T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

DİREK GÖRÜŞÜ OLMAYAN ULTRAVİYOLE HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN İLERİ SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİ

Sayed Hasan HARİQ

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Bahattin KARAKAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma 29.07.2021 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Dr.Öğr.Üyesi Bahattin KARAKAYA
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Fırat KAÇAR
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç.Dr.Serap ÇEKLİ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi

Prof. Dr. Onur OSMAN
İstanbul Arel Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, 2215 numaralı TÜBİTAK BİDEB programı ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmalarım boyunca verdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam Dr. Ögr. Üyesi Bahattin KARAKAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tezin oluşumu aşamasında çoğu zaman birlikte çalıştığım ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Doç. Dr. Niyazi ODABAŞIOĞLU'ya teze yaptığı büyük katkılardan dolayı çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam boyunca bana hep yardımcı olan tüm hocalarıma, maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen sevgili eşim Elham AYAZ'a, kayınpederim sayın Dr. Mohammad Zakir AYAZ'a, sevgili aileme ve çok değerli arkadaşlarıma şükranlarımı sunuyorum. Son olarak doktora öğrenimimi destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz 2021 **Sayed Hasan HARİQ**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xx**
SUMMARY ..... **xxii**
1. GİRİŞ **1**
1.1. KABLOSUZ OPTİK VE ULTRAVİYOLE HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TARİHİ 1
1.2. DİREK GÖRÜŞÜ OLMAYAN ULTRAVİYOLE (NLOS-UV) HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN MOTİVASYONU VE İLERLEMESİ 2
1.3. TEZİN AMACI VE KAPSAMI 6
1.4. TEZİN YAPISI 11
2. GENEL KISIMLAR **13**
2.1. NLOS-UV İLETİŞİM SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ 13
2.1.1. UV Kaynakları 13
2.1.2. UV Dedektör Teknolojileri 14
2.1.2.1. Tek-Foton Dedektörü *15*
2.1.2.2. Performans Karşılaştırması *16*
2.1.3. Filtre Teknolojisi 17
2.1.4. Lens Teknolojisi 18
2.1.5. UV Atmosfer Kanalı 18
2.1.5.1. İletişim Aracı: Atmosfer *18*
2.1.5.2. NLOS-UV Saçılma Kanalı *19*
2.1.5.3. Haberleşme Kanal Modelleri *21*
2.1.5.4. Analitik Tek Saçılma Modeli *22*
2.1.5.5. Parametrik Tek Saçılım Kanal Modeli *24*
2.1.5.6. Yaklaşık Tek Saçılma Yol Kaybı Modeli *25*
2.1.5.7. NLOS-UV Türbülans Analizi *27*

2.1.6. Modülasyon Teknikleri 33
3. MALZEME VE YÖNTEM 35
3.1. GİRİŞ 35
3.2. UZAYSAL ÇEŞİTLEME TEKNİKLERİ 36
3.2.1. Sistem Modelleri 37
3.2.1.1. SISO NLOS-UV Şemalarının Sistem Modeli 37
3.2.1.2. Uzaysal Çeşitlemeli NLOS-UV Şemalarının Sistem Modeli 37
3.2.2. Bit Hata Oranı (BER) Başarım Analizi 40
3.2.2.1. SISO NLOS-UV Bağlantılarının BER Başarım Analizi 40
3.2.2.2. MISO NLOS-UV Bağlantılarının BER Başarım Analizi 42
3.2.2.3. SIMO NLOS-UV Bağlantılarının BER Başarım Analizi 46
3.2.2.4. MIMO NLOS-UV Bağlantılarının BER Başarım Analizi 48
3.2.3. Kesinti Olasılığı Analizi 51
3.2.3.1. SISO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi 52
3.2.3.2. MISO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi 53
3.2.3.3. SIMO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi 56
3.2.3.4. MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi 57
3.2.4. Uzaysal Çeşitlemeli NLOS-UV Bağlantılarının Çeşitleme Kazancı Analizi 62
3.3. SEÇİM ÇEŞİTLEME TEKNİKLERİ 66
3.3.1. TRAS Şemalı MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Sistem Modeli 66
3.3.2. TRAS Şemalı MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi 67
3.3.3. TRAS Şemalı MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Çeşitleme Kazancı Analizi 69
4. BULGULAR 71
4.1. GİRİŞ 71
4.2. UZAYSAL ÇEŞİTLEMELİ NLOS-UV SİSTEMLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIM SONUÇLARI 71
4.2.1. SISO NLOS-UV Bağlantılarının Bit Hata Oranı Başarım Sonuçları 72
4.2.2. MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Bit Hata Oranı Başarım Sonuçları 73
4.3. UZAYSAL ÇEŞİTLEMELİ NLOS-UV SİSTEMLERİNİN KESİNTİ OLASILIĞI BAŞARIM SONUÇLARI 82
4.3.1. SISO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Başarım Sonuçları 82
4.3.2. MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Başarım Sonuçları 82

4.4. UZAYSAL ÇEŞİTLEMELİ NLOS-UV SİSTEMLERİNİN GÖRECELİ ÇEŞİTLEME KAZANCI 95
4.5. ANTEN SEÇME ŞEMALI MIMO NLOS-UV BAĞLANTILARININ KESİNTİ OLASILIĞI BAŞARIM SONUÇLARI 97
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 101
KAYNAKLAR 104
ÖZGEÇMİŞ 115

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Optik spektrumu. 2

Şekil 2.1: UVTOP255 derin UV LED'in spektral karakteristiği [57]. 14

Şekil 2.2: Princeton Instruments 254 nm filtre iletimi ile dalga boyu karşılaştırması [57]. 17

