

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**DÜŞÜK GÖRÜNÜRLÜKLÜ SAVAŞ UÇAKLARININ ERKEN TESPİTİ
İÇİN L-BANT HAVA RADARI UYGULAMASI**

HAZIRLAYAN

BARIŞ AKKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA- 2024

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**DÜŞÜK GÖRÜNÜRLÜKLÜ SAVAŞ UÇAKLARININ ERKEN TESPİTİ
İÇİN L-BANT HAVA RADARI UYGULAMASI**

HAZIRLAYAN

BARIŞ AKKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. AHMET GÜNGÖR PAKFİLİZ

ANKARA- 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Barış AKKAYA tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 22 / 05 / 2024

Tez Adı: Düşük Görünürlüklü Savaş Uçaklarının Erken Tespiti İçin L-Bant Hava Radarı Uygulaması

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı- Soyadı, Kurumu)

İmza

Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ, OSTİM Teknik Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÜÇÜNCÜ, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Şenol GÜLGÖNÜL, OSTİM Teknik Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 25/05/2024

Öğrencinin Adı, Soyadı: Barış AKKAYA

Öğrencinin Numarası: 22110371

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Elektrik Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ

Tez Başlığı: Düşük Görünürlüklü Savaş Uçaklarının Erken Tespiti İçin L-Bant Hava Radarı Uygulaması

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 70 sayfalık kısmına ilişkin, 25/05/2024 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %4'tür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası.....

ONAY

Tarih: ... / ... /

Öğrenci Danışmanı Unvan, Ad, Soyadı, İmza:

Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ

Bu tez çalışmasını fikirleriyle bizlere ışık tutan ve bizlere bu ülkeyi emanet eden ulu önderimiz Atatürk'e ithaf ediyorum.

Barış AKKAYA

Ankara-2024

TEŞEKKÜR

Saygıdeğer hocam Sn. Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKF L Z'e bu tez çalışmasında bana inandığı ve g vendiğı, teknik olarak yol g sterciliğı yanında güler yüzüyle de çalışma gayreti verdiğı için teşekkür ederim.

Desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen sevgili ailem; babam Adem Akkaya'ya, annem Neriman Akkaya'ya, abim Ender Akkaya'ya, e im Dilan Akkaya'ya ve bu tez çalışmasında en büyük destekçim olan Hira'ya sonsuz teşekkür ederim.

ÖZET

Barış AKKAYA

DÜŞÜK GÖRÜNÜRLÜKLÜ SAVAŞ UÇAKLARININ ERKEN TESPİTİ İÇİN L-BANT HAVA RADARI UYGULAMASI

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2024

Radar Kesit Alanı (RKA) tanımına ve formülasyonlarına bakıldığında RKA değerinin; sinyalin frekansı, nesnenin geometrisi ve yansıtıcı yüzeyde kullanılan materyalin özellikleri ile ilişkili olduğu görülür. Temelde yatan bu üç etmenden dolayı bir uçağın RKA'sı X-bantta ve L-bantta ölçüldüğünde birbirinden farklı değerler ortaya çıkacaktır. Bir radarın hedefi tespit edebilirliği ile ilgili en önemli parametrelerden biri tespit etmek istediği hedefin RKA'sıdır. Bir hedefin RKA'sı ne kadar yüksek ise radar tarafından o kadar kolay veya bir diğer tabirle daha uzaktan tespit edilebilecektir. “Radara görünmez” (stealth) olarak adlandırılan savaş uçakları esasen belli bir bantta radar düşük görünürlüğüne sahiptirler. Bunun temel sebebi bir nesneyi örneğin bir uçağı tüm frekans bandı boyunca sabit RKA'lı veya düşük RKA'lı yapmak mümkün değildir. Yukarıda da bahsedildiği gibi RKA frekansın bir fonksiyonudur. Bu nedenle RKA, genellikle tespitinden kaçınılmak istenen radarın çalışma frekans bandında düşük olacak şekilde optimize edilir. Terminolojide “Fighter” olarak adlandırılan avcı/savaşçı savaş uçaklarının en temel görevlerinden biri hava muhaberesidir. Bu tip savaş uçaklarının burun bölgelerinde taşıdıkları burun radarları; hem temelde ihtiyaç duydukları tespit/takip hassasiyeti, çözünürlüğü yönlerinden hem de boyut, ağırlık, güç ve soğutma yönlerinden değerlendirildiğinde en optimize bant olan X-bantta çalışırlar. Bu nedenden dolayı radardan kaçınmak isteyen bir savaş uçağının RKA'sı X-bantta mümkün olduğu kadar en düşük seviyede olacak şekilde tasarlanır. Bu tez çalışmasında, X-banta optimize edilmiş RKA'ya sahip bir stealth uçağın RKA'sının yüzeyinde kullanılan radar soğurucu malzemelerinin frekansa bağlı sınırlı performansından dolayı frekansın azalışına bağlı olarak artışı incelenmiş daha sonra bir F-16 savaş uçağının kanat kısmına entegre edilebilecek boyutlarda bir L-bant radar tasarlanmış ve stealth bir savaş uçağını tespit menzili araştırılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Radar Hedef Tespiti, Stealth Uçak, L-Bant Radar

ABSTRACT

Bariş AKKAYA

L-BAND AIR RADAR APPLICATION FOR EARLY DETECTION OF LOW OBSERVABLE STEALTH AIRCRAFT

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Electrical-Electronics Engineering

2024

When examining the definition and formulations of Radar Cross Section (RCS), it becomes evident that the RCS value is intricately linked to the signal frequency, the geometry of the object, and the properties of the reflective surface material. Due to these underlying factors, the RCS of an aircraft measured in the X-band and L-band will yield distinct values. One of the most crucial parameters concerning a radar's ability to detect a target is the RCS of the desired target. The higher the RCS of a target, the easier it will be detected by the radar; in other words, it will have greater visibility. Stealth aircraft, commonly referred to as "radar-invisible," inherently possess low radar visibility in a specific band. The fundamental reason is that achieving a constant RCS or a low RCS throughout the entire frequency spectrum for an object, such as an aircraft, is not feasible. As mentioned earlier, RCS is fundamentally a function of frequency. Therefore, RCS is typically optimized to be low within the operational frequency band of the radar one seeks to evade. Fighter aircraft, categorized as "Fighters," play a fundamental role in air combat. The nose radars carried by these fighter aircraft operate in the X-band, primarily for the needed detection/tracking precision and resolution, considering size, weight, power, and cooling. Hence, the RCS of a stealth aircraft, aiming to evade radar detection, is designed to be as low as possible in the X-band. In this thesis, the increase in the RCS of a stealth aircraft optimized for the X-band was examined due to the frequency-dependent limited performance of radar-absorbing materials used on the RCS surface as the frequency decreases. Subsequently, an L-band radar, which can be integrated into the wing section of an F-16 fighter aircraft, was designed and the detection range for a stealth fighter aircraft was investigated.

KEYWORDS: Radar Target Detection, Stealth Aircraft, L-Band Radar

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Radar Konsepti.....	1
1.2. Radar Bileşenleri	10
1.2.1. Anten	11
1.2.2. Exciter	13
1.2.3. Gönderici (Transmitter)	14
1.2.4. Alıcı (Receiver)	14
1.2.5. Sinyal işleme birimi.....	14
1.2.6. Veri işleme birimi.....	15
2. FREKANS SEÇİMİ	16
2.1. Frekans Bantları.....	16
2.2. Atmosfer Karakteristiği.....	18
3. RADAR MENZİL DENKLEMİ	21
3.1. Radar Kayıpları.....	24
4. SİNYAL-GÜRÜLTÜ ORANI	26
5. RADAR KESİT ALANI	29
5.1. Uçaklarda Radar Kesit Alanı.....	34
5.2. Malzeme Etkisi-Radar Soğurucu Malzemeler	37
5.3. Düşük Görünürlük Konsepti.....	41
5.4. Stealth Savaş Uçakları	42
6. SİSTEM BÜTÇE DEĞERLENDİRMESİ	46
6.1. L-Bant Radar Anteni Bütçesi.....	46
7. RADAR TESPİT MENZİLİ ANALİZİ	51
7.1. X-Bant Radar Menzil Analizi	51

7.2. L-Bant Radar Menzil Analizi.....	52
7.2.1. L-bant güç yükselteci	52
7.2.2. L-bant radar dizi anteni	53
7.2.3. L-bant radar performansı	57
7.2.4. Yağmurun performans üzerindeki etkisi.....	61
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR.....	71

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2. 1. Farklı aviyonik sistemlerin çalışma frekansları	18
Tablo 5. 1. Bazı geometrik şekillerin RKA değerleri.....	30
Tablo 5. 2. RAM malzemelerin frekansa göre dB soğuruculuk performansları	40
Tablo 5. 3. Hedef uçağın frekansa göre malzemesiz RKA değerleri	44
Tablo 5. 4. RAM malzemeli RKA değerleri	45
Tablo 7. 1. F-16 burun radarının standart 1m ² ve stealth bir uçağı tespit menzili	52
Tablo 7. 2. X-Bant burun radarının RCS ve açıya göre tespit performansı	58
Tablo 7. 3. Frekans ve yağmur miktarına göre dB/km sönümleme oranları.....	62
Tablo 7. 4. X-Bant radarın uçak nişan hattında farklı yağmur koşullarında performansı.....	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. 1. Radar Sistemi Genel Tasviri [3].....	2
Şekil 1. 2. AN/APQ-50 Radarı [4]	3
Şekil 1. 3. AN/APG-83 Radarı [5]	4
Şekil 1. 4. Captor-E Radarı [6].....	4
Şekil 1. 5. Radar Sistemi Blok Diyagramı [8].....	6
Şekil 1. 6. Monopulse Toplam ve Fark Kanalları [9].....	8
Şekil 1. 7. Zamana Göre Menzil Değişim Hızı [1]	10
Şekil 1. 8. Radar Sistemi Fiziksel Mimarisi.....	11
Şekil 1. 9. İki farklı tarama açısında Grating Lobe oluşumu [14].....	13
Şekil 2. 1. RF Frekans Bantları [1].....	17
Şekil 2. 2. Frekansa göre atmosferik sönmüleme [18].....	19
Şekil 2. 3. Frekans ve yüksekliğe göre atmosferik kayıp [19]	20
Şekil 4. 1. 4'ün 2'li entegrasyonunda gerekli SNR.....	27
Şekil 4. 2. 8'in 3'lü entegrasyonunda gerekli SNR.....	28
Şekil 5. 1. Yer Kargaşasının Polarizasyon ve Açıya Göre Değişimi [23]	31
Şekil 5. 2. X-Bant Deniz Kargaşasının Polarizasyon ve Açıya Göre Değişimi [24]	32
Şekil 5. 3. Çimlik alanda polarizasyona göre yer kargaşasının X-bantta değişimi [25]	32
Şekil 5. 4. Topraklık alanda polarizasyona göre yer kargaşasının X-bantta değişimi [25]....	33
Şekil 5. 5. Yerleşim alanında polarizasyona göre yer kargaşasının L-bantta değişimi [25]..	33
Şekil 5. 6. RKA hesabı için hava aracının bölümleri [22]	34
Şekil 5. 7. Hava aracının bölümlerinin RKA'ya katkıları [22]	35
Şekil 5. 8. B-2 savaş uçağının geometrik tasarımı [27]	36
Şekil 5. 9. B-2 savaş uçağının gelen düzlem dalgaya davranışı [27]	36

Şekil 5. 10. Stealth bir uçağın radar kesit alanı [28]	37
Şekil 5. 11. MR11-0010-00 malzemesinin frekansa göre soğuruculuk performansı [30]	39
Şekil 5. 12. MR31-0003-00 malzemesinin frekansa göre soğuruculuk performansı [31]	39
Şekil 5. 13. MF-500 malzemesinin frekansa göre soğuruculuk performansı [32]	40
Şekil 5. 14. EM analiz yöntemleri	41
Şekil 5. 15. EM analiz yöntemlerinin farklı uygulamalarda kullanımı [33]	42
Şekil 5. 16. Bir stealth uçağın farklı frekansa göre malzemesiz RKA değerleri [38]	43
Şekil 6. 1. L-bant radarların kanatta yerleşim bölgeleri [40]	47
Şekil 6. 2. F-16 Blok-70 boyutları [40]	48
Şekil 6. 3. F-16 kanat hücum kenarı açısı [41]	49
Şekil 6. 4. F-16 kanadının kanat açıklığına oranı	49
Şekil 6. 5. F-16 kanadının geometrik tasviri	50
Şekil 7. 1. CGHV14800 güç yükseltecinin frekansa göre çıkış gücü	53
Şekil 7. 2. Yerleşime göre FoR gösterimleri	54
Şekil 7. 3. Dizi anten yayılım paterni	55
Şekil 7. 4. L-bant dizi anten	56
Şekil 7. 5. 10 elemanlı dizinin 3 boyutlu yayılım paterni	56
Şekil 7. 6. Uçak nişan hattında iki dizi antenin menzil performansı	58
Şekil 7. 7. Anten nişan hattında iki dizi antenin menzil performansı	59
Şekil 7. 8. Açık havada 10 elemanlı L-bant ve X-bant radarların performansları	60
Şekil 7. 9. Açık havada 16 elemanlı L-bant ve X-bant radarların performansları	60
Şekil 7. 10. Frekansa göre farklı yağmur koşullarında sönümleme [45]	61
Şekil 7. 11. $Az=0^{\circ}$ 'de 1mm/hr yağmur durumunda iki dizi antenin performansı	63
Şekil 7. 12. $Az=0^{\circ}$ 'de 4mm/hr yağmur durumunda iki dizi antenin performansı	64
Şekil 7. 13. $Az=0^{\circ}$ 'de 16mm/hr yağmur durumunda iki dizi antenin performansı	65

Şekil 7. 14. Tarama açısına göre açık havada radar performansları.....	66
Şekil 7. 15. Tarama açısına göre 1mm/hr yağmur durumunda radar performansları	66
Şekil 7. 16. Tarama açısına göre 4mm/hr yağmur durumunda radar performansları	67
Şekil 7. 17. Tarama açısına göre 16mm/hr yağmur durumunda radar performansları	67

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

3-B	3 boyut
λ	dalga boyu
σ_0	sigma nought
A_e	effective aperture area
ADC	analog digital converter
AESA	active electronically scanned array
CPI	coherent processing interval
DAC	digital analog converter
dB	decibel
dBsm	dB square meter
ECEF	earth centric earth fixed
EM	electromagnetic
ESM	electronic support measures
F_n	noise figure
FDTD	finite difference time domain
FEM	finite element method
FFT	fast Fourier transform
FoR	field-of-regard
FoV	field-of-view
G_t	transmit gain
G_r	receive gain
k	boltzman sabiti
LNA	low noise amplifier
MHz	megahertz
MLFMM	multilevel fast multipole method
MMIC	monolithic microwave integrated chip
MoM	method of moments
P_d	probability of detection
$P_{d,CPI}$	single cpi probability of detection
P_{fa}	probability of false alarm
$P_{fa,CPI}$	single cpi probability of false alarm
P_r	received power
PAP	power aperture product
PESA	passive electronically scanned array
PO/GO	physical optics/geometrical optics
RAM	radar absorbing material
RAP	radar absorbing paint
RF	radio frequency
RKA	radar kesit alanı
RWR	radar warning receiver
SNR	signal-to-noise ratio

1. GİRİŞ

Radar sistemleri uzun yıllardır; hava, yer, uzay uygulama alanlarında; tespit, takip, görüntüleme, kimliklendirme gibi birçok görevi yerine getirme amaçlı kullanılmaktadır. Temelinde Radyo Frekans (RF) dalgaları kullanılır ve gönderdikleri EM (Elektromanyetik) dalgalar ile hedefe çarpıp dönen dalgalar arasındaki; zaman gecikmesi, faz kayması, sinyal gücü farkı, Doppler kayması gibi bilgileri kıymetlendirerek fonksiyonlarını yerine getirirler.

Sistemin çalışması için temelde yukarıda bahsedildiği gibi gönderilen EM dalganın bir yansıtıcıdan yansması gerekmektedir. Bir analogi kurmak gerekirse, nasıl ki güneş altında bazı cisimler insan gözüne daha parlak bazıları ise daha karanlık görünüyorsa, radar sistemlerinde de bazı cisimler iletilen dalgayı daha yüksek oranda yansıtımalarından ötürü radara daha kolay bir diğer ifadeyle daha uzak mesafelerden görünürler. Burada yansıtıcılığın ölçüsü Radar Kesit Alanı (RKA)'dır. Bir hedefin RKA'sı ne kadar yüksek ise radar tarafından algılanması o kadar kolaydır.

Avcı savaş uçaklarında yukarıda bahsedilen fonksiyonları yerine getirmek için burun *bulkhead*'i üzerine yerleştirilmiş burun radarları kullanılır. Avcı uçaklarında bu radarlar genelde X-bant frekansında çalışırlar. X-bant 8-12 GHz frekans aralığına verilen isimdir [1].

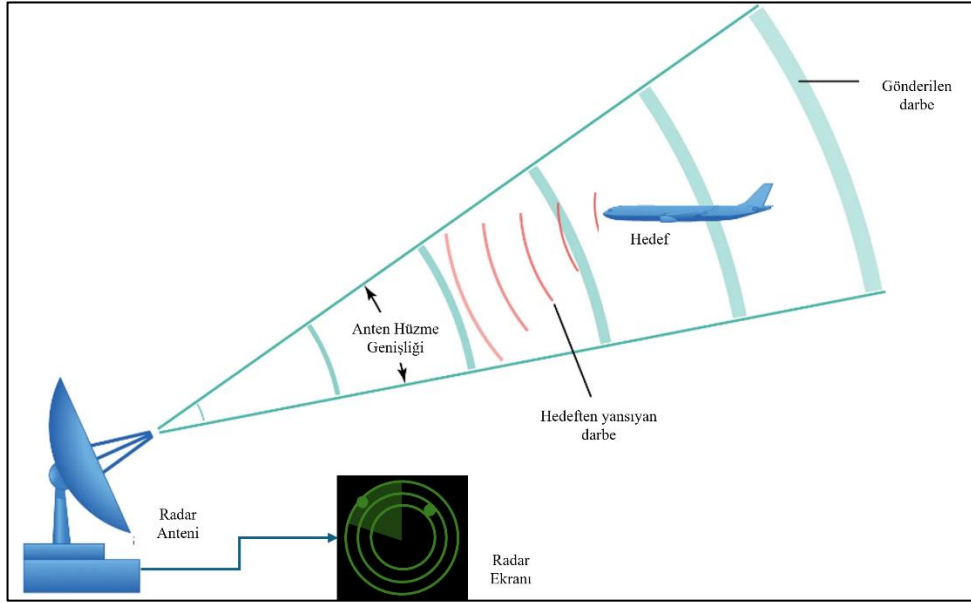
Bu tez kapsamında, F-16 savaş uçağının X-bant burun radarı ile kanat hücum kenarları içine yerleştirilebilecek boyutta, daha düşük frekans olan ve L-bant olarak isimlendirilen 1-2 GHz frekansları içinde çalışan bir radar tasarlanmış, her iki radarın bir stealth savaş uçağını tespit performansları kıyaslanmış ve 5. nesil düşük görünürlüklü uçaklara karşı erken uyarı amaçlı bir çözüm önerisi sunulmuştur.

Çalışmada AN/APG-83 burun radarına sahip bir Blok-70 F-16 savaş uçağının burun radarıyla ve kanat hücum kenarı içine yerleştirilebilecek boyutta, lineer bir dizi antene sahip L-bantta çalışan bir radar ile hedef bir stealth savaş uçağını tespit etme menzili ve farklı yağmur yoğunlukları altında L-bant radarın etkinliği değerlendirilmiştir.

1.1. Radar Konsepti

Radar kelimesi “Radio Detection And Ranging” kelimelerinin kısaltması olan İngilizce kökenli bir kelimedir. Çalışma prensibinin temelinde, sistemden yayılan elektromanyetik dalganın; hava araçları, arabalar, yağmur, yer yüzeyi, kuş vb. bir yansıtıcı yüzeye çarptıktan sonra sisteme geri dönen kısmının alınıp; mesafe, hız, hedef açısı gibi bilgilerin elde edilmesi için kıymetlendirilmesi ve sonrasında bir ekran vasıtasıyla

kullanıcıya iletilmesi yatmaktadır [2]. Sistemi tasvir eden bir gösterim Şekil 1. 1’de verilmiştir.



Şekil 1. 1. Radar Sistemi Genel Tasviri [3]

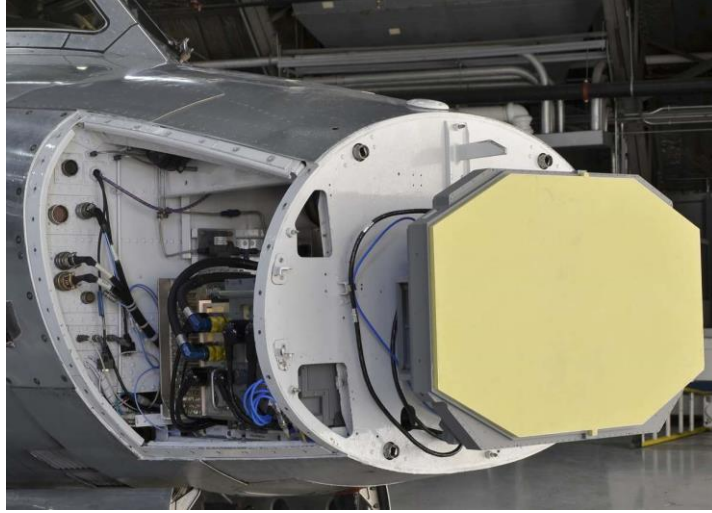
Radar sistemleri tespit edilmek istenen nesnelerin özelliklerine göre özelleştirilirler. Örneğin; yağış yoğunluğunu, türbülansı vb. hava olaylarını tespit etmek için özelleştirilmiş radara “Hava Radarı” denir. Havadan yere yüksek çözünürlüklü yeryüzü görüntüleme için kullanılan radarlar kullanılan teknik de itibari ile “Sentetik Açıklıklı Radar” olarak adlandırılır. Tespit edilen bir hedefe atılan füzeyi hedefe yönlendiren radara, bir diğer anlatımla güdüm sağlayan radara “Atış Kontrol Radarı” denir. Veya bu tez çalışmasının da konusu olan savaş uçaklarının burun yapısalı üzerine entegre edilen ve tespit, takip, güdüm, yer görüntüleme vb. gibi çoklu fonksiyon yerine getiren radarlara çok fonksiyonlu hava radarı veya “Burun Radarı” adı verilir. Bir radar spesifik olarak ne ile ilgileniyorsa, ilgilendiği nesne o radar için “hedef” olarak anılır.

Radar sistemleri temelde “Darbeli Radarlar” ve “Sürekli Dalga Radarları” olarak ikiye ayrılır. Darbeli radarlarda yayın sinüs dalgası ile modüle edilmiş darbeler şeklindedir. Bu tip sistemlerde alma ve gönderme için tek anten açıklığı kullanılır. Alma ve gönderme hatları bir sirkülatör ile birbirinden ayrılır. Gönderme sırasında alma hattı kapalıdır, gönderme tamamlandığında alma hattı yansımaları dinleme başlar. Sürekli dalga radarlarında ise alma ve gönderme hatları tamamen birbirinden ayırdır, gönderme sırasında alma hattı da dinleme modundadır. Sürekli dalga radarları bunu sağlayabilmek için iki anten açıklığı kullanırlar.

Kullanılan dalga biçimine ek olarak radarlar hedef tespit ve takibi yapacağı bölgeyi aydınlatabilmek için mekanik yönlendirmeli, elektronik hüzmeye yönlendirmeli veya her ikisini birden sağlayan radarlar olarak ayrılırlar. Aşağıdaki Şekil 1. 2’de Douglas F-4 savaş uçağında kullanılmış olan parabolik çanak bir antene sahip mekanik yönlendirmeli AN/APQ-50 radarı gösterilmiştir [4], bu radar dönemin teknolojisinin sınırları içinde yalnızca mekanik olarak yönlendirmeye sahip bir radardır ve çoklu hedef takibi, çoklu fonksiyon gerçekleştirme gibi güncel radarların sahip olduğu kabiliyetlerden yoksundur. Şekil 1. 3’de General Dynamics firmasının F-16 Block-70 Viper uçağında kullanılan *Active Electronically Scanned Array* (AESA) tipi AN/APG-83 radarı gösterilmiştir [5]. Bu radar sabit burun yapısalı üzerine entegre edilmiş ve hüzmeye yönlendirmesini anten elemanları arkasında bulunan alma-gönderme modülleri içindeki faz kaydırıcılar vasıtasıyla RF sinyalin fazını ayarlayarak yapar. Şekil 1. 4’de ise British Aerospace EAP tarafından üretilmiş Eurofighter Typhoon savaş uçağına entegre edilmiş olan Captor-E radarı gösterilmiştir [6]. Bu radar da AN/APG-83 radarına benzer olarak elektronik olarak hüzmeye yönlendirme kabiliyetine sahiptir. Buna ek olarak radar anteni *swashplate* olarak isimlendirilen mekanik bir yapı ile yönlendirilebilmektedir. Bu sayede AN/APG-83 radarının sağladığı *Field-of-Regard* (FoR) kapsama açısından daha geniş bir FoR sunmaktadır.



Şekil 1. 2. AN/APQ-50 Radarı [4]



Şekil 1. 3. AN/APG-83 Radarı [5]



Şekil 1. 4. Captor-E Radarı [6]

Elektronik hüzmeye yönlendirmeli radarlar ise kendi içlerinde aktif yönlendirmeli (AESA) ve pasif yönlendirmeli (PESA) olarak ayrılmaktadır. İki radar arasındaki en temel fark ise, AESA radarlarda RF sinyali son güç yükseltme işlemini anten elemanları arasındaki yer alan modüllerde yer alan yüksek güç yükselteçleri ile yaparken, PESA tipi radarlarda ise alma gönderme modüllerine RF sinyali *Travelling Wave Tube* (TWT) gibi bir güç yükselteci tarafından yükseltilmiş olarak iletilmektedir. Yeni nesil savaş uçaklarında radar

hüzmesini neredeyse zaman kayıpsız olarak yönlendirebilmek için elektronik taramalı aktif faz dizili darbeleri Doppler radarları kullanılır. Günümüzde tasarlanan radar sistemlerinin çok büyük bir bölümü elektronik hüzmeye yönlendirmeli olarak tasarlanmaktadır.

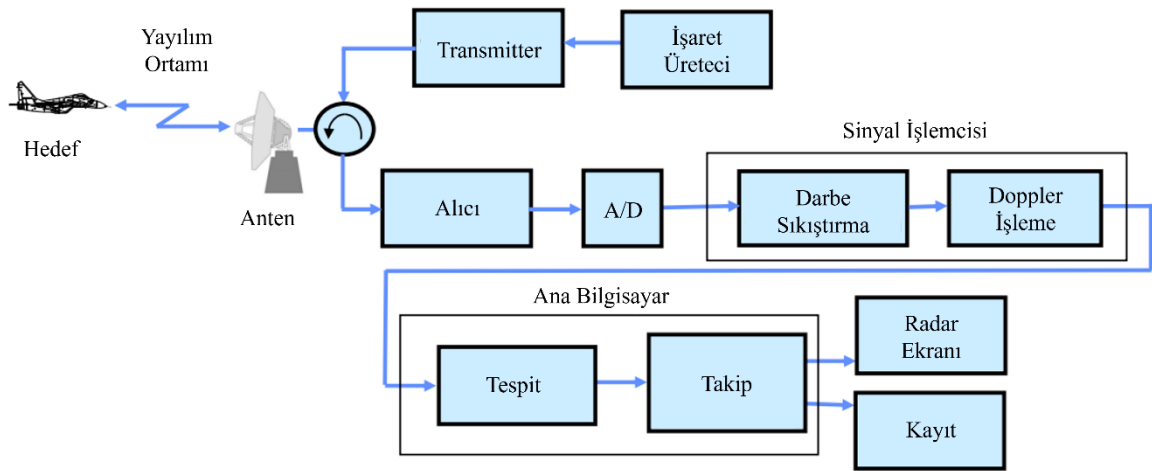
Darbeleri radarlar; evre-uyumlu darbeleri Doppler radarı ve evre-uyumsuz darbeleri Doppler radarı olarak ikiye ayrılırlar. İkisi arasındaki fark, evre-uyumlu darbeleri Doppler radarı yansıyan sinyalin faz bilgisini de kullanarak kıymetlendirme yapar. Bu tip radarlar yansımaları evre-uyumlu olarak birbirleri ile toplar ve bu sayede yansıma sinyali ile gürültü arasındaki farkı yansıma lehine artırır dolayısıyla tespit ihtimalini (P_d) artırır. Eski tip darbeleri Doppler radarları evre-uyumsuz olarak çalışırken yeni nesil radarların neredeyse tamamı evre-uyumlu radar olarak tasarlanırlar. Bu avantaj ışığında yeni nesil radarlar eski tip radarlara kıyasla bir hayli yüksek tespit ve takip menzili sunmaktadırlar. Bu tip radarlarda evre-uyumluluk, radarın gönderici ve alma hatlarının bir yerel osilatör sinyali ile senkronize edilmesi ile sağlanır. Gönderme hattında üretilen sinyalin fazı her zaman birbiri ile aynıdır, böylece alınan sinyaldeki fazdaki kayma yalnızca göndericinin veya alıcının fiziksel hareketinden kaynaklanmaktadır. Sinyaller birbirleri ile evre-uyumlu oldukları için alınan sinyaller bir tamponda tutulduktan sonra *Fast Fourier Transform* (FFT) işlemine tabi tutulurlar bu sayede toplam *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) tek bir darbenin SNR'ına göre toplam darbe sayısı, N , kadar artırılmış olur. Aşağıda Eşitlik 1.1'de evre-uyumsuz bir darbe Doppler radarının sinyal işleme kazancı, Eşitlik 1.2'de ise evre-uyumlu bir darbe Doppler radarının sinyal işleme kazancı verilmiştir [7]. Görüldüğü gibi sinyal işleme kazançları yönünden evre-uyumlu radar lehine bir durum söz konusudur. Burada ' SNR_{NCI} ' evre-uyumsuz darbe entegrasyonu sonrası SNR'ı, ' SNR_{CI} ' evre-uyumlu darbe entegrasyonu sonrası SNR'ı, ' SNR_1 ' tek darbenin SNR'ını, ' N ' ise darbe sayısını ifade etmektedir.

$$SNR_{NCI} = \sqrt{N} \cdot SNR_1 \quad (1.1)$$

$$SNR_{CI} = N \cdot SNR_1 \quad (1.2)$$

Darbeleri Doppler radarları sinyal işleme kazancı sağlamak için yansıma sinyallerinin hem genlik hem de faz bilgilerini kullanırlar, bu nedenle bu radarlar evre-uyumlu radarlardır. Güncel hava platformlarında kullanılan darbeleri Doppler radar sistemlerinin çalışma prensiplerini biraz daha derinden ifade etmek gerekirse, sistem daha önce tanımlanmış olan RF işareti ilk olarak *baseband* yani temel bantta üretir bu işlem için dijital olarak sistemde kayıtlı bulunan dalga işareti Dijital-Analog Dönüştürücü (DAC) vasıtasıyla analog sinyale dönüştürülür. Daha sonra bu sinyal mikserler yardımıyla RF bandına çıkarılır, güç

yükselteçleri ile yükseltilir ve kullanıcının istediği yöne faz kaydırıcılar vasıtasıyla uygun faz ayarları ile yayılır. Faz kaydırma işlemi anten elemanları arasında yer alan alma-gönderme modüllerinde yapılır, bu birimde aynı zamanda radar hüzmelerinin şekillendirilmesi amaçlı sönümleyiciler de yer almaktadır. Darbeli Doppler radarlarında sistem her darbeden sonra dinleme moduna geçer. Dinleme sırasında alınan sinyal düşük gürültülü güç yükselteçleri ile yükseltilir ve yine mikserler yardımıyla sinyal işleme için *intermediate frequency*'ye (IF) veya baseband'e indirilir ve Analog-Dijital dönüştürücüler (ADC) vasıtasıyla dijital sinyale dönüştürülür. Alınan bu sinyal bir dizi matematiksel sinyal işleme adımlarından geçer ve kaydedilir. Bu şekilde tanımlanmış süre boyunca hedefe gönderilen darbeler aynı işlemlerden geçer ve birçok darbenin yansıması bu şekilde kaydedildikten sonra tüm darbelere FFT işlemi uygulanır, bu işlem sonucunda yansıma sinyallerinin faz ve genlik bilgileri elde edilmiş olur. Sistem ilk başta gönderdiği darbedeki bilgilerle elde edilen bu bilgileri karşılaştırır ve anlamlandırma yapar. Bu sayede elde edilen; menzil, hız, yön bilgileri sayesinde hedef tespiti ve takibi gerçekleştirilir [8]. Sistemin blok diyagramı Şekil 1. 5'te gösterilmiştir.



Şekil 1. 5. Radar Sistemi Blok Diyagramı [8]

Sistem menzil ölçümü için, yayılan EM dalganın radardan yayıldığı an ile hedeften yansıyıp tekrar radara döndüğü an arasında geçen süreyi ölçerek hesaplar. Radardan yayılan radyo dalgaları dalga boyu görünür ışıktan farklı olan bir ışıktır, bu nedenle hızı ışık hızına eşittir. Radar sistemi, darbenin öncü kenarının antenden yayınlandığı zamanı kaydeder, daha sonra dinlemeye geçerek darbe kenarını tespit ettiği zamanı da kaydederek gönderme ve alma arasında geçen süreyi hassas bir şekilde hesaplar. Radar dalgası hedef ile arasındaki yolu iki yönlü olarak aldığı için hedefin uzaklığı geçen sürenin yarısı ile ışık hızının

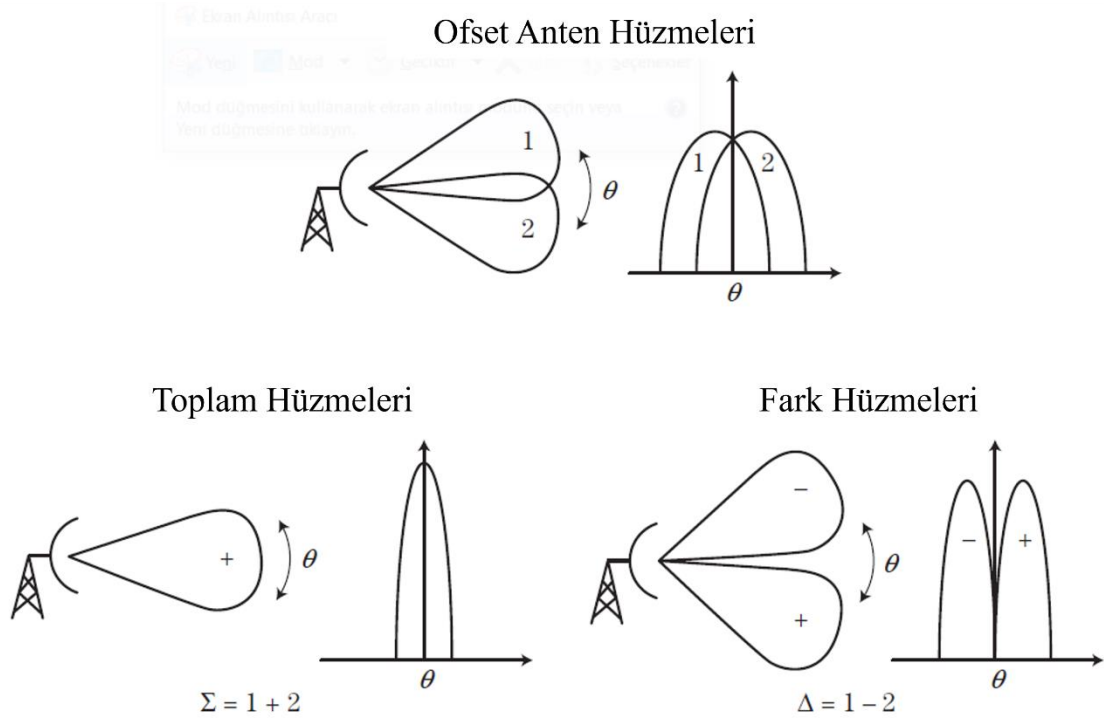
çarpımına eşittir. Eşitlik 1.3'te menzil formülü verilmiştir [1]. Burada 'R' menzili, 'c' ışık hızını, ' t_0 ' darbenin yayınlandığı zamanı ve ' t_1 ' ise darbenin alındığı zamanı ifade etmektedir.

$$R = \frac{c}{2}(t_1 - t_0) \quad (1.3)$$

Radar sisteminin hedefe dair tespit etmesi gereken bir diğer parametre ise hedefin radar platformuna göre yanca ve yükselişte hangi açıda olduğudur. Açısal bilgi de elde edildiğinde yukarıda bahsedildiği gibi menzil bilgisi ile 3-boyutlu uzayda hedefin radar platformuna göre konumu belirlenmiş olur. Radar sistemi tarama yaparken bir sinyal tespit ettiğinde hedef teknik olarak o an ki hüzmeye pozisyonu içinde herhangi bir yerde olabilir, bu nedenle yalnızca tek bir hüzmeye kullanıldığı durumda açısal hassasiyet 3-dB hüzmeye genişliğine eşit olacaktır [9]. 3-dB hüzmeye genişliği Eşitlik 1.4'teki formülle ifade edilir. Burada ' α ' hüzmeye genişliği faktörüdür ve antenin şekliyle ve kullanılan *tapering* fonksiyonuyla belirlenir. Yüksek yan lob bastıran 40 dB Taylor gibi bir taper fonksiyonuyla hüzmeye oluşturulduğunda ana lob hüzmeye genişliği üniform ya da normal dağılımlı aydınlatılan bir antene göre çok daha geniş olacaktır. Dairesel geometriye sahip ve üniform aydınlatılan bir dizi anten için α yaklaşık 1'e eşit olacaktır [9].

$$\theta = \frac{\alpha\lambda}{L} \quad (1.4)$$

Çoğu radar uygulaması için 3-dB hüzmeye genişliğinde açısal ölçüm hassasiyeti yeterli olmayacaktır. Bu nedenle güncel radarlarda *monopulse* adı verilen tek darbe ölçüm tekniği kullanılır. Bu teknikte radar antenin Şekil 1. 6'da gösterildiği gibi hüzmeler eş zamanlı olarak oluşturulur. Bu hüzmeler analog olarak radar antenini iki eş parçaya bölerek oluşturulabileceği gibi alt dizi adı verilen dizilerden gelen sinyaller dijitalleştirildikten sonra dijital olarak da oluşturulabilir. Bu tekniğe *sub-array level digital beamforming* adı verilir. Bu iki hüzmeye toplandığında toplam kanalı (Σ), çıkarıldığında is tam ortada bir *null* ve her iki taraf birbirinden 180° farklı fazda olacak şekilde fark kanalı (Δ) oluşur.



Şekil 1. 6. Monopulse Toplam ve Fark Kanalları [9]

Hedef tam eksen üzerinde olduğu sürece fark kanallarında bir fark sinyali oluşmaz, hedef merkezden sapmaya başladığı zaman ise sapmanın açısal olarak büyüklüğüne göre fark kanalından gelen işaret büyür, bu fark sonucu bir monopulse hata sinyali hesaplanır, aşağıda bu hata sinyali verilmiştir [9].

$$v_{hata}(\theta) = \frac{|\Delta(\theta)|}{|\Sigma(\theta)|} \cos \beta \quad (1.5)$$

Yukarıda ‘ θ ’ hedefin anten boresight’ına göre açısı, ‘ β ’ ise toplam ve fark kanalları arasındaki faz açısıdır. Yukarıdaki formülden hesaplanan hata sinyali ile monopulse hata eğimi elde edilir ve hedefin açısal pozisyonu elde edilir [9].

Hedefin hız bilgisinin ölçümü ise radar sistemi tarafından iki yöntem ile yapılabilir. İlk yöntem gönderilen sinyalin frekansı ile alınan sinyalin frekansı arasındaki kaymanın ölçülmesi ile açısal hızın bulunmasıdır. Burada Doppler Kayması fenomeni kullanılmaktadır. Doppler yöntemi; gönderici sistem ile hedef arasındaki açısal hız farkından kaynaklı frekanstaki sıkışmayı veya genişlemeyi ifade etmektedir. Eğer hedef ve radar arasındaki mesafe azalıyor ise bu durum pozitif bir Doppler yaratır, tersi durumda ise kayma negatif olacaktır. Doppler kayması formülasyonu Eşitlik 1.6’da verilmiştir [10].

Burada ' f_D ' Doppler frekansını, ' V ' radyal hız farkını, ' f_0 ' yayılan dalganın frekansını ifade eder. Sistem Doppler kaymasını kullanarak radyal hız farkını tespit ettikten sonra kendi hız verisini de kullanarak hedefin radyal hızını hesaplamış olur.

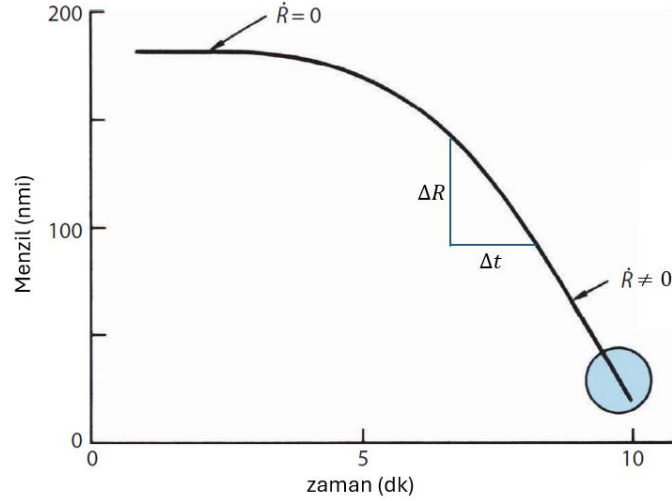
$$f_D = \frac{2V \cdot f_0}{c} \quad (1.6)$$

Doppler kayması hız bilgisinin ölçülmesinin yanı sıra hedef tespiti ve yanlış alarm oranının azaltılması için kargaşa sinyallerinin bastırılmasında, aynı menzil hücresi içinde kalan hedeflerin ayrıştırılmasında ve hedefleri kimliklendirmede kullanılır [10].

Hedef hızının belirlenmesinde kullanılabilecek diğer yöntem ise *range-differentiation* yöntemidir. Hız ve menzil arasında türev ve integral ilişkisi bulunmaktadır, menzilin değişiminin zamana göre türevi hızı eşittir, bu durum Eşitlik 1.7'de verilmiştir [1]. Burada ' V ' hızı, ' R ' hızın türevini, ' $\Delta R / \Delta t$ ' menzilin zamana göre değişimini ifade etmektedir.

$$V = R' = \frac{\Delta R}{\Delta t} \quad (1.7)$$

Şekil 1. 7'de menzildeki değişimden hız bilgisinin elde edilmesi gösterilmiştir. Burada başlangıç zamanında yaklaşık 5. dakikaya kadar menzilde bir değişim olmamaktadır bu aralıktaki herhangi bir noktada menzilin türevinden radyal hız farkının sıfıra eşit olduğunu göstermektedir. 5. dakikadan sonra hedef radyal olarak hızlanmaktadır, böylece menzilin zamana göre değişiminden hız bilgisi hesaplanmaktadır.



Şekil 1. 7. Zamana Göre Menzil Değişim Hızı [1]

Doppler ölçümü ile hedef hızın tespit edilmesi her zaman daha yüksek ölçüm doğruluğu verecektir. Doppler ile çok az sayıda darbe ile hız tespiti yapmak mümkün iken, menzil değişimi yöntemi ile hızın aynı hassasiyette tespit edilebilmesi için çok fazla sayıda darbe göndermek gerekmektedir. Bunu da hava aracı gibi hareketli platformlarda sağlamak mümkün değildir [11].

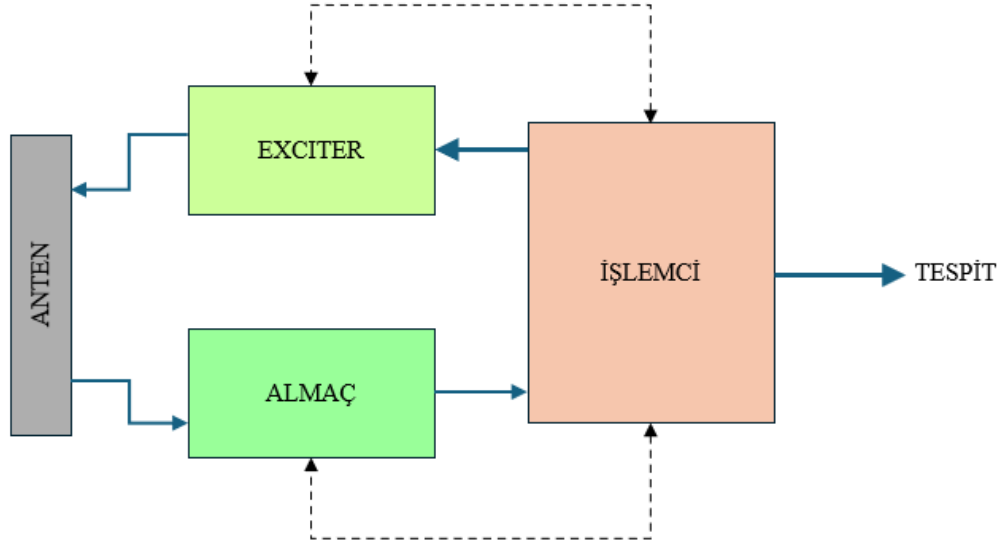
Radar tarafından bir hedef tespit edildiğinde, bir sonraki işlem hedefin 3 boyutlu bir koordinat sisteminde kesin konumunun ve hızının belirlenmesidir. Radar sistemi hedef tespit ve takibini uçak gövdesine (*body frame*) göre yapar. Ancak bulunan bu bilgiler uçak gövdesini referans alan bir koordinat sistemine göre olduğu için bunların dünya üzerinde sabit referansa sabit global bir sisteme göre de iletilmesi gerekmektedir. Sistem uçak üzerinde yer alan navigasyon sisteminden aldığı bilgileri kullanarak hedefin kesin pozisyonunu ve hızını bulur. Global koordinat sistemleri olarak Genellikle LLA, ECEF gibi koordinat sistemleri kullanılır [10]. İhtiyaç duyulan koordinat sistemleri dönüşümleri radar sistemi tarafından yapılır.

1.2. Radar Bileşenleri

Bu bölümde evre-uyumlu darbeleri Doppler radarlarının temel fiziksel bileşenlerinden ana hatlarıyla bahsedilmiştir. Bu çalışmanın da konusu olan bu tip radarlar temel olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşurlar [9]:

- Exciter
- Gönderici (Transmitter)
- Anten
- Alıcı (Receiver)
- Sinyal İşleme birimi
- Veri İşleme Birimi

Sistemin genel blok şeması Şekil 1. 8’de verilmiştir.



Şekil 1. 8. Radar Sistemi Fiziksel Mimarisi

1.2.1. Anten

Anten birimi yüksek güçlü RF işareti EM dalgalar halinde göndermekten ve yansımaları toplayarak güçlendirip sayısallaştırma için iletmekten sorumludur. Eski tip radar sistemlerinde parabolik antenler kullanılırken, güncel radarlarda elektronik faz kaydırmalı dizi antenler kullanılmaktadır. Dizi antenler parabolik antenlere kıyasla hüzme yönlendirmeyi mekanik değil elektronik olarak yaptıkları için çok daha hızlı tarama yapma ve çoklu fonksiyonları çok daha hızlı yerine getirme imkânı sunmaktadır. Sistemde kullanılacak antenin tasarımı, sistemin ihtiyaç duyduğu; anten performans metriği, çalışma frekansı, anlık bant genişliği, FoR ve *Field-of-View* (FoV) ile ilişkilidir. Bunlara ek olarak ağırlık, güvenilirlik, maliyet gibi etkenler de diğer önemli parametrelerdir.

Radar sisteminde tasarım yapılırken bir *Figure of Merit* (FoM) değeri belirlenir. FoM bir radar sisteminde ihtiyaç duyulan tespit menzili, tespit olasılığı (P_d), yanlış tespit oranı (P_{fa}), açı ve menzil çözünürlükleri, tespit ve takip hassasiyetleri gibi gereksinimler ile

belirlenir. FoM, radar sistemlerine özgü bir tanımlama olmamakla birlikte genellikle bir sistemin veya bileşenin performansını değerlendirmek için kullanılan bir kavramdır, bir sistemin veya bileşenin önemli özelliklerini nicelendirmek veya karşılaştırmak için kullanılan bir ölçüdür. FoM değeri belirlendikten sonra gerekli bütçenin bir kısmı anten birimine kırılır. Buradan bir radar sisteminde çıkış gücü, alma/gönderme anten kazancı ve gürültü oranının bir fonksiyonu olan *Power Aperture Product* (PAP) değeri belirlenir [12]. Aşağıdaki formülle ifade edilir, burada ' P_t ' sistemin çıkış gücü, ' G_t ' antenin gönderme kazancı, ' G_r ' ise antenin alma kazancıdır.

$$PAP \propto P_t G_t G_r \quad (1.8)$$

N tane elemana sahip bir faz dizili antende çıkış gücü, bir antenden yayılan gücün N ile çarpımına eşittir. Anten kazancı ise antenin fiziksel boyutunun bir fonksiyonudur. Aşağıdaki formülle ifade edilir [13]. Burada ' A_e ' antenin efektif alanı, ' λ ' ise dalga boyudur.

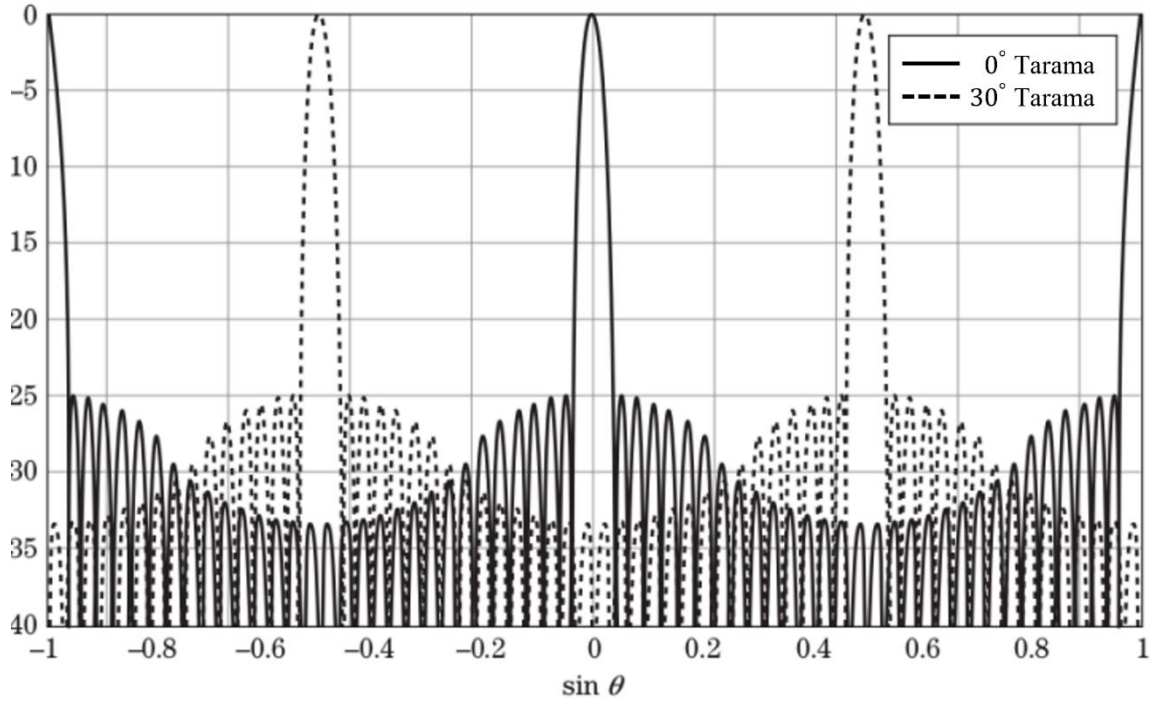
$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (1.9)$$

Bir radar sisteminde genellikle alma kazancı gönderme kazancından bir miktar daha düşüktür. Bunun nedeni alma sırasında anten elemanlarına *antenna tapering* uygulanmasıdır. Tapering genellikle anten hüzmesini şekillendirmek için kullanılan bir tekniktir. Bununla, antenin yan lobları bastırılır, ana hüzme şekillendirilir ve sistemin performansı artırılır. Bu şekilde farklı hüzme profilleri oluşturulabilir ve oluşturulan bu hüzme profilleri farklı radar fonksiyonlarında kullanılabilir [9]. Ancak her durumda yan lobları bastırmak için alma sırasında tapering yapmak yaygın kullanılan bir yöntemdir.

Radar anteni için bir diğer önemli husus anten elemanlarının yerleşimidir. Anten elemanlarının yerleşimi anten tarama açısı aralığı içinde *grating lobe* oluşmaması açısından kritiktir. Grating lobe oluşumu dalga boyu ve tarama açısı aralığı ile ilişkilidir. Anten elemanlarının farklı faz kaydırıcılar tarafından kontrol edildiği faz dizili antenlerde, antenin birçok yöne elektronik olarak taranmasına izin verilir; bu durumda grating lobe adı verilen bir olgu ortaya çıkar. Grating lobe anten elemanlarının yerleşiminden kaynaklı olarak tarama açısı aralığında tarama kenarlarına doğru gidildikçe istenen yönden farklı yönlerde meydana gelen istenmeyen ana lobdur. Grating lobe'lar anten performansını etkileyebilecek istenmeyen sinyaller oluşturur, bu nedenle hatalı tespitler oluşabilir, sistem gürültüsü yükselebilir. Bu nedenle, grating lobe oluşumunu önlemek veya sınırlamak için anten dizisi düzeni ve tasarımına dikkatlice dikkat edilmelidir. Grating lobe oluşumunu önlemek için

ilgili formül aşağıda verilmiştir [15]. Burada 'd' dizideki anten elemanları arasındaki mesafeyi 'θ' ise maksimum tarama açısını ifade eder. Grating lobe kavramını açıklana bir görsel de aşağıda Şekil 1. 9'da verilmiştir. Görselde de görüldüğü üzere anten 30° tarama yaptığıında bir adet grating lobe 60°'de görünmektedir.

$$d < \frac{\lambda}{1 + \sin \theta} \quad (1.10)$$



Şekil 1. 9. İki farklı tarama açısında Grating Lobe oluşumu [14]

1.2.2. Exciter

Exciter birimi çok yüksek stabilitede tanımlı frekans ve fazda düşük güçlü RF işaret üretir. Bunun yanında stabiliteyi sağlamak için gereken yerel osilatör işaretinin üretilmesinden de sorumludur. Aynı zamanda alma ve gönderme hatları arasında uyumluluğun sağlanması için gönderme hattına referans sinyali de sağlar. Radar sistemlerinde farklı fonksiyonlar ve ihtiyaçlara en uygun sonucu üretebilmeleri için farklı dalga şekillerinde çalışabilirler. Örneğin yüksek hızlı hedeflerin tespiti için kullanılacak olan ve yüksek darbe tekrarlama frekansına dalga işareti menzil tespitinde bazı eksiklere sahip olur, söz konusu kullanım durumu menzil belirsizliğini gidermek olduğunda daha düşük darbe tekrarlama frekansına sahip bir dalga şekline ihtiyaç duyulur [1]. Exciter kendisine işlemci tarafından gönderilen komutlara göre tanımlı dalga şeklini üretmekten sorumludur.

1.2.3. Gönderici (Transmitter)

Gönderme ünitesi exciter'dan gelen düşük güçlü sinyalin güçlendirilerek anten birimine iletilmesinden sorumludur. Güçlendirme işlemi PESA tipi radarlarda yüksek güçlü TWTA adı verilen güç yükselteçleri ile yapılır, güçlendirilen sinyal dalga kılavuzları yardımıyla hüzmeyi yönlendirme amaçlı faz kaydırıcıları içeren anten birimine iletir. Yeni nesil AESA tipi radarlarda güç yükselteçleri yarı iletken teknolojisi ile tasarlanmaktadır. Bu radarlarda güç yükselteci anten birimi içinde ve her bir anten elemanı arkasında *Transmit-Receive Module* (TRM) adı verilen *Microwave Monolithic Integrated Chip* (MMIC) çipler içerisinde faz kaydırıcı, düşük gürültülü yükselteç, sirkölatör ile paket halinde yer alır. Güç yükseltme işlemi PESA tipi radarlarda olduğu gibi TWTA ile yapılmadığından ve tek kaynak güç yükseltme yerine çok kaynaklı yükseltme yapıldığından; tek hata kaynaklı sistem arızalarının da önüne geçilmiş olur. Literatürde AESA'ların bu üstünlüğüne *gracefully degradation* özelliği adı verilir.

1.2.4. Alıcı (Receiver)

Hedeyten yansıyan sinyaller anten tarafından alındıktan sonra düşük gürültülü güç yükselteçleri (LNA) ile güçlendirilir. Gürültü figürünü kötüleştirmemek adına LNA genellikle anten yakınına almaç önüne yerleştirilir. Almaç birimi daha sonra alınan sinyali mikserler yardımıyla ADC'nin sayısallaştırma yapabileceği frekansa indirir. Sinyalin teorik olarak kayıpsız olarak geri kazanılabilmesi için dijitalleştirme frekansı Nyquist'e göre sinyal frekansının en az 2 katıdır [16]. Günümüz teknolojisinde ADC'ler oldukça yüksek örnekleme frekansına ulaşılmıştır. Bu avantaj sinyalleri baseband'e indirmeden IF bandında sayısallaştırma yapabilme imkânı sunmaktadır, bu sayede hem gürültü figürü hem de ağırlık yönünden avantaj sağlanmaktadır. ADC'ler aynı zamanda Doppler veri işleme için sinyali *In-phase* ve *Quadrature* bileşenlere ayırır.

1.2.5. Sinyal işleme birimi

Almaç tarafından alınıp dijitalleştirilen sinyalleri işlemek için kullanılan birimdir. Bu birim gerçek zamanlı olarak çok fazla sayıda matematiksel işlemi yapar. Sinyal işleme birimine iletilen dijitalleştirilmiş ekolar menzile, varış zamanlarına, fazlarına göre sıralanıp hafızaya alınırlar, daha sonra bu veriler üzerinde FFT işlemi uygulanır. Bu sayede tespitin gerçekleştirilebilmesi için SNR artırılmış olur. Ayrıca hatalı tespit ihtimalinin (P_{fa})

azaltılması için kargaşadan gelen sinyaller yansıma sinyalinden filtrelenir. Günümüz radar sistemlerinde alıcı ve sinyal işleme birimleri genellikle aynı kutuda yer alırlar.

1.2.6. Veri işleme birimi

Radar sisteminde veri işleme birimi çok amaçlı dijital bilgisayarlardan oluşur. Sinyal işleme birimi sonrası tespit, takip, sabit hata oranı algoritmaları ve görüntüleme algoritmaları bu bilgisayarlar üzerinde koşar. Buna ek olarak çoklu fonksiyon, çoklu takip gibi durumlarda radarın kaynak, hüzmeye planlamasını yapar ve fonksiyonlara göre hangi dalga şeklinin exciter tarafından üretileceğini belirler. Fonksiyonların çalışması sırasında uçağın pozisyon, hız, ivme gibi ölçülebilir verilerini alarak hata düzeltmeleri yapar. Çıktısı olan işlenmiş son veri operatörün sonuçları görüntülemesi için ekrana gönderilir.

2. FREKANS SEÇİMİ

Bir ekipmanın/sistemin hava araçlarında kullanımı, genellikle boyut, ağırlık gibi kısıtlamalarla karşı karşıyadır. Bu nedenle özellikle E2 ve AWACS gibi büyük radar kubbelerine sahip uçaklarda, UHF, L ve S bantları gibi daha düşük frekanslar, uzun menzilli algılama gereksinimlerini karşılamak için kullanılırken, dar anten demetlerine ihtiyaç duyan küçük uçaklarda daha yüksek frekanslar tercih edilir. Bu tercih, özellikle savaş uçaklarında, radarın boyutunu ve performansını optimize etmeye yöneliktir [1].

Çoğu savaş, saldırı ve keşif radarları X-bantta çalışır. X-bant, 3 cm dalga boyunda, genellikle hava araçlarında kullanılan dar anten demetleri için idealdir. Bu frekansın tercih edilmesinin nedenleri arasında düşük atmosferik zayıflama, yüksek güç yoğunluğu ve kolay erişilebilirlik sayılabilir.

Daha yüksek frekanslar, küçük boyut ve yüksek çözünürlük gerektiren durumlarda tercih edilir. Örneğin, Ka-bantta çalışan radarlar, yer arama ve arazi kaçınma görevleri için geliştirilmiştir. Ancak, yüksek frekanslarda yaşanan zayıflama nedeniyle, bu bandın kullanımı sınırlıdır.

94 GHz 'de kullanılan radarlar, küçük hava-hava füzelerinin yüksek hassasiyetle hedefleri tespit etmesini sağlar. Bu frekansta, küçük boyutlu antenlerle yüksek çözünürlük elde etmek mümkündür. Bu teknoloji, özellikle hedefin yakınında ve kısa menzilde etkili olabilir.

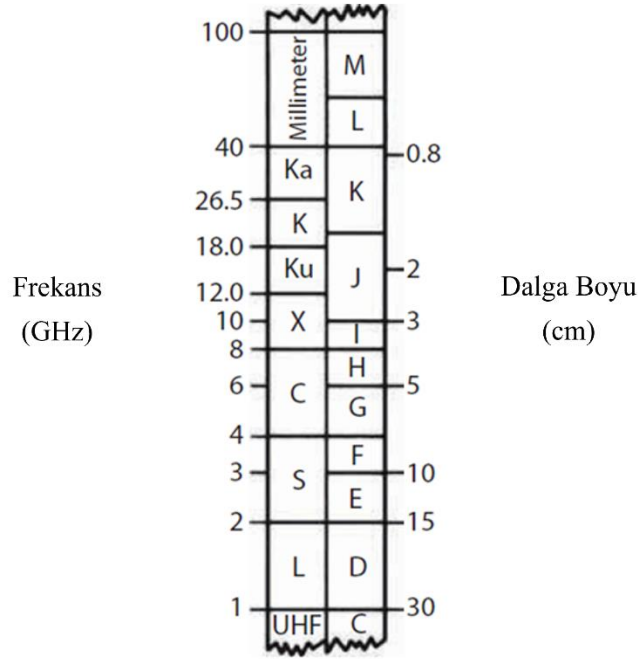
2.1. Frekans Bantları

Giriş paragrafında bahsedildiği gibi radar teknolojisinin temelinde gönderilen EM dalganın cisimden yansımalarının kıymetlendirilmesi yatmaktadır. Bu doğrultuda temelde dalgaların; frekans, polarizasyon, ilerleme ve yansıma gibi karakteristikleri yatmaktadır.

Radar tasarımında karar verilmesi gereken en kritik parametrelerden biri EM dalganın merkez frekansıdır. Çalışma frekansı; radardan ihtiyaç duyulan, menzil, açı çözünürlüğü gibi birçok gereksinimin yerine getirilmesinde oldukça kritiktir. Öte yandan çalışma frekansı dalga boyunu belirlediği için dolayısıyla anten, küpler, sirkülatör, filtre vb. gibi mikrodalga elemanların boyutları dalga boyu ile ilişkili olduğu için sistemin ağırlığı ve boyutları doğrudan dalga boyu ile ilişkilidir. Dalga boyu ve frekans arasındaki ilişki Eşitlik 2.1'de verilmiştir. Denklemden yer alan “c” ışığın atmosferde yayılım hızı, “f” frekans ve “ λ ” da dalga boyudur [1].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Günümüz radarları ihtiyaca göre birkaç MHz ile 300 GHz aralığında çok geniş bir spektrumda tasarlanmaktadır. Genel kullanım çalışma frekans aralıklarına göre radarlar ve ilgili frekans aralığına verilmiş IEEE ve NATO isimlendirmeleri Şekil 2. 1’de verilmiştir.



Şekil 2. 1. RF Frekans Bantları [1]

Radar menzil denkleminde yer alan diğer parametrelerden; çıkış gücü, alma-gönderme anten kazançları, RKA ve bunlara ek olarak kablo kayıpları, atmosferik kayıplar, radom kayıpları gibi kayıplar da doğrudan çalışma frekansı ile değişmektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılacak frekans seçiminde en temel kriter çalışma frekansı mümkün olabildiği kadar düşük tutmaktır. Bunun nedeni daha sonraki bölümlerde açıklanmıştır. Bunun yanı sıra frekanstaki azalma anten ve diğer mikrodalga elemanlarının boyutlarının büyümesine neden olacaktır. Bu nedenle frekansı azaltırken paralelde büyüyen RF elemanlar uçak içine sığabilecek boyutlarda olmalıdır. Bu nedenle çalışma frekansı olarak, literatürdeki benzer çalışmalar da dikkate alınarak L-bant aralığı seçilmiştir. L-bant sınırları içinde ise radyo navigasyon cihazlarının genellikle bulunduğu alt L-bandın hemen üstü seçilmiştir. Aşağıda Tablo 2. 1’de L-bantta çalışan bazı radyo navigasyon sistemleri listelenmiştir [17].

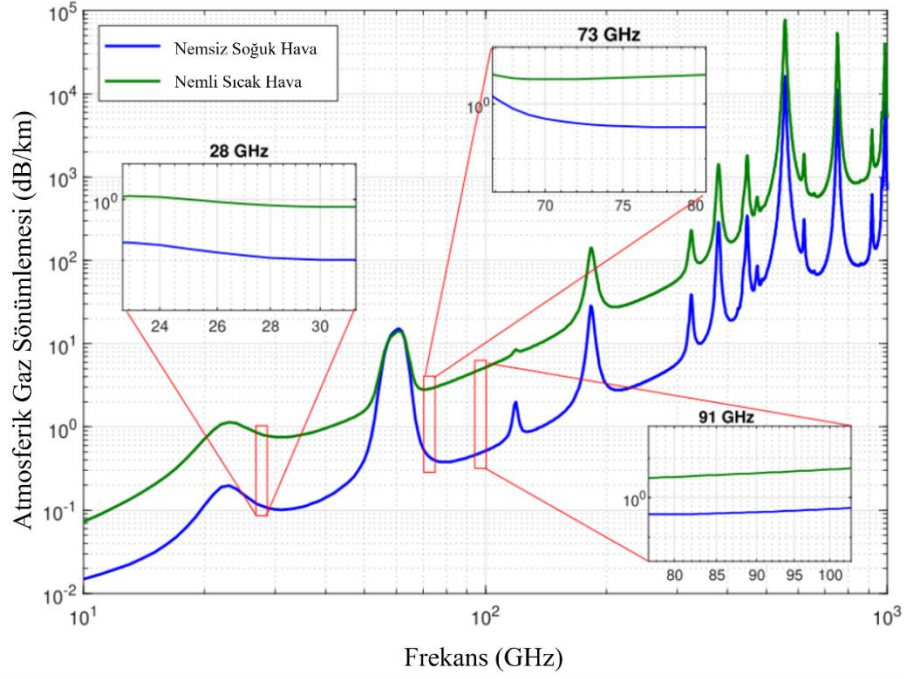
Tablo 2. 1. Farklı aviyonik sistemlerin çalışma frekansları

Sistem	Çalışma Frekansı (MHz)
JTIDS	960-1213
DME	962-1213
TACAN	962-1213
SSR	1030,1090
GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO, BAIDU)	1227, 1575

Tablodan da görüldüğü gibi alt L-bant sivil ve askeri radyo navigasyon cihazlarının sıklıkla kullandıkları frekanslardır. Bu nedenle enterferansı da minimumda tutmak için 1213-1227 Mhz aralığı, bant ortası olarak da 1220 Mhz merkez frekansı tez konusu olan L-bant kanat radarı için çalışma merkez frekansı olarak belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmalar ve analizler 1.2 GHz ‘de yapılmıştır.

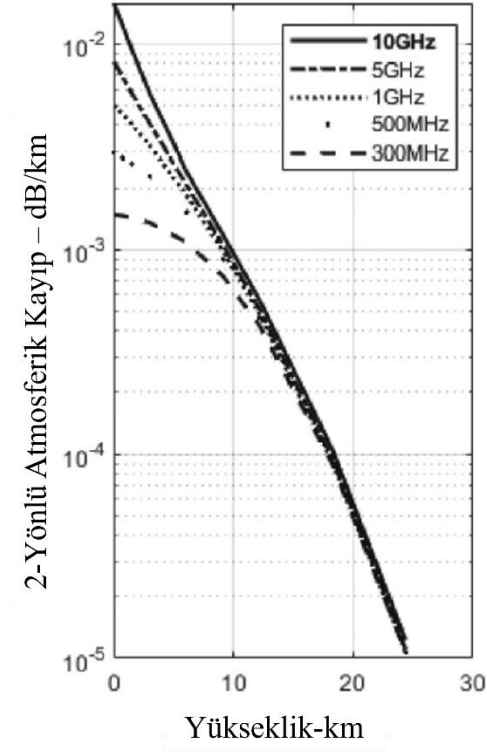
2.2. Atmosfer Karakteristiği

Frekans seçiminde atmosferin davranışını göz önünde bulundurmak da kritik bir öneme sahiptir. Radar dalgası havada ilerlerken atmosfer içinde yer alan gazlardan ve su buharından kaynaklı iki yönlü olarak sönümlemeye uğrar, sinyal emilimi esasen havadaki su buharı ve oksijen bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Sönümleme genellikle dB/km olarak hesaba katılır, dolayısıyla menzil arttıkça toplam atmosferik kayıp da artacaktır. Atmosferin zayıflatıcı etkisi ve frekans arasında doğrusal olmayan artışlı bir davranış bulunmaktadır. Şekil 2. 2’de atmosferin deniz seviyesinde sönümleyici etkisi frekansa bağlı olarak verilmiştir [18]. Atmosferdeki su buharı ve oksijen miktarı genellikle basıncın azalmasıyla yani yüksekliğin artmasıyla birlikte azalır, bu nedenle aşağıdaki veriler deniz seviyesinden 1-2 km yüksekliğe kadar geçerlidir. Yükseklik arttıkça atmosferin sönümleyici etkisi azalacaktır.



Şekil 2. 2. Frekansa göre atmosferik sönümleme [18]

Genel davranış yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi atmosferik sönümleme frekansın artışına bağlı olarak artış eğilimi göstermektedir. Sinyal sönümlemesinde grafikten de görüldüğü üzere ilk zirve 22 GHz’de oluşurken, ikinci zirve ise 60 GHz civarında oluşmaktadır. Atmosferin bu davranışına uygun şekilde genelde tasarımcılar radarları bu bantlarda çalışacak şekilde tasarlamaktan kaçınırlar. Özellikle uzun menzilli arama radarlarında atmosferik kayıplar menzilin artışıyla beraber kayda değer mertebelere ulaşabilmektedir. Uzun menzilli radarların düşük frekanslarda çalışacak şekilde tasarlanmalarının en önemli sebeplerinden biri bu etkidir. Şekil 2. 3’te yüksekliğe bağlı olarak frekansın değişimine bağlı atmosferin sönümlemesi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere 20000 ft. yükseklikte L-bantta yaklaşık 2-yönlü atmosferik kayıp 0.002 dB/km’dir. İlerleyen bölümlerde analizlerde atmosferik kayıp da burada yer aldığı şekilde hesaba katılmıştır.



Şekil 2. 3. Frekans ve yüksekliğe göre atmosferik kayıp [19]

3. RADAR MENZİL DENKLEMİ

Bir radarın tespit kabiliyeti en temel olarak; çıkış gücü (P_t), alma-gönderme anten kazançları (G_t, G_r), hedef RKA'sı (σ), menzil (R), yayının dalga boyu (λ), alınan sinyalin gücünün (P_r) birbiri ile olan ilişkisi ile ifade edilir.

Sistemde bir izotropik yayın yapan bir anten bir anten bulunduğu durumda, antenden R kadar uzaklıkta bir noktada oluşan güç yoğunluğu yayılan gücün izotropik antenin etrafındaki kürenin yüzey alanına oranına eşittir, güç yoğunluğu Eşitlik 3.1'de verilmiştir [9].

$$Q_i = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (3.1)$$

İzotropik anten bilindiği gibi varsayımsal bir antendir, radar sistemleri de amaçları gereği gücü belli bir yönde yoğunlaştırmaya çalışırlar. Bu nedenle bir noktadaki güç yoğunluğu izotropik antenin güç yoğunluğunun yönlü antenin kazancı ile çarpımına eşittir,

$$Q_i = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (3.2)$$

Gücün hedef yönünde iletilen kısmı üzerinde zamana bağlı olarak değişen yüzey akımları oluşturur, bunun sonucunda hedef yüzey bir anten gibi davranmaya başlar ve üzerine düşen radar dalgalarını her yönde yansıtır. Yansıyan sinyallerin bir kısmı radara doğru dönerken bir kısmı farklı açılarda yansır kalan kısım ise ısıya döner. Yansıtıcı hedef burada birim kaynak olarak düşünülebilir bu durumda her bir birim alana düşen güç kürenin yüzey alanı kadar azalır. Hedefin üzerine düşen sinyali algılayıcı radar yönünde yansıtıcılığının ölçüsü RKA olarak adlandırılır, birimi m^2 'dir. Hedef yüzeyden radar yönünde dönen sinyal güç, P_{ref} , hedef yüzeyinden yansıyan sinyalin RKA ile çarpımına eşittir ve Eşitlik 3.3'te verilmiştir. Eşitlik 3.1'dekine benzer olacak şekilde hedeften RKA oranınca yansıyan sinyallerin oluşturduğu güç yoğunluğu da Eşitlik 3.4'te verilmiştir.

$$P_{ref} = Q_i \sigma = \frac{P_t G_t \sigma}{4\pi R^2} \quad (3.3)$$

$$Q_r = \frac{P_{ref}}{4\pi R^2} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.2 ve 3.3 birleştirildiğinde radar anteni önünde indüklenen güç yoğunluğu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q_r = \frac{Q_i \sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_t G_t \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (3.5)$$

Ancak anten önünde indüklenen bu yansıma sinyallerinin tamamı anten tarafından yakalanamaz, yansıma sinyalinin belli bir kısmı radar antenin etkin açıklığı (A_e) ile orantılı olacak şekilde radar anteni tarafından yakalanır. Alınan güç (P_r) Eşitlik 3.6'da verilmiştir.

$$P_r = Q_r A_e = \frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (3.6)$$

Radar denkleminde antenin efektif açıklığı yerine genellikle anten kazancı kullanılır. Kazanç ve aktif açıklık arasında Eşitlik 3.7'deki ilişki vardır.

$$G = \frac{4\pi A_e}{(\lambda)^2} = \frac{4\pi \eta_a A}{(\lambda)^2} \quad (3.7)$$

Burada η_a değeri 0 ve 1 arasında değişen anten etkinliği değeridir. Bu değer bir tasarım parametresi olarak anten *weighting* değeri olarak belirlenir. Alma ve gönderme sırasında farklı tapering değeri uygulanır ise veya sadece alma sırasında tapering uygulanır ise bu durumda alma ve gönderme kazançları birbirinden farklı olacaktır. Buna ek olarak antendeki direnç kayıpları da η_a 'nın bir parametresidir. Sonuç olarak bir anten tarafından alınan güç Eşitlik 3.8'de verilmiştir.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r (\lambda)^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.8'de her iki taraf radar almacındaki gürültünün gücüne bölündüğünde, eşitliğin sol tarafında alınan P_r 'nin P_n 'ye oranı SNR'ı verir ve eşitlik aşağıdaki hali alır. Burada ' k ' boltzman sabiti, ' T ' Kelvin cinsinden sıcaklık, ' B ' almacın bant genişliği F_n ise gürültü figürüdür.

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r (\lambda)^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T B F_n} \quad (3.9)$$

Yukarıda bahsedilen denklem tek darbede elde edilebilecek SNR değerini ifade eder. Ancak güncel radar sistemleri Bölüm 1.1'de bahsedildiği gibi tek darbeden tespit yapmazlar, SNR'ı iyileştirmek için hedeften yansıyan darbe sinyallerini evre-uyumlu olarak toplarlar.

Bu durumda yukarıda Eşitlik 1.2’de de ifade edildiği gibi SNR değeri bir CPI süresindeki darbe sayısı olan N kadar iyileştirilmiş olur, bu durumda eşitlik aşağıda Eşitlik 3.10’daki halini alır.

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r (\lambda)^2 \sigma N}{(4\pi)^3 R^4 k T B F_n} \quad (3.10)$$

$$T_d = \text{dwell süresi} = N \cdot PRI = \frac{N}{PRF} \quad (3.11)$$

$$N = T_d \cdot PRF \quad (3.12)$$

Yukarıda ‘ T_d ’ radar sistemlerinde *dwell* süresi olarak anılır, uzunluğu bir CPI süresine eşittir. Eşitlik 3.10’da SNR’ın N darbe sayısı kadar artırıldığı gösterilmişken Eşitlik 3.11 ve 3.12’de N, CPI süresi ve PRF yönünden hesaplanmıştır.

Bir radar sisteminde radar görev döngüsü (*duty cycle*), sistemin iki darbe arasında yayın yaptığı sürenin (τ) iki darbe arasındaki süreye (PRI) oranı şeklinde ifade edilir [1]. PRI darbelerin periyodu, PRF ise darbe tekrarlama frekansıdır. Radarın ortalama çıkış gücü ise maksimum çıkış gücünün görev döngüsü ile çarpımına eşittir. Ortalama güç ve radar görev döngüsünün PRF ve darbe genişliği cinsinden ifadesi aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\text{Radar Görev Döngüsü} = \rho = \tau \cdot PRF \quad (3.13)$$

$$P_{ort} = P_t \cdot \rho = P_t \cdot (\tau \cdot PRF) \quad (3.14)$$

Basit bir radar darbesi için darbenin genişliği ve bant genişliği arasında aşağıdaki ilişki vardır [9].

$$B = \frac{1}{\tau} \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.12, 3.13, 3.14 kullanılarak radarın maksimum gücü aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$P_t = \frac{P_{ort} T_d B}{N} \quad (3.16)$$

Eşitlik 3.16, Eşitlik 3.10’da yerine konulduğunda darbe entegrasyon kazancını da içeren, ortalama güç cinsinden radar denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$SNR = \frac{P_{avg} G_t G_r (\lambda)^2 \sigma T_d}{(4\pi)^3 R^4 k T B F_n} \quad (3.17)$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_{avg} G_t G_r (\lambda)^2 \sigma T_d}{(4\pi)^3 SNR k T B F_n}} \quad (3.18)$$

3.1. Radar Kayıpları

Eşitlik 3.18’de tanımlanan radar denklemi ideal durumda, sistemden veya çevreden kaynaklı herhangi bir kayıp yok ise geçerli olan radar denklemidir. Ancak radar sistemlerinde birçok kayıp kaynağı vardır. Bu kayıplardan kaynaklı elde edilen SNR da gürültünün gücü ve gürültü faktörü yönünden olmasa bile alınan sinyal gücü yönünden kayıplar meydana gelir. Bir radar tasarımı yaparken kayıpların doğru şekilde ve gerçeğe yakın olarak tahminlenmesi nihai ürünün istenen performansı yerine getirmesi yönünden çok önemlidir. Bu kayıplar sistemin kendinden kaynaklı kayıplar olabileceği gibi radarın çalıştığı dış çevreden de kaynaklanabilir, örneğin yağmurdan kaynaklı EM sinyaller sönmülemeye uğrarlar ve güçleri azalır. Atmosferdeki herhangi bir yağış olmadığı durumda bile atmosferin kendisi Bölüm 4.2’de de bahsedildiği gibi EM dalgalarda kayba neden olurlar. Radar sistemlerinde hesaba katılması gereken kayıplar aşağıdaki gibi sıralanabilir [9].

- Gönderme kaybı (L_t)
- Alma kaybı (L_r)
- Sinyal işleme kaybı (L_{sp})
- Atmosferik kayıp (L_a)

Bu durumda sistemdeki toplam kayıp bu kayıpların çarpımına eşit olacaktır.

$$L_s = L_t L_r L_{sp} L_a \quad (3.19)$$

Bu durumda 3.18’de verilen SNR ve menzil denklemleri nihai olarak aşağıdaki şeklini alır.

$$SNR = \frac{P_{avg} G_t G_r (\lambda)^2 \sigma T_d}{(4\pi)^3 R^4 k T B F_n L_s} \quad (3.20)$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_{avg} G_t G_r (\lambda)^2 \sigma T_d}{(4\pi)^3 SNR k T B F_n L s}} \quad (3.21)$$

Bu tez çalışması kapsamında da ilgili analizlerin yer aldığı bölümde bu kayıplar gerçekçi değerler ile analizlere dahil edilmiştir.

4. SİNYAL-GÜRÜLTÜ ORANI

Temelde sıcaklığı mutlak sıfırın üzerinde olan tüm nesneler frekans bandının hemen her yerinde olacak şekilde EM dalga yayalar [9]. Yayılan bu EM dalgalar radar almacının içinde istenmeyen bir gürültü oluştururlar. Yani almaç girişinde hedeften gelen yansıma sinyaline ek olarak termal gürültü de bulunur. Termal gürültünün gücü sıcaklıkla ve almacın bant genişliği ile doğru orantılı olacak şekilde artacaktır, formülasyonu Eşitlik 4.1’de verilmiştir [1]. Burada ‘P’ termal gürültünün Watt biriminden gücü, ‘k’ Boltzman Sabiti ve ‘B’ ise almacın Hertz biriminden bant genişliğidir.

$$P = kTB \quad (4.1)$$

Radar sistemlerinde SNR, alıcıda alınan sinyalin gücünün, gürültü sinyalinin gücüne oranını ifade eder, genellikle dB ile ifade edilir. SNR ne kadar yüksek olursa, alıcıda alınan sinyal o kadar net ve doğru bir şekilde ölçülebilir. SNR ne kadar düşük olursa, gürültü seviyesi yüksek olduğundan ölçülen sinyal belirsiz hale gelebilir. SNR, radar sisteminin performansını belirlemek ve optimize etmek için önemli bir parametredir. Radar sisteminin kaç dB SNR durumunda hedef tespiti yapabileceği sistemden istenen P_d ve P_{fa} değerleri ile doğrudan ilişkilidir. SNR’ın artışı P_d ’yi artırır ve P_{fa} ’yı azaltır. Benzer şekilde sistemden belli bir menzilde belli bir hedefi daha yüksek oranla tespit etmesi isteniyorsa daha yüksek SNR gerekecektir. SNR, P_d ve P_{fa} arasındaki ilişki Eşitlik 4.2’de verilmiştir [20].

$$SNR = \frac{10 \log(P_{fa,CPI})}{10 \log(P_{d,CPI})} - 1 \quad (4.2)$$

SNR’ı artırmak için yansıma sinyalinin gücünün artırılması ve/veya gürültü oranının düşürülmesi gerekmektedir. Bunu sağlamak için; çıkış gücü ve/veya anten kazancı artırılarak radardan yayılan sinyalin gücü artırılabilir, sinyal entegrasyonu süresi artırılabilir, frekans seçici filtreler ile gürültü oranı düşürülebilir.

Birçok durumda ihtiyaç duyulan P_d ve P_{fa} ’i sağlayabilmek tek bir CPI içinde mümkün değildir. Bu nedenle radar sistemleri hem menzil belirsizliklerini çözmek hem de ihtiyaç duyulan P_d ve P_{fa} ’yı sağlayabilmek için *binary integration* adı verilen M out of N tespit yöntemini kullanırlar. Bu sayede hedef N kadar CPI içinde aynı menzil kapısında M kadar tespit edildiğinde sistem o kapıda bir tespit olduğunu raporlar. Bu sayede bir CPI’daki P_d ve

P_{fa} oranı kümülatif olarak iyileştirilmiş olur [21]. Kümülatif ve tek CPI'daki P_d ve P_{fa} ilişkisi aşağıda verilmiştir.

$$P_{d,cum} = \sum_{n=M}^N \binom{N}{n} P_{d,cpi}^n (1 - P_{d,cpi})^{N-n} \quad (4.3)$$

$$P_{fa,cum} = \sum_{n=M}^N \binom{N}{n} P_{fa,cpi}^n (1 - P_{fa,cpi})^{N-n} \approx \binom{N}{M} P_{fa,cpi}^M \quad (4.4)$$

Yukarıda bahsedilenler ışığında daha sonraki bölümlerde yer alan analizlerde tespit karar noktası olarak radarın tespit yapabileceği SNR değerinin belirlenmesi amacıyla MATLAB ortamında aşağıda Şekil 4. 1'de verilen araç hazırlanmıştır.

Radar SNR Hesaplayıcı

N M

Pdcum Pfacum

HESAPLA

Pdcpi Pfacpi

SNR

Barış Akkaya
2024

Şekil 4. 1. 4'ün 2'li entegrasyonunda gerekli SNR

Bu hesaplama aracı, seçilen M out of N entegrasyon yöntemi, seçilen kümülatif P_d ve P_{fa} değerlerine karşılık gelen ve tek CPI'da sağlanması gereken P_d ve P_{fa} değerlerine

çıkarmakta ve daha sonra tek CPI’da sağlanması gereken SNR’ı kullanıcıya iletmektedir. Bu hesaplamaları yukarıda verilmiş olan formülleri kullanarak yapmaktadır.

4’ün 2’lisi entegrasyon seçeneğinde %90 P_d ve 1×10^{-8} P_{fa} değerlerinde görüldüğü gibi hedef tespiti için tek CPI’da 14 dB SNR gerekmektedir. Aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi entegrasyon seçimini 8’in 3’lüsü yaparak gerekli olan SNR değerini 10.45 dB’ye düşürmek mümkündür, bu da Şekil 4. 2’de verilmiştir. SNR’ın düşmesi Eşitlik 3.21’deki radar denkleminde de görüleceği gibi radar tespit menzilini uzatacaktır. Ancak tarama sırasında her bir hüzmeye pozisyonunda 4 CPI yerine 8 CPI süresince beklenmesi gerekmektedir. Bu da bir aç aralığını taramak için gerekli olan süreyi iki katına çıkaracaktır.

Radar SNR Hesaplayıcı

N M

Pdcum Pfacum

HESAPLA

Pdcpi Pfacpi

SNR

Barış Akkaya
2024

Şekil 4. 2. 8’in 3’lü entegrasyonunda gerekli SNR

Bu tez çalışması kapsamında kümülatif P_d Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi %90, kümülatif P_{fa} ise 1×10^{-8} seçilmiştir. Bu seçimler tamamen tasarımcı kararı ve kullanıcının ihtiyacı ile ortaya çıkmaktadır.

5. RADAR KESİT ALANI

Radar dalgaları bir nesneye çarptığında, dalgaların bir kısmı soğurulurken bir kısmı da nesneden geri yansır. Radar Kesit Alanı hedefe ulaşan güç yoğunluğunun radar yönünde yansıyan kısmına oranıdır. Birimi desibel metre karedir (dBsm) ve σ ile ifade edilir. RKA bir hedefin radar sinyalleri ile algılanabilirliğini ve radarın hedefi algılama mesafesini etkileyen bir faktördür. RKA ve hedef tespit menzili arasında Eşitlik 3.21'deki denklemden gelen aşağıdaki gibi bir oran vardır.

$$R \sim \sqrt[4]{\sigma} \quad (5.1)$$

Daha düşük bir RKA'ya sahip olmak yalnızca bir radar tarafından tespit edilebilecek mesafeyi azaltmakla kalmaz, aynı zamanda radarın menzil, açı, hız, kimliklendirme hassasiyetlerini de azaltır. Bir radar sisteminde elde edilen SNR da aynı tespit menziline olduğu gibi RKA'nın bir fonksiyonudur. Hedef RKA'sı azaldıkça aynı menzilde yansıma sinyalinin gücünün azalmasına bağlı olarak SNR da azalacaktır. Radarın menzil, açı ve hız hassasiyetleri SNR'ın birer fonksiyonlarıdır [11]. Bu ilişkiler sırasıyla aşağıda ifade edilmiştir. Burada ' τ ' radarın evre-uyumlu olarak sinyal işlediği süre, ' k_m ' radarın monopulse paterninin eğimidir.

$$\sigma_{menzil} = \frac{\Delta R}{\sqrt{2 \left(\frac{S}{N} \right)}} = \frac{c}{2B \sqrt{2 \left(\frac{S}{N} \right)}} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{açı} = \frac{\theta}{k_m \sqrt{2 \left(\frac{S}{N} \right)}} \quad (5.3)$$

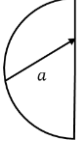
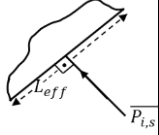
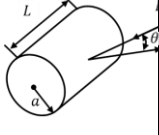
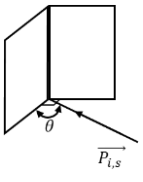
$$\sigma_{hız} = \frac{\lambda}{2\tau \sqrt{2 \left(\frac{S}{N} \right)}} = \frac{\Delta V}{\sqrt{2 \left(\frac{S}{N} \right)}} \quad (5.4)$$

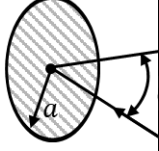
Hedef RKA'sı birçok parametreye bağlıdır, bunlar aşağıda sıralanmıştır [22].

- Boyut
- Geometri
- Malzeme
- Frekans
- Polarizasyon
- Sinyal Geliş Açısı

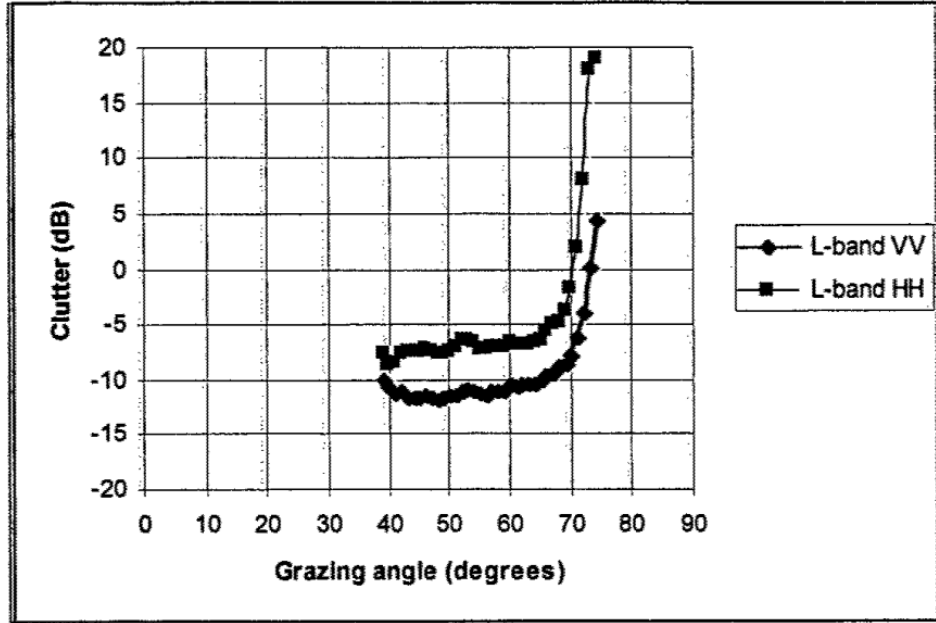
Geometri, RKA üzerindeki etkiyi çeşitli şekillerde değiştirebilir. Örneğin, keskin kenarlar ve düz yüzeyler yansıyan dalgaların yoğunlaşmasına neden olabilir. Buna karşılık yuvarlak yüzeyler ve yumuşak kenarlar yansıyan dalgaların yayılmasına neden olur bu da RKA'nın azalmasına yol açar. Bu nedenle, RKA'nın azaltılması için bir nesnenin tasarımı ve geometrisi büyük ölçüde önem taşır. Nesnenin boyutu da RKA üzerindeki etkiyi belirleyen bir diğer etmendir. Büyük boyutlu nesneler aynı geometrik şekle sahip daha küçük boyutlu olanlarına kıyasla daha yüksek RKA'ya sahiptirler. Ancak direkt olarak büyük nesnelerin her zaman küçük nesnelere kıyasla daha yüksek RKA'sı vardır denemez. Geometrisi itibarıyla fiziksel olarak çok daha büyük nesneler, çok daha küçük nesnelere kıyasla çok küçük RKA'ya sahip olabilirler. Basit geometrik şekillerin RKA'ları nispeten daha kolay formüllerle ifade edilip hesaplanabilirken, karmaşık geometriler için bu farklı analiz yöntemleri gerektirmektedir. Bazı geometrilerdeki yapıların RKA'ları Tablo 5. 1'de verilmiştir [22]. Formüller içinde yer alan fiziksel boyut, dalga boyu ve farklı geometrilerin farklı RKA formüllerine sahip olmaları sırasıyla; boyut, frekans ve geometrinin RKA'yı etkilemelerinin bir sonucudur.

Tablo 5. 1. Bazı geometrik şekillerin RKA değerleri

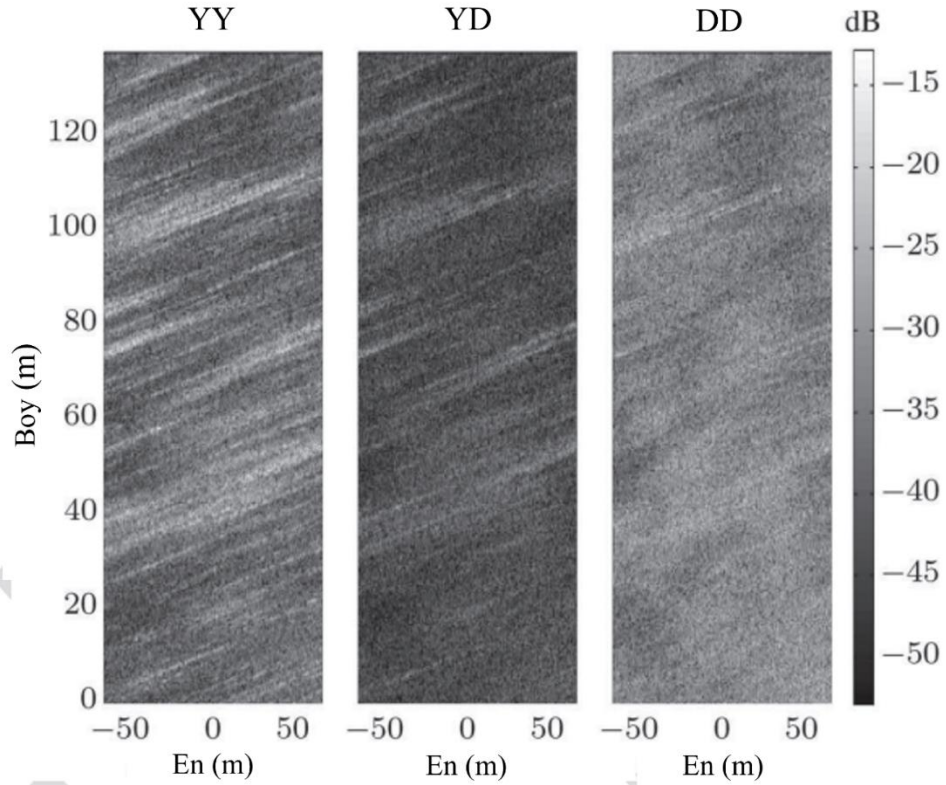
Geometri	Tanım	
	Küresel Yüzey	$\sigma \approx \pi \cdot a^2 \cdot (1 - \text{sinc}(2 \cdot D_u))^2$ $D_u \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sin \theta}{\lambda} \quad (5.5)$
	Köşe	$\sigma \approx \frac{L_{eff}^2}{\pi} \quad (5.6)$
	Silindir	$\sigma \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot L^2 (\cos \theta)^2 \cdot (\text{sinc}(2 \cdot U))^2}{\lambda} \quad (5.7)$
	Düz Köşe	$\sigma \approx \frac{4 \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b^2 (\sin \frac{\pi}{4} + \theta)^2}{\lambda^2}, @ \theta \leq \pm 30^\circ \quad (5.8)$

	Disk	$\sigma \approx \frac{\pi \cdot a^2}{(\tan \theta)^2} \left[J_1 \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \sin \theta}{\lambda} \right) \right]^2 \quad (5.9)$
---	------	--

Yukarıda da bahsedildiği gibi EM dalganın polarizasyonu da bir hedefin görüldüğü RKA'yı etkiler. Bazı nesneler dikey polarizasyonda daha yüksek RKA gösterirken bazıları da yatay polarizasyonda daha yüksek RKA'ya sahiptir. Aşağıdaki görsellerde polarizasyona bağlı olarak RKA'nın değişimi gösterilmiştir. Yer kargaşası, bazı durumlarda yatay polarizasyonlu bir EM sinyal ile aydınlatıldığında daha büyük RKA gösterme eğilimindedir ancak aşağıda Şekil 5. 1'de ve Şekil 5. 2'de de görüleceği gibi bu durum sinyalin geliş açısına göre de değişiklik göstermektedir.



Şekil 5. 1. Yer Kargaşasının Polarizasyon ve Açıya Göre Değişimi [23]



Şekil 5. 2. X-Bant Deniz Kargaşasının Polarizasyon ve Açıya Göre Değişimi [24]

Aşağıda farklı yeryüzü şekilleri için dikey ve yatay polarizasyonda σ_0 (σ_0) değerleri verilmiştir. Radar sistemleri genelde hareketli hedef tespiti (GMTI) gibi arama modlarında $30^\circ - 40^\circ$ gibi *grazing* açılarında çalıştıkları için o açılardaki ortalama değerlere dikkat çekilmiştir.

X Bant, YY Polarizasyon

Angle	N	σ_{max}^0	σ_1^0	σ_{21}^0	Median	σ_{75}^0	σ_{95}^0	σ_{min}^0	Mean	Std. Dev.
0°	238	8.6	6.9	3.6	1.7	-1.4	-8.8	-15.0	0.8	4.4
10°	345	10.6	7.2	0.5	-2.3	-4.3	-10.1	-17.1	-1.8	4.8
20°	377	1.4	-0.4	-4.8	-6.2	-7.4	-12.1	-18.3	-6.3	3.1
30°	516	-1.2	-4.9	-7.2	-8.6	-10.2	-13.5	-18.6	-8.8	2.6
40°	931	-4.4	-7.5	-9.5	-11.2	-13.4	-17.4	-24.4	-11.7	3.1
45°	41	-5.3	-6.7	-8.7	-9.9	-12.2	-15.3	-15.7	-10.4	2.8
50°	890	-6.1	-8.6	-10.7	-12.4	-14.5	-18.4	-24.4	-12.8	3.1
60°	1033	-4.6	-9.5	-11.3	-12.8	-14.5	-19.5	-24.6	-13.2	2.8
70°	728	-3.4	-10.6	-12.7	-14.5	-16.5	-19.9	-28.5	-14.7	3.1
80°	242	-2.3	-12.9	-13.9	-14.6	-15.8	-24.3	-33.5	-15.5	3.5

X Bant, DD Polarizasyon

Angle	N	σ_{max}^0	σ_1^0	σ_{21}^0	Median	σ_{75}^0	σ_{95}^0	σ_{min}^0	Mean	Std. Dev.
0°	237	10.1	7.0	4.0	2.2	-0.6	-8.8	-12.7	1.2	4.4
10°	343	10.8	7.6	-0.5	-3.2	-5.6	-9.6	-14.1	-2.5	5.0
20°	466	1.3	-1.6	-5.8	-8.0	-9.7	-12.6	-17.5	-7.7	3.1
30°	510	-3.2	-6.5	-9.4	-10.9	-13.0	-15.6	-18.8	-11.1	2.8
40°	928	-4.7	-8.1	-11.9	-14.2	-16.8	-20.2	-25.2	-14.2	3.6
45°	40	-5.2	-6.5	-8.7	-10.9	-14.0	-16.6	-17.1	-11.2	3.3
50°	1366	-2.7	-7.9	-10.9	-13.7	-16.6	-20.1	-23.0	-13.8	3.8
60°	979	-4.9	-8.7	-11.8	-14.6	-17.0	-20.2	-23.5	-14.5	3.5
70°	729	-3.4	-8.8	-11.9	-15.0	-17.4	-20.4	-26.5	-14.8	3.7
80°	236	-2.3	-11.0	-12.7	-13.9	-15.3	-22.3	-33.5	-14.6	3.8

Şekil 5. 3. Çimlik alanda polarizasyona göre yer kargaşasının X-bantta değişimi [25]

X Bant, YY Polarizasyon

Angle	N	σ_{max}^0	σ_1^0	σ_{25}^0	Median	σ_{75}^0	σ_{95}^0	σ_{min}^0	Mean	Std. Dev.
0°	25	15.5	14.3	11.4	5.1	-3.2	-5.7	-6.3	5.0	7.4
5°	8	6.0						-7.5	1.5	4.5
10°	43	10.0	4.3	1.3	-1.6	-4.7	-12.9	-15.1	-1.6	5.1
15°	309	6.5	4.5	2.0	-1.0	-3.0	-5.0	-9.1	-0.5	3.1
20°	55	3.0	1.3	-2.0	-4.5	-6.9	-14.4	-17.0	-4.8	4.2
30°	94	3.5	-1.7	-5.6	-8.0	-10.4	-15.9	-19.1	-8.1	4.3
40°	58	3.0	0.0	-6.1	-9.2	-12.2	-20.4	-21.2	-9.1	5.5
45°	16	-7.3	-9.4	-10.3	-11.1	-12.3	-18.7	-19.2	-12.0	3.2
50°	94	3.0	-2.0	-8.4	-11.5	-13.9	-19.6	-24.9	-10.8	5.2
60°	126	1.0	-6.0	-12.2	-15.0	-21.0	-27.0	-31.0	-16.3	6.4
70°	57	-3.5	-6.4	-12.2	-14.5	-18.8	-29.1	-37.0	-15.2	6.3

X Bant, DD Polarizasyon

Angle	N	σ_{max}^0	σ_1^0	σ_{25}^0	Median	σ_{75}^0	σ_{95}^0	σ_{min}^0	Mean	Std. Dev.
0°	14	11.3						-6.4	2.0	5.7
5°	12	7.0						-6.3	-0.2	5.3
10°	24	5.7	3.0	-0.2	-5.3	-9.3	-13.6	-14.1	-4.9	5.7
15°	13	1.0						-8.5	-4.6	3.3
20°	48	-0.9	-2.5	-3.7	-6.1	-9.9	-13.6	-17.6	-6.9	3.9
30°	61	-3.6	-5.8	-7.6	-8.7	-11.6	-14.5	-18.5	-9.5	3.1
40°	32	-5.1	-7.1	-8.0	-10.2	-14.1	-18.4	-19.0	-11.0	3.6
45°	15	-7.7	-9.5	-10.2	-11.5	-13.8	-15.0	-16.3	-11.6	2.2
50°	144	-2.6	-7.1	-8.7	-11.0	-13.0	-16.7	-20.0	-11.1	3.2
60°	42	-9.6	-11.4	-12.3	-13.9	-17.3	-20.6	-22.6	-14.8	3.2
70°	31	-11.7	-13.1	-14.3	-16.0	-20.5	-25.3	-27.1	-17.0	3.7

Şekil 5. 4. Topraklık alanda polarizasyona göre yer kargaşasının X-bantta değişimi [25]

L Bant, YY Polarizasyon

Angle	N	σ_{max}^0	σ_1^0	σ_{25}^0	Median	σ_{75}^0	σ_{95}^0	σ_{min}^0	Mean	Std. Dev.
0°	2	7.0						1.5	4.3	3.9
10°	1	-1.4						-1.4	-1.4	0.0
20°	1	-5.8						-5.8	-5.8	0.0
30°	2	-8.9						-9.0	-8.9	0.1
40°	2	-9.0						-10.1	-9.6	0.8
50°	2	-11.0						-11.5	-11.3	0.4
60°	4	-4.8						-13.0	-9.5	3.4
70°	2	-12.1						-13.7	-12.9	1.1
75°	2	-6.0						-14.0	-10.0	5.7
80°	5	-8.0						-14.6	-12.4	2.8

L Bant, DD Polarizasyon

Angle	N	σ_{max}^0	σ_1^0	σ_{25}^0	Median	σ_{75}^0	σ_{95}^0	σ_{min}^0	Mean	Std. Dev.
0°	2	8.0						-0.1	4.0	5.7
10°	1	-3.5						-3.5	-3.5	0.0
20°	1	-10.4						-10.4	-10.4	0.0
30°	1	-11.5						-11.5	-11.5	0.0
40°	1	-14.5						-14.5	-14.5	0.0
50°	1	-13.8						-13.8	-13.8	0.0
60°	2	-14.2						-15.0	-14.6	0.6
70°	2	-13.9						-19.7	-16.8	4.1
80°	2	-18.5						-20.0	-19.3	1.1

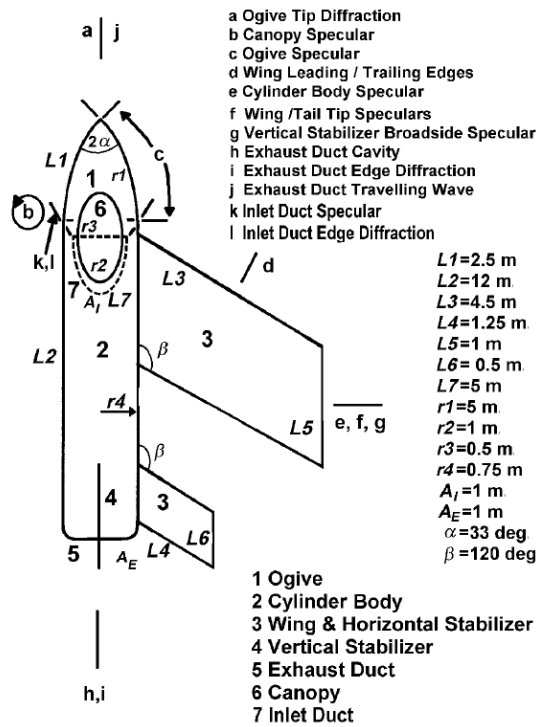
Şekil 5. 5. Yerleşim alanında polarizasyona göre yer kargaşasının L-bantta değişimi [25]

Yukarıda sırasıyla Şekil 5. 3, Şekil 5. 4 ve Şekil 5. 5'te de görüldüğü gibi farklı yeryüzü şekillerinin yansıtıcılık katsayıları sinyalin geliş açısına göre farklı davranışlar sergilemektedirler. Bir savaş uçağında kullanılan antenin polarizasyonu da kullanılması planlanan göreve alana bağlı olarak tasarlanır. Ancak genellikle savaş uçaklarında hem hedef

platformlar yapıları itibariyle dikey polarizasyonlu sinyalle aydınlatıldıklarında daha yüksek RKA gösterme eğiliminde oldukları için hem de dikey polarizasyonda *multi-path* etkilerinin daha düşük olmasından kaynaklı dikey polarizasyonlu olarak tasarlanırlar [11]. Bu nedenle bu tez çalışmasında da öngörülen L-bant radar anteni dikey polarize bir anten olarak değerlendirilmiştir.

5.1. Uçaklarda Radar Kesit Alanı

Aşağıda boyutları yaklaşık bir F-16 boyutunda olan bir hava aracı için RKA analizi yer almaktadır. Görüldüğü üzere bir hava aracının RKA hesabında hava aracı Şekil 5. 6'da verildiği gibi mümkün olan en küçük fiziksel parçalara ayrılır ve her bir parçaya uyan geometriye ait formülasyonla RKA hesabı yapılır. Aşağıda ayrıca farklı sinyal geliş açılarında RKA'nın değişimi de görülmektedir [22]. Yukarıda maddeler halinde ifade edilen RKA'yı belirleyen özelliklerin aşağıda Şekil 5. 7'de RKA'ya ne şekilde etki edebilecekleri somut olarak görülebilmektedir.



Şekil 5. 6. RKA hesabı için hava aracının bölümleri [22]

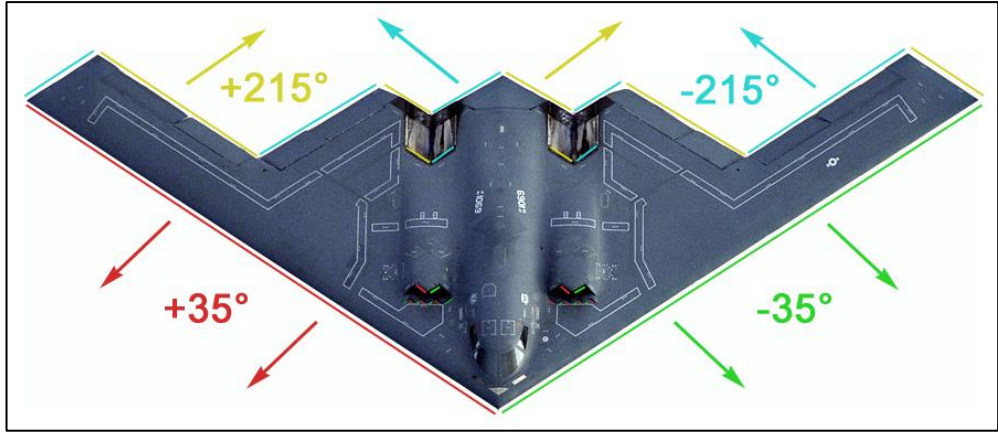
Figure 1.16 feature	Equation	RCS @ 0° (dBsm)	RCS @ 10° (dBsm)	RCS @ 20° (dBsm)	RCS @ 30° (dBsm)	RCS @ 40° (dBsm)	RCS @ 50° (dBsm)	RCS @ 60° (dBsm)	RCS @ 70° (dBsm)	RCS @ 80° (dBsm)	RCS @ 90° (dBsm)
a	$\lambda^2 \tan^4 \alpha / (16\pi)$	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
b	$\pi r_3 r_2^*$	-7	-5	-2	1	2	3	4	4	5	5
c	$\pi r_1^2 (1 - \cos \alpha / \sin \theta)$	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-10	7	9	10
d	$2(L3^2 + L4^2)/\pi$	-60	-60	-60	11	-60	-60	-60	-60	-60	-60
e	$2\pi r_4 \cdot L2^2/\lambda$	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60
f	$(L5^2 + L6^2)/\pi$	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-4
g	$4\pi(L4 \cdot L6 \sin \beta)^2/\lambda$	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	18
h	$2A_E$	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60
i	$(2\lambda)^2/\pi$	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
j	$\pi \lambda (r_4)^2 / (L1 + L2)$	-21	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60
k	$2A_I \cos^2 \theta$	3	2.9	2.5	1.8	-0.7	-0.8	-3	-6.3	-12	-60
l	$(L7)^2/\pi^{**}, (2\lambda)^2/\pi$	9	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23	-23
Total	Noncoherent Sum	10	2.9	3.8	12	3.8	4	5.4	9	10.4	19

Şekil 5. 7. Hava aracının bölümlerinin RKA'ya katkıları [22]

Askeri araçların, gemilerin veya uçakların genel boyutları, operasyonel yeteneklerinin sınırları içinde büyük ölçüde değiştirilemez. Bu durumda, araçların veya gemilerin geometrik kesitleri kolayca küçültülemez. Ancak, şekillendirme teknikleriyle hedef yüzeylerin ve kenarların yönlendirilmesi, radar sinyallerini dağıtmak ve yansıtmak için kullanılır. Hedefin bu şekilde düzenlenmesi, radarın tespit ve izleme yeteneklerini azaltarak, radarın algıladığı radar kesit alanını minimize eder. Bu, düşman radarı tarafından tespit edilme riskini azaltarak, askeri araçların, gemilerin veya uçakların daha az görünür hale gelmesine yardımcı olur.

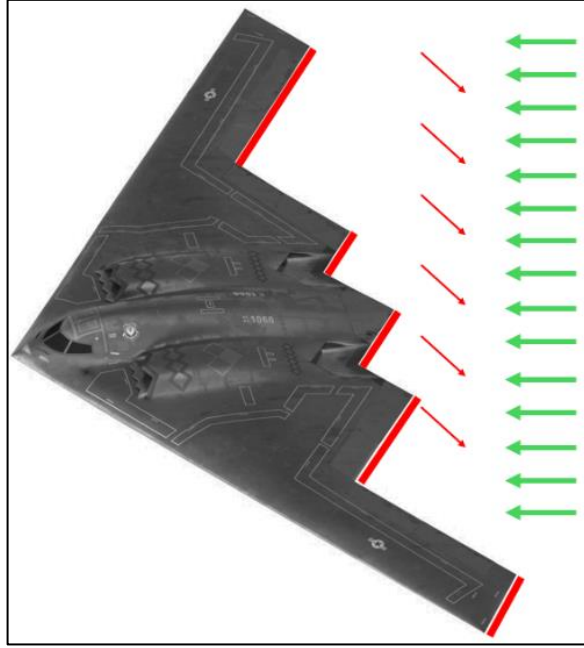
Düşük görünürlüklü uçaklarda yüzeylerdeki keskin hatlar, köşeler ve çıkıntılar minimize edilir [26], uçak dış kabuğundan çıkıntı yapan anten veya optik sensörler yüzeyi takip edecek şekilde konformal olarak tasarlanır. Buna ek olarak mühimmatlar gövde içindeki mühimmat yuvalarına yerleştirilir, kullanılması durumunda mühimmat kapağı hızlıca açılıp ateşleme sonrası tekrar kapanır.

Düşük görünürlüklü bir fiziksel tasarım yapmak için radardan gelen dalgayı radar yönünde değil farklı bir açıda yansıtmak bir tasarım yapılmalıdır. Buna ek olarak geri yansımanın kaçınılmaz olacağı durumlarda uçak üzerindeki yansıtıcı yüzeylerin gelen sinyali dar bir açı aralığında belli bir aralığa odaklayacak şekilde tasarım yapılmalıdır. Bunu sağlamak için testere dişi şeklinde geometrik tasarım yapmak yaygın bir çözümdür. Bu çözüm B-2 Spirit uçağında Şekil 5. 8'te gösterildiği şekilde uygulanmıştır.



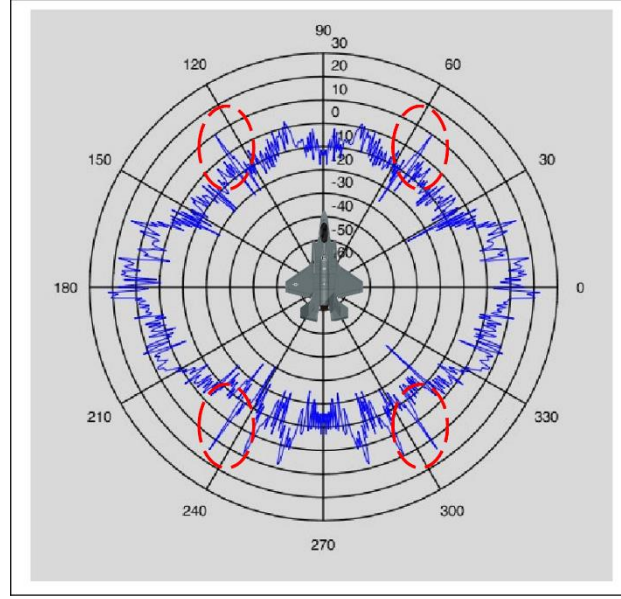
Şekil 5. 8. B-2 savaş uçağının geometrik tasarımı [27]

Uygulanmış olan bu testere dişi tasarımı sayesinde uçağa çarpan düzlem dalga aynı yöne toplanarak yansıtılır. Bu durum Şekil 5. 9 betimlenmiştir.



Şekil 5. 9. B-2 savaş uçağının gelen düzlem dalgaya davranışı [27]

Aşağıda Şekil 5. 10'da bir stealth savaş uçağına ait hesaplanmış bir RKA verilmiştir. Görüldüğü gibi, uçak yapısında testere dişli eş açılar kullanımından dolayı bazı geliş açılarında RKA'da spike'lar görülmektedir. Bu da tam olarak tasarımın bekleneni verdiğine işaretler.



Şekil 5. 10. Stealth bir uçağın radar kesit alanı [28]

5.2. Malzeme Etkisi-Radar Soğurucu Malzemeler

Bu tez çalışmasının da direkt olarak konusu olan, RKA'yı etkilen Radar Soğurucu Malzemeler (RAM) için yukarıda sıralanan etmenlerden farklı olarak bu konuya özel bir başlık ayrılmıştır.

RAM'ler genellikle uçak sistemlerinde belli frekans aralığında RKA'yı düşürmek için kullanılan malzemeler ve boyalardır. Özel olarak tasarlanan bu malzemeler üzerine düşen radar sinyallerini soğurup ısıya dönüştürerek geri yansımayı azaltmak ve engellemek için kullanılırlar [29].

Genellikle polimer ya da seramik malzemelerin özel yöntemlerle birleştirilmesi ve katmanlar arasının demir, nikel gibi yüksek iletkenliğe sahip malzemelerin küçük formlarda parçacıklar halinde doldurulması ile bu matris malzemeler oluşturulurlar. Kompozit bir malzeme olan RAM yapımında, polimer ve iletken parçacıklar karıştırılıp eritilerek bir kalıba dökülür daha sonra malzeme özel tekniklerle uçak üzerinde kullanılabilecek formda şekillendirilip katılaştırılır.

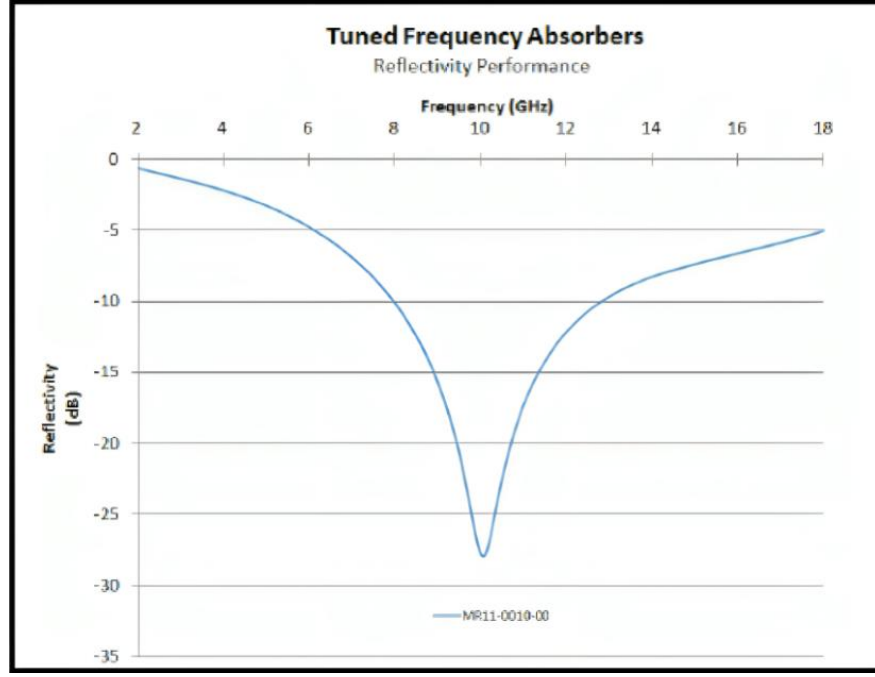
Radar soğurucu olarak kullanılan bir diğer materyal da radar emici boyalardır. *Radar Absorbing Paint* (RAP) olarak adlandırılan bu tip boyalar RAM malzemelerin pigmentlerle karıştırılmasıyla üretilirler. RAP boyalar uygulandığı yüzeye yüksek düzeyde yapışabilen boyalardır bu yönüyle de bu boyalar yüzeyde bulunan çukurluk ve girintileri doldurur ve böylece yüzeyin radar yansıtma oranını azaltır. Uygulama yöntemi olarak; malzeme sprey vasıtası ile yüzeye atılabilecek forma getirilir daha sonra bir sprey ya da fırça yardımı ile

yüzeye uygulanır. Malzeme uygulandıktan sonra kurumaya bırakılır, daha sonra ihtiyaca göre birden fazla katman uygulanabilir. Üretim, uygulama ve bakım maliyeti açısından oldukça yüksek maliyetli olan bir süreç olduğu için uçak yüzeyine uygulanan bu malzemeyi korumak için genellikle koruyucu bir kaplama uygulanır.

Bazı yaygın kullanılan RAM malzemeler şunlardır:

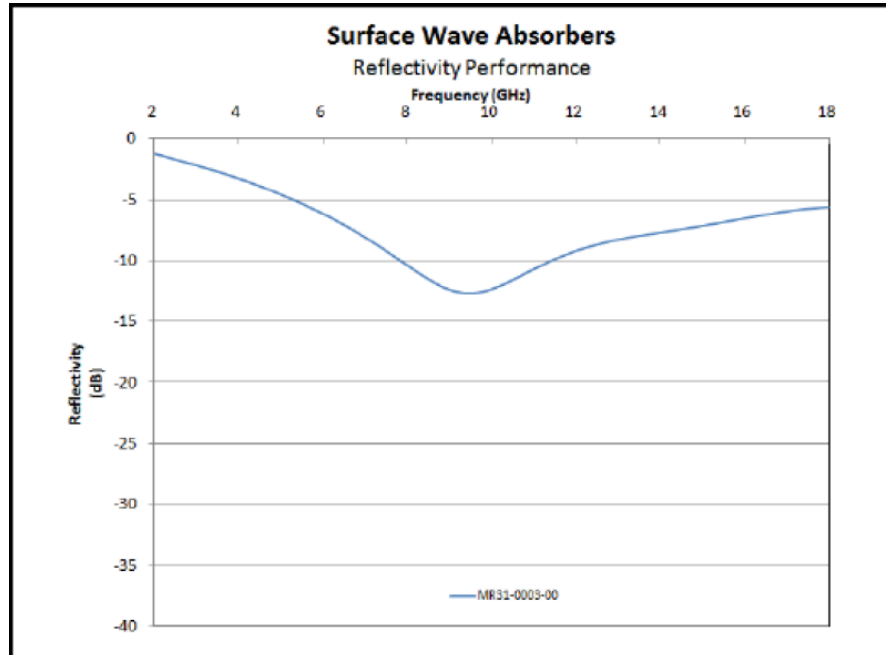
1. Seramikler: Titanyum dioksit, silikon karbür, bor karbür, magnezyum oksit ve alüminyum oksit gibi seramik malzemeler.
2. Karbon Bazlı Malzemeler: Karbon fiber, grafit, karbon nanotüpler, karbon siyahı gibi malzemeler.
3. Polimerler: Polimer malzemelere çeşitli kimyasal maddelerin ilave edilmesiyle oluşturulurlar. Bu tip malzemeler genellikle radom yapısında kullanılırlar.
4. Metalik köpükler: Genellikle alüminyum veya bakır gibi metalik malzemelerin köpük formuna getirilmesiyle elde edilir.

RAM malzemelerin en büyük dezavantajlarından biri bu tezin de odaklandığı şekilde bu malzemelerin tüm frekans bandı boyunca yeterli soğurumu yapamamasıdır. Bu malzemeler uçak üzerinde minimum ağırlık artışına neden olmak için belirli bir frekans bandında maksimum soğurma yapacak şekilde tasarlanırlar. Genellikle bu frekans bandı savaş uçaklarının burun radarlarının çalışma frekansları olan 8-12 GHz frekans aralığıdır. Aşağıdaki Şekil 5. 11’de MAST Technologies firması tarafından üretilen MR11-0010-00 malzemesinin frekansa göre yansıtıcılık grafiği verilmiştir.



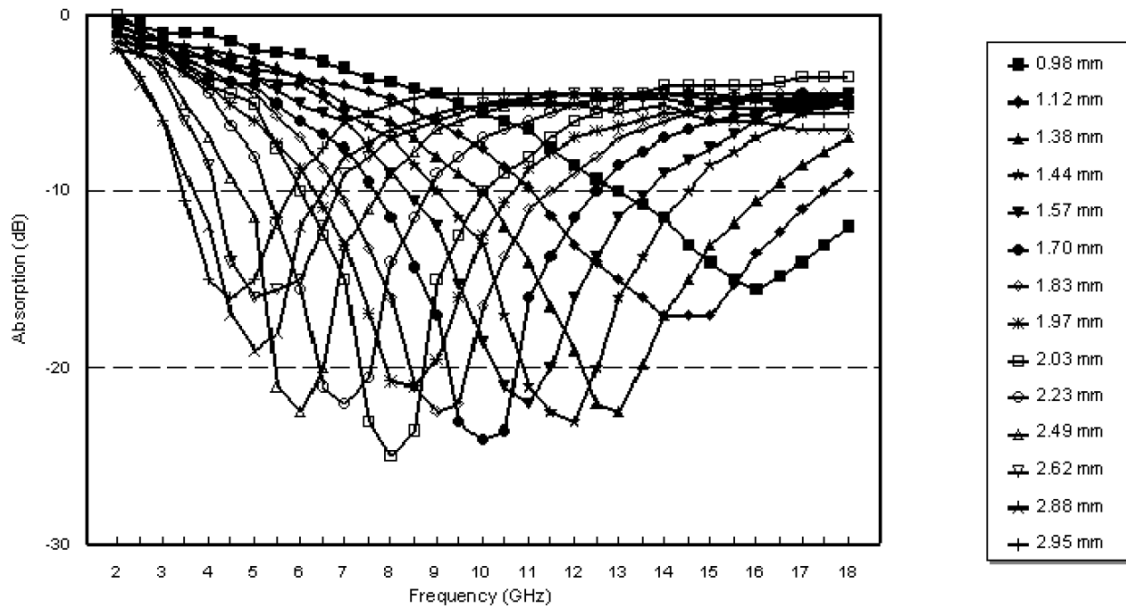
Şekil 5. 11. MR11-0010-00 malzemesinin frekansa göre soğuruculuk performansı [30]

Görüldüğü gibi malzeme 10 GHz’de maksimum performans noktasına ulaşırken, bu frekansta yaklaşık olarak 27 dB’lik bir soğurma performansına sahiptir. L-banda doğru yaklaştıkça malzeme neredeyse soğurma özelliğinin tamamını kaybetmektedir. Aşağıdaki Şekil 5. 12’de yine MAST Technologies firması tarafından üretilen MR31-0003-00 malzemesinin frekansa göre yansıtıcılık grafiği verilmiştir.



Şekil 5. 12. MR31-0003-00 malzemesinin frekansa göre soğuruculuk performansı [31]

MR31-0003-00 de MR11-0010-00'e benzer şekilde X-bantta maksimum performans noktasına ulaşırken, bu frekansta yaklaşık olarak 13 dB'lik bir soğurma performansına sahiptir. Bu malzeme de yine frekans L-banda doğru yaklaştıkça soğurma özelliğini neredeyse kaybetmektedir. Aşağıdaki Şekil 5. 13'te ise MWT Materials tarafından üretilen MF-500 urethane radar soğurucu boya malzemesinin frekansa göre yansıtıcılık grafiği verilmiştir. Bu malzemenin soğuruculuk karakteristiği uygulama kalınlığına göre değişiklik göstermektedir, ancak bu malzeme de yine eş zamanlı olarak L-banttan X-banta kadar bir bant genişliğinde soğurma performansı vermemektedir.



Şekil 5. 13. MF-500 malzemesinin frekansa göre soğuruculuk performansı [32]

Farklı malzemelerin RKA azaltıcı performansları 1.2 GHz'de ve X-bantın ortası olan 10 GHz'de aşağıda, Tablo 5. 2'de verilmiştir.

Tablo 5. 2. RAM malzemelerin frekansa göre dB soğuruculuk performansları

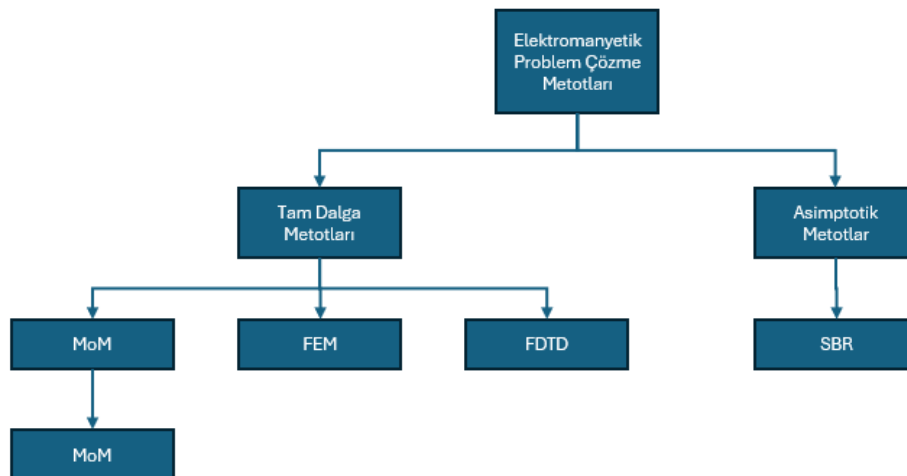
Frekans (GHz)	1.2	10
MR11-0010-00	-1	-27
MR31-0001-00	-1	-13
MF-500 (1.97 mm kalınlıkta)	-2	-15

Tablo 5. 2’de görüldüğü gibi kaplama uygulamalarında kullanılan üç malzemenin de RKA azaltma performansı X-bantta maksimum etkinliğe ulaşırken frekans azaldıkça çok yüksek bir performans kaybına uğramaktadır.

5.3. Düşük Görünürlük Konsepti

Bir radarın tespit menzili ve takip hassasiyeti hedef uçağın RKA’sına bağlı performans değerleridir. Daha önce bahsedildiği gibi bir radarın bir hedefi tespit kabiliyeti hedefin RKA’sı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle de düşük görünürlüklü bir savaş uçağı tasarımında RKA’nın belirli bir seviyenin altında tutulması kritik öneme sahiptir, genellikle RKA düşük görünürlüklü bir platform tasarımında *Key Performance Parameter* (KPP) olarak kabul edilir. Tasarımcılar, hem geometrik olarak uçağın açılarını doğru şekillendirmeye hem de geometrik olarak sınıra ulaşıldığında RKA’yı azaltabilmek için uçak yüzeyinde bu amaçla geliştirilen, bir önceki bölümde bahsedilen özel malzemeleri kullanarak sonuca ilerlemeye çalışırlar.

RKA’nın KPP’lerden biri olması nedeniyle, birçok düşük görünürlüklü savaş uçağı platformunun RKA değerleri yüksek gizlilik içeren bilgilerdir. Bu nedenle bu platformlara ait RKA değerleri CATIA gibi bazı 3-B modelleme araçlarıyla üretilen modellerin; CST, FEKO, HFSS gibi EM analiz araçlarıyla Tam Dalga Analizi veya Asimptotik yöntemler ile çözülmesi ile tahminlenmektedir, bu yöntemler MoM, FDTD, FEM, MLFMM’dir [33]. Açık kaynaklardan elde edilecek bilgiler bu analizler araçlarının çıktılarıdır. Bu analiz araçları aşağıdaki Şekil 5. 14’te verilen yöntemlerden bir veya birkaçını kullanarak RKA sonuçlarını vermektedir.



Şekil 5. 14. EM analiz yöntemleri

Bu metotlar Maxwell denklemlerini ele alış yöntemleri bakımından birbirinden farklılık gösterirler. Aşağıda Şekil 5. 15'te de tanımlandığı gibi bir problemin hangi yöntem çözüleceği genellikle problemin ne olduğuna ve ihtiyaca göre belirlenir.



Şekil 5. 15. EM analiz yöntemlerinin farklı uygulamalarda kullanımı [33]

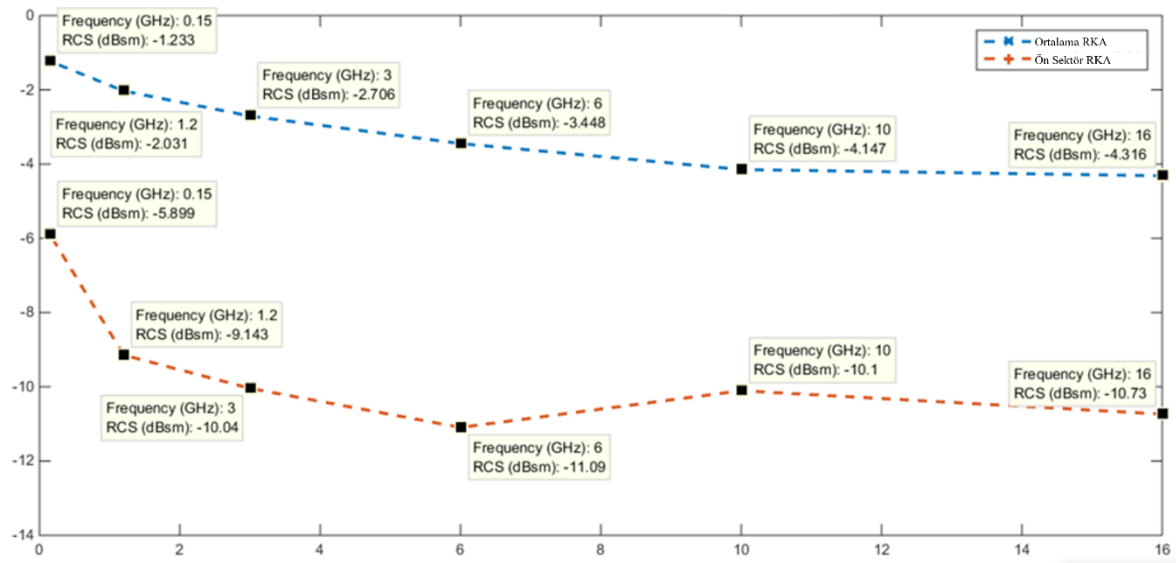
Nesnenin karmaşıklığı genellikle yapısında bulunan farklı dielektrik sabitlerine sahip malzemelerle belirlenir. Örneğin insan kafası gibi yapısında insan derisi, kemik, beyin sıvısı, kan, beyin farklı katmanları gibi farklı dielektrik katsayılarına sahip yapıların iç içe geçmiş bir şekilde bulunduğu yapılar karmaşıklığı yüksek yapılardır. Tam dalga metotları genellikle daha kesin sonuç ve daha yüksek hassasiyet verirler, ancak işlemci yükleri asimptotik yöntemlere göre daha fazladır [33].

5.4. Stealth Savaş Uçakları

Stealth savaş uçaklarının RKA'ları uçakların tasarım sürecinde bazı analizlerle optimize edilir. Bu analizler genellikle uçağın dış kabuğunun tasarımı sırasında aerodinamik özellikleri ve RKA'sı arasında yapılan, güçlü bilgisayarlar ile gerçekleştirilmiş simülasyonları içeren ödünleşme çalışmalarıdır. Uçağın yüzeylerindeki her bir bileşen radar dalgalarını minimize etmek ve aerodinamik olarak görevini de yerine getirmek için optimize edilir. Bu analizlerde uçağın düzleştirilmiş yüzeyleri ve keskin hatları, radar dalgalarının dağılmasını ve yansımalarını azaltmak için tasarlanır. Aerodinamik yönün ağır bastığı ve RKA yönünden

optimize edilemeyen yüzeyler radar soğurucu malzemeler ile üretilir. Ayrıca bu tip uçakların tüm yüzeyi RKA'yı azaltmak için radar soğurucu boya ile boyanır [36, 37].

Bir uçak RKA'sının hesaplanması; uçağın birebir modelinin bulunmamasından, uçağın gövdesinde kullanılan malzeme ve yüzeyinde kullanılan boyaların bilgisinin edinilememesinden bunlara ek olarak tam dalga veya asimptotik çözücülerin gerektirdiği çok yüksek işlemci ve RAM ihtiyacından dolayı oldukça zahmetli bir iştir. Aşağıda bir stealth uçak için yapılmış, tüm uçak yüzeyini iletken kabul eden bir RKA analizi Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16. Bir stealth uçağın farklı frekanslara göre malzemesiz RKA değerleri [38]

Bu RKA analiz çalışmasında da birçok diğer çalışmaya benzer şekilde, öncelikle uçağın modeli 3-B modelleme programı ile modellenmiştir. Modelin üretimi sırasında açık kaynaklardan elde edilen fotoğraflar ve videolar, gerçek boyutlara yakınsama yapmayı sağlayacak her türlü kıyaslama verisi, kanat açıklığı, boyutu gibi bilgileri içeren resmî açıklamalar ve tanıtım broşürleri, uzman yorumları ve benzer uçaklarla yapılan kıyaslamalar gibi birçok veri kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada üretilen uçak modeli POFACETS adı verilen bir algoritmaya sokulmuş ve birçok kez simülasyon koşturulmuştur. Simülasyonda koşturulan model RAM kaplamayı içermemektedir. Simülasyon, uçak burnu etrafında azimutta -30° ve 30° ve yükseliş ekseninde -15° ve 15° derece aralığında azimutta 1° ve yükselişte 5° derece çözünürlükte, VHF-Ku Bant aralığında yapılmıştır. Yukarıdaki şekilde hem ön sektör hem de ortalama RKA analiz sonuçları yer almaktadır. Savaş uçakları bir hedef bölgesine hücum ederlerken düşman unsurların o uçağı ilk olarak ön sektöründen görecektir, bu nedenle ortalama RKA'dan ziyade monostatik arayıcı radarın baktığı ön

sektörden analiz sonucunu değerlendirmek daha doğru sonuç verecektir. Bu kapsamda ön sektör RAM malzemesiz RKA değeri X-bantta-10.1 dBsm çıkarken, çalışmada malzeme ile bu değerin -20 dBsm'e kadar düşeceği öngörülmüştür. Ancak bu çalışmada bahse konu malzemenin özelliklerinden bahsedilmemiştir, bu nedenle ön sektör RKA belirlenmesinde bu tez çalışmasının 5.2. Bölümünde verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Çalışmada elde edilen malzemesiz RKA simülasyonun sonuçları Tablo 5. 3'te verilmiştir. Ortalama RKA'nın ön sektör RKA'dan daha yüksek olmasının sebebi, özellikle monostatik arayıcının kanat hücum ve firar kenarları yönünden ve arka sektörden baktığında RKA'yı ön sektöre göre daha yüksek görmesidir. Ancak görünmez uçaklarda görmeden-gör kabiliyeti için ön sektör RKA'sı her zaman optimizasyonun tercih edilen tarafı olmaktadır.

Tablo 5. 3. Hedef uçağın frekansa göre malzemesiz RKA değerleri

Sektör (dBsm)	Ön	Ortalama
1.2 GHz	-2.031	-9.143
3 GHz	-2.706	-10.04
6 GHz	-3.448	-11.09
10 GHz	-4.147	-10.1
16 GHz	-4.316	-10.73

Bölüm 5.2'de RKA azaltımı için potansiyel kullanılabilecek malzemeler ve Tablo 5. 2'de bu malzemelerin 1.2 GHz ve 10 GHz'de performansları verilmiştir. Bu bölümde ortalama bir değer elde edilmesi amacıyla her üç malzemenin ortalama değerleri alınmış ve her iki frekans değeri için performansın ortalaması elde edilmiştir. 1.2 GHz'de üç malzemenin ortalama RKA azaltma performansı:

$$Ortalama_{@1.2\text{ GHz}} = \frac{10^{\frac{-2}{10}} + 10^{\frac{-1}{10}} + 10^{\frac{-1}{10}}}{3} = 0.74 \quad (5.10)$$

$$10 \log(0.74) = -1.3 \text{ dB} \quad (5.11)$$

10 GHz'de üç malzemenin ortalama performansı:

$$Ortalama_{@10\text{ GHz}} = \frac{10^{\frac{-15}{10}} + 10^{\frac{-27}{10}} + 10^{\frac{-13}{10}}}{3} = 0.028 \quad (5.12)$$

$$10 \log(0.03) = -15.542 \text{ dB} \quad (5.13)$$

Bu durumda Tablo 5. 3'te verilen ön ve ortalama RKA'lar üzerine RAM malzemeden kaynaklı ortalama iyileşme eklendiğinde hedef uçağın nihai RKA'sı aşağıdaki gibi olmaktadır.

Tablo 5. 4. RAM malzemeli RKA değerleri

Sektör (dBsm)	Ön	Ortalama
1.2 GHz	-3.331	-10.451
10 GHz	-19.147	-25.642

Tablo 5. 4'te görüldüğü gibi stealth hedef uçağın 1.2 GHz ve 10 GHz frekansları RKA'ları arasında ön sektörde aşağıdaki fark bulunmaktadır. Bu fark L-bantta çalışan bir radar için hedef tespiti açısından X-bant bir radara kıyasla kayda değer bir farktır.

$$RKA_{farkı} = | - 3.339 - (-19.147) | = 15.808 \quad (5.14)$$

Sonuçtan da görüldüğü gibi, bu tez çalışması kapsamında hedef uçak olarak kullanılacak olan radar düşük görünürlüğüne sahip stealth hedef uçağın L-bant ve X-bant RKA'ları arasında 15.808 dB'lik fark bulunmaktadır. Çalışma bu fark temel alınarak ilerletilmiştir.

6. SİSTEM BÜTÇE DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde F-16 uçağının kanat hücum kenarları içine yerleştirebilecek boyutlarda bir radar anteni için araştırma ve değerlendirmeler yer almaktadır. Bu kapsamda L-bant radar için ise F-16 uçağının açık kaynaklardan elde edilen fiziksel boyutları araştırılmış ve kanadın hücum kenarına sığabilecek anten boyutları belirlenmiştir.

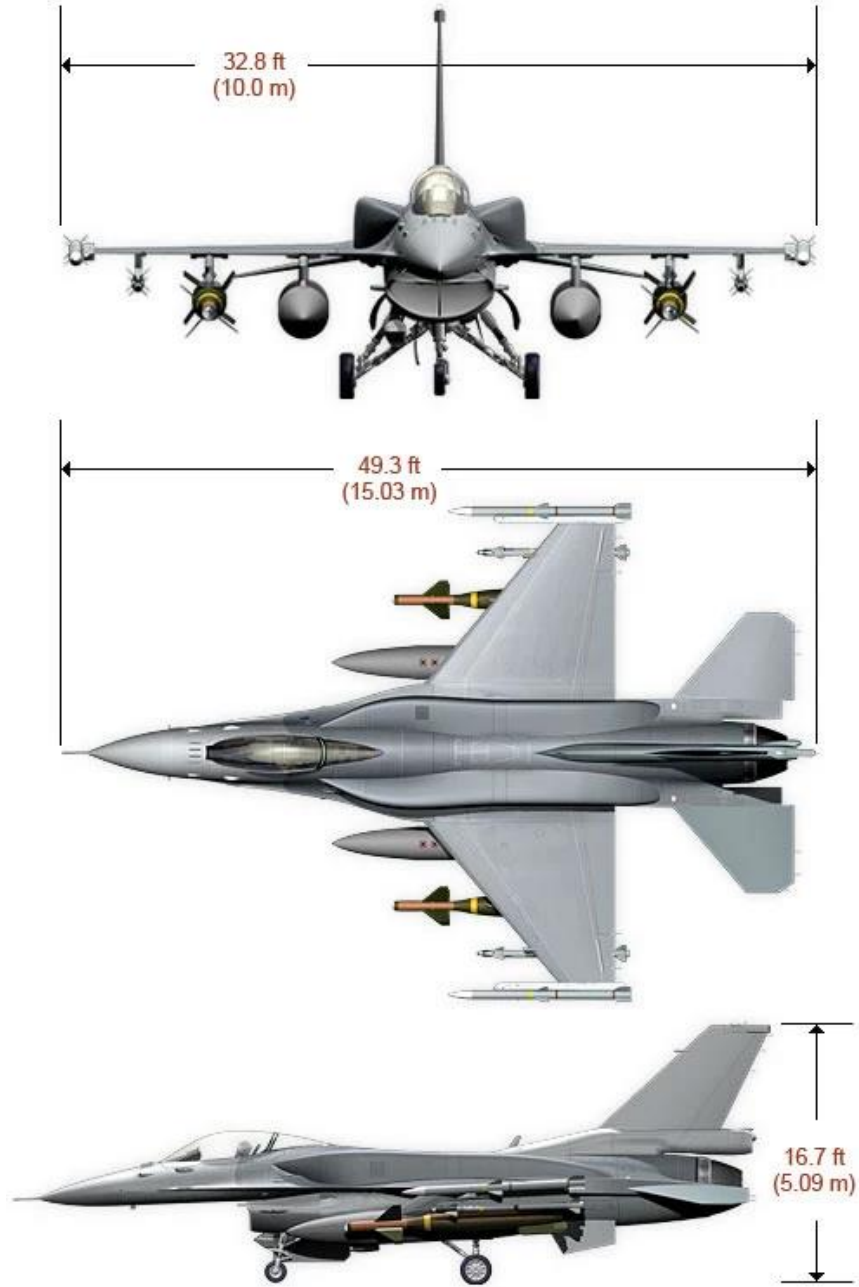
6.1. L-Bant Radar Anteni Bütçesi

Savaş uçakları, çok düşük irtifalar ile yüksek irtifalar arasında harekât yapabilme kabiliyetine sahiptirler. Bir F-16 için servis tabanı düşük seviye intikal operasyonları sırasında 50 metrelere kadar inebilmektedirken, 50000 ft. irtifada servis tavanı olabilmektedir [39]. Ancak bu yüksekliklerde uçağın uzun süre uçurulması karşılaşılan çevre koşullarından dolayı uçak malzemesini çok yorabilmekte hem de oksijen yetersizliğinden dolayı motorların etkin çalışmasını engellemektedir. Bu nedenle muharebe sırasında savaş uçakları genellikle 20000-35000 ft. yükseklikler arasında angajmana girmektedirler. Çok yüksek ve çok alçaktan uçaklar ile hava-hava angajman ihtimali daha düşük olması nedeniyle, uçaklarda yanca çözünürlüğü yükseliş çözünürlüğüne göre daha kritiktir bu nedenle üzerine yerleştirilmesi düşünülen L-bant radar dikey bir lineer dizi anten yerine yatay bir dizin anten olmalıdır. Bu nedenle bu radarın ön sektörü görebilecek ve yatay olarak yerleşim sağlanabilecek bir yer olan kanat hücum kenarlarına yerleştirilmesi en uygun yer olacaktır. Yerleşim pozisyonları aşağıdaki Şekil 6. 1’de kırmızı ile gösterilmiştir.



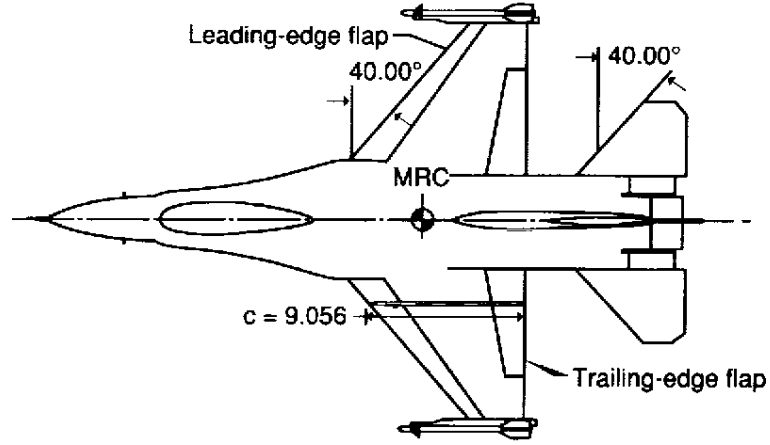
Şekil 6. 1. L-bant radarların kanatta yerleşim bölgeleri [40]

Öncelikle bu alana sığabilecek anten boyutunun ne olacağını belirlemek için F-16 uçak boyutlarını incelenmiştir, daha sonra kanat hücum kenar uzunluğu tespit edilmiştir. Bunun için açık ve resmi kaynaklarda yer alan bilgiler kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 6. 2 ve Şekil 6. 3'te F-16'nın boyutları yer almaktadır.



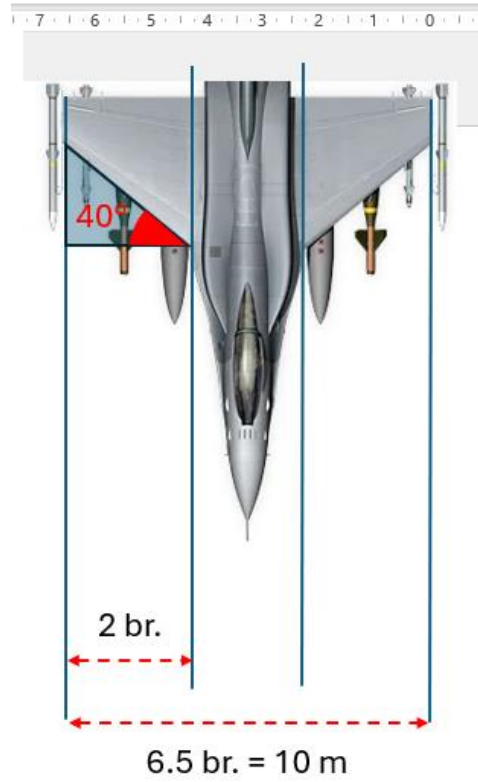
Şekil 6. 2. F-16 Blok-70 boyutları [40]

Aşağıda ise hücum kenar açısı yer almaktadır.



Şekil 6. 3. F-16 kanat hücum kenarı açısı [41]

Görseldeki hücum kenar açısı ve yukarıdaki görseldeki kanat açıklığı uzunluğu kullanılarak, hücum kenarının uzunluğu hesaplanmıştır.

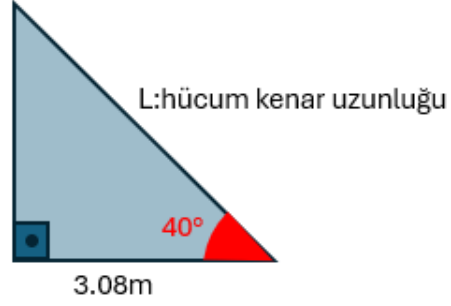


Şekil 6. 4. F-16 kanadının kanat açıklığına oranı

Her birim uzunluk Şekil 6. 4'te verilen orantı kullanılarak yaklaşık olarak aşağıdaki gibi 1.538 m olarak hesaplanır.

$$\frac{10}{6.5} = 1.538 \text{ m} \quad (6.1)$$

Bu durumda Şekil 6. 5’te verildiği gibi Pisagor teoremi kullanılarak hücum kenarının uzunluğu yaklaşık olarak aşağıdaki gibi 4 m olarak bulunur.



Şekil 6. 5. F-16 kanadının geometrik tasviri

$$\cos 40^\circ \times L = 3.08 \text{ m} \quad (6.2)$$

$$L = \frac{3.08}{\cos 40^\circ} = 4.02 \text{ m} \quad (6.3)$$

7. RADAR TESPİT MENZİLİ ANALİZİ

Bu bölümde kanat hücum kenarlarına yerleştirilecek L-bant radarın nihai tasarımı ve tespit menzil analizi yapılmıştır ve X-bant radarın hedef tespit kabiliyeti ile karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak farklı yağış koşulları altında iki radarın performans tepkileri incelenip karşılaştırılmıştır.

7.1. X-Bant Radar Menzil Analizi

Bir savaş uçağı için, radar tespit menzili kritik bir parametredir. Bu nedenle genellikle gizlilik derecesi yüksek bir bilgidir. Radar anteni çapı da dolaylı olarak tespit menzili tahminlemek için önemli bir bilgi olduğu için kesin çap bilgisi de genellikle paylaşılmamaktadır. Ancak açık kaynaklarda F-16 Blok 70 versiyonlarında kullanılan AN/APG-83 burun radarının çapı 60-70 cm olarak geçmektedir. Bu bilgi genellikle açık kaynaklarda paylaşılan fotoğraflar ve videolar ile tahminlenmektedir. Açık kaynaklarda AN/APG-83 için yer alan menzil değerleri genellikle bu çalışmaların bir ürünü olarak ortaya konmaktadır.

Bu kapsamda AN/APG-83 burun radarına sahip bir F-16'nın 1m² RKA'ya sahip hedefi %90 P_d ile tespit edebildiği menzil 47 NM yani 87 km'dir [42].

Yukarıda F-16 Viper savaş uçağının 1m² RKA'ya sahip bir hedefi görebileceği mesafe verilmiştir. Ancak bu tez kapsamında hedef uçak stealth bir savaş uçağı olacağı için, Tablo 5. 4'te hesaplanan RKA değerine göre F-16 burun radarının bu hedefi görebileceği menzil Eşitlik 3.21'de yer alan Radar Menzil Denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Burada RKA'ların oranlarını kullanarak bir hesaplama yapılmıştır. İlk olarak stealth uçağın RKA'sı oranlama yapabilmek için lineer skalaya aşağıdaki gibi çevrilmiştir:

$$10^{\frac{-19.147}{10}} = 0.012 m^2 \quad (7.1)$$

Daha sonra RKA'ların oranının 4. Derece kökü yardımıyla bu oranın tespit menzili üzerine etkisi aşağıdaki gibi bulunur:

$$Hedefi tespit menzili = \sqrt[4]{\frac{RKA_{stealth A/C}}{RKA_{1m2}}} \times Menzil_{1m2} \quad (7.2)$$

Yukarıdaki eşitlikten tespit menzili 28.794 km bulunur. Bu hesaplamalara göre F-16 Viper Savaş uçağı aşağıda Tablo 7. 1’de karşılık gelen RKA’lara sahip ve uçağın nişan hattından gelen hedefleri tespit menzilleri verilmiştir.

Tablo 7. 1. F-16 burun radarının standart $1m^2$ ve stealth bir uçağı tespit menzili

RKA (m^2)	1	0.012
Tespit Menzili	87	28.794

7.2. L-Bant Radar Menzil Analizi

Bu çalışmanın kapsamı olan L-bant radar daha önce de bahsedildiği gibi F-16 savaş uçağının kanat hücum ne kenarına yerleşebilecek şekilde tasarlanacaktır. Bu nedenle kalınlık kısıtından da dolayı kanat hücum kenarına yükselişte tek elemanlı doğrusal bir dizi anten planlanmıştır. İlerleyen bölümde L-bant radarın çıkış gücü ve anten kazancı araştırılmıştır.

7.2.1. L-bant güç yükselteci

Tez çalışmasının bu bölümünde tasarlanacak olan L-bant radar sistemine entegre edilmek üzere tasarlanmış bir L-bant yüksek güç amplifikatörünü araştırılmıştır. Askeri uygulamalar için bir güç amplifikatörü seçerken, zorlu operasyonel ortamlarda optimal performans ve güvenilirlik sağlamak için belirli kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kriterler arasında dayanıklılık, verimlilik, güvenilirlik ve mevcut sistemlerle uyumluluk bulunur. Dayanıklılık, amplifikatörün sıklıkla askeri operasyonlarda karşılaşılan aşırı sıcaklıklar, titreşimler ve şoklar gibi sert koşullara dayanabilmesi için oldukça kritiktir. Verimlilik, güç tüketimini minimize etmek için önemlidir, bu sayede taşıyıcı platformun harekât yarıçapı minimum olarak kısıtlanmış olacaktır. Bunun temel nedeni, aviyonik ekipmanlarda güç kaynağı taşıyıcı platformun jeneratörleridir. Bu jeneratörler de takatlarını uçak motorundan alırlar, bu nedenle uçağa eklenecek her ekipman getirdiği ağırlığın yanı sıra bu yönüyle de bir maliyet getirmektedir. Güvenilirlik, kritik görevler sırasında arıza veya arızaların riskini azaltarak zaman içinde tutarlı performans sağlar. Genellikle komponentlerin ve ekipmanların MIL-STD-704, MIL-STD-810G, DO-178, DO-254 gibi bu gerekleri regüle eden standartlara uygun olmaları beklenir. Bütün bunların ışığında, 1.2 GHz frekansında çalışabilecek, yüksek güç sağlayabilecek ve askeri standartları da sağlayacak bir güç yükselteci olarak MACOM’un CGHV14800 güç yükseltecinin kullanılabileceği

değerlendirilmiştir. Aşağıda Şekil 7. 1’de çıkış gücünü belirlemeye yardımcı olacak şekilde *datasheet*’in ilgili bölümü verilmiştir [43].

Typical Performance Over 1.2 - 1.4 GHz ($T_c = 25^\circ\text{C}$) of Demonstration Amplifier						
Parameter	1.2 GHz	1.25 GHz	1.3 GHz	1.35 GHz	1.4 GHz	Units
Output Power	1000	940	940	920	910	W
Gain	15.5	15.2	15.2	15.1	15.1	dB
Drain Efficiency	74	73	73	69	67	%

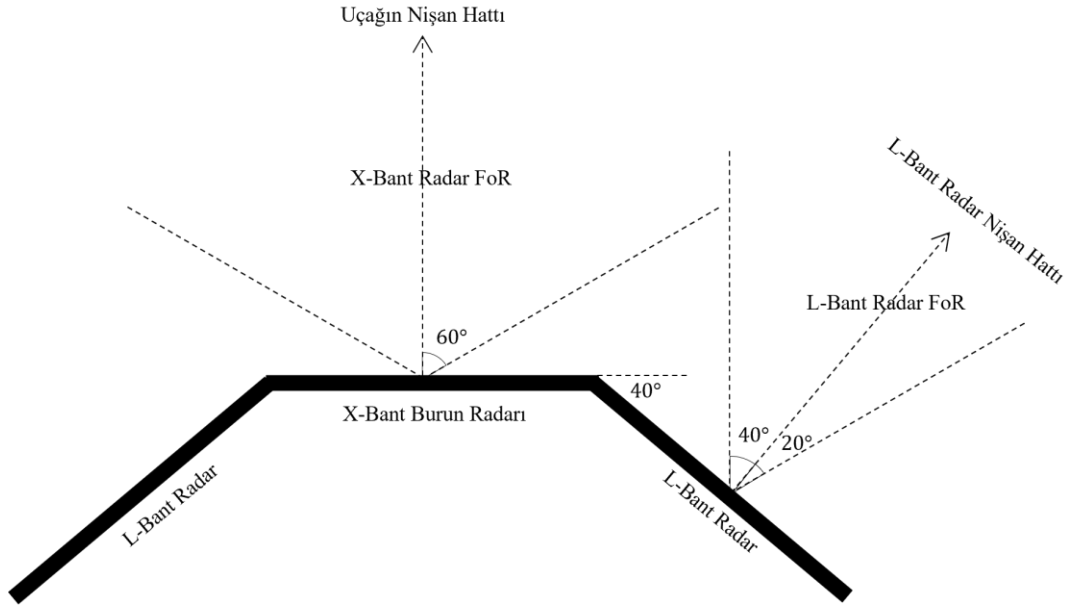
Note: Measured in the CGHV14800F-AMP amplifier circuit, under 100µsecs pulse width, 5% duty cycle, $P_{in} = 44.5\text{ dBm}$.

Şekil 7. 1. CGHV14800 güç yükseltecinin frekansa göre çıkış gücü

Şekil 7. 1’de görüldüğü gibi yükselteç 1.2 GHz frekansında %5 çalışma döngüsünde 1000W ortalama çıkış gücü vermektedir. Bu değer her bir anten elemanından atılabilecek ortalama güçtür, toplam ortalama gücü bu performans değerine dayanarak analizlere dahil edilmiştir.

7.2.2. L-bant radar dizi anteni

Bu bölümde F-16 hücum kenarına yerleşebilecek boyutlarda bir anten için boyut değerlendirmesi, anten tasarımı ve anten kazancı çalışmaları yapılmıştır. Hücum kenarının kalınlığı itibarıyla ilgili bölgeye yerleşebilecek anten tek sıra lineer bir dizi anten olarak planlanmıştır. Bu tek sıra anten dizi ile radar yancada açı çözünürlüğü sunabilecektir. Radar açıklıkları, zaman paylaşımı çalışacak şekilde planlanmıştır. Her iki kanada yerleştirilecek ve tasarlanacak L-bant radarın FoR’u burun radarının FoR’una eşit olacak şekilde planlanmıştır. AN/APG-83 burun radarının FoR’u açık kaynaklarda $\pm 60^\circ$ (120°) olarak belirtilmiştir [42, 44]. Bu nedenle, uçağın burnu 0° olarak kabul edildiğinde ve yanca açısının saat yönünde arttığı varsayıldığında, sağ kanada yerleştirilecek anten, antenin mekanik referans noktasına göre $-40/+20$ açı aralığında tarama yapmalıdır. Bu durum Şekil 7. 2’de gösterilmiştir.



Şekil 7. 2. Yerleşime göre FoR gösterimleri

Anten tasarımında dikkat edilmesi gereken noktalardan biri bölüm 1.2.1’de bahsedildiği gibi grating lobe’lardan kaçınmaktır. Burada Eşitlik 1.10’da verilen formül kullanılarak iki komşu anten elemanı arasındaki maksimum mesafe aşağıdaki gibi bulunur. Burada ön değerlendirme olarak L-bant radarın maksimum tarama açısı 40° olacak şekilde bir hesaplama yapılmıştır. Burada ‘d’ dizi içindeki komşu iki anten arasındaki mesafedir.

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1.2 \times 10^9} = 0.25 \text{ m} \quad (7.3)$$

$$d < \frac{0.25}{1 + \sin 40} = 0.152 \text{ m} \quad (7.4)$$

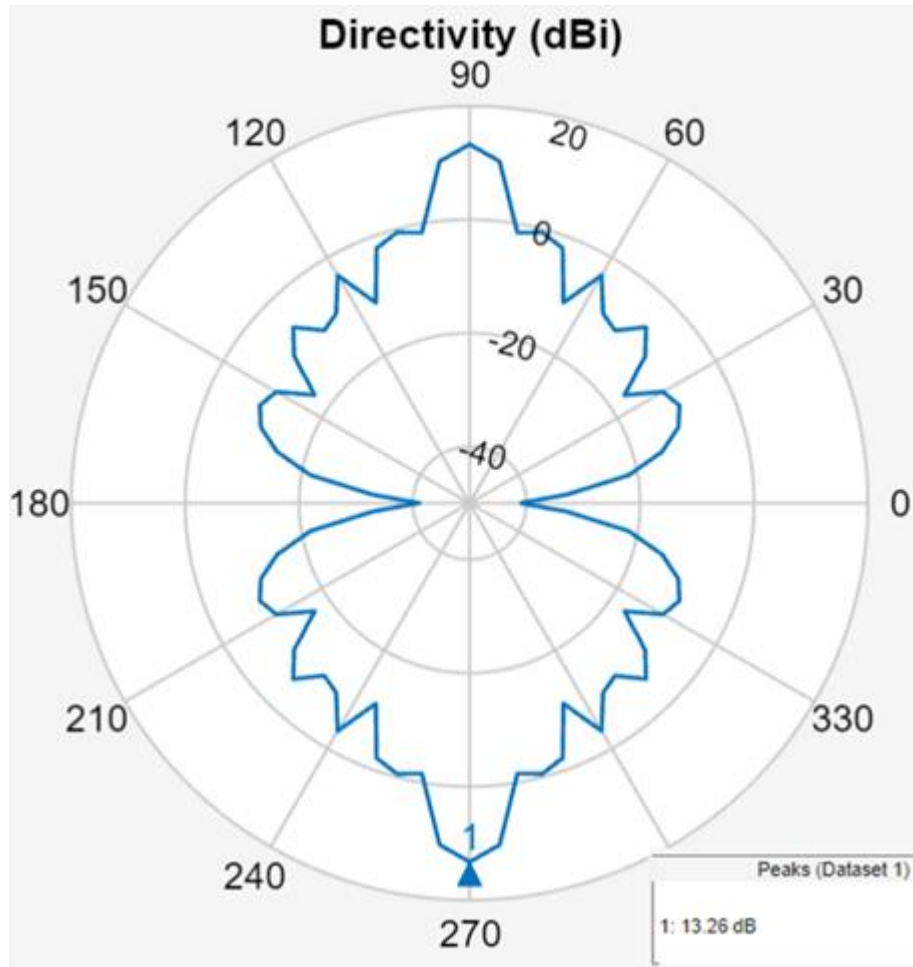
Bu sonuca göre tarama açı aralığında grating lobe oluşmaması için iki anten elemanı arasındaki mesafe 0.152 m’den daha az olmalıdır. Ancak, radar uygulamalarında, anten elemanları arasındaki mesafeyi genellikle $\lambda/2$ olarak ayarlamak genel bir tasarım tercihidir. $\lambda/2$ anten aralığına göre tasarım yapmak, gelecekte bu antenden daha geniş bir tarama açısı talep edildiğinde anteni revize etmeden kullanabilme esnekliği sunmaktadır. Bu çalışmada da iki anten elemanı mesafe yarım dalga boyu olan 0.125 m olarak seçilmiştir. Bu tercih, dizide yer alacak anten elemanı sayısı, dolayısıyla güç yükselteci ve çıkış gücünü de belirleyeceğinden önemli bir tasarım kararıdır.

Antene dair olan ve sistem performansını direkt olarak etkileyen bir diğer önemli parametre de anten kazancıdır. Anten kazancı ve dizinin fiziksel boyutu arasında Eşitlik

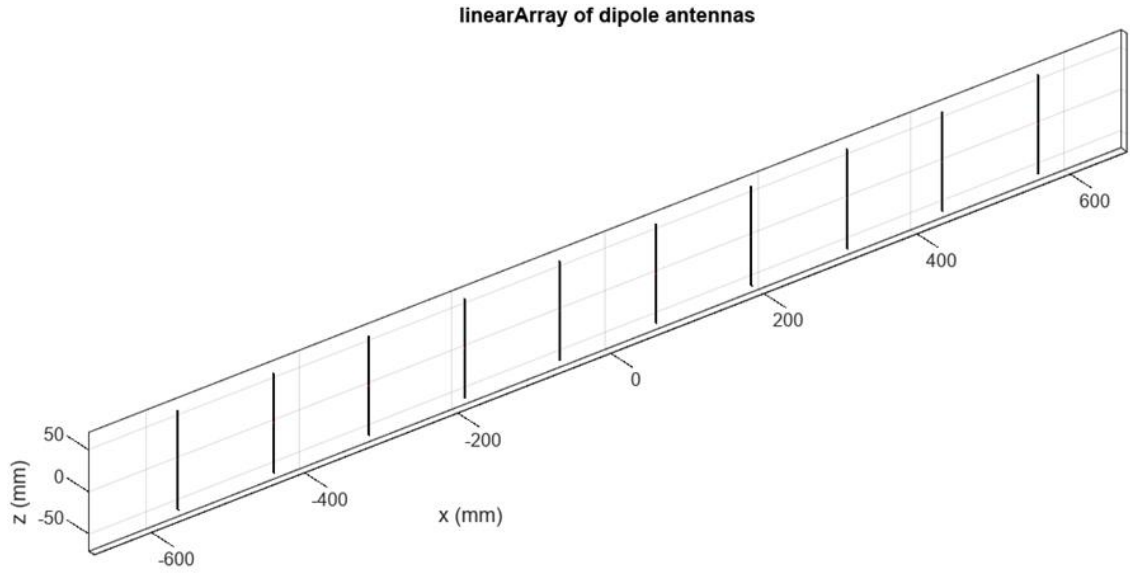
1.9’da verilmiş olan ilişki vardır. Eşitlik 3.18 ve 1.9’da beraber görülebileceği üzere dizinin uzunluğu sistemin performansını direkt olarak etkilemektedir.

MATLAB’ın Array Designer aracını kullanarak, 0.125 m anten eleman aralığına sahip 10 elemanlı bir dizi tasarlanmıştır. Bu dizinin tepe yönlülüğü Şekil 7. 3’te görüldüğü gibi 13.26 dBi olarak gözlemlenmiştir. Bu durumda dizinin uzunluğu Şekil 7. 4’te de verildiği gibi yaklaşık olarak 140 cm olmaktadır. Daha önceki bölümde belirtildiği gibi, kanat ön kenar uzunluğu 4 m olduğundan, bu dizinin bu bölgeye rahatça yerleştirilmiş olacağı kabul edilmiştir. Analiz bölümünde 10 ve 16 elemanlı anten dizisine sahip radarların performanslarının benzetimleri yapılmıştır. Her iki anten elemanı arasında kazançları Eşitlik 1.9’a göre orantılı olarak aşağıdaki gibi hesap edilmiştir. Dizinin yayılım paterni ve fiziksel görünümü aşağıda verilmiştir.

$$13.26 \text{ dBi} + 10 \log\left(\frac{16}{10}\right) = 15.301 \text{ dBi} \quad (7.5)$$

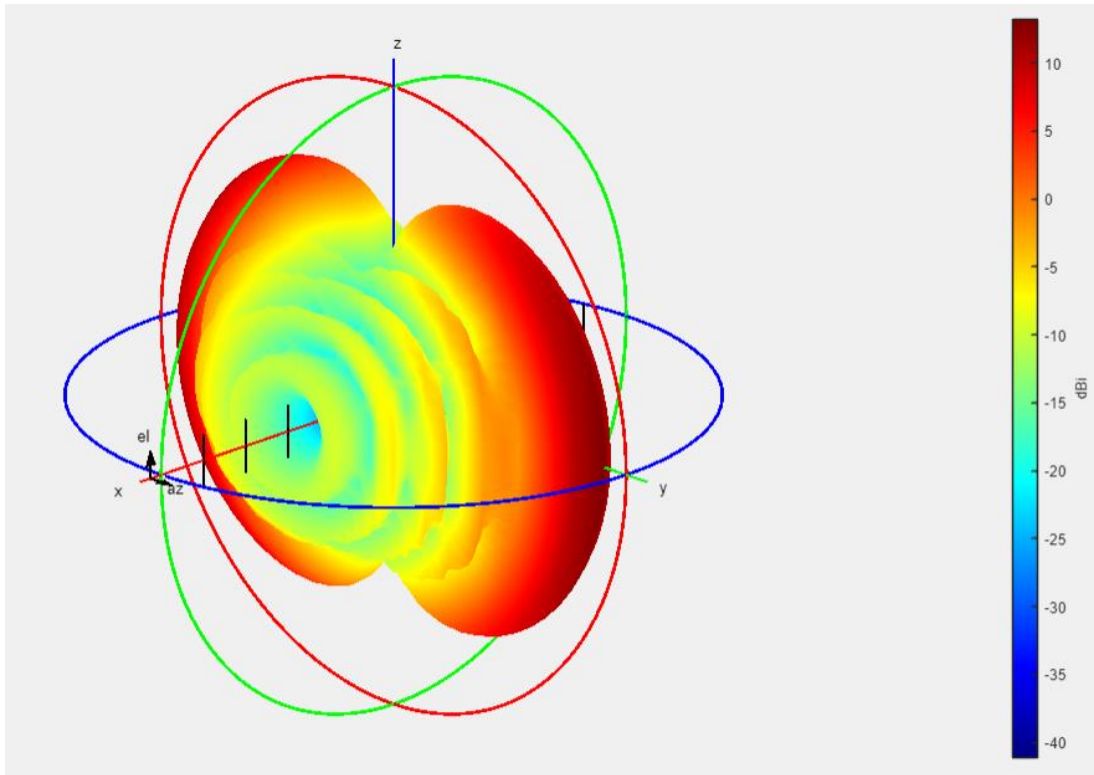


Şekil 7. 3. Dizi anten yayılım paterni



Şekil 7. 4. L-bant dizi anten

Aşağıda Şekil 7. 5'te ise dizi antenin 3 boyutlu yayılım paterni görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi yanca doğrultusunda tek sıra dizi anten olmasından kaynaklı yancada 10° derecelik bir hüzme genişliği sağlanırken, yükselişte hüzme oldukça geniştir.



Şekil 7. 5. 10 elemanlı dizinin 3 boyutlu yayılım paterni

7.2.3. L-bant radar performansı

Bu bölümde, bir önceki bölümde verilen L-bant radarın çıkış gücü ve anten kazancı bilgileri de kullanılarak radarın performans analizi yapılmıştır. Temel parametreler ve varsayımlar aşağıda verilmiştir:

- Çalışma frekansı= 1.2 GHz
- Ortalama çıkış gücü= 10 elemanlı dizi :10x1000 = 10 kW, 16 elemanlı dizi: 16x1000=16 kW
- Gönderme Anten kazancı= 10 elemanlı dizi:13.26 dBi, 16 elemanlı dizi: 15.301 dBi (antenin mekanik nişan hattında)
- Alma Anten kazancı= 10 elemanlı dizi:12.26 dBi, 16 elemanlı dizi: 14.301 dBi (antenin mekanik nişan hattında), 1 dB Tapering kaybı (yalnızca almada)
- Anten etkinliği= 0.9
- CPI süresi= 50 ms
- T=290K
- Gürültü faktörü= 4 dB
- Sistem kaybı= 3 dB (sinyal işleme, radom, kablo vb. kayıplar dahil)
- Atmosferik kayıp= 0.002 dB/km @1.2 GHz

Yukarıda da bahsedildiği gibi L-bant radar antenleri her iki kanada 40° açıyla yerleştirilecektir. Bu durumda yancada uçağa göre 0°'yi tarayabilmek için yancada 40° lik bir *off-boresight* açısı gerektirmektedir. Bu da tarama kaybı olarak adlandırılan bir ek kayba neden olacaktır. Bu kaybın sebebi dizi antenin mekanik nişan hattından uzaklaştıkça antenin aktif açıklığının tarama açısının kosinüsü ile orantılı olacak şekilde bir azalmaya neden olmasıdır, tarama açısı arttıkça ana lobunda 3-dB hüzmeye genişliği artıp, ana lob'un yönlülüğü azalacaktır [11]. Tarama kaybı aşağıdaki şekilde ifade edilir. Bu durumda Eşitlik 3.20, Eşitlik 7.7'deki halini alır.

$$\text{Anten Kazancı}_{@ \theta} = \text{Anten Kazancı}_{@ 0^\circ} \cdot \cos \theta \quad (7.6)$$

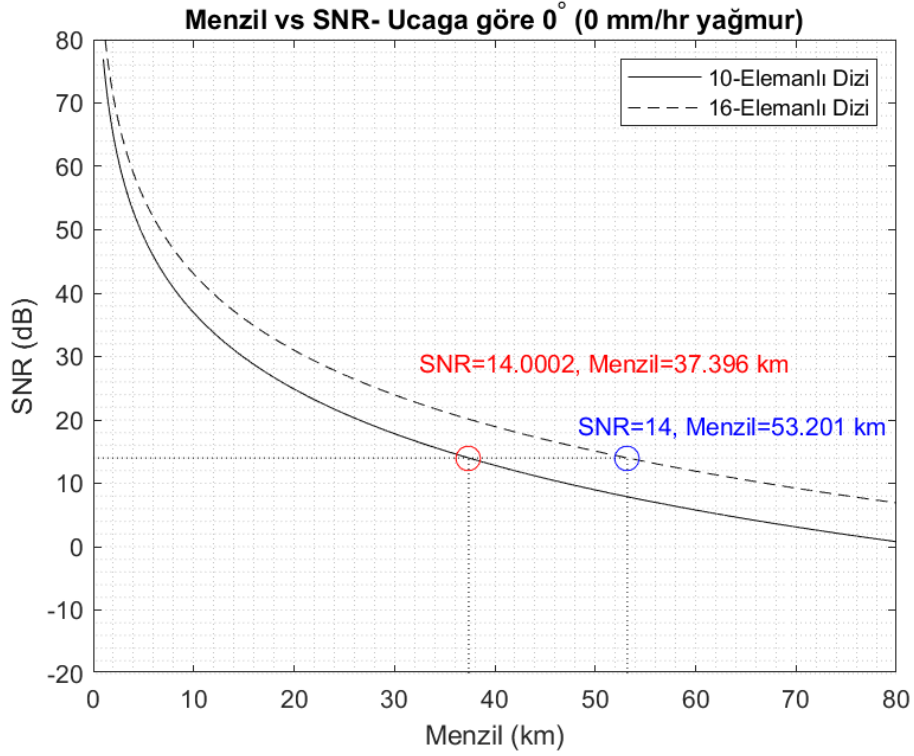
$$SNR = \frac{P_{avg} G_t G_r (\lambda)^2 \sigma T_d \cos \theta}{(4\pi)^3 R^4 k T B F_n L_s} \quad (7.7)$$

F-16 savaş uçağının uçağın nişan hattından gelen hedefleri tespit edebileceği menziller Tablo 7. 1'de verilmiştir. Aşağıdaki Tablo 7. 2'de verilen tablo, Eşitlik 7.7'ye göre X-bant burun radarının L-bant radarın merkezi nişan hattında yani uçağa göre 40°'de bulunan hedefleri tespit edebileceği mesafeleri içermektedir.

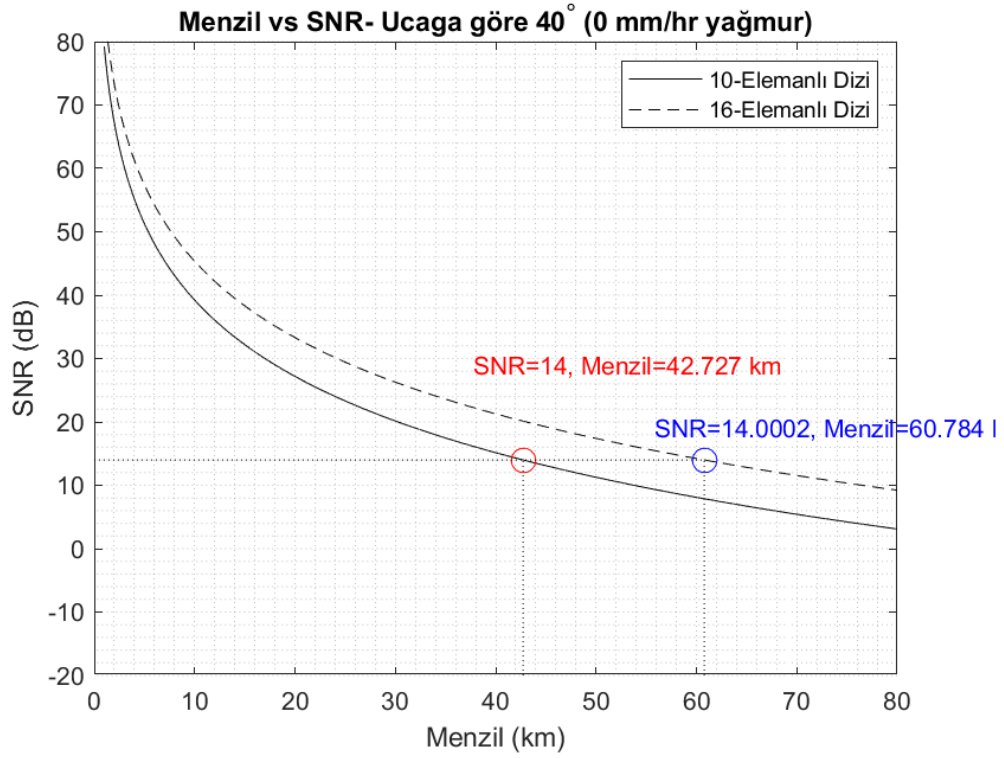
Tablo 7. 2. X-Bant burun radarının RCS ve açıya göre tespit performansı

Tespit Menzili (km)	Uçak Nişan Hattında	40° Yancada
1 m ²	87	76.145
0.012 m ²	28.794	25.201

Aşağıda Eşitlik 7.7'ye göre 10 elemanlı ve 16 elemanlı L-bant diziler için SNR'a karşılık menzil analiz sonuçları açık hava koşulları durumunda hem uçağın hem de antenin mekanik nişan hattında sırasıyla Şekil 7. 6 ve Şekil 7. 7'da verilmiştir.



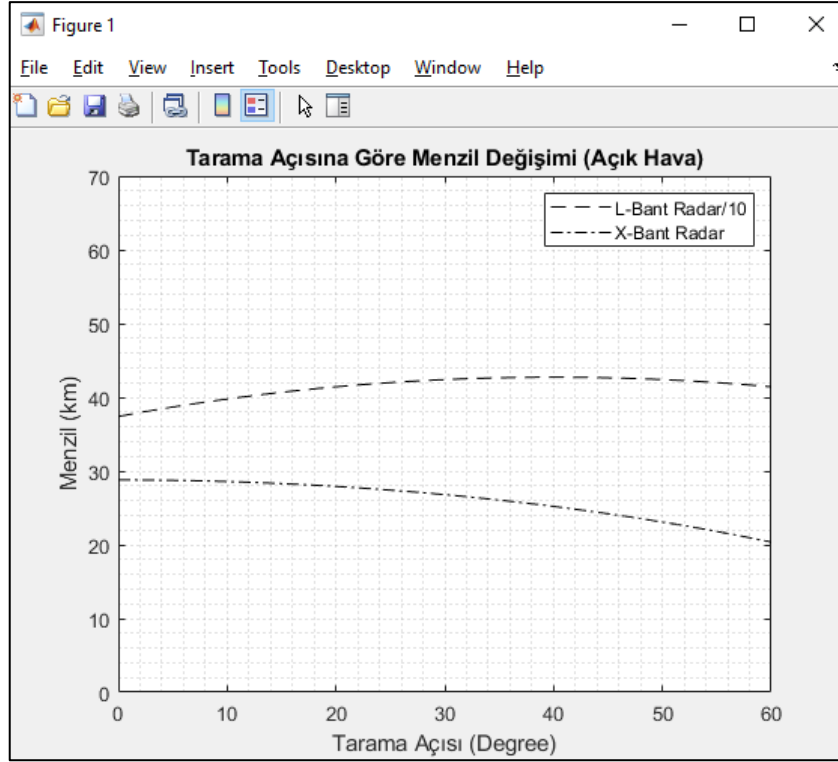
Şekil 7. 6. Uçak nişan hattında iki dizi antenin menzil performansı



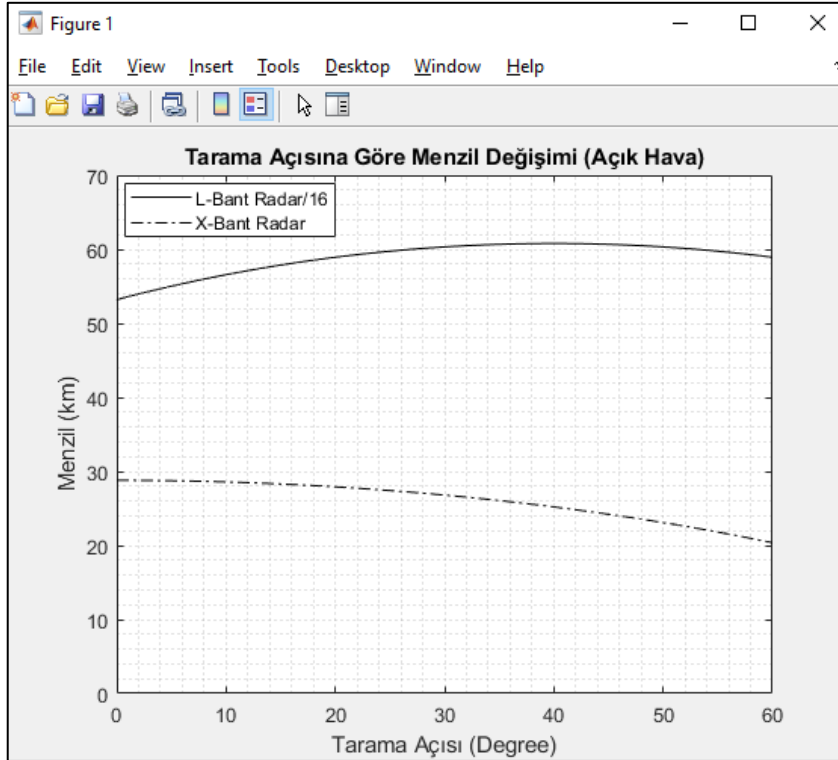
Şekil 7. 7. Anten nişan hattında iki dizi antenin menzil performansı

Bölüm 4'te anlatıldığı gibi, L-bant radar hedef tespitini 14 dB SNR durumu geçildiğinde yapacaktır. Bu değer altındaki değerlerde tespit yoktur. Bu nedenle grafiklerde sistemin bu SNR değerini sağladığı menziller işaretlenmiştir. Görüldüğü gibi uçağın mekanik nişan hattında 10 ve 16 elemanlı anten dizisine sahip L-bant radar 5. Nesil stealth hedef uçağı sırasıyla 37.4 ve 53.2 km'lerde tespit etmektedir. Antenin mekanik nişan hattında ise 39.9 ve 56.8 km'lerde hedefin tespiti yapılabilmektedir.

Aşağıdaki grafiklerde ise hem X-bant ve L-bant radarları hedef uçağı tespit performansları yanca açısına ve menzile göre beraber verilmiştir. X-bant burun radarı Şekil 7. 2'de verildiği gibi yancada 0° açıyla konumlanırken, L-bant radarın 40° eğimle konumlanması nedeniyle, hedef uçak F-16 uçağına göre 0° yanca açısından uzaklaştıkça, X-bant radarın tespit menzili düşerken, hedef uçak L-bant radarın merkezi nişan hattına yaklaştığı için bu radarın performansı artmaktadır. Şekil 7. 8 ve Şekil 7. 9'de verilen simülasyon sonuçlarından da bu durum gözlenmektedir.



Şekil 7. 8. Açık havada 10 elemanlı L-bant ve X-bant radarların performansları

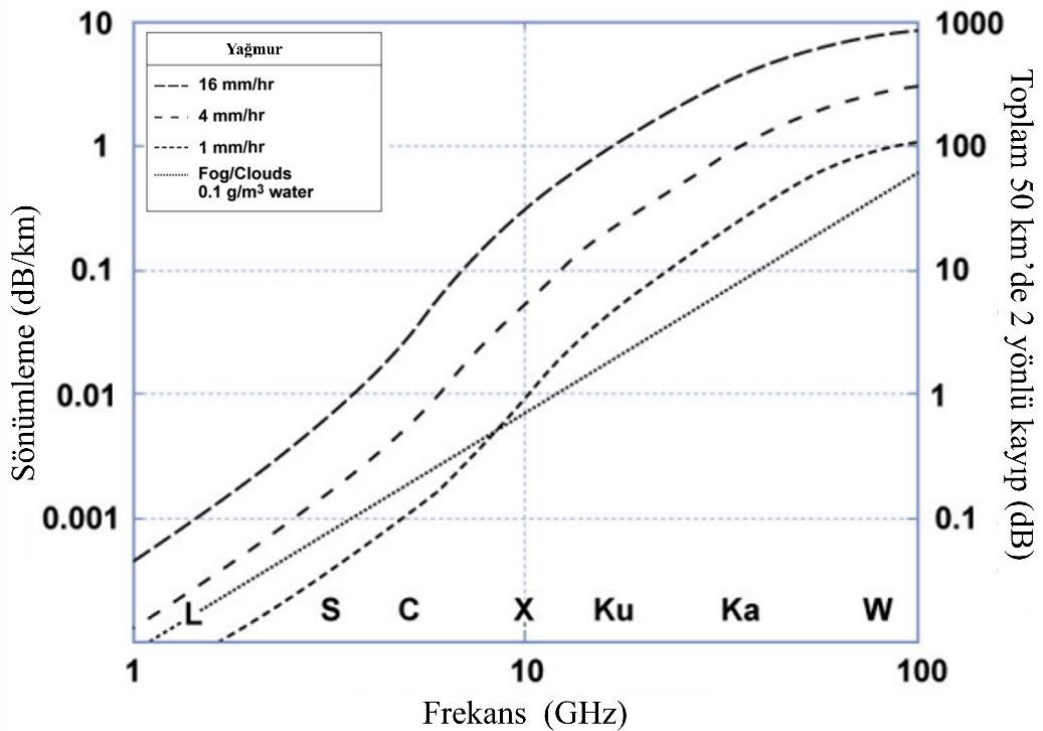


Şekil 7. 9. Açık havada 16 elemanlı L-bant ve X-bant radarların performansları

7.2.4. Yağmurun performans üzerindeki etkisi

Radarın iyi hava koşullarındaki performansı bir önceki bölümde verilmiştir. Bu bölümde frekansa göre farklı yağış hızları altında yağmurun RF sinyali sönümleme oranları araştırılmış, L-bant ve X-bant radarların bu koşullar altında performansları araştırılmış ve karşılaştırılmıştır.

Yağmurun frekansa göre sinyal gücü üzerindeki sönümleyici etkisi Şekil 7. 10'da verilmiştir. Grafiğin sol tarafında sönümleme oranları tek yönlü dB/km olarak verilmiştir, sağ tarafında ise bir örnek olarak 50 km menzilde yağmurun iki yönlü olarak RF sinyalde kaç dB zayıflamaya neden olduğu verilmiştir. Grafikten, frekans arttıkça yağmur sönümlemesinin de artma eğiliminde olduğu ve bu iki değişken arasında artan orantılı bir ilişkinin olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 7. 10. Frekansa göre farklı yağmur koşullarında sönümleme [45]

Yukarıdaki grafikten L-bant ve X-bantta frekansa göre yağmur zayıflamasını sunan aşağıdaki Tablo 7. 3 elde edilmiştir, ilgili frekans ve yağmur hızına karşılık gelen sönümleme değerlerinin birimi dB/km'dir.

Tablo 7. 3. Frekans ve yağmur miktarına göre dB/km sönümleme oranları

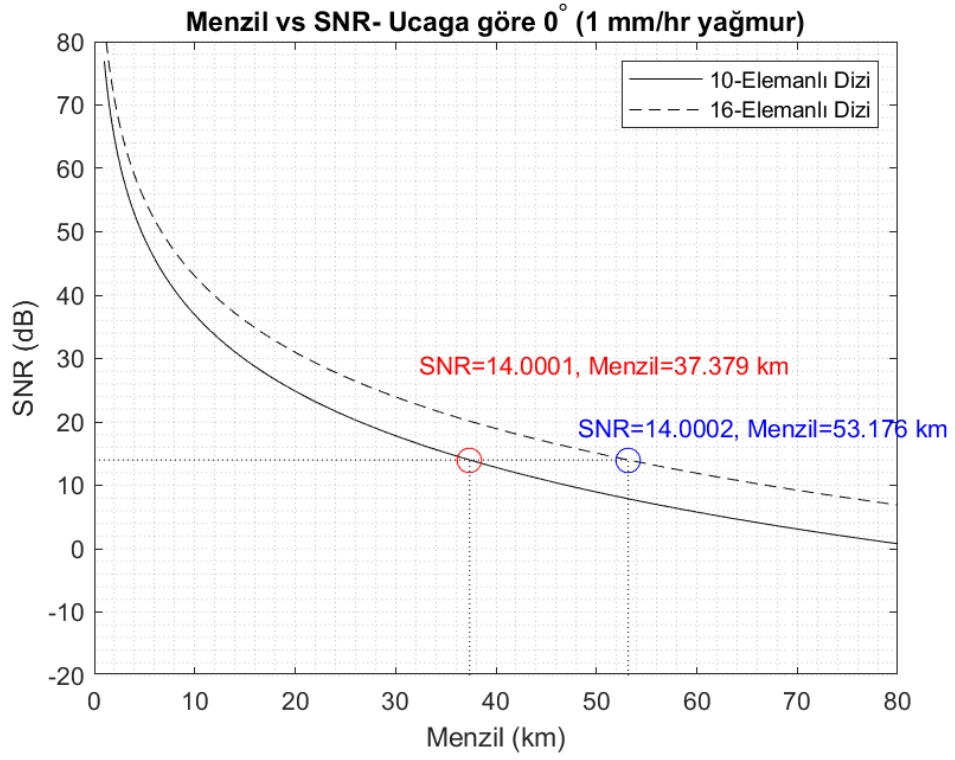
Yağmur Hızı (mm/hr)	1	4	16
1.2 GHz	0.0002	0.0005	0.001
10 GHz	0.01	0.018	0.5

Yağmurun neden olduğu zayıflama nedeniyle X-bant burun radarının hedefi algılayabileceği menzil de azalacaktır. Yağmurlu koşullar altında X-bant radarın algılama menzilleri Bölüm 7.1’de verilen performans değerine göre Eşitlik 3.21’e gelen ek kayıpla birlikte aşağıda Tablo 7. 4’te verilmiştir.

Tablo 7. 4. X-Bant radarın uçak nişan hattında farklı yağmur koşullarında performansı

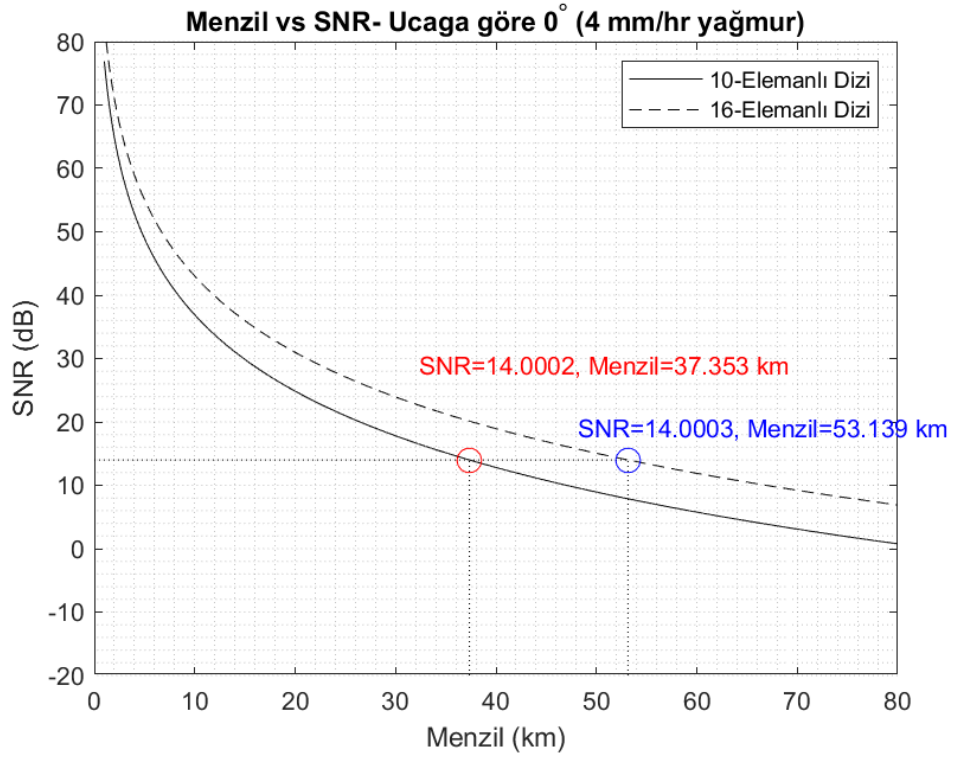
Yağmur Hızı (mm/hr)	Açık Hava	1	4	16
Tespit Menzili (km)	28.794	27.5523	24.2191	12.5071

Tablo 7. 3’te görüldüğü gibi yağmurun sönümleyici etkisi dalga boyu küçüldükçe dramatik olarak artmaktadır. L-bant frekansında bir RF yağmur kaynaklı uğradığı sönümleme yok denecek kadar azdır. Farklı yağmur koşulları altında Tablo 7. 3’te verilen yağmur kayıpları ile L-bant radarın hedef uçağı tespit performansına dair analiz sonuçları da aşağıda verilmiştir.



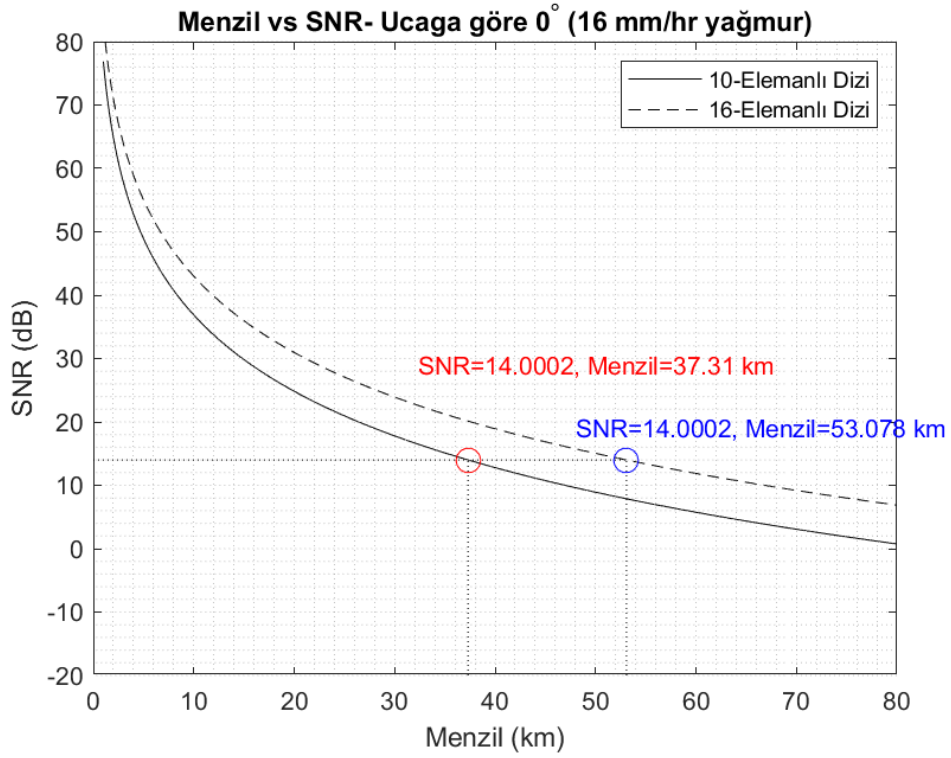
Şekil 7. 11. Az=0°’de 1mm/hr yağmur durumunda iki dizi antenin performansı

Şekil 7. 11’de Görüldüğü gibi uçağın mekanik nişan hattında 1mm/hr yağmur durumunda 10 ve 16 elemanlı anten dizisine sahip L-bant radar hedef uçağı sırasıyla 37.379 ve 53.176 km’lerde tespit etmektedir.



Şekil 7. 12. $Az=0^\circ$ 'de 4mm/hr yağmur durumunda iki dizi antenin performansı

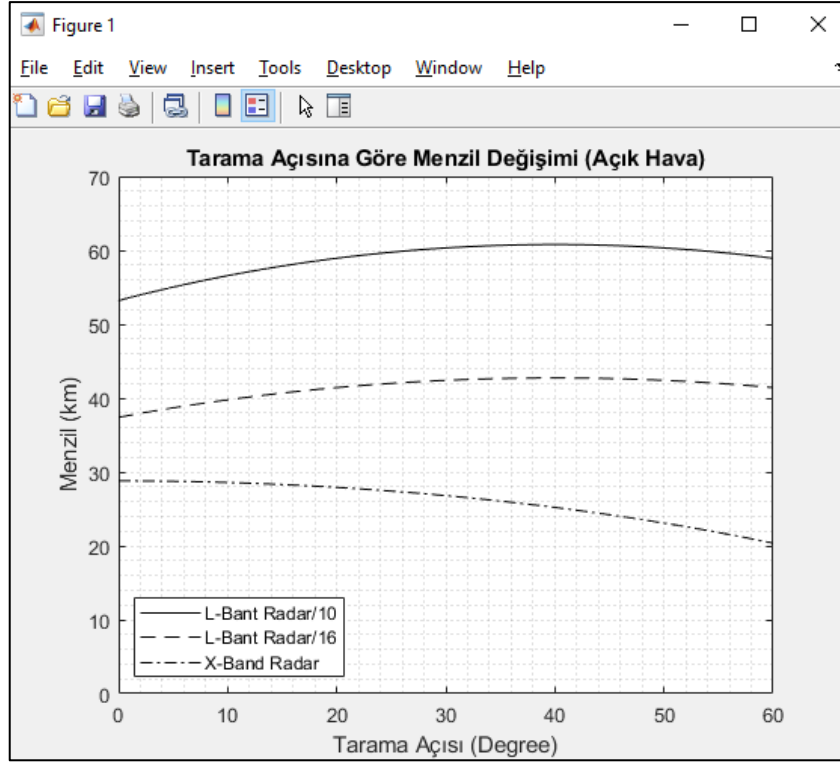
4mm/hr yağmur durumunda, uçağın mekanik nişan hattında 10 ve 16 elemanlı anten dizisine sahip L-bant radar hedef uçağı sırasıyla Şekil 7. 12'de görüldüğü gibi 37.353 ve 53.139 km'lerde tespit etmektedir.



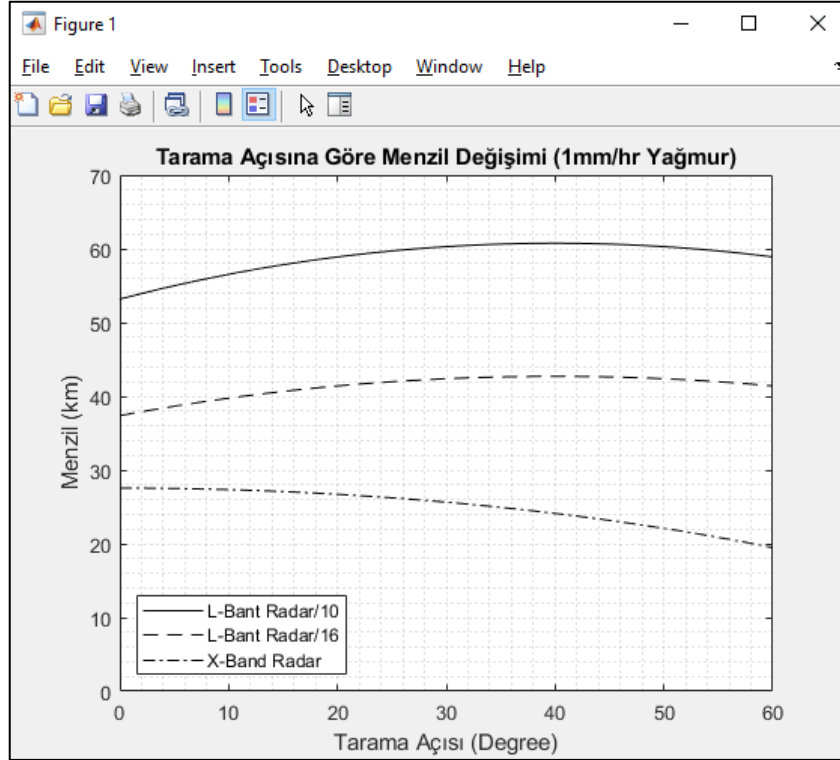
Şekil 7. 13. Az=0°’de 16mm/hr yağmur durumunda iki dizi antenin performansı

Şekil 7. 13’te görülen, 16mm/hr yağmur durumunda ise, yine uçağın mekanik nişan hattında 10 ve 16 elemanlı anten dizisine sahip L-bant radar hedef uçağı sırasıyla 37.31 ve 53.078 km’lerde tespit etmektedir.

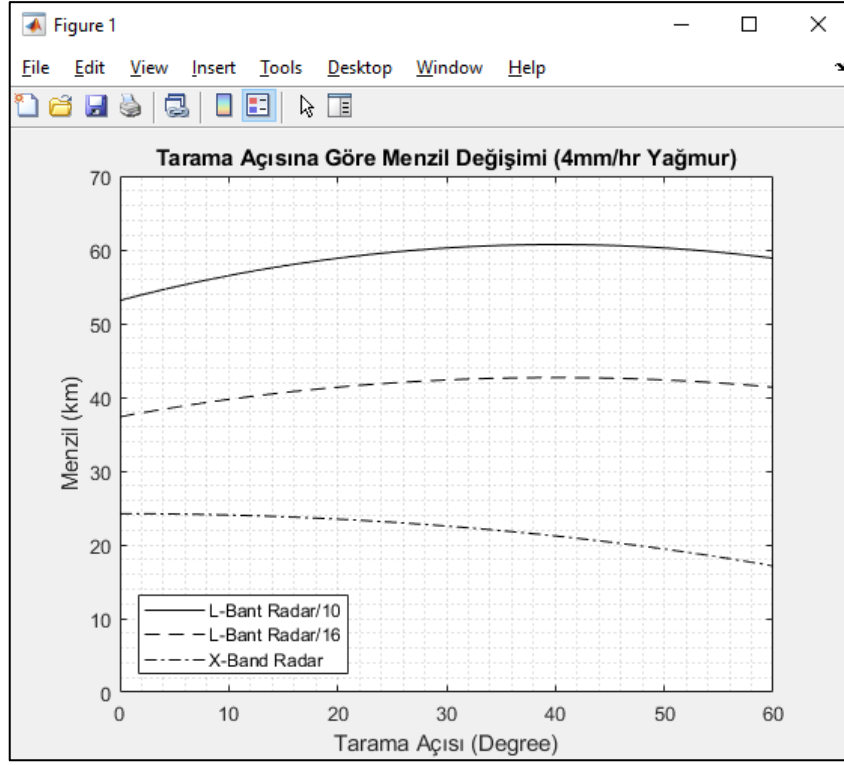
Aşağıda yer alan analizlerde 10 ve 16 elemanlı L-bant kanat ve X-bant burun radarlarının sırasıyla açık hava, 1mm/hr, 4mm/hr ve 16mm/hr yağmur altında tarama açısına göre performansları verilmiştir. Burada da yine bir önceki bölümdeki analize benzer şekilde hedef uçak X-bant radarın mekanik nişan hattı olan uçağın 0°’sinden uzaklaşıp L-bant radarın mekanik nişan hattı olan yancada 40°’ye yaklaştıkça tarama kaybından dolayı X-bant radarın performansı azalırken, L-bant radarın performansı artmaktadır, bu değerlendirmeye dair simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 7. 14, Şekil 7. 15, Şekil 7. 16, Şekil 7. 17’de görülmektedir.



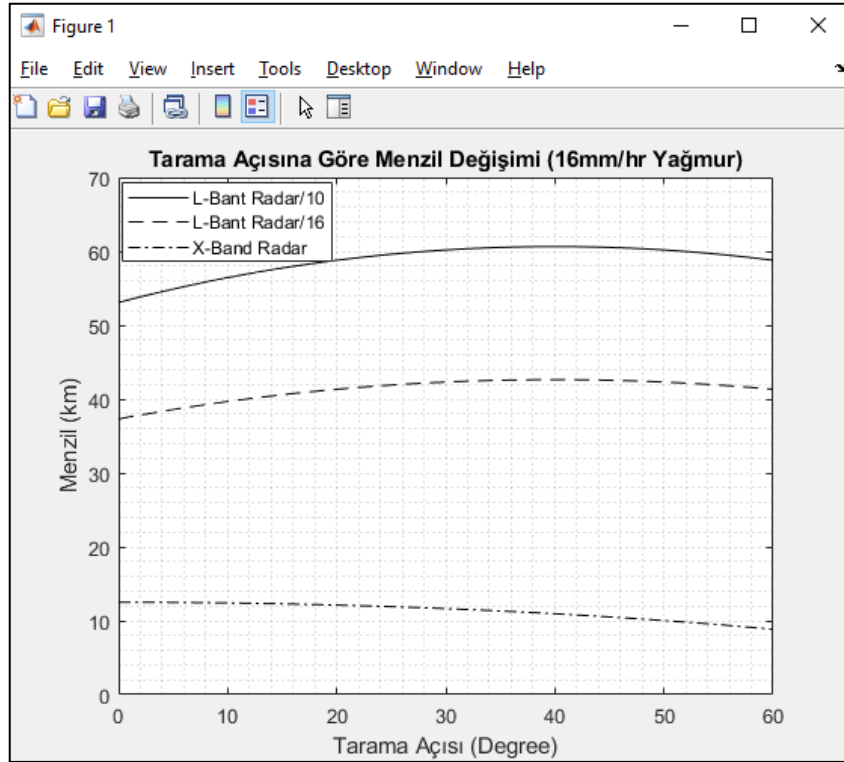
Şekil 7. 14. Tarama açısına göre açık havada radar performansları



Şekil 7. 15. Tarama açısına göre 1mm/hr yağmur durumunda radar performansları



Şekil 7. 16. Tarama açısına göre 4mm/hr yağmur durumunda radar performansları



Şekil 7. 17. Tarama açısına göre 16mm/hr yağmur durumunda radar performansları

Simülasyon sonuçları, yağış miktarının artması durumunda, X-bant burun radarının algılama menzil performansının dramatik olarak etkilenirken, beklendiği gibi L-bantta

alışan kanat radarının şekil 7. 10'da verilen sönümleme değlerine istinaden yağıştan neredeyse etkilenmediğini göstermiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, bir F-16'nın kanadına entegre edilebilecek boyutlarda 10 elemanlı ve 16 elemanlı L-bant hava radar sisteminin başarılabirliği, analizi ve simülasyon çalışması yapılmış ve X-bant burun radarına kıyasla avantajları sunulmuştur.

Öncelikli olarak, 5. Nesil stealth bir savaş uçağının malzemesiz RKA'sı araştırılmış, daha sonra platformda kullanılabilecek RAM malzemeler araştırılarak stealth hedef uçağın malzemeli RKA'sına dair çalışma yapılmıştır. Tasarlanmış olan L-bant radarla performans kıyaslaması yapmak, radarın başarımını ölçebilmek amacıyla, F-16 savaş uçağının X-bant burun radarının performansı araştırılmıştır.

L-bant radarın performansına dair simülasyonları yapabilmek için, donanım tarafında; L-Bant radarın fiziksel boyutu ve grating lobe oluşturmada yerleşebilecek anten eleman sayısı belirlenmiş, dizi antende kullanılabilecek, radar uygulamalarına uygun yüksek güçlü güç yükseltici seçimi yapılmıştır. Daha sonra dizi anten tasarımı yapılmış ve kazanç değeri belirlenmiştir. Sinyal işleme tarafında ise, sistemin tespit kararını hangi SNR seviyesinde vereceğine dair matematiksel çalışma yapılmıştır. Ek olarak, X-bant ve L-bant frekanslarının yağmur altındaki davranışları araştırılmıştır. Son olarak elde edilen veriler vasıtasıyla açık havada ve farklı yağmur koşulları altında 10 ve 16 elemanlı L-bant kanat radarlarının ve X-bant burun radarının simülasyonları MATLAB ortamında yapılmıştır.

Simülasyon sonuçları göstermektedir ki bir savaş uçağının kanat hücum kenarlarına entegre edilecek bir L-bant radar ile X-bantta çalışan burun radarlarına göre stealth uçakları daha uzak mesafeden tespit etmek mümkündür. Çalışmada da anlatıldığı gibi, radar anteninin boyutunun artırarak; her eklenen anten elemanı ile hem güç hem de anten kazancını arttırarak algılama menziline daha da genişletmek mümkündür. Ayrıca bu çalışmada L-bant radarın X-bant radara kıyasla yağmurlu hava koşullarında çok daha iyi bir tespit performansı sunduğu kanıtlarla ortaya konmuştur. Yağmur hızının artışıyla beraber dalga boyu L-banda kıyasla çok daha küçük olan X-bant frekansı yağmur kaynaklı sönümlemeden dramatik olarak etkilenmektedir. L-bant radar bu yönden de yağmurlu hava operasyonlarında tespit performansı olarak daha avantaja sahiptir.

Bu çalışmada sunulduğu gibi, bu radar sisteminin tasarımı, stealth uçakların geniş bir frekans bandında RKA'yı optimize edememe dezavantajını bu uçaklara karşı bir avantaja dönüştürmektedir. Bunlara ek olarak aşağıda listelenen alanlardaki araştırmalar ile bu radar sisteminin avantajlarını daha da arttırmak mümkündür.

1. L-bant radar için kullanılan faz dizili antenle uyumlu bir Elektronik Karşı Tedbir (ECM) sistemi tasarlanarak, GPS, GLONASS ve Link-16 navigasyon ve iletişim sistemleri gibi bu bantta çalışan haberleşme ve navigasyon sistemlerinin karıştırılması mümkün olacaktır.
2. Aynı frekans bandında çalışan *Identification Friend or Foe* (IFF) sorgulayıcı sistemlerinin, yüksek kazançlı yer belirleme yapabilen ESM sistemlerinin antenlerinin bu tez çalışmasında incelenen L-bant radar sisteminin antenleriyle anten ortaklaması yapılması ile; boyut, ağırlık, güç ve maliyet açısından avantajlar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] G.W. Stimson, H.D. Griffiths, C.J. Baker, D. Adamy, Introduction to Airborne Radar. NJ, USA: SciTECH Publishing, 2014.
- [2] P. Lacomme, J. P. Hardange, J. C. Marchais, E. Normant, Air and Spaceborne Radar Systems: An Introduction. NY, USA: SciTECH Publishing, 2001.
- [3] M. I. Skolnik, “Radar”. Britannica . com. britannica. com / technology / radar [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [4] Wikipedia, “AN / APQ-120”. en. wikipedia. org. en. Wikipedia . org / wiki /AN/APQ - 120. [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [5] Radartutorial, “AN/APG-83”. Radartutorial . eu. Radartutorial . eu/ 19. Kartei /08. airborne /pic/img08-023-01. jpg. [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [6] Wikipedia, “Euroradar CAPTOR”. en . wikipedia. org. en. wikipedia. org / wiki/ Euroradar_CAPTOR. [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [7] T. Jeffrey, *Phased-Array Radar Design: Application of Radar Fundamentals*. NC, USA: SciTECH Publishing, 2009.
- [8] Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Lexington, MA, Radar, Introduction to Radar Systems The Radar Equation — Online Course | MIT Lincoln Laboratory.
- [9] M. A. Richards, J. A. Scheer, W. A. Holm, Principles of Modern Radar Vol.I: Basic Principles. NJ, USA: SciTECH Publishing, 2010.W. Stimson, H.D. Griffiths, C.J. Baker, D. Adamy, Introduction to Airborne Radar. NJ, USA: SciTECH Publishing, 2014.
- [10] W. L. Melvin, J. A. Scheer, Principles of Modern Radar Vol.III: Radar Applications. NJ, USA: SciTECH Publishing, 2014.

- [11] G. R. Curry, Radar System Performance Modeling, 2nd ed. MA, USA: Artech House, 2005.
- [12] W. L. Melvin, J. A. Scheer, Principles of Modern Radar Vol.II: Advanced Techniques. NJ, USA: SciTECH Publishing, 2013.
- [13] D.K. Barton, Radar System Analysis and Modeling. MA, USA: Artech House, 2005.
- [14] D. Sjöberg, EITN90 Radar and Remote Sensing Lecture 8: Radar antennas, 2020.
- [15] M. Skolnik, Radar Handbook, 2nd ed. USA: McGraw Hill, 1990.
- [16] C. Alabaster, Pulse Doppler Radar, Principles, Technology, Applications. NJ, USA: SciTECH Publishing, 2012.
- [17] I. Moir, Military Avionics Systems. WS, ENG: John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [18] N. Hosseini, M. Khatun, C. Guo, K. Du, O. Ozdemir, D. W. Matolak, İ. Guvenc, H. Mehrpouyan, “Attenuation of Several Common Building Materials in Millimeter-Wave Frequency Bands: 28, 73 and 91 GHz”, IEEE Antennas and Propagation Magazine January 2021, doi: 10.1109/MAP.2020.3043445.
- [19] B. R. Mahafza, Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, 4th ed. FL, USA: CRC Press, 2022.
- [20] M.A. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, 2nd ed. USA: McGraw Hill, 2014.
- [21] M. Skolnik, Radar Handbook, 3rd ed. USA: McGraw Hill, 2008.
- [22] D. Lynch, Introduction to RF Stealth. NC, USA: SciTECH Publishing, 2004.

- [23] Y. Dong, “Models of Land Clutter vs Grazing Angle, Spatial Distribution and Temporal Distribution- L-Band VV Polarisation Perspective”, Australian Government Department of Defence Defence Science and Technology Organisation, 2004.
- [24] A. Fiche, S. Angelliaume, L. Rosenberg, A. Khenchaf, “Analysis of X-band SAR Sea-Clutter Distributions at Different Grazing Angles”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, August 2015.
- [25] F. T. Ulaby, M. C. Dobson, Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain. MA, USA: Artech House, 1989.
- [26] A. G. Pakfiliz, ‘Increasing self-protection jammer efficiency using radar cross section adaptation’. Computers and Electrical Engineering Volume 98, 2022, doi:10.1016/j.compeleceng.2021.107635.
- [27] Jetphotos, “B-2 Bomber. jetphotos. com. jetphotos.com/photo/. [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [28] P. Touzopoulos, D. Boviatsis, K. C. Zikidis, “3D Modelling of Potential Targets for the purpose of Radar Cross Section (RCS) Prediction”, 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT), 31 May 2017.
- [29] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, M. T. Tuley, Radar Cross Section, 2nd ed. NC, USA: SciTECH Publishing, 2004. G.W. Stimson, H.D. Griffiths, C.J. Baker, D. Adamy, Introduction to Airborne Radar. NJ, USA: SciTECH Publishing, 2014.
- [30] MAST Technologies, “MR11-0010-00 Datasheet”. masttechnologies. com. masttechnologies. com / wp-content / uploads/ 2016/ 04/ MR 11 -0010-00-Tech-Data Sheet. pdf. [Eriřim: Mayıs 2024].
- [31] MAST Technologies, “MR31-0003-00 Datasheet”. masttechnologies. com masttechnologies . com /wp-content /uploads /2016 / 04/ MR 31 - 0003-00-Tech-Data-Sheet.pdf. [Eriřim: Mayıs 2024].

- [32] MWT Materials Inc., “MF-500 Urethane Datasheet”. [mwtmaterials. com. mwtmaterials. com/wp-content/ uploads / 2020/04 / MWT-TD-MF-500 Urethane-er4.2.pdf](https://mwtmaterials.com/wp-content/uploads/2020/04/MWT-TD-MF-500-Urethane-er4.2.pdf). [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [33] J.J. Delisle, “EM-Simulation Numerical Methods”. [mwrfl. com. mwrfl. com /technologies/embedded/software/article /21845967/ whats-the-difference-between-various-em-simulation-numerical-methods](https://mwrfl.com/technologies/embedded/software/article/21845967/whats-the-difference-between-various-em-simulation-numerical-methods). [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [34] Lockheed Martin, “F - 35 Lightning”. [lockheedmartin. com. F - 35 Lightning, lockheedmartin. com/content /dam /lockheed-martin/ aero/ documents /F-35/f35-brochure. pdf](https://lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/aero/documents/F-35/f35-brochure.pdf). [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [35] The Office of the Director, Operational Test and Evaluation, “F-35 Joint Strike Fighter (JSF)”. [dote.osd.mil. dote.osd.mil/Portals /97 / pub / reports / FY2013 / dod /2013f35jsf.pdf?ver=2019-08-22-111254-220](https://dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/FY2013/dod/2013f35jsf.pdf?ver=2019-08-22-111254-220). [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [36] I. S. Bisht, “Australia to Build Paint Facility to Make F-35As ‘Virtually Invisible’”. [thedefensepost. com. thedefensepost. com/2023/08/16/australia-f-35a-stealth-paint/](https://thedefensepost.com/2023/08/16/australia-f-35a-stealth-paint/). [Eriřim: Mayıs 2024].
- [37] Wikipedia, “Lockheed Martin F-35 Lightning II”. [tr.wikipedia. org tr.wikipedia. org/wiki/Lockheed_Martin_F-35_Lightning_II](https://tr.wikipedia.org/wiki/Lockheed_Martin_F-35_Lightning_II). [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [38] K. Zikidis, “Early Warning Against Stealth Aircraft, Missiles and Unmanned Air Vehicles” *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*, Springer, 2018, s.195-216. doi: 10.1007/978-3-319-68533-5_10.
- [39] AirPower Steiermark, “Lockheed Martin F-16 Fighting Falcon”. [airpower. gv. at. airpower. gv. at/ lockheed-martin-general-dynamics-f-16-fighting-falcon /?lang=en](https://airpower.gv.at/lockheed-martin-general-dynamics-f-16-fighting-falcon/?lang=en). [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [40] Thai Military and Asian Region, “F-16 E/F Block 60 Desert Falcon”. [Thaimilitary and asianregion. wordpress. com. Thaimilitary and asianregion. wordpress. com/ 2015/11/25/f-16-ef-block-60-desert-falcon/](https://thaimilitaryandasianregion.wordpress.com/2015/11/25/f-16-ef-block-60-desert-falcon/). [Eriřim: 18 Mayıs 2024].

- [41] M. C. Fox, D. K. Forrest, “Supersonic Aerodynamic Characteristics of an Advanced F-16 Derivative Aircraft Configuration”, NASA Technical Paper 3355, July 1993.
- [42] G.K. Gaitanakis, G. Limnaios, K. C. Zikidis “On the use of the AESA (Active - Electronically Scanned Array) Radar andIRST (Infrared Search & Track) System to Detect and Track Low Observable Threats” in European Aeronautic Science Network, 2019, s.304, doi: 10.1051/mateconf/201930404001.
- [43] MACOM, “CGHV14800 Datasheet”. [cdn.macom .com. macom .com/ datasheets/ CGHV14800 .pdf](https://cdn.macom.com/datasheets/CGHV14800.pdf). [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [44] Wikipedia, “AN/APG - 83”. [en. Wikipedia .org. en. wikipedia. org/wiki/AN/APG-83](https://en.wikipedia.org/wiki/AN/APG-83). [Eriřim: 18 Mayıs 2024].
- [45] Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Lexington, MA, Radar, Introduction to Radar Systems Propagation Effects - Online Course | MIT Lincoln Laboratory.