# ROKET EGZOZ GAZININ TELEMETRİ BANDINDA HABERLEŞMEYE ETKİLERİ

# ROCKET EXHAUST PLUME EFFECTS TO COMMUNICATION LINKS IN TELEMETRY BAND

CANER ARSLAN

Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü YÜKSEK LİSANS TEZİ Olarak Hazırlanmıştır.

2010

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Selçuk Geçim
Üye (Danışman)	: Prof. Dr Erdem Yazgan
Üye	: Prof. Dr Birsen Saka
Üye	: Doç. Dr Erkan Afacan
Üye	:Yar. Doç. Dr Mehmet Demirer

# ONAY

Bu tez ...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof.Dr Adil DENİZLİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

# ROKET EGZOZ GAZININ TELEMETRİ BANDINDA HABERLEŞMEYE ETKİLERİ

# Caner ARSLAN

# ÖΖ

Bu tez çalışmasında takip edilen bir rokete ilişkin bilgileri yer istasyonuna aktarmak amacıyla radyo dalgaları ile kurulan telemetri linklerine etkiyen parametrelerden roket egzoz gazının (yakıt atığının) linke etkisi incelenmiştir.

Egzoz gazı ile havanın etkileşime girdiği bölgede buz kristalleri, su tanecikleri, yüksek miktarda gaz karışımları ve serbest elektron yükleri bulunmaktadır. Bu sebeple çözümleme çalışmalarında öncelikle atmosferde bulunan gazların, su tanecikleri içeren bulut, sis ve yağmur olgularının, buz kristalleri içeren kar ve dolunun ve yüksek miktarda elektron yoğunluğu içeren iyonosferin radyo dalgalarına etkileri incelenmiştir.

Egzoz gazından kaynaklanan zayıflamayı veren bir modelde kullanılmak üzere elektron yoğunluk dağılımı üzerine çalışılmış ve elde edilen bilgiler, mevcut bir yakıt atığı konfigürasyonu için kullanılarak MATLAB ortamında analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalar, CST isimli nümerik elektromanyetik analiz yazılımında tekrarlanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler**: Roket yakıt atığı, link bütçesi, telemetri sistemleri, atmosferik etkiler, iyonosfer, plazmalar.

Danışman: Prof.Dr. Erdem YAZGAN, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

# ROCKET EXHAUST PLUME EFFECTS TO COMMUNICATION IN TELEMETRY BAND

#### Caner ARSLAN

### ABSTRACT

In this study, effects of missile exhaust plume to telemetry links established by electromagnetic waves to transfer the missile payload data from missile to the earth station is examined.

Ice crystals, water particles, high amounts of gas mixtures, and free electron charges are located at the interaction region of exhaust gases and the atmosphere. Therefore, primarily for gas content atmospheric gases, for water particles cloud, fog and rain; for ice crystals snow and hail; and for free electron charges ionosphere effects to radio waves are examined.

Electron density distribution is examined to implement in a model which gives the attenuation caused by exhaust plume and the results are used in the analysis performed by MATLAB for a given exhaust plume content.

Studies are repeated by CST named a numerical electromagnetics analysis software tool. The obtained results are compared.

**Keywords**: Rocket exhaust plume, link budget, telemetry systems, atmospheric effects, ionosphere, plasmas.

Advisor: Prof.Dr. Erdem YAZGAN, Hacettepe Üniversity, Department of Electrical and Electronics Engineering, Electrical and Electronics Engineering Section

# TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her safhasında yol gösterici ve destek olan Prof. Dr. Erdem YAZGAN'a,

Çalışmalarımda her türlü desteğini benden esirgemeyen eşim Başak Tulay ARSLAN'a,

Katkılarından dolayı Prof. Dr. Birsen Saka'ya,

Ayrıca her zaman yanımda olduklarını hissettiğim Sayın İnanç Yıldız ve Sayın Mehmet Altuntaş'a,

Teşekkürler...

# SIMGELER VE KISALTMALAR DIZINI

-е	Elektron yükü
ε <sub>o</sub>	Serbest uzay geçirgenliği
λ	Dalgaboyu
m <sub>e</sub> -	Elektron kütlesi
Ne	Birim Hacimdeki elektron sayısı
μ	Manyetik geçirgenlik
BER	Bit Hata Oranı
CST	Computer Simulation Technology
EIRP	Efektif İzotropik Yayılan Güç
IF	Ara Frekans
ITU	International Telecommunication Union
RF	Radyo Frekansı
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
TDM	Zaman Bölmeli Çoklama
TEC	Toplam Elektron İçeriği

# İÇİNDEKİLER

1.	GİRİ	Ş	1
2.	TEL	EMETRİ LİNKLER	5
Ĩ	2.1.	Telemetri Link Yapısı	8
ź	2.2.	Telemetri Sistemi Link Bütçesi	9
3.	HİDF	ROMETEOR ELEKTROMANYETİK DALGA ETKİLEŞİMLERİ	12
4.	PLA	ZMA YAPILARINDA DÜZLEMSEL DALGALAR	18
2	4.1.	İyonize Gazlar	19
2	1.2.	Kompleks Geçirgenlik Değerli Plazmalar	22
5.	EGZ	OZ GAZI ELEKTRON YOĞUNLUK DAĞILIMI	25
5	5.1.	Yanma Sırasında Gerçekleşen Kimyasal Reaksiyonlar	25
5	5.2.	Elektron Yoğunluğu Hesabı	28
6.	ELE	KTRON YOĞUNLUĞU ETKİLERİ	34
(	5.1.	Dünyanın Manyetik Alanı	35
(	5.2.	Kırılım İndisi	36
(	5.3.	QL (Sözde Boylamsal – Quasilongitudinal) Yaklaşımı	37
6	5.4.	Radyo Dalgaları Elektron Etkileşimleri	38
	6.4.1	. Faraday Rotasyonu ve Polarizasyon	38
	6.4.2	. Grup Gecikmesi	42
	6.4.3	. Faz Değişimi	44
	6.4.4	Doppler Kayması	45
	6.4.5	. Bant Genişliği Evre-uyumluluğu ve Yayılma	46
	6.4.6	. Soğurma	47
7.	EGZ	OZ GAZI RF SİNYAL ETKİLEŞİMİ	49
7	7.1.	Egzoz Gazı Yapısı	49
7	7.2.	Çarpışma Frekansı	50
7	7.3.	Termal Elektron Hızı	51
7	7.4.	Кауıр Незаbı	52
7	7.5.	Uygulama	53
7	7.6.	Elektromanyetik Model Gerçeklemesi	55
	7.6.1	. Yönlülük	56
	7.6.2	. CST Uygulaması	59
	7.6.3	İyonize Gazlar Yaklaşımı ile Karşılaştırma	67
	7.6.4	. Farklı Frekanslarda Etkileşimler	71

-	7.7. Т	elemetri Link Bütçesi Analizi	
	7.7.1.	2.35 GHz'de Link Analizleri	74
	7.7.2.	1.435 GHz'de Link Analizleri	84
8.	SONU	Ç VE DEĞERLENDİRMELER	
Ek	-1: ATM	OSFERİK ETKİLER	
Ek	-2: İYON	IOSFER	109

# Şekiller Listesi

Şekil 1-1: Roket Lüle Çıkışı ve Egzoz Plazma Yapısı	1
Şekil 1-2: Genel Roket Yapısı	2
Şekil 2-1: Telemetri Sistemi Yapısı	5
Şekil 2-2: Telemetri Sistemi Füze Test Örneği	7
Şekil 2-3: Telemetri Link Senaryosu	9
Şekil 3-1: Atmosferik Gazlardan Kaynaklanan Zayıflama (P=1013, T=0 <sup>O</sup> C)	.12
Şekil 3-2: Sisten Kaynaklanan Zayıflama Katsayısı (0 – 5 GHz)	.14
Şekil 3-3: Yağmurdan Kaynaklanan Zayıflama Katsayısı (1.5 – 5 GHz)	.15
Şekil 3-4: Sulu Kar Zayıflatması vs. Dalgaboyu Grafiği	.16
Şekil 5-1: Model Geometrisi	.28
Şekil 5-2: Alt-hücreler Arası Denge Durumu	.29
Şekil 5-3: Sıcaklık Profili	.33
Şekil 5-4: Elektron Yoğunluğu Dağılımı	.33
Şekil 6-1: Dipol Modeli ile Yerin Manyetik Alanı Değerleri [14]	.35
Şekil 6-2: Paralel Yayılım için Kırılım İndisi Değerleri	.37
Şekil 6-3: Dairesel Polarize Dalgaların Doğrusal Polarize Dalga Oluşturması	.39
Şekil 6-4: Faraday Rotasyonu	.40
Şekil 6-5: Egzoz Gazı İçerisinde Faraday Rotasyonu Değişimi	.42
Şekil 6-6: Egzoz Gazı İçerisinde Grup Gecikmesi	.44
Şekil 6-7: Faz Kayması Lüleden Uzaklık Değişimi	.45
Şekil 6-8: Lüleden Uzaklıkla Zaman Gecikmesi Yayılımı Değişimi	.46
Şekil 6-9: Lüleden Uzaklıkla Faz Yayılması Değişimi	.47
Şekil 7-1 : Plume Yapısı	.50
Şekil 7-2: Kullanılan Yol Üzerinde N <sub>2</sub> Değişimi	.54
Şekil 7-3: Kullanılan Yol Üzerinde CO Değişimi	.54
Şekil 7-4: Kullanılan Yol Üzerinde CO2 Değişimi	.54
Şekil 7-5: Kullanılan Yol Üzerinde H <sub>2</sub> O Değişimi	.55
Şekil 7-6: Kullanılan Yol Üzerinde H <sub>2</sub> Değişimi	.55
Şekil 7-7: (a) Gerçek Geometri (b) Benzetim Modeli	.60
Şekil 7-8: 3-Boyutlu Yönlülük Değişimi	.61
Şekil 7-9: θ=90 için Yönlülük Değişimi	.61
Sekil 7-10: θ=90 icin Faz Değişimi	.62
Sekil 7-11: Dalga Kılavuzu Elektrik Alan Dağılımı	.62
Sekil 7-12: Dalga Kılavuzu Elektrik Alan Dağılımı Polar Gösterimi	.63
Sekil 7-13: Egzoz Gazı Modeli–Dalga Kılavuzu Etkilesimi	.64
Sekil 7-14: Egzoz Gazı Modeli ile Yönlülük Değisimi	.65
Sekil 7-15: Egzoz Gazı Modeli ile Faz Değisimi	.65
Sekil 7-16: Egzoz Gazı Modeli ile Elektrik Alan Değisimi	.66
Sekil 7-17: Egzoz Gazı Modeli ile Elektrik Alan Değisimi	.66
Sekil 7-18: Eazoz Atesi Bölgesi Etkisi ile Yönlülük Değisimi	.69
Sekil 7-19: Egzoz Atesi Bölgesi Etkisi ile Yönlülük Değisimi Polar Gösterimi	.69
Sekil 7-20: Egzoz Atesi Bölgesi Etkisi ile Elektrik Alan Değisimi	.70
Sekil 7-21: Egzoz Atesi Bölgesi Etkisi ile Elektrik Alan Değisimi Polar Gösterimi.	.70
Şekil 7-22: 2.31 GHz Frekansında Yönlülük Değişimi	.72
Sekil 7-23: 2.31 GHz Frekansında Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi	.72
Sekil 7-24: 2.39 GHz Frekansında Yönlülük Değişimi	.73
Şekil 7-25: 2.39 GHz Frekansında Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi	.73
Sekil 7-26: Roket İrtifasının Zamanla Değisimi	.75
Şekil 7-27: 10 <sup>0</sup> Açı için Yönlülük Değişimi.	.76

Şekil 7-28: 10 <sup>0</sup> Açı için Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi	76
Şekil 7-29: 15 <sup>0</sup> Açı için Yönlülük Değişimi	77
Şekil 7-30: 15 <sup>0</sup> Açı için Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi	77
Şekil 7-31: Serbest Uzay Kaybı	79
Şekil 7-32: Farklı Yağış Oranları ve Farklı Polarizasyonlar için Yağmur Kaybı	80
Şekil 7-33: Farklı Su İçerikli Ortamlarda Sis/Bulut Kaybı	80
Şekil 7-34: Kar/Dolu Kaybı	81
Şekil 7-35: Egzoz Gazı Kaybı Etkileri	82
Şekil 7-36: 2.35 GHz Link Analizi	83
Şekil 7-37: 1.435 GHz için Zamanla Irtifa Değişimi	84
Şekil 7-38: 1.435 GHz Dalga Kılavuzu Yönlülük Değişimi	85
Şekil 7-39: 1.435 GHz Dalga Kılavuzu Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi	85
Şekil 7-40: 1.435 GHz Etkileşimle Yönlülük Değişimi	86
Şekil 7-41: 1.435 GHz Etkileşimle Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi	86
Şekil 7-42: 1.435 GHz Frekansında Atmosferik Etkiler	87
Şekil 7-43: Egzoz Gazı Etkisi	88
Şekil 7-44: Düz Arazi 1.435 GHz Link Analizi	89
Şekil 7-45: Temsili Tek Dağ Senaryo Geometrisi	90
Şekil 7-46: 1.435 GHz'de Tek Dağ Senaryosu	91
Şekil 7-47: Temsili İki Dağ Senaryo Geometrisi	92
Şekil 7-48: 3km'de 200m ve 6km'de 250m Yükseklikte Iki Dağ Senaryosu	94
Şekil 7-49: 3km'de 200m ve 4km'de 225m Yükseklikli İki Dağ Senaryosu	95
Şekil 7-50: 3km'de ve 6km'de 200m Yükseklikli Iki Dağ Senaryosu	96
Şekil 7-51: 1.435 GHz'de Deniz Senaryosu	97

# 1. GİRİŞ

Roketlerin uçuşları süresince maruz kaldıkları etkileri öğrenebilmek amacıyla telemetri sistemleri kullanılmaktadır. Hareketli birime ilişkin veri toplamak amacıyla kullanılan telemetri sistemlerinde roketin, serbest uzayda tek başına hareket eden bir verici olarak düşünülmesi link bütçesi analizinde hata yapılmasına sebep olur.

Roket egzozundan çıkan alev ve yakıt atıkları yanmanın gerçekleştiği süre boyunca, hava ile etkileşerek, bulundukları ortamın iyon dağılımını değiştirmektedirler. Rokete ait verileri yer istasyonunda elde edebilmek amacıyla kullanılan elektromanyetik dalgalar, fark edilir seviyede iyonize olmuş plazma yapısındaki sıcak bir roket egzozundan geçerken, dalga boyuyla ilintili olarak zayıflamaya maruz kalmaktadırlar.

Bu senaryoya ilişkin geometri Şekil 1-1'de gösterilmektedir.



Şekil 1-1: Roket Lüle Çıkışı ve Egzoz Plazma Yapısı

Şekil 1-1'de gösterilen bölgeler aşağıdaki ifadelerde tanımlanmaktadır [1, 2];

- Egzoz Ateşi: Yanmanın en yoğun gerçekleştiği ve iyonik etkileşimlerin en az olduğu bölgedir.
- Karışım Bölgesi: Atmosfer ile egzoz gazının karıştığı bölgedir. Yüksek sıcaklıklı egzoz gazı ile atmosferin etkileşimi ile bu bölgenin dış kısımlarında su damlacıkları ve buz kristalleri gözlenmektedir.
- Tali Yanış (Afterburning): Roket motorlarında, asıl yanma ve tepkime sona erdikten sonra bir süre daha devam eden düzensiz yanma özelliğidir. Lüle çıkışından radyal yönde uzakta gerçekleşir [3].
- Ana Hazne: Rokette yakıtın bulunduğu ve yanmanın gerçekleştiği bölmedir.
   Bu kısmın iç basıncı egzoz gazı uzunluğunu belirleyen etkenlerdendir.



Şekil 1-2: Genel Roket Yapısı

Anteni üzerine takılmış bir roket ve rokete ait egzoz gazına ilişkin görsel detaylar yukarıdaki şekilde verilmiştir. Şekilde yer alan parametreler ise aşağıda Tablo 1-1'de tanımlanmaktadır.

Rokete ilişkin bilgiler genel geçer bilgiler olup farklı uygulamalara yönelik farklı roket konfigürasyonları kullanılabilmektedir.

Parametreler	Tanımlar	
0		
U_	Anten merkezi	
L <sub>M</sub>	Roketin boyu	
L <sub>ANT</sub>	Anten kısmının uzunluğu	
L <sub>FT</sub>	Anten merkezi ile roketin önü arası mesafe	
D <sub>R</sub>	Roket çap uzunluğu	
$\theta_{N}$	Burun açısı	
L <sub>R</sub>	Anten merkezi ile roketin arkası arası mesafe	
L <sub>A</sub>	Kanatçık uzunluğu	
θΑ	Kanatçık sapma açısı	
L <sub>P</sub>	Egzoz gazı uzunluğu	
σ <sub>P</sub>	Egzoz gazı iletkenlik değeri	
ε <sub>p</sub>	Egzoz gazı geçirgenlik sabiti	
$\theta_{P}$	Egzoz gazı huzme genişliği	

#### Tablo 1-1: Rokete İlişkin Parametreler

Egzoz gazı yapısı, yanmanın yoğun bir şekilde gerçekleştiği egzoz ateşi bölgesi, yakıt atığında yer alan moleküller, yakıt atığındaki moleküllerin termoiyonik reaksiyonları sonucu ortaya çıkan elektronlar ve yüksek sıcaklıklı egzoz gazı ile atmosferin etkileşimi sonucu dış kısımlarda ortaya çıkan su damlacıkları ve buz kristallerinden meydana gelmektedir.

Tabloda yer alan egzoz gazına ilişkin parametrelerden egzoz gazı uzunluğunu yanmanın gerçekleştiği ana haznenin basıncı ve füzenin uçuş yüksekliğindeki dış basınç belirler. Egzoz gazı huzme genişliği ise roket çıkışındaki lüle sayısı ve bu lülelerin açıklıkları ile belirlenir. Egzoz gazı iletkenlik değerini ve geçirgenlik sabitini belirleyen parametreler ise içerisindeki moleküller ve elektron yoğunluk dağılımıdır.

Bu çalışmada roket egzozundan çıkan iyonize gaz halinde bulunan yakıt atığı ile haberleşme sinyalinin etkileşiminin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu doğrultuda ikinci bölümde telemetri sistem yapısı anlatılmış ve telemetri link analizine etkiyen parametreler detaylandırılmıştır. Telemetri link analizinde bulunan parametreler ilerleyen bölümlerde de incelenmiş ve son kısımda bu parametrelere ilişkin farklı değerlerle analizler gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü bölümde telemetri link analizine etken parametrelerden olan atmosferde bulunan gazlar ve hidrometeorların elektromanyetik dalgalara etkisi incelenmiştir. Hidrometeorlar, yüksek sıcaklıklı egzoz gazı ile atmosferin etkileşimi ile egzoz gazının karışım bölgesinde de ortaya çıkmaları sebebiyle elektromanyetik dalgalar ile etkileşimleri üzerinde durulmuştur.

Dördüncü bölümde plazma yapısındaki egzoz gazından kaynaklanan zayıflamanın hesaplanması için gerekli parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda plazma ortamında elektromanyetik dalga davranışları ve zayıflamaya etken parametreleri hesaplamak için kompleks geçirgenlikli plazma yapıları incelenmiştir. Ayrıca plazma yapılarında elektromanyetik dalga yayılımı hakkında hızlı bir şekilde fikir sahibi olunmasını sağlayan basitleştirilmiş bir yöntem olan iyonize gaz yaklaşımı detaylandırılmıştır.

Beşinci bölümde, plazma yapılarının incelenmesi ile önemi ortaya çıkan egzoz gazı içerisindeki elektron yoğunluk dağılımının hesaplandığı bir yöntem incelenmiştir.

Altıncı bölümde yüksek elektron yoğunluk dağılımına sahip yapıların haberleşmeye etkileri araştırılmıştır.

Yedinci bölümde egzoz gazı yapısında, elektromanyetik dalganın maruz kaldığı zayıflama miktarını veren bir yöntem incelenmiştir. İçeriği bilinen bir egzoz gazı için gerçekleşecek zayıflama MATLAB ortamında hesaplanmış ve elde edilen zayıflama değeri verilmiştir. Benzer bir model CST (Computer Simulation Technology) isimli elektromanyetik analiz yazılımında [4, 5] gerçeklenmiştir. MATLAB'ta gerçekleştirilen hesaplamalara ilişkin sonuçlar ile CST'den elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yine bu bölümde farklı telemetri link senaryoları tanımlanmış ve ikinci bölümde verilen telemetri link bütçesi analizinde yer alan parametrelerin farklı değerleri ile hesaplamalar yapılmıştır.

# 2. TELEMETRİ LİNKLER

Telemetri linkler, hareketli bir birimden ihtiyaç duyulan verilerin sabit bir platforma iletilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Sistem kapsamında tasarlanan herhangi iki birimin dünya çapında uyumluluk göstermesi gerektiği için sistemde yer alan tüm parametreler IRIG 106 RCC Telemetri Standardında tanımlanmaktadır.

Sistem yapısında yer alan bileşenler şunlardır [6];

- Veri toplama elemanları: Ölçüm sensörleri
- Çoklama (multiplexing) sistemi: Frekans bölmeli çoklama, zaman bölmeli çoklama veya ikisinin birleşimi hibrit bir yapı
- Verici: Modülatör, RF göndermeç ve anten
- Sinyalin yayıldığı kanal
- Alıcı: Anten, RF almaç, ara frekans (IF) kısmı ve demodülatör
- Çoklamayı bileşenlerine ayıran sistem (demultiplexing)
- Veri işleme





a) Test Aracı b) İletim Ortamı c) Yer Ekipmanı

Şekil 2-1'de temsili olarak telemetri sistemi yapısı gösterilmektedir. (a) ile gösterilen kısımda test aracına ilişkin birimlerin veri akışları, (c) ile gösterilen kısımda ise yer istasyonuna ait birimlerin veri akışları gösterilmiştir. (b) ile gösterilen kısım ise RF sinyalin yayıldığı ortamı tanımlamaktadır. Bu ortam dünya sınırları içerisinde genellikle atmosferdir.

Bir telemetri sisteminde bit dizileri, birçok sensörün çıktılarının örneklenmesi, sayısallaştırılması ve TDM bir yapıyla birleştirilmesi sonucunda elde edilir.

Veri toplama sistemi, fiziksel veriyi elektriksel işarete dönüştürebilen sensörler veya dönüştürücü problardan (transducer) meydana gelir. Genellikle alınan sinyalin genliği çok düşüktür ve çoklama birimine gönderilmeden önce genlik seviyesi yükseltilmektedir.

Veri toplama sisteminin çıktıları çoklama birimine gönderilir. Gelen veriler eğer farklı frekanslardaysa sistem frekans bölmeli çoklama ismini alır. Eğer çoklama birimi, verileri zamanda sıralarsa sistem zaman bölmeli çoklama ismini alır.

Vericiye gelen bit dizisi modülasyondan önce bir doğrusal faz ön-modülasyon filtresi kullanılarak filtrelenir. Ön-modülasyon filtresinin amacı RF iletim bant genişliğini sınırlamaktır. Bu alçak geçirgen filtre BER değerinde iyileşme yarattığı için filtre bant genişliğinin de RF bant genişliği gereksinimini karşılayacak kadar küçük olması gerekmektedir. Verici kısmında modülatör, RF göndermeç ve anten yer alır. Çoklanan veri, vericide modüle edildikten sonra bir taşıyıcı frekansa çıkarılarak anten üzerinden kanala gönderilir.

Taşıyıcı sinyal, anten üzerinden dış dünyaya gönderildiğinde atmosferik etkiler ve egzoz gazı gibi yapılarla etkileşime girdikten sonra alıcıya ulaşır.

Alıcı yapısında; anten, RF/IF yükselteçler ve demodülatör bulunmaktadır. Anten tarafından alınan elektromanyetik dalga, RF ön yükselteçte genlik seviyesi arttırıldıktan sonra frekansı ara katman frekansına (IF) düşürülerek demodülatöre iletilir. Demodüle edilen sinyal çoklamayı bileşenlerine ayıran sisteme gönderilir.

Çoklamayı bileşenlerine ayıran sistem kullanılan tekniğe göre (FDM, TDM veya ikisinin birleşimi hibrit bir yapı) verileri doğru kanallara iletir.

Veriler doğru kanallara ayrıldıktan sonra sinyal işleme birimi devreye girerek yapılması gereken işlemleri verilere uygular.

6

Örnek bir füze uçuş testi örneği Şekil 2-2'de yer almaktadır.



Şekil 2-2: Telemetri Sistemi Füze Test Örneği

Test süresince füze kalkışı ve yere çarpma anı da dahil olmak üzere füzeye ilişkin parametreler (sıcaklık, maruz kaldığı basınç, bölgesel titreşim değerleri, vb...) sensörler ile ölçülür. Bir çoklama yöntemi ile birleştirilen bu veriler, verici üzerinden yer istasyonuna gönderilir. Yer istasyonunda bulunan alıcı ile alınan bilgiler, her sensörden okunan bilgi ayrıştırıldıktan (demultiplexing) sonra veri işleme ve veri kayıt birimlerine gönderilir.