Şekil 2.3: Yükseltilmiş verici ışını ve alıcı görüş alanını gösteren NLOS-UV iletişim bağlantı geometrisi. 20

Şekil 2.4: Prolat küresel koordinat sistemi. 23

Şekil 2.5: Rayleigh ve Mie faz fonksiyonları için NLOS-UV kanalın dürtü yanıtları sırasıyla: (a) Rayleigh (Eşitlik (2.2)), (b) Mie (Eşitlik (2.3)) [7]. 25

Şekil 3.1: MISO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu. 38

Şekil 3.2: SIMO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu. 39

Şekil 3.3: MIMO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu. 40

Şekil 3.4: TRAS şemalı bir MIMO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu. 67

Şekil 4.1: Farklı C_n^2 değerleri için SISO NLOS-UV bağlantısının SNR'e karşı bit hata oranı başarımı. 72

Şekil 4.2: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-16}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda verici çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının bit hata oranı başarımı. 74

Şekil 4.3: Uzaysal korelasyonun, atmosferik türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan log-normal kanal durumunda dört verici antene sahip NLOS-UV bağlantısının performansı üzerindeki etkisi. 75

Şekil 4.4: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanlları durumunda alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının BER başarım sonuçları. 76

Şekil 4.5: Farklı türbülans şiddetlerine sahip atmosferik türbülans kanalları durumunda verici çeşitlemeli ve alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının BER başarım karşılaştırması. 77

Şekil 4.6: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanlları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantılarının BER başarım sonuçları. 78

Şekil 4.7: Uzaysal korelasyonun, atmosferik türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan log-normal kanal durumunda üç verici ve üç alıcı antene sahip MIMO NLOS-UV bağlantısının performansı üzerindeki etkisi.....80

Şekil 4.8: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarına karşı uzaysal çeşitlemeli FSO bağlantılarının BER başarım sonuçları. 81

Şekil 4.9: Farklı C_n^2 değerleri için SISO NLOS-UV bağlantılarının SNR'e karşı kesinti olasılığı başarım sonuçlar. 83

Şekil 4.10: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda verici çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı başarım sonuçları. 84

Şekil 4.11: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı başarım sonuçları. 85

Şekil 4.12: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı başarım sonuçları. 87

Şekil 4.13: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-14}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı başarım sonuçları. 89

Şekil 4.14: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda 4-TX ve 4-RX antenli MIMO NLOS-UV bağlantısının farklı bağlantı mesafesi için kesinti olasılığı başarım sonuçları. 90

Şekil 4.15: MISO NLOS-UV bağlantısının, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda farklı verici anten sayısı ve farklı korelasyon katsayısı için kesinti olasılığı başarım sonuçları.....91

Şekil 4.16: SIMO NLOS-UV bağlantısının, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda farklı alıcı anten sayısı ve farklı korelasyon katsayısı için kesinti olasılığı başarım sonuçları.....92

Şekil 4.17: MIMO NLOS-UV bağlantısının, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda farklı verici ve alıcı anten sayısı ve farklı korelasyon katsayısı için kesinti olasılığı başarım sonuçları. 94

Şekil 4.18: İlişkisiz atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantılarının göreceli ceşitleme kazancı.....96

Şekil 4.19: İlişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda farklı korelasyon katsayısı değerleri için MIMO NLOS-UV bağlantılarının göreceli ceşitleme kazancı. 97

Şekil 4.20: Atmosferik türbülans kanalları durumunda verici ve/veya alıcı anten seçimi olan MIMO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı başarım sonuçları. 98

Şekil 4.21: Anten seçim şemaları olan ve olmayan MIMO NLOS-UV sistemlerinin kesinti olasılığı başarım karşılaştırması.....100

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Atmosferin model parametreleri: 230 – 310 nm. 20

Tablo 4.1: SISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} BER değerine ulaşmak için atmosferik türbülans şiddetine karşı gerekli SNR değerleri. 73

Tablo 4.2: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-16}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk BER değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici anten sayısı (N). 74

Tablo 4.3: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk BER değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısı (N,M). 79

Tablo 4.4: SISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} kesinti olasılığı değerine ulaşmak için atmosferik türbülans şiddetine karşı gerekli SNR değerleri. 83

Tablo 4.5: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici anten sayısı (N). 85

Tablo 4.6: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda SIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı alıcı anten sayısı (M). 86

Tablo 4.7: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısı (N, M). 88

Tablo 4.8: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda MISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici anten sayısı (N) ve korelasyon katsayısı değerleri. 91

Tablo 4.9: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda SIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı alıcı anten sayısı (M) ve korelasyon katsayısı değerleri (ρ_{kl}). 93

Tablo 4.10: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10}'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısı (N, M) ve korelasyon katsayısı değerleri (ρ_{kl}) 95

Tablo 4.11: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10}'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısı (N, M). 99

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

A : Skaler bileşen

$AD_{R_{SD}}$: Asimptotik göreceli çeşitleme kazancı

$AD_{R_{TRAS}}$: TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantılarının asimptotik göreceli çeşitleme kazancı

A_R : Alıcı açıklığının alanı

c_n : Skaler bileşen

$C(\cdot)$: Haberleşme kanalının anlık kapasitesi

C_n^2 : Atmosferin kırılma yapı parametresinin indisi

d : Verici ve alıcı taban çizgisi ayrımı

d' : Verici veya alıcı antenlerin ayırma mesafesi

d_1 : Verici ile ortak hacim arasındaki mesafe

d_2 : Alıcı ile ortak hacim arasındaki mesafe

d_G : Çeşitleme kazancı

D_1 : Büyük koninin alt yüzeyinin yarıçapı

D_2 : Küçük koninin alt yüzeyinin yarıçapı

$D_n(\cdot,\cdot)$: Atmosferin yapı fonksiyonu

$D_{R_{SD}}$: Uzaysal çeşitlemeli log-normal kanallar için göreceli çeşitleme kazancı

