



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**LAZERLİ UYDU HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE LİNK
BÜTÇESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN ANALİZİ VE
MODELLENMESİ**

Hamidullah RİAZ

Yüksek Lisans Tezi



**LAZERLİ UYDU HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE LİNK
BÜTÇESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN ANALİZİ VE
MODELLENMESİ**

Hamidullah RİAZ



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZERLİ UYDU HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE LİNK BÜTÇESİNİ ETKİLEYEN
PARAMETRELERİN ANALİZİ VE MODELLENMESİ

HAMİDULLAH RİAZ

PROF. DR. GÜNEŞ YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA 2016

TEZ ONAYI

Hamidullah Riaz tarafından hazırlanan "Lazerli Uydu Haberleşme Sistemlerinde Link Bütçesini Etkileyen Parametrelerin Analizi Ve Modellenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

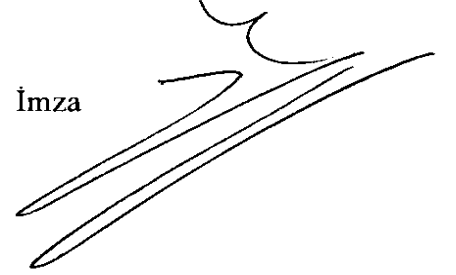
Danışman: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Başkan :

Prof. Dr. Güneş YILMAZ

İmza

U.Ü. Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Mühendisliği Anabilim
Dalı

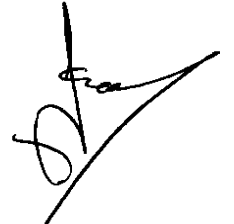


Üye :

Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK

İmza

U.Ü. Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Mühendisliği Anabilim
Dalı




Üye :

Yrd. Doç. Dr. Bahadır HIÇDURMAZ

İmza

Dumlupınar Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi,
Elektromanyetik Al. ve Mikrodalga
Tek.




Yukarıdaki sonucu onaylarım
Prof. Dr. *Ali Osman Demir*
Enstitü Müdürü
02.11.2016

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
 - atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
 - kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı
- beyan ederim.**

02/11/2016

İmza

Hamidullah Riaz

ÖZET

Yüksek Lisans

LAZERLİ UYDU HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE LİNK BÜTÇESİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN ANALİZİ VE MODELLENMESİ

Hamidullah RİAZ

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Lazerli uydu haberleşme sistemleri, Serbest Uzay Optik Haberleşmesinin (SUOH) bir uygulamasıdır. SUOH'a dayalı haberleşmelerin atmosfer yoluyla gerçekleştirilmesi ve işaret taşıyıcı ışın olması nedeniyle, işaret atmosferdeki farklı parametreler tarafından yansıtılır, kırılır, emilir veya bozular. Bu tez çalışmasında, farklı bulutların lazer ışınının 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboylarını ne kadar zayıflattığı incelenmiştir. Daha sonra her bulutun zayıflatması ve dikey boyutu dikkate alınarak yer-uydu lazer haberleşme link bütçesine uygulanmıştır. Ayrıca, SUOH bağlantılarında, atmosferik türbülans lazer ışınını bozar ve yayılan lazer ışınının kalitesi üzerinde önemli etkisi olur. SUOH sisteminin kalitesi İşaret Gürültü Oranı (SNR) ve Bit Hata Oranı (BER) ile tanımlanır. Tezde, SNR ve BER üzerinde türbülansın farklı durumundaki etkisi incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar Matlab kullanılarak yapılmıştır. Tez çalışması süresince lazer, uydu, atmosfer ortamı ve serbest uzay optik haberleşmesi ile ilgili farklı dergilerde yayınlanan makaleler, tamamlanmış tezler ve bazı üretici firmaların raporları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazerli uydu haberleşme, serbest uzay optik haberleşme, lazer, uydu, atmosfer, türbülans, SNR, BER

2016, xiii + 138 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

ANALYSIS AND MODELLING OF PARAMETERS AFFECTING LINK BUDGET IN LASER SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Hamidullah RIAZ

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

The laser satellite communication is one of the applications of Free Space Optical Communication (FSOC). Since FSOC based communications are carried out via atmosphere and because of the carrier being light, the signal is reflected, refracted, absorbed and distorted by different parameters in the atmosphere. In this thesis, the amount of attenuation of different clouds over 850 nm, 1060 nm, 1250 nm and 1550 nm wavelengths of laser light has been analyzed. Afterwards the attenuation and the vertical extent of each cloud has been considered and applied to the ground-satellite communication link budget. Also, in FSOC links, atmospheric turbulence impairs laser beam and has significant impact on the quality of beam propagated through the atmosphere. The quality of FSOC system is described by Signal-to-Noise Ratio (SNR) and Bit Error Rate (BER). In this thesis, the effect of turbulence on SNR and BER is investigated in different turbulence conditions. All these studies have been accomplished using Matlab. During the study of this thesis, the published articles from different journals, completed dissertations and reports from some manufacturers in the fields of laser, satellite, atmosphere environment and free space optical communication are investigated.

Key words: Laser satellite communication, free space optical communication, laser, satellite, atmosphere, turbulence, SNR, BER

2016, xiii + 138 pages.

TEŞEKKÜR

Beni her anlamda destekleyen, her konuda benden yardımlarını esirgemeyen, yüksek lisans öğrenimim süresince yetişmem ve kendimi geliştirmem açısından bilgi ve tecrübelerini paylaşan, bu konu üzerinde çalışmam ve başarı ile tamamlamam için ilgisini her zaman gösteren, çalışmalarım sırasında beni yönlendiren değerli danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a teşekkürler sunmamı bir borç bilirim.

Tez çalışmasının başından sonuna kadar, mesaisinin bir bölümünü ayıran ve tezin oluşmasında yaptığı değerlendirmeler ve yönlendirmelerle benden yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Pelin Demir'e teşekkürlerimi sunarım.

Türkiyede ikinci evim gibi kaldığım süresince vakit geçirdiğimiz, her konuda beni destekleyen ve bana yol gösteren başta değerli manevi aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Her zaman sevgilerini, maddi ve manevi desteklerini yanımda hissettiren ve benden daha fazla başarılı olmamı isteyen çok sevgili ve değerli Babama, Anneme, Ağabeyime, Ablalarıma ve kardeşime kalpten teşekkür ederim.

Hamidullah Riaz

02/11/2016

SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A_r	Açıklık alan
σ_I	Parıldama indisi
CO_2	Karbondioksit
C_n^2	Kırılma indisi yapısının parametresi
E_p	Foton enerjisi
G_{Rx}	Alıcı anten kazancı
G_{Tx}	Verici anten kazancı
H_2O	Su
H_a	Mutlak nem
H_r	Bağlı nem
I_{th}	Eşik akımı
L_{MP}	İşaret kaçırma kaybı
L_U	Uydunun enlemi
L_{YI}	Yer istasyonunun enlemi
L_a	Atmosferik kayıp
L_c	Eşevresel uzunluğu
L_{opt}	Optik kaybı
N_b	Alıcı duyarlılığı
N_d	cm^3 başına parçacıkların toplam sayı yoğunluğu
O_3	Ozon
P_0	İletilen orijinal optik güç
P_{Avg}	Darbeli lazerin ortalama gücü
P_L	Lazer gücü
P_{Peak}	Lazerin tepe gücü
P_{Req}	Gereken işaret gücü
P_{Rx}	Alınan işaret gücü
P_{Tx}	İletilen işaret gücü
P_d	d mesafesinde atmosferik yolun sonundaki optik güç
P_i	Lense gelen ışının gücü
Q_{Scat}	Saçılma verimliliği
R_v	Yerin yermerkezli yarıçapı
a_s	Belirli zayıflama
d_R	Alıcı sisteminde açıklık çapı
d_T	Verici sisteminde açıklık çapı
m_p	Proton kütlesi
p_0	Deniz seviyesinde basınç
r_{mod}	Mod yarıçapı
t_c	Eşevresellik zamanı
v_m	Boylamsal modun frekansı
w_0	Başlangıç ışın beli
w_{eff}	Etkin ışın beli

Q_{ext}	Mie sönme katsayısı
β_{ext}	Sönme parametresi
ε_0	Yeryüzü istasyonundan uydunun yükseklik açısı
η_i	İç kuantum verimi
λ_0	Vakumda ışığın dalgaboyu
λ_c	Taşıyıcının optik dalgaboyu
λ_m	(Maddede dalgaboyu) m modun dalgaboyu
σ_M	Hava moleküllerinden dolayı sönüm katsayısı
σ_e	Sönüm katsayısı
τ_{Rec}	Alıcı optik verimliliği
τ_{Trans}	Verici optik verimliliği
τ_a	Serbest uzay iletim katsayısı
τ_r	Alt sistem alıcının iletim katsayısı
τ_t	Alt sistem vericinin iletim katsayısı
Δ	Yer istasyonu ile uydu arasındaki boylam farkı
Δh	Bulutun geometric katsayısı
Δv	Frekans yayılımı
$\Delta \lambda$	Dalgaboyu yayılımı
$^{\circ}K$	Kelvin
A	Azimet
a	Yağmur damlasının yarıçapı
Å	Angstrom
A_{Kap}	Yükseklik açısı ile görünür olan kapsama alanı
Ar	Argon
c	Vakumda ışığın hızı
G	Yer istasyonun konumu
GL	Geometrik kayıp
h	Planck sabiti
hPa	Hektopaskal
M	Uydu alt noktasının konumu
Q	Kalite faktörü
R	Veri hızı
S	Uydunun konumu
S	İnsan gözü için görünürlük
T	Sıcaklık
T	Türbülans nedeniyle ışının ek genişlenmesi
v	Yayılan radyasyonun frekansı
W	Işın ile karşılaşmış tortulaşabilen su
E	Darbe enerjisi
H (m)	Ölçek yüksekliği
L	Mesafe
Na	Yağmur damlasının dağılımı
P	Basınç
c(r)	Aerosol parçacık sayı yoğunluğu
d	Atmosferik yolun mesafesi
f	Odak uzaklığı

g	Yerçekimi sabiti
m	Mod sayısı
mb	Milibar
n	Aktif ortamının kırılma endeksi
$n(r)$	Parçacık boyut dağılımı
r	Yörünge yarıçapı
t	Lazerin darbe süresi
w	Işın çapı
$w(l)$	Yayıma mesafesinin sonraki ışın beli
x	Buz kristallerinin maksimum boyutu
α	İç kaybın katsayısı
γ	Merkezi açı
γ	Radyasyon azalımın katsayısı
δ	Eğim açısı
ε	Yükseklik açısı
η	Hava viskozitesi
θ	İraksaklık açısı
ρ	Yoğunluk
ϕ	Faz

Kısaltmalar

Açıklama

AlGaAs	Aluminum Gallium Arsenide (Alüminyum Galyum Arsenit)
AMU	Atomic Mass Unit (Atomik kütle birimi)
APD	Avalanche Diode (Çığ Işık Diyodu)
ASK	Amplitude Shift Keying (Genlik Kaydırmalı Anahtarlama)
BER	Bit Error Rate (Bit Hata Oranı)
CW	Continuous Wave (Sürekli Dalga)
DPSK	Differential Phase Shift Keying (Farksal Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
EUV/XUV	Extreme Ultraviolet (Uç Morötesi)
FSK	Frequency Shift Keying (Frekans Kaydırmalı Anahtarlama)
FSOC	Free Space Optical Communication (Serbest Uzay Optik Haberleşmesi)
FSSP	Forward Scattering Spectrometer Probe (İleri Saçılım Spektrometre Probu)
GaAs	Gallium Arsenide (Galyum Arsenit)
GEO	Geosynchronous Earth Orbit (Yer-durağan Dünya Yörüngesi)
GPS	Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
GSO	Geostationary Orbit (Yer Durağan Yörüngesi)
HAP	High Altitude Platform (Yüksek İrtifa Platformu)
He	Helium (Helyum)
HEO	Highly Elliptical Orbit (Yüksek Eliptik Yörüngesi)
IM/DD	Intensity Modulation/ Direct Detection (Yoğunluk Modülasyonu/ Doğrudan Algılama)
IR	Infrared (Kızılötesi)
ISS	Inter-Satellite Service (Uydu-Arası Hizmeti)
LAN	Local Area Network (Yerel Alan Ağları)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Uyarılmış

	Işınım Yayılımıyla Işığın Kuvvetlendirilmesi)
LEO	Low Earth Orbit (Alçak Dünya Yörüngesi)
LM	Link Margin (Link Marjı)
LOS	Line-of-Sight (Görüş Hattı)
MAN	Metropolitan Area Network (Metropolitan Alan Ağları)
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Uyarılmış Işınım Yayılımıyla Mikrodalganın Kuvvetlendirilmesi)
MEO	Medium Earth Orbit (Orta Dünya Yörüngesi)
Nd: YAG	Neodimyum: Yttrium Aluminum Garnet (Neodimyum: İttriyum Alüminyum Garnet)
Ne	Neon
NGSO	Non-Geostationary Orbit (Yer Durağan Olmayan Yörünge)
NRZ	Non-Return-to-Zero (Sıfıra Dönüşümsüz)
OOK	On/Off Keying (Açma-Kapama Anahtarlama)
PIN	Positive-Intrinsic-Negative (Olumlu-İçsel-Negatif)
PMT	Photomultiplier Tube (Fotomultiplikator Tüp)
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence (Sözde Rasgele İkili Dizi)
PSK	Phase Shift Keying (Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
RF	Radio Frequency (Radyo Frekans)
RVR	Runway Visual Range (Pist Görüş Mesafesi)
SHF	Super High Frequency (Süper Yüksek Frekans)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
SUOH	Serbest Uzay Optik Haberleşmesi
SXR	Soft X-Ray (Yumuşak X-ışını)
TEM	Transverse Electromagnetic (Çapraz Elektromanyetik)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (İnsansız Hava Aracı)
UV	Ultraviolet (Morötesi)
VUV	Vacuum Ultraviolet (Vakum Morötesi)
WMO	World Meteorological Organization (Dünya Meteoroloji Örgütü)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Eğim açısı	6
Şekil 2.2. Yükseklik açısı.....	7
Şekil 2.3. Uydu haberleşmesinde temel bloklar.....	8
Şekil 2.4. Yaygın olarak kullanılan frekans bantlarını tanımlayan RF spektrumu	9
Şekil 2.5. Uyduların yörüngeleri; LEO, MEO, HEO ve GEO	11
Şekil 2.6. Molniya yörüngesi	12
Şekil 2.7. Üç uydu ile yeryüzünü tam kapsama.....	14
Şekil 2.8. Yer istasyonunun geometrisi.....	14
Şekil 2.9. Kapsama geometrisi.....	15
Şekil 2.10. Kapsama alanı ve tepe açısının gösterimi.....	18
Şekil 2.11. Bakış açılarının geometrisi	19
Şekil 2.12. Temel lazer bileşenleri.....	22
Şekil 2.13. Lazer eyleminde üç anahtar işlemi	22
Şekil 2.14. Çeşitli lazerlerin dalgaboyu aralığı	26
Şekil 2.15. Eksenel lazer modları (a) Basit bir gösterimi (b) Çizginin merkezindeki modun maksimum yoğunluğuna sahip olduğunu gösteren lazer hat genişliğinin içi ...	28
Şekil 2.16. Lazerin farklı TEM modları.....	30
Şekil 2.17. Çapraz modun kontrolü	31
Şekil 2.18. Boşluğun merkezinde minimum çapı	34
Şekil 2.19. (a) E.M. dalgaların genel kaynağı için O noktasında yüzey parlaklığı. (b) Çapı D ve sapması θ olan bir lazer ışının parlaklığı.....	36
Şekil 2.20. Dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak foton dedektörler ve termal dedektörlerin çıkışı	39
Şekil 2.21. Fotodiyot için akım-gerilim karakteristiği	40
Şekil 2.22. Fotomultiplikatör çalışma prensipleri. Dinotlar D1, D2, vb. ile ifade edilmiştir	42
Şekil 2.23. Serbest-uzay lazer iletişim mimarisi.....	44
Şekil 2.24. Hava yoğunluğu, hava basıncı ve hava molekülleri	46
Şekil 2.25. Troposferde sıcaklık enverziyonu.....	48
Şekil 2.26. İyonosferin üç ana bölgesi	50
Şekil 2.27. İyonosferin diğer bölgeleri.....	50
Şekil 2.28. Yükseklik ile atmosferin yapısı	51
Şekil 2.29. Atmosferde kimyasal katmanları	52
Şekil 2.30. Sıcaklık ve basınç değişikliği, ana kimyasal türleri, ve güneşten gelen radyasyonun yayılmasını gösteren atmosfer bölgeleri.....	54
Şekil 2.31. Kümülonimbus bulutunda su ve buz dağılımı	60
Şekil 2.32. Bulut tipleri.....	64
Şekil 2.33. SUOH verici ve alıcının görüş hattı.....	65

Şekil 2.34. Verici ve alıcı arasındaki küçük açılar ve benek boyutu	68
Şekil 2.35. SUOH sistemin blok şeması	70
Şekil 2.36. Beer-Lambert yasasına göre iletim	71
Şekil 2.37. İç modülasyon.....	72
Şekil 2.38. Harici modülasyon	72
Şekil 2.39. Eşevreli algılamalı alıcı.....	76
Şekil 2.40. Atmosferik aerosollerin boyut olarak sınıflandırılması	79
Şekil 2.41. Farklı hidrometeorlar için belirli zayıflamanın görünürlüğe bağımlılığı.....	83
Şekil 2.42. Dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak atmosfer yoluyla enerji iletimi	89
Şekil 2.43. Emilim payı ile atmosferik iletme penceresi	90
Şekil 2.44. Saçılmanın temel türleri.....	92
Şekil 2.45. Işın çapından daha büyük olan türbülans hücrelerin nedeniyle lazer ışının sapması	100
Şekil 2.46. Işın çapından daha küçük olan türbülans hücreleri nedeniyle alıcıda ışın yoğunluğundaki dalgalanmalar	100
Şekil 4.1. Farklı dalgaboyları için Stratus bulutların zayıflatması.....	111
Şekil 4.2. Farklı dalgaboyları için Kümüülüs bulutların zayıflatması	112
Şekil 4.3. Stratokümüülüs, Altostratus ve Altokümüülüs bulutların zayıflatması	113
Şekil 4.4. Kümülonimbus ve Nimbostratus bulutların zayıflatması	114
Şekil 4.5. Sirüs bulutların zayıflatması	114
Şekil 4.6. Sis zayıflatması	115
Şekil 4.7. Stratus (Karasal) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi	117
Şekil 4.8. Stratus (Deniz) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi.....	117
Şekil 4.9. Kümüülüs (Karasal, Temiz) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi .	118
Şekil 4.10. Kümüülüs (Karasal, Kirli) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi ..	118
Şekil 4.11. Kümüülüs (Deniz) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi	119
Şekil 4.12. Stratokümüülüs bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi.....	120
Şekil 4.13. Altostratus bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi.....	120
Şekil 4.14. Altokümüülüs bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi	121
Şekil 4.15. Kümülonimbus bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi	121
Şekil 4.16. Nimbostratus bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi.....	122
Şekil 4.17. Sirüs-I bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi	122
Şekil 4.18. Sirüs-II bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi.....	123
Şekil 4.19. Sirüs-III bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi.....	123
Şekil 4.20. Sis zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi	124
Şekil 4.21. SNR'nin C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 850 nm için benzetimi	124
Şekil 4.22. SNR'nin C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1060 nm için benzetimi	125
Şekil 4.23. SNR'nin C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1250 nm için benzetimi.....	125
Şekil 4.24. SNR'nin C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1550 nm için benzetimi	126
Şekil 4.25. BER'in C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 850 nm için benzetimi	126

Şekil 4.26. BER'in C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1060 nm için benzetimi 127
Şekil 4.27. BER'in C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1250 nm için benzetimi 127
Şekil 4.28. BER'in C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1550 nm için benzetimi 128



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Frekans bantları.....	9
Çizelge 2.2. Lazer uygulamaları	31
Çizelge 2.3. Haberleşme için kullanabilecek farklı lazer kaynak türleri	32
Çizelge 2.4. Atmosfer bileşenleri.....	55
Çizelge 2.5. Bulut tipleri ve farklı konumlarda yeryüzünden irtifaları.....	57
Çizelge 2.6. Buz bulut modellerinin mikrofiziksel özellikleri.....	62
Çizelge 2.7. Iraksaklık, mesafe ve benek boyutu.....	69
Çizelge 2.8. Algılama tekniklerinin sınıflandırılması.....	75
Çizelge 2.9. İkili modülasyon teknikleri	76
Çizelge 2.10. Hava durumu ile partiküllerin tipleri, boyutları ve yoğunlukları.....	78
Çizelge 2.11. Farklı çapındaki parçacıkların 100 m'ye düşme süresi.....	79
Çizelge 2.12. Monte Carlo programında parçacık boyut dağılımı için parametreler.....	81
Çizelge 2.13. Hava koşulları ve yağış için uluslararası görünürlük kodları	82
Çizelge 2.14. Bazı dalgaboylarında moleküler emilimi.....	89
Çizelge 2.15. (2.70) ve (2.71)'de kullanılan sabitler	91
Çizelge 2.16. Tipik atmosferik saçılım parametreleri ile boyut parametresi	92
Çizelge 2.17. Yağış hızının farklı tipleri için değerler.....	96
Çizelge 2.18. SUOH'de kullanılan bazı sabitlerin değerleri.....	97
Çizelge 2.19. ITU-R tarafından önerilen yağmur zayıflatma modeli	98
Çizelge 2.20. C_n^2 için türbülans profil modelleri	101
Çizelge 3.1. Farklı bulutlar için LWC ve Nd.....	107
Çizelge 3.2. Farklı bulutların görünürlüğü.....	107
Çizelge 3.3. Farklı bulutların dikey boyutu ve ömür süresi.....	108
Çizelge 4.1. Farklı bulutlar için bulunan görünürlük.....	110
Çizelge 4.2. Farklı bulutların lazer ışınının farklı dalgaboyları üzerindeki zayıflatması... 110	
Çizelge 4.3. Farklı dalgaboyları için alıcıda gereken güç.....	116
Çizelge 4.4. Link bütçesinde kullanılan farklı parametreler ve değerleri.....	116

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
İÇİNDEKİLER	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Uydu Tanımı	3
2.2. Uydu Uzay Ortamının Tanımı.....	5
2.3. Uydu Temelleri	5
2.4. Temel Uydu Haberleşme Sistemi.....	7
2.5. Uydu Haberleşme Temel Özellikleri.....	13
2.6. Uzay Bağlantısı	20
2.7. Lazer Tanımı	21
2.8. Lazerlerin Kısa Tarihçesi	23
2.9. Lazerin Altyapısı ve Çalışma Prensipleri	23
2.10. Einstein İlişkileri ve Kazanç Katsayısı	24
2.11. Lazer Spektrumu ve Dalgaboyları	25
2.12. Lazer Gücü ve Enerjisi.....	27
2.13. Lazer Modları.....	28
2.14. Lazer Çeşitleri.....	31
2.15. Lazer Işınımının Özellikleri.....	32
2.16. Optik Alıcı	38
2.17. Lazer İletişim Mimarlığı	43
2.18. Atmosferik İletim Tanımı	44
2.19. Atmosferik Yapı.....	44

2.20. Bulut.....	56
2.21. SUOH Tanımı	64
2.22. SUOH Temeli	65
2.23. Algılama ve Modülasyon Teknikleri	74
2.24. SUOH Sistemini Etkileyen Parametreler	77
2.25. Optik Link Bütçesi	105
2.26. BER (Bit Hata Oranı) ve SNR (İşaret Gürültü Oranı)	106
3. MATERYAL VE YÖNTEM	107
3.1. Buluttaki Görünürlük ve Zayıflatma ile Link Bütçesinin İlişkisi.....	107
3.2. Aıcıda Gereken Güç	108
3.3. Kırılma İndisinin Yapısı ile SNR ve BER	108
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	110
4.1. Farklı Bulutların Görünürlüğü	110
4.2. Farklı Bulutların Yer-Uydu Arası Link Bütçesine Etkisi.....	116
4.3. SNR ve BER Üzerinde Türbülans Etkisi	124
5. SONUÇ	129
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ	138

1. GİRİŞ

Lazerli uydu haberleşmesi, Serbest Uzay Optik Haberleşme (SUOH) sisteminin bir kullanımımıdır. SUOH sisteminin farklı kullanımları vardır. Bu kullanımların içinde en çok uygulamalı olanlar, uydular, derin mesafe incelemeleri (deep-space probes), yer terminallerin arasındaki haberleşme, İnsansız Hava Araçları (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs), Yüksek İrtifa Platformları (High Altitude Platforms, HAPs) ve uçaklardır. Ayrıca, optik uzay haberleşmesi geniş-alan veri ağları için önemli bir yapı taşıdır.

Uydu haberleşme altyapısının belirli gereksinimlerini çözmek için, iki veya daha fazla uydu arasında iletişim gerekmektedir. Bu iletişim lazer veya Radyo-Frekans (RF) ile elde edilebilir. Uydu haberleşme sisteminde kullanılan RF'e göre, lazer haberleşmesinin benzersiz bazı avantajları vardır. Verici ve alıcının boyutu, ağırlığı, gücü, uzay aracının entegrasyon kolaylığı, RF karmaşık planlaması ve frekans girişiminden çözüm ile birlikte, lazer haberleşmesi RF'e dayalı haberleşmelerinden daha fazla bilgi taşıma ve sağlama potansiyeline sahiptir. Lazerli uydu haberleşme sisteminde uydular-arası bilgi taşıma hızı zemindeki fiber optik sistemin hızı ile uyumludur. Ancak, lazerli uydu haberleşme sisteminde yer-uydu arası haberleşmesinin lazer taşıyıcı işareti atmosferin farklı parametrelerinden etkilenerek zayıflar ve hatta bazı durumlarda yok olur.

Lazer işareti üzerinde atmosferik zayıflama parametrelerin en etkili olanları su damlacıkları, karbondioksit, farklı bulutlar, sis ve aerosollerdir. Bulutların türü, irtifası ve kalınlığı iklime ve konuma göre değişir. Bulutlar farklı yüksekliklerde çeşitli yapı ve yoğunlukta bulunur. Bulutun zayıflatması yoğunluğa bağlıdır. Daha yoğun bulut daha fazla zayıflatıcıdır. Deniz üzerinde oluşan bulutlar karasal bulutlardan daha az zayıflatır, çünkü deniz üzerindeki bulutların yoğunluğu karasaldakilerden daha azdır. Düşük irtifadaki bulutlar daha yüksek sıcaklıkta oluştuğu için su damlacıkları içerir, halbuki yüksek irtifadaki bulutlar sıcaklığın sıfır derece altında oluştuğu için buz kristallerini içerir ve fazla yoğun olmazlar.

Ayrıca, atmosferde lazer ışınını zayıflatın parametrelerin yanında onu bozan diğeri bir parametre vardır. Türbülans denilen bu parametre yerden farklı yüksekliklerde atmosferde değişen sıcaklık ve basınç ortamları ile oluşur. Yere yakın yüksekliklerde türbülans gücü daha fazladır ve yerden yüksek irtifalarda türbülans gücü zayıf olacaktır. Lazer ışını

türbülansın zayıf ortamlarına göre güçlü ortamlarından daha fazla etkilenir. Atmosferde türbülans nedeniyle yayılan lazer ışını bozulur. Türbülans, parıldama, ışın sapması ve ışın genişlemesine neden olur. Böylece, lazer ışınının kalitesi düşer.

Tez kapsamında yapılan çalışmada, 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için farklı bulutların zayıflatması incelenmiştir. Daha sonra bu bulutların zayıflatmaları yer-uydu arasındaki link bütçesine eklenerek alınan işaret gücü bulunmuştur. Ayrıca, tez çalışması kapsamında SNR ve BER üzerinde türbülansın farklı ortamlarının etkisi 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları dikkate alınarak incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar için benzetimler yapılmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Uydu Tanımı

İnsanoğlu var olduğu günden beri haberleşmeye ihtiyacı olmuş ve bu ihtiyaç yaşanan dönemin sahip olduğu teknolojiye göre bir şekilde karşılanmıştır. Bazen haberleşme için duman, bazen güvercin ve bazen de binekli posta araçları kullanılmıştır. Haberleşmeye dayalı teknoloji insanoğlunun duyduğu haberleşme ihtiyacına ve çağa göre gelişmiştir. Bu gelişme günümüze kadar devam etmiş ve hala devam etmektedir. Günümüzde ise haberleşme sistemlerinde ulaşılan son nokta uydu sistemleridir (Anonim 2013).

Haberleşme alanında uydu sistemleri, daha yüksek kapasiteli, daha hızlı ve bunların karşısında daha düşük maliyetli sistemler yaratma çabaları sonucunda ortaya çıkmıştır. İlk olarak uydu sistemleri savunma ve askeri amacıyla kullanılmış daha sonra hayatın her alanında kullanılmıştır. Zaman geçtikçe özel şirketler, üniversiteler ve devlet sektörü de uydu sistemlerinden yararlanmıştır. Günümüzde uydu teknolojisi öyle bir hale gelmiştir ki artık sunduğu imkânlardan sadece şirketler, devlet ve özel sektörler, üniversiteler v.s. değil, kişiler de faydalanmaktadır (Anonim 2013).

Günümüzde, neredeyse uzaydan eve kadar ulaşan tüm televizyon kapsamı hizmetler uydudan geçecektir. Hatta geniş bant optik fiber kablolar ve internet çağında, uydular hala dünyada ülkelerin çoğunluğunun temel telekomünikasyon ihtiyaçlarına hizmet vermektedir. Örneğin, yerli uydular büyük ölçüde kamu telefon sisteminin hizmet kalitesini arttırmış ve ulusları birbirine daha sıkı bir araya getirmiştir. Uydular birçok potansiyel kullanıcıların ulaşılabilir bir şekilde yer istasyonlarının tek yönlü ve iki yönlü maliyeti ile, multimedya bilgi ve kişisel iletişim gelişmelere uydurmaktadır. Benzersiz bir faydası acil durum hazırlık ve müdahale alanında geliştirmiştir (Elbert 2008).

Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı ilerleme son 21. yüzyılda multimedya toplumun ihtiyaçlarını karşılamak için beklentilerimizi aşmıştır. Serbest-uzay (Free-space) optik iletişim çok yüksek hızda, saniyede çoklu gigabit (multi-Gb/s) büyük kapasiteli Havacılık ve Uzay (Aerospace) iletişimi gerçekleştirmek için önemli teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir. İşaret taşıyıcı, bir görüş hattı, kablosuz, yüksek bant genişliği, uzak siteler

arasında iletişim bağlantısı olarak lazerler kullanarak sağlanabilir. Lazer vericiler son derece yüksek bant genişliği ile istenen ağ işlevlerini tanıtmak için orta, düşük risk vesileleri sunmaktadır. Serbest-uzay optik lazerin kablosuz yönü, özellikle şehirlerde fiber optik kabloların döşenmesi pahalı olduğunda Yerel Alan Ağları (LAN) ve Metropolitan Alan Ağları (MAN) 'da, önemli bir avantaj olabilir. Serbest-uzay optik lazer daha yüksek veri hızları, düşük kesişim olasılık, düşük güç gereksinimleri ve daha küçük yapı dahil olmak üzere geleneksel RF kablosuz iletişim teknolojisi üzerinden önemli avantajları sunmaktadır. Serbest-uzay optik lazer sistemleri çeşitli uygulamalarda fiber optik tabanlı sistemlere bir alternatif olduğu kanıtlanmıştır (Majumdar ve Ricklin 2008).

Herhangi bir nesne yer veya başka bir gezegenin çevresinde özel bir hız ve sistemiyle dönüyorsa, uydudur. Bir uydu bir gezegen veya yıldız etrafında dolanan bir ay, gezegen ya da bir makinedir. Uzayda doğal ve yapay uyduları bulunmaktadır. Yerin yörüngesinde dönen binlerce yapay ya da insan yapımı uydular vardır.

Uydular farklı uygulamalar için kullanılır. Bazı uydular gezegenlerin fotoğraflarını çeker, bazıları da meteorologlara hava ve pist kasırgaların tahmini için yardımcı olurlar. Diğer bazıları, gezegenler, güneş, kara delikler, karanlık madde veya uzak galaksilerin fotoğraflarını çekmektedir. Bu fotoğraflar bilim adamlarının güneş sistemi ve evreni daha iyi anlamasına yardımcı olmaktadır. Yine de diğer uydular özellikle TV işaretleri yayması ve dünya çapında telefon görüşmesi gibi haberleşme için kullanılır. 20'den fazla uydudan oluşan bir grup Küresel Konumlandırma Sistemini (GPS) oluşturmaktadır. Bir GPS alıcısı elimizde olduğunda, bu uydular tam konumumuzu anlamaya yardımcı olabilir. Bir haberleşme uydusu yeryüzündeki verici istasyonundan bir haberleşme işaretini alır, yükseltir ve mümkün olduğunca işler, sonra bu işaretin alınması amacıyla uzayda başka bir uyduya veya yeryüzündeki bir veya daha fazla alıcı istasyonlarına iletir. Haberleşme bilgileri uydu ile sadece iletilir; uyduda ne kaynaklanır ne de sona erer. Uydu, karasal Microdalga (Microwave) iletişiminde kullanılan kulelerin röle (relay) fonksiyonuna benzer aktif iletim röledir (Ippolito 2008).

2.2. Uydu Uzay Ortamının Tanımı

Uyduları tanımak için öncelikle uzay ve atmosferin bir tanımını yapmak gerekecektir. Hava vasıtaları açısından bakıldığında, atmosfer denince, vasıtanın aerodinamik kuralları açısından uçabileceği en yüksek irtifa akla gelmektedir. Bu yükseklik yaklaşık 40 km'dir (100 000– 120 000 ft). Atmosferi oluşturan hava kütlelerinin %99'u bu irtifanın altındadır. Bir uydunun uçabileceği en alçak irtifa ise, 150 km'dir. Bu, uzayın başladığı en alçak irtifa olarak kabul edilmekle birlikte, uluslararası belgelerde açık olarak ifade edilmemektedir. Eliptik yörüngeli bir uydunun yere en alçak (perigee) geçebileceği yükseklik ise 129 km'dir. Bugün artık birçok kişi tarafından hava ve uzay birbirinden ayrılmaz bir bütün olarak kabul edildiğinden, bu ortam hava-uzay (aerospace) olarak adlandırılmaktadır (ITU 2002).

2.3. Uydu Temelleri

Uydular dünya çevresinde dönmektedir. Uygulamaya bağlı olarak, bu yörüngeler Dairesel (Circular) ya da Eliptik (Elliptical) olabilir. Dairesel yörüngelerde Uydular her zaman yeryüzüne aynı mesafeyi tutmaktadır (Sheridan 2013).

Yerçekimi (Gravity) nedeniyle yeryüzünün Çekim Kuvveti (Attractive Force) (2.1)'de verilmiştir.

$$F_g = mg \left(\frac{R}{r}\right)^2 \quad (2.1)$$

m: Uydu kütlesi

g: Yer çekiminin ivmesi, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

R: 6 370 km'lik yerin yarıçapı

r: Yerin merkezine uydunun mesafesi

Uyduyu çekmeye çalışan Merkezkaç Kuvveti (Centrifugal Force) (2.2)'de verilmiştir.

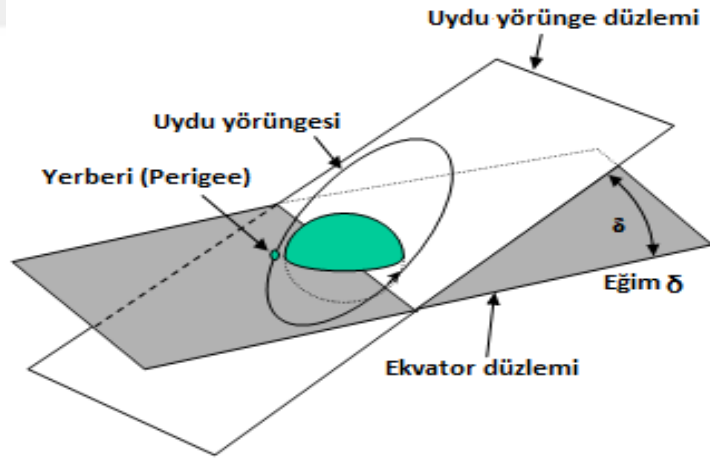
$$F_c = mr\omega^2 = mr(2\pi f)^2 \quad (2.2)$$

ω : Açısal hızı, $\omega = 2\pi f$, *f*: Dönme frekansı

İstikrarlı bir dairesel yörüngede uyduyu tutmak için, çekim kuvveti, merkezkaç kuvvetine eşit olması ($F_g = F_c$) gerekmektedir. Bu denkleme baktığımızda fark ettiğimiz ilk şey bir uydunun kütlesi onun yörüngede istikrarlı kalması ile alakasız olmasıdır (bu denklemin her iki tarafında 'm' görünür). Denklemin çözümünden yeryüzünün merkezine uydunun mesafesi elde edilir:

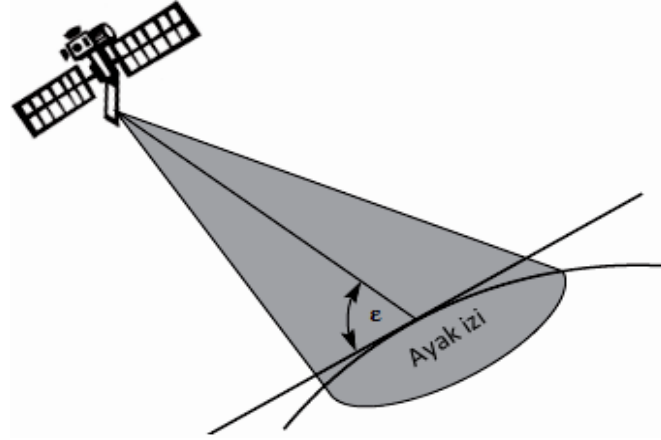
$$r = \left(\frac{gR^2}{4\pi^2 f^2} \right)^{1/3} \quad (2.3)$$

(2.3)'te yeryüzüne uydunun mesafesi, uydunun dönme frekansına bağlı olduğu sonucuna varılabilir. Uydu iletişimde eğim (Inclination) ve yükseklik (Elevation) açıları önemli parametrelerdendir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi eğim açısı (δ) ekvatorial düzlemi ve uydu yörüngesi tarafından açıklanan düzlemi arasında tanımlanır. Sıfır derecelik bir eğim açısı uydunun tam olarak ekvator üzerinde olduğu anlamına gelir (Schiller 2015).



Şekil 2.1. Eğim açısı (Schiller 2015)

Yükseklik açısı (ϵ), uydu demetinin merkezine ve yeryüzüne teğet düzlemi arasında tanımlanır. Ayak izi (Footprint), uydu işaretleri ile elde edilebilecek yeryüzündeki alanı olarak tanımlanabilir. Yükseklik açısı ve ayak izi Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



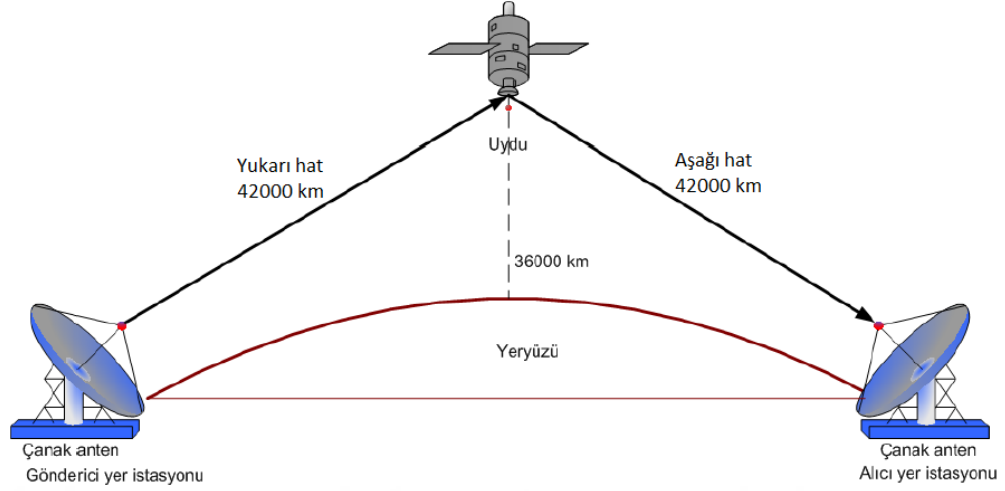
Şekil 2.2. Yükseklik açısı (Schiller 2015)

2.4. Temel Uydu Haberleşme Sistemi

Uydu haberleşme sistemi yer terminaller (Earth terminals) arasında uyduların telsiz yayınlarının geçişi için kullanır. Haberleşmede kullanılan iki tür uydu vardır; Aktif ve Pasif.

Pasif bir uydu sadece yerden alınan radyo işaretlerini geri yere yansıtır. Aktif uydu ise tekrarlayıcı gibi davranır; aldığı işaretleri güçlendirir ve daha sonra geri yere iletir. Bu alıcı terminalinde pasif uydudan mevcut olan işaret gücünü daha yüksek bir seviyeye artırır.

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, uydu Haberleşme sistemi bir veya daha fazla uydu bağlantıyı (link) içerir. Tipik bir operasyonel bağlantı, aktif uydu ve iki veya daha fazla yer terminalleri içerir. Bir istasyon, yukarı hat (uplink) frekansı olarak adlandırılan bir frekansta uyduya işaret gönderir. Uydu sonra işareti yükseltir, aşağı hat (downlink) frekansına dönüştürür ve yeryüzüne geri iletir. İşaret sonraki alıcı terminali tarafından alınır. İki yer istasyonun arasında bağlantıları doğrudan bir ara yer istasyonu olmadan iki veya daha fazla uydu kullanılarak birbirine bağlanabilir. Uydu-uydu bağlantıları kullanarak iki yer istasyonun arasındaki böyle bir bağlantıya çoklu-uydu bağlantısı denir. Uydu-uydu bağlantıları, uydu-arası servisinin (ISS) bir parçasını oluşturacaktır (Ippolito 2008).

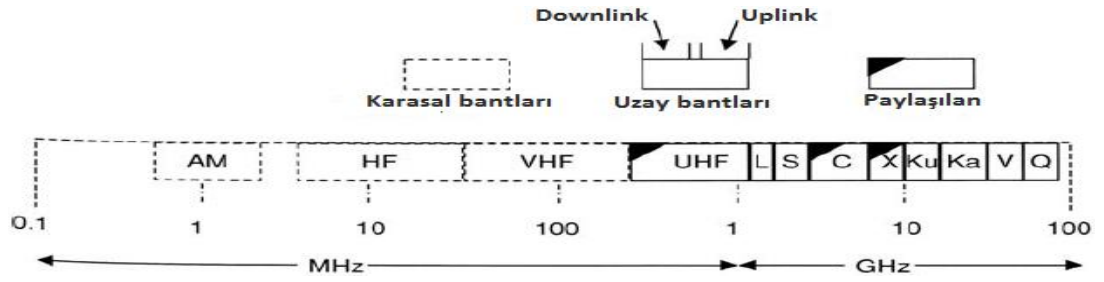


Şekil 2.3. Uydu haberleşmesinde temel bloklar (Anonim 2013)

Radyo işaretleri uyduya ve yer istasyonlara atmosferik yol kayıpların yüzünden zayıflamış olarak ulaşır çünkü uydu yörüngesi yerden yaklaşık 36000 km uzaklıktadır. Uydu haberleşmede yer istasyonlarının uyduya yeterli güçte ulaşabilmeleri için geniş açılı antenlere ve yüksek güçlü radyo işaretleri kullanmaya ihtiyaçları vardır. Yer istasyonları, uydudan gelen zayıf işaretlerini almaları için yine geniş açılı parabolik antenler kullanırlar (ITU 2002).

2.4.1. Uydu frekans bantları

Uydu haberleşme genellikle radyo spektrumunun 1 GHz ile 30 GHz aralığında yer almaktadır. Uydular yukarı hat ve aşağı hat için farklı frekanslarda çalışmaktadır. Bu ayırıştırma, yeniden alınan ve böylece uydu çalışmasını sıkışan aşağı hat işaretlerinin şansını en aza indirmek için, uydu mikrodalga tekrarlayıcının tasarımını yansıtır. Aynı frekans üzerinde ama farklı zamanlarda işaretin iletilmesi ve elde edilmesi mümkündür. ITU tarafından tahsis edilen Uplink frekans bantları, uyduya göre bir yer istasyonunda RF gücünü üretmek daha kolay olduğu gerçeğinden yararlanmak için, tipik olarak hafifçe karşılık gelen Aşağı hat frekans bandının üstündedir. Yer istasyonun güç yükselticinin çıkışı, genellikle 10 ile 100 arasında bir faktör ile bir uydudan daha büyüktür. Yer terminallerinde kullanılan vericiler, kullanılan tip ve operasyonel gereksinimlerine bağlı olarak 10 W ile 20 kW arasında çıkış güç yetenekleri vardır (ITU 2002). RF frekansların spektrumu Şekil 2.4'te tasvir edilmiştir.



Şekil 2.4. Yaygın olarak kullanılan frekans bantlarını tanımlayan RF spektrumu (Elbert 2008)

0.1 ile 100 MHz arasında spektrumun alt ucu çeşitli radyo yayın hizmetlerine uygulanmıştır ve uzay iletişimi için kullanılmaz. Aslında, iyonosfer olarak anılan atmosferin elektrik yüklü tabakası bu frekanslarda opaktır. Uydular için ilgili frekans bantları 100 MHz üstünde bulunan VHF, UHF ve Süper Yüksek Frekans (SHF) bantlarıdır. SHF aralığı altbantların içine ortak kullanımı tarafından harfli belirtme ile bilinen L-, S-, C-, X-, Ku- ve Ka-bantlarına Çizelge 2.1’de verildiği gibi kesilmiştir. Genellikle, Ku-band ve altında olanlar nispeten düşük maliyetle mevcut ekipman ve daha elverişli yayılma özelliklerinin nedeniyle en popülerdir. Ka-, V- ve Q-bantları milimetre dalga boylarını kullanmaktadır ve küçük alıcı antenlere çok yüksek bant genişliği iletimleri için potansiyel olarak yararlıdır. Artan yağmur zayıflaması ve donanım giderinin nedeniyle milimetrik dalga bantların uygulanmasında zorluklar yaşanmaktadır (Elbert 2008).

