

**TROPOSFER KATMANINDAKİ RAYLEIGH VE MİE  
SAÇILMALARI KAYNAKLI ZAYIFLAMININ LAZERLİ  
UYDU HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN  
PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ANALİZİ**

**Pelin DEMİR**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TROPOSFER KATMANINDAKİ RAYLEIGH VE MIE SAÇILMALARI  
KAYNAKLI ZAYIFLAMANIN LAZERLİ UYDU HABERLEŞME  
SİSTEMLERİNİN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ANALİZİ**

**Pelin DEMİR**  
0000-0001-9768-4194

Prof. Dr. Güneş YILMAZ  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

## TEZ ONAYI

Pelin DEMİR tarafından hazırlanan "TROPOSFER KATMANINDAKİ RAYLEIGH VE MİE SAÇILMALARI KAYNAKLI ZAYIFLAMANIN LAZERLİ UYDU HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ANALİZİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Güneş YILMAZ  
0000-0001-8972-1952

**Başkan** : Prof. Dr. Güneş YILMAZ  
0000-0001-8972-1952  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

**Üye** : Doç. Dr. Sait Eser KARLIK  
0000-0001-5985-210X  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

**Üye** : Doç. Dr. Uğur YALÇIN  
0000-0002-4160-9774  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

**Üye** : Doç. Dr. Cemal HANILCI  
0000-0002-9174-0367  
Bursa Teknik Üniversitesi  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Ömer Zor  
0000-0001-6461-9812  
Bursa Teknik Üniversitesi  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

İmza

İmza

İmza

İmza

İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel Eren**  
Enstitü Müdürü  
26.11.2020

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

- 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 yararlanması 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.**

**05/10/2020**

**Pelin DEMİR**

## ÖZET

Doktora Tezi

### TROPOSFER KATMANINDAKİ RAYLEIGH VE MIE SAÇILMALARI KAYNAKLI ZAYIFLAMANIN LAZERLİ UYDU HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN PERFORMANSINA ETKİLERİNİN ANALİZİ

**Pelin DEMİR**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Bu tez çalışmasında serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde, atmosferik etkilerden biri olan saçılmanın sistem kayıpları üzerine etkileri incelenmiştir. Belirlenen atmosferik gazların ve su moleküllerinin saçılma kaynaklı zayıflatma değerleri hesaplanmıştır. Yer uydu arası haberleşme sistemi tasarımı yapılmış, ardından BER analizi yapılarak haberleşme sisteminin verimliliği incelenmiştir. En yoğun zayıflatıcı etkilerin yer aldığı troposfer katmanı seçilerek, bu katmanda yakın kızılötesi bölgedeki üç farklı dalgaboyunun gaz molekülerine çarparak oluşturduğu saçılma zayıflatmaları Rayleigh ve Mie analizleri ile incelenmiştir. 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboyu için saçılma değerleri sırasıyla  $0,0666 \text{ m}^{-1}$ ,  $0,7250 \text{ m}^{-1}$  ve  $39,5545 \text{ m}^{-1}$  olarak bulunmuş, 850 nm dalgaboyunun troposferdeki gazlar için zayıflama açısından en verimli dalgaboyu olduğu analiz edilmiştir. Taguchi'nin deney tasarım yöntemi kullanılarak, zayıflamaya etki eden parametreler bir dizi analiz sonrası önem derecelerine göre sıralandırılmıştır. Böylece önemsiz parametreler elenerek, görünürlük ve dalgaboyunun verimi etkileyen en önemli faktörler olduğu belirlenmiştir. 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboylarında, daha büyük boyutlu su molekülleri için Mie teorisi kullanılarak saçılma verimlilikleri analiz edilmiştir. Parçacık yarıçapları 0,1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  seçilerek saçılma verimi açısından en verimli dalgaboyunun 850 nm olduğu görülmüştür. Yer uydu arası bir haberleşme sistemi tasarlanarak azot gazının oluşturduğu zayıflatma etkisi ile sistemin BER değerleri 850 nm için  $2,06 \times 10^{-15}$ , 1064 nm için  $1,36 \times 10^{-15}$ , 1550 nm için ise  $2,17 \times 10^{-11}$  olarak gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçların literatürde kabul edilen BER değeri olan  $10^{-9}$ 'dan daha küçük olduğu ve tasarlanan sistemin daha verimli olduğu bulunmuştur. Sisteme türbülans kaybı eklenerek, toplam SNR değerleri hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Serbest uzay optiği, Taguchi analiz yöntemi, Mie saçılması, Rayleigh saçılması  
**2020, xi + 100 sayfa.**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### ANALYSIS OF EFFECTS OF RAYLEIGH AND MIE SCATTERINGS BASED ATTENUATION OCCURRING IN TROPOSPHERE LAYER IN THE PERFORMANCE OF SATELLITE LASER COMMUNICATION SYSTEMS

**Pelin DEMİR**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electronics Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Güneş YILMAZ

In this thesis, the effects of scattering, which is one of the atmospheric effects, were investigated on system losses in free space optical communication systems. The scattering attenuation values of the determined atmospheric gases and water molecules are calculated. The communication system between ground and satellite has been designed, then the efficiency of the communication system is analyzed by performing the BER analysis. Selecting the troposphere layer where the most intense attenuating effects are determined, the scattering attenuation caused by three different wavelengths in the near infrared region by hitting the gas molecule in the troposphere layer is investigated by Rayleigh and Mie analysis. The scattering values for 850 nm, 1064 nm and 1550 nm wavelengths are found as  $0,0666 \text{ m}^{-1}$ ,  $0,7250 \text{ m}^{-1}$  and  $39,5545 \text{ m}^{-1}$ , respectively. It is observed that 850 nm wavelength is the most efficient wavelength in terms of attenuation of gases in the troposphere. Using Taguchi's experimental design method, parameters affecting attenuation are ranked according to their importance after a series of analysis. Thus, parameters, which are low priority, are eliminated and it is determined that visibility and wavelength are the most important factors for efficiency. The scattering efficiencies are analyzed for larger water molecules at 850 nm, 1064 nm, and 1550 nm by using Mie theory. The scattering efficiencies by selecting the particle radii of  $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $1 \text{ }\mu\text{m}$  and  $10 \text{ }\mu\text{m}$ , are observed and it is concluded that the most efficient wavelength for large water molecules is 850 nm. By designing an ground-satellite communication system, the BER values of the system with the attenuation effect created by nitrogen gas are observed as  $2,06 \times 10^{-15}$ ,  $1,36 \times 10^{-15}$  and  $2,17 \times 10^{-11}$  at 850 nm, 1064 nm and 1550 nm wavelengths, respectively. It has been observed that the designed system has smaller values than  $10^{-9}$  BER value accepted in the literature. Total SNR values were calculated by adding turbulence loss to the system.

**Key words:** Free space optics, Taguchi analysis method, Mie scattering, Rayleigh scattering

**2020, xi + 100 pages.**

## TEŞEKKÜR

Tüm akademik çalıőmalarımnda ve doktora eğitimim boyunca yanımda olan, her zaman desteğini gördüğüm ve bana yol gösteren sayın hocalarım Prof. Dr. Güneş YILMAZ' a ve Doç. Dr. Sait Eser Karlık'a teőekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan değerli ailelerime ve eőime teőekkürü bir borç bilirim.

*Oğlum Kağan'a*

Pelin DEMİR  
05/10/2020

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı.....	2
1.2 Tezin Önemi ve Çalışmada İzlenen Yöntem.....	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1 Serbest Uzay Optik Haberleşme.....	5
2.2 Serbest Uzay Optik Haberleşme ve Radyo Frekansı (RF) Haberleşme.....	6
2.3 Serbest Uzay Optik Temel Yapısı ve Topolojiler.....	8
2.4 Serbest Uzay Optik Haberleşme Parametreleri/Alt Sistemleri.....	9
2.5 Atmosferik Kanal.....	11
2.6 Atmosferik Zayıflama/Kayıplar.....	13
2.6.1 Soğurum ve saçılma kayıpları.....	14
2.6.2 Atmosferik soğurum.....	18
2.6.3 Atmosferik saçılma.....	19
2.6.4 Serbest uzay kaybı.....	20
2.6.5 Işın açıklık kaybı.....	20
2.6.6 Hava olayları kayıpları ve görünürlük.....	24
2.6.7 Atmosferik türbülans.....	27
2.7 Serbest Uzay Optik Haberleşme için Lazer Dalgaboyu Seçimi.....	29
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	32
3.1 Taguchi Analiz Yöntemi.....	32
3.2 Mie Saçılma Analizi.....	35
3.3 Mie Saçılma Matematiği.....	36
3.4 Serbest Uzay Optik Sistem Modülleri ve Tasarım Parametreleri.....	43
4. BULGULAR.....	46
4.1 Atmosferdeki Molekül Sayısı.....	46



4.2 Mie ve Rayleigh Saçılması .....	47
4.3 Taguchi Analiz Yönetiminin Uygulanması .....	53
4.4 Aerosol Mie Saçılması .....	57
4.5 Yer-Uydu Arası Serbest Uzay Optik Haberleşme Sistemi Tasarımı .....	74
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	81
5.1 Doktora Tezinin Bilime Katkısı .....	85
5.2 Gelecekte Planlanan Çalışmalar .....	86
KAYNAKLAR .....	88
EKLER .....	94
EK 1 Mie Saçılma Analizi .....	95
EK 2 S1 ve S2 Değerlerinin Hesabı .....	96
EK 3 Mie Saçılma Katsayıları $a_n$ ve $b_n$ Hesabı .....	97
EK 4 Lagrange Polinomlarının Hesabı .....	98
ÖZGEÇMİŞ .....	99

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$P_R$	Alıcı güç
$P_T$	Verici güç
$\theta$	Işın açıklık açısı
$T_a$	Atmosferik geçirgenlik
$\tau$	Optik derinlik
$\gamma$	Atmosferik zayıflama
$R$	Hat mesafesi
$\lambda$	Dalgaboyu
$I(\lambda, x)$	Yoğunluk
$\alpha$	Soğurum katsayısı
$\beta$	Saçılma katsayısı
$dL$	Saçılma indikatiksi
$L_S$	Uzay kayıp faktörü
$G_T$	Verici anten kazancı
$G_R$	Alıcı anten kazancı
$D_n$	Işın, mercek boyutu çapı
$P_0$	Vericiden gelen optik güç
$V$	Görünürlük aralığı
$\Omega_b$	İki boyutlu katı açı
$\rho$	Saçılma boyut dağılım katsayısı
$n_0$	Kırılma indisinin gerçek değeri
$n'(r)$	Kırılma indisinin sanal değeri
$P'$	Atmosferik basınç
$T'$	Atmosferik sıcaklık
$C_n^2$	Kırılma indis yapı sabiti
$\beta_m$	Moleküler saçılma
$\beta_a$	Aerosol saçılma
$N_p$	Birim mikrometreküp başına molekül sayısı
$\alpha_{turb}$	Atmosferik türbülans zayıflatma katsayısı

G	Geometrik kesit alanı
$\sigma_{sca}$	Saçılma kesit alanı
$N_2$	Azot
$H_2$	Hidrojen
$CO_2$	Karbondioksit
Ar	Argon
$O_3$	Ozon
GaAs	Galyum Arsenit
GaAlAs	Galyum Alüminyum Arsenit
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenit
InGaAsP	İndiyum Galyum Arsenit Fosfat
Nd/YAG	Neodimyum İttriyum Alüminyum Garnet
Nd/YAP	Neodimyum İttriyum Alüminyum Fosfat
Nd/YLF	Neodimyum İttriyum Lityum Florür
$\theta_{div}^2$	Diverjans açısı
$Gain_{optik}$	Anten kazancı
$\eta_T$	Verici verimliliği
$\eta_R$	Alıcı verimliliği
$Q_{sca}$	Saçılma verimi
$x$	Boyut parametresi
G	Geometrik kesit alanı
$\mu(\cos\theta)$	Faz fonksiyonu ortalama kosinüsü
$Q_{ext}$	Kayıp verimi
$Q_{back}$	Geri saçılma verimi
$\sigma_{ext}$	Kayıp kesit alanı
$\sigma_{back}$	Geri saçılma kesit alanı
$K(\beta)$	Saçılma katsayısı
$\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$	Ortonormal temel vektörler
$E_i$	Gelen dalganın elektrik alanı
$E_{\parallel i}$	Saçılma düzlemine paralel elektrik alan
$E_{\perp i}$	Saçılma düzlemine dik elektrik alan
k	Dalga numarası
$\phi$	Azimut açısı

$S_n$	Saçılma matrisi vektörü
$a_n, b_n$	n. dalganın kısmi genlikleri
$\pi_n, \tau_n$	Lagrange polinomları
$\psi_n, \zeta_n$	Riccati-Bessel fonksiyonları
m	Kompleks kırılma indisi
$p(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o)$	Saçılma faz fonksiyonu

### **Kısaltmalar**

### **Açıklama**

RF	Radio frequency (Radyo frekansı)
LAN	Local area network (Yerel alan ağı)
MAN	Metropolitan area network (Kentsel alan ağı)
THz	Terahertz
dB	Desibel
VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser (Dikey boşluklu yüzey salımlı lazer)
DFB	Distributed feedback laser (Dağınık geri beslemeli)
EDFA	Erbium doped fiber amplifier (Erbiyum katkılı fiber yükselteç)
MOPA	Main oscillator power amplifier (Ana osilatör güç yükselteç)
CIE	International Commission on Illumination (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)
NIR	Near infrared (Yakın kızılötesi)
SIR	Short infrared (Kısa kızılötesi)
MIR	Mid infrared (Orta kızılötesi)
LIR	Long infrared (Uzun kızılötesi)
FIR	Far infrared (Uzak kızılötesi)
SNR	Signal to noise ratio (İşaret gürültü oranı)
BER	Bit error rate (Bit hata oranı)
ATP	Acquisition tracking pointing (Edinim izleme odaklama)
FM	Fade margin (Solma toleransı)
NF	Noise figure (Alıcı gürültüsü)
2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Serbest uzay optiği kullanım alanları.....	5
Şekil 2.2. Mars'tan Dünya'ya optik ve RF ışın diverjansı .....	7
Şekil 2.3. Serbest uzay optiği için temel yapılar .....	9
Şekil 2.4. Serbest uzay optik blok diyagramı.....	10
Şekil 2.5. Atmosfer katmanları .....	11
Şekil 2.6. Atmosferik geçirgenlik ve dalgaboyu .....	12
Şekil 2.7. Ortalama parçacık boyutu ve yoğunluğu .....	13
Şekil 2.8. Saçılma mekanizması.....	17
Şekil 2.9. Soğurucudan ışın geçişi .....	18
Şekil 2.10. Saçılma indikatrisi .....	19
Şekil 2.11. Yayılım gösterimi a) Lambertian kaynağı b) Işın şekillendirme optiği.....	20
Şekil 2.12. Işın açıklık kaybı .....	23
Şekil 2.13. Işın dağıtıcı ile açıklık arttırma .....	24
Şekil 2.14. Zayıflama ve görünürlük a) Ağır sis ve bulut b) Hafif sis ve pus.....	27
Şekil 3.1. Genel Taguchi analiz yöntemi yaklaşımı .....	33
Şekil 3.2. Saçılma düzlemi ve parçacık .....	36
Şekil 3.3. Saçılma kesit alanı .....	41
Şekil 3.4. Serbest uzay optik sistem blok diyagramı .....	43
Şekil 4.1. 850 nm dalgaboyu için Rayleigh saçılma değerleri.....	52
Şekil 4.2. 1064 nm dalgaboyu için Rayleigh saçılma değerleri.....	52
Şekil 4.3. 1550 nm dalgaboyu için Rayleigh saçılma değerleri.....	53
Şekil 4.4. Önerilen metodun işlem adımları.....	53
Şekil 4.5. 0,1 µm yarıçap ve 850 nm dalgaboyu için saçılma grafiği.....	59
Şekil 4.6. 1 µm yarıçap ve 850 nm dalgaboyu için saçılma grafiği.....	59
Şekil 4.7. 10 µm yarıçap ve 850 nm dalgaboyu için saçılma grafiği.....	60
Şekil 4.8. 0,1 µm yarıçap ve 1064 nm dalgaboyu için saçılma grafiği.....	61
Şekil 4.9. 1 µm yarıçap ve 1064 nm dalgaboyu için saçılma grafiği.....	61
Şekil 4.10. 10 µm yarıçap ve 1064 nm dalgaboyu için saçılma grafiği.....	62
Şekil 4.11. 0,1 µm yarıçap ve 1550 nm dalgaboyu için saçılma grafiği.....	63
Şekil 4.12. 1 µm yarıçap ve 1550 nm dalgaboyu için saçılma grafiği.....	63

Şekil 4.13. 10 µm yarıçap ve 1550 nm dalgaboyu için saçılma grafiği.....	64
Şekil 4.14. 1 µm yarıçaplı parçacık için dalgaboyu karşılaştırması .....	64
Şekil 4.15. Parçacığa etki eden saçılma şematığı.....	65
Şekil 4.16. Mie saçılması benzetim modeli .....	65
Şekil 4.17. Saçılma parçacık benzetim modülü .....	66
Şekil 4.18. 850 nm dalgaboyunda (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri.....	67
Şekil 4.19. 1064 nm dalgaboyunda 0,1 µm parçacık boyutu için (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri.....	68
Şekil 4.20. 1064 nm dalgaboyunda 1 µm ve 10 µm parçacık boyutu için (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri .....	69
Şekil 4.21. 1550 nm dalgaboyunda 0,1 µm parçacık boyutu için (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri.....	70
Şekil 4.22. 1550 nm dalgaboyunda 1 µm parçacık boyutu için (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri.....	71
Şekil 4.23. 1550 nm dalgaboyunda, 10 µm parçacık boyutu için (a) 2B ve b) 3B saçılma grafikleri.....	72
Şekil 4.24. Yer-uydu istasyonu haberleşme blok diyagramı.....	74
Şekil 4.25. 850 nm dalgaboyu için göz diyagramı .....	78
Şekil 4.26. 1064 nm dalgaboyu için göz diyagramı.....	78
Şekil 4.27. 1550 nm dalgaboyu için göz diyagramı .....	79

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Belirli dalgaboyları için moleküler soğurma değerleri .....	<b>16</b>
Çizelge 2.2. Çeşitli parçacıkların saçılma parametreleri.....	<b>16</b>
Çizelge 2.3. Hava koşullarına göre görünürlük mesafeleri.....	<b>26</b>
Çizelge 2.4. Serbest uzay optikte kullanılan lazer tipleri.....	<b>30</b>
Çizelge 3.1. Taguchi ortogonal dizi seçim matrisi.....	<b>34</b>
Çizelge 4.1. Atmosferik gazların yarıçapları ve kesit alanları.....	<b>48</b>
Çizelge 4.2. Atmosferdeki gaz molekül sayıları .....	<b>49</b>
Çizelge 4.3. 850 nm ve 1064 nm dalgaboyları için saçılma değerleri.....	<b>50</b>
Çizelge 4.4. 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboyları için Mie saçılması .....	<b>51</b>
Çizelge 4.5. 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboyları için zayıflama değerleri .....	<b>51</b>
Çizelge 4.6. L8 ortogonal dizisi .....	<b>54</b>
Çizelge 4.7. Deney tasarım seviyeleri .....	<b>54</b>
Çizelge 4.8. Serbest uzay optik zayıflama L8 deney tasarım grafiği.....	<b>55</b>
Çizelge 4.9. Taguchi analiz yöntemi analiz sonuçları.....	<b>55</b>
Çizelge 4.10. Analiz sonuçları ve önem seviyeleri .....	<b>56</b>
Çizelge 4.11. Mie saçılma giriş parametreleri .....	<b>58</b>
Çizelge 4.12. 850 nm dalgaboyu için çıkış parametreleri .....	<b>58</b>
Çizelge 4.13. 1064 nm dalgaboyu için çıkış parametreleri .....	<b>60</b>
Çizelge 4.14. 1550 nm dalgaboyu için çıkış parametreleri.....	<b>62</b>
Çizelge 4.15. Yer-uydu istasyonu sistem giriş parametreleri .....	<b>76</b>
Çizelge 4.16. SNR ve BER değerleri .....	<b>76</b>
Çizelge 4.17. Türbülans ve saçılma kaynaklı SNR ve BER değerleri.....	<b>80</b>

## 1. GİRİŞ

Uydular, meteorolojik tahminlerde, savunma sanayiinde ve mobil iletişim gibi birçok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Uydular günümüze kadar teknolojik gelişmeler ile ilerlemiş ve bu alanda yapılan çalışmalar ile kendisini geliştirmiştir. Son teknolojik gelişmeler ve akıllı telefonların hayatımıza daha fazla girmesi ile uydulara olan önem daha da artmıştır.

Uydu-uydu arası, yer istasyonu-uydu arası ve uydu-yer istasyonu arası haberleşme kablosuz teknikler ile yapılmaktadır. İlk olarak radyo haberleşme teknolojisi 1890 yılında kablosuz telgraf ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 1920 yılında radyonun icadı ile kablosuz haberleşmenin temeli atılmıştır. İlk olarak 1928 yılında, başarılı bir şekilde test edilen art arda sürükleme tüpleri arasında, Radyo Frekansı (RF) gerilimi uygulaması yapılmıştır. 1980 ve 1990 yılları arasında kablosuz sayısal haberleşme teknolojileri gelişmeye başlamış, mobil geniş bant, kablosuz bağlantı ve Bluetooth'un kullanımı 2000'li yılları bulmuştur (Seymour ve Shaheen 2011).

1904 yılında helyograf telgraf yöntemi kullanılarak ilk defa serbest uzay haberleşme kullanılmıştır. II. dünya savaşı sırasında, Carl Zeiss adlı bilim insanı, optik dalgaları modüle ederek mors kodunu değiştirip optik konuşma cihazını geliştirmiştir. 1959 yılında lazerin icadı ile serbest uzay optik haberleşmenin günümüzdeki kullanım alanlarının temelleri atılmıştır (Gould 1959).

Serbest uzay optik haberleşme olarak adlandırılan bu haberleşme türünün, RF türüne göre bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Serbest uzay optik haberleşmenin eksik yönlerini iyileştirme çalışmaları ile gelecekte daha fazla alanda kullanılması öngörülmektedir.

Serbest uzay optik haberleşme sistemleri, RF sistemlere göre, yüksek veri hızına, yüksek modülasyon yeteneğine sahip lazer kaynaklarına, hızlı ve hassas alıcılara, tüm sistemin optik cihazlar ile iletişimin sağlanmasıyla yüksek bantgenişliğine sahiptir. Ancak optik dalga serbest uzayda ilerlerken atmosferik olaylardan etkilenerek



performansı sınırlanabilir. Alıcı ve verici arasındaki görüş hattında meydana gelen bu olaylar optik dalga üzerinde çeşitli zayıflamalara yol açar. Bu zayıflama etkileri alıcıya gönderilen veride kayıplara yol açarak haberleşme performansını etkiler. Bu etkiler temelde hava olayları kayıpları, geometrik kayıplar, serbest uzay kaybı ve odaklama kayıpları olarak sıralanabilir.

Alıcı ve verici optik sistemlerin haberleşme kanalının performansına etkileri mevcuttur. Sistemi etkileyen kayıpların bir kısmı hava olayları gibi müdahale edilemeyen kaynaklardan gelir. Verimli bir iletişim için, değiştirilebilen parametreler üzerinde analizler yapılarak, yüksek kalitede veri aktarımının yapılması sağlanmaktadır (Majumdar ve Ricklin 2008).

### **1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasında, serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde, haberleşme esnasında vericiden gönderilen işaretin atmosferden geçerken karşılaştığı zayıflatıcı etkiler incelenmiştir. Taguchi'nin deney tasarım yöntemi kullanılarak, zayıflamaya etki eden parametreler bir dizi analiz sonrası önem derecelerine göre sıralandırılmıştır. Bu yöntemle göre, atmosferik saçılma kaynaklı zayıflamanın hesaplandığı parametrelerden, dalgaboyu, görünürlük, saçıcı parçacık boyut dağılımı, mesafe ve saçılma kesit alanı arasından, sistem verimliliğine en çok katkı sağlayan parametrenin bulunması amaçlanmıştır. Tez çalışması bu kapsamda Taguchi analiz yöntemi ile teorik analizlere yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Önem derecesi yüksek parametrelerin saçılma kaynaklı zayıflamaya katkısının bulunması amacıyla farklı boyutlardaki gaz ve su moleküllerinin saçılma verimlilikleri hesaplanmıştır.

Serbest uzay optik haberleşme sistemleri üzerinde kayıplara yol açan, türbülans, uzay yol geometrik kaybı ve gürültü etkilerine ek olarak, saçılma kayıplarının ihmal edilmediği bir sistem tasarımı yapılarak, analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçların, deneysel çalışmalarda elde edilecek sonuçlara yaklaşması amaçlanmaktadır. Bir sistemi etkileyen tüm zayıflatma türleri değerlendirilerek, deneysel çalışmalarda ortaya çıkabilecek sapmaların öngörülmesi amaçlanmaktadır. Lazerli uydu haberleşme

sistemlerinin deneysel çalışmalarının mali gereksinimlerinin fazla olması ve uygulamada hataya yer vermeyen sistemler olmasından dolayı, deney öncesi analitik çözümlerin doğruluğu sistem tasarımı için önem teşkil etmektedir.

## **1.2. Tezin Önemi ve Çalışmada İzlenen Yöntem**

Bu tez çalışmasında troposfer katmanında yer alan gaz molekülleri kaynaklı Rayleigh ve Mie saçılmaları nedeniyle oluşan zayıflamanın lazerli uydu haberleşme sistem performansına etkisi, farklı parçacık yarıçapları ve iletim dalgaboyları için incelenmiş, elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak yer-uydu arası haberleşme sistemi tasarlanmış ve benzetimlerle iletim performansı analiz edilmiştir.

Tez çalışmasında Taguchi analiz yöntemi ile belirlenen en önemli parametrelerden biri olan dalgaboyu ve bağlantılı olduğu değerler Mie saçılma analizi ile hesaplanarak, saçılma verimlilikleri elde edilmiştir. Atmosferde bulunma oranı en yüksek olan azot molekülü seçilerek, bu gaz molekülünün sistem üzerindeki zayıflatma değeri ile üç farklı dalgaboyu için yer-uydu arası haberleşme sistemleri tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemlerin işaret gürültü oranı ve bit hata oranları hesaplanmıştır. Taguchi analizi ile elde edilen önemli parametreden biri olan dalgaboyunun, sistem üzerindeki verimini ölçmek amacıyla farklı dalgaboyları karşılaştırılarak, saçılma zayıflaması açısından sistem verimliliği analiz edilmiştir.

Literatürdeki benzer çalışmalardan yola çıkılarak, farklı bilimsel alanlarda kullanılan Taguchi analiz yöntemi, serbest uzay optik haberleşme sistemi için kullanılmıştır. İncelenen çalışmalarda serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde iyileştirme yöntemlerinden adaptif optik kullanımı, modülasyon teknikleri, çoklu verici-alıcı sistemleri kullanımı ve radyo frekansı-optik hibrit sistemlerin kullanımı yalnızca türbülans kaynaklı zayıflamaların iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda sistem verimi hesaplanırken saçılma kaynaklı zayıflamalar ihmal edilerek iyileştirmeler yapılmaktadır. Yapılan bu iyileştirmelerde saçılmaların ihmal edilmesi, analitik yaklaşımlarda bir eksik olarak görülmektedir. Tez çalışmasında literatürde görülen bu eksiklik yapılan analizler ile özgün katkı olarak sunulmuştur.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler ile 21. yüzyılda çoğul ortam toplumunun gereksinimlerini karşılamak beklentileri aşmaktadır. Serbest uzay optik haberleşme sistemleri, yüksek veri hızı, yüksek bantgenişliği ve karmaşık olmayan kurulumu ile günümüz anahtar teknolojisi olmaktadır (Serap Altay 2007). İletişimde lazerin kullanılması ile serbest uzay optik haberleşmenin kablosuz özelliği, özellikle şehirlerde fiber optik kablo kullanılan yerel alan ağlarında (LAN) ve kentsel alan ağlarında (MAN) önemli bir avantaj sağlamaktadır.

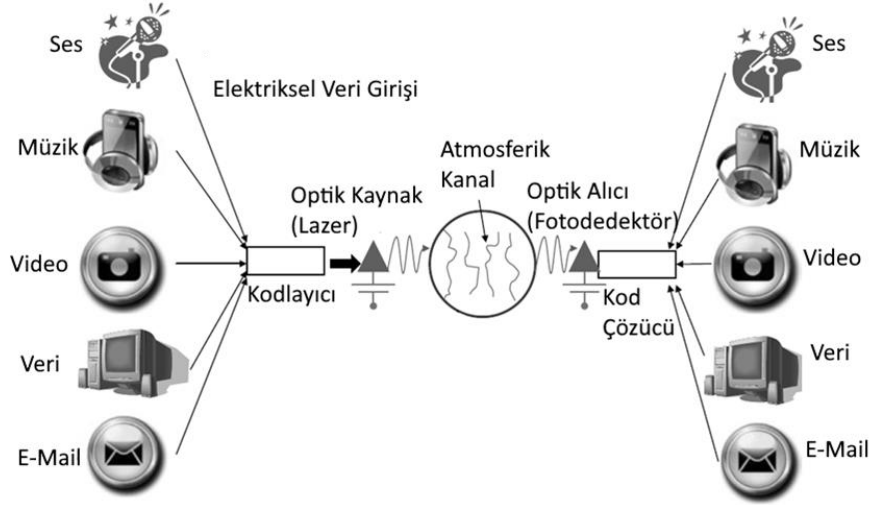
Karasal askeri uygulamalarda, iletişimin uzak mesafelere kablosuz haberleşme ile yapılması, açık denizde askeri gemilerin birbirleri ile iletişiminin sağlanması, uzayda uydu-yer, yer-uydu ve uydu-uydu haberleşmesinde kullanılmaktadır.

Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinin veri iletimi, atmosfer katmanlarından geçerek gerçekleşmektedir. Verici ve alıcı arasındaki atmosferik ortamda çeşitli zayıflatıcı parametreler mevcuttur. Literatürde bu zayıflatıcı faktörlerin sistem performansına etkilerini inceleyen birçok çalışma yer almaktadır. Saçılma, soğurma, atmosferik türbülans, hava olayları gibi etkiler lazer ışınını etkileyerek sistemde zayıflamaya yol açarak veri alımını ve gönderimini sınırlar. Yapılan çalışmalar en çok zayıflama oranına sahip olduğu düşünülen atmosferik türbülans üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak ciddi derecede kayıplara yol açan atmosfer katmanlarındaki gazların ve moleküllerin etkileri ve bu etkilerin sistem için önem derecesi hakkında çok az çalışma bulunmaktadır (Majumdar ve Ricklin 2008, Brazda ve ark. 2014).

Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde, veri iletiminde kullanılan parametrelerin öneminin derecelendirilmesinde kullanılan Taguchi analiz yöntemine, daha önce yapılan çalışmalar arasında rastlanmamaktadır. Yapılan çoğu çalışma atmosferik etkilerin incelenmesi yönündedir. Bu etkilerin önem sıraları ve önem dereceleri ile ilgili olarak bir çalışmaya rastlanmamıştır.

## 2.1. Serbest Uzak Optik Haberleşme

Yeni nesil internet bağlantıları, yüksek bantgenişliğine ihtiyaç duyan video konferansı uygulamaları, çoklu medya içeriği ve ağ uyumlu hareketli cihazlar teknolojinin sınırlarını zorlamaktadır. Optik haberleşmede kullanılan teknikler ve bantgenişliği bu durumlara çözüm olarak sunulabilir. Şekil 2.1’de serbest uzak optik haberleşme teknolojisinin yapısı ve farklı kullanıcı bağlantıları gösterilmektedir (Majumdar 2015).



Şekil 2.1. Serbest uzak optik kullanım alanları

Serbest uzak optik haberleşmenin diğer sistemlere göre avantajları bulunmaktadır.