## 2.1. Telemetri Link Yapısı

Bir hava taşıtından yer istasyonuna veri göndermekte kullanılan mevcut sistemlerde genellikle zaman bölmeli çoklama (TDM) kullanılmaktadır. TDM sinyali birçok sensörün çoklanarak sürekli bir sayısal veri dizisine dönüştürülmesi ile oluşur. Veri dizileri 100 Kbps ile 25 Mbps arasında değişen veri hızlarında olabilmektedir. Göndermeç çıkış gücü uygulamada ihtiyaç duyulan en küçük değer seçilmek üzere 100 mW ile 25 W arasında değişebilmektedir. Standart çıkış frekansı ise L bant (1435-1525 MHz), alt S bant (2200-2290 MHz) ve üst S bant (2310-2390 MHz) arasından seçilebilmektedir [7].

### L Bant (1435-1535 MHz) Frekans Tahsisi:

Bu bantta yer alan frekanslar insanlı/insansız hava araçları, füzeler, roket kızakları ve diğer araçlar ya da onların başlıca bileşenleri ile ilgili uzaktan kumanda faaliyetleri için ayrılmıştır.

1444.5, 1453.5, 1501.5, 1515.5, 1524.5 ve 1525.5 MHz taşıyıcı frekansları uçuş telemetri mobil istasyonları ile paylaşılmaktadır.

### Alt-S Bantdın (2200-2300 MHz) Frekans Tahsisi:

Hava aracı uçuş testleri için bu bantta her hangi bir hüküm yoktur.

#### Üst-S Bant (2310-2390 MHz) Frekans Tahsisi:

Bu bant; sabit, mobil, radar ve uydu servislerine ayrılmıştır. Telemetri uygulamaları insanlı/insansız hava aracı, füzeler, uzay araçları veya bu araçların başlıca bileşenlerinin uçuş testlerine yöneliktir.

# VHF (216 – 265 MHz) Frekans Tahsisi:

Geçmişte kullanılmış frekans bandıdır. Günümüzde mevcut uygulamalar için herhangi bir geçerliliği bulunmamaktadır.



Şekil 2-3: Telemetri Link Senaryosu

Şekil 2-3'de genel bir telemetri link senaryosu yer almaktadır. Senaryo süresince roket yörüngesi ve roketin bulunduğu noktadaki yakıtın yanma miktarı zamanla değişim göstermektedir. Bu etkilere bağlı olarak da egzoz gazı huzme genişliği, egzoz gazı boyu ve RF sinyalin egzoz gazı ile etkileşime başladığı açı sürekli değişmektedir.

Roketlerde kullanılan antenler, genellikle roket gövdesinde yer alan sarmal veya yama (patch) tipi antenlerdir. Bu sebeple roketten gönderilen elektromanyetik dalga, egzoz ateşi olarak isimlendirilen en çok yanmanın gerçekleştiği en iç kısımla etkileşime girmemektedir. Egzoz ateşi, egzoz içerisinde en fazla elektron yoğunluk dağılımına sahip bölgedir.

# 2.2. Telemetri Sistemi Link Bütçesi

RF link analizleri göndermeç parametreleri, hava taşıtı ve yer istasyonu arasındaki ortamı tanımlayan parametreler ve yer istasyonu parametrelerini içerir [8]. Aşağıdaki tabloda link parametreleri özetlenmektedir.

	Link	Tanımlar
	Parametreleri	
Göndermeç	Pt	Göndermeç çıkış gücü
Parametreleri	L <sub>ct</sub>	Göndermeç ile göndermeç anteni arası kablo kaybı
	Gt	Göndermeç anteni kazancı
İletim Ortamı	d	Link mesafesi
Parametreleri	L <sub>p</sub>	Link mesafesinden kaynaklanan kayıp
	L <sub>m</sub>	Çok yolluluk kaybı
	L <sub>a</sub>	Atmosferik kayıp
	L <sub>f</sub>	Egzoz gazı kaybı
Yer İstasyonu	Gr	Almaç anteni kazancı
Parametreleri	NF <sub>pa</sub>	Ön-güç yükselteç gürültü faktörü
	G <sub>pa</sub>	Ön-güç yükselteç kazancı
	NF <sub>rx</sub>	Almaç gürültü faktörü
	R <sub>th</sub>	Almaç eşik değeri
	T <sub>a</sub>	Anten sıcaklığı (K)
	SNR <sub>r</sub>	Gerekli SNR değeri

Tablo 2-1: Telemetri Link Parametreleri

Göndermeç parametreleri; RF güç çıkışı, kablo kayıpları, veri hızı ve anten kazancından oluşmaktadır. Ortam karakteristikleri ise birimler arasındaki mesafeden kaynaklanan kayıp, çok yolluluk kaybı, atmosferik kayıp ve egzoz gazı kaybından oluşmaktadır. Yer istasyonu parametreleri alıcı anten kazancı, RF kablo ve konnektör kaybı, almaç gürültü faktörü, anten sıcaklığı ve alıcı hassasiyetidir.

Bütün bu parametreler dikkate alınarak link payı elde edilir. Hesaplamalar sonucu elde edilen link payı değerinin en az istenen BER değerine karşılık gelen SNR değeri kadar olması gerekmektedir [9].

Göndermeç çıkışındaki sinyal gücü;

$$EIRP = \frac{P_t x G_t}{L_{ct}}$$
(2.1)

olur. Sinyalin ortamda yayılmasından kaynaklanan yol kaybı ise;

$$L_{p} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^{2}$$
(2.2)

olarak bulunur. Eşitlikteki  $\lambda$  dalgaboyu olup "f" çalışma frekansı olmak üzere  $\lambda$ =c/f formülü ile hesaplanır.

Kanalda gerçekleşen toplam kayıp ise;

$$L_t = L_p \times L_m \times L_a \times L_f \tag{2.3}$$

formülü ile bulunur. Almaç tarafında alınan güç ise;

$$P_{r} = \frac{EIRP \ x \ G_{r}}{L_{t}}$$
(2.4)

olur. Yukarıda hesaplanan değerler eşitlikte yerine koyulursa alıcı girişindeki RF sinyal gücü;

$$P_{r} = \frac{P_{t} x G_{t} x G_{r}}{L_{ct} x L_{m} x L_{a} x L_{f}} x \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^{2}$$
(2.5)

olarak bulunur. Modülatöre giden sinyal gücünü (P<sub>sm</sub>) bulmak içinse almacın ve ön-yükseltecin RF sinyale etkilerinin de hesaba dahil edilmesi gerekmektedir;

$$P_{\rm sm} = \frac{P_{\rm r} \, \mathrm{x} \, \mathrm{G}_{\mathrm{pa}}}{\mathrm{N} F_{\mathrm{pa}} \, \mathrm{x} \, \mathrm{N} F_{\mathrm{rx}}} \tag{2.6}$$

Modülatöre giden sinyal gücü değerinin, almaç hassasiyetinden en az istenen bit hata oranı için gerekli SNR değeri (SNR<sub>r</sub>) kadar büyük veya eşit olması gerekmektedir.

$$P_{sm} \ge \left(R_{th} + SNR_{r}\right) (dB) \tag{2.7}$$

Bu koşulun sağlanamaması durumunda bit hata oranında artış gerçekleşecek ve sistem performansı kötüleşecektir.

## 3. HIDROMETEOR ELEKTROMANYETIK DALGA ETKILEŞİMLERİ

Bu bölümde, egzoz gazının atmosferle etkileşimi sonucu, egzoz gazının dış kısımlarında ortaya çıkan hidrometeorların elektromanyetik dalgaya etkileri incelenmiştir. Bu amaçla RF haberleşmede hidrometeorların elektromanyetik dalgaya etkisinin en çok gözlendiği atmosfer ortamında gerçekleşen etkileşimler araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiş olup, hesaplamalara ilişkin detaylar Ek-1'de yer almaktadır.

Elektromanyetik dalgalarla etkileşime giren maddelerin saçılım parametrelerinin hesaplanması, maddelerin dielektrik özelliklerinin bilinmesini gerektirir. Hidrometeorlara ilişkin dielektrik özellikler, genellikle kompleks dielektrik sabiti ya da kompleks kırılım indisi ile ifade edilir. Bir ortamın dielektrik sabitinin veya kırılım indisinin kompleks değerlikli olması ise ortamda yol alan bir elektromanyetik dalganın yol boyunca zayıflamaya maruz kalacağı anlamına gelmektedir.

Atmosferde RF sinyale etkiyen birçok olgu ile plazma halindeki iyonize egzoz gazındaki etkiler benzerlik göstermektedir. Örneğin atmosferde elektromanyetik dalganın zayıflamasına sebep olan gaz molekülleri, roket egzoz gazında da bulunmakta olup benzer şekilde zayıflamaya sebep olmaktadır. Bu sebeple atmosferde bulunan gaz moleküllerinin elektromanyetik dalga ile etkileşimi araştırılmıştır.



Şekil 3-1: Atmosferik Gazlardan Kaynaklanan Zayıflama (P=1013, T=0<sup>o</sup>C)

Şekil 3-1'de atmosferik gazlardan kaynaklanan zayıflamanın frekans ile değişimi gösterilmektedir. Şekilde RF sinyalin, 1013 hPa basınç ve 0<sup>o</sup>C sıcaklık koşullarında 1 m<sup>3</sup> hacimde 7.5 gram su bulunduran ortamda 1 km boyunca ilerlemesi durumunda maruz kalacağı zayıflamanın frekansla değişimi verilmektedir. Şekilden kuru havanın su buharına göre çok daha büyük bir zayıflama katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum düşük mikrodalga frekanslarında böyleyken kullanılan frekans bandı milimetre dalga bandına çıktığında su buharından kaynaklanan zayıflamanın çok daha fazla olduğu görülmüştür.

Atmosfer Sıcaklığı (Celcius)	2.35 GHz'de Zayıflama (g/m <sup>3</sup> ) (dB/km)
-8	0.0085759
0	0.0079158
10	0.0071839
20	0.0065409

Tablo 3-1: Farklı Sıcaklıklarda Gaz Zayıflatması

Tablo 3-1'de 2.35 GHz frekansında elektromanyetik dalganın farklı sıcaklıklarda atmosferde bulunan gaz moleküllerinin etkisiyle maruz kalacağı zayıflama değerleri verilmiştir. Sinyalin km cinsinden izleyeceği yol ve g/m<sup>3</sup> cinsinden ortamdaki su miktarı, ortamın sıcaklık değerine karşılık gelen değer ile çarpılarak toplam zayıflama elde edilebilir.

Yakıt atığında yer alan gazların yanı sıra 2000<sup>0</sup>K sıcaklığındaki su buharının plazma dışında yaklaşık 285<sup>0</sup>K sıcaklığındaki atmosfer ortamı (yaklaşık 400 m yükseklikte atmosfer sıcaklığı) ile karşılaşması, ortamda su damlacıkları oluşumuna sebep olmaktadır. Su damlacıklarının RF sinyale etkisini gözlemek amacıyla, yapısında su damlacıkları bulunduran ortamlar olan bulut ve sis yapılarının elektromanyetik dalgaya etkisi araştırılmıştır.



Şekil 3-2: Sisten Kaynaklanan Zayıflama Katsayısı (0 – 5 GHz)

Şekil 3-2'de, zayıflama katsayısı değişimi kullanım ihtiyaçları doğrultusunda 1 - 5 GHz frekans bandında detaylı olarak incelenmiştir. Egzoz gazının yüksek sıcaklıklı olmasına karşın atmosferle etkileşime girdiği bölgelerde sıcaklık bir anda düşmektedir. Bu sebeple ortam şartlarına uygun olarak sıcaklık değeri  $-8^{\circ}$ C ile  $20^{\circ}$ C arasında incelenmiştir.

Bulut / Sis Sıcaklığı (Celcius)	2.35 GHz'de Zayıflama (g/m <sup>3</sup> ) (dB/km)
-8	0.0068596
0	0.0051482
10	0.0037981
20	0.0029618

Tablo 3-2: Sis Zayıflatma Etk	is
-------------------------------	----

Tablo 3-2'de ise spesifik olarak üst telemetri taşıyıcı frekansı olan 2.35 GHz'de farklı sıcaklıklarda bulut/sisten kaynaklanan zayıflama değerleri verilmektedir. Verilen değerler, 2.35 GHz taşıyıcı frekansındaki RF sinyalin 1 m<sup>3</sup> hacminde 1 gram su damlacığı bulunan bir ortamda 1 km mesafe gitmesi durumunda ortaya çıkan kayıp değerleridir.

Su damlacıklarının etkisini incelemek için düşük kayıplı bulut/sis yapılarının yanı sıra yağmurla etkileşime giren elektromanyetik dalgada meydana gelen zayıflama da araştırılmıştır. Egzoz gazı ile atmosferin etkileşimi sonucu yağmur gibi yüksek miktarda su içeren bir yapının ortaya çıkması beklenen bir durum değildir. Fakat en kötü durum senaryosunu göz önünde bulundurabilmek amacıyla yağmur ile RF sinyalin etkileşimi de incelenmiştir.



Şekil 3-3: Yağmurdan Kaynaklanan Zayıflama Katsayısı (1.5 – 5 GHz)

Tablo 3-3: 2.35 GHz'de	Yağmur Zayıflatması
------------------------	---------------------

Polarizasyon	Yağmur Yağış Miktarı (mm/hr)	2.35 GHz'de Zayıflama (dB/km)
Dikey	10	0.0051
Dairesel	20	0.0083
Dikey	40	0.0103
Dairesel	80	0.0162
Yatay	100	0.0215

Tablo 3-3'te, 2.35 GHz taşıyıcı frekansındaki RF sinyalin 1 km'lik mesafe kadar ilerlemesi durumunda meydana gelen zayıflama değerleri farklı polarizasyon ve farklı yağış oranları için verilmiştir. Değerler incelendiğinde, yağış oranı arttıkça (ortamın su damlacığı içeriği fazlalaştıkça) zayıflama değerinin arttığı

gözlenmektedir. Yağmurun bulut/sisten daha fazla su damlacığı içerdiği durumlarda RF sinyalin maruz kaldığı zayıflamanın çok daha fazla olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3-4: Sulu Kar Zayıflatması vs. Dalgaboyu Grafiği

Roketin uçuş yüksekliğine bağlı olarak su buharının 273<sup>o</sup>K ve altındaki sıcaklık değerlerine sahip atmosfer ortamları (yaklaşık 2000 m yükseklikte atmosfer sıcaklığı) ile karşılaşması, ortamda buz kristallerinin oluşmasına sebep olabilmektedir. Buz kristallerinin RF sinyale etkisini inceleyebilmek amacıyla yapısında buz kristalleri bulunduran kar ve dolu ile RF sinyal etkileşimleri incelenmiştir.

Şekil 3-4'te içeriğinde farklı miktarda su bulunduran kar yapılarının RF sinyali zayıflatma miktarları verilmektedir. RF sinyalin maruz kaldığı zayıflama değerinin, dalga boyuyla ve kar içerisindeki su miktarıyla artış göstermekte olduğu gözlenmektedir.

Kar İçerisindeki Su Miktarı	2.35 GHz'de Zayıflama	
(mm/hr)	(dB/km)	
10	0.0018	
20	0.0035	
40	0.0071	
120	0.0213	
160	0.0285	

Tablo 3-4: 2.35 GHz'de Kar Zayıflatması

Spesifik olarak telemetri bandında yer alan 2.35 GHz taşıyıcı frekansındaki RF sinyalin kar içerisindeki farklı su miktarlarına göre zayıflama değerleri Tablo 3-4'te verilmiştir. Değerler RF sinyalin belirtilen su içeriğine sahip kar ortamında 1 km ilerlemesine karşılık gelmektedir.

Yukarıda sonuçları verilen atmosferik olayların RF sinyale etkilerine ilişkin detaylı bilgiler Ek-1'de yer almaktadır. 2.35 GHz frekansı için tablolarda verilen zayıflama değerleri en fazla 0.0285 dB/km olarak (160 mm/hr kar yağışı durumu) bulunmuştur. Bu değer km bazında olup m bazında uzunluğa sahip roket egzoz gazına uygulandığında binde biri oranında azalacaktır (0.0000285 dB/m). Bu değer sistem link bütçesindeki diğer değerlerle kıyaslandığında çok küçük seviyelerde kalmaktadır. Bu sebeple egzoz gazı ile havanın etkileşimi sonucu ortaya çıkan su damlacıkları ve buz kristallerinin RF sinyale etkilerinin ihmal edilebileceği değerlendirilmektedir. Ancak telemetri link mesafesinin artmasıyla link bütçesine kayıp olarak etkisi artmaktadır.

#### 4. PLAZMA YAPILARINDA DÜZLEMSEL DALGALAR

Kaynak olmayan kayıplı bir ortamda homojen vektör Helmholtz eşitliği şu şekilde ifade edilir [10];

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \mathbf{k}_c^2 \mathbf{E} = 0 \tag{4.1}$$

Eşitlikteki  $k_c = w \sqrt{\mu \epsilon_c}$  dalga sayısı kompleks bir sayı olup aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilmektedir.

$$k_{c} = w\sqrt{\mu\varepsilon_{c}} = w\sqrt{\mu(\varepsilon' - j\varepsilon'')}$$
(4.2)

Kayıpsız ortamda düzlemsel dalgalara yönelik yapılan incelemeler, dalga sayısını k yerine  $k_c$  alarak kayıplı ortamdaki dalga yayılımına uygulanabilir. Genel gösterimle uyumlu olması açısından aşağıdaki gibi bir yayılım sabiti,  $\gamma$ , tanımlanabilir;

$$\gamma = jk_c = jw\sqrt{\mu\varepsilon_c} \qquad (m^{-1})$$
(4.3)

Yayılım sabitinin kompleks bir sayı olması sebebiyle aşağıdaki eşitlikler elde edilir;

$$\varepsilon_{\rm c} = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\rm w} \tag{4.4}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = jw \sqrt{\mu \epsilon \left(1 + \frac{\sigma}{jw\epsilon}\right)}$$
(4.5)

Eşitlik (4.2)'deki dalga sayısı ifadesi Eşitlik (4.5)'te yerine koyulursa,

$$\gamma = \alpha + j\beta = jw \sqrt{\mu \epsilon' \left(1 - j\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)}$$
(4.6)

eşitliği elde edilir.

Eşitlikteki  $\alpha$  ve  $\beta$ , yayılım sabitinin gerçek ve sanal kısımlarıdır. Kayıpsız bir ortam için  $\sigma=0$  ( $\epsilon$ "=0,  $\epsilon$ '= $\epsilon$ ),  $\alpha=0$ ,  $\beta=k=w\sqrt{\mu\epsilon}$ . Kayıplı bir ortam için  $\epsilon$ "= $\sigma/\omega$ ,  $\epsilon$ '= $\epsilon$ 'dir. Kayıplı ortam için Eşitlik (4.1)'deki Helmholtz eşitliği;

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \gamma^2 \mathbf{E} = 0 \tag{4.7}$$

şeklini alır.

Bu eşitliğin çözümü, +z yönünde düzgün düzlemsel dalga yayılımını tanımlayan;

$$\mathbf{E} = \mathbf{a}_{x} \mathbf{E}_{x} = \mathbf{a}_{x} \mathbf{E}_{0} \mathbf{e}^{-\gamma z}$$
(4.8)

ifadesidir.

Burada dalganın x yönünde doğrusal polarize olduğu varsayılmıştır. Yayılım faktörü, e<sup>-yz</sup>, iki faktörün çarpımı olarak yazılırsa;

$$\mathbf{E}_{\mathbf{x}} = \mathbf{E}_{0} \mathbf{e}^{-\alpha z} \mathbf{e}^{-j\beta z} \tag{4.9}$$

eşitliği elde edilir.

Birinci faktör,  $e^{-\alpha z}$ , z arttıkça azalır yani bu bir zayıflatma faktörüdür.  $\alpha$  da zayıflatma katsayısı olarak isimlendirilir. Zayıflatma katsayısının birimi ise Neper<sup>1</sup>/metre (Np/m)'dir. İkinci faktör,  $e^{-j\beta z}$ , ise faz faktörüdür.  $\beta$  ise faz sabiti olarak isimlendirilir ve (rad/m) birimini alır. Faz sabiti dalganın bir metre ilerlediğinde dalganın fazında oluşan kaymayı tanımlamaktadır. Faz sabitinin zayıflamaya herhangi bir katkısı yoktur.

### 4.1. İyonize Gazlar

İyonlaşmış gazlar; serbest elektronlar ve pozitif iyonlardan oluşur. İyonlaşmış tabakaların her birinde, katman içerisindeki elektron ve iyon yoğunluğu dağılımları her noktada birbirine eşittir. Eşit elektron ve iyon yoğunluk dağılımına sahip iyonlaşmış gazlara plazma denir.

Elektronlar, pozitif iyonlardan çok daha hafif olduklarından, plazmadan geçen elektromanyetik dalgaların elektrik alanı ile daha çok ivmelenirler.

-e yüklü ve m kütleli **E** elektrik alanında bir elektron, x yönünde w açısal frekansında kendini pozitif bir iyondan **x** mesafesi kadar uzaklaştıracak –eE gibi bir kuvvete maruz kaldığında;

$$-\mathbf{e}\mathbf{E} = \mathbf{m} \left(\frac{\mathbf{d}^2 \mathbf{x}}{\mathbf{d}t^2}\right) = \mathbf{m}\mathbf{w}^2 \overline{\mathbf{x}}$$
(4.10)

$$\overline{\mathbf{x}} = \frac{-\mathbf{e}}{\mathbf{mw}^2}\overline{\mathbf{E}}$$
(4.11)

olarak ifade edilir [10].

Burada **E** ve **x** fazördür. Böyle bir yer değişiminin elektrik dipol momentinde yapacağı artış ise;

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> \*Neper boyutsuz bir değerdir.  $\alpha$ =1(Np/m) ise 1m ilerleyen dalganın genliğinde e<sup>-1</sup>=0.368 lik bir azalma olur. 1 Np/m'lik azalma 20loge=8.69(dB/m)'ye karşılık gelir.

$$\overline{\mathbf{p}} = -\mathbf{e}\overline{\mathbf{x}}$$
(4.12)

olur.

Birim hacimde N elektron varsa elektrik dipol momentinin (polarizasyon vektörünün) hacim yoğunluğu;

$$\overline{\mathbf{P}} = \mathbf{N}\overline{\mathbf{p}} = -\frac{\mathbf{N}\mathbf{e}^2}{\mathbf{m}\mathbf{w}^2}\overline{\mathbf{E}}$$
(4.13)

olarak ifade edilir.

Yukarıdaki eşitliği yazarken elektronların indüklenmiş dipol momentlerinin birbirleri üzerine etkileri ihmal edilmiştir. Elektrik akı yoğunluğu (elektrik değişimi), D, denklemi;

$$\mathbf{D} = \varepsilon_{o} \overline{\mathbf{E}} + \overline{\mathbf{P}}$$
(4.14)

kullanılarak;

$$\overline{\mathbf{D}} = \varepsilon_{o}\overline{\mathbf{E}} + \overline{\mathbf{P}} = \varepsilon_{o}\left(1 - \frac{(\mathbf{N}e^{2})}{(\mathbf{m}w^{2}\varepsilon_{o})}\right)\overline{\mathbf{E}}$$
(4.15)

ifadesi elde edilir. Denklemde görüldüğü üzere etkin plazma geçirgenliği;

$$\varepsilon = \varepsilon_{o} \left( 1 - \frac{\left( Ne^{2} \right)}{\left( mw^{2}\varepsilon_{o} \right)} \right) = \varepsilon_{o} \left( 1 - \frac{w_{p}^{2}}{w^{2}} \right)$$
(4.16)

olarak tanımlanır. Buradan;

$$\mathbf{w}_{p} = \sqrt{\frac{\mathrm{Ne}^{2}}{\mathrm{m}\,\varepsilon_{o}}} \left(\mathrm{rad/s}\right) \tag{4.17}$$

sonucu elde edilir. Denklemde yer alan w<sub>p</sub> iyonize ortamın bir karakteristiği olan plazma açısal frekansını tanımlar.

Plazma frekansı ise;

$$\mathbf{f}_{\mathbf{p}} = \frac{\mathbf{W}_{\mathbf{p}}}{2 \pi} = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{\mathbf{N}\mathbf{e}^2}{\mathbf{m} \,\varepsilon_{\mathbf{o}}}} \quad (\mathbf{H}\mathbf{z}) \tag{4.18}$$

olarak bulunur.

Etkin plazma geçirgenliği frekansa bağlı bir parametre olarak tanımlanacak olursa;

$$\varepsilon = \varepsilon_{o} \left( 1 - \frac{f_{p}^{2}}{f^{2}} \right) (F/m)$$
(4.19)

sonucu elde edilir.