$D_{R_{TRAS}}$: TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantılarının göreceli çeşitleme kazancı

$E[\cdot]$: Beklenen değer

E_r : Alıcıya ulaşan optik sinyalin enerjisi

E_t : Vericiden yayılan optik sinyalin enerjisi

$f(\cdot)$: Olasılık yoğunluk fonksiyonu

$F_{\gamma_{TRAS}}(.)$: γ_{TRAS} rastgele değişkeninin kümülatif dağılım fonksiyonu

h_1 : Büyük koninin alt yüzeyinin yüksekliği

h_2 : Küçük koninin alt yüzeyinin yüksekliği

$h(t)$: Kanalın dürtü yanıtı

$I_{0_{NLOS}}$: Tek saçılma varsayımı altında türbülans olmadığında NLOS yolundan gelen ve alıcıda alınan ışık yoğunluğu

$I_{r_{NLOS}}$: NLOS yolundan gelen ve alıcıda alınan ışık şiddeti

$I_{r_{NLOS_m}}$: m'inci alıcı açıklığında alınan ışın yoğunluğu

$I_{r_{NLOS_{MIMO}}}$: MIMO NLOS-UV durumunda alıcıda alınan ışın yoğunluğu

$I_{r_{NLOS_{MISO}}}$: MISO NLOS-UV durumunda alıcıda alınan ışın yoğunluğu

$I_{r_{NLOS_n}}$: n'inci verici açıklığından alınan ışın yoğunluğu

$I_{r_{NLOS_{nm}}}$: n'inci verici anteninından m'inci alıcı antenine kadar olan kanalı modelleyen sönümleme kanal katsayısı

$I_{r_{NLOS_{SIMO}}}$: SIMO NLOS-UV durumunda alıcıda alınan ışın yoğunluğu

I_t : Vericiden yayılan ışık şiddeti

I_v : Türbülans varlığında ortak hacme varan ışığın şiddeti

I_{v_0} : Türbülans olmadan ortak hacimde alınan ortalama ışınım

k : Hermite polinomunda yaklaşımın mertebesi

k_a : Emilme katsayısı

k_e : Sönme katsayısı

k_s : Toplam saçılma katsayısı

k_s^{Mie} : Mie (aerosol) saçılma katsayısı

k_s^{Ray} : Rayleigh (moleküler) saçılma katsayısı

K : Dalga numarası

K_0 : Türbülans gücü parametresi

L : Yol kaybı

L_c : Kanal uzunluğu

$L_n(t)$: n-sıralı Laguerre polinomu

n : Atmosferin kırılma indisi

M : Alıcı anten sayısı

N : Verici anten sayısı

N_0 : Toplamsal beyaz Gauss gürültüsünün gücü

$p(\mu)$: Saçılma faz fonksiyonu

P : Hava basıncı

P_e : Bit hata olasılığı

$P_{e_{MIMO}}$: MIMO NLOS-UV bağlantılarının bit hata olasılığı

$P_{e_{MISO}}$: MISO NLOS-UV bağlantılarının bit hata olasılığı

$P_{e_{SIMO}}$: SIMO NLOS-UV bağlantılarının bit hata olasılığı

$P_{e_{SISO}}$: SISO NLOS-UV bağlantılarının bit hata olasılığı

P_{out} : Kesinti olasılığı

$P_{out_{MIMO}}$: MIMO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı

$P_{out_{MISO}}$: MISO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı

$P_{out_{SD}}$: Uzaysal çeşitlemeli bir NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı

$P_{out_{SIMO}}$: SIMO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı

$P_{out_{SISO}}$: SISO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı

$P_{out_{TRAS}}$: TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı

P_T : İletim gücü

$q,\ g,$ ve f : Model parametreleri

$\mathrm{Q}(\cdot)$: Gauss Q fonksiyonu

$\mathbf{r}$: Atmosfer içindeki konum

r_{MIMO} : MIMO NLOS-UV bağlantısı durumunda alınan optik sinyal

r_{MISO} : MISO NLOS-UV bağlantısı durumunda alınan optik sinyal

r_{SIMO} : SIMO NLOS-UV bağlantısı durumunda alınan optik sinyal

r_{SISO} : SISO NLOS-UV sistemlerinde alıcıda alınan optik sinyal

R_0 : İletim hızı

s : Bilgi biti

SNR_{avg} : Ortalama sinyal gürültü oranı

t : Zaman

T : Kelvin cinsinden sıcaklık

V : Ortak hacim

X : Log-genlik dalgalanması

w : Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü

z : Yükseklik

z_i : k 'inci mertebeden Hermite polinomunun sıfırları

α ve β : Model parametreleri

γ : Anlık elektriksel sinyal gürültü oranı

γ_{MIMO} : MIMO NLOS-UV bağlantılarında alıcıda alınan anlık elektriksel SNR

γ_{MISO} : MISO NLOS-UV bağlantılarında alıcıda alınan anlık elektriksel SNR

γ_{SIMO} : SIMO NLOS-UV bağlantılarında alıcıda alınan anlık elektriksel SNR

γ_{SISO} : SISO NLOS-UV bağlantılarında alıcıda alınan anlık elektriksel SNR

γ_{th} : Eşik sinyal gürültü oranı

γ_{TRAS} : TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantılarda, alıcıda alınan anlık SNR