Bunlar;

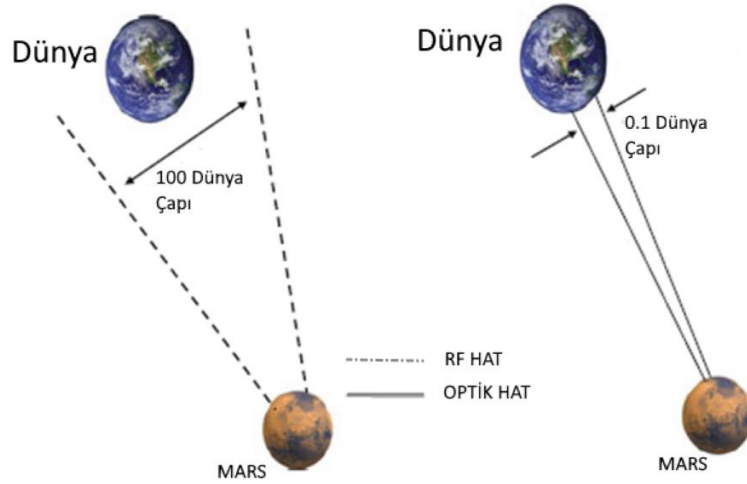
- Yüksek veri hızı
- Yüksek iletim güvenliği
- Frekans ayırma gerekliliğinin olmaması
- Küçük boyutlarda ve düşük güç gereksinimine sahip olması
- Kolay uygulanabilir yapıya sahip olması
- Askeri, finans vb. uygulamalar için yüksek güvenlik düzeyinde özelliklere sahip olmasıdır (Başgümüş 2016).

Diğer sistemlere göre üstün özellikleri olmasına rağmen, sistemi sınırlayan etkiler mevcuttur. Atmosferik kanalda oluşan optik türbülans serbest uzay optik haberleşme performansını sınırlar (Fiser ve ark. 2014). Diğer atmosferik etkiler ise lazer ışını ile oluşan saçılma ve soğurma kayıplarıdır (Majumdar ve Ricklin 2008).

## 2.2 Serbest Uzay Optik Haberleşme ve Radyo Frekansı (RF) Haberleşme

Serbest uzay optik haberleşmenin diğer haberleşme sistemlerinden olan RF haberleşme sistemlerine göre en büyük avantajı dalgaboyundaki büyük farklılıktır. Temiz hava koşullarında (görünürlük 16 km'den fazla), atmosferik geçirgenlik penceresi adı verilen yakın kızıl ötesi bölge, 700 nm ile 1600 nm dalgaboyu arasında yer alır. Geçirgenlik penceresi RF sistemler için 30 mm ile 3 m arasındadır. RF dalgaboyu, optik haberleşme dalga boylarından 1000 kat daha büyüktür. Dalgaboyundaki bu yüksek oran, iki sistem arasında farklılıklara yol açar.

- (i) Yüksek modülasyonlu bantgenişliği: Taşıyıcı frekansındaki artışın bir iletişim sisteminin bilgi taşıma kapasitesini arttırdığı bilinen bir gerçektir. RF ve mikrodalga haberleşme sistemlerinde, izin verilen bantgenişliği taşıyıcı frekansının %20'sine kadar olabilir. Optik haberleşmede, bantgenişliği taşıyıcı frekansının %1'i olarak alınsa bile ( $\approx 10^{16}$  Hz), izin verilen bantgenişliği 100 THz olacaktır. Bu, tipik bir RF taşıyıcının neredeyse  $10^5$  katı olan optik bir frekansta kullanılabilir bantgenişliği sağlar.
- (ii) Dar ışın diverjansı: Işın diverjansı  $\sim \lambda/D_R$  olarak verilir. Burada  $\lambda$  taşıyıcı dalgaboyu,  $D_R$  ise ışın açıklık çapıdır. Dolayısıyla, optik taşıyıcı tarafından sunulan ışın yayılımı, RF taşıyıcıdan daha dardır. Örneğin; lazer ışın diverjansı, dalgaboyu 1550 nm ve açıklık çapı 10 cm olan bir sistemde saçılan ışın 0,34  $\mu$ rad olacaktır. Diğer yandan RF işareti X bandında, 3 cm dalgaboyunda ve 1 m'lik açıklık çapı ile ışın diverjansı 67,2 mrad olacaktır. Optik frekanstaki çok daha küçük ışın sapması, belirli bir iletilen güç için alıcıdaki işaret yoğunluğunda artışa yol açar. Şekil 2.2'de optik ve RF işaretin ışın diverjansları görülmektedir.



**Şekil 2.2.** Mars'tan Dünya'ya optik ve RF ışın diverjansı

- (iii) Daha az güç ve kütle gereksinimi: Verilen verici güç seviyesi için, optik yoğunluk alıcıda daha çok görülür, bunun nedeni dar ışık diverjansından kaynaklanır. Daha küçük dalga boylarında çalışan serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde RF sistemlere göre aynı kazanç için daha küçük boyutlu antenler kullanılır. Temelde bir optik sistem için 0,3 mm ile 1,5 m arasında anten kullanılır (Kaushal ve ark. 2017).
- (iv) Yüksek yönlülük: Optik dalgaboyu oldukça küçük olduğundan dolayı, yüksek yönlülük küçük boyutlu antenler ile gerçekleştirilebilir. Anten yönlülüğü kazanç ile ilgilidir. Optik taşıyıcının, RF taşıyıcıya göre avantajları (2.1)'de görülmektedir.

$$\frac{Gain_{optik}}{Gain_{RF}} = \frac{4\pi/\theta_{div(optik)}^2}{4\pi/\theta_{div(RF)}^2} \quad (2.1)$$

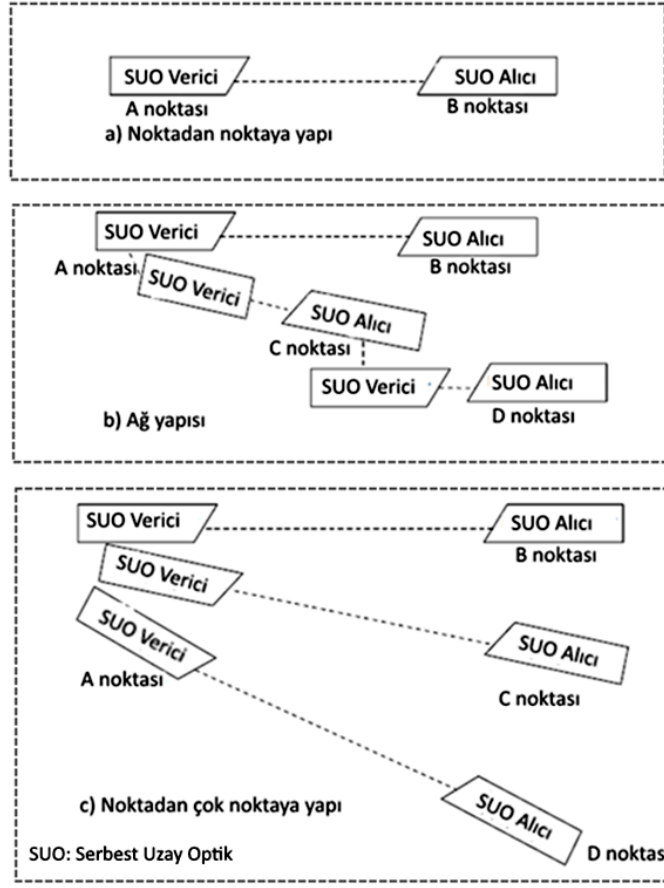
Burada  $\theta_{div(optik)}^2$  ve  $\theta_{div(RF)}^2$  sırası ile optik ve RF ışın diverjanslarıdır ve  $\frac{\lambda}{D_R}$  ile orantılıdır. Açıklık çapı  $D_R = 10$  cm olan bir optik taşıyıcı için, dalgaboyu  $\lambda = 1550$  nm için  $\theta_{div(optik)} \approx 40$   $\mu$ rad olur. Işın diverjansı 40  $\mu$ rad olan sistemin anten kazancı  $Gain_{optik}$ , yaklaşık olarak 100 dB olur. Aynı kazancı RF sistemde elde etmek için ise X bandında dalgaboyu  $\lambda = 3$  cm olup, açıklık çapı  $D_R$  gerçekleştirilemeyecek kadar büyük olacaktır.

- (v) Lisanssız Spektrum: RF sistemlerde komşu taşıyıcılardan geçen parazit, spektrum tıkanıklığını meydana getirerek en büyük problemi oluşturur. Bu durum, spektrum lisansı ile çözülebilir. Ancak optik sistemlerde ücretsiz spektrum lisansı kullanılmaktadır. Bu durum kurulum maliyetinde kazanç sağlar.
- (vi) Güvenlik: Dar ışın diverjansı nedeni ile optik ışını tespit etmek, RF sistemlere göre daha zordur. İletilen optik işareti tespit etmek amacı ile, ışın nokta çapına fiziksel olarak ( $\leq 150 m$ ) çok yaklaşmak gerekir. Yapılan çalışmalarda görülmektedir ki, optik işaret 16 km mesafede, tepe iletim gücünden 140 dB'e düşmektedir. Ancak RF işareti daha geniş bir bölge ile yayılarak ilerler. Bu durumda, işaret 60 km mesafede kabaca alınabilir ve 160 km mesafede yaklaşık 40 dB'e düşer (Kaushal ve ark. 2017).

Ek olarak, serbest uzay optik haberleşme sistemlerinin avantajları, fiber optik kabloların kullanılmadığı yerlerde kullanılması, kolaylıkla ağ segmentasyonunun arttırılıp azaltılması, hafif ve bütünleşik bir yapıya sahip olmasıdır. Bu avantajların yanı sıra, serbest uzay optik haberleşme sistemlerinin dezavantajları da bulunmaktadır. Dar ışın diverjansından dolayı hizalama ve odaklamada zorlanılmaktadır. Işın, duvar, bina, tepe gibi yapılardan geçememektedir. Alıcı ve verici arasında temiz görüş alanı bulunmak zorundadır. Ayrıca RF sistemlerin aksine, serbest uzay optik haberleşme sistemleri, atmosferik etkilerden etkilenmekte, sistem performansı düşmektedir.

### **2.3 Serbest Uzay Optik Temel Yapısı ve Topolojiler**

Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde 3 temel yapı kullanılır. Bunlar, noktadan noktaya, ağ ve tek noktadan çok noktaya yapılarıdır. Noktadan noktaya yapı yüksek bantgenişliği sağlar. Ağ yapısı yüksek gerçekleştirilebilirlik ve kolay nokta ekleme içerirken, mesafe kısıtlaması nedeni ile daha çok gereksinime ihtiyaç duyar. Tek noktadan çoklu noktaya yapısı maliyeti düşük bağlantılar ve nokta ekleme kolaylığı içerirse de noktadan noktaya seçeneğinden daha düşük bantgenişliğine sahiptir. Şekil 2.3'te bu yapılar görülmektedir.



Şekil 2.3. Serbest uzay optiği için temel yapılar (Akhavan ve ark. 2002, Brien 2009)

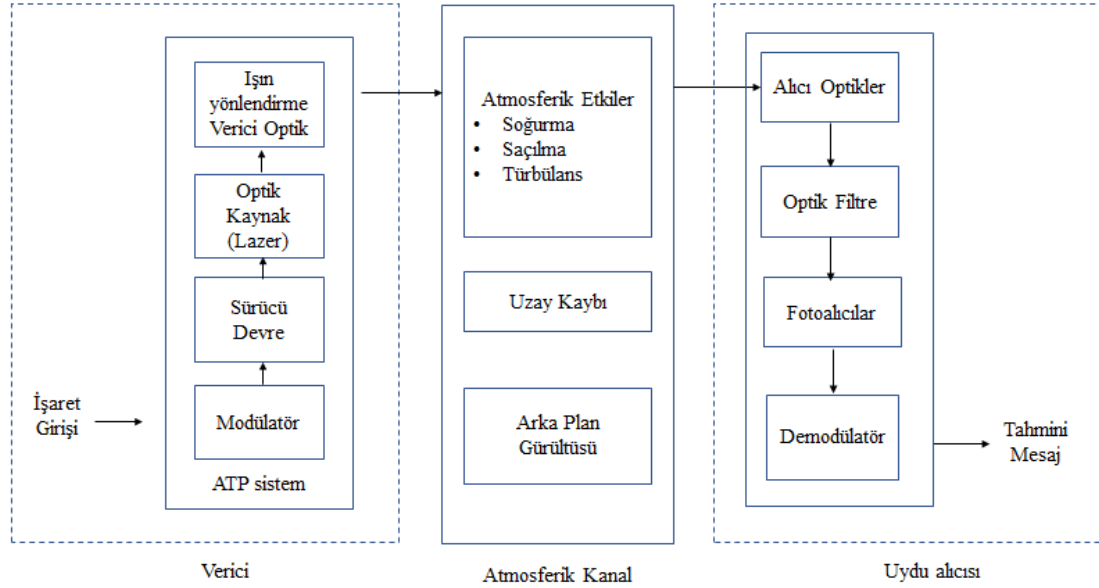
#### 2.4. Serbest Uzay Optik Haberleşme Parametreleri/Alt Sistemleri

Serbest uzay optik haberleşme sistemleri, verici ve alıcı arasında açık görüş açısına sahip, noktadan noktaya iletimin yapıldığı bir sistemdir. Kaynaktan gelen bilgi işareti, optik taşıyıcı üzerinde modüle edilir ve modüle edilen işaret optik fiber gibi bir kılavuz içerisinde değil, atmosferik kanal içerisinde yayılarak alıcıya ulaşır. Yer-uydu ve uydu-yer arası bağlantılarda, atmosferde yayılan optik ışın serbest uzaydaki gibi yayılır.

Şekil 2.4'te, serbest uzay optik blok diyagramı görülmektedir. Diğer bütün haberleşme teknolojileri gibi serbest uzay optik haberleşme hatları üç temel alt sistem olan, verici, kanal ve alıcıdan oluşur (Li ve ark. 2007).



Serbest uzay optik haberleşmede ilk işlem, optik taşıyıcı üzerinde mesaj işaretinin modüle edilerek mesajın atmosferden geçerek alıcıya ulaşmasıdır. Vericinin temel bileşenleri, modülatör, sıcaklık dalgalanmalarına karşı optik kaynağı stabilize eden sürücü devresi ve odaklayıcıdan oluşur.

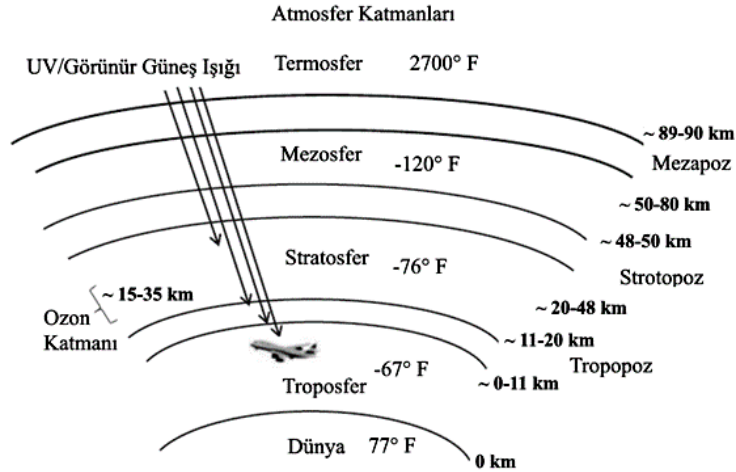


**Şekil 2.4.** Serbest uzay optik blok diyagramı (Kaushal ve ark. 2017)

Serbest uzay optik haberleşme kanalı olan atmosfer, beklenmeyen çevresel faktörler olan bulut, kar, sis ve yağmur gibi etkilere maruz kalır. Bu etkiler, sabit bir karakteristiğe sahip değildir. Alınan işarete zayıflamalara ve bozulmalara neden olur. Serbest uzay optik sistemlerini en çok sınırlayan etken kanal ve kanal içerisindeki zayıflatıcı etkilerdir (Yuan ve ark. 2019). Optik haberleşmede öncelik, iletilen verinin iyileştirilmesidir. Bu durum, alıcı optik cihazlarda, optik filtrede, fotoalıcıda ve demodülatörde yapılır. Alıcı, gelen ışını toplar ve fotoalıcıya odaklar. Optik filtre arka plan yayılımlarını bastırarak, işareti fotoalıcı üzerine gönderir. Burada optik işaret elektriksel işarete dönüştürülür (Levine ve ark. 1998).

## 2.5. Atmosferik Kanal

Atmosfer Dünya'yı çevreleyen, gaz, su buharı ve toz taneciklerini barındıran bir tabakadır. Atmosfer tabakası, Dünya yüzeyinden uzaya doğru ilerlediğinde çeşitli tabakalar halinde sıralanır. Temelde homosfer ve heterosfer olarak ikiye ayrılır. Homosfer, Dünya yüzeyinden 90 km yüksekliğe kadar olan tabakadır ve gaz oranları bu tabakada değişmez şekilde belirli oranlarda bulunur. Homosferde ayrıca çeşitli gazlar, su buharları, kirleticiler ve diğer kimyasallar bulunur. Bu gazlar ve moleküllerin en yoğun konsantrasyonları, Dünya yüzeyinden 20 km'ye kadar uzanan troposferde yer alır. Gaz oranları, %78,09 azot, %20,95 oksijen, %0,93 argon, %0,04 karbondioksit ve diğer gazlar olarak bilinir (Wallace ve Hobbs 2006). Homosfer ile 1000 km arasındaki tabaka ise heterosfer olup çeşitli gazları barındırır. Şekil 2.5'te atmosfer katmanları ve yükseklikler görülmektedir.



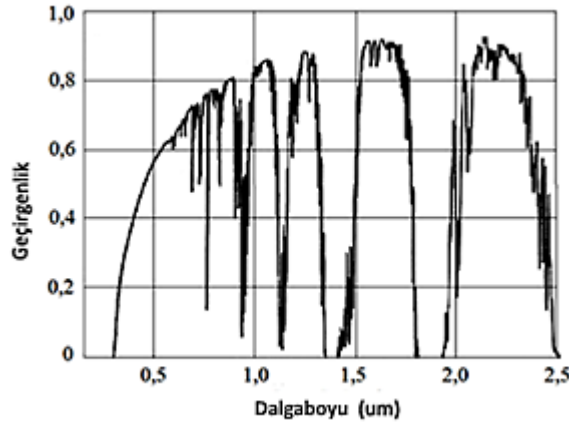
Şekil 2.5. Atmosfer katmanları (Gagliardi 1995)

Atmosfer katmanları troposfer, stratosfer, mezosfer ve termosfer olarak sıralanırlar. Atmosferin en alt tabakası olan troposfer, Dünya'ya yakınlığından dolayı atmosferdeki tüm havanın yaklaşık %75'ini ve su buharının neredeyse tümünü içerir. Serbest uzay optik haberleşme sistemleri üzerinde çalışan bilim insanları özellikle troposfer katmanı ile ilgilenir. Bunun nedeni çoğu hava olayının gerçekleştiği yer olmasıdır (Bouchet ve ark. 2006).

Stratosfer Dünya'ya en yakın ikinci tabakadır. Troposferin üstünde yer alır ve iki katman birbirlerinden tropopoz tabakası ile ayrılmaktadır. Bu tabaka troposferin üst kısmında yaklaşık 12 km ile 38 km yükseklikte Dünya yüzeyinin yaklaşık 50 km üzerindeki stratopoza kadar uzanır.

Dünya yüzeyindeki en soğuk yer olan mezosfer yer küreden yaklaşık olarak 80 km yükseklikte yer alır. Termosfer, atmosferin en yüksek tabakasıdır. Mezopozdan yaklaşık 80 km yükseklikte termopoza kadar uzanır. Termopozun yüksekliği, Güneş aktivitesindeki değişikliklerden dolayı önemli ölçüde değişir (Ahrens 2012).

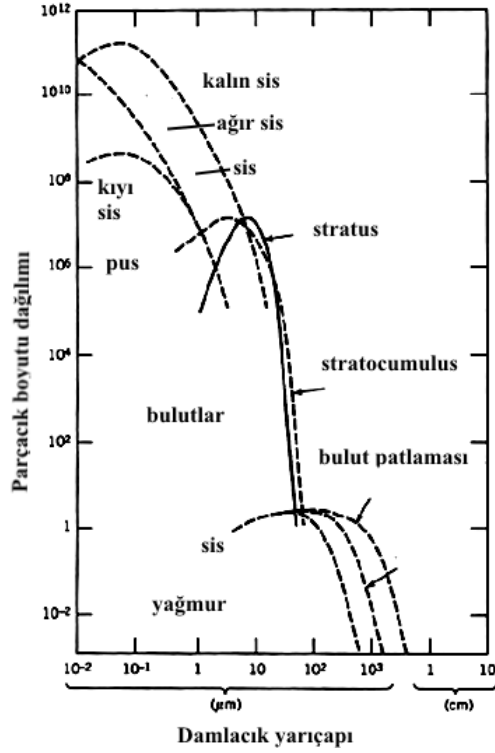
Atmosferin katmanlarında su buharına ek olarak çeşitli gazlar ve moleküller bulunur. Bu moleküller lazerli haberleşme sistemleri için zayıflatıcı etkilere sahiptir. Bu etkiler, iletilen işaretin çalışma dalgaboyu, atmosferik parçacıkların enine kesit boyutları ile karşılaştırılabilir olduğunda daha belirgin hale gelir. Bu durum Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Belirli dalgaboylarında atmosferik soğurum yaşanırken, bazı dalgaboylarında atmosferik geçirgenlik en üst düzeyde bulunmaktadır (Gesner ve ark. 2019).



**Şekil 2.6.** Atmosferik geçirgenlik ve dalgaboyu

Atmosferik koşullar, serbest uzay optik haberleşme kanallarında üç şekilde sınıflandırılır. Bunlar, temiz hava, bulut ve yağmurdur. Temiz hava koşulları uzak görünürlük ve düşük zayıflama ile tanımlanır. Bulutlu hava koşulları sis ve ağır bulutlar,

düşük görünürlük ise yüksek nem ve büyük zayıflama ile tanımlanır. Yağmur koşulları, yağmur damlasının ölçülebilir parçacık boyutu ile tanımlanır ve yağmur hızına bağlıdır. Şekil 2.7'de ortalama parçacık boyutu ve atmosferdeki parçacık yoğunluğu gösterilmektedir. Ortalama damla boyutu ve dağılım grafiği çeşitli bulutlu ve yağmurlu hava koşulları için gösterilmektedir (Khan ve ark 2012, Brazda ve Fiser 2015).



Şekil 2.7. Ortalama parçacık boyutu ve yoğunluğu

## 2.6. Atmosferik Zayıflama/Kayıplar

Serbest uzay optik haberleşme sistemleri atmosferik kanal vasıtası ile iletilir. Atmosferik kanal, atmosferde asılı çeşitli gazlardan ve aerosollerden ve diğer küçük parçacıklardan oluşur. Aynı zamanda Dünya yüzeyine yakın olan atmosfer katmanında, yağmur, kar ve sis gibi büyük etkiler de mevcuttur. Atmosferde bulunan bu bileşenler ve olaylar iletim esnasında lazer ışını etkileyerek güç seviyesinin azalmasına, yani ışının moleküller tarafından soğurulması veya saçılmasına neden olarak optik işaretin zayıflamasına neden olur. Bu zayıflamalar farklı kayıplar nedeni ile gerçekleşebilir.

Bunlar, geometrik kayıp, saçılma kayıpları, soğurulma kayıpları, serbest uzay kaybı, hava koşulları kaybı ve odaklama kayıpları olarak sıralanabilir (Jursa 1985).

Lazer ışını, en yoğun katman olan troposferde ilerlerken aşağıdaki zayıflama etkilerine maruz kalır:

- Atmosferdeki gaz bileşimleri
- Aerosollerin, havada süspansiyon halinde değişken büyüklükteki (0,1  $\mu\text{m}$  ile 100  $\mu\text{m}$  arasında değişen) küçük parçacıkların varlığı
- Yağmur, kar, dolu gibi hidrometeorlar
- Toz, duman, kum gibi litometeorlar
- Türbülans nedeni ile yayılım ortamının kırılma indisinin eğim derecesinin değişimi.

Optik sistemleri etkileyen atmosferik iletim özelliklerini karakterize etmek için atmosferin gaz bileşenleri iki kategoride sınıflandırılır (Akinwumi ve ark. 2016). Sabit yoğunluk oranına veya çoğunluğa sahip olan bileşenler, 15 km ile 20 km arasında değişen yükseklikte yer alırlar. Bu bileşenler arasında en önemlisi azot ( $N_2$ ), oksijen ( $O_2$ ), argon ( $Ar$ ) ve karbondioksit ( $CO_2$ ) 'dir. Görünür ve kızılötesi bölgelerde, 15  $\mu\text{m}$  dalgaboyuna kadar,  $CO_2$  sadece önemli soğurum hatlarında geçerlidir. Değişken yoğunluğa sahip bileşenler azınlıktadır ve konsantrasyonları coğrafi bölgelere göre değişir. Su buharı, atmosferin temel değişkenidir. Konsantrasyonu iklimsel ve meteorolojik parametrelere bağlıdır. Denize yakın bölgelerde konsantrasyonu %2'ye ulaşabilirken, 20 km'den daha yüksek irtifalarda varlığı ihmal edilebilir. Diğer önemli değişken bileşen olan ozon ( $O_3$ ) konsantrasyonu enlem, boylam ve mevsime göre de değişir (Bouchet ve ark. 2006).

### **2.6.1. Soğurum ve saçılma kayıpları**

Atmosferik kanaldaki kayıp, çoğunlukla ışının soğurulması ve saçılmasından kaynaklanır. Görünür ve kızıl ötesi dalgaboyu bölgesinde, başlıca atmosferik soğurucular su molekülleri, karbondioksit ve ozon gazlarıdır (Gesner ve ark. 2019). Optik işaret atmosferden geçerken, optik derinlik  $\tau$  olarak adlandırılan birim ile

derecelendirilir ve bu durum alıcı  $P_R$  ve verici  $P_T$  gücü (2.2)'deki gibi ilişkilidir (Long 1963).

$$P_R = P_T \exp(-\tau) \quad (2.2)$$

Optik hatlarda alıcı gücünün, verici gücüne oranı atmosferik geçirgenlik olarak adlandırılır. Optik işaret  $\theta$  tepe açısı ile ilerlerken, geçirgenlik faktörü  $T_\theta = T_a \sec(\theta)$  ile verilir. Burada  $T_a$  atmosferik geçirgenlik ( $T_a = P_R/P_T$ ),  $\tau$  optik derinlik ile ilişkili atmosferik zayıflama katsayısı  $\gamma$  ve iletim alanı  $R$  olmak üzere (2.3) ve (2.4) ile verilir (Mahlobogwane ve Owolawi 2018, Kourogorgas 2017).

$$T_a = \exp\left(-\int_0^R \gamma(\rho) d\rho\right) \quad (2.3)$$

$$\tau = \int_0^R \gamma(\rho) d\rho \quad (2.4)$$

Zayıflama katsayısı, (2.5)'te görüldüğü üzere atmosferde bulunan aerosoller ve moleküler bileşenlerden gelen saçılma ve soğurma katsayılarının toplamı ile oluşur.

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (2.5)$$

(2.5)'te ilk iki parametre moleküler ve aerosol soğurma katsayılarını, son iki parametre ise moleküler ve aerosol saçılma katsayısını temsil eder. Atmosferik soğurma dalgaboyuna bağlı bir olgudur (Willebrand ve Ghuman 2002, Sudhakar ve Subramanyam 2013). Moleküler soğurma katsayılarının değerleri, belirli dalgaboyları için Çizelge 2.1'de temiz hava koşullarında verilmiştir. Serbest uzay optik haberleşme sistemleri için dalgaboyu aralığı en az soğurum için seçilmiştir. Bu durum atmosferik iletim penceresi olarak adlandırılır.

**Çizelge 2.1.** Belirli dalgalıoyları için moleküler soğurma değerleri

Dalgaboyu (nm)	Moleküler Soğurum (dB/km)
550	0,13
690	0,01
850	0,41
1550	0,01

Bu alışma penceresinde, moleküler ve aerosol soğurumdan kaynaklanan zayıflama 0,2 dB/km'den küçüktür. Dalgaboyu 700-1600 nm aralığında, birkaç iletim penceresi bulunur. Çoğu serbest uzay optik haberleşme sistemi 780-850 nm ve 1520-1600 nm aralığında tasarlanır. Saçılma işlemi, optik enerjinin açısal olarak yeniden düzenlenmesi olarak değerlendirilebilir. Bu durum  $r$  yarıçaplı parçacıkların iletim esnasında birbirleri ile ve ışın ile çarpışmasından kaynaklanmaktadır.

Eğer  $r < \lambda$  durumu var ise, saçılma süreci Rayleigh saçılması olarak adlandırılır.

Eğer  $r \approx \lambda$  durumu var ise saçılma süreci Mie saçılması olarak adlandırılır.

$r > \lambda$  durumunda ise saçılma süreci kırınım teorisi (geometrik optik) ile açıklanmaktadır. Çeşitli parçacıklardan kaynaklanan saçılma süreci izelge 2.2'de gösterilmiştir.

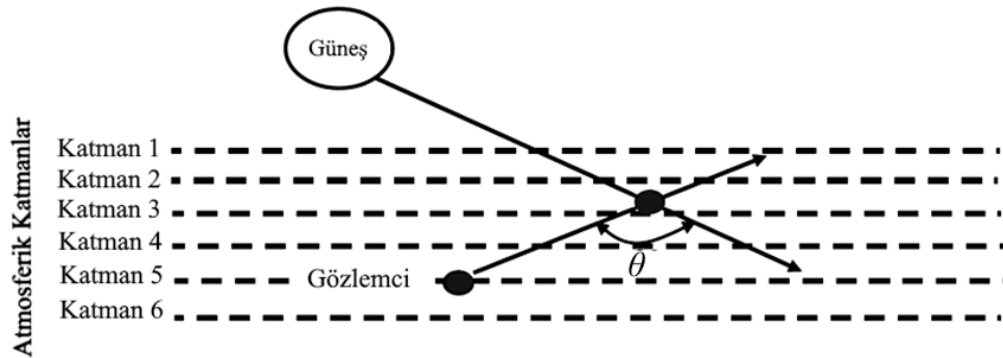
**Çizelge 2.2.** eşitli parçacıkların saçılma parametreleri

Tr	Yarıçap ( $\mu\text{m}$ )	Saçılma Türü
Hava molekülleri	0,0001	Rayleigh
Pus parçacığı	0,01-1	Rayleigh-Mie
Sis damlası	1-20	Mie-Geometrik optik
Yağmur	100-10,000	Geometrik optik
Kar	1000-5000	Geometrik optik
Dolu	5000-50,000	Geometrik optik

Hava molekülleri, toz parçacıkları, sis damlacıkları, kar, yağmur gibi saçıcı parçacıkların dışında, sis parçacıklarının dalgaboyu, serbest uzay optik haberleşme sistemi dalgaboyu ile karşılaştırılabilir durumdadır. Böylelikle, optik ışıyette zayıflama için büyük rol oynar. Atmosferik saçılma ile yalnızca optik ışıyette zayıflamaz, aynı zamanda gökyüzü parlamasına neden olarak, gündüz haberleşme esnasında gürültü oluşmasına neden olur (Hulst 1981).

Gökyüzü parlaması, atmosferik yol boyunca solar fotonların saçılmasından dolayı oluşur. Bu durum istenmeyen arka plan gürültüsünün artmasına neden olur ve bu durum alıcıdaki ışıyette gürültü oranını düşürür. Alıcıdaki arka plan gürültüsü, Güneş'in lokasyonuna, alıcı geometrisine ve vericiye bağlıdır.

Şekil 2.8'de, katmanlı atmosfer modelinde saçılma süreci görülmektedir. Atmosfer çoklu katmanlar olarak ele alınır ve her bir katman homojen olarak karışmış durumdaki gaz ve aerosollerden oluşur.



Şekil 2.8. Saçılma mekanizması

Saçılma açısı ( $\theta$ ), ileri yöndeki Güneş ışıyını ile gözlemci noktası arasındaki açıdır. Saçıcıların yüksek yoğunlukta olması daha fazla gökyüzü parlamasına neden olur. Eğer Güneş ile gözlemci arasındaki açısal mesafe düşerse, gökyüzü parlaması artar. Güneş'ten gelen  $30^\circ$  ile parıldama aerosol katkısı ile bastırılır. Açısal mesafe artar ise Rayleigh saçılması arka plan ışıyınının baskın olmasına sebebiyet verir (Rouissat ve ark. 2012).

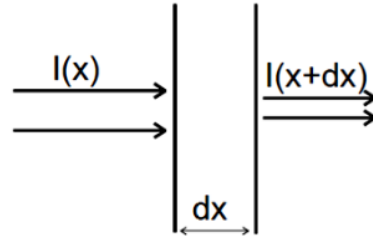


## 2.6.2. Atmosferik soğurum

Atmosferik soğurum, fotonlar ile atom veya moleküllerin arasındaki etkileşim ile;

- Gelen fotonun yok olması
- Sıcaklıkta artış
- Ulaşılan sıcaklıktaki eşdeğer cisim ile orantılı yayılım durumlarına neden olmaktadır.

Şekil 2.9'da  $\lambda$  dalgaboyuna sahip,  $dx$  uzaklığında bir soğurum ortamından geçen ışın görülmektedir.



Şekil 2.9. Soğurucudan ışın geçişi

Geçiş ortamının soğurum parametreleri nedeniyle, yayılımdaki fotonlar yolun uzunluğu kadar kayıp yaşarlar. Yayılımın yoğunluğu,  $x + dx$  olarak verilir.

$$I(\lambda, x + dx) = I(\lambda, x) - dI_a(\lambda, x) \quad (2.6)$$

(2.6)'da  $dI_a(\lambda, x)$ , ortam tarafından soğurulan ışının yoğunluğunu  $I(\lambda, x)$  ise gelen ışının yoğunluğunu temsil eder. Ortam parametreleri  $dx$  ve ortamın soğurumunu temsil eden spektral parametre  $\alpha(\lambda, x)$  için (2.7) yazılabilir.

$$dI_a(\lambda, x) = \alpha(\lambda, x)I(\lambda, x)dx \quad (2.7)$$

Bu iki denklem ve  $X$  yolu uzunluğu için (2.8) yazılır.

$$I(\lambda, X) = I(\lambda, 0) \exp\left[-\int_0^X \alpha(\lambda, x)dx\right] \quad (2.8)$$

Ortamın spektral iletimi (2.9) ile verilir.

$$\tau_a(\lambda, X) = I(\lambda, X)/I(\lambda, 0) = \exp[-\int_0^X \alpha(\lambda, x)dx] \quad (2.9)$$

Eğer iletim ortamı homojen ise, soğurum katsayısı  $\alpha(\lambda, x)$ ,  $X$  'ten ve ortam spektral iletiminden bağımsız olacaktır.

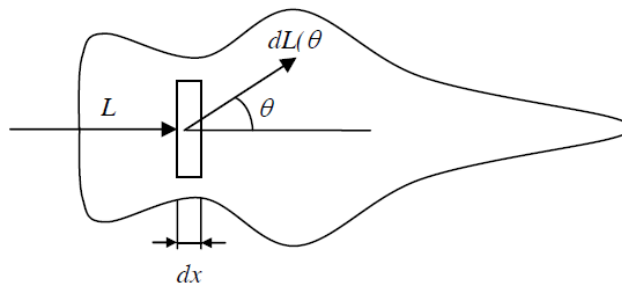
$$\tau_a(\lambda, X) = \exp[-\alpha(\lambda)X] \quad (2.10)$$

### 2.6.3. Atmosferik saçılma

Atmosferik saçılma, gelen ışının atom veya moleküller ile etkileşime girerek enerjisinin yön değiştirmesi olarak adlandırılabilir. Saçılmanın gerçekleştiği ortamın özellikleri, saçılmanın hangi özellikte olacağını belirler. Saçılma ortamının iletiminin/geçirgenliğinin hesaplanması için (2.11) kullanılır.

$$\tau_d(\lambda, X) = I(\lambda, X)/I(\lambda, 0) = \exp[-\int_0^X \beta(\lambda, x)dx] \quad (2.11)$$

Burada  $\beta(\lambda, x)$ , spektral saçılma katsayısıdır. Eğer ortam saçıcıları, gelen ışın dalgaboyundan küçük ise Rayleigh, aynı veya daha büyük ise Mie saçılması meydana gelir.



Şekil 2.10. Saçılma indikatriksi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İndikatriks: Cisimlerin ya da minerallerin her yöndeki kırılma indislerini uzunluk olarak veren geometrik şekil.

Saçılma durumunda, saçılan ışık, soğurum durumunda olduğu gibi bölgesel olarak kaybolmaz. Saçıcı ortamda, Şekil 2.10’da görüldüğü gibi, saçılma indikatrisi olan  $dL(\theta)$ , birim hacim başına dağılmış ışığın uzamsal dağılımını ifade eder. Gelen ışının dağılım yönü etrafında bir simetri meydana gelir ve bu duruma “faz fonksiyonu” adı verilir (Bouchet ve ark. 2006).

#### 2.6.4. Serbest uzay kaybı

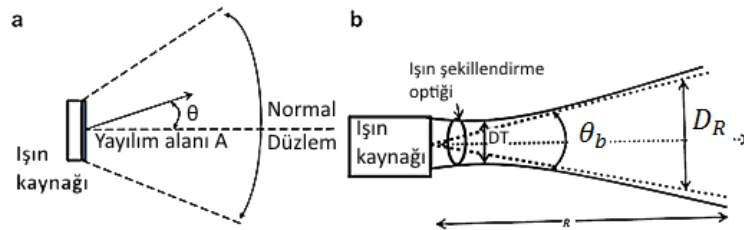
Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde, en çok kayıp genellikle “uzay kaybı” olarak belirlenir. Bu kayıp, serbest uzayda ışın ilerlerken işaret gücündeki azalma olarak adlandırılır. Uzay kayıp faktörü (2.12) ile verilir.

$$L_S = (\lambda/4\pi R)^2 \quad (2.12)$$

(2.12)’de  $R$  değeri hat uzunluğunu temsil eder. Dalgaboyuna bağlı olarak, hat uzadıkça, sistemin dayanması gereken serbest uzay optik kayıp, RF sistemlere göre daha fazladır ( $L_S$  faktörü daha küçüktür). Uzay kaybı dışında, işaret kayıplı bir ortamdan geçerken sistem kayıplarına, yayılım kayıpları da eklenir. Çoğu optik hat için, örneğin derin uzayda, ek kayıp olmaz. Bunun nedeni atmosfer ile iletişimde olmamalarından kaynaklanır (Soloyev 2019).

#### 2.6.5. Işın açıklık kaybı

Şekil 2.11’de görüldüğü üzere ışın serbest uzayda ilerlerken şekillendirme optikleri ile toplanır ve dağıtılmadan önce tekrar odaklandırılır.



Şekil 2.11. Yayılım gösterimi a) Lambertian kaynağı b) Işın şekillendirme optiği

Kaynaktan gelen ışın yakınsak mercek ve saptırıcı mercek ile bir noktaya odaklandırılır. Burada düzlemsel ışın çapı  $D_R$ , (2.13) ile verilir.

$$D_R = D_T[1 + (\lambda R/D_T^2)^2]^{1/2} \quad (2.13)$$

Burada  $\lambda$  dalgaboyunu,  $D_T$  verici lens çapını ve  $R$  ise hat uzunluğunu ifade eder. Lens çapları yakın alan ve uzak alan olmak üzere iki farklı durumda (2.14) ile incelenir.

$$\begin{aligned} \text{Yakın alan, } \frac{\lambda R}{D_T^2} < 1, D_R \approx D_T \\ \text{Uzak alan, } \frac{\lambda R}{D_T^2} > 1, D_R \approx \lambda R/D_T \end{aligned} \quad (2.14)$$

İlk durum, ortaya çıkan ışının alıcı lens çapına eşit olan çapta bir toplayıcı ile toplanarak geldiği durumdur. İkinci durumda ise, ortaya çıkan ışın, kaynak uzaklığından dağılan ışındır. Dağılan ışın kaynağının düzlemsel ışın açısı  $\theta_b$ , aynı zamanda kırınım sınırlı verici ışın açısı olarak tanımlanır.

$$\theta_b \cong D_R/R \quad (2.15)$$

Burada  $D_R$  değeri, uzak alan için aşağıdaki hali alır.

$$\theta_b \cong \lambda/D_T \quad (2.16)$$

İki boyutlu katı açı olan  $\Omega_b$ , düzlemsel ışın açısı ile ilişkili olup (2.17) ile verilir.

$$\Omega_b = 2\pi[1 - \cos(\theta_b/2)] \cong (\pi/4)\theta_b^2 \quad (2.17)$$

Burada verici kazancı olan  $G_T$ , hat mesafesi  $R$  boyunca ışının alan yoğunluğu sırası ile (2.18) ve (2.19) ile verilir.

$$G_T = 4\pi/\Omega_b \approx (4D_T/\lambda)^2 \quad (2.18)$$

$$I = G_T P_T / 4\pi R^2 \quad (2.19)$$

Alıcı gücü  $P_R$ , alıcı alanı  $A$  ve verici kazancı  $G_T$  ile ilişkilidir.

$$P_R = (G_T P_T / 4\pi R^2) A \quad (2.20)$$

Alıcı kazancı  $G_R$  (2.21) ile verilmiştir.

$$G_R = (4\pi/\lambda^2) A \Rightarrow A = \lambda^2 G_R / 4\pi \quad (2.21)$$

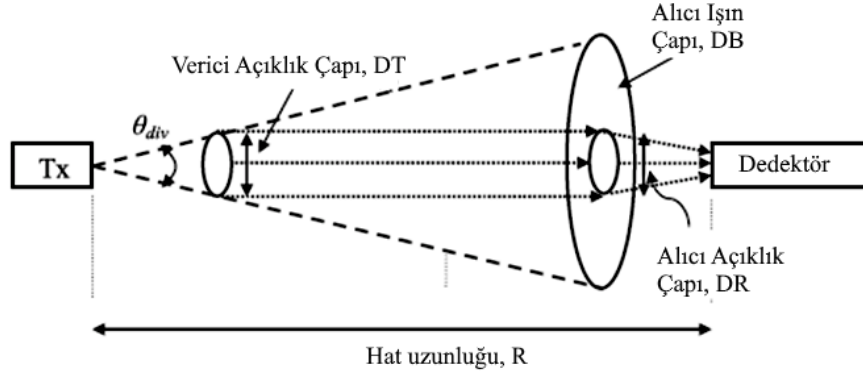
Böylelikle alıcı gücü  $P_R$ , verici gücü ve alıcı kazancı ile bağlantılı olarak (2.22) ile verilir.

$$P_R = P_T (G_T \eta_T \eta_{TP} (\frac{\lambda}{4\pi R})^2 G_R \eta_R \eta_\lambda) \quad (2.22)$$

Burada  $P_R$  fotoalıcı girişindeki işaret gücü,  $P_T$  verici gücü,  $\eta_T$  ve  $\eta_R$  sırası ile verici ve alıcı verimlilikleri,  $G_T$  verici anten kazancı,  $G_R$  alıcı anten kazancı,  $\eta_{TP}$  verici odaklama kayıp faktörü,  $\frac{\lambda}{4\pi R}$  uzay kayıp faktörü,  $\eta_\lambda$  darbant filtre iletim faktörüdür (Kaushal ve ark. 2017).

Işın atmosferde ilerlerken, kırınımdan dolayı etrafa saçılır. Şekil 2.12’de görüldüğü üzere, alıcı açıklığı bu kırılan kısımları toplayabilme yeteneğine sahip değildir. Bu durum ışın açıklık kaybı olarak adlandırılır. Tipik bir serbest uzay optik sistemde, vericiden iletilen ışın çapı yaklaşık olarak 5-8 cm boyutlarında olmaktadır. Bu ışın, 1 km hat mesafesinde yayıldığında, ışın çapı 1-5 m genişliğine ulaşmaktadır. Ancak serbest uzay optik alıcısı dar görüş alanına sahiptir ve dağılan tüm enerjiyi toplama kapasitesine sahip değildir. Şekil 2.12 alıcıdaki ışın açıklık kaybını gösterir. Burada alıcı, vericiden gelen ışının yalnızca küçük bir bölümünü toplayabilir. Alıcıda toplanan optik güç (2.23) ile verilmektedir.

$$P_R = P_T G_T G_R L_P \quad (2.23)$$



**Şekil 2.12.** Işın açıklık kaybı

(2.23)'te,  $P_T$  verici gücü,  $L_P$  serbest uzay yol kaybı,  $G_T$  ve  $G_R$  sırası ile verici ve alıcı etkin anten kazancıdır.

Bu değerler  $L_P = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2$ ,  $G_T = \left(\frac{4D_T}{\lambda}\right)^2$  ve  $G_R = \left(\frac{\pi D_R}{\lambda}\right)^2$  ile alınan optik kazancı oluşturur. Bu durum (2.24)'te verilmiştir.

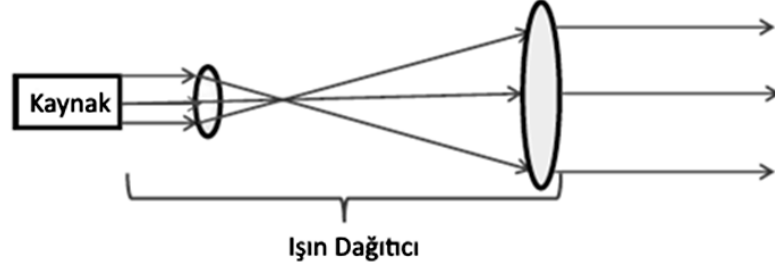
$$P_R \approx P_T (D_T D_R / \lambda R)^2 \approx P_T (4/\pi)^2 (A_T A_R / \lambda^2 R^2) \quad (2.24)$$

Kırınım sınırlı ışın açıklık kaybı/geometrik kayıp desibel cinsinden ifade edilirse (2.25) elde edilir (Awan ve Mohan 2016).  $A_T$  ve  $A_R$  sırası ile verici ve alıcı açıklık alanıdır.

$$L_G(\text{Geometrik Kayıp}) = -10[2\log(4/\pi) + \log(A_T A_R / \lambda^2 R^2)] \quad (2.25)$$

Geometrik kayıpların daha az yaşanması için dar ışın açıklığına sahip optik kaynaklar, sistem tasarlanırken daha çok tercih edilmektedir. Ancak dar ışın açıklığı, alıcı ile verici arasında hizalama hatası olduğu durumlarda hattın bozulmasına neden olur. Bazı durumlarda uygun ışın açıklığı seçimi ile aktif takip ve odaklama sistemi ihtiyacı karşılanmış olup, aynı zamanda ışın açıklık kayıplarında azalma sağlanmış olur. Çoğu zaman ışın dağıtıcı, kırınım sınırlı ışın açıklığından dolayı oluşan kayıpları azaltmak için kullanılır. Işın açıklığı, verici açıklık çapı ile ters orantılıdır. ( $\theta_{div} \cong \frac{\lambda}{D_T}$ )

Bu durumda iki farklı lens kullanılarak açıklık çapı artırılarak Şekil 2.13'te gösterildiği gibi bir durum elde edilebilir.



**Şekil 2.13.** Işın dağıtıcı ile açıklık artırma

Kırınım sınırlı olmayan durum için, açıklık açısı  $\theta_{div}$  olan ve çapı  $D_T$  olan ışının boyutu  $(D_T + \theta_{div}R)$  olur. Bu durumda, alıcı gücünün ( $P_R$ ), verici gücüne ( $P_T$ ) oranı (2.26) ile ifade edilir.

$$P_R/P_T = D_R^2/(D_T + \theta_{div}R)^2 \quad (2.26)$$

Burada ışın açıklığı veya geometrik kayıp desibel cinsinden (2.27)'de görülmektedir (Kaymak ve ark. 2017).

$$L_G(\text{Geometrik kayıp}) = -20\log[D_R/D_T + \theta_{div}R] \quad (2.27)$$

### 2.6.6. Hava olayları kayıpları ve görünürlük

Serbest uzay optik hattının performansı, sis, kar, yağmur gibi çevresel etkilerden etkilenerek alınan işaret gücünün düşmesine neden olur. Bu çevre şartlarının dışında, atmosferik zayıflama genellikle sis nedeni ile olurken, sisin parçacık boyutunun kullanılan dalgaboyu ile kıyaslanabilir boyutta olmasından kaynaklanır. Bu durum optik işaretin karakteristiğini değiştirebildiği gibi, soğurum, saçılma ve yansıtma nedeni ile ışın geçişini tamamıyla engeller. Bu durumu saptamak için, atmosferik görünürlük çevre koşullarından korunmak için önemli bir ölçüm sağlar (Pang ve You 2018, Ijaz ve ark. 2013).

Görünürlük, paralel ilerleyen ışınların yoğunluklarının, özgün ışına göre %2'ye düştüğü mesafe olarak tanımlanabilir. Uygun bir serbest uzay optik sisteminin tasarlanması için, görünürlük ve zayıflama arasındaki ilişki bilinmelidir. Bunun için daha önce yapılan bilimsel çalışmalarda birkaç model önerilmiştir. Optik işaret bir ortamda ilerlerken oluşan zayıflamanın karakterize edilebilmesi için, “özel zayıflama” olarak adlandırılan bir terim kullanılır. Bu terim kısaca zayıflama olarak kullanılarak, kilometre bazında mesafe başına düşen zayıflama olup (dB/km), (2.28) ile verilmiştir.

$$\beta(\lambda) = 1/R \log(P_0/P_R) = 1/R 10\log(e^{\gamma(\lambda)R}) \quad (2.28)$$

Burada  $R$  hat uzunluğunu,  $P_0$  vericiden gelen optik gücü,  $P_R$   $R$  mesafesindeki optik gücü ve  $\gamma$  atmosferik zayıflama katsayısını temsil eder. Zayıflama sis, kar ve yağmur gibi nedenlerden oluşabilir. Sis kaynaklı zayıflama, Mie saçılma teorisinin uygulanması ile tahmin edilebilir. Ancak, karmaşık hesaplamalara ve detaylı sis parametrelerine ihtiyaç duyar. Alternatif bir yaklaşım olan görünürlük bilgisi kullanılarak, sis kaynaklı zayıflama benzer deneysel bir model ile tahmin edilebilir. Genellikle, görünürlük aralığı için referans dalgaboyu 550 nm olarak kullanılır. (2.29)'da Mie saçılması için sis kaynaklı zayıflama modeli verilmiştir.

$$\beta_{sis}(\lambda) = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550}\right)^\rho \quad (2.29)$$

Burada  $V$  (km) görünürlük aralığını,  $\lambda$  (nm) çalışma dalgaboyunu ve  $\rho$  ise saçılmanın boyut dağılım katsayısını temsil eder (Nebuloni ve Capsoni 2013).

Kim modeline göre  $\rho$  değeri (2.30) ile verilir (Kim ve ark. 2001).

$$\rho = \begin{cases} 1,6 & V > 50 \\ 1,3 & 6 < V < 50 \\ 0,16V + 0,34 & 1 < V < 6 \\ V - 0,5 & 0,5 < V < 1 \\ 0 & V < 0,5 \end{cases} \quad (2.30)$$



Kruse modeline göre  $\rho$  değeri (2.31) ile verilir (Kruse ve ark. 1962).

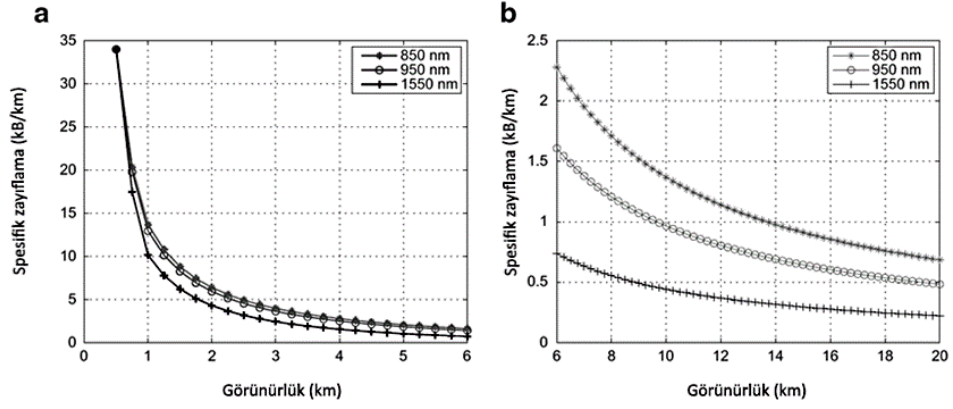
$$\rho = \begin{cases} 1,6 & V \geq 50 \\ 1,3 & 6 < V < 50 \\ 0,585V^{\frac{1}{3}} & V \leq 6 \end{cases} \quad (2.31)$$

Farklı hava koşulları, görünürlük mesafeleri temel alınarak sınıflandırılabilir. Çizelge 2.3'te görüldüğü üzere, hava koşullarına karşılık gelen kayıplar ve görünürlük mesafeleri yer almaktadır.

**Çizelge 2.3.** Hava koşullarına göre görünürlük mesafeleri

Hava koşulu	Görünürlük mesafesi (km)	Kayıp (dB/km) 785 nm
<b>Yoğun Sis</b>	0,2	-86,6
<b>Yumuşak Sis</b>	0,5	-34
<b>Hafif Sis</b>	0,770 -1	-20 ~ -14
<b>İnce Sis/ Ağır Yağış (25 mm/saat)</b>	1,9 ~ 2	-7,1 ~ - 6,7
<b>Pus/Orta Yağış (12,5 mm/saat)</b>	2,8 ~ 4	-4,6 ~ -3
<b>Hafif Pus/Hafif Yağış (2,5 mm/saat)</b>	5,9~10	-1,8 ~ -1,1
<b>Temiz/Çiseleme (0,25 mm/saat)</b>	18~20	-0,6 ~ 0,53
<b>Temiz Hava</b>	23~50	-0,46 ~ -0,21

Düşük görünürlüğe sahip hava koşullarında, ağır sis ve bulut altında çalışma dalgaboyu zayıflama için ihmal edilebilir etkiler sunar. Hafif sis hava koşullarında, görünürlük mesafesi yüksek (6 km) olduğu durumlarda zayıflama 1550 nm' de diğer dalgaboyları olan 850 nm ve 950 nm 'ye kıyasla daha az görülür. Eğer görünürlük 20 km'ye çıkarsa, zayıflamaya olan dayanım düşer. Bu durum Şekil 2.14 a ve b'de görülmektedir (Brazda ve Ark. 2014).



**Şekil 2.14.** Zayıflama ve görünürlük a) Ağır sis ve bulut b) Hafif sis ve pus (Dordova ve Wilfert 2009)

### 2.6.7. Atmosferik türbülans

Atmosferdeki türbülans, atmosferik kırılma indisi üzerinde rastgele dalgalanmalara yol açar. Sıcaklık ve basınç yayılım yolu boyunca kırılma indisine etki eder. Temelde, atmosferik kırılma indisi, uzayda herhangi bir  $r$  noktasında, ortalama ve kararsız terimlerin toplamı ile ifade edilir (Varshney ve Bhatia 2019).

$$n(r) = n_0 + n'(r) \quad (2.32)$$

Burada,  $n_0 = \langle n(r) \rangle \approx 1$  değeri kırılma indisinin gerçek değerini,  $n'(r)$  değeri de rastgele dalgalanmaları temsil eder.

$$n(r) = 1 + n'(r) \quad (2.33)$$

Atmosferin kırılma indisi, sıcaklık ve basınçla ilişkili olup (2.34) ile verilir.

$$n(r) = 1 + 7.66 \times 10^{-6} (1 + 7.52 \times 10^3 \lambda^{-2}) P'(r) / T'(r) \cong 1 + 79 \times 10^{-6} (P'(r) / T'(r)) \quad (2.34)$$

Burada  $\lambda$  ( $\mu m$ ) dalgaboyunu,  $P'$  (mbar) atmosferik basıncı,  $T'$  (K) atmosferik sıcaklığı temsil eder. Molekül veya aerosollerden kaynaklı saçılma ve soğurma etkilerinden dolayı optik işaretteki değişimler burada ihmal edilmiştir. Kırılma indisi yapısal

fonksiyonu  $D_n(r)$ ,  $D_n(r_n) = C_n^2 r^{2/3}$  ile ifade edilir. Burada  $C_n^2$ , kırılma indis yapı sabiti olarak isimlendirilerek, kırılma indisindeki dalgalanmaların şiddetini ölçer. Şiddetli türbülans  $10^{-12} m^{-2/3}$  ile düşük türbülans  $10^{-20} m^{-2/3}$  arasındaki değerleri alır.  $C_n^2$  değeri,  $C_t^2$  sıcaklık yapı sabiti ile ilişkili olup (2.35)'te gösterilmiştir.

$$C_n^2 = [79 \times 10^{-6} \frac{P'}{T'^2}]^2 C_t^2 \quad (2.35)$$

$C_t^2$  değeri, iletim yolunda bulunan iki ayrı noktanın sıcaklık değerlerinin ortalama kare değerlerini verir. (2.35)'te yer alan kırılma indis yapı parametresi, sıcaklık, basınç ve yol boyunca oluşan sıcaklık dalgalanmalarının ölçümü ile elde edilir. Yapı fonksiyonundaki tüm açıklamalar  $l_0 \leq r \leq L_0$  aralığı için tanımlıdır. Atmosferik türbülans etkisinde, kırılma indis yapı sabiti en kritik parametredir (Islam ve Majumder 2019). Bu etkinin zayıflatma denklemi (2.36) ile verilmiştir (Dordova ve Wilfert 2010).

$$\alpha_{turb} = 2 \cdot \sqrt{23,17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot R^{11/6}} \quad (2.36)$$

Eğer ışındaki girdaplar verici ışın boyutundan büyük olursa, ışın orijinal yolunda ayrılarak bükülür. Bu olay ışın açılımı olarak adlandırılır ve ışında odaklama hatalarına yol açarak ışının alıcıya ulaşamamasına neden olur. Eğer girdap boyutu, ışın boyutu ile uyumlu ise, girdaplar mercekle gibi davranarak odaklama ve geri odaklama yaparak ışının alıcıda dalgalanmasına neden olur ve bu duruma ışın parıldaması adı verilir. Parıldama, işaret gürültü oranında kayıplara neden olur ve sonuç olarak rastgele işaret solmalarına neden olur. Parıldama etkisi, çoklu alıcı verici anten kullanımı, açıklık ayarlama yöntemleri ile azaltılabilir.

Girdap boyutu ışın boyutundan küçükse, ışının küçük bir bölümü kırılır veya saçılır. Bu durum alıcı güç yoğunluğunda düşüşe ve alıcı dalga cephesinde bozulmaya (distorsiyona) neden olur. Eğer verici ışın çapı, atmosferin tutarlı uzunluğundan daha küçük tutulursa, türbülans nedenli ışın saçılması etkisi ihmal edilebilir (Titterton 1973).

## 2.7. Serbest Uzay Optik Haberleşme için Lazer Dalgaboyu Seçimi

Lazer dalgaboyu seçimi, yüksek elektro-optik dönüşüm verimi, mükemmel ışın kalitesi, değişken tekrarlama oranı, sabit çalışma ömrü, hızlı başlatma ve yüksek uygulanabilirlik gibi özellikler ile belirlenmektedir.

Son teknolojik gelişmeler ile birlikte karbondioksit lazer ( $CO_2$ ), stabil olması ve atmosferik etkilerden daha az etkilenme özelliğinden dolayı daha çok kullanılmaktadır. Ancak, serbest uzay optik tabanlı uygulamalarda kullanımı, hantal boyutları ve güvenilir yapıda olmalarından dolayı yaygın değildir.

Katı hal lazer olan Neodimyum İttriyum Alüminyum Garnet (Nd/YAG), serbest uzay optik tabanlı uygulamalar için bir seçenek olarak kullanılmaktadır. Nd/YAG lazerlerde kullanılan temel dalgaboyu 1064 nm ve 532 nm'ye doğrusal olmayan kristaller ile çıkartılabilir. Diğer bir Nd/YAG kaynağa yakın olan yapı ise, Neodimyum İttriyum Alüminyum Fosfat (Nd/YAP) ve Neodimyum İttriyum Lityum Florür (Nd/YLF) lazerlerdir. Katı hal cihazlar stabil ve dar spektral hat genişliğine sahiptir. Çalışma rejimi ise darbeli veya sürekli zaman modunda olabilir. Yüksek tepe güç seviyesine sahiptir ve oldukça dar spektral hat genişliğinde çalıştırılabilir.

Yarıiletken lazer diyotlar, Galyum Arsenit (GaAs), Galyum Alüminyum Arsenit (GaAlAs), İndiyum Galyum Arsenit (InGaAs) ve İndiyum Galyum Arsenit Fosfat (InGaAsP), bazı özel serbest uzay optik uygulamalarında kullanılır. Diğer bir yarı iletken lazer, dikey boşluklu yüzey salınımlı (VCSEL), Fabry Perot lazer ve dağınık geri beslemeli lazerlerdir. Eşik akımı gereksinimi, VCSEL lazerlerde oldukça düşüktür ve bu durum yüksek iç modülasyon bantgenişliğine izin verir. Fabry Perot ve dağınık geri beslemeli (DFB) lazerler yüksek güç yoğunluğuna ( $\approx 100 \text{ mW/cm}^2$ ) sahiptir ve Erbium katkılı fiber yükselteçler (EDFA) ile uyumludur. Bu lazerler serbest uzay optik haberleşmede geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yarı iletken lazerler, tek frekansta ve tek konumsal modda çalışırlar. Oldukça küçük, hafif ve kolay uygulanabilir özelliklere sahiptirler. Ancak çıkış gücü oldukça düşüktür. Bu durum uzun mesafe haberleşme uygulamalarında ek olarak yükseltici kullanılmasını gerektirir.

Diğer bir tür olan Erbiyum katkılı fiber lazerler 965 nm ile 1550 nm dalgaboyu aralığında çalışırlar. Ana osilatör güç yükselteç (MOPA) tabanlı lazerler de bu aralıkta çalışır. Kuvvetlendirici yapısına dayanarak, bu lazerler genişbant veya darbant çıkışlı ışın üretir (Numai 2010). Mevcut lazerler arasında, MOPA ve katı hal lazerler uzay temelli uygulamalar için gereksinimleri karşılamaktadır. Yarı iletken lazerler veya EDFA yakın lazer haberleşme için çoklu Gigabit hatlarda kullanışlıdır. Ancak fiber yükselteçler düşük tepe gücüne sahiptir. Lazer seçimi yapılırken, lazer gücü, spektral genişlik, çıkış dalgaboyu, menzil, optik arka plan gürültüsü, veri hızı ve modülasyon yeteneği gibi parametreler değerlendirilir. Çizelge 2.4'te serbest uzay optik uygulamaları için kullanılan lazer tipleri gösterilmiştir.

**Çizelge 2.4.** Serbest uzay optikte kullanılan lazer tipleri

Lazer tipi	Materyal	Dalgaboyu (nm)	Veri hızı	Tepe gücü
<b>Katı Hal Darbeli</b>	Nd/YAG	1064	<10 Mbps	Çok yüksek
	Nd/YLF	1047 veya 1053		10-100 W
	Nd/YAP	1080		
<b>Katı Hal Mod Kilitlemeli</b>	Nd/YAG	1064	<1 Gbps	>100W
	Nd/YLF	1047 veya 1053		10 W
	Nd/YAP	1080		
<b>Katı Hal CW</b>	Nd/YAG	1064	>Gbps	1-5W
	Nd/YLF	1047 veya 1053		
	Nd/YAP	1080		
<b>Yarı İletken Darbeli</b>	GaAlAs	789-890	1-2 Gbps	200 mW
	InGaAs	890-980	1-2 Gbps	1 W
	InGaAsP	1300	Çoklu	<50 mW
	VCSEL	1550	10 Gbps	<30 mW
	Fabry Perot	780-850	40 Gbps	200 mW
	DFB	1300 ve 1500		
<b>Katkılı Fiber Kuvvetlendirici</b>	EDFA	1550	10 Gbps	1000 W

Uluslararası Aydınlatma Komisyonunun (CIE) optik yayılım ile ilgili olarak sınıflandırmaları mevcuttur. Bu sınıflandırma 3 kategori altında toplanır. Bunlar: IR-A (700–1400 nm), IR-B (1400–3000 nm), ve IR-C (3000 nm–1 mm) olarak verilmiştir.

Sınıflandırma;

- (i) Yakın kızılötesi (NIR) aralık 750 nm ile 1450 nm arası olup, düşük zayıflama penceresine sahiptir.
- (ii) Kısa kızılötesi (SIR) aralık 1400 nm ile 3000 nm olup, 1530 – 1560 nm arası dışında baskın spektral aralık, uzun mesafeli haberleşme için kullanılır.
- (iii) Orta kızılötesi (MIR) aralık 3000 nm ile 8000 nm arasındadır ve askeri uygulamalar için kullanılır.
- (iv) Uzun kızılötesi (LIR) aralık 8000 nm ile 15  $\mu$ m aralığı olup termal görüntüleme için kullanılır.
- (v) Uzak kızılötesi (FIR) bölgesi ise 15  $\mu$ m ile 1 mm aralığıdır (Bader ve Lui 1996, Anonim 2020).

Neredeyse tüm serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde yakın kızıl ötesi ve kısa kızıl ötesi dalgaboyu aralığı kullanılır. Bu dalgaboyları aynı zamanda fiber optik haberleşme sistemlerinde de kullanılmaktadır.