Çizelge 2.1. Frekans bantları (Elbert 2008)

Bantlar	Frekans Aralığı
L	1.7 GHz - 2.5 GHz
S	2.7 GHz - 3.5 GHz
C	3.7 GHz - 6.4 GHz
X	8 GHz - 12 GHz
Ku	14 GHz - 17.8 GHz
Ka	20 GHz - 30 GHz
V	46 GHz - 56 GHz
Q	36 GHz - 46 GHz

2.4.2. Uydu yörünge yapılandırmaları

Uydu veya bir gezegen tarafından takip edilen bir yıldız veya başka bir gezegenin etrafındaki yoluna yörünge denir. Genel olarak, bir uydunun yörüngesinin şekli elipsteki iki odaklarının birinde bulunan gezegen ile bir elipstir. Dairesel yörünge de elipsin iki odağı dairenin merkezinde denk gelen bir elips olarak kabul edilebilmektedir. Uydu yörüngeleri iki geniş kategoride sınıflandırılır.

- Yer Durağan Olmayan Yörüngesi (NGSO)
- Yer Durağan Yörüngesi (GSO)

Yörünge yüksekliği ve yörüngesel düzleminin eğimine bağlı olarak Yer Durağan Olmayan Yörüngesinin farklı türleri vardır. Eğim, yerin kuzeyinden güneye ekvatoru geçerken yörünge düzlemi ile ekvator düzleminin yaptığı ve “0” dereceden “180” dereceye kadar ölçülen açıdır. Yörüngesel düzleminin eğimlerine göre, Yer Durağan Olmayan Yörüngeler aşağıdaki üç tipe sınıflandırılmıştır.

- Kutupsal Yörünge
- Ekvator Yörünge
- Eğimli Yörünge

Kutupsal yörüngede, uydunun kutuptan kutuba hareket eğimi 90 derecedir. Ekvator yörüngede, yörünge düzlemi yerin ekvator düzleminde yatar ve eğim sıfır ya da çok azdır. Kutupsal ve ekvator yörünge dışındaki tüm yörüngelere eğimli yörünge denir.

Bir uydu yörüngesi 90 dereceden az bir eğim ile *Prograd* yörüngesi olarak adlandırılır. Prograd yörüngede, uydu, yerin kendi eksenin üzerinde dönmesi ile aynı yönde hareket eder. Bir uydu yörüngesi 90 dereceden fazla bir eğim ile *Retrograd* yörüngesi olarak adlandırılır ve uydunun hareketi yerin dönme hareketinin zıt yönündedir. Yerin dönme hızından yararlanarak prograd yörüngede uydunun nihai hızını daha az bir itici ile elde etmek amacıyla hemen hemen tüm iletişim uyduların yörüngeleri prograd yörüngelerdir. Retrograd yörüngesinde, bir uydunun fırlatılması yerin dönme doğrultusuna ters bir yönde olmasından fazla iticiye ihtiyacı vardır.

Uydu yörüngeleri de yörüngesel yükseklik bakımından aşağıdaki gibi sınıflandırılır (Sreedharan 2007).

- Alçak Dünya Yörüngesi (Low Earth Orbit, LEO)
- Orta Dünya Yörüngesi (Medium Earth Orbit, MEO)
- Yüksek Eliptik Yörüngesi (Highly Elliptical Orbit, HEO)
- Yer-durağan Dünya Yörüngesi (Geostationary Earth Orbit, GEO)

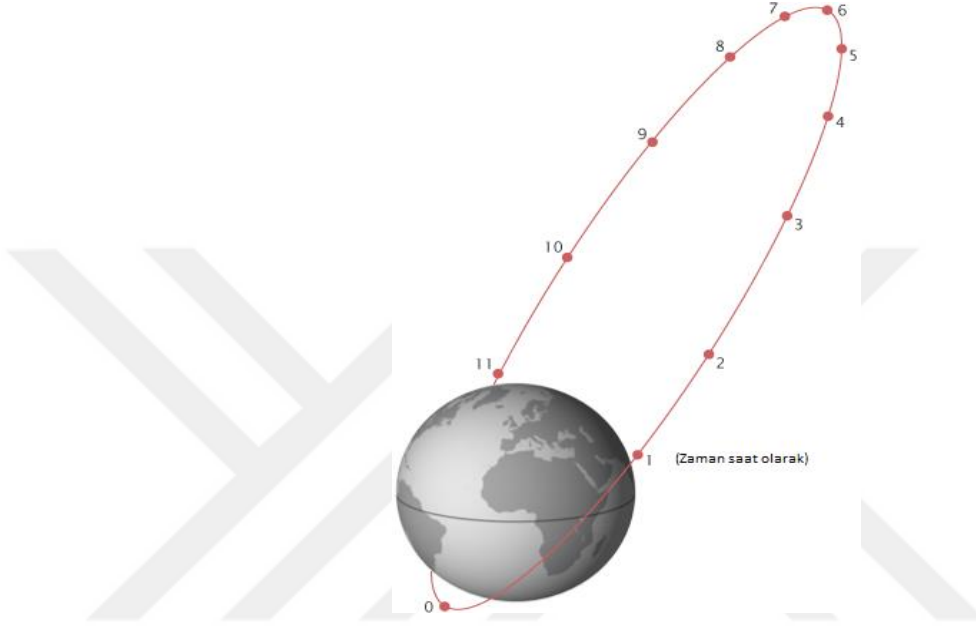
Dünya yörüngesinde bir uydunun davranışı için Kepler'in gezegensel hareket yasaları uygulanmaktadır. Şekil 2.5'te dünya yörünge şeması gösterilmiştir. Alçak Dünya Yörüngesinin sistemleri 500 ile 1000 *km* arasında değişen irtifalarda uyduları kullanmaktadır. Bu aralıkta, yörünge süresi 1.6 ile 1.8 saat arasındadır; yüksek yörünge devrimin biraz daha uzun süresine sonuçlanmaktadır. Sürede bu küçük değişimin sebebi, süresini belirleyen dünyanın merkezine uzaklıktır, deniz seviyesinden yükseklik değildir. LEO uydularının temel avantajı, kısa aralıktır ki radyo işareti daha az güç ile ve yayılma gecikmesi en az süre ile çapraz geçiş yapsın (Elbert 2008).



Şekil 2.5. Uyduların yörüngeleri; LEO, MEO, HEO ve GEO (Anonim 2015)

Orta Dünya Yörüngesinin yüksekliği yaklaşık 10000 *km* ve süresi yaklaşık 6 saatliktir. 2000 – 8000 *km* arasında, Van Allen radyasyon kuşağı tarafından üretilen elektronik bileşenleri için konuk sevmez bir ortam vardır. 8000 ile 10000 *km* aralığı yüksekliklerde, bir MEO uydusunun daha uzun süresi vardır ve bu nedenle bir kaç saat yeryüzündeki verilen bir bölge üzerinde gözetmektedir. İletim mesafesi ve yayılım gecikmesi LEO'dan daha fazla ama yine de GEO'dakinden önemli ölçüde daha azdır (Elbert 2008).

Basıklığı Yüksek Eliptik Yörüngesinde uydular yüksek enlemlerde iletişim için uygundur. Şekil 2.6'da gösterilen Rus Molniya uyduları yaklaşık 1000 km yerberi (Perigee), 40000 km doruk (Apogee), 63.435° eğim ve 12 saatlik yörüngesel dönem ile son derece eğimli eliptik yörüngeye sahiptir (Riebeek 2009).



Şekil 2.6. Molniya yörüngesi (Riebeek 2009)

24 saat süresi olan yere eşzamanlı (geosynchronous) yörüngesi ekvatora göre eğimli (inclined) veya eliptik (veya her ikisi) olabilir. Zemin bir nokta üzerinde görünen uydu, bir ekvatorial, 24 saatlik dairesel yörüngenin özel durumuna Yer-durağan Dünya Yörüngesi (GEO) denir. GEO, yeryüzü üzerinde 35784 km mesafede, ekvator üzerinde dairesel bir yörüngeyi işgal etmektedir. Ekvatora göre eğimli, 24 saat hizmet veren dairesel, yere eşzamanlı yörüngesi, GEO değildir, çünkü uydu, dünya üzerinde sabit noktaya göre hareket etmekte görünüyor. Bir GEO uydusunu takip eden zemin antenlerine ihtiyaç yoktur, halbuki eğimli, yere eşzamanlı yörüngesinde bulunan uyduyu takip eden zemin antenlerine ihtiyaç vardır (Blake 2012).

Yer-durağan uydularının mobil kullanımı için pek çok dezavantajları vardır. Onlar yeryüzünden çok uzun bir mesafede kaldığı için el telefonlarında son derece arzu edilen, yüksek kazançlı antenlerin kullanılması imkansızdır. Gereken verici güç piller üzerinde büyük bir yük taşıtır. Yol uzunluğu da bir gidiş-dönüş için yaklaşık 0.25 s'lik rahatsız edici

bir zaman gecikmesine neden olur. Bazı mobil haberleşme sistemleri yer-durağan uyduları kullanmakta, ama işaretler daha güçlü ve yayılma süresi daha kısa olması nedeniyle, yeni önerilerin çoğu daha düşük irtifalarda uyduların takımyıldızlarını kullanmaktadır (Blake 2012).

2.5. Uydu Haberleşme Temel Özellikleri

2.5.1. Kapsama

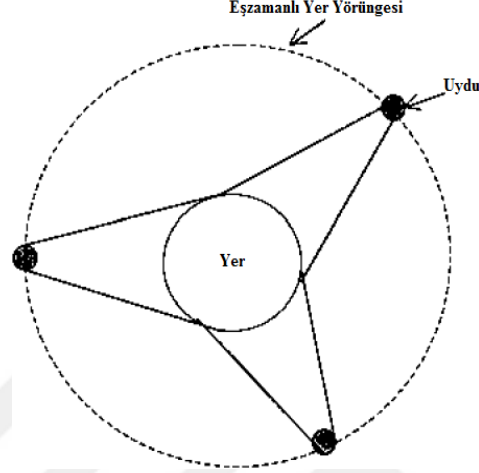
Uydu bağlantıları, uydu kapsama alanında bulunma koşuluyla, herhangi bir ara altyapı olmadan ve bu noktalar arasında coğrafi mesafelerine bağımsız koşulları (teknik, maliyet, vb) altında, yeryüzünde herhangi bir nokta arasındaki iletişime izin vermektedir. Bir GSO (GeoSynchronous Orbit) uydusu durumunda, hizmet için noktalar sadece uydudan görülebilir dünyanın bölgesinde değildir. Aynı zamanda, uydu antenlerin kirişlerinin kapsadığı coğrafi alanlar içinde bulunmaları gerekir: bu alanlar haberleşme uydu sisteminin kapsama alanları olarak tanımlanır. Uydu antenin kirişleri hizmet için bölgeye uyarlanmış özel kapsama alanları oluşturmak amacı ile şekillendirilebilmektedir.

Uydu, yerden yüksek bir mesafede bulunmasından dolayı, çok büyük serbest uzay yayılım kaybı (6 GHz frekansta yaklaşık 200 dB), yer istasyonlarda aşağıdaki parametreler ile dengelemelidir:

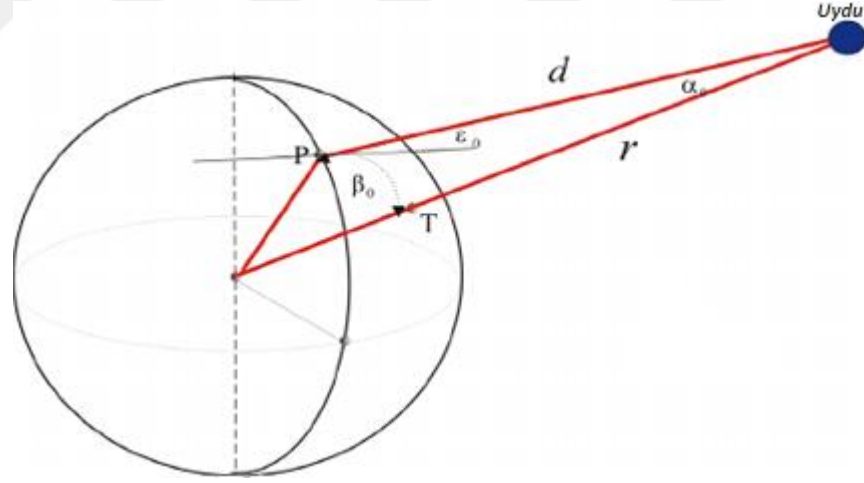
- Gürültü ve girişime düşük bir hassasiyet ile yüksek kazançlı (büyük çaplı, yüksek performanslı) anten
- Yüksek duyarlı alıcı (çok düşük iç gürültü ile)
- Güçlü verici

Öte yandan, yer istasyonu tarafından yerine getirilmesi gereken gereksinim, uydu transponder performansına doğrudan bağlıdır. Özellikle, küçük hizmet edilen alan, transponder ve uydunun etkili yayılan gücüne (EIRP) bağlanmış antenin ışınının daha fazla yönelme özelliğine sahip olması manasına gelir ki bu, yer istasyonun performansının daha düşük gereksinimlerine sonuçlar (ITU 2002).

Kapsama miktarı yeri gözleyen uydularının tasarımında önemli bir özelliğidir. Kapsama, çeşitli faktörler arasında yükseklik ve ekipmanın görünüm açılarına bağlıdır. Şekil 2.7’de üç uydu ile tüm yeryüzünü kapsama gösterilmiştir (Kolawole 2016).



Şekil 2.7. Üç uydu ile yeryüzünü tam kapsama (Kolawole 2016)



Şekil 2.8. Yer istasyonunun geometrisi (Cakaj 2014)

Bir uydu ile zemin istasyonun arasındaki temel geometrisi Şekil 2.8’de tasvir edilmiştir. Şekil 2.8’de, noktalar uydu, yer istasyonu ve yerin merkezini gösterir. Bu üçgenin iki tarafı yerin merkezinden yer istasyonuna kadar olan mesafeyi ve uydudan yerin merkez yörüngesel yarıçapına kadar olan mesafeyi göstermektedir. Bu üçgenin içinde dört değişken vardır: ε_0 – yükseklik açısı, α_0 – nadir açısı, β_0 – merkez açısı ve d – eğim aralığı. İki miktar bilindiğinde diğerleri (2.4), (2.5) ve (2.6) denklemlerle hızlıca bulunabilir.

$$\varepsilon_0 + \alpha_0 + \beta_0 = 90^\circ \quad (2.4)$$

$$d \cos \varepsilon_0 = r \sin \beta_0 \quad (2.5)$$

$$d \sin \alpha_0 = R_e \sin \beta_0 \quad (2.6)$$

En çok ihtiyaç duyulan parametre eğim aralığıdır. Bu parametre link-bütçe hesaplaması sırasında kullanılacaktır ve yükseklik açısı ile ifade edilmektedir. Üçgen için kosinüs yasası uygulanarak (2.7) denklemi elde edilir.

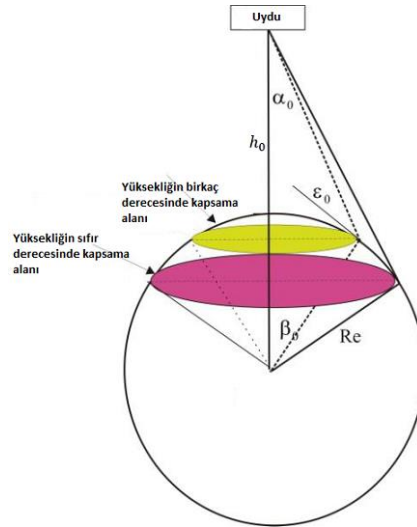
$$r^2 = R_e^2 + d^2 - 2R_e d \cos(90^\circ + \varepsilon_0) \quad (2.7)$$

Yükseklik açısının fonksiyonu olarak eğim aralığı (2.8) gibi elde edilebilir.

$$d(\varepsilon_0) = R_e \left[\sqrt{\left(\frac{h_0 + R_e}{R_e}\right)^2 - \cos^2 \varepsilon_0} - \sin \varepsilon_0 \right] \quad (2.8)$$

$$r = h_0 + R_e$$

h_0 , uydunun yeryüzünden yüksekliğidir. Kapsama alanına göre dönüştürülmesi Şekil 2.9 gibidir.



Şekil 2.9. Kapsama geometrisi (Cakaj 2014)

Şekil 2.9’da iki üçgen vardır. Büyük olan sıfır derece yükseklikte tam kapsama olgusudur. Genel olarak, küçük üçgende sinüs teoremini uygulayarak (2.9) elde edilebilir.

$$\frac{\sin \alpha_0}{R_e} = \frac{\sin(90^\circ + \varepsilon_0)}{R_e + h_0} \quad (2.9)$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{R_e}{R_e + h_0} \cos \varepsilon_0 \quad (2.9 a)$$

$\varepsilon_0 = 0$ için azami kapsama elde edilir, böylece bilinen h_0 yükseklikte azami kapsama için kapsama açısı (2.9 b)’da verilmiştir (Cakaj 2014).

$$(\sin \alpha_0)_{Mak, h_0} = \frac{R_e}{R_e + h_0} \quad (2.9 b)$$

Maksimum geometrik kapsamı daha sonra uydunun bir koni içindeki yeryüzüne teğet olan apeksta (tepede) yerin bölümü olarak tanımlanabilir. Uydudan yer terminaline bakış açısı α olarak düşünülürse, o zaman tepe açısı 2α olacaktır.

Bakış açısı (2.10) ile verilmiştir.

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{R_e}{h_0 + R_e} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{R_e}{r} \right) \quad (2.10)$$

Deneysel değerleri kullanılarak ($R_e = 6378 \text{ km}, r = 42162 \text{ km}$), tepe açısı (2α) 17.33° olup düzlemsel açının ışın genişliğine eşittir. Bu “yeryüzü kapsama”, uydu anteninin minimum ışın genişliği $\theta_{BW} = 17.33^\circ$ olması gerektiğini sonucuna varacaktır. Uygulamada 18° ya da 19° ışın genişliğine sahip olan anten yönlü karışmalara izin vermemek için kullanılmaktadır. Böylece, tek bir GSO uydusunun yeryüzünün üçte birine aşan aydınlatması için, antenin asgari ışın genişliği en az 2α olmalıdır.

Uydu antenlerin ışın genişliği kapsanmış veya servis verilmiş yerin alanını belirlemektir. Gerekli ışın genişliği belirli bir çalışma frekansında anten kazancı ve anten açıklığın fiziksel boyutunu doğrudan belirler.

Bir kılavuz olarak Şekil 2.10'dan notasyonları kullanarak, uydudan en az ε_0 gibi bir yükseklik açısı ile görünür olan kapsama alanı (A_{Kap}) (2.11) gibi kurulabilir.

$$A_{Kap} = 2\pi R_e^2 (1 - \cos \gamma) \quad (2.11)$$

Burada γ merkez açısıdır. Bu yeryüzü ve uydu koordinatları ile ilgili küresel trigonometrinin ilişkisidir.

Yerdeki uydunun kapsama alanı yörünge parametrelerine bağlıdır ve genellikle uydu kapsama alanı ya da uydunun ayakizi (Footprint) yer alanının bir kısmı olarak (yüzde olarak) ifade edilmektedir.

$$Kapsama (\%) = \frac{A_{Kap}}{A_{Yer}} = \frac{2\pi R_e^2 (1 - \cos \gamma)}{4\pi R_e^2} = \frac{1}{2} (1 - \cos \gamma) \quad (2.12)$$

Uyduya gerekli tepe açısı, belirli bir kapsamayı (A_{Kap}) üretmek için uygun olmalıdır.

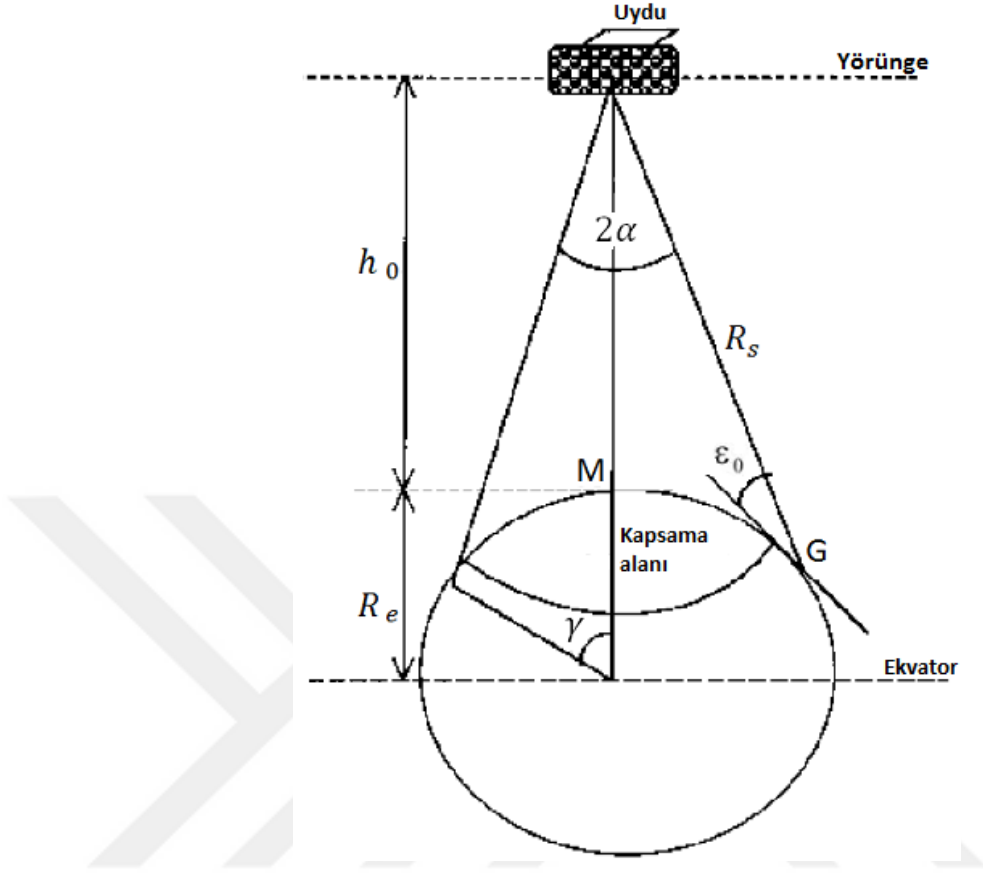
$$2\pi\{1 - \cos \alpha\} = \frac{A_{Kap}}{h_0^2} \quad (2.13)$$

Ancak, küçük açılar için evrensel ışın genişliği yaklaşık olarak (2.14)'teki gibi hesaplanır.

$$2\alpha \approx \frac{d_{Kap}}{h_0} \quad (2.14)$$

Burada d_{Kap} kapsama alanının çapıdır.

Kapsama alanı ve tepe açısı Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Kapsama alanı ve tepe açısının gösterimi (Kolawole 2016)

2.5.1.1. Geometrik mesafeler

Yörünge düzleminde GEO uydularının yörünge geometrisini göz önüne alarak aşağıda verilen parametrelerin hesaplanması mümkün olacaktır:

- Eğim aralığı (R_s) denilen uydu ve yer istasyonu arasındaki mesafe
- Topluca bakış açıları denilen azimut ve yükseklik açıları. Bakış açıları, yer istasyonunun anteni uydu ile iletişim kurmak için işaret edilmeli olan koordinatlardır.
- Alan mesafesi ya da alan genişliği (swath distance/ swath width) denilen yörünge zemin iz boyunca incelendiği bölümün genişliği

Netlik için ve kapsama alanı olmadan Şekil 2.10, Şekil 2.11 gibi yeniden çizilir. Kılavuz olarak bu şekli kullanarak yukarıda listelenen parametrelerin çoğunu yöneten ifadeler kurulabilir.

Şekil 2.11’de:

S: Uydunun konumu

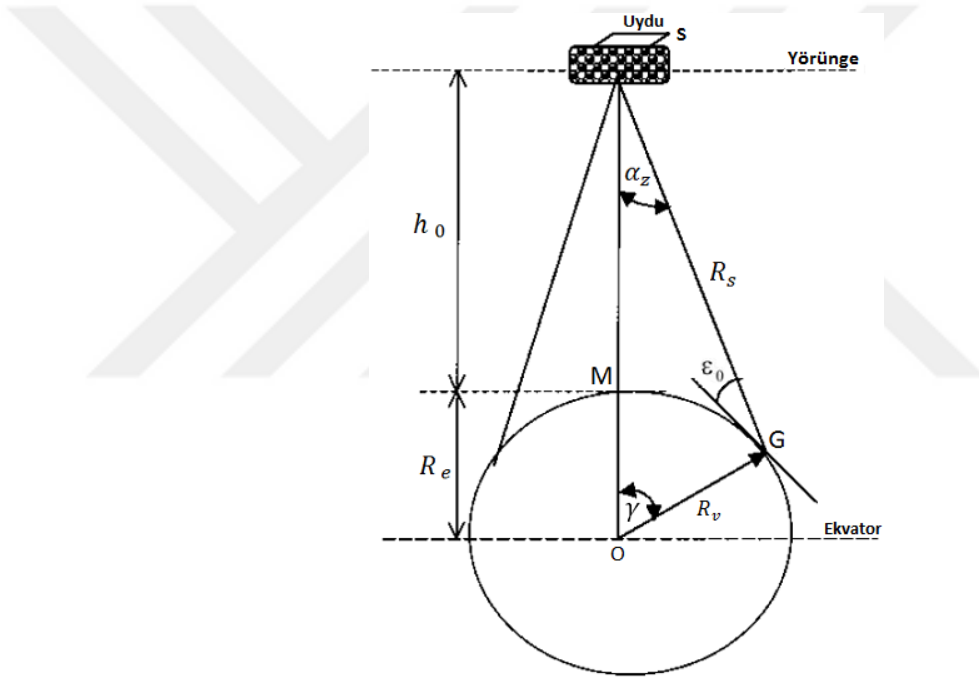
G: Yer istasyonunun konumu

$R_v = OG$: *G* enleminde yerin yermerkezli yarıçapı

ε_0 : Yeryüzü istasyonundan uydunun yükseklik açısı

M: Uydu alt noktasının konumu. Bu konumun enlem ve boylamı Efemeris uydu tablosundan belirlenir. Sözde, yerdurağan uydu için enlem 0° olarak alınır.

γ : Merkezi açı



Şekil 2.11. Bakış açılarının geometrisi (Kolawole 2016)

Küresel trigonometrik ilişkileri kullanarak merkezi açı (2.15)’teki gibi bulunabilir.

$$\gamma = \cos^{-1}(\sin L_U \sin L_{YI} + \cos L_U \cos L_{YI} \cos \Delta) \quad (2.15)$$

Kosinüs yasası kullanılarak eğim aralığı (2.16)’daki gibi bulunacaktır.

$$R_s = \sqrt{R_e^2 + r^2 - 2rR_e \cos \gamma} \quad (km) \quad (2.16)$$

Yükseklik açısı (2.17)'deki gibi yazılabilir.

$$\varepsilon_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \Delta \cos L_{YI} - \left(\frac{R_e}{r} \right)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \cos^2 L_{YI}}} \right) \text{ derece, } R_e/r \approx 0.1512 \quad (2.17)$$

Azimut için (2.18)'deki ilişki vardır (Beasley ve Page 1999).

$$A = 180^\circ + \tan^{-1} \left[\frac{\tan \Delta}{\sin L_{YI}} \right] \quad (2.18)$$

L_{YI} : Yer istasyonunun enlemi. Bu değer enlem için kuzey yarımküre'de (ekvatorun kuzeyinde) pozitif ve güney yarımküre'de (ekvatorun güneyinde) negatiftir.

L_U : Uydunun enlemi

Δ : Yer istasyonu ile uydu arasındaki boylam farkı

r : Yörüngenin yarıçapı, $OM + MS = R_e + h_0$

(2.17)'de yükseklik açısı için geliştirilmiş olan denklem geometrik değerini vermektedir (Kolawole 2016).

2.6. Uzay Bağlantısı

Link güç bütçesinin hesaplamalarının temelinde iki parametresi, iletim gücü ve alma gücü ile ilişkindir ve bu, iki güç arasındaki fark ile nasıl bağlantılı olduğunu ayrıntılı olarak göstermektedir. Link-bütçe hesaplamaları genellikle desibel veya decilog miktarları kullanılarak yapılır. 'dB' kısaltması kullanıldığında birimleri ile ilgili hiçbir belirsizlik meydana gelmez. Örneğin, Boltzmann sabiti, -228.6 dB olarak verilir. Tam anlamıyla, bu, $(1 \text{ J} / ^\circ\text{K})$ 'ne göre -228.6 decilogs olarak verilmelidir. Bu durum kısaltmada gösterilip referans birimini göstermek için arzu edilir. Örneğin, dB Hz, 1 Hz'a göre desibel anlamına gelir (Roddy 2006).

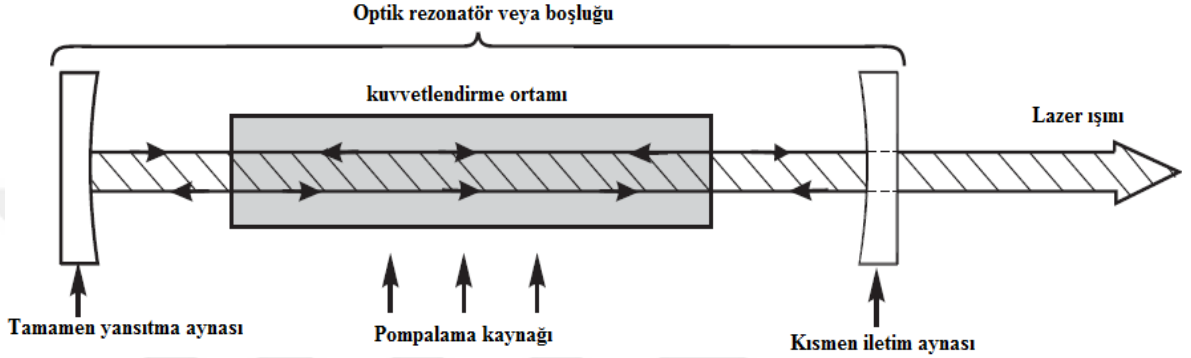
2.7. Lazer Tanımı

LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation kelimelerin baş harflerinin alınmasından türetilmiş bir kelimedir ve uyarılmış ışınım yayılımıyla ışığın kuvvetlendirilmesi manasına gelmektedir. İlk 1964 yılında "Optical Maser" isminin yerleştirilmesi için tanımlanmıştır. MASER, Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation kısaltması ile 1955 yılında tanımlanmıştır. Lazerler elektromanyetik spektrumun kızıl ötesi, görülebilir ya da morötesi bölümünde uzanan bir dalgaboyu ile tutarlı radyasyonu üreten cihazlardır. Işık demeti özel olarak hazırlanmış bir ortam üzerinden geçer ve başlar veya tam olarak aynı yönde ve tam olarak orijinal demetinin aynı dalgaboyunda ışığı yaymak için bu ortam içinde atomları uyardığı zaman meydana gelmektedir. Lazerler yüksek seviyede yönelimli, yüksek yoğunluklu ışını üretmek için ışığın yoğunluğunu yükselten ya da arttıran, tipik olarak çok saf bir frekans ya da dalgaboyuna sahip olan cihazlardır. Bunlar, insan saçının yaklaşık onda bir çapından çok büyük bir binanın boyutuna kadar farklı boylarda bulunabilir (Singh ve ark. 2012, Bretenaker 2015).

Lazerler çok kısa çoğuşmalar (bursts) için nW'tan 10^{21} W'a kadar değişen güçleri üretirler. Bunlar mikrodalga bölgesi ve kızılötesinden görünür, ultraviyole, vakum ultraviyole ve yumuşak X-ışını spektral bölgeye kadar değişen dalga boylarını ya da frekansları üretmektedirler. Bunlar insanın henüz üretebildiği ışının en kısa çoğuşmalarını (5×10^{-15} saniye) oluştururlar. Lazerler, en modern iletişim sistemlerinin bazı birincil bileşeni ve cd (kompakt disk) okuyucusundan gelen ses işaretlerini üreten sondalardır. Bunlar hem endüstriyel hem de tıp dünyasındaki malzemeler, ısıl işlem, kesme temizleme ve çıkarılması için kullanılır (Silfvast 2015).

Lazer ışığı kaynağının özel uyarılma doğası ve lazer ışığını üretmek için gerekli aygıtlar nedeniyle, genellikle lazer fotonların üretilmesi ya da karşılaştırılabilen gücünün kullanılması diğer ışık kaynaklarının üretilmesi veya kullanılması gibi ucuz değildir. Günümüzde, lazerler, sokak lambaları, oda ışıkları, otomobil farları ya da el feneri için lamba ampul gibi işlemlerinde kullanmamaktadır. Lazerler, aynı zamanda, genel olarak "beyaz ışık" sağlamaz, ancak bunun yerine kullanılan lazere bağlı olarak belirli bir "renk" ya da dalga boyu üretmektedir (Silfvast 2015).

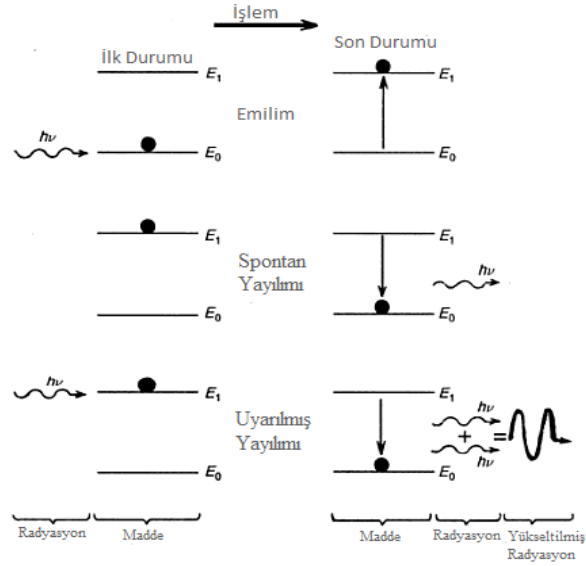
Tipik bir lazer cihazı, yükseltme ya da kazanç bir ortamı, cihaza enerji girişi için bir pompalama kaynağı, daha fazla amplifikasyon için kazanç aracılığıyla ışık ışınını ileri ve geriye yansıtan bir optik boşluktan veya ayna düzenlemeden oluşmaktadır. Aynaların birisi tamamen yansıtan öbürü ise kısmen iletendir. Kısmen ileten aynanın üzerinden ışığın küçük bir bölümüne kaçmak için izin verilerek lazer ışını elde edilir (Silfvast 2015).



Şekil 2.12. Temel lazer bileşenleri (Silfvast 2015)

Lazer eylemi üç anahtar işleminin sonucudur:

1. Foton emilimi
2. Spontan (doğal) yayılım
3. Uyarılmış (stimulated) yayılım



Şekil 2.13. Lazer eyleminde üç anahtar işlemi (Bendre ve ark. 2009)

2.8. Lazerlerin Kısa Tarihçesi

Max Planck 1900 yılında, ışık, elektromanyetik radyasyonun bir biçimi olduğu anlayışını sağlayan çalışmasını yayınladı. Bu anlayış olmadan lazer icat edilmeyecekti. Lazerin ilkesi ilk kez fizikçi Albert Einstein tarafından uyarılmış emisyon teorisi açıklandığında, 1917 yılında bilinmiştir. Ancak, mühendisler pratik amaçlar için bu ilkeyi kullanmaya başladığında, 1940'lara kadar bu ilke kullanılmamıştır.

1950'lerin başında birkaç farklı mühendis, uyarılmış emisyon prensibini kullanarak enerjinin doğru kullanılmasını sağlamışlardır. Maryland Üniversitesi'nde Joseph Weber, Kolumbia Üniversitesi'nde Charles Townes ve Moskova'da Lebedev laboratuvarlarında Alexander Prokhorov ve Nikolai G Basov idiler. Lazerin icadı ilk kez Arthur L. Schawlow ve Charles H. Townes tarafından 1958'de "Infrared and Optical Masers" adlı "American Physical Society's Physical Review" 'da yayınlandığında, MASER kelimesi tarif edilmiştir. Makalede, bu yeni bilimsel alanın başlatılması lazerin temel ilkeleriyle açıklanmıştır.

Theodore Maiman, birkaç bilim adamları tarafından yayınlanan raporların sonrasında 1960 yılında ilk pratik lazeri göstermek için ilk şahıs bilinmektedir. Maiman'ın birinci lazeri, bir flaş lambasını kullanarak sentetik yakut kristalin optik pompalamasına dayanan 694 nm'de darbeli kırmızı lazer radyasyonu üretendi. İranlı bilim adamları Javan ve Bennett 1960 yılında 1: 10 oranında He (Helium) ve Ne (Neon) gazların karışımını kullanarak ilk gaz lazeri yaptılar. R. N. Hall 1962 yılında galyum arsenit'ten (GaAs) yapılan 850 nm radyasyonu yayan ilk diyot lazeri gösterdi, ve daha sonra aynı yılda Nick Holonyak ilk yarıiletken görünür-ışığı yayan lazeri geliştirdi (Sprangle ve ark. 2008, Singh ve ark. 2012).

2.9. Lazerin Altyapısı ve Çalışma Prensibi

Genellikle her bir lazer sisteminin esas itibarıyla optik olarak paralel ve oldukça yansıtıcı aynaların bir çiftinin (biri kısmen ileten) arasında yer alan bir aktif / kazanç ortamı, ve aktif ortamını pompalamak için bir enerji kaynağı vardır. Pompalama elektriksel veya optik olabilirken kazanç ortamı, katı, sıvı veya gaz olabilir. Katı, sıvı veya gaz ortamları uyarılmış saçılımı ile içlerinden geçen ışık dalgasının genliğini büyütme için bu özelliğe sahip olabilmeleridir. Aynalar arasındaki salınan ışık kazanç ortamından geçtiği ve her

defasında önemli amplifikasyona ulaştıktan sonra ileten ayna tarafından yayıldığı şekilde kazanç ortamı ayna çiftinin arasında yerleştirilmiştir.

Sadece iki enerji düzeyine sahip atomların aktif ortamını düşünelim:

Uyarılmış düzeyi E_2 ve temel düzeyi E_1 .

Eğer temel seviyedeki (E_1) atomlar herhangi bir pompalama mekanizma (optik, elektrik deşarjı, geçen akım veya elektron bombardımanı) ile üst seviyeye (E_2) uyarılıyorsa, sadece onların uyarılmalarının birkaç nanosaniye sonrasında atomlar enerji fotonlarını ($h\nu = E_2 - E_1$) yaydığı gibi temel seviyesine geri döneceklerdir. Einstein'ın 1917 teorisine göre, emisyon işlemi iki farklı şekilde ortaya çıkabilir, ya foton tarafından uyarılan olabilir ya da kendiliğinden meydana gelebilir. İlk olay uyarılmış emisyon (stimulated emission) olarak adlandırılır iken sonraki, kendiliğinden emisyon (spontaneous emission) olarak bilinmektedir. Uyarılmış emisyon tarafından yayılan fotonlar uyarıcı foton gibi aynı frekansa, faza ve kutuplaşma haline sahiptir. Bu nedenle, onlar yapıcı olarak foton uyarıcı dalgasına eklenir böylece lazer ışınmasını (lasing) yürütmek için onun genliğini artıracaktır. Termal Denge, uyarılmış emisyonun olasılığı kendiliğinden emisyonundan çok daha düşüktür ($1 : 10^{33}$). Bu nedenle geleneksel ışık kaynaklarının çoğu tutarsızdır ve yalnızca lazer uygulaması termal dengesinin dışındaki koşullarda mümkündür (Singh ve ark. 2012, Griot 2013).

2.10. Einstein İlişkiler ve Kazanç Katsayısı

Birim hacim başına N_1 ve N_2 atomların toplamı ile $\rho_\nu = N * h\nu$ fotonların yoğunluğu tarafından ışınlandırılan E_1 ve E_2 ($E_2 > E_1$) enerjilerini düşünelim. Burada, N , birim hacim başına ν frekansının fotonlarının sayısıdır. O zaman uyarılmış emilim ve uyarılmış emisyonun oranları sırasıyla, $N_1\rho_\nu B_{12}$ ve $N_1\rho_\nu B_{21}$ olarak yazılabilir. Burada B_{12} ve B_{21} sırasıyla, enerji düzeylerin belirli bir çiftinin arasında yukarı ve aşağı geçişleri için sabitlerdir. Kendiliğinden (Spontan) geçiş oranı atomların uyarılmış haldeki ortalama ömrüne bağlı olup $N_2 A_{21}$ ile verilmektedir. Burada A_{21} bir sabittir. B_{12} , B_{21} ve A_{21} sabitleri *Einstein katsayıları* olarak bilinmektedir. Termal denge durumunu, atomik yayılımın Boltzmann istatistiği ve karacisim (blackbody) radyasyonun Planck yasasını birlik içinde kullandığımızda, $B_{12} = B_{21}$, $A_{21} = B_{21}(8\pi h\nu^3/c^3)$ ve $R = \exp(h\nu/kT) - 1$

sırasıyla *Einstein ilişkiler ve oranı* olarak bilinen kendiliğinden ve uyarılmış emisyonların oranlarının bulunması kolaydır.

Örneğin, He-Ne sisteminden oda sıcaklığında 632.8 nm dalga boyunda ışık üretmek zorunda olduğumuzda kendiliğinden ve uyarılmış emisyon oranı yaklaşık 5×10^{26} olacaktır. Bu güçlü lazer uygulamasının alınması için termal dengeyi ayrı düşünmek zorunda olduğumuzu göstermektedir. Kısa dalgaboylu lazer için, uyarılmış emisyon karşılık kendiliğinden emisyon oranı daha büyüktür. Bu, uyarılmış emisyonun ilkesini kullanarak IR'a göre UV ışığın üretilmesi daha zor olduğunu göstermektedir.

Uyarılmış emisyon yoluyla yoğun lazer ışını veya ışık amplifikasyonu üretmek için kendiliğinden emisyon ve öz soğurmada (Self absorption) daha fazla uyarılmış emisyonun yüksek oranını gerektirir. Bu, $E_2 > E_1$ (Boltzmann istatistiklerine ters) olmasına rağmen, $N_2 > N_1$ ($B_{12} = B_{21}$ gibi) için sadece mümkündür. Bu, yoğun lazer ışığını elde etmek için uyarılmış emisyon sürecini arttırmak amacıyla termal denge ötesine geçerek *populasyon enverziyonunun* (population inversion) durumunu oluşturmak zorunda olacağı anlamına gelmektedir.

Bahsedilen aktif bir ortam üzerinden başlangıç yoğunluğa (I_0) sahip monokromatik ışığın birleştirilmiş ışını geçerse, x uzunluğundan geçtikten sonra ışının yoğunluğu $I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$ ile verilmektedir. Burada α , N_1 ve N_2 farkı ile orantılı olan ortamın emme katsayısıdır. Termal denge durumunda ($N_1 \gg N_2$), demetin parlaması ortam boyunca yayılma süresi ile azalır. Ancak, populasyon enverziyonunun durumunda ($N_2 > N_1$) - α , olumlu olacak ve demetin parlaması $I(x) = I_0 e^{kx}$ olarak katlanarak artacaktır. Burada, k , ortamın kazanç katsayısı olup $k = (nN_d h\nu_{21} B_{21})/c$ ile verilecektir. Kazanç katsayısında, $N_d = N_2 - N_1$, c ışık hızı ve n ortamın kırılma indisidir (Wamser 2000, Singh ve ark. 2012).

2.11. Lazer Spektrumu ve Dalgaboyları

Elektromanyetik radyasyon spektrumunun bir kısmı halen mevcut lazerlerin kapsadığı bölge için Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Bu tür lazerler, uzak kızılötesi (far infrared) kısmının spektrumundan ($\lambda = 1000 \mu\text{m}$) yumuşak X-ışınının (soft-X-ray) bölgesine ($\lambda = 3 \text{ nm}$) kadar dalgaboyu aralığını kapsamaktadır. Lazer dalgaboylarını tanımlamak için kullanılan

birimlerin çeşitli türleri vardır. Kızılötesi bölgesinden görünür, morötesi (UV), vakum morötesi (VUV), uç morötesi (EUV veya XUV) ve yumuşak X-ışınının (SXR) spektral bölgelerine kadar mikrometre (μm), nanometre (nm) ve angstrom (\AA) ile lazer dalgaboyları ölçülmektedirler.

DALGABOYU BİRİMLERİ

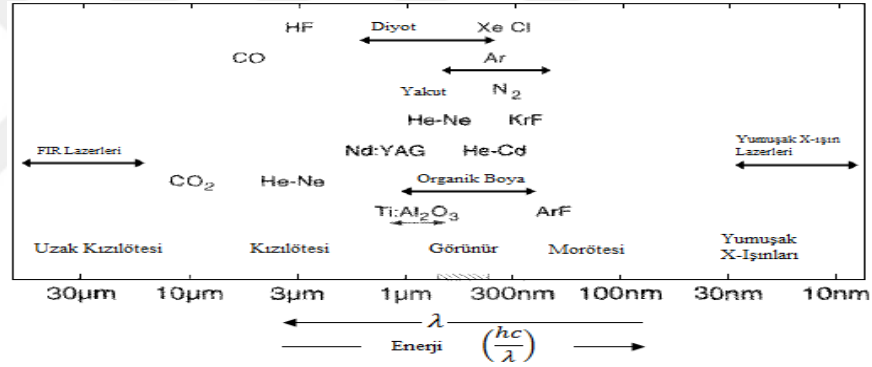
$$1 \mu m = 10^{-6} m$$

$$1 \text{\AA} = 10^{-10} m$$

$$1 nm = 10^{-9} m$$

Sonuç olarak, 1 mikron (μm) = 10 000 angstrom (\AA) = 1 000 nanometre (nm).

Örneğin, yeşil ışığın dalgaboyu = $5 \times 10^{-7} m = 0.5 \mu m = 5 000 \text{\AA} = 500 nm$.



Şekil 2.14. Çeşitli lazerlerin dalgaboyu aralığı (Silfvast 2004)

DALGABOYU BÖLGELERİ

Uzak kızılötesi: 10 – 1 000 μm ;

Orta kızılötesi: 1 – 10 μm ;

Yakın kızılötesi: 0.7 – 1 μm ;

Görünür: 0.4 – 0.7 μm , veya 400 – 700 nm;

Morötesi: 0.2 – 0.4 μm , veya 200 – 400 nm;

Vakum morötesi: 0.1 – 0.2 μm , veya 100 – 200 nm;

Uç morötesi: 10 – 100 nm;

Yumuşak X – ışını: 1 nm'den yaklaşık 20 – 30 nm'ya (EUV ile biraz çakışma)(Silfvast 2004).