$\Gamma(\cdot)$: Gamma fonksiyonu

$\Gamma_n(\cdot,\cdot)$: Kırılma indisinin korelasyon fonksiyonu

ζ : Alıcı ekseni ile alıcıdan ortak hacme bir vektör arasındaki açı

η : Açısal koordinatı

η_r : Fotoçoğaltıcı tüpün kuantum verimliliği

θ_1 : Verici tepe açısı

θ_2 : Alıcı tepe açısı

θ_s : Saçılma açısı

λ : Dalgaboyu

μ : Saçılma açısı ile tanımlanan bir parametre

μ_{X_i} : Log-genlik ortalaması

$\mu_{X_{NLOS}}$: NLOS yolundan gelen ve alıcıda alınan ışık şiddetinin log-genlik ortalaması

$\mu_{X_{NLOS_{MIMO}}}$: MIMO NLOS-UV durumunda alıcıda alınan optik sinyalin log-genlik ortalaması

$\mu_{X_{NLOS_{MISO}}}$: MISO NLOS-UV durumunda alıcıda alınan optik sinyalin log-genlik ortalaması

$\mu_{X_{NLOS_{SD}}}$: Uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV durumunda alıcıda alınan optik sinyalin log-genlik ortalaması

$\mu_{X_{NLOS_{SIMO}}}$: SIMO NLOS-UV durumunda alıcıda alınan optik sinyalin log-genlik ortalaması

ξ : Radyal koordinatı

ρ_{ij} : Korelasyon katsayısı

σ_I^2 : Işınım dalgalanmasının varyansı veya parıldama indisi

$\sigma_{X_i}^2$: Log-genlik varyansı veya Rytov varyansı

$\sigma_{X_{NLOS}}^2$: NLOS yolundan gelen ve alıcıda alınan ışık şiddetinin log-genlik varyansı

$\sigma_{X_{NLOS_{MIMO}}}^2$: MIMO NLOS-UV durumunda alıcıda alınan optik sinyalin log-genlik varyansı

$\sigma_{X_{NLOS_{MISO}}}^2$: MISO NLOS-UV durumunda alıcıda alınan optik sinyalin log-genlik varyansı

$\sigma_{X_{NLOS_{SD}}}^2$: Uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV durumunda alıcıda alınan optik sinyalin log-genlik varyansı

$\sigma_{X_{NLOS_{SIMO}}}^2$: SIMO NLOS-UV durumunda alıcıda alınan optik sinyalin log-genlik varyansı

σ_w : Toplamsal beyaz Gauss gürültüsünün standart sapması

σ_w^2 : Toplamsal beyaz Gauss gürültüsünün varyansı

ϕ : Azimut koordinatı

ϕ_1 : Verici ışını tam genişlikte sapma açısı

ϕ_2 : Alıcı görüş alanı açısı

$\Phi(K)$: Güç spektral yoğunluğu

ω_i : k 'inci mertebeden Hermite polinomunun ağırlık faktörü

Ω_t : Verici konisinin katı açısı

Kısaltmalar **Açıklama**

APD : Çığ Fotodiyot / Avalanche Photodiode

BER : Bit Hata Oranı / Bit Error Rate

cdf : Kümülatif Dağılım Fonksiyonu / Cumulative Distribution Function

CSI : Kanal Durum Bilgisi / Channel State Information

DARPA : Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı / Defense Advanced Research Projects Agency

DCR : Karanlık Sayım Oranı / Dark Count Rate

DUVAP : Derin Ultraviyole Çığ Fotodiyot / Deep Ultrviolet Avalanche Photodiode

EGC : Eşit Kazanç Birleştirme / Equal Gain Combining

FOV : Görüş Alanı / Field of View

FSO : Kızılötesi Kablosuz Optik / Free-Space Optic

FWHM : Tam Genişlik Yarı Maksimum / Full Width at Half Maximum

ICNIRP : Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

IEC : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu / International Electrotechnical Commission

IM : Yoğunluk Modülasyonu / Intensity Modulation

IM/DD : Yoğunluk Modülasyonu ve Direk Sezim / Intensity Modulation and Direct Detection

IR : Kızılötesi / Infrared

ISI : Semboller-Arası Girişim / Inter-Symbol Interference

İHA : İnsansız Hava Araçları

LED : Işık Yayan Diyot / Light Emiting Diode

LOS : Direk Görüş / Line-of-Sight

MC : Monte Carlo

MIMO : Çok-Girişli-Çok-Çıkışlı / Multiple-Input-Multiple-Output

MISO : Çok-Girişli-Tek-Çıkışlı / Multiple-Input-Single-Output

MRC : Maksimum Oran Birleştirme / Maximum Ratio Combining

MSE : Ortalama Kare Hataları / Mean Squar Errors

NLOS : Direk Görüşü Olmayan / Non-Line-of-Sight

OFDM : Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama / Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OOK : Açma-Kapama Anahtarlama / On-Off Keying

PDF : Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu / Probability Density Function

PMT : Foto-Çoğaltıcı Tüp / Photomultiplier Tube

PPM : Darbe Konum Modülasyonu / Pulse Position Modulation

RAS : Alıcı Anten Seçimi / Receive Aperture Selection

RF : Radyo Frekansı / Radio Frequency

RX : Alıcı / Receiver

SB-UV : Güneş Körü-Ultraviyole / Solar Blind-Ultraviolet

SelC : Seçim Birleştirme / Selection Combining

SIMO : Tek-Girişli-Çok-Çıkışlı / Single-Input-Multiple-Output

SISO : Tek-Girişli-Tek-Çıkışlı / Single-Input-Single-Output

SNR : Sinyal Gürültü Oranı / Signal-to-Noise Ratio

SPAD : Tek-Fotonlu Çığ Fotodiyot / Single-Photon Avalanche Photodiode

SPDE : Tek Foton Algılama Verimliliği / Single-Photon Detection Efficiency

STBC : Uzay-Zaman Blok Kodu / Space-Time Block Code

SUVOS : Yarıiletken Ultraviyole Optik Kaynak / Semiconductor Ultraviolet Optical Sources

TAS : Verici Anten Seçimi / Transmit Aperture Selection

TRAS : Verici-Alıcı Anten Seçimi / Transmit-Receive Aperture Selection

TX : Verici / Transmitter

UGS : Gözetimsiz Zemin Sensörü / Unattended Ground Sensor

UV : Ultraviyole / Ultraviolet

VLC : Görünür Işık İletişimi / Visible Light Communication

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DİREK GÖRÜŞÜ OLMAYAN ULTRAVİYOLE HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN İLERİ SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİ

Sayed Hasan HARİQ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Bahattin KARAKAYA

Ultraviyole (UV) bandındaki sinyallerin atmosferdeki zengin saçılması, direk görüşü olmayan dış mekan kablosuz bağlanabilirliği sağlamakta ve kızılötesi optik bağlantılarının direk görüş olma gereksinimini ortadan kaldırmaktadır. UV sinyallerinin zengin saçılması, direk görüşü olmayan (NLOS) iletişim sağlarken, aynı zamanda NLOS-UV bağlantılarının performansını önemli ölçüde düşüren büyük bir yol kaybına neden olur. Saçılma ve emilme kayıplarının yanı sıra, atmosferik türbülans kaynaklı sönümleme, NLOS-UV iletişim sistemleri için önemli bir sınırlayıcı faktördür. Türbülans kaynaklı sönümleme, alınan optik ışında dalgalanmalara neden olarak alıcıda güç kaybına ve performans düşüşüne neden olmaktadır. Hata düzeltme kodları, işbirlikli haberleşme sistemleri, bağlantı adaptasyonu vb. dahil olmak üzere sönümleme etkisini azaltan birçok teknikler vardır. Bunlar arasında, uzaysal çeşitleme teknikleri, doğal fazlalıkları ile sönümleme etkisini izole etmek için çekici bir alternatif yaklaşım sağlamaktadır.

Bu tezde, atmosferik türbülans kaynaklı sönümleme varlığında NLOS-UV haberleşme sistemleri için uzaysal çeşitleme teknikleri incelenmektedir. Çalışma esas olarak (i) verici çeşitlemesi olarak adlandırılan MISO sistemine, (ii) alıcı çeşitlemesi olarak adlandırılan SIMO

sistemine ve (iii) MIMO NLOS-UV iletişim sistemlerine odaklanmaktadır. Uzaysal çeşitleme tekniklerinin sönümleme etkisini azaltma gücünü göstermek için, bahsedilen sistemlerin bit hata oranı ve kesinti performansı analizi yapılmaktadır. Bahsedilen tüm sistemlerin bit hata oranı ve kesinti olasılığı için kapalı form ifadeleri türetilmektedir. Elde edilen teorik ifadelerin doğruluğu sayısal simülasyonlarla teyit edilmektedir. Sayısal simülasyonlarda, alıcı çeşitleme durumu için eşit kazanç birleştirme (EGC), en büyük oransal birleştirme (MRC) ve seçim birleştirme (SelC) dahil olmak üzere farklı birleştirme yöntemleri dikkate alınmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, tek-girişli-tek-çıkışlı (SISO) sistemine göre uzaysal çeşitleme şemalarında önemli performans iyileştirmeleri olduğunu göstermektedir. Uzaysal korelasyonun etkisi ayrıca araştırılmakta ve ilişkili atmosferik sönümleme kanalları durumunda MISO, SIMO ve MIMO NLOS-UV bağlantılarının bit hata oranı ve kesinti performansları türetilmektedir. Sönümleme yolları arasındaki uzaysal korelasyonun performansı önemli ölçüde düşürdüğü ve sönümleme yolları arasında hiçbir korelasyon olmaması durumunda maksimum çeşitleme kazancının elde edilebildiği gösterilmektedir. Uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının çeşitleme kazancı analizi ayrıca araştırılmakta ve MISO, SIMO ve MIMO NLOS-UV bağlantılarının göreceli çeşitleme kazancı ve asimptotik göreceli çeşitleme kazancı için kapalı form ifadeleri türetilmektedir.

MIMO NLOS-UV sistemleri için, verici anten seçimi (TAS), alıcı anten seçimi (RAS) ve verici ve alıcı antenlerin birlikte seçimi (TRAS) şemaları dahil olmak üzere, atmosferik türbülans kanalları durumunda seçim çeşitleme teknikleri de incelenmektedir. Önerilen yaklaşımlarda, karşılık gelen optik yolun sinyal gürültü oranını (SNR) maksimize etmek için N verici ve/veya M alıcı antenler arasından tek bir verici ve/veya alıcı anten seçilmektedir. Kesinti olasılığı ölçütü, belirtilen tekniklerin performansını değerlendirmek için kullanılır ve kesinti olasılıkları için kapalı form ifadeler türetilmektedir. Elde edilen ifadelerin doğruluğunu teyit etmek için kapsamlı simülasyon çalışmaları da sunulmaktadır. Bahsedilen tekniklerin çeşitleme kazancı analizleri de araştırılmakta ve asimptotik göreceli çeşitleme kazancı türetilmektedir. Sonuçlar, anten seçimi olmayan MIMO şemalarına göre anten seçim şemalarında önemli performans iyileştirmeleri olduğunu göstermektedir.

Temmuz 2021, 139 sayfa.