Çalışma dalgaboyunun seçiminde, bileşen uygunluğu, zayıflama, arka plan gürültü gücü ve alıcı hassasiyeti dikkate alınır. Çoğu serbest uzay optik sistemin tasarımı 780 nm ve 850 nm ile 1520 nm ve 1600 nm spektral pencere aralığında düşük zayıflamanın olduğu bölgede yapılır. Bunu dışında 1550 nm oldukça sık kullanılan bir dalgaboyudur. Bunun nedeni göz güvenliği, düşük solar arka plan ve saçılmadır. 1550 nm’de daha çok güç, sis, bulut gibi nedenlerde oluşan zayıflamayı atlatarak iletilebilir. Bununla birlikte, sıkı hizalama gereksinimi ve daha yüksek bileşen maliyeti nedeniyle belirli zorluklara sahiptir (Lambert ve Casey 1995, Navas ve ark. 2012).

### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

#### **3.1. Taguchi Analiz Yöntemi**

Tez çalışmasında atmosferik katmanlarda bulunan gaz moleküllerinin saçılma kaynaklı zayıflatma denklemlerinde kullanılan parametrelerin analizinde Taguchi analiz yöntemi kullanılmıştır.

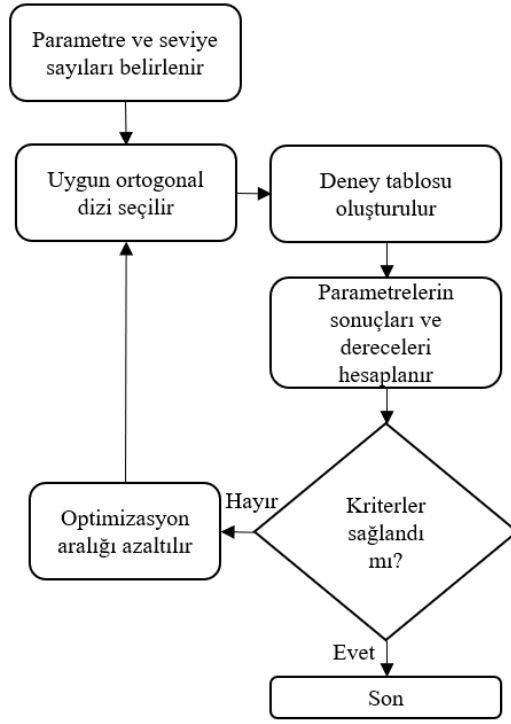
Taguchi analiz yöntemi, kalite geliştirme konusunda Dr. Genichi Taguchi tarafından ortaya çıkartılan, bir deneyde, giriş parametrelerinin, kontrol edilemeyen parametrelere karşı uygun bir seviyesini seçerek, deneyde yer alan parametrelerin önemini belirten bir çalışmadır (Taguchi ve ark. 2005).

Deneyin istenilen özellikleri, deney kalitesini belirler. Bu özellikler, deney tasarımına başlamadan veya başlama aşamasında belirlenmelidir. Bu durumda, istenilen özelliklerde deneyin oluşturulması ve ürünlerin ortaya çıkması sağlanır (Canıyılmaz ve Kutay 2003, Ferah 2003)

Bu yöntem ilk olarak kalite mühendisliği ve ürün tasarım çalışmalarında kullanılmıştır. Günümüzde ise daha az analiz veya deney yapılarak aynı sonuca ulaşılmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Taguchi analiz yöntemi ile diğer istatistiksel yöntemler arasındaki fark, bir deneyde yer alan kontrol edilebilen ve edilemeyen parametreleri gruplandırarak, çoklu parametrelerin analizinin sağlanmasıdır. Ayrıca, ortalama performans değerinin istenilen seviyeye getirilmesi ile hedef alandaki varyansı en aza indirir (Weng ve ark. 2007).

Taguchi analiz yöntemi, ortogonal dizilere dayanır ve deneysel çalışmaları tasarlamak için kullanılır (Demir ve Aküner 2017).

En uygun deney sayısı Taguchi analiz yöntemiyle, kontrol parametreleri ise ortogonal dizilerin kullanımı ile belirlenir (Demir ve Aküner 2018, Haroon ve ark. 2017). Şekil 3.1’de Taguchi analiz yönteminin temel yaklaşım aşamaları görülmektedir.



**Şekil 3.1.** Genel Taguchi analiz yöntemi yaklaşımı (Weng ve ark. 2007)

Şekil 3.1’de görülen akış şemasında Taguchi yöntemi beş ana adımdan oluşur. Bu adımlar, sistemin seviyelerini, ortogonal dizinin seçimini, deneysel tabloyu, hesaplanan sonuçları ve parametrelerin öncelik sırasını belirler. Sonuç olarak düşük seviye ile gereksiz olan parametreleri belirler (Jia ve Lu 2019, Peng ve ark. 2019).

Her sistem, parametrelerden ve bu parametrelerin değerlerinden oluşur. Bu parametre değerlerine Taguchi analiz yönteminde seviye adı verilir. Uygun bir çözüm için doğru deney tasarımı tanımlanmış olmalıdır. Bu çözüm için Taguchi analiz yönteminde seçim matrisi belirlenir. Çizelge 3.1’de bu matris görülmektedir (Demir ve Aküner 2018).

Parametre sayısına göre, her bir parametre seviyelere ayrılır ve uygun deney Çizelge 3.1. kullanılarak seçilir (Mach ve ark. 2010).



**Çizelge 3.1.** Taguchi ortogonal dizi seçim matrisi

		Parametre sayısı											
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Seviye sayısı	2	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12	L16	L16	L16	L16
	3	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	L27	L27	L27	L36	L36
	4	L'16	L'16	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32					

Serbest uzay optik haberleşme sistemi için belirlenen parametre sayısı ve seviye sayısı için Çizelge 3.1'de gösterilen Taguchi'nin ortogonal dizi seçim matrisi kullanılarak deney tasarım tablosu belirlendikten sonra, belirlenen deney tasarım tablosu ortogonal dizi için uygulanarak deney dizisi oluşturulur.

Seçilen parametre sayısı ve seviyeye göre ortogonal dizide seviye numarası seçilerek deney sonuçlarının bu tabloya göre uyarlaması yapılır. Bu uyarlama tablosuna göre deney sonuçlarının işaret gürültü oranı adı verilen performans değerleri hesaplanır. Bu hesaplama (3.1) ile yapılır (Kamber 2019). Burada  $n$  değeri deney sonucunu ifade etmektedir.

$$S/N = -10\log(1/n^2) \quad (3.1)$$

Elde edilen işaret gürültü oranı (SNR) değerleri ile seçilen seviye değerleri açısından ortogonal tablo kullanılarak analiz dereceleri ortalamaları alınarak elde edilir.

### 3.2 Mie Saçılma Analizi

Tez çalışmasında atmosferik katmanlarda bulunan gaz moleküllerinden daha büyük boyutlu su moleküllerinin saçılma analizi Mie teorisi kullanılarak yapılmıştır.

Mie teorisine göre, belirli dalgaboyunda bir elektromanyetik dalga ve dalgaboyuna eşit veya dalgaboyundan daha büyük boyuttaki küresel bir parçacık ile etkileştiğinde Mie saçılması meydana gelir. Serbest uzay optik haberleşmede, lazer ışını atmosferden geçerken mikro ölçekteki gaz parçacıkları yani aerosoller ve su damlacıkları ile etkileşir. Buradaki saçılmanın anlamı, kırılma indisi  $n_p$  olan bir malzemenin etrafının kırılma indisi  $n_c$  olan farklı bir malzeme ile çevrili olmasıdır. Bilim insanı Gustav Mie 1908 yılında yayınladığı çalışmasında herhangi boyuttaki küresel homojen bir parçacığın ışığı saçması ile ilgili çözümünden bahsetmiştir. Mie teorisinin klasik çözümü için üç parametre ele alınır. Bunlar, saçılma verimi  $Q_{sca}$ , parçacık kırılma indisi  $n$  ve boyut parametresi olan  $x$  parametreleridir (Mie 1908).

Kırılma indisi uyumsuzluğu olarak da bilinen, yüzey büyüklüğünü ifade eden terim olan boyut parametresi (3.2) ile verilmiştir. Boyut parametresi olan  $x$  değeri, saçılan bir parçacığın ölçüsü olarak, parçacık yarıçapı  $r$  ve dalgaboyu  $\lambda$  'nın oranından oluşur.

$$x = 2\pi r / \lambda \quad (3.2)$$

Mie teorisi hesaplanırken, saçılma verimi de bilinmelidir. Saçılma verimi, saçılma kesit alanı ve geometrik kesit alanı oranlarına bağlıdır.

$$Q_{sca} = \sigma_{sca} / \pi r^2 \quad (3.3)$$

Burada geometrik kesit alanı,  $G = \pi r^2$  ve  $\sigma_{sc}$  saçılma kesit alanıdır (Jacques ve Prahl 1998).

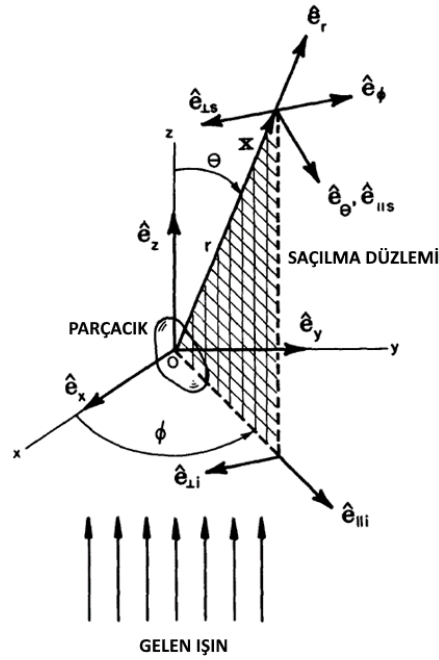
Mie saçılması analizinde kullanılan diğer parametreler, faz fonksiyonunun ortalama kosinüsü  $\cos\theta$ , kayıp verimi  $Q_{ext}$ , geri saçılma verimi  $Q_{back}$ , saçılma kesit alanı  $\sigma_{sca}$ ,

kayıp kesit alanı  $\sigma_{ext}$ , geri saçılma kesit alanı  $\sigma_{back}$ , saçılma katsayısı  $K(\beta)$  ve toplam zayıflama katsayısı  $\gamma$  olarak sıralanabilir.

### 3.3 Mie Saçılma Matematiği

Saçılma düzlemi, bir kaynağı, küresel saçılma parçacığını ve üç boyutlu konumu olan gözlemciyi kapsar. Gelen ışık ve saçılan ışık, saçılma düzlemine paralel veya dikey olan bileşenlerine indirgenir. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi, paralel ve dikey bileşenler saçılma düzlemine paralel veya dikey yönlendirilmiş doğrusal polarizasyon ile seçilebilir.

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, bir parçacık lazer ışını ile etkileşir. Gelen ışının yayılım yönü, ileri yönlü olarak  $z$  ekseninde yer alır. Parçacığın herhangi bir noktasında orijin seçilebilir. Kartezyen koordinat sisteminde,  $x$  ve  $y$  eksenleri  $z$  eksenine ortogonaldır. Ortonormal temel vektörler  $\hat{e}_x$ ,  $\hat{e}_y$ ,  $\hat{e}_z$ ,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenlerinin pozitif yönleridir. Saçılma yönü  $\hat{e}_r$  ve ileri yön  $\hat{e}_z$  saçılma düzlemi adı verilen düzlemi oluşturur.



Şekil 3.2. Saçılma düzlemi ve parçacık

Saçılma düzlemi, eğer  $\widehat{e}_r$  z eksenine paralel ise azimut açısı  $\emptyset$  ile hesaplanabilmektedir. Bu iki kesen ( $\widehat{e}_r = \pm \widehat{e}_z$ ), z ekseninin herhangi bir yerinde bulunursa, o düzlem saçılma düzlemi olur. Gelen dalganın elektrik alanı  $E_i$ , xy düzleminde yer alır ve saçılma düzlemine paralel olan  $E_{\parallel i}$  ve saçılma düzlemine dik olan  $E_{\perp i}$  bileşenlerinden oluşur.

$$E_i = (E_{0\parallel} \widehat{e}_{\parallel i} + E_{0\perp} \widehat{e}_{\perp i}) \exp(ikz - i\omega t) = E_{\parallel i} \widehat{e}_{\parallel i} + E_{\perp i} \widehat{e}_{\perp i} \quad (3.4)$$

Burada  $k = 2\pi/\lambda$  terimi, parçacığın etrafını saran ortamın dalga numarasıdır. Ortonormal temel vektörleri  $\widehat{e}_{\parallel i}$  ve  $\widehat{e}_{\perp i}$  olup

$$\widehat{e}_{\parallel i} = \sin\phi \widehat{e}_x - \cos\phi \widehat{e}_y \quad \widehat{e}_{\perp i} = \cos\phi \widehat{e}_x + \sin\phi \widehat{e}_y \quad (3.5)$$

Buradan hareketle,  $\widehat{e}_z$  için,

$$\widehat{e}_{\perp i} \times \widehat{e}_{\parallel i} = \widehat{e}_z, \quad \widehat{e}_{\perp i} = -\widehat{e}_\phi, \quad \widehat{e}_{\parallel i} = \sin\theta \widehat{e}_r + \cos\theta \widehat{e}_\theta \quad (3.6)$$

Burada  $\widehat{e}_r, \widehat{e}_\theta, \widehat{e}_\phi$  ortonormal baz vektörleri olup, küresel kutuplu koordinat sisteminde  $(r, \theta, \phi)$  olur. Eğer x ve y parametreleri  $E_{xi}$  ve  $E_{yi}$  ile ifade edilirse,

$$E_{\parallel i} = \cos\phi E_{xi} + \sin\phi E_{yi} \quad E_{\perp i} = \sin\phi E_{xi} - \cos\phi E_{yi} \quad (3.7)$$

Orijinden yeteri kadar uzaklıkta ( $kr \gg 1$ ), uzak alan bölgesinde, saçılan elektrik alan  $E_s$ , yaklaşık olarak ( $\widehat{e}_r \cdot E_s \simeq 0$ ) olup,

$$E_s \sim (e^{ikr}/-ikr)A \quad (3.8)$$

Burada  $\widehat{e}_r \cdot A = 0$  olarak alınır. Böylece uzak alan bölgesinde saçılan alan (3.9) ile yazılır.

$$E_s = E_{\parallel s} \widehat{e}_{\parallel s} + E_{\perp s} \widehat{e}_{\perp s} \quad \text{ve} \quad \widehat{e}_{\parallel s} = \widehat{e}_\theta, \quad \widehat{e}_{\perp s} = -\widehat{e}_\phi, \quad \widehat{e}_{\perp s} \times \widehat{e}_{\parallel s} = \widehat{e}_r \quad (3.9)$$

Baz vektörü  $\widehat{e}_{\parallel s}$  saçılma düzlemine paralel,  $\widehat{e}_{\perp s}$  ise saçılma düzlemine diktir. Sınır koşullarının doğrusallığı nedeniyle, rastgele bir parçacık tarafından saçılan alanın genliği, gelen alanın genliğinin doğrusal bir fonksiyonudur.

Saçılma analizinde, saçılma matrisi veya S matrisi olarak adlandırılan, bir saçılma sürecine giren fiziksel bir sistemin başlangıç ve son durumunu gösteren matris formu kullanılır. S matrisinde yer alan elemanlar, saçılma genliği olarak bilinir.

Gelen alan ve saçılan alan arasındaki bağlantı matris formunda yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} E_{\parallel s} \\ E_{\perp s} \end{bmatrix} = -\exp(-ik(r-z))/ikr \begin{bmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\parallel i} \\ E_{\perp i} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

(3.10)'da yer alan  $S_j (j = 1,2,3,4)$  elemanı, genlik saçılım matrisine dayanır. Saçılma açısını  $\theta$ , azimut açısını  $\phi$ ' ye bağlıdır. Saçılma matrisi "uzak alanda" gözlemlendiği gibi saçılma düzlemine dik ve paralel olarak gelen ve saçılan elektrik alan bileşenleri arasındaki ilişkiyi açıklar (Bohren ve Huffman 1983).

(3.10) ifadesi, pratik deneylerde sadeleştirilebilir.

- Üstel terim olan  $-\exp(-ik(r-z))/ikr$  saçılma ve gözlemci arasındaki mesafeye bağlı olan bir taşıma faktörüdür. Eğer saçılan ışın, saçıcıdan sabit bir  $r$  mesafesinde, örneğin polarizasyon açısının veya yönünün bir fonksiyonu olarak ölçülürse, taşıma faktörü sabit olur.
- Toplam alan ( $E_{top}$ ) gelen alana ( $E_i$ ), saçılan alana ( $E_s$ ) ve bu alanların etkileşimine ( $E_{int}$ ) bağlıdır. Saçılma  $E_i$ 'yi önleyen bir pozisyondan gözlemlenirse, hem  $E_i$  hem de  $E_{int}$  sıfırdır ve sadece  $E_s$  gözlenir.
- $E_s$ 'nin  $d$  çapındaki bir parçacıktan  $L$  uzak mesafedeki "uzak alan" gözlemi için  $kL \gg n_c^2$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $n_c = d/\lambda$ , saçılma elemanları  $S_3$  ve  $S_4$  sifıra eşittir (Bohren ve Huffman 1983).
- Işın yoğunluğu,  $I = \langle E \cdot E^* \rangle = (1/2)a^2$  burada  $E = a\exp(-i\delta)$  olup,  $a$  genliği ve  $\delta$  elektrik alanın fazını temsil eder.

Dolayısıyla pratik saçılma ölçümleri için (3.10) aşağıdaki gibi sadeleştirilir.

$$\begin{bmatrix} I_{\parallel s} \\ I_{\perp s} \end{bmatrix} = \text{sabit} \begin{bmatrix} |S_2|^2 & 0 \\ 0 & |S_1|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\parallel i} \\ I_{\perp i} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Saçılma matrisindeki  $S$  vektörleri, Riccati-Bessel fonksiyonlarına bağlı olarak, (3.12) ve (3.13) ile verilmektedir.

$$S_1(\mu) = \sum_{n=1}^N [2n + \frac{1}{n(n+1)}] [a_n \pi_n(\mu) + b_n \tau_n(\mu)] \quad (3.12)$$

$$S_2(\mu) = \sum_{n=1}^N [2n + \frac{1}{n(n+1)}] [a_n \tau_n(\mu) + b_n \pi_n(\mu)] \quad (3.13)$$

Burada  $\mu = \cos\theta$  olup  $\theta$  açısı gelen ışın ile saçılan ışın arasındaki açıdır.  $a_n$  ve  $b_n$  olarak bahsedilen terimler  $n$ . dalganın kısmi genliğidir.  $\pi_n$ ,  $\tau_n$  terimleri ise Lagrange polinomlarıdır.

Saçılma esnasında parçacıktan saçılan ışığın, parçacığı oluşturan elektrik yükü tarafından oluşturulan çoklu kutuplar tarafından yayılan kısmi dalgalardan oluştuğu düşünülebilir. Bir dipol birinci kısmi dalgayı, bir kuadropol ikinci kısmi dalgayı yayar ve yayılım bu şekilde devam eder. Kısmi dalgaların genlikleri, Mie teorisinin çözümünün merkezinde bulunan  $a_n$  ve  $b_n$  katsayıları ile verilir (Bohren ve Huffman 1983).

$$a_n = \frac{m^2 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu_1 j_n(x) [mx j_n(mx)]'}{m^2 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(x) [mx j_n(mx)]'} \quad (3.14)$$

$$b_n = \frac{\mu_1 j_n(mx) [x j_n(x)]' - j_n(x) [mx j_n(mx)]'}{\mu_1 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x) [mx j_n(mx)]'} \quad (3.15)$$

Burada  $m$  parametresi kompleks kırılma indisi,  $x$  parametresi boyut parametresi,  $\lambda$  dalgaboyu,  $k$  dalga numarasıdır.  $m = n - jn'$ ,  $n$  parçacık kırılma indisi,  $n'$  parçacık kırılma indisi sanal kısmıdır. Bu değer parçacığın karşılaşacağı dalgaboyuna göre değişmektedir. Denklemden yer alan  $\mu_1$  parametresi, kürenin manyetik geçirgenliğinin ortamın manyetik geçirgenliğine  $(\mu_1/\mu)$  oranıdır.  $j_n(z)$  fonksiyonu ve  $h_n^{(1)} = j_n(z) + iy_n(z)$  fonksiyonu  $n$ . dereceden küresel Bessel fonksiyonlarıdır. Verilen  $z$  terimi  $z=x$  veya  $z=mx$  şeklinde ifade edilir.

$$[z j_n(z)]' = z j_{n-1}(z) - n j_n(z); \quad [z h_n^{(1)}(z)]' = z h_{n-1}^{(1)}(z) - n h_n^{(1)}(z) \quad (3.16)$$

Bütünlüğü sağlamak için, Bessel ve küresel Bessel fonksiyonları arasında (3.17) ile verilen ilişkiler bulunur.

$$j_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} J_{n+\frac{1}{2}}(z)$$

$$y_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} Y_{n+\frac{1}{2}}(z) \quad (3.17)$$

Burada verilen  $J_n$  ve  $Y_n$  birinci dereceden Bessel fonksiyonlarıdır.  $n=0$  değeri için küresel Bessel fonksiyonları (3.18) ile verilir.

$$j_0(z) = \frac{\sin z}{z}; j_1(z) = \frac{\sin z}{z^2} - \frac{\cos z}{z}$$

$$y_0(z) = -\cos z/z; y_1(z) = \frac{-\cos z}{z^2} - \frac{\sin z}{z} \quad (3.18)$$

Küresel Hankel fonksiyonları,  $j_n$  ve  $y_n$ 'in doğrusal birleşimleridir. Burada ilk tür olan denklem  $h_n^{(1)}(z) = j_n(z) + iy_n(z)$  ile verilir. Aynı zamanda Riccati Bessel fonksiyonları ile  $\psi_n(z) = zj_n(z)$ ;  $\chi_n(z) = -zy_n(z)$ ;  $\xi_n(z) = zh_n^{(1)}(z)$  ifade edilir. Saçılma analizinde manyetik geçirgenlik oranları  $\mu_1 = 1$  alınarak n. nereden katsayılar  $a_n$  ve  $b_n$  sadeleştirilir. İkinci katsayılar olan  $c_n$  ve  $d_n$  parametreleri, molekül içindeki elektrik alan söz konusu olduğunda gereklidir. Molekül içerisindeki elektrik alan girişini test etmek, ısı kaynaklarının dağılımını incelemek veya soğurumu hesaplamak için kullanılır. Bu nedenle saçılma teorisinde bu terimler ihmal edilir.

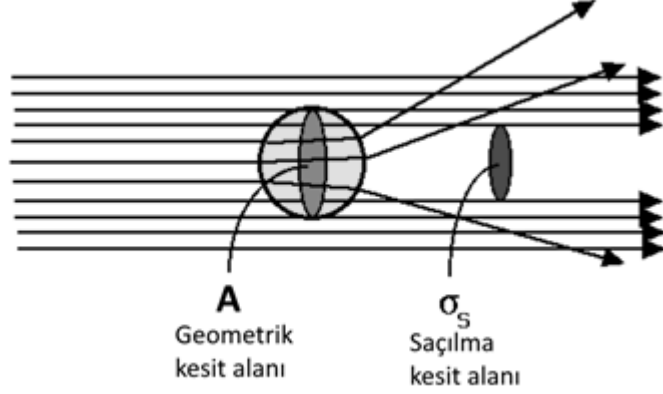
$S$  vektörleri içerisinde yer alan birinci dereceden Lagrange polinomları (3.19) ve (3.20) ile verilir.  $\pi_n(\cos\theta)$  ve  $\tau_n(\cos\theta)$  polinomları,  $S_1$  ve  $S_2$ 'yi tanımlamak için kullanılan harmoniklerin açılma modellerini tanımlar ve tekrarlama ilişkilerini takip eder.

$$\pi_n = \frac{2n-1}{n-1} (\cos\theta)\pi_{n-1} - \frac{n}{n-1}\pi_{n-2} \quad (3.19)$$

$$\tau_n = n\cos\theta \cdot \pi_n - (n+1)\pi_{n-1} \quad (3.20)$$

$$\pi_0 = 0; \pi_1 = 1; \pi_2 = 3\cos\theta; \tau_0 = 0; \tau_1 = \cos\theta; \tau_2 = 3\cos(2\theta) \quad (3.21)$$

Mie saçılmasında, hesaplanması gereken bir diğer parametre saçılma kesit alanıdır. Saçılma kesit alanı, bir saçılma olayı sırasında, parçacık tarafından ne kadar alanın engellendiğine dair bir fikir vermektedir. Şekil 3.3'te saçılma kesit alanı temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Saçılma kesit alanı

(3.22)'de  $\sigma_s$  saçılma kesit alanıdır ve saçılma verimi ile geometrik kesit alanına bağlıdır. Saçılma analizinde, saçılma faz fonksiyonu veya faz fonksiyonu parametresi belirli bir dalgaboyunda bir parçacık tarafından saçılan ışık yoğunluğunun açisal dağılımından bahseder.

$$\sigma_{sca} = Q_{sca}(\pi r^2) \quad (3.22)$$

Saçılma faz fonksiyonu  $p(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o)$ , gelen ışın açısı  $(\theta_i, \phi_i)$  ve giden ışın açısı  $(\theta_o, \phi_o)$  olan bir parçacık nedeniyle oluşan saçılmaların toplamı ile ifade edilir. Saçılma fonksiyonu, temelde dairesel olarak simetrik olduğundan yalnızca  $\theta = \theta_o - \theta_i$  açısına bağlı olur. Bu nedenle, saçılma fonksiyonu  $p(\theta)$  şeklinde yazılabilir. Sonuç olarak, açı  $\mu = \cos\theta$  ile yer değiştirerek, faz fonksiyonunun ortalama kosinüsü ifadesi olan  $p(\mu)$  halini alır. Saçılma faz fonksiyonunun ortalama kosinüsüne, genellikle saçılma asimetrisi veya sadece saçılma anizotropisi denir. Bu değer -1 (tamamen geri saçılma) ile +1 (toplam ileri saçılma) arasındadır.



Saçılma verimi, saçılma kesit alanı ve geometrik kesit alanı oranına bağlı olmakla birlikte,  $a_n, b_n$  katsayılarına bağlı olarak da yazılabilir.

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (3.23)$$

$Q_{ext}$  kayıp verimi, soğurum verimi ve saçılma veriminin toplamından oluşur. Mie saçılma analizinde soğurum özellikleri dikkate alınmaz, bu nedenle soğurum verimi ihmal edildiği için saçılma verimine eşit kabul edilebilir. Ancak bazı ihmal edilemeyen durumlarda, (3.24) kullanılır.

$$Q_{ext} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (3.24)$$

Geri saçılma verimi olarak adlandırılan parametre  $Q_{back}$ , parçacık tarafından geri yönlü saçılmaları ifade eder. (3.25) ile verilmiştir.

$$Q_{back} = \frac{1}{x^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (-1)^n (a_n - b_n) \right|^2 \quad (3.25)$$

Soğurum ihmal edildiği için kayıp kesit alanı olarak adlandırılan parametre saçılma kesit alanına eşittir ( $\sigma_{ext} = \sigma_{sca}$ ). İleri yönlü saçılan ışınlar haricinde geriye doğru saçılma da mevcuttur.

Geri saçılma kesit alanı  $\sigma_{back}$ ,

$$\sigma_{back} \approx (\pi^5 / \lambda^4) |T_m|^2 D^6 \quad (3.26)$$

Burada,  $D$ , parçacık çapı,  $T_m = (m^2 - 1)/(m^2 + 2)$  olup  $m$  ortamın kompleks kırılma indisidir.

Toplam Mie saçılma katsayısı  $K$ , her yönde bir parçacık tarafından saçılan toplam akının, küresel parçacığın geometrik enine kesitindeki akıya bölünmesiyle elde edilir.

$$K = 2 - (4 \sin \rho) / \rho + 4(1 - \cos \rho) / \rho^2 \quad (3.27)$$

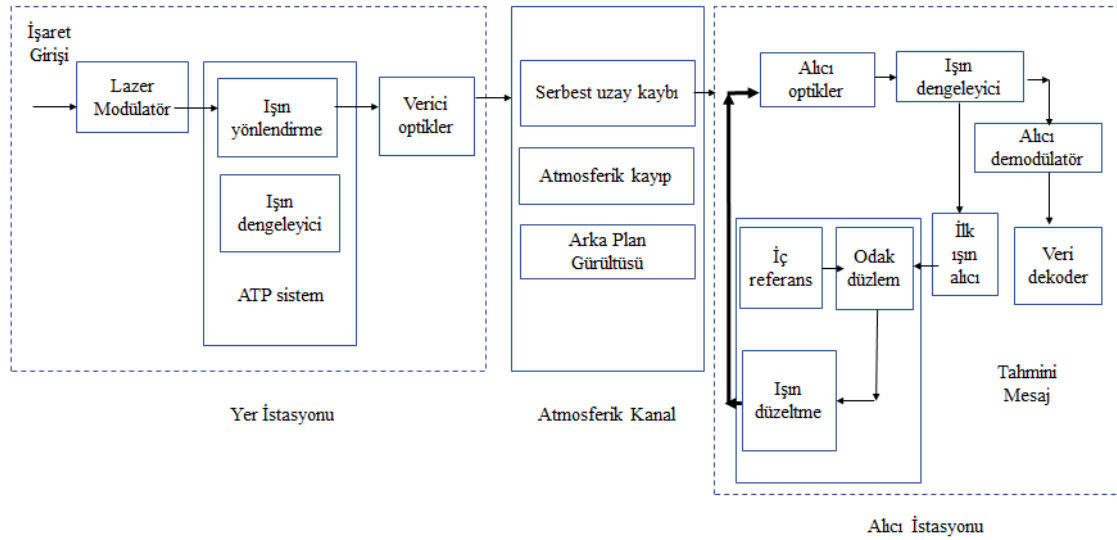
Burada  $\rho = 2x(n-1)$  ve  $x$  boyut parametresidir (Penndorf 1957, Bohren ve Hoffman 1983, Calabroa ve Bigioa 2014, Ishimaru 1978, Grainger ve ark. 2004).

### 3.4 Serbest Uzay Optik Sistem Modülleri ve Tasarım Parametreleri

Temel bir serbest uzay optik haberleşme sisteminin temel bileşenleri;

- (i) Optik güç kaynağı, verici
- (ii) Modülator
- (iii) Takip sistemi, optik odaklama sistemi
- (iv) Arka plan etkileri bastırma filtresi,
- (v) Optik iletim ve alma açıklığı,
- (vi) Fotoalıcı, demodülator modüllerinden oluşur (Kaushal ve ark. 2017).

Şekil 3.4'te temel bir uydu-yer istasyonu arası serbest uzay optik sistemin blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.4. Serbest uzay optik sistem blok diyagramı

Blok diyagram 3 ana modülden oluşur. İlk modül yer istasyonu olan vericidir. Yer istasyonunda, lazer ışınının atmosferde taşınabilmesini sağlayan modülator yer alır. Modüle edilen işaret, ışın yönlendiricilerinin ve sensörlerin yer aldığı edinim, izleme ve odaklamanın yapıldığı ATP (Acquisition-Tracking-Pointing) sistemi ile yönlendirici optik cihazlara iletilir. Verici optik cihaz çıkışındaki işaret atmosferik ortamda alıcıya iletilir. Vericiden çıkan optik işaretler, serbest uzay kaybı, atmosferik kayıplar ve arka

plan gürültüsünün bulunduğu optik kanalda ilerler. Optik kanalda zayıflayan optik işaretler, alıcı optik cihazları tarafından alınır. Işın dağıtıcı tarafından dağıtılan ışının bir kısmı demodülatöre, bir kısmı da stabilizasyon ve odaklama işlemi için alıcı ATP sistemine gönderilir. Son aşamada ise ışın dekodere gönderilerek demodüle edilir ve alıcı için elektriksel işaretlere dönüştürülür.

Optik kanalda işareti zayıflatan etkilerden biri de arka plan gürültüsüdür. İşaret gürültü oranını (SNR) etkileyen önemli bir parametre olan atmosferik gürültü, Güneş'ten ve diğer yıldızlardan gelen arka plan gürültüsü ve alıcı tarafından ışın toplanırken gelen dağınık ışık gürültüsüdür. Atmosferik gürültü, yaklaşık olarak 7 MHz'de -9 dB olarak ölçülmüştür (Kaushal ve Kaddoum 2015). Bu ölçüm, hava koşullarına göre ve mevsimlere göre değişiklik göstermektedir. Sistem tasarımı yapılırken, bu koşullar göz önüne alınır. Atmosferik gürültü, alıcı optik bantgenişliği sınırlanarak kontrol edilebilir.

Bir sistem tasarlanırken işaret gürültü oranı hesap edilerek sistemin verimliliği hesaplanır.

$$SNR = P_t - 30 + G_R + G_T - 20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) - 10 \log \left( \frac{k_B T}{1mW} \right) - 10 \log(BW) - 10(\log \exp(-\gamma R)) - NF - FM \quad (3.28)$$

Burada  $P_t$  iletilen güç,  $G_T$  verici anten kazancı,  $G_R$  alıcı anten kazancı,  $\lambda$  dalgaboyu,  $k_B$  Boltzman sabiti ( $1.38 \times 10^{-23} J/K$ ), alıcı bantgenişliği ( $BW = 2,2$  MHz),  $T$  sıcaklık değeri ( $^{\circ} K$ ),  $NF$  alıcı gürültüsü (Noise figure),  $FM$  solma toleransı (Fade margin),  $10 \log(\exp(-\gamma R))$  (dB) toplam zayıflama,  $20 \log \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)$  yol kaybı olarak verilir (Shaker ve Mazin 2019).

Verici ve alıcı anten kazancı  $G_T$ , ve  $G_R$ , (3.29) ve (3.30) ile verilir.

$$G_T = 32/\theta_{div}^2 \quad (3.29)$$

$$G_R = \left(\frac{\pi D_r}{\lambda}\right)^2 \quad (3.30)$$

Burada  $D_r$  alıcı açıklık çapıdır,  $\theta_{div}^2$  ise diverjans ışın açısı olup (3.31) ile verilir.

$$\theta_{div}^2 = \frac{4\lambda}{\pi D_t} \quad (3.31)$$

Burada  $D_t$  verici sistemin açıklık çapıdır (Shaker ve Mazin 2019).

$$BER = \frac{\exp(-SNR/2)}{(2\pi SNR)^{0.5}} \quad (3.32)$$

## 4. BULGULAR

### 4.1 Atmosferdeki Molekül Sayısı

Atmosferde bulunan azot, oksijen, argon, karbondioksit, su buharı gibi moleküller birbirlerinden farklı yoğunluklara ve küresel boyutlara sahiptirler. Atmosferdeki moleküllerin sayısı ve çeşitliliği bölgesel olarak değişmektedir. Atmosferde bulunan gazların molekül sayılarının hesaplanabilmesi için ortamın basınç değeri, molekülün yüzey alanı ve molekülün bulunduğu yükseklik gibi bilgiler bilinmelidir.

Bilindiği üzere basınç, bir yüzey üzerine etki eden kuvvetin birim alana düşen miktarıdır ve standart koşullarda 1 atmosferik basınç 101,325 Pascal'a eşittir. Bu çalışmada alan olarak belirtilen yüzey Dünya'nın yüzeyidir ve yaklaşık olarak küreseldir. Bir kürenin yarıçapı  $r$  olmak üzere, kürenin alanı  $4\pi r^2$  formülü ile hesaplanır.

Dünya'nın yarıçapı 6371 km olup, kürenin alanı formülünden,  $5,1 \times 10^{19} m^2$  bulunur. Kuvvet ise basınç ve yüzey alanının birbirleriyle çarpımı ile hesaplanır. Buradan yola çıkarak,  $F = 101,325 \text{ Pascal} \times 5,1 \times 10^{19} m^2 = 2,17 \times 10^{19} \text{ Newton}$  bulunur. Kuvvet aynı zamanda kütle ve yer çekiminin çarpımıdır. Buradan hareketle kütle,  $5,17 \times 10^{19} \text{ Newton} / 9,8 = 5,27 \times 10^{18} \text{ kilogram} = 5,27 \times 10^{21} \text{ gram}$  olarak bulunur.

Atmosferde yer alan hava moleküllerinin molar kütlelerinin hesaplanması için, havanın molar kütlesi ile mol hesabı yapılmalıdır. Havanın molar kütlesi 29 gram/mol'dür. Buradan hareketle,  $5,27 \times 10^{21} \text{ gram} \times 1 \text{ mol} / 29 \text{ gram} = 1,81 \times 10^{20} \text{ mol}$  olarak bulunur. Bulunan sonucun molar kütle ile çarpılması için Avogadro sabiti ile çarpılır.  $1,81 \times 10^{20} \times 6,02214179 \times 10^{23} = 1,09 \times 10^{44}$  bulunur. Atmosferdeki hava moleküllerinin  $1,09 \times 10^{44}$  molekül kadar olduğu hesaplanmış olur. Alçak atmosferde bulunan gaz oranları %78 azot ( $N_2$ ), %20 oksijen ( $O_2$ ), %0,9 argon (Ar) ve %0,04 diğer (%0,0038  $CO_2$ , %0,0018 Ne, %0,000524 He, %0,00018  $CH_4$ , %0,00055  $H_2$ , %0,000114 Kr) olduğu bilinmektedir. Buradan yola çıkılarak atmosferdeki her bir gazın molekül sayısı bulunabilir.

## 4.2. Mie ve Rayleigh Saçılması

Atmosferde lazer ışını yayılımının zayıflaması (4.1) ile verilmiştir.

$$P_R/P_T = \exp(-\tau) = \exp(-\gamma R) \quad (4.1)$$

Burada  $\tau$  değeri optik derinlik ile ilişkilidir, zayıflama katsayısı  $\gamma$  ve iletim hattı uzunluğu  $R$  olmaktadır.

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (1/m) \quad (4.2)$$

Yakın kızılötesi bölgede (NIR) kırılma indisinin sanal kısmı ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu sebeple, yalnızca saçılmalardan kaynaklanan zayıflama ele alınabilir. Böylelikle, zayıflama(saçılma) katsayısı (4.2) sadeleştirilerek, (4.3) halini alır.

$$\gamma(\lambda) = \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (1/m) \quad (4.3)$$

Burada  $\beta$  saçılma katsayısıdır. Indisler  $m$  ve  $a$  sırası ile molekülü ve aerosolü temsil eder. (4.3)'teki her bir katsayı lazer yayılımının dalgaboyuna bağlıdır. Aerosol saçılma Mie saçılması, moleküler saçılma ise Rayleigh saçılması olarak bilinir.

Mie saçılması;

$$\beta_a = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550nm} \right)^\rho \quad (1/m) \quad (4.4)$$

Burada,  $V$  (km) görünürlük,  $\lambda$ (nm) dalgaboyu,  $\rho$  saçıcı parçacıkların boyut dağılımıdır. Boyut dağılımının görünürlük ile arasında aşağıdaki bağıntı bulunmaktadır.

$$p = \begin{cases} 1,6 & V \geq 50 \text{ km} \\ 1,3 & 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,585V^{\frac{1}{3}} & V \leq 6 \text{ km} \end{cases} \quad (4.5)$$

Tek molekül için Rayleigh saçılması;

$$\beta_m = 0.827N_p A_p^3 \lambda^{-4} \quad (1/m) \quad (4.6)$$

Burada  $N_p$  birim mikrometreküp başına molekül sayısını,  $A_p$  ise saçılmanın kesit alanını temsil eder. (4.6)'da verilen  $\beta_m = (C)\lambda^{-4}$ , parametrelerinden  $C$  teriminin yapılan çalışmalarda deniz seviyesindeki değerinin  $1,1 \times 10^{-3}$  olduğu belirtilmiştir. (Möller 1964). Saçılma kesit alanı ise,

$$\sigma_{sca} = \pi r^2 \quad (m^2) \quad (4.7)$$

Burada  $r$ , kütle numarası  $A$  olan parçacığın çekirdeğinin yarıçapıdır (Bucholtz 1995). Yapılan çoğu saçılma deneylerinde, parçacıkların küresel olduğu ve aynı yoğunluğa sahip oldukları varsayılır. Fermi modeli adı verilen bu durum (4.8) ile ifade edilir (Nave 2000).

$$r = r_0 A^{1/3} \quad (m) \quad (4.8)$$

(4.8) içerisinde yer alan  $r_0 = 1,2 \times 10^{-15}$  m olarak alınmıştır. Çizelge 4.1'de, kütle numarası bilinen gazların, yarıçapları ve kesit alanları (4.7) ile hesaplanarak verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Atmosferik gaz moleküllerinin yarıçapları ve kesit alanları

Gaz	Kütle numarası A (g/mol)	Yarıçap r (m)	Kesit alanı $A_p$ ( $\mu m^2$ )
H <sub>2</sub>	2	$1,511 \times 10^{-15}$	$7,172 \times 10^{-24}$
He	4	$1,904 \times 10^{-15}$	$1,138 \times 10^{-23}$
CH <sub>4</sub>	16	$3,023 \times 10^{-15}$	$2,870 \times 10^{-23}$
Ne	20	$0,325 \times 10^{-14}$	$3,318 \times 10^{-23}$
N <sub>2</sub>	28	$0,364 \times 10^{-14}$	$4,162 \times 10^{-23}$
O <sub>2</sub>	31	$0,376 \times 10^{-14}$	$4,441 \times 10^{-23}$
Ar	39	$0,406 \times 10^{-14}$	$5,178 \times 10^{-23}$
CO <sub>2</sub>	44	$0,423 \times 10^{-14}$	$5,621 \times 10^{-23}$
Kr	83	$0,523 \times 10^{-14}$	$8,593 \times 10^{-23}$

Saçılma analizi atmosferin ilk katmanını olan troposfer katında gerçekleştirilmektedir; çünkü gaz yoğunluğu üst katmanlara çıkıldıkça azalmakta ve saçılma ihmal edilmektedir.

Troposfer katmanını atmosferin Dünya yüzeyinden 12 km'lik yüksekliğe kadar olan bölümüdür. Troposfer katmanında bulunan gazların molekül sayısı ve birim hacimdeki molekül sayısının hesaplanabilmesi için ilk olarak troposferin Dünya'yı sardığı hacmi hesaplamak gerekmektedir. (4.9)'da troposfer hacmi verilmiştir.

Böylece,

$$V_{Trop} = V_{Tüm} - V_{Dünya} \quad (4.9)$$

$$V_{Trop} = \frac{4}{3}\pi(12km + 6,3km)^3 - \frac{4}{3}\pi(6,3km)^3$$

$$V_{Trop} = 2,463 \times 10^{13} km^3 = 2,463 \times 10^{16} m^3 = 2,463 \times 10^{22} \mu m^3$$

olarak bulunur.

Troposferin kapladığı hacim yardımı ile birim mikrometreküpdeki molekül sayısı hesaplanarak Çizelge 4.2'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Atmosferdeki gaz molekül sayıları

<b>Gaz</b>	<b>Molekül sayısı</b>	<b>Birim mikrometreküpdeki molekül sayısı <math>N_p</math> (<math>1/\mu m^3</math>)</b>
<b>H<sub>2</sub></b>	$5,45 \times 10^{37}$	$2,2 \times 10^{15}$
<b>He</b>	$5,45 \times 10^{39}$	$2,2 \times 10^{17}$
<b>CH<sub>4</sub></b>	$1,962 \times 10^{38}$	$8,1 \times 10^{15}$
<b>Ne</b>	$1,962 \times 10^{38}$	$8,1 \times 10^{15}$
<b>N<sub>2</sub></b>	$81,75 \times 10^{42}$	$3,3 \times 10^{21}$
<b>O<sub>2</sub></b>	$2,18 \times 10^{43}$	$8,8 \times 10^{20}$
<b>Ar</b>	$1,0137 \times 10^{42}$	$4,2 \times 10^{19}$
<b>CO<sub>2</sub></b>	$4,142 \times 10^{40}$	$1,7 \times 10^{18}$
<b>Kr</b>	$1,09 \times 10^{38}$	$4,5 \times 10^{15}$



(4.10) kullanılarak, elde edilen veriler ile 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboylarında Rayleigh saçılma analizleri her bir gaz için hesaplanabilir.

$$B_m = 0,827N_p A_p^3 \lambda^{-4} \quad (1/m) \quad (4.10)$$

Örnek olarak, azot için yapılacak olan hesaplama,

$$B_m = 0,827N_p A_p^3 \lambda^{-4} \quad (1/m)$$

$$B_m = 0,827(3,3 \times 10^{21})(4,162 \times 10^{-23})^3(0,850)^{-4} = 3,7692 \times 10^{-40} \quad (1/m) \quad \text{olarak}$$

bulunur. Her bir gaz için yapılan hesaplamalar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** 850 nm 1064 nm ve 1550 nm dalgaboyları için Rayleigh saçılma değerleri

Gaz	850 nm Rayleigh saçılması (1/m)	1064 nm Rayleigh saçılması (1/m)	1550 nm Rayleigh saçılması (1/m)
H <sub>2</sub>	1,2585x10 <sup>-48</sup>	5,2370x10 <sup>-49</sup>	1,1628x10 <sup>-49</sup>
He	5,1367x10 <sup>-46</sup>	2,0921x10 <sup>-46</sup>	4,6454x10 <sup>-47</sup>
CH <sub>4</sub>	3,0336x10 <sup>-46</sup>	1,2355x10 <sup>-46</sup>	2,7435x10 <sup>-47</sup>
Ne	4,6875x10 <sup>-46</sup>	1,9092x10 <sup>-46</sup>	4,2392x10 <sup>-47</sup>
N <sub>2</sub>	3,7692x10 <sup>-40</sup>	1,5351x10 <sup>-40</sup>	3,4087x10 <sup>-41</sup>
O <sub>2</sub>	1,2211x10 <sup>-40</sup>	4,9735x10 <sup>-41</sup>	1,1043x10 <sup>-41</sup>
Ar	9,2378x10 <sup>-42</sup>	3,7624x10 <sup>-42</sup>	8,3543x10 <sup>-43</sup>
CO <sub>2</sub>	4,7383x10 <sup>-43</sup>	1,9481x10 <sup>-43</sup>	6,3249x10 <sup>-44</sup>
Kr	4,5235x10 <sup>-45</sup>	1,8424x10 <sup>-45</sup>	4,0909x10 <sup>-46</sup>

(4.4) ile elde edilen Mie saçılma değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. İlk olarak görünürlük değeri 50 km'den büyük alınarak Mie saçılma değerleri hesaplanmıştır. Stratosfer katmanı 50 km' ye kadar olan kısmı kapsamaktadır. Stratosfer katmanından sonra ki katmanlarda gaz yoğunluğu azalmaktadır. Dünya'dan 15 km mesafe ise troposfer katmanı ile stratosfer katmanlarının birleştiği bölge olduğundan, gaz yoğunluklarının değiştiği bölge olması nedeni ile bu görünürlük mesafesi incelenmiştir. 6 km' den küçük görünürlük değeri ise görüş hattının azaldığı mesafe olarak alınmıştır.

**Çizelge 4.4.** 850 nm 1064 nm ve 1550 nm dalgaboyları için Mie saçılma değerleri

Görünürlük (km)	Mie Saçılması (1/m)		
	850 nm	1064 nm	1550 nm
V=50	$1,56 \times 10^{-4}$	$2,24 \times 10^{-4}$	$4,10 \times 10^{-4}$
V=15	$4,59 \times 10^{-4}$	$6,14 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-3}$
V=6	0,0666	0,7250	39,5545

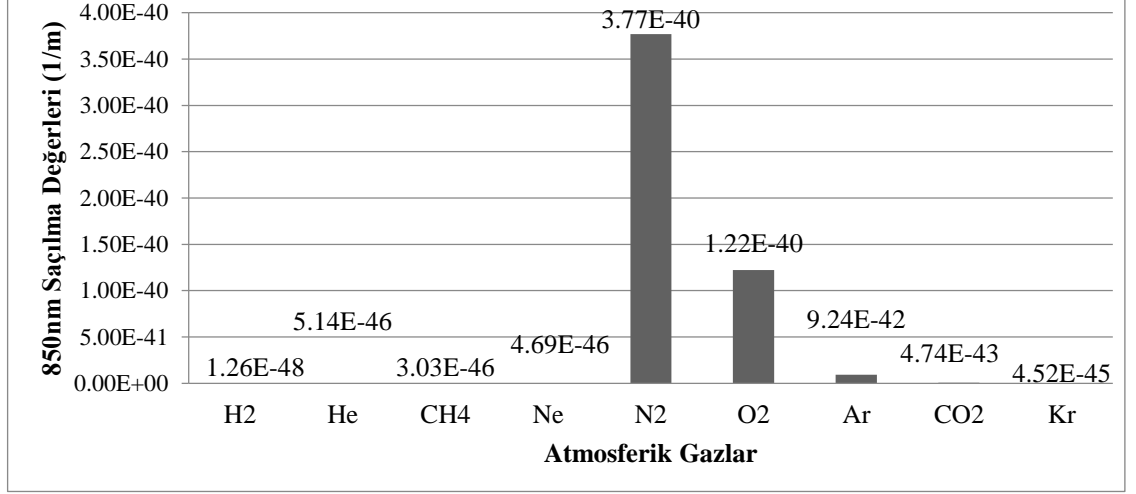
Temel zayıflama denklemi kullanılarak, Rayleigh saçılma değerleri ile Mie saçılma değerleri toplanarak, zayıflama 6 km'lik hat mesafesi için hesaplanırsa Çizelge 4.5'de verildiği üzere, elde edilen sonuçlara göre tüm zayıflamalar eşit çıkacaktır. Belirlenen dalgaboyları ve alınan hat mesafesi için tüm gazların Rayleigh saçılma değerleri, Mie saçılma değerlerine oranla çok küçük olmaktadır. Buradan yola çıkılarak, yakın kızıl ötesi bölgede Rayleigh saçılmasının ihmal edileceği anlaşılmaktadır.

**Çizelge 4.5.** 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboyları için zayıflama değerleri

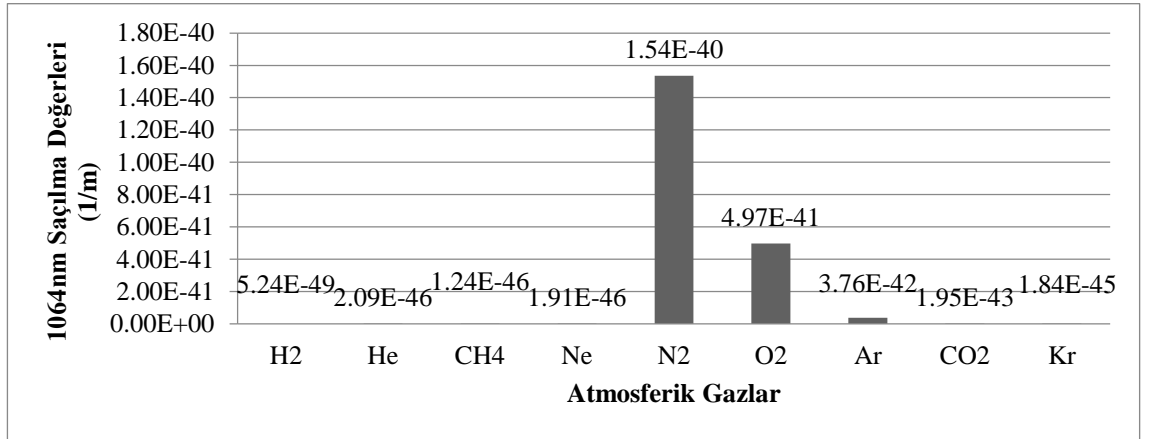
Gaz	850 nm zayıflama $\gamma$ (1/m)	1064 nm zayıflama $\gamma$ (1/m)	1550 nm zayıflama $\gamma$ (1/m)
H <sub>2</sub>	0,0666	0,7250	39,5545
He	0,0666	0,7250	39,5545
CH <sub>4</sub>	0,0666	0,7250	39,5545
Ne	0,0666	0,7250	39,5545
N <sub>2</sub>	0,0666	0,7250	39,5545
O <sub>2</sub>	0,0666	0,7250	39,5545
Ar	0,0666	0,7250	39,5545
CO <sub>2</sub>	0,0666	0,7250	39,5545
Kr	0,0666	0,7250	39,5545

Elde edilen sonuçlar Şekil 4.1- 4.3'te verilen grafikler ile değerlendirilebilir. Şekil 4.1. 850 nm dalgaboyu için her bir gaz molekülünün Dünya'dan 6 km mesafedeki Rayleigh saçılma değerlerini vermektedir. Görüldüğü gibi azot en yüksek değere sahip olup, takibinde oksijen gelmektedir. Diğer gazların zayıflama oranları birbirlerine yakındır. Şekil 4.2'de ise 1064 nm dalgaboyu için Rayleigh saçılma değerleri görülmektedir. 850 nm'ye göre 1064 nm dalgaboyunda da öne çıkan gaz molekülü azot ve oksijen

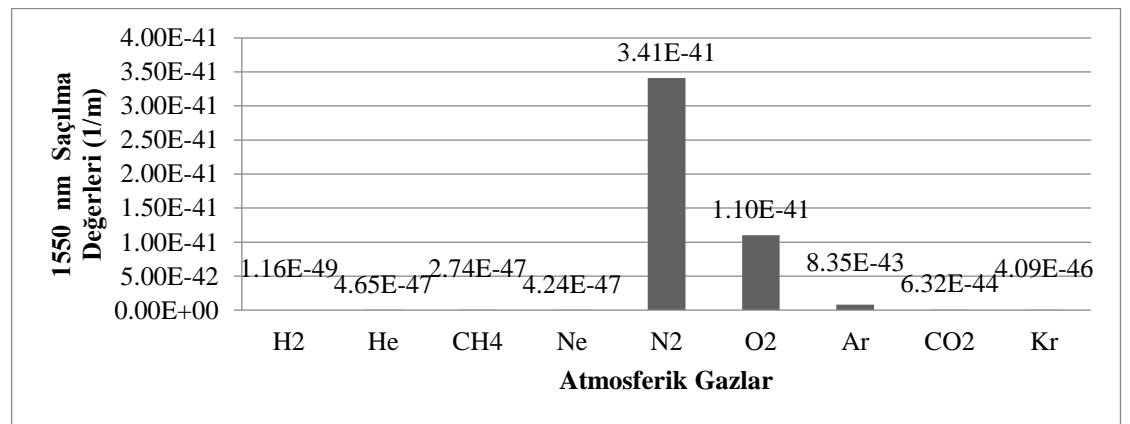
olmuştur. Şekil 4.3'te ise 1550 nm dalgaboyu için Rayleigh saçılma değerleri görülmektedir.



Şekil 4.1. 850 nm dalgaboyu için Rayleigh saçılma değerleri



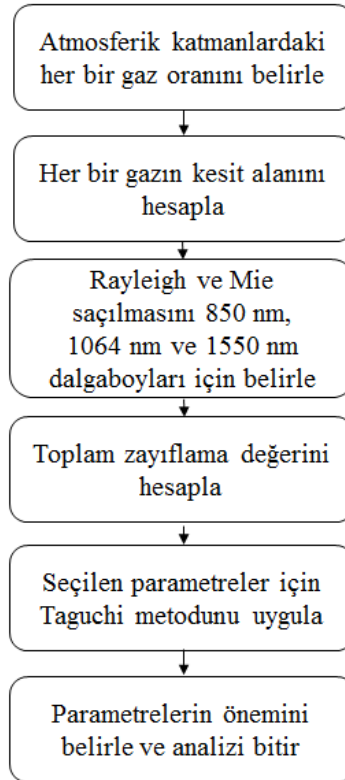
Şekil 4.2. 1064 nm dalgaboyu için Rayleigh saçılma değerleri



Şekil 4.3. 1550 nm dalgaboyu için Rayleigh saçılma değerleri

### 4.3. Taguchi Analiz Yönetiminin Uygulanması

Taguchi analiz yönteminin uygulanması için, öncelikle parametreler belirlenmelidir. Tez konusu atmosferik zayıflama için öncelikle atmosferik katmanlardaki her bir gaz oranı belirlenir. Belirlenen gaz oranlarına göre her bir gaz molekülünün kesit alanı hesaplanır. Seçilen her bir dalgaboyu için Rayleigh ve Mie saçılma değerleri hesaplanarak toplam zayıflama değerleri bulunur. Şekil 4.4'te işlem adımları gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Önerilen metodun işlem adımları

Taguchi analiz yöntemi için bu adımdan sonra parametreler seçilir. Seçilen parametrelere göre deneysel bir tablo oluşturularak öncelik sırası belirlenir. Analiz sonucunda düşük seviye ile gereksiz olan parametreler belirlenerek analiz süresi kısaltılmış olur. Taguchi analizinde seviyelerinin belirlenmesi için belirli tablolar oluşturulmuştur. Analiz için, değişken parametre sayısı 6, alt ve üst limit 2 seviye alınmıştır. Yapılan seçimlere göre Taguchi ortogonal dizi seçim matrisine göre 6

parametre ve 2 seviye için Taguchi tablosunda L8 seviyesi alınır. L8 tablosu ise Çizelge 4.6 ile verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** L8 ortogonal dizisi

Seviye	Sütun					
	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2
4	1	2	2	2	2	1
5	2	1	2	1	2	1
6	2	1	2	2	1	2
7	2	2	1	1	2	2
8	2	2	1	2	1	1

L8 tablosuna göre, seçilen parametreler ile yeni analiz tablosu oluşturulur. Analiz tablosunun oluşturulması için minimum ve maksimum parametre seviyeleri için bir tablo oluşturulur. Çizelge 4.7.' de seçilen 6 parametre ve 2 seviyeye göre oluşturulan tablo yer almaktadır.

**Çizelge 4.7.** Deney tasarımı seviyeleri

Parametreler	Seviye I	Seviye II
İletim mesafesi (R)	1 km	12 km
Görünürlük(V)	6 km	50 km
Saçıcı parçacık boyut dağılımı (p)	1.3	1.6
Birim mikrometreküp başına düşen parçacık sayısı ( $N_p$ )	$2,2 \times 10^{15} \text{ H}_2$ ( $1/\mu\text{m}^3$ )	$3,3 \times 10^{21} \text{ N}_2$ ( $1/\mu\text{m}^3$ )
Saçılma kesit alanı ( $\sigma_{sca}$ )	$7,172 \times 10^{-24} \mu\text{m}^2$	$8,593 \times 10^{-23} \mu\text{m}^2$
Dalgaboyu ( $\lambda$ )	850 nm	1064 nm

Çizelgedeki veriler, analizi yapılan deneyin sonuçlarının en büyük ve en küçük değerleri olarak alınmıştır. Bu sebeple en düşük gaz parçacık sayısı olarak hidrojen, en yüksek gaz parçacık sayısı için de azot kullanılmıştır. 1550 nm değeri alınmamıştır, çünkü zayıflatma değeri yaklaşık olarak  $\sim 40$  olmaktadır. Çok fazla zayıflatma değeri

iletişimin tamamen kaybolması anlamına gelmektedir. Bu nedenle 1550 nm dalgaboyundaki iletişim diğer parametreler için ihmal edilmiştir. Deneysel tasarım grafiği L8 kullanılarak, Çizelge 4.7. yardımıyla Çizelge 4.8 oluşturulur.

**Çizelge 4.8.** Serbest uzay optik zayıflatma L8 deney tasarım grafiği

Deneyler	İletim mesafesi (km)	Görünürlük (km)	Saçıcı parçacık boyut dağılımı	Birim mikrometre küp başına düşen parçacık sayısı	Saçılma kesit alanı ( $\mu\text{m}^2$ )	Dalgaboyu (nm)
1	1	6	1.3	$2,2 \times 10^{15}$ ( $\text{H}_2$ )	$7,172 \times 10^{-24}$	850
2	1	6	1.3	$3,3 \times 10^{21}$ ( $\text{N}_2$ )	$8,593 \times 10^{-23}$	1064
3	1	50	1.6	$2,2 \times 10^{15}$ ( $\text{H}_2$ )	$7,172 \times 10^{-24}$	1064
4	1	50	1.6	$3,3 \times 10^{21}$ ( $\text{N}_2$ )	$8,593 \times 10^{-23}$	850
5	12	6	1.6	$2,2 \times 10^{15}$ ( $\text{H}_2$ )	$8,593 \times 10^{-23}$	850
6	12	6	1.6	$3,3 \times 10^{21}$ ( $\text{N}_2$ )	$7,172 \times 10^{-24}$	1064
7	12	50	1.3	$2,2 \times 10^{15}$ ( $\text{H}_2$ )	$8,593 \times 10^{-23}$	1064
8	12	50	1.3	$3,3 \times 10^{21}$ ( $\text{N}_2$ )	$7,172 \times 10^{-24}$	850

Çizelge 4.8. (4.1) yardımı ile hesaplanarak oluşturulur. Çizelge 4.8.'e göre (3.1) kullanılarak, deney 1 için birinci satırdaki değerlerin sonucu yazılır. Aynı işlemler diğer 7 satır için tekrarlanarak Taguchi işaret gürültü oranlarının hesabı Çizelge 4.9.'daki gibi elde edilir.

**Çizelge 4.9.** Taguchi analiz yöntemi SNR sonuçları

Deney	SNR
1	0,315
2	0,2151
3	0,7987
4	0,8547
5	$1,5302 \times 10^{-7}$
6	$1,7317 \times 10^{-10}$
7	0,10939
8	0,1915

Seçilen parametrelerin önem sırasının belirlenmesi için, Çizelge 4.8. kullanılarak L8 tablosuna göre, parametrelerin ortalamaları alınıp, önem seviyeleri bulunur. Çizelge 4.10’da seçilen parametrelerin alınan seviyelere göre önem sırası verilmiştir.

**Çizelge 4.10.** Analiz sonuçları ve önem seviyeleri

<b>Parametreler</b>	<b>Seviye 1</b>	<b>Seviye2</b>	<b>Sıra</b>
<b>İletim mesafesi</b>	-56,373	-16,789	6.000
<b>Görünürlük</b>	-7,783	-110,967	1.000
<b>Saçıcı parçacık boyut dağılımı</b>	-1,583	-73,413	3.000
<b>Birim mikrometreküp başına düşen parçacık sayısı</b>	-5,914	-70,815	5.000
<b>Saçılma kesit alanı</b>	-70,829	-5,891	4.000
<b>Dalgaboyu</b>	-3,144	-89,810	2.000

Çizelge 4.10’a göre, görünürlük en önemli parametredir. Ardından dalgaboyu ve saçıcı parçacık boyutu dağılımı gelmektedir.

Analiz sonucu en önemli parametrenin saçılımı doğrudan etkileyen görünürlük olduğu görülmektedir. Seçilen gaz molekülleri boyutu açısından Mie saçılımının zayıflatma parametresine etkisinin, Rayleigh saçılmasından fazla olduğu anlaşılmaktadır. Dalgaboyu, görünürlük ile birlikte düşünüldüğünde ise düşük görünürlükte dalgaboyunun zayıflatmaya etkisinin azaldığı görülmektedir. Düşük görünürlük durumunda seçilen dalgaboyları karşılaştırılacak olursa, 1064 nm ve 1550 nm’ye kıyasla 850 nm’de yapılan haberleşme daha verimli olmaktadır.

Bu koşullar altında, deneylerin sayısı seçilen ‘6’ parametre kullanılarak azaltılır. Taguchi analiz yöntemi düşük parametrelerin ortadan kaldırılmasını sağlar ve dolayısıyla yaklaşık sonuç daha kısa sürede elde edilir.

#### 4.4 Aerosol Mie Saçılması

Tez çalışmasının bu bölümünde, aerosoller ve gaz moleküllerinden daha büyük boyuttaki su damlacıkları üzerinde Mie saçılma analizi gerçekleştirilmiştir. Saçılma analizinde kullanılmak üzere dört farklı Matlab kodu kullanılmıştır. EK 1, EK 2, EK 3 ve EK 4' te kaynak kodlar verilmiştir (Matzler 2002). Saçılma analizi grafikleri için Oregon Teknoloji Enstitüsü'nün geliştirmiş olduğu benzetim programı kullanılmıştır (Jacques ve Prahl 1998).

EK 1' de verilen Matlab programı,  $|S_1|^2$  ve  $|S_2|^2$  değerlerini hesaplar. Diğer Matlab programlarını içerisinde çağırarak hesaplamaktadır. Mie saçılma yoğunlukları  $S_1$  ve  $S_2$ 'nin saçılma matrisini,  $u = \cos\theta$ 'nin bir fonksiyonu olarak hesaplar. Burada  $|S_1|^2$  parametresi ( $0 < \theta < \pi$ ) aralığında üst yarım daireyi,  $|S_2|^2$  parametresi ise ( $\pi < \theta < 2\pi$ ) aralığında alt yarım daireyi oluşturmaktadır. Burada  $m$  terimi ile gösterilen parametre kompleks kırılma indisini,  $m_1$  terimi gerçek,  $m_2$  sanal kısmı ifade eder.  $x$  terimi boyut parametresini,  $n$  terimi örneklem sayısını ifade eder. EK 2'de verilen program, saçılma genlikleri olan  $S_1$  ve  $S_2$  değerlerinin hesabını yapmaktadır. Burada  $k$  dalga numarasını,  $a$  parçacık yarıçapını ve  $\theta$  saçılma açısını ifade eder. EK 3'te verilen program Mie saçılma katsayıları olan  $a_n$  ve  $b_n$ 'i hesaplamaktadır. Mie saçılma katsayılarının hesaplanmasında, yüksek seviyeli Bessel fonksiyonlarının çözümü kullanılmaktadır.  $a_n$  ve  $b_n$  terimlerinin açılımında, soğurum özellikleri incelenmediğinden manyetik geçirgenlik katsayısı 1 alınarak denklemler sadeleştirilmiştir. EK 4'te verilen program ise Lagrange polinomları olan  $\pi_n$  ve  $\tau_n$  'in değerlerini hesaplamaktadır.  $n$  değeri 1'den başlayarak istenilen tekrar sayısı olan  $n_{max}$ 'a kadar tekrarlamayı yaparak polinomları hesaplar.

Tez çalışmasının bu kısmında Taguchi analiz yöntemi ile elde edilen önemli parametrelerden biri olan dalgaboyunun daha büyük boyutlu moleküller üzerindeki saçılmaları analiz edilmiştir. Saçılma verimliliklerinin bulunması amacı ile üç farklı dalgaboyunda lazer ışını ve üç farklı boyuttaki su molekülü üzerinde Mie teorisi uygulanmıştır. Su moleküllerinin yarıçapları 0,1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  olarak seçilerek, lazer ışını dalgaboyları 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm kullanılmıştır. Saçılma analizinin yapıldığı molekül su damlası olarak seçildiği için molekül kırılma indisi 1,3 alınmış,



molekölün bulunduğu ortam hava olduğundan, ortam kırılma indisi 1 alınmıştır. Çizelge 4.11’de verilen giriş parametreleri için elde edilen analiz sonuçları Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14’te sırası ile 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboyları için sonuçlar verilmiştir.

**Çizelge 4.11.** Mie saçılma giriş parametreleri

<b>Giriş Parametreleri</b>		
<b>Tanım</b>	<b>Simge</b>	<b>Alınan değer</b>
<b>Küre yarıçapı</b>	$r$	0,1 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$
<b>Ortam kırılma indisi</b>	$n_{ort}$	1
<b>Küre kırılma indisi</b>	$n_{sph}$	1,3
<b>Dalgaboyu</b>	$\lambda$	850 nm, 1064 nm, 1550 nm

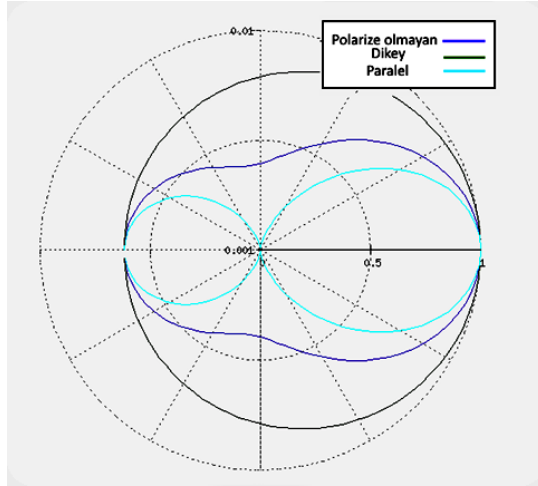
**Çizelge 4.12.** 850 nm dalgaboyu için çıkış parametreleri

<b>Tanım</b>	<b>Simge</b>	<b>r=0,1 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>r=1 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>r=10 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>Boyut parametresi</b>	$x$	0,7392	7,392	73,92
<b>Faz fonksiyonunun ortalama kosinüsü</b>	$\cos\theta$	0,098239	0,85981	0,87439
<b>Saçılma verimi</b>	$Q_{sca}$	0,0257	38,469	20,612
<b>Kayıp verimi</b>	$Q_{ext}$	0,0257	38,469	20,612
<b>Geri saçılma verimi</b>	$Q_{back}$	0,029894	0,062739	0,20443
<b>Saçılma kesit alanı (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	$\sigma_{sca}$	0,00080739	12,085	647,55
<b>Kayıp kesit alanı (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	$\sigma_{ext}$	0,00080739	12,085	647,55
<b>Geri saçılma kesit alanı (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	$\sigma_{back}$	0,00093915	0,1971	64,224
<b>Saçılma katsayısı (<math>\text{mm}^{-1}</math>)</b>	$K(\beta)$	0,080738	1208,5	64753
<b>Toplam zayıflama katsayısı (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>	$\gamma$	80,738	$1,208 \times 10^6$	$64,753 \times 10^6$

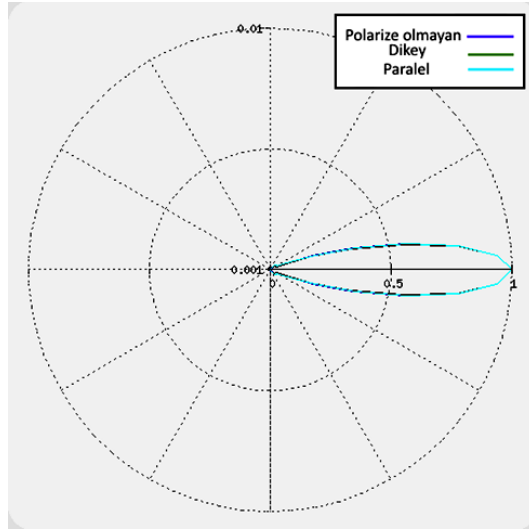
850 nm dalgaboyuna sahip bir ışın, yarıçapı 0,1  $\mu\text{m}$  olan bir parçacık ile çarpıştığında, boyut parametresi sıfırdan küçük olduğu için tam olarak Mie saçılması

gerçekleşmemiştir. İleri yönlü saçılmalar olduğu gibi, geri yönlü saçılmalar da mevcuttur. Bu durumda kayıplar artacaktır.

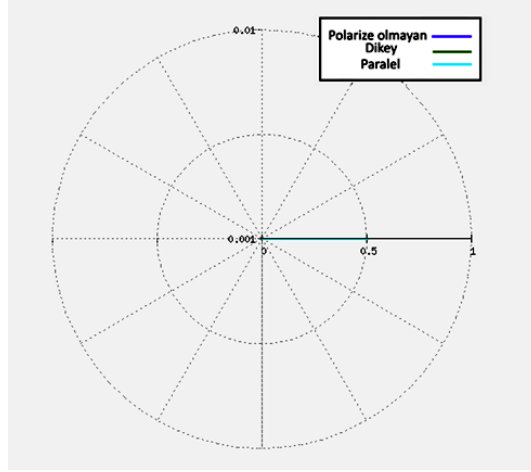
Şekil 4.5-4.7’de 850 nm dalgaboyunda sırası ile 0,1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  yarıçaplı parçacık için saçılma grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.5. 0,1  $\mu\text{m}$  yarıçap ve 850 nm dalgaboyu için saçılma grafiği



Şekil 4.6. 1  $\mu\text{m}$  yarıçap ve 850 nm dalgaboyu için saçılma grafiği



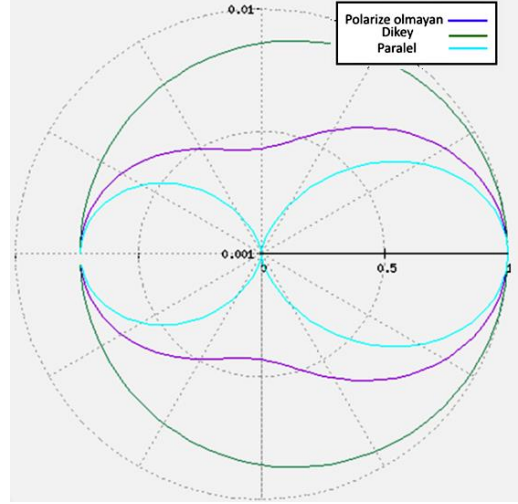
**Şekil 4.7.** 10 µm yarıçap ve 850 nm dalgaboyu için saçılma grafiği

850 nm dalgaboyunda, 0,1 µm yarıçaplı parçacık için geriye saçılmalar gözlemlenir. Ancak parçacık boyutu dalgaboyundan büyük olduğunda, Mie teorisini doğrular nitelikte 1 µm ve 10 µm için ileri yönlü saçılmalar meydana gelir. 1064 nm Mie saçılma analizi çıkış parametreleri Çizelge 4.13'te verilmiştir. 3 farklı yarıçapa sahip parçacık için Mie analizi gerçekleştirilmiştir.

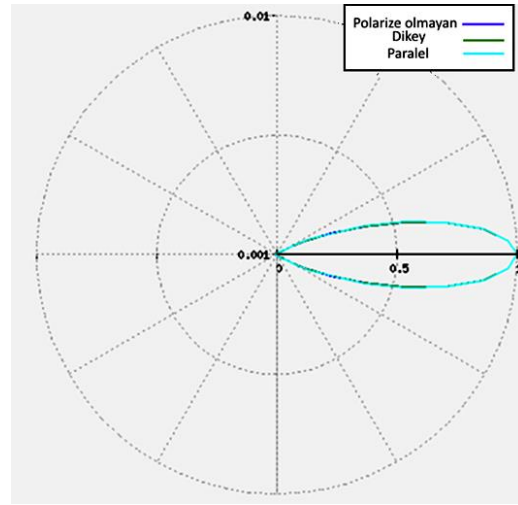
**Çizelge 4.13.** 1064 nm dalgaboyu için çıkış parametreleri

Tanım	Simge	r=0,1 µm	r=1 µm	r=10 µm
<b>Boyut parametresi</b>	$x$	0,59052	5,9052	59,052
<b>Faz fonksiyonunun ortalama kosinüsü</b>	$\cos\theta$	0,062621	0,87125	0,85264
<b>Saçılma verimi</b>	$Q_{sca}$	0,010839	3,7419	2,2715
<b>Kayıp verimi</b>	$Q_{ext}$	0,010839	3,7419	2,2715
<b>Geri saçılma verimi</b>	$Q_{back}$	0,01388	0,36838	2,5566
<b>Saçılma kesit alanı (µm<sup>2</sup>)</b>	$\sigma_{sca}$	0,00034052	11,756	713,61
<b>Kayıp kesit alanı (µm<sup>2</sup>)</b>	$\sigma_{ext}$	0,00034052	11,756	713,61
<b>Geri saçılma kesit alanı (µm<sup>2</sup>)</b>	$\sigma_{back}$	0,00043605	1,1573	803,18
<b>Saçılma katsayısı (mm<sup>-1</sup>)</b>	$K(\beta)$	0,034051	1175,6	71362
<b>Toplam zayıflama katsayısı (m<sup>-1</sup>)</b>	$\gamma$	34,051	1,1756x10 <sup>6</sup>	71,362x10 <sup>6</sup>

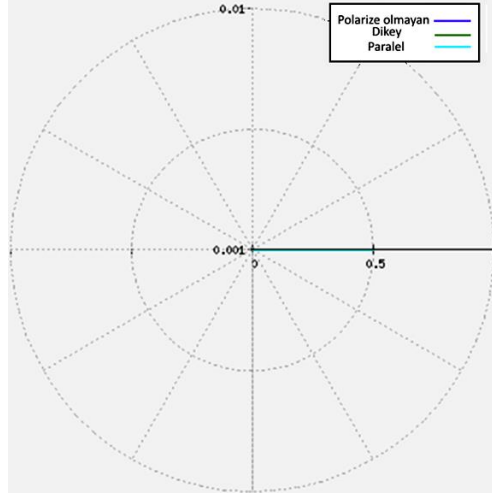
Şekil 4.8 - 4.10'da 1064 nm dalgaboyunda sırası ile 0,1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  yarıçaplı parçacık için saçılma grafikleri verilmiştir. 850 nm dalgaboyu analizine benzer grafikler elde edilmiştir. Ancak 850 nm dalgaboyunda 1  $\mu\text{m}$  yarıçaplı parçacık saçılma doğrultusu, 1064 nm de gerçekleşen saçılma yelpazesinden daha dardır.



Şekil 4.8. 0,1  $\mu\text{m}$  yarıçap ve 1064 nm dalgaboyu için saçılma grafiği



Şekil 4.9. 1  $\mu\text{m}$  yarıçap ve 1064 nm dalgaboyu için saçılma grafiği



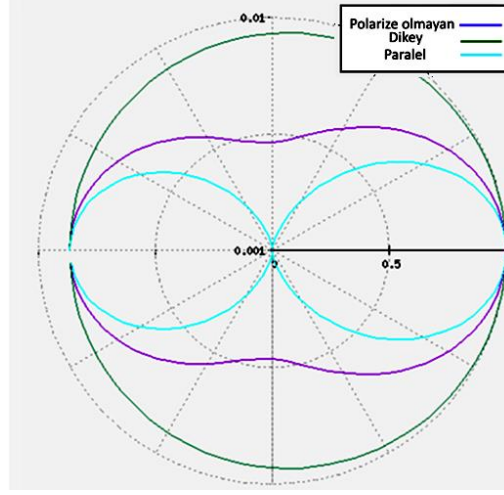
**Şekil 4.10.** 10  $\mu\text{m}$  yarıçap ve 1064 nm dalgaboyu için saçılma grafiği

1550 nm dalgaboyunda Mie saçılma analizi çıkış parametreleri Çizelge 4.14'te verilmiştir. 3 farklı yarıçapa sahip parçacık için Mie analizi gerçekleştirilmiştir.

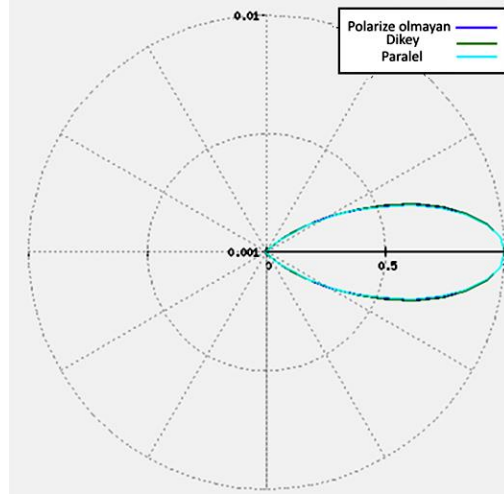
**Çizelge 4.14.** 1550 nm dalgaboyu için çıkış parametreleri

Tanım	Simge	$r=0,1 \mu\text{m}$	$r=1 \mu\text{m}$	$r=10 \mu\text{m}$
<b>Boyut parametresi</b>	$x$	0,40537	4,0537	40,537
<b>Faz fonksiyonunun ortalama kosinüsü</b>	$\cos\theta$	0,062621	0,83727	0,82236
<b>Saçılma verimi</b>	$Q_{\text{sca}}$	0,010839	2,4828	2,4312
<b>Kayıp verimi</b>	$Q_{\text{ext}}$	0,010839	2,4828	2,4312
<b>Geri saçılma verimi</b>	$Q_{\text{back}}$	0,01388	0,1771	7,3043
<b>Saçılma kesit alanı (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	$\sigma_{\text{sca}}$	0,00034052	7,7999	763,78
<b>Kayıp kesit alanı (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	$\sigma_{\text{ext}}$	0,00034052	7,7999	763,78
<b>Geri saçılma kesit alanı (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	$\sigma_{\text{back}}$	0,00043605	0,55638	2294,7
<b>Saçılma katsayısı (<math>\text{mm}^{-1}</math>)</b>	$K(\beta)$	0,034051	779,99	76377
<b>Toplam zayıflama katsayısı (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>	$\gamma$	34,051	$0,7799 \times 10^6$	$76,377 \times 10^6$

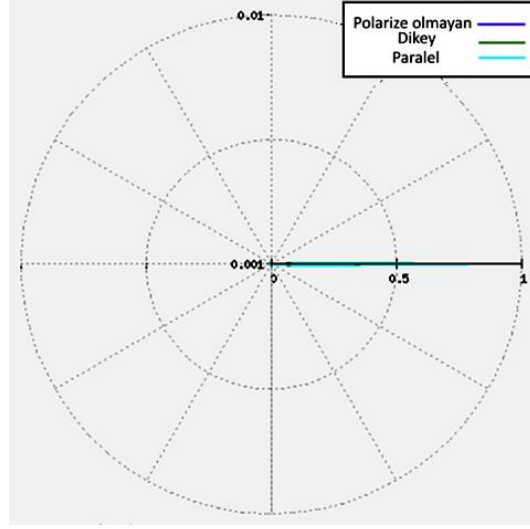
Şekil 4.11 - 4.13'te sırası ile 0,1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  yarıçaplı parçacık için saçılma grafikleri verilmiştir. 1  $\mu\text{m}$  yarıçap için saçılma grafiği, 850 nm ve 1064 nm dalgaboyundaki saçılma grafiklerine göre daha geniş bir yelpazeye sahiptir.



Şekil 4.11. 0,1  $\mu\text{m}$  yarıçap ve 1550 nm dalgaboyu için saçılma grafiği

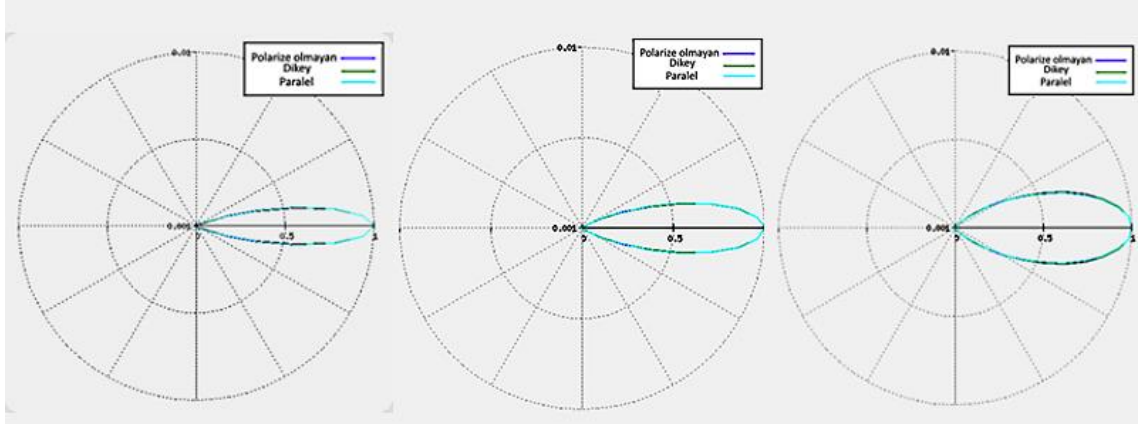


Şekil 4.12. 1  $\mu\text{m}$  yarıçap ve 1550 nm dalgaboyu için saçılma grafiği



**Şekil 4.13.** 10 µm yarıçap ve 1550 nm dalgaboyu için saçılma grafiği

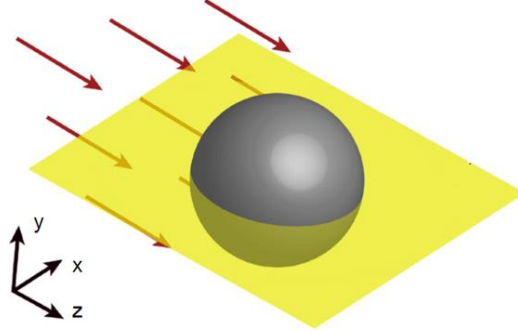
Şekil 4.14'te 1 µm yarıçaplı parçacık üzerindeki saçılma grafikleri sırası ile 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm'dir. Karşılaştırma sonucuna göre, dalgaboyu büyüdükçe, saçılma yelpazesi de büyümektedir.



**Şekil 4.14.** 1 µm yarıçaplı parçacık için dalgaboyu karşılaştırması

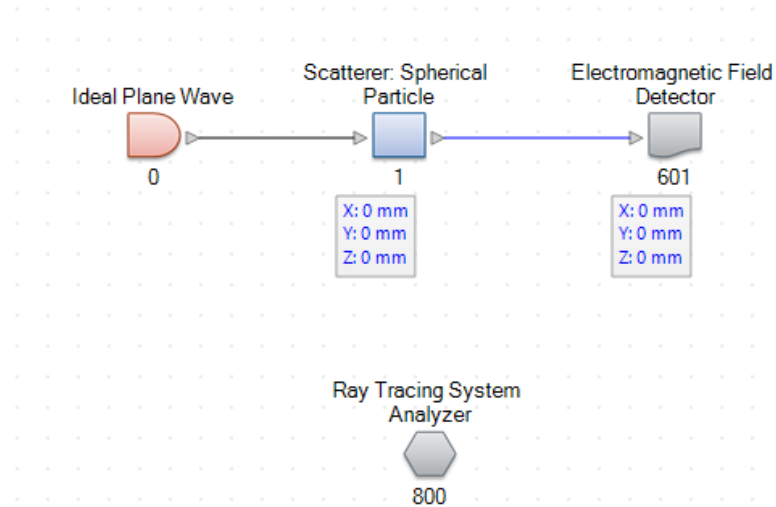
Tez çalışmasının bu bölümündeki analizlerde Matlab programı ile kutupsal grafikler çizdirilmiştir. Analizin daha detaylı olarak gösterimi açısından, Lighttrans VirtualLab Fusion benzetim programı kullanılarak, aynı deneyler tekrarlanmış ve grafikler elde

edilmiştir. Benzetim programında lazer ışınının bir parçacık üzerindeki etkisi ve süpürdüğü alan Şekil 4.15'te görülmektedir.



Şekil 4.15. Parçacığa etki eden saçılma şematifi

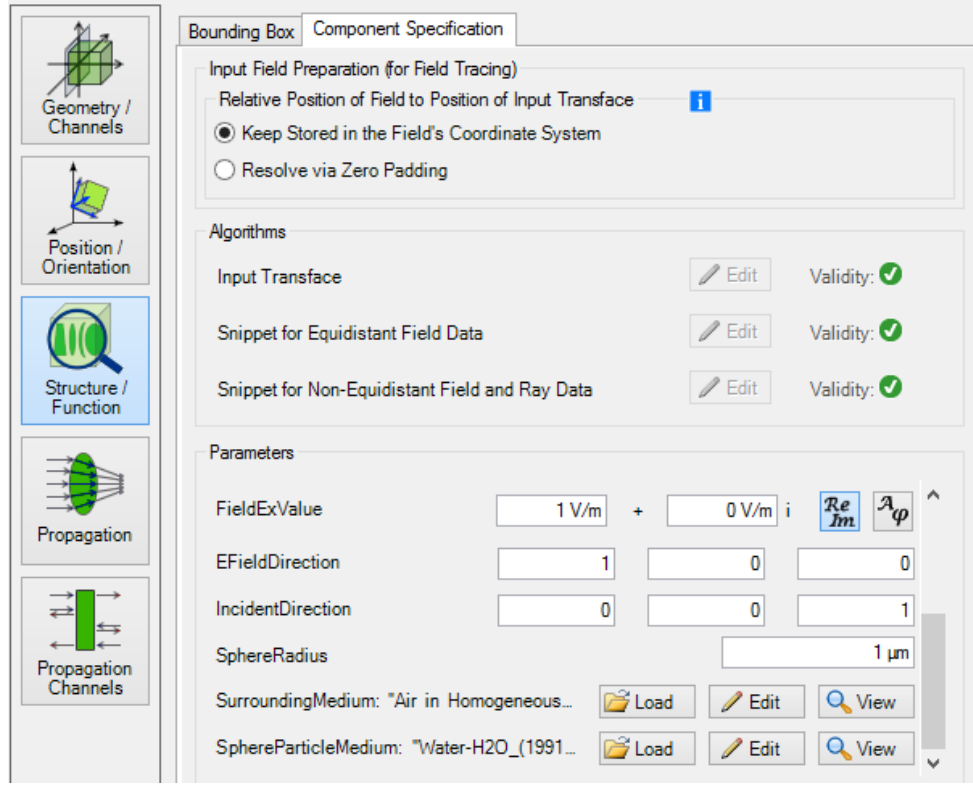
Benzetim programında verici modülü, saçıcı ortam ve analiz modülünün yer aldığı bir model oluşturulmuştur. Şekil 4.16'da bu model görülmektedir.



Şekil 4.16. Mie saçılması benzetim modeli

Saçıcı ortam modülü içerisinde, parçacık boyutu, ortam ve parçacığın kırılma indisi değerleri girilerek, tek bir parçacık için Z düzleminde bir yayılımın gerçekleştiği analizi yapılmıştır. Şekil 4.17'de saçıcı modülün giriş değerlerinin yapıldığı pencere görülmektedir.

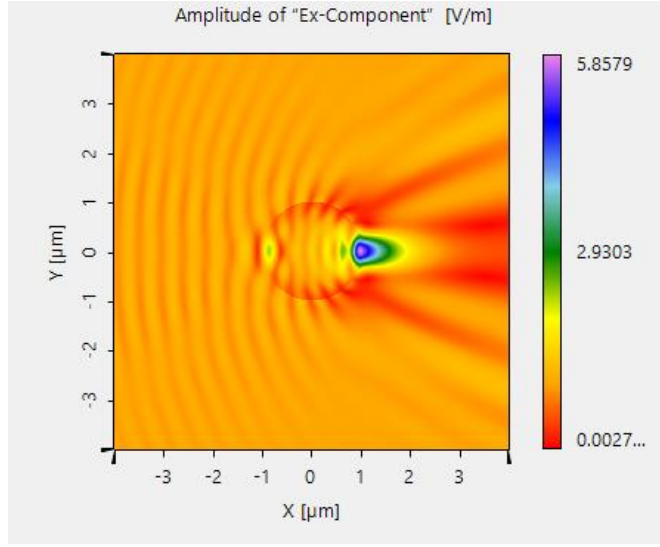




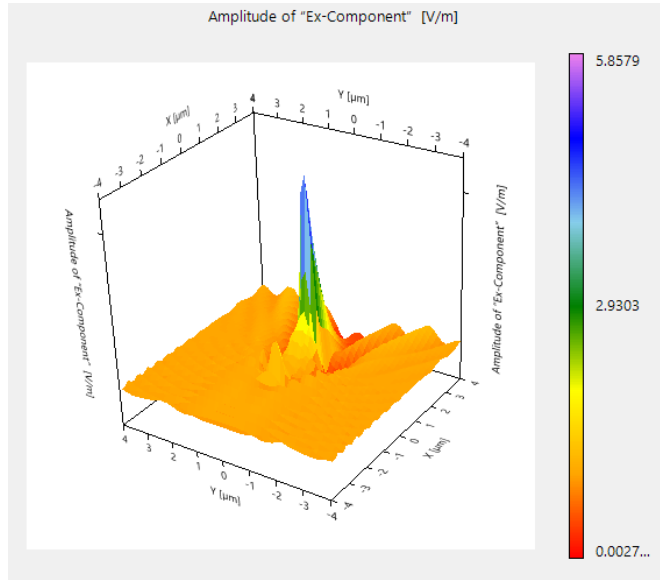
**Şekil 4.17.** Saçıcı parçacık benzetim modülü

Benzetim programı arka planda Mie saçılma analizi denklemlerini kullanarak parçacık için saçılma grafiğini oluşturur. Benzetim için ortam kırılma indis değeri sabit olarak 1 seçilmiştir. Atmosferik basınçtaki gazlar, düşük yoğunlukları nedeniyle 1,3'e yakın kırılma indislerine sahiptir. Bu nedenle parçacık kırılma indisi sabit bir değer seçilerek, dalgaboyu ve parçacık boyutu arasındaki ilişki araştırılmıştır. Aynı zamanda aynı parçacık boyutunun farklı dalgaboylarında nasıl bir saçılma özelliği gösterdiği incelenmiştir. Şekil 4.18'de ilk dalgaboyu olan 850 nm ve seçilen 3 farklı parçacık boyutu için iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu(3B) saçılma grafikleri görülmektedir.

(a)



(b)

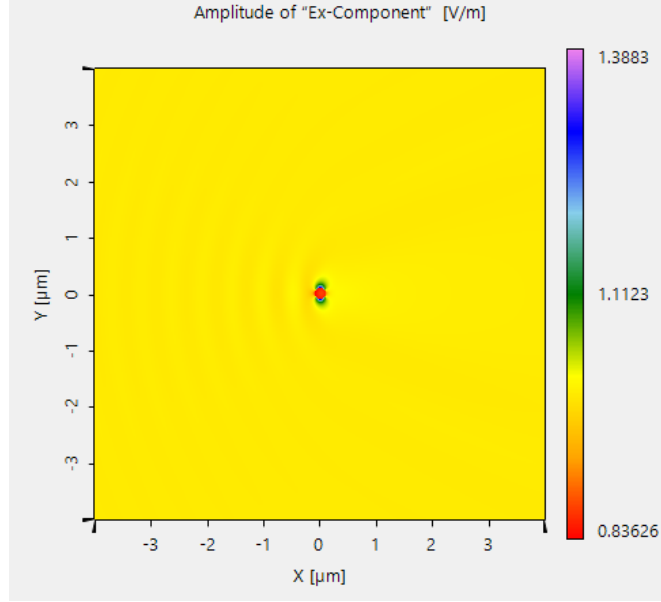


**Şekil 4.18.** 850 nm dalgaboyunda (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri

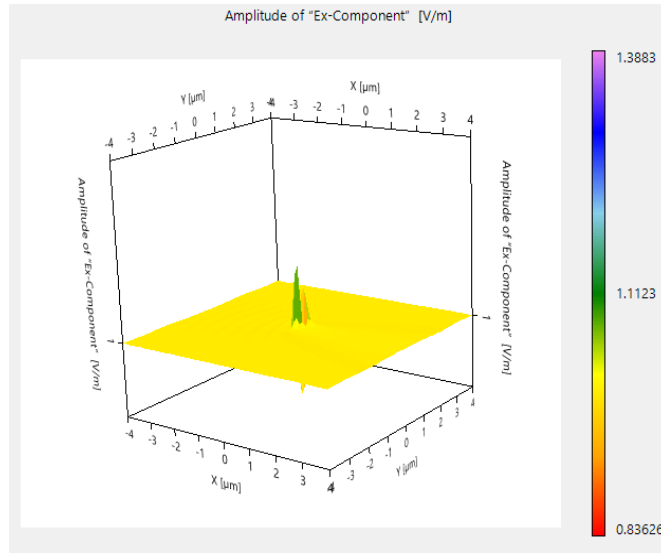
850 nm dalgaboyunda 0,1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  parçacık boyutları için aynı saçılma grafiğini vermiştir. Dalgaboyunun parçacık boyutundan büyük olduğu durumlar olması nedeni ile geriye saçılmalar da gerçekleşmiştir. Aynı zamanda Matlab ile yapılan analizden farklı olarak kayıplar bu analizde ihmal edilmemiştir. Bu nedenle 3 farklı yarıçap için aynı saçılma grafiği elde edilmiştir. Kullanılan benzetim programı daha büyük boyutlu parçacıklar için tasarlanmıştır.

Aynı parçacık boyutları kullanılarak 1064 nm dalgaboyu için saçılma analizi yapılmıştır. Şekil 4.19'da 1064 nm dalgaboyunda, 0,1  $\mu\text{m}$  yarıçaplı parçacık için iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) saçılma grafikleri görülmektedir.

(a)



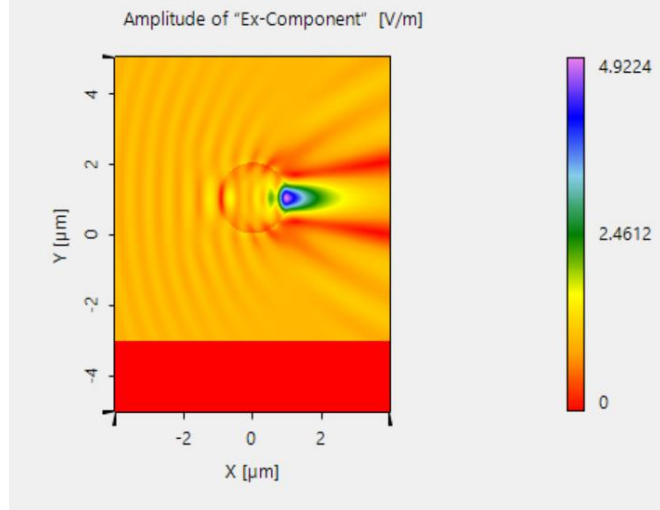
(b)



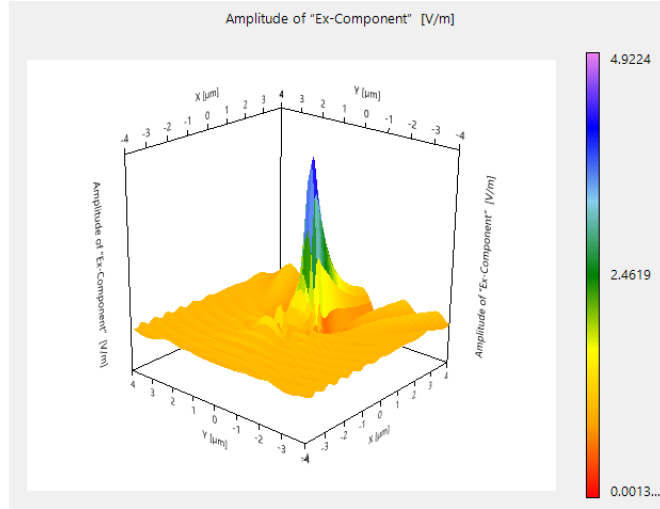
Şekil 4.19. 1064 nm dalgaboyunda 0,1  $\mu\text{m}$  parçacık boyutu için (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri

Parçacık boyutu 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  yapıldığında 1064 nm dalgaboyu için aynı değerler elde edilmiştir. Bu durum Şekil 4.20’de iki (2B) ve üç boyutlu (3B) grafiklerde görülmektedir.

(a)



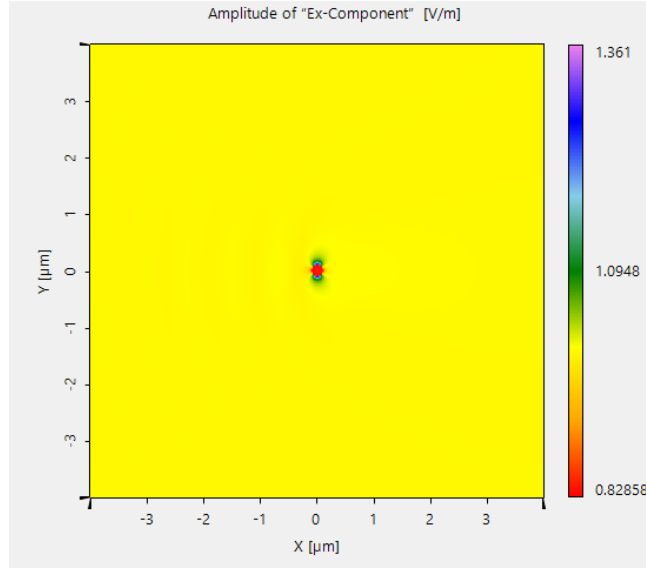
(b)



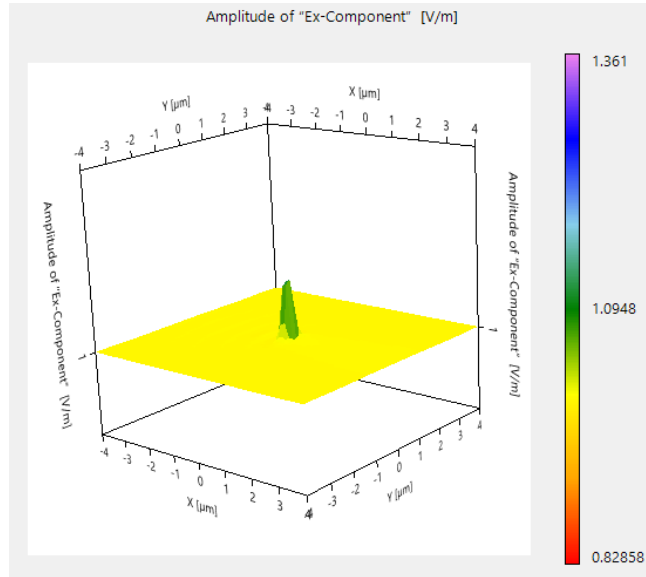
**Şekil 4.20.** 1064 nm dalgaboyunda 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$  parçacık boyutu için (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri

Aynı parçacık boyutları için 1550 nm dalgaboyu kullanıldığında ise farklı sonuçlar elde edilmiştir. 0,1  $\mu\text{m}$  için elde edilen iki ve üç boyutlu grafikler Şekil 4.21’de görülmektedir. Burada saçılma tek noktada gerçekleşerek tek noktada bitmiştir.

(a)



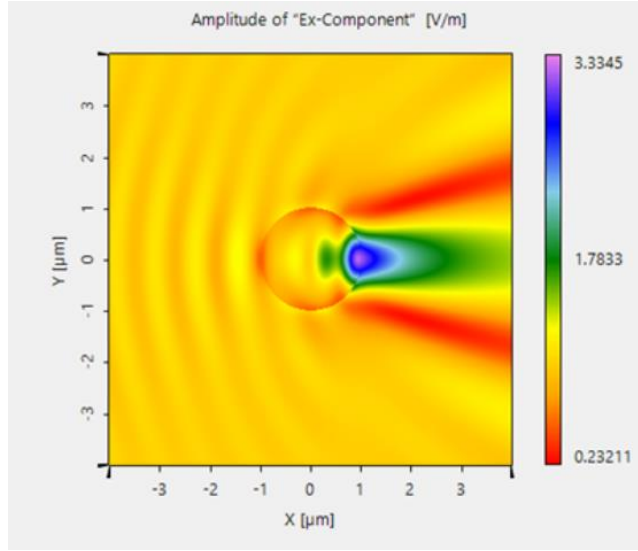
(b)



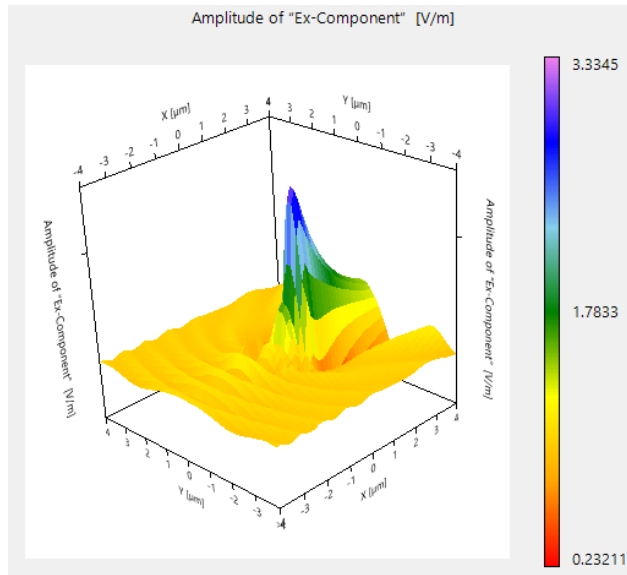
**Şekil. 4.21.** 1550 nm dalgaboyunda 0,1  $\mu\text{m}$  parçacık boyutu için (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri

Parçacık boyutu 1  $\mu\text{m}$  olduğunda ise saçılma bir anda değişim göstermiştir. Bu durum iki (2B) ve üç boyutlu (3B) gösterim ile Şekil 4.22'de görülmektedir.

(a)



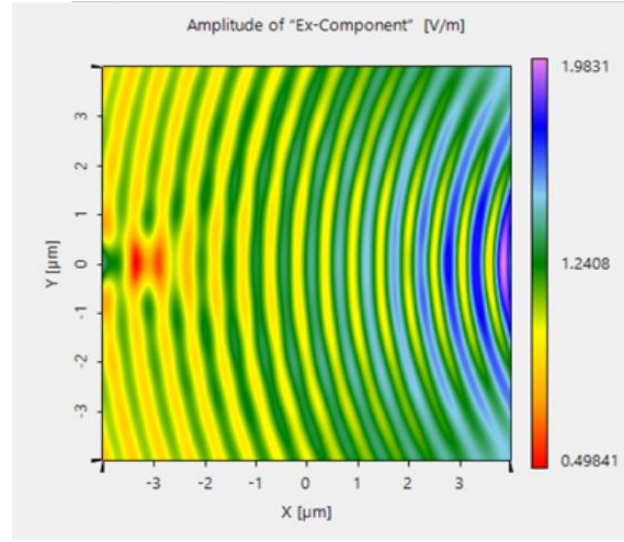
(b)



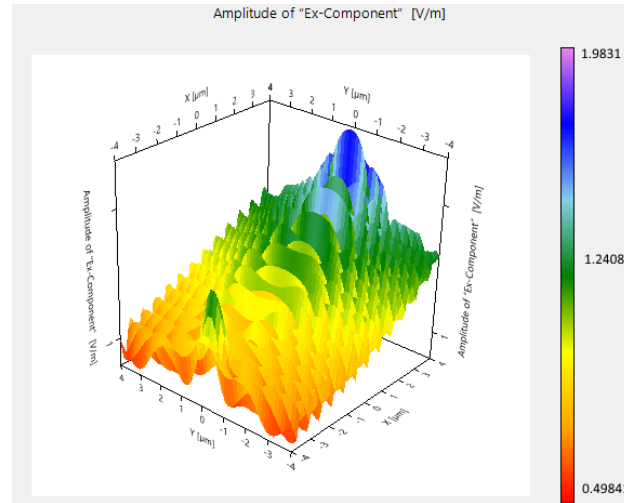
**Şekil 4.22.** 1550 nm dalgaboyunda 1  $\mu\text{m}$  parçacık boyutu için (a) 2B ve (b) 3B saçılma grafikleri

10  $\mu\text{m}$  parçacık boyutunda, Şekil 4.23'teki saçılma durumu görülmektedir. Boyut parametresi 1550 nm dalgaboyu ve 10  $\mu\text{m}$  yarıçaplı parçacık için yaklaşık olarak 40 değerini almaktadır. Mie saçılmasında bilinmektedir ki boyut parametresi 1 değerinden ne kadar büyük ise ileri yönlü saçılmalar artmaktadır. Şekil 4.23'te görülen ileri yönlü saçılma diğer yarıçaplı parçacıklara göre oldukça fazladır.

(a)



(b)



**Şekil 4.23.** 1550 nm dalgaboyunda, 10  $\mu\text{m}$  parçacık boyutu için (a) 2B ve b) 3B saçılma grafikleri

Analiz sonuçlarına göre 850 nm ve 1064 nm dalgaboyunda 0,1  $\mu\text{m}$  parçacık boyutu saçılma grafikleri karşılaştırıldıklarında, dalgaboyundaki artış, ileri yönlü saçılmanın artmasını sağlamıştır. Parçacık boyutu 1  $\mu\text{m}$  olduğunda ise, 1550 nm dalgaboyuna sahip ışında ileri yönlü saçılmaların daha fazla olduğu görülür. Analiz sonucunda görülmektedir ki, dalgaboyu büyüdükçe aynı parçacık boyutunda, ileri yönlü saçılma artmaktadır. Bu durum dalgaboyunun aynı koşullar içinde saçıcı özelliğinin arttığını ve dolayısıyla zayıflama etkisinin daha fazla olduğunu göstermektedir.

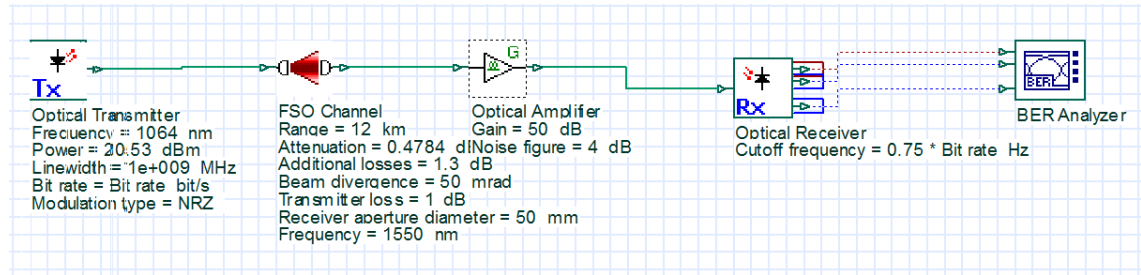
Serbest uzay optik haberleşme sistemleri, atmosferik katmanlarda bulunan parçacıklarla etkileşerek saçılmalara uğradıklarında, saçılmanın seçilen parametreler için belirli dalgaboyuna ve parçacık boyutuna bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkarak analiz sonuçlarına göre, bir sistem tasarımı yapılmadan önce optik parametre değerlerinden lens çapı, odaklama, lazer dalgaboyu gibi parametreler analiz sonuçlarına göre seçilerek, Mie saçılmasını etkilemeyen önemsiz parametreler elenebilir.

Tez çalışmasında Taguchi analiz yöntemi ile yapılan çalışmalar sonucunda, görünürlük parametresinin en büyük önem derecesine sahip olduğu ve bağlantılı olduğu parametrenin dalgaboyu olduğu bulunmuş ve bu noktadan yola çıkılarak yapılan saçılma grafikleri ile saçılma kesit alanının saçılma verimi ile ilişkili olduğu doğrulanmıştır. Bir sonraki çalışma olan sistem tasarımı ile saçılma verimleri hesabı yapılacaktır.



#### 4.5 Yer-Uydu Arası Serbest Uzay Optik Haberleşme Sistemi Tasarımı

Tez çalışmasının bu bölümünde, atmosferik saçılma kayıplarından Mie saçılması göz önüne alınarak Şekil 4.24'te tasarım şeması görülen bir yer-uydu arası serbest uzay optik haberleşme sistemi tasarımı yapılmıştır.



Şekil 4.24. Yer-uydu istasyonu haberleşme blok diyagramı

Bir yer-uydu arası serbest uzay optik haberleşme sistemi üç bloktan oluşur. İlk blok yer istasyonu verici sistemidir. Verici sistemi, lazer modülatörü, ışın yönlendirme bloğu ve verici optik cihazlardan oluşur.

Lazer ışını lazer modülatör girişine uygulanarak optik modülasyon işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra ışın, yönlendirme optik cihazlarına gelerek, dengeleme işlemi yapılır. Burada amaç ışının odaklandırılmasıdır. Daha sonra ışın atmosferde ilerlemek üzere optik kanala gönderilir.

İkinci blok olan optik kanal, lazer ışınının çeşitli kayıplara uğradığı iletim kanaludur. Burada temel olarak, serbest uzay kaybı, atmosferik kayıplar ve arka plan gürültüsü etkileri ile ışında zayıflamalar meydana gelir.

Optik kanalda ilerledikten sonra alıcı sistem optik cihazları tarafından alınan ışın, ışın dağıtıcı ve stabilizasyon sistemine yönlendirilir. Daha sonra ışın demodüle edilerek çıkışta optik işaretler elektriksel işaretlere dönüştürülür.

Sistem tasarımı yapılırken, sistemin veriminin hesaplanması için işaret gürültü oranı belirlenir. Serbest uzay optik yayılım link modelinde, işaret gürültü oranı için (3.28) kullanılmıştır.

Saçılma kaynaklı kayıp için bölüm 4.2’de analizi yapılan zayıflama değerlerinden, seçilen dalga boylarında hemen hemen en yüksek zayıflama etkisine sahip ve aynı zamanda atmosferde en çok bulunma yüzdesi (%78) ile azot gazı olduğundan bu değerler seçilmiştir. Solma toleransı olarak adlandırılan parametre, sabit bir uzaklıkta alınan işaretin belirli bir değerin altına düşmeden sistemin veriminin kaç dB’lik bir değere düşebileceğini gösteren parametredir. Uydu haberleşme sistemlerinde solma toleransı en yüksek 25-35 dB arasında bir değer alır. Gürültü terimi ise SNR değerinin ne kadar bozulabileceğinin bir ölçüsüdür. Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde yaklaşık olarak 4 dB’lik bir değer alır.

Bir alıcı verici sistemi tasarlanırken, alıcı diverjans açısı ve verici açıklık çapı sistemin performansını etkiler. Yüksek zayıflama etkisine sahip optik haberleşme sistemlerinde, verici diverjans açısı lazerin üretim malzemesi ve dalga boyu ile ilişkilidir ve  $\mu\text{rad}$  ile mrad değerleri arasında bir değer alır.

Alıcı mercek çapı ise  $50 \text{ mm} < D_{\text{mercek}} < 10 \text{ cm}$  arasında bir değer seçilir. Alıcı mercek çapının 50 mm’den küçük veya 10 cm’den büyük olduğu sistemlerde optimum verimlilik sağlanamaz. Mercek çapı 10 cm’den büyük olan sistemler, tüm işareti topladığı gibi, ortam gürültüsü ve istenmeyen işaretleri de topladığından işaretin bozulmasına neden olur. 50 mm’den küçük çaplı merceklerde ise ortam gürültüsü ve istenmeyen işaretlerin girişi engellendiği gibi, vericiden gelen işaretlerin tamamının toplanamamasına neden olarak kayıplara yol açar. Bu sebeple diverjans açısı ve alıcı mercek çapı aralıkları optimum düzeyde tutulmalıdır. Seçilen bölge troposfer olduğu için, saçılma ortamı sıcaklığı  $290 \text{ °K} = 17 \text{ °C}$  alınmıştır. 850 nm dalga boyu için optik güç 13 W ve ışın diverjansı 20  $\mu\text{rad}$ , 1064 nm dalga boyu için optik güç 113 mW ve ışın diverjansı 50 mrad, 1550 nm dalga boyu için optik güç 200 mW ve ışın diverjansı 19,5  $\mu\text{rad}$  alınmıştır. Alıcı ve verici verimlerinin yarı verimde çalıştığı düşünülmüştür. Alıcı mercek çapları 50 mm alınmıştır. Aynı alıcı çapı için dalga boyunun ve

zayıflamanın etkileri analiz edilmiştir. Çizelge 4.15'te troposfere konumlandırılmış bir uydu ile yer istasyonu arasındaki sistem için seçilen giriş parametreleri görülmektedir. Zayıflama değerleri (4.1) ile hesaplanmıştır.

**Çizelge 4.15.** Yer- uydu istasyonu sistem giriş parametreleri

Parametreler	Dalgaboyu		
	850 nm	1064 nm	1550 nm
İletilen güç	13 mW=11 dBm	113 mW=20 dBm	200 mW=23 dBm
Verici diverjans açısı	20 µrad	50 mrad	19,5 µrad
Verici verimi	149 dB	149 dB	149 dB
Alıcı verimi	105 dB	105 dB	105 dB
Alıcı mercek çapı	50 mm	50 mm	50 mm
Mesafe	12 km	12 km	12 km
Saçılma ortamı sıcaklığı	290 °K=17 °C	290 °K=17 °C	290 °K=17 °C
Gürültü	4 dB	4 dB	4 dB
Solma toleransı	25 dB	25 dB	25 dB
Zayıflama (N <sub>2</sub> için)	29,90 dB	40,04 dB	65,30 dB

Çizelge 4.16'da görüldüğü üzere seçilen parametreler ile her üç dalgaboyu için SNR değerleri (3.28) ile hesaplanmıştır. Yapılan analizde tek bir atmosferik gaz molekülü seçilerek, her bir dalgaboyu için farklı zayıflama değerleri, lazer diyot üretiminden kaynaklı farklı diverjans açıları kullanılmıştır.

**Çizelge 4.16.** Tasarlanan sistem için hesaplanan SNR ve BER değerleri

Dalgaboyu (nm)	SNR Değeri (dB)	BER Değeri
850	61, 67	$2,06 \times 10^{-15}$
1064	62, 48	$1,36 \times 10^{-15}$
1550	43, 49	$2,17 \times 10^{-11}$

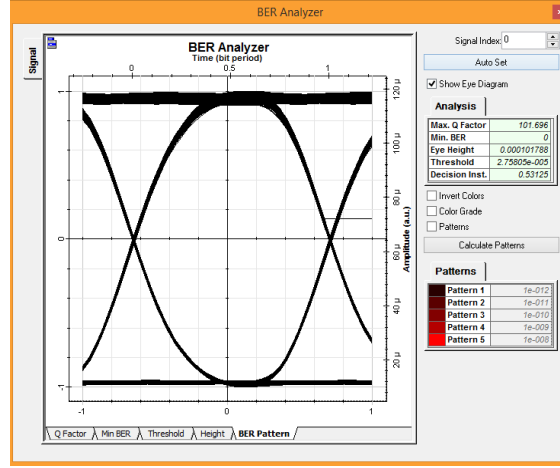
Yapılan analizde görülmektedir ki her üç sistem de oldukça verimlidir. Sistemin BER değerleri, bir haberleşme sistemi için kabul edilen  $10^{-9}$  değerinden küçüktür. Ancak bu durum, yalnızca saçılma kaynaklı kayıpların eklendiği sistem için alınmış BER değerleridir. Diğer kayıp olan türbülans kaybı da sisteme eklendiğinde, verim düşecektir.

Her üç dalgaboyunda, gürültü ve solma toleransı için aynı değerler kullanılmıştır. Verici gücü için, üretimde kullanılan dalgaboyuna göre güç değeri maksimum olacak şekilde alınmıştır. Alıcı mercekle çapı her üç sistem için de aynı değere sahiptir.

Yapılan SNR analizinde görülmektedir ki, 850 nm ve 1064 nm dalgaboyu kullanılarak tasarlanan sistemin, saçılma kaynaklı zayıflatmaların etkisinde en verimli sistemler olduğu görülmüştür.

Yapılan sayısal analizin sonuçlarının karşılaştırılması ve sistemin verici ve alıcı kazanç değerleri olmadan veriminin analizi amacı ile optik benzetim programı olan OptiSystem ile göz diyagramları oluşturulmuştur.

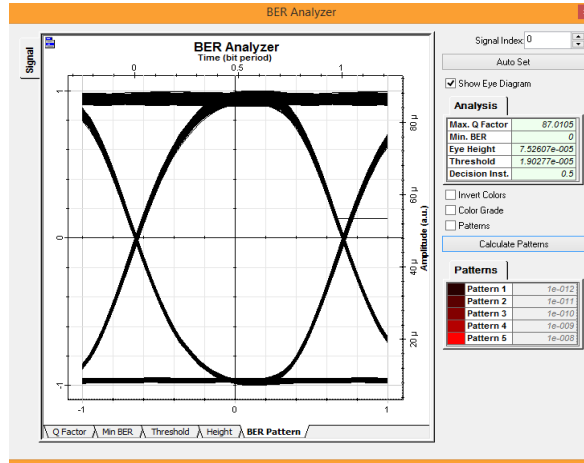
Optisystem benzetim programı ile Şekil 4.24'te blok diyagramı görülen, verici, serbest uzay optik kanal ve alıcıdan oluşan bir sistem tasarlanmıştır. Giriş için, Çizelge 4.15'te yer alan parametreler kullanılarak göz diyagramı oluşturulmuştur. BER değerlerinin yakın olması amaçlanmıştır, ancak sayısal hesaplamalarda kullanılan bazı parametreler benzetim programında yer almadığından, aynı değerlerin çıkmayacağı öngörülmüştür. İlk sonuç Şekil 4.25'te görüldüğü üzere 850 nm dalgaboyu için alınmıştır.



Şekil 4.25. 850 nm dalgaboyu için göz diyagramı

Benzetim programına göre göz diyagramı açıklığı 850 nm dalgaboyu için bozulmamıştır. Sayısal olarak hesaplanan BER değeri,  $2,06 \times 10^{-15}$  ile göz diyagramında elde edilen BER değerine, yani sıfır değerine yakındır.

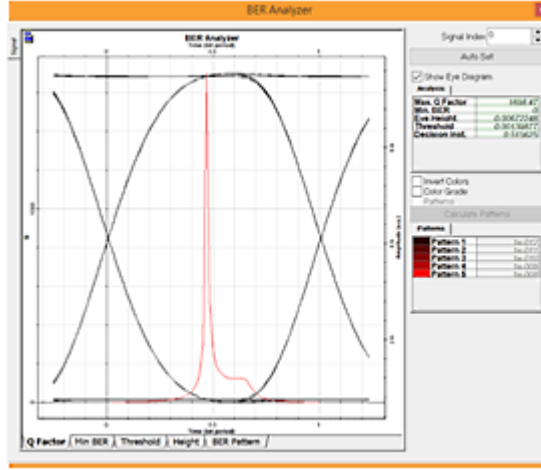
Aynı işlemler 1064 nm dalgaboyu için yapıldığında ise Şekil 4.26 elde edilmiştir.



Şekil 4.26. 1064 nm dalgaboyu için göz diyagramı

1064 nm dalgaboyu için yapılan analizde, göz diyagramı bozulmamıştır. Benzetim programında elde edilen BER değeri 0 olarak hesaplanmıştır. Sayısal hesaplamalar ile yapılan BER analizinde ise  $1,36 \times 10^{-15}$  değeri elde edilmiştir.

1550 nm dalgaboyu için benzetim programında oluşturulan göz diyagramı Şekil 4.27’de yer almaktadır.



Şekil 4.27. 1550 nm dalgaboyu için göz diyagramı

1550 nm dalgaboyu ile yapılan analizde, göz diyagramı bozulmamıştır. BER değeri  $2,17 \times 10^{-11}$  ile sıfıra yakındır. Sayısal hesaplamalar ile yapılan BER analizinde verici ve alıcı verimlilikleri hesaba eklenmiştir. 1550 nm dalgaboyuna sahip lazerli sistemlerin, daha yüksek optik güç değerine sahip olması, göz uyumlu (retina-safe) olması, deneysel uygulamalarda sıklıkla kullanılması ve savunma sistemlerinde gece görüş kameralarında görülmemesinden dolayı, bu dalgaboyunun kullanıldığı sistemlerin verimliliğinin artırılması gereklidir.

Sayısal hesaplama sonuçları ile benzetim programı sonuçları birbirlerine yakın olarak bulunmuştur. Her üç dalgaboyunda da göz diyagramında bozulmalar gözlemlenmemiştir. Ancak benzetim programında BER değerleri sıfır çıkmıştır. Benzetim programında sayısal hesaplamalarda kullanılan parametrelerden yalnızca, dalgaboyu, giriş gücü, hat mesafesi, diverjans açısı ve alıcı açıklık çapı parametreleri kullanılmıştır. Diğer parametreler olan verici ve alıcı verimlilikleri, saçılma ortamının sıcaklığı ve solma toleransı değerleri sistem tasarımına eklenerek, tez sonrası yapılacak olan geliştirme çalışmalarında kullanılacaktır.

Elde edilen saçılma kaynaklı zayıflatma değerleri kullanılarak, sisteme etki eden temel zayıflatma değerlerinin eklendiği bir sistemin analizi yapılmıştır. (2.36) kullanılarak üç

dalgaboyu için düşük türbülans kayıplarının yer aldığı ve saçılma kaynaklı zayıflamaların sisteme eklenerek bulunduğu SNR ve BER değerleri Çizelge 4.17’de görülmektedir.

**Çizelge 4.17.** Türbülans ve saçılma kaynaklı SNR ve BER değerleri

<b>Dalgaboyu (nm)</b>	<b>Türbülans kayıbı (dB)</b>	<b>Saçılma kayıbı (dB)</b>	<b>Toplam SNR Değeri (dB)</b>	<b>BER</b>
850	15,46	29,90	46,21	$5,42 \times 10^{-12}$
1064	16,03	40,04	46,45	$4,79 \times 10^{-12}$
1550	16,98	65,30	26,51	$1,35 \times 10^{-7}$

Bir serbest uzay optik haberleşme sistemine etki eden tüm zayıflatma etkilerinin yer aldığı Çizelge 4.17’de, sistemin SNR değerlerinin azaldığı, sistemin veriminin düştüğü görülmüştür. Düşük türbülans altında 1550 nm dalgaboyunda yapılan analizde  $10^{-9}$  değerinden daha büyük bir değer elde edilmiştir. Literatürde yapılan son çalışmalarda (Mandal ve ark. 2020), 1550 nm dalgaboyunda yapılan bir analizde, türbülans kaybı 4 dB olarak alınmıştır. Literatürdeki çalışmada, saçılma kayıpları ihmal edilerek elde edilen BER değeri yapılan iyileştirmeler ile birlikte  $1,915 \times 10^{-7}$  bulunmuştur. Tez çalışmasında yapılan analizlerde elde edilen türbülans kaybı yerine literatür verileri kullanılarak BER değeri 1550 nm için  $1,68 \times 10^{-10}$  elde edilmiş olup, literatürden daha verimli bir sistem olduğu anlaşılmıştır. Türbülans kaybının etkisi, saçılma etkisinden daha küçük olsa da, verimi etkilemektedir. Türbülans etkisi altında, kırılma indisi değişimleri ile ışındaki dalgalanmalar iletilen işareti bozmaktadır. Alıcıda düzeltilemeyen işaret sistem verimini düşürmektedir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasının amacı troposfer katmanında yer alan gaz molekülleri kaynaklı Rayleigh ve Mie saçılmaları nedeniyle oluşan zayıflamanın lazerli uydu haberleşme sistem performansına etkisinin incelenmesidir. Farklı parçacık yarıçapları ve iletim dalgaboyları için sistem performansı incelenmiş, elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak yer-uydu arası haberleşme sistemi tasarlanmış ve benzetimlerle iletim performansı analiz edilmiştir.

Tezin analiz bölümünde, troposfer katmanında yer alan gaz moleküllerinin oluşturduğu Rayleigh ve Mie saçılma kaynaklı zayıflatmalar Kruse modeli kullanılarak hesaplanmıştır.

Atmosferik saçılma kaynaklı zayıflamanın hesaplandığı parametrelerden, dalgaboyu, görünürlük, saçıcı parçacık boyut dağılımı, mesafe ve saçılma kesit alanı arasından, sistem verimliliğine en çok katkı sağlayan parametrenin bulunması amacıyla Taguchi deney tasarım yöntemine yer verilmiştir. Taguchi'nin deney tasarım yöntemi kullanılarak, zayıflamaya etki eden parametreler, bir dizi analiz sonrası, önem derecelerine göre sıralandırılmıştır. Devamında önem derecesi yüksek parametrelerin saçılma kaynaklı zayıflamaya katkısının bulunması amacıyla farklı boyutlardaki su moleküllerinin saçılma verimlilikleri Mie teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Saçılma kaynaklı zayıflatma için en verimli iletişimin yapılabileceği dalgaboyu önerilmiştir. Bu çalışmalar ile literatüre özgün bir katkı olarak sunulmuştur. Bilindiği kadarıyla, serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde Taguchi analiz yönteminin kullanıldığı bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır.

Serbest uzay optik haberleşme sistemleri üzerinde kayıplara yol açan, türbülans, uzay yol geometrik kaybı ve gürültü etkilerine ek olarak, saçılma kayıplarının ihmal edilmediği bir sistem tasarımı yapılarak, analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçların, deneysel çalışmalarda elde edilecek sonuçlara yaklaşması sağlanmıştır. Bir sistemi etkileyen tüm zayıflatma türleri değerlendirilerek, deneysel çalışmalarda ortaya çıkabilecek sapmaların öngörülmesi analiz edilmiştir. Lazerli uydu haberleşme



sistemlerinin deneysel çalışmalarının mali gereksinimlerinin fazla olması ve uygulama açısından hataya yer vermeyen sistemler olmasından dolayı, deney öncesi analitik çözümlerin doğruluğu sistem tasarımı için önem teşkil etmektedir. Bu amaçla saçılma kaynaklı zayıflatmaları ihmal eden sistem tasarımlarına eklenecek olan saçılma zayıflatmaları bu tez çalışmasında çalışılmıştır.

Atmosferde bulunma oranı en yüksek olan azot molekülü seçilerek, bu gaz molekülünün sistem üzerindeki zayıflatma değeri ile üç farklı dalgaboyu için yer-uydu arası haberleşme sistemleri tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemlerin işaret gürültü oranı ve bit hata oranları hesaplanmıştır. Taguchi analizi ile elde edilen önemli parametrelerden biri olan dalgaboyunun, sistem üzerindeki verimini ölçmek amacıyla farklı dalgaboyları karşılaştırılarak, saçılma zayıflaması açısından sistem verimliliği analiz edilmiştir.

Literatürde incelenen çalışmalarda serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde verim artırma ve iyileştirme yöntemlerinden adaptif optik kullanımı, modülasyon teknikleri, çoklu verici-alıcı sistemleri kullanımı ve radyo frekansı-optik hibrit sistemlerin kullanımı yalnızca türbülans kaynaklı zayıflamaların iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda sistem verimi hesaplanırken saçılma kaynaklı zayıflamalar ihmal edilerek iyileştirmeler yapılmaktadır. Yapılan bu iyileştirmelerde saçılmaların ihmal edilmesi, analitik yaklaşımlarda bir eksik olarak görülmektedir. Tez çalışmasında literatürde görülen bu eksiklik için yapılan analizler ile özgün katkı sunulmuştur. Tez konusu, iletimde en fazla etkilerin görüldüğü saçılma kayıpları üzerinde durmaktadır. Literatürde yapılan çalışmaların büyük bir bölümünün atmosferik türbülans üzerine olduğu, saçılmaların ise daha az yer aldığı görülmüştür.

Serbest uzay optik haberleşme sistemleri için dalgaboyu aralığı en az soğurum ve saçılma için seçilmiştir. Bu atmosferik iletim penceresi yakın kızıl ötesi bölgesi (NIR) olarak adlandırılır. Literatürde yapılan çoğu çalışmada sadece 1550 nm dalgaboyu için analizlerin yapıldığı görülmüştür. Bu bölgede ise yalnızca saçılmaların ele alındığı, soğurumun ihmal edilecek kadar küçük olduğu belirlenmiştir.

Mie saçılmasının, seçilen her bir gaz molekülü ve seçilen dalgaboylarında hesaplanabilmesi için, görünürlük ve saçıcı parçacık boyut dağılımlarının belirlenmesi gerekmektedir. Görünürlük için 6 km'lik bir mesafe seçilmiştir. Bunun nedeni troposfer katmanına kadar olan kısmın incelenmesidir. Troposfer katmanı, Dünya'nın yüzeyinden başlayarak 12 km'lik bir alanı kapsamaktadır. En yoğun olduğu bölgeler 0-6 km olduğu bölgelerdir. Saçılma analizi atmosferin ilk katmanı olan troposferde gerçekleştirilmektedir; çünkü gaz yoğunluğu üst katmanlara çıkıldıkça azalmakta ve saçılma ihmal edilmektedir. Literatürde taranan daha önce yapılan saçılma deneyleri baz alınarak, parçacıkların küresel olduğu ve aynı yoğunluğa sahip olduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Rayleigh saçılma analizlerinde, azot gazının 850 nm dalgaboyu için  $3.7692 \times 10^{-40}$  (1/m) ile en fazla saçılma değerini gösterdiği, hidrojen gazının ise  $1.2585 \times 10^{-48}$  (1/m) ile en az saçılma değerini gösterdiği belirlenmiştir. Diğer gazların saçılma oranlarının birbirlerine yakın oldukları görülmüştür. Diğer dalgaboyları için aynı işlemler tekrarlanarak aralarındaki benzerlikler ve farklılıklar aranmıştır. Değerlendirme sonucunda ise 1064 nm dalgaboyu için saçılma değerlerinden ortaya çıkan en önemli gaz molekülleri  $1,5351 \times 10^{-40}$  (1/m) ile azot ve onu takip eden  $4,9735 \times 10^{-41}$  (1/m) ile oksijen olmuştur. 1550 nm dalgaboyu için yapılan hesaplamalarda ise en yüksek saçılma oranının  $3,4087 \times 10^{-41}$  (1/m) ile azot,  $1,1043 \times 10^{-41}$  (1/m) ile oksijen olduğu görülmüştür.

Mie saçılma analizinde, 850 nm ve 1064 nm'ye göre 1550 nm dalgaboyundaki saçılmanın yaklaşık 40 kat daha fazla olduğu bulunmuştur. Bunun sonucunda Taguchi analiz yönteminde 1550 nm dalgaboyu ile yapılan hesaplamaların ihmal edilmesine karar verilerek, tez sonrasında 1550 nm'de ortaya çıkan yüksek zayıflatma değerlerinin düşürülmesi amacı ile çalışmalar yapılması hedeflenmiştir.

Atmosferik etkilerden hava olaylarının incelenmesi için tez çalışmasında yağmurlu havada haberleşme esnasında karşılaşılabilecek etkiler için, atmosferik katmanlarda bulunan büyük boyutlu su moleküllerinin saçılma analizi, Mie saçılma teorisi yardımıyla yapılmıştır. Mie saçılma analizi, kullanılan dalgaboyu ve parçacık boyutu

arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Mie saçılmasının gerçekleşebilmesi için parçacık boyutunun dalgaboyuna eşit veya daha büyük bir değerde olması gerekmektedir. Analizde parçacık boyutu olarak, 0,1 µm, 1 µm ve 10 µm değerleri ve 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboyları kullanılarak saçılma grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, dalgaboyu büyüdükçe, saçılma açısının büyüdüğü ve verimin düştüğü analiz edilmiştir.

Tez çalışmasında yer- uydu arası bir sistemin tasarımı yapılmış, elde edilen zayıflatma değerleri kullanılarak sistemin BER analizi yapılmıştır. Kullanılan üç dalgaboyu arasından 850 nm dalgaboyunun BER değeri  $2,06 \times 10^{-15}$  olarak bulunmuştur. Bir haberleşme sisteminin sahip olması gereken BER değeri en yüksek  $10^{-9}$  olmalıdır. Yapılan analizlerde bu değerden daha küçük BER değerleri elde edilerek, saçılma kaynaklı zayıflatma etkisinin değerlendirildiği daha verimli bir sistem elde edilmiştir. Yapılan BER hesaplamaları ışığında, OptiSystem benzetim programında bir serbest uzay optik haberleşme sistemi tasarımı ile sistemin göz diyagramları oluşturularak sayısal hesaplamalardan elde edilen değerler karşılaştırılarak, benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Saçılma kaynaklı zayıflatmaların elde edilmesi ile sisteme türbülans kayıpları eklenerek, tüm kayıplar altında sistemin SNR değerleri hesaplanmıştır. Tüm zayıflatıcı etkilerin eklenmesi ile sistem veriminin düştüğü görülmüştür. Tez sonrasında, bu etkilerin azaltılmasına yönelik çalışmaların yapılması planlanmıştır.

Özetle, bu tez çalışması ile yakın kızıl ötesi bölgede seçilmiş dalgaboyu ile çalışan, troposfer mesafesinde bulunan gaz moleküllerinin zayıflatma değerlerinin belirlendiği, su moleküllerinin Mie saçılma analizinin yapıldığı ve hesaplanan değerler ile bir uydu- yer istasyonu modellenmesinin yapılarak sisteminin saçılma kaynaklı zayıflama analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan Taguchi yöntemi ile en önemli parametreler belirlenmiştir. Gerçekleştirilen analizler ile elde edilen sonuçlar literatüre özgün bir katkı olarak sunulmuştur.

Tez çalışmasının sonuçları, 2018 yılında Karaelmas Fen ve Mühendislik dergisinde serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde türbülans etkilerinin incelendiği “The Investigation of SNR for Free Space Optical Communication Under Turbulence” başlıklı bir makalede ve 2020 yılında, International Journal of Optics dergisinde, serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde Taguchi analiz yöntemi ile sistem parametrelerinin önem derecelerinin analizinin yapıldığı “Investigation of the atmospheric attenuation factors in FSO communication systems using the Taguchi method” başlıklı bir makalede yayınlanmıştır. (Demir ve Yılmaz 2018) (Demir ve Yılmaz 2020).

### **5.1 Doktora Tezinin Bilime Katkısı**

Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde, atmosferik olayların sistem verimliliği üzerine etkilerinin incelendiği bu tez çalışmasında, zayıflatma etkilerinden türbülans, yol geometrik kaybı ve atmosferik etkilerden saçılma kaynaklı kayıpların sistem performansına etkileri incelenmiştir.

Bu amaçla;

- Yakın kızılötesi bölgede seçilen 850 nm, 1064 nm ve 1550 nm dalgaboylarındaki lazer ışınlarının atmosferden geçerken uğradığı saçılmaların analizi için, Mie ve Rayleigh saçılma değerleri hesaplanmıştır. Haberleşme için en yoğun zayıflatıcı etkilerin yer aldığı troposfer katmanı seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yakın kızılötesi bölgede Rayleigh saçılmasının ihmal edilebileceği bulunmuştur.
- Taguchi'nin deney tasarım yöntemi kullanılarak, zayıflamaya etki eden parametreler bir dizi analiz sonrası önem derecelerine göre sıralandırılmıştır. Böylece önemsiz parametreler elenerek, görünürlük ve dalgaboyunun verimi etkileyen en önemli parametreler olduğu belirlenmiştir.
- Haberleşme esnasında, lazerin atmosferde ilerlerken yağmurlu hava koşullarında karşılaşacağı zayıflama değerleri hesaplanmıştır. Bu amaçla gaz moleküllerinden daha büyük boyutlu olarak seçilen 0,1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  ve 10  $\mu\text{m}$

yarıçapına sahip su molekülleri için Mie teorisi uygulanmıştır. Büyük boyutlu moleküller için en verimli dalgaboyunun 850 nm olduğu görülmüştür.

- Zayıflama değerlerinin etkisinin görülmesi amacıyla, atmosferde yoğunluk oranı en fazla olan azot gazının zayıflatma değerlerinin kullanıldığı bir yer-uydu haberleşme sistemi tasarımı yapılmıştır.
- Belirlenen dalgaboyları ile tasarımı yapılan sistemin verimlilik analizi için SNR ve BER değerleri hesaplanmıştır. Troposfer katmanı mesafesinde seçilen değerler için 850 nm ve 1064 nm dalgaboylarının en verimli kaynak olduğu belirlenmiştir.
- Seçilen yakın kızılötesi bölge için düşük türbülans altında, yol kayıplarının ve saçılma kayıplarının sisteme eklendiği durumda SNR değerleri hesaplanarak, verimlilik analizi yapılmıştır.

## 5.2 Gelecekte Planlanan Çalışmalar

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen veriler ile bir serbest uzay optik haberleşme sisteminin verimini düşüren zayıflatma türü olan güçlü türbülans ve uzun yol geometrik kaybının etkilediği sistemin iyileştirme çalışmalarının yapılması planlanmaktadır. Yapılması planlanan iyileştirme çalışmalarında, sistem için en verimli modülasyon türünün belirlenerek analiz çalışmalarında bu modülasyonun uygulanması planlanmaktadır.

Güçlü türbülans altında, dalga cephesi bozulmalarını en aza indirmek amacıyla adaptif optik yöntemleri uygulanabilmektedir. Adaptif optik sistemlerin temel fikri, önce atmosferik bozulma miktarını ölçmek, ardından ışın kameraya ulaşmadan önce düzeltmektir. Türbülans etkisi, lazerli sistemlerde parıldama adı verilen etkileri oluşturmaktadır. Parıldama etkisi, diğer bir adıyla ışındaki dalgalanmalar, alıcıda odaklama hatalarına yol açmaktadır. Bu problemin çözümü, alıcı açıklık çapının arttırılması ile yapılmaktadır. Açıklık çapı arttırılırken, yüksek küresel sapmaların oluşmaması için gerekli analizlerin yapılması planlanmaktadır.

Bu amaçla;

- Alıcı açıklık çapını arttıracak hesaplamalar ile parıldama varyansının azaltılması planlanmaktadır.
- Azaltılmış parıldama varyansı, alıcıdaki ortalama gücün SNR değerini arttıracaktır.
- Artan ortalama SNR, BER değerini kabul edilebilir bir düzeye düşürerek, atmosferik türbülans ve saçılma kayıpları varlığında serbest uzay optik haberleşme sistemlerinin performansının iyileştirilmesi planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Ahrens, C. D. 2012.** Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere. Cengage Learning, California, USA, 463 pp.
- Akhavan, K., Kavehrad, M., Jivkova, S. 2002.** High speed power efficient indoor wireless infrared communication using code combining. *IEEE Trans. Com.*, 50(7) :1098–1109.
- Akinwumi, S. A., Omotosho, T.V., Usikalu, M. R., Adewusi, M. O., Ometan, O. O. 2016.** Atmospheric gases attenuation in West Africa. IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean, 10-13 October, 2016, St. Gilles-les-Bains, Reunion.
- Altay, S. 2007.** Işık kaynaklarının serbest uzay optik haberleşme sistemlerine etkisi. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Anonim, 2020.** Optical Radiation Sources. <http://cie.co.at/>-(Erişim tarihi: 2020).
- Awan, M.B., Mohan, S. 2016.** Analysis of beam divergence and input bit rate for free space optical communication link. IEEE 37th Sarnoff Symposium, 19-21 September, 2016, Newark, NJ, USA.
- Bader, O., Lui, C. 1996.** Laser safety and the eye: hidden hazards and practical pearls. Technical report: American Academy of Dermatology, Lion Laser Skin Center, Vancouver and University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Başgümüş, A. 2016.** Fresnel yansıma tabanlı fiber optik sensör sistemi tasarımı ve röle destekli serbest uzay optik haberleşme sistemi ile iletim analizi. *Doktora Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Bohren, C. F., Huffman, D. R. 1983.** Absorption and scattering of light by small particles. Wiley VHC, Canada, 544 pp.
- Bouchet, O., Sizun, H., Boisrobert, C., Fornel, F., Favennec, P. 2006.** Free-space optics propagation and communication, ISTE Ltd, California, USA, 220 pp.
- Bucholtz, A. 1995.** Rayleigh scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *App. Opt.*, 34(15): 2765-2773.
- Brazda, V., Fiser, O., Pek, V., Pesice, P., Schejbal, V. 2014.** Meteorological measurement of atmospheric turbulence and FSO link attenuation. The 8th European Conference on Antennas and Propagation, 6-11 April, 2014, The Hague, Netherlands.
- Brazda, V., Fiser, O., Rejtek, L. 2014.** Development of system for measuring visibility along the free space optical link using digital camera. 24th International Conference Radioelektronika, 15-16 April, 2014, Bratislava, Slovakia.

**Brazda, V., Fiser, O. 2015.** Estimation of fog drop size distribution based on meteorological measurement. Conference on Microwave Techniques, 22-23 April, 2015, Pardubice, Czech Republic.

**Brien, D. O. 2009.** Indoor optical wireless communications: recent developments and future challenges. *Proc. SPIE*, 7464: 1-12.

**Canıyılmaz, E., Kutay, F. 2003.** Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 18(3): 51-63.

**Calabroa, K. W., Bigioa, I. J. 2014.** Influence of the phase function in generalized diffuse reflectance models: review of current formalisms and novel observations. *J. Biomed Opt.*, 19(7): 1-16.

**Demir, U., Aküner, M. C. 2017.** Using Taguchi method in defining critical rotor pole data of LSPMSM considering the power factor and efficiency. *Tehn. Vjes*, 24(2): 347-353.

**Demir, P., Yılmaz, G. 2018.** The investigation of SNR for free space optical communication under turbulence. *Karaelmas Sci. And Eng. J.*, 8(2): 438-445.

**Demir, U., Aküner, M. C. 2018.** Design and optimization of in-wheel asynchronous motor for electric vehicle. *J. of the Fac. of Eng. and Arch. of Gazi Univ.*, 33(4): 1517-1530.

**Demir, P., Yılmaz, G. 2020.** Investigation of the atmospheric attenuation factors in FSO communication systems using the Taguchi method. *Hindawi Int. J. of Opt.*, 2020: 1-8.

**Dordova, L., Wilfert, O. 2009.** Free space optical link range determination on the basis of meteorological visibility. 19th International Conference Radioelektronika, 22-23 April, 2009, Bratislava, Slovakia.

**Dordova, L., Wilfert, O. 2010.** Calculation and comparison of turbulence attenuation by different methods. *Radioengineering, Proc.s of Czech and Slovak Tech. Univ.* 19(1):162-167.

**Ferah, M. 2003.** Çok yanıtli Taguchi deneysel tasarım metodu ve alüminyum sanayinde bir uygulama. *Sakarya Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(2): 61-69.

**Fiser, O., Brazda, V., Rejfk, L. 2014.** Two ways to consider atmospheric turbulences in FSO propagation. 24th International Conference Radioelektronika, 15-16 April, 2014, Bratislava, Slovakia.

**Gagliardi, R. M., Karp, S. 1995.** Optical communications. Wiley 2nd ed., New York, USA, 368 pp.



- Gesner, R. L., Christodoulou, C. G., Lane, S., Murrell, D., Hong, E., Tarasenko, N. 2019.** Modeling the effects of gaseous absorption and attenuation due to clouds for a 72 GHz terrestrial link. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 7-12 July, 2019, Atlanta, GA, USA.
- Gould, G. 1959.** The LASER, Light amplification by stimulated emission of radiation. The University of Michigan, USA, 128 pp.
- Grainger, R. G., Lucas, J., Thomas, G. E., Ewen, G. B. L. 2004.** Calculation of Mie derivatives. *App. Opt.*, 43(28): 5386-5393.
- Haroon, H., Razak, H. A., Khalid, S. S., Nadia, Aziz, N. A. 2017.** On the effectiveness of Taguchi method in optimizing the performance of parallel cascaded MRR array (PCMRRA). *Opt. and Adv. Mat. Rap. Com.*, 11(7-8): 393-397.
- Hulst, V. H. C. 1981.** Light scattering by small particles. Dover publications, New York, USA, 470 pp.
- Ijaz, M., Ghassemlooy, Z., Perez, J., Brazda, V., Fise, O. 2013.** Enhancing the atmospheric visibility and fog attenuation using a controlled FSO channel. *IEEE Photo. Tech. Let.*, 25(13): 1262 – 1265.
- Islam, M. S., Majumder, S. P. 2019.** Performance analysis of an OFDM optical DQPSK FSO link considering strong atmospheric turbulence with pointing error. IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics, 28-30 December, 2019, Dhaka, Bangladesh.
- Ishimaru, A. 1978.** Wave propagation and scattering in random media. Academic Press, New York, USA, 272 pp.
- Jacques, S. L., Prahl, S. A. 1998.** Ece 532 Biomedical optics, optical properties, <https://omlc.org/classroom/ece532/class3/index.html> -(Erişim tarihi:2020).
- Jeyarani, J. D., Kumar, S., Caroline, B. E. 2019.** Performance analysis of PolSK MIMO FSO over strong atmospheric turbulence conditions. International Conference on Microwave Integrated Circuits, Photonics and Wireless Networks, 22-24 May, 2019, Tiruchirappalli, India.
- Jia, X., Lu, G. 2019.** A hybrid Taguchi binary particle swarm optimization for antenna designs. *IEEE Anten. and Wire. Propag. Let.*, 18(8): 1581 – 1585.
- Jursa, A. S. 1985.** Handbook of geophysics and the space environment. Scientific Editor, Air Force Geophysics Laboratory, Washington, USA, 467 pp.
- Kaushal, H., Jain, V. K. Kar, S. 2017.** Free space optical communication. Springer, USA, 233 pp.

- Kaushal, H., Kaddoum, G. 2017.** Free space optical communication: challenges and mitigation techniques. *IEEE Comm. Surv. Tuto.*, 19(1): 57-96.
- Kaymak, Y., Cessa, R. R., Feng, J., Ansari, N., Zhou, M. 2017.** On divergence-angle efficiency of a laser beam in free-space optical communications for high-speed trains. *IEEE Trans.on Vehic.Tech.*, 66(9): 7677-7687.
- Khan, M. S., Leitgeb, E., Grabner, M., Kvicera, V., Nebuloni, R., Capsoni, C. 2012.** Effects of PSA on free-space optical links. 6th European Conference on Antennas and Propagation, 26-30 March, 2012, Prague, Czech Republic.
- Kim I. I., McArthur, B., Korevaar, E. 2001.** Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. *SPIE, Optic. Wir. Comm.*, 4214(2): 1-12.
- Kourogiorgas, C., Panagopoulos, A. D. 2017.** Spectral coexistence of GEO and MEO satellite communication networks: differential total atmospheric attenuation statistics. 11th European Conference on Antennas and Propagation, 19-24 March, 2017, Paris, France.
- Kruse, P. W., McGlauchlin, L. D., McQuistan, R. B. 1962.** Elements of infrared technology: generation, transmission, and detection. J. Wiley & Sons, New York, USA, 448 pp.
- Lambert, S. G., Casey, W. L. 1995.** Laser communication in space, Artech House, Boston, USA, 390 pp.
- Levine, B. M., Martinsen E. A., Wirth A., Jankevica, A., Quinones, M. T., Landers, F., Bruno, T. L. 1998.** Horizontal line-of-sight turbulence over near-ground paths and implications for adaptive optics corrections in laser communications. *Appl. Opt.*, 37: 4553–4560.
- Li, J., Liu, J. Q., Taylor, D. P. 2007.** Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels. *IEEE Trans. Comm.*, 55(8): 1598–1606.
- Long, R. K. 1963.** Atmospheric attenuation of ruby lasers. *Proc. IEEE*, 51(5): 859–860.
- Mach, P., Zeman, P., Kotřová, E., Barto, S. 2010.** Optimization of lead-free wave soldering process using Taguchi orthogonal arrays. 3rd Electronics System Integration Technology Conference, 13-16 September, 2010, Berlin, Germany.
- Mahlobogwane, Z., Owolawi, P. A., Sokoya, O. 2018.** Multiple wavelength propagation in free space optical wireless channel. International Conference on Advances in Big Data, Computing and Data Communication Systems, 6-7 August, 2018, Durban, South Africa.
- Majumdar, A. K., Ricklin, J. C. 2008.** Free-space laser communications principles and advances. Springer, New York, USA, 427 pp.

- Majumdar, A. K. 2015.** Advanced free space optics (FSO). Springer, New York, USA, 408 pp.
- Mandal, S. K., Bera, B., Dutta, G.G. 2020.** Free space optical(FSO) communication link design under adverse weather condition. International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering, 17-18 Jan. 2020, Kolkata, India.
- Matzler, C. 2002.** MATLAB functions for Mie scattering and absorption. Institut für Angewandte Physik, Research Report No. 2002-08, Switzerland.
- Mie, G. 1908.** Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen. *Annalen der Physik*, 330(3): 377-445.
- Möller, F. 1964.** Optics of the lower atmosphere. *Appl. Opt.*, 3(2): 157–166.
- Navas, A. J., Balsells, J. M. G., Paris, J. F., Vázquez, M. C., Notario, A. P. 2012.** Impact of pointing errors on the performance of generalized atmospheric optical channels. *Opt. Exp.*, 20(11): 12550–12562.
- Nave, C. R. 2000.** Georgia State University. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/crosec.html#c2>-(Erişim tarihi:2020).
- Nebuloni, R. Capsoni, C. 2013.** Measurements of optical attenuation through fog: comparison between a 0,785  $\mu\text{m}$  laser link and a visibility sensor. 2nd International Workshop on Optical Wireless Communications, 21-21 October, 2013, Newcastle, UK.
- Numai, T. N. 2010.** Laser diodes and their applications to communications and information processing. Wiley, New York, USA, 391 pp.
- Pang, Jie. You, S. 2018.** Research on free-space optical communication performance under various weather conditions. Asia Communications and Photonics Conference, 26-29 October, 2018, Hangzhou, China.
- Peng, X., Kong, L., Sun, X., Lyu, H. 2019.** Design and analysis of optical receiving antenna for led visible light communication based on Taguchi method. *IEEE*, 7: 186364 - 186377.
- Penndorf, R. B. 1957.** Total Mie scattering coefficients for spherical particles of refractive index 2,00. *J. of the Opt. Soc. of America*, 47(7): 603-605.
- Recep, B. 2019.** Negatif iyon jeneratörlerinin ürettiği negatif iyonların voltaj, hava hızı değişimi ve ortam sıcaklığına bağlı olarak etki alanlarının araştırılması ve Taguchi metodu ile analiz analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

- Rouissat, M., Borsali, A. R., Chiak-Bled, M. E. 2012.** Free space optical channel characterization and modeling with focus on Algeria weather conditions. *Int. J. Comp. Netw. Inf. Secur.*, 3: 17–23.
- Seymour, T., Shaheen, A. 2011.** History of wireless communication. *Rew. of Busin. Inf. Syst.*, 15: 37-42.
- Solovey, A. 2019.** Novel post-processing technique in free space transmission loss measurement of multi-layer dielectric material parameters. International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 9-13 September, 2019, Granada, Spain.
- Sudhakar, K., Subramanyam, M. V. 2013.** Evaluation of atmospheric attenuation due to various parameters. International Conference on Information Communication and Embedded Systems, 21-22 February, 2013, Chennai, India.
- Shaker F., Ali M. 2019.** Performance of free space optical communication link under foggy weather. *J. of Com.*, 14(6): 518-523.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., Y. W. 2005.** Taguchi's quality engineering handbook. Wiley, New York, USA, 1662 pp.
- Titterton P. J. 1973.** Power reduction and fluctuations caused by narrow laser beam motion in the far field. *Appl. Opt.*, 12(2): 423–425.
- Varshney, D., Bhatia, R. 2019.** Technique for improving the performance of FSO under atmospheric turbulence. 6th International Conference on Computing for Sustainable Global Development, 13-15 March, 2019, New Delhi, India.
- Yuan, F., Lee, Y. H., Meng, Y. S., Manandhar, S., Ong, J. T. 2019.** High-resolution ITU-R cloud attenuation model for satellite communications in tropical region. *IEEE Trans.on Ant. and Prop.*, 67(9): 6115-6122.
- Weng, W., Yang, F., Elsherbeni, A. 2007.** Electromagnetics and antenna optimization using Taguchi's method. Morgan & Claypool Pub., USA, 94 pp.
- Weng, W. C., Yang, F., Elsherbeni, A. Z. 2007.** Linear antenna array synthesis using Taguchi's method: a novel optimization technique in electromagnetics. *IEEE Trans. Anten. and Prop.*, 55(3): 723-730.
- Wallace, J. M., Hobbs, P. V. 2006.** Atmospheric science an introductory survey. Elsevier, New York, USA, 505 pp.
- Willebrand, H., Ghuman B.S. 2002.** Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks. SAMS publishing, Indianapolis, USA, 288 pp.

## **EKLER**

**EK 1 Mie Saçılma Analizi**

**EK 2 S1 ve S2 Değerlerinin Hesabı**

**EK 3 Mie Saçılma Katsayıları  $a_n$  ve  $b_n$  Hesabı**

**EK 4 Lagrange Polinomlarının Hesabı**

## EK 1 Mie Saçılma Analizi

```
% Ortam kırılma indisi m,  
% Boyut parametresi x,  
% Dalga numarası k,  
% Örnekleme sayısı nsteps,  
% Saçılma açısı teta alınarak, Mie güç dağılım fonksiyonunun hesaplanması ve saçılma  
% grafiklerini oluşturan program.
```

```
function result = Mie_tetascan(m, x, nsteps)  
nsteps=nsteps;  
m1=real(m); m2=imag(m);  
nx=(1:nsteps); dteta=pi/(nsteps-1);  
teta=(nx-1).*dteta;  
for j = 1:nsteps,  
u=cos(teta(j));  
a(:,j)=Mie_S12(m,x,u);  
SL(j)= real(a(1,j)'*a(1,j));  
SR(j)= real(a(2,j)'*a(2,j));  
end;  
y=[teta teta+pi;SL SR(nsteps:-1:1)]';  
polar(y(:,1),y(:,2))  
title(sprintf('Mie angular scattering: m=%g+%gi, x=%g',m1,m2,x));  
xlabel('Scattering Angle')  
result=y;
```

## EK 2 S1 ve S2 Değerlerinin Hesabı

```
% Ortam kırılma indisi m,  
% boyut parametresi  $x=k_0*a$ ,  
% dalga numarası k,  
% yuvarlama fonksiyonu nmax,  
% saçılma açısı kosinüsü  $u=\cos(\text{saçılma açısı})$ ,  
% molekül yarıçapı a, alınarak Mie saçılma fonksiyonları S1 ve S2' nin  
% hesaplanmasını sağlayan program.
```

```
function result = Mie_S12(m, x, u)  
nmax=round(2+x+4*x^(1/3));  
abcd=Mie_abcd(m,x);  
an=abcd(1,:);  
bn=abcd(2,:);  
pt=Mie_pt(u,nmax);  
pin =pt(1,:);  
tin=pt(2,:);  
n=(1:nmax);  
n2=(2*n+1)./(n.*(n+1));  
pin=n2.*pin;  
tin=n2.*tin;  
S1=(an*pin'+bn*tin');  
S2=(an*tin'+bn*pin');  
result=[S1;S2];
```

### EK 3 Mie Saçılma Katsayıları $a_n$ ve $b_n$ Hesabı

% Derece numaraları n,  
% boyut parametresi  $x=k_0*a$ ,  
% dalga numarası k,  
% molekül yarıçapı a, alınarak n. dereceden Mie katsayılarının hesaplanmasını  
% sağlayan program.

```
function result = Mie_abcd(m, x)
nmax=round(2+x+4*x^(1/3));
n=(1:nmax); nu = (n+0.5); z=m.*x; m2=m.*m;
sqx= sqrt(0.5*pi./x); sqz= sqrt(0.5*pi./z);
bx = besselj(nu, x).*sqx;
bz = besselj(nu, z).*sqz;
yx = bessely(nu, x).*sqx;
hx = bx+i*yx;
b1x=[sin(x)/x, bx(1:nmax-1)];
b1z=[sin(z)/z, bz(1:nmax-1)];
y1x=[-cos(x)/x, yx(1:nmax-1)];
h1x= b1x+i*y1x;
ax = x.*b1x-n.*bx;
az = z.*b1z-n.*bz;
ahx= x.*h1x-n.*hx;
an = (m2.*bz.*ax-bx.*az)./(m2.*bz.*ahx-hx.*az);
bn = (bz.*ax-bx.*az)./(bz.*ahx-hx.*az);
cn = (bx.*ahx-hx.*ax)./(bz.*ahx-hx.*az);
dn = m.*(bx.*ahx-hx.*ax)./(m2.*bz.*ahx-hx.*az);
result=[an; bn; cn; dn];
```



#### EK 4 Lagrange Polinomlarının Hesabı

% Saçılma açısı  $-1 < u(\cos\theta) < 1$  aralığında alınarak,  
% Mie Teorisinde kullanılan açısız fonksiyonlar olan  $\pi_n$  ve  $\tau_n$  fonksiyonlarının  
%  $n=1$ 'den  $n_{\max}$  değerine kadar olan aralıkta hesaplanmasını sağlayan program.

```
function result=Mie_pt(u,nmax)
p(1)=1;
t(1)=u;
p(2)=3*u;
t(2)=3*cos(2*acos(u));
for n1=3:nmax,
p1=(2*n1-1)/(n1-1).*p(n1-1).*u;
p2=n1/(n1-1).*p(n1-2);
p(n1)=p1-p2;
t1=n1*u.*p(n1);
t2=(n1+1).*p(n1-1);
t(n1)=t1-t2;
end;
result=[p;t];
```

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Pelin Demir  
Doğum Tarihi : 03.01.1988  
Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Balıkesir Anadolu Lisesi  
Lisans : Uludağ Üniversitesi Elektronik Mühendisliği  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Elektronik Mühendisliği

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar :

Gedik Üniversitesi-İstanbul  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
Araştırma Görevlisi(2020-Devam)

Asisguard Savunma Sistemleri - Ankara  
Kıdemli Sistem Mühendisi (02.2020-09.2020)

Uludağ Üniversitesi- Bursa  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
Araştırma görevlisi (2015-2020)

Ermaksan Makine ve San. Tic. A.Ş. - Bursa  
Ar-Ge Mühendisi 2011-2013  
Patent Mühendisi 2013-2014

İletişim (e-posta) : [pelinsule@gmail.com](mailto:pelinsule@gmail.com), [pelin.demir@gedik.edu.tr](mailto:pelin.demir@gedik.edu.tr)

### Yayınları :

**Demir P., 2017.** Serbest uzay optik haberleşmede saçılma ve soğurmalar. 19. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, 29 Eylül, 2017, Koç Üniversitesi, İstanbul.

**Demir, P., Yılmaz, G. 2018.** The investigation of SNR for free space optical communication under turbulence. *Karaelmas Sci. And Eng. J.*, 8(2): 438-445. (Int. Ind.)

**Demir, P., Yılmaz, G. 2020.** Investigation of the atmospheric attenuation factors in FSO communication systems using the Taguchi method. *Hindawi Int. J. of Opt.*, 2020: 1-8. (SCI-Exp)

**Demir, P., Kaymak, E. 2016.** An air vehicle capable of measuring environmental parameters, Türk Patent Enstitüsü Faydalı Model Başvurusu.

**Demir, P., Demir, U. 2016.** Device that Performs Laser Communication Analysis, Türk Patent Enstitüsü, Patent Başvurusu

**Kaymak, E., Kale, M., Taşoğlu, Y.C, Yerlikaya, M., Orhan, N., Süle, P. 2016.** Sıcaklık, basınç, nem, yükseklik, hız ve pozisyon ölçümü yapabilen piko uydu tasarımı. V. Ar-Ge Günleri, 15-16 Mart, 2016, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

**Süle, P. 2015.** The importance of intellectual property in R&D center works. 1st International Congress on Engineering Architecture and Design Congress, Kocaeli University, Kocaeli.

**Süle, P., Yılmaz, G. 2016.** Lazerli uydu haberleşme sistemlerinde atmosferik kırılmanın araştırılması. V. Ar-Ge Günleri, 15-16 Mart, 2016, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

**Süle, P., Demir, U. 2016.** Automatically open/close for automotive glove box using shape memory alloy- spring element. Türk Patent Enstitüsü, Patent başvurusu.