2.12. Lazer Gücü ve Enerjisi

Lazerin gücü watt olarak (genellikle $nW, \mu W, W$ vb. cinsinden belirtilmiştir) ölçülmektedir ve lazer ışının optik güç çıkışından bahsetmektedir ki bu sürekli dalga (CW) lazerlerin sürekli güç çıkışı, ya darbeleri ya da modüle edilmiş lazerin ortalama gücüdür.

Lazer enerjisi tipik olarak darbeleri bir lazer çıkışı ve ilgili güç çıkışı ile ilişkindir. Enerji, lazerin darbe süresi (t) çarpı lazerin tepe gücüne (P_{tepe}) eşittir.

$$E = P_{tepe} \times t \quad (2.19)$$

Darbeleri lazerin ortalama gücü (P_{Avg}), darbe enerjisi (E) ile lazerin tekrarlama hızının (Hz) çarpımına eşittir (Anonim 2009).

$$P_{Avg} = E \times Hz \quad (2.20)$$

Kararlı-hal (steady-state) koşullarında, uyarılmış emisyon tarafından yayılan güç basitçe (2.21)'deki gibi yazılabilir:

$$P_e = (I - I_{th})\eta_i hv/e \quad (2.21)$$

I_{th} : eşik akımı

η_i : iç kuantum verimi

v : yayılan radyasyonun frekansı

Bu gücün bir kısmı iç kayıpları (saçılma ve kaplama kayıplarının nedeni) ile dağıtılır ve bir kısmı iki boşluk ucundan çıkış gücü olarak kullanılabilir. Daha sonra bu güç (2.22)'deki gibi yazılabilir (Svelto 2010).

$$P = \left[\frac{(I - I_{th})\eta_i hv}{e} \right] \left(\frac{-\ln R}{\alpha L - \ln R} \right) \quad (2.22)$$

R : aynanın iki ucunda güç yansıtması

α : iç kaybın katsayısı

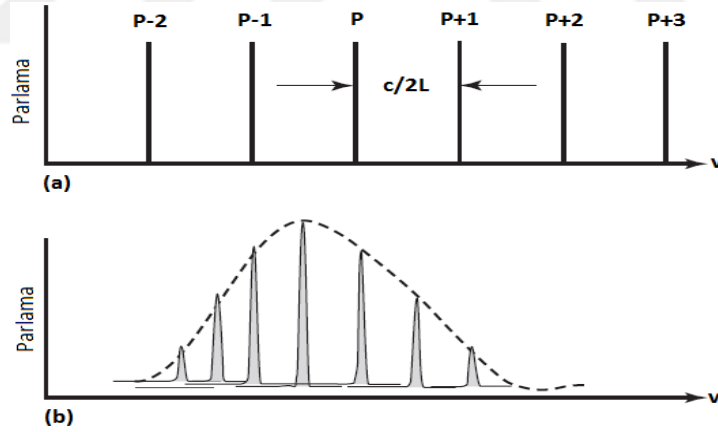
L : boşluk uzunluğu

2.13. Lazer Modları

Lazer ışının çıkışı aslında geniş bir frekans aralığında farklı frekansların yakın aralıklı spektral çizgilerinin bir dizisini içerir. Ayırık spektral bileşenleri *lazer modları* olarak adlandırılır ve kapsama aralığı, lazer çıkışı için sorumlu olan atom geçişinin hat genişliğidir. Lazer modları Eksenel (Axial) ve Çapraz veya Enine (Transverse) modları olarak kategorize edilmektedir.

2.13.1. Eksenel modu

Eksenel modlar, boşluk eksenine tamamen paralel olarak hareket eden ışık dalgalarının tarafından oluşturulur. Ayna üzerine gelen ışık ve ondan yansıyan ışık, her iki ucunda sınırlanan bir dizgeye benzer duran bir dalgayı oluşturacaktır. Tüm eksenel modlar iki yansıtan ayna merkezlerini birleştiren çizgi boyunca düzlem dalgalarının yayılması nedeniyle mevcuttur. Eksenel modlar tek renkliliğinin (monochromaticity) derecesini doğrudan etkiler. (Şekil 2.15 a,b) eksenel lazer modunun basit görünüşü ve çizginin merkezindeki modun maksimum yoğunluğu ile lazer hat genişliğinin içi gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Eksenel lazer modları (a) Basit bir gösterimi (b) Çizginin merkezindeki modun maksimum yoğunluğuna sahip olduğunu gösteren lazer hat genişliğinin içi (Singh ve ark. 2012)

Bir duran dalgayı oluşturmak için, bir aynadan diğer aynaya ve geri optik yolu, dalgaboyunun bir tamsayı çarpması olmalıdır. Dalga aynada aynı faz ile başlamalıdır. Aynalar arasındaki mesafe sabittir (L). Duran dalgalarını oluşturan uygun dalgaboyları " $\lambda_m = 2L/m$ " koşulunu yerine getirmelidir.

L : Optik boşluğunun uzunluğu

m : Optik boşluğunun içindeki yarım dalgaboyların sayısına eşit olan mod sayısı

λ_m (*maddede dalgaboyu*): Optik boşluğunun içindeki m modun dalgaboyu ($\lambda_m = \lambda_0/n$)

λ_0 : Vakumda ışığın dalgaboyu

n : Aktif ortamının kırılma endeksi

c : Vakumda ışığın hızı

ν_m : Boylamsal modun frekansı

$c = \lambda_0 \nu$ olduğunda,

$$\nu_m = \frac{c}{n\lambda_m} \quad (2.23)$$

(2.23) denkleme λ_m değerini koyduğumuzda:

$$\nu_m = m \cdot \left(\frac{c}{2 \cdot n \cdot L} \right) \quad (2.24)$$

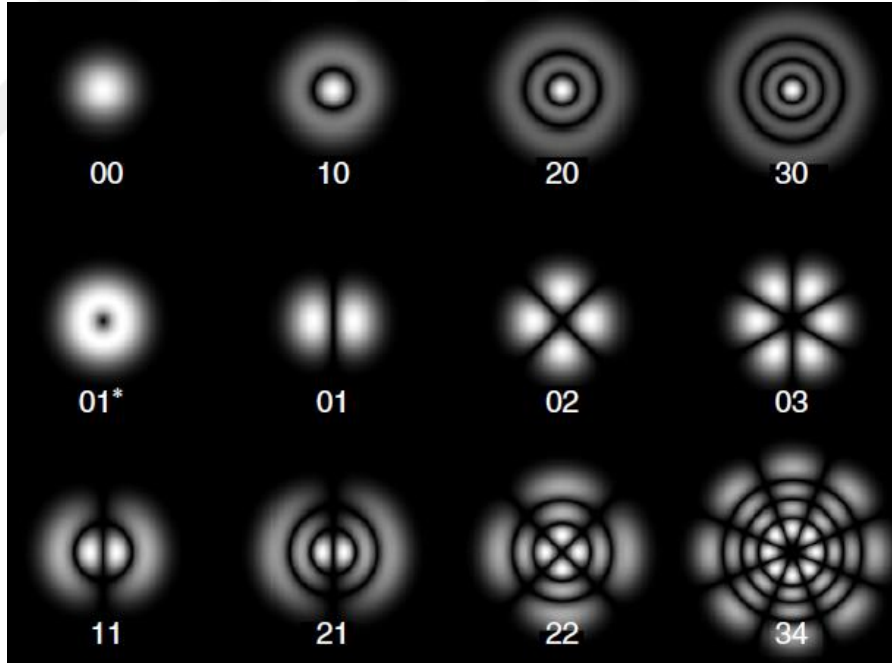
Salınımın ilk modu: $\nu_1 = \frac{c}{2 \cdot n \cdot L}$

Bu mod temel boylamsal modu olarak bilinir ve optik boşluğunun temel frekansına sahiptir. $d\phi = 2\pi/\lambda \cdot (2L)$ boşlukta gidiş-dönüşten sonra lazer dalga faz değişimi olsun. Boşluk içinde lazer salınımını sürdürmek için faz değişimi 2π 'in tümleyici bir katı olmalıdır, yani $2\pi/\lambda \cdot (2L) = 2p\pi$. Frekans açısından, bu ifade $\nu = pc/2L$ 'ya transforme edilir; bu nedenle, iki bitişik p ve $p + 1$ modların arasındaki ayrılma $\Delta\nu = c/2L$ ile verilmektedir. Nd: YAG özel durumunda, $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ve $L = 25 \text{ cm}$, lazerin boşluğunun içinde $p = 2L/\lambda \approx 47 \times 10^{24}$ aksenel mod mevcuttur. Eğer lazerin çizgi genişliği 1064 nm 'de yaklaşık olarak $\Delta\omega = 1 \text{ GHz}$ olsa, sadece $\Delta\omega/\Delta\nu \approx 1$ olduğunda, diğer modlar ölürlen aksenel modu boşluk içinde salınacaktır (Foth 2008, Sawaf 2010, Singh ve ark. 2012).

2.13.2. Çapraz modu

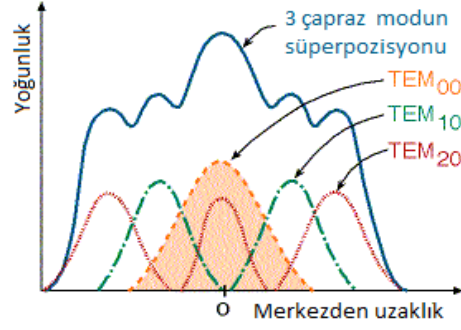
Eksenel modlarda boşluğun ekseni boyunca yayılan düzlem dalgaların aksine, çapraz elektromanyetik modları (TEM) olarak adlandırılan kendi yolunu tekrarlayamayan eksen dışına hareket eden bazı dalgalar vardır. Çapraz modları esas olarak ışın demeti sapması,

bölge boyutu ve maksimum güç yoğunluğu etkiler. Lazer ışını her yüzeye düştüğünde bu modlar pratikte desen şeklinde görülebilmektedir. Bu modlar lazer ışının deseninde, p ve q sırasıyla yatay ve dikey eksenleri boyunca (aydınlatılan bölgeler arasında) sıfır aydınlatma noktalarının sayısıdır. Bu modlar TEM_{pq} şeklinde iki tamsayı (p ve q) tarafından tahsis edilmektedir. TEM_{00} , ışın bölgesinde hiçbir sıfır aydınlatma noktasının olmadığını gösterir ve bu *Uniphase modu* olarak bilinmektedir. Aksine, TEM_{01} yatay taramada hiçbir sıfır aydınlatma noktası olmadığını ve dikeyde bir sıfır aydınlatma noktası olduğunu göstermektedir. Bu sınıflandırmaya sığmayan bir çapraz modu ve önemine bağlı olarak (kendi şekline göre) özel bir adı vardır: "Bagel" veya "Doughnut". Bu TEM_{01} ve TEM_{10} salınımdan oluşmaktadır. Birkaç TEM modu ile ekranda lazer ışınının bölgeleri Şekil 2.16'da görüntülenmektedir. Şekil 2.16'da "01*" Bagel durumunu gösterir (Sawaf 2010, Singh ve ark. 2012).



Şekil 2.16. Lazerin farklı TEM modları (Singh ve ark. 2012)

Bir lazer birkaç çapraz modunda çalışırken, toplam yoğunluk profili mevcut olan tüm çapraz modların süperpozisyonudur. Şekil 2.17'de gösterildiği gibi, alt çapraz modu (TEM_{00}) diğer modları ile karşılaştırıldığında küçük bir çapa sahiptir (Foth 2008, Singh ve ark. 2012).



Şekil 2.17. Çapraz modun kontrolü (Sawaf 2010)

2.14. Lazer Çeşitleri

Aktif ortamının tabiatına bağlı olarak lazerler; katı, sıvı ve gaz şeklinde üç ana kategoriye ayrılır. Bilim adamları ve araştırmacılar lazer ışınımını yakut kristalinde gözlediğinde 1958 yılından bu yana lazer malzemelerinin çeşitlerini aktif ortam olarak her kategoride araştırmışlardır. Günümüzde çok çeşitli dalgaboylarına sahip olan, farklı boyutlarda, farklı malzemelerden yapılan lazerlerin üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu malzemelere sahip olan tüm lazerlerin aktif ortam olarak tartışılması bu tez kapsamında yapılmayacaktır (Kuhn 1998, Singh ve ark. 2012).

Çizelge 2.2’de listelendiği gibi, lazerin çeşitli özelliklerine (eşevresellik, yüksek monokromatiklik ve son derece yüksek güçlere ulaşma yeteneği) dayanarak farklı alanlarda geniş bir biçimde kullanışı vardır.

Çizelge 2.2. Lazer uygulamaları

Kullanılan Alan	Amaç
Bilim	İnterferometrik teknikleri, Spektroskopi, Astronomi
Tıp	Lazer neşter, Ameliyatlar (Göz, Yumuşak doku, Kozmetik)
Endüstri ve Ticaret	Kesme, Kaynama, Barkod okuyucular
Telekomünikasyon	Fiber optic, Radar, Uydu
Askeri	Silah, Defansif önlemler, Rehberlik, Hedefleme
Bireysel	CD/DVD’ler, Lazer aydınlatma, Laser tag
Sanat	Aşındırma

Serbest ortam optik haberleşme sistemi için kullanabilecek farklı lazer kaynak türleri özet olarak Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Haberleşme için kullanabilecek farklı lazer kaynak türleri (Akbulut 2006)

Lazer türü	Malzeme
Gaz	CO_2 $He - Ne$
Katıhal	$Nd:YAG$ $Nd:YLF$ $Nd:YAP$
Yarı-iletken (Diyot)	GaAlAs InGaAs InGaAsP

2.15. Lazer Işınının Özellikleri

Lazerlerden üretilen ışık, geleneksel diğer ışık kaynaklarından elde edilen ışıkta olmayan, çeşitli bilimsel ve teknik uygulamalar için uygun hale getirilen değerli özelliklere sahiptir. Lazer radyasyonu, Monokromatiklik (Monochromaticity), Eşevresellik (Coherence), Yönlülük (Directionality) ve Parlaklığın (Brightness) aşırı yüksek bir derecesi ile karakterize edilir. Bu özelliklere bir özellik daha eklenebilir; Kısa Zaman Süresi (Short Time Duration) (Svelto 2010, Singh ve ark. 2012).

2.15.1. Monokromatiklik

Teorik olarak, titreşimin tek bir frekansı ν ya da tek bir dalga boyu λ ile ışık dalgaları, tek renkli veya monokromatik ışık kaynağı olarak adlandırılır. Pratikte, lazer dahil ışığın hiçbir kaynağı ideal olarak monokromatik değildir. Monokromatiklik göreceli bir terimdir. Işığın bir kaynağı diğerlerinden daha monokrom ya da tekrenkli olabilir. Kısaca bu özelliğin aşağıdaki iki şart sebebiyle olduğunu söyleyebiliriz:

- Sadece bir e.m. $\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$ ile verilen frekans dalgası amplifiye edilebilir.
- İki ayna düzenlemesi bir rezonans boşluğu oluşturduğundan ötürü, salınım sadece bu boşluğun rezonans frekanslarında oluşabilir.

Nicel olarak, monokromatiklik derecesi bir hattın frekansında yayılma $\Delta\nu$, ışık kaynağının çizgi genişliği veya ilgili dalgaboyunda yayılma $\Delta\lambda$ ile karakterize edilir. $\Delta\lambda$ 'nın küçük değeri için frekans yayılması $\Delta\nu = -(c/\lambda^2)\Delta\lambda$ ve $\Delta\lambda = (c/\nu^2)$ ile verilir. Lazer ortam türü ve uyarma türüne göre, üretilen lazer çizgisi genişten (boya lazer gibi, $\Delta\lambda \sim 200 \text{ nm}$) dar (gaz deşarj hatları için, $\Delta\lambda \sim 0.01 \text{ nm}$) aralığına kadar renk bantlarını içermektedir.

Uygun filtreleri kullanarak lazer ışımaya geçişinin tek bir satırına kadar iyi monokromatiklik elde edilebilir. Ama yine de böyle tek bir satır lazer modları olarak bilinen ayrık frekansların yakından aralıklı çizgiler kümesini içermektedir. Kilitleme modunu kullanarak merkezi yoğun modu hariç diğer tüm modların bastırılması ile lazer çizgisinin monokromatikliği artırılabilir. Modların bastırılması, iki mod arasındaki mesafeyi ($\Delta\nu_{sep} = c/2L$) artırarak mümkündür. İki mod arasındaki mesafe de boşluk uzunluğu azaltılarak gerçekleştirilebilir. Eksenel modun ayrımı lazer ışımaya geçiş çizgi genişliğine ($\Delta\nu$) yaklaştığında, sadece tek mod salınımı mümkündür. Şimdi, lazer çizgi genişliği çok dar tek boylamsal bir moda eşittir. Lazer hattının genişliği, boşluğun kalite faktörüne Q doğrudan ilişkilidir ve $Q = \nu/\Delta\nu$ ile verilir. Kalite faktörü Q aslında döngü başına harcanan enerji ve rezonans durumunda boşlukta depolanan enerjinin oranını tanımlar ($Q=2\pi \times \text{rezonansta rezonatördeki depolanan enerji}/ \text{döngü başına harcanan enerji}$). Lazer hattının genişliği sıfır ise $\Delta\nu = 0$, tek bir frekansta salınım yapmaktadır ve lazer hattı kesinlikle monokromatik olacaktır. Tek modlu lazer monokromatikliğin en yüksek derecesine sahiptir, ama ideal bir monokromatiklik koşulunu elde edememiştir (Foth 2008, Svelto 2010, Singh ve ark. 2012).

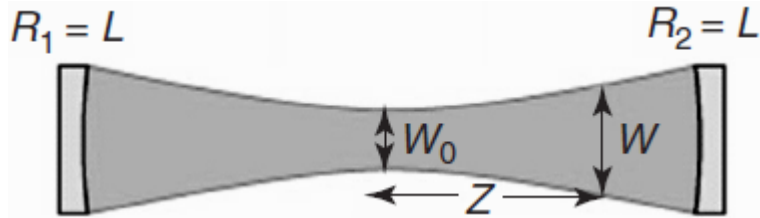
2.15.2. Eşevresellik

Eşevreselliğin temel anlamı, lazer ışımada tüm dalgaların mekansal ve geçici olarak aynı fazda kalmalarıdır. Eşevresellik, zaman ya da lazer ışının boyunca ışığın senkronizasyonu ile ilgilidir. Uyarılmış emisyon süresince üretilen fotonlar uyarıcı fotonlar ile eş fazlıdır. İdeal bir lazer sistemi için, ışının kesitindeki her noktada ışık dalgalarının elektrik alanı zaman ile aynı eğilimi takip etmektedir. Böyle bir ışına Uzamsal Eşevresel (Spatially Coherent) denir. Işının uzunluğu bu ifadenin doğru olmasına kadar Eşevresel Uzunluk (L_c) olarak bilinir. Lazer ışınının eşevreselliğinin başka türü Zamansal Eşevreselliğidir (Temporal Coherence). Bu, ışın üzerindeki herhangi bir noktada lazer ışığın dalga fazındaki

değişim oranında tekdüzeliği tanımlar. Çerçeve zamanının uzunluğu lazer ışınının üzerindeki herhangi bir noktada faz oranının değişmesine kadar sabit kalır ve eşevresellik zamanı (t_c) olarak bilinmektedir. Aynı zamanda eşevresellik süresi, uzunluğu L_c bir ışık dalgasının dizisini yaymak için aktif ortam içinde atomlar/ molekülleri ile geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Bu iki eşevresellik dolayısıyla $t_c = L_c/c$ ile ilişkilidir. Lazer ışınının eşevresellik süresi neredeyse lazer geçiş genişliğinin tersidir ($t_c \approx 1/\Delta\nu$). Tek mod ile çalışan lazerler (iyi-istikrarlı lazerler) dar çizgi genişliğine sahiptir, bu nedenle, çok modda faaliyet gösteren lazerler ile kıyaslandığında daha yüksek eşevresellik süresi ve eşevresellik uzunluğuna sahiptirler. Sürekli lazer ışınların uzamsal ve zamansal eşevreselliği darbeli lazer sistemleri ile karşılaştırıldığında daha yüksektir, çünkü zamansal eşevreselliği darbeli lazerlerde darbe içinde ani gürültü (spike) varlığı veya emisyonun frekansında dalgalanma ile sınırlıdır (Foth 2008, Singh ve ark. 2012).

2.15.3. Yönlülük

Lazerin en çarpıcı özelliklerinden biri onun yönlülüğüdür, yani onun çıkışı neredeyse paralel bir ışın biçimindedir. Lazerin yönlülük doğasının sayesinde uzaktan teşhis ve iletişim amaçlı çok uzun mesafelere enerji ve veri taşınabilmektedir. İdeal bir lazer ışını mükemmel paraleldir. Çıkış penceresinde onun çapı çok uzun mesafelere gittiğinde de aynı olmalıdır, ama gerçekte bunu elde etmek mümkün değildir. Pratik lazer ışınının paralellüğünde sapma, lazer tasarımının herhangi bir arızasından kaynaklanmamaktadır. Bu durum, aynalar ve pencerelerin kenarlarının kırılmasından kaynaklanmaktadır. Kırılma teorisinden, dairesel açıklık $\theta = \sin^{-1}(1.22\lambda/D)$ ile verilen kırılma açısına sahiptir. Işın çapı (w) minimum çapın açısının mesafesi z ile değişecektir ve $w = w_0(2z/r)$ ile verilir. Burada $w_0 = (\lambda r/2\pi)^{1/2}$, r boşluk aynaların eğrilik yarıçapıdır.



Şekil 2.18. Boşluğun merkezinde minimum çapı (Singh ve ark. 2012)

Bir lazer ışın ya da daha genel olarak herhangi bir ışık kaynağının yönlülüğünün (Sapma) ölçülebilmesi için iki genel yol vardır.

- i. Kaynaktan çok büyük mesafelere yayılan ışının derecesini ölçerek Yarım-açı ışının sapması (2.25)'teki denklem ile elde edilir:

$$\theta_d = w/z \quad (2.25)$$

w: Çok büyük bir mesafede ışının uygun bir şekilde tanımlayan yarıçapı

z: Mesafe

Kırılma sınırlı durumunda, sapma (2.26)'daki gibi ifade edilir:

$$\theta_d = \beta \lambda/D \quad (2.26)$$

λ : Işının dalgaboyu

D: Işının çapı

β 'nın tam değeri, genlik dağılımının alanına hem de θ_d ve *D* tanımlandığı şekline bağlı olup birim derecesinin sayısal katsayısıdır.

- ii. Lensin odak düzleminde odaklanmış ışınının radyal yoğunluğunun dağılımını, $I(r)$, ölçerek

Airy formülü olarak bilinen $I(r)$ için ifade Airy tarafından 19. yüzyılında kırılma teorisi kullanılarak elde edilmiştir.

$$I = \left[\frac{2J_1(krD/2f)}{krD/2f} \right]^2 I_0 \quad (2.27)$$

$$k = 2\pi/\lambda$$

J_1 : Birinci dereceden Bessel fonksiyonu

f: Odak uzaklığı

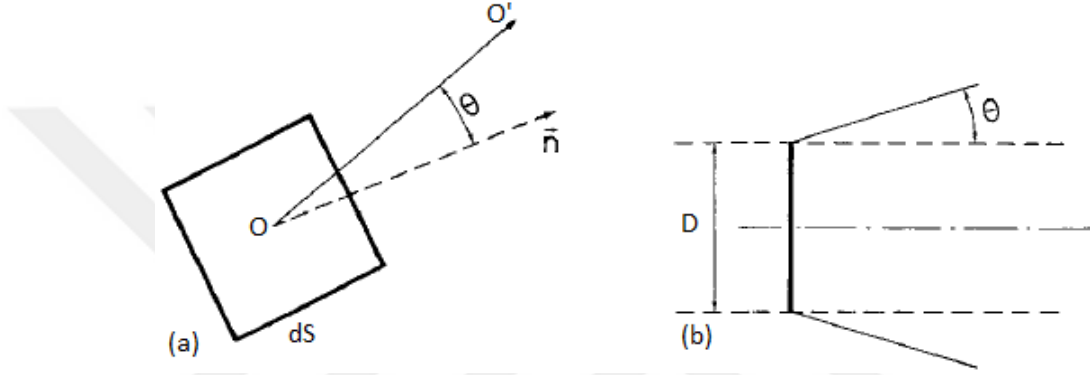
$$I_0 = P_i \left(\frac{\pi D^2}{4\lambda^2 f^2} \right)_r \quad (2.27 a)$$

P_i : Lense gelen ışının gücü

$r = 0$ olması durumunda, (2.27) denkleminin köşeli parantez içindeki ifadesinin değeri birim olduğunda, I_0 odak noktasının merkezinde ışın yoğunluğunu temsil edecektir (Foth 2008, Svelto 2010, Singh ve ark. 2012).

2.15.4. Parlaklık

E.M. dalgalarının belirli bir kaynağının parlaklığı, birim yüzey alanı başına birim katı açı başına yayılan gücü olarak tanımlanır.



Şekil 2.19. (a) E.M. dalgaların genel kaynağı için **O** noktasında yüzey parlaklığı. (b) Çapı **D** ve sapması **θ** olan bir lazer ışının parlaklığı (Svelto 2010)

Daha kesin olmak gerekirse, kaynağın O noktasında element yüzey alanı dS olsun (Şekil 2.20 a). OO' etrafındaki yönün $d\Omega$ katı açısına dS ile yayılan dP gücü (2.28)'deki gibi yazılabilir:

$$dP = B \cos \theta \, dS \, d\Omega \quad (2.28)$$

θ : OO' ve yüzeye dik olan n arasındaki açı

B : OO' yönüne O noktasında kaynak parlaklığı

B sabit olduğunda, kaynağa izotropik veya lambert kaynağı denir.

Sapması θ ve çapı D olan dairesel bir dik kesit ile P gücünün lazer ışını düşünelim (Şekil 2.19 b). Genellikle θ küçük olduğundan, $\cos \theta \cong 1$. Işının alanı $\pi D^2/4$ ve emisyon katı açı $\pi \theta^2$ olduğundan, (2.28)'deki denklem kullanılarak ışının parlaklığı (2.29)'daki gibi bulunur.

$$B = 4P/(\pi D \theta)^2 \quad (2.29)$$

Eğer ışın kırılma sınırlı ise, $\theta = \theta_d$ 'dır ve bir ışının P gücü ile sahip olabileceği maksimum parlaklık (2.30)'daki gibidir.

$$B = \left(\frac{2}{\beta\pi\lambda} \right)^2 P \quad (2.30)$$

Parlaklık genel olarak herhangi bir kaynağın ve özel olarak lazer ışınının en önemli parametresidir. Lazerler, güneş gibi diğer geleneksel kaynaklara göre daha yoğun ve parlak kaynaklardır. Yüksek yönlü, düşük sapma lazer kaynağı olan 1 mW He - Ne lazer, izotropik radyasyonu yayan güneşten daha parlaktır.

$3.2 \times 10^{-5} \text{ rad}$ ışın sapma ve çıkış penceresinde 0.2 mm nokta çapı ile 1 mW He - Ne lazerin özel durumunda:

$$\text{Katı açısı} = (\pi(3.2 \times 10^{-5})^2) = 3.2 \times 10^{-9} \text{ sr}$$

$$\text{Çıkış penceresinde nokta alanı} = (\pi(2 \times 10^{-4})^2) = 1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

Işın parlaklığı $((1 \times 10^{-3}) / (1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \times 3.2 \times 10^{-9} \text{ sr})) = 2.4 \times 10^{12} \text{ W/m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ olarak verilir ve güneşten ($1.3 \times 10^6 \text{ W/m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$) neredeyse 10^6 kez daha parlaktır (Svelto 2010, Singh ve ark. 2012).

2.15.5. Kısa zaman süresi

Kısa zaman süresi'nin özelliği bir manada dalgaboyunda enerji konsantrasyonunu ima eden monokromatiklik ile mevkidaş olup zamanda enerji konsantrasyonunu ifade etmektedir. Kısa zaman süresi, belki monokromatiklikten daha az ana özelliği olarak kabul edilecektir. Halbuki, gerçekte bütün lazerler, ilke olarak, son derece monokromatik yapılabilir. Sadece geniş çizgi genişliğine sahip olan lazerler, katı hal ve sıvı lazerler gibi çok kısa zaman süresinin darbelerini üretebilir.

Mod kilitleme (Mode locking) adı verilen özel bir teknik ile süresi $2 \rightarrow 1$ (uyarılmış \rightarrow temel) geçişin çizgi genişliğinin tersine kabaca eşit olan ışık darbelerinin üretilmesi mümkündür. Böylece, çizgi genişliği nispeten dar olan gaz lazerleri ile darbe genişlik $\sim 0.1 - 1 \text{ ns}$ olabilir. Böyle darbe süreleri özellikle kısa olarak kabul edilmez ve hatta bazı lambalar 1 ns süreli ışık darbelerinden daha küçük darbeler yayabilir. Diğer yandan, bazı

katı hal ve sıvı lazerlerin çizgi genişliği bir gaz lazerden $10^3 - 10^5$ kat daha büyük olabilir ve bu durumda çok daha kısa darbeleri (~ 10 fs altında) oluşturulabilir. Bu durum, lazer araştırma ve uygulamaları için heyecan verici yeni olanaklar vermektedir (Svelto 2010).

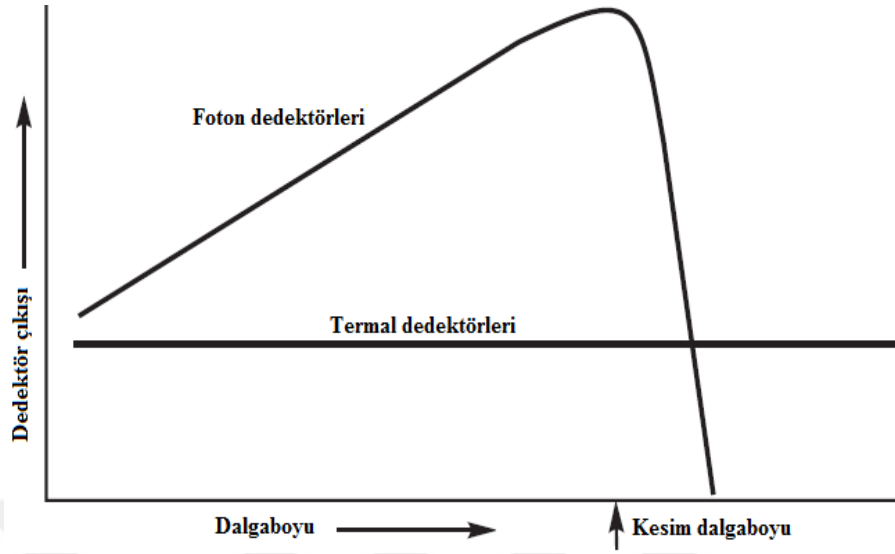
2.16. Optik Alıcı

Optik haberleşme sisteminde alıcının fonksiyonu, alınan optik işaretini elektrik işaretine dönüştürmesidir ki bu işareti diğer cihaz ya da haberleşme sistemleri için bir giriş olarak hizmet edebilir. Optik alıcı, temelde alıcı bir optiğin ardından bir demodülatör/ dedektörden oluşmaktadır. Dedektör, kullanılan modülasyon şeması tipine bağlı olarak eşvrelili veya eşvresiz tekniklere dayalı olabilir.

Birçok fotonik uygulamaları optik güç ya da enerjiyi ölçmek için optik dedektörler kullanımını gerektirir. Optik uzay haberleşmede dedektör alıcıda uygulanmaktadır. Lazer malzemelerin işlenmesinde, bir dedektör tekrarlanabilir koşulları sağlamak için lazer çıkışı izler. Optik dedektörler ışık dalgası ile ilişkili elektrik alanının karesi ile doğru orantılı olan optik ışın gücüne yanıt vermektedir. Optik dedektörlere bu nedenle "kare-yasa dedektörleri (square-law detectors)" denir.

Optik dedektörler genellikle iki geniş sınıfa ayrılır: foton dedektörler ve termal dedektörler. Foton dedektörlerde, ışık enerjisi miktarı (quanta) dedektör malzemesindeki elektronlar ile etkileşir ve serbest elektron üretir. Serbest elektronu üretmek için, atom bağlayıcı kuvvetlerden bir elektronu serbest bırakmak için yeterli enerji olmalıdır. Foton dedektörlerin dalgaboyu tepkisi uzun kesim dalgaboyunu gösterir. Eğer dalgaboyu kesim dalgaboyundan daha uzunsa, foton enerjisi serbest elektronu üretmek için çok küçüktür ve foton dedektör yanıtı sıfıra düşer.

Termal dedektörler ışık tarafından gönderilen ısı enerjisine yanıt vermektedir. Bu dedektörler elektriksel direnç değişikliği gibi bazı sıcaklık-bağımlı etkisini kullanabilir. Termal dedektörler yalnızca dedektöre ulaşan ısı enerjisinin toplam miktarına dayanır, yanıt dalgaboyundan bağımsızdır. Şekil 2.20'de foton ve termal dedektörlerin çıkışları dalgaboyunun fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak foton dedektörler ve termal dedektörlerin çıkışı (Ready 2003)

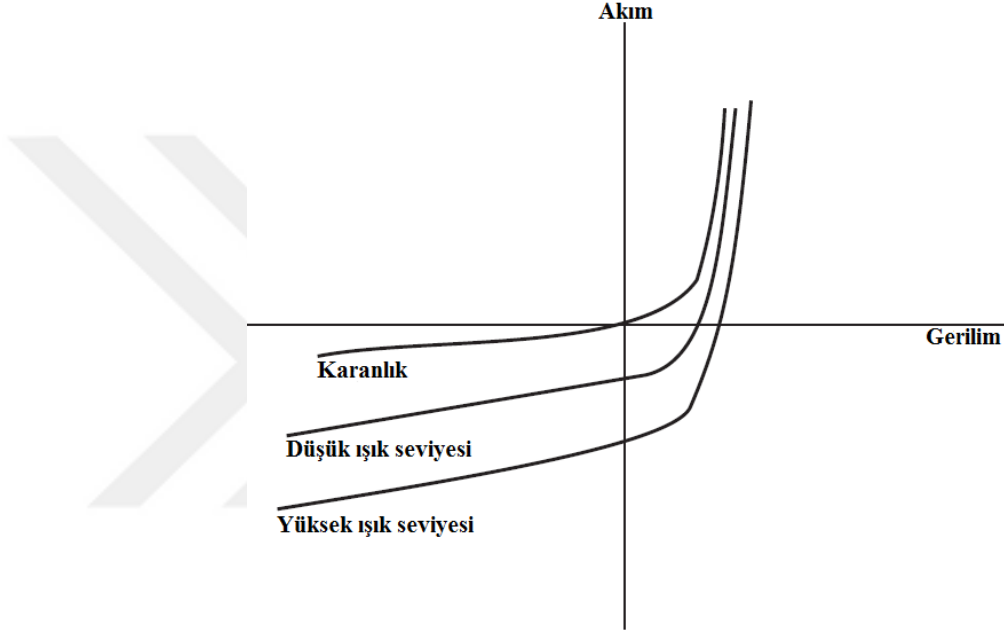
Şekil 2.20, sadece foton ve termal dedektörlerin çıkış eğrilerinin göreceli biçimlerinin gösterimi amaçlanmıştır, sayısal değerlerini göstermemiştir.

Foton dedektörler, dedektör yanıtını üreten fiziksel etkiye göre alt bölümlere ayrılabilir. Foton dedektörlerin bazı önemli sınıfları aşağıda listelenmiştir.

- **Fotoiletken (Photoconductive):** Gelen ışık, elektrik akımını taşıyabilen serbest elektronları üretir, böylece düşen ışık yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak dedektör materyalin elektriksel iletkenliği değişir. Fotoiletken dedektörleri silikon gibi yarı-iletken malzemelerden imal edilir.
- **Fotovoltaiik (Photovoltaic):** Böyle bir dedektör, iletkenlik elektronlara bağlı ve iletkenlik deliklere bağlı bölgelerin arasındaki yarı-iletken malzemesinde bir jonksiyonu (sözde p-n jonksiyonu) içerir. Optik enerji cihaza çarptığında bir gerilim üretilir.
- **Işıl salımlı (Photoemissive):** Bu dedektörler fotoelektrik etkisine dayanmaktadır, ki burada düşen fotonlar dedektör malzemesinin yüzeyinden elektronları serbest bırakır. Işıl salımlı dedektörlerde akım bir fotokatoddan doğrudan bir anoda akmaktadır.

Optik uzay haberleşmede kullanılan foto dedektörler (PIN fotodiyot, çığ fotodiyot (APD)), fotomultiplikator tüp (PMT) ve foton sayacı'dır.

Foto diyotlar (Photodiodes): Kutuplama (bias) gerilimi ile bir p-n jonksiyon dedektörü fotodiyot olarak adlandırılır. Çok sayıda farklı yarı-iletken malzemeleri genelde fotodiyot olarak kullanılmaktadır. Kullanılan malzemeleri, görünür, yakın morötesi ve yakın kızılötesinde silikon; yakın kızılötesinde germanyum ve indiyum galyum arsenit; ve uzun dalgaboyu kızılötesinde indiyum antimonide, indiyum arsenit, cıva kadmiyum telurür, ve bakır ve altın gibi unsurlarla katkılı germanyumu kapsamaktadır.



Şekil 2.21. Fotodiyot için akım-gerilim karakteristiği (Ready 2003)

Fotodiyot dedektörü, Şekil 2.21'deki artan ışık seviyesi ile bir dış yük direnci yoluyla çizilen akımın artacağı alt sol kuadrantta çalışmaktadır. Uygulamada, yük direncin üzerindeki görünen gerilim düşümü ölçülmektedir.

Fotodiyodun en sık karşılaşılan tipi silisyumdur. Silisyum fotodiyotlar genelde optik disklerde dedektör elemanı olarak ve optik haberleşme sistemlerinde alıcı elemanı olarak kullanılmaktadır. Silisyum fotodiyotlar görünür ve yakın kızılötesinin bir kısmını kapsayan bölgelerde yaklaşık 400 – 1100 nm spektral aralığında yanıt vermektedir. Silisyum fotodiyotlar Argon, He-Ne, AlGaAs ve Nd:YAG gibi en yaygın lazer dalgaboyların çoğunu algılamak için yararlıdır.

PIN Fotodiyotlar

Fotodiyotlarda kullanılan yarı-iletken yapının diğere yaygın türü PIN olarak adlandırılan yapıdır. Bu yapı, fotodiyotların frekans yanıtını artırmak için geliştirilmiştir. Cihaz bir taraftan son derece katkılı nispeten ince p-tipi yarı-iletken bir tabaka ile ve diğere taraftan nispeten kalın n-tipi yarı-iletken bir tabaka ile sınırlandırmış olup yaklaşık saf yarı-iletken malzemenin bir tabakası vardır. Dolayısıyla buna PIN (Positive-Intrinsic-Negative) cihazı denir. İçsel bölgede emilen ışığın foton enerjisi yeterince yüksek olması koşuluyla serbest elektron-delik çiftleri üretir. PIN fotodiyotların frekans yanıtı $10^{10}Hz$ mertebeden daha yüksek olabilir. Bu, içsel bölgesi olmaksızın p-n jonksiyonunun frekans tepkisinden daha yüksektir.

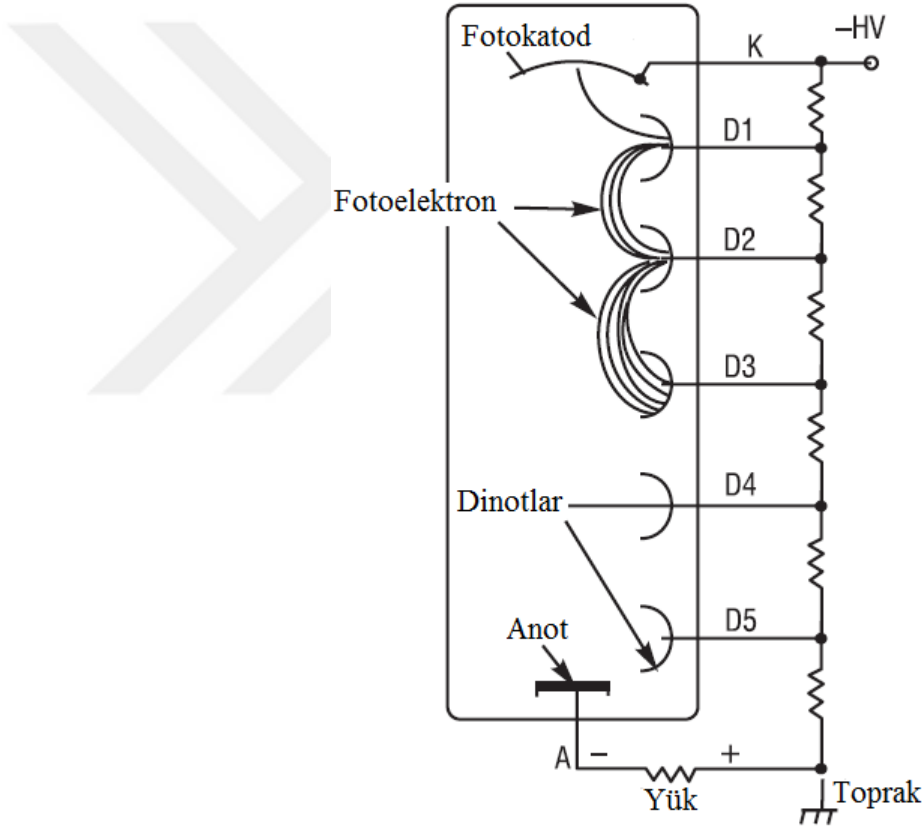
Çığ (Avalanche) Fotodiyotlar

Fotodiyodun başka bir varyasyonu çığ fotodiyottur. Çığ fotodiyot iç kazanç imkanını sunuyor; bazen bir "yarı-iletken fotomultiplikator" olarak adlandırılır. Çığ fotodiyotlar için en çok kullanılan madde silisyumdur, ancak germanyum gibi diğere malzemelerden de imal edilmiştir. Yüzey arızası olmadan çığ fotodiyodun yüksek ters kutuplamaya izin veren yüzey şekillendirme ile yayınlık p-n kavşağı vardır. Büyük dahili elektrik alanı iyonize çarpışmaların yoluyla yük taşıyıcıların sayısının çoğalmasına yol açmaktadır. İşaret bir çığ olmayan cihazdan belki 100 – 200 kat arasında daha fazla bir değere artırılacaktır. Sınırlayıcı gürültünün arka plan radyasyonundan gelmemesi kaydıyla alıcılık (detectivity) artacaktır. Çığ fotodiyotlar geleneksel fotodiyotlardan daha pahalıdır ve onlar ideal öngerilimi korumak için sıcaklık dengeleme devrelerini gerektirir, ancak yüksek performans gerekli olduğunda çekici bir seçenek olacaktır.

Fotomultiplikator

Fotomultiplikator, akımın amplifikasyonunu sağlayan önemli ışıl salımlı dedektördür. Bu cihaz, bir ışıl salımlı katodu ve dinot denilen birtakım ikincil yayan ortamları vardır. Dinotlar, serideki her dinottan sonraki dinoda elektronlar gönderilsin diye düzenlenmiştir. Katottan yayılan elektronlar ilk dinoda uygulanan gerilim ile hızlandırılır ki bunların etkisi çok sayıda ikincil elektronların emisyonuna neden olacaktır. Bu elektronlar sonraki dinoda

hızlandırılır ve daha da fazla elektronları üretecektir. Son olarak, son dinottan elektronlar anoda hızlanacak ve harici devrede büyük bir akım darbesini üretecektir. Fotomultiplikatör bir vakum tüp olarak paketlenir. Kazancın tipik değerleri 100000 – 1000000 aralığında olabilir. Böylece katoda her foton çarptığında 100000 veya daha fazla elektron anoda ulaşacaktır. Fotomultiplikatör tüpler aslında katotta tek bir fotonun gelişini tespit edebilir. Fotomultiplikatör tüpler spektrumundaki morötesi, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde en yüksek mevcut duyarlılığı sunmaktadır. Ancak bunların yanıtı 1000 nm'den daha uzun dalgalınlara uzamamaktadır (Ready 2003).



Şekil 2.22. Fotomultiplikatör çalışma prensipleri. Dinotlar D1, D2, vb. ile ifade edilmiştir (Ready 2003)

2.16.1. Dedektörün optik gücü

Alıcı doğrudan algılamada, alıcı antenin (lazer iletişim sisteminin teleskobu sıkça anten olarak adlandırılır) çapı işaret enerjisinin maksimum miktarını elde edebilmek için mümkün olduğu kadar geniş olmalıdır.

- **Optik dedektörün girişindeki güç alma minimum değeri**

Bu parametre için verilen minimum değer (2.31)'de verilmiştir.

$$P_{min} = \frac{\pi^2 \tau_t \tau_a \tau_r d_T^2 d_R^2 P_L}{32 R^2 \lambda_c^2} \quad (2.31)$$

τ_t : Alt sistem vericinin iletim katsayısı

$\tau_a = \tau_{FS}$: Serbest uzay iletim katsayısı

τ_r : Alt sistem alıcının iletim katsayısı

d_T : Verici sisteminde açıklık çapı

d_R : Alıcı sisteminde açıklık çapı

P_L : Lazer gücü

R : Verici ve alıcı birimlerin arasındaki aralık

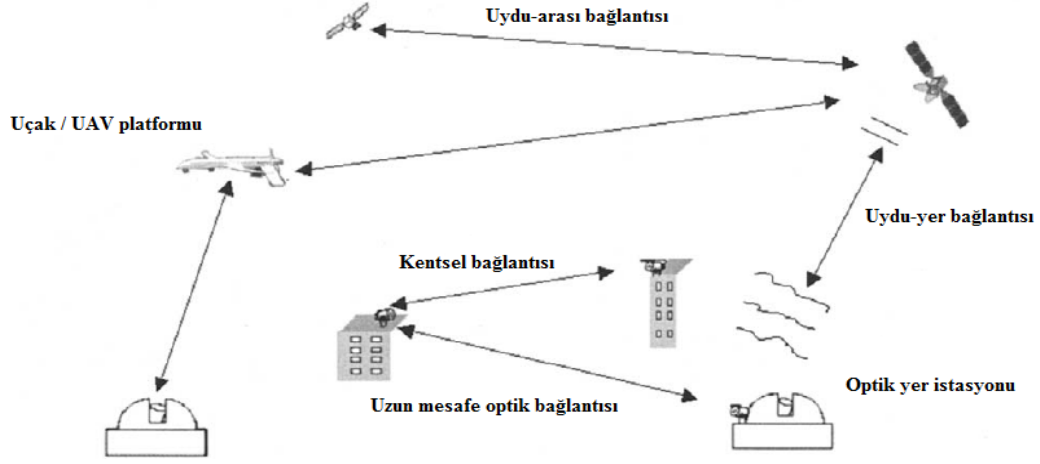
λ_c : Taşıyıcının optik dalgaboyu

- **Optik dedektörün girişindeki güç alma maksimum değeri**

$$P_{mak} = \frac{\pi^2 \tau_t \tau_a \tau_r d_T^2 d_R^2 P_L}{16 R^2 \lambda_c^2} \quad (2.32)$$

2.17. Lazer İletişim Mimarlığı

Şekil 2.23, yer-yer, yer-uzay, uzay-yer ve uzay-uzay bağlantıları için serbest uzay lazer iletişimi mimarilerini göstermektedir. Bu bağlantılar, ofis binaların arasında hava-hava lazer iletişimi kullanarak kentsel ağı, optik yer istasyonu ve bir bina ya da uydu platformu, ya da uydu-arası bağlantının arasındaki uzun mesafeli optik bağlantıyı içerebilmektedir. Diğer ilgi alanı, kentsel ağlar boyunca sözde son mil bağlantı açığını kapatmak için geniş bant kablosuz çözümdür.