Anahtar kelimeler: Kablosuz optik haberleşme, NLOS-UV iletişim sistemleri, atmosferik türbülans, uzaysal çeşitleme, seçim çeşitleme.

SUMMARY

Ph.D. THESIS

ADVANCED SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES FOR NON-LINE-OF-SIGHT ULTRAVIOLET COMMUNICATION SYSTEMS

Sayed Hasan HARIQ

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Bahattin KARAKAYA

Rich scattering of ultraviolet (UV) signals enables the non-line-of-sight (NLOS) outdoor wireless connectivity and eliminates the line-of-sight (LOS) requirement of free-space optical links. While the rich scattering of UV signals provides NLOS communication, they also cause a huge path loss which significantly degrades the performance of NLOS-UV links. Besides scattering and absorption losses, atmospheric turbulence-induced fading is a major limiting factor for NLOS-UV communication systems. The turbulence-induced fading causes fluctuations in the received optical beam, resulting in power loss and performance degradation at the receiver. There are many fading mitigation techniques, including error-correcting codes, cooperative communications, link adaptation, etc. Among these, spatial diversity techniques provide an appealing alternative approach for fading compensation with their inherent redundancy.

In this thesis, the spatial diversity techniques for NLOS-UV communication systems in the presence of atmospheric turbulence-induced fading are investigated. The study mainly focuses on (i) the MISO system, which is called transmit diversity, (ii) the SIMO system, which is called

receive diversity, and (iii) MIMO NLOS-UV communication systems. The BER and outage performance of the mentioned systems is analyzed to show the fading mitigation power of spatial diversity techniques for NLOS-UV communication systems. Closed-form expressions are derived for the BER and outage probability of all the mentioned systems. The accuracy of the derivations is confirmed through numerical simulations. In the numerical simulations, different combining methods are considered, including equal gain combining (EGC), maximum ratio combining (MRC), and selection combining (SelC) for receive diversity case. The BER and outage performances of all the techniques are derived, and comparisons are made between them. The results of this study demonstrate significant performance improvements in spatial diversity schemes over single-input–single-output (SISO) counterparts. The effect of spatial correlation is further investigated, and the BER and outage performances of MISO, SIMO, and MIMO NLOS-UV links over correlated atmospheric fading channels are derived. It is illustrated that the spatial correlation between fading paths significantly degrades the performance, and maximum diversity gain is achievable in the case of no correlation between fading paths. The diversity gain analysis of NLOS-UV links with spatial diversity is further investigated, and closed-form expressions are derived for the relative diversity order and asymptotic relative diversity order of MISO, SIMO, and MIMO NLOS-UV links.

Selection diversity techniques are also studied for MIMO NLOS-UV systems over atmospheric turbulence channels, including transmit aperture selection (TAS), receive aperture selection (RAS), and joint transmit and receive aperture selection (TRAS) schemes. In the proposed approaches, a single transmit and/or receive aperture is selected among N transmit and/or M receive apertures for transmission to maximize the corresponding optical path's signal to noise ratio (SNR). The outage probability metric is used to evaluate the performance of the mentioned techniques, and closed-form expressions are derived for their outage probability. Extensive simulation studies are further presented to confirm the accuracy of the derivations. The diversity gain analyses of the mentioned techniques are also investigated, and the asymptotic relative diversity order is derived. The results demonstrated significant performance improvements in aperture selection schemes over MIMO schemes without aperture selection counterparts.

July 2021, 139 pages.

Keywords: Optical wirless communication, NLOS-UV communication system, atmospheric turbulence, spatial diversity, selection diversity.

