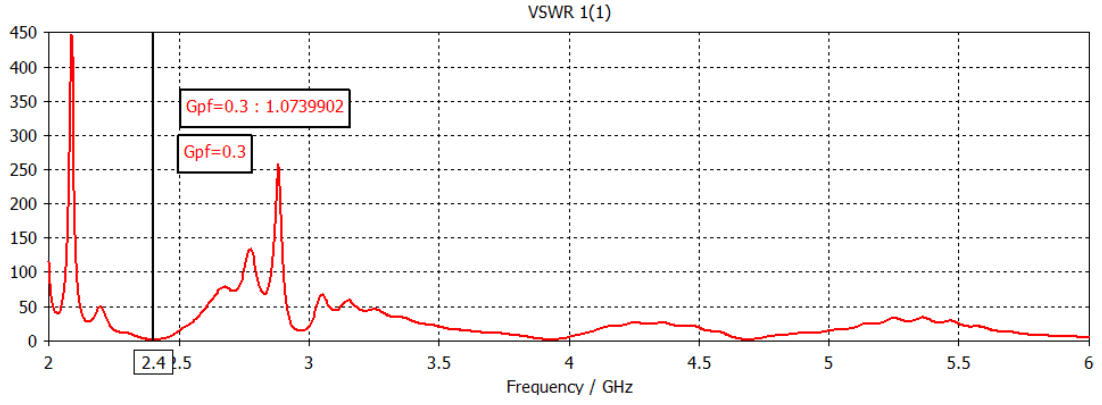
Şekil 7. 34 Optimize dizi antenin S₁₁ değerinin frekansa göre değişimi



Şekil 7. 35 Optimize dizi antenin yönlendiricilik kazancının frekansa göre değişimi

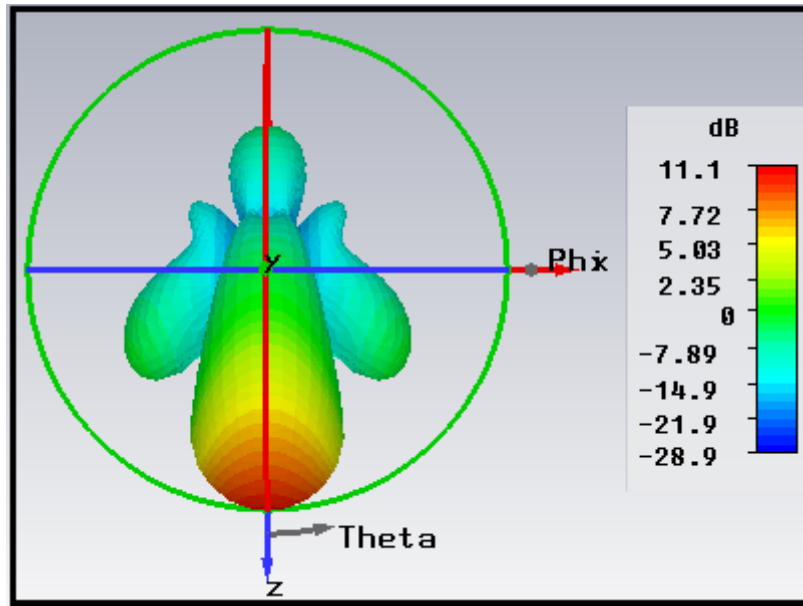


Şekil 7. 36 Optimize dizi antenin kazancının frekansa göre değişimi

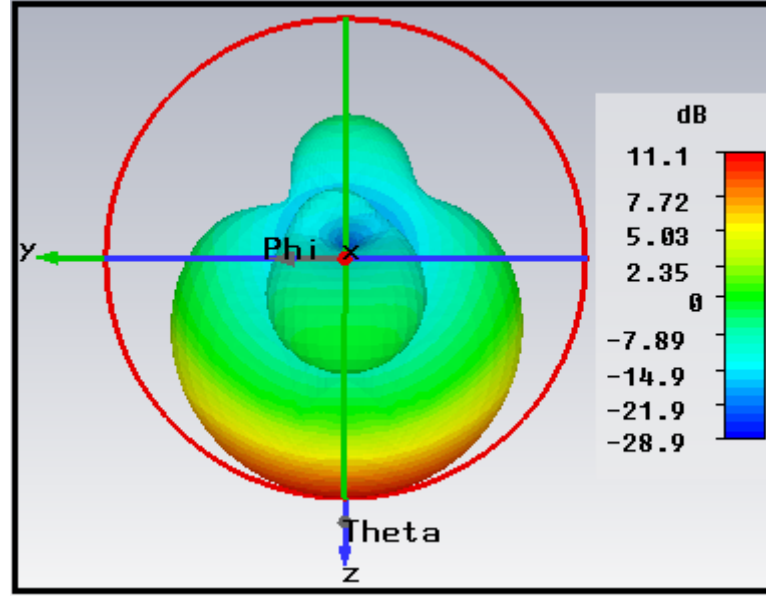


Şekil 7. 37 Optimize dizi antenin VSWR değerinin frekansa göre değişimi

Şekil 7.38 ve Şekil 7.39' de ise merkez frekans 2.4 GHz için tasarlanan mikroşerit antenin uzak alan analizi 3 boyutlu gösterimi verilmiştir.

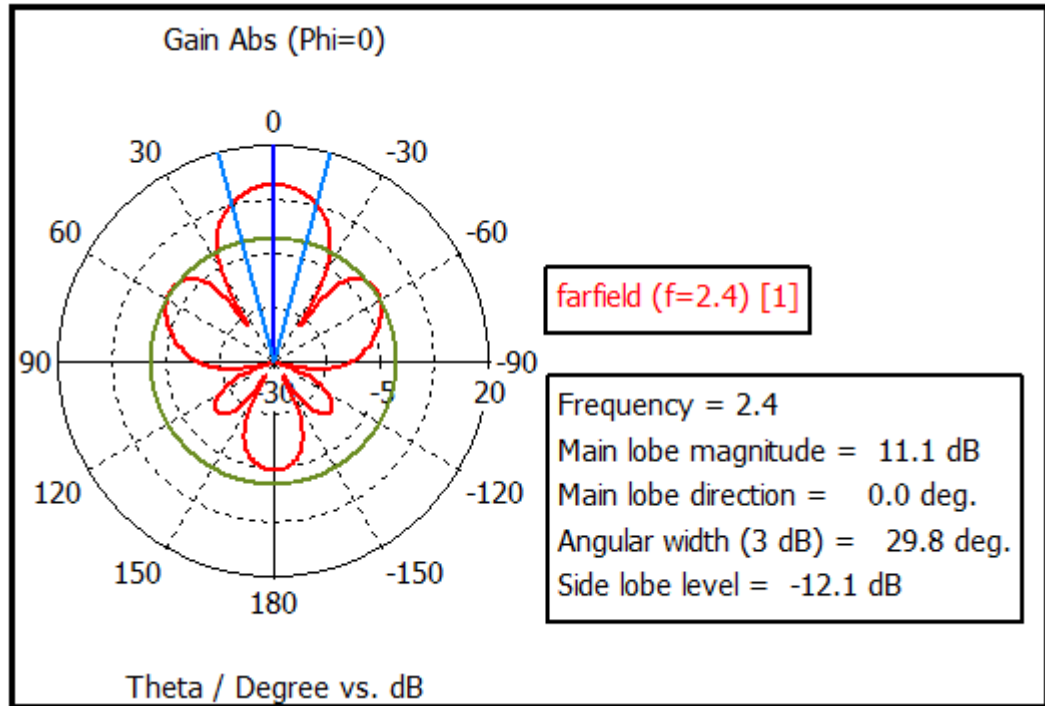


Şekil 7. 38 Tasarlanan dizi antenin yatay düzlemde uzak alan ışıması



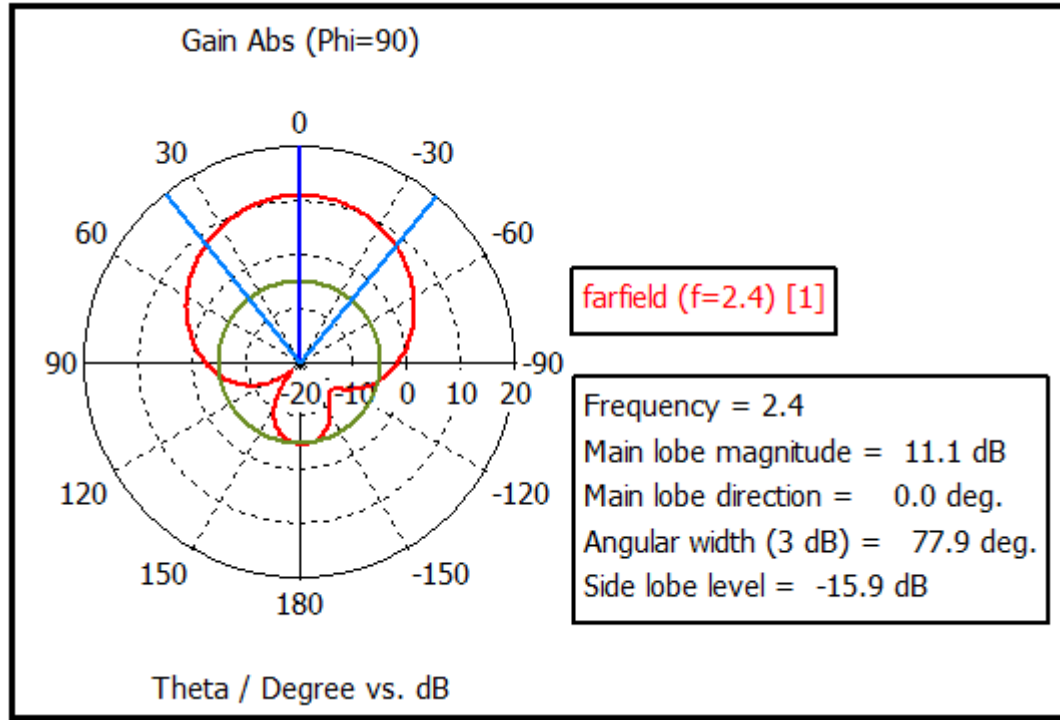
Şekil 7. 39 Tasarlanan dizi antenin düşey düzlemde uzak alan ışıması

Şekil 7.40’ da tasarlanan mikroşerit antenin yatay düzlemde ışıması gösterilmiştir. Buna göre HPBM yaklaşık olarak 30° ’ dir. Bu açı değeri proje için düşünülen otomatik yönlendirilebilir anten için en uygun değerdir.



Şekil 7. 40 Tasarlanan dizi antenin yatay düzlemde ışımasının polar çizimi

Şekil 7.41’da tasarlanan mikroşerit antenin düşey düzlemde ki 2.4 GHz merkez frekansında ki ışıması verilmiştir. Bu değere göre haberleşme linki düşey düzlemde herhangi bir yönlendirmeye ihtiyaç duymadan LOS haberleşme sağlamaktadır.



Şekil 7. 41 Tasarlanan dizi antenin düşey düzlemde ışımasının polar çizimi

Mikroşerit anten tasarımı çalışması sonucu istenen anten elde edilmeye çalışılmıştır.

Buna göre anten tasarımında kullanılan parametreler Çizelge 7.4' de verilmiştir.

Çizelge 7. 4 Tasarımda kullanılan anten parametrelerinin optimize değeri

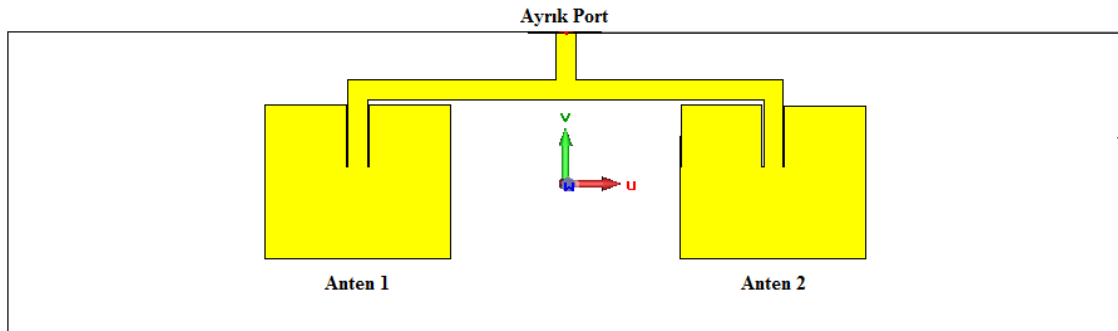
Parametre	Değer
G_{pf}	0,3
L	40,5
L_{am}	125
L_{f1}	14
L_{f2}	31
L_{f3}	18
L_g	80
W	50
W_{f1}	1,3
W_{f2}	5,3
W_g	150
h	1,575
t	0,1
Tüm Parametre Birimleri mm'dir.	

Çizelge 7.4' de verilen tasarım parametrelerinin ışığında tasarlanan anten parametreleri ise Çizelge 7.5' de verilmektedir.

Çizelge 7. 5 Tasarlanan antenin parametre değerleri

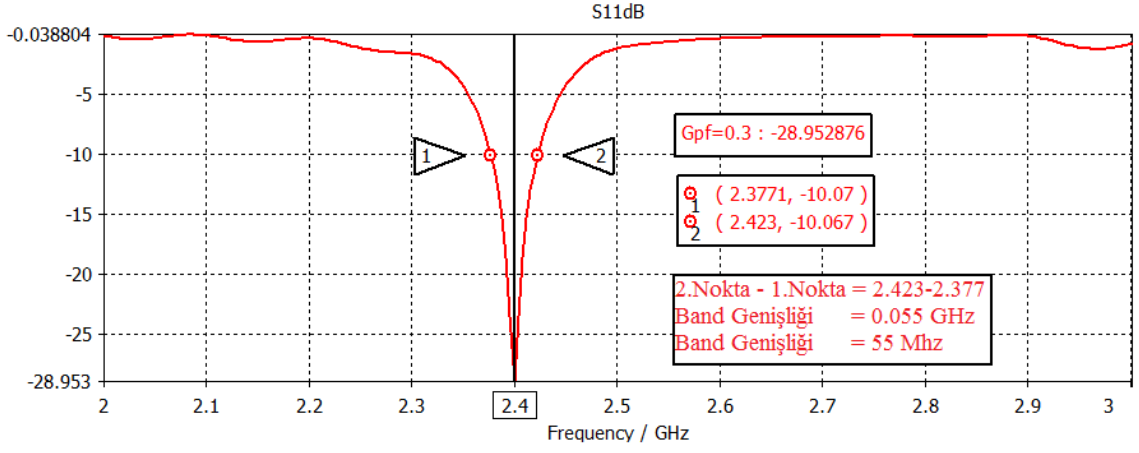
Anten Parametresi	Değer	Parametre
Merkez Frekans	2.4	GHz
Anten Kazancı	11	dBi
Yönlendiricilik Kazancı	12	dBi
S_{11}	-29	dB
HPBW Yatay	30	Derece
HPBW Düşey	80	Derece
VSWR	1.07	
Yansıma Katsayısı	0.03	
Band Genişliği	55	MHz
Boyut	8x15	cm

Burada Çizelge 7.4' de verilen parametreler kullanılarak elde edilen anten parametreleri, proje için düşünülen otomatik yönlendirilebilir anten için düşünülen en uygun yaklaşık değerlerdir. Tasarlanan anten ise Şekil 7.42' da parametreleri ile gösterilmektedir.



Şekil 7. 42 Tasarlanan optimize mikroşerit dizi anten

Bölüm 6.1.6.6’ da band genişliği hesabı anlatılmıştı. Buna göre S_{11} değerinin merkez frekans etrafında ki düşüşlerinde -10 dB noktaları saptanacak ve bu noktalar arasında ki fark band genişliğini verecektir [12]. Buna göre S_{11} değerinin frekansla değişimi grafiğinden hesaplanan band genişliği Şekil 7.43’ de verilmiştir



Şekil 7. 43 S_{11} değerinden band genişliği hesabı

BÖLÜM 8

İHA VERİ LİNKİ TASARIMI

Bu çalışma da “Çok Maksatlı Hibrid İnsansız Hava Aracı Sistemi Geliştirilmesi” isimli Santez projesi kapsamında İHA sisteminde kullanılan video vericisi için aşağı link (Downlink) tasarımı gerçekleştirilmek istenmiştir. Burada tasarım için İHA’nın ve video vericisinin teknik özellikleri dikkate alınmıştır. Video vericisi ve tasarlanan anten parametreleri göz önüne alınarak link bütçe hesabı yapılacaktır.

8.1 Video Vericisi

Veri linki tasarımında en önemli husus olan link bütçe hesapları, güncel ve gerçek ortam şartları düşünülerek yapılmıştır. İHA’ nın teknik özellikleri Çizelge 8.1’ de verilmiştir.

Çizelge 8. 1 Proje kapsamında ki İHA’ nın teknik özellikleri

Uçuş Süresi	7 Saat
Yükseklik	>2000 Metre
Faydalı Yük Ağırlığı	50 kg
Haberleşme Menzili	>100 Km
Seyir Hızı	60-100 Knot
Sınıf	MALE

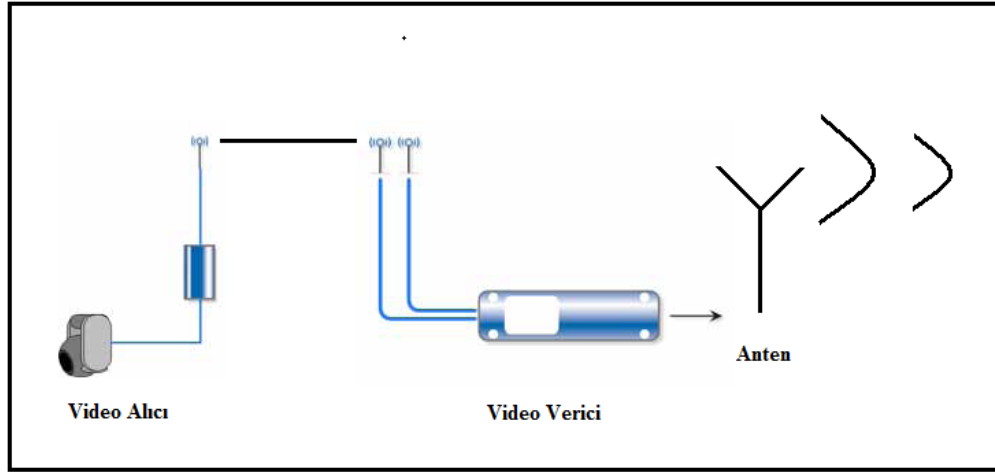
Video vericisi proje kapsamında hazır çözüm olarak düşünülmüştür. İHA üzerinde bulunan video alıcısı tarafından elde edilen veriler bu verici aracılığıyla YVT’ ye gönderilmektedir.

Bu çalışmada yapılacak veri linki ile bu işlemin güvenilir ve kaliteli olması sağlanmak istenmiştir. Video vericisinin özelliklerine gelince Çizelge 8.2’ de verilmektedir.

Çizelge 8. 2 Projede kullanılan video vericisinin teknik özellikleri

Video Vericisinin Teknik Özellikleri	
Frekans	2,0 GHz to 2,7 GHz*** (300 MHz steps)
Kanal Band Genişliği	6, 7, 8MHz
RF Güç Çıkışı	5W/10 W Anahtarlmalı
Modülasyon	COFDM 2k QPSK, 16QAM, 64QAM FEC 1/2, 2/3, 3/4 Guard 1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Video Kodlama	MPEG-2 4:2:0 SP@ML MPEG-2 4:2:0 SP@HL MPEG-2 4:2:2 in SD and HD
Ses Kodlama	MPEG Layer 2
RF Out	50 Ohm
Güç Girişi	28 VDC
Güç tüketimi	< 150 W
Uyumluluk	CE marked in Accordance with EU Low Voltage and EMC Direc-tives EMC Compliance: EN55022, EN55024
Sıcaklık	-10°Cto +48°C (-14°F to +118°F)
Boyutlar	CT2440ARINC SD/HD: 124 x 230 x 215 mm (approx. 4,88‘‘ x 9,06‘‘ x 8,46‘‘)
Ağırlık	CT2440ARINC SD/HD: 5,5kg (12,13 lbs)
*** Talebe Göre Diğer Frekanslar Mümkündür.	

Yukarıda ki veriler dikkate alınarak veri linki hesaplanmıştır. Bunun sonucunda 150 Km üzeri menzile elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 8.1’ de videonun İHA’ dan elde edilmesi ve YVT’ ye gönderilmesi işlemi verilmektedir.



Şekil 8. 1 Video elde edilmesi ve YKİ' ye aktarım işlemi

8.2 Anten Kazancı

Yapılan mikro şerit anten tasarım çalışmasında link bütçe hesabında kullanılacak olan antenin kazanç değeri elde edilmiştir. “Anten kazancı” link bütçe hesabında önemli bir parametredir. Çünkü ihtiyaç duyulan menzil değerini üstel olarak etkilemektedir. Dolayısıyla antende elde edilen küçük kazanç değişimi haberleşme menzili için büyük derecede kazanım sağlayacaktır.

8.3 Link Bütçe Hesabı

Link bütçesi link analizinin çıkışıdır. Link bütçesi alıcıda girişim yaratan gürültü gücünün ve kullanılabilir sinyal gücünün tablolaştırılması ve hesaplanmasını içerir [16].

Askeri uygulamalarda amaç kötü durum altında (Girişim, Sönümleme, Gürültü ve Zayıflama gibi) gerekli haberleşmeyi sağlamaktır. Genel olarak link kalitesini artırma yöntemleri aşağıda ki gibidir [9].

- Yönlü anten kullanımı
- Kesin ve güvenilir bir modülasyon tekniği kullanımı
- Ayrık spektrum tekniklerinin kullanımı
- Hata düzeltme yanıtı

Yukarıda ki tasarım önerileri kesin ölçekte karmaşıklığı, esnekliği ve maliyeti de beraberinde getirir. Aynı zamanda link performansı daha iyi bir şekilde dengeli ve güvenilir bir link sunar.

Haberleşmenin kalitesi genel anlamda aşağıda verilen iki değerin hesabıdır [9].

- Vericiden ışıyan güç
- Alıcıda haberleşme için gerekli olan minimum güç

Bu bağlamda “link kalitesi alıcı ve verici arasında ki müsaade edilebilir maksimum yol kaybından (MAPL, Maximum Allowable Path Loss) hesaplanır”. [16]

Link kalitesi için en önemli araç link bütçesidir. Link bütçesi kazançların ve kayıpların dengesidir. Aşağıda link bütçesi parametreleri verilmektedir [16].

- Verici gücü (dB)
- Anten kazançları (dBi)
- İşlem kazancı (dB)
- Sinyal yayılım kayıpları (dB)
- Sönümlmeler (dB)
- Gürültü (dB)
- Sinyal uygulamaları ve işlemci devrelerinde ki kayıplar (dB)

8.4 Link Parametreleri

Link parametreleri link bütçe hesabında kullanılan anten kazançları, gürültüler, kayıplar ve haberleşmede kullanılan sistem özelliklerine bağlı parametrelerdir.

8.4.1 Gürültü

Gürültü, etkili bir sistem tasarımı için mümkün olacak kilit terminolojilerdendir. Haberleşme sistemlerini birçok alanda sınırlandıran en önemli etkidir. En önde gelen gürültü tipi ısı gürültüdür. Haberleşme sistemlerinin ve iletim hatlarının ısılarından dolayı doğal olarak ortaya çıkar. Isıl gürültü rastgele harekete sahip olan elektronların hızlarının ısıyla artmasıyla ortaya çıkar [9]. Isıl gürültü frekans spektrumu boyunca yayılır ve Gaussian genlik dağılımına sahiptir. Isıl gürültü doğrudan sıcaklık ve band genişliğine bağlıdır. Isıl gürültü değeri eşitlik (8.1)’ de verilmiştir.

$$N_{th} = k \cdot T \cdot B \quad (8.1)$$

N_{th} , Isıl gürültü şiddeti

k , Boltzman sabiti

T , sıcaklık (Kelvin)

B , Bant genişliği

Alicıların yükselteçleri sinyalleri yükseltme işlemlerinde sinyale gürültü katarlar. Böylece yükselteçten çıkan sinyalin SNR değeri her zaman girişten düşüktür. Bu etkiye sebep olan gürültüye gürültü şekli (NF, Noise Figure) denir. Dolayısıyla toplam gürültü eşitlik (8.2)' de verilen değere eşit olur. Bu toplam gürültüye, gürültü zemini (N_f , Gürültü Zemini, Noise Floor) denir.

$$N_f = k \cdot t \cdot B \cdot NF \quad (8.2)$$

$$N_f = 174 + 10 \cdot \log_{10}(BW) + NF(dBm) \quad (8.3)$$

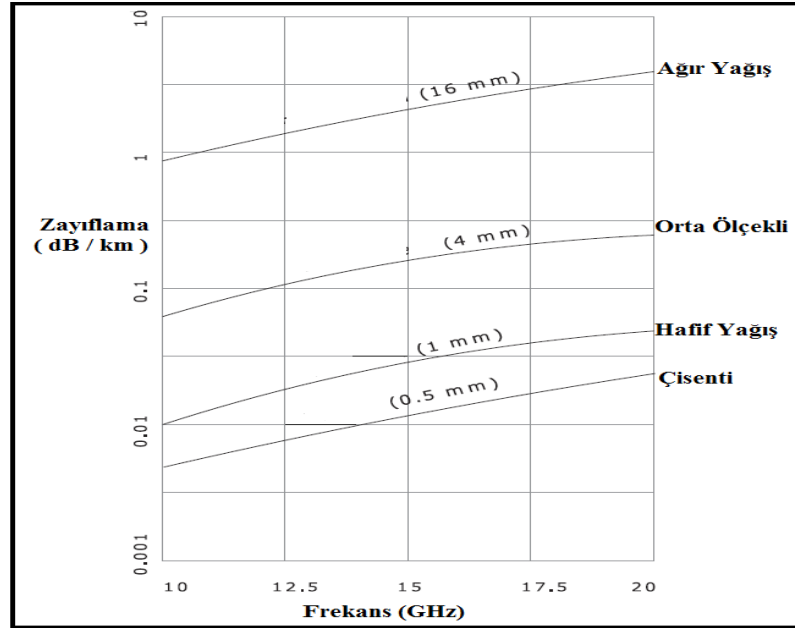
8.4.2 Yağış Kayıpları

Yüksek frekansta çalışmanın avantajı küçük boyutlarda anten kullanabilmektir. Ancak 10 GHz ve üstü frekanslarda yağışlardan dolayı çok fazla zayıflama görülür. 10 GHz'in altında ise çoklu yol sönmömleri daha baskındır. Özellikle bu zayıflama 15 GHz'in üstünde çok daha fazladır. Ayrıca yağışların meydana getirdiği zayıflama yola da bağlıdır. 10 km'den sonra zayıflama en fazla değerine ulaşır. Buna karşılık düşey polarizasyonlu antenler yağış zayıflatmasından daha az etkilenir [16].

İİHA haberleşme linki tasarımında sönmömler marjini (Fade Margin, Sönmömler Marjini) değeri yağış zayıflatmasından ve güvenlik seviyesinden kaynaklı olarak değerlendirilecektir.

Yol erişilebilirliği ve link güvenilirliği zamanında alınan sinyal değerinin yüzdesinin gereken eşik değerinin üstünde alınmasıdır. Eğer link bütçesi içerisinde yeterli bir sönmömler marjini oluşturulursa bağlantı güvenilirliği daha iyidir. Link kullanılabilirliği radyo frekansı, sönmömler marjini, yol uzunluğu ve bölgesel iklime bağlı bir fonksiyondur. Dünyanın değişik yerlerinde iklime bağlı olarak sönmömler marjinleri farklılık arz eder. Tipik olarak sönmömler marjini sönmömler ve yağış zayıflatmaları için 4–40 dB'dir [16]. Bu değer yağış miktarı, uzaklık artışı, yüksek frekans ve yatay

polarizeli anten kullanımı ile artar. Şekil 8.2' de yağış miktarı göz önüne alındığında kaybın frekansa göre değişimi verilmiştir.



Şekil 8. 2 Yağış zayıflatması

8.4.3 Kablo Kayıpları

Kablo kaybı video alıcısından video vericisine sinyalin ulaşımı esnasında gerçekleşir. Takribi olarak 5m kablo kullanılması öngörülmüştür. Buna göre Çizelge 8.3' de verilen kablo tiplerinden düşük kayıplı ve esnek olmasından dolayı 1/2" LDF kullanılacaktır. Bunun sonucunda kablo kaybı yaklaşık 1 dB olmaktadır.

Çizelge 8. 3 Farklı kablo modelleri için kayıplar.

Cable Tipi	2.4 GHz Kayıp dB/100 feet	2.4 GHz Kayıp dB/100 m
RG-58	32.2	105.6
RG-8X	23.1	75.8
LMR-240	12.9	42.3
RG-213/214	15.2	49.9
20.2	7.7	25.3
LMR-400	6.8	22.3
3/8" LDF	5.9	19.4
LMR-600	4.4	14.4
1/2" LDF	3.9	12.8
7/8" LDF	2.3	7.5
1 1/4" LDF	1.7	5.6
1 5/8" LDF	1.4	4.6

8.4.4 Akım Bileziği Kayıpları

Akım bileziği (Slip-Rings) otomatik yönlendirilebilir anten sistemine yatay düzlemde 360° dönme kabiliyeti kazandırmak için kullanılmaktadır. Ancak dönel kısım tamamen tamamlanmamış sürtünme ile teması sahip bir hat olduğu için bir miktar kayıp yaşanmaktadır. Bu sistemde altın, gümüş ve karbon gibi kaybı azaltıcı malzemeler kullanılmaktadır. Ayrıca fırçalı sistemlere sahip dönel bileziklerde vardır. Dönel bilezik sistemlerinde hesaba katılması gereken en önemli üç parametre aşağıda verilmiştir.

- Sinyal kayıpları
- Geri dönüş kayıpları
- Gürültü

Ancak haberleşme uygulamaları için yüksek frekanslarda düşük kayıplı ve düşük gürültülü dönel bilezik bulmak mümkündür. Ayrıca haberleşme uygulamaları için tasarlanan dönel bilezikler yukarıda verilen parametreler dikkate alınarak tasarlanmaktadır.

Link bütçe hesabında kablo kayıpları ve dönel bilezik kayıpları kablo kayıpları olarak verilecektir. Bu değer yaklaşık olarak 5 dB seçilmiştir.

8.4.5 Anten Kazançları

Anten kazançları alıcı ve verici anten kazançlarıdır. Verici anten bu çalışmada tasarımı yapılan 11 dBi kazanca sahip mikro şerit 2x1 dizi antendir. Tasarımı bu çalışma kapsamında yapılan anten 11 dBi kazanca sahiptir. Alıcı anten ise hazır çözüm olarak kullanılan BMS firmasının TAS 500S modellenli takip antenidir. S bandı için kazancı 24 dBi kazanca sahiptir.

8.4.6 BER Analizi

Sayısal haberleşme sistemlerinde hatalı bitlerin sayısı, haberleşme kanalında gürültü, girişim, bozulma ve senkronizasyon hatalarından dolayı değişim gösteren bit sayısıdır [15]. BER değeri, çalışılan zaman aralığında toplam iletilen bit sayısının hatalı bit sayısına bölünmesiyle elde edilir. Kanal modeli olarak AWGN (Additional White Gauss Noise, Eklemeli Beyaz Gauss Gürültülü) kanal modeli seçildiği zaman BER değeri analitik olarak E_b/N_0 'ın (E_b/N_0 , Bit Enerjisi/Gürültü Enerjisi) fonksiyonu şeklinde elde edilir. Çizelge 8.4' de, BPSK (Binary Phase Shift Keying, İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying, Dördül Faz Kaydırmalı Anahtarlama), M - PSK (M - Phase Shift Keying, Faz Kaydırmalı Anahtarlama) ve M - QAM'e (Qaudrature Amplitude Modulation, Dördül Genlik Modülasyonu) göre BER değerinin belirlenmesi görülmektedir (15).

Çizelge 8. 4 Modülasyon türüne göre BER değerinin elde edilmesi

MODÜLASYON	BER
BPSK	$0.5\text{erfc}(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}})$
QPSK	$0.5\text{erfc}(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}})$
M – PSK	$\frac{1}{m}\text{erfc}(\sqrt{\frac{mE_b}{N_0}} \sin(\frac{\pi}{M}))$
M – QAM	$\frac{2}{m}(1 - \frac{1}{\sqrt{M}})\text{erfc}(\sqrt{\frac{3mE_b}{2(M-1)N_0}})$
$m = \log_2(M)$	m, sembol başına bit sayısı M, sembol seviyesi

Haberleşme sistemlerinin performansı için standardı alınan sinyalin gürültüye oranı, C/N (C/N, Carier/Noise, Taşıyıcı Gücü/Gürültü Gücü) olarak tanımlanır. Bu değer istenen sinyalin istenmeyen sinyale oranı olarak ifade edilmektedir. Eğer C/N değeri küçükse alıcı sistem iletilen sinyali tespit edemeyecektir. Bu gürültünün iletilen sinyali bastırdığı anlamına gelir. Alıcı sistemin hassasiyeti hangi değerdeki C/N'yi belirleyebileceğidir. C/N değeri alınan sinyal gücü ve gürültü değerlerinden elde edilir. Gürültü değerleri daha önceki bölümde belirtilmişti. C/N değeri SNR (SNR, Sinyal Noise Ratio, İşaret Güürltü Oranı) değerinin sayısal haberleşmede ki karşılığıdır [15].

$$\frac{C}{N} = \frac{P_r}{k \cdot T \cdot B} \quad (8.4)$$

Eşitlik (8.4), dB olarak düzenlenirse, eşitlik (8.5)' de ki gibi olur.

$$\frac{C}{N} = EIRP + G_r - P_L - N_T \quad (8.5)$$

Analog haberleşme sistemleri için taşıyıcı gücünün gürültü gücüne oranı standart bir performans metriğidir. Ancak sayısal haberleşme sistemlerinde bit hata oranı (BER, Bit Error Rate, Bit Hata Oranı) sistemin performansını belirler. BER değeri bozulmuş sinyallerin alınma olasılığıdır. Haberleşme sisteminin türüne bağlı olarak haberleşme sistemi kesin bir değerde BER değerine sahip olması gerekir. Veri iletim sistemlerinde bu değer 10^{-6} olması istenir [15]. BER değeri, kullanılan modülasyonun türüne göre bit enerjisinin bit başına gürültü yoğunluğuna oranının (E_b/N_0) fonksiyonu olarak ifade edilir. Büyük E_b/N_0 değerleri bit hata oranının düşük olacağı anlamına gelmektedir. İdeal bir sistemde E_b/N_0 değeri (8.6)' da verilen eşitliklerle hesaplanır.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \cdot \frac{B}{R_b} \quad (8.6)$$

E_b , Bit enerjisi

N_0 , Isıl Gürültü

C, Taşıyıcı Gücü

N, Gürültü Gücü

B, Band Genişliği

R_b , Bit Hızı

Analog veya sayısal haberleşme sistemlerinde modülasyon tekniği bilgiyi taşıyıcı frekanslar üzerine ekleme tekniğidir. Haberleşme sistemlerinde en genel anlamda üç tip modülasyon tekniği kullanılmaktadır [16].

- Faz Modülasyonu
- Frekans Modülasyonu
- Genlik Modülasyonu

Bu çalışma da İHA sistemleri için sayısal modülasyon şemaları üzerinde durulacaktır. Haberleşme sistemi tasarımcıları taşıyıcı başına daha fazla yük eklemek için çok farklı teknikler de şemalar kullanmaktadır. Bu teknikler band genişliği verimini arttırmaktadır. Band verimi (8.7) eşitliğinde verilmiştir.

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad (8.7)$$

η , Band genişliği verimi

R_b , Bit hızı

B , Band genişliği

Modülasyon tekniği altında ki tüm bu işlemler taşıyıcı fazının, frekansının ve genliğinin varyasyonlarıdır. Bir modülasyon tekniğinde ki M değeri modülasyon işleminde kaç tane faz, frekans ve genlik seviyesinin kullanıldığını gösterir. Çizelge 8.5, Çizelge 8.6 ve Çizelge 8.7' de üç farklı sayısal modülasyon şemalarını ve bu şemaların karakteristik parametre değerlerini göstermektedir [15].

Çizelge 8. 5 M-QAM modülasyonunun parametreleri

M-QAM						
M	4	16	64	256	1024	4096
η	1	2	3	4	5	6
E_b/N_0 (BER = 10^{-6})	11	15	19	24	28	33,5

Çizelge 8. 6 M-PSK modülasyonunun parametreleri

M-PSK						
M	2	4	8	16	32	64
η	0,5	1	1,5	2	22,5	3
E_b/N_0 (BER = 10^{-6})	10,5	10,5	14	18,5	23,4	28,5

Çizelge 8. 7 M-FSK modülasyonunun parametreleri

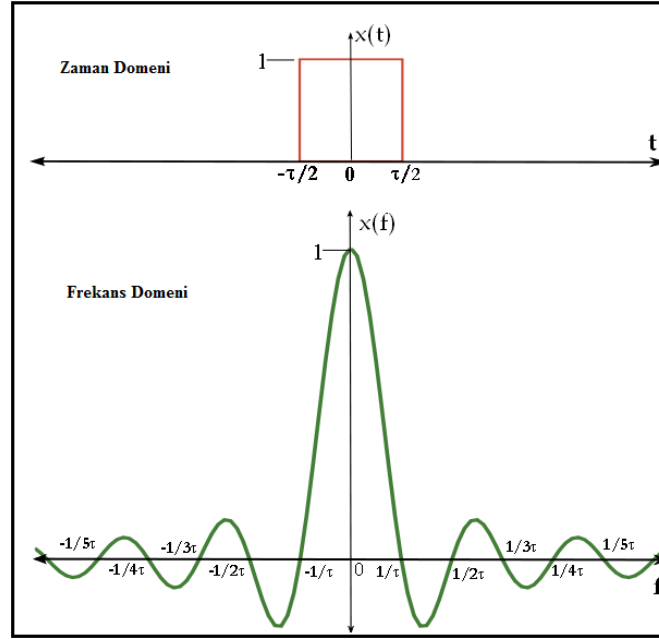
M-FSK						
M	2	4	8	16	32	64
η	0.4	0.57	0.55	0.42	0.29	0.18
E_b/N_0 (BER = 10^{-6})	13.5	10.8	9.3	8.2	7.5	6.9

l değeri ise M ile alakalı olup sembol başına bit oranını tanımlar. Sayısal modülasyonda girişteki bit hızı (R_b) farklı bir bit hızıyla sistemden çıkar. Sistem çıkışındaki bit hızı sembol hızı (R_s) olarak adlandırılır. Bu sembol hızı modülasyon şemasının M değerine bağlıdır. Bit hızı ile sembol hızı arasındaki bağlantı eşitlik (8.8)' de verilmiştir.

$$R_s = \frac{R_b}{l} \quad (8.8)$$

$$l = \log_2 M \quad (8.9)$$

Son olarak sayısal modülasyon işlemi sonucunda band genişliği, modülasyonun türüne bağlı olarak bit hızı ve uygulanan darbenin biçimine bağlıdır. Haberleşme kanalında iletilen her bir sayısal darbenin biçimi zaman domenindeki darbenin biçimidir. Şekil 8.3' de yükselen kosinüs darbe biçimi verilmiştir [15].



Şekil 8. 3 Yükselen kosinüs darbe biçimi

Daha küçük band genişliğine ihtiyaç duymasından dolayı yükselen kosinüs darbe biçimi diğer darbe biçimlerine göre en sık kullanılandır. Eşitlik (8.10) yükselen kosinüs darbe biçiminin kullanılması sonucundaki band genişliğini vermektedir.

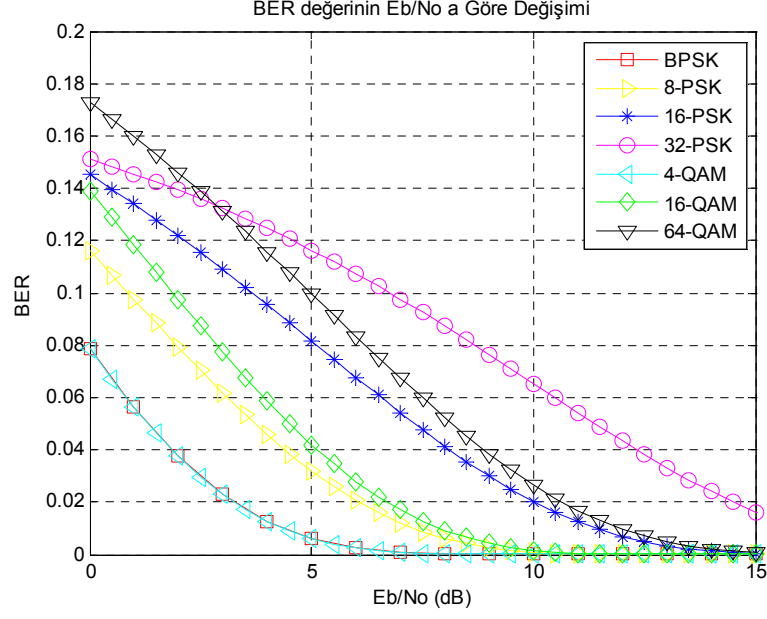
$$B = R_s (1 + r) \quad (8.10)$$

r , rolloff faktörü

Haberleşme sistemi tasarımında, sistem tasarımcıları sistemin çalışıp çalışmayacağını kesinlikle öngörmelidirler. Sistemin güvenilirliği yani BER değeri, gereken C/N oranına bağlıdır. Alıcıda ki C/N ise link bütçe hesabıyla elde edilir. Yani tasarım çalışmasında öncelikle bu BER değerine karar verilir buna göre alıcı sistemin talep edeceği C/N değeri hesaplanır. Daha sonra belirli bir menzile için kayıplar, kazançlar, verici gücü ve marjın değerleri göz önüne alınarak C/N değeri elde edilir.

8.4.7 Modülasyon Seçimi

Çizelge 8.2’ de video vericisinin desteklemiş olduğu modülasyon türleri verilmişti. Bu çalışma için QPSK sayısal modülasyonu seçilmiştir. Bunda menzile artırımı için negatif etkide bulunan C/N değerini düşürme seçeneği en başta gelmektedir [15]. Bunun yanında güvenilir bir haberleşme sistemi tasarımı da önemli bir etkidir. Şekil 8.4’ de BER değerine göre C/N değerinin değişimi gösterilmektedir. Burada QPSK modülasyonu BPSK modülasyonu ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 8. 4 BER değerinin Eb/No' a göre değişimi

QPSK sayısal modülasyon türüne göre modülasyon parametreleri Çizelge 8.8' de verilmiştir.

Çizelge 8. 8 QPSK modülasyonuna göre modülasyon parametreleri

Parametreler	Değerler	Birim
M	4	
l	2	
η	1	
E_b/N_0 (BER = 10^{-6})	10.5	dB

Daha önce denklemlerden hesaplamalar yapıldığında QPSK modülasyonu için 10^{-6} güvenlik seviyesinde elde edilen değerler ve işlemler aşağıda verilmiştir.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \cdot \frac{B}{R_b} = \frac{C}{N} \frac{R_b}{\eta \cdot R_b} \quad (8.11)$$

$$\frac{C}{N} = \eta \cdot \frac{E_b}{N_0} \quad (8.12)$$

$$\frac{C}{N} = 1 \cdot 10.5 = 10.5(dB) \quad (8.13)$$

Eşitlik (8.13)' den görüldüğü üzere C/N değeri 10.5 dB olarak elde edildi. Bu değer belirli bir güvenlik seviyesinde (BER = 10^{-6}) haberleşme sistemi için alıcının ihtiyaç

duyduğu değerdir. Link bütçe hesabında bu değer referans alınarak alıcının hassasiyeti hesaplanacaktır.

Band genişliği ise aşağıda ki işlemler sonucu elde edilir.

$$B = \frac{R_b}{l} \cdot (1 + r) \quad (8.14)$$

$$B = \frac{R_b}{2} \cdot (1 + 0.2) = 0.6 \cdot R_b \quad (8.15)$$

Band genişliği, QPSK sayısal modülasyona göre elde edilen eşitlik (8.15)' in sonucuna göre değerlendirilirse, bit hızının 0.6 katı olarak ifade edilmektedir.

8.4.8 Güvenlik Seviyesi ve Sönümlleme Marjini

Önceki bölümde güvenlik seviyesinin bir haberleşme sistemi için öneminden sıkça bahsedilmişti. Bu bölümde ise güvenlik seviyesinin hesaplanması ve matematiksel ifadesi anlatılacaktır. Genel olarak güvenlik seviyesi herhangi bir servis sağlayıcısının veya tasarımcının kapsamaya dair güvenlik seviyesidir [16]. Bir d_i noktasındaki güç eşitlik (8.16)' da ki gibi belirlenir.

$$P_{di} = P_0 - \gamma \cdot \log \frac{d_i}{d_0} \quad (8.16)$$

P_0 , d_0 referans noktasındaki güç

γ , Yol kaybı üssü

P_{di} , Ortalama güç

Eğer verilen bir ortalama güç ve standart sapma (genellikle 8 dB) için menzıl değeri x rastgele değişken ise bu rastgele değişkenle ilişkili olarak güvenlik seviyesi hesaplanabilir. Böylece standart olasılık fonksiyonu kullanılarak güvenlik seviyesi hesaplanabilir [16].

$$P(x \geq L) = P\left(\frac{x - P_{d1}}{\sigma} \geq m\right) \quad (8.17)$$

L , Eşik değeri

P_{d1} , Ortalama alınan güç

Eğer L değeri aynı P_{d1} değerine karşılık artarsa güvenlik seviyesi düşecektir. Örneğin, $P_{d1} = -80$ dBm ve istenen güvenlik seviyesi % 30 olduğu varsayılımsın. Sinyal seviyesi

hangi değerden büyük veya eşit olacaktır. Sinyal seviyesinin üstünde bir değer için sinyal gücü verildiğinde güvenlik seviyesinin ne kadar artacağı belirlenir. % 30 güvenlik seviyesine karşılık $m = 0,5$ 'dir [16].

$$P\left(\frac{x - P_{d1}}{\sigma} \geq 0.5\right) = \%30 \quad (8.18)$$

$$x - P_{d1} \geq 0.5 \cdot \sigma \quad (8.19)$$

$$x \geq 0.5\sigma + P_{d1}$$

$$x - P_{d1} \geq 0.5 \cdot \sigma \quad (8.20)$$

$$x \geq 0.5 \cdot (8) + (-80dBm) \quad (8.21)$$

$$x \geq -76dBm \quad (8.22)$$

Buna göre -76 dBm %30 güvenlik seviyesi için eşik sinyal değeridir. Dolayısıyla sinyal seviyesi %30 güvenlik seviyesi için -76 dBm eşit veya büyük olmalıdır.

Eğer güvenlik seviyesi %50 ise,

$$P\left(\frac{x - P_{d1}}{\sigma} \geq 0\right) = \%50 \quad (8.23)$$

$$x \geq -80dBm \quad (8.24)$$

Böylece güvenlik seviyesinin artması için beklenen sinyal seviyesi daha düşük olmalıdır. Bir seviye tasarımında link bütçesiyle çalışırken sönümlleme marjini eklenmesi güvenlik seviyesini artıracaktır. Böylece son örnekte görüldüğü gibi sıfır marjin % 50 güvenlik seviyesidir. Marjin eklenince güvenlik seviyesi artmaktadır. Çünkü beklenen sinyal değeri sönümlleme marjini kadar düşüktür. Bu çalışmada link bütçe hesabında sönümlleme marjini değeri 10 dB alınacaktır.

8.4.9 Menzil Değerinin Elde Edilmesi

Link bütçe hesabında elde edilen değerlerin tek çıkarımı menzildir. Menzil haberleşme sistemi, belirlenen ve garanti edilen güvenlik seviyesinde en önemli parametredir. Menzil, haberleşme sistemi için tanımlanan değerlere bağlı olarak elde edilen haberleşme aralığıdır. Link bütçe hesabında alıcı sistemin hassasiyetine göre yani haberleşmenin güvenilir olması için tanımlanan eşik sinyal değerine göre menzil değeri elde edilir. Buna göre öncelikle alıcı sistemin hassasiyeti, daha sonra veri linkinin izin verebileceği maksimum sinyal kaybı hesaplanmalıdır. Bu telafi edilebilir sinyal kaybına göre menzil değeri hesaplanmalıdır [15,16].

Link bütçe hesabında öncelikle EIRP (EIRP, Effective Isotropic Radiate Power, Efektif İzotropik Işınım Gücü) değeri hesaplanmalıdır. Daha sonra ise alıcı hassasiyeti ve alıcı izotropik seviyesi hesaplanır. Bu hesaplamalardan sonra ise sistem kazancı hesaplanır ve sistemin müsaade edeceği maksimum yol kaybı (MAPL, Maksimum Allowable Path Loss, Maksimum Müsaade edilebilir Yol Kaybı) değeri elde edilir. Aşağıda verilmiş olan (8.25), (8.26), (8.27), (8.28) ve (8.29) eşitliklerinde bu hesaplamalar için kullanılan eşitlikler verilmektedir.

$$EIRP = P_{TX} - L_C + G_{TX} \quad (8.25)$$

$$S_{RX} = N + 10 \cdot \log_{10} B + NF + \frac{C}{N} \quad (8.26)$$

$$IRL = S_{RX} - G_{RX} \quad (8.27)$$

$$G_{SYS} = EIRP - IRL \quad (8.28)$$

$$MAPL = G_{SYS} - M_T \quad (8.29)$$

Son olarak elde edilen MAPL değeri haberleşme sisteminin izin verebilecek olduğu maksimum yol kaybıdır. Daha sonra bu değer göz önüne alınarak menzil değeri elde edilecektir. Bunun için öncelikle yol kaybı modelinin belirlenmesi gerekmektedir.

8.4.10 Kanal Modeli ve Serbest Uzay Yol Kaybı

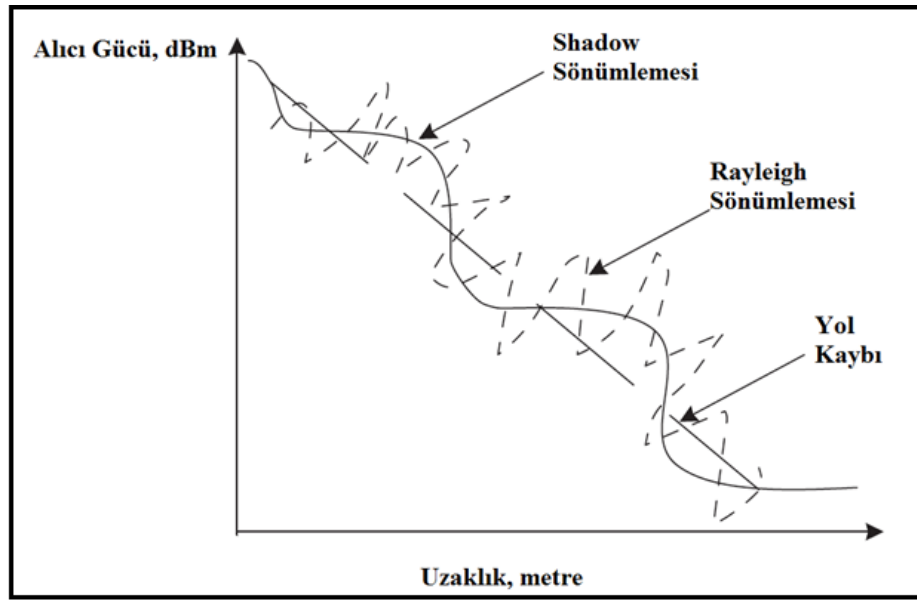
Eklenebilir Beyaz Gaussian Gürültü (AWGN, Additional White Gaussian Noise, Eklenebilir Beyaz Gaussian Gürültü) ' lü kanal modelinde sinyal ısı gürültü, sönmüleme ve kablo kaybıyla azalmaktadır. Diğer taraftan Rayleigh sönmüleme modeli ise LOS haberleşmenin çok kısıtlı olduğu durumlar için geçerlidir. Rician dağılım modeli ise LOS ve NLOS haberleşme ortamı arasında karakterize edilmektedir. Haberleşme kanalı eşitlik (8.30)' da verilen M değerine göre karakterize edilmektedir [16].

$$M = \frac{P_{LOS}}{P_{NLOS}} \quad (8.30)$$

Buna göre M değeri $P_{LOS} = 0$ için $M = 0$ olmaktadır ve bu M değeri Rayleigh sönmüleme modeline uyumluluk sağlar. Diğer taraftan M değeri $P_{NLOS} = 0$ için $M = \infty$ olur. Bunun sonucunda kanal AWGN kanal modeliyle uyumluluk sağlar. Dolayısıyla bu çalışma da haberleşme ortamı LOS haberleşme karakterinde olduğu için AWGN kanal

modeli seçilecektir. Sonuç olarak LOS ve NLOS haberleşme türüne göre kanal modellemesi AWGN, Rician ve Rayleigh dağılımlarına göre karakterize edilir.

Serbest uzay yol kaybı kanal modeli ise adından anlaşılacağı üzere serbest uzay yol kaybını içeren ideal bir modeldir. Şekil 8.5’ de Shadow (Shadow, Gölgeleme) Sönümlemesi, Rayleigh Sönümlemesi ve serbest uzay yol kaybı modelleri görülmektedir. Shadow sönümlemesi engel kayıplarından ve Rayleigh sönümlemesi ise çoklu yoldan kaynaklanan etkidir.



Şekil 8. 5 Yol kaybı sönümleme modelleri

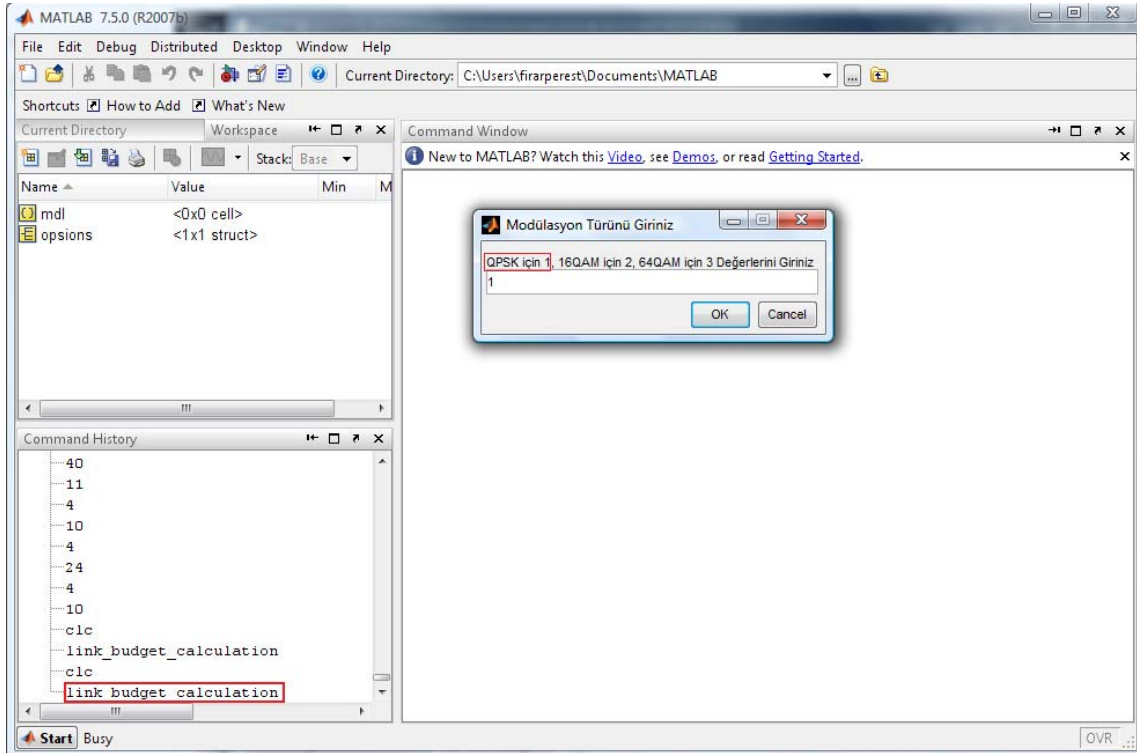
Serbest uzay yol kaybı modeli çok temel hesaplamalarda kullanılır ve diğer spesifik tüm modelleri kapsar. Genel bir sunumdur ve detaylı durumları içermez. Tahmini bir model, genel ifadelerden oluşan bir model en temel hesaplamaları içerir. Serbest uzay yol kaybı modeli bu bağlamda sadece uzaklık ve frekans içerir. Bu modellemeye Friis eşitliği denir ve eşitlik (8.31)’ de bu eşitlik verilmiştir. Bu çalışmada yol kaybı modeli olarak serbest uzay yol kaybı modeli seçilmiştir.

$$P_{LF} = 32.4 + 20 \cdot \log(d_{KM}) + 20 \cdot \log(f_{MHz}) \quad (8.31)$$

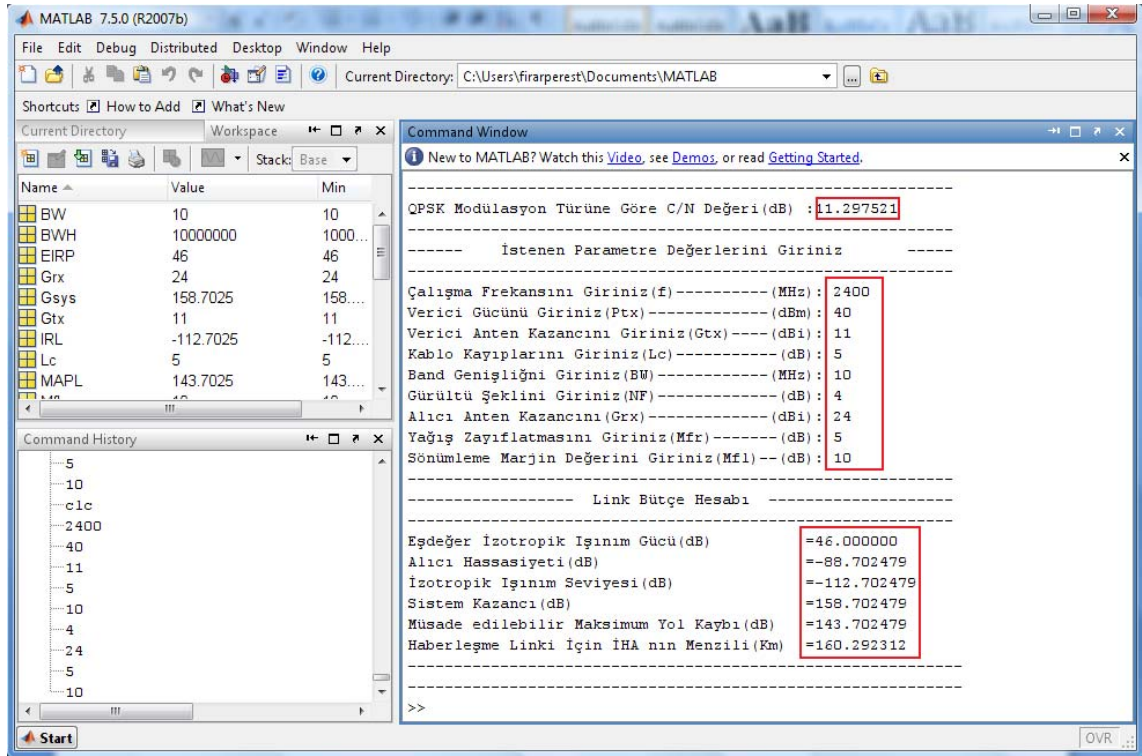
Önceki bölümde elde edilen MAPL değeri serbest uzay yol kaybı modeline uygulanacaktır. Böylece serbest uzay yol kaybı modelinde P_{LF} değeri maksimum MAPL değerine eşit olabilir. Daha fazla kayıp için alıcının eşik sinyal değerinin altına düştüğü için haberleşme sağlanamaz. Sonuçta P_{LF} ve MAPL eşitliğinden genel denklemde tek bilinmeyen olan menzil değeri d_{km} elde edilir.

8.4.11 Link Bütçe Hesabı için Matlab Uygulaması

Önceki bölümlerde anlatılan link bütçe hesapları için amaç menzil değerini elde etmekti. Bu bölümde ise bu hesaplamalar Matlab ortamında yazılan bir algoritma ile yürütülecektir. *link_budget_calculation.m* dosyasına link bütçe hesabı için hazırlanan algoritma girildi. Bu uygulama çalıştırıldığında öncelikle modülasyon türünün seçilmesi istenecektir. Daha sonra ise gereken link parametre değerlerinin girilmelidir. Gerekli parametrelerin girişi tamamlandınca bir takım hesaplamalar yapılmakta ve İHA için menzil değeri hesaplanmaktadır. Matlab ortamında hazırlanan kod EK-D' de verilmiştir.



Şekil 8. 6 İHA menzil değerinin hesaplanması



Şekil 8. 7 İHA menzil değerin hesaplanamsı sonucu elde edilen değeler

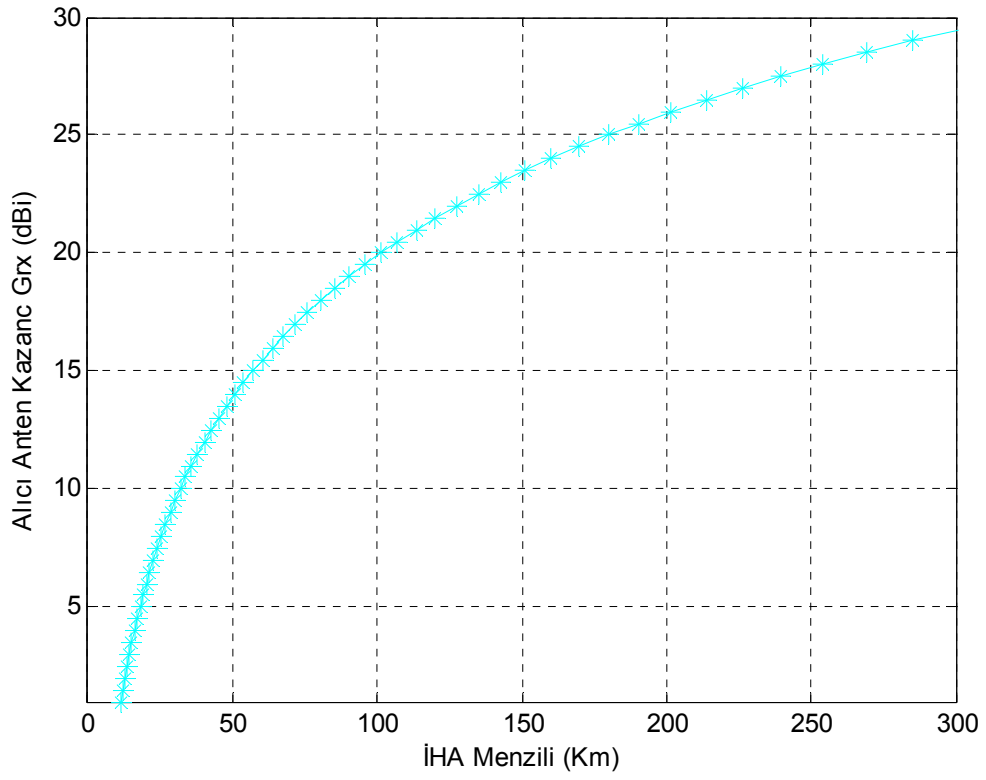
Matlab uygulamasının çalışması sonucunda link bütçe parametrelerinin tamamı elde edilmiştir. Çizelge 8.9' da link bütçe hesaplamalarında yer alan ve haberleşme linkine dair gerek duyulan tüm değerler verilmiştir.

Bu çalışmada, proje kapsamında ihtiyaç duyulan menzil değeri elde edilmek istenmiştir. Gerçek senaryolar dahilinde kullanılan veri linki parametreleri ile yaklaşık 160 Km menzil değerine ulaşılmıştır. Link bütçe hesabında kullanılan anten kazançları, sönümlmeler, kayıplar ve marjinler gibi link parametrelerinin gerçeğe uygunluğu veri linkinin güvenilirliği ve sürekliliği açısından çok önem taşımaktadır. Çünkü bu parametrelerde ki en küçük hata payı bile büyük sonuçlar doğurmaktadır. Bu da haberleşmenin, güvenilirliğine ve kalitesine önemli ölçüde zarar vermektedir. Dolayısıyla link bütçe hesabında kullanılan parametrelerin analizi büyük önem taşımaktadır. Hazırlanan link bütçe hesabı algoritması kullanılarak, bu parametre değerlerinin incelenmesinde büyük fayda görülmektedir. Verici anten kazancı, alıcı anten kazancı modülasyon türü ve sönümlleme kayıpları gibi kritik link bütçe parametrelerine göre menzil değişimi incelenmiştir. Bunun neticesinde elde edilen grafikler aşağıda verilen şekillerde ifade edilmiş ve yorumlanmıştır.

Çizelge 8. 9 Link bütçe parametreleri

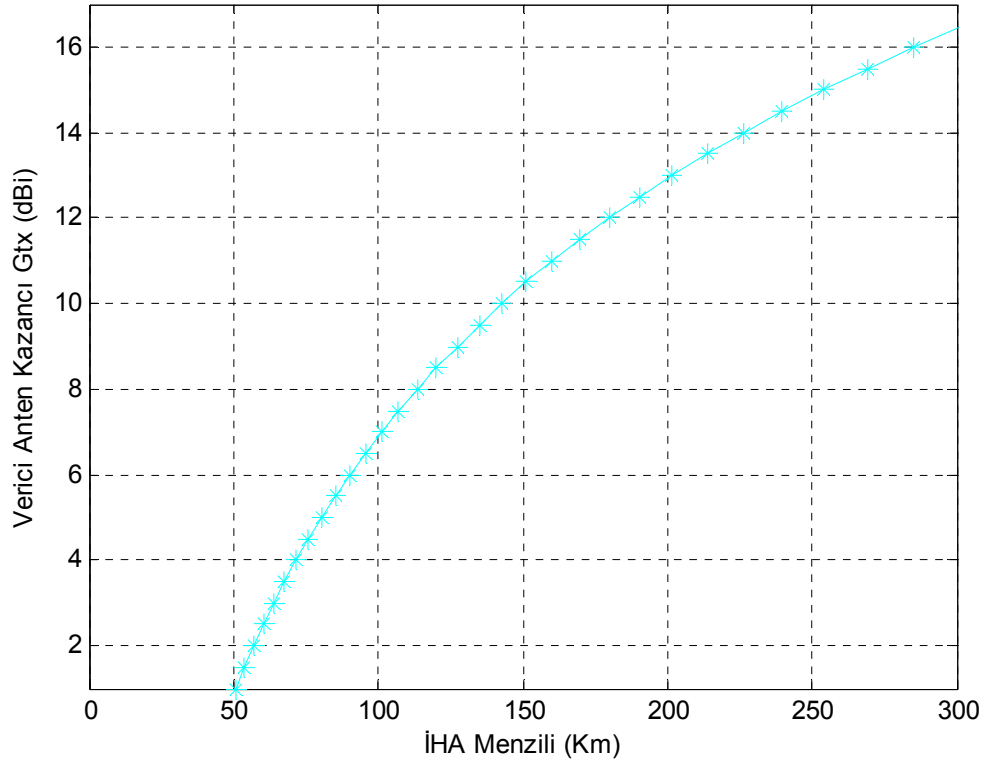
Parametre	Açıklama	Değer	Birim
Frekans	Çalışma Frekansı	2.4	GHz
Modülasyon	Sayısal Modülasyon Türü	QPSK	
BER	Bit Hata Oranı	10^{-6}	
EIRP	Eşdeğer İzotropik Işınım Gücü	46	dB
P_{TX}	Verici Anten Gücü	40	dBm
L_c	Kablo Kaybı	5	dB
G_{tx}	Verici Anten Kazancı	11	dBi
S_{rx}	Alıcı Hassasiyeti	-88	dBm
N	Isıl Gürültü	-174	dB
B	Band Genişliği	10	MHz
NF	Gürültü Şekli	4	dB
C/N	Taşıyıcı Gürültü Oranı	11.3	dB
IRL	İzotropik Alıcı Seviyesi	-112	dBm
G_{rx}	Alıcı Anten Kazancı	24	dBi
G_{sys}	Sistem Kazancı	158	dB
M_t	Toplam Marjın	15	dB
M_r	Yağış Marjini	5	dB
M_l	Log Normal Marjini	10	dB
MAPL	Maksimum Müsaade Edilebilir Yol Kaybı	143	dB
Menzil	İHA'nın Uçuş Menzili	160	Km

Öncelikle alıcı anten kazancının değişimine göre menzil hesabının değişimi incelenecektir. Şekil 8.8' de elde edilen simülasyon sonucu verilmektedir. Buna göre alıcı anten kazancı arttırıldığında menzilde artmaktadır.



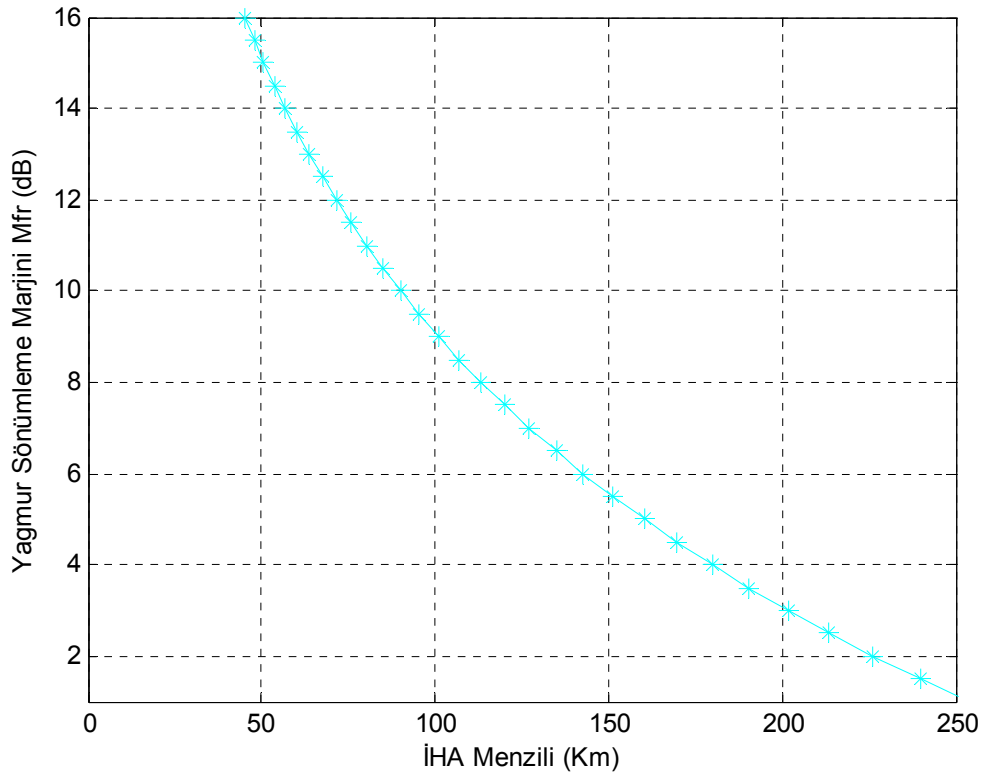
Şekil 8. 8 İHA haberleşme menzilinin alıcı anten kazancına göre değişimi

Bu çalışmada tasarımı yapılan verici anten kazancı değişimi ise Şekil 8.9’ da verilmektedir. Yine verici antenin kazancında ki artış ile menzil değeri artmaktadır. Bunun yanında verici antenin kazanç artışı menzil değerinde daha büyük değişim sağlamaktadır.



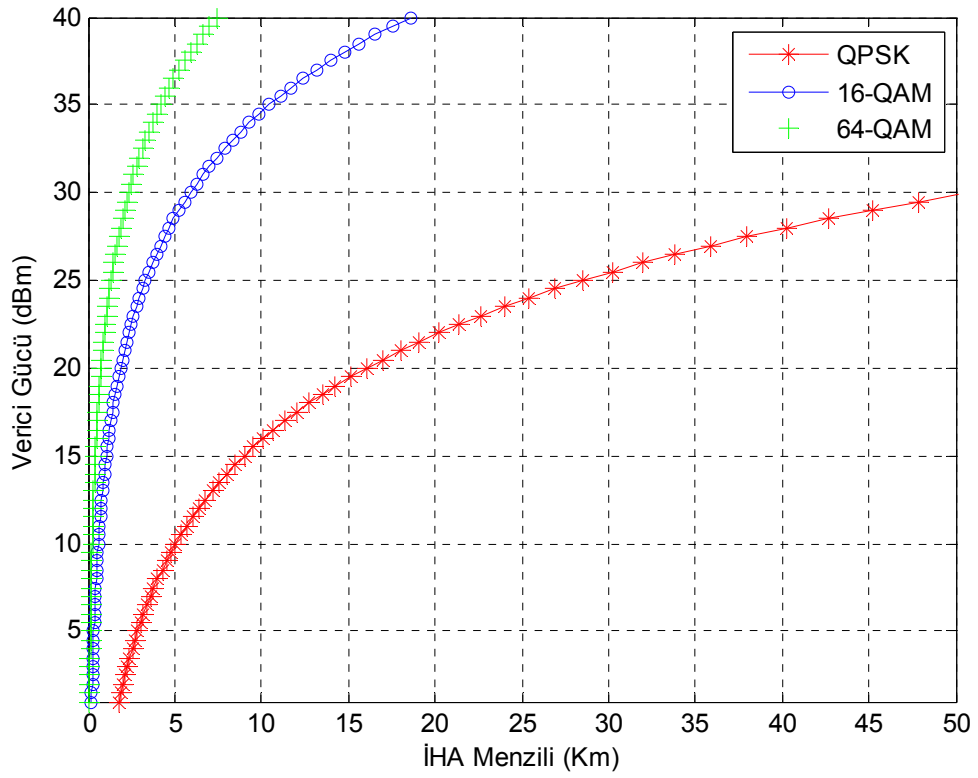
Şekil 8. 9 İHA haberleşme menzilinin verici anten kazancına göre değişimi

Şekil 8.10' da ise yağış sönmüleme marjini değerinin azalması ile İHA menziline ki artışın değişimi verilmektedir. Yağış marjini yağışlardan kaynaklanan sinyal kayıpları için link bütçe hesabına eklenen marjin değeridir. Dolayısıyla yağış marjini düştükçe menzil artmaktadır.



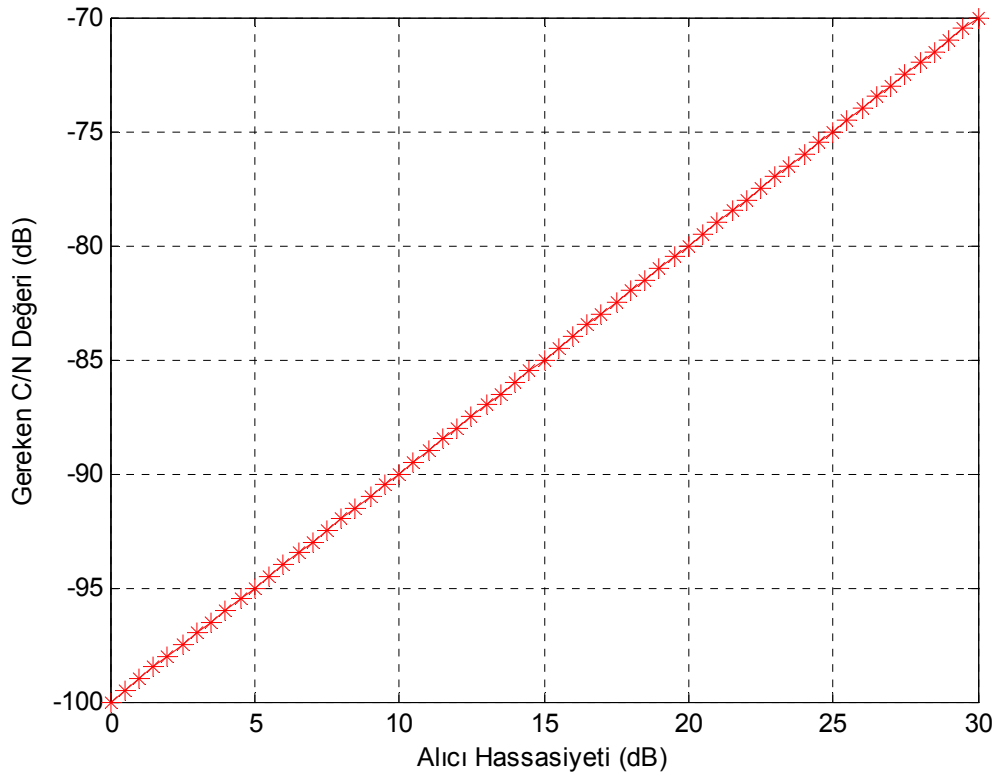
Şekil 8. 10 İHA haberleşme menzilinin yağış sönümlemesine göre değişimi

Şekil 8.11' da ise QPSK, 16-QAM ve 64-QAM için verici çıkış gücünün artışına göre İHA menziline ki artış verilmiştir. Görüldüğü üzere menzilin yüksek olması için en ideal modülasyon türü QPSK'dır.



Şekil 8. 11 İHA haberleşme menzilinin verici çıkış gücüne göre değişimi

Son olarak yapılan analiz alıcı hassasiyetinin C/N değeri ile değişimidir. C/N değeri modülasyon türüne göre farklılık arz eden ve alıcı sistemin hassasiyetini belirleyen değerdir. Şekil 8.12’ de alıcı sistemin hassasiyetinin istenen C/N değerine göre değişimi verilmiştir.



Şekil 8. 12 Sistem tarafından gereken C/N değeri alıcı hassasiyeti

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu proje kapsamında amaçlanan, İHA sistemine uyumlu uzun menzilli veri linki tasarlamaktır. Proje kapsamında yaklaşık 150 Km menzile ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle yüksek kazançlı anten kullanılarak aynı güç çıkışıyla bu menzil elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun için otomatik yönlendirilebilir anten tasarımı düşünülmüştür. Bu tasarıma göre yüksek kazançlı anten kullanılacaktır. İHA sistemlerine en uygun olarak düşünülen antenler genel olarak mikro şerit antendir. Çünkü mikroşerit antenler hem boyut ve ağırlık olarak küçük hem de tasarımı kullanıcının isteğine göre şekillendirilebilmektedir. Dolayısıyla tasarım çalışmaları bu yönde ilerlemiştir. Mikro şerit anten kullanımı kazanç ve ışıma verimliliği açısından tek başına yeterli olmamıştır. Bu nedenle dizi mikro şerit anten kullanılmıştır. Dizi mikro şerit anten ile istenen kazanç ve ışıma açısı elde edilmiştir. Anten tasarımından sonra otomatik yönlendirilebilir anten sistemi tasarımı yapılmıştır. Burada yönlendirme sistemi hem mekanik olarak analiz edilmiş bunun yanında kontrol mekanizması da tasarlanmıştır. Kontrol mekanizmasında en önemli unsur olan yönlendirme sistemi üzerinde durulmuştur. Yönlendirme sistemi İHA' nın uçuşu boyunca YVT ile haberleşmenin güvenlik ve sürekliliğini sağlamaktan sorumlu sistemdir. Yönlendirme sistemi bunu İHA' nın IMU ve GPS bileşenlerinden elde ettiği verileri yorumlayarak ve bir takım hesaplamalar neticesinde elde ettiği yatay açı değeri ile sağlamaktadır. Bu açı değeri antenin tümleşik olduğu DC motor sürücülerine gönderilmekte ve böylece antenin YVT' ye odaklanması sağlanmaktadır.

Yapılan son çalışma link bütçe hesabı üzerine olmuştur. Link bütçe hesabı veri linkinin güvenilirliği ve haberleşmenin sürekliliği için çok önem arz etmektedir. Çünkü link parametrelerinden herhangi birinin yanlış değerde olması veya gerçek ortamla uyumsuzluğu çok büyük hatalara sebep olmaktadır. Bu nedenle her bir link

parametresi detaylı bir şekilde incelenmiş ve İHA' nın gerçek çalışma ortamı göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Bunun neticesinde link bütçe hesabı yapılmıştır. Link bütçe hesabı neticesinde menzil değerinin elde edilmesi için bir algoritma hazırlanmış MATLAB programında bu algoritma yazılımsal olarak düzenlenmiştir. Bu program aracılığıyla menzil hesabı yapılmıştır. Çalışma neticesinde İHA için proje kapsamında istenen 150 Km menzil değerine ulaşılmıştır. Programın doğruluğunun teyidi için BAYKAR Makine envanterinde bulunan Mini İHA referans alınmıştır. Mini İHA için yapılan hesaplamalarda, link bütçe hesabı için hazırlanan algoritmanın güvenilirliği ve doğruluğu teyit edilmiştir.

Sonuçta tasarlanan anten sisteminin İHA haberleşme sistemine entegrasi sonucu gerekli hesaplamalar yapılmıştır. İHA' dan YVT' ye aşağı link video akışı için tasarlanan veri linki için, link bütçe hesabı gerçek senaryolar dahilinde elde edilen parametreler kullanılarak yapılmıştır. Proje için gerek duyulan İHA' nın veri linki menzil değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla tasarlanan veri linkinin güvenilirliği ve çalışabilirliği sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Austin A., (2010). Unmanned Aircraft Systems, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex.
- [2] Önge A. ve Bahar C. (2010). “İHA Sistemleri Yol Haritası” , Savunma Sanayi Gündem Dergisi, T.C. M.S.B. Savunma Sanayii Müsteşarlığı, Ankara.
- [3] Kök T. (2012). “İnsansız Hava Araçlarının Güvenli Kullanımı için Spektrum İhtiyaçlarının Belirlenmesi ile İlgili Öneriler”, Teknik Uzmanlık Tezi, Bilgi Teknolojileri Kurumu, İstanbul.
- [4] Friedrich F. (2010). “Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO”, JAPPC, Kalkar.
- [5] Timothy H. (2004). “Civil UAV Capability Assessment”, NASA, Washington.
- [6] Akyürek S., (2012)., “İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI Muharebe Alanında ve Terörle Mücadelede Devrimsel Dönüşüm”, Bilge Adamlar Stratejik Araştırma Merkezi Raporu, Rapor No:53, İstanbul.
- [7] Uygunacılar T. (2010). “İnsansız Hava Araçlarında (İHA)Veri İletim Linkleri” , Savunma Sanayi Gündem Dergisi, T.C. M.S.B.Savunma Sanayii Müsteşarlığı, Ankara.
- [8] Chaput J.(2001). Introduction to UAV System, UAV CENTER Co., Ltd., Mannyun-dong Seo-gu Daejeon.
- [9] Wolfgang W., (2011). “UAV Data-Links: Tasks, Types, Technologies and Examples”, “Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications”, 13-17 September, Saint-Genese.
- [10] Jenn D. (2010). “Overview of Antennas for UAVs”, Naval Postgraduate School, Monterey.
- [11] Gustafsson J., (2005)., “UAV Tracking Device Useing 2.4 GHz Video Transmitter, Master Thesis, Lulea University of Technology, MSC Programmes inEngineering, Lulea.
- [12] Balanis C. (1997). Antenna Theory, John Wiley & Sons Ltd, 2, Newyork.
- [13] Gark R. ve Bhattia P., (2001). Microstript Antenna Design Handbook, Artech House Inc., London.
- [14] Milligan T. (2005). Modern Antenna Design, John Wiley & Sons Ltd, 2, New Jersey.

- [15] Bradley A.,(2000), “The System Design of a Global Communications System for Military and Commercial use Utilizing High Altitude Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Terrestrial Local Multipoint Distribution Service (LMDS) Sites”, Master’s Thesis, Virginia Polytechnic Institute, State University, Virginia.
- [16] Abate, Z., (2009), WiMAX RF Systems Engineering, Artech House, London.
- [17] Matin A. ve Sayeed M., (2007). A Design Rule for Inset-fed Rectangular Microstrip Patch Antenna, Department of Electrical Engineering and Computer Science, North South University. Dhaka.
- [18] Khan A. ve Nema R., (2012). “ Analysis of Five Different Dielectric Substrateso Microstrip Patch Antenna”, International Journal of Computer Applications, October 2012.
- [19] Kandasamy J. (2008). “Stabilization System for Camera Control on an Unmanned Surface Vehicle”, Master Thesis, Naval Postgraduate School, Department of Mechanical and Astronautical Engineering, Monterey.
- [20] Kissell T. (2006). Industrial Electronics, Prentice Hall, 2, New Jersey.
- [21] Hughes A., (2006), Electric Motors and Drivers, Elseiver Ltd., 3, Burlington.
- [22] Turanlı M. ve Arslan S., (2008). “Laser Gdml Hedef Takibi Yapan Robotik Dzeneği Tasarımı ”,TMMOB Elektrik Mhendisleri Odası 2007-2008 ğretim Yılı Proje Yarışması, İstanbul.
- [23] Babuska R., (1999). “Matlab and Simulink for Modeling and Control”, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, Delft.
- [24] Aydın ., (2012). Otomatęk Ynlendęrmelę Araçlarda Yrnge Kontrol,Yksek Liasns Tezi, Fırat niversitesi, Fen Bilimleri Entits, Elazığ.
- [25] Alsager F., (2011). Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays, Master Thesis, University College of Borås School of Engineering, Electrical Enginering, Boras
- [26] Zajdel T., (2011). Design of Patch Antennas, Master Thesis, Electrical Engineering University of California, California.
- [27] Khraisat Y., (2012). “Design of 4 Elements Rectangular Microstrip Patch Antenna with High Gain for 2.4 GHz Applications”, Modern Applied Science, January 2012, Irbid.
- [28] ITU Study Group (2011), “Examples of technical characteristics for unmanned aircraft control and non-payload communications links”, ITU-R, Genova.

SİMÜLASYONDA KULLANILAN MATLAB KODLARI

```
% DC Motor Parametreleri
J=0.001;
b=0.002;
Kl=0.008;
K=0.008;
R=0.3;
L=0.00003;

% DC Motorun Basamak ve Darbe Yanıtı
% Gv DC Motor Hız Çıkışı
% Ga DC Motor Konum Çıkışı

aux = tf(K,conv([L R],[J b]));
Gv = feedback(aux,K);
Ga = tf(1,[1 0])*Gv;

%figure(1);step(Gv);
%figure(2);impulse(Gv);
%figure(3);step(Ga);
figure(4);impulse(Ga);
xlabel('Zaman')
ylabel('Konum')
%ylabel('Hız')
%title('DC Motorun Basamak Yanıtı')
title('DC Motorun Darbe Yanıtı')

% DC Motorun Oransol Kontrollü Basamak ve Darbe Yanıtı
% Gv DC Motor Hız Çıkışı
% Ga DC Motor Konum Çıkışı

aux = tf(K,conv([L R],[J b]));
Gv = feedback(aux,K);
Ga = tf(1,[1 0])*Gv;
```

```

Kp = 10;
Gc = feedback(Ga*Kp,1);
Gc = feedback(Gv*Kp,1);

figure(1); step(Gc);
figure(2); impulse(Gc);

xlabel('Zaman')
ylabel('Genlik')
%ylabel('Hız')
%title('DC Motorun Basamak Yanıtı')
title('Oransal Kontrollü DC Motor')
% DC Motorun PID Kontrollü Basamak ve İmpuls Yanıtı
% Gv DC Motor Hız Çıkışı
% Ga DC Motor Konum Çıkışı

aux = tf(K,conv([L R],[J b]));
Gv = feedback(aux,K);
Ga = tf(1,[1 0])*Gv;

Kp = 2;
Ki = 0.8;
Kd = 0.3;
C = tf([Kd Kp Ki],[1 0]);
rlocus(Ga*C);
Kp = rlocfind(Ga*C);
Gc = feedback(Ga*C*Kp,1);

figure(1); step(Gc);

xlabel('Zaman')
ylabel('Genlik')
title('PID Kontrollü DC Motor')

```

MAXON 118749 DC MOTOR KATALOŽU

Stock program Standard program Special program (on request!)		Order Number								
according to dimensional drawing		118749	118750	118751	118752	118753	118754	118755	118756	118757
Shaft length 15.7 shortened to 4 mm		302002	302003	302004	302005	302006	302007	302001	302008	302009
Motor Data										
1 Assigned power rating	W	20	20	20	20	20	20	20	20	20
2 Nominal voltage	Volt	9.0	15.0	18.0	24.0	30.0	42.0	48.0	48.0	48.0
3 No load speed	rpm	10000	9650	10200	9550	9850	11100	10300	8230	5050
4 Stall torque	mNm	232	225	220	243	249	283	264	210	129
5 Speed / torque gradient	rpm / mNm	46.5	44.7	47.9	40.2	40.3	39.7	39.6	39.7	39.7
6 No load current	mA	110	61	54	37	31	25	20	15	9
7 Starting current	mA	29100	15700	13500	10400	8720	7940	6030	3810	1440
8 Terminal resistance	Ohm	0.309	0.953	1.33	2.32	3.44	5.29	7.96	12.6	33.4
9 Max. permissible speed	rpm	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000
10 Max. continuous current	mA	1500	1500	1500	1210	992	800	652	519	318
11 Max. continuous torque	mNm	11.8	20.6	23.5	26.1	26.1	26.3	26.3	26.3	26.3
12 Max. power output at nominal voltage	mW	52000	52800	55500	58300	62200	80400	70200	44400	16800
13 Max. efficiency	%	77	82	83	85	86	87	87	87	84
14 Torque constant	mNm / A	7.97	14.3	16.3	23.4	28.5	35.7	43.8	55	89.7
15 Speed constant	rpm / V	1200	669	585	407	335	268	218	173	106
16 Mechanical time constant	ms	5	5	5	4	4	4	4	4	4
17 Rotor inertia	gcm ²	11.3	10.0	9.11	10.3	10.1	10.1	10.0	9.96	9.91
18 Terminal inductance	mH	0.03	0.09	0.12	0.24	0.35	0.55	0.83	1.31	3.48
19 Thermal resistance housing-ambient	K / W	14	14	14	14	14	14	14	14	14
20 Thermal resistance rotor-housing	K / W	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
21 Thermal time constant winding	s	13	12	10	12	12	12	12	11	11

MİKROŞERİT ANTEN PARAMETRELERİ MATLAB KODU

```

clc
clear all
close all
syms n;
c=3*10^8;
d1=input('Substrate Yüksekliğini Giriniz (mm):');
d=d1*10^-3;
er=input('Substrate Dielektrik Sabiti:');
fr1=input('Çalışma Frekansını Giriniz (GHz):');
fr=fr1*10^9;
lambda=c/fr;
w=0.5*lambda*(2/(er+1))^0.5;
er_eff=0.5*(er+1+((er-1)/(1+(12*d/w))^0.5));
L_eff=0.5*lambda*(er_eff)^-0.5;
delta_L=0.412*d*((er_eff+0.3)*(w/d+0.264))/((er_eff-0.258)*(w/d+0.8));
L=L_eff-2*delta_L;
Za=90*(er^2/(er-1))*(L/w)^2;
BW1=(16/(3*(2)^0.5))*((er-1)/(er^2))*((L*d)/(lambda*w));
BW=BW1*fr/10^6;

disp('*****')
disp('----Patch Verileri----')
str=['Dalga Boyu=',num2str(lambda*1000),'mm'];
disp(str)
str=['Lenght=',num2str(L*1000),'mm'];
disp(str)
str=['Weight=',num2str(w*1000),'mm'];
disp(str)
str=['InputEmpedance=',num2str(Za),'ohm'];
disp(str)
str=['BandWidth=',num2str(BW),'Mhz'];
disp(str)
%Zt=(50*Za)^0.5;
%p=(60/((er)^0.5))*log10((8*1.5/n)+(n/(4*1.5)))-Zt;
%solve(p)

```

```

disp('----Port Verileri----')
z=5*d+w;
x=6*w;
str=['WidthOfPort (Along-x-Axis)=',num2str(x*1000),'mm'];
disp(str)
str=['WidthOfPort (Along-z-Axis)=',num2str(z*1000),'mm'];
disp(str)

disp('----Graund Verileri----')
wg=6*d+w;
Lg=6*d+L;
str=['WidthOfGraund=',num2str(wg*1000),'mm'];
disp(str)
str=['LenghtOfGraund=',num2str(Lg*1000),'mm'];
disp(str)

disp('----Quadret Transmission Line Verileri----')
Zt=sqrt(50*Za);
a3=exp(Zt*sqrt(er)/60); p=-4*d*a3; q=32*d^2;
Wl=-(p/2)-sqrt((p/2)^2-q); %width of the transition line
Lt=(c/fr)/(4*sqrt(er_eff)); %length of transition line
str=['Width of the Transition Line = ', num2str(Wl*1000), ' mm'];
disp(str)
str=['Length of Transition Line = ', num2str(Lt*1000), ' mm'];
disp(str)

disp('----Transmission Line Verileri----')
s=1;
ds=d*1000;
for W2=0:0.1:10;
A(s)=(W2/ds)+((2/3)*log10(W2/ds+1.44))-(7.5398/(er^0.5))+1.393;
s=s+1;
end
A=abs(A);
emin=min(A);
for i=1:101;
    if A(i)==emin
        W2=0.1*(i-1);
    end
end
str=['Width of the 50 ohm Line=',num2str(W2),'mm'];
disp(str)

```

MENZİL HESABI UYGULAMASI MATLAB KODU

```

clc
clear all
options.resize='on';
mdl=inputdlg('QPSK için 1, 16QAM için 2, 64QAM için 3 Değerlerini Giriniz','Modülasyon Türünü Giriniz');
%msgbox(mdl)
if char(mdl)=='1'
    en=(erfcinv(2*10^-6))^2;
    cn=en;
    mdls='QPSK';
elseif char(mdl)=='2'
    msgbox('16QAM');
    M=16;
    m=log2(M);
    en=((erfcinv((10^-6)*(m/2)*((M^0.5)/(M^0.5-1))))^2)*(2*(M-1))/(3*m);
    cn=2*en;
    mdls='16-QAM';
elseif char(mdl)=='3'
    msgbox('64QAM');
    en=((erfcinv((10^-6)*(m/2)*((M^0.5)/(M^0.5-1))))^2)*(2*(M-1))/(3*m);
    cn=2*en;
    mdls='64-QAM';
else
    warndlg('Modülasyon Türü Seçimi İçin 1,2,3 Değerlerini Girebilirsiniz','Yanlış Seçim Yaptınız')
end

disp('-----')
disp(sprintf('%s Modülasyon Türüne Göre C/N Değeri (dB) :%f',mdls,cn));
disp('-----')
disp('----- İstenen Parametre Değerlerini Giriniz -----')
disp('-----')
f=input('Çalışma Frekansını Giriniz (f)----- (MHz): ');
Ptx=input('Verici Gücünü Giriniz (Ptx)----- (dBm): ');
Gtx=input('Verici Anten Kazancını Giriniz (Gtx)---- (dBi): ');
Lc=input('Kablo Kayıplarını Giriniz (Lc)----- (dB): ');
EIRP=Ptx+Gtx-Lc;

```

```

BW=input('Band Genişliğni Giriniz (BW) ----- (MHz): ');
BWH=BW*10^6;
N= -174+(10*log10(BWH));
NF=input('Gürültü şeklini Giriniz (NF) ----- (dB): ');
Srx=N+NF+cn;

Grx=input('Alıcı Anten Kazancını (Grx) ----- (dBi): ');
IRL=Srx-Grx;

Gsys=EIRP-IRL;

Mfr=input('Yağış Zayıflatmasını Giriniz (Mfr) ----- (dB): ');
Mfl=input('Sönümleme Marjin Değerini Giriniz (Mfl) -- (dB): ');
Mt=Mfr+Mfl;

MAPL=Gsys-Mt;
fs=20*log10(f);
d1=(MAPL-32-fs)/20;
d=10^d1;

disp('-----')
disp('----- Link Bütçe Hesabı -----')
disp('-----')
disp(sprintf('Eşdeğer İzotropik Işınım Gücü (dB)           =%f',EIRP));
disp(sprintf('Alıcı Hassasiyeti (dB)                       =%f',Srx));
disp(sprintf('İzotropik Işınım Seviyesi (dB)                =%f',IRL));
disp(sprintf('Sistem Kazancı (dB)                                   =%f',Gsys));
disp(sprintf('Müsade edilebilir Maksimum Yol Kaybı (dB)           =%f',MAPL));
disp(sprintf('Haberleşme Linki İçin İHA nın Menzili (Km)             =%f',d));
disp('-----')
disp('-----')

```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İbrahim KARSU
Doğum Tarihi ve Yeri : 16.01.1988 Türkoğlu / Kahramanmaraş
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ibrahimkarsu@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Haberleşme	Yıldız Teknik Üniversitesi	-
Lisans	Elekt. ve Hab. Müh	Yıldız Teknik Üniversitesi	22.06.2011
Lise	Fen	Türkoğlu Anadolu Lisesi	14.06.2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013	Türkiye Halkbank A.Ş.	Uzman