Şekil 2.23. Serbest-uzay lazer iletişim mimarisi (Majumdar ve Ricklin 2008)

2.18. Atmosferik İletim Tanımı

Atmosfer genelde elektro-optik sistemlerin performansında çok önemli bir husustur. Elektro-optik sistemi üç temel bileşenini (kaynak, dedektör ve yayılım ortamı) içeren sistem olarak tanımlanabilir. Günümüzde, kaynak ve algılama sistemlerinin kalitesi daha yüksek olduğundan dolayı genel sistem performansında sınırlayıcı faktör genellikle yayılım ortamıdır. Dolayısıyla, atmosfer ve zayıflatmanın farklı mekanizmalarının ayrıntılı tartışılması gerekir. Kaybın baskın mekanizmaları emilim, saçılma ve türbülanstır. Atmosfer ortamında optik yayılımın çok önemli özellikleri ve önemleri vardır. Bunlar, meteorolojik uzaktan algılama, kızılötesi ve görünür gökbilimi, genel uzaktan algılama ve elektro-optik sistemlerin performansını içerir (Smith 1993).

2.19. Atmosferik Yapı

Atmosfer, yükseklik ve azimutun bir fonksiyonu olarak farklı sıcaklıklarda ve basınçlarda gazlar ve muallak parçacıklardan oluşur. Atmosferin sıcaklığı, basıncı, yoğunluğu ve bileşiminin dikey dağılımı atmosferin yapısını oluşturur. Bu miktarlar enlem ve boylam olarak bölgeden bölgeye ve yanı sıra geceden gündüze değişir. Yeryüzüne yakın atmosferin çoğu kısmı yoğundur. Bu gerçeğin nedeni hava moleküllerinin (yanısıra diğer herşey) yerçekimi tarafından yeryüzüne yakın tutulmasıdır. Böylece, hava parçacıkları birbirine daha yakın sıkıştırılır ve bu belirli bir hacimde parçacıkların sayısının arttırılmasına neden olur. Atmosferin mutlak derinliğinin tanımlanması imkansızdır. Atmosferin dikey profili bir seri katman şeklinde ayrılabilir olduğunu gösterir. Her katman birkaç yoldan

tanımlanabilir: katman içinde hava sıcaklığı nasıl değiştiğini, gazların içerdiğini veya hatta elektrik özellikleri ile tanımlanabilir. Atmosfer katmanlarının tartışmasına başlamadan önce iki önemli değişkenin dikey profiline bakmak gerekir. Bu değişkenler hava basıncı ve hava yoğunluğudur (Smith 1993, Ahrens 2009, Frierson 2012).

2.19.1. Hava basıncı ve hava yoğunluğuna bir bakış

Yerçekimi, hava dahil olmak üzere nesnelere ağırlığı üzerine etkisi vardır. Aslında, ağırlık yerçekimi nedeniyle bir nesne üzerine etkileyen güçtür. Ağırlık, nesnenin kütlesi çarpı yerçekimin ivmesi ile tanımlanır.

$$Ağırlık = Kütle \times Yerçekimi$$

Bir nesnenin kütlesi nesnede bulunan maddenin miktarıdır. Dolayısıyla, sabit bir kaptaki hava kütlesi evrenin her yerinde aynıdır. Ancak, bu sabit kapın kütlesi ayda değişmezken ağırlığı azalır. Kütle gram (g) veya kilogram (kg) ile verildiğinde, hacim santimetreküp (cm^3) veya metreküp (m^3) ile verilir. Deniz seviyesine yakın, hava yoğunluğu metreküp başına 1.2 kilogramdır (neredeyse fut küp başına 1.2 ons).

Hava (ya da herhangi bir madde) yoğunluğu, atomlar ve moleküllerin kütleleri ve bunların arasındaki boşluk (yani, hacim) tarafından belirlenir. Diğer bir deyişle, yoğunluk, belirli bir boşlukta ne kadar madde mevcut olduğunu anlatır. Yoğunluk farklı yollar ile ifade edilebilir.

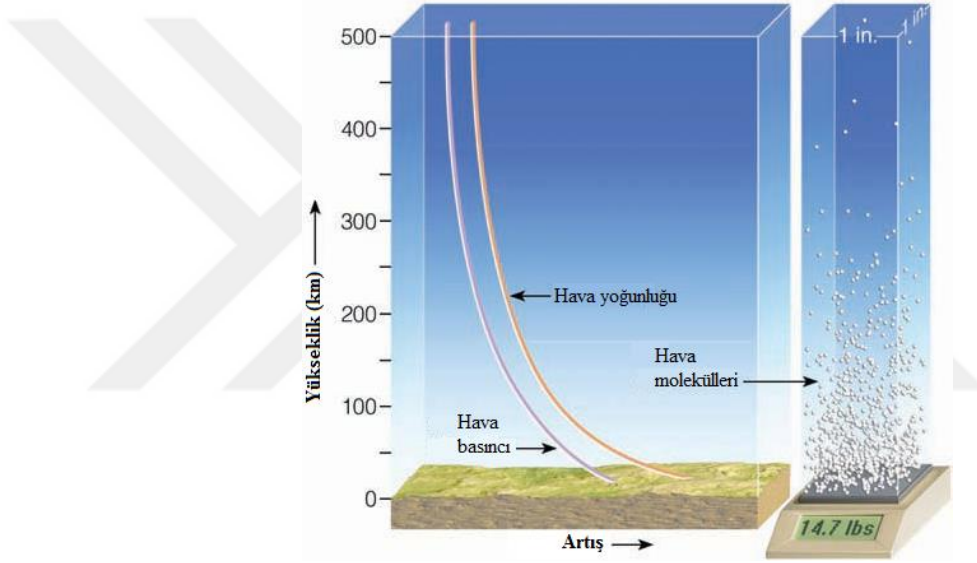
Havanın moleküler yoğunluğu belirli bir hacimde moleküllerin sayısıdır. Ancak, yaygın olarak, yoğunluk belirli bir hacimde hava kütlesi olarak verilir (Ahrens 2009).

$$Yoğunluk = \frac{Kütle}{Hacim}$$

Yüksek seviyelere göre yeryüzüne yakın havanın aynı boyut hacminde gözle görülür derecede daha fazla molekül mevcut olduğunda, hava yoğunluğu yeryüzünde azamidir ve atmosferde yukarı doğru azalır. Birkaç yüzde kapsamında, deniz seviyesinde hava yoğunluğu $1.25 \text{ kg}/m^3$ 'dür. Şekil 2.24'te, hava yeryüzüne yakın sıkıştırılmış olduğunda, yoğunluğu normalde ilk başta hızla, daha sonra yeryüzünden uzağa gittiğinde daha yavaşça azaldığı gösterilmiştir (Wallace ve Hobbs, 2006, Ahrens 2009).

Hava molekülleri sürekli hareket halindedir. Yeryüzüne yakın ılık bahar gününde, bir hava molekülü diğer hava molekülleri ile her saniyede yaklaşık 10 milyar kez çarpışacaktır. Aynı zamanda, evler, ağaçlar, çiçekler, zemin ve hatta insanlar gibi etrafındaki nesnelere karşı çarpışması olacaktır. Her zaman bir hava molekülü bir kişiye karşı sıçarsa, küçük bir itme verecektir. Bu küçük güç (itme) ittiği alana bölüldüğünde basınç olarak belinecektir (Ahrens 2009).

$$\text{Basınç} = \frac{\text{Güç}}{\text{Alan}}$$



Şekil 2.24. Hava yoğunluğu, hava basıncı ve hava molekülleri (Ahrens 2009)

Şekil 2.24'teki gibi, deniz seviyesinden atmosferin "ucuna" uzanan 1 inçkare kesitte havanın sütunu tartılırsa, yaklaşık 14.7 Paund ağırlığında olacaktır. Böylece, deniz seviyesine yakın, normal atmosferik basınç inçkare başına neredeyse 14.7 paunddır (santimetrekare başına neredeyse 1033.5 g). Daha fazla molekül sütunun içine sıkıştırılırsa, daha yoğun hale gelir, hava daha ağır olur, ve yüzey basıncı yükselir. Diğer yandan, daha az molekül sütunda olduğunda, hava ağırlığı daha az olur, ve yüzey basıncı azalır. Böylece, yüzey hava basıncı yüzey üzerinde havanın kütlesi değiştirilerek değişebilir.

İnçkare başına paund, elbette, hava basıncını ifade etmek için sadece bir yoldur. Yüzey grafiklerin üzerinde basıncın tercih edilen birimi olarak *Hektopaskal (hPa)* gitgide *milibarın (mb)* yerine geçmesine rağmen, milibar halen de yüzey hava haritalarda bulunan

en yaygın birimidir. Havacılık alanı, televizyon ve radyo hava yayınlarında yaygın olarak kullanılan başka basınç birimi *inç cıva*'dır (inches of mercury, *Hg*). Deniz seviyesinde, atmosferik basıncı için standart değer aşağıda verilmiştir (Ahrens 2009).

$$1013.25 \text{ mb} = 1013.25 \text{ hPa} = 29.92 \text{ Hg}$$

Basınç P ve yoğunluk ρ yüksekliği ile hemen hemen katlanarak azalır.

$$P \approx p_0 \cdot e^{-z/H} \leftrightarrow \ln \frac{P}{p_0} \approx -\frac{z}{H} \quad (2.33)$$

z : referans bir yükseklik (deniz seviyesi $z = 0$) üzerindeki yükseklik

H : ölçek yüksekliği = kT/mg

m : atmosferde ortalama molekül kütlesi = ortalama kütle numarası \times proton kütlesi
ortalama kütle numarası ($\langle A \rangle$) = 28.96 AMU (Atomik Kütle Birimi)

proton kütlesi (m_p) = $1.6726219 \times 10^{-27}$ kg

p_0 : $z = 0$ 'da mutlak basınç

Atmosferin en düşük 100 km'de, ölçek yüksekliği kabaca 7 ile 8 km arasında değişir. Yukarıdaki ilişki, yer atmosferindeki farklı basınç seviyelerinin yüksekliğini tahmin etmek için kullanışlıdır (Wallace ve Hobbs, 2006).

30 km altında iletim hesaplamalarda, basınç, zaman ile değişiminin yoksayılabileceği tek atmosferik değişkendir. Dikey ve eğimli hatlar için, basıncın yükseklik ile değişimi atmosferik iletimin tanımlanmasında daha önemli bir faktördür. Yeryüzünün farklı bölgelerinde, dikey basınç profili pratik olarak aynıdır. Basınç değişimi deniz seviyesinde global ölçüde neredeyse 980 – 1040 mb'dır (Seyrafi 1993).

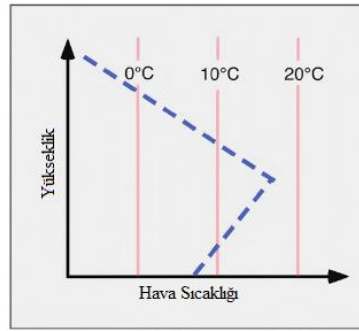
2.19.2. Atmosferin katmanları

Yer atmosfer katmanlarının bir dizisi vardır ve her katman kendine has özelliklere sahiptir. Yerden yukarıya giderek, farklı katmanlar, termal özellikleri (sıcaklık değişimi), kimyasal bileşimi, işlemleri ve yoğunluğuna dayanarak tanımlanmıştır. Katmanların her birinde termal özellikleri, kimyasal bileşimi, hareket ve yoğunluğa meydana gelen en büyük değişiklikler koşuluyla "pauz" tarafından sınırlandırılmıştır (Anonim 2016).

2.19.2.1. Troposfer

Yer atmosferinin en düşük katmanı ya da yeryüzünün üstündeki ilk katmanı troposfer'dir. Atmosfer kütesinin çoğu (yaklaşık 75 – 80 %) yoğun troposferdedir. Bulutların pek çok türleri troposferde bulunur ve hemen hemen tüm hava bu katman içinde gerçekleşir. Troposferin altı yerin yüzeyindedir. Bu katmanın derinliği enlem ve mevsim ile değişir. Ekvatorda troposfer kalınlığı yaklaşık 16 km'dir. Yerin kutup bölgelerinin üstünde, troposfer 8 km bir yüksekliğe ulaşır. Yeryüzünden bu katmanın ortalama yüksekliği yaklaşık olarak 11 km'dir. Atmosferik önemli zayıflatıcıların çoğu (genelde H_2O , CO_2 , bulutlar, sis ve aerosoller) troposferde mevcuttur. Su, deniz sınır tabakasının parçası olarak özellikle okyanus üzerinde düşük yüksekliklerde çok önemlidir. Ayrıca, bu, en yüksek basınç veya yoğunluğun bölgesidir ve bu nedenle azami moleküler saçılmasına sahiptir. Troposfer kış aylarına göre yaz aylarında daha kalındır. Sıcak yaz mevsiminin süresinde, düşük atmosferin termal genişmesi ve baskın sıcaklığın tırmanması bu katmanın üst sınırını daha yükseğe iter (Smith 1993, Anonim 2015, Pidwirny 2016).

Troposferde genel olarak hava sıcaklığı yükseklik ile azalır. Yere yakın küresel sıcaklığı yaklaşık olarak 15 °C'dir. Yükseklik artarak hava sıcaklığı düzgün olarak yükseklik ile 1000 m başına 6.5 °C düşer. Troposferin tepesinde, -57 °C ortalama sıcaklığına ulaşır. Troposferik sıcaklık değişiminin gerçek oranı yükseklik, konum ve yılın belli zamanı ile değişir. Şekil 2.25 troposferde sıcaklık enverziyonunu gösterir (Pidwirny 2016).



Şekil 2.25. Troposferde sıcaklık enverziyonu (Pidwirny 2016)

Troposferin tepesine yakın, yaklaşık 9 km mesafe için hava sıcaklığı yükseklik ile değişmez bir geçiş bölgesi vardır. Atmosferde böyle bölgelere İzotermal (Isothermal) katmanı denir. İlk izotermal katmanına Tropopoz (Tropopause) denir (Pidwirny 2016).

2.19.2.2.Stratosfer

Troposferden sonraki katmana stratosfer denir. Bu katman atmosferin toplam kütesinin %20'sini içerir ve 50 km'ye kadar genişler. Atmosferin bu katmanında, minimal hava vardır ve çok az karışım meydana gelir. Nadiren, gök gürültülü fırtınanın (thunderstorm) tepesi bu katmanın altını çığner. Bu katmanda, yeryüzünde yaşamı morötesi ışıınımdan koruyan ozon (O_3) bulunur. O_3 0.3 μm veya altında emmeye başlar ve emmesi 0.85 μm altında daha şiddetlidir. Bu katmanda parçacıklar daha uzun zaman için kalabilir. Stratosferde, sıcaklık yükseklik ile artar, çünkü ozon gaz moleküllerin bölgesel konsantrasyonu göneşten gelen morötesi ışıınıcı emmer, böylece ısı enerjisi oluşur. Stratosferin sıcaklıkları katmanın üst sınırında $-57\text{ }^\circ\text{C}$ ile $0\text{ }^\circ\text{C}$ arasında değişir. Atmosferde, stratosferden diğer katmanı ayırmak için Stratopoz (Stratopause) denilen bir izotermal katmanı mevcuttur.

2.19.2.3.Mezosfer

Stratosferin üstündeki katman mezosfer'dir. Bu katman yeryüzünün 50 km üzerinden başlar ve 90 km'ye uzanır. Atmosferde optik yayılım ile ilgilenen modellerin çoğu bu katmana kadar çalışır. Burada hava çok incedir ve son derece soğuk olabilir. Bu katmanın tepesinde sıcaklık yaklaşık $-90\text{ }^\circ\text{C}$ ($-130\text{ }^\circ\text{F}$)'dir. Mezosferin üstünde Mesopoz (Mesopause) denilen son izotermal katman mevcuttur (Smith 1993, Pidwirny 2016).

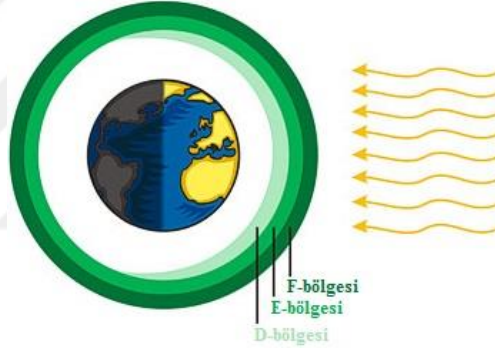
2.19.2.4.Termosfer

Mezosferin üstünde, yeryüzünden 90 km'den daha fazla yüksekliğindeki atmosferik katmana termosfer denir. Bu katmanda sıcaklık $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ($2200\text{ }^\circ\text{F}$)'ya kadar yükselir. Bu yüksek sıcaklıkları oksijen moleküllerin (O_2) tarafından yoğun güneş radyasyonun emiliminden üretilir. Termosferde, uzun mesafeler ile birbirinden ayrılan birey gaz moleküller ile birlikte hava son derece incedir. Termosferin içinde birçok uydu yerin etrafında döner. Termosfer katmanının içinde bir katman daha tarif edilmiştir (Anonim 2015, Pidwirny 2016).

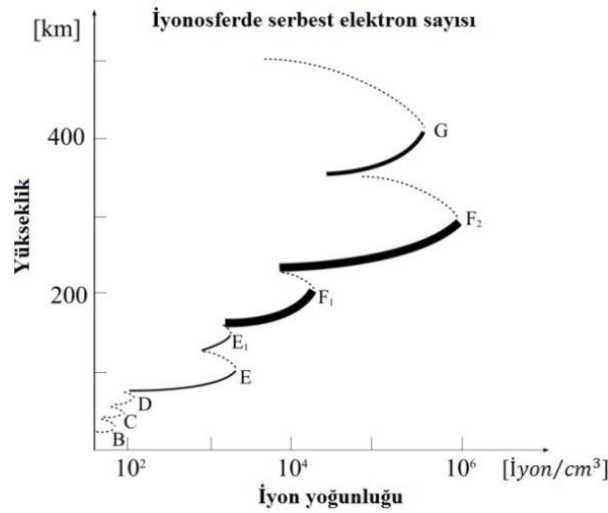
2.19.2.5.İyonosfer

İyonosfer termosfer içindedir, yukarıda anlatılmış diğer katmanlar gibi ayrı katman değildir ve elektriksel yüklü gaz parçacıklardan yapılmıştır (iyonize). Bazen iyonosfer mezosfer ve

termosferin bölgelerinde, bölgenin dizisi olarak tarif edilmiştir. İyonosfer, yeryüzünün üstünde 60 – 300 *km* arasında uzanır. Bu katman radyo dalga yayılması için önemlidir. Bununla birlikte, radyo frekanslarında yansıtıcı özelliklerini veren plazma rezonansları optik frekanslar için çok yavaştır ve bu katman optik olarak şeffaftır. İyonosfer üç bölge veya katmana; F-bölgesi, E-bölgesi, ve D-bölgesine ayrılmıştır. Gündüz, F-bölgesi iki bölgeye bölünür ve gece yeniden birleşir. İyonosferin varlığı atmosfere güneş çarpmasıyla olduğundan gündüz ve gece bunun yoğunluğu değişir. Gündüz, bütün katmanlar daha yoğundur, geceleyin bütün katmanlar D-bölgesinin azami değişimi ile azalır. Geceleyin, D-bölgesi esas olarak kaybolur (Smith 1993, Anonim 2016). Şekil 2.26 ve Şekil 2.27 sırasıyla iyonosferin ana bölgelerini ve iyonosferin farklı bölgelerinde iyon yoğunluğunu gösterir.



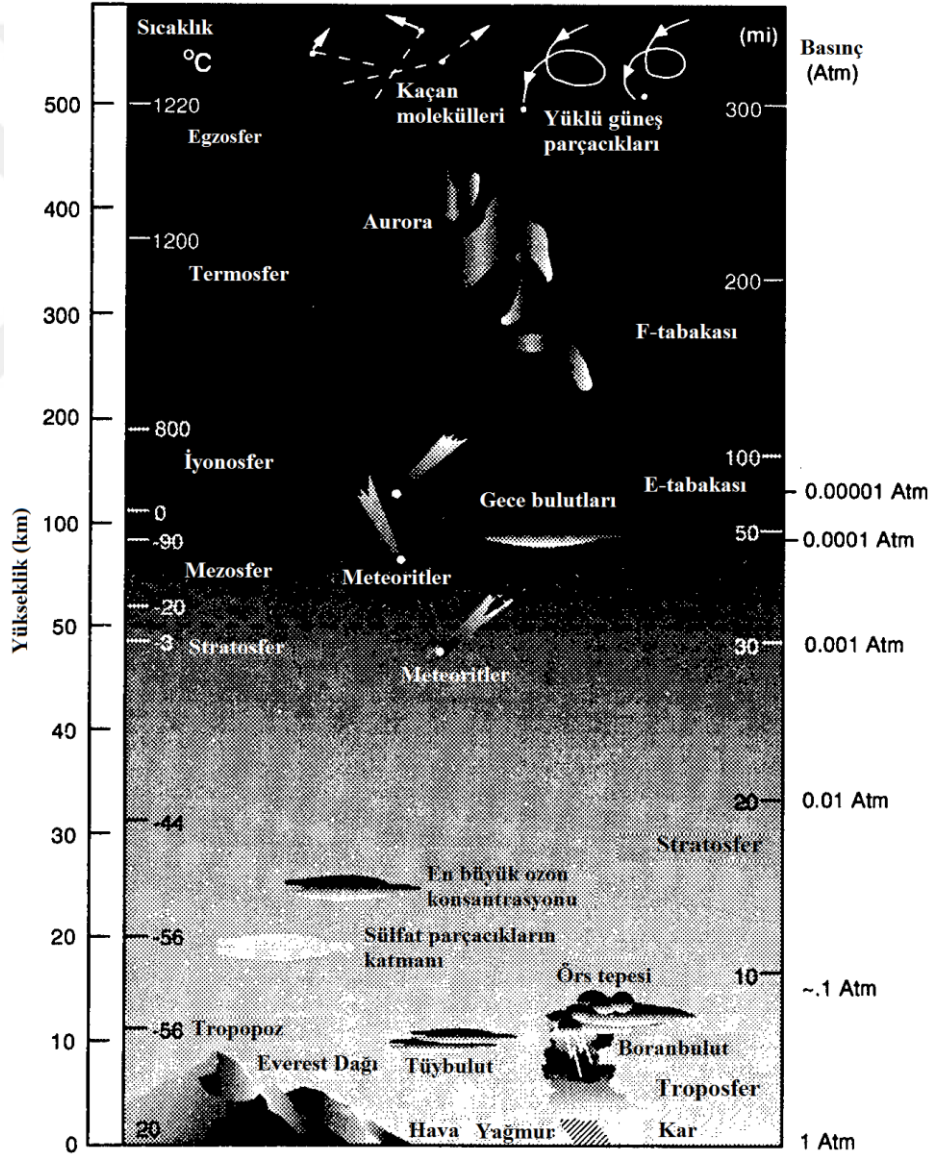
Şekil 2.26. İyonosferin üç ana bölgesi (Anonim 2016)



Şekil 2.27. İyonosferin diğer bölgeleri (Lagzi ve ark. 2013)

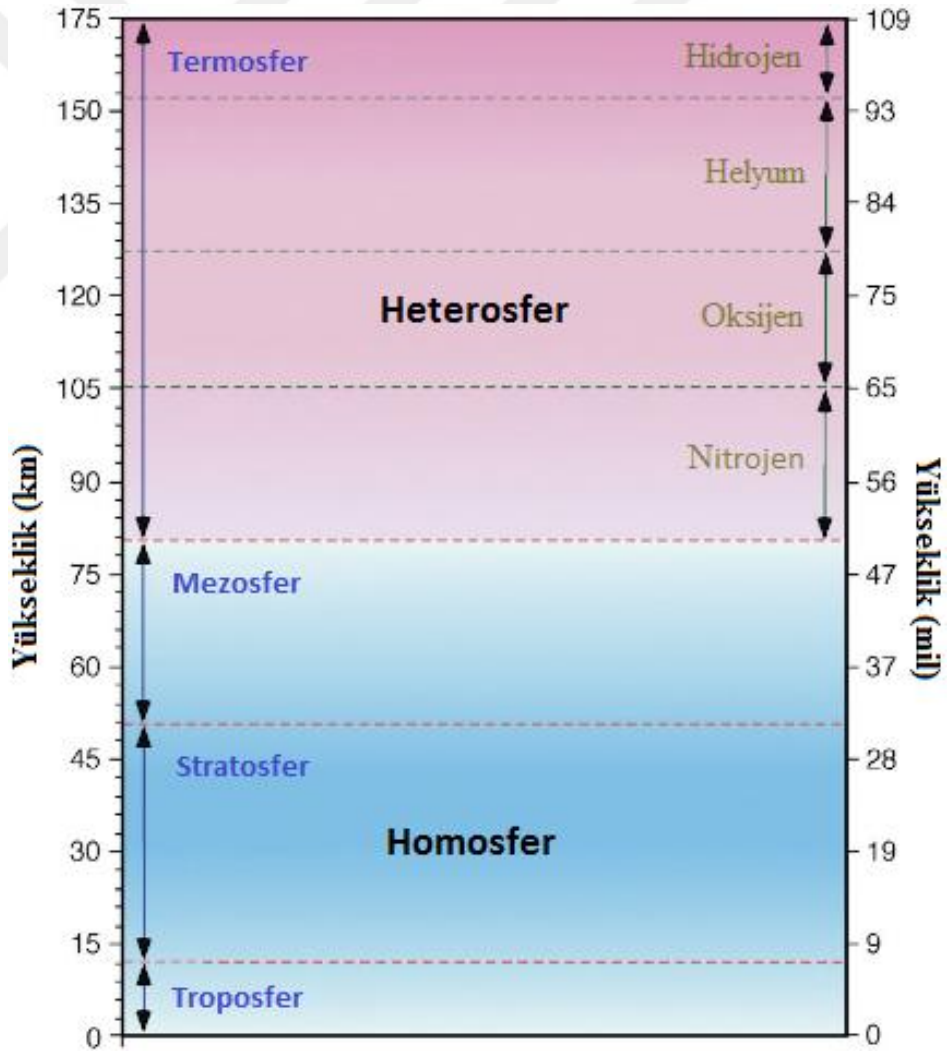
2.19.2.6.Egzosfer

Bazı uzmanlar termosferi atmosferin üst katmanı olarak kabul etse de, diğerleri egzosferi yerin gaz zarfının gerçek “son sınırı” (final frontier) olarak görmüştür. Egzosferde hava çok çok incedir, bu katmanı termosferden daha fazla uzay gibi kılar. Bu katmanın üstü yeryüzünden bazen 100000 km bazen de 190000 km olarak belirlenmiştir. Bu katmanda, atomlar ve moleküller uzaya kaçar ve uydular yer etrafında döner (Anonim 2015, Anonim 2016). Şekil 2.28’de atmosferin farklı katmanları, sıcaklık ve basınç değişimi ve farklı yüksekliklerdeki bulutlar gösterilmiştir.



Şekil 2.28. Yükseklik ile atmosferin yapısı (Smith 1993)

Atmosfer ayrıca kimyasal özelliklerine göre Şekil 2.29’de gösterildiği gibi farklı katmanlarda tanımlanabilir. Yeryüzünden 80 km yüksekliğine kadar, atmosfer, ana gazların (nitrojen, oksijen, argon, ve karbondioksit) oldukça türdeş karışımına sahiptir. Homojen bileşimin bu bölgesi *homosfer* olarak bilinir. Homosferin üstünde *heterosfer* denilen bir katman mevcuttur. Heterosferde, nitrojen (azot), oksijen, helyum, ve hidrojen gazları bu katman içinde belirgin yüksekliklerde yoğunlaşmıştır. Yükseklik ile bu gazların sırasının dizisi, bunların atom ağırlığı tarafından kontrol edilir. Bu gazların en ağırı azottur ve yoğunlaşmış olarak bu katmanın altında bulunur. Sonraki iki alt katmanı sırasıyla, oksijen ve helyum tarafından alınmıştır. Heterosferin üst kısmında, hidrojenin alt katmanı yerleştirilmiştir. Hidrojen bu grubun en hafif gazıdır (Pidwirny 2016).



Şekil 2.29. Atmosferde kimyasal katmanları

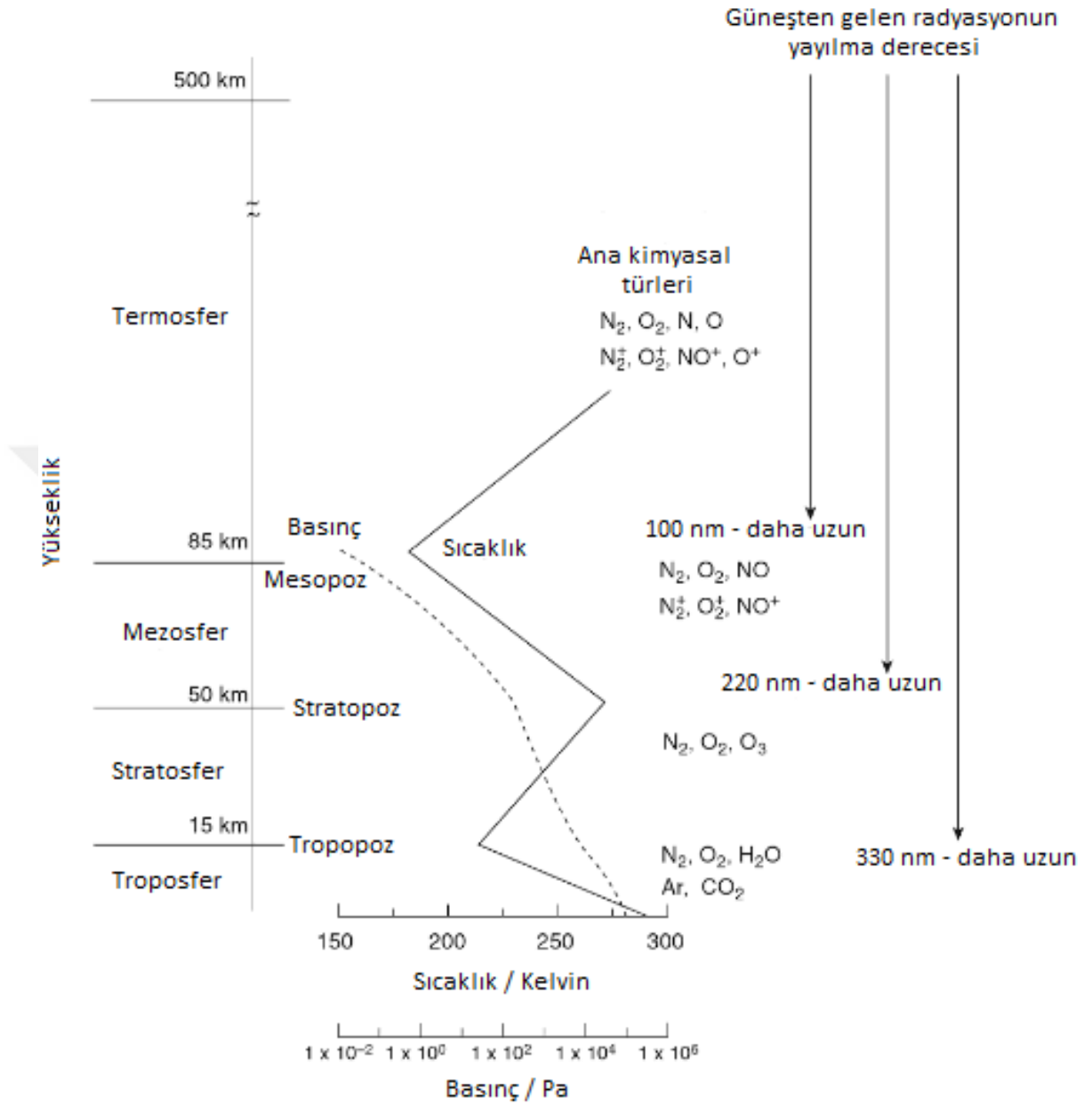
2.19.3. Atmosfer bileşimi

Hava birkaç gazın karışımıdır, ancak moleküler azot (N_2) ve moleküler oksijen (O_2) en çok bulunurken atıl gaz argon (Ar) az miktarda bulunur. Bu gazlar kuru hava kütlelerinin toplam hacminin %99.9'nu (azot yaklaşık %78 ve oksijen yaklaşık %21) oluşturur. Diğer bütün gazlar çıkarıldığında, neredeyse 80 km'ye kadar azot ve oksijen moleküllerinin sayısının oranı oldukça sabit tutulur. Nispi konsantrasyonları farklı olan diğer gazlar, sadece küçük miktarlarda mevcuttur. Bunların en önemlileri, uzun dalga radyasyonunu soğuran ve yayan su buharı (H_2O) ve karbondioksit (CO_2), ve güneşten morötesi radyasyonu hem de yerden biraz uzun dalga radyasyonunu soğuran ozondur (O_3) (Ahrens 2009, Frierson 2012).

Ozonu oluşturmak için güneşten gelen morötesi radyasyonu oksijen molekülleri ile stratosferde kesişir. Yaklaşık 25 km'de ozonun pik yoğunluğu bulunur. Ozonun toplam miktarı az (azami yoğunluklarda havanın milyon molekülünün başına ozonun yaklaşık 10 molekül) olmasına rağmen, morötesi radyasyonun çoğu miktarını engeller. Aksi halde, güneşten gelen radyasyonlar canlılara zarar verir.

Havadaki su buharının miktarı oldukça değişkendir ve yükseklik ile süratle azalır. Yeryüzüne yakın yoğunluk zirvesinde, su buharı hava kütlelerinin yaklaşık %4 tamamlayabilir fakat toplamda su buharı atmosfer kütlelerinin sadece yaklaşık %0.33'nü oluşturur. Yaklaşık 10 km yükseklikte, su buharının yoğunluğu zemindekine göre sadece yaklaşık %1'dir ve yüksekliğe çıkıldıkça bu miktar daha azdır.

Su buharı ve ozondan daha farklı olarak karbondioksit havada oldukça iyi karıştırılır. Karbondioksit yoğunluğu düşük (yeryüzüne yakın havanın bir milyon molekülünün başına sadece yaklaşık 400 karbondioksit parçası) olmasına rağmen, fotosentez ve radyasyon dengesini sağlamak için çok önemlidir. Su buharı ve karbondioksitin ikisi güneş radyasyonunun az bir miktarını emmer, ancak yeryüzünden gelen radyasyonunun birazını emmer ve yeniden yukarı ve aşağıya doğru yayar (Frierson 2012). Şekil 2.30, atmosferin farklı katmanlarını, sıcaklık ve basınç değişimlerini ve farklı katmanlarda bulunan ana kimyasal maddelerin türlerini gösterir.



Şekil 2.30. Sıcaklık ve basınç değişikliği, ana kimyasal türleri, ve güneşten gelen radyasyonun yayılmasını gösteren atmosfer bölgeleri (vanLoon ve Duffy 2011)

Çizelge 2.4'te atmosferde farklı bileşenler ve onların kuru havada yoğunlukları yüzde oranı ve ppm (milyonda bir) olarak listelenmiştir.

Çizelge 2.4. Atmosfer bileşenleri

Bileşen	Sembol	Yoğunluk (Kuru Havada)
Kuru hava	-	%100.0
Azot	N_2	%78.08
Oksijen	O_2	%20.95
Argon	Ar	%0.934
Su buharı	H_2O	%0 – %4, Değişken
Karbondioksit	CO_2	401 ppm
Neon	Ne	18.18 ppm
Kripton	Kr	1.14 ppm
Helyum	He	5.24 ppm
Metan	CH_4	1.786 ppm
Ksenon	Xe	0.09 ppm
Ozon	O_3	0.034 ppm, Değişken*
Nitröz oksit	N_2O	0.328 ppm
Karbonmonoksit	CO	0.12 ppm
Hidrojen	H_2	0.6 ppm
Amonyak	NH_3	0.1 ppm
Azot dioksit	NO_2	0.001 ppm
Sulfür dioksit	SO_2	0.0002 ppm
Hidrojen sülfid	H_2S	0.0002 ppm
Kloroflorokarbon-12	CCl_2F_2	0.00051 ppm
Kloroflorokarbon-11	CCl_3F	0.00023 ppm
Kloroflorokarbon-113	Cl_2CCClF_2	0.00007 ppm
(İs, toz, vb.) Parçacıkları	-	0.01 – 0.15 ppm

* 11-15 km arasındaki yüksekliklerde, stratosferik değerler yaklaşık 5-12 ppm'dir.

2.20. Bulut

Bulut havadaki muallak küçük su damlacıklarının veya buz kristallerinin görünür bir toplamıdır. Bazıları yüksek irtifalarda bulunurken, diğerleri neredeyse yere temas eder. Bulutlar kalın veya ince, büyük ya da küçük olabilir - görünüşte bitip tükenmez farklı şekillerde mevcuttur. Bu çeşitliliği düzene koymak için bulutlar on temel tipe ayrılır (Ahrens 2009).

2.20.1. Bulut tipleri

Bulutların en temel sınıflandırılması, onların meydana geldiği yükseklik aralığı ile yapılır. Düşük-seviye bulutlar yeryüzünden 2 km'den daha az bir irtifada yer alır. Neredeyse her zaman bu bulutlar su damlacıklardan oluşur; oysaki, soğuk havada, buz parçacıkları veya karı içerir. Orta-seviye bulutlar yeryüzünden yaklaşık 2 ile 6 km arasında meydana gelir. Bu bulutlar su damlacıklarından oluşur. Hava soğuk olduğunda, bazı buz kristallerini içerir. Yüksek-seviye bulutlar genellikle yeryüzünden 6 km'den daha fazla bir yükseklikte oluşur. Bu irtifalarda hava pek soğuk ve kuru olduğundan dolayı, yüksek-seviye bulutlar neredeyse sadece buz kristallerden oluşur ve oldukça incedirler.

Özde, Howard, İngiliz bir doğabilimcisi, yeryüzündeki gözlemciye gördükleri gibi bulutları tanımlamak için Latince kelimeleri kullanmıştır. O, bulut gibi bir tabakayı Stratus (Latince için "Layer"); kabarık bulutunu Kümülüs (Latince için "Heap"); tutam bulutunu Sirüs ya da tüybulut (Latince için "Curl of hair"); ve bir yağmur bulutunu Nimbus (Latince için "Violent rain") olarak adlandırmıştır. Howard sisteminde, bunlar bulutların dört ana şeklidir. Diğer bulutlar ana türleri birleştirilerek tanımlanabilir.

Düşük-seviye türlerinde Katmanbulut (Stratus), Kümülüs (Cumulus) ve Yığınbulut (Stratocumulus) vardır. Stratus bulutu az görünür yapısı ile homojen grimsi bir tabaka olarak mevcuttur. Kümülüs bulutlar birbirinden ayrılmış höyükler veya kuleler gibi dik olarak gelişir. Stratokümülüs bulutluluk ayrı yığınlar ile bir tabaka olarak meydana gelir.

Orta-seviye türleri de altostratus ve altokümülüs'tür. Altostratus ve altokümülüs bulutlar her ikisi tabakalarda oluşur, ancak bunların farkı da şu ki altokümülüs'ün farklı bulut elemanları vardır ve altostratus daha düzgün bir görünüme sahiptir.

Yüksek-seviye türleri de tüybulut (Saçakbulut), tülbulut (sirostratüs) ve yumakbulut (sirrokümülüs)'tür. Tüybulut veya Sirüs bulutlar birbirinden kopuktur; beyaz ve genellikle tüylü görünür. Sirostratüs bulutu beyazımsı ve saydam tabakada oluşur. Sirrokümülüs bulutluluk çok küçük ama ayrı bulut unsurlardan oluşan beyazımsı bir tabaka olarak mevcuttur. Yüksek bulutlar, güneşin saçılmamış (kırmızı, turuncu ve sarı) bileşenleri bulutların alt kısmından yansıdığına, gündoğumu ve günbatımına yakın zamanı hariç, genellikle beyaz görünür (Ahrens ve ark. 2005, Ahrens 2009).

Çizelge 2.5. Bulut tipleri ve farklı konumlarda yeryüzünden irtifaları

İrtifa Aralığı	Bulut Tipi	Kısaltma	Tropik Bölgesi	Orta Enlem Bölgesi	Kutup Bölgesi
Düşük	Stratus	St	0 – 2 km	0 – 2 km	0 – 2 km
	Kümülüs	Cu			
	Yığınbulut	Sc			
	Kümülonimbus	Cb			
Orta	Altostratus	As	2 – 8 km	2 – 7 km	2 – 4 km
	Altokümülüs	Ac			
	Nimbostratus	Ns			
Yüksek	Tüybulut	Ci	6 – 8 km	5 – 13 km	3 – 8 km
	Tülbulut	Cs			
	Yumakbulut	Cc			

Yağmur veya kar üreten iki bulut tipi boranbulut (kümülonimbus) ve katman karabulut (nimbostratus)'tur. Gök gürültülü tipik bir kümülonimbus bulutu, bir kümülüs bulutuna benzer ve çok uzun gelişebilir, ama yine de düşük-seviye bir bulut türü olarak sınıflandırılır. Kümülonimbus bulutların bazen örs şeklinde üstleri vardır, gök gürültüsü ve şimşek ile ortaya çıkar. Nimbostratus bulutluluk gri ve çoğu zaman koyu bir tabaka olarak mevcuttur, yağmur veya kar oluşumu ile stratus'tan farkedilebilir. Nimbostratus bulutların kalın olması ve yükseklikte geniş bir aralığı tutmasına rağmen, genellikle orta-seviye bulutu

olarak sınıflandırır. Çeşitli bulutlar farklı modeller ile tanımlınır. Su bulutları Deirmendjian (1969) modifiye gama dağılımı ile tanımlanmıştır. Çizelge 2.5'te farklı seviyelerdeki bulutlar ve onların tropik, orta-enlem ve kutup bölgelerindeki irtifaları listelenmiştir (Oliver 2008, Ahrens 2009).

Sis, esasen yere temas eden bulut, ek bir bulut türü olarak tanımlanabilir. Belirli meteorolojik süreçler bulutların farklı türleri ürettiği için, bulut morfolojisi niteliksel olarak yerel atmosferik ortamını açıklar. Bulutların farklı türlerinin genel dağılımları dünyanın çeşitli iklim bölgelerinin konumları ile yakından bağlantılıdır (Oliver 2008).

2.20.1.1. Stratus

Stratus bulutları gökyüzüne hakim olan, düzgün grimsi bulutlardır. Bu bulutlar yere değmeyen sise benzer. Aslında, kalın bir sis yükseldiğinde, sonuçlanan bulut, düşük stratus katıdır. Normal olarak, stratustan yağmaz, ancak bazen hafif pus ve çişenti ile eşlik edilir. Bu bulutlar yazın genel olarak Pasifik ve Atlantik kıyı suların üzerinde oluşur. Stratusun kalın bir katmanı nimbostratus ile karıştırılabilir, ama bunların arasındaki fark bulutun tabanının gözlemlenmesine göre ortaya çıkar. Sıkça, stratus nimbostratusa göre daha düzgün tabana sahiptir. Ayrıca, stratusun bir destesi altostratusun bir tabakası ile karıştırılabilir. Bunların arasındaki fark, stratus bulutların daha düşük ve daha koyu gri olmasıdır.

- **Stratus (karasal)**

Stratus bulutların boyut dağılımı genellikle kümülüs'ten daha geniştir, ama bunlar kümülüs bulutlarına göre hacim başına daha az damlaları içerir. Okyanuslar üzerindeki bulutlar kıta üzerindikilerden daha geniş dağılımlara sahip olma eğilimindedir ve kirli bulutlar temiz olanlardan daha fazla ve daha küçük damlaları içerir.

- **Stratus (deniz)**

Bu, karasal stratus'tan daha az ve daha büyük damlaları içerir, ayrıca boyut dağılımı daha geniştir (Hess ve ark. 1998, Ahrens ve ark. 2005).

2.20.1.2. Kümülüs bulutu

Kümülüs bulutu farklı yarıçaplı olan damlacıkları içerir. Kümülüs bulutundaki damlacık boyut dağılımı, modifiye gama dağılımı ile uyar. Kümülüs bulutunun içindeki toplam parçacık yoğunluğu (N_0) $250 \text{ parçacık/cm}^3$ 'tır (Arnon ve ark. 1994, Hess ve ark. 1998).

$$n(r) = 2.604 \times r^3 \exp(-0.5r) \quad (2.34)$$

r : parçacık yarıçapı (μm)

$n(r)$: parçacık boyut dağılımı

- **Kümülüs (karasal, temiz)**

Bu bulutun dağılımı stratus bulutlardan daha küçüktür ve daha fazla damla içerir.

- **Kümülüs (karasal, kirli)**

Bu bulut, temiz kümülüs buluttan daha fazla ve daha küçük damlacıkları içerir. Ayrıca, yoğun kirli havada geliştirilen bir bulutun örneği olarak kabul edilmelidir. Aynı boyut dağılımı, ama $N = 400 \text{ parçacık/cm}^3$ ile, bir yığınbulutunu temsil etmek için çok uygundur. Bu durumda, Su Sıvı İçeriği (LWC) = 0.092 g/m^3 'dir.

- **Kümülüs (deniz)**

Karasal kümülüs bulutlardan daha az ve daha büyük damlaları içerir ve boyut dağılımı daha geniştir.

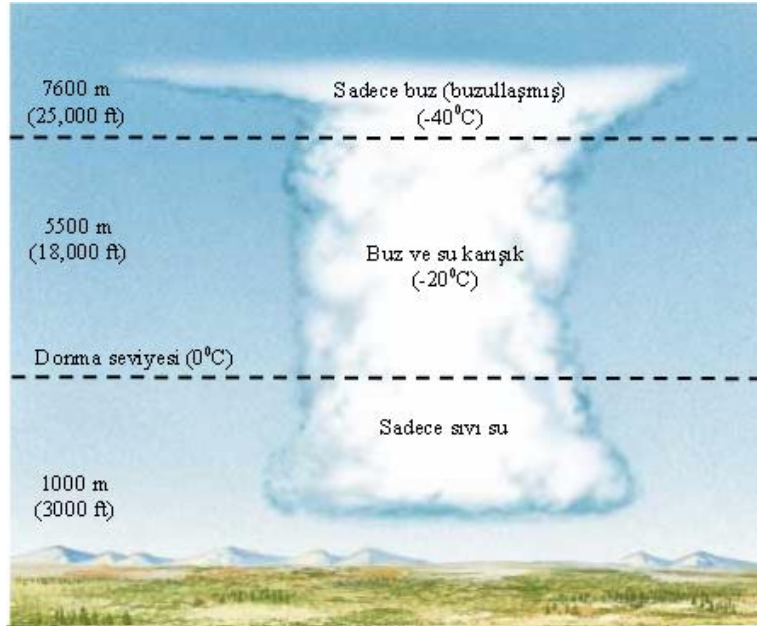
Kabarık kümülüs bulutu çeşitli şekillerde bulunur, fakat çoğu zaman keskin çizgiler ve düz taban ile dalgalı pamuğun bir parçası gibi görünür. Sadece hafif dikey büyümeyi (*kümülüs hümilis*) gösteren kümülüs bulutları açık hava ile ilişkilidir, bu nedenle, bu bulutlara *açık hava bulutları (fair weather cumulus)* denir. Kümülüs bulutları küçük ve dağınık kenarlı bulutun kırık parçaları ile görünür ise, *tabakalı kümülüs (kümülüs fraktus)* olarak bilinir. Karnabahar kafasını andıran büyüyen kümülüs, *kümülüs konjestus (cumulus congestus)* veya *tepe yapan kümülüs (towering cumulus)* olarak adlandırılır. Çoğu zaman, tek bir bulut olarak bulunur, ama, bazen, yükselen bulutların çizgisini oluşturup birbirlerinin içine büyüyebilirler. Kümülüs konjestus'tan yağış daima sağanaklıdır (Ahrens ve ark. 2005).

2.20.1.3. Yğınbulut (Stratokümülüs)

Düşük, yumrulu bulut tabakası stratokümülüs'tür. Bu bulutlar, bireysel bulut elemanların arasındaki görünür mavi gökyüzü ile diziler, lekeler ya da yuvarlak kitleler şekillerinde bulunur. Çoğu zaman çok büyük bir kümülüs bulutunun yayılma kalıntıları olarak günbatımına yakın bir zamanda görünür. Stratokümülüsün rengi açık ile koyu gri arasında değişir. Bu bulutlar, daha düşük taban ve daha geniş bulut elemanlara sahip olmasından, Altokümülüs'ten farklıdır. Stratokümülüsten yağmur veya kar nadiren yağar.

2.20.1.4. Boranbulut (Kümülonimbus)

Kümüülüs konjestusun dikey büyümesi devam ederse, çok büyük bir kümülonimbus veya fırtına bulutuna gelişir. Koyu tabanı yeryüzünün üzerinden 2000 *ft*'ten fazla olmasa da üstü 35000 *ft*'ten daha yüksek olup tropopoza kadar uzayabilir. Kümülonimbus, ayrı bir bulut, çizginin bir parçası ya da bulutların duvarı gibi ortaya çıkabilir. Şekil 2.31'de görüldüğü gibi, bulutun alt (daha sıcak) kısmı genellikle su damlacıklarından oluşur. Bulutun daha yüksek kısmında, su damlacıkları ve buz kristalleri ikisi bol olurken, soğuk üstüne doğru, sadece buz kristalleri bulunur. Bu bulutlarla ilgili hava durumu da farklıdır: tipik olarak yıldırım, fırtına, ve dolu yağış kümülonimbus ile meydana gelir (Ahrens ve ark. 2005).



Şekil 2.31. Kümülonimbus bulutunda su ve buz dağılımı (Ahrens ve ark. 2005)

2.20.1.5. Altostratus

Altostratus çoğu zaman yüzlerce kilometrekareden daha geniş bir alanının üzerindeki tüm gökyüzünü kapsayan gri veya mavi-gri buluttur. Bulutun ince bölümünde, bazen *sulu güneş* (*watery sun*) olarak adlandırılan güneş (veya ay) bir yuvarlak disk gibi belirsiz bir biçimde görülebilir. Kalın Sirostratus bulutlar bazen ince altostratus bulutları ile karıştırılır. Altostratusun belirlenmesi için göneşin gri rengi, boyu ve belirsizliği iyi ipuçlardır. Altostratus bulutları genellikle ileride yaygın ve nispeten sürekli yağış olan fırtınaları oluşturur. Altostratustan yağış düşerse, tabanı genel olarak düşürür. Yağış zemine düşerse, bulut Nimbostratus olarak sınıflandırılır.

2.20.1.6. Altokümülüs

Altokümülüs bulutlar bazen paralel dalgalar veya bantlarında yayılmış, gri, kabarık kitleler olarak görünür orta-seviye bulutlardır. Genellikle, yüksek Sirrokümülüs bulutlardan ayırmak için, bulutun bir kısmı diğer kısmından daha koyudur. Ayrıca, altokümülüsün bireysel kabartıları sirrokümülüsükilerinden daha büyük görünür. Altokümülüsün bir tabakası altostratus ile karıştırılabilir, ancak yuvarlak kitleler mevcut olduğunda, bulut altokümülüstür.

2.20.1.7. Nimbostratus (katman karabulutı)

Nimbostratus bulutu bazen orta-seviye bazen ise düşük-seviye bulutlar ile sınıflandırılmıştır. Bu bulut yüksek nem içeriği nedeniyle genellikle stratus bulutlardan daha gri koyu renktedirler ve genelde yağış bu bulut türü ile oluşur. Daha fazla ya da daha az sürekli düşen yağmur veya kar ile ilişkilidir. Bu yağışın yoğunluğu genellikle hafif veya ortadır. Nimbostratus bulutunun tabanını normalde açık olarak tespit etmek mümkün değildir ve altostratus ile kolayca karıştırılır. İnce nimbostratus kalın altostratustan daha koyu gridir ve güneş ya da ay nimbostratus katmanından görünmez.

2.20.1.8. Tüybulutlar (Sirüs)

En yaygın yüksek bulutlar *kısraklar kuyrukları* (*mares' tails*) denilen uzun flamalar içine yüksek rüzgarlar tarafından üflenmiş ince, ufacak sirüs bulutlardır. Bu bulutlar yüksek irtifalarda bulunur. Sıcaklık sıfır derece altında olduğundan, bulutlar buz kristalleri içerir. Sirüs bulutlar batıdan doğuya doğru gökyüzünde hareket eder, bu durum bulutların

bulunduğu irtifadaki hakim olan rüzgarları gösterir. Bunlar, $a_{1,2}$, $b_{1,2}$ ve buz su içeriğini (IWC) buluttaki sıcaklık ile bağlayan, Çizelge 2.6'daki parametreleri kullanarak (2.35) ve (2.36)'daki denklemler ile hesaplanır. Kullanılan buz kristalinin en küçük ve en büyük boyutları sırasıyla $1.8 \mu m$ ve $271 \mu m$ yarıçapı ile eşdeğer küreler yüzeyine karşılık gelir.

$$\frac{dN}{dx} = N f a_1 x^{b_1} (IWC), \quad x < x_0 \quad (2.35)$$

$$\frac{dN}{dx} = N f a_2 x^{b_2} (IWC), \quad x > x_0 \quad (2.36)$$

x : buz kristallerinin maksimum boyutu

IWC (Ice Water Content): buz su içeriği

N : sayı yoğunluğu

f : bir faktör

Çizelge 2.6. Buz bulut modellerinin mikrofiziksel özellikleri (Hess ve ark. 1998)

Unsur	a_1	b_1	a_2	b_2	x_0	f
Sirüs I	4.486E+08	-2.417	1.545E+14	-4.376	670	0.909
Sirüs II	5.352E+10	-3.545	-	-	-	3.48
Sirüs III	5.352E+10	-3.545	-	-	-	3.48

Burada, f tanınması gereken ek faktördür, çünkü boyut dağılımların entegrasyonu tüm durumlarda deneysel olarak elde edilen IWC 'yi vermez.

Farklı sıcaklıklarda bulutlar için geçerli üç sirüs bulutunun özellikleri aşağıda anlatılmıştır.

- **Tüybulut (Sirüs) 1**

-25 °C sıcaklığı için geçerlidir. Bu boyut dağılımın eğimi, tüybulut 2'den daha büyük parçacıklara doğru önemli ölçüde daha yavaş bir düşüşü gösterir.

- **Tüybulut (Sirüs) 2**

-50 °C sıcaklığı için geçerlidir. Bu durumda, $f = 3.48$ değeri gül benzeri kristallerinin mevcudiyetini gösterir. Bu tip parçacıklar daha büyük boyutlarda olması daha muhtemel olduğu için, f sadece $90 \mu m$ 'den daha büyük parçacıklara uygulanır.

Bu boyut dağılımları $20 \mu m$ 'den daha büyük buz kristalleri için geçerlidir. Daha küçük parçacıklar ihmal edilmiştir. Bulut optik derinliği belirlendiği ve görünür spektral aralıkta sadece faz fonksiyonları dikkate alındığı sürece, bu büyük hatalara yol açmayacaktır. Eğer optik derinliği parçacık sayı yoğunluğu ve bulut sınırlarından hesaplanırsa, küçük parçacıklar ihmal edilemez. Bu durumda, tüybulut 2'ye benzer ama parçacıkları ile boyut aralığında $2 - 20 \mu m$ genişletilmiş olan tüybulut 3 uygulanmalıdır.

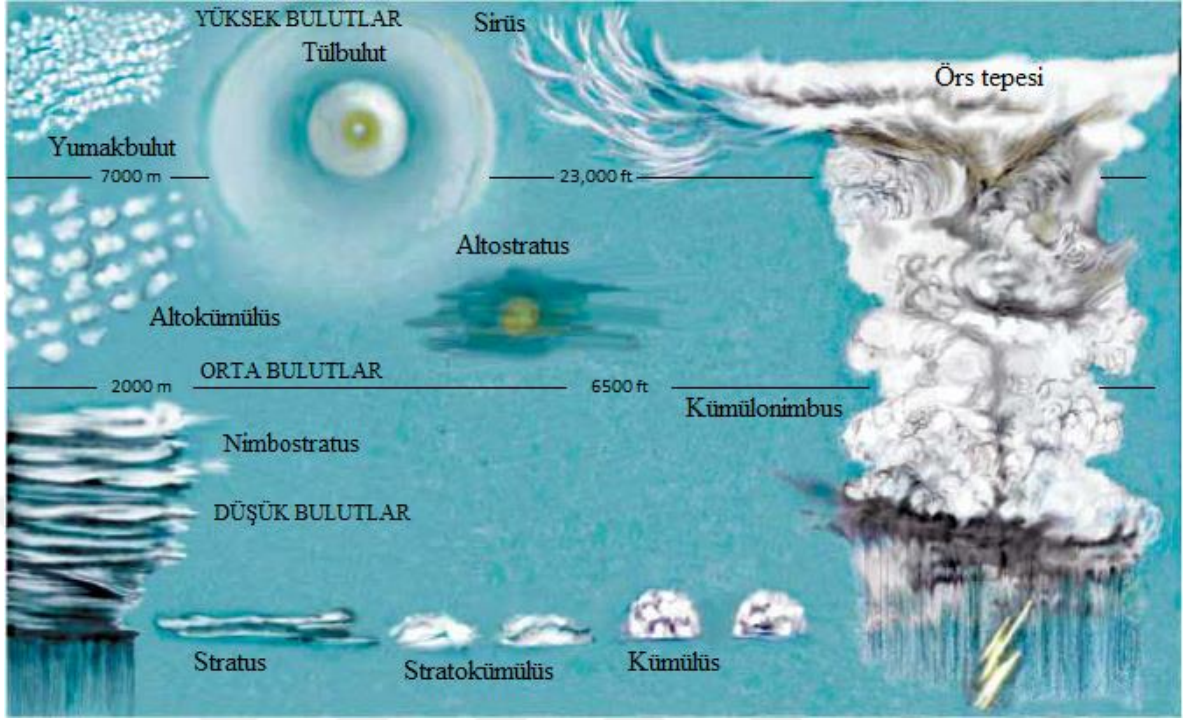
2.20.1.9. Yumakbulut (Sirrokümülüs)

Sirrokümülüs bulutları, sirüs bulutlardan daha az sıklıkla görünen, küçük, yuvarlak, bireysel ya da sıralar halinde oluşabilecek beyaz kabartılardır. Sirrokümülüs nadiren gökyüzünün küçük bir kısmından daha fazlasını kapsar. Sirrokümülüs'te küçük dalgalanmalar fazlasıyla balık pullarına benzer; dolayısıyla, *makerel gökyüzü (mackerel sky)* ifadesi yaygın olarak sirrokümülüs bulutlarla dolu bir gökyüzünü açıklar.

2.20.1.10. Tülbulut (Sirostratüs)

Sıklıkla tüm gökyüzünü kapsayacak, ince, yaprağa benzer, yüksek, güneş ve ay açıkça içlerinden görülebilecek kadar ince bulutlar sirostratüs'tür. Bu bulutlardaki buz kristallerin içinden geçen ışık eğilir ve sıkça bir hale üretilir. Sirostratüsün peçesi çok ince olabildiğinden, hale bu bulutların varlığının tek ipucudur. Kalın sirostratüs bulutları gökyüzüne çok parlak beyaz bir görünüm verir ve sık sık öncesinde ilerleyen bir fırtınayı oluşturur, dolayısıyla, özellikle orta-seviye-tip bulutlar ile takip edildiğinde, on iki ile yirmidört saat içinde yağmur veya kar yağacağını tahmin etmek için kullanılabilir (Ahrens ve ark. 2005).

Şekil 2.32'de farklı seviyelerdeki bulutların tipi gösterilmiştir.



Şekil 2.32. Bulut tipleri (Ahrens ve ark. 2005)

Bulutların optik derinliği, yüksekliğe bağımsız olarak bulut damlacık yoğunluğu ile homojen bir tabaka varsayılarak hesaplanır.

$$\tau = \sigma_e^1 N(0) \Delta h \quad (2.37)$$

σ_e^1 : sönmüm katsayısı, 1 parçacık/cm³ sayı yoğunluğuna normalize edilmiştir

Δh : bulutun geometrik kalınlığı, varsayım değeri = 1 km

Burada, bulutlar (ayrıca aerosoller) için hava moleküllerinin optik derinliği dahil değildir (Hess ve ark. 1998).

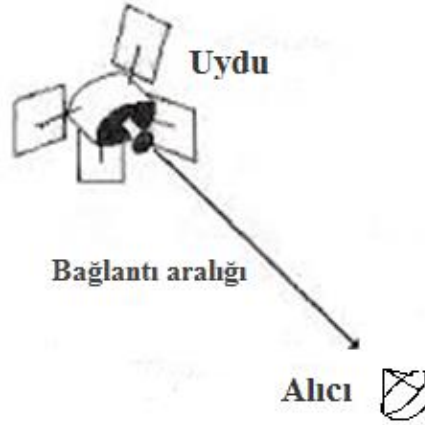
2.21. SUOH Tanımı

SUOH, optik bant genişliği bağlantıları sağlamak için lazer kullanan bir görüş hattı (Line of Sight) teknolojisidir. Diğer bir deyişle, SUOH, telekomünikasyon ve bilgisayar ağı için kablosuz veri iletimi amacıyla serbest uzaya (hava, dış uzay, vakum ya da benzer bir şey) ışığı yayan bir optik haberleşme tekniğidir. SUOH, yüksek hızlı (*multi – Gb/s*), büyük kapasiteli uzay haberleşmesini gerçekleştirmek için önemli teknolojilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu teknoloji, 780 – 1600 nm dalgaboyu bandında çalışır ve O/E

(Optical-to-Electrical) ve E/O (Electrical-to-Optical) dönüştürücüleri kullanmaktadır. SUOH, LED veya lazeri kullanarak odaklanmış ışığı gerektirir. Lazerlerin kullanımı, optik haberleşmesi için fiber optik kabloları kullanmak gibi basit bir kavramdır; tek farkı iletim ortamıdır. Işık havada başka ortamlara göre daha hızlıdır (Majumdar ve Ricklin 2008, Alkholidi ve Altowij 2014).

2.22. SUOH Temeli

SUOH atmosfer yoluyla bir lazer ışını tarafından taşınan veriyi taşımak için kullanılan bir tekniktir. SUOH geniş bant hizmetleri sunarken verici ve alıcı arasında görüş hattı (LOS) gerektirmektedir. Şekil 2.33 uydu (verici) ve yer istasyonunun (alıcı) arasındaki görüş hattını göstermektedir.



Şekil 2.33. SUOH verici ve alıcının görüş hattı

Atmosferden geçen lazer ışının üzerine atmosferin etkileri olup alınan verilerin kalitesini etkilemektedir. Bu etkiyi azaltmak için, temel sistem bileşenlerinin hava şartları ile uyum sağlayacak şekilde tasarlanmış olması gerekir. Bu tasarım çoğunlukla verici ve alıcı bileşenleri ile ilişkindir. Kullanıcı tarafından dikkate alınarak tasarlanan SUOH unsurları dalgaboyu, ışın iraksaklık açısı (beam divergence angle), açıklık çapı (aperture diameter) ve mesafedir (Range) (Alkholidi ve Altowij 2014).

2.22.1. Dalgaboyu

SUOH için kullanılacak en iyi dalgaboyunu seçmek için bileşenlerin kullanırlığı, göz güvenlik hususları, gerekli iletim mesafesi, fiyat ve bunlara benzer çeşitli faktörler göz önüne alınmalıdır. Bileşenlerin kullanırlığı ışık kaynakları ve dedektörlerdir. Göz güvenliği

kablosuz kızılötesi (IR) vericisi tarafından yayılan optik güç seviyesine en önemli kısıtlamalardan biridir. Çok yüksek güçlü lazerler 850 nm ve 780 nm sistemlerinden daha güvenle 1550 nm sistemlerinde kullanılabilir. Yaklaşık 1400 nm altındaki dalgaboylarında insanın kornea tarafından retina üzerine düşen konsantre bir noktaya odaklanmış olması durumunda göz hasarına neden olabilir.

1550 nm dalgaboyunda izin verilebilen güvenli lazer gücü yaklaşık 50 kat daha fazladır. Bu 50 faktörü, sistemin yoğun zayıflama yoluyla uzun mesafelerde yayılmasına ve daha yüksek veri hızlarını desteklemesine izin verip 17 dB'ye kadar ekstra marjı sağlamak için önemlidir (Alkholidi ve Altowij 2014).

780 nm ve 1600 nm dalgaboyu aralığında neredeyse şeffaf (zayıflama < 0.2 dB/km) birkaç iletim pencereleri vardır. Bu pencereler birkaç belirli merkez dalgaboyların etrafında yer almaktadır (Alkholidi ve Altowij 2014).

- **850 nm**

Düşük zayıflama ile karakterize edilen 850 nm penceresi SUOH çalışması için çok uygundur. Bununla beraber, güvenilir, yüksek performanslı ve ucuz verici ve dedektör bileşenleri genellikle mevcuttur. Çok hassas silikon çığ fotodiyot dedektör teknolojisi ve gelişmiş VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) teknolojisi bu atmosferik pencerede işlem için kullanılabilir (Anonim 2009).

- **1060 nm**

1060 nm iletim penceresi son derece düşük zayıflama değerlerini gösterir. Ancak, bu dalgaboyu aralığında SUOH sistemini oluşturmak için iletim bileşenleri çok sınırlıdır ve tipik olarak hantaldır (örneğin. Yd:YAG katı hal lazerleri). Bu pencere özellikle haberleşme sistemlerinde kullanılmadığı için çok kaliteli iletim bileşenleri nadirdir. 980 nm'ye yakın dalgaboyuna özellikle ayarlanmış yarı-iletken lazerler (fiber amplifikatörleri için 980 nm pompa lazerler) ticari olarak mevcuttur. Ancak, 980 nm dalgaboyu aralığı açık hava koşullarında bile birkaç dB/km atmosferik zayıflamaya uğramaktadır (Anonim 2009).

- **1250 nm**

1250 nm iletim penceresi düşük zayıflama gösterir, ancak bu dalgaboyu aralığında çalışan vericiler nadirdir. Tipik olarak 1280 – 1310 nm aralığında kaliteli, düşük güçlü çalışan lazerler ticari olarak mevcuttur. Ancak, 1290 nm’de atmosferik zayıflama büyük ölçüde arttığından bu dalgaboyu sadece marjinal olarak SUOH için uygundur (Anonim 2009).

- **1550 nm**

1550 nm bandı, düşük zayıflaması ve yüksek-kaliteli verici ve dedektör bileşenlerinin çoğalması nedeniyle SUOH için uygundur. Bileşenler hem WDM (Wavelength Division Multiplexing) çalışması için çok yüksek hızlı yarı-iletken uygun teknolojiyi hem de iletim gücünü arttırmak için kullanılan yükselticileri (EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier, SOA - Semiconductor Optical Amplifier) içerir. Bu aralıkta zayıflama özellikleri ve bileşenlerin kullanılabilirliği nedeniyle SUOH WDM uygulanabilir (Anonim 2009).

Açık hava koşullarında zayıflama son derece düşüktür ($< 0.2 \text{ dB/km}$) ve merkez dalgaboylarının etrafında $\pm 10 \text{ nm}$ daha fazla uzanabilir. Hatta lazer iletim dalgaboyu tümüyle merkez dalgaboylarına eşleşmediğinde, atmosferik emilimden kaynaklanan zayıflama değişmeyecektir. Bu, vericinin lazer ışın dalgaboyunda üretim toleransı nedeniyle önemlidir. Lazer kaynak sıcaklığı sabit olmadığı zaman, lazer dalgaboyunun kaymasından dolayı düşük zayıflama için daha geniş bir dalgaboyu aralığı istenilir. $0.2 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ dalgaboyu kaymaları yüksek güçlü, kısa dalgaboylu lazerler için oldukça yaygındır. Ayrıca, lazer diyodun sıcaklık değişimi (geniş sıcaklık aralığında çalışan dış ekipmanı için oldukça olağandır) nedeniyle iletim dalgaboyunun hafif kayması orta (moderate) yağmur koşullarının altında bile uzun mesafeli SUOH sistemlerinde işaret kaybına neden olabilir. Bu sonuçlar, SUOH sistemlerinin çalışmasını daha geniş atmosferik iletim pencereler içinde güvenilir sistemlerin işlemi için en iyi seçenek olduğunu en iyi şekilde ortaya çıkarır (Anonim 2009).

2.22.2. Işın ıraksaklığı

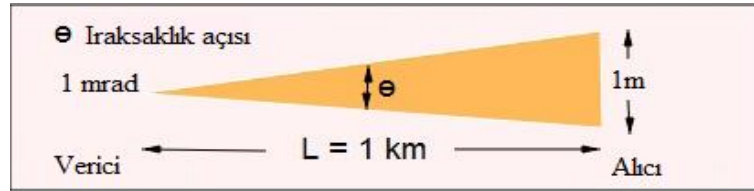
Işın ıraksaklığı ışının sapması veya yayılmasına kasten izin verir. SUOH sisteminde dar ışının kullanılmasının avantajı çok yüksek veri hızının üretilmesi ve güvenliğin artırılmasıdır. Son derece dar ışık ile üretilen lazer kolayca ses ve veri bilgileri ile modüle edilebilir. Işın yayılması ışın ıraksaklık açısına ve iletim aralığına bağlıdır. Tipik olarak, $1 - 8 \text{ mrad}$ ışın ıraksaklığı 1 km mesafede $1 - 8 \text{ m}$ yayılır. Geniş bir ışın yayılmasını önlemek için 1 mrad gibi dar ışın ıraksaklığının kullanılması daha iyidir (Alkholidi ve Altowij 2014).

Işın ıraksaklığı λ/D_R ile orantılıdır; λ taşıyıcı dalgaboyu ve D_R açıklık çapıdır. Bu nedenle, optik taşıyıcısının sunduğu ışın genişliği daha dardır (Kaushal ve Kaddoum 2015).

Şekil 2.34'te verici ve alıcı arasındaki ıraksaklık açısı ve benek boyutu sunulmuştur (Alkholidi ve Altowij 2014).

$$1^\circ \approx 17 \text{ mrad} \rightarrow 1 \text{ mrad} \approx 0.0573^\circ$$

Küçük açı yaklaşımı: $\text{Açı } (\theta, \text{mrad}) * \text{Mesafe } (L, \text{km}) = \text{Benek boyutu (m)}$



Şekil 2.34. Verici ve alıcı arasındaki küçük açılar ve benek boyutu (Alkholidi ve Altowij 2014)

2.22.3. Açıklık çapı

SUOH sisteminde, yüksek veri hızlı haberleşme bağlantılarını kurmak için vericinin küçük açıklığı ve alıcının daha geniş açıklığı gerekir. Verici ve alıcının açıklık çapı hava koşullarına uygun olmalıdır. Lazer ışını atmosfere yayıldığında, ışın, kaynaktan L mesafesinde uzak olduğunda türbülans nedeniyle dağılır. Eğer türbülans hücresi ışın çapından daha büyükse, ve alıcı açıklığı küçükse, ışın eğilir ve işaretin tamamen alıcı birimini kaybetmesine neden olabilir. Alıcının geniş boyutlu açıklık çapı SUOH üzerine türbülans etkilerini azaltır (Alkholidi ve Altowij 2014).

SUOH için geometrik yol kaybı optik vericisinin ışın genişliğine, yol mesafesine ve ıraksaklık açısına bağlıdır. Verici ve alıcının açıklık çapı ölçülebilir parametrelerdir ve genellikle üretici tarafından belirtilir (Alkoholide ve Altowij 2014).

Çizelge 2.7’de 1 km mesafesinde ıraksaklık açısı değiştirilerek elde edilen benek boyutu listelenmiştir.

Çizelge 2.7. ıraksaklık, mesafe ve benek boyutu (Patel ve Mulye 2016)

ıraksaklık	Mesafe	Benek Boyutu
0.5 mrad	1.0 km	~ 0.5 m (~ 20 in)
2.0 mrad	1.0 km	~ 2.0 m (~ 6.5 ft)
4.0 mrad (~ 1/4)°	1.0 km	~ 4.0 m (~ 13.0 ft)

Kaur ve ark. (2015) tarafından farklı verici ve alıcının açıklık çapları üzerinde yapılan çalışmada, 1310 nm dalgaboyu, Sözde Rasgele İkili Dizi (PseudoRandom Binary Sequence, PRBS) üretici ve Sıfıra Dönüşümsüz (Non-Return-to-Zero, NRZ) sürücü, ve 1310 nm’de doğrudan modüle edilmiş lazer ile oluşan verici kullanılmıştır. Verici çıkışındaki optik gücü 8 dBm, ıraksaklık 0.3 mrad, SUOH bağlantısının veri hızı 5 Gbps, bağlantı mesafesi 10 km, ve çığ fotodiyot alıcısı seçilmiştir. Bu çalışmada, vericinin açıklık çapı 1 cm ile 5 cm arasında ve alıcının açıklık çapı 2 cm ile 12 cm arasında değiştirilmiştir. 5 cm vericinin açıklık çapı ve 12 cm alıcının açıklık çapında gözlenen çıkış, kalite faktörü açısından en iyi sonuçları vermiştir.

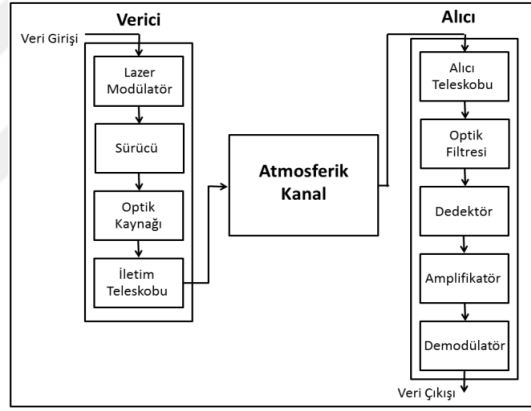
2.22.4. Mesafe

Verici ve alıcı arasındaki mesafe SUOH sistemlerinin performansını üç şekilde etkiler. Birincisi, parıldama, açık hava koşullarında bile ışın ıraksar ve dedektöre az güç ulaşır. İkincisi, mesafenin arttırılması ile ışının toplam iletim kaybı arttırılır. Üçüncüsü, daha uzun mesafelerde saçılma ve emilim etkileri toplanır. Bu nedenle, genel güç bütçesinde parıldama sönümlenme (fading) marjının değeri, BER (Bit Error Rate) için önceden tanımlanmış bir değeri devam ettirecek şekilde artacaktır. SUOH için mevcut ticari sistemlerin çoğu 25 – 5000 m arası, yüksek güçlü askeri uydu sistemleri 2000 km’ye

kadar çalışma için sınıflandırılmıştır. 1 km'den fazla mesafe için çalışan sistemlerin çoğu mesafe kaynaklı sorunları azaltmak için üç veya daha fazla paralel çalışan lazeri birleştirir. Uzak boşlukta, SUOH'un binlerce kilometre mesafeyi elde edebilmesi ilginçtir (Alkholidi ve Altowij 2014).

2.22.5. SUOH alt sistemi

Daha önce belirtildiği gibi, SUOH atmosfer yoluyla bir noktadan diğer noktaya çok yüksek bant genişliği olan sayısal veriyi göndermek için lazer ışını kullanan görüş hattı teknolojisidir. Bu, atmosfer yoluyla iletim istasyonunda modüle edilmiş dar bir lazer ışını kullanarak veriyi iletmekten ve daha sonra alıcı tarafında almaktan ibarettir. SUOH geliştirilmiş sistemi Şekil 2.35'de gösterilmektedir.



Şekil 2.35. SUOH sistemin blok şeması (Alkholidi ve Altowij 2014)

SUOH bileşenleri üç adettir:

- I. Atmosfer yoluyla optik radyasyonu göndermek için Beer Lambert yasasına uyan verici

Atmosferik iletim Beer Lambert yasası ile (2.38)'deki gibi tanımlanabilir.

$$T(\lambda, d) = \frac{P_d}{P_0} = e^{-\gamma d} \quad (2.38)$$

P_d : d mesafeli atmosferik yolun sonundaki optik güç

P_0 : iletilen orijinal optik güç

γ : radyasyon azalımı veya sönme (Extinction) katsayısı

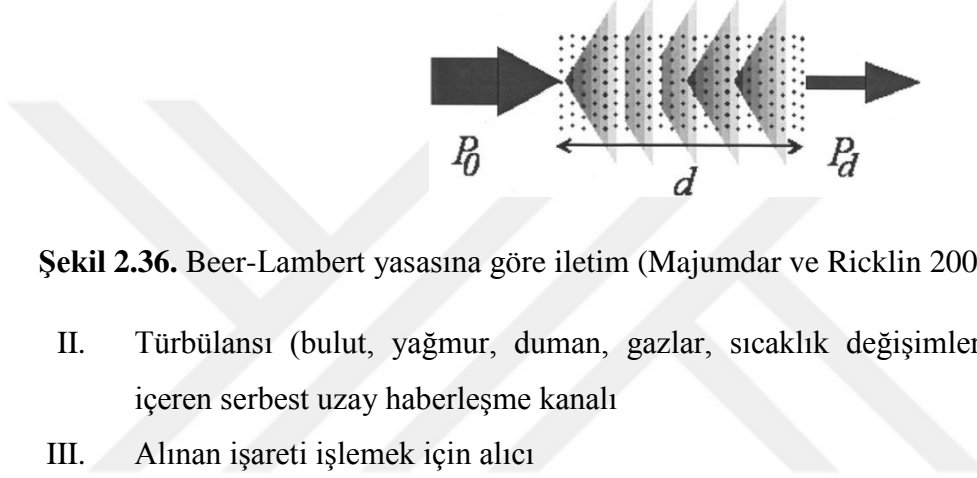
d : atmosferik yolun mesafesi

Radyasyon azalımın katsayısı atmosferde parçacıklar tarafından emilim α ve saçılma β işlemleriyle oluşur. Ayrıntılı olarak, bu parçacıklar atmosferik gaz bileşenlerinin molekülleri ve daha büyük aerosol parçacıkları olabilir.

$$\gamma(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda)$$

$$= \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda)$$

Toplam radyasyon azalımın katsayısı km^{-1} birimi ile belirlenir. Beer Lambert yasasına göre iletim Şekil 2.36'daki gibidir (Majumdar ve Ricklin 2008).



Şekil 2.36. Beer-Lambert yasasına göre iletim (Majumdar ve Ricklin 2008)

- II. Türbülansı (bulut, yağmur, duman, gazlar, sıcaklık değişimleri, sis ve aerosol) içeren serbest uzay haberleşme kanalı
- III. Alınan işareti işlemek için alıcı

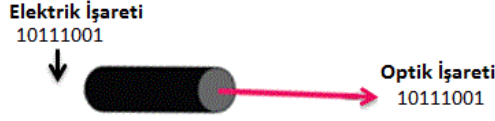
2.22.5.1. Verici

Verici optik işareti elektrik işarete dönüştürür ve atmosferik kanal üzerinden taşınan veriyi alıcıya aktarmak için lazer ışını modüle etmektedir. Şekil 2.35'te gösterildiği gibi verici dört bölümden oluşmaktadır.

• Lazer Modülatör

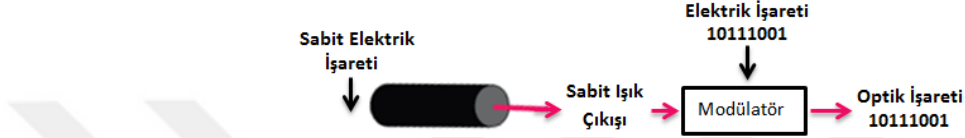
Lazer modülasyonu, verilerin lazer ışını ile taşınması anlamına gelir. Modülasyon tekniği iki yöntem ile uygulanabilir; iç (doğrudan) modülasyonu ve harici modülasyonu. Harici modülasyon düzeni iç modülasyon düzeninden daha yönetilebilir ve daha yönlüdür (Sato 2002, Alkholidi ve Altowij 2014).

İç Modülasyon: Lazer rezonatörün içinde meydana gelen bir süreçtir. Katkı bileşenlerin tarafından sebep olan değişime bağlıdır ve bilgi işaretine göre lazer ışınının yoğunluğunu değiştirecektir. Şekil 2.37 iç modülasyonu göstermiştir.



Şekil 2.37. İç modülasyon

Harici modülasyon: Şekil 2.38’de gösterildiği gibi, lazer rezonatörün dışında meydana gelen bir süreçtir, hem polarizasyon hem de kırılımsal fenomenine bağlıdır.



Şekil 2.38. Harici modülasyon

Verici kazancı (2.39)’dan elde edilir.

$$\text{Verici kazancı } G_T = 10 \log[16/\theta^2] \quad (2.39)$$

θ : iraksalık açısı

- **Sürücü**

Vericinin sürücü devresi ışık kaynağı üzerinden akım akışını değiştirerek optik bir işareti elektrikselsel bir işarete dönüştürür.

- **Optik Kaynağı**

Optik kaynağı elektrikselsel işareti optik işarete dönüştürmek için lazer veya LED kullanabilir.

- **İletim Teleskobu**

Verici teleskobu, kanalın diğer ucundaki alıcı teleskobuna doğru optik radyasyonu toplar, ayarlar ve yönlendirir (Alkholidi ve Altowij 2014).

2.22.5.2. Atmosferik kanal

SUOH’nin yayılma özelliği atmosfer içinde, haberleşme ortamı nedeniyle özellikle hava durumunun etkisi güçlü olduğundan büyük ölçüde değişmektedir. Alınan işaret gücü

yayıma kanalındaki yağmur, sis, pus ve türbülans gibi atmosferik engeller tarafından dalgalandırılır ve zayıflatılır. Atmosferik zayıflatma yayılma boyunca lazer ışını ile hava molekülleri ve aerosollerin çarpışmalarından meydana gelmektedir. Optik kablosuz haberleşme üzerine esas etkiler emme, saçılma ve parıdamadır (Alkholidi ve Altowij 2014).

2.22.5.3. Alıcı

Şekil 2.35'teki blok şemasında gösterildiği gibi, optik alıcı beş bölümden oluşmaktadır.

• Alıcı Teleskobu

Alıcı teleskobu gelen optik radyasyonunu toplar ve foto dedektöre odaklar. Büyük bir alıcı teleskobu açıklığının istenilir olduğuna dikkat edilmelidir, çünkü birden fazla ilintisiz radyasyon toplanır ve ortalamaları foto dedektör üzerine odaklanır. Alıcı kazancı (2.40)'tan elde edilir.

$$\text{Alıcı kazancı } G_R = (\pi d_R / \lambda)^2 \quad (2.40)$$

d_R : alıcı açıklık çapı

• Optik Filtresi

Dedektöre çarpacak istenen dalgaboyundaki enerjiye başta izin veren ve istenmeyen dalgaboylarındaki enerjiyi reddeden optik filtreleri tanıstırarak güneş aydınlatma etkisi önemli ölçüde azaltılmış olabilir (Alkholidi ve Altowij 2014).

2.22.6. Link marjı (Link margin)

Link marjı (LM), belirli bir veri hızında belirtilen bit hata oranını (BER) elde etmek için, mevcut alınan gücün gereken alıcı gücüne oranıdır. Alıcı tipik olarak belirlenmiş veri hızında en düşük belirli bir duyarlılığa sahiptir ve görevi de sistemin güvenilir bir şekilde çalışmasını garanti etmek amacıyla alınan gücün duyarlılığının üstünde kalmasıdır. Bununla birlikte, SUOH'un önemli bir bağlantı parametresi hava etkilerinden dolayı zaman ile değişen verici ve alıcı arasındaki ortamının kaybına bağlıdır. Bu nedenle, SUOH sistemi için hava koşullarını dikkate almak çok önemlidir. Link marjı genel olarak (2.41)'deki gibi belirlenir.

$$LM = \text{Alınan Güç } (P_{Rx}) / \text{Gereken Güç } (P_{Req})$$

$$P_{Rx} = P_{Tx} \cdot \frac{d_R^2}{\theta^2 L^2} \cdot 10^{-\gamma \cdot L/10} \cdot \tau_{Trans} \tau_{Rec} \quad (2.41)$$

P_{Rx} : alınan işaret gücü

P_{Req} : gereken işaret gücü

P_{Tx} : iletilen işaret gücü

h : Planck sabiti, $6.62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$

c : ışık hızı

N_b : alıcı duyarlılığı (foton sayısı/bit)

L : mesafe

τ_{Trans} : verici optik verimliliği

τ_{Rec} : alıcı optik verimliliği

d_R : alıcı sisteminde açıklık çapı

θ : ıraksaklık açısı

γ : atmosferik zayıflama

$$P_{Req} = N_b \cdot R \cdot h \cdot c / \lambda \quad (2.42)$$

R : veri hızı (bits/s)

$$R = \frac{P_{Tx} \cdot P_{Rx} \cdot 10^{-\gamma \cdot L/10} \cdot d_R^2}{\pi(\theta/2)^2 \cdot L^2 \cdot E_p \cdot N_b} \quad (2.42 \text{ a})$$

$E_p = hc/\lambda$: λ dalgaboyunda foton enerjisi

Link marjı (2.43)'teki gibi belirlenir (Ali 2013, Fadhil ve ark. 2013).

$$LM = [P_{Tx} \cdot \lambda / N_b \cdot R \cdot h \cdot c] * [d_R^2 / (\theta^2 \cdot L^2)] 10^{-\gamma \cdot L/10} \cdot \tau_{Trans} \tau_{Rec} \quad (2.43)$$

2.23. Algılama ve Modülasyon Teknikleri

Bugünlerde bazı SUOH sistemlerinde doğrudan algılama ile OOK (Açma-Kapama Anahtarlama) kullanılır ve bazılarında interferometrik algılama ile DPSK (Farksal Faz Kaydırmalı Anahtarlama) kullanılması başlanmıştır. Modülasyon ve algılama tekniklerinin daha ileri gelişimi WDM sistemlerinde spektral verimliliğini artıracaktır. İkili olmayan modülasyon eşvreli algılama ile yukarıdaki tüm açılarda artan uygulama karmaşıklığı pahasına iyi performans gösterir (Kahn 2006).

2.23.1. Algılama teknikleri

Çizelge 2.8’de gösterildiği gibi, sayısal olarak modüle edilmiş optik işaretler için algılama yöntemleri geleneksel ayrımlarını kullanarak en çok mantıklı olarak sınıflandırılır. Eşevresiz algılamada sadece enerjinin varlığı ya da yokluğu tespit edilir, hiçbir faz bilgisi elde edilmez. Diferansiyel eşvrelili algılamada, bir sembol fazı önceki sembol fazı ile karşılaştırılır. Eşvrelili algılamada, alıcıda üretilen bir taşıyıcı faz referansı kullanılarak işaret tespit edilir (Kahn 2006).

Çizelge 2.8. Algılama tekniklerinin sınıflandırılması (Kahn 2006)

Algılama Tekniği	Ara katlı veya Eş-zamanlı Uygulaması	Doğrudan Algılama Uygulaması	Modülasyon Teknikleri	Teknik Sınıfı
Eşevresiz	Zarf Algılaması	Doğrudan Algılama	PAM	Asenkron
Diferansiyel Eşvrelili	Gecikme-ve-çarpma Algılaması	İnterferometrik Algılama	DPSK	
Eşvrelili	Eşvrelili Algılama	-	PSK, QAM	Senkron

Üç algılama yönteminin herhangi biri, uygun elektrik-alan dedektörü ardından yerel bir osilatör (LO) lazer ve dengeli bir optik alıcı (lar) ile ara katlı (heterodyne) veya eş-zamanlı (homodyne) aşağı dönüşümü (down conversion) kullanılarak uygulanabilir. Ancak, diferansiyel eşvrelili algılama dengeli optik alıcı (lar) ile birlikte interferometre (ler)’i kullanarak düşük karmaşıklıkta uygulanabilirken; eşevresiz algılama, basit doğrudan algılama kullanarak düşük karmaşıklıkta uygulanabilir.

2.23.2. Modülasyon teknikleri

SUOH sisteminde, işaretleri göndermek için optik kaynağının yoğunluğu genlik modülasyonu, frekans modülasyonu, faz modülasyonu gibi birçok modülasyon yöntemleri ile frekans, genlik, faz ve polarizasyonunda modüle edilebilir. SUOH sisteminde en yaygın kullanılan modülasyon tekniği bant genişliği verimliliği ve modülasyon/ demodülasyon kolaylığı nedeniyle OOK modülasyondur. Ancak, IM/DD (Yoğunluk Modülasyonu/ Doğrudan Algılama) ve faz modülasyonunun daha yüksek duyarlılığı ve SUOH sistemi için daha iyi özelliklere sahip olduklarına göre, OOK modülasyonun yeteneği atmosferik

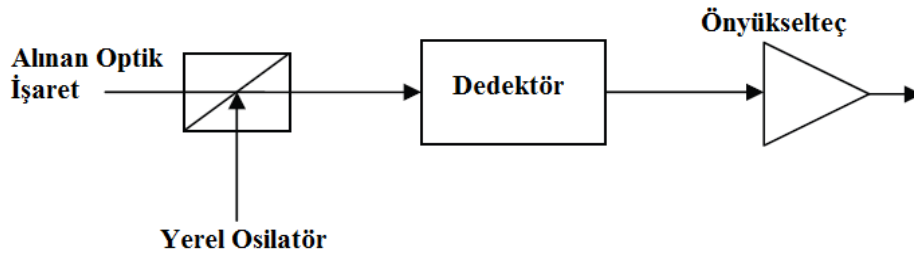
türbülansa karşı oldukça zayıftır. Modülasyon teknikleri kabaca iki ana sınıfa ayrılabilir; doğrudan algılamalı ve eşevreli algılamalı. Doğrudan algılamalı sistemler için sayısal temel bant modülasyonu ve eşevreli algılamalı sistemler için ara katlı ve eş-zamanlı modülasyonlar kullanılır.

Doğrudan algılamalı sistemler için en yaygın modülasyon ikili (binary) temel bant işaret kullanımıdır. Bu sistemde işaret için kullanılan iki durum, biri ikili 1 öteki de ikili 0 olarak bilinir. İkili temel bant modülasyonu için kullanılan en yaygın teknikler Çizelge 2.9’da listelenmiştir (Henniger ve Wilfert 2010, Zhang ve ark. 2015).

Çizelge 2.9. İkili modülasyon teknikleri

NRZ	Sıfıra Dönüşlü Olmayan (Non-return to Zero)
RZ	Sıfıra Dönüşlü (Return to Zero/bi-phase-Manchester)
PPM	Darbe Konumu Modülasyonu (Pulse Position Modulation)
PBM	Darbe İkili Modülasyonu (Pulse Binary Modulation)
PPBM	Darbe Polarizasyon İkili Modülasyonu (Pulse Polarization Binary Modulation)
PDBM	Darbe Gecikme İkili Modülasyonu (Pulse Delay Binary Modulation)
PIM	Darbe Aralığı Modülasyonu (Pulse Interval Modulation)
PQM	Darbe Dört-düzeyle Modülasyonu (Pulse Quaternary Modulation)

Şekil 2.39’da gösterildiği gibi eşevreli algılamalı sistemde gelen optik işaret alıcıda bir yerel osilatör çıkışıyla karıştırılır veya toplanır. SUOH sisteminde, bu işlem dedektörde gerçekleştirilir.



Şekil 2.39. Eşevreli algılamalı alıcı

Eşvreli modülasyonlardan ara katlı ve eş-zamanlı alış sistemleri olarak söz edilebilir. Ara katlı alış sistemlerinde gelen optik işaret bir yerel lazer ile karıştırılır ve elektriksel ara frekansına çekilir. Demodülasyon işlemi de kullanılan modülasyon tekniğine göre yapılır. Genellikle, ASK (Genlik Kaydırmalı Anahtarlama), FSK (Frekans Kaydırmalı Anahtarlama) ve PSK (Faz Kaydırmalı Anahtarlama) kullanılır.

Eş-zamanlı alış sistemlerinde gelen optik işaret bir yerel lazer ile karıştırılır ve doğrudan temel bant bilgi işaret frekansına çekilir. Genellikle, burada ASK ve PSK kullanılır (Norimatsu ve Iwashita 1990).

2.24. SUOH Sistemini Etkileyen Parametreler

Lazer ışınının yayılması atmosfer yoluyla olduğu gibi, SUOH bağlantısı atmosfer hakkında iyi bir anlayış gerektirir. Atmosferden geçen ışık dalgası zayıflanması ile birlikte bozulur ve eğrilir. Zayıflama birincil olarak atmosferdeki muallak moleküller ve aerosoller tarafından meydana gelen emilim ve saçılmanın sonucudur. Diğer yandan, bozulma (distortion), kırılma indisi dalgalanmalarından ötürü atmosferik türbülانstan kaynaklanır. Bozulma ortalama etrafında işaretin değişmesine neden olur, oysa zayıflama, optik bağlantıda alınan işaretin ortalama değerini etkiler. Genellikle, atmosferik zayıflama, atmosfer yoluyla optik haberleşme bağlantısında sınırlayıcı faktör olabilir.

2.24.1. Aerosoller

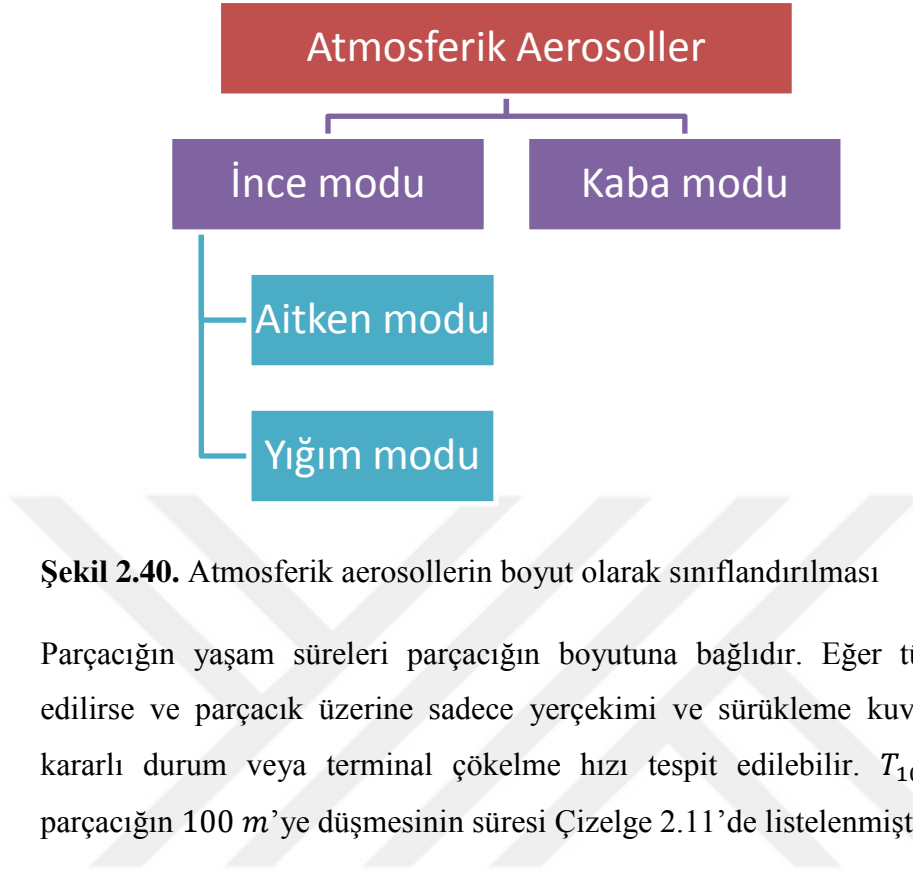
Aerosoller atmosferdeki sis, pus, toz ve duman gibi muallak parçacıklardır ve bunların farklı doğası, şekli ve boyutu var. Aerosoller dağılımda (distribution), bileşenlerde (constituents) ve yoğunlukta (concentration) değişebilir. Aerosollerin büyük yoğunluğu sınır (boundary) tabakasındadır (2 km kadar yukarıdaki yeryüzünün tabakası). Sınır tabakasının üstünde, aerosolun yoğunluğu hızlı bir şekilde azalır. Saçılma aerosoller ve yayılan ışının arasındaki ana etkileşimdir. Aerosol parçacıklarının boyutları optik haberleşmede kullanılan dalgaboyları ile karşılaştırılabilir olduğundan, aerosol saçılmasını tanımlamak için Mie saçılma teorisi kullanılır. Böyle bir teori, aerosollerin saçılma katsayısı, aerosollerin boyut dağılımı, kesiti, yoğunluğu ve çalışan dalgaboyunun işlevini belirtir. Atmosferik bileşenlerin farklı boyutları ve atmosferik bileşenlerin farklı tiplerinin yoğunlukları Çizelge 2.10'da listelenmiştir (Alkholidi ve Altowij 2014).

Çizelge 2.10. Hava durumu ile partiküllerin tipleri, boyutları ve yoğunlukları

Durum	Partikülün tipi	Yarıçapı (μm)	Yoğunluk (cm^{-3})
Hava	Molekül	10^{-4}	10^{19}
Pus	Aerosol	$10^{-2} - 1$	$10 - 10^3$
Sis	Su damlacığı	$1 - 10$	$10 - 10^2$
Bulut	Su damlacığı	$1 - 10$	$10^2 - 3 \times 10^2$
Yağmur	Su damlası	$10^2 - 10^4$	$10^{-5} - 10^{-2}$
Kar	Tane	$10^3 - 5 \times 10^3$	N/A
Dolu yağmur	Su damlası	$5 \times 10^3 - 5 \times 10^4$	N/A

Bir aerosolün parçacığı molekülden daha büyüktür, ama yine de uzun bir süre için atmosferde muallak kalamayacak kadar yeterince küçüktür. Atmosferik aerosollerin çap aralığı (d) kabaca $0.002 \mu m < d < 100 \mu m$ 'dir. Atmosferik aerosoller boyut olarak Şekil 2.40'taki gibi sınıflandırılmıştır.

İnce (Fine) modu $d < 2.5 \mu m$ 'den daha küçük çapa sahip parçacıklardan oluşmaktadır. Aitken modu, pıhtılaşma vasıtasıyla daha fazla büyüyecek moleküllerin yoğunlaşma veya çekirdeklenme ile yaratılmış $d < 0.1 \mu m$ parçacıklarından oluşmaktadır. Yığılma (Accumulation) modu daha büyük parçacıklara dönmeyecek $0.1 \mu m < d < 2.5 \mu m$ çapta olan parçacıklardan oluşmaktadır. Çapı $d > 2.5 \mu m$ olan Kaba (Coarse) modu esas olarak toprak üzerinde esen rüzgar, kum veya su (deniz sprey) gibi mekanik işlemleri ile üretilen parçacıklardan oluşmaktadır.



Şekil 2.40. Atmosferik aerosollerin boyut olarak sınıflandırılması

Parçacığın yaşam süreleri parçacığın boyutuna bağlıdır. Eğer türbülans etkileri ihmal edilirse ve parçacık üzerine sadece yerçekimi ve sürüklenme kuvvetleri varsa, o zaman kararlı durum veya terminal çökme hızı tespit edilebilir. T_{100} d çapında olan bir parçacığın 100 m'ye düşmesinin süresi Çizelge 2.11'de listelenmiştir.

Çizelge 2.11. Farklı çapındaki parçacıkların 100 m'ye düşme süresi

d	T_{100}
0.1 μm	~ 3.6 yıl
1.0 μm	~ 33 gün
10.0 μm	~ 8.5 saat
100.0 μm	~ 7 dakika

Böylece, deniz veya yeryüzünün ilk 10 m yukarısında büyük parçacıklarda güçlü gradyanlar bulunabilir, çünkü şimdiki parçacık kütlesi çok yakın geçmişteki üretim mekanizmaları tarafından ortaya çıkarılmıştır (Majumdar ve Ricklin 2008).

Radyasyon azalımının fenomenini incelemek için geliştirilmiş birtakım aerosol modelleri vardır. Teknik zorluklar operasyonel senaryolarda detaylı bir deneysel değerlendirmeyi zor hale getirir, dolayısıyla onun yerine parçacık yoğunluğunu tahmin etmek için klimatoloji

veya gerçek meteorolojik koşullar esasına dayanan aerosol modelleri kullanılır. Tüm koşulların altında tam olarak radyasyon azalımını tahmin edebilen hiçbir aerosol modeli yoktur. Bu, yerel meteorolojik koşulların aerosol kaynak işlevine hakim olduğu özel bir durumdur. Yerel coğrafi ve meteorolojik bilgilerin kullanılmasına izin veren modelleme olanakları gerçek aerosol koşullarını daha iyi tahmin etmek için sunulmuştur.

Aerosol parçacık sayı yoğunluğu $c(r)$, yarıçaptaki artış başına ve birim hacim başına parçacıkların sayısı olarak tanımlanır.

Deirmendjian (1969) modifiye bir gama dağılımını önerdi, ki bu, yarıçapı artış başına ve birim hacim başına parçacıkların sayısını modeller.

$$c(r) = dN/dr = ar^\alpha \exp(-br^\gamma) \quad (2.44)$$

$$b = \frac{\alpha}{\gamma r_{mod}^\gamma}$$

r : parçacık boyutu

r_{mod} (μm): mod yarıçapı

N : cm^3 başına parçacıkların toplam sayı yoğunluğu

a, b, α, γ : ayarlanabilir parametreler

a parametresi birim hacim başına damlacıkların sayısını N normalize eder. α boyut parametresi sadece pozitif ve tamsayı değerleri kabul eder ve γ pozitif ve reel olmalıdır (Majumdar ve Ricklin 2008, Verghese 2008).

On aerosol modelinin önemli parametreleri Çizelge 2.12'de verilmiştir.

Çizelge 2.12. Monte Carlo programında parçacık boyut dağılımı için parametreler (Park 2008)

Model #	Atmosferik tipi	a	α	b	γ	r_{mod}	N
1	Yoğun advektif sis	0.027	3	0.3	1.0	10.0	20
2	Mutedil advektif sis	0.066	3	0.375	1.0	8.0	20
3	Ayla bulut C2	$1.085 \cdot 10^{-2}$	8	1/24	3.0	4.0	100
4,9	Kümebulut C.1, Yoğun ışımsal sis	2.373	6	1.5	1.0	4.0	100
5	Pus H	$4.0 \cdot 10^5$	2	20.0	1.0	0.1	100
6	Pus L	$4.976 \cdot 10^6$	2	15.119	0.5	0.07	100
7	Pus M	$16/3 \cdot 10^5$	1	8.943	0.5	0.05	100
8	Bulut C3	5.556	8	1/3	3.0	2.0	100
10	Mutedil ışımsal sis	607.5	6	3	1.0	2.0	200

Junge fonksiyonu başka bir tanınmış dağılım fonksiyonudur.

$$c(r) = \frac{dN}{d \log r} = pr^{-v} \quad (2.45)$$

$c(r)$, birim hacim başına ve yarıçap logaritması başına parçacık sayısı olarak tanımlanır. p ve v 'nin belirlenmesi aerosolün belirli özelliklerine bağlıdır. v , tipik sis şartlarında bulunan düşük $v \approx 2$ değeri ile $2 < v < 4$ aralığında değişebilir. Eğer saha denemeleri boyutun bir fonksiyonu olarak parçacık dağılımını sağlarsa, p yukarıdaki denklemden belirlenebilir (Majumdar ve Ricklin 2008).

2.24.2. Görünürlük (Visibility)

Görünürlük başlangıçta meteorolojik ihtiyaçları için insan gözlemcisi ile tahmin edilen miktar olarak tanımlanmıştır. Bu miktar Kruse modeli olarak tanımlanır; 550 nm'lik bir optik işaret orijinal değerinin 0.02'sine düşürecek uzunluğu ifade eder. Ancak, bu tahmin birçok öznel ve fiziksel faktörler tarafından etkilenir. Temel meteorolojik miktarı (atmosfer şeffaflığı) objektif olarak ölçülebilir ve Pist Görsel Aralığı (Runway Visual Range, RVR) ya da meteorolojik optik aralığı denir.

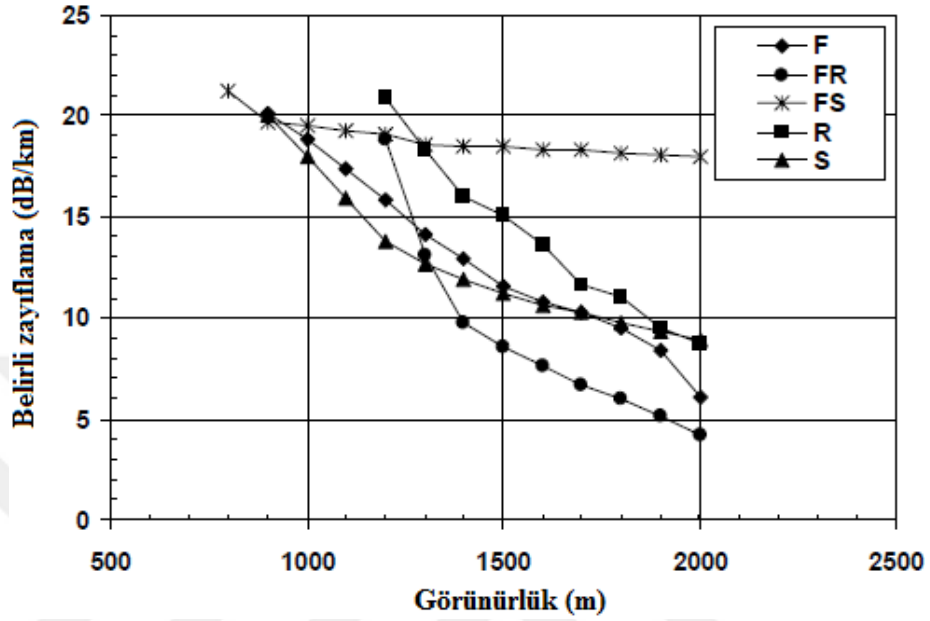
Görünürlük sis, duman, toz, pus, bulutlar ve diğer kirletici parçacıkları içeren atmosferin yararlı bir ölçüsüdür. Çizelge 2.13'te görüldüğü gibi, deniz sis (Maritime mist) ve bulutlar, kalın sis (thick fog) gibi görünürlüğü birkaç metreye azaltabilir. Düşük görünürlük SUOH sistemlerinin verimliliğini ve kullanılabilirliğini azaltır ve bir yıl içinde belirli bir zaman süresinde ya da günün belirli saatlerinde ortaya çıkabilir. Sisi fiziksel olarak karakterize etmek zordur. Sisli koşulları karakterize etmek için görünürlük yaygın olarak kullanılır, ancak parçacık boyutu ve yoğunluk gereksinimleri gibi diğer yöntemler sis koşullarını tanımlamak için daha nicel bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.13. Hava koşulları ve yağış için uluslararası görünürlük kodları (Ghuman ve Willebrand 2002)

Hava Durumu	Yağış		Ölçü (mm/hr)	Görünürlük	Kayıp (dB/km)
Yoğun sis				0 m, 50 m	-271.65
Kalın sis				200 m	-59.57
Mutedil sis	Kar			500 m	-20.99
Hafif sis	Kar	Sağanak	100	700 m 1 km	-12.65 -9.26
İnce sis	Kar	Yoğun yağmur	25	1.9 km 2 km	-4.22 -3.96
Pus	Kar	Orta yağmur	12.5	2.8 km 4 km	-2.58 -1.62
Hafif pus	Kar	Hafif yağmur	2.5	5.9 km 10 km	-0.96 -0.44
Açık	Kar	Çiğenti	0.25	18.1 km 20 km	-0.24 -0.22
Apaçık				23 km 50 km	-0.19 -0.06

Düşük görünürlükte parçacıkların yoğunluğunun ve boyutunun ortalama görünürlüktekinden daha yüksek olduğu açıktır. Böylece, düşük görünürlük durumları saçılma ve zayıflamaya daha fazla sebep olur. Düşük görünürlük değerleri için zayıflama *km* başına yüzlerce *dB*'ya ulaşabilir ve daha kısa dalgaboylarında daha yüksektir. Düşük görünürlük ve ilgili yüksek saçılma katsayıları uzun mesafelerde SUOH sistemlerinin uygulanması için en sınırlayıcı faktörlerdir (Ghuman ve Willebrand 2002, Alkholidi ve Altowij 2014, Shahiduzzaman ve ark. 2015).

Şekil 2.41’de birey hidrometeorların farklı tipleri ve onların birleştirmesinin görüşlülük üzerine etkileri ve zayıflatmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.41. Farklı hidrometeorlar için belirli zayıflamanın görüşlülüğe bağımlılığı (Kvicera ve Grabner 2008)

F: Sis (Fog)

FR: Sis ile Yağmur (Fog with Rain)

FS: Sis ile Kar (Fog with Snow)

R: Yağmur (Rain)

S: Kar (Snow)

Görüşlülük, kaynağın eşvrelilik derecesine, yolların arasındaki farka ve kaynağına göre dedektör konumuna bağlıdır. Dedektöre gelen çeşitli ışınların arasındaki eşvrelilik de geçiş ortamına bağlıdır. Örneğin, saçıcı (diffusing) ortamı eşvreliliği azaltabilir. İki optik yol arasındaki uzunluğu değişirse, enerji minimum ve maksimum üzerinden geçer (Devarajan ve Pillai 2014).

Görüşlülük aralığı V , %2 iletimi için atmosferik yol mesafesidir ve Koschmieder denklem ile ifade edilir.

$$V = \frac{\ln\left(\frac{1}{\tau}\right)}{\gamma_{550 \text{ nm}}} = \frac{\ln\left(\frac{1}{0.02}\right)}{\gamma_{550 \text{ nm}}} = \frac{3.912}{\gamma_{550 \text{ nm}}} \quad (2.46)$$

Bazen literatürde görünürlük aralığı %5 olarak tanımlanır. Bu 3.912 yerine 2.996 kullanımına yol açar (Majumdar ve Ricklin 2008).

Görünürlük V (2.47)'deki gibi tanımlanır.

$$V = \frac{I_{Mak} - I_{min}}{I_{Mak} + I_{min}} \quad (2.47)$$

I_{Mak} ve I_{min} optik yol farkının civarındaki bir saçak üzerinde interferogramın (girişim eğrisi) maksimum ve minimum değerleridir (Alkholidi ve Altowij 2014).

Görünürlüğü hesaplamak için farklı parametreler dikkate alınarak farklı deneysel modeller geliştirilmiştir.

$$V = \frac{3.0}{\sigma_e(0.55 \mu m) + \sigma_M(0.55 \mu m)} \quad (2.48)$$

$$\sigma_e = \sum_e \sigma_{e,i}^1 N_i$$

$$\sigma_M(0.55 \mu m) = 0.01159 \text{ km}^{-1}$$

Bulut ve sise bakıldığında, görünürlük, sıvı su içeriği (LWC) ve damlacık sayı yoğunluğu (N_d) arasında farklı ilişkiler tanımlanmıştır. LWC ve N_d üzerindeki eski çalışmalar, verilen LWC için N_d 'de genellikle geniş değişkenlik olduğunu göstermiştir. Sis ile ilgili çalışmalarda, sabit LWC için N_d hacim başına birkaç damlacıktan $100 \text{ damlacık/cm}^3$ 'e kadar değişebilmiştir ve görünürlük LWC ve N_d her ikisinin fonksiyonu olmalıdır. Deneysel ilişkilere göre, görünürlük doğrudan ortalama bulut damla yarıçapı (buradan sayı yoğunluğu) dolaylı olarak LWC ile ilişkilidir (Gultepe ve Isaac 1999, Gultepe ve ark. 2006).

$$V = -\ln(0.02)/\beta_{ext} \quad (2.49)$$

β_{ext} : sönme parametresi

$$\beta_{ext} = \sum Q_{ext} n(r) \pi r^2 dr \quad (2.50)$$

Mie sönme katsayısı (Q_{ext}), sayı yoğunluğu, parçacık yarıçapı ve görünür ışığın dalgaboyuna bağlıdır. Damla boyutu yaklaşık $4 \mu m$ 'den daha büyük olduğunda, Q_{ext} 2 olur. $4 \mu m$ 'den daha küçük parçacık boyutları için Q_{ext} 3.8 ve 0.9 arasında dalgalanır (Gultepe ve ark. 2006).

N_d yoğunluğu FSSP-100 (İleri-Saçılım Spektrometre Probu, Forward-Scattering Spectrometer Probe) kullanılarak orijinal boyut aralığı ($2.1 - 48.4 \mu m$; FSSP-96) ve geniş boyut aralığı ($4.6 - 88.7 \mu m$; FSSP-124) ile elde edilmiş ve LWC ile ilişkisi (2.51) ve (2.52)'deki gibidir. N_d artmasıyla LWC artar, ama belirli LWC için, N_d hacim başına birkaç damlacıktan cm^3 başına 100 damlacığa kadar değişir.

$$LWC_{96} = 1 \times 10^{-6} N_d^2 + 0.0014 N_d \quad (2.51)$$

$$LWC_{124} = 3 \times 10^{-7} N_d^2 + 0.0009 N_d \quad (2.52)$$

LWC tahmininde, gözlemlerde büyük değişkenliği gösteren ortalama kök kare hatası (root-mean square error, rmse) ve ortalama bağlı hata (mean relative error, mre) sırasıyla $0.02 g/m^3$ ve %76'dır.

FSSP (orijinal boyut aralığı) ölçüleri ile N_d 'ye karşı görünürlük (V) (2.53)'teki gibi belirtilmiştir. V , $N_d < 100 cm^{-3}$ için hızlıca azalır, halbuki $N_d > 100 cm^{-3}$ için tedrici olarak azalır.

$$V = 44.989 N_d^{-1.1592} \quad (2.53)$$

Görünürlük tahmininde, rmse ve mre sırasıyla $18 m$ ve %46'dır. N_d hacim başına birkaç damlacıktan cm^3 başına 100 damlacığa kadar değiştiğinde, görünürlükte büyük değişmeler meydana gelir. $100 cm^{-3}$ üstünde, görünürlük $100 m$ 'den az olur.

Görünürlük LWC işlevi olarak (2.54)'te verilmiştir.

$$V = 0.0219 LWC^{-0.9603} \quad (2.54)$$

V , $LWC > 0.03 g/m^3$ 'te az olurken $LWC > 0.03 g/m^3$ 'te büyük olur.

$0.5 - 45 \mu m$ boyut aralığında, LWC ve IWC'ye karşı sönme katsayısı (β_{ext}) için parametrelendirmeler sırasıyla (2.55) ve (2.56)'da verilmiştir (Gultepe ve ark. 2006).

$$\beta_{ext,Su} = 144.7 LWC^{0.88} \quad (2.55)$$

$$\beta_{ext,Buz} = 163.9IWC^{1.0} \quad (2.56)$$

Görünürlük ve LWC'nin ilişkisi (2.49) denkleminde (2.57)'deki gibi bulunur.

$$V = 0.027LWC^{-0.88} \quad (2.57)$$

Sisin mikro yapısındaki değişkenliği damlacıkların varlığı tarafından endüklenen görünürlük azalmasında (sönme) önemli değişkenlik anlamına gelir. Sis LWC ve ilişkili sönme katsayısı (β) arasındaki ilişki deneysel katsayıları ile (2.85)'te verilmiştir.

$$\beta = a(LWC)^b \quad (2.58)$$

Deneysel sonuçlar $65 \leq a \leq 178$ ve $0.63 \leq b \leq 0.96$ aralığına düşen değerleri ile önemli bir değişkenliği gösterir (Gultepe ve ark. 2007).

N_d ve LWC artmasıyla görünürlük azaldığının bilgisini kullanarak görünürlük ile N_d ve LWC arasında bir ilişki incelenmiştir.

$$V = \frac{1.002}{(LWC \times N_d)^{0.6473}} \quad (2.59)$$

Bu denklem, görünürlüğün N_d ve LWC'nin ikisi ile de ters orantılı olduğunu gösterir. Görünürlük tahmininde, rmse ve mre sırasıyla 37 m ve %44'tür. N_d ve LWC'yi sınırlayan maksimum ve minimum değerleri sırasıyla yaklaşık 400 cm^{-3} ve 0.5 g/m^3 ve 1 cm^{-3} ve 0.005 g/m^3 'tür (Gultepe ve ark. 2006).

Sisin Uzaktan Algılanması ve Modellenmesi (Fog Remote Sensing and Modeling, FRAM) adlı bir proje kapsamında, deniz sis ile ilgilenen deniz sisinin farklı aşamalarını (örneğin, oluşumu, gelişimi ve dağılımı) tanımlamak için deneysel veriler kullanılarak bir model geliştirilmiştir (Muhammad ve ark. 2010).

$$V = \frac{0.856}{(LWC \times N_d)^{0.609}} \quad (2.60)$$

Michael B. Meyer'e (1980) göre görünürlük, hafif sis ve yoğun sis işlevi olarak sırasıyla (2.61) ve (2.62)'de verilmiştir.

$$V_{H.Sis} = 120N_d^{-0.77} \quad (2.61)$$

$$V_{Y.Sis} = 80N_d^{-1.1} \quad (2.62)$$

LWC, belirli bir konumda, atmosferde bulunan bulut türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Onların sınıflandırılması hem LWC hem de bulunduğu bölgeye bağlıdır (Muhammad ve ark. 2010).

Havaalanlarında ya da meteoroloji merkezlerinde, görünürlük izlenir ve daha sonra zayıflatma katsayısına dönüştürülür. Görünürlük zayıflama katsayısını düzenleyen temel faktörlerden biridir. Görünürlük (V) ve zayıflama katsayısı ile ilişkili farklı deneysel modeller mevcuttur.

$$\beta_a(km^{-1}) = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta} \quad (2.63)$$

$$\beta_a(dB/km) = 4.34 \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta} \quad (2.64)$$

4.34 faktörü, $\beta_a(dB/km) = (10 \log_{10} e) \beta_a(1/km) = 4.34 \times \beta_a(1/km)$ ilişkisinden gelir (Majumdar ve Ricklin 2008).

δ : görünürlük durumlarına göre değişen *parçacıkların boyut dağılımı*

Gözlemlere göre iki farklı model mevcuttur. 'Kim' modeline göre, δ (2.65)'teki gibi verilir.

$$\delta = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.16V + 0.34 & 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5 & 0.5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0 & V < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (2.65)$$

Halbuki 'Kruse' modeli δ 'yı (2.66)'daki gibi belirler.

$$\delta = \begin{cases} 1.6 & V > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0.585V^{1/3} & V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (2.66)$$

2.24.3. Atmosferik zayıflama

Elektromanyetik dalga atmosfer içinden geçtiğinde ve atmosferik etkilerden EM enerjisinin bir kısmı veya tamamının kaybetmiş olduğu süreç atmosferik zayıflama olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, atmosferik zayıflama yayılma boyunca lazer ışının hava

molekülleri ve aerosolleri ile çarpışmasının neticesidir. Böylece, atmosfer, emilim, saçılma ve parıldama dahil olmak üzere çeşitli yollarla bir SUOH sistem bağlantısında işaret bozulması ve zayıflamasına neden olur. Bütün bu etkiler güncel yerel koşullar ve hava şartlarına bağlı olup zamanla değişir. Diğer dalgalara benzer, optik ışının gücü de yayılma mesafesi ile zayıflar. Genel olarak, atmosferik zayıflama 2.22.5. bölümünde anlatılan Beer Lambert yasası ile verilir (Alkholidi ve Altowij 2014).

Link bütçe hesaplanmasında atmosferik radyasyon zayıflamasından meydana gelen kaybını L_a belirlemek gereklidir.

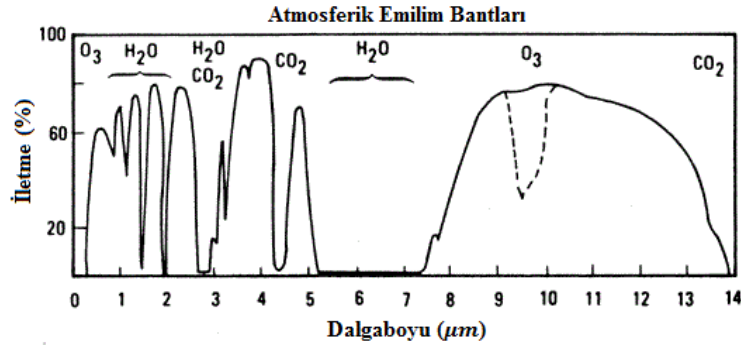
$$L_a = 10 \log_{10} \tau \quad (2.67)$$

$$L_a(d) = 20 \log[4\pi d/\lambda] \quad (2.66 a)$$

Tipik açık hava koşullarda, sönme katsayısı $\beta(\lambda) \approx 0.1$; puslu koşullarda (yaklaşık 4 km görünürlük ile), $\beta(\lambda) \approx 1.0$; sisli koşullarda, $\beta(\lambda) \geq 10$, ve yoğun sis için (10 m görünürlük ile), $\beta(\lambda) \approx 391$ olacaktır (Majumdar ve Ricklin 2008).

2.24.4. Emilim

Emilim, havadaki su buharı, toz, buz ve organik moleküller gibi güzelce-dağılmış çeşitli sıvı ve katı parçacıklar ile çarpışan ışının fotonlarından kaynaklanır. Kızılötesi dalgaboylarında en çok emilim potansiyeline sahip aerosoller Su (H_2O), Oksijen (O_2), Ozon (O_3) ve Karbondioksit (CO_2) içerir. Emilimin, bağlantı marjı, mesafe ve bağlantı kullanılabilirliği üzerinde azaltma etkisi vardır.



Şekil 2.42. Dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak atmosfer yoluyla enerji iletimi (Anonim 2016)

Emilim katsayısı gaz moleküllerinin tipi ve yoğunluğuna bağlıdır. Şekil 2.42’de dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak atmosfer yoluyla enerji iletimi üzerinde farklı gazların etkisi veya iletim penceresi gösterilmiştir. Moleküler emilim, ışığın belirli frekanslarının geçmesine izin veren, atmosferik iletim pencereler denilen şeffaf bölgeleri sunan atmosferin spektral iletimini doğan bir olgudur. Bu pencereler farklı dalgaboylarında meydana gelir. Emilim nedeniyle meydana gelen atmosferik pencereler atmosferik gazlar ile oluşturulur ve spektrumun kızılötesi kısmında soğurmaya katkıda bulunur. Ancak, atmosferik pencereleri oluşturan gazların içinde en çok bulunan gazlar (nitrojen ve oksijen) mevcut değildir.

Tipik dalgaboylarındaki moleküler emilimi Çizelge 2.14’te listelenmiştir.

Çizelge 2.14. Bazı dalgaboylarında moleküler emilimi (Kaushal ve Kaddoum 2015)

Dalgaboyu (nm)	Moleküler emilimi (dB/km)
550	0.13
690	0.01
850	0.41
1550	0.01

Parçacığın yoğunluğu ve etkin kesit-alanından (effective cross section) emilim katsayılarının hesaplanması mümkündür.

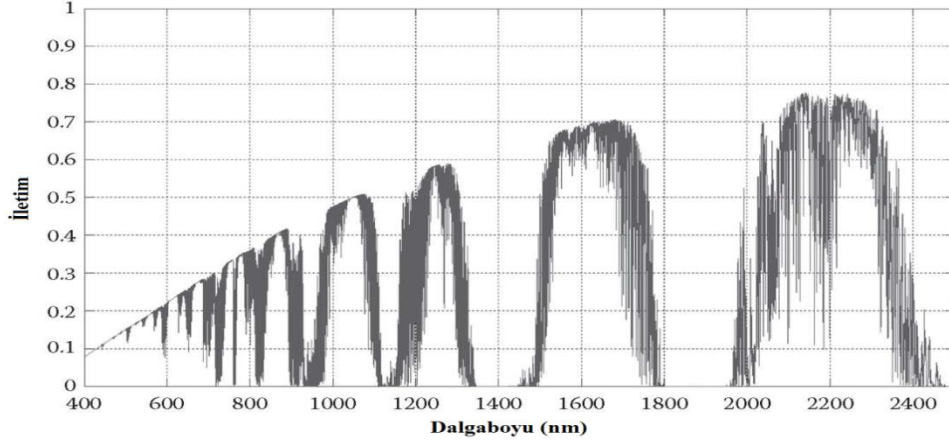
$$\beta_{abs} = \alpha_{abs} N_{abs} [km^{-1}] \quad (2.68)$$

β_{abs} : moleküler ve aerosol emilimi

α_{abs} : emilim parçacıklarının etkin kesit – alanı [km^2]

N_{abs} : emilim parçacıklarının yoğunluğu [km^{-3}]

Emilim çizgileri görünür ve yakın kızılötesi dalgaboylarında genel olarak dar ve iyi ayrılmış olur. Böylece, genel olarak SUOH için ilgili dalgaboylarında emilim ihmal edilebilir. Emilim etkisinin ihmal edilmesi için başka neden, emilim spektrumunda iletim penceresi içine düşen dalgaboylarının seçilmesidir (Alkholidi ve Altowij 2014).



Şekil 2.43. Emilim payı ile atmosferik iletme penceresi (Alkholidi ve Altowij 2014)

Emilimi hesaplamak için basit bir yaklaşım, iletimde değişimler, havadaki su içeriğinde değişiklikler neden olduğu varsayılmaktadır. Işın ile rastlaşmış tortulaşabilen su [W (mm)] (2.69) ile bulunur.

$$W = 10^{-3} H_a \cdot l \quad (2.69)$$

H_a : mutlak nem (g/m^3)

H_a 'nin değeri Bağıl Nem (Relative Humidity, H_r) oranına ve sıcaklığa (T , °C) bağlı olabilir.

$$H_a = H_r \cdot [-0.74 + 90.96 \cdot \exp(T/13.67) - 85.4 \cdot \exp(T/13.52)]$$

Emici iletmesi (2.70) ve (2.71)'deki deneysel ifadelerle herhangi bir iletme penceresi için hesaplanabilir.

$$\tau = \exp(-A_i \cdot w^{1/2}), w < w_i \quad (2.70)$$

$$\tau = k_i \cdot \left(\frac{w_i}{w}\right)^{\beta_i}, w > w_i \quad (2.71)$$

(2.70) ve (2.71)'de farklı pencere sınırları için kullanılan sabitlerin değerleri izelge 2.15'te listelenmiştir (David ve Forin 2010).

Çizelge 2.15. (2.70) ve (2.71)'de kullanılan sabitler (David ve Forin 2010)

Pencere Sınırları	A_i	k_i	β_i	w_i
720 – 940	0.0305	0.800	0.112	54
940 – 1130	0.0363	0.765	0.134	54
1130 – 1380	0.1303	0.830	0.093	2
1380 – 1900	0.211	0.802	0.111	1.1
1900 – 2700	0.350	0.814	0.1035	0.35
2700 – 4300	0.373	0.827	0.095	0.26
4300 – 6000	0.598	0.784	0.122	0.165

2.24.5. Saçılma

Fiziksel etkileşimlerin sonucunda farklı yönlerine doğru ışının dağılmasına saçılma denir. Parçacık bir elektromanyetik dalgasına engel olduğunda, dalga enerjisinin bir kısmı parçacık ile çıkarılır ve ona merkezlenmiş katı açıya yeniden yayılır. Bu saçılma dalgaboyuna değişiklik yapıp veya yapmadan optik alanın açısal yeniden-dağılımına (redistribution) neden olur. Saçılmanın üç temel türü vardır ve Şekil 2.44'te gösterilmiştir.

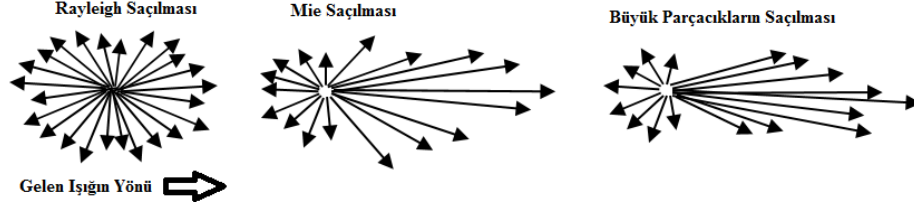
1. Rayleigh saçılması
2. Mie saçılması
3. Seçici-olmayan (non-selective) saçılma

Genel saçılma (2.72)'deki eşitlik ile sunulabilir:

$$\beta_{scat} = \beta_{Rayleigh} + \beta_{Mie} + \beta_{non-selective} [km^{-1}] \quad (2.72)$$

Işık yayılım esnasında rastgelmiş parçacıkların çapı (r) saçılma etkisinin önemli faktörlerinden biridir. Boyut parametresi ($x_0 = 2\pi/\lambda$) saçılma etkisini tanıtmak için kullanılan yollardan biridir. $x_0 \ll 1$ olursa, arka lobu daha büyük olup yan lobları kaybolur ve saçılma süreci Rayleigh saçılması olarak kabul edilir. Diğer bir deyişle, optik işaret kaynak dalgaboyundan daha küçük boyutta moleküler ve atmosferik gazlar tarafından saçıldığında, Rayleigh saçılması olarak adlandırılır. $x_0 \approx 1$ olursa, arka lobu n lobu ile

simetrik olup Mie saçılması olarak bilinir. $x_0 \gg 1$ için, parçacık geniş bir ön lob ve görünmeye başlayan küçük yan lobları sunar ve saçılma süreci seçici-olmayan saçılma ya da geometrik saçılması olarak isimlendirilir.



Şekil 2.44. Saçılmanın temel türleri (Alkholidi ve Altowij 2014)

Parçacığın yoğunluğu ve etkin kesit-alanından saçılma katsayılarının hesaplanması mümkündür.

$$\beta_{scat} = \alpha_{scat} N_{scat} [km^{-1}] \quad (2.73)$$

β_{scat} : ya Rayleigh (moleküler, β_m) ya da Mie (aerosol, β_a) saçılımı

α_{scat} : kesit – alanın parametreleri [km^2]

N_{scat} : parçacık yoğunluğu [km^{-3}]

Toplam saçılma (2.74)'teki gibi yazılabilir:

$$\beta_{scat} = \beta_m + \beta_a [km^{-1}] \quad (2.74)$$

Atmosferde mevcut çeşitli saçılım parçacıkları için saçılma süreci Çizelge 2.16'da özetlenmiştir (Alkholidi ve Altowij 2014, Shahiduzzaman ve ark. 2015).

Çizelge 2.16. Tipik atmosferik saçılım parametreleri ile boyut parametresi (Alkholidi ve Altowij 2014)

Parçacık Tipi	Çapı (μm)	Boyut Parametresi (x_0)	Saçılım Düzeni
Hava molekülleri	0.0001	0.00074	Rayleigh
Pus parçacıkları	0.01 – 1	0.074 – 7.4	Rayleigh - Mie
Sis damlacıkları	1 – 20	7.4 – 147.8	Mie - Geometrik
Yağmur damlacıkları	100 – 1000	740 – 7400	Geometrik
Kar taneleri	1000 – 5000	7400 – 37000	Geometrik

Parçacıkların özelliklerine bağlı birçok faktörler bilinmemektedir, bu nedenle, görünürlüğe dayanarak uygulamada kullanabilen belirleyici bir formüle yol açılır. Saçılmadan meydana gelen zayıflama (2.75)'te verilmiştir.

$$a_s \cong \frac{17}{S} \left(\frac{555}{\lambda} \right)^{0.195-S} \quad (2.75)$$

a_s : belirli zayıflama (dB/km)

S : insan gözü için görünürlük (görüş) (km)

Genellikle, görünürlük aralığı, havadaki %2 iletimin yolu olarak (yaklaşık 555 nm dalgaboyunda 17 dB zayıflamaya tekabül eder), insan gözünün kontrast çözünürlüğünü tanımlar (Majumdar ve Ricklin 2008).

Desibel ile ifade edilen iletme bağlı atmosferik zayıflama (2.76)'daki gibi ifade edilir.

$$A_{10}(L, V) = -10 \log[T(L, V)] = 10 \log_{10}(e) \alpha_e(V) \cdot L \quad (2.76)$$

α_e : atmosferik zayıflama katsayısı

Saçılma nedeniyle meydana gelen zayıflama için atmosferik zayıflama katsayısı (2.77)'den türetilebilir:

$$\alpha_e = \frac{-\ln \varepsilon}{V} \quad (2.77)$$

ε , Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından 0.05 olarak kabul edilmiştir ve $\varepsilon = 0.05$ için:

$$\alpha_e = \frac{-\ln 0.05}{V} = \frac{3}{V}$$

α_e , uzunluk birim başına desibel olarak yaklaşık $\alpha_{10} = 4.343\alpha_e$ olacaktır (Islam ve ark. 2016).

2.24.5.1. Rayleigh (moleküler) saçılması

Gelen ışığın dalgaboyundan daha küçük boyutta ince katı parçacıklar, evren tozu ve duman gibi aerosol parçacıklar, moleküller ve atmosferik gazlar tarafından saçılım, Rayleigh saçılması olarak adlandırılır. Rayleigh saçılma katsayısı (2.78)'de verilmiştir.

$$\beta_m = \alpha_m N_m [km^{-1}] \quad (2.78)$$

α_m : Rayleigh saçılmasının kesit – alanı [km^2]

N_m : hava moleküllerinin yoğunluğu [km^{-3}]

Rayleigh saçılmasının kesit-alanı, (2.79)'a göre gelen ışığın dalgaboyunun dördüncü üssü (λ^{-4}) ile ters orantılıdır.

$$\alpha_m = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N^2\lambda^4} [km^2] \quad (2.79)$$

n : kırılma indisi

λ : gelen ışığın dalgaboyu [m]

N : moleküllerin hacimsel yoğunluğu [km^{-3}]

Rayleigh saçılması kızılötesi dalga aralığında ihmal edilebilir, çünkü Rayleigh saçılması görünür – morötesi dalga aralığında öncelikli önem taşır (Soni ve Malhotra 2011, Alkholidi ve Altowij 2014).

2.24.5.2. Mie (aerosoller) saçılması

Parçacık çapı gelen lazer ışınının dalgaboyuna eşit veya onun onda birinden daha büyük olduğunda, Mie saçılması meydana gelir. Mie saçılması karasal irtifada SUOH için çalışan dalgaboylarında zayıflamanın ana nedenidir. Serbest uzayda iletilen optik ışınları SUOH'daki çalışılan dalgaboyu bandında ($0.5 - 2 \mu m$) esasen en çok Mie saçılması etkisinin hakimiyetinden meydana gelen duman, duman-sis (smog), sis ve pus ile zayıflar. Pusta ışığı zayıflatan baskın fenomen Mie saçılmasıdır. Bu, optik güç/ parlama (power/ irradiance) zayıflaması için sisi ve pusu önemli katkıda bulundurur. Zayıflama düzeyleri çok yüksektir ve açıkçası istenilmez.

Mie saçılması nedeniyle (en çok sis katkısı ile) meydana gelen zayıflama yüzlerce dB/km değerlere erişebilir. Mie saçılmasının katsayısı (2.80)'deki gibi ifade edilir.

$$\beta_a = \alpha_a N_a [km^{-1}] \quad (2.80)$$

α_a : Mie saçılmasının kesit – alanı [km^2]

N_a : hava moleküllerinin yoğunluğu [km^{-3}]

Aerosolun yoğunluğu, bileşimi ve boyut dağılımı zaman ve mekansal olarak değişir, bu nedenle aerosoller ile zayıflamayı tahmin etmek zordur (Soni ve Malhotra 2011, Alkholidi ve Altowij 2014, Islam ve ark. 2016).

2.24.5.3. Seçici-olmayan saçılma

Gelen lazer ışının dalgaboyundan daha büyük çapı olan parçacıklardan meydana gelen saçılma, seçici-olmayan saçılma olarak bilinir. Büyük sis damlacığı, yağmur ve kar bu saçılmaya neden olur. Seçici-olmayan saçılma dalgaboyundan bağımsızdır ve yağış nedeniyle vardır. Bu nedenle, yağmur tropikal bölgelerde (Güney Doğu Asya ve Güney Asya) seçici-olmayan saçılmanın ana faktörüdür (Suriza ve ark. 2011, Shahiduzzaman ve ark. 2015).

• Yağmur

Yağmur atmosferde bulunan su buharı ile oluşturulur. Bu, zaman ve mekanda şekli ve sayısı değişen su damlacıklarından oluşur. Bunların şekli boyutuna bağlıdır: 1 mm yarıçapına kadar küreler ve onun ötesinde kutupları basık sferoit olarak değerlendirilir. Yağmur damlalarının yarıçapı SUOH için dikkate alınan lazerlerin dalgaboylarından önemli ölçüde büyüktür. Lazer ışını yağmur damlalarından kolayca ve düşük saçılma ile geçebilir. Ama yağmur muhtemelen görünürlüğü azaltabilir ve SUOH bağlantısının genel performansını etkileyebilir. Bu nedenle, yağmurdan meydana gelen saçılma dikkate alınmalıdır. Yağmur saçılma katsayısı Stroke yasası kullanılarak hesaplanabilir (Fadhil ve ark. 2013).

$$\beta_{Rain-Scat} = \pi a^2 N_a Q_{Scat} \left(\frac{a}{\lambda} \right) \quad (2.81)$$

a : yağmur damlasının yarıçapı (100 – 1 000 μm)

N_a : yağmur damlasının dağılımı

Q_{scat} : Saçılma verimliliği

$$N_a = \frac{Za}{4/3 (\pi a^3) Va} \quad (2.80 \text{ a})$$

Z_a : yağış hızı

a : damlacığın yarıçapı

V_a : yağış hızının sınırlaması

$$V_a = \frac{2a^2 \rho g}{9\eta} \quad (2.80 \text{ b})$$

ρ : su yoğunluğu (g/cm^3)

g : yerçekimi sabiti

η : hava viskozitesi

Yağmur zayıflaması Beer yasasının kullanılmasıyla (2.82)'deki gibi elde edilir.

$$\tau = \exp(-\beta_{\text{Rain-Scat}} \cdot L) \quad (2.82)$$

Yağış hızının farklı tipleri için değerler Çizelge 2.17'de listelenmiştir.

Çizelge 2.17. Yağış hızının farklı tipleri için değerler (Fadhil ve ark. 2013)

Tip	Yağış Hızı (mm/h)	Yağış Hızı (cm/s)
Hafif	26	7.22×10^{-4}
Orta	40	1.11×10^{-3}
Yoğun	80	2.22×10^{-3}

Sabitlerin değerleri Çizelge 2.18'de listelenmiştir.

Çizelge 2.18. SUOH’de kullanılan bazı sabitlerin değerleri (Fadhil ve ark. 2013)

Sabit	Değer
g	980 cm/s ²
ρ	1 g/cm ²
η	1.8 × 10 ⁻⁴ (g/cm)s
a	0.001 – 0.1 cm
Q _{Scat}	2

Yağmurdan meydana gelen atmosferik zayıflaması iki deneysel model, KIMS modeli ve Carbonneau modeli ile belirtilir.

- **KIMS modeli**

Yağmurdan meydana gelen zayıflama katsayısı dalgaboyuna bağlı değil, sadece görünürlüğe bağlıdır.

$$L_{Atm-Rain} = 10 \log(\exp(-\sigma_{Rain} \times d)) \quad (2.83)$$

$$\sigma_{Rain} = \frac{2.9}{V} (km^{-1}) \quad (2.83 a)$$

V: görünürlük

- **Carbonneau modeli**

Bu deneysel model yağış hızına bağlıdır ve bunun doğruluğu yağış hızının ölçümlerinin hatasızlığına bağlıdır. ITU-R tarafından önerilen yağmurdan meydana gelen zayıflama modeli (2.84)’teki gibidir.

$$L_{Atm-Rain} = A_{Attenuation} \times d (dB) \quad (2.84)$$

$$A_{Attenuation} = k_1 \times (Za)^{k_2} (dB/km) \quad (2.84 a)$$

Za: yağış hızı

*k*₁ ve *k*₂ için değerler Çizelge 2.19’dadır (Alkoholidi ve Altowij 2014, Twati ve ark. 2014, Kaushal ve Kaddoum 2015).

Çizelge 2.19. ITU-R tarafından önerilen yağmur zayıflatma modeli (Kaushal ve Kaddoum 2015)

Model	Orijin	k_1	k_2
Carbonneau	Fransa	1.076	0.67
Japonya	Japonya	1.58	0.63

Yağmur etkisi sisinki gibi belirgin değildir, çünkü yağmur damlacıklarının boyutu SUOH'de kullanılan dalgaboyundan daha büyüktür. 850 nm ile 1500 nm civarı dalgaboylarında zayıflama kaybı, hafif yağmur (2.5 mm/hr) ve yoğun yağmur (25 mm/hr) için 1 dB/km ile 10 dB/km arasında değişir. Düşük bulutlar eşliğinde yağmur, yüksek zayıflamaya neden olur. Düşük bulutlar eşliğinde yoğun yağmur sırasında fazla güç kaybı ile mücadele etmek amacıyla, yüksek güçlü lazerler kullanılmalı ve SUOH sisteminin maksimum link kullanırlığı için 30 dB 'den fazla yeterli link marjı elde edilmelidir (Kaushal ve Kaddoum 2015).

- **Kar**

Kar parçacıklarının boyutu yağmur ve sis parçacıklarının arasındadır. Bu nedenle, kardan meydana gelen zayıflama, yağmurdan daha fazla ama sisten daha azdır. Yoğun kar yağışı sırasında, lazer ışının yolu yayılım yolundaki kar tanelerinin yoğunluğunun artışı nedeniyle engellenir. Bu durumda, bunun zayıflatması $30 - 350\text{ dB/km}$ arasında değişen sis zayıflatması ile karşılaştırılabilir ve bu, SUOH sisteminin link kullanırlığını önemli ölçüde azaltabilir. Yoğun kar yağışı (150 dB/km) sırasında, link marjı yaklaşık 50 dB seçildiği durumunda, SUOH sistemi %99.9 link kullanırlığını verebilir. Kar için zayıflama, kuru ve ıslak kar zayıflaması olarak sınıflandırılır. Kar hızı (S) için zayıflama (α_{Snow}) (2.85)'teki gibidir.

$$\alpha_{Snow} = aS^b \quad (2.85)$$

Kuru ve ıslak karda a ve b parametrelerin değerleri aşağıdadır (Kaushal ve Kaddoum 2015).

Kuru kar: $a = 5.42 \times 10^{-5} + 5.49$, $b = 1.38$

Islak kar: $a = 1.02 \times 10^{-4} + 3.78$, $b = 0.72$

2.24.6. Türbülans

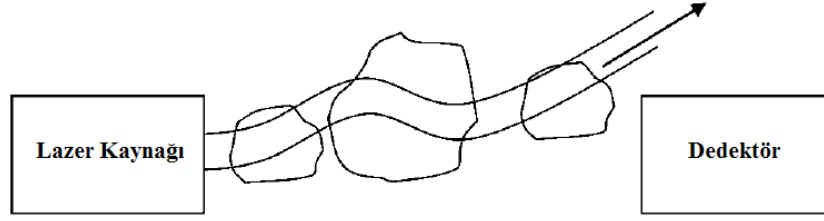
Atmosferin sıcaklığı ve basıncı genelde düzgün değildir ve bu, atmosferde kırılma indisinin düzensizliklerini veya homojensizliklerini oluşturur. Bu düzensizlikler türbülans olarak adlandırılır, ayrıca değişen rüzgar hızı ve ykseklige bağlıdır. Diğer bir deyişle, atmosferik türbülans yayılma yolu boyunca atmosfer sıcaklığı ve basıncının değişiminden kaynaklanan rasgele bir olgudur. Bu etki, lazer iletimini etkileyecek olan tüm atmosferik etkilerin arasında hakimdir. Hatta açık hava için, türbülans, atmosferik özelliklerin değişen doğası nedeniyle mevcuttur. Atmosferik türbülans yayılan optik işaretlerde faz kaymalarına neden olup dalga sınırında bozulmaya sonuçlar. Optik sapmaları denilen bu bozulmalar aynı zamanda yoğunluk bozulmalarına neden olup parıldama olarak adlandırılır. Nem, aerosoller, sıcaklık ve basınç değişiklikleri yoğunlukta rastgele değişimlere sebep olarak havada kırılma indisinin değişimlerini üretir. Bu değişimler girdaplar (eddies) olarak adlandırılır ve bunların içinden geçen işığın üzerinde mercek etkisi oluşturur. Kırılma indisi (2.86) ile tanımlanabilir.

$$n - 1 \approx 79 \times \frac{P}{T} \quad (2.86)$$

P : atmosferik basınç (mbar)

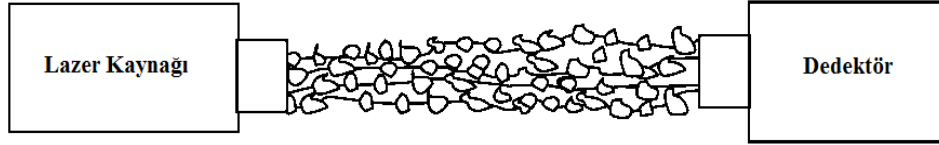
T : sıcaklık (Kelvin, K)

Eğer türbülans girdaplarının boyutu işın çapından daha büyük ise, bütün lazer işını Şekil 2.45'te gösterildiği gibi eğilir.



Şekil 2.45. Işın çapından daha büyük olan türbülans hücrelerin nedeniyle lazer ışının sapması (Alkholidi ve Altowij 2014)

Eğer türbülans girdaplarının boyutu ışın çapından daha küçük ise, lazer ışını Şekil 2.46’da gösterildiği gibi eğilir ve bozular. Işın dalga sınırının farklı bileşenlerinin varış zamanındaki küçük değişimler yapıcı ve yıkıcı girişimi üretir ve alıcıda lazer ışınının yoğunluğunda geçici dalgalanmalar ile sonuçlanır.



Şekil 2.46. Işın çapından daha küçük olan türbülans hücreleri nedeniyle alıcıda ışın yoğunluğundaki dalgalanmalar (Alkholidi ve Altowij 2014)

Sıcaklık, basınç ve optik alanındaki dalgaboyuna az bağlı olan kırılma indisi arasındaki ilişki (2.87)’de verilmiştir.

$$n = 1 + 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P}{T} \times 10^{-6} \quad (2.87)$$

Türbülans iki ana parametre ile nitelendirilir. Biri kırılma indisi yapı parametresi (C_n^2), öbürü de parlama değişimi (irradiance variance) veya parıldamadır (scintillation) (Devarajan ve Pillai 2014, Kaushal ve Kaddoum 2015, Patel ve Mulye 2016).

2.24.6.1. Kırılma indisinin yapısı

Kırılma indisi yapı parametresi, türbülans gücünü belirleyen en önemli parametredir. Açıkça, C_n^2 coğrafik konumu, yükseklik ve gün saatine bağlıdır. Yere yakın, atmosferik basıncın (hava yoğunluğu) en büyük değerleri ve sıcaklığın en büyük eğimi mevcuttur. Bu nedenle, C_n^2 parametresinin en büyük değerleri deniz seviyesinde beklenir. Yükseklik

arttıkça, sıcaklığın eğimi ve hava basıncının azaldığından, C_n^2 parametresinin daha küçük değerleri meydana gelir. Hatta epey uzun mesafeli yatay bir yol olarak düşünülen uygulamalarda, C_n^2 pratik olarak sabit kabul edilir. Güçlü bir türbülans için C_n^2 parametresinin değeri $10^{-13}m^{-2/3}$ kadar olabilirken, yer seviyesinde zayıf bir türbülans için C_n^2 değeri tipik olarak $10^{-17}m^{-2/3}$ kadar küçük olabilir. Bununla birlikte, C_n^2 profilini tanımlamak için Çizelge 2.20’de listelendiği gibi birtakım deneysel parametrik modeller formüle edilmiştir ve bunların arasında en kullanılan modellerden biri Hufnagel-Valley modelidir (Devarajan ve Pillai 2014, Kaushal ve Kaddoum 2015, Patel ve Mulye 2016).

Çizelge 2.20. C_n^2 için türbülans profil modelleri (Kaushal ve Kaddoum 2015)

Modeller	Uzaklık
PAMELA modeli	Uzun (birkaç on km)
NSLOT modeli	Uzun (birkaç on km)
Fried modeli	Kısa (m)
Hufnagel ve Stanley modeli	Uzun (birkaç on km)
Hufnagel Valley modeli	Uzun (birkaç on km)
Gurvich modeli	Uzun (birkaç on km)
Von Karman-Tatarski modeli	Orta (birkaç km)
Greenwood modeli	Uzun (birkaç on km)
SLC (Denizaltı Lazer Haberleşme) modeli	Uzun (birkaç on km)
Clear 1 modeli	Uzun (birkaç on km)
ALM (Aeronomy Laboratuvar Modeli)	Uzun (birkaç on km)
AFRL Radiosonde modeli	Uzun (birkaç on km)

Hufnagel-Valley modeli (2.88)’de verilmiştir.

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A_0 \exp\left(-\frac{h}{100}\right) \quad (2.88)$$

h : yükseklik (m)

v : yüksek irtifada rüzgar hızı (m/s)

A_0 : yer seviyesinde türbülans gücü ($A_0 = 1.7 \times 10^{-14}m^{-2/3}$)

(2.88)'de en önemli değişkenler rüzgar hızı ve yüksekliktir. Türbülansın üç ana etkisi vardır; parıldama, ışın sapması ve ışın genişlemesi (Davide ve Forin 2010, Alkholidi ve Altowij 2014).

2.24.6.2. Parıldama

Alınan işaretin yoğunluk dalgalanmaları parıldama olarak bilinir ve parıldama indisi (yoğunluk dalgalanmalarının normalize değişimi) cinsi ile ölçülür. Parıldama indisi (σ_I^2) (2.89)'da verilmiştir.

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (2.89)$$

$I = |E|^2$: işaret parlaması veya yoğunluğu

Parıldama gücü ışın genliğinin değişimi veya parlama (σ_i) cinsi ile ölçülebilir.

$$\sigma_i^2 = 1.23 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6} \quad (2.90)$$

$$k = 2\pi/\lambda$$

L : link aralığı (m)

(2.90)'daki denklem matematik olarak $\sigma_i^2 < 1$ 'e karşılık gelen zayıf türbülans durumu için geçerlidir (Davide ve Forin 2010, Alkholidi ve Altowij 2014).

2.24.6.3. Işın sapması

Işın sapması, türbülans girdaplarının boyutu ışın boyutundan daha büyük olduğunda yaşanan bir olgudur. Bu olgu, ışının yayılım yolundan rastgele yön değiştirmesine (deflection) sonuçlanır ve bağlantının bozulmasına yol açar (Kaushal ve Kaddoum 2015).

$$\sigma_{BW}^2 = 1.44 \cdot C_n^2 \cdot L^2 \cdot W_0^{-1/3} \quad (2.91)$$

W_0 : başlangıç ışın boyutu

Işın sapmasının ışınsal (radial) değişimi (2.92)'deki gibi tanımlanabilir (Davide ve Forin 2010).

$$\sigma_r^2 = 1.90 \cdot C_n^2 \cdot (2 \cdot w)^{-1/3} \cdot l^3 \quad (2.92)$$

w : vericide benek boyutu

Işınsal değişim dalgaboyu ve uzunluğunun fonksiyonu olarak da tanımlanabilir.

$$\sigma_r = 1.83 \cdot C_n^2 \cdot \lambda^{-1/6} \cdot L^{17/6} \quad (2.93)$$

(2.93)'te dalgaboyu bağımlılığı zayıf olmasına rağmen, daha uzun dalgaboylarının kısa dalgaboylarına göre daha az ışın sapmasına uğrayacağı anlamına gelir (Ghuman 2002).

2.24.6.4. Işın genişlemesi

Işın genişlemesi, türbülanslı atmosferde ışın yayılırken dağılma nedeniyle beklenen sınırın ötesinde ışının genişletilmesini açıklar. Işın genişlemesi, türbülans girdaplarının boyutu ışın boyutundan daha küçük olduğunda dikkate alınır. Bu durumda, gelen ışın bağımsız olarak kırınımına uğrar ve saçılır ve alınan dalga yüzünün bozulmasına yol açar. Türbülans mevcudiyetinde Gauss ışını için ışın genişlemesinin durumu (2.94)'te belirlenmiştir.

$$I(l, r) = \frac{2P_0}{\pi w_{eff}^2(l)} \exp\left(\frac{-2r^2}{w_{eff}^2(l)}\right) \quad (2.94)$$

P_0 : toplam ışın gücü (W)
 r : ışın merkezinden ışınsal mesafe
 w_{eff} : etkili ışın beli

Işın genişlemesinin miktarını belirlemek için etkin ışın belinin ortalaması (2.94 a)'daki gibi açıklanır.

$$w_{eff}(l)^2 = w(l)^2(1 + T) \quad (2.94 a)$$

$w(l)$: l yayılma mesafesinin sonraki ışın beli

T : türbülans nedeniyle ışının ek genişlenmesi

T , türbülans gücü ve ışın yoluna bağlıdır. Özel olarak, yatay yol için T (2.94 b)'de verilmiştir.

$$T = 1.33 \cdot \sigma_i^2 \cdot \Lambda^{5/6} \quad (2.94 \text{ b})$$

$$\Lambda = \frac{2L}{kw^2(l)} \quad (2.94 \text{ c})$$

$$w(l)^2 = \left[w_0^2 + \left(\frac{2L}{kw_0} \right)^2 \right] (m^2) \quad (2.94 \text{ d})$$

w_0 : $L = 0$ 'da başlangıç ışın beli

Açıkçası, $w_{eff}(l) > w(l)$ durumundan dolayı, ışın merkezinde, (2.95)'teki gibi bir ışın kaybı yaşanacaktır.

$$L_{BE} = 20 \log_{10}(w(l)/w_{eff}(l))(dB) \quad (2.95)$$

$w_{eff}(l)^2$ türbülans gücü ve ışın yoluna bağlıdır (Alkholidi ve Altowij 2014, Kaushal ve Kaddoum 2015).

2.24.7. Geometrik kayıplar

SUOH bağlantısı için geometrik yol kaybı, optik vericinin ışın genişliği (θ), yol uzunluğu (L) ve alıcı açıklık alanına (A_r) bağlıdır. Geometrik kayıp, alıcı açıklık yüzey alanı ve verici ışının yüzey alanının oranıdır. İletim ışınları ıraksaklık tarafından belirlenen bir oranda artan aralık ile sürekli yayıldığında, geometrik kayıp temel olarak ıraksaklık ve aralığa bağlıdır.

$$\text{Geometrik kayıp (GL)} = \frac{d_R^2}{[d_P + (L\theta)]^2}$$

$$\text{Geometrik kayıp (GL)} = 10 \log \left[\frac{d_R}{d_P + (L\theta)} \right]^2 \quad (2.96)$$

d_R : alıcı açıklık çapı (m)

d_P : verici açıklık çapı (m)

θ : ışın ıraksaklığı (mrad)

Bu kayıp sabit bir değerdir, yağmur zayıflaması, sis, pus ve parıldamadan meydana gelen kaybın aksine zamanla değişmez.

2.24.8. Toplam zayıflama

SUOH sisteminin atmosferik zayıflanmasında tipik olarak sis, pus hakimdir ve yağmura da bağlıdır. Toplam zayıflama, atmosferdeki atmosferik zayıflama ve geometrik kaybın birleşimidir. SUOH sistemi için toplam zayıflama yüksek seviyede (optik verimliliği, dedektör gürültüleri vb. dışında) gerçekten çok basittir. Toplam zayıflama (2.97)'de verilmiştir.

$$\frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} = \frac{d_R^2}{[d_p + (L\theta)]^2} \times e^{-\gamma d} \quad (2.97)$$

P_{Rx} : alınan işaret gücü (mW)

P_{Tx} : iletilen işaret gücü (mW)

(2.97)'de kontrol edilebilen değişkenler açıklık boyutu, ışın ıraksaklığı ve link aralığıdır. Kırılma indisi bina dışı (outdoor) ortamda kontrol edilemez (Alkholidi ve Altowij 2014).

2.25. Optik Link Bütçesi

Optik link denklemi herhangi bir RF (Radio Frequency) haberleşme bağlantısı için link denklemine benzer. İletim gücü ile başlayan tüm bağlantı kalite bozulmaları (degradations) ve kazançlar alınan işaret seviyesini belirlemek için tanımlanır. Alınan işaret seviyesi daha sonra alıcının duyarlılığı ile karşılaştırılır ve böylece bağlantı marjı verilir. SUOH link bütçesinin hesaplanması için geometrik kayıp, bağlantı marjı, alınan güç ve bit hata oranı gibi birçok parametre dikkate alınır. Alınan işaret gücü $P_{Rx}(W)$, iletilen güç $P_{Tx}(W)$, verici anten kazancı G_{Tx} , alıcı anten kazancı G_{Rx} , ve toplam kayba [geometrik kayıp (GL), Atmosferik kayıp (L_a), işaret kaçırma kaybı (miss pointing loss, L_{MP}), optik kayıp (L_{opt})] bağlıdır.

$$P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - \text{Toplam Kaybı} \quad (2.98)$$

İşaret kaçırma kaybı verici ve alıcının uyumsuzluğundan meydana gelir ve tipik olarak 3 dB kabul edilir. Optik kayıplar, optik işaretin mercekten iletildiği / merceğe alındığı veya aynadan yansıdığına meydana gelen bağlaşım ve ekleme kayıplarıdır ve tipik olarak 9 dB kabul edilir (Alkholidi ve Altowij 2014, Twati ve ark. 2014).

2.26. BER (Bit Hata Oranı) ve SNR (İşaret Gürültü Oranı)

BER ve SNR, haberleşme sistemlerinin kalitesini değerlendirmek için kullanılır. BER performansı alınan gücün ortalaması, parıldama gücü ve alıcı gürültüsüne bağlıdır. Açıklık ortalamasının uygun tasarımı ile alınan optik güç artırılabilir ve parıldama etkisi ihmal edilebilir. Türbülans ile beraber, SNR (2.99)'daki gibi ifade edilebilir (Alkholidi ve Altowij 2014).

$$SNR = (0.31 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6})^{-1} \quad (2.99)$$

OOK modülasyonu ile SUOH bağlantıları için BER (2.100)'deki gibi yazılabilir (Alkholidi ve Altowij 2014).

$$BER = \frac{\exp(-SNR/2)}{(2\pi \cdot SNR)^{1/2}} \quad (2.100)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Buluttaki Görünürlük ve Zayıflatma ile Link Bütçesinin İlişkisi

Bulut, sis olarak varsayıldığında, görünürlük, bölüm 2.24.2’de anlatıldığı gibi farklı deneysel modellerden elde edilebilir. Bu tezde farklı bulutların görünürlüğünü bulmak için Çizelge 3.1’de verilen LWC ve N_d ’ya dayanarak Gultepe ve ark. (2006) tarafından görünürlük için geliştirilmiş (2.59)’da yer alan model kullanılmıştır. Farklı bulutların sıvı su içeriği (LWC) ve damlacık sayı yoğunluğu (N_d) alındığı kaynakları ile Çizelge 3.1’de listelenmiştir. Ayrıca, sirüs bulutlar ve Kümülüs (Karasal, Kirli) bulutu için Hess ve ark. (1998), Kümülonimbus, Altostratus ve Altokümülüs için Kampe (1949) tarafından bulunan görünürlük kullanılmıştır ve Çizelge 3.2’de yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Farklı bulutlar için LWC ve N_d

Bulut Tipi	LWC (g/m^3)	Nd (cm^{-3})	Kaynak
Stratus (Karasal)	0.28	250	(Hess ve ark. 1998)
Stratus (Deniz)	0.30	80	(Hess ve ark. 1998)
Kümülüs (Karasal, Temiz)	0.26	400	(Hess ve ark. 1998)
Kümülüs (Deniz)	0.44	65	(Hess ve ark. 1998)
Kümülüs (Karasal, Kirli)	0.30	1300	(Hess ve ark. 1998)
Yığınbulut (Stratokümülüs)	0.15	250	(Shettle 1989)
Altostratus	0.41	400	(Shettle 1989)
Nimbostratus (katman karabulut)	0.65	200	(Shettle 1989)
Saçakbulut (Sirüs) I	0.0260	0.107	(Hess ve ark. 1998)
Saçakbulut (Sirüs) II	0.00193	0.0225	(Hess ve ark. 1998)
Saçakbulut (Sirüs) III	0.00208	0.578	(Hess ve ark. 1998)
Sis	0.058	15	(Hess ve ark. 1998)

Çizelge 3.2. Farklı bulutların görünürlüğü

Bulut Tipi	Görünürlük (km)	Kaynak
Kümülüs (Karasal, Kirli)	0.02	(Hess ve ark. 1998)
Altostratus	0.15	(Kampe 1949)
Altokümülüs	0.08-0.3	(Kampe 1949)
Kümülonimbus	0.01	(Kampe 1949)
Saçakbulut (Sirüs) I	4	(Hess ve ark. 1998)
Saçakbulut (Sirüs) II	36	(Hess ve ark. 1998)
Saçakbulut (Sirüs) III	21	(Hess ve ark. 1998)

Daha sonra Çizelge 4.1’de bulunan bulutların görünürlüğüne dayanarak bulutlardan meydana gelen zayıflama, (2.66)’da yer alan Kruse modeli ve (2.64) denklemi kullanılarak elde edilmiştir.

Yer-uydu arasındaki optik link bütçesini hesaplamak için bu tezde yer alan (2.39), (2.40), (2.67 a), (2.96) ve (2.98) denklemler, Çizelge 4.2’de yer alan farklı bulutların lazer ışınının farklı dalgaboyları üzerindeki zayıflatması, (Grund ve Eloranta 1989, Lohmann ve ark. 2016) tarafından Çizelge 3.3’te verilen farklı bulutların dikey boyutları, Çizelge 4.4’te bulunan link bütçesi için kullanılan farklı parametreler ve bölüm 2.25’teki açıklamalar kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Farklı bulutların dikey boyutu ve ömür süresi

Bulut	Dikey Boyutu (km)	Ömür Süresi
Stratus (Karasal)	0.9	6 Saat
Stratus (Deniz)	0.5	6 Saat
Yığınbulut	0.5	6 Saat
Kümüls Hümilis	1.5	20 dk
Kümüls kongestus	5	30 dk
Sis	0.1	4 Saat
Yığınbulut (Stratokümüls)	0.5	6 Saat
Nimbostratus	4	6 – 12 Saat
Tüybulut	~0.1	0.2 – 12 Saat
Altostratus	1	6 – 12 Saat
Kümülonimbus	9	1 Saat
Altokümüls	0.5	6 – 12 Saat

3.2. Alıcıda Gereken Güç

Alıcıda gereken güç, (2.42)’deki denklem kullanılarak alıcı duyarlılığı (N_b) 40 *foton/bit*, veri hızı 1 Gbps ve 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm için hesaplanmıştır.

3.3. Kırılma İndisinin Yapısı ile SNR ve BER

Bu tezde, kırılma indisinin yapı parametresi (C_n^2) yere yakın bir mesafeden 12 km’ye kadar (2.88)’deki Hufnagel-Valley modeli kullanılarak bulunmuştur. SNR, 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için (2.99)’da yer alan denklemin kullanılması ile elde edilmiştir. Bulunan farklı yükseklikteki C_n^2 ’nin değerleri dikkate alınarak mesafenin bir

fonksiyonu olarak 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboylarında SNR için benzetimler yapılmıştır. Daha sonra SNR'ye bağı BER (2.100)'de yer alan denklem kullanılarak bulunmuştur. BER için benzetimler de SNR'nin bulunan değerlerine dayanarak mesafenin bir fonksiyonu olarak 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için yapılmıştır.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Farklı Bulutların Görünürlüğü

Farklı bulutların görünürlüğü, Çizelge 3.1’de listelenen LWC ve N_d ’ya dayanarak, (2.59) denklemin kullanılmasıyla elde edilmiş ve Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı bulutlar için bulunan görünürlük

Bulut Tipi	Görünürlük (km)
Stratus (Karasal)	0.06
Stratus (Deniz)	0.13
Kümülüs (Karasal, Temiz)	0.05
Kümülüs (Deniz)	0.11
Yığınbulut (Stratokümülüs)	0.1
Nimbostratus (katman karabulut)	0.04
Sis	1.1

(2.59) denkleminde göre, görünürlük, LWC ve N_d ile ters ilişkilidir. Farklı bulutlarda N_d sabit kaldığında, LWC arttıkça, görünürlük azalır. Aynı zamanda, LWC sabit olduğunda, N_d arttıkça, görünürlük azalır ve tam tersi gerçekleştirilebilir. Daha sonra bulutların zayıflatmasının hesaplanması üzerinde LWC ve N_d ’ya bağlı görünürlüğün önemli katkısı olacaktır.

Çizelge 4.2. Farklı bulutların lazer ışınının farklı dalga boyları üzerindeki zayıflatması

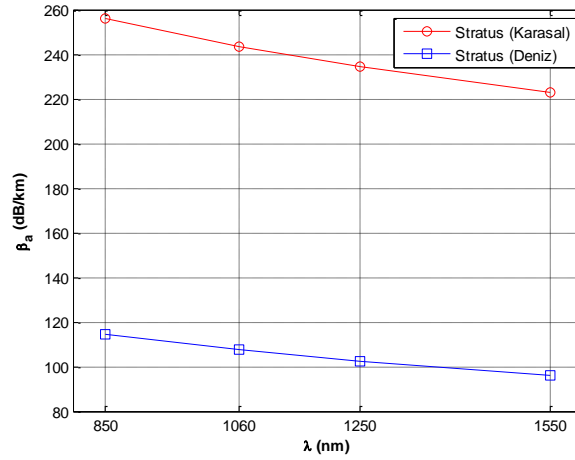
Bulut Tipi	Zayıflama (dB)			
	850 nm	1060 nm	1250 nm	1550 nm
Stratus (Karasal)	255.99	243.36	234.35	223.08
Stratus (Deniz)	114.74	107.47	102.34	96.02
Kümülüs (Karasal, Temiz)	309	294.64	284.35	271.47
Kümülüs (Deniz)	136.55	128.35	122.56	115.38
Kümülüs (Karasal, Kirli)	791.8	764.52	744.76	719.75
Yığınbulut (Stratokümülüs)	150.78	142	135.79	128.08
Altostratus	98.81	92.26	87.65	81.98
Altokümülüs	77.15	71.63	67.76	63.04
Kümülonimbus	1606.35	1562.26	1530.13	1489.21
Nimbostratus (katman karabulut)	388.85	372.05	359.98	344.81
Saçakbulut (Sirüs) I	2.83	2.31	1.98	1.62
Saçakbulut (Sirüs) II	0.27	0.2	0.16	0.12
Saçakbulut (Sirüs) III	0.46	0.34	0.28	0.21
Sis	11.86	10.38	9.4	8.25

Farklı bulutların, lazer ışınının 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboylarının üzerindeki zayıflatması, Çizelge 3.2 ve Çizelge 4.1’de yer alan bulutların görünürlükleri, (2.66)’da yer alan Kruse modeli ve (2.64) denklemi kullanılarak elde edilmiş ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Şekil 4.1 ile Şekil 4.6 arasında gösterilen benzetimler, lazer ışınının 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyların üzerinde yapılmıştır.

Şekil 4.1’de Stratus (Karasal) ve Stratus (Deniz) bulutların zayıflatmasının benzetimi gösterilmektedir. Bu benzetim, Çizelge 4.1’de yer alan Stratus (Karasal) ve Stratus (Deniz) bulutların görünürlükleri dikkate alınarak (2.66)’da yer alan Kruse modelinde δ değeri $0.585V^{1/3}$ seçilerek ve (2.64) denklemi kullanılarak elde edilmiştir.

Benzetimde görüldüğü gibi, Stratus (Karasal) bulutunun zayıflatması Stratus (Deniz) bulutundan daha fazladır. Genel olarak karasal bulutlarda damlacıkların boyutu daha küçük ve sayısı daha fazla iken deniz bulutlarında damlacıkların boyutu daha büyük ve sayısı daha azdır. Böylece, Stratus (Karasal) bulutunun yoğunluğu daha fazla olduğundan lazer ışareti Stratus (Deniz) bulutuna göre daha fazla zayıflar.

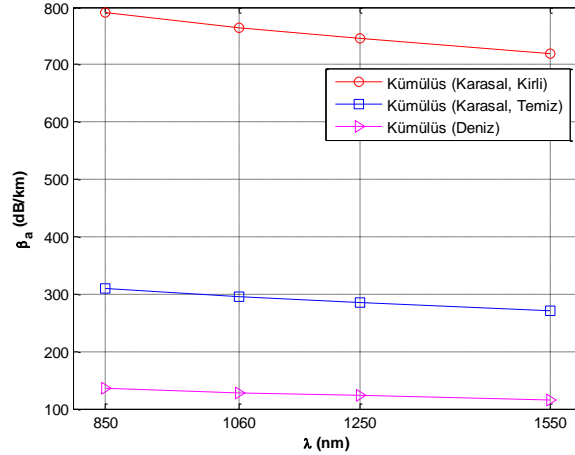


Şekil 4.1. Farklı dalgaboyları için Stratus bulutların zayıflatması

Şekil 4.2’de Kümülüs (Karasal, Kirli), Kümülüs (Karasal, Temiz) ve Kümülüs (Deniz) bulutların zayıflatma benzetimi gösterilmektedir. Bu benzetimin elde edilmesi için, Çizelge 3.2’de verilen Kümülüs (Karasal, Kirli) bulutunun görünürlüğü, Çizelge 4.1’de yer alan Kümülüs (Karasal, Temiz) ve Kümülüs (Deniz) bulutların görünürlükleri, (2.66)’da yer alan Kruse modelinde δ değeri ($0.585V^{1/3}$) ve (2.64) denklemi kullanılmıştır.

Şekil 4.2’deki benzetime göre, Kümülüs (Deniz) bulutu, Kümülüs (Karasal, Temiz) ve Kümülüs (Karasal, Kirli) bulutlarından daha az zayıflatma özelliğine sahiptir ve Kümülüs (Karasal, Kirli) bulutu, kümülüs bulutların en çok zayıflatanıdır. Çizelge 3.1’e göre, Kümülüs (Karasal, Temiz) bulutunun damlacık sayı yoğunluğu (N_d) Kümülüs (Deniz) bulutundan daha fazla ama Kümülüs (Karasal, Kirli) bulutundan daha azdır. Bu nedenle, Kümülüs (Karasal, Temiz) bulutunun zayıflatması, Kümülüs (Deniz) ve Kümülüs (Karasal, Kirli) bulutların arasındadır. Kümülüs (Karasal, Kirli) bulutunun sıvı su içeriği (LWC), Stratus (Deniz) bulutuna eşittir, ama Kümülüs (Karasal, Kirli) bulutunda N_d her buluttan daha fazladır. Böylece, Kümülüs (Karasal, Kirli) bulutunun zayıflatması daha fazladır.

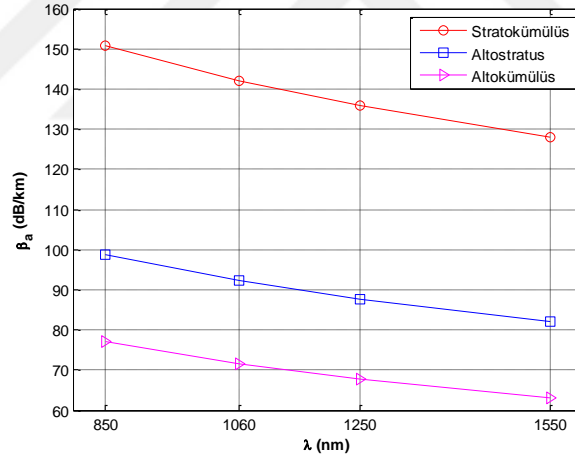
Aynı zamanda, bulutların zayıflatması lazer ışınının dalgaboyları ile ters ilişkilidir; dalgaboyu arttıkça bulutların zayıflatması azalır.



Şekil 4.2. Farklı dalgaboyları için Kümülüs bulutların zayıflatması

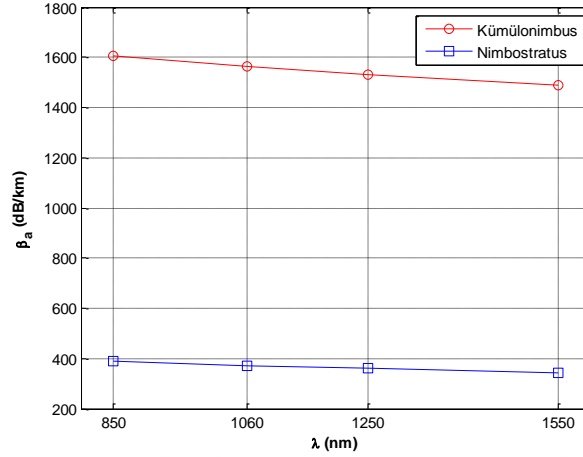
Şekil 4.3'te Stratokümülüs, Altostratus ve Altokümülüs bulutların zayıflatmasının benzetimi yapıp gösterilmektedir. Bu benzetimde, Çizelge 4.1'de bulunan Stratokümülüs bulutunun görünürlüğü, Çizelge 3.2'de verilen Altostratus ve Altokümülüs bulutların görünürlükleri, (2.66)'da yer alan Kruse modelinde δ değeri ($0.585V^{1/3}$) ve (2.64) denklemi kullanılmıştır. Altokümülüs bulutunun görünürlüğü ortalama olarak (0.19) alınmıştır.

Şekil 4.3'te gösterilen benzetimde görüldüğü gibi, Stratokümülüs bulutu, lazer ışını, Altostratus ve Altokümülüs bulutlardan daha fazla zayıflatır. Çizelge 3.2 ve Çizelge 4.1'de verildiği gibi, Stratokümülüs bulutu, Altostratus ve Altokümülüs bulutlardan daha az görünürlüğe sahiptir. Aynı zamanda, Altostratus bulutu, Stratokümülüs ve Altokümülüs bulutların arasında görünürlük ve zayıflatmaya sahiptir. Bu grupta en az zayıflatılan, Altokümülüs bulutudur.



Şekil 4.3. Stratokümülüs, Altostratus ve Altokümülüs bulutların zayıflatması

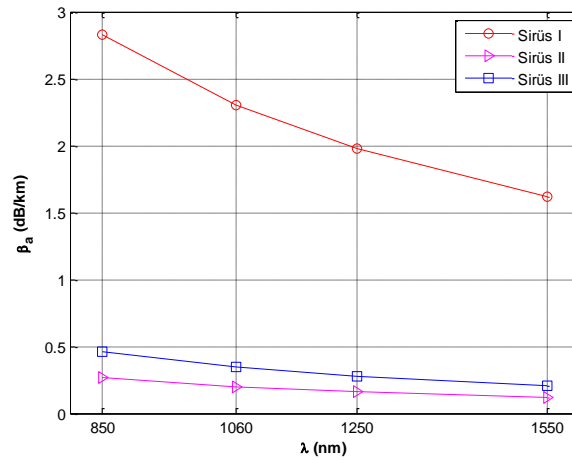
Şekil 4.4'te Kümülönimbus ve Nimbostratus bulutların zayıflatma benzetimi görülmektedir. Bu benzetimde, Çizelge 3.2'de yer alan Kümülönimbus bulutunun görünürlüğü, Çizelge 4.1'de bulunan Nimbostratus bulutunun görünürlüğü, (2.66)'da yer alan Kruse modelinde δ değeri ($0.585V^{1/3}$) ve (2.64) denklemi kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Kümülonimbus ve Nimbostratus bulutların zayıflatması

Şekil 4.4'te verilen benzetimde açık olarak görüldüğü gibi, lazer ışını üzerinde, Kümülonimbus bulutunun Kümüls (Karasal, Kirli) bulutundan neredeyse iki kat ve Nimbostratus bulutundan üç kat daha fazla zayıflatma etkisi var. Aynı zamanda, Kümüls (Karasal, Kirli) ve Nimbostratus diğer tüm bulutlardan daha fazla zayıflatmaya sahiptir.

Şekil 4.5'te Saçakbulut (Sirüs) I, Saçakbulut (Sirüs) II ve Saçakbulut (Sirüs) III bulutların zayıflatma benzetimi gösterilmiştir.



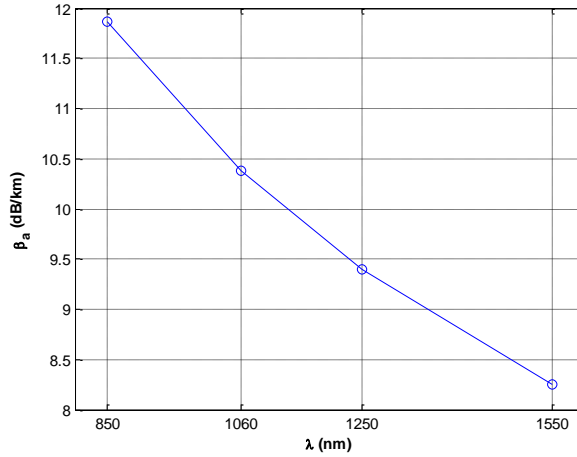
Şekil 4.5. Sirüs bulutların zayıflatması

Bu benzetimin yapılmasında, Çizelge 3.2’de listelenen Sirüs-I, Sirüs-II ve Sirüs-III bulutların görünürlükleri, (2.66)’da yer alan Kruse modelinde δ değeri Sirüs-I için $(0.585V^{1/3})$, Sirüs-II ve Sirüs-III için (1.3) verilmiş ve (2.64) denklemi kullanılmıştır.

Şekil 4.5’teki benzetime göre, saçakbulutlar, diğer bütün bulutlara göre lazer ışınına daha az zayıflatırlar. Bu bulutlarda LWC ve N_d miktarları diğer bulutlardan daha azdır. Böylece, bu bulutların ölçülen görünürlükleri daha uzundur. Sirüs-III, Sirüs-I ve Sirüs-II bulutlarına göre lazer ışınına daha az zayıflatır. Sirüs-I bu grupta en fazla zayıflatandır, çünkü bu bulut $-25\text{ }^\circ\text{C}$ ’de oluşur ve damlacık miktarı daha fazladır, halbuki Sirüs-II ve Sirüs-III bulutları $-50\text{ }^\circ\text{C}$ ’de oluşurlar ve damlacık miktarı Sirüs-I bulutundan daha azdır. Sirüs-II ve Sirüs-III bulutları aynı sıcaklıkta oluştuğu halde, Sirüs-II, Sirüs-III bulutundan daha fazla zayıflatır, çünkü Sirüs-II bulutunda küçük parçacıklar da mevcuttur.

Şekil 4.6’da sis zayıflatma benzetimi görünmektedir. Bu benzetimde, Çizelge 4.1’de verilen sis görünürlüğü, (2.66)’da yer alan Kruse modelinde δ değeri $(0.585V^{1/3})$ ve (2.64) denklemi kullanılmıştır.

Şekil 4.6’daki benzetimde görüldüğü gibi, sis, lazer ışınına, saçakbulutlar hariç diğer tüm bulutlardan daha az zayıflatır. Sisler farklı yoğunluklarda bulunur. Bazı sisler lazer ışınına daha yoğun bulutların zayıflattığı gibi zayıflatırlar. Buradaki benzetimde seçilen sis hafiftir.



Şekil 4.6. Sis zayıflatması

4.2. Farklı Bulutların Yer-Uydu Arası Link Bütçesine Etkisi

Bu bölümde, yer-uydu arasındaki link bütçesinin lazer ışınının 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için farklı bulutlar tarafından ne kadar etkilendiğinin benzetimi yapılmıştır. Bölüm 3'te anlatıldığı gibi, bu benzetimlerin yapılması için, bu tezde yer alan farklı denklemler, açıklamalar, Çizelge 3.3'te listelenen farklı bulutların dikey boyutları ve Çizelge 4.4'te verilen farklı parametrelerin değerleri kullanılmıştır.

Ayrıca, bölüm 3.2'de açıklanan parametrelerin değerlerine göre alıcıda gereken güç bulunmuş ve Çizelge 4.3'te listelenmiştir. Daha sonra link bütçesinde alınan işaret gücü Çizelge 4.3'teki değerlere göre yorumlanmıştır.

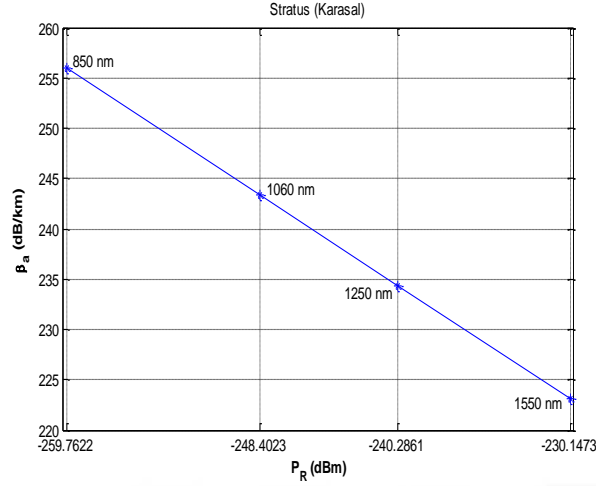
Çizelge 4.3. Farklı dalgaboyları için alıcıda gereken güç

Dalgaboyu	Geren Güç
850 nm	-80.29 dBm
1060 nm	-81.25 dBm
1250 nm	-81.96 dBm
1550 nm	-82.90 dBm

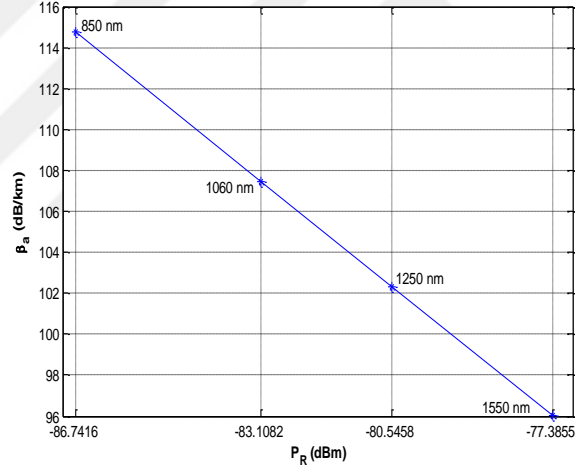
Çizelge 4.4. Link bütçesinde kullanılan farklı parametreler ve değerleri

Parametre	Değer
Verici iletme gücü (P_T)	15 dBm
İşaret kaçırma kaybı (L_{MP})	3 dB
Optik kaybı (L_{opt})	9 dB
Alıcı açıklık çapı (d_R)	0.4 m
Verici açıklık çapı (d_p)	0.16 m
ıraksaklık açısı (θ)	5 μ rad
Yer-uydu arası mesafe	500 km

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilen benzetimler, yer-uydu arasındaki link bütçesinde lazer ışınının 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için Stratus (Karasal) ve Stratus (Deniz) bulutların zayıflatmasına bağlı alınan işaret gücü gösterilmiştir.



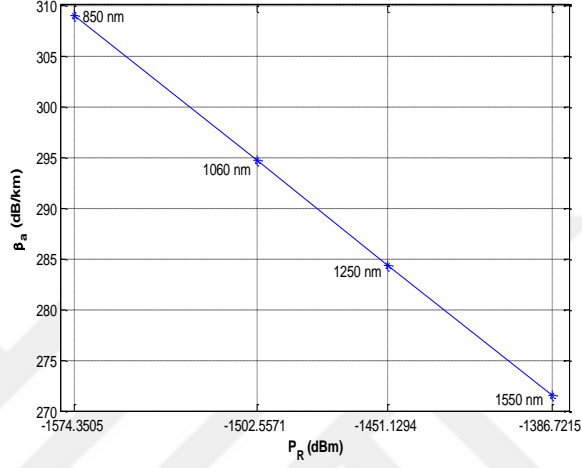
Şekil 4.7. Stratus (Karasal) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi



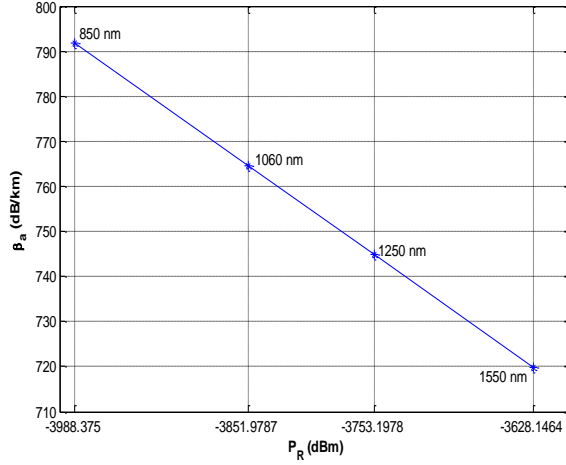
Şekil 4.8. Stratus (Deniz) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

Bölüm 4.1’de tartışıldığı gibi, Stratus (Karasal) bulutunun Stratus (Deniz) bulutundan daha fazla zayıflatması olduğu için, link bütçesi de Stratus (Karasal) bulutunun varlığından daha fazla etkilenir. Stratus (Karasal) bulutunun dikey boyutu 0.9 km olduğunda, alıcı tarafından alınan işaret gücü Çizelge 4.4’te verilen parametreler altında, 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalga boylarında sırasıyla -259.7622 dBm, -248.4023 dBm, -240.2861 dBm ve -230.1473 dBm olmaktadır. Aynı zamanda, Stratus (Deniz) bulutunun zayıflatması Stratus (Karasal) bulutundan daha az olduğunda, aynı dalga boylarında alınan işaret gücü sırasıyla -86.7416, -83.1082, -80.5458 ve -77.3855’dir.

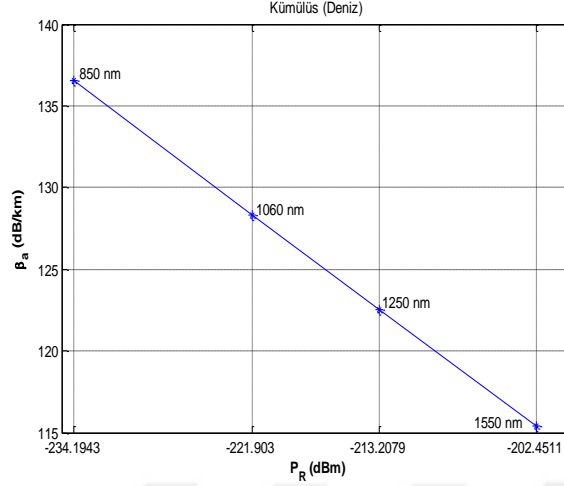
Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de sırasıyla Kümürlüs (Karasal, Temiz), Kümürlüs (Karasal, Kirli) ve Kümürlüs (Deniz) bulutlarının lazer ışınının 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için, link bütçe üzerindeki etkilerinin benzetimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Kümürlüs (Karasal, Temiz) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi



Şekil 4.10. Kümürlüs (Karasal, Kirli) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

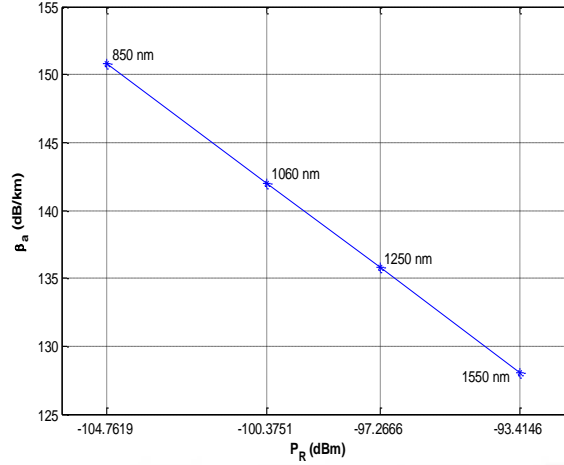


Şekil 4.11. Kümülius (Deniz) bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

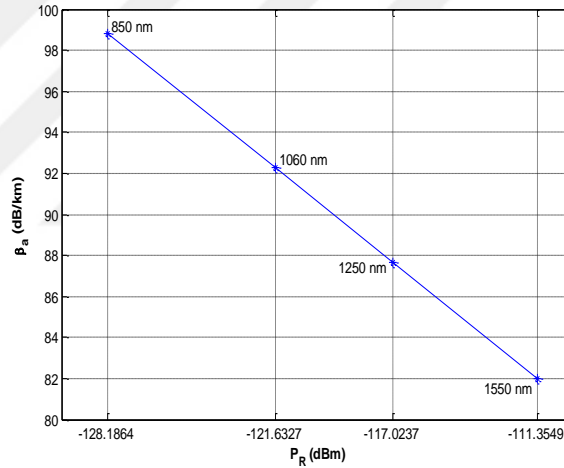
Kümülius (Deniz) bulutunun link bütçesine etkisi, Kümülius (Krasal, Temiz) ve Kümülius (Krasal, Kirli) bulutlardan daha azdır. Aynı zamanda, Kümülius (Krasal, Temiz) bulutunun link bütçesi üzerindeki etkisi Kümülius (Deniz) bulutundan daha fazla, ama Kümülius (Krasal, Kirli) bulutundan daha azdır.

Ayrıca, Kümülius (Deniz) bulutunun dikey boyutu Kümülius (Karasal, Temiz) ve Kümülius (Karasal, Kirli) bulutlarından daha küçüktür. Kümülius (Karasal, Temiz) ve Kümülius (Karasal, Kirli) bulutların varlığında, Çizelge 4.4'te verilen parametrelerin değerleri kullanılarak yer-uydu lazer haberleşmesinin gerçekleştirilmesi Çizelge 4.3'teki değerlere göre mümkün değildir.

Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te sırasıyla Stratokümülius, Altostratus ve Altokümülius bulutlarının link bütçesi üzerindeki etkisinin lazer ışınının 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için benzetimleri görünmektedir. Şekil 4.3'te gösterilen benzetime göre, Stratokümülius bulutu Altostratus ve Altokümülius bulutlarından daha fazla zayıflatmaya sahip olduğundan, link bütçesi üzerine de Altostratus ve Altokümülius bulutlarından daha fazla etkisi olacaktır.

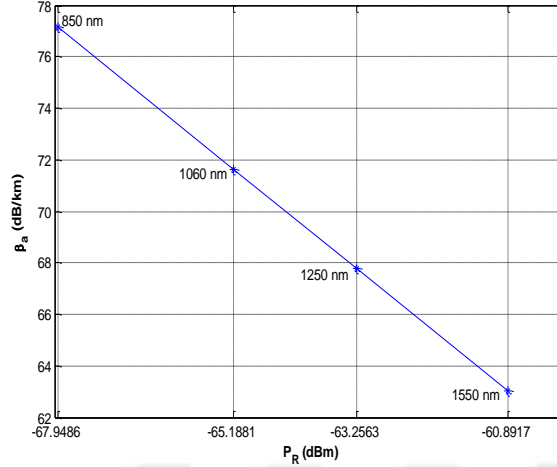


Şekil 4.12. Stratokümülüs bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi



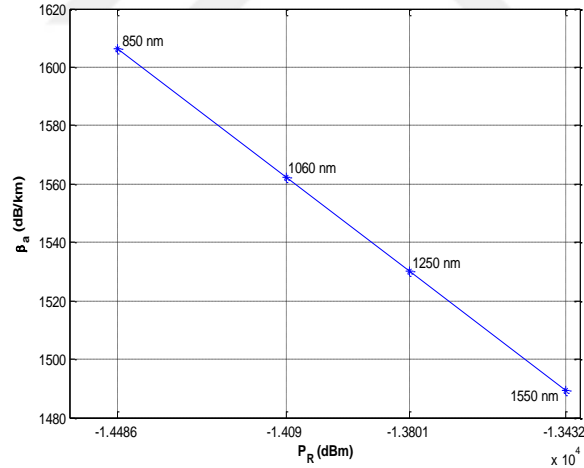
Şekil 4.13. Altostratus bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

Aynı zamanda, Altostratus bulutunun link bütçesi üzerindeki etkisi, Stratokümülüs ve Altokümülüs bulutlarının arasındadır. Ancak, Çizelge 3.3'te farklı bulutların dikey boyutları verildiği gibi, Stratokümülüs ve Altokümülüs bulutların dikey boyutları, Altostratus bulutundan daha az olduğu için, Altostratus bulutundan etkilenen alınan işaret gücü, Stratokümülüs ve Altokümülüs bulutlarından daha zayıftır.



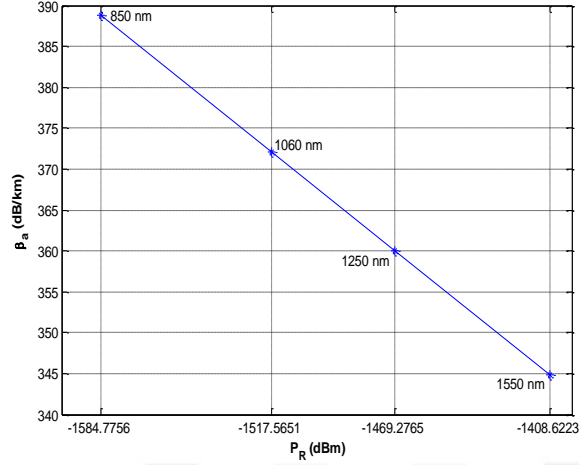
Şekil 4.14. Altokümürlös bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilen benzetimler, Kümülonimbus ve Nimbostratus bulutların link bütçesi üzerindeki etkilerini göstermektedir. Bölüm 4.1’de tartışıldığı gibi, Kümülonimbus ve Nimbostratus bulutlar daha yoğun ve daha zayıflatıcı oldukları için, link bütçesi üzerinde de daha fazla etkileri görünmektedir.



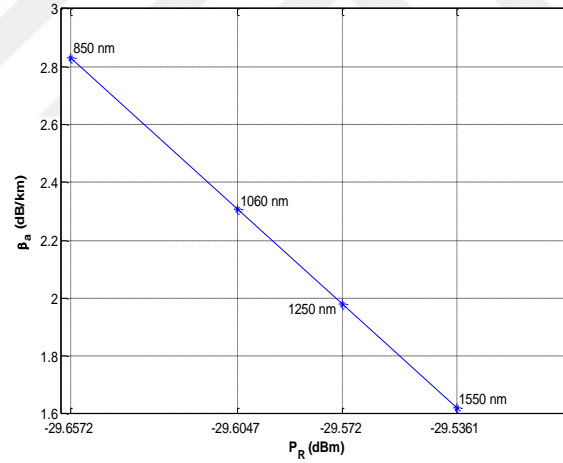
Şekil 4.15. Kümülonimbus bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

Kümülonimbus bulutunun fazla zayıflatması ile birlikte dikey boyutu da diğer tüm bulutlardan daha büyüktür, bu yüzden Kümülonimbus bulutunun varlığında, yer-uydu lazer haberleşmesinin gerçekleştirilmesi Çizelge 4.3’teki değerlerine göre imkansızdır. Aynı zamanda, Nimbostratus bulutunun link bütçesi üzerindeki etkisinden ve ortalama dikey boyutu 4 km olduğundan, yer-uydu arası lazer haberleşmesi de imkansızdır.



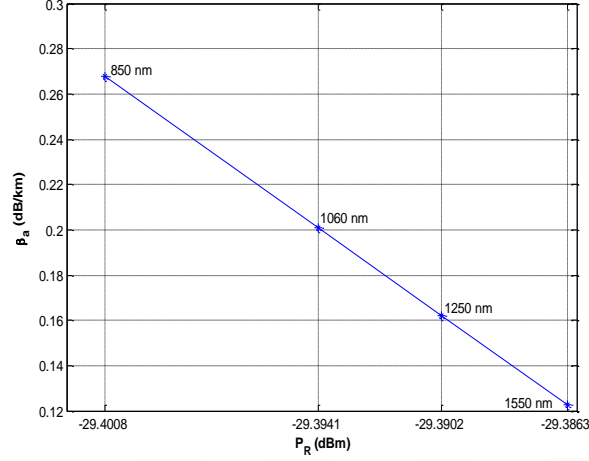
Şekil 4.16. Nimbostratus bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da yer alan sırasıyla Sirüs-I, Sirüs-II ve Sirüs-III bulutlarının link bütçesi üzerindeki etkilerinin benzetimleri gösterilmektedir.

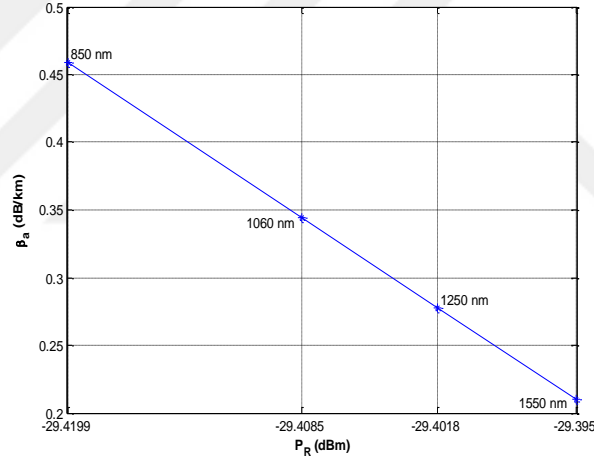


Şekil 4.17. Sirüs-I bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

Bu bulutların zayıflatmaları diğer tüm bulutlardan daha az olduğundan, link bütçesi üzerine de daha az etkileri vardır. Aynı zamanda, bu bulutların dikey boyutları diğer tüm bulutlardan daha küçüktür. Sirüs-I bulutunun lazer ışınının üzerindeki zayıflatması Sirüs-II ve Sirüs-III bulutlarından daha fazla olduğu gibi, link bütçesi üzerine de daha fazla etkisi vardır, Sirüs-II bulutunun link bütçesi üzerinde Sirüs-I ve Sirüs-II bulutlarından daha az etkiye sahiptir. Genel olarak, saçakbulutlardan meydana gelen zayıflama, link bütçesi hesaplanırken ihmal edilebilir, çünkü bunların zayıflatma etkilerine kıyasla sistemde optik zayıflamanın etkileri daha fazladır.

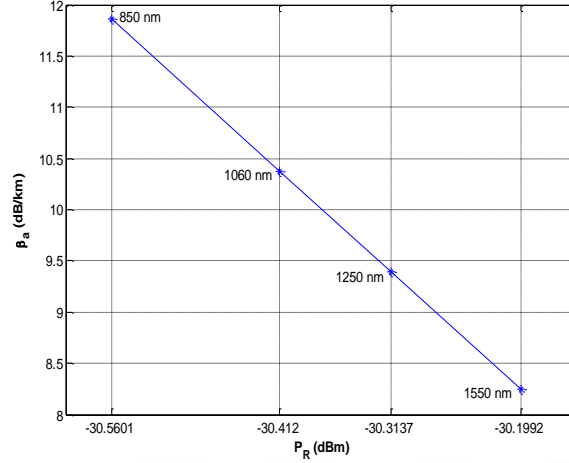


Şekil 4.18. Sirüs-II bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi



Şekil 4.19. Sirüs-III bulut zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

Şekil 4.20’de gösterilen benzetim, link bütçesi üzerindeki sis zayıflatma etkisine aittir. Bu benzetim de verilen diğer benzetimler gibi lazer ışınının 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için yapılmıştır. Bölüm 4.1’de anlatıldığı gibi, sis farklı yoğunluklarda bulunabilir ve bu yoğunluklara göre lazer işaretinin zayıflaması da farklı olacaktır. Burada dikkate alınan sisin zayıflatmasının az olması ile birlikte daha az dikey boyuta sahiptir. Böylece, link bütçesi üzerine etkisi de çok azdır. Genellikle sis yere yakın olduğundan, sistem kurulurken, sis zayıflatmasının etkisi en aza düşürülebilir.

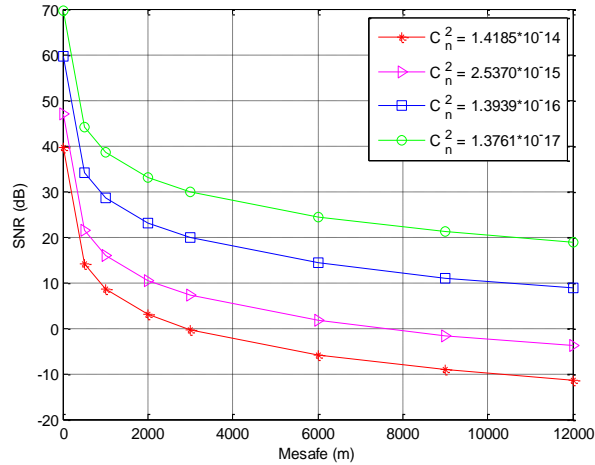


Şekil 4.20. Sis zayıflatmasının link bütçe üzerindeki etkisi

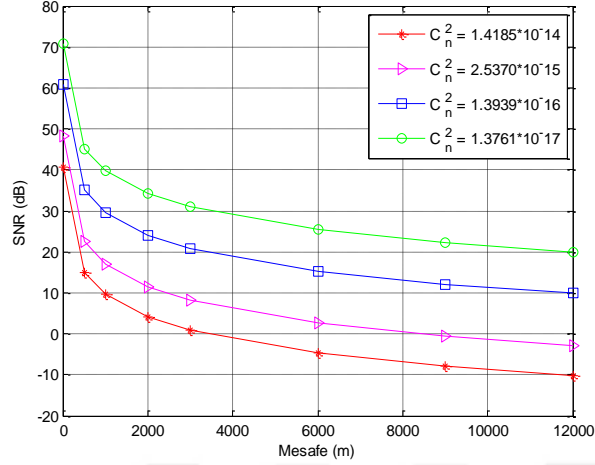
4.3. SNR ve BER Üzerinde Türbülans Etkisi

SNR ve BER kırılma indisinin yapı parametresine (C_n^2) dayanarak bulunmuştur. Türbülans, C_n^2 ile yerden belirli bir yüksekliğe kadar zayıf ve güçlü olarak nitelendirilir. Türbülans, yere yakın yüksekliklerde güçlü ve yerden yüksek irtifalarda zayıf olur.

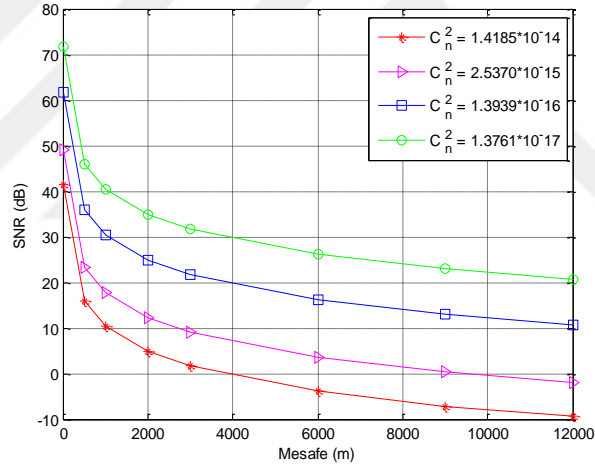
SNR'nin benzetimleri, 20 m'den 12 km'ye kadar C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için yapılip sırasıyla Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.21. SNR'nin C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 850 nm için benzetimi

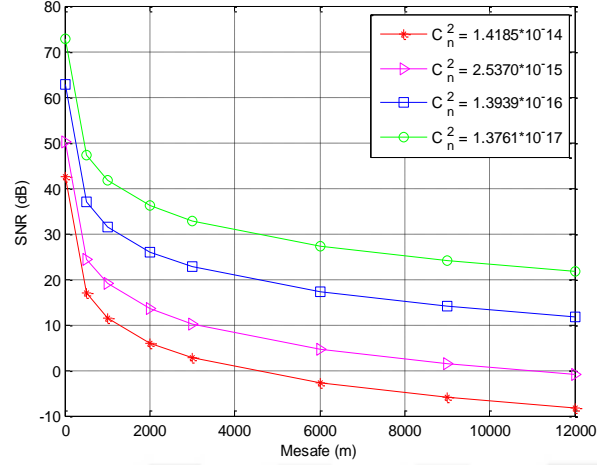


Şekil 4.22. SNR'nin C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1060 nm için benzetimi



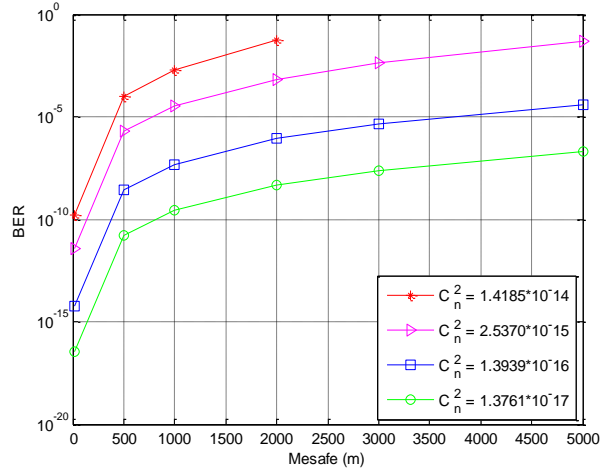
Şekil 4.23. SNR'nin C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1250 nm için benzetimi

Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'teki benzetimlere göre, SNR, atmosferik türbülansın gücüne ve mesafeye göre değişiyor. Atmosferik türbülans güçlü, ve mesafe uzun olduğunda, SNR azalır. SNR azalınca BER performansı fazla olacaktır. (2.99)'daki denkleme göre, SNR dalgaboyunun $-7/6$ üssü ile orantılı olduğundan, dalgaboyunun etkisi türbülansın gücüne ve mesafeye göre SNR üzerinde etkili değildir.



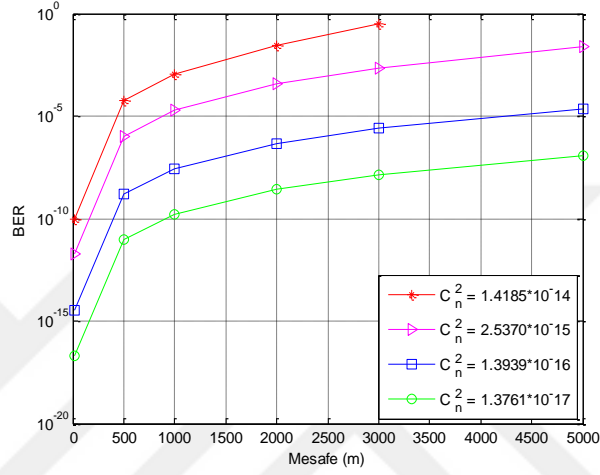
Şekil 4.24. SNR'nin C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1550 nm için benzetimi

BER'in benzetimleri, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'teki SNR'nin bulunduğu benzetimlerine bağlı olup (2.100)'deki denklem kullanılarak bulunmuştur. BER'in benzetimleri, SNR gibi 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboyları için sırasıyla Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de gösterilmiştir.

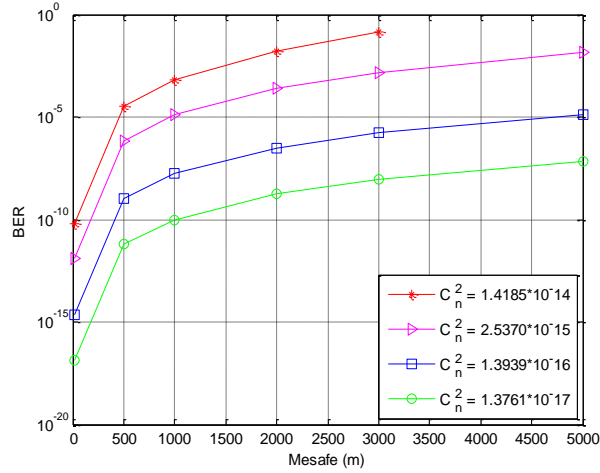


Şekil 4.25. BER'in C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 850 nm için benzetimi

BER değeri haberleşme sistemlerinde 10^{-9} olması sistemin iyi çalışması için kabul edilmiştir. Şekil 4.25'te görüldüğü gibi, BER'in performansı 850 nm'de $C_n^2 = 1.3761 * 10^{-17}$ için alıcı ve verici arasındaki mesafe neredeyse 1700 m olmasına kadar iyidir. Aynı zamanda aynı dalgaboyunda $C_n^2 = 1.3939 * 10^{-16}$ için bu mesafe neredeyse 470 m'ye düşer. $C_n^2 = 2.5370 * 10^{-15}$ ve $C_n^2 = 1.4185 * 10^{-14}$ için bu mesafe sırasıyla neredeyse 95 m ve 220 m'ye kadar olacaktır.

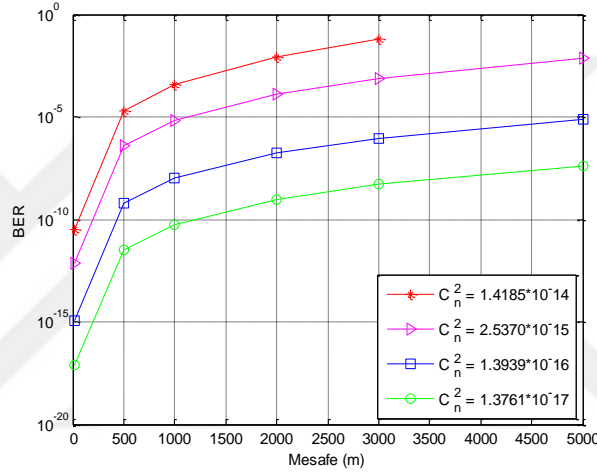


Şekil 4.26. BER'in C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1060 nm için benzetimi



Şekil 4.27. BER'in C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1250 nm için benzetimi

Şekil 4.26'daki benzetime göre, BER'in değeri 10^{-9} olması için $C_n^2 = 1.3761 * 10^{-17}$ ve dalgaboyu 1060 nm durumunda, alıcı ve verici arasındaki mesafe neredeyse 1750 m olacaktır. $C_n^2 = 1.3939 * 10^{-16}$ için bu mesafe neredeyse 480 m'ye düşer. Aynı dalgaboyunda $C_n^2 = 2.5370 * 10^{-15}$ ve $C_n^2 = 1.4185 * 10^{-14}$ için bu mesafe sırasıyla neredeyse 125 m ve 250 m olacaktır. Aynı zamanda, Şekil 4.27'deki benzetime göre, dalgaboyu 1250 nm ve $C_n^2 = 1.3761 * 10^{-17}$ durumunda, alıcı ve verici arasındaki mesafe neredeyse 1850 m olacaktır. $C_n^2 = 1.3939 * 10^{-16}$ durumunda, bu mesafe 500 m'ye düşer ve aynı zamanda $C_n^2 = 2.5370 * 10^{-15}$ ve $C_n^2 = 1.4185 * 10^{-14}$ için bu mesafe sırasıyla neredeyse 150 m ve 270 m olacaktır.



Şekil 4.28. BER'in C_n^2 'nin farklı değerlerine dayanarak 1550 nm için benzetimi

Şekil 2.48'deki benzetime göre, BER'in kabul edilen değeri için 1550 nm dalgaboyu ve $C_n^2 = 1.3761 * 10^{-17}$ durumunda alıcı ve verici arasındaki mesafe neredeyse 2000 m olacaktır. $C_n^2 = 1.3939 * 10^{-16}$ için bu mesafe neredeyse 520 m'ye düşer. Aynı zamanda $C_n^2 = 2.5370 * 10^{-15}$ ve $C_n^2 = 1.4185 * 10^{-14}$ için bu mesafe sırasıyla neredeyse 170 m ve 300 m olacaktır.

Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'deki benzetimler karşılaştırıldığında, BER'in kabul edilen değeri türbülansın gücüne ve mesafeye daha fazla bağlıdır. BER, SNR'ye bağlı olduğundan ve SNR de dalgaboyunun $-7/6$ üssü ile orantılı olduğundan, BER'in performansı kısa dalgaboylarına göre uzun dalgaboylarında daha iyi olduğu gösterilmiştir.

5. SONUÇ

Yer-uydu arasındaki mesafede, farklı atmosferik zayıflatıcı parametreler mevcuttur. Bu tez çalışmasının amacı lazer ışınının 850 nm, 1060 nm, 1250 nm ve 1550 nm dalgaboylarında, farklı bulutların zayıflatmasının bulunması ve daha sonra bu zayıflatmalarını yer-uydu arasındaki optik link bütçesine etkisinin bulunmasıdır.

Tezde, 1 tür sis ve 13 değişik bulutun zayıflatmaları bulunmuştur. Farklı bulutların zayıflatması, sıvı su içeriği (LWC) ve damlacık sayı yoğunluğuna (N_d) bağlı görünürlüğe dayanarak bulunmuştur. Görünürlük, LWC ve N_d ile ters orantılı olmakla birlikte, bulutların lazer ışınının üzerindeki zayıflatması da görünürlük ile ters orantılıdır. Buradan, bulutların lazer ışınının üzerindeki zayıflatmasının LWC ve N_d ile doğru orantılı olması anlaşılmaktadır. LWC veya N_d miktarı bulutta ne kadar fazla ise, bulut o kadar yoğun olup görünürlüğü azalır ve bu, bulutun lazer ışınına daha fazla zayıflatmasına neden olur.

Yer-uydu arasındaki link mesafesi 500 km olarak seçilip bu mesafe yerden LEO uydusunun yörüngesine kadarki mesafeyi temsil etmektedir. Bu mesafede, lazer ışınının üzerine atmosferik farklı parametrelerin etkileri vardır. Bu çalışmada, sadece su bulutları dikkate alınmıştır, diğer bütün parametrelerin etkileri serbest uzay kaybı hariç ihmal edilmiştir.

Bulunan sonuçlara göre, en zayıflatıcı bulut Kümülönimbus bulutudur, çünkü bu bulut diğer bütün bulutlardan daha kısa görünürlüğe sahiptir. Aynı zamanda, Kümülönimbus bulutunun yer-uydu arasındaki lazer link bütçesinin üzerine en fazla etkisi vardır; çünkü bu bulutun dikey boyutu 9 km olup diğer bütün bulutlardan daha fazladır. Kümülönimbus bulutunun varlığında, yer-uydu lazerli haberleşmesinin gerçekleştirilmesi, bu tezdeki dikkate alınan parametrelerin altında, mümkün değildir.

Bulutların zayıflatmaları karşılaştırıldığında, Kümülönimbus bulutu lazer ışınının en etkili zayıflatıcısı ve Sirüs-II bulutu en etkisiz zayıflatıcısı olarak özetlenebilmektedir. Sirüs-II bulutunun görünürlüğü 36 km olup diğer tüm bulutlara göre lazer ışınına daha az zayıflatır. Aynı zamanda, Sirüs-II bulutunun dikey boyutu neredeyse 0.1 km olup yer-uydu lazer link bütçesinin üzerine etkisi yok sayılabilmektedir.

Sonuçlara baktığımızda, link bütçesi, uzun dalgalıboylarına göre kısa dalgalıboylarında serbest uzay kaybindan daha fazla etkilenmektedir.

Bu tezde belirlenen alıcı duyarlılığı, veri hızı ve dalgalıboylarının değerleri altında farklı bulutların etkileri dikkate alınarak yer-uydu arasındaki link bütçesinde bulunan alıcı işaret gücü neredeyse -80 dBm ile -83 dBm arasındaki değerinden daha az olduğundan haberleşme mümkün değildir. Böyle bir durumun iyileştirilmesi için, verici gücün daha yüksek olması, verici açıklık çapının daha dar olması, alıcı açıklık çapının daha geniş olması, ıraksaklık açısının daha küçük olması ve veri hızının daha düşük olması gerekir.

Ayrıca, tezde SNR ve BER üzerinde 20 m ile 12 km arasındaki türbölans etkisi farklı dalgalıboyları için incelenip bulunmuştur. Türbölans yere yakın mesafelerde daha güçlü ve yerden yüksek irtifalarda daha zayıftır. SNR ve BER, türbölans ve mesafeye daha fazla ve dalgalıboyu daha az bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Bulunan sonuçlara göre BER'in performansı kırılma indisinin yapı parametresinin (C_n^2) yüksek değerlerinde bozulur. Türbölansın zayıf bölgelerinde, BER'in haberleşme sistemlerinde kabul edilen değerini (10^{-9}) elde etmek için alıcı ve verici arasındaki mesafe türbölansın güçlü bölgelerine göre daha uzun olacaktır.

Bu tezde, BER'in değeri OOK modölasyonu kullanılarak bulunmuştur ve yer-uydu arasındaki mesafe için uygun değildir. Daha uzun mesafelerde BER'in kabul edilen değerini elde etmek için diğer etkili modölasyon teknikleri ve hata düzeltme teknikleri kullanılması gerekir.

KAYNAKLAR

- Ahrens, C. Horne, N. Alvelais, R. 2005.** Essentials of meteorology - an invitation to the atmosphere. Brooks Cole, Belmont, 454 pp.
- Ahrens, C. 2009.** Meteorology today - an introduction to weather, climate, and the environment. Brooks Cole, Cengage Learning, Belmont, 549 pp.
- Akbulut, A. 2006.** Laserle Yer-Uydu Arası İki Yönlü Optiksel İletişim İçin Proje. *DOKTORA TEZİ*, AÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Ali, M. 2013.** Characterization of fog attenuation for free space optical communication link. International Journal Of Electronics And Communication Engineering & Technology (IJECE), Baghdad.
- Alkholidi, A. Altowij, K. 2014.** Free Space Optical Communications — Theory and Practices: Contemporary Issues in Wireless Communications, INTECH, Sana'a, pp: 159-209.
- Alkholidi, A. Altowij, K. 2014.** Effect of Clear Atmospheric Turbulence on Quality of Free Space Optical Communications in Western Asia: Contemporary Issues in Wireless Communications, INTECH, Sana'a, pp: 41-70.
- Anonim, 2009.** How to Design a Reliable FSO System. Spec Sheets, Brochures, & Latest White Papers, San Diego.
- Anonim, 2009.** Measuring Laser Power and Energy Output. Santa Clara, www.coherent.com/downloads/aboutmeasuringlaserpowerndenergyoutputfinal.pdf - (29.9.2015).
- Anonim, 2013.** Elektrik-Elektronik Teknolojisi. Müşterek Uydu Anten Tesisatı. MEB, <http://www.megep.meb.gov.tr>-(Erişim tarihi: 11.12.2015).
- Anonim, 2015.** Layers of Earth's Atmosphere. UCAR, <http://scied.ucar.edu/atmosphere-layers->(18.8.2016).
- Anonim, 2015.** Types-of-satellite-orbits. swifttutors.com, <http://www.swifttutors.com/types-of-satellite-orbits.html>-(6.10.2015).
- Anonim, 2016.** Atmospheric Layers. National Weather Service, <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/atmos/layers.html>-(15.8.2016).

- Anonim, 2016.** Energy Sources and Interactions. Corporate Document Repository (FOA), [http://www.fao.org/docrep/003/t0355e/T0355E02.HTM-\(13.12.2015\)](http://www.fao.org/docrep/003/t0355e/T0355E02.HTM-(13.12.2015)).
- Arnon, S. Sadot, D. Kopeika, N. S. 1994.** Analysis of Optical Pulse Distortion Through Clouds for Satellite to Earth Adaptive Optical Communication. *Journal of Modern Optics*, 41(8): 1591-1605.
- Beasley, J. S. Page, J. T. 1999.** Computing Azimuth and Elevation Angles with JavaScript. *The Electronic Journal for Engineering Technology*, 3(2):1-3.
- Bendre, B. S. Mahamuni, R. Desa, K. V. Raybagkar, V. H. Joshi, W. A. 2009.** Emerging Physics. Pearson India, New Delhi, 184 pp.
- Blake, R. 2012.** Satellite Propagation: Wireless Communication Technology, Delmar, pp: 247-249.
- Bretenaker, F. 2015.** Laser Physics. Orsay, [www.lac.u-psud.fr/IMG/pdf/2015_laserphysics_bretenaker.pdf-\(30.3.2015\)](http://www.lac.u-psud.fr/IMG/pdf/2015_laserphysics_bretenaker.pdf-(30.3.2015)).
- Cakaj, S. 2014.** The Coverage Analysis for Low Earth Orbiting Satellites at Low Elevation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 5 (6): 6-10.
- Davide M. Forin, G. 2010.** Free Space Optical Technologies: Trends in Telecommunications Technologies, INTECH, pp: 257-292.
- Devarajan, D. Pillai, S. 2014.** Optimization of Laser Satellite Communication System through Link Budget Prediction. Information Communication and Embedded Systems (ICICES), 2014, S. A. Engineering College, Chennai.
- Elbert, B. R. 2008.** Introduction to Satellite Communication. Norwood, Artech House, 447 pp.
- Eloranta, E. W. Grund, C. J. 1989.** Optical and Morphological Properties of Cirrus Clouds Determined by the High Spectral Resolution Lidar During Fire. Meteorology and Climatology, United States.
- Fadhil, A. H. Amphawan, A. Shamsuddina, A.B. H. Abda, H. T. Al-Khafajia, M.R. H. Aljunida, S.A. Ahmeda, N. 2013.** Optimization of free space optics parameters: An optimum solution for bad weather conditions. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 124(19): 3969-3973.
- Foth, H. J. 2008.** Principles of Lasers. Wiley, [www.wiley-vch.de/books/sample/3527319972_c01.pdf-\(19.2.2016\)](http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527319972_c01.pdf-(19.2.2016)).

- Frierson, D. M. 2012.** Atmospheric Structure. Atmospheric Sciences Department/ University of Washington, www.atmos.washington.edu/~dargan/587/atmosphericstructure.pdf-(23.9.2012).
- Ghuman, B. Willebrand, H. 2002.** Free space optics : enabling optical connectivity in today's networks. Indianapolis: Sams Publishing, USA, 261 pp.
- Griot, M. 2013.** Basic Laser Principles. Ben-Gurion University of the Negev, www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/Lasers.pdf-(20.3.2016).
- Gultepe, I. Isaac, G. A. 1999.** Scale Effects on Averaging of Cloud Droplet and Aerosol Number Concentrations: Observations and Models. *AMS*, 12: 1268-1279.
- Gultepe, I. Müller, M. D. Boybeyi, Z. 2006.** A New Visibility Parameterization for Warm-Fog Applications in Numerical Weather Prediction Models. *Journal Of Applied Meteorology and Climatology*, 45: 1469-1480.
- Gultepe, I. Tardif, R. Michaelides, S.C. Cermak, J. Bott, A. Bendix, J. Müller, M. D. Pagowski M. Hansen, B. 2007.** Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, 164: 1121-1159.
- Henniger, H. Wilfert, O. 2010.** An Introduction to Free-space Optical Communications. *Radioengineering*, 19(2): pp: 203-212.
- Hess, M. Koepke, P. Schult, I. 1998.** Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5): 831-844.
- Ippolito, L. J. Jr. 2008.** Satellite Communications Systems Engineering. John Wiley & Sons, Washington, 394 pp.
- Islam, M. S. Mohammad, A. Al-Gailani, S. A. 2016.** Characteristics of free space optics communication link in an unusual haze. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 54: 46-50.
- ITU, 2002.** Handbook on Satellite Communications. Wiley, 1112.
- Kahn, J. 2006.** Modulation and Detection Techniques for Optical Communication Systems. *Optical Society of America*, [https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=cota-2006-CThC1-\(30.7.2016\)](https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=cota-2006-CThC1-(30.7.2016)).
- Kampe, H. J. (1950).** Visibility and Liquid Water Content In Clouds In The Free Atmosphere. *Journal of Meteorology*, 7: 54-57.

Kaur, H. Bhardwaj, A. Soni, G. 2015. Performance Improvement of Free Space Optical Link by varying Transmitter and Receiver Aperture Diameter. Proceedings of 2015 Global Conference on Communication Technologies (GCCT 2015), 23-24 April, 2015, India, huckalay ,Nagercoil, Tamil Nadu.

Kaushal, H. Kaddoum, G. 2015. Free Space Optical Communication: Challenges and Mitigation Techniques. Cornell University Library, <https://arxiv.org/pdf/1506.04836.pdf>-(23.8.2016).

Kim, I. I. McArthur, B. Korevaar, E. J. 2001. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. *SPIE Proceedings*, 4214: 1-12.

Kolawole, M. O. 2016. Satellite Communication Engineering, Second Edition. CRC Press, USA, 302 pp.

Kuhn, K. J. 1998. Laser Engineering. Prentice Hall, USA, 498 pp.

Kvicera, V. Grabner, M. 2008. Visibility and Attenuation Due to Hydrometeors at 850 nm Measured on an 850 m Path. 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2008 (CNSDSP08), 23-25 July, 2008, Graz University of Technology, Graz.

Lagzi, I. L. Mészáros, R. Gelybó, G. Leelőssy, Á. 2013. Atmospheric chemistry. Eötvös Loránd University, http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2011-0073_atmospheric_chemistry/ch01s04.html-(17.8.2016).

Lohmann, U. Lüönd, F. Mahrt, F. 2016. Clouds: An Introduction to Clouds: From the Microscale to Climate, Cambridge University Press, UK, pp: 1-23.

Majumdar, A. Ricklin, J. 2008. Free-Space Laser Communications. Springer, New York, 427 pp.

Meyer, M. B. Jiusto, J. E. Lala, G. G. 1980. Measurements of Visual Range and Radiation-Fog (Haze) Microphysics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(3): 622-629.

Muhammad, S. S. Awan, M. S. Rehman, A. 2010. PDF Estimation and Liquid Water Content Based Attenuation Modeling for Fog in Terrestrial FSO Links. *Radioengineering*, 19(2): 228-236.

Norimatsu, S. Iwashita, K. 1990. PSK optical homodyne detection using external cavity laser diodes in Costas Loop. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2(5): 374-376.

Oliver, J. E. 2008. Encyclopedia Of World Climatology. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 854 pp.

- Park, J. H. 2008.** Multiple Scattering Measurements Using Multistatic Lidar. Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Pennsylvania State University, PA 16801, United States.
- Patel, K. R. Mulye, S. K. 2016.** Free Space Optics (FSO)-Past, Present, Future and Mathematical Models of Atmospheric Turbulence for FSO Link Budget Analysis. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 4(1): 149-154.
- Pidwirny, M. 2016.** The Atmosphere: Understanding Physical Geography, Our Planet Earth Publishing, UK, pp: 3-45.
- Ready, J. 2003.** Optical Detectors and Human Vision. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Edina, Minnesota, USA, 248 pp.
- Riebeck, H. 2009.** Catalog of Earth Satellite Orbits. NASA Earth Observatory, <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/>-(21.10.2015).
- Roddy, D. 2006.** Satellite Communications. McGraw-Hill, New York, 500 pp.
- Sato, K. 2002.** Semiconductor Light Sources for 40-Gb/s Transmission Systems. *Lightwave Technology*, 20(12): 2035-2042.
- Sawaf, S. 2010.** Optical Cavity and laser Modes. Kingdom Saudi Arabia, <http://faculty.ksu.edu.sa/72442/Lecture%20Notes/Phys335/Optical%20Cavity%20and%20laser%20Modes.pdf>-(10.11.2015).
- Schiller, J. 2015.** Mobile Communications: Satellite Systems. FEUP, https://web.fe.up.pt/~mleitao/CMOV/Teoricac/CMOV_SAT.pdf-(10.9.2015).
- Seyrafi, K. 1993.** Introduction to Electro-Optical Imaging and Tracking Systems. Artech House, London and Boston, 260 pp.
- Shahiduzzaman, K. Md. Hasan, M. Karmaker, B.k. 2015.** Scattering Effect on Terrestrial Free Space Optical Signal in Tropical Weather Condition. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 10(4): 12-18.
- Sheridan, S. 2013.** Brief introduction to satellite communications. Slideshare.net, <http://www.slideshare.net/sallysheridan5/brief-introduction-to-satellite-communications-> (12.9.2015).
- Shettle, E. P. 1989.** Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies. Atmospheric Propagation in the UV, Visible, IR, and MM-Wave Region and Related Systems Aspects, 9-13 October, 1989, Denmark, Copenhagen.
- Silfvast, W. T. 2004.** Laser Fundamentals. Cambridge University Press, Florida, 642 pp.

- Silfvast, W. T. 2015.** Fundamentals of Photonics. Orlando, Florida, [https://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2005.pdf-\(12.1.2016\)](https://spie.org/Documents/Publications/00%20STEP%20Module%2005.pdf-(12.1.2016)).
- Singh, S. C. Zeng, H. Guo, C. Cai, W. 2012.** Lasers: Fundamentals, Types, and Operations: Nanomaterials: Processing and Characterization with Lasers, Wiley-VCH Verlag & Co. KgaA, Weinheim, pp: 1-34.
- Smith, F. G. 1993.** Atmospheric Propagation of Radiation. Infrared Information Analysis Center, California, 322 pp.
- Soni, G. Malhotra, J. 2011.** Free Space Optics System: Performance and Link Availability. *International Journal Of Computing and Corporate Research*, 1(3): 2249-054X.
- Sprangle, P. Ting, A. Peñano, J. Fischer, R. Hafizi, B. 2008.** High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications. NRL. Maryland.
- Sreedharan, M. 2007.** Satellite Communications an Overview. SAC (Space Applications Centre), [www.sac.gov.in/SACSITE/Satcom_Overview.doc-\(16.11.2015\)](http://www.sac.gov.in/SACSITE/Satcom_Overview.doc-(16.11.2015)).
- Suriza, A. Z. Wajdi. A. K. Rafiqul, I. Md. Najj, A. W. 2011.** Preliminary analysis on the effect of rain attenuation on Free Space Optics (FSO) propagation measured in tropical weather condition. IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), 12-13 July, 2011, Malaysia, Penang.
- Svelto, O. 2010.** Principles of Lasers. Springer Science & Business Media, Milan, 620 pp.
- Twati, M. O. Badi, M. M. Adam, A. F. 2014.** Analysis of Rain Effects on Free Space Optics Based on Data Measured in the Libyan Climate. *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 4(6): 469-472.
- vanLoon, G. W. Duffy, S. J. 2011.** The chemistry of global climate: Environmental Chemistry: A Global Perspective, OUP Oxford, United Kingdom, pp: 172-207.
- Vergheese, S. J. 2008.** Investigation of Aerosol and Cloud Properties Using Multiwavelength Raman Lidar Measurements. *Ph.D. Thesis*, Faculty of Electrical Engineering, Pennsylvania State University, PA 16801, United States.
- Wallace, J. M. Hobbs, P. V. 2006.** Atmospheric Science: An Introductory Survey. Academic Press, 504 pp.
- Wamser, C. C. 2000.** Organic Chemistry II. Portland State University, [http://web.pdx.edu/~wamserc/C335W00/13notes.htm-\(5.3.2016\)](http://web.pdx.edu/~wamserc/C335W00/13notes.htm-(5.3.2016)).

Zhang, H. Li, H. Dongya, X. Chao, C. 2015. Performance Analysis of Different Modulation Techniques for Free-Space Optical Communication System. *Telkomnika*, 13(3): 880-888.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hamidullah Riaz
Doğum Yeri ve Tarihi : Afganistan, 21.11.1987
Yabancı Dili : Türkçe, İngilizce, İtalyanca, Urduca

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Omer-i-Farok Lisesi, 1994 - 2005
Lisans : Kabil Üniversitesi
ICT Fakültesi, 2006 - 2010
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Elektronik Mühendisliği 2014-2016

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

AfghanTelecom (AFTEL)
BT Destek Mühendisi, 2010

Afghan Wireless Communication Company (AWCC)
RF (Radyo Frekans) planlama ve optimizasyon Mühendisi, 2012

Kabil Üniversitesi, ICT Fakültesi
Araştırma Görevlisi, 2012 - ...

İletişim (e-posta) : hamidullah.riaz@gmail.com