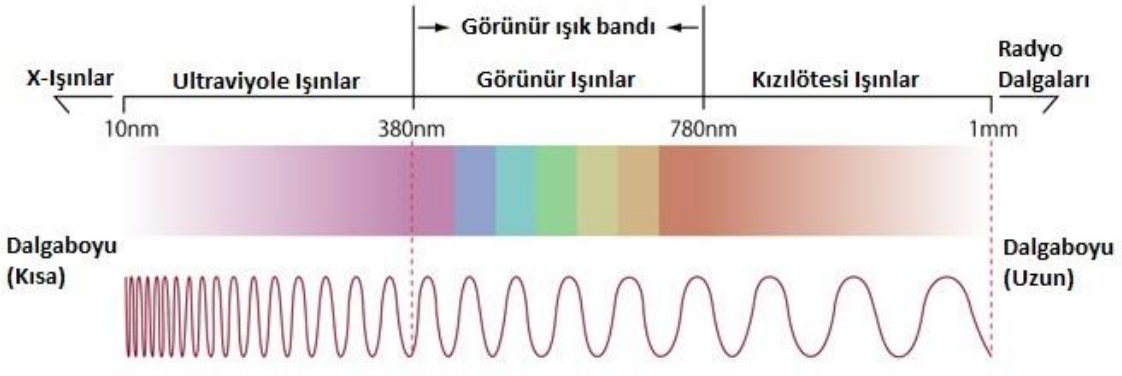
1. GİRİŞ

1.1. KABLOSUZ OPTİK VE ULTRAVİYOLE HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN TARİHİ

İnsanlık tarihi boyunca kablosuz iletişim her zaman en önemli ve en hızlı gelişen alanlardan olmuştur. Binlerce yıl öncesinde Romalılar, ordularını savaş alanında bilgilendirmek için yüksek ses çıkaran araçlar kullanıyorlardı. Çinliler düşmanlarının saldırılarını bildirmek için Çin seddinin istasyonları arasında duman sinyallerini kullanıyorlardı. Lord Nelson günlerinden beri denizdeki savaş gemileri arasında bilgi iletimi yanıp sönen ışıklar vasıtasıyla yapılıyordu. Geçtiğimiz iki yüz yılda, radyo frekansı (RF) iletişim sistemlerinin gelişmesiyle birlikte insan toplumu tamamen yenilenmiştir, örneğin, artık birisinin dünyanın öbür tarafındaki arkadaşıyla konuşması ve veri alış verişi yapabilmesi mümkündür. Bununla birlikte, insanların talebinin artmasıyla birlikte, sınırlı bant genişliği, veri hızı ve yayın özelliği nedeniyle RF iletişimi artık ihtiyacı karşılayamamaktadır. Bilgi göndermek için ışığı kullanmak yepyeni bir fikir değil, çünkü antik çağımız daha önce bundan faydalanmıştı. Geçtiğimiz yıllarda, kablosuz optik iletişim sistemlerine olan ilgi artmaya başlamıştır [1, 2], ve RF iletişim sistemlerine alternatif bir yol olarak düşünülmüştür [3].

Bir kablosuz optik iletişim sistemi, bilgiyi iletmek için kızılötesi ve görünür ışıktan ultraviyole'ye kadar değişen dalga boyuna sahip bir optik dalga kullanır. Üç ana kablosuz optik iletişim türü vardır: kızılötesi (IR) iletişim sistemleri, görünür ışık iletişim sistemleri (VLC) ve ultraviyole (UV) iletişim sistemleri. Bu üç tür kablosuz optik haberleşme sistemlerinde kullanılan optik sinyalin dalga boyları Şekil 1.1'de gösterilmiştir.

Bir RF iletişim sistemi ile karşılaştırıldığında, muazzam ve lisanssız bant genişliği, düşük güç ve minyatürleştirilmiş alıcı-verici, daha yüksek güç yoğunlukları, parazit yayınlarına karşı daha dirençli olması, veri hızında potansiyel artışı, düşük malzeme maliyeti, elektromanyetik girişimden etkilenmemesi, daha güvenli olması ve cihazının ağırlık ve boyutu gibi çeşitli potansiyel avantajlar göstermektedir [4]. Kablosuz optik alanında, kızılötesi ve UV dalgaları çok değerli taşıyıcılardır ve 1960'lardan beri kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve geliştirilmiştir [2].



Şekil 1.1: Optik spektrumu.

1.2. DİREK GÖRÜŞÜ OLMAYAN ULTRAVİYOLE (NLOS-UV) HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN MOTİVASYONU VE İLERLEMESİ

Direk görüşü olmayan ultraviyole (Non-line-of-sight Ultraviolet, NLOS-UV) haberleşme sistemleri için temel konsept, esas olarak iki atmosferik fenomene bağlıdır. İlk olarak, alt atmosferdeki ultraviyole radyasyonlarının emisyonu, örneğin troposferik tabakada, aerosoller, gaz molekülleri, ve diğer süspansiyonlar gibi asılı parçacıklar tarafından güçlü bir saçılmaya uğrar. İletilen ışığın bir kısmı, atmosferik saçılma özelliklerine bağlı bir büyüklükte yere doğru saçılır. Yerde, gelen dağınık ışık, bir veya daha fazla dağıtılmış alıcı düğüm tarafından toplanır. İkincisi, bu ultraviyole bandında, güneş radyasyonu üst atmosferdeki ozon tabakası tarafından yüksek oranda emilir ve çok düşük bir seviyede yer seviyesine ulaşır. Bu, zayıf bir güneş arkaplan gürültüsüne neden olur ve saçılmadan dolayı gelen zayıf ışığın alınmasına izin verir.

Kısa menzilli iç mekan iletişim aracı olarak kızılötesi iletişim sistemleri, RF iletişim sistemlerine göre önemli avantajlar göstermiştir [5, 6]. Kızılötesi iletişim sistemleri, LED'ler gibi düşük güç kaynaklarını direk görüş olan durumlarda kullanabilmelerine ve yüksek ve lisanssız bantgenişliğine sahip olmalarına rağmen bazı uygulamalarda az bir yansımadan dolayı tıkanmaya açıktır ve direk görüşü olmayan uygulamalarda kullanılamamaktadır. Buna ek olarak, dış mekan güneş ışığı arka plan gürültüsü ve iç mekan floresan ışık gürültüsü ve alıcının karanlık gürültüsü, kızılötesi iletişim performansını büyük ölçüde sınırlandırmaktadır. Kızılötesi haberleşme sistemlerine alternatif olarak, NLOS-UV iletişim teknolojisi, UV dalgalarının özellikleri ve atmosfer ortamı ile benzersiz etkileşimleri nedeniyle kızılötesi iletişim sistemleri için gerekli olan katı direk görüş gereksinimlerini gevşetmek için önemli bir potansiyel göstermektedir [7].

Öncelikle, UV-C (200 ~ 280 nm) spektrumu veya derin UV spektrumu olarak da adlandırılan ultraviyole spektrumu güneş körüdür yani güneş ışınları kaynaklı arkaplan gürültüsünden etkilenmez [7]. Atmosferin dışında gözlemlenen güneş radyasyonu, güneşin bileşenleri nedeniyle dalga boyuna bağlı bir enerji dağılımına sahiptir. Bu radyasyonun sadece %9'u UV spektrumuna aittir ve bu spektruma düşen kısmın da sadece %1'den daha azı UV-C spektrumundadır. Dünya yüzeyine ulaşmak için, bu güneş radyasyonunun Dünya atmosferini geçmesi gerekmektedir ve bu durumda emilme ve saçılmadan dolayı enerji kaybına uğramaktadır. Daha uzun dalga boyları için nispeten yüksek iletim meydana gelirken UV dalgaları için daha güçlü emilim gözlenir. UV dalgaları için zayıflama kaydadeğer hale gelir ve daha kısa dalga boylarına doğru hızla artar [8]. Daha büyük zayıflama ile birlikte üst atmosferdeki ozon tabakasının güçlü emilimi, UV-C bölgesindeki güneş radyasyonunun ihmal edilebilir seviyede olmasını sağlar. Bu bölgede çalışarak, yer tabanlı bir fotodetektör düşük arkaplan radyasyonunu kullanarak kuantum-sınırlı foton-sayıcı sezim yapabilir. Bu özellik, arka plan gürültüsünü fazla arttırmadan alınan enerjiyi büyük ölçüde artırmak için geniş görüş alanı (FOV) alıcılarının geliştirilmesini sağlar. İkincisi, UV dalgaları kısa dalgaboyuna sahip olduklarından, moleküler ve aerosollerle dolu atmosferden geçerken yüksek derecede açıdan bağımsız saçılmaya maruz kalır. Bu da kaynaktan hedefe kadar muazzam iletişim yollarının oluşmasına sebep olur. Sonuç olarak, direk görüşü olmayan (NLOS) iletişim imkanı elde edilir. Böylece alıcıdaki katı direk görüş olma gereksinimlerini gevşetir. Bu özellik, direk görüşün mümkün olmadığı iletişim sistemlerinde çok önemlidir. Üçüncüsü, atmosferin sebep olduğu yüksek zayıflama nedeniyle, sönme aralığının (genellikle birkaç kilometre) ötesindeki sinyaller neredeyse hiç engellenemez. Bu da, tedbirli uygulamalar için istenen bir özelliktir. Sonuç olarak, UV bandındaki muazzam ve lisanssız spektrum, potansiyel olarak yüksek veri hızı iletişim sağlayabilir; bu, kızılötesi muadilinden birkaç kat daha yüksektir. Düşük güç tüketimi, düşük maliyetli uygulama, direk görüş olmadan çalışabilirliği ve güvenliğin gerekli olduğu, mesafe ve bant genişliği gereksinimlerinin mütevazı olduğu koşullar için UV teknolojisi idealdir. UV iletişim sistemleri veri iletişimi, gözetleme sensör ağları, yurt güvenliği, gözetimsiz yer sensörü (Unattended Ground Sensor, UGS) ağları ve kentsel arazi ortamlarında küçük birim iletişimlerinde çeşitli uygulamalar bulabilir [7]. Ayrıca insansız hava araçları (İHA'lar) ile terminalleri arasındaki iletişim veya kimyasal ve biyolojik ajanların tespiti için de uygun bir iletişim teknolojisidir. Elbette, UV teknolojisi direk görüşü olan kanallar için de uygun bir teknolojidir.

Çok önemli bir konu olarak göz ve cilt güvenliği için Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) UV bandındaki radyasyon için belli bir güç sınırlamaları uygular [9]. Derin UV bölgesinde, minimum izin verilen UV radyasyonuna sürekli maruz kalma limiti, 270 nm dalga boyunda, 3 mJ/cm^2/sn, 200 nm'de 1 mJ/cm^2/sn ve 280 nm'de 3.4 mJ/cm^2/sn kadardır [7]. Bu sınırlar, saniye cinsinden maruz kalma süresiyle orantılı olarak azalır. Dolayısıyla UV ile ilgili iletişim sistemi tasarımı ve deneyleri bu güvenlik kurallarına uymalıdır.

NLOS-UV iletişim sistemlerindeki araştırma ilgi alanları iki türe ayrılabilir. Birincisi, analiz, deney ve simülasyon yoluyla NLOS-UV kanal özelliklerinin incelenmesidir. İkincisi, sistem alıcı-verici tasarımı ve modülasyon çalışması gibi iletişim teknolojilerinin geliştirilmesidir. Modülasyon ve alıcı-verici tasarımı, başarılı bir NLOS-UV optik iletişim sistemi için önemli unsurlar iken, iletişim kanalı, bağlantı ve sistemin performans değerlendirmesi için kritik bir bileşeni temsil eder. NLOS-UV kanalının birim dürtü yanıtından, kanalın zamana bağlı yayılımı, yol kaybı ve kanal bant genişliği dahil olmak üzere temel sistem performans parametreleri kolayca elde edilebilir ve bu parametreler sistemin tasarımı için uygun prensipler sağlar. Genel optik bağlantılarının iletişim kanalı yanıtlarını karakterize etmek için önemli miktarda çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte, NLOS optik iletişim sistemleri, atmosfer koşulları ve karmaşık bağlantı geometrileri gibi karmaşık sistem faktörleri ile dolaylı bir bağlantı yolunda çalıştığından, pratik NLOS optik iletişim bağlantılarının performans potansiyellerini elde etmek için kanal özelliklerinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılması gerekmektedir.

NLOS-UV iletişim sistemleri üzerine çalışmalar onlarca yıl önce başlamıştı ve 1960'lara kadar uzanıyor. UV bandında saçılmış bir iletişim bağlantısının karekterizasyonuna odaklanan öncü bir deneysel çalışma 1968'de yapılmıştı [10]. Bu deneyde yüksek güçte 280 nm'lik dalga boyuna sahip sürekli spektrum dalgalarını yaymak için UV kaynağı olarak bir xenon flaş tüpü kullanıldı. Foto-çoğaltıcı tüp (photomultiplier tube, PMT) tabanlı alıcı, vericiden 26 km'lik bir mesafe ile ayrılmıştı ve deneysel NLOS geometrisi gözönüne alındığında optik sinyalin NLOS yolundan kat ettiği mesafe 40 km olmuştu. Test edilen NLOS bağlantısının performansı hesaplanmıştı. