

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAĞMURUN K_u BANT RADAR SİNYALLERİNE ETKİSİ

ADEM YAYLA

KOCAELİ 2016

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAĞMURUN K_u BANT RADAR SİNYALLERİNE ETKİSİ

ADEM YAYLA

**Doç.Dr. Gonca ÇAKIR
Danışman, Kocaeli Üniv.**

**Yrd.Doç.Dr. Sibel ÇİMEN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Yrd.Doç.Dr. Ahmet Yahya TEŞNELİ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.**



Tezin Savunulduğu Tarih: 22.12.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde elektromanyetik dalgalar, günlük hayatımızın vazgeçilemez bir parçası haline gelmiştir. Elektromanyetik dalgaların kullanıldığı cihaz ve sistemlerden beklenen özellikler her geçen gün artmaya devam etmektedir. Bahse konu cihaz/ sistemlerin kullanımı esnasındaki en büyük beklenti performanslarına yöneliktir. Performansa yönelik beklentilerin tam olarak karşılanabilmesi için; tasarımcılar tarafından, üzerinde herhangi bir kontrolümüzün bulunmadığı ortam şartları ve tabiat olaylarının sistem/ cihaz üzerindeki etkileri tasarım aşamasında hassasiyetle incelenerek sistem/ cihaz özellikleri ortaya konmalıdır. Kullanıcılar tarafından sistem ve cihazların özellikleri çok iyi bilinmeli ve özellikle ortam şartlarının elektromanyetik dalgalara etkisi kullanım esnasında dikkate alınmalıdır.

Özellikle güvenilirliklerinin oldukça yüksek olması beklenen ve çalışma limitlerine yönelik tolerans aralığı oldukça küçük olan askeri uygulamalarda, operatörler tarafından sistem özellikleri ve ortam kısıtlamalarının çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Elektromanyetik dalgalar üzerinde oldukça etkili olan yağmur, bu çalışma kapsamında ele alınmış ve radar sinyallerine etkisi değerlendirilmiştir.

Tezin her aşamasında bana desteğini eksik etmeyen tez danışmanım Sn. Doç.Dr. Gonca ÇAKIR'a, yüksek lisans eğitimi süresince desteklerini esirgemeyen Sn.Doç.Dr. Alp Oral SALMAN'a ve Sn.Yrd.Doç.Dr. Mustafa ÇAKIR'a en içten dileklerle teşekkür ederim. Ayrıca hayatım boyunca beni destekleyen aileme, eşime, kızıma ve bana öğrenmenin yaşının olmadığını öğreten babama minnet duygularımı sunarım.

Kasım – 2016

Adem YAYLA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ.....	1
1. RADAR SİSTEMLERİ	5
1.1. Radarın Tanımı	5
1.2. Radar Çalışma Prensipleri	6
1.3. Radar Temel Prensipleri	7
1.3.1. Radarın yapısı.....	7
1.3.2. Radar fonksiyonları	8
1.3.2.1. Gözetleme.....	9
1.3.2.2. İzleme (Takip)	9
1.3.2.3. Görüntüleme	9
1.3.2.4. Ölçme	10
1.3.3. Radar kullanım alanları	10
1.3.4. Radarlarda kullanılan frekanslar	11
1.3.4.1. Yüksek frekans (HF)	15
1.3.4.2. Çok yüksek frekans (VHF).....	15
1.3.4.3. Ultra yüksek frekans (UHF).....	15
1.3.4.4. L bandı	16
1.3.4.5. S bandı	16
1.3.4.6. C bandı.....	16
1.3.4.7. X bandı.....	16
1.3.4.8. K _u bandı.....	17
1.3.4.9. K bandı.....	17
1.3.4.10. K _a bandı.....	17
1.4. Radar Dalga Yayılımı	18
1.4.1. Yer yüzeyinden yansımalar.....	18
1.4.2. Dalga kırılması	19
1.4.3. Oluklanma	20
1.4.4. Kırınım.....	21
1.4.5. Zayıflama.....	21
2. YAĞMURUN K _u BANT RADAR SİNYALLERİNE ETKİSİ	26
2.1. K _u Bant Radar Sistemleri	26
2.2. Yağmurun Elektromanyetik Dalgalara Etkisi	29
2.3. Yağmurun Radar Sistemleri Üzerindeki Etkisi.....	34
2.4. Yağmurun Elektromanyetik Dalgalar Üzerindeki Etkilerinin Tespitine Yönelik Yöntemler	37
2.4.1. ITU-R P.838-3 modeli	39
2.4.2. Mahafza modeli.....	43
2.4.3. Olsen/Rogers/Hodge modeli.....	44

3. YAĞMUR ZAYIFLATMASININ CST PROGRAMI İLE MODELLENMESİ	46
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	52
EKLER.....	55
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	60
ÖZGEÇMİŞ	61



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Radarın temel çalışma prensibinin genel gösterimi.....	5
Şekil 1.2.	Radar koordinatları	7
Şekil 1.3.	Radar temel diyagramı	8
Şekil 1.4.	Radarla konteyner görüntüleme	9
Şekil 1.5.	Gürültü seviyeleri	12
Şekil 1.6.	Radar frekans bantları	14
Şekil 1.7.	KH-25MAE (AS-10/Karen) aktif radarlı güdümlü mermide kullanılan PSM-E serisi Ku-Bant radar.....	17
Şekil 1.8.	Elektromanyetik dalgaların yansıması	18
Şekil 1.9.	Snell kanunu	19
Şekil 1.10.	Elektromanyetik dalgaların kırılması ve radar ufku.....	20
Şekil 1.11.	Oluklanma.....	20
Şekil 1.12.	Kırınım	21
Şekil 1.13.	Çeşitli frekanslarda atmosferik zayıflama	22
Şekil 1.14.	Farklı irtifalarda zayıflama katsayısı.....	23
Şekil 2.1.	Uzay aracı iletişim sistemi	26
Şekil 2.2.	F-4 Phantom uçaklarında kullanılan AN/APG-76 Radarı	27
Şekil 2.3.	Güdümlü mermilerde kullanılan K_u bant Radar.....	27
Şekil 2.4.	Raytheon firması ASDE (Airport Surface Detection Equipment-Havaalanı Yüzey Algılama Ekipmanı) radarı anteni	27
Şekil 2.5.	Türk Deniz Kuvvetleri bağlı YAVUZ ve BARBAROS Sınıfı Fırkateynlerde bulunan K_u bant hedef takip radarı	28
Şekil 2.6.	Phalanx Yakın Hava Savunma Silah Sistemi (CIWS)	28
Şekil 2.7.	Yağmur damlalarının atmosferde maruz kaldığı kuvvetler	31
Şekil 2.8.	Boyutlarına göre yağmur damlalarının şekilleri.....	31
Şekil 2.9.	Klasik ve sensörlü yağmur ölçerler	32
Şekil 2.10.	NASA tarafından kullanılan (a) yağış radarları ve (b) radar/uydu sistemleri kullanılarak elde edilen yağış verileri.....	33
Şekil 2.11.	Radar skobunda (a) yağmur nedeniyle oluşan gürültü (b) gürültü bastırma fonksiyonu aktif hale getirildiğinde skop görüntüsü.....	35
Şekil 2.12.	Zamana bağlı olarak yağmurun etkisine ilişkin K_u bant radar A-skobu görüntüsü	36
Şekil 2.13.	ITU tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) yatay polarizasyonlu K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarları	42
Şekil 2.14.	ITU tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) dikey polarizasyonlu K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarları	42
Şekil 2.15.	Mahafza tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarları	44

Şekil 2.16. Olsen / Rogers / Hodge tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarları	45
Şekil 3.1. Üç boyutlu FDTD ile yağmur etkisinin analiz modeli.....	47
Şekil 3.2. Yağmur ortamını modelleyen, düzlem dalga ile aydınlatılan, z'de sınırlı, x- ve y'-de sınırsız yapı.....	47
Şekil 3.3. Sınır koşullarının tanımlanması.....	48
Şekil 3.4. CST programında mesh tipleri	49
Şekil 3.5. CST programında mesh tipinin iletim katsayısına etkisi	49
Şekil 3.6. CST ile analizleri yapılan malzemeler ile MAHAFZA modeli kullanılarak elde edilen zayıflama karakteristikleri.....	50



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. ITU tarafından belirlenen frekans bantları ve kullanım alanları	13
Tablo 1.2. IEEE tarafından önerilen radar frekans bantları ve kullanım alanları	14
Tablo 2.1. Şiddetine göre yağmur türleri	33
Tablo 2.2. Dünyanın farklı bölgeleri için tespit edilen yağış şiddeti olasılıkları	34
Tablo 2.3. Yatay polarizasyonlu dalgaların k_H değeri için sabitler	40
Tablo 2.4. Dikey polarizasyonlu dalgaların k_V değeri için sabitler	40
Tablo 2.5. Yatay polarizasyonlu dalgaların α_H değeri için sabitler	40
Tablo 2.6. Dikey polarizasyonlu dalgaların α_V değeri için sabitler	40
Tablo 2.7. K_u bant yatay ve dikey polazirasyonlu dalgalar için frekansa bağlı sabitler	41
Tablo 3.1. MAHAFZA modelindeki zayıflatma karakteristiklerini veren malzemelerin özellikleri	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A, A_R	: Yağmurun özgül zayıflatma miktarı, (dB/km)
f	: Frekans, (GHz)
R	: Yağış şiddeti, (mm/sa) γ
$\tan \delta$: Kayıp tanjantı
γ_R	: Yağmur nedeniyle meydana gelen tek yönlü özgül zayıflama, (dB/km)
ϵ_r	: Bağıl yalıtkanlık sabiti, (F/m)
θ	: Yükselme açısı, ($^\circ$)
τ	: Ufuk çizgisine göre polarizasyon eğiklik açısı, ($^\circ$)

Kısaltmalar

ASDE	: Airport Surface Detection Equipment (Havaalanı Yüzey Algılama Ekipmanı)
CIWS	: Close-in Weapon System (Yakın Hava Savunma Silah Sistemi)
DSD	: Drop Size Distribution
FDTD	: Finite-Difference Time-Domain (Zaman Bölgesinde Sonlu Farklar)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
ISAR	: Inverse Synthetic Aperture Radar (Ters Yapay Açıklıklı Radar)
ITU	: International Telecommunications Union (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği)
NATO	: North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)
RKA	: Radar Kesit Alanı
SAR	: Synthetic Aperture Radar (Yapay Açıklıklı Radar)

YAĞMURUN K_u BANT RADAR SİNYALLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Atmosfer içinde bulunan gazlar ve hidrometeorlar (yağmur, dolu, kar, bulut, sis gibi) yayılan elektromanyetik dalgaların zayıflamasına neden olur. Yağmur nedeniyle oluşan zayıflama, özellikle 10 GHz üzerindeki frekanslarda elektromanyetik dalgaların yayılımına etki eden önemli bir faktördür ve bu frekanslarda çalışan sistemler için tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada, yağmur nedeniyle elektromanyetik dalgaların zayıflaması ile ilgili literatür gözden geçirilmiş ve zayıflama miktarının belirlenmesine yönelik bazı modeller, MATLAB programı kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, farklı yağış miktarlarının, radar sinyallerine etkisinin incelenebilmesi amacıyla CST programı kullanılarak yeni bir model geliştirilmiştir. Bu yeni model ile mevcut modeller arasından seçilen bir model karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Propagasyon, Radar, Yağmurun Zayıflatması.

THE EFFECT OF RAIN ON K_u BAND RADAR SIGNALS

ABSTRACT

The electromagnetic waves propagating through the atmosphere are attenuated by various factors. The atmospheric gases, hydrometeors (rain, hail, snow, clouds and fog etc.) cause the losses of the propagating electromagnetic waves. Rain attenuation is an important aspect of signal propagation especially at frequencies above 10 GHz and should be considered in the designing of systems operating in these frequencies. This paper reviews the literature on attenuation of electromagnetic waves due to rain and examines some of the models for prediction of rain attenuation by using MATLAB. In addition, a new model has been developed by using CST program to investigate the effects of different rainfall on radar signals. This new model has been compared with the one selected from the existing models.

Keywords: Propagation, Radar, Rain Attenuation.

GİRİŞ

İlk olarak James Clerk MAXWELL tarafından ortaya atılan elektromanyetik dalga kavramı, zaman içerisinde günlük hayatta vazgeçilemez hale gelmiştir. Günümüzde, telefon, radyo, televizyon gibi, iletişim sistemlerinden, radar sistemlerine; sağlık sektöründen silah sistemlerine birçok alanda kullanılan elektromanyetik dalgaların kullanım alanı her geçen gün artmaktadır.

Ses veya su dalgalarının aksine yayılım için herhangi bir ortama ihtiyaç duymayan elektromanyetik dalgaların, boşluk haricindeki diğer ortamlarda yayılımı, ortamın özelliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Serbest uzay ortamında analiz edilerek ortaya çıkarılan elektromanyetik dalga yayılım karakteristiği, atmosfer içinde geçerliliğini yitirmektedir.

Farklı ortamlar için analiz yapılırken; dalgaların içinde yol aldığı ortamın özellikleri (manyetik geçirgenlik, elektrik geçirgenlik, fiziksel bileşenler vb.) dikkate alınmalıdır.

Atmosfer içinde bulunan gazlar, meteorolojik olaylar (hidrometeorlar, sis, bulut vb.), fiziksel oluşumlar (toz, kuş sürüsü vb.) ve ortamdaki kozmik/yapay gürültü, elektromanyetik dalgaların etkilenmesine/zayıflamasına neden olmaktadır.

Elektromanyetik dalga kullanılan sistem/cihazların tasarım sürecinde en önemli aşamalardan birisi kullanılacak frekansın belirlenmesidir. Tasarlanan sistem/cihazın kullanım amacının yanı sıra propagasyon ile ilgili kısıtlamalar da frekansın belirlenmesinde etkili rol oynamaktadır.

Kozmik gürültü ve atmosferik zayıflama dikkate alındığında 1-10 GHz arasındaki frekanslarda elektromanyetik dalgalara olan etkinin azaldığı görülmektedir.

Frekans seçiminde atmosferde bulunan oksijen ve su buharının rezonans frekansları özel amaçlı sistemler (uzay ortamında uydular arası muhabere gibi) haricinde kullanılamamakta, kaybın en fazla değerlere ulaştığı rezonans frekansları arasında kalan ve pencere olarak adlandırılan aralıklardaki frekans değerleri kullanılmaktadır [1].

Günümüzde özellikle iletişim sistemlerinde talep edilen iletim hızı ile kapasitesi ve radar sistemlerinde hassas bilgi ihtiyacına bağlı olarak yüksek frekansa sahip elektromanyetik dalgalar kullanılmaktadır.

Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların kullanımının sağladığı avantajların yanı sıra propagasyon ile ilgili kısıtlamalar da bulunmaktadır.

Frekansı 10 GHz altındaki (3 cm'den daha kısa dalga boyuna sahip) elektromanyetik dalgalar için ihmal edilebilir seviyede olan hidrometeorların etkisi, 10 GHz üzerindeki frekanslarda artış göstermekte ve ihmal edilemez seviyelere ulaşmaktadır [1, 2].

Hidrometeor olarak isimlendirilen, atmosfer içindeki su damlacıkları (sis ve bulut), yağmur damlaları, kar ve buz taneleri (dolu) arasında, elektromanyetik dalgaları en fazla etkileyen yağış türünün yağmur olduğu belirlenmiştir [1].

Elektromanyetik spektrumda, yağmur etkisinin ihmal edilemez seviyeye ulaştığı 10 GHz üzerindeki ilk frekans bandı olan K_u bant kapsadığı bölge itibari (12-18 GHz) ile kritik bir bant olma özelliği taşır.

Uydu iletişimi amacıyla çok sık kullanılan K_u bant elektromanyetik dalgalar, hassas hedef bilgisine ihtiyaç duyulan radar sistemlerinde (altimetre, yüksek çözünürlüklü görüntüleme radarı, atış kontrol/hedef takip radarı, güdümlü mermi başlık radarı gibi) kullanılmaktadır.

Atmosferik şartlara karşı hassas, K_u bantta çalışan radarların hedef hassasiyeti ve menzil çözünürlüğü fazladır. Ancak çok uzun menzile sahip sistemler hedeflenemez.

Yağmur, elektromanyetik dalgaların soğrulmasına, farklı yönlerde saçılarak dağılmasına, polarizasyonunun bozulmasına, alıcıya istenen seviyede sinyal ulaşmamasına ve radar skobunda sahte hedef/gürültü oluşmasına neden olur.

Radar sistemlerinde oluşan sahte hedef/gürültü bu çalışma kapsamında ele alınmamıştır.

Yağmurun elektromanyetik dalgalara olan etkisi; dalganın frekansı ve polarizasyonunun yanı sıra, yağmurun yağış oranı, yağmur damlasının şekli ve hacimsel yoğunluğuna göre değişiklik gösterir [3].

Yağmurun elektromanyetik dalgalara etkisinin hesaplanması için birçok parametreye ihtiyaç duyulması ve bu parametrelerin kesin olarak belirlenememesi sebebiyle, fiziksel (kesin) hesaplama yöntemleri yerine deneysel (ampirik) hesaplama modelleri kullanılmaktadır.

Yağmurun karakteristiğine yönelik parametreler arasında belirlenmesi daha kolay olan yağmur şiddeti, yağmurun etkisinin ortaya konmasında temel parametrelerden biri olarak kullanılmaktadır.

Yağmur şiddeti ifadesi, bir saatte birim alana (1 m^2) düşen yağmurun derinliğini ifade etmektedir.

Yağmur miktarı, farklı bölgelerdeki farklı meteorolojik şartlara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yağmuru şiddeti, ülke, şehir, meteorolojik bölge gibi alanlar için analiz edilerek ihtiyaç duyulan zaman aralıklarını (anlık, günlük, aylık, yıllık gibi) kapsayacak şekilde istatistiksel olarak ifade edilmektedir [4].

Yağmur şiddetine göre yer küreyi farklı bölgelere ayıran birçok çalışma mevcuttur.

Elektromanyetik dalga kullanılan sistemler için tasarım aşamasında; propagasyon şartları nedeniyle sistemden beklenen kullanılmayan zaman oranına (genellikle % 0,01) bağlı olarak kullanılacak bölgedeki azami yağmur şiddeti istatistiksel değerine göre zayıflama miktarı hesaplanmaktadır. Belirlenen zayıflama miktarına bağlı olarak sistemin kullanılabilmesi etkili mesafe veya etkili olunması istenen mesafeye istinaden sistem parametreleri belirlenmektedir [2].

Belli bir bölgede sabit olarak kullanılacak sistemlere yönelik yağmurun elektromanyetik dalgalara etkisini belirlenerek tasarım aşamasında önlem alınabilmektedir.

Gemi, uçak, güdümlü mermi gibi birçok bölgede kullanılabilen hareketli platformlarda konuşlu sistemler için tasarım aşamasında alınan önlemler, sistemlerin kullanıldığı farklı bölgelerde yeterli olmamaktadır.

Bu nedenle, bahse konu sistemleri kullanan operatörler tarafından sistemlerin tasarım özellikleri çok iyi bilinmeli ve bulunulan bölgedeki şartlar dikkate alınarak sistemler kullanılmalıdır.

Özellikle, verici ve alıcı antene sahip radar sistemine sahip ve atıldıktan sonra kullanıcıya herhangi bilgi/düzeltilme girişi imkanı vermeksizin hedefi kendisi bulan (at-unut tipi) aktif radar başlıklı güdümlü mermilerin, oldukça yüksek maliyetli olmaları nedeniyle kullanılmadan önce bir çok çevresel parametrenin dikkate alınması gereklidir. Bu çalışma, özellikle K_u bant frekanslarında çalışan aktif radar başlıklı güdümlü mermilerin, kullanılacakları bölgedeki anlık yağış durumunun, mermi kullanılmadan önce mutlak surette analiz edilmesinin gerekliliğini belirlemeye yöneliktir.

Tezin birinci bölümünde; radar sistemleri ve elektromanyetik dalgaların propagasyonuna ilişkin gerekli olabilecek temel teorik bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde; yağmurun radar sistemlerine etkisine yönelik literatür ve yaygın olarak kullanılan deneysel modeller arasından seçilen üç model incelenmiştir. Seçilen modellere ait parametreler MATLAB programı kullanılarak zayıflama değerleri grafik halinde elde edilmiştir.

Üçüncü bölümde; yağmurun etkisinin CST programında modellenmesi ve elde edilen sonuçların deneysel model sonuçları ile karşılaştırılması konuları ele alınmıştır.

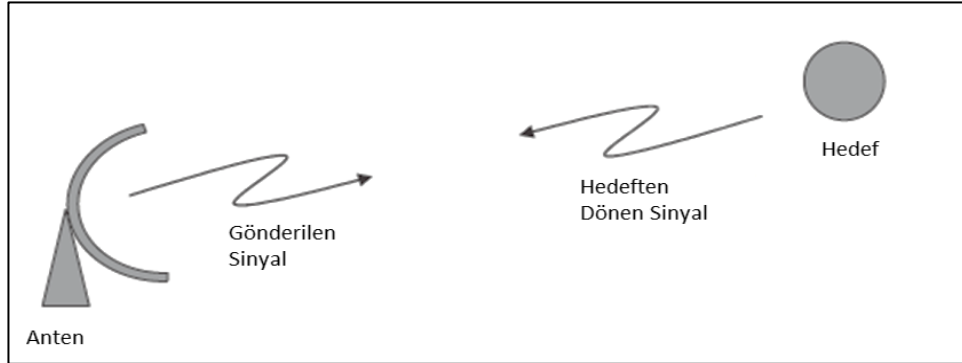
1. RADAR SİSTEMLERİ

1.1. Radarın Tanımı

İngilizce RAdio Detection And Ranging kelimelerinin baş harflerinden 1940'lı yıllarda türetilmiş yapay bir kelime olan RADAR kelimesi günümüzde birçok dilde kullanılmaktadır [5].

Radarlar; hareket eden veya hareketsiz duran; hava, deniz üzeri, kara veya uzay ortamında bulunan araç/vasıtaların, çeşitli meteorolojik olayların (bulut, kar, hortum gibi), insanların ve uygun özelliklere sahip nesnelerin varlığını, uzaklığını, yönünü, yüksekliğini, hızını ve/veya ilerleme yönünü tespit etmek için kullanılan elektromanyetik sistemlerdir [6].

Radarın teorik temelleri oldukça karmaşık olmasına karşın, çalışma prensibi oldukça basittir. Radarın çalışma prensibi, verici antenden çıkarak ışık hızıyla ortamda yayılan elektromanyetik dalgaların, bir hedefe çarparak yansıtılarak geri dönmesi ve dönen dalgaların bir alıcı anten tarafından algılanması temeline dayanır.



Şekil 1.1. Radarın temel çalışma prensibinin genel gösterimi

Radarlar; optik ve kızılötesi sistemlere göre; gece/gündüz kullanılabilirliği, meteorolojik koşullardan (yağmur, kar, sis vb.) çok daha az etkilenmeleri ve optik sistemlerle kıyaslanamayacak ölçüde uzun menzile sahip olmaları nedeniyle oldukça avantajlıdır [6].

1.2. Radar Çalışma Prensipleri

Radarın temelinde yer alan elektromanyetik dalgalar, ses veya su dalgalarının aksine, yayılmak için herhangi bir ortama ihtiyaç duymazlar. Boşlukta, hava içerisinde veya uygun elektriksel ve manyetik özelliklere sahip ortamlarda yayılabilirler.

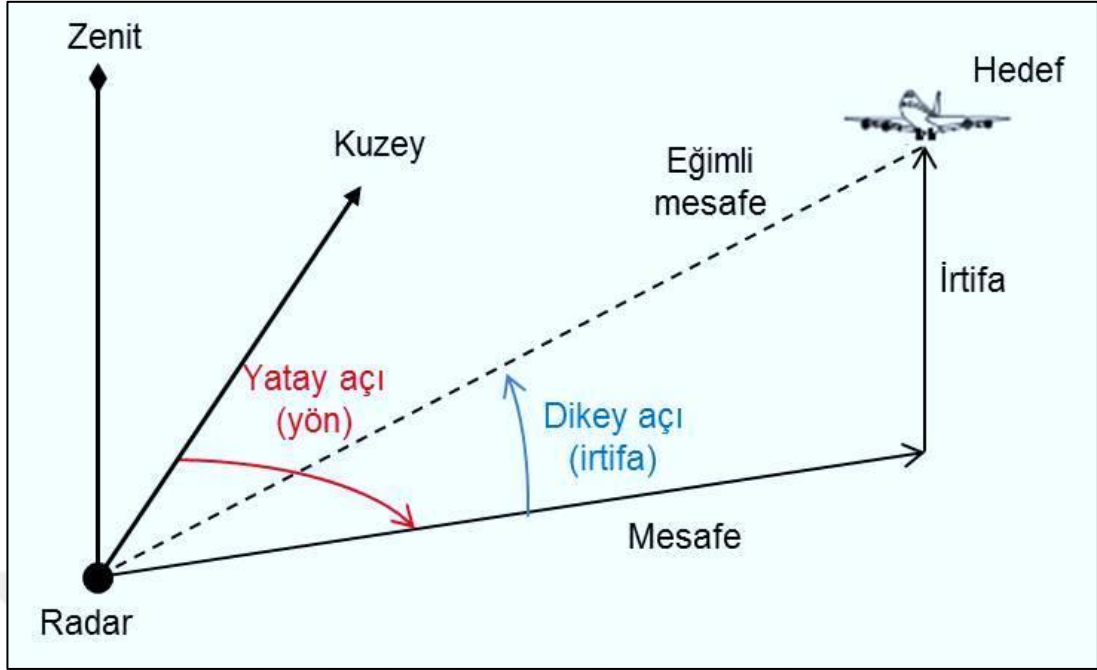
Radarların çalışma prensibinde elektromanyetik dalgalara ilişkin üç fizik kuralı rol oynar:

- Elektromanyetik dalgaların yansıması: Elektromanyetik dalgalar elektriksel iletken bir yüzeye çarpmaları halinde yansır. Yansıma sinyali alıcı tarafından kaydedilir ve bu da bize dalganın yayıldığı yönde bir cismin varlığını kanıtlar.
- Elektromanyetik dalgaların sabit yayılma hızı: Elektromanyetik dalgalar yaklaşık olarak ışık hızına yakın bir hızla yayılırlar. Elektromanyetik dalgaların sabit hızla yayılma özelliğinden faydalanarak, hedeften geri dönen radar sinyallerinin geri dönüş süresi ve hedefin uzaklığı hassas bir şekilde belirlenebilir.
- Elektromanyetik dalgaların doğrusal yayılması: Doğrusal olarak yayılan elektromanyetik dalgalar bazı özel antenler ile belli bir yönde yoğunlaştırılarak hedefin açısal koordinatları (yatay açısı ve yükseklik açısı) tespit edilebilir.

Radarlar tarafından hedefe ilişkin bilgilerin elde edilmesine yönelik üç fiziksel kanunun yanı sıra, radar sinyallerinin yayılımında, ortamdaki atmosferik ve meteorolojik şartlar da oldukça etkilidir.

Bahse konu fiziksel kanunlar kullanılarak radarlar ile bir hedefin;

- Mesafesi (uzaklığı),
 - Bulunduğu yön (yatay açısı),
 - İrtifası/Yüksekliği (dikey açısı),
- belirlenebilir [7].



Şekil 1.2. Radar koordinatları [8]

1.3. Radar Temel Prensipleri

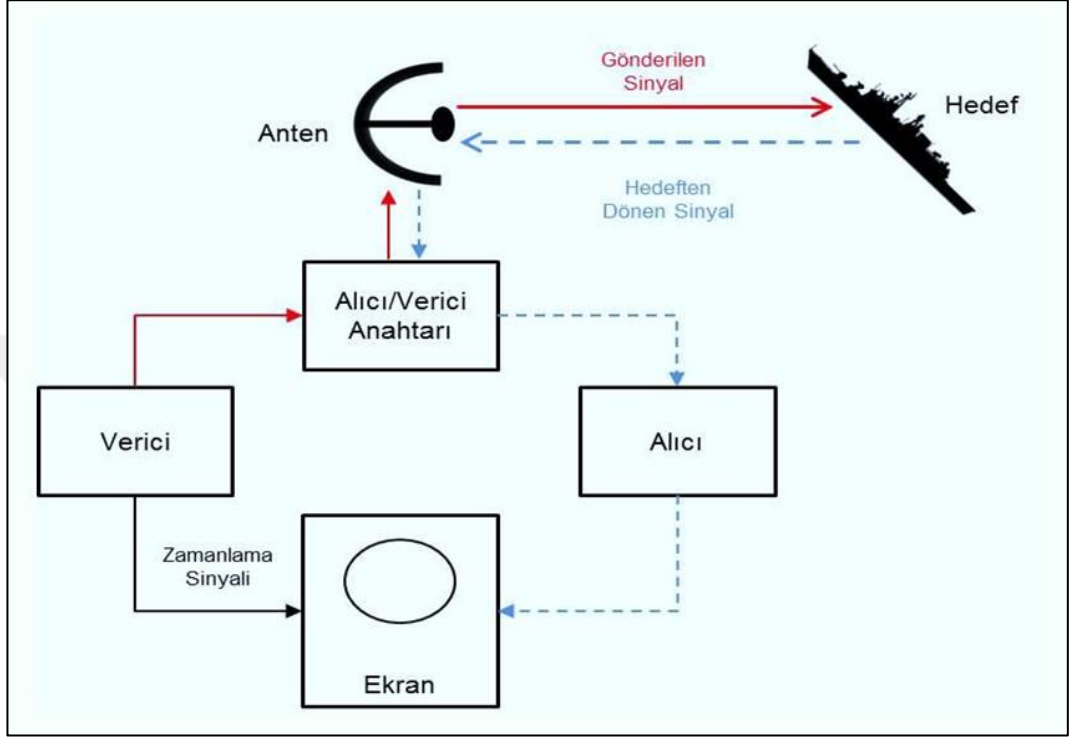
1.3.1. Radarın yapısı

Bir radar sisteminin temelinde;

- Radar sinyallerini üreten bir verici,
- Üretilen elektrik sinyallerini elektromanyetik dalgalara dönüştürerek ortama yayan bir anten (verici),
- Geri dönen elektromanyetik dalgaları algılayarak elektrik sinyallerine dönüştüren bir anten (alıcı),
- Gelen sinyalleri işleyerek çeşitli bilgiler sağlayan bir alıcı,
- Gönderilen komutlarla radarın diğer kısımlarının eş zamanlı çalışmasını sağlayan ve işlenen sinyallerden elde edilen bilgileri, radar operatörünün algılayabileceği şekilde sergileyen bir ekran, bulunur.

Elektromanyetik dalgaları ortama yaymak için kullanılan anten ile geri dönen elektromanyetik dalgaları algılamak için kullanılan anten farklı olabilir. Ancak pratik uygulamalarda, verici ünitesi ile alıcı ünitesi tarafından ortak bir anten kullanılır.

Bu durumda; verici hattı çalışırken alıcı hattının, alıcı hattı çalışırken ise verici hattının kapalı olmasını sağlayan bir alıcı-verici anahtarı kullanılır. Böylelikle vericinin yaydığı yüksek gücün alıcıyı etkilemesi ve geri dönen sinyallerin vericiye gitmesi engellenir [9].



Şekil 1.3. Radar temel diyagramı

1.3.2. Radar fonksiyonları

Radarlar, tasarımlarına göre değişik fonksiyonlar gerçekleştirebilir. Radarların fonksiyonları temel olarak;

- Gözetleme,
- İzleme (takip),
- Görüntüleme,
- Ölçme,

başlıkları altında toplanabilir [10].

Bir radar bu fonksiyonlardan birini veya birkaçını gerçekleştirecek şekilde tasarlanabilir.

1.3.2.1. Gözetleme

Hava, deniz üzeri, kara ya da uzay ortamında bir sahanın gözetlenmesi ve bu saha içinde bulunan uçak, gemi, füze, uydu gibi çeşitli platformların tespit edilmesi, radarların en yaygın kullanım alanlarından birisidir. Gözetlenecek alan niteliklerine, radarın menziline, yerleştirildiği yere ve gözetlenecek platformların özelliklerine göre gözetleme radarları çeşitlilik gösterebilir [9].

1.3.2.2. İzleme (Takip)

Radarlar, tek veya birkaç platformun hareketlerini detaylı olarak izlemek için de kullanılabilir. Genellikle izleme fonksiyonu, radar güdümlü bir silah sisteminin gereksinim duyduğu hedef yönü, hedef hızı, ilerleme yönü gibi verilerin hassas olarak belirlenmesi veya füze güdümü için ön plana çıkmaktadır. Atış kontrol radarları ve G/M başlık radarları izleme fonksiyonunun öne çıktığı radar türleridir [11].

1.3.2.3. Görüntüleme

Radar bir alanın, elektromanyetik yansıtıcılık haritasını çıkartarak ileri seviyede bir görüntüleme fonksiyonu için kullanılabilir. Güvenlik hizmetlerine yönelik nesne araması ile şeffaf olmayan malzeme (toprak, beton, tuğla duvar, asfalt, taş, buz gibi) içinde bulunan nesnelerin ya da katmanların yerlerini belirlemek ve haritalamak maksadıyla kullanılır [11].



Şekil 1.4. Radarla konteyner görüntüleme [12, 13]

1.3.2.4. Ölçme

Radarlar yükseklik, hız gibi bazı fiziksel büyüklükleri ölçmek için bir ölçüm cihazı olarak da kullanılabilir. Radar altimetre, tek fonksiyonu konuşlandırıldığı hava platformunun (uçak, güdümlü mermi vb.) bulunduğu yüksekliği ölçmek olan ve radar prensibi ile çalışan bir cihazdır [11].

Trafikte seyreden araçların hız bilgilerini elde etmek üzere radarlar kullanılmaktadır. Meteoroloji radarları da hava durumu tahmini ve değerlendirmesine yönelik çeşitli ölçümler yapmak için kullanılır.

1.3.3. Radar kullanım alanları

Radarlar, amaç, çalışma frekansı, uygulama sektörü, tip, dalga formu, konuşlu olduğu platform gibi farklı parametrelere göre sınıflandırılmaktadır [6].

Günümüzde radarlar kara, deniz, hava ve uzay platformlarında veya bu platformların tespit/takip edilmesinde kullanılmaktadır.

Karada konuşlu radarlar; genel olarak havada, deniz üzerinde veya uzayda bulunan hedeflerin tespiti, konumlarının belirlenmesi, takip edilmesi ve füze güdümü maksatlardır.

Deniz platformlarında bulunan radarlar; seyir emniyetinin sağlanması ve diğer gemilerin, sahillerin ve deniz üzerinde bulunabilecek diğer oluşumların (buzdağı gibi) ile askeri maksatlı hava platformlarının (uçak, helikopter, güdümlü mermi gibi) tespit ve takip edilebilmesine yöneliktir.

Hava platformlarında bulunan radarlar; kara, deniz, hava platformlarının tespiti, yer haritalarının çıkarılması, meteorolojik olayların gözlenmesi ve uçağın güvenli seyahati için kullanılmaktadır [5].

Bünyelerinde aktif veya pasif radar başlığı bulunan güdümlü mermiler, sahip oldukları radar sistemleri ile hedef tespiti ve takibi maksadıyla kullanılmaktadır [6].

Uzay ortamında radarlar; uyduların rotalarının belirlenmesini, kara ve denizlerin uzaktan algılanmasını amaçlamaktadır.

Radarların kullanım alanları;

- Hava trafik kontrolü,
- Uçak seyrüseferi,
- Gemi seyrüseferi,
- Uzay uygulamaları,
- Uzaktan algılama,
- Güvenlik uygulamaları (trafik radarı, çevre gözetlemesi, görüntüleme vb.)
- Askeri uygulamalar (gözetleme, seyrüsefer, atış kontrol, füze güdüm, görüntüleme vb.)

başlıkları altında toplanabilir [5-7].

1.3.4. Radarlarda kullanılan frekanslar

Frekans, radarın fonksiyonunu, performansını ve tasarımını etkileyen en önemli faktörlerdendir.

Radar sinyallerini üretme (verici) ve yayınlama/algılama (anten) maksadıyla kullanılan cihazların boyutları dalga boyu ile orantılıdır. Düşük frekanslar için büyük boyutlu ve ağır donanımlara ihtiyaç duyulurken, yüksek frekanslar için daha küçük boyutlu ve daha hafif donanımlar kullanılmaktadır [9].

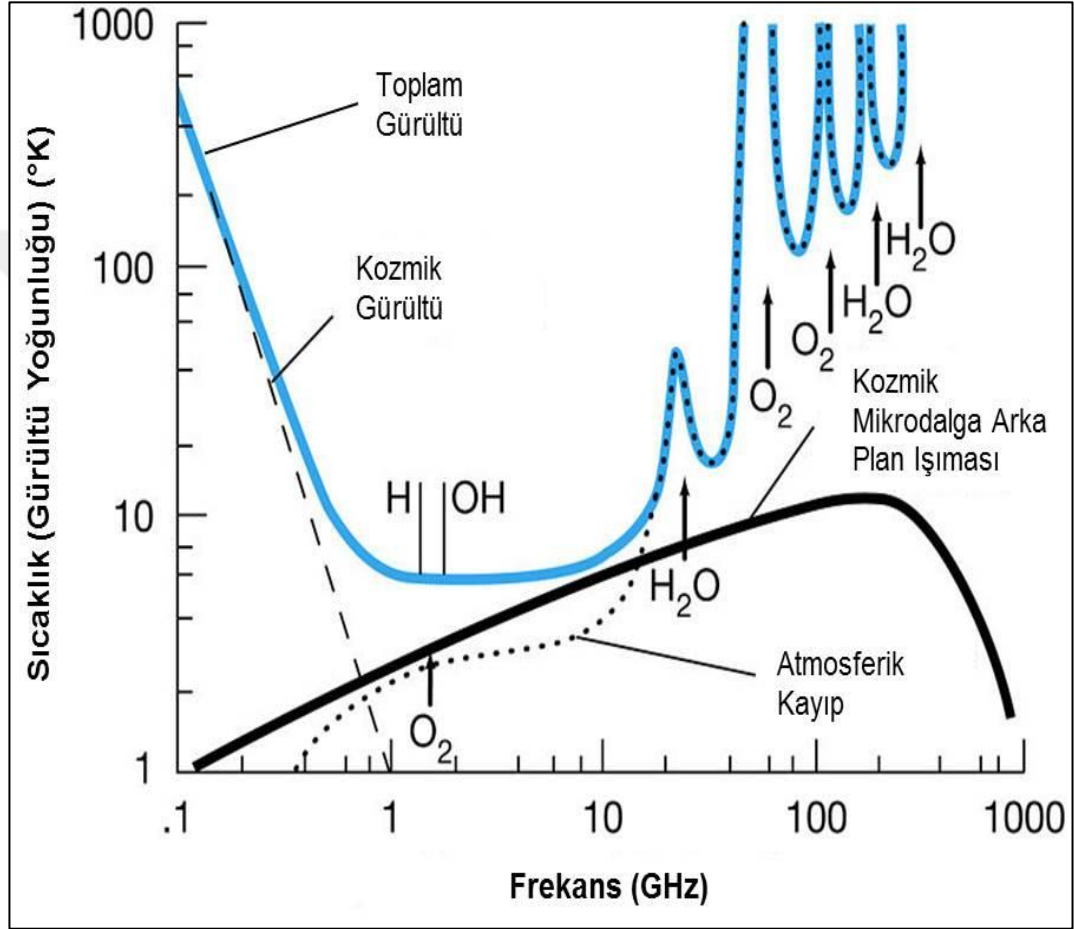
Bir cismin radar tarafından rahat algılanabilmesi için cismin boyutlarının radarın kullandığı dalga boyundan büyük olması gereklidir. Aksi takdirde gönderilen sinyaller hedeften saçılacağı için çok azı radara geri döner ve hedef radar tarafından algılanamayabilir [6]. Hava tahmini için yağmur damlalarının tespiti maksadıyla, damlaların boyutları dikkate alınarak, dalga boyu küçük ve buna bağlı olarak frekansı yüksek sinyaller kullanılmalıdır.

Frekans anten kazancını da etkilemektedir. Anten boyunun vericinin tepe gücünü de etkilemesi nedeniyle, büyük boyutlu antenler ile daha yüksek güçlerde yayım yapılabilmesine imkan sağlamaktadır.

Radar frekansı seçimini etkileyen diğer bir faktör de gürültüdür. Atmosferik gürültü, kozmik gürültü ve insan kaynaklı gürültü, belirli radar bantlarında ve uygulamalarında gürültü seviyesinin radar sistemindeki ısı gürültü seviyesinin üzerine çıkmasına neden olur ve radar performansını olumsuz etkiler [14].

Elektromanyetik dalgalara yönelik olarak;

- Düşük frekanslarda kozmik gürültü ve atmosferik gürültü,
- Yüksek frekanslarda atmosferik gazların soğurması,
- Mikrodalga frekanslarında (300 MHz-900 MHz.) şimşeklerden kaynaklanan gürültü ve insan kaynaklı gürültü, ön plana çıkmaktadır [6, 14].



Şekil 1.5. Gürültü seviyeleri [15]

Çevresel gürültü seviyesinin az olduğu, 1-10 GHz arasındaki frekanslar radarlarda yoğun olarak kullanılmaktadır.

Çok yüksek frekans değerlerine kadar geniş bir bölgeyi kapsayan elektromanyetik spektrum, dalgaların fiziksel nitelikleri de dikkate alınarak farklı bantlara ayrılmıştır. Frekansların özelliklerine bağlı olarak, frekans bantlarının kullanım alanları/maksatları değişiklik göstermektedir.

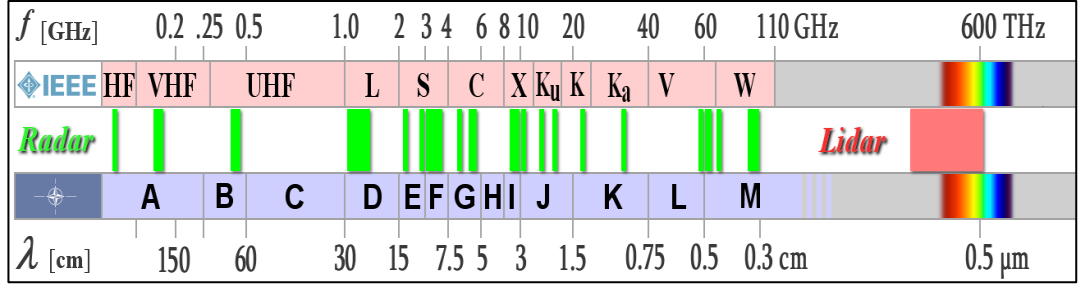
Tablo 1.1. ITU tarafından belirlenen frekans bantları ve kullanım alanları [16]

Frekans Bandı	Frekans Aralığı	Dalga Boyu	Kullanım Yeri
Very Low Frequency (VLF)	3-30 KHz	10-100 km	- Sonar - Denizcilik (muhabere, seyir yardımcı cihazları)
Low Frequency (LF)	30-300 KHz	1-10 km	- Denizcilik (muhabere, seyir yardımcı cihazları, radyo yön bulucu (Radio Direction Finder-RDF))
Medium Frequency (MF)	300 KHz - 3 MHz	100-1000 m	- AM radyo yayın - Denizcilik (muhabere, seyir yardımcı cihazları)
High Frequency (HF)	3-30 MHz	10-100 m	- İletişim (telefon, amatör telsiz, telgraf) - Kısa dalga uluslararası yayın - Gemi - Sahil istasyonu arası muhabere - Gemi - Hava vasıtaları arası muhabere
Very High Frequency (VHF)	30-300 MHz	1-10 m	- Muhabere (hava trafik kontrol, polis telsizi, gemi-gemi arası muhabere) - Denizcilik (muhabere, seyir yardımcı cihazları)
Ultra High Frequency (UHF)	300 MHz - 3 GHz	10-100 cm	- Televizyon yayını - Uydu muhaberesi - Radyo-sonda - Gözetleme radarı - Denizcilik (seyir yardımcı cihazları) - Gemi - Hava vasıtaları arası muhabere
Super High Frequency (SHF)	3-30 GHz	1-10 cm	- Radar - Mobil iletişim - Uydu muhaberesi
Extremely High Frequency (EHF)	30-300 GHz	1-10 mm	- Radar - Deneysel kullanım

Frekansın radar ile ilgili pek çok parametreyi etkilemesi nedeniyle radarın operasyonel kullanım amacına uygun frekans bandı seçilmelidir.

Radarlarda kullanılan frekanslar ilk defa II. Dünya Savaşı sırasında çeşitli bantlara ayrılmıştır. Frekans bantlarına, o günlerde bant aralıklarının gizliliği de dikkate alınarak verilen isimler (L, S, C, X, K) halen kullanılmaktadır.

Günümüzde frekans bantları için IEEE ve NATO tarafından belirlenmiş farklı isimler ve aralıklar bulunmaktadır [5].



Şekil 1.6. Radar frekans bantları [1]

Kullanılan frekansa göre radarların kullanım alanları Tablo 1.2.'de yer almaktadır.

Tablo 1.2. IEEE tarafından önerilen radar frekans bantları ve kullanım alanları [18]

Frekans Bandı	Frekans Aralığı	Kullanım Alanı
HF	3-30 MHz	- Ufuk ötesi radar
VHF	30-300 MHz	- Çok uzun menzilli gözetim
UHF	300 MHz-1 GHz	- Çok uzun menzilli gözetim
L	1-2 GHz	- Uzun menzilli gözetim - Trafik kontrolü
S	2-4 GHz	- Orta menzilli gözetim - Terminal hava trafik kontrolü - Uzun menzil radar
C	4-8 GHz	- Uzun menzilli takip - Hava teması tespit/yönlendirme
X	8-12 GHz	- Kısa menzilli takip - Güdümlü füze - Deniz haritalama radarı - Hava teması tespit/önleme
K _u	12-18 GHz	- Yüksek çözünürlüklü görüntüleme - Altimetre - Kısa menzilli hedef takip - Güdümlü füze
K	18-27 GHz	- Meteorolojik gözlem - Hız ölçüm
K _a	27-40 GHz	- Çok yüksek çözünürlüklü görüntüleme - Kısa menzilli takip - Hava gözetleme
V, W	40-110 GHz	- Akıllı mühimmat - Uzaktan algılama
Milimetre	110 GHz <	- Deneysel uygulamalar - Uzaktan algılama

Günümüzde operasyonel amaçlı radarlarda en yüksek frekans bandı olarak Ka bandı kullanılmakta, milimetrik dalga bandı (40-110 GHz) (V ve W bandı) radar menzilinın çok kısa olması nedeniyle, otomobil park radarları ile deneysel ve pilot radar uygulamalarında kullanılmaktadır [16-18].

1.3.4.1. Yüksek frekans (HF)

Yüksek Frekans (High Frequency-HF) bandı 3-30 MHz aralığını kapsar. Muhabere sistemleri tarafından yaygın olarak kullanılan HF bandı, atmosferik gürültünün yoğunluğu nedeniyle radar uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılmamaktadır. HF radar sinyallerinin bir kısmının, iyonosferden yansması nedeniyle, bu bantta çalışan radarların temel kullanım alanı çok uzak mesafelerden hedef (uçak, gemi, balistik füze gibi) tespitine yöneliktir [9].

1.3.4.2. Çok yüksek frekans (VHF)

Çok Yüksek Frekans (Very High Frequency-VHF) bandı 30-300 MHz aralığını kapsar. Radar sistemlerinin geliştirildiği 1930'lu yıllarda, radarlarda kullanılmaya başlayan VHF bandı, bu yeni teknoloji için öncü görevi görmüştür. Uzun mesafe hava gözetleme ve balistik füze tespiti maksatlı radarlar için oldukça avantajlı bir banttır. VHF bandı için yer yüzeyinden ve özellikle su sathından yansıma katsayısının oldukça büyük olması, bu banttaki radar sinyallerinin çok uzak mesafelere iletilmesini sağlar. Bu bandın diğer bir avantajı ise yağmur damllarından etkilenmemesidir [9]. Bununla birlikte, VHF bandın alçak irtifa kaplaması zayıftır ve radar sinyallerinin bir genişliğinin büyük olması nedeniyle hedeflere ilişkin hassas sağlanamaz yaklaşık bilgi elde edilir.

Çok uzun menzilde uçak, uydu gibi platformları gözetlemek için VHF bandında çalışan gözetleme radarları bulunmaktadır.

1.3.4.3. Ultra yüksek frekans (UHF)

Ultra Yüksek frekans (Ultra High Frequency-UHF) bandı 300-1000 MHz aralığını kapsar. VHF bandına benzerlik gösteren UHF bandının uzun menzilde kullanılabilme özelliğinden dolayı hava platformlarında konuşlu erken ihbar radarları ile uydu ve balistik füze gözetleme radarlarında bu bant kullanılmaktadır [9].

1.3.4.4. L bandı

L bandı 1-2 GHz aralığını kapsar. Uzun menzilli (200 nm. ve üzeri) hava gözetleme radarları, hava trafik radarları, uydu ve balistik füze gözetleme radarları, hava trafik radarları, üç boyutlu (yön, mesafe ve irtifa bilgisi) askeri gözetleme radarları bu bantta çalışmaktadır [19].

L bandı ve daha yüksek frekanslarda çalışan radarlar için dizayn aşamasında, yağmurun etkisini azaltacak hususlar dikkate alınmalıdır [9].

1.3.4.5. S bandı

S bandı 2-4 GHz aralığını kapsar. Hem gözetleme hem de hedef takibi fonksiyonları için uygun olan S bandı, hava savunma radarı uygulamalarında ön plana çıkmaktadır.

Orta menzilli (50-60 nm.) hava gözetleme radarları, uzun menzilli meteoroloji radarları, üç boyutlu (yön, mesafe ve irtifa bilgisi) askeri gözetleme radarları, takip radarları, füze güdüm radarları bu bantta çalışmaktadır [5, 9].

1.3.4.6. C bandı

C bandı 4-8 GHz aralığını kapsar. Kısa ve orta menzilli gözetleme, füze kontrol ve Avrupa gibi ılıman iklime sahip bölgelerde meteoroloji radarlarında kullanılır. Meteorolojik etkilerin çok büyük olması nedeniyle askeri amaçlı radarlar da dairesel polarizasyon tercih edilir [19].

1.3.4.7. X bandı

X bandı 8-12 GHz aralığını kapsar. Bu bant kısa menzilli tespit ve izleme fonksiyonu için uygundur.

Askeri maksatla hava ve suüstü temaslarının hassas bilgilerinin tespit edilmesi amacıyla sıklıkla kullanılan X bandı, sivil maksatla denizcilik sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır [19].

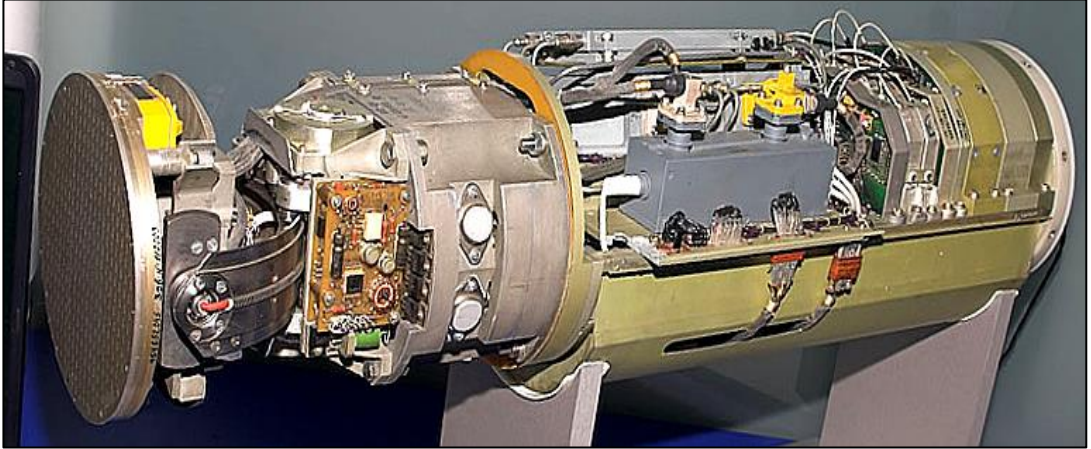
Küçük, ucuz ve hızlı dönen antenleriyle, X bantta çalışan radarlar kullanılarak orta menzillerden iyi bir hassasiyetle hedef bilgisine ulaşılabilir [9].

Gemi seyir/ hedef takip/ atış kontrol radarları, uçak atış kontrol radarları, Yapay Açıklıklı Radarlar (Sythetic Aperture Radar-SAR), Ters Yapay Açıklıklı Radarlar (Inverse Synthetic Aperture Radar-ISAR) ve aktif radar başlıklı füze güdüm radarları bu bantta çalışmaktadır.

1.3.4.8. K_u bandı

K_u bandı 12-18 GHz aralığını kapsar. Atmosferik kayıplar ihmal edilemez seviyededir. Küçük boyutlu antenlerin kullanıldığı K_u bantta çalışan radarlar ile çok büyük güçte çıkış elde edilemez. Uzun menzilden hedef tespiti amaçlanmayan ve küçük boyutlu radar kullanımının ihtiyaç duyulan uygulamalar için tercih edilir [9].

Hava platformlarına konuşlu radarlar, yüksek çözünürlüklü görüntüleme radarları, altimetre radarları, aktif radar başlıklı füze güdüm radarları bu bantta çalışmaktadır.



Şekil 1.7. KH-25MAE (AS-10/Karen) aktif radarlı güdümlü mermi kullanılan PSM-E serisi K_u-Bant radar [20]

1.3.4.9. K bandı

K bandı 18-27 GHz aralığını kapsar. Atmosferdeki su buharı ile ilgili kayıplar nedeniyle bu bant atmosferik uygulamalarda kullanılmamaktadır. Meteoroloji radarları, metal detektörler ve hız ölçüm radarları bu bantta çalışmaktadır [5].

1.3.4.10. K_a bandı

K_a bandı 27-40 GHz aralığını kapsar. Çok yüksek çözünürlüklü görüntüleme radarları, hava alanı yer trafiği gözetleme radarları, atış kontrol radarları bu bantta çalışmaktadır [5].

1.4. Radar Dalga Yayılımı

Radar uygulamalarının büyük çoğunluğu, atmosfer içinde bulunan hedeflerin tespiti ve izlenmesine yöneliktir. Bu nedenle boş bir uzayda dalgaların yayıldığını varsayarak yapılan radar analizi uygulanabilir olmayacaktır [6].

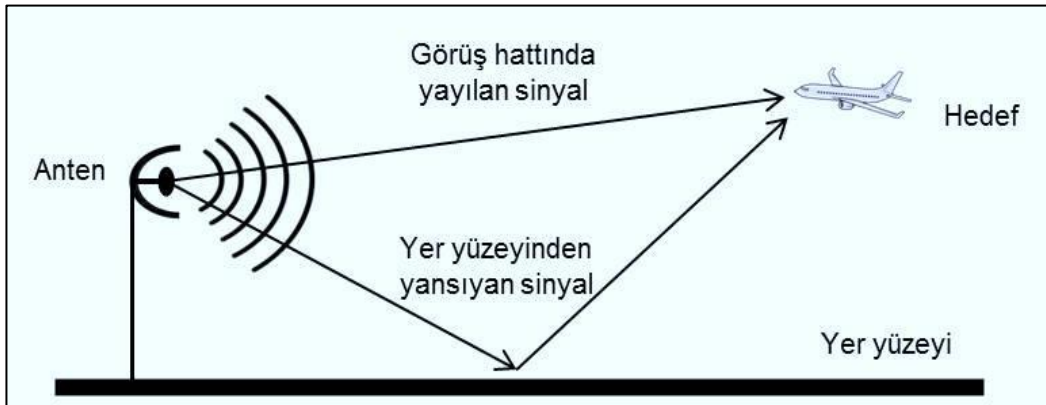
Radar uygulamalarında, radar dalgalarının yer yüzeyi ve atmosfer ile etkileşimi;

- Yer yüzeyinden yansımalar (surface reflection),
- Dalga kırılması (refraction),
- Oluklanma (ducting),
- Kırınım (diffraction),
- Zayıflama (attenuation),

başlıkları altında toplanabilir [6, 21].

1.4.1. Yer yüzeyinden yansımalar

Radar anteninden yayılan dalga, hedefe yalnızca radar anteni ile hedef arasındaki hat (görüş hattı) üzerinden değil yer yüzeyinden yansıyarak da ulaşabilir. Benzer şekilde, hedeften yansıyan dalgalar da bu iki yolu takip ederek radar antenine ulaşabilir. Alıcıya gelen bu iki sinyal arasında, kat ettikleri mesafelere bağlı olarak faz farkı oluşur. Aynı noktaya (antene) aralarında faz farkı olan iki sinyalin gelmesi, iki sinyal arasındaki faz farkına bağlı olarak bu noktada elde edilecek toplam sinyal şiddetinin artmasına bazen de azalmasına neden olur. Özellikle alçak irtifalarda ortaya çıkan bu problem, sinyalin zayıfladığı durumlarda hedeflerin tespit edilememesine neden olabilir [6, 22].

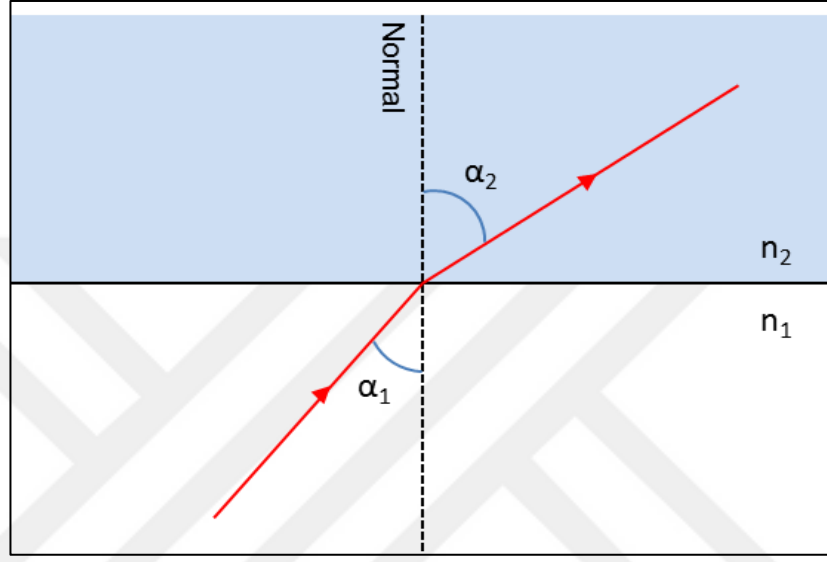


Şekil 1.8. Elektromanyetik dalgaların yansımaları

1.4.2. Dalga kırılması

Elektromanyetik dalgalar boşlukta düz hatlar üzerinde yayılırlar. İrtifaya bağlı olarak değişen ısı, basınç, nem ve yoğunluk, atmosferde elektromanyetik dalgaların kırılmasına neden olur.

Bu durum Snell Kanunu ile açıklanabilir.

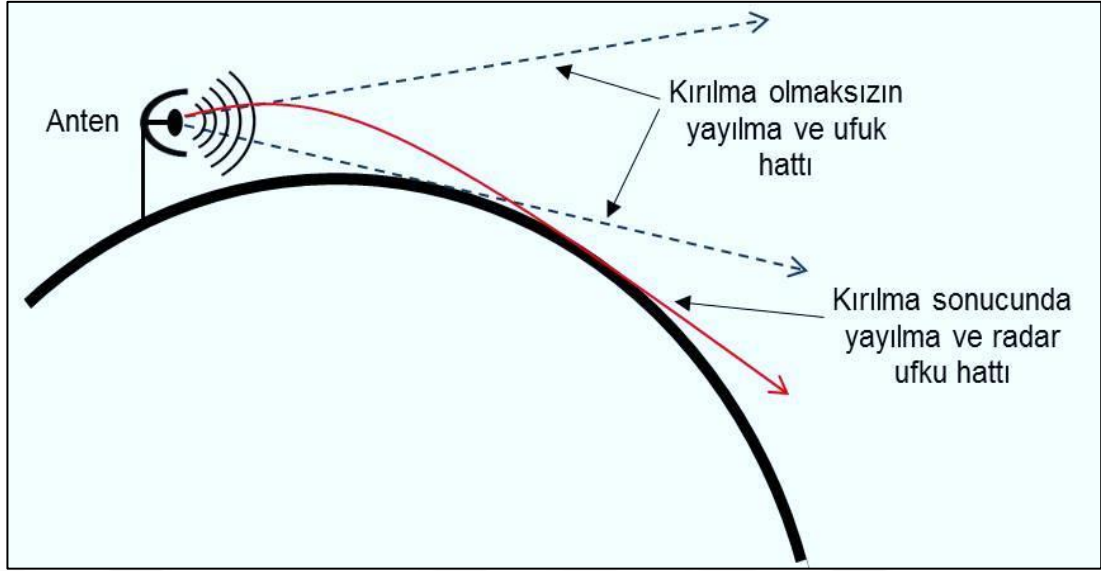


Şekil 1.9. Snell kanunu

Farklı özelliklere sahip katmanlardan oluşan atmosfer içinde Kırılma İndisi (n) sabit değildir. Atmosfer içinde yükseklik arttıkça kırılma indisi değeri azalır.

Elektromanyetik dalgaların hızı yayıldıkları ortama göre değişiklik gösterir. Ortamın yoğunluğu ile elektromanyetik dalgaların hızı ters orantılıdır.

Yoğun ortamda hız daha düşüktür ve yoğunluk azaldıkça hız artış gösterir. Dalga hızındaki bu değişiklik, dalganın yön değiştirmesine, yoğun ortamdan daha az yoğun ortama geçerken, dalganın normalden uzaklaşmasına neden olur ve elektromanyetik dalga iki farklı ortam arasındaki sınırdan geçerken kırılma oluşur. Bu kırılma radar ufkunun görsel ufuktan daha uzun olmasını sağlar [6].



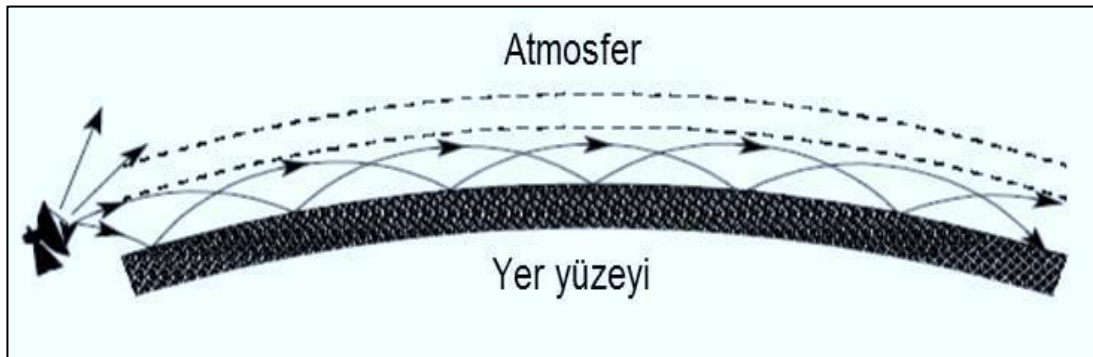
Şekil 1.10. Elektromanyetik dalgaların kırılması ve radar ufku

1.4.3. Oluklanma

Atmosfer içinde kırılma indisinin çok hızlı azalması, radar dalgalarının Dünya'nın eğriliğine denk bir eğrilikte kırılmasına ve radar ufkunun sonsuz olmasına neden olabilir. Bu durum Oluklanma olarak adlandırılır.

Oluklanma sonucunda; radar dalgaları, yer yüzeyine yakın bölge içine hapsolarak normal ortam şartlarındaki radar menzilin çok ilerisine ulaşabilir.

Radar dalgalarının ortam şartları nedeniyle hapsoldüğü/dışına çıkamadığı bu bölge bir dalga kılavuzu gibi düşünülebilir [23].



Şekil 1.11. Oluklanma

Oluklanma genellikle soğuk ve çok nemli bir hava tabakasının üzerinde; yüksekliği arttıkça sıcaklığı hızla artıp, nemi hızla düşen başka bir tabakanın bulunması durumunda meydana gelir.

Oluklanma olayının, okyanus ve deniz gibi büyük su kütleleri üzerinde meydana gelme olasılığı yüksektir.

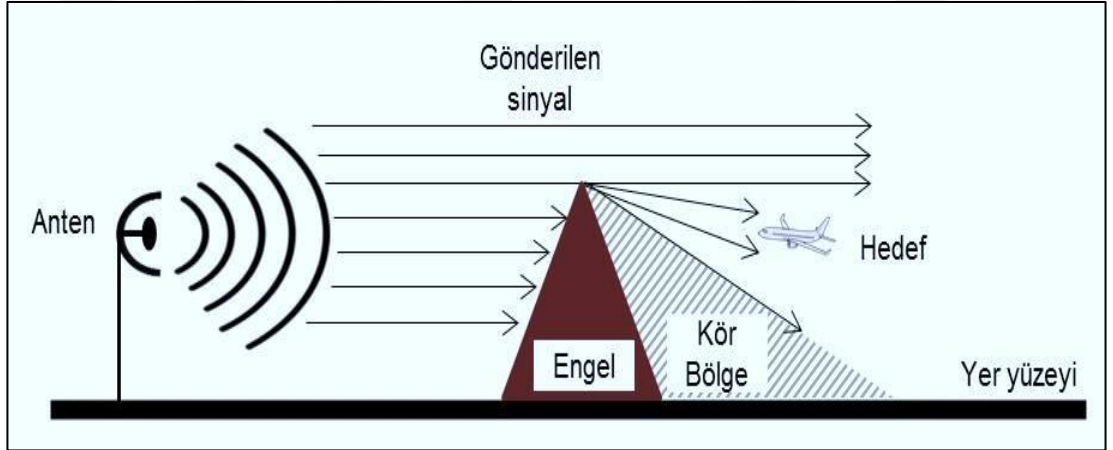
Oluklanma sonucunda radar dalgaları çok uzak mesafelere ulaşabilirken, oluğun üstünde radar sinyallerinin geçemediği kör bölge oluşur. Bu bölgede bulunan hedefler radar ile tespit edilemez [22].

1.4.4. Kırınım

Radar dalgaları, yeryüzü şekilleri/coğrafi formasyonlar nedeniyle ışık gibi kırınıma uğrayabilir [6].

Radar dalgaları kırınım ile standart radar ufğunun veya radarın aydınlattığı bölgedeki fiziksel engellerin ötesine geçebilir. Bu sayede burada bulunan hedeflerin tespit edilebilir. Bu etki frekansa bağlıdır ve frekans arttıkça normalde aydınlatılmayan bölgeye giden sinyal seviyesi de azalır [6, 22].

Kırınım ile dalgaların, radarın görüş alanı üzerindeki bir engelin (tepe gibi) arkasına erişmesi, burada mevcut hedeften yansıması ve yansıyan sinyalin radar tarafından tespiti mümkün olur [6].



Şekil 1.12. Kırınım

1.4.5. Zayıflama

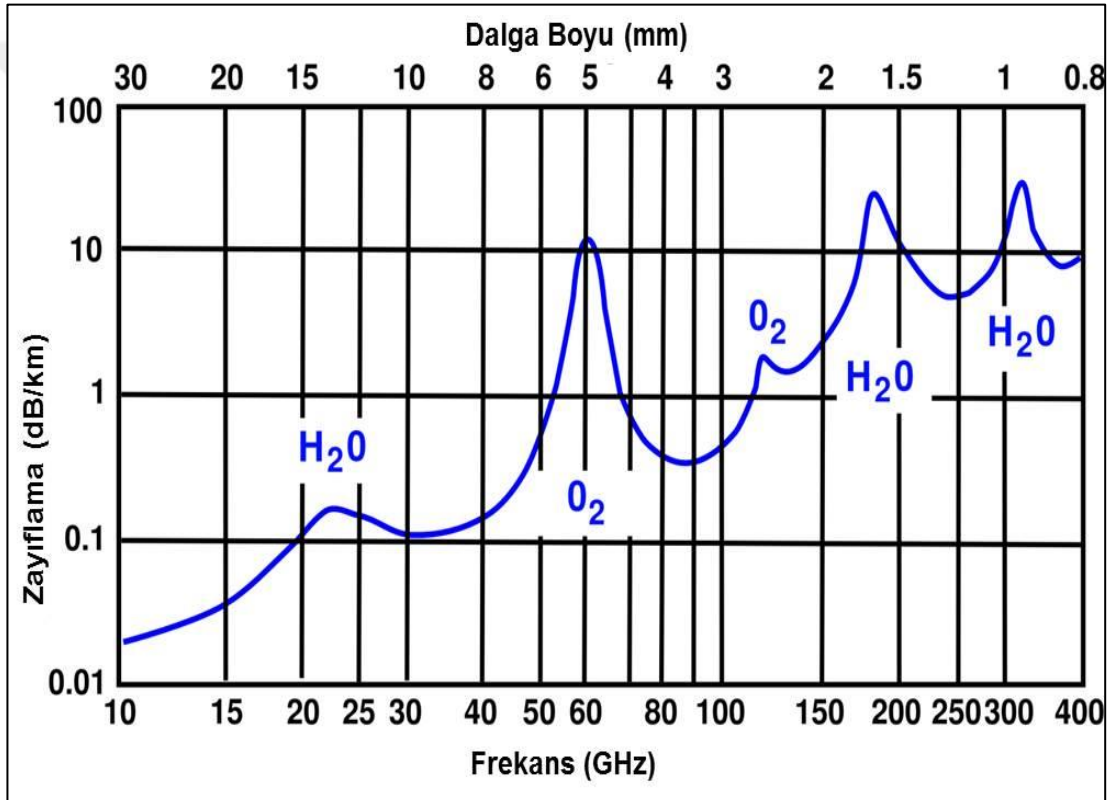
Elektromanyetik dalgalar, yayıldıkları ortamın dielektrik özelliklerinden farklı ortam/nesnelerin içinden geçerken farklı yönlerde doğru saçılırlar ve enerjilerinin bir kısmı soğrulur.

Soğrulma içinden geçilen malzemenin dielektrik özelliklerine; isotropik benzeri saçılma ise nesnenin boyutları ile dalga boyuna bağlı olarak değişiklik gösterir.

Atmosferde içinde yayılan elektromanyetik dalgalar, ortamdaki gazlardan ve üç halde de (gaz, sıvı ve katı) bulunabilen su moleküllerinden etkilenmektedir[5].

Elektromanyetik dalgalar, atmosfer içinde ilerlerken enerjisinin bir kısmı, atmosferde bulunan gazlar ve su buharı molekülleri tarafından soğurulur.

Atmosferik zayıflama (atmospheric attenuation), atmosferdeki gazların rezonans frekanslarına bağlı olarak artış gösterir [6].



Şekil 1.13. Çeşitli frekanslarda atmosferik zayıflama [24]

Oksijen ve su buharının yanı sıra atmosferde bulunan diğer gazların da (N₂O, SO₂, O₃, NO₂ ve NH₃) rezonans frekansları bulunmaktadır. Ancak atmosferdeki yoğunluklarının düşük olması nedeniyle elektromanyetik dalgaların yayılımına olan etkileri dikkate alınmaz [25].

Atmosferde bulunan oksijen ve su buharı nedeniyle ortaya çıkan zayıflama değeri, frekansın artması ile artış göstermektedir.

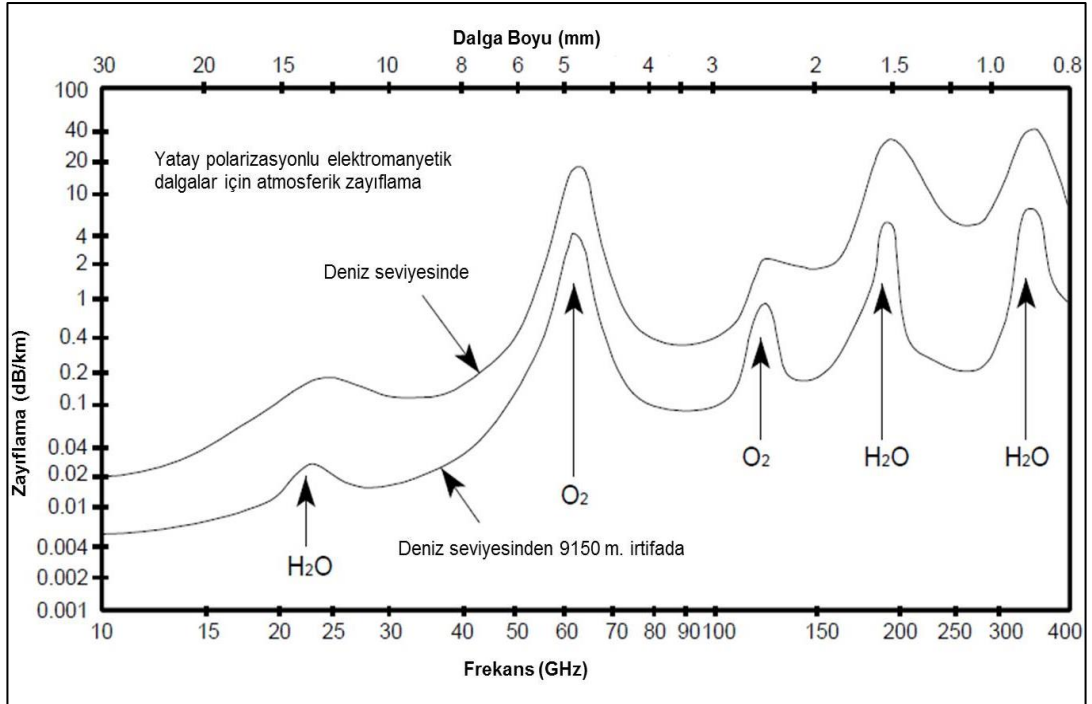
100 GHz frekansına kadar bazı frekanslarda (su buharı için 22,235 GHz ve oksijen için 60 GHz gibi) değerleri için zayıflama miktarı çok büyük değerlere ulaşacak şekilde sapma göstermektedir [9].

100 GHz üzerindeki frekanslarda ise zayıflama değerlerindeki aşırı artış oluşan (119, 183, 325, 380 GHz gibi) sapma bölgelerinin sayısında artış görülür [26].

Su buharının rezonans frekansının (22,235 GHz), K bandının merkez frekansı ile örtüşmesi nedeniyle K bandı radarlarda kullanılmamaktadır. Atmosferik zayıflamanın çok şiddetli olması nedeniyle K_a bandı (27-40 GHz) üzeri frekanslar, kısa mesafeli özel radarlar ve deneysel/pilot radarlarda kullanılmaktadır [9, 16, 21].

Oksijen nedeniyle zayıflamanın oldukça yüksek olduğu 60 GHz civarındaki frekansların, uzak mesafelerden tespit edilme ve karıştırmaya maruz kalma olasılıkları oldukça düşüktür. Bu nedenle 58-62 GHz arasındaki frekanslar; uydular arası iletişim, kısa mesafeli gemi-gemi emniyetli muhabere gibi askeri ve gizlilik gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [25]

Atmosferdeki soğurma, havadaki gazların oranına bağlıdır. İrtifaya bağlı olarak gazların oranlarının değişmesi nedeniyle, atmosferik zayıflama irtifaya göre farklılık gösterir. İrtifa arttıkça atmosferik zayıflama azalır [6, 23].



Şekil 1.14. Farklı irtifalarda zayıflama katsayısı [27, 28]

Su molekülleri; atmosferde gaz (su buharı) halinin yanı sıra hidrometeor olarak adlandırılan yağış tipleriyle, sıvı (yağmur, sis, bulut) ve katı (kar, buz kristalleri) halde de bulunmaktadır.

Su buharının yoğunlaşması sonucunda oluşan yağmur, sis, bulut, kar, dolu gibi hidrometeorlar, yayılan radar sinyalinin soğrulmasına, farklı yönlere saçılarak dağılmasına, polarizasyonunun bozulmasına ve radar skobunda sahte hedef/gürültü oluşmasına neden olur. Hidrometeorların elektromanyetik dalgalara etkisi, hidrometeor taneciklerinin miktarına ve taneciklerin boyutlarına (dalga boyuna bağlı olarak) göre değişiklik gösterir [14].

Elektromanyetik dalgaların, su molekülleri içinden geçerken;

- Su damlalarının zayıf bir dielektrik malzeme gibi davranarak dalganın gücünü soğurması (ısınma),
- Dalganın su damlalarına çarparak saçılması (farklı yönlere dağılma), nedeniyle zayıflama meydana gelir [29].

Meydana gelen zayıflamanın, fiziksel (kesin) yöntemler kullanılarak hesaplanmasındaki güçlükler ve hesaplamanın bölgesel olarak değişim göstermesi nedeniyle deneysel (ampirik) hesaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Bahse konu deneysel yöntemler ile çoğunlukla oldukça başarılı sonuçlar elde edilmektedir [25].

Bünyesinde donmuş halde su içeren ve su yoğunluğu daha az olan karın, elektromanyetik dalgalara etkisi yağmura nazaran oldukça azdır [14]. Hatta donmuş (kuru) haldeki buzun etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. Ancak kar taneleri erimeye başladıkça elektromanyetik dalgalara etkisi de artış gösterir [30].

Dolunun elektromanyetik dalgalara etkisi, içerdği sıvı haldeki su miktarı ile dalga boyu ve dolu tanelerinin boyutlarına bağlı olarak değişir. Erimeye başlayana kadar dolunun çok büyük bir etkisi bulunmaz [4, 14].

Genellikle içlerinde, küçük boyutlu (0,01 cm ve daha küçük çapa sahip) su damlacıkları bulunan sis ve bulutların elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkisi birim hacimlerdeki su damlası miktarı ile doğru orantılıdır [25, 31].

Düşük irtifalarda görülen sis, özellikle deniz üzerinde ve sahile yakın kesimlerde oluşması durumunda bünyesinde taşıdığı su damlalarının yoğunluğu nedeniyle elektromanyetik dalgalar üzerinde oldukça etkilidir.

Bünyesinde su damlası bulunan bulutlar, yer yüzeyinden atmosfer içinde 6 km yüksekliğe kadar ulaşabilmektedir. Frekansı 10 GHz altında olan elektromanyetik dalgalar için sis ve bulutların etkisi ihmal edilebilirken, 10 GHz üzerindeki frekansa sahip elektromanyetik dalgalar üzerinde özellikle bulutlar nedeniyle meydana gelen zayıflama frekans arttıkça oldukça büyük boyutlara ulaşmaktadır [26].

Yağmur nedeniyle elektromanyetik dalgalarda meydana gelen zayıflama, diğer meteorolojik yağış türlerine göre daha fazladır [16].

Zayıflamada;

- Dalga boyu, yağmur damlasının boyutuna göre büyükse saçılma,
- Yağmur damlasının boyutu, dalga boyuna göre büyükse soğrulma, etkilidir [5].

Yağmurun etkisi; dalganın frekansı ve polarizasyonunun yanı sıra, yağmurun yağış oranı, yağmur damlasının şekli ve hacimsel yoğunluğuna (damla sayısı/m³) göre değişiklik gösterir [4]

2. YAĞMURUN K_u BANT RADAR SİNYALLERİNE ETKİSİ

2.1. K_u Bant Radar Sistemleri

Telefon, radyo, televizyon gibi iletişim sistemlerinden, radar sistemlerine; sağlık sektöründen askeri uygulamalara kadar birçok alanda elektromanyetik dalgalar yaygın olarak kullanılmaktadır.

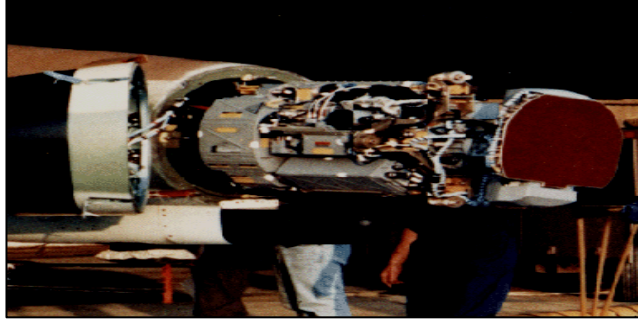
Her geçen gün elektromanyetik sinyallere yönelik beklenti ve talep artış göstermekte, özellikle iletişim sistemlerinde iletim hızı ile kapasiteye, radar sistemlerinde ise hassas bilgiye yönelik artış gösteren beklenti ve taleplere cevap verebilmek üzere, yüksek frekansa sahip elektromanyetik dalgaların kullanımı artış göstermektedir.

Talepleri karşılayabilmek üzere günümüzde K_u bant (12-18 GHz), özellikle uydu iletişimi ve hassas hedef bilgisine ihtiyaç duyulan hedef takip/ atış kontrol radarlarında tercih edilmektedir [1].



Şekil 2.1. Uzay aracı iletişim sistemi [32]

Radar sistemlerinde kullanılan dalga kılavuzu, anten gibi donanımlar, K_u bant radarlar için küçük boyutludur. Bu nedenle, K_u bant özellikle alanın kısıtlı olması nedeniyle küçük boyutlu donanım kullanılmasına ihtiyaç duyulan ve yakın mesafelerden hassas bilgi elde edilmesi amaçlanan radar uygulamaları için oldukça kullanışlıdır. Ancak bu radarlar ile uzun mesafeden hedef bilgisi temin edilememektedir [9].



Şekil 2.2. F-4 Phantom uçaklarında kullanılan AN/APG-76 Radarı [33]

Bünyesinde bulunan radar ile hedef tespit ve takibi yapan, aktif radar başlıklı güdümlü mermiler ve çok uzak mesafelerden tespit/takip ihtiyacı bulunmayan av uçaklarında kullanılmak üzere K_u bant radarlar tercih edilmektedir.



Şekil 2.3. Güdümlü mermilerde kullanılan K_u bant Radar [34]

Kara üzerinde konuşlu, hava savunma sistemlerinde hedef takibi, hava meydanlarında uçak trafiğini kontrol ve takip için K_u bant radarlar kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Raytheon firması ASDE (Airport Surface Detection Equipment- Havaalanı Yüzey Algılama Ekipmanı) radarı anteni [35]

Suüstü platformlarında ise özellikle hava hedeflerine yönelik tespit, takip ve angajman işlemleri için K_u bant radarlar kullanılmakta, hava hedeflerinin süratlerinin ve manevra kabiliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle angajman safhasında hassas bilgi (mekii, rota, sürat) ihtiyacı K_u bant radarlar ile karşılanmaktadır [9].



Şekil 2.5. Türk Deniz Kuvvetleri bağlısı YAVUZ ve BARBAROS Sınıfı Fırkateynlerde bulunan K_u bant hedef takip radarı

Hedeflere ilişkin hassas bilgi sağlayarak hedefin vurulma olasılığını arttıran K_u bant radarlar; gemilerin üzerine gelen güdümlü mermilere karşı savunulmasında son safha olarak yakın mesafelerde etkili olan ve kritik öneme sahip yakın hava savunma silah sistemlerinde (Close-in Weapon System - CIWS) kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. Phalanx Yakın Hava Savunma Silah Sistemi (CIWS) [36]

Yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların, küçük boyutlu donanım (anten, dalga kılavuzu gibi) ihtiyacı, hassas bilgi temini, hızlı ve yüksek kapasitede veri transferi imkanı gibi bir çok avantajı bulunmaktadır. Ancak frekansın yükselmesi ile doğru orantılı olarak, propagasyon esnasında ortam şartlarının olumsuz etkilerinin artış göstermesi, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların kullanımını kısıtlamakta ve ilave önlemler alınmasına veya frekansın kullanılamamasına neden olmaktadır [1].

2.2. Yağmurun Elektromanyetik Dalgalara Etkisi

Elektromanyetik dalgaların, atmosfer içinde yayılımı süresince, kozmik ışıma, gazlar, oksijen molekülleri, toz gibi faktörlerin yanı sıra su molekülleri de dalgaların zayıflamasına neden olmaktadır.

Hayati bir element olan su atmosferde;

- Katı (kar, dolu),
- Sıvı (yağmur),
- Gaz (su buharı, sis),

olmak üzere üç halde de bulunmaktadır.

Bünyelerinde bir adet oksijen ve iki adet hidrojen atomu bulunan su moleküllerinin mikrodalga ve kızılötesi bölgelerde neden olduğu emilimin temelinde, sahip oldukları oldukça yüksek dipol kuvveti yer almaktadır [37].

Su moleküllerinin sahip olduğu dipol kuvveti, elektromanyetik dalgalar gibi zamana bağlı olarak değişim gösterir. Bu nedenle su molekülleri elektromanyetik dalgaları yeniden yayılmasını sağlayan anten gibi davranırlar. Bunun sonucunda elektromanyetik enerjinin bir kısmı, hedef veya alıcı anten yönü haricindeki yönlere de rastgele yeniden yayılır [4].

Suyun bağıl dielektrik katsayısı ve özgül ısı, atmosfere oranla oldukça yüksektir. Su molekülü ısınırken, oldukça büyük miktarda sıcaklığı emer. Ortam sıcaklığına ve elektromanyetik dalganın frekansına bağlı olarak emilen sıcaklık miktarı değişiklik gösterir [4].

Elektromanyetik dalgalar, yağmur damlalarının içinden geçerken;

- Damlalarının zayıf bir dielektrik malzeme gibi davranarak dalganın gücünü soğurması (ısınma),
- Dalganın damlalara çarparak saçılması (farklı yönlere dağılma), nedeniyle zayıflama meydana gelmektedir [29].

Zayıflamada;

- Dalga boyu, yağmur damlasının boyutuna göre büyükse saçılma,
- Yağmur damlasının boyutu, dalga boyuna göre büyükse soğrulma, etkili olmaktadır [4].

Saçılma, düşük frekanslı elektromanyetik dalgalar üzerinde daha fazla etki gösterirken, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar üzerinde soğrulma daha fazla etki göstermektedir.

Elektromanyetik dalgaların frekansı arttıkça, yağmurun etkisi de artış göstermektedir [25].

Yağmurun etkisi belirlenen frekansların altındaki frekans değerleri için ihmal edilebilir olarak kabul edilmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri Silahlı Kuvvetleri tarafından 6 GHz altındaki frekanslar için zayıflama ihmal edilebilir kabul edilirken; International Telecommunications Union (ITU) tarafından 5 GHz altındaki frekanslar için zayıflamanın ihmal edilebileceği tavsiye edilmektedir [25].

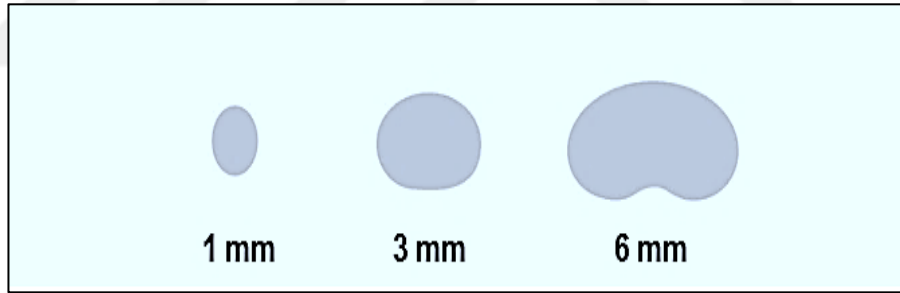
10 GHz ve üzerindeki frekanslara sahip elektromanyetik dalgaları en fazla etkileyen, hidrometeor türü olan yağmur; 20 GHz üzerinde frekans değerlerine sahip elektromanyetik dalgaların maksimum yayılım mesafesini etkileyen en önemli faktörlerden biri haline gelmektedir [1].

Yağmur, atmosferden yer yüzeyine doğru düşen ve çapı çok küçük değerlerden 7 mm civarına kadar ulaşabilen su damlaları olarak ifade edilebilir. Çok küçük boyutlu (< 2 mm) damlalarda gaz haline dönüşme (buharlaşma) veya diğer damlalarla birleşme görülürken, büyük boyutlu (> 5 mm) damlalar maruz kaldıkları aerodinamik kuvvetler nedeniyle parçalara ayrılırlar. Bahse konu olaylara bağlı olarak; yağmur damlalarının bir kısmı yer yüzeyine ulaşmamakta ve yağmur damlalarının boyutlarında dağılım meydana gelmektedir [14].



Şekil 2.7. Yağmur damlalarının atmosferde maruz kaldığı kuvvetler [38]

Aerodinamik kuvvetler damlaların şekillerinin değişmesine de neden olmaktadır. Küçük boyutlu damlaların şekilleri küre şekline yakın iken aerodinamik kuvvetlerden etkilenen büyük boyutlu damlaların şekilleri düzleşmekte ve çapı 4 mm üzerindeki damlalar konkav şekil almaktadır [39].



Şekil 2.8. Boyutlarına göre yağmur damlalarının şekilleri [14]

Yağmur damlasının şeklinde meydana gelen düzleşme nedeniyle, elektromanyetik dalganın polarizasyonuna bağlı olarak yağmurun dalgaya olan etkisi değişiklik göstermektedir. Yatay polarizasyona sahip dalgalar düzleşmiş (büyük boyutlu) yağmur damlalarından daha fazla etkilenmektedir [14].

Yağmurun etkisi; dalganın frekansı ve polarizasyonunun yanı sıra, yağmur damlasının şekline, hacimsel yoğunluğuna (damla sayısı/ m^3) ve yağış şiddetine (mm/sa) bağlı olarak değişmektedir [3].

Yağış şiddeti hariç, yağmur damlasına ilişkin diğer parametrelerin (damlaların hızı, damla boyu dağılımları (*DSD* - Drop Size Distribution), su içeriği, hacimsel yoğunluğu, yağış kaplama yüksekliği gibi) ölçülmesi/belirlenmesi oldukça zordur ve bu işlemler için özel ölçüm aletler (distrometre)/ radarlar gerektirmektedir.

Diğer faktörlere göre ölçümü/belirlenmesi daha kolay olan yağış şiddeti, yağmurun elektromanyetik dalgalara etkisinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

Yağış şiddeti; belli bir zaman aralığında yer yüzeyine ulaşan yağmur miktarının, ölçü aleti (plüviyometre, plüviyograf) veya sensör (elektromanyetik, optik veya akustik) kullanılarak tespit edilmektedir [40, 41].

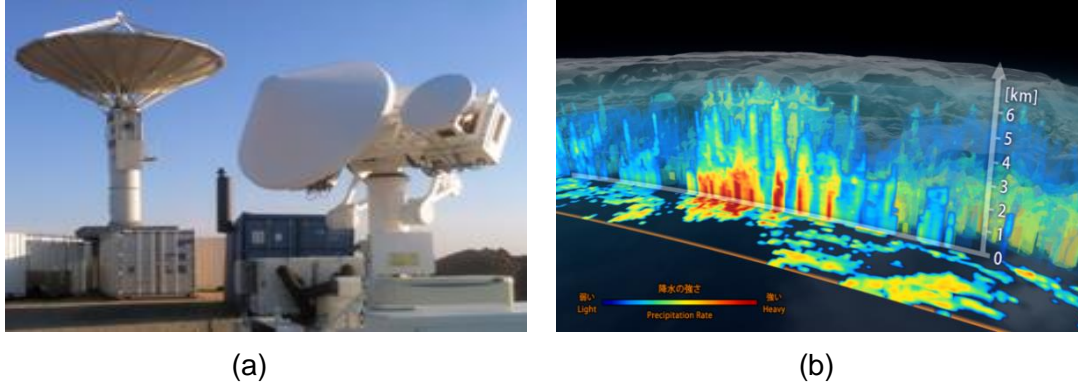


Şekil 2.9. Klasik ve sensörlü yağmur ölçerler [42]

Ölçüm süresi, kullanılan sensör sayısı, tüm yağmur damlaları yer yüzeyine ulaşamaması gibi faktörler dikkate alındığında, yağış şiddetinin hatalı olarak tespit edilme olasılığı mevcuttur [1].

Yağış şiddetinin ifade edilmesi için “saat (sa)” birim zaman olarak kullanılır. Yağış şiddeti, yağışın süresi ve ölçüm süresine bağlı olarak istatistiksel yöntemler kullanılarak elde edilir. Kullanılan yöntemeye bağlı olarak, yağış şiddetinin doğru olarak tespit edileme ihtimali bulunmaktadır [4].

Yağışlara ilişkin daha detaylı, doğru ve anlık hacimsel ölçümler yapmak için radar ve uydular kullanılmaktadır. Radar ve uydular ile yapılan ölçümler sonucunda yağışa ilişkin detaylı bilgiler (yağış şiddeti, damlaların hızı, damla boyu dağılımları, su içeriği, yağış türü, yağış kaplama yüksekliği gibi) özellikle büyük boyutlu alanlar için hassas ve hızlı olarak elde edilebilmektedir. Bahse konu sistemlerin maliyetlerin oldukça yüksek olması kullanım alanlarının kısıtlı kalmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.10. (a) NASA tarafından kullanılan yağış radarları ve (b) radar/uydu sistemleri kullanılarak elde edilen yağış verileri [43, 44]

Yağış şiddeti, birim alana (1 m²) düşen su miktarı “kg” olarak ifade edilir. Suyun özgül ağırlığı (1 gr/cm³) nedeniyle, 1 kg ağırlığındaki su 1 litreye ve birim alanda 1 mm derinliğindeki su miktarına eşittir. Bu nedenle yağış şiddetinin ifadesi edilmesi için “mm/sa” ve “kg/sa” birimleri kullanılır [40].

Yağış şiddetine bağlı olarak, yağmurlar sınıflandırılır.

Tablo 2.1. Şiddetine göre yağmur türleri [45]

Yağmur Türü	Yağış Şiddeti (mm/hr)
Çise	<1
Hafif Yağış	1 - 5
Orta Kuvvette Yağış	6 - 20
Kuvvetli Yağış	21 - 50
Çok Kuvvetli Yağış	51 - 75
Şiddetli Yağış	76 - 100
Aşırı Yağış	>100

Yağmur miktarı, farklı bölgelerdeki farklı meteorolojik şartlara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yağış şiddeti, ülke, şehir, meteorolojik bölge gibi alanlar için analiz edilerek ihtiyaç duyulan zaman aralıklarını (saatlik, günlük, aylık, yıllık gibi) kapsayacak şekilde istatistiksel olarak ifade edilmektedir [4].

Yağış şiddetine göre dünya farklı bölgelere ayıran birçok çalışma mevcuttur. Bu konuda, ITU [46] ve Crane [1] tarafından yapılan çalışmalar sıklıkla kullanılmaktadır. Bahse konu çalışmalar kullanılarak, çalışma bölgesine ilişkin ihtiyaç duyulan bilgiler, elde edilebilmektedir.

Tablo 2.2. Dünyanın farklı bölgeleri için tespit edilen yağış şiddeti olasılıkları [18]

Bölgeler	Yağış Şiddeti Olasılığı (%)			
	Hafif Şiddetli	Orta Şiddetli		Şiddetli
	1 mm/sa	2 mm/sa	4 mm/sa	20 mm/sa
Paris/Fransa	1,6	0,74	0,22	0,001
Vaşington/ ABD	2,5	1,5	0,68	0,07
İngiltere	2,4	1,5	0,65	0,004
Saygon/ Vietnam	2,4	1,7	1,0	0,21
Türkiye	1,5	0,7	0,25	0,01
Tokyo/ Japonya	3,2	2,0	1,2	0,24
Sri Lanka	3,8	2,8	1,9	0,48
New Orleans/ ABD	3,0	1,7	1,2	0,37
Dünya Ortalaması	1,6	1,0	0,47	--

2.3. Yağmurun Radar Sistemleri Üzerindeki Etkisi

Radar sistemleri, optik ve kızılötesi sistemlere göre meteorolojik şartlardan daha az etkilenmektedir. Bununla birlikte radar sistemlerinde kullanılan elektromanyetik dalgaların frekansı arttıkça, meteorolojik şartların özellikle yağmurun etkisi artış göstermekte, süper yüksek frekans bandının (SHF) üst kısmında yer alan frekanslarda ve aşırı yüksek frekans bandındaki (EHF) frekanslarda çalışan radar sistemlerinin performansına çok büyük etkisi bulunmaktadır [6].

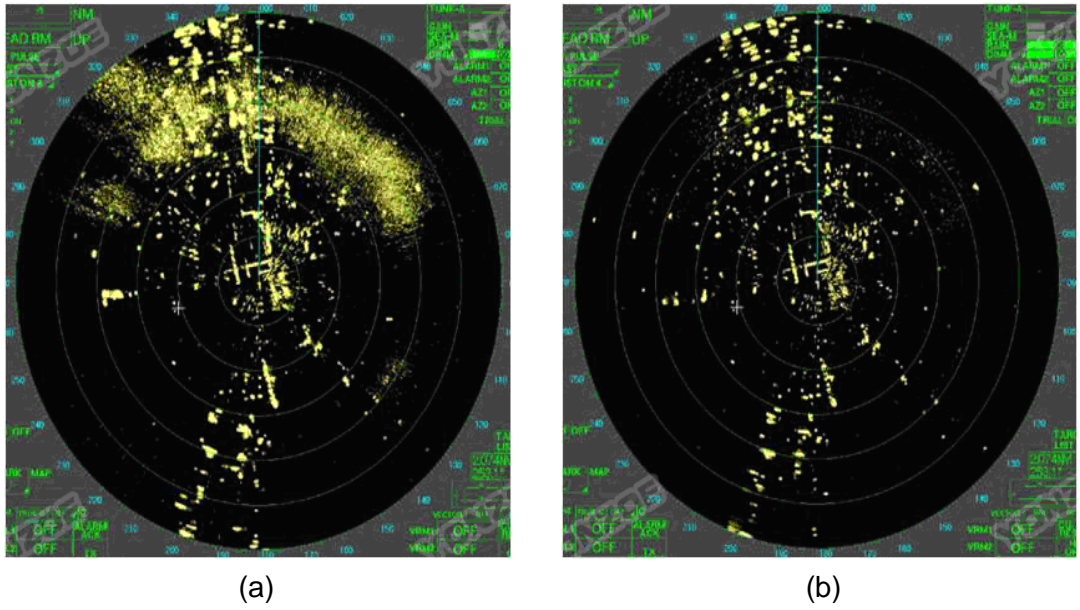
Yağmur, radar verici anteni tarafından yayılan elektromanyetik dalgaların soğrulmasına, farklı yönlere saçılarak dağılmasına ve polarizasyonlarının değişmesine neden olmaktadır. Saçılma ve soğrulma etkisine bağlı olarak, hedeften yansiyarak alıcıya ulaşan sinyallerde zayıflama meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra yağmur, radar skobunda sahte hedef/ gürültü (Hedef Dışı Yansıma-Clutter) oluşmasına neden olmaktadır [6].

Doğal çevre (yer yüzeyi, deniz sathı, meteorolojik olaylar, kuşlar, böcek sürüleri vb.) nedeniyle radar sistemlerinde oluşan hedef dışı yansıma, radar sistemlerinde karışıklığa yol açarak tespit edilmek istenen hedeflerin belirlenememesi sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Hedef dışı yansımalar, yansımayı meydana getiren etmene bağlı olarak isimlendirilmektedir. Yer yüzeyi veya deniz sathı nedeniyle oluşan hedef dışı yansımalar Yüzeysel Hedef Dışı Yansımalar, yağmur gibi meteorolojik olaylar nedeniyle oluşan yansımalar ise Hacimsel Hedef Dışı Yansımalar olarak adlandırılmaktadır [6].

Yağmur nedeniyle meydana gelen büyük boyutlu hedef dışı yansımalar, özellikle aynı ve yakın yatay açıda bulunan gerçek hedeflere ait yansımaları bastırmakta ve gerçek hedeflerin radar skobu üzerinde sergilenmemesine neden olmaktadır [9].

Ortam şartları nedeniyle oluşan sahte hedeflerin radar skobunda sergilenmemesi maksadıyla radar sistemleri tarafından belirlenen sinyal gücü seviyesinin altında alıcıya gelen sinyalleri bastırılmaktadır.



Şekil 2.11. Radar skobunda (a) yağmur nedeniyle oluşan gürültü (b) gürültü bastırma fonksiyonu aktif hale getirildiğinde skop görüntüsü [47]

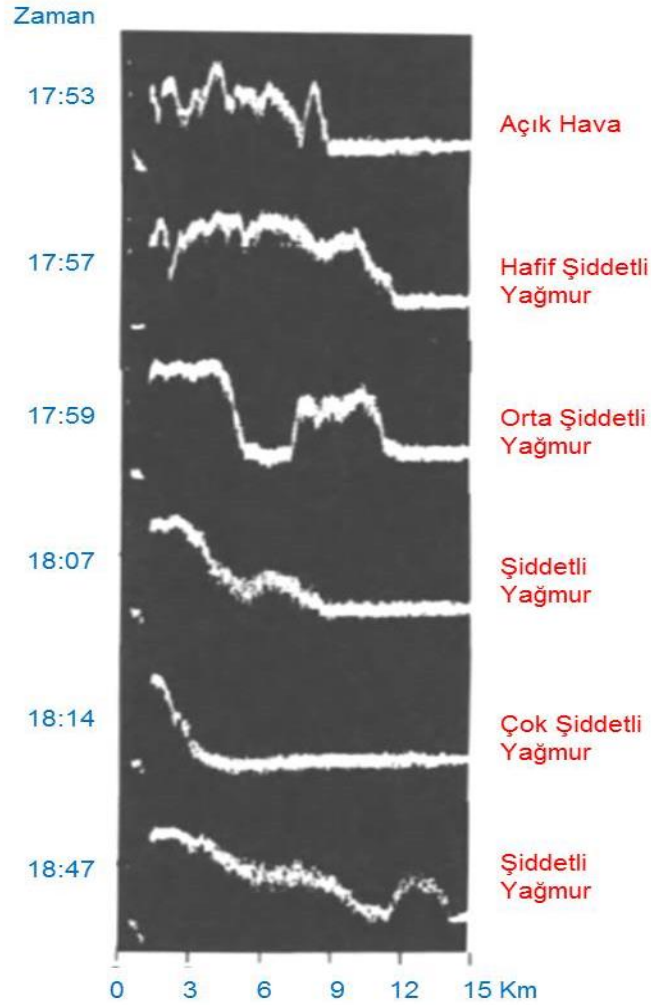
Radarların performansını olumsuz yönde etkileyen meteorolojik olaylar nedeniyle meydana gelen gürültü, meteoroloji radarları tarafından algılanarak, meteorolojik olayların takibi ve hava tahmini için kullanılmaktadır.

Elektromanyetik dalgaların radar anteninden yayılarak hedefe ve sonrasında hedeften geri yansıyarak antene ulaşmasına kadar kat ettiği yol boyunca, yağmur dalgalarının zayıflamasına neden olmaktadır.

Gerçek bir hedefe ait yansımaların, yağmur nedeniyle zayıflaması sonucunda gürültü olarak algılanarak radar skobunda sergilenmemesi yağmur nedeniyle yaşanabilecek diğer bir zafiyettir. Bu zafiyet gürültü bastırma özelliğinin dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır [6].

Genellikle olumsuz hava şartları ve rüzgardan korunmaları için antenler korunak (radom) içinde kullanılırlar. Antenin ve korunağın dizaynına bağlı olarak, ortam şartlarının yanı sıra, antenin veya varsa korunağın üzerinde biriken yağmur ve ıslak kar nedeniyle de kayıp meydana gelmektedir [1].

Bu çalışma kapsamında, yağmur nedeniyle elektromanyetik dalgalarda meydana gelen zayıflama ele alınmış, radar sistemlerinde oluşan sahte hedef/gürültü ele alınmamıştır.



Şekil 2.12. Zamana bağlı olarak yağmurun etkisine ilişkin K_u bant radar A skobu görüntüsü [47]

2.4. Yağmurun Elektromanyetik Dalgalar Üzerindeki Etkilerinin Tespitine Yönelik Yöntemler

Yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflamanın hesaplanmasına yönelik tahmin modelleri, sistem gereksinimlerini ve maliyeti dengelemek için sistem tasarımcılarına yol gösterici olarak geliştirilmiştir [1].

Yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflama miktarının belirlenmesine yönelik metotlar;

- Yayılım ölçümlerinden elde edilen istatistiklere dayanarak yayılım yolundaki kayıpların hesaplanmasını sağlayan Deneysel (Ampirik) modeller,
 - Yayılma ile ilgili fiziksel kural ve varsayımlar ile yayılım yolunu etkileyen temel süreçlere yönelik istatistiklere dayanarak yayılım yolundaki kayıpların hesaplanmasını sağlayan Fiziksel (Teorik/Analitik/Kesin) modeller,
- başlıkları altında iki grupta toplanabilir [4].

Deneysel modeller için, yağış şiddeti ve buna bağlı ölçülen zayıflama istatistikleri kullanılarak model içinde geçen parametreler belirlenmektedir. Fiziksel modeller zayıflama sürecine ait fiziksel olayları tam olarak ortaya koymayı amaçlar. Fiziksel modellere ait parametrelerin belirlenmesi için meteorolojik şartlara bağlı olarak ölçülen zayıflama istatistikleri kullanılmamaktadır. Meteorolojik istatistikler, atmosfer içinde radyo dalga yayılımına ilişkin fiziksel olayları belirlemek için kullanılmakta ve elde edilen sonuçlara uygulanan sayısal analiz yöntemleri ile modele ait parametreler türetilmektedir [26].

Deneysel modeller bağlanım (regresyon) metoduna, fiziksel modeller ise fizik kurallarına bağlı olarak ortaya konmaktadır. Bu nedenle fiziksel modellerin doğruluğu, ortam ve sınır şartlarının gerçek şartlara uygun olarak tanımlanmasına bağlıdır. Ortam şartlarının tam olarak belirlenebilmesi için, yağmurun yapısına ilişkin detaylı bilgilerin (yağmur damlalarının boyutları, hızı, şekli, sıcaklığı, hacimsel yoğunluk gibi) elde edilebilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Ancak bahse konu bilgilerin, günümüz imkanlarıyla elde edilmesindeki zorluk/imkansızlıklar nedeniyle fiziksel modellerin tam olarak ortaya konulması oldukça zordur. Meydana gelen zayıflamanın, fiziksel modeller kullanılarak hesaplanmasındaki güçlükler ve maliyet nedeniyle deneysel hesaplama modelleri daha sık kullanılmakta ve bahse konu deneysel yöntemler ile oldukça başarılı sonuçlar elde edilmektedir [25, 26].

Yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflama miktarının gerçek şartlara uygun olarak belirlenmesine yönelik modelleme prosedürlerinin geliştirilebilmesi için her iki modelleme yöntemi de katkı sağlamaktadır [1]. Modellerin geliştirilmesi çalışmaları kapsamında ilk olarak istatistiksel raporlar ve bu raporlara göre deneysel modeller ile oluşturulan tavsiyeler yayınlanmıştır. Birçok yayılım yoluna uyarlanabileceği değerlendirilen deneysel modellere ilişkin sınırlar ve şartlar fiziksel modeller kullanılarak oluşturulmuştur [49].

Ortaya konan sınır ve şartlar dikkate alınarak, farklı çalışmalarda istatistiklerin ve bu değerlere göre oluşturulan deneysel modellerin geçerli olduğu bölgeler belirlenerek dünya çeşitli bölgelere ayrılmıştır. Deneysel modeller belli bölgeler için geçerli iken, fiziksel modeller ilgili bölgeye ait meteorolojik değerlerin uygulanması şartı ile tüm bölgelerde kullanılabilir [1].

Bazı modellerde polarizasyon ve yağmur damlasının şekli de dikkate alınmakla birlikte; modellerde genellikle; yağmurun elektromanyetik dalgalara etkisi dalganın frekansı ve yağış şiddetine bağlı olarak ortaya konmaktadır. Zayıflamanın hesaplanmasında frekans, yağış şiddeti ve bu değerlere bağlı katsayılar kullanılmaktadır [49].

Deneysel modellerde, sadeliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle yağmurun özgül zayıflatma miktarını (A), yağış hızı (R) ile ilişkilendiren;

$$A=aR^b \quad (2.1)$$

şeklindeki genel eşitlik zayıflamanın hesaplanması için sıklıkla kullanılmaktadır.

Farklı yağış şiddetleri için zayıflatma etkisinin hesaplanmasına yönelik eşitlikteki “a” ve “b” ifadeleri; elektromanyetik dalganın frekansına, polarizasyonuna ve ortam sıcaklığına bağlı olarak logaritmik bağlanım yöntemiyle hesaplanmış sabit değerlerdir. Sabitlerin değerleri; deneysel sonuçlar, farklı damla boyu dağılım miktarı modelleri ve Mie saçılması kullanılarak, logaritmik bağlanım yöntemi ile elde edilmektedir [49]. Deneysel olarak elde edilmiş olan bahse konu sabitlerin değerleri, modeller arasında farklılık göstermektedir.

Farklılıkların temelinde değerlerin elde edilmesinde kullanılan deneysel yöntemler (ölçü aleti sayısı, ölçüm yapılan süre vb.) yer almaktadır. [49].

Gerçek yağmur damlasının mükemmel küre şekline sahip olmaması nedeniyle, dağılım modelleri kullanılarak elde edilen zayıflama değeri ile Mie saçılması uygulanarak elde edilen zayıflama değeri arasında; frekans, yağış şiddeti ve yağmur damlalarının simetri eksenine ortalama geliş açısına bağlı olarak %13 değerine kadar farklılık oluşabilmektedir [49].

Bu çalışma kapsamında; yaygın olarak kullanılan deneysel modellerden International Telecommunications Union (ITU-R P.838-3) [50], Mahafza [17] ve Olsen/Rogers/Hodge [49] tarafından belirlenen modeller kullanılarak, farklı yağmur şiddetlerinin (1, 5, 10, 20, 50, ve 100 mm/sa), K_u bant aralığındaki (12-18 GHz) frekanslar için zayıflama değerleri MATLAB programı kullanılarak incelenmiş ve CST programı ile elde edilen zayıflama değerleri karşılaştırılmıştır.

2.4.1. ITU-R P.838-3 modeli

ITU tarafından tavsiye edilen model, yağış şiddeti bilinen yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflama miktarının hesaplanmasını sağlamaktadır.

Yağmur nedeniyle meydana gelen tek yönlü özgül zayıflama miktarı (γ_R) (dB/km), yağış şiddetine (R) (mm/sa) bağlı olarak güç yasası kullanımını esas alan;

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (2.2)$$

eşitliği ile elde edilir [50].

Eşitlik içinde yer alan “k” ve “ α ” elektromanyetik dalganın frekansı (f) (GHz) ve polarizasyonuna bağlı sabitlerdir. Frekansı 1-1000 GHz arasındaki elektromanyetik dalgalar için sabitler;

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (2.3)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (2.4)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Yatay (k_H , α_H) ve dikey (k_V , α_V) polarizasyonlu elektromanyetik dalgalar için Eşitlik (2.3) ve Eşitlik (2.4)'te bulunan sabit değerleri yöntem içerisinde ayrı ayrı belirtilmiştir.

Tablo 2.3. Yatay polarizasyonlu dalgaların k_H değeri için sabitler

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Tablo 2.4. Dikey polarizasyonlu dalgaların k_V değeri için sabitler

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Tablo 2.5. Yatay polarizasyonlu dalgaların α_H değeri için sabitler

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		

Tablo 2.6. Dikey polarizasyonlu dalgaların α_V değeri için sabitler

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		

Lineer ve dairesel polarizasyonlu dalgalar için Eşitlik (2.3) ve Eşitlik (2.4) kullanılarak “k” ve “α” sabitleri;

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2 \theta \cos 2 \tau]/2 \quad (2.5)$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2 \theta \cos 2 \tau]/2k \quad (2.6)$$

eşitlikleri ile elde edilir.

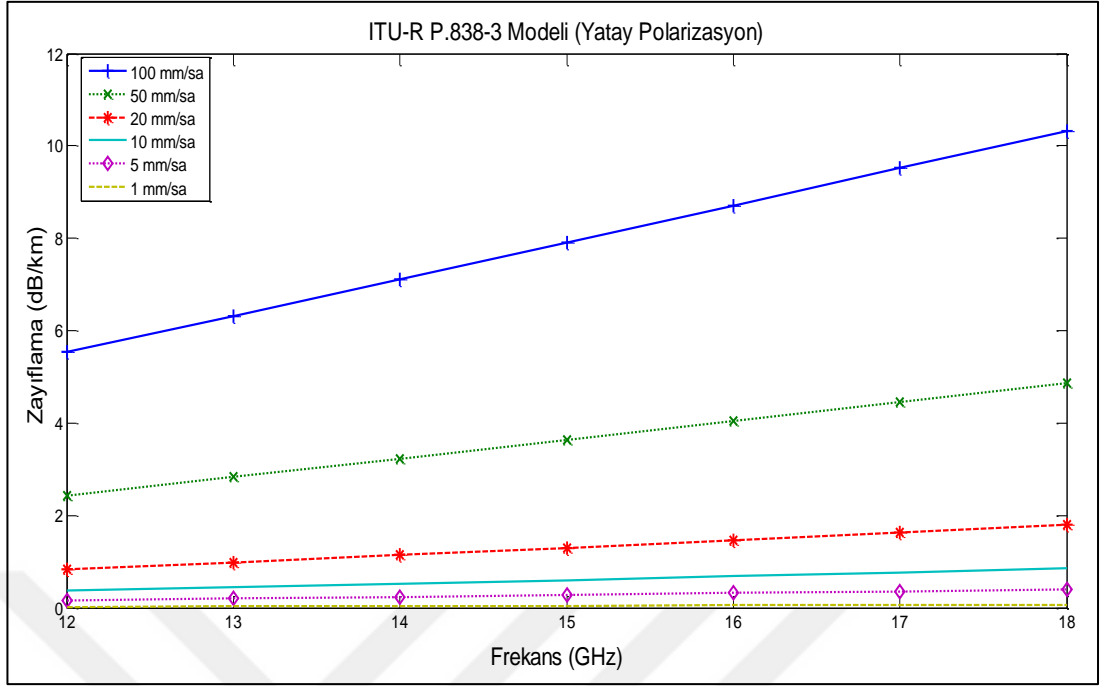
Eşitliklerde yer alan θ yükselme açısını, τ ise ufuk çizgisine göre polarizasyon eğiklik açısını (dairesel polarizasyon için $\tau = 45^\circ$) ifade etmektedir.

Modelde, yatay ve dikey polarizasyonlar için ayrı ayrı olmak üzere, frekansı 1-1000 GHz aralığındaki elektromanyetik dalgaların “ k_H ”, “ α_H ”, “ k_V ” ve “ α_V ” değerleri grafik ve tablo şeklinde gösterilmiş olup K_u bant frekanslar için Tablo 3.5.’teki sabitler belirtilmiştir.

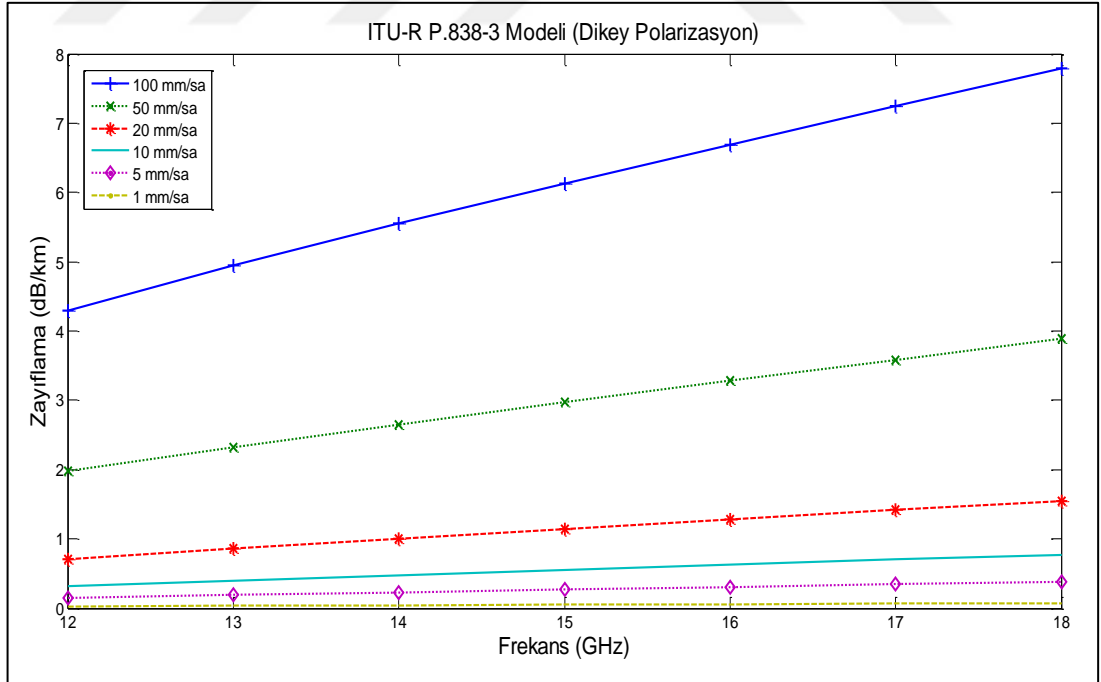
Tablo 2.7. K_u bant yatay ve dikey polazirasyonlu dalgalar için frekansa bağlı sabitler

Frekans (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
12	0,02386	1,1825	0,02455	1,1216
13	0,03041	1,1586	0,03266	1,0901
14	0,03738	1,1396	0,04126	1,0646
15	0,04481	1,1233	0,05008	1,0440
16	0,05282	1,1086	0,05899	1,0273
17	0,06146	1,0949	0,06797	1,0137
18	0,07078	1,0818	0,07708	1,0025

Modelde belirtilen eşitlik ve parametreler MATLAB programında kullanılarak, K_u bant yatay ve dikey polazirasyonlu elektromanyetik dalgalar için, farklı yağış şiddetine (1, 5, 10, 20, 50 ve 100 mm/sa) sahip yağmurların tek yönlü zayıflatma grafikleri Şekil 2.13 ve Şekil 2.14’te gösterilmiştir.



Şekil 2.13. ITU tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) yatay polarizasyonlu K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarları



Şekil 2.14. ITU tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) dikey polarizasyonlu K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarları

Yatay polarizasyonlu K_u bant elektromanyetik dalgalar için zayıflama miktarını gösteren grafiğin elde edildiği program Ek-A'da; dikey polarizasyonlu elektromanyetik dalgalar için geçerli program ise Ek-B'de yer almaktadır.

2.4.2. Mahafza modeli

Mahafza tarafından; yağmur nedeniyle radar sinyallerinde meydana gelen zayıflamanın, sinyalin frekansı veya dalga boyu ile yağış şiddetine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Tek yönlü özgül zayıflama miktarı (A_R) (dB/km), yağış şiddetine (R) (mm/sa) bağlı olarak güç yasası kullanımını esas alan;

$$A_R = K_A f^\alpha R \quad (2.7)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir [17].

Eşitlik içinde frekans (f) (GHz) ve yağış şiddeti (R) (mm/sa) cinsinden kullanılmış, " K_A " ve " α " sabitlerinin değerleri ile ilgili olarak, literatürdeki açık kaynakların neredeyse tamamında farklılıklar bulunduğu belirtilmiştir.

Farklı kaynaklarda değeri 2,39 ile 3,84 arasında değişen α sabiti için 2,25 ve değeri $1,21 \times 10^{-5}$ ile $8,33 \times 10^{-6}$ arasında değişen K_A sabiti için 0,0002 değerleri yazar tarafından kabul edilmiştir.

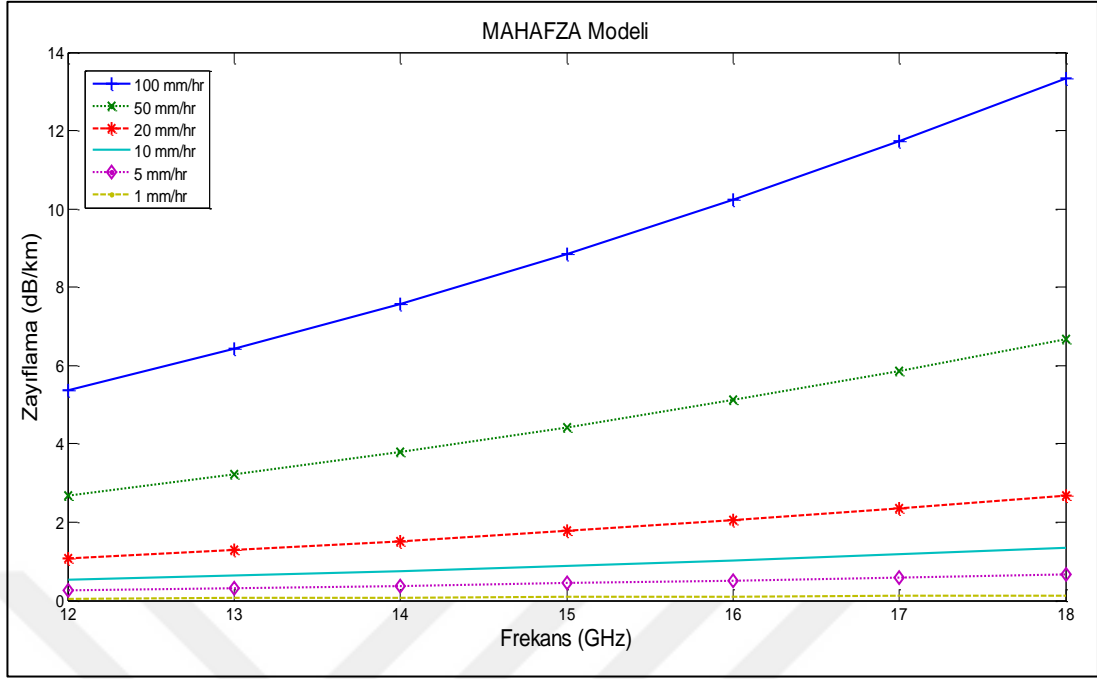
Kabul edilen değerler eşitlikte yerine konulduğunda eşitlik;

$$A_R = 0,0002 f^{2,25} R \quad (2.8)$$

halini alır.

Modelde belirtilen eşitlik ve parametreler MATLAB programında kullanılarak, K_u bant elektromanyetik dalgalar için, farklı yağış şiddetine (1, 5, 10, 20, 50 ve 100 mm/sa) sahip yağmurların zayıflatma grafikleri Şekil 2.15'te yer almaktadır.

K_u bant elektromanyetik dalgalar için zayıflama miktarını gösteren grafiğin elde edildiği program Ek-C'de yer almaktadır.



Şekil 2.15. Mahafza tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflama miktarları

2.4.3. Olsen/Rogers/Hodge modeli

Olsen/Rogers/Hodge tarafından yağmur nedeniyle meydana gelen zayıflama (A);

$$A = \alpha R^b \quad (2.9)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir [49].

Eşitlik içinde yağış şiddeti (R) (mm/sa) cinsinden kullanılmıştır. Bu eşitlikte yer alan a ve b, elektromanyetik dalganın frekansı ile yağmurun sıcaklığına bağlı sabit katsayı değerleridir. Modelde;

$$a = G_a f^{E_a} \quad (2.10)$$

$$b = G_b f^{E_b} \quad (2.11)$$

ifadeleri ile tanımlanan sabitlerin belirlenebilmesi için 1-1000 GHz arasındaki frekanslar dört gruba bölünmüştür.

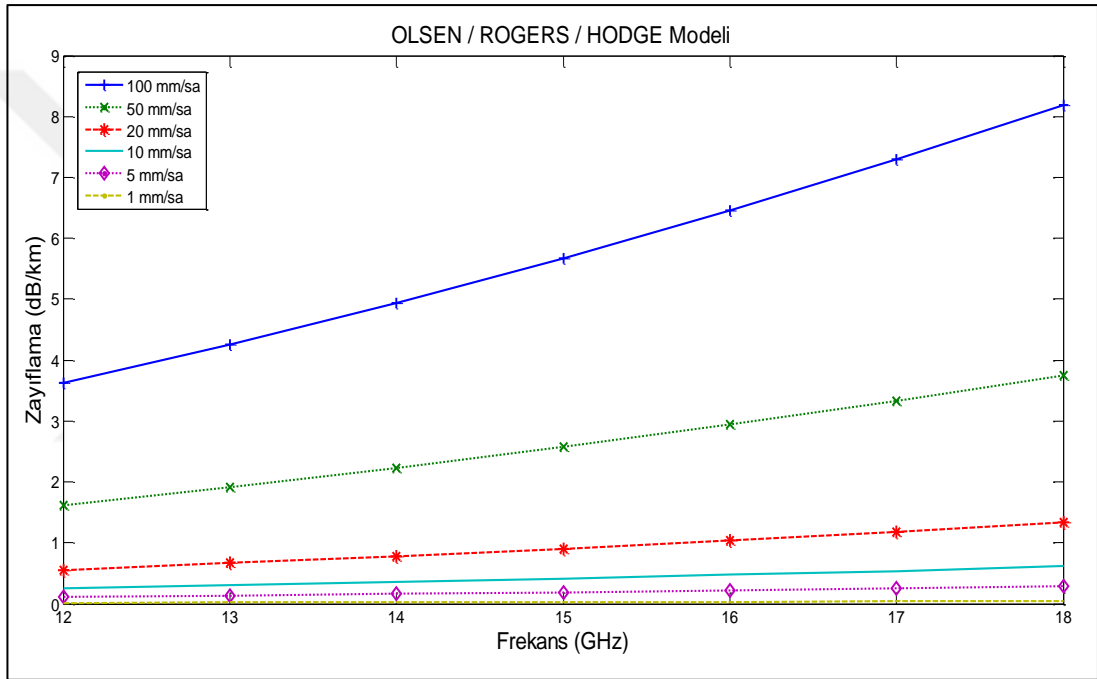
K_u bant elektromanyetik dalgalar için sabitler;

$$G_a = 4,21 \times 10^{-5} \quad , \quad E_a = 2,42 \quad 2,9 \leq f < 54 \text{ GHz}$$

$$G_b = 1,41 \quad , \quad E_b = -0,0779 \quad 8,5 \leq f < 25 \text{ GHz}$$

değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Modelde belirtilen eşitlik ve parametreler MATLAB programında kullanılarak, K_u bant elektromanyetik dalgalar için, farklı yağış şiddetine (1, 5, 10, 20, 50 ve 100 mm/sa) sahip yağmurların zayıflatma grafikleri Şekil 2.16'da yer almaktadır.



Şekil 2.16. Olsen / Rogers / Hodge tarafından tavsiye edilen model ile hesaplanan farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarları

K_u bant elektromanyetik dalgalar için zayıflama miktarını gösteren grafiğin elde edildiği program Ek-Ç'de yer almaktadır.

3. YAĞMUR ZAYIFLATMASININ CST PROGRAMI İLE MODELLENMESİ

Yağmurun elektromanyetik dalgalara yönelik etkisi, deneysel ve fiziksel modellerin yanı sıra sayısal bilgisayar simülasyonları kullanılarak da analiz edilebilir.

Literatürde sayıca çok az olan bilgisayar simülasyonlarının kullanıldığı modeller ile yağmurun elektromanyetik dalgalar üzerindeki tüm etkilerini belirlemek mümkün değildir. Bu modeller ile birçok deneysel modelde olduğu gibi yağmurun zayıflatma etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

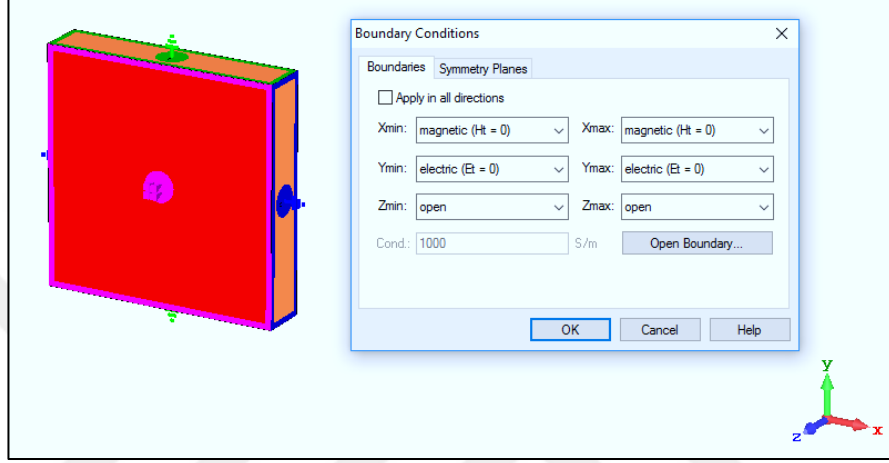
Sayısal yöntemlerle, yağmura ilişkin tüm parametrelere (yağış şiddeti, yağmur tanesinin şekli, hızı, açısı) bağlı etkileri incelemek mümkündür. Ancak bu etkileri içeren yeni modellerin tanımlanması gerekmektedir, literatürde bu etkileri içeren sayısal modellerle ilgili çalışmalara rastlanmamaktadır.

Bu tip simülasyonların büyük bir alanı kapsayacak şekilde çalıştırılabilmesi maksadıyla oldukça maliyetli donanım altyapısına gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca simülasyonun tamamlanmasının, uzun bir süre alması nedeniyle zaman zaman sonuç alınamamakta veya hatalı sonuçlar elde edilebilmektedir. Donanım ihtiyacını düşürmek, simülasyondan doğru sonucu elde edebilmek ve gerekirse simülasyonu birden fazla kez çalıştırarak sonuçları kontrol edebilmek maksadıyla, çalışma alanı daha küçük alt bölgelere ayrılmaktadır. Alt bölge sınırları içinde simülasyon çalıştırılarak elde edilen sonuçlar ile çalışma alanının tamamına yönelik zayıflama karakteristikleri ortaya konabilmektedir.

Sayısal yöntemlere ait simülasyonların hazırlanması için propagasyona yönelik farklı programlar ve yöntemler kullanılmaktadır. Literatürde FDTD yöntemi kullanılarak hazırlanmış bir veya birden fazla yağmur damlasının elektromanyetik dalgalara etkisine ilişkin kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda propagasyon bölgesi, içerisine yağmur damlaları gelişigüzel dağıtılmış rastgele bir ortam olarak kabul edilmekte ve FDTD ile analiz yapılmaktadır. Şekil 3.1'de bu tip bir analizde kullanılan model verilmiştir. Sınırlandırılmış bir bölgede yağmur taneleri rastgele dağıtılmış ve bölgeye düzlem dalga gönderilerek, yağmur zayıflaması incelenmiştir.

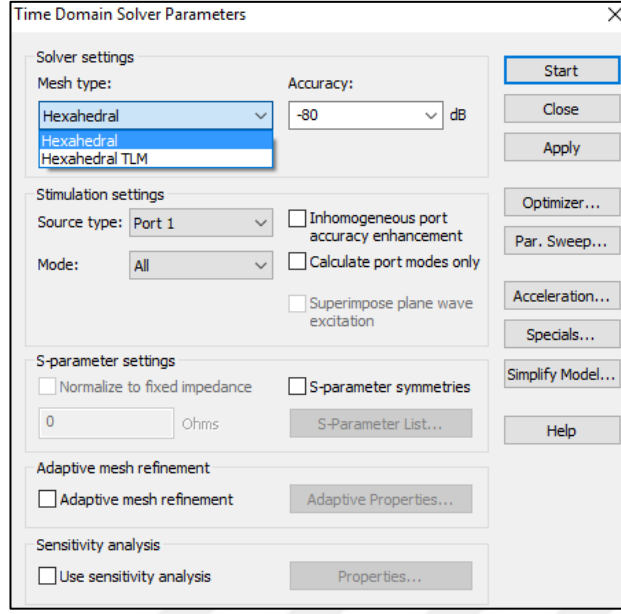
Şekil 3.2’de gösterildiği gibi, yağmur ortamını modelleyen, z’de sınırlı, x- ve y’de sınırsız yapı, düzlem dalga ile aydınlatılmıştır. Gelen ve iletilen dalgalara ait dataalar kullanılarak frekansa bağlı zayıflatma karakteristikleri elde edilmiştir.

Yapının x- ve y- ekseninde sonsuz uzunlukta olması, düzlem dalganın polarizasyonu dikkate alınarak, x- ve y- sınırında uygun olan teğet alan bileşenleri sıfır alınarak sağlanmıştır (Bkz. Şekil 3.3).

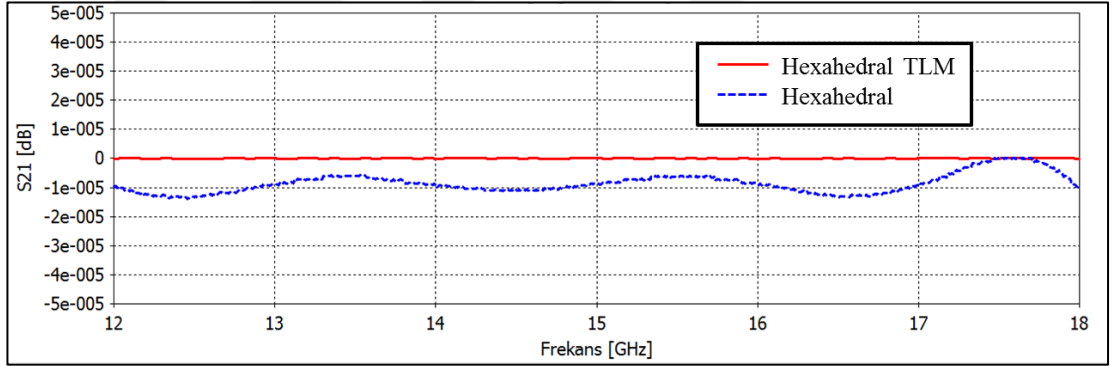


Şekil 3.3. Sınır koşullarının tanımlanması

Elektromanyetikte sayısal yöntemler kullanarak yapılan problem çözümlerinde, dikkat edilmesi gereken başlıca unsur, sınır koşullarının doğru tanımlanmasıdır. Bilgisayarda tanımlanan yapay sınırlardan gelecek olan yansımalar, elde ettiğimiz sonuçların doğruluğunu etkileyecektir. Özellikle radar kesit alanı hesabı ya da bu çalışmada olduğu gibi yağmur zayıflatması gibi, çok küçük genlikli sinyallerle çalışılacağı zaman, gelen yansımaların bu sinyallerin genlikleri mertebesinde olması, sonucu doğrudan etkileyecektir. CST programı ile yapılacak olan analizlerde de bu yansımalara dikkat edilmelidir. Yağmur ortamı incelenmeden önce, portlar arasında sadece hava varken iletim katsayısına bakmak, sınırlardan gelecek yansımaların incelenmesinde yeterli olacaktır. İletim katsayısının idealde 0dB olması beklenir. Şekil 3.4’de CST’de kullanılan farklı mesh modeliyle hava ortamı için elde edilen iletim katsayısı grafikleri verilmiştir. Görüldüğü gibi mesh tipi hexahedral seçildiği zaman sınır yansımalarından dolayı iletim katsayısı 0 dB’ye oturmamaktadır. Mertebe olarak seviye düşük olarak nitelendirilebilir ancak yağmur zayıflatması gibi genlik seviyelerindeki oynamanın da çok küçük olduğu ortamlarda bu seviye farkı gözardı edilemez. Bu sebeple mesh tipi hexahedral değil, 0 dB’ye daha yakın sonuç elde edilen “Hexahedral TLM” seçilmiştir.



Şekil 3.4. CST programında mesh tipleri



Şekil 3.5. CST programında mesh tipinin iletim katsayısına etkisi

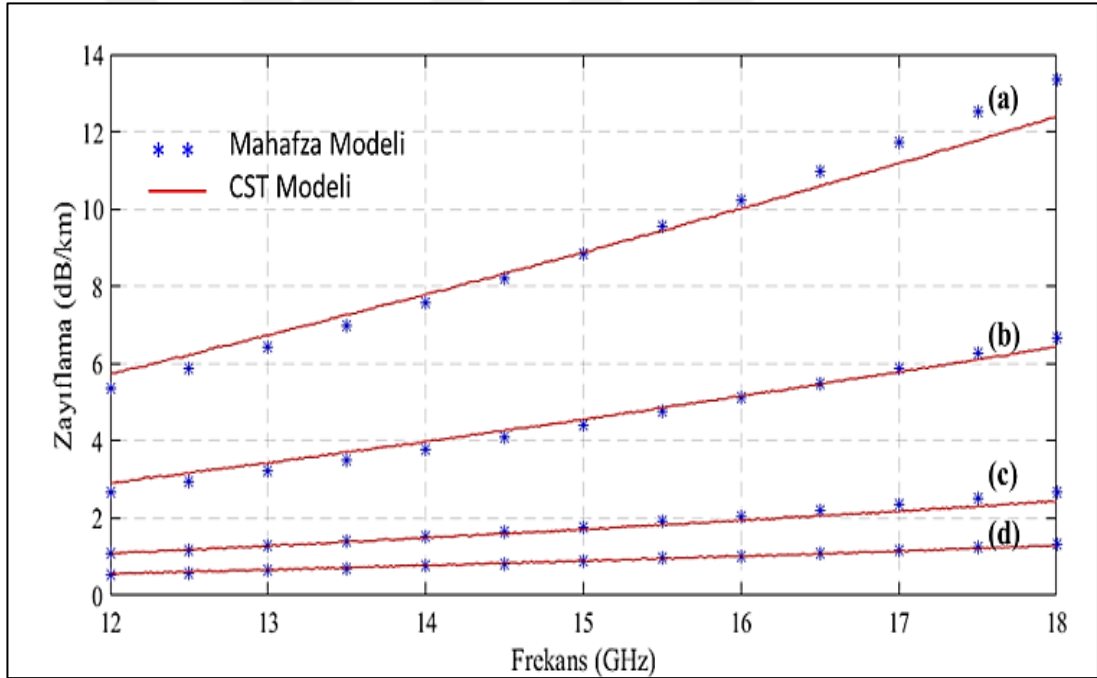
Yağmur ortamı modelinin farklı yağış şiddetlerini temsil edebilmesi için, ortamların elektriksel özellikleri değiştirilmiştir. Tablo 3.1.'de, yağış şiddetlerini temsil eden ortam elektriksel parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.1.'de verilen elektriksel parametreleri içeren malzemeler CST programında 1 cm kalınlıklı olarak kullanılmış, zayıflatma hesabında kilometreye çevrilmiştir. Elde edilen karakteristikler ve referans olarak seçilen MAHAFZA modeli ile elde edilen farklı yağış şiddetlerine ait zayıflama karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda, benzer zayıflatma etkisini gösteren malzeme özellikleri belirlenmiştir.

Tablo 3.1. MAHAFZA modelindeki zayıflatma karakteristiklerini veren malzemelerin özellikleri

	Yağış Şiddeti (mm/sa)	Bağlı Dielektrik Katsayısı (ϵ_r)	Kayıp Tanjantı ($\tan \delta$)	Malzeme Kalınlığı (cm)
(a)	100	1,5	0,0285	1
(b)	50	1,5	0,0238	1
(c)	20	1,5	0,0184	1
(d)	10	1,5	0,0155	1

Karşılaştırma sonucuna ilişkin Şekil 3.5'de görüldüğü üzere CST ile analizleri yapılan malzemeler ile MAHAFZA modeli kullanılarak elde edilen zayıflama karakteristikleri elde edilebilmiştir.



Şekil 3.6. CST ile analizleri yapılan malzemeler ile MAHAFZA modeli kullanılarak elde edilen zayıflama karakteristikleri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yağmurun atmosfer içinde yayılan K_u bant radar sinyalleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yayılım için herhangi bir ortam ihtiyacı bulunmayan elektromanyetik dalgalara, atmosfer içindeki hidrometeorların etkisi araştırılmıştır. Hidrometeor türlerinden biri olan yağmurun elektromanyetik dalgaların yayılımına büyük etkisi olduğu ve 10 GHz üzerindeki frekanslar için etkisinin ihmal edilemez seviyelere ulaştığı anlaşılmıştır. Yapılan literatür incelemesinde, yağmurun etkisinin hesaplanmasına yönelik deneysel (ampirik) yöntemlere ilişkin birçok çalışma bulunduğu ancak sayısal yöntemle ilişkin kısıtlı sayıda çalışma olduğu görülmüştür.

Deneysel yöntemler arasından seçilen modeller için MATLAB kodları oluşturularak farklı yağış şiddetine sahip yağmurların K_u bant elektromanyetik dalgalara etkisi frekansa bağlı olarak incelenmiştir. Elde edilen zayıflatma karakteristiklerini verecek ortamları tanımlamak üzere CST programı kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar, CST programında tanımlanan ortamlar ile istenen yağmur etkisinin oluşturulabildiğini göstermektedir.

Deneysel modeller ile elektromanyetik dalganın, belli bir yağış şiddetindeki yağmurlu ortamda yayılma mesafesine bağlı olarak zayıflama miktarı tespit edilebilmektedir. CST programı ile ortam özellikleri tanımlanarak, elektromanyetik dalgaların zayıflama miktarının tespit edilmesinin yanı sıra yağmurlu ortam içinde Radar Kesit Alanı (RKA) hesaplaması yapılabileceği değerlendirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Crane R. K., *Electromagnetic Wave Propagation Through Rain*, 1st ed., John Wiley&Sons, New Jersey, 1996.
- [2] Haslett C., *Essentials of Radio Wave Propagation*, 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- [3] Seybold J. S., *Introduction to RF Propagation*, 1st ed., John Wiley&Sons, New Jersey, 2005.
- [4] Tamosiunaite M., Zilinskas M., Tamosiuniene M., Tamosiunas S., Atmospheric Attenuation due to Humidity, Editor: Zhurbenko V., *Electromagnetic Waves*, 1st ed., InTech, Rijeka, 157-172, 2011.
- [5] Barton D. K., Leonov S. A., *Radar Technology Encyclopedia*, 1st ed., Artech House, Boston, 1998.
- [6] Skolnik M. I., *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
- [7] [http://www.radartutorial.eu/01.basics/Physical fundamentals of the radar principle.en.html](http://www.radartutorial.eu/01.basics/Physical_fundamentals_of_the_radar_principle.en.html) (Ziyaret tarihi: 05 Haziran 2016).
- [8] Meikle H., *Modern Radar Systems*, 2nd ed., Artech House, Boston, 2008.
- [9] Skolnik M. I., *Radar Handbook*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2008.
- [10] Sloan F. E., Cote G. J., *Navy Electricity and Electronics Training Series Module 18-Radar Principles*, 1st ed., U.S. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, Florida, 1998.
- [11] Neri F., *Introduction to Electronic Defense Systems*, 2nd ed., Artech House, Boston, 2006.
- [12] <http://www.nuctech.com/en/SitePages/ThDetailPage.aspx?nk=PAS&k=DGBHFA> (Ziyaret tarihi: 29 Haziran 2016).
- [13] http://www.portstrategy.com/news101/port-operations/safety-and-security/revealing_all (Ziyaret tarihi: 29 Haziran 2016).
- [14] Willis M. J., Propagation in Rain and Clouds, Editor: Barclay L., *Propagation of Radiowaves*, 3rd ed., The Institution of Engineering and Technology, London, 161-186, 2013.
- [15] <http://frigg.physastro.mnsu.edu/~eskridge/astr115/waterhole.jpg> (Ziyaret tarihi: 24 Mart 2016).
- [16] Collin R. E., *Antennas and Radiowave Propagation*, 1st ed., McGraw-Hill, New York, 1985.

- [17] Mahafza B. R., *Radar Systems Analysis and Design Using Matlab*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, 2013.
- [18] Nathanson F. E., Reilly J. P., Cohen M. N., *Radar Design Principles*, 2nd ed., SciTech Publishing, New Jersey, 1999.
- [19] [http://www.radartutorial.eu/07.waves/Waves and Frequency Ranges.en.html](http://www.radartutorial.eu/07.waves/Waves%20and%20Frequency%20Ranges.en.html) (Ziyaret tarihi: 22 Haziran 2016). [10]
- [20] <http://www.ausairpower.net/APA-Rus-ASM.html> (Ziyaret tarihi: 1 Mart 2016).
- [21] Eaves J. L., Reedy E. K., *Principles of Modern Radar*, 1st ed., Chapman & Hall, New York, 1987. [11]
- [22] Tzannes N. S., *Communication and Radar Systems*, 1st ed., iUniverse, Nebraska, 2000. [12]
- [23] Smiley R. E., *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*, Naval Air Warfare Center, California, 4th ed., 2013.
- [24] <http://tikalon.com/blog/blog.php?article=2013/ALMA> (Ziyaret tarihi: 25 Mart 2016).
- [25] Freeman R. L., *Radio System Design for Telecommunications*, 3rd ed., John Wiley&Sons, New Jersey, 2007.
- [26] Crane R. K., *Propagation Handbook for Wireless Communication System Design*, 1st ed., CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [27] Chen A., *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*, Naval Air Warfare Center, California, 2nd ed., 1999.
- [28] Pozar D. M., *Microwave Engineering*, 4th ed., John Wiley&Sons, New Jersey, 2012.
- [29] Howard R. S., Vaughan H. D., *Navy Electricity and Electronics Training Series Module 10—Introduction to Wave Propagation, Transmission Lines and Antennas*, U.S. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, Florida, 1998.
- [30] Ishimaru A., *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation and Scattering*, 1st ed., Prentice Hall, New Jersey, 1991.
- [31] ITU-R P.840-6, Attenuation Due to Clouds and Fog, *International Telecommunication Union (ITU)*, Geneva, 2013.
- [32] <http://www.spaceflightnow.com/shuttle/sts115/060813kubolts/> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).
- [33] <http://www.ausairpower.net/technology.html> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).
- [34] <http://defence.pk/threads/astra-missile-test-fired-on-2nd-consecutive-day-agat-seeker-tested.225807/page-2> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).

- [35] <http://www.radartutorial.eu/19.kartei/karte202.en.html> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).
- [36] <http://www.raytheon.com/capabilities/products/phalanx/> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).
- [37] Kupfer K., *Electromagnetic Aquametry, Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances*, 1st ed., Springer, Berlin, 2005,
- [38] https://en.wikipedia.org/wiki/Drop_%28liquid%29#cite_ref-1 (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).
- [39] Pruppacher, H. R., Pitter, R. L., A Semiempirical Determination of the Shape of Cloud and Rain Drops, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1971, **28**, 86–94.
- [40] <http://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojikaletler.aspx?a=e> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016)
- [41] <http://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojikaletler.aspx?a=j> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016)
- [42] <http://www.labor.com.tr/TFA-473003-YAGMUR-SIDDETI-OLCER-SENSORLU,PR-10221.html> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).
- [43] <http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/releases/2013/13-031.html> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).
- [44] <http://www.nasa.gov/press/2014/march/first-images-available-from-nasa-jaxa-global-rain-and-snowfall-satellite/#.VsJGe9BWQ27> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).
- [45] <http://www.mgm.gov.tr/site/yardim1.aspx?=#HadSid> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016)
- [46] ITU-R P.837-6, Characteristics of Precipitation for Propagation Modelling, *International Telecommunication Union (ITU)*, Geneva, 2012.
- [47] <http://www.yonzoe.com/en/Index/pdetail/id/1.html> (Ziyaret tarihi: 21 Haziran 2016).
- [48] Hodge D. B., The Effects of Precipitation on Radar Target Identification and Targeting, Editor: Jeske H. E. G, *Atmospheric Effects on Radar Target Identification and Imaging*, 1st ed., D.Reidel Publ., Dordrecht, 379-398, 1976.
- [49] Olsen R., Rogers D., Hodge D., The aRb Relation in the Calculation of Rain Attenuation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, **26**(2), 318- 329.
- [50] ITU-R P.838-3, Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods, *International Telecommunication Union (ITU)*, Geneva, 2005.
- [51] Miyazaki Y., Takahashi K., Goto N., FDTD Parallel Computing of Microwave Scattering and Attenuation Characteristics Due to Randomly Distributed Rainfalls, *PIERS Proceedings*, 2008, **4**(2), 245-250.



Ek-A

Tablo A1. ITU 838-6 modeli ile farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) yatay polarizasyonlu K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarlarının belirlenmesine yönelik programcık kodu

```
clear all;close all;clc

% Ku Bant frekans aralığı (12-18 GHz)

f=[12:1:18];

% Yatay polarizasyon için ITU-R P-838'de belirtilen katsayılar

kh=[0.02386;0.03041;0.03738;0.04481;0.05282;0.06146;0.07078];
ah=[1.1825;1.1586;1.1396;1.1233;1.1086;1.0949;1.0818];

% Yağış hızları (1, 5, 10, 20, 50, ve 100 mm/sa)

R1=[1];
R5=[5];
R10=[10];
R20=[20];
R50=[50];
R100=[100];

% Yatay polarizasyon için zayıflama miktarı

Ah1=kh.*R1.^ah;
Ah5=kh.*R5.^ah;
Ah10=kh.*R10.^ah;
Ah20=kh.*R20.^ah;
Ah50=kh.*R50.^ah;
Ah100=kh.*R100.^ah;

% Belirlenen yağış değerleri için zayıflama miktarının grafiksel gösterimi

plot(f,Ah100,f,Ah50,f,Ah20,f,Ah10,f,Ah5,f,Ah1);

% Grafik etiket bilgileri

xlabel('Frekans (GHz)');
ylabel('Zayıflama (dB/km)');
title('ITU-R P.838-3 Modeli (Yatay Polarizasyon)');
legend('100 mm/sa','50 mm/sa','20 mm/sa','10 mm/sa','5 mm/sa','1 mm/sa',-1);
```

Ek-B

Tablo B1. ITU 838-6 modeli ile farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) dikey polarizasyonlu K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarlarının belirlenmesine yönelik programcık kodu

```
clear all;close all;clc

% Ku Bant frekans aralığı (12-18 GHz)

f=[12:1:18];

% Dikey polarizasyon için ITU-R P-838'de belirtilen katsayılar

kv=[0.02455;0.03266;0.04126;0.05008;0.05899;0.06797;0.07708];
av=[1.1216;1.0901;1.0646;1.0440;1.0273;1.0137;1.0025];

% Yağış hızları (1, 5, 10, 20, 50, ve 100 mm/sa)

R1=[1];
R5=[5];
R10=[10];
R20=[20];
R50=[50];
R100=[100];

% Dikey polarizasyon için zayıflama miktarı

Av1=kv.*R1.^av;
Av5=kv.*R5.^av;
Av10=kv.*R10.^av;
Av20=kv.*R20.^av;
Av50=kv.*R50.^av;
Av100=kv.*R100.^av;

% Belirlenen yağış değerleri için zayıflama miktarının grafiksel gösterimi

plot(f,Av100,f,Av50,f,Av20,f,Av10,f,Av5,f,Av1);

% Grafik etiket bilgileri

xlabel('Frekans (GHz)');
ylabel('Zayıflama (dB/km)');
title('ITU-R P.838-3 Modeli (Dikey Polarizasyon)');
legend('100 mm/sa','50 mm/sa','20 mm/sa','10 mm/sa','5 mm/sa','1 mm/sa',-1);
```

Ek-C

Tablo C1. Mahafza modeli ile farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarlarının belirlenmesine yönelik programcık kodu

```
clear all;close all;clc

% Ku Bant frekans aralığı (12-18 GHz)

f=[12:1:18];

% Yağış hızları (1, 5, 10, 20, 50, ve 100 mm/hr)

R1=[1];
R5=[5];
R10=[10];
R20=[20];
R50=[50];
R100=[100];

% Modelde belirtilen katsayılar

Ka=0.0002;
Alpha=2.25;

% Zayıflama miktarı

Ar1=Ka*R1*f.^Alpha;
Ar5=Ka*R5*f.^Alpha;
Ar10=Ka*R10*f.^Alpha;
Ar20=Ka*R20*f.^Alpha;
Ar50=Ka*R50*f.^Alpha;
Ar100=Ka*R100*f.^Alpha;

% Belirlenen yağış değerleri için zayıflama miktarının grafiksel gösterimi

plot(f,Ar100,f,Ar50,f,Ar20,f,Ar10,f,Ar5,f,Ar1);

% Grafik etiket bilgileri

xlabel('Frekans (GHz)');
ylabel('Zayıflama (dB/km)');
title('MAHAFZA Modeli');
legend('100 mm/hr','50 mm/hr','20 mm/hr','10 mm/hr','5 mm/hr','1 mm/hr',-1);
```

Ek-Ç

Tablo Ç1. Olsen/Rogers/Hodge modeli ile farklı şiddetteki yağmurların (100, 50, 20, 10, 5 ve 1 mm/sa) K_u bant elektromanyetik dalgaları tek yönlü zayıflatma miktarlarının belirlenmesine yönelik programcık kodu

```
clear all;close all;clc

% Ku Bant frekans aralığı (12-18 GHz)

f=[12:1:18];

% Yağış hızları (1, 5, 10, 20, 50, ve 100 mm/hr)

R1=[1];
R5=[5];
R10=[10];
R20=[20];
R50=[50];
R100=[100];

% Modelde belirtilen katsayılar

Ga2=4.21*10^-5;
Ea2=2.42;
Gb2=1.41;
Eb2=-0.0779;

a=Ga2*f.^Ea2;
b=Gb2*f.^Eb2;

% Zayıflama miktarı

A1=a.*R1.^b;
A5=a.*R5.^b;
A10=a.*R10.^b;
A20=a.*R20.^b;
A50=a.*R50.^b;
A100=a.*R100.^b;

% Belirlenen yağış değerleri için zayıflama miktarının grafiksel gösterimi
plot(f,A100,f,A50,f,A20,f,A10,f,A5,f,A1);

% Grafik etiket bilgileri
xlabel('Frekans (GHz)');
ylabel('Zayıflama (dB/km)');
title('OLSEN/ROGERS/HODGE Modeli');
legend('100 mm/sa','50 mm/sa','20 mm/sa','10 mm/sa','5 mm/sa','1 mm/sa',-1);
```

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Yayla A.**, Çakır G., Çimen S., Yağmurun K_u Bant Elektromanyetik Dalgalara Etkisinin Modellenmesi, *ELECO-16 Konferansı*, Bursa, 01-03 Aralık 2016



ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. Lise öğrenimini Deniz Lisesi'nde tamamlayarak, 1995 yılında girdiği Deniz Harp Okulu Kontrol Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nden 1999 yılında mezun oldu. Mezuniyeti müteakip Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'nın çeşitli yüzer ve eğitim birliklerinde görev yapmıştır. 2014 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde başladığı yüksek lisans eğitiminin şu an itibariyle tez aşamasındadır.