Buradan yayılım sabiti;

$$\gamma = \alpha + \mathbf{j}\beta = \mathbf{j}\mathbf{w}\sqrt{\mu\varepsilon_o \left(1 - \left(\frac{\mathbf{f}_p}{\mathbf{f}}\right)^2\right)}$$
(4.20)

şeklinde yazılabilir.

Etkin plazma geçirgenliği formülünden, f'nin f<sub>p</sub>'ye yaklaştıkça ε'nin ortadan kalktığı yönünde bir olgu ortaya çıkmaktadır. ε sıfıra yaklaştıkça, serbest yüklerin ve polarizasyon yüklerinin her ikisine de bağlı olan elektrik alan şiddeti, **E**, sıfır olmazken; sadece serbest yüklere bağlı olan elektriksel yer değişimi, **D**, sıfıra yaklaşır. Bu durumda, serbest yükler olmamasına rağmen plazmada salınım gösteren bir elektrik alan şiddeti ortaya çıkma olasılığı vardır. Buna da plazma salınımı denir.

 $f < f_p$  olduğunda yayılma sabiti reel hale gelir ve yayılım olmaksızın bir zayıflama olduğunu belirtir. Aynı zamanda  $\eta_p$  sanal hale gelir ve güç iletimi olmayan bir reaktif yük olduğunu gösterir. Burada  $f_p$  kesim frekansı olarak tanımlanmaktadır.

Diğer taraftan  $f > f_p$  olduğunda yayılım sabiti tümüyle sanaldır ve elektromanyetik dalgalar plazma içerisinde zayıflamadan yayılacaktır.

Eğer e, m ve  $\varepsilon_o$  değerleri eşitlikte yerine koyulursa;

Elektron yükü:  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  (C)

Elektron kütlesi:  $m = 9.107 \times 10^{-31}$  (kg)

Serbest uzay geçirgenliği:  $\varepsilon_o = (1/36 \pi) \times 10^{-9} = 8.854 \times 10^{-12} (F/m)$ 

$$\mathbf{f}_{p} = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{Ne^{2}}{m \varepsilon_{o}}} \cong 9 \sqrt{N} (Hz)$$
(4.21)

şeklinde sadeleştirilebilir.

#### 4.2. Kompleks Geçirgenlik Değerli Plazmalar

Bir plazma, yüklü parçacıkların, parçacıklar arası etkileşimler ve uygulanan bir alanın etkisiyle serbest bir şekilde hareket ettiği iyonize bir gazdır. Plazmalar, yapılarında barındırdıkları parçacıkların hareketini engelleyen atomik bir sınırlama olmamasıyla diğer maddelerden ayrılırlar. Buna karşın bir gaz dahi olsa parçacıklar ve alanlar arası etkileşimler polarizasyon etkisinin artmasına sebep olarak gaz geçirgenliğinin serbest uzaydan farklı bir hal almasına sebep olur. Hareket halindeki parçacıkların birbirleriyle çarpışmasıyla iletkenlik cinsinden tanımlanacak bir etkiyle sahip oldukları momentumları değişir.

Newton'un ikinci kuralı, ortamdaki her noktaya etkiyen kuvvetin etkidiği noktadaki zamanla değişen momentum ile dengelendiğini belirtir. Çarpışmalardan ötürü momentum yoğunluğundaki toplam değişim [11];

$$F(\mathbf{r},t) = -\operatorname{NeE}(\mathbf{r},t) = \frac{\mathrm{dP}(\mathbf{r},t)}{\mathrm{dt}} + \alpha P(\mathbf{r},t)$$
(4.22)

şeklinde tanımlanır.  $\alpha$  değeri elektronlar arasında birim zamanda gerçekleşen çarpışma sayısı ölçütüdür. Eşitlikteki momentum hacim yoğunluğu;

$$P(\mathbf{r},t) = N m_{\rho} v(\mathbf{r},t) \tag{4.23}$$

olarak ifade edilebilir. v(r,t) plazma ortamının makroskobik hızını tanımlamaktadır.

Eğer ortamda dışarıdan uygulanan herhangi bir elektromanyetik kuvvet yoksa Eşitlik (4.22);

$$\frac{\mathrm{dP}(\mathbf{r},\mathbf{t})}{\mathrm{dt}} + \alpha \mathbf{P}(\mathbf{r},\mathbf{t}) = 0 \tag{4.24}$$

halini alır. Bu yüzden;

$$P(\mathbf{r},\mathbf{t}) = P_0(\mathbf{r})e^{-\alpha t}$$
(4.25)

ve eşitlikteki " $\alpha$ ", makroskobik plazma hızı v'yi sıfır yapan, elektron hızlarının rastgele bir duruma kaydığı bir hız olarak tanımlanır.

Eşitlik (4.22)'nin zamana göre türevi alınırsa toplam türev;

$$\frac{dP(\mathbf{r},t)}{dt} = \frac{\partial P(\mathbf{r},t)}{\partial t} + (\alpha . \nabla) P(\mathbf{r},t)$$
(4.26)

olarak bulunur.

Sağ taraftaki ikinci terim momentumun zamanla değişimini tanımlar. Elektron hızı elektromanyetik alan ile tetiklendiği için sinüssel bir dalga için uzaysal değişimlerin alanın dalga boyu ( $\lambda = 2\pi c/\omega$ ) ile orantılı olması beklenmektedir. İlk terim w ile orantılı olduğu için ikinci terim wv/c ile orantılıdır ve göreceli olmayan parçacık hareketleri için ihmal edilebilir. Bu durumda E(r,t) ve v(r,t)'nin ters Fourier dönüşümü alınırsa Eşitlik(4.22);

$$-e\tilde{E} = jwm_e\tilde{v} + m_e\alpha\tilde{v}$$
(4.27)

halini alır. Makroskobik plazma hızını çekecek olursak;

$$\tilde{v} = -\frac{\frac{e}{m_e}E}{\alpha + jw}$$
(4.28)

Hareket eden elektronlardan kaynaklanan ikincil akım;

$$J^{s} = -Ne\tilde{v} = \frac{\varepsilon_{0}w_{p}^{2}}{w^{2} + \alpha^{2}}(\alpha - jw)E$$
(4.29)

olarak bulunur. Eşitlikteki w<sub>p</sub> Eşitlik(4.17)'de tanımlanan plazma frekansıdır.

Frekans düzleminde serbest uzayda birincil ve ikincil akımlar için Amper Kanunu yazılırsa;

$$\nabla \mathbf{x}\mathbf{H} = \mathbf{J}^{i} + \mathbf{J}^{s} + \mathbf{j}\mathbf{w}\boldsymbol{\varepsilon}_{0}\mathbf{E}$$
(4.30)

bulunur. Eşitlik(4.29), Eşitlik(4.30)'da yerine yazılacak olursa;

$$\nabla x H = J^{i} + \frac{\varepsilon_{0} w_{p}^{2} v}{w^{2} + \alpha^{2}} E + j w \varepsilon_{0} \left[ 1 - \frac{w_{p}^{2}}{w^{2} + \alpha^{2}} \right] E$$
(4.31)

elde edilir.

Plazma ortamının özelliklerini belirlemek Eşitlik(4.30);

$$\nabla \mathbf{x}\mathbf{H} = \mathbf{J}^{i} + \mathbf{J}^{s} + \mathbf{j}\mathbf{w}\mathbf{D} \tag{4.32}$$

şeklinde yazılabilir. Buradan;

$$\mathbf{J}^{s} = \frac{\varepsilon_{0} \mathbf{w}_{p}^{2} \boldsymbol{\alpha}}{\mathbf{w}^{2} + \boldsymbol{\alpha}^{2}} \mathbf{E}$$
(4.33a)

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}_0 \left[ 1 - \frac{\mathbf{w}_p^2}{\mathbf{w}^2 + \boldsymbol{\alpha}^2} \right] \mathbf{E}$$
(4.33b)

olarak elde edilir.

 $J^{s} = \sigma E$  ve  $D = \epsilon E$  temel eşitlikleri, Eşitlik (4.33) ile birleştirerek iletkenlik ve geçirgenlik değerleri çekilirse;

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 w_p^2 \alpha}{w^2 + \alpha^2}$$
(4.34)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[ 1 - \frac{w_p^2}{w^2 + \alpha^2} \right]$$
(4.35)

olarak elde edilir.

Böylece plazma yapısının temel özelliklerini tanımlanabilmesi için haberleşme frekansı, elektronlar arası çarpışma frekansı ve toplam elektron içeriğinden hesaplanan plazma frekansı bilgilerine ihtiyaç duyulduğu görülmüştür.

# 5. EGZOZ GAZI ELEKTRON YOĞUNLUK DAĞILIMI

Roket egzoz gazına uygulanacak olan plazma modelinin uygunluğunu belirlemek için, itki sisteminde gerçekleşen yanma olayındaki kimyasal reaksiyonlar göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle ekzotermik (ısıveren) yanma işlemi fazlalık alkali metallerin pozitif ve negatif iyonlar olarak yayılmasına sebep olan hızlı sıcaklık artışına sebep olur. Negatif iyonlar hidrojenle birleşerek nötral moleküller ve elektron üretirler. Yanma işlemi sonucunda açığa çıkan egzoz gazı, nötral moleküller ve neredeyse gözle görülür düzeyde fazla miktarda nötral pozitif ve nötral negatif yüklerden oluşur. Bu gaz yapısı plazma olarak tanımlanır.

Roket yakıt atığı içerisinde bulunan düşük iyonizasyon potansiyeline sahip bir bileşen, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında elektron kaybetme eğilimine girmektedir. Gaz halindeki alüminyum, çıkış düzleminde genellikle ihmal edilebilecek miktarda elektron katkısı yapar, ancak yakıttaki alüminyum, alev sıcaklığının artışıyla elektron yoğunluğunu çok fazla miktarda arttırır [12].

Bu doğrultuda öncelikle yanma sonrası gaz reaksiyonlarının elektron salınımına etkisi incelenmiştir. Kimyasal prensiplerden sonra roket egzoz çıkışındaki elektron yoğunlukları hesaplanması üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise roket yakıt atığında elektron yoğunluklarını tanımlayan zamanla değişen ve doğrusal olmayan diferansiyel eşitlikler incelenmiştir.

# 5.1. Yanma Sırasında Gerçekleşen Kimyasal Reaksiyonlar

Yanma sonrasında birçok kimyasal reaksiyon gerçekleşmektedir. Bunlardan bazıları Tablo 5-1'de özetlenmiştir. Elektron yoğunluğuna etkiyen en önemli olgular yük üretimi ve yüklerin birleşmesidir. Tablo 5-1'de yük üretimi ve yüklerin birleşmesi olgularında etken molekülün klorür olduğu gözlenmektedir.

Reaksiyon	Kimyasal Bileşen	Çıktılar
Hidrojen Karbon Oksit Yanması	$\begin{array}{c} O+O+Mg\\ O+H+Mg\\ H+H+Mg\\ H+OH+Mg\\ CO+O+Mg\\ OH+OH\\ OH+H_2\\ O+H_2\\ H+O_2\\ CO+OH\\ \end{array}$	$O_2+Mg$ OH+Mg $H_2+Mg$ $H_2O+Mg$ $CO_2+Mg$ $H_2O+O$ $H_2O+H$ OH+H OH+H OH+H $CO_2+H$
Klorür İçeren Reaksiyonlar	H+Cl+Mg Cl+H <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O+Cl OH+Cl	HCI+Mg HCI+H HCI+OH HCI+O
Nötral Potasyum	K+HCI	KCI+H
Yük Bileşimi	K <sup>+</sup> +e <sup>-</sup> +Mg	K+Mg
Yük Üretimi	K+Cl H+Cl <sup>-</sup> Mg+Cl <sup>-</sup>	K⁺+Cl⁻ HCl+e⁻ Cl+Mg+e⁻

Tablo 5-1: Yanma Sonrası Kimyasal Reaksiyonlar [12]

Bu kısımda katı yakıtlı bir rokette gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar incelenmektedir. Deniz seviyesine göre 20 km irtifanın altında uçan roketler için başlıca elektron üreten reaksiyon;

 $K + CI \rightarrow K^+ + CI^-$ (5.1)olarak tanımlanabilir.Bunu takiben; $H + CI^- \rightarrow HCI + e^-$ (5.2)reaksiyonu gelir.

Baskın bileşim için ise;

 $K^+ + e^- + Mg \longrightarrow K + Mg$  (5.3)

reaksiyonu bulunmaktadır.
Reaksiyon (5.3)'teki magnezyum moleküllerinin elektron üretimine katkıları yokmuş gibi görünmelerine rağmen momentumun ve enerjinin korunumu kanunlarının sağlanabilmesi için katalizör etkisi gören magnezyum moleküllerinin hesaplamalara dahil edilmesi gerekmektedir.

(5.1) – (5.3) reaksiyonları, lüle çıkışındaki elektron yoğunluğunu, n<sub>i</sub>, hesaplamak için kullanılır. Özellikle, yanma ürünlerinden olan Klor'un tipik olarak N<sub>cl</sub>= $2.7*10^{-3}$ değerine sahip molar yüzdesi dikkate alınır. Bu nedenle yakıtın bir mole-ündeki elektron sayısı: N<sub>e</sub> = N<sub>cl</sub> x N<sub>av</sub> = 16.26 x 10<sup>20</sup> elektron/mole (N<sub>av</sub>: Avagadro sayısı) değerini alır.

Birim hacimdeki elektron sayısını (ni) bulmak için motor çıkışı basınç ve sıcaklık değerlerindeki yakıt atığının bir mole-ünün hacmi bulunmalıdır. Bundan dolayı motor çıkışındaki basıncı hesaplamak için, yakıt atığının ısı-salmaz bir uzanım olduğu varsayılarak yakıt atığı boyunca basınç dağılımının bulunması gerekmektedir. Buradaki varsayım gerçekçi bir yaklaşımdır, çünkü basınç değişimi doğası gereği sıcaklık değişiminden çok daha fazladır. Bu yaklaşımın fiziksel olarak tutarlı olmasına karşın, basınç değişiminin hesaplanamaması sebebiyle elektron yoğunluğunun basınçtaki değişimlerden etkilenmediği varsayılarak problem kolaylaştırılmaktadır. Bu nedenle yaklaşımdaki elektron yoğunluğunun sadece elektron-iyon birleşimine dayandığı varsayılmaktadır. Bu durumda egzoz çıkışındaki birlesme etkisinin elektron yoğunluğu, ihmal edilebildiği mesafelerdekine eşit varsayılmıştır. Başka bir ifadeyle egzoz çıkışındaki basınç, atmosferik basınca eşit kabul edilerek elektron yoğunluğu hesaplanmaktadır. Bu varsayımın elektron yoğunluğunda bir azımsamaya sebep olmasına karşın hesaplamalarda büyük bir sorun teşkil etmeyeceği değerlendirilmektedir.

Lüle çıkışındaki sıcaklığın yaklaşık 2000 K, basınç değerinin ise 1023 mPa olduğu varsayılıp ideal gaz denklemi uygulanırsa hacim değerine ulaşılabilir:

V=nRT/P=16.22.10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> (R: gaz sabiti değeri 8.314472 J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup> olarak alınmıştır.)

Birim hacimdeki elektron yoğunluğu bu durumda;

$$n_i = \frac{N_e}{V} \cong 10^{11} \,\mathrm{cm}^{-3}$$
 (5.4)

olarak hesaplanır.

### 5.2. Elektron Yoğunluğu Hesabı

Şekil 5-1'de referans sistem merkezinin, roket egzoz çıkışının merkezine yerleştirildiği ve x koordinat düzleminin roket ekseni ile kesiştiği durum göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 5-1: Model Geometrisi

X ekseni boyunca, elektron yoğunluğunun roket yarıçapı D'ye eşit yarıçapta dairesel bir düzlemde düzgün dağıldığı varsayılırsa, elektron yoğunluğunun boyut ve zaman değişimini tanımlayan,  $n_e(t,x)$ , diferansiyel eşitlik [12];

$$\frac{dn_{e}(t,x)}{dt} + \alpha n_{e}^{2}(t,x) = q(t,x)$$
(5.5)

şeklinde tanımlanabilir.

Eşitlik(5.5)'te yer alan ifadeler;

- q(t,x) x ekseni için itki gücünü,
- n<sub>e</sub>(t,x) elektron yoğunluğunu,
- α birleşim faktörünü

#### tanımlar.

İtki gücü olmadığı zaman (q(t,x)=0 durumunda), Eşitlik (5.5) plazmalarda elektron birleşim kanununu tanımlayan denklemdir. Elektron yoğunluğu, n<sub>e</sub>(t,x),  $\tau=x/v$ saniye sonra (v: elektron yayılım hızı) sıfırdan farklı bir değerdedir.  $\tau$  süresi elektronların x gibi bir noktaya gelmesi için geçen süredir. Kolay anlaşılır olması için x-ekseni M tane alt kümeye bölünmüş kabul edilmektedir.

$$x_m = m \Delta x \text{ ve } m = 0, 1, 2, ... M-1$$

L= M  $\Delta x$  ifadesi egzoz gazının boyunu vermektedir. n<sub>e</sub>(t,x<sub>m</sub>)= n<sub>e,m</sub>(t) olarak ifade edilirse m-inci hücrenin elektron yoğunluğu için denge durumunu tanımlayan diferansiyel eşitlik;

$$\frac{dn_{e,m}(t)}{dt} + \alpha n_{e,m}^{2}(t) = q(t, x_{m})$$
(5.6)

halini alır.

Bu durumda;  $t < \tau_m = x_m/v$  süresince  $n_{e,m}(t) = 0$  olur. Eşitlik (5.6)'nın daha iyi açıklanabilmesi için itki gücünün,  $q(t,x_m)$ , ve birleşme katsayısının,  $\alpha$ , tanımlanması gerekmektedir.

q(t,x<sub>m</sub>), x ekseni boyunca elektron yoğunluğundaki elektron yayılımından kaynaklanan değişimleri açıklamak için kullanılmaktadır. Hatta kütlenin korunumu kanununu herhangi bir m-inci hücre için uygulanırsa hücreye gelen elektron sayısının hücreden çıkan elektron sayısına eşit olduğunun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Birim zamanda elektron yoğunluğundaki değişimlerin hesaplanması için Şekil 5-2'deki senaryo kullanılabilir;



Şekil 5-2: Alt-hücreler Arası Denge Durumu

Öncelikle m. ve (m+1). hücreler arasındaki arayüz incelenecektir. İki hücre arasındaki D yarıçaplı arayüz silindirinin birim hacmi  $\delta V$  ve birim yüksekliği  $\delta x$ 

kabul edilmektedir. Elektron yoğunluğunun zamanla değişmediği varsayılırsa  $\delta t$ birim zaman olmak üzere, birim yüksekliği  $\delta x=v$ .  $\delta t$  olarak tanımlanabilir. Bu durumda hacim  $\delta V$ ;

$$\delta V = \frac{\pi D^2}{4} v \delta t \tag{5.7}$$

eşitliği ile hesaplanır.

Birim zaman aralığında,  $\delta t$ , m-inci hücreyi terk edip (m+1). hücreye giren elektronların sayısı;

$$N_{e,m\to m+1}(t) = n_{e,m}(t) \frac{\pi D^2}{4} v \,\delta t$$
(5.8)

eşitliği ile bulunur.

Hücredeki elektron yoğunluğu değişimini belirlemek için m. hücreden ayrılan elektron sayısı şunları sağlamalıdır [12]:

1. 
$$V = \frac{\pi D^2}{4} \Delta x$$
 olan hücre hacmine bölünür;

2. birim zaman aralığına bölüp δt sıfıra giderken limiti alınırsa;

$$\frac{d}{dt}[n_{e,m\to m+1}(t)] = \lim_{\delta t\to 0} \frac{1}{\delta t V} N_{e,m}(t) = \frac{V}{\Delta x} n_{e,m}(t)$$
(5.9)

(m-1). hücreden çıkıp m-inci hücreye giren elektronların sayısı birbirlerine eşittir. Buradaki tek istisnai durum t anında (m-1). hücre için elektron yoğunluğudur.

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}[\mathbf{n}_{\mathrm{e},\mathrm{m-1}\to\mathrm{m}}(t)] = \frac{\mathrm{v}}{\Delta x} \mathbf{n}_{\mathrm{e},\mathrm{m-1}}(t)$$
(5.10)

Bu yüzden itki kuvveti q(t,x<sub>m</sub>);

$$q(t, x_{m}) = \frac{v}{\Delta x} \Big[ n_{e,m-1}(t) - n_{e,m}(t) \Big]$$
(5.11)

şeklinde yazılabilir.

Eşitlik (5.6) ile (5.11) birleştirilirse eşitlik (5.12)'de verilen m-inci hücre için elektron yoğunluk dengesi kanununu tanımlayan diferansiyel eşitlik;

$$\frac{dn_{e,m}(t)}{dt} + \alpha n_{e,m}^{2}(t) + \frac{v}{\Delta x} n_{e,m}(t) = \frac{v}{\Delta x} n_{e,m-1}(t)$$
(5.12)

elde edilir.

 $t < \tau_m = x_m/v$  durumunda  $n_{e,m}(t) = 0$ 'dır.

Doğrusal olmayan diferansiyel eşitliğin, Eşitlik (5.12)'nin, zamanla değişen katsayıları, çözümü tekrarlayan nümerik hesaplamalar ile bulunabilir. Özellikle ilk hücre (m=0) ele alınırsa şu diferansiyel eşitliğin çözülmesi gerekmektedir:

$$\frac{dn_{e,0}(t)}{dt} + \alpha n_{e,0}^{2}(t) + \frac{v}{\Delta x} n_{e,0}(t) = \frac{v}{\Delta x} n_{i}$$
(5.13)

t<0 durumu için  $n_{e,0}(t)=0$ 'dır.

Başlangıç yoğunluk değeri, n<sub>i</sub>, Eşitlik (5.4)'te verilmiştir. İkinci hücrede diferansiyel eşitliğin çözümü ise şöyledir;

$$\frac{dn_{e,1}(t)}{dt} + \alpha n_{e,1}^{2}(t) + \frac{v}{\Delta x} n_{e,1}(t) = \frac{v}{\Delta x} n_{e,0}(t)$$
(5.14)

 $t < \tau_1 = x_1/v$  durumu için  $n_{e,1}(t) = 0$ 'dır.

Bu yöntem ardışık olarak diğer hücreler için de tekrarlanmaktadır.

Eşitlik (5.12)'yi çözmek için üç adet parametrenin tanımlanması gerekmektedir;

- 1. Elektron yayılım hızı, v,
- 2. Hücre uzunluğu,  $\Delta x$ ,
- 3. Birleşim katsayısı, α.

Elektron yayılım hızı roket itki sistemine bağlı bir parametredir ve her roket konfigürasyonu için ayrı değerlendirilmelidir. Hücre uzunluğuyla ilgili sorunsa xeksenindeki hataları azaltmak için  $\Delta x'$ i sıfıra yakın bir değer olarak alınmasıdır. Bununla birlikte Eşitlik(5.12)'deki diferansiyel denklemin geçerliliği nötrlük durumu ile sınırlıdır. Hücreye ilişkin minimum boyutun,  $\Delta x$ , Debye<sup>2</sup> yarıçapından (r<sub>d</sub>) daha büyük veya eşit olması gerekmektedir [12];

$$\Delta x \ge r_{\rm d} = 6.8678 \sqrt{\frac{T_{\rm e}}{\rm N}}$$
(5.15)

Hücre için seçilebilecek boyutun olabildiğince küçük fakat Debye yarıçapından büyük veya eşit olması gerekliliğini ortaya koyar. Yani hücre boyutunun ideal değeri Debye yarıçapıdır.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Debye: Maddeler içerisindeki atomik titreşimlerin ısıl kapasiteye katkısını açıklayan bir olgudur.

Eşitlik (5.15)'te T<sub>e</sub> ilgili hücredeki sıcaklık değeri, N ise ilgili hücredeki elektron yoğunluğudur.

Birleşme katsayısı, aşağıdaki eşitlikte verildiği üzere elektron sıcaklığına ve yoğunluğuna bağlıdır [12].

$$\alpha = \frac{10^{-25}}{T_e^{4.5}} n_e(t)$$
(5.16)

Eşitlik (5.16) birleşme katsayısıyla ilgili olarak şunları ifade eder;

- 1. Elektron yoğunluğu arttıkça birleşme katsayısı artar. (Daha fazla elektron daha fazla birleşme anlamına gelir.)
- 2. Sıcaklık arttıkça birleşme katsayısı azalır.

Sıcaklığın artması, iyonların birbiriyle etkileşimini engeller ve parçacıkların kinetik enerjilerinin artmasına sebep olur. Böylece iyon-elektron birleşimi azalır. Eşitlik (5.16) Eşitlik (5.12)'yle birleştirilirse [12];

$$\frac{dn_{e,m}(t)}{dt} + \frac{10^{-25}}{T_e(m)} n_{e,m}^{3}(t) + \frac{v}{\Delta x} n_{e,m}(t) = \frac{v}{\Delta x} n_{e,m-1}(t)$$
(5.17)

ifadesi elde edilir.

Eşitlik (5.17)'deki T<sub>e</sub>(m) fonksiyonu x-ekseni boyunca uzanan hücrelerdeki sıcaklık profilini tanımlamaktadır. Böylece tanımlı bir sıcaklık profili ve egzoz çıkışı elektron dağılımı bilgisiyle katmanlara ilişkin elektron yoğunluk dağılımları tanımlanabilmektedir.

Bu bilgiler ışığında Şekil 5-3'te verilen sıcaklık dağılımına sahip bir egzoz gazı yapısı için elektron yoğunluk dağılımı hesaplanmıştır. Hesaplanan lüleden uzaklık ile elektron yoğunluk dağılımı değişimi, Şekil 5-4'te verilmiştir.

Hesaplamalarda çıkış düzlemi elektron yoğunluğu Eşitlik (5.4)'te verildiği şekilde 10<sup>11</sup> cm<sup>-3</sup> (10<sup>17</sup> m<sup>-3</sup>), elektron yayılım hızı ise 100 m/s olarak alınmıştır.



Şekil 5-4: Elektron Yoğunluğu Dağılımı

Burada plazma yapılarının elektromanyetik dalgaya etkilerini belirlemede en önemli parametrelerden biri olan elektron yoğunluk dağılımı tanımlanmıştır. Şekillerden elektron yoğunluk dağılımının sıcaklık dağılımına göre farklılık gösterdiği gözlenmektedir.

### 6. ELEKTRON YOĞUNLUĞU ETKİLERİ

Elektromanyetik dalgalara yüksek elektron yoğunluklu yapıların etkilerini belirleyebilmek amacıyla yüksek elektron yoğunluğuna sahip iyonosfer katmanlarında yer alan uydularla yer istasyonları arasında haberleşme amacıyla kullanılan elektromanyetik dalgaların iyonosferdeki etkileşimleri incelenmiştir. Radyo dalgasına iyonosferik etkiler, frekansın artmasıyla azalır.

Yayılan bir elektromanyetik dalgaya elektron yoğunluğu yüksek yapılardan kaynaklanan etkiler; polarizasyon dönüşü (Faraday rotasyonu), yayılım gecikmesi, geliş yönünün değişimi, yayılma, soğurma ve frekans değişimi şeklinde sıralanabilir [13].

Faraday Rotasyonu, dünyanın manyetik alanının varlığından dolayı elektronlar ile elektromanyetik dalgaların etkileşimi sonucu dalga polarizasyonunda gerçekleşen rotasyondur. Dairesel polarizasyon kullanılan sistemler için Faraday rotasyonu sorun teşkil etmemektedir.

Yayılım gecikmesi, yayılım yolunda serbest elektronların varlığı sebebiyle elektromanyetik dalganın yayılım hızının azalmasıdır. Grup gecikmesi olarak da isimlendirilmektedir. Plazma yapısında ilerleyen bir elektromanyetik dalganın grup hızındaki yavaşlama, serbest uzayda gözlenenden daha uzun bir yayılım zamanına sebep olur. Bu etki, başarılı bir performans için hassas bir mesafe bilgisi ve yayılım zamanı gerektiren uygulamalar için çok kritiktir.

Geliş açısındaki değişimler, iletim yolunda refraktif indis değişimlerinden kaynaklanır. Geliş açısı değişimleri, kırılım olgusuyla ilişkili olup 10 GHz'in altındaki frekanslarda genellikle küçük açıklıklı antenler ile bu etki gözlenebilir.

Çok yolluluk, iletilen sinyalin alıcı antene iki veya daha fazla yayılım yolu izleyerek ulaşması ile oluşur. İki veya daha fazla sinyalin izledikleri yollardan kaynaklanan faz farkı sinyallerin birbirlerine bozucu etki yapmalarına sebep olabilir. Çok yolluluk, plazma yapısındaki refraktif indis düzensizliklerinden ortaya çıkar.

Eş-evreli bant genişliği, radyo dalgalarının destekleyebileceği kanal kapasitesi veya bilgi bant genişliğinin üst limitidir. Yayılım ortamının dağıtıcı özellikleri sebebiyle oluşur. Tipik uydu haberleşme frekanslarında eş-evreli bant genişliği 1

GHz seviyelerindedir. Bu durum 1 GHz'in üzerinde bir bant genişliğinde haberleşme yapılamayacağı anlamına gelmektedir.

Soğurma, enerjinin tekrar dönüştürülemeyecek şekilde radyo dalgasından yayılım yolundaki maddeye dönüştürülmesi sebebiyle elektromanyetik dalganın genliğindeki (veya alan şiddetindeki) azalmadır.

Tüm bu etkiler frekansın karesiyle ters orantılı olarak azalma eğilimindedir. Özelikle 10 GHz'in altındaki frekansların kullanıldığı haberleşme sistemlerinde ihmal edilmemesi gereken olgulardır. 10 GHz'in üzerinde ise bu etkiler, diğer sistem hata bütçeleriyle kıyaslandığında ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır.

### 6.1. Dünyanın Manyetik Alanı

Dünyanın manyetik alanı, yaklaşık olarak dönme eksenine göre 12 derece eğimli, dünya merkezinden uzaklaştıkça uzaklığın küpüyle azalan bir alana sahip manyetik dipol özelliği gösterir. Şekil 6-1'de manyetik momenti M=7.95x10<sup>25</sup> gauss cm<sup>3</sup> olan dünya merkezli dipol varsayımı ile yükseklik ve dipol enlemi fonksiyonu olarak dünyanın manyetik alan şiddeti değerleri verilmiştir.



Şekil 6-1: Dipol Modeli ile Yerin Manyetik Alanı Değerleri [14]

Telemetri linkinin kurulacağı Türkiye'nin dünya üzerindeki konumu doğrultusunda elektronların maruz kalacağı manyetik alan yaklaşık 0.46 Gauss (4.6 x 10<sup>-3</sup> Wb/m<sup>3</sup>) olarak belirlenmiştir.

Dünyanın manyetik alanının anizotropik hale getirmesi sebebiyle iyonosfer, plazma özelliği gösterir. Bu tür ortamların tipik tepkilerinden olan polarizasyon dönüşü etkisi dalganın polarizasyon karakteristiğinde bir değişime sebep olacak ve sistem link bütçesine etkiyecektir.

#### 6.2. Kırılım İndisi

Bir elektromanyetik dalganın kırılım indisi, n, elektromanyetik dalganın boşluktaki hızının, c, belirtilen bölgedeki hızına oranıdır.

Bir elektromanyetik dalganın faz sabiti,  $\beta$ , aşağıdaki gibi kullanılırsa mesafeye göre elektromanyetik dalganın fazındaki kayma elde edilir.

$$\mathsf{E}=\mathsf{E}_0 \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\beta z} \tag{6.2}$$

Yukarıdaki eşitlik dalganın z yönünde yayıldığı ve z=0 noktasında  $E_0$  gibi bir elektrik alan şiddetine sahip olduğu durum için tanımlanmıştır. Faz sabiti,  $\beta$ , birçok eşitlikle ifade edilebilir;

$$\beta = 2\pi / \lambda = w / v_p = \beta_0 n \tag{6.3}$$

Eşitlikteki  $\lambda$  dalgaboyu,  $\beta_0$  ise boş uzayın faz sabitidir.

Sol ve sağ dairesel polarize dalgalar farklı kırılım indislerine sahiptir. Kırılım indisleri yazılacak olursa;

$$n_{1} = \left[1 - \frac{f_{p}^{2}}{f(f + f_{B})}\right]^{1/2}$$
(6.4)

$$n_{r} = \left[1 - \frac{f_{p}^{2}}{f(f - f_{B})}\right]^{1/2}$$
(6.5)

elde edilir [14]. Eşitliklerdeki f<sub>B</sub> plazma içerisindeki elektronların dönme frekansını tanımlamaktadır. f<sub>B</sub> =–eB/2 $\pi$ m değerine eşittir. B elektronların maruz kaldığı manyetik alandır.

Elektron yoğunluk dağılımının incelendiği Bölüm 5'te tanımlanan elektron dağılımına sahip bir egzoz gazı konfigürasyonu için bu değerler hesaplanmış ve değişim grafiği Şekil 6-2'de verilmiştir.



Şekil 6-2: Paralel Yayılım için Kırılım İndisi Değerleri

Grafikte kırılım indisi değerinin belirli bir süre sıfır olduğu görülmektedir. Bu durum kırılım indisi değerinin reel kısmının olmadığı, sanal kısmının ise ihmal edildiği kısımdır. Kırılım indisinin sanal değerler alması gelen sinyalin yansımaya maruz kalacağı anlamına gelmektedir.

#### 6.3. QL (Sözde Boylamsal – Quasilongitudinal) Yaklaşımı

Yayılım, dünyanın manyetik alanına göre  $\theta_B$  değerli herhangi bir açıda oluşabilir ve genel durum için analizler, paralel veya dik yayılımdan çok daha karmaşıktır. Durumu kolaylaştırmak için QL yaklaşımı uygulanabilir. Bu yaklaşımı tanımlamak için,  $w_p^2/w^2$  ifadesi X,  $w_B^2/w^2$  ifadesi Y olarak ifade edilmektedir.

Bu ifadeler kullanılırsa Eşitlik (6.4) ve Eşitlik (6.5) aşağıdaki hali alırlar;

$$n_1^2 = K_1 = 1 - X(1 + Y)$$
  
 $n_r^2 = K_r = 1 - X(1 - Y)$ 

Ayrıca  $Y cos \theta_B$ ,  $Y_L$  olarak,  $Y sin \theta_B$ ,  $Y_T$  olarak tanımlanarak QL yaklaşımı uygulanırsa;

$$4(1 - X)^2 Y^2 >> Y_T^2$$

elde edilir.

Bu yaklaşım uygulandığında manyetik alana göre  $\theta_B$  açısıyla yayılan dalgalar dairesel polarizedir ve bu durum  $\theta_B=0$  için de geçerlidir. Ve kırılım indisleri;

$$n_1^2 = K_1 = 1 - X(1 + Y_L)$$
  
 $n_r^2 = K_r = 1 - X(1 - Y_L)$ 

şeklinde ifade edilebilir [14].

## 6.4. Radyo Dalgaları Elektron Etkileşimleri

Toplam elektron içeriğinin radyo dalgaları üzerine etkileri; Faraday rotasyonu, grup gecikmesi, yayılma (dispersion), Doppler kayması, geliş yönündeki değişim ve soğurmadır.

QL yaklaşımında tanımlanan X değeri, uygulanma durumunu belirlemede önemli bir faktördür ve yüksek elektron içeriğine sahip plazma yapıları için  $X=w_p^2/w^2$ olarak tanımlanmaktadır. Mikrodalga haberleşmede w çok büyük değerler almaktadır. Bu yüzden X çok küçük bir değere sahiptir. Böylece  $\theta_B$ 'nin büyük değerleri için QL yaklaşımı uygulanabilir olmaktadır. Ayrıca Eşitlik (6.4) ve Eşitlik (6.5) incelendiğinde, w'nın büyük değerleri için n<sub>l</sub> ve n<sub>r</sub> birden çok az küçük değerlere sahip olacaklardır. Bu değerler w arttıkça bire ve birbirlerine daha da yaklaşacaklardır (Şekil 6-2).

# 6.4.1. Faraday Rotasyonu ve Polarizasyon

Yüksek frekanslı doğrusal polarize bir dalganın yüksek elektron yoğunluklu bir yapıda yayılımı analiz edildiğinde, polarizasyon düzleminin döndüğü, örneğin dikey polarize bir dalganın dikey kalmamakta olduğu, gözlenmektedir [13]. Frekansa, plazma yapısındaki yayılım yolu uzunluğuna ve dünyanın manyetik alanına göre yönelimine bağlı olarak polarizasyon dönüş miktarı değişim gösterebilir. Böyle bir dönmenin temeli, Faraday rotasyonu olarak isimlendirilen, farklı kırılım indislerine sahip sol ve sağ dairesel polarize bileşenlerden meydana gelen doğrusal polarize dalgadır. Şekil 6-3 bu durumu görselleştirmek için kullanılmıştır.

Dairesel polarize dalgalar kullanılan haberleşme sistemleri için Faraday rotasyonu sorun teşkil etmez. Buna karşın doğrusal polarize dalgalar Faraday rotasyonuna maruz kalır ve bu etki onlar için kötü sonuçlara sebep olabilir. Şekil 6-3'te  $E_1$  ve  $E_r$ , sol ve sağ dairesel polarize dalgaların elektrik alan şiddeti vektörleri olarak tanımlanmaktadır. Sayfa düzleminin dışına doğru, z yönünde, yayılım için  $E_1$  ve  $E_r$  için rotasyonu göstermek için küçük yardımcı oklar kullanılmıştır.  $E_1$  ve  $E_r$ , x-yönünde elektrik alan şiddetine sahip doğrusal polarize dalganın dairesel polarize bileşenleridir. Şekil 6-3 (a)  $E_1$  ve  $E_r$ , 'nin her ikisinin de x-ekseni üzerinde uzandığı anı ve Şekil 6-3 (b) daha sonraki bir anı göstermektedir.



Şekil 6-3: Dairesel Polarize Dalgaların Doğrusal Polarize Dalga Oluşturması

Şekilden, iki vektör döndükçe y-ekseni üzerindeki izdüşümlerinin birbirlerini yok ettikleri ve x-ekseni üzerindeki izdüşümlerinin her zaman x-ekseni boyunca uzanan elektrik alan genliğinde sinüssel toplam olarak değişimlere sebep olduğu gözlenmektedir.

E<sub>1</sub> ve E<sub>r</sub> vektörleri z – yönünde yayıldığı için, kendi yönlerinde w açısal hızıyla dönmeye devam ederler, fakat dönmenin fazı  $e^{-j\beta_1^z}$  ve  $e^{-j\beta_r^z}$  faktörlerine bağlı olarak kayar. n<sub>1</sub> ve n<sub>r</sub> kırılım indisleri farklı değerlere sahiptirler ve bu nedenle  $\beta_1$  ve  $\beta_r$ 'nin farklı değerleri vardır. Bu yüzden z gibi bir mesafe yayıldıktan sonra dönüşler xekseni doğrultusunda artık simetrik değildir ve E alan şiddeti daha fazla x-ekseni boyunca uzanmaz. Fakat düzgün dağılımlı plazma yapıları için orjinal xekseninden  $\phi$  gibi bir açıda bu durum tekrar sağlanır;

$$\phi = (\beta_1 z - \beta_r z) / 2 \tag{6.6}$$

Daha genel olarak  $\phi = \int (\beta_1 - \beta_r) / 2 dz$  'dir ve buradaki  $\beta_1$  ve  $\beta_r$  yol boyunca pozisyonun fonksiyonlarıdır. Şekil 6-4'te z kadar bir mesafe yayıldıktan sonra elektrik alanın  $\phi$  kadar bir açıyla sağ dairesel yönde kaymış olması durumu gösterilmektedir.



Şekil 6-4: Faraday Rotasyonu

QL yaklaşımı kullanılarak dünyanın manyetik alanına göre  $\theta_B$  açısıyla yayılım incelenirse, yeterince yüksek frekanslar için dönüşün hesaplanması şu şekilde kolaylaştırılabilmektedir;

$$\frac{\beta_{o}(n_{1}-n_{r})}{2} = \frac{\beta_{o}}{2} \left[ \left\{ 1 - \frac{X}{1+Y_{L}} \right\}^{1/2} - \left\{ 1 - \frac{X}{1-Y_{L}} \right\}^{1/2} \right]$$

$$\approx \frac{\beta_{o}}{2} \left[ 1 - \frac{X}{2(1+Y_{L})} - 1 + \frac{X}{2(1-Y_{L})} \right] = \frac{\beta_{o}}{2} XY_{L}$$
(6.7)

Elektron yoğunluğu ve yol boyunca manyetik alan genellikle düzgün olmayacaktır. Fakat toplam dönüş, önce yol uzunluğu artışındaki, *dl*, diferansiyel dönüşü,  $d\phi$ , tanımlayıp daha sonra yol boyunca integrali alınarak belirlenebilir. Böylece şu eşitlik elde edilir;

$$d\phi = (\beta_0/2) X Y_L dI rad$$
(6.8)

ve X ve  $Y_{L}$  için eşitlikler kullanılarak yol boyunca toplam dönüş bulunacak olunursa;

$$\phi = \frac{e^3}{2c\varepsilon_0 m^2 w^2} \int NB \cos \theta_B dl rad$$
(6.9)

elde edilir [15, 16].

Eşitlikte elektrik yükü e=1.6002x10<sup>-19</sup> C, elektron kütlesi m=9.1096x10<sup>-31</sup> kg, ışık hızı c=3x10<sup>8</sup> m/s, serbest uzay geçirgenliği  $\varepsilon_0$ =8.854x10<sup>-12</sup> F/m ve çalışma frekansı w=2 $\pi$ f'tir. f frekans (Hz), N elektron/m<sup>3</sup> ve B dünyanın manyetik alanı (Wb/m<sup>3</sup>) olmak üzere;

$$\phi = \frac{2.36 \times 10^4}{f^2} \int NB \cos \theta_B dl rad$$
(6.10)

şeklinde yazılabilir.

Eşitlik (6.10)'da toplam dönüşün, frekansın karesi ile ters orantılı olarak değiştiği ve yol boyunca  $B\cos\theta_B$  ile ağırlıklandırılmış elektron yoğunluğunun integrali ile orantılı olduğu görülmektedir.  $\chi$  tepe açısı veya dikeyden ölçülen yolun açısı olmak üzere, sec $\chi$  gibi bir faktör de işin içine katılırsa integral işlemi eğik bir yol üzerinden dl=dh dikey yönü ile de gerçekleştirilebilir. B, dünya merkezinden alınan yarıçapın küpüyle ters orantılı değişir.

Eşitlik (6.10)'da B $\cos\theta_B$  yerine B<sub>L</sub> gibi ortalama bir değer koyarak ifade integralin dışına alınabilir.

Bu durumda Faraday rotasyonunu veren eşitlik;

$$\phi = \frac{2.36 \times 10^4}{f^2} B_L \int N dl = \frac{2.36 \times 10^4}{f^2} B_L TEC$$
(6.11)  
halini alır.

Sabit bir yol boyunca yukarıdaki prosedür uygulandığında Faraday rotasyonu değeri, toplam elektron içeriğine bağlıdır. Yani elektromanyetik dalgada meydana gelen polarizasyon değişimini etkileyen parametreler haberleşme frekansı, dalganın yayıldığı yol boyunca etkileşime girdiği toplam elektron içeriği ve elektronlara etkiyen manyetik alandır.

Yerin manyetik alanına bağlı olan B<sub>L</sub> değeri ise Şekil 6-1'de gösterildiği gibi bulunulan konum ve yükseklikle değişim göstermektedir.

Şekil 6-5'de Bölüm 5'te elektron yoğunluk dağılımı verilen egzoz gazı konfigürasyonu için Faraday rotasyonunun lüleden uzaklıkla değişimi verilmektedir.



Şekil 6-5: Egzoz Gazı İçerisinde Faraday Rotasyonu Değişimi

Faraday rotasyonunun belirgin olduğu frekans aralıklarında, doğrusal polarize bir göndermeç anteni ve aynı doğrusal polarizasyona sahip almaç ile haberleşme yapıldığında yüksek seviyede polarizasyondan kaynaklanan bir kayıp görülmesi Faraday rotasyonunun bir sonucudur. Sorunla başa çıkmak için geliştirilen teknikler; Faraday rotasyonunun ihmal edilebileceği kadar yüksek frekanslar kullanmak, polarizasyon kaybının olmayacağı doğrusal polarize sinyallerin her ikisini de alabilecek almaç antenleri kullanmak ve doğrusal yerine dairesel polarize antenler kullanmak olarak sıralanabilir. Dairesel polarize dalgaların bu tür ortamlarda yayıldıklarında polarizasyonlarında bir değişim olmaz.

### 6.4.2. Grup Gecikmesi

Fazlalık grup gecikmesi, fazlalık mesafe gecikmesi olarak da isimlendirilir. Yüksek frekanslarda fazlalık grup gecikmesi incelenirse, n kırılım indisini tanımlamak üzere yol boyunca ∫ndl'i hesaplamak, kırılım indisinin bire eşit olması durumunda gerçek mesafeyi verir. Eğer n birden farklıysa elde edilen yol uzunluğu gerçek mesafeden farklıdır. Gerçek uzunluk R olmak üzere P olarak tanımlanan diğer mesafeyle aradaki fark ∆R;

 $\Delta R = \int (n-1)dl$ eşitliğinden hesaplanabilir.

Kırılım ihmal edilip frekansın da 100 MHz'in üzerinde olduğu varsayılırsa;

$$n^{2} = 1 - X = 1 - \frac{f_{p}^{2}}{f^{2}} = 1 - \frac{80.6N}{f^{2}}$$
eşitliği elde edilir. (6.13)

Eşitlikteki N elektron yoğunluğu (el/m<sup>3</sup>) ve f Hz cinsinden frekanstır. 100 MHz'den büyük frekanslar için X bire göre çok küçük kabul edilirse,

$$n \cong 1 - \frac{X}{2} = 1 - \frac{40.3N}{f^2}$$
 (6.14)  
olur.

Bununla birlikte grup gecikmesi için grup hızı, faz hızından çok daha önemlidir. Yüksek elektron içeriğine sahip yapılarda elektromanyetik dalga yayılımında,  $v_g$  grup hızı,  $v_p$  faz hızı olmak üzere  $v_p>c$  iken  $v_gv_p=c^2$  olduğu için grup kırılım indisi de ( $n_g=1+X/2$ ) kullanılabilmektedir. Sonuçta;

$$\Delta R = \frac{40.3}{f^2} \int Ndl \quad (m)$$
eşitliği elde edilir.
(6.15)

Eşitlik (6.15)'deki  $\Delta R$  fazlalık mesafe gecikmesi olup gerçek mesafe ile c hızı kullanılarak elde edilen mesafe arasındaki farktır. (Gerçek uzaklık bulunandan kısadır.) Eşitlikteki  $\int Ndl$  elektromanyetik dalganın izlediği yol boyunca toplam elektron içeriğidir (TEC). Fazlalık mesafe gecikmesi,  $\Delta R$ , zamanda hata yapılmasına sebep olur ve fazlalık zaman gecikmesi ile doğrudan ilişkilidir. Aşağıdaki eşitlikte fazlalık zaman gecikmesi tanımlanmıştır [15, 16];

$$\Delta t = \frac{40.3}{cf^2} \int Ndl = \frac{1.34 \times 10^{-7}}{f^2} TEC \ (s)$$
(6.16)

Şekil 6-6'da Bölüm 5'te verilen egzoz gazı içerisindeki elektron yoğunluk dağılımı bilgisi kullanılarak egzoz gazı boyunca RF sinyalin maruz kalacağı grup gecikmesi hesaplanmıştır.



Şekil 6-6: Egzoz Gazı İçerisinde Grup Gecikmesi

Şekil 6-6'da hesaplanan grup gecikmesi değerleri RF sinyalin bulunduğu noktanın etkisi olup RF sinyalin kat ettiği her nokta için bu gecikme değerleri toplanarak etkimektedir.

### 6.4.3. Faz Değişimi

Yüksek yoğunluklu elektron içeren yapılarının varlığı, iyonize olmayan ortamdan alınan sinyale göre fazda,  $\phi$ , bir değişime sebep olacaktır. Faz kayması,  $\Delta \phi$ , Eşitlik (6.15)'de verilen fazlalık mesafe gecikmesi,  $\Delta R$ , ile faz sabiti,  $\beta = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$ , çarpılarak bulunur;

$$\Delta R = \frac{40.3}{f^2} TEC$$

$$\Delta \phi = \frac{40.3(2\pi f)}{f^2 c} \text{TEC} = \frac{8.44 \times 10^{-7}}{f} \text{TEC (rad)}$$
(6.17)

sonucu elde edilir [14].



Şekil 6-7: Faz Kayması Lüleden Uzaklık Değişimi

Şekil 6-7'de Bölüm 5'te tanımlanan elektron yoğunluk dağılımına sahip egzoz gazıyla etkileşime giren RF sinyalde gerçekleşen faz kayması lüleden uzaklıkla değişimine göre incelenmiştir. Grafikte verilen faz değişimi elektromanyetik dalganın o an bulunduğu nokta için olup dalganın izlediği yol boyunca bütün etkilerin toplanması gerekmektedir.

### 6.4.4. Doppler Kayması

Yüksek yoğunluklu elektron içeren yapılarda yayılan elektromanyetik dalgada meydana gelen Doppler kayması, diğer etkilere göre daha küçük bir etkidir. TEC ile ilişkisi aşağıdaki formülasyon ile bulunur.

Frekans ve faz arasındaki ilişki;

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$$
(6.18)

şeklinde tanımlanabilir.

Frekansın birimi Hz, fazınki ise radyandır. Frekanstaki Doppler kayması, f<sub>D</sub>, Eşitlik (6.17)'deki faz değişimlerine karşılık gelir. Doppler kayması ise,

$$f_{\rm D} = \frac{1.34 \times 10^{-7}}{f} \frac{\Delta (\rm TEC)}{T_{\rm C}}$$
(6.19)

şeklinde ifade edilir [14].

### 6.4.5. Bant Genişliği Evre-uyumluluğu ve Yayılma

Bir elektromanyetik dalga büyük bir bant genişliği ile yüksek elektron yoğunluklu bir yapı boyunca yayılırsa, frekansın fonksiyonu olan yayılım gecikmesi yayılmaya (dispersion) maruz kalır. Frekansla zaman gecikmesi değişimi hızı veya zaman gecikmesi yayılması, Eşitlik (6.16)'nın türevi alınarak bulunur;



Şekil 6-8: Lüleden Uzaklıkla Zaman Gecikmesi Yayılımı Değişimi

Şekil 6-8'de Bölüm 5'te tanımlanan elektron yoğunluk dağılımına sahip egzoz gazı için gerçekleşen zaman gecikmesi yayılımı verilmiştir. Grafikte y – ekseninin negatif değerler alması zamanda gecikmeyi ifade etmektedir.

Frekansla faz açısının değişim hızı veya faz yayılması, Eşitlik (6.17)'nin türevi alınarak bulunabilir;

$$\frac{d\phi}{df} = \frac{-8.44 \times 10^{-7}}{f^2} \text{TEC}$$
(6.21)

Eşitlikten frekans arttıkça veya darbe genişliği azaldıkça gecikmenin azaldığı bilgisi elde edilir. Bu nedenle bant genişliği boyunca diferansiyel gecikme, yol boyunca TEC ile doğru orantılı ve frekansın küpüyle ters orantılıdır.

Yayılma etkisi, geniş bant haberleşmede semboller arası girişime sebep olarak sinyallerde bozulmaya sebep olur.



Şekil 6-9: Lüleden Uzaklıkla Faz Yayılması Değişimi

Şekil 6-9'da Bölüm 5'te tanımlanan elektron yoğunluk dağılımına sahip egzoz gazı içerisinde oluşan faz yayılması değişimi verilmiştir. Egzoz gazındaki toplam elektron içeriğinin sıfırlandığı noktada faz yayılmasının da ortadan kalktığı görülmektedir.

#### 6.4.6. Soğurma

Yüksek elektron yoğunluklu yapılarda yayılan elektromanyetik dalgalar, sönümlendirici bir etkiye maruz kalırlar. Bu etki, frekansın azalmasıyla daha da önem kazanmaktadır. Soğurmanın asıl sebebi serbest elektronların nötral atom ve moleküllerle çarpışmasıdır.  $e^{-\alpha z}$  ile uyumlu olarak mesafe ile elektrik alan şiddetindeki azalma hızını belirleyen zayıflama katsayısı,  $\alpha$ , şu şekilde ifade edilebilir [14];

$$\alpha = \frac{Ne^2 v}{2m\epsilon_0 n_r c w^2} \text{ Nepers / m}$$
(6.22)

Eşitlikte;

n<sub>r</sub>: kırılım indisinin gerçek kısmını

v: Hz cinsinden moleküller arası çarpışma frekansını

tanımlamaktadır.

Kırılım indisi kompleks bir hal aldığında zayıflama gerçekleşir ve elektron yoğunluğu ile çarpışma frekansının bir fonksiyonu olur. Kırılım indisinin gerçek kısmının değeri, n<sub>r</sub>, toplam elektron içeriği ve çarpışma frekansı değerlerinin tahminine göre tam olarak hesaplanabilir.

Haberleşmede kullanılan frekanslar yeterince yüksek seçildiğinde zayıflama, frekansın karesiyle ters orantılı değiştiğinden n<sub>r</sub> kayıpsız durumla aynı değere sahip olur ve bire yaklaşır.

### 7. EGZOZ GAZI RF SİNYAL ETKİLEŞİMİ

Çalışmanın bu kısmında öncelikle belirli bir motor konfigürasyonu ve yakıt karışımından meydana gelen egzoz gazından kaynaklanan mikrodalga zayıflamayı hesaplamak amacıyla, serbest elektronlar ve moleküller arasında gerçekleşen çarpışmaları da göz önünde bulundurarak elektromanyetik dalganın maruz kaldığı zayıflamayı hesaplayan bir yöntem özetlenmektedir. Özetlenen yöntem belirli bir egzoz gazı yapısından kaynaklanan zayıflamayı hesaplamak için kullanılmıştır.

Daha sonra aynı egzoz gazı için Bölüm 4.2'de tanımlanan, plazmaya ilişkin elektrik geçirgenlik ve iletkenlik sabitleri hesaplanarak CST isimli elektromanyetik analiz yazılımında egzoz gazı modellenerek sebep olacağı zayıflatma etkisi hesaplanmıştır.

İki yöntemle elde edilen zayıflama değerleri karşılaştırılmıştır. Buna ilaveten iyonize gazlar yaklaşımı ile elektromanyetik dalga davranışı tahminleri yapılmış ve bu tahminlerin diğer yöntemlerde elde edilen sonuçlarla benzerliği incelenmiştir.

### 7.1. Egzoz Gazı Yapısı

Egzoz gazından kaynaklanan zayıflamayı hesaplayabilmek için öncelikle gaz yapısı hakkında bilgiye sahip olmamız gerekmektedir. Egzoz gazı farklı katmanların birleşiminden meydana gelmektedir. Bu katmanların her birinin kendi içerisinde aynı miktarda elektron yoğunluğu ve yakıt atığı molekülleri dağılımına sahip olduğu kabul edilmektedir. Yani her katman kendi başına farklı bir plazma özelliği göstermektedir. Buna ilaveten bir katman içerisinde sıcaklık değeri de ilgili katman içerisinde tanımlanan tüm noktalarda aynı değere sahiptir [15].

Gaz fazındaki nötral içerikler arası çarpışma frekansı, zayıflamanın hesaplanabilmesi için önemli bir parametredir. Bu bilgiyi türetmek için egzoz gazı içerisindeki sıcaklık dağılımı, molekül çeşitleri, molekül dağılımları ve molekül çarpışma kesit alanları bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır [16].

Şekil 7-1'de iki boyutta egzoz gazı yapısı gösterilmektedir. Burada verilen yapı doğrultusunda, esas yapının üç boyutta düşünülmesi gerekmektedir.



Şekil 7-1 : Plume Yapısı

#### 7.2. Çarpışma Frekansı

Zayıflamayı hesaplamak için gerekli temel parametrelerden birisi de elektron ve gaz fazındaki nötral içerikler arası çarpışma frekansıdır.

Egzoz gazı, tüm yapı düşünüldüğünde düzenli bir dağılıma sahip değildir. Molekül bileşenleri miktarları ve sıcaklık hem radyal hem de eksenel düzlemde değiştiği için elektron dağılımı ve çarpışma frekansı plazma içerisindeki pozisyon değişimi ile farklılık gösterir. Egzoz gazının karışım bölgesinde gerçekleşen ve tali yanış sürecinde gerçekleşen olgular çarpışma frekansına etkiyen parametrelerdir.

Genellikle çarpışma frekansına en çok su (H<sub>2</sub>O) katkıda bulunur, buna karşın diğer içeriklerin etkisi de ihmal edilemez. Sadece su buharının kullanılması, tahmin edilen çarpışma frekansı değerinde yüksek miktarda hataya sebep olur. Yükseklikteki artış, basıncın ve sıcaklığın azalması sebebiyle çarpışma frekansı değerinde esaslı bir azalmaya sebep olur. Basınca ilişkin bu bağımlılık, egzoz gazı içeriğine bağlı bir fonksiyon değildir. Buna karşın sıcaklığa ilişkin bağımlılık, mevcut içeriklere göre değişim gösterebilir.

İlgili katmandaki çarpışma frekansının hesaplanması için;

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_{e} \sum_{j=1}^{n} \left( \mathbf{N}_{j} \mathbf{q}_{j} \right)$$
(7.1)

eşitliği kullanılır [17].

Eşitlikte yer alan;

- j indeksi: İlgili katmanda bulunan molekül cinslerinin sayısını
- v<sub>e</sub>: Ortalama termal elektron hızını
- N<sub>i</sub>: İlgili yakıt atığından ilgili katmanda ne kadar bulunduğunu
- qj: Katmanda bulunan j. atık moleküllerinin çarpışma kesit alanını

ifade etmektedir.

Molekül	Kesit Alan, Q	Sıcaklık (°K)
CO	$2.08 \times 10^{-23} v_e + 2.46 \times 10^{-16}$	< 2.5 x 10 <sup>4</sup>
CO <sub>2</sub>	$4.7 \times 10^{-8} v_e^{-1}$	< 10 <sup>4</sup>
H <sub>2</sub> O	$5.9 v_e^{-2}$	< 10 <sup>4</sup>
HCI	1.85 $v_e^{-2}$	< 10 <sup>4</sup>
NH <sub>3</sub>	$3.7 v_e^{-2}$	< 10 <sup>4</sup>
N <sub>2</sub>	$3.29 \times 10^{-23} v_e$	288'den 1200'e
H <sub>2</sub>	$1.45 \times 10^{-23} v_e + 8.910^{-16}$	300'den 10 <sup>4</sup>
Н	4 x 10 <sup>-15</sup>	≈ 200
F	10 <sup>-16</sup>	≈ 2000
CI	3 x 10 <sup>-17</sup>	≈ 2000
0	2 x 10 <sup>-16</sup> 'dan 6 x 10 <sup>-16</sup> 'ya	≈ 2000

Tablo 7-1 : Yakıt Atık Moleküllerine İlişkin Çarpışma Kesit Alanları

Çarpışma kesit alanı (Q<sub>i</sub>) yakıt atığında yer alan moleküllerin boyutlarına bağlıdır. Literatürde bulunan ve yakıt atığında genellikle gözlenen moleküllere ilişkin çarpışma kesit alanı ile sıcaklık ilişkileri Tablo 7-1'de verilmektedir [18].

# 7.3. Termal Elektron Hızı

Serbest elektronlar, bulundukları ortamın sıcaklığına göre değişen hızlarda hareket ederler. Eşitlik (7.1)'de yer alan  $v_e$ , ortalama termal elektron hızı, ise plazma içerisinde bulunulan katmanın sıcaklığına göre değişiklik gösteren bir parametredir. Termal elektron hızı;

$$v_{e^{-}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_{e^{-}}}}$$
 (7.2)

eşitliğinden hesaplanabilmektedir [17]. Eşitlikte yer alan;

- k: Boltzmann sabitini
- T: Kelvin cinsinden katman sıcaklığını
- m<sub>e</sub>-: elektron kütlesini: 9,10953 x 10<sup>-28</sup> gramı

ifade etmektedir.

Yakıt atığı içerisindeki izotermler (eş düzey sıcaklık eğrileri) incelendiğinde; sıcaklığın, yanmanın en fazla gözlendiği en içerdeki katmanda değil de orta katmanlardan birinde en yüksek değerine ulaşıyor olması dikkat çekicidir. Bu sebeple termal elektron hızı orta katmanlardan birinde en yüksek değerine ulaşmaktadır.

### 7.4. Kayıp Hesabı

Elektron dağılımı, çarpışma frekansı ve haberleşme frekansının bilinmesi, elektromanyetik dalganın maruz kaldığı ortam kaynaklı zayıflamanın tahmin edilebilmesi için yeterlidir.

Elektromanyetik dalganın geçtiği ortam, yapısı gereği düzgün dağılımlı bir plazma olarak tanımlanamayacağı için sinyalin izleyeceği yol, her biri yaklaşık homojen özelliklerde birbirine komşu birçok katmandan oluşur ve mikrodalga sinyal ardışık olarak bu katmanlardan geçer. Soğrulmadan kaynaklanan sinyal zayıflaması tüm bu katmanların etkilerinin toplamı olarak sonuca yansımaktadır.

Toplam zayıflama;

Att = 
$$0.46 \sum_{i=1}^{m} \left[ \frac{y_i v_i \left( N_{e^-} \right)_i}{v_i^2 + w^2} \right] (dB)$$
 (7.3)

formülü kullanılarak hesaplanır [19].

Eşitlikte yer alan;

- m: egzoz gazında bulunan katman sayısını
- yi: elektromanyetik dalganın i. katmanda kat ettiği mesafeyi
- v<sub>i</sub>: i. katmandaki çarpışma frekansını
- (Ne-)i: i. katmanda birim hacimdeki elektron sayısını
- w: çalışma frekansını

### ifade etmektedir.

Her ne kadar hesaplamalar yaklaşık değerler olsa da, ön tasarım ve geliştirme aşamasında katı yakıtlı bir roketin mikrodalga zayıflama karakteristiklerinin tahmini için faydalı olduğu değerlendirilmektedir.

#### 7.5. Uygulama

Bu kısımda belirli bir roket konfigürasyonu için yakıt içeriği, lüle açıklığı, iç haznedeki yanma sıcaklığı ve basınç bilgilerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda üretilen yakıt atıklarına ait, 3 boyutlu mesafe, sıcaklık, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O molekül dağılımlarına dair veriler ışığında RF yayının ne kadar zayıflayacağı hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda haberleşme frekansı olarak telemetri linklerinde kullanılan üst S bant merkezi olan 2.35 GHz frekansı kullanılmıştır. Elektromanyetik dalganın egzoz gazına, roket üzerindeki antene göre 5 derecelik açı ile gireceği varsayılmıştır.

Koordinat sistemi y ve z eksenlerinin 0 noktaları roket egzoz çıkışını ortalayacak şekilde yerleştirilmiştir. Platform ile roket arasında en kısa mesafe ölçüt alındığı için roket geometrisi ve anten yerleşimi de göz önünde bulundurulduğunda elektromanyetik dalganın telemetri link senaryosunda gözlenen geometri gereği egzoz alevinin orta bölgesinden geçmeyeceği değerlendirilmektedir. Bu durumda elektromanyetik dalga, en yüksek sıcaklığı 2100 – 2400 K olan katmanların içerisinden geçecektir.

Ardışık x yönünde bulunan hücreler kullanılarak öncelikle yayının izlediği yol bulunmuştur. Bu kısımda katmanlar arasındaki geçirgenlik sabitinin farklılığından kaynaklanan kırılım olgusu ihmal edilmek durumundadır. Dolayısıyla elektromanyetik dalganın izlediği yolda gerçekleşecek değişimler göz ardı edilmektedir.

Daha sonra izlenen yol üzerinde geçilen hücrelerin elektron, sıcaklık, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O molekül dağılımlarına ilişkin değişimler hesaplanmıştır. Zayıflama hesabı için gerekli molekülere ait çarpışma kesit alanı bilgisi kullanılarak çarpışma frekansı değerleri hesaplanmıştır.











Şekil 7-4: Kullanılan Yol Üzerinde CO2 Değişimi



Şekil 7-5: Kullanılan Yol Üzerinde H<sub>2</sub>O Değişimi



Şekil 7-6: Kullanılan Yol Üzerinde H<sub>2</sub> Değişimi

Yukarıdaki şekillerde elektromanyetik dalganın egzoz gazı içerisinde izlediği yol boyunca karşılaştığı molekül cinslerine göre sayıları verilmektedir.

Elde edilen veriler kullanılarak Eşitlik (7.1), Eşitlik (7.2) ve Eşitlik (7.3) Matlab ortamında gerçeklenmiştir. Sonuçta hesaplanan zayıflatma etkisi yaklaşık 0.86 dB değerindedir.

### 7.6. Elektromanyetik Model Gerçeklemesi

Matlab ortamında gerçekleştirilen çalışmalara ek olarak benzer bir model CST isimli nümerik elektromanyetik analiz aracında da gerçeklenmiştir. Bölüm 5'te hesaplanan elektron yoğunluk dağılımı değerleri, egzoz gazında yer alan plazma katmanlarının dielektrik sabitlerinin ve iletkenlik değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Bu değerlerin hesaplanmasına ilişkin ayrıntılar bir sonraki bölümde verilmektedir.

Daha önce de belirtildiği üzere telemetri linklerde roket üzerinde yer alan antenler sarmal veya yama tipinde tümyönlü (omnidirectional) yapıda olmaktadır. Telemetri linklerinde vaat edilen veri hızı oranlarının her durumda sağlanabilmesi gerekliliği, link senaryosu gereği karşılaşılabilecek en kötü durumların telemetri link bütçesinde incelenmesini gerektirmektedir. Bu sebeple burada roketin yörüngesi gereği yaptığı hareketler sonucu, elektromanyetik dalganın roket egzoz gazı ile etkileşime girmeden haberleşmenin sağlanamadığı durum ele alınmaktadır. Yani dalganın egzoz gazına yönlenmiş kısmının davranışı incelenmektedir. Bundan ötürü yönlenmiş bir anten gibi davranış gösteren açık uçlu dalga kılavuzu modelde kullanılarak yönlülük (directivity) değerindeki egzoz gazından kaynaklanan değişim analiz edilmiştir. Kullanılan dalga kılavuzu boyutları, haberleşme frekansında çalışacak şekilde 56 mm x 112 mm olarak seçilmiştir.

#### 7.6.1. Yönlülük

Bir dalga kılavuzunun açıklığındaki elektrik alan değerleri diğer açıklıklı antenlerde olduğu gibi bulunur. Öncelikle uzak alan elektrik ve manyetik alan bileşenleri kullanılarak yayılım şiddeti (radiation intensity), U( $\theta$ , $\phi$ ), tanımlanır [20];

$$\mathbf{U}(\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{\phi}) = \frac{1}{2} \mathbf{R} \mathbf{e} \left[ \left( \hat{\mathbf{a}}_{\boldsymbol{\theta}} \mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}} + \hat{\mathbf{a}}_{\boldsymbol{\phi}} \mathbf{E}_{\boldsymbol{\phi}} \right) \mathbf{x} \left( \hat{\mathbf{a}}_{\boldsymbol{\theta}} \mathbf{H}_{\boldsymbol{\theta}} + \hat{\mathbf{a}}_{\boldsymbol{\phi}} \mathbf{H}_{\boldsymbol{\phi}} \right)^* \right] = \frac{1}{2\eta} \left( \left| \mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}} \right|^2 + \left| \mathbf{E}_{\boldsymbol{\phi}} \right|^2 \right)$$
(7.4)

Eşitlik normalize edilirse;

$$\mathbf{U}_{n}(\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{\phi}) = \left(\left|\mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{\phi})\right|^{2} + \left|\mathbf{E}_{\boldsymbol{\phi}}(\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{\phi})\right|^{2}\right) = \mathbf{B}_{0}\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{\phi})$$
(7.5)

elde edilir.

Dörtgen bir açıklık için uzak alanda elektrik alan değerleri;

$$E_r \cong 0 \tag{7.6a}$$

$$E_{\theta} \cong -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left( L_{\phi} + \eta N_{\theta} \right)$$
(7.6b)

$$E_{\phi} \cong \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left( L_{\theta} - \eta N_{\phi} \right)$$
(7.6c)

olarak tanımlıdır.

Açık uçlu dalga kılavuzu için  $L_{\phi}$ ,  $L_{\theta}$ ,  $N_{\theta}$  ve  $N_{\phi}$ ;

$$N_{\theta} = N_{\phi} = 0 \tag{7.7a}$$

$$L_{\theta} = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} M_{x} e^{jk(x'\sin\theta\cos\phi + y'\sin\theta\sin\phi)} dx'dy'$$
(7.7b)

değerlerini alır. Eşitliği çözmek için;

$$\int_{-c/2}^{c/2} e^{j\alpha z} dz = c \left[ \frac{\sin\left(\frac{\alpha c}{2}\right)}{\frac{\alpha c}{2}} \right]$$
(7.8)

ifadesi kullanılırsa;

$$L_{\theta} = 2abE_{0} \left[ \cos\theta\cos\phi \left(\frac{\sin X}{X}\right) \left(\frac{\sin Y}{Y}\right) \right]$$
(7.9)

elde edilir. Burada;

$$X = \frac{ka}{2}\sin\theta\cos\phi \tag{7.10a}$$

$$Y = \frac{kb}{2}\sin\theta\sin\phi \tag{7.10b}$$

şeklinde tanımlanır. Benzer şekilde;

$$L_{\phi} = -2abE_0 \left[ \sin\phi \left( \frac{\sin X}{X} \right) \left( \frac{\sin Y}{Y} \right) \right]$$
(7.11)

olarak bulunur.

Buradan elektrik alan değerleri yazılacak olursa;

$$E_r = 0$$
 (7.12a)

$$E_{\theta} = j \frac{abkE_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ sin \phi \left( \frac{sin X}{X} \right) \left( \frac{sin Y}{Y} \right) \right]$$
(7.12b)

$$E_{\phi} = j \frac{abkE_0 e^{-jkr}}{2\pi r} \left[ \cos\theta \cos\phi \left( \frac{\sin X}{X} \right) \left( \frac{\sin Y}{Y} \right) \right]$$
(7.12c)

elde edilir. Yönlülük eşitliği;

$$D = \frac{U_{\text{max}}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}}$$
(7.13)

şeklindedir. Eşitlikteki yayılım şiddeti;

$$U_{max} = B_0 F_{max}(\theta, \phi) \tag{7.14}$$

olarak ve yayılan güç;

$$\mathbf{P}_{\mathrm{rad}} = \bigoplus_{\Omega} \mathbf{U}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\phi}) \, \mathrm{d}\Omega = \mathbf{B}_0 \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\phi}) \sin \boldsymbol{\theta} \, \mathrm{d}\boldsymbol{\theta} \, \mathrm{d}\boldsymbol{\phi} \tag{7.15}$$

olarak tanımlanır.

Bu durumda yönlülük değeri;

$$D = 4\pi \frac{F_{max}(\theta, \phi)}{\int\limits_{0}^{2\pi} \int\limits_{0}^{\pi} F(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi}$$
(7.16)

eşitliğinden elde edilir. Yayılan gücü bulmak için η öz empedans olmak üzere açıklıktaki manyetik alanın;

$$H_a = -\hat{a}_x \frac{E_0}{\eta}$$
(7.17)

olduğu kabul edilirse, yayılan güç;

$$\mathbf{P}_{rad} = \bigoplus \mathbf{W}_{av} \cdot \mathbf{ds} = \frac{\left|\mathbf{E}_{0}\right|^{2}}{2\eta} \iint_{\mathbf{S}_{a}} \mathbf{ds} = \mathbf{ab} \frac{\left|\mathbf{E}_{0}\right|^{2}}{2\eta}$$
(7.18)

halini alır.

Elektrik alan değerleri kullanıldığında en yüksek yayılım şiddeti  $(U_{max})$ ,  $\theta$ =0'da ortaya çıkar ve,

$$U_{max} = \left(\frac{ab}{\lambda}\right)^2 \frac{\left|E_0\right|^2}{2\eta}$$
(7.19)

değerini alır. Bu iki değer oranlandığında yönlülüğe ilişkin eşitlik;

$$D_0 = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} ab$$
(7.20)

şeklinde elde edilir.

Uygulama kapsamında kullanılan dalga kılavuzu açıklığı 56 mm x 112 mm boyutlarına sahiptir. Kullanılan haberleşme frekansı 2.35 GHz için dalga boyu hesaplanırsa;

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2.35 \times 10^9} = 0.128 \,\mathrm{m} \tag{7.21}$$

olarak bulunur.

Bu veriler ışığında yönlülük değeri;

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} ab = \frac{4\pi}{0.127^2} x \, 56 \, x \, 112 \, x \, 10^{-6} = 4.88$$
(7.22)

olarak bulunur. Bu değer dB cinsinden yazılırsa;

$$10 \times \log(4.88) = 6.89 \,\mathrm{dBi}$$
 (7.23)

olarak elde edilir.

#### 7.6.2. CST Uygulaması

Tez kapsamında incelenen egzoz gazı ile elektromanyetik dalga etkileşimini gösteren senaryo geometrisi Şekil 7-7 (a)'da gösterilmektedir. Şekil 7-7 (a)'da yer alan senaryoda roketin göndermecinden gönderilen elektromanyetik dalga yer istasyonunda bulunan almaca ulaşabilmek için egzoz gazı ile etkileşime girmek zorundadır. Başka bir ifadeyle egzoz gazı ile iletişime girmeyen elektromanyetik dalgalar senaryo geometrisi gereği yer istasyonuna ulaşamamaktadır. Analiz kapsamında linkin bu etkileşime girdiği anlarda elektromanyetik dalgada ne kadar bir zayıflama gerçekleşeceği hesaplanmaktadır.

Dalganın egzoz gazına yönlenmiş kısmının davranışı incelendiği için modelde egzoz gazına yönlendirilmiş bir anten davranışı gösteren açık uçlu dalga kılavuzu kullanılmıştır. Dalga kılavuzunun yönlülük değerinin egzoz gazı yapısından kaynaklanan değişiminin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda egzoz gazı yapısının bulunmadığı durumda dalga kılavuzunun yönlülük değeri ile bulunduğu durumdaki yönlülük değeri analiz edilmiş ve aralarındaki fark bulunarak egzoz gazı yapısından kaynaklanan zayıflama değeri hesaplanmıştır.

Egzoz gaz yapısında yer alan katmanlar elips benzeri bir şekle sahiptir. Buna karşın hesaplama süresini belirleyen parametre olan modeldeki örgü (mesh) sayısının çok fazla miktarda artış göstererek (yaklaşık 40 milyon örgüden yaklaşık 200 milyon örgüye) hesaplanması imkânsız bir model ortaya çıkarması sebebiyle model yapısı olarak Şekil 7-7 (b)'de yer alan küresel yapı kullanılmıştır. Modelde elektron yoğunluklarına göre 5 farklı katmana sahip egzoz gazı ve anten olarak da bir dalga kılavuzu kullanılmaktadır. Matlab ortamındaki çalışmalara uygun olarak egzoz gazı ile dalga kılavuzu arasındaki eğiklik açısı 5 derece olarak alınmıştır.



Type Therm.c

PTC

(b)

Şekil 7-7: (a) Gerçek Geometri (b) Benzetim Modeli

Analiz çalışmalarında öncelikle dalga kılavuzuna ait (egzoz gazı modeli olmaksızın) yönlülük, faz ve elektrik alan incelenmiş, daha sonra egzoz gazı modeli uygulanarak ilgili parametrelerde gerçekleşen değişim gözlenmiştir.







Şekil 7-9: 0=90 için Yönlülük Değişimi



Şekil 7-10: 0=90 için Faz Değişimi



Şekil 7-11: Dalga Kılavuzu Elektrik Alan Dağılımı


Şekil 7-12: Dalga Kılavuzu Elektrik Alan Dağılımı Polar Gösterimi

Şekil 7-8'de anten olarak kullanılan dalga kılavuzunun 2.35 GHz frekansında, uzak alanda üç boyutlu yönlülük değişimi gözlenmektedir. Analiz sonucu olarak dalga kılavuzunun en yüksek yönlülük değerinin,  $\theta$ =90<sup>°</sup> düzleminde  $\phi$ =90<sup>°</sup> de 6.87 dBi mertebesinde elde edildiği görülmektedir.

Bölüm 7.6.2'de hesaplanan yönlülük değeri ile analiz sonucu elde edilen yönlülük değeri arasında çok küçük bir farklılık bulunmaktadır. Bu farklılığın hesaplamalarda antenin yayılım verimliliğinin (radiation efficiency) hesaba katılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Antene ilişkin huzme genişliğini tanımlayan 3 dB açısal genişlik değeri ise 137° olup yan bant bastırma oranı 4.1 dB mertebesindedir.

Daha sonra dalga kılavuzunun önüne egzoz gazı modeli yerleştirilerek analiz çalışmaları tekrarlanmıştır (Şekil 7-13). Model yapısı gereği, daha düzenli elektron yoğunluk değeri geçişlerine sahip, içerisinde çok miktarda katman bulunduran bir egzoz gazı yapısı kullanılamamaktadır. Bu sebeple her katman için, Şekil 5-4'te hesaplanan elektron yoğunluk değerlerinin karşılık geldiği uzanımdaki katmanın içinde elektron yoğunluğunun eşit dağılmış olduğu kabul edilmiştir. Elektron yoğunluk değerleri lüle çıkışından belirli bir mesafe sonra hızlı bir azalma gösterip öncesinde değişim daha yavaş olduğu için katmanlara ilişkin değerler arasında çok büyük farklılıklar gözlenmemektedir.

Her katmana ilişkin dielektrik katsayı değerleri Eşitlik (4.35)'ten, iletkenlik katsayısı değerleri ise Eşitlik (4.34)'ten elde edilmiştir. Hesaplamalar sonucu elde edilen değerler Tablo 7-2'de verilmektedir.

Elektron Yoğunluğu	İletkenlik	Dielektrik Sabiti
8e+016	0.0045	0.9990 * ε <sub>o</sub>
2.5e+016	0.0037	0.9967 * ε <sub>o</sub>
5e+015	0.0017	0.9958 * ε <sub>o</sub>
1e+015	6.7896e-004	0.9876 * ε <sub>o</sub>
1e+014	7.9696e-006	0.9865 * ε <sub>o</sub>

Tablo 7-2: Egzoz Gazı Modeline İlişkin Değerler



Şekil 7-13: Egzoz Gazı Modeli–Dalga Kılavuzu Etkileşimi



Şekil 7-14: Egzoz Gazı Modeli ile Yönlülük Değişimi



Şekil 7-15: Egzoz Gazı Modeli ile Faz Değişimi



Şekil 7-16: Egzoz Gazı Modeli ile Elektrik Alan Değişimi



Şekil 7-17: Egzoz Gazı Modeli ile Elektrik Alan Değişimi

Şekil 7-8'de dalga kılavuzunun tek başına incelendiği durumda, maksimum yönlülük değerinin  $\theta$ =90<sup>°</sup> düzleminde  $\phi$ =90<sup>°</sup> noktasında 6.87 dBi seviyesinde olduğu gözlenmektedir.

Şekil 7-13'te egzoz gazı modeli eklendiğinde dalga kılavuzundan elde edilen maksimum yönlülük değerinin 6.22 dBi seviyesine düştüğü gözlenmektedir. Şekil 7-14'teki veriler incelenecek olursa en yüksek yönlülük değerinin,  $\theta=90^{\circ}$ düzleminde  $\phi=108^{\circ}$ 'de elde edildiği görülmektedir. Bu değer, dalga kılavuzunun tek başına incelendiğinde elde edilen değerle karşılaştırılırsa egzoz gazının yaklaşık 0.65 dB'lik bir kayba sebep olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Şekil 7-14'ten antene ilişkin huzme genişliğini tanımlayan 3 dB açısal genişlik değerinin ise 137<sup>0'</sup>den 98.5<sup>0'</sup>ye düştüğü, yan bant bastırmasının ise kötüleşerek 2.7 dB mertebesine çıktığı gözlenmektedir. Bu durum, plazma yapısının elektromanyetik dalgada kırılım etkisi oluşturarak uzay düzleminde yayması olarak değerlendirilmektedir.

CST'de gerçekleştirilen uygulama sonucu hesaplanan zayıflama değeri (0.65 dB) ile Bölüm 7.5'te hesaplanan zayıflama değeri (0.86 dB) birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Aradaki küçük farkın Bölüm 7.5'te kullanılan modelde kırılımların ihmal edilmesi sebebiyle elektromanyetik dalganın izlediği yolun tam olarak çizilememesinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

Grafiklerde egzoz gazı ile etkileşime girdikten sonra dalga fazında büyük değişimler olduğu gözlenmektedir. Dalganın katmanlar arasında konum değiştirerek kırılıma uğraması göz önünde bulundurulduğunda bu etkinin beklenen bir durum olduğu değerlendirilmektedir.

#### 7.6.3. İyonize Gazlar Yaklaşımı ile Karşılaştırma

Tablo 7-2'de yer alan elektron yoğunluk dağılımı değerleri, Eşitlik (4.47)'de uygulanarak iyonize gazlar yaklaşımının bu değerlerle vereceği sonuç incelenmiştir.

İyonize gazlar yaklaşımında, sinyal frekansı plazma frekansının üzerindeyse elektromanyetik dalganın herhangi bir kayba maruz kalmaksızın plazmadan geçeceği, ancak sinyal frekansı plazma frekansından küçükse dalganın yansımaya uğrayıp plazmadan geçemeyeceği kabul edilmektedir.

67

Bölüm 7.6.2'de gerçekleştirilen hesaplamalarda roket üzerinde yer alan antenden yer istasyonuna gönderilen elektromanyetik dalgaların, anten ve egzoz gazı katmanları geometrisi gereği, ilk olarak en içteki katmanın bir dışındaki katmanla etkileşime gireceği gözlenmektedir. Dalga dış katmanlara doğru devam etmektedir.

Bu durumda ilgili katmandaki elektron yoğunluk dağılımı kullanılarak Eşitlik (4.18)'de verilen plazma frekansı hesaplanırsa;

$$f_{p} = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{Ne^{2}}{m \epsilon_{o}}} \cong 9 \sqrt{2.5 \times 10^{16}} = 1.423 \text{ GHz}$$
 (7.24)

olarak elde edilir.

Bu durumda elektromanyetik dalga, yansımaya maruz kalmayıp Bölüm 7.6.2'de edilen sonuçlarda olduğu gibi plazma yapısından geçebilecektir.

Elektromanyetik dalganın en yüksek elektron yoğunluk dağılımına sahip en içerdeki katman ile etkileşime girmesi durumu için Eşitlik (4.18) ile hesaplamalar tekrarlandığında plazma frekansı;

$$f_{p} = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{Ne^{2}}{m \epsilon_{o}}} \cong 9 \sqrt{8x10^{16}} = 2.5456 \text{ GHz}$$
 (7.25)

olarak elde edilir.

Hesaplanan plazma frekansı değeri çalışma frekansı değerinden yüksektir. Bu durumda elektromanyetik dalga yansımaya uğrayarak plazma yapısından geçemeyecektir.

Elektromanyetik dalganın en içerdeki katmanla etkileşimi CST'de de incelenmiştir. Bu amaçla dalga kılavuzu en içerdeki katmanla etkileşime girmesi için gerekli konuma getirilmiştir.







Şekil 7-19: Egzoz Ateşi Bölgesi Etkisi ile Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi



Şekil 7-20: Egzoz Ateşi Bölgesi Etkisi ile Elektrik Alan Değişimi



Şekil 7-21: Egzoz Ateşi Bölgesi Etkisi ile Elektrik Alan Değişimi Polar Gösterimi

Şekil 7-18'e ilk bakıldığında 4.47 dBi'lık bir yönlülük değeri görülmektedir. Dalga kılavuzunun normal pozisyonundayken incelendiği Şekil 7-13'deki yönlülük değeri ile karşılaştırıldığında 1.75 dB'lik bir fark olduğu gözlenmektedir. Şekil 7-19'daki polar gösterim incelendiğinde ise yönlülük değerinin istenenden çok farklı bir açıda (64.8<sup>°</sup>'de) ortaya çıktığı görülmektedir. Asıl ilgilenilen  $\theta$ =90<sup>°</sup>  $\phi$ =90<sup>°</sup> noktasında ise yönlülük değeri 0.6 dBi değerine sahiptir.

Elektromanyetik dalganın kırılıma uğrayarak geliş yönünün değişmesi yüksek elektron yoğunluklu farklı katmanlardan oluşan plazma yapılarının elektromanyetik dalgalara etkilerinden olup gerçekleşmesi beklenen bir olgudur.

Aynı durum ile elektrik alanın üç boyutlu gösterildiği Şekil 7-20'de de karşılaşılmaktadır. Şekilden en yüksek elektrik alan değerinin 16.1 dBV/m olduğu gözlenmektedir. Yönlülükte olduğu gibi polar gösterimin verildiği Şekil 7-21 incelendiğinde  $\theta$ =90<sup>°</sup>  $\phi$ =90<sup>°</sup> noktasında elektrik alan değerinin 12.3 dBV/m olduğu görülmektedir.

İyonize gazlar yaklaşımı plazma içerisinde moleküller ve serbest elektronlar arasında gerçekleşen çarpışmaları ihmal etmektedir. Bu yaklaşımın temel amacı plazma yapısı ile elektromanyetik dalganın etkileşimi hakkında kolay ve hızlı bir fikir sağlamaktır.

#### 7.6.4. Farklı Frekanslarda Etkileşimler

Teorik bilgiler, haberleşme frekansı arttıkça plazma yapısının zayıflatıcı etkisinin azalacağını belirtmektedir. Yani plazma yapılarında yayılan düşük frekanslı elektromanyetik dalgalar, yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalara göre daha çok zayıflayacaktır.

Bu etkinin gözlenmesi amacıyla üst S telemetri bandının en düşük değerinde (2310 MHz) ve en yüksek değerinde (2390 MHz) yayılım yapan elektromanyetik dalgaların egzoz gazı yapısı ile etkileşimi CST'de incelenmiştir. Bu frekanslara ek olarak üst S bandının ortasında yer alan 2.35 GHz frekansında yapılan çalışmalar da frekans arttıkça zayıflamanın azalması olgusunun incelenmesine yönelik kullanılacaktır.



Şekil 7-22: 2.31 GHz Frekansında Yönlülük Değişimi



Şekil 7-23: 2.31 GHz Frekansında Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi



Şekil 7-24: 2.39 GHz Frekansında Yönlülük Değişimi



Şekil 7-25: 2.39 GHz Frekansında Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi

2.31 GHz frekansında elektromanyetik dalga yayılımının incelendiği Şekil 7-22'de yönlülük 6.12 dBi değerine sahiptir. 2.35 GHz frekansında elektromanyetik dalga

yayılımının incelendiği Şekil 7-13'te yönlülük 6.22 dBi değerine sahiptir. 2.39 GHz frekansında elektromanyetik dalga yayılımının incelendiği Şekil 7-24'te yönlülük 6.34 dBi değerine sahiptir. Sonuçlardan frekans arttıkça yönlülük değerinin arttığı gözlenmektedir. Yönlülük değerindeki artış, egzoz gazı yapısının zayıflama etkinliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

### 7.7. Telemetri Link Bütçesi Analizi

Bu kısımda öncelikle egzoz gazı yapısı tanımlanan roket için yörünge verisi tanımlanarak düz arazide 2.35 GHz frekansında gerçekleştirilen bir telemetri ölçümü için link bütçe analizi hesaplanmıştır.

Sonrasında ise çalışmalar egzoz gazı etkisinin daha belirgin olduğu 1.435 GHz haberleşme frekansı ve farklı bir yörünge için tekrarlanmıştır. Ayrıca ortam senaryoları değiştirilerek ortamdan kaynaklanan etkiler incelenmiştir.

## 7.7.1. 2.35 GHz'de Link Analizleri

Bu kısımda 2.35 GHz haberleşme frekansında link analizleri gerçekleştirilecektir. Önceki bölümlerde yapılan çalışmalar da 2.35 GHz frekansında gerçekleştirildiği için elde edilen sonuçlar burada kullanılabilecektir.

Roket irtifasının zamanla değişimi Şekil 7-26'da verilmektedir. İrtifa grafiğinden roketin kalkış da dahil olmak üzere üç kere yükseliş yaptığı gözlenmektedir. Bu üç yükseliş profilinin yükselişe yönelik hızlanmanın azaldığı ve roketin düzlemsel harekete geçme eğiliminde bulunduğu kısımlarında (5.5 – 9.5, 26.5 – 32 ve 46 – 49.5 saniye aralıklarında) elektromanyetik dalgalar ile egzoz gazı etkileşime girmeden yer ekipmanı ile roket arasında iletişim sağlanamamaktadır. Bu sebeple link bütçesi analizi yapılırken bu kısımlarda egzoz gazından kaynaklanan zayıflama etkisinin de hesaba katılması gerekmektedir.



Şekil 7-26: Roket İrtifasının Zamanla Değişimi

Elektromanyetik dalganın egzoz gazı ile etkileşime girdiği açıya göre zayıflatma değeri değişim gösterecektir. Bu sebeple önce bu kısımlarda etkileşim açıları hesaplanmış daha sonrasında ise bu açılara göre egzoz gazı yapısı ile etkileşimi sonucunda elektromanyetik dalgada gerçekleşecek kayıp değeri CST'de hesaplanmıştır. Etkileşim açıları sırasıyla 15<sup>°</sup>, 10<sup>°</sup> ve 5<sup>°</sup> olarak hesaplanmıştır. Sonuçları Şekil 7-13'te verilen çalışmalarda etkileşim açısı 5<sup>°</sup> olarak alınmıştır. Bu doğrultuda diğer iki açı için CST analizleri gerçekleştirilmiştir.







Şekil 7-28: 10<sup>0</sup> Açı için Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi



Şekil 7-29: 15<sup>0</sup> Açı için Yönlülük Değişimi





5<sup>°</sup> açıda elektromanyetik dalga ile egzoz gazı etkileşimi için elde edilen yönlülük değeri 6.22 dBi'dır. 10<sup>°</sup> açıda etkileşimle yapılan analiz sonuçları için Şekil 7-27 incelendiğinde en yüksek yönlülük değerinin 6.31 dBi olarak elde edildiği, 15<sup>°</sup>

açıda etkileşimle yapılan analiz sonuçları için Şekil 7-29 incelendiğinde en yüksek yönlülük değerinin 6.51 dBi olarak elde edildiği görülmektedir.

Sonuçlar, etkileşim açısı büyüdükçe, yani elektromanyetik dalganın etkileşime girdiği katman lüle çıkışından uzaklaştıkça, yönlülük değerinin arttığı, egzoz gazının zayıflatma etkinliğinin azaldığı yönündedir.

Link bütçesi analizinde öncelikle herhangi bir etkiye maruz kalmaksızın roketin izlediği yoldan kaynaklanan serbest uzay kaybı ile sinyal gücü değişimi hesaplanmıştır. Daha sonra diğer etkilerden kaynaklanan kayıplarla sinyal gücü değişiminin hesaplanması amacıyla farklı atmosferik koşullar altında yoldan kaynaklanan kayıp ve çok yolluluk etkisi incelenmiştir. Burada atmosferik gazlardan kaynaklanan zayıflama, her hava koşulu için varlığını koruyan toplayıcı bir etki olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Son olarak egzoz gazı ile etkileşimden gelen kayıp ve incelenen diğer kayıplar birleştirilmiştir.

Hesaplamalarda kullanılan sistem parametrelerine ilişkin değerler gerçekte kullanılan değerlerle uyumlu olarak;

- Haberleşme frekansı: 2.35
- Telemetri Göndermeci Çıkış Gücü: 1 W
- Telemetri Göndermeç Anten Kazancı: 0 dBi
- Telemetri Almaç Anten Kazancı: 20 dBi

şeklinde seçilmiştir.



Şekil 7-31: Serbest Uzay Kaybı

Serbest uzay kaybı elektromanyetik dalganın izlediği yoldan kaynaklanmakta olup kayıp hesabına ilişkin formül Eşitlik (2.2)'de verilmektedir.

Şekil 7-32'de ilgili telemetre senaryosu farklı ortam koşulları (basınç ve sıcaklık), farklı yağış oranları ve farklı polarizasyonlarda incelenmiştir. İncelenen ortam koşulları Tablo 7-3'te verilmektedir.

Polarizasyon	Yağış Oranı (mm/hr)	Basınç (hPa)	Sıcaklık (C)
Yatay	300	1013	20
Dairesel	150	750	10
Dikey	75	500	5

Tablo 7-3: Yağmur Kaybı için Ortam Koşulları

Yağmurdan kaynaklanan zayıflatmada polarizasyonun da önemli bir etkisi bulunmaktadır. Yatay polarize dalgalar, yağmurdan en çok etkilenirken dikey polarize dalgalar yağmurdan görece daha az etkilenmektedir. Şekil 7-32'de yağış oranı arttıkça zayıflamanın arttığı gözlenmektedir.



Şekil 7-32: Farklı Yağış Oranları ve Farklı Polarizasyonlar için Yağmur Kaybı



Şekil 7-33: Farklı Su İçerikli Ortamlarda Sis/Bulut Kaybı

Su İçeriği (gr/m³)	Basınç (hPa)	Sıcaklık (C)
5	1013	20
2.5	800	7
0.5	600	2

Tablo 7-4: Sis/Bulut Kaybı için Ortam Koşulları

Tablo 7-4'te sisten/buluttan kaynaklanan zayıflama hesaplanırken göz önünde bulundurulan ortam koşulları verilmektedir.



Şekil 7-34: Kar/Dolu Kaybı

Tablo 7-5'te kardan/doludan kaynaklanan zayıflama hesaplanırken göz önünde bulundurulan ortam koşulları verilmektedir.

Basınç (hPa)	Sıcaklık (C)	Kar Yağış Oranı
1013	-30	200
800	-20	100
500	-10	50

Tablo 7-5: Kar/Dolu Kaybı için Ortam Koşulları

Atmosferik kayıplardan kaynaklanan zayıflama, mesafe arttıkça etkinliğini arttırdığı için grafik gösterimler belirli bir mesafe sonrasından başlamaktadır.



Şekil 7-35: Egzoz Gazı Kaybı Etkileri

Egzoz gazından kaynaklanan kayıp tüm senaryo boyunca etkin olmamaktadır. Bu kayıp, haberleşmenin sadece egzoz gazı bölgesinden yapılabildiği zamanlarda linke etkimektedir.

Tüm bu etkiler çok yolluluk etkisi ile birleştirilerek farklı atmosferik ortam koşullarında alıcıdaki sinyal gücü değişimi hesaplanmıştır. Çok yolluluk kaybına ilişkin hesaplamalarda ise iki ışın modeli [22] kullanılmıştır. Senaryonun düz, toprak bir arazide gerçekleştiği varsayılarak yansıtma katsayısı 0.25 olarak seçilmiştir.

Şekil 7-36'da farklı ortam koşulları için alıcıdaki sinyal gücü değişimi verilmektedir. Grafikte kullanılan ortam koşulları değerleri;

- Yatay polarize dalga için 20<sup>0</sup>C 1013 hPa 300 mm/hr yağmur yağışı
- -20<sup>o</sup>C 1000 hPa 100 mm/hr kar yağışı
- 7<sup>0</sup>C 800 hPa 2.5 g/m<sup>3</sup> su yoğunluklu sis/bulut ortamı

şeklindedir.



Şekil 7-36: 2.35 GHz Link Analizi

Şekil 7-36 (a)'da düz arazi için sinyal gücü değişimi incelenmiştir. (b)'de ise atmosferik etkilerin ve egzoz gazı etkisinin gözlenebilmesi için mesafe aralığı daraltılmıştır.

# 7.7.2. 1.435 GHz'de Link Analizleri

Link analizleri, egzoz gazı zayıflatmasının daha etkin olacağı telemetri frekansı alt S bandının en düşük değeri (1.435 GHz) için farklı ortamlar için tekrarlanmıştır. Füzeye ilişkin yörünge bilgisi de değiştirilerek kırınımdan (diffraction) kaynaklanan kaybın gözlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 7-37: 1.435 GHz için Zamanla İrtifa Değişimi

Öncelikle ilgili frekansta elektromanyetik dalga ile egzoz gazı etkileşimi incelenmiştir. Egzoz gazından kaynaklanacak kayıp hesaplanacağı için daha önce olduğu gibi önce dalga kılavuzu tek başına modellenecek sonrasında ise egzoz gazı yapısı modele eklenerek yönlülükteki azalma incelenecektir. 2.35 GHz'de yapılan analizler için kullanılan dalga kılavuzu, 1.435 GHz frekansında yayılım yapamadığı için, dalga kılavuzunun yönlülük değerinin hesaplanması amacıyla dalga kılavuzunun tek başına analizi de tekrarlanmıştır.



Şekil 7-38: 1.435 GHz Dalga Kılavuzu Yönlülük Değişimi



Şekil 7-39: 1.435 GHz Dalga Kılavuzu Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi

Grafiklerden dalga kılavuzu için en yüksek yönlülük değerinin 8.3 dBi seviyesinde olduğu gözlenmektedir.







Şekil 7-41: 1.435 GHz Etkileşimle Yönlülük Değişimi Polar Gösterimi

Grafiklerde en yüksek yönlülük değeri 8.2 dBi olarak görünmesine karşın iletişim yapılacak doğrultu olan dalga kılavuzunun  $\theta$ =90<sup>°</sup> düzleminde ve  $\phi$ =90<sup>°</sup> noktasında yönlülük değeri 0.6 dBi olarak elde edilmektedir.

1.435 GHz frekansında egzoz gazı yapısından kaynaklanan zayıflama değeri ise iki durum arasındaki farktan 7.7 dB olarak elde edilir.

Atmosferik etkiler ve çok yolluluk kaybı da göz önünde bulundurularak düz arazi için link analizi tekrarlandığında elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir.

Grafikte kullanılan ortam koşulları değerleri;

- Yatay polarize dalga için 20<sup>o</sup>C 1013 hPa 300 mm/hr yağmur yağışı
- -20<sup>0</sup>C 1000 hPa 100 mm/hr kar yağışı
- 7<sup>o</sup>C 800 hPa 2.5 g/m<sup>3</sup> su yoğunluklu sis/bulut ortamı

olarak alınmıştır.



Şekil 7-42: 1.435 GHz Frekansında Atmosferik Etkiler

Atmosferik olayların etkileri mesafe arttıkça daha gözle görülür hale gelmektedir. Bu sebeple grafikler belirli bir mesafe sonrasından başlamaktadır.



Şekil 7-43: Egzoz Gazı Etkisi

Egzoz gazından kaynaklanan kayıp tüm senaryo boyunca etkin olmamaktadır. Bu kayıp, haberleşmenin sadece egzoz gazı bölgesinden yapılabildiği zamanlarda linke etkimektedir.

Bu analizde egzoz gazı kaybı, roket yörüngesi gereği 12 – 18 saniye aralığında uygulanmıştır. Egzoz gazı kaybının yüksek olması sebebiyle bu zaman aralığında 2.35 GHz analizlerine göre grafiklerde gözle görülür düşüşler bulunmaktadır. Bu düşüşlerin gerçekleştiği anlarda sinyal gürültü oranı değerinde yüksek düşüşler gerçekleşmekte olup bit hata oranında yüksek miktarda artış gözlenir.

Aynı atmosferik koşullar çok yolluluk etkisi ile birleştirilerek farklı atmosferik ortam koşullarında alıcıdaki sinyal gücü değişimi hesaplanmıştır. Senaryonun düz bir arazide gerçekleştiği varsayılmıştır.



Grafiklerde görülen anlık düşmeler, linkin sadece egzoz gazı üzerinden kurulabildiği zamanlarda gerçekleşmektedir. Atmosferik olayların etkileri mesafe arttıkça daha belirgin bir hal aldığı için Şekil 7-44 (b), bu etkinin görülebileceği şekilde belirli bir mesafe aralığında alınmıştır.

Telemetri senaryosu geliştirilerek yer istasyonundan 3 km uzaklıkta 200 m yüksekliğe sahip bir dağ bulunan, 300 mm/hr yağmur yağışlı bir ortamda roketin fırlatılması durumunda sinyal gücündeki değişim incelenmiştir. Kırınım kaybının hesaplanmasında bıçak sırtı kırınım modeli kullanılmıştır.

Şekil 7-45'te tek dağ senaryosuna ilişkin temsili geometri verilmektedir.



Şekil 7-45: Temsili Tek Dağ Senaryo Geometrisi

Kırınım modelinin uygulanmasında eldeki bu veriler kullanılarak Fresnel-Kirchhoff kırınım parametresi tanımlanmaktadır [22];

$$v = h_{\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}}$$
(7.26)

Eşitlikte yer alan d1 yer istasyonu ile dağ arası mesafeyi, d2 roket ile dağ arası mesafeyi, h ise dağın yer istasyonu ile roket arasındaki görüş hattı doğrultusunun (LOS) üzerinde kalan uzunluğunu tanımlar. Eğer kırınım noktası görüş hattı doğrultusunun altında kalırsa h negatif değer alır.

Kırınımdan kaynaklanan kayıp ise bu parametreyle ilintili olarak;

$$L_d = 0 \ dB \qquad v \le -1 \tag{7.27a}$$

$$L_d = 20\log(0.5 - 0.62v) \, dB \qquad -1 \le v \le 0 \tag{7.27b}$$

$$L_{d} = 20\log(0.5e^{-0.95v})dB \qquad 0 \le v \le 1$$
(7.27c)

$$L_{d} = 20\log\left(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^{2}}\right) dB \qquad 1 \le v \le 2.4$$
(7.27d)

$$L_d = 20\log\left(\frac{0.225}{v}\right)dB \qquad 2.4 \le v \tag{7.27e}$$

şeklinde hesaplanır. Eşitliklerde yer alan L<sub>d</sub> kırınım kaybını tanımlamaktadır.



Şekil 7-46: 1.435 GHz'de Tek Dağ Senaryosu

Link analizinden görüldüğü üzere roket, 3 km uzaklıktaki engelin arkasına geçtikten sonra görüş hattı bir müddet daha sağlanabildiği için sinyal gücü seviyesi bir müddet daha aynı seviyede kalmaktadır. Ancak görüş hattından çıkınca sinyal gücünde sürekli bir düşme gerçekleşmektedir. Sinyal seviyesindeki sürekli düşmede salınımlar gözlenmemesinin sebebi ise yansıyan sinyallerin alıcıya ulaşmamasıdır. Füze alçalışa geçtiğinde ise sinyal gücü -200 dBm'in altındaki seviyelerine kadar inmektedir.

Bu analizi takiben senaryo bir adım daha ileri götürülerek yer istasyonuna 3 km uzaklıkta 200 m yükseklikli dağa ilaveten, yer ekipmanına 6 km uzaklıkta 250 m yükseklikli bir dağ daha eklenmiştir.

Ortam koşulları olarak da -20<sup>o</sup>C sıcaklık, 1000 hPa basınç altında 100 mm/hr hızında kar yağışı olduğu kabul edilmiştir. Roket ile yer istasyonu arasında iki dağın bulunduğu senaryoya ilişkin geometri Şekil 7-47'de verilmektedir.



Şekil 7-47: Temsili İki Dağ Senaryo Geometrisi

Senaryo geometrisinden kaynaklanan zayıflamanın hesaplanmasında Deygout'un kırınım modeli [23] kullanılmıştır. Senaryoda roket göndermeç, yer istasyonu ise almaç olarak görev yapmaktadır. Bu sebeple birinci dağdan kaynaklanan zayıflamayı hesaplamak için a roket ile rokete yakın dağ arası mesafe, b iki dağ arası mesafe ve c yer istasyonu ile yer istasyonuna yakın dağ arası mesafe olmak üzere;

$$r_2 = \sqrt{\frac{\lambda c \left(a+b\right)}{a+b+c}} \tag{7.28}$$

hesaplanarak;

$$L = 0 h_2 / r_2 < -0.5 (7.29a)$$

$$L = 6 + 12h_2 / r_2 \qquad -0.5 < h_2 / r_2 \le 0.5 \tag{7.29b}$$

 $L = 8 + 8h_2 / r_2 \qquad 0.5 < h_2 / r_2 \le 1 \tag{7.29c}$ 

 $L = 16 + 20\log(h_2 / r_2) \qquad 1 < h_2 / r_2 \tag{7.29d}$ 

eşitliklerinde kullanılır.

İkinci dağdan kaynaklanan zayıflamayı hesaplamak için de aynı eşitlikler kullanılmaktadır. Ancak bu sefer kullanılacak formülü belirleyen ölçüt *h'/ r*' şeklini almaktadır.

İfadede yer alan h' rokete uzak dağdan rokete görüş hattı çizildiğinde rokete yakın olan dağın bu çizginin üzerinde olan kısmını ifade etmektedir. r' ise;

$$r' = \sqrt{\frac{\lambda ab}{a+b}} \tag{7.30}$$

olarak tanımlanmaktadır.

Deygout son olarak modele bir de doğrulama faktörü eklemiştir.

$$\tan \alpha = \sqrt{\frac{(a+b+c)}{ac}}$$
(7.31a)

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda a(c+b)}{a+b+c}}$$
(7.31b)

$$r_2 = \sqrt{\frac{\lambda c \left(a+b\right)}{a+b+c}} \tag{7.31c}$$

$$p = \frac{h_2}{r_2}\sqrt{2}$$
 (7.31d)

$$p = \frac{h_1}{r_1}\sqrt{2} \tag{7.31e}$$

olmak üzere doğrulama faktörünü;

$$DF = \left(12 - 20\log\left(\frac{2}{1 - \alpha/\pi}\right)\right) \left(\frac{q}{p}\right)^{2p}$$
(7.32)

olarak tanımlamıştır.

Kırınımdan kaynaklanan toplam kayıp ise, birinci ve ikinci dağlardan kaynaklanan kayıpların toplamından doğrulama faktörü çıkartılarak elde edilir.

Eşitliklerdeki h1 ve h2 arada kalan dağların yüksekliklerini, h' yer istasyonu ile rokete yakın olan dağın zirvesi arasında bir çizgi çekildiğinde ilk dağa ait bu çizginin üzerinde kalan yükseltiyi, a yer istasyonu ile ilk dağ arası mesafeyi, b iki dağ arası mesafeyi, c ise roket ile dağ arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır.



Şekil 7-48: 3km'de 200m ve 6km'de 250m Yükseklikte İki Dağ Senaryosu

Grafikten, roketin ikinci engelin arkasına geçtikten sonra bir süre daha sadece ilk engelin etkisinin olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi ikinci dağın bir süre daha elektromanyetik dalga ile alıcı arasına girememesidir. Yaklaşık 7500 m sonrasında ise ikinci dağ linke etkimeye başlamaktadır. Roket dağın tamamen arkasına geçtiği 8800 m'den sonra ise sinyal gücü -250 dBm seviyelerine inmektedir.

Bir sonraki aşamada ise yer istasyonuna 3 km uzaklıkta 200 m yükseklikte ve 4 km uzaklıkta 225 m yükseklikte dağlar olması durumu incelenmiştir.



Şekil 7-49: 3km'de 200m ve 4km'de 225m Yükseklikli İki Dağ Senaryosu

Şekil 7-49 incelendiğinde ikinci dağın yüksekliğinin bir önceki senaryoya göre daha kısa olmasına karşın yer istasyonuna daha yakın olması sebebiyle link bütçesine etkisi daha kısa zamanda ortaya çıkmaktadır. Grafikte de görüldüğü gibi ikinci dağ 6000 m uzaklıkta elektromanyetik dalgaya etkimeye başlamaktadır. Roket alçalışa geçtiğinde her iki senaryoda da sinyal gücünde yüksek seviyede azalma gözlenmektedir.

Burada ikinci dağdan kaynaklanan kırınım kaybının ikinci dağın yüksekliği kadar yer istasyonuna olan yakınlığı ile de değiştiği gözlenmektedir.

İki dağ senaryolarında son olarak yer istasyonundan 3 km ve 6 km uzaklıklarda 200 m yükseklikli dağlar incelenmiştir.



Şekil 7-50: 3km'de ve 6km'de 200m Yükseklikli İki Dağ Senaryosu

Deygout'un yaklaşımında tanımlanan ilk engel ile roket arasında görüş hattı doğrultusunun üzerinde ikinci engelin herhangi bir parçası olmadığı için, bu senaryoda roket 200 m irtifanın altına inmediği sürece ikinci dağın etkisi gözlenmemektedir. Bu sebeple bir önceki senaryo ile kıyaslandığında 8800 m uzaklık civarında sinyal gücünde yaklaşık 20 dB'lik bir fark gözlenmektedir. Buna karşın roket ikinci engelin boyundan aşağıda bir irtifaya sahip olduğunda sinyal güç seviyeleri arasındaki fark azalmaktadır.

Son olarak durgun deniz üzerinde telemetri link analizi gerçeklenmiştir. Tuzlu deniz suyu çok yüksek yansıtma özelliğine sahip olduğu için yansıtma katsayısı 1 olarak alınmıştır.





Şekil 7-51'de verilen grafikte yansımanın çok fazla olmasıyla alınan sinyalde çok fazla miktarda sönümleme gerçekleşmektedir. Buna karşın roket ile yer istasyonu arasında herhangi bir engel bulunmadığı için sinyal seviyesi hiçbir zaman engelli senaryolarda gözlenen -200 dBm seviyelerine düşmemektedir.

Gerçeklenen senaryolarda, baskın zayıflama çok yolluluk ve kırınımdan kaynaklanmaktadır. Çok yolluluktan kaynaklanan zayıflama, kırınıma göre daha yüksek değerlikli olmasına karşın araya giren engellerin yansıyan sinyallerin etkisini engellemesi sebebiyle zayıflama değeri tahmin edilebilir bir hal almaktadır. Çok yolluluk etkisinin baskın olduğu deniz senaryosunda da görüldüğü üzere çok yolluluk etkisinin ortaya çıkma olasılığının tahmini ise çok daha zordur.

#### 8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışma kapsamında roketlerde kullanılan telemetri sistemlerine egzoz gazının etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışmalar, egzoz gazı yapısında bulunan moleküller ve elektron yoğunluk dağılımının bu etkilerin incelenmesinde birincil parametreler olduğunu ortaya koymuştur. Analiz araçları yakıt içerikleri tanımlandığında egzoz gazında yer alan molekül ve sıcaklık dağılımlarına ilişkin bilgi sağlamasına karşın, egzoz gazı içerisindeki elektron yoğunluk dağılımını tanımlayamamaktadır. Bu sebeple elektron yoğunluk dağılımını veren bir yöntem detaylandırılmıştır. Egzoz gazının elektromanyetik dalgayla etkileşimine ilişkin üç farklı yöntem sunulmuştur.

Atmosferik etkilerden kaynaklanan kayıpların sistem link bütçesi kapsamında yer alan diğer parametrelere göre küçük değerlere sahip olmasına karşın, mesafe artışıyla etkinlikleri artmaktadır. Bu sebeple uzun menzilli roketler için ihmal edilmemesi gereken bir husus olduğu değerlendirilmiştir.

Telemetri göndermecinde çıkış gücünü belirleyen güç yükseltecinin olabildiğince küçük seçilmesi, sistemin hem daha küçük ve hafif olmasını hem de roket platformunda çözümü sıkıntı yaratabilecek ısınma sorununa karşı mukavemet kazanmasını sağlamaktadır. Egzoz gazından kaynaklanan kayıp değeri, sabit haberleşme sistemleri için çok fazla değilse bile boyut ve ağırlığın büyük önem taşıdığı roket platformunda optimum güç çıkışının belirlenmesi için dikkat edilmesi gereken bir parametredir.

Bu tez kapsamında yapılan hesaplamalarda kullanılan haberleşme frekansı her uygulamada belirtilmektedir. Ayrıca tez kapsamında belirli bir roket egzoz gazı yapısı kullanılmıştır. Farklı bir roket egzoz gazı yapısı ve farklı frekans kullanım ihtiyacı olması durumunda çalışmaların bu doğrultuda yenilenmesi gerekmektedir.

Ayrıca, egzoz gazı radar kesit alanı üzerine yeni akademik çalışmalar yapılarak radar ve elektronik harp uygulamaları, plazma yapılarının elektron yoğunluk değişimleri üzerine akademik çalışmalar yapılarak iyonosferin yer – uydu linklerine ve HF haberleşmeye etkileri üzerine uygulamalar geliştirilebileceği değerlendirilmiştir.
# Ek-1: ATMOSFERİK ETKİLER

## BULUT VE SİSTEN KAYNAKLANAN ZAYIFLAMA [21]

Bulut ve sisten kaynaklanan zayıflamaya yönelik çalışmalar, 10 GHz ve üzerinde yer alan frekans bantlarında çalışan yer-uzay haberleşmesinde kullanılan sistemlerde duyulan ihtiyaca yönelik başlamıştır. Fakat çalışmalar; 10 GHz'in altındaki mikrodalga frekanslarında da bulutların, kayıp açısından da önemli bir parametre olduğunu göstermiştir.

Genellikle 0.001 cm<sup>3</sup>'den küçük taneciklerden oluşan bulut ve sis için 200 GHz'in altındaki frekanslarda Rayleigh yaklaşımı geçerli olup; zayıflama, birim hacimde bulunan su miktarı cinsinden ifade edilebilmektedir.

Bu doğrultuda bulut veya sisin içerisindeki zayıflama aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\gamma_{\rm c} = K_{\rm l} M$$
 (dB/km)

Eşitlikte yer alan;

 $\gamma_c$ : Zayıflama (dB/km)

K<sub>i</sub>: Zayıflama Katsayısı ((dB/km)/(g/m<sup>3</sup>))

M: Bulut yada siste bulunan sıvı su yoğunluğu (g/m<sup>3</sup>)

şeklinde tanımlanmaktadır.

### Zayıflama Katsayısı

10 GHz seviyesinde ve üzerindeki frekanslarda sisten kaynaklanan zayıflama baskındır. Sis içerisinde sıvı su yoğunluğu tipik olarak orta dereceli bir sis için (görüş mesafesi 300 m seviyelerinde) 0.05 g/m<sup>3</sup> ve yoğun sis için (görüş mesafesi 50 m seviyelerinde) 0.5 g/m<sup>3</sup>'tür.

1000 GHz'e kadar olan frekanslarda zayıflama katsayısını (K<sub>I</sub>) hesaplamak için Rayleigh saçılımını temel alan suyun dielektrik geçirgenliği,  $\epsilon$ (f), için çift-Debye modeli kullanan bir matematiksel model kullanılabilir.

$$K_1 = \frac{0.819 f}{\epsilon''(1+\eta^2)} \quad (dB/km)/(g/m^3)$$

Eşitlikteki f, GHz cinsinden frekansı tanımlar.

Burada η:

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}$$

şeklindedir.

Suyun kompleks dielektrik geçirgenliği ise şu şekilde ifade edilir;

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p[1 + (f / f_p)^2]} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s[1 + (f / f_s)^2]}$$
  
$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{[1 + (f / f_p)^2]} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{[1 + (f / f_s)^2]} + \varepsilon_2$$
  
$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\theta - 1)$$
  
$$\varepsilon_1 = 5.48$$
  
$$\varepsilon_2 = 3.51$$
  
$$\theta = 300 / T$$

Eşitliklerde yer alan T, Kelvin cinsinden sıcaklık değerini ifade etmektedir.

Birincil ve ikincil hafifletme frekansları ise; GHz cinsinden olmak üzere aşağıda verilen eşitliklerle hesaplanır;

$$f_{p} = 20.09 - 142(\theta - 1) + 294(\theta - 1)^{2}$$
  
$$f_{s} = 590 - 1500(\theta - 1)$$

#### **Bulut Zayıflatması**

Belirli bir bölgede ve belirli bir olasılık değerinde bulutlardan kaynaklanan zayıflamayı belirlemek için sıvı suyun toplam içeriklerinin istatistiklerinin, L (kg/m<sup>2</sup>), veya eşdeğeri olarak çökeltilebilir su miktarının (mm) bilinmesi gerekmektedir. Böylece aşağıda verilen eşitlik kullanılabilir;

$$A = \frac{LK_1}{\sin \theta} \quad dB \quad for \quad 90^\circ \ge \theta \ge 5^\circ$$

Eşitlikte yer alan  $\theta$  yükseliş açısını, K<sub>1</sub> ise yukarıda tanımlanan zayıflama katsayısını ifade etmektedir.

Sıvı suyun toplam dik konumlu içeriklerinin istatistikleri, radyometrik ölçümler veya radyosonda<sup>3</sup> denemeler sayesinde elde edilmektedir. Bu yönde yerel ölçümlerin olmaması durumunda, bulutlardan kaynaklanan zayıflamayı bulabilmek için, 0°C'ye normalize edilmiş buluttaki sıvı suyun toplam dik konumlu içeriklerinin istatistikleri Rec. ITU-R P.840'den elde edilebilir.

# KAR VE DOLU YAĞIŞININ RF LİNKE ETKİSİ

RF sinyallerde gözlenen dolu ve karın gerçekleştirdiği zayıflama, ağırlıklı olarak parçacıkların içeriğindeki nemden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple kar ve dolu yağışından kaynaklanan zayıflamanın, yağmurdan kaynaklanan zayıflamaya göre çok daha az olduğu gözlenmektedir.

Karın etkisini modellemek için geliştirilmiş çok fazla model olmamakla birlikte, bu kısımda literatürde en çok kabul gören model incelenmiştir. Elektromanyetik dalga zayıflamasına yönelik genel bir yaklaşım da yağmurdan kaynaklanan zayıflatmanın kar ve dolu tanelerinden kaynaklanan zayıflamayı da içerdiği yönündedir.

Dolu veya kar taneleri, veri linklerini saçılım etkisi göstererek etkilemektedir. Farklı hidrometeorların saçılım özelliklerinin hesaplanması maddelerin dielektrik özelliklerinin bilinmesini gerektirmektedir. Dielektrik özellikler genellikle kompleks dielektrik sabiti yada kompleks kırılım indisi ile ifade edilmektedir.

Kar taneleri, buzun hava ve/veya suyla karmaşık bir karışımından oluşur. Karışım oranı ve bileşenlerin şekilleri, kar tanelerinin maruz kaldığı meteorolojik ortama göre oldukça değişkenlik göstermektedir. Böyle bir karışımın elektriksel özelliklerini teorik olarak değerlendirmek için bileşen maddeler, dielektrik özelliklerini belirleyebilmek için, yeterince büyük kabul edilmiştir.

Yine de böyle bir karışımın etkin dielektrik özelliklerini bulmak, bileşen maddeler arasında meydana gelen birçok etkileşim sebebiyle zor bir problemdir. Çözüm birçok yakınsama yapılarak elde edilebilir. Hava durumuna bağlı olarak kar tanelerinin birçok şekil, dielektrik sabiti ve büyüklük dağılımına sahip olabilmeleri sebebiyle kardan kaynaklanan RF zayıflamayı analiz etmek çok zordur. Fakat mikrodalga bandında kuru kardan kaynaklanan zayıflamanın, aynı yağış

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> METEOROLOJİ KAYITÇILARI: Atmosferin üst tabakalarındaki hava şartlarını otomatik olarak kaydedip bunları telsizle yeryüzüne ileten alettir. Bu alet; küçük bir balon ile uçurulur ve balon patlayınca alet paraşütle yere iner. Buna "radiosonde" da denmektedir.

oranlarında yağmurdan kaynaklanan zayıflamadan çok daha düşük olduğu bilinmektedir.

Bununla birlikte ıslak ya da sulu kar, mikrodalga ve milimetre dalga bantlarında, yağmurla kıyaslanabilir bir zayıflamaya sebep olmaktadır. Bu durum, sinyalin dalgaboyu küçüldükçe kardan kaynaklanan zayıflamanın arttığını ortaya koymaktır. Bu sebeple kardan kaynaklanan zayıflamayı hesaplamaya yönelik literatürde yer alan çalışmalar, genellikle optik yayılım üzerinedir.

### Dolu Etkisi

Dolu, yumru şeklinde kar tanelerinin ya da buzun yeryüzüne yağması olayıdır. Boyutları yağmur damlaları ile golf topu büyüklüğü arasında değişebilmektedir. Dolu taneleri, donmuş (buz) halde bulundukları sürece RF enerjiyi zayıflatmazlar. Bununla birlikte, taneler, erimeye başlayınca RF link üzerinde yağmurdan daha bozucu bir etkiye sahip olurlar. Taneler eridikçe, dış yüzeyleri ince su tabakası ile kaplanmış içyapısı ise buz olan bir forma dönüşürler. RF sinyalde zayıflamaya sebep olan, dış yüzeydeki bu su tabakasıdır. Merkezlerinin donmuş olmasından dolayı, dolu taneleri, büyük yağmur damlaları gibi davranırlar. Suyla kaplı tanecikten kaynaklanan kayıp, su ve buzun farklı dielektrik sabitlerine sahip olmasına bağlanmaktadır. 20°C'de su için dielektrik sabiti 80,4'tür. Buz için dielektrik sabiti 3,2'dir [24].

Dielektrik sabiti, maddelerin maruz kaldıkları akının elektrostatik çizgilerini toplama yeteneğinin bir ölçütüdür. Bu şu anlama gelir; bu sabit ne kadar büyük olursa madde o kadar iyi bir iletkendir. İyi iletkenler aynı zamanda iyi birer yayıcı oldukları için dış yüzeyi suyla kaplı taneler buz tanelerinden daha büyük zayıflamaya sebep olur.

#### Kar Etkisi

Kuru kar, yüksek yağış hızlarına sahip olsa da RF sinyalin zayıflamasına en az sebep olan atmosferik parametredir. Örneğin 18 – 100 GHz aralığında 150 mm/hr yağış hızında ölçülen zayıflatma değerleri 0.01 ile 0.04 dB/km arasında değişmektedir. Bu olay, buzun düşük dielektrik sabiti ile de desteklenmektedir. Ek olarak karın ortalama yoğunluğu, yağmurun ortalama yoğunluğundan 8 kat daha azdır. Bu şu anlama gelir; aynı yağış oranlarında kar miktarı, yağmur miktarından çok daha az olacaktır.

Sulu kar, içeriğinde çok miktarda su bulunduran bir kar çeşididir ve genellikle yağmur ve karın karışımı olarak değerlendirilir. Sulu kar elektromanyetik enerjiyi, yağmur gibi, çok zayıflatır. Km başına sulu kardan kaynaklanan zayıflama aşağıdaki eşitlikle bulunabilir [27, 28];

Sulu \_ Kar \_ Zayıflatması = 
$$\frac{0.00349r^{1.6}}{\lambda^4} + \frac{0.0022r}{\lambda}$$

Eşitlikteki;

 $\lambda$ : cm cinsinden dalgaboyu ve

r: sulu kardaki mm/hr cinsinden su miktarı

olarak tanımlanmaktadır.

# YAĞMUR ZAYIFLATMASI

Radyo sinyalleri yağmur damlaları ile karşılaştığında yağmur damlalarında oluşan soğrulma ve saçılmadan dolayı sinyal zayıflar. Bu zayıflama yağış oranı, damla büyüklüğü, damla şekli ve damlaların toplam hacmine (damla/m<sup>3</sup>) bağlıdır. Fakat bu faktörlerden sadece yağış oranı ölçülebilir olduğundan zayıflama hesaplarında genel olarak yağış oranı kullanılır.

## ITU-R P.838 Modeli [25]

ITU-R P.838 standardına göre 1 ile 1000 GHz frekans aralığında yağmur zayıflaması,  $\gamma_{\rm R}$ , ilgili frekans, polarizasyon tipi ve yağış miktarı için:

$$\gamma_{\rm R} = k R^{\alpha}$$

eşitliğiyle hesaplanmaktadır.

Burada: R, mm/saat cinsinden yağış miktarı, k ve  $\alpha$  regresyon katsayılarını ifade etmektedir. Regresyon katsayıları şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$k = [k_{\rm H} + k_{\rm V} + (k_{\rm H} - k_{\rm V})\cos^2\theta\cos 2\tau]/2$$

$$\alpha = [k_{\rm H}\alpha_{\rm H} + k_{\rm v}\alpha_{\rm v} + (k_{\rm H}\alpha_{\rm H} - k_{\rm v}\alpha_{\rm v})\cos^2\theta\cos^2\tau]/2k$$

Bu formüllerde:  $\theta$  link yükseliş açısını,  $\tau$  yataya göre polarizasyon tilt açısını ifade etmektedir. Dairesel polarizasyon için  $\tau$ , 45 °C'dir, k ve  $\alpha$  değerlerini hesaplamak için ITU-R P.838 standardında katsayıları verilen aşağıdaki formüller kullanılır:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^{4} a_{j} \exp\left[-\left(\frac{\log_{10} f - b_{j}}{c_{j}}\right)^{2}\right] + m_{k} \log_{10} f + c_{k}$$
$$\alpha = \sum_{j=1}^{5} a_{j} \exp\left[-\left(\frac{\log_{10} f - b_{j}}{c_{j}}\right)^{2}\right] + m_{\alpha} \log_{10} f + c_{\alpha}$$

### ATMOSFERİK GAZLARDAN KAYNAKLANAN ZAYIFLAMA [26]

Atmosferik gazlardan kaynaklanan zayıflamayı hesaplamak amacıyla Rec. ITU-R P.676 standardı incelenmiştir. Standart 1 – 1000 GHz frekans bandında karasal ve eğik hatlarda atmosferik gazlardan kaynaklanan zayıflamanın tahmin edilmesi amacıyla hazırlanmıştır.

Genel uygulamalar için 1000 GHz frekansına kadar olan gaz zayıflatmalarını hesaplamak için aşağıda verilen yöntemler kullanılmaktadır.

### Hat – Hat Gaz Zayıflatmasının Hesaplanması

### Spesifik Zayıflama

Her hangi bir basınç, sıcaklık ve nem değerinde, oksijen ve su buharının ayrı ayrı rezonans hatlarının toplamı alınarak, 10 GHz'in altında oksijenin rezonant olmayan Debye spektrumu için küçük ek faktörler hesaba katılarak, 100 GHz'in üzerinde ise basınçla indüklenen nitrojen zayıflatması ve su buharı zayıflatmasındaki artışı hesaplamak için deneysel olarak bulunan bir ıslaklık süresi kullanılarak 1000 GHz frekansına kadar kuru hava ve su buharından kaynaklanan spesifik zayıflama doğru bir şekilde bulunabilir. Aşağıdaki şekilde bu model kullanılarak, 1013 hPa basınç, 15<sup>o</sup>C sıcaklık altında 7.5 g/m<sup>3</sup> su buharı yoğunluğu ve kuru atmosfer koşullarında 0 – 1000 GHz aralığında 1 GHz'lik aralıklarla hesaplanan spesifik zayıflama



Şekil: Atmosferik Gaz Zayıflatması

Spesifik gaz zayıflatması aşağıdaki eşitlikte verilmektedir;

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_w = 0.1820 \text{ f N}''(\text{f}) \text{ dB/km}$$

Eşitlikte yer alan  $\gamma_o$  ve  $\gamma_w$  sırasıyla kuru hava (oksijen, basınç ile indüklenen nitrojen ve resonant olmayan Debye zayıflatması) ve su buharı kaynaklı spesifik zayıflatmalar (dB/km), f frekans ve N''(f) frekansa bağlı kompleks kırıcılığın sanal kısmıdır.

$$N''(f) = \sum_{i} S_i F_i + N_D''(f)$$

S<sub>i</sub> i.hattın uzanımını, F<sub>i</sub> hat şekli düzeltme faktörünü ve bütün hatlardaki toplam uzatmaları,  $N_D''(f)$  ise basınçla indüklenen nitrojen soğurmasını ve Debye spektrumuna bağlı kuru uzanımı tanımlamaktadır.

Hat uzanımı şu eşitlikle ifade edilmektedir:

$$\begin{split} \mathcal{S}_i &= a_1 \times 10^{-7} \ p \ \theta^3 \ \exp\left[a_2 \left(1 - \theta\right)\right] & \text{oksijen için} \\ &= b_1 \times 10^{-1} \ e \ \theta^{3.5} \ \exp\left[b_2 \left(1 - \theta\right)\right] & \text{su buharı için} \end{split}$$

Oksijen için  $a_1$ ,  $a_2$  katsayıları, su buharı için  $b_1$  ve  $b_2$  katsayıları tablo halinde Rec.

ITU-R P.676'da yer almaktadır.

Eşitlikteki parametreler ise;

*p*: Kuru hava basıncı (hPa)

e: Su buharı kısmi basıncı (hPa cinsinden) (toplam barometrik basınçP = p + e)

$$\theta = 300/T$$

T: Sıcaklık (K)'tır.

Su buharı kısmi basıncı, e, aşağıdaki eşitlik ve su buharı yoğunluğu,  $\rho$ , kullanılarak bulunabilir.

$$e = \frac{\rho T}{216.7}$$

Hat düzeltme faktörüne ilişkin eşitlik ise aşağıda verilmiştir;

$$F_{i} = \frac{f}{f_{i}} \left[ \frac{\Delta f - \delta \left(f_{i} - f\right)}{\left(f_{i} - f\right)^{2} + \Delta f^{2}} + \frac{\Delta f - \delta \left(f_{i} + f\right)}{\left(f_{i} + f\right)^{2} + \Delta f^{2}} \right]$$

Eşitlikteki  $f_i$  hat frekansı,  $\Delta f$  ise hattın genişliği olup aşağıdaki şekilde bulunur;

$$\Delta f = a_3 \times 10^{-4} (p \ \theta^{(0.8 - a_4)} + 1.1e \ \theta) \qquad \text{oksijen için}$$
$$= b_3 \times 10^{-4} (p \ \theta^{b_4} + b_5 e \ \theta^{b_6}) \qquad \text{su buhari için}$$

Hat genişlemesi,  $\Delta f$ , Doppler yayılımını hesaplayabilmek için değiştirilmiş ve aşağıdaki şekli almıştır;

$$\Delta f = \sqrt{\Delta f^{2} + 2.25 \times 10^{-6}}$$
 oksijen  
= 0.535 \Delta f + \sqrt{0.217 \Delta f^{2} + \frac{2.1316 \times 10^{-12} f\_{i}^{2}}{\theta}} su buhari

 $\delta$  ise oksijen hatlarındaki girişim etkisinden kaynaklanan doğrulama faktörüdür.

$$\delta = (a_5 + a_6 \theta) \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8}$$
 oksijen  
= 0 su buhari

Spektroskopik katsayılar tablo halinde Rec. ITU-R P.676'da yer almaktadır.

Kuru hava sürekliliği 10 GHz'in altında oksijenin rezonant olmayan Debye spektrumundan ve 100 GHz'in üstünde basınçla indüklenen nitrojen zayıflatmasından kaynaklanmaktadır.

$$N_D''(f) = f p \theta^2 \left[ \frac{6.14 \times 10^{-5}}{d \left[ 1 + \left(\frac{f}{d}\right)^2 \right]} + \frac{1.4 \times 10^{-12} p \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \times 10^{-5} f^{1.5}} \right]$$

Eşitlikteki *d* Debye spektrumu için genişlik parametresi olup;

$$d = 5.6 \times 10^{-4} p \theta^{0.8}$$

şeklinde ifade edilir.

#### Yol Zayıflaması

Bu kısımda, yukarıda anlatılan hat – hat modeli kullanılarak farklı basınç, sıcaklık ve nem değerlerinde hesaplanan spesifik zayıflamanın birleştirilmesine yönelik bir yöntem verilmiştir. Bu doğrultuda herhangi bir geometrik konfigürasyona sahip haberleşme sistemleri için yol zayıflaması, bulundukları ortamı yatay katmanlara bölüp, yol boyunca basınç, sıcaklık ve nem gibi çevresel parametrelerin profilleri tanımlanarak doğru bir şekilde belirlenebilir.

Yükseliş açısı,  $\varphi$ , yüksekliği *h* olan bir istasyondan toplam eğik yol kaybı,  $A(h, \varphi)$ ,  $\varphi \ge 0$  için aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$A(h, \varphi) = \int_{h}^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} dH$$

$$\Phi = \arccos\left(\frac{c}{(r+H) \times n(H)}\right)$$
$$c = (r+h) \times n(h) \times \cos\varphi$$

*n*(*h*) radyo kırılım indisi olup, ITU-R P.453'te verilen yöntemde, bulunulan konumdaki basınç, sıcaklık ve su buharı basıncı verileriyle hesaplanır.

Öte yandan  $\varphi < 0$  için sinyal hüzmesinin dünya yüzeyine paralel olduğu h<sub>min</sub> gibi bir minimum yükseklik değeri vardır. Minimum yükseklik değeri aşağıdaki eşitlik çözülerek belirlenebilir;

$$(r+h_{min}) \times n(h_{min}) = c$$

Bu eşitlik, aşağıdaki eşitliği  $h_{min} = h$  gibi bir başlangıç değeri alıp, tekrar çözerek kolayca bulunabilir;

$$h'_{min} = \frac{c}{n(h_{min})} - n$$

Bu nedenle  $A(h, \varphi)$  için aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$A(h, \varphi) = \int_{h_{min}}^{\infty} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} \, \mathrm{d}H + \int_{h_{min}}^{h} \frac{\gamma(H)}{\sin \Phi} \, \mathrm{d}H$$

Atmosferik gazlardan kaynaklanan zayıflama için nümerik çözüm aşağıdaki algoritma ile sağlanabilir.

Bir link için toplam zayıflamayı hesaplamak için, sadece linkin her noktasındaki spesifik zayıflamayı bilmek yetmez, spesifik zayıflamanın olduğu yolun uzunluğunu da bilmek gerekir. Yol uzunluğunu bulmak için ışın eğilmelerini de göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

Aşağıdaki şekil referans olarak kullanılırsa n<sub>n</sub> refraktif indisli,  $\delta_n$  kalınlıklı n. katmandaki yol uzunluğu a<sub>n</sub>'dir.  $\alpha_n$  ve  $\beta_n$  geliş ve gidiş açılarıdır.  $r_n$ , dünyanın merkezinden n. katmanın başlangıcına kadar olan yarıçap olmak üzere;

$$a_n = -r_n \cos \beta_n + \frac{1}{2} \sqrt{4 r_n^2 \cos^2 \beta_n + 8 r_n \delta_n + 4 \delta_n^2}$$

Eşitlikteki  $\alpha_n$  açısı aşağıdaki formülden hesaplanabilir;

$$\alpha_n = \pi - \arccos\left(\frac{-a_n^2 - 2r_n \,\delta_n - \delta_n^2}{2a_n r_n + 2a_n \,\delta_n}\right)$$

 $\beta_1$  ise yer istasyonundaki geliş açısıdır (yükseliş açısı  $\theta$ 'nın tümleyenidir).  $\beta_{n+1,}$ Snell yasası kullanılarak  $\alpha_n$ 'den bulunabilir.

$$\beta_{n+1} = \arcsin\left(\frac{n_n}{n_{n+1}}\sin\alpha_n\right)$$

Buradaki  $n_n$  and  $n_{n+1}$  kırıcı indisler, n. ve n+1. katmanlara aittir. Frekansa bağlı (saçıcı) terimin sonuç üzerinde çok küçük bir etkisi (yaklaşık %1) vardır.

$$A_{gas} = \sum_{n=1}^{k} a_n \, \gamma_n \qquad \text{dB}$$

Buradaki  $\gamma_{n}$ , spesifik zayıflama değeridir.

# Ek-2: İYONOSFER

# İYONOSFERİN VE PLAZMOSFERİN ELEKTRON İÇERİĞİ

Göndermeçten almaca ışının izlediği yol boyunca toplam elektron içeriği (TEC), haberleşme sinyaline iyonosferik etkilerin belirlenmesinde çok önemlidir. Yol boyunca toplam elektron içeriği (TEC), yol ile kesişecek şekilde bir metrekarelik bir sütun kesit alanın içerisindeki elektronların sayısı (elektron/m<sup>2</sup> veya el/m<sup>2</sup>) olarak ifade edilir ve aşağıdaki eşitlik ile bulunur [27];

$$TEC = \int n \, dl$$

Eşitlikteki n elektron yoğunluğu (el/m<sup>3</sup>) ve "l" yayılım yolunu tanımlamaktadır. İyonosferin TEC'sinin günlük değişimlerle, güneş aktiviteleriyle ve güneş aktiviteleri sonucunda oluşan jeomanyetik fırtınalarla değiştiği gözlenmiştir. Faraday rotasyonu, aşırı zaman gecikmesi ve buna bağlı mesafe gecikmesi, faz ilerlemesi, zaman gecikmesi ve faz yayılması TEC ile doğru orantılıdır. Aslında birçok iyonosferik etki TEC ile ilgili olmaya meyillidir.

### Yansıma ve Kırılım

### Yansıma

Göreceli dielektrik sabiti eşitliği incelendiğinde dielektrik sabiti negatif olabileceği ve böylece kırılım indisinin sanal olabileceği ortaya çıkar. w>w<sub>p</sub> için n<sub>o</sub> gerçeldir fakat w<w<sub>p</sub> için n<sub>o</sub> sanaldır. Kırılım indisinin sanal değeri  $\beta$  değerinin de sanal olmasına sebep olur; bu yüzden dalganın eşitlikteki gibi yayılması yerine geçici bir durum ortaya çıkar. Böylece –j $\beta$  ifadesi –j $\beta$ (–j|n|)=– $\alpha$  E=E<sub>o</sub>e<sup>- $\alpha$ z</sup>, ya dönüşür. Farklı olasılıklar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

ω	n	E(z)
$\omega > \omega_{\rm p}$	Gerçek	$E = E_0 e^{-j\beta z}$
$\omega = \omega_{\rm p}$	0	$E = E_0$
ω< ω <sub>p</sub>	Sanal	$E = E_0 e^{-\alpha z}$

Tablo: n ve E	E(z) karakteristikleri	
1401011110		

 $E=E_0e^{-\alpha z}$  durumu z'deki artış ile bir zayıflama olduğunu tanımlar, fakat bu durumda zayıflama yok edici değildir. Onun yerine yansıma olur ve aşağıdaki şekilde (b)'de de gösterildiği gibi ters istikamette yön değiştirme gerçekleşir.

Aşağıdaki şekilde iyonosferde irtifanın artmasıyla elektron yoğunluğunda bir artış olduğu varsayılmıştır. Aşağıdaki şekilde (a)'da w frekansı, w<sub>p</sub> frekansından çok daha fazladır ve ışının izlediği yol eğimli de olsa dik de olsa ışın yolu esasen iyonosferden etkilenmez. (b)'de dikey yol için w<w<sub>p</sub> durumu oluşmuş ve ışın geri yansımıştır. Yansıma olgusu, gerçekte  $E=E_0e^{-\alpha z}$  eşitliğiyle uyumlu olarak belirli seviyede değil de farklı yükseklik aralıklarında gerçekleşir. Ayrıca geçici bölge sınırlı uzunluktaysa ve E hala bölgenin kaynaktan uzak kısımlarında yüksek değere sahipse, azaltılmış genlikli bir dalga geçici bölgeyi atlar ve ötesinde yayılıma devam eder.



Şekil: İyonosferik ışın yolları (a)  $\omega >> \omega_p$  (b)  $\omega < \omega_p$  (c) Eğik dalga

Olağan dalga için, w>w<sub>p</sub> durumunda ortaya çıkan w<sub>p</sub>, kritik frekanstır. Bu durum f<sub>c</sub> gibi belirli bir kesim frekansı olan metalik dalga kılavuzu ile benzerdir. Bir dalga kılavuzunda f>f<sub>c</sub> için yayılım olur ve f<f<sub>c</sub> için geçici bir durum oluşur. Dalga kılavuzu kesim frekansının altında zayıflatıcı gibi davranır. Dairesel polarize dalgalar için;

$$w_{p}^{2} = w^{2} + ww_{B}$$
 ve  $w_{p}^{2} = w^{2} - ww_{B}$ 

durumu gerçekleşir.

Yukarıdaki açıklamalar, yok eden zayıflamanın iyonosferde belirli derecede meydana geldiği durum için yapılmıştır, bu yüzden w>w<sub>p</sub> için  $\alpha$  elektromanyetik enerjinin ısıya dönüştüğü zayıflatmayı tanımlamak üzere E(z)=E<sub>0</sub>e<sup>- $\alpha$ z</sup>e<sup>-j $\beta$ z</sup> olur.

#### Kırılım

(c)'de, bir ışın iyonosfere eğik olarak gelir ve yansımaya maruz kalır. Bu durumda w, w<sub>p</sub>'den her zaman büyüktür, bununla birlikte ışın yansıyormuş gibi görünse de burada gerçekleşen olgu kırılımdır. Dünyanın eğikliğini ihmal edip tepeden ölçülen açıyı  $\chi$  olarak isimlendirip Snell kanunu uygulanırsa troposferin n<sub>o</sub> kırılım indisi (bire eşittir),  $\chi_o$  ise iyonosferin alt tarafından gelme açısı olmak üzere

n.sin $\chi$ =n<sub>o</sub>sin $\chi$ <sub>o</sub> elde edilir. (c)'de yol üzerinde en yüksek noktada  $\chi$  açısı 90 dereceye eşittir. Bu nedenle bu noktada eşitlik n=sin $\chi$ <sub>o</sub> halini alır. Olağan dalga için eğimli yayılımda

$$n^2 = 1 - (f_p / f^2)$$

olur. Eşitlikte f<sub>p</sub> plazma frekansı, f ise çalışma frekansıdır. Bu nedenle

$$n^{2} = \sin^{2}\chi_{o} = 1 - (f_{p} / f^{2})$$
  
$$\cos\chi_{o} = f_{p} / f \text{ 'den} \qquad f = f_{p} \sec\chi_{o}$$

elde edilir.

Bu eşitlik gelme açısı  $\chi_0$  olan dalganın, plazma frekansı f<sub>p</sub>'nin bulunduğu yüksekliğin altında, yansıyacak veya kırılacak en yüksek frekansı, f, verir. Eğer f<sub>p</sub> iyonosferdeki en yüksek plazma frekansı ise f kullanılabilecek maksimum frekanstır, özellikle  $\chi_0$  açısıyla gelen dalga için yansıyacak maksimum frekanstır. Yukarıdaki durum kırılım için uç bir örnek olarak ele alınabilir. Mikrodalga frekanslar düşünüldüğünde iyonosferik kırılım daha az öneme sahip olacaktır fakat ışının hafifçe kırılmasına sebep olacaktır ve gelen zahiri yükseliş açısı, geometrik yükseliş açısından daha yüksek olacaktır. Uydu haberleşmesinde iyonizasyon kaynaklı hatanın çoğu yükseliş açısından meydana gelir;

$$\Delta \theta = \frac{\left(R + r_0 \sin \theta_0\right) r_0 \cos \theta_0}{\left[h_i \left(2r_0 + h_i\right) + \left(r_0 \sin \theta\right)^2\right]} \frac{\Delta R}{R} \quad \text{rad}$$

şeklinde ifade edilir.

Eşitlikteki  $\theta_0$  zahiri yükseliş açısını,  $h_i$  yol boyunca elektron içeriğinin ağırlık merkezinin yüksekliğini (genellikle 300 – 450 km arasında), ve  $\Delta R$  mesafe hatasını tanımlar. Yeterince düşük yükseliş açıları için veya  $R > r_0 \sin \theta_0$  olan yerdurağan (geostationary) uydulara göre uzak mesafeler için

$$\Delta \theta = \frac{\cos \theta_0}{2h_i} \Delta R \text{ rad}$$

olur.  $\Delta R$ , mesafe hatası zamanla değiştiği için yükseliş açısı hatası,  $\Delta \theta$ , da zamanla değişir. Buna ilaveten  $\Delta \theta$  gerçek ve zahiri yükseliş açıları arasındaki fark olduğu için, zahiri yükseliş açısı veya geliş yönleri zamanla değişir.

#### REFERANSLAR

[1] Senol, A. J., Rominet, G. L., Jan.-Feb. 1986, Three-Dimensional Refraction/Diffraction of Electromagnetic Waves Through Rocket Exhaust Plumes, AIAA, J. Spacecraft VOL. 23, no. 1, pp39 - 46

[2] Ely, Olen P., Hockenbergerj, Robert W., 1966, Rocket Exhaust Effects on Radio Frequency Transmission , AIAA, J. Spacecraft VOL. 3, NO. 3, pp310 - 314

[3] Stedman, Donald H., Ay, J., Williams, Jeffrey R., Adamson, Thomas C., 1974, Afterburning of Solid Rocket Exhaust, Pergamon Press, Acta Astronautica. Vol. 1, pp. 1507-1509

[4] Zolesi, Marcello, 2010, An Efficient Approach for Wide Angle Scattering Analysis of TT&C Antennas on Satellite, CST UGM2010

[5] Poles, S., Bernasconi, F., Leroux, E., Kaldor, Y., 2010, Design and Optimization of an Antenna using CST Microwave Studio and Mode Frontier, CST UGM2010

[6] Carden, F., Jedlicka, C., Henry, R., 2002, Telemetry Systems Engineering, Artech House, Boston, London

[7] IRIG – 106, September, 2007, Telemetry Standards, Range Commander Council U.S. Army White Sands Missile Range, New Mexico

[8] Ippolito, Louis J., Krikorian, Yogi Y., Taggart, David A., Wang, Charles C., Kumar, R., Chen, Chen-T., Do, Sieu K., Emmons, Debra L., Hant, J., Mathur, A., Cutler, M., and Elyashar, N., March, 2004, Dynamic Link Analysis Tool for a Telemetry Downlink System, IEEE Aerospace Conference Proceedings, Vol.6, pp 3994 - 4003

[9] Sizun, Herve, 2005, Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications, Springer, Verlag Berlin Heidelberg

[10] Cheng, David K., 1983, Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley, Massachusets, California, London, Amsterdam Ontario, Sydney

[11] Rothwell, Edward J., Cloud, Michael J., 2001, Electromagnetics, CRC Press, Boca Raton, Florida [12] Martorella, M., Mese, E. D., Berizzi, F., Soleti, R., April 14, 2005, Plume Effect on Radar Cross Section of Missiles at HF Band, Report for Dept. of Information Engineering-University of Pisa

[13] Richards, John A., 2008, Radio Wave Propagation, Springer, Verlag Berlin Heidelberg

[14] Ippolito, Louis J., February 1999, Propagation Effects Handbook for Satellite Systems Design, Stanford Telecom, Ashburn, Virginia

[15] Lee, Richard H. C., Chang, I-S., Stewart, Gordon E., May 17, 1982, Studies of Plasma Properties in Rocket Plumes, Space Division Air Force Systems Command, Los Angeles

 [16] Baghdady, E. J, September, 1966, Effects of Exhaust Plasmas upon Signal Transmission to and from Rocket-Powered Vehicles, Proceedings of the IEEE, VOL. 54, NO. 9, pp 1134-1146

[17] Poehler, Horst A., March 27, 1969, Attenuation Predictions from Exhaust Plume Models, J. Spacecraft VOL. 6, NO. 9, pp 1057-1059

[18] Huo, Winifred M., and Kim, Yong-Ki, Electron Collision Cross-Section Data for Plasma Modeling, IEEE Transactions On Plasma Science, VOL. 27, no. 5, October 1999, pp 1225-1240

[19] Smoot, L. D., Underwood, Donald L., February 1965, Prediction of Microwave Attenuation Characteristics of Rocket Exhausts, AIAA J. Spacecraft Vol. 3 no.3, pp 302-309

[20] Balanis, Constantine A., 1982, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley and Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore

[21] ITU-R P.840-3, 1999, Attenuation Due to Clouds and Fog

[22] Seybold, John S., 2005, Introduction to RF Propagation, John Wiley and Sons, New Jersey

[23] Deygout, Jacques, August 1991, Correction Factor for Multiple Knife-Edge Diffraction, IEEE Transactions On Antennas and Propagation, VOL. 39, NO. 8, pp1256-1258 [24] Booth, Joel P., Read, S., Allen, B., January 5, 2009, Weather and Propagation Effects on Multi-Mode Seeker Systems, IEEEAC paper# 1020, V.1

[25] ITU-R P.838-3, 2005, Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods

[26] ITU-R P.676-7, 2007, Attenuation by Atmospheric Gases

[27] ITU-R.P 531-10, October, 2009, Ionospheric Propagation Data and Prediction Methods Required For The Design of Satellite Services and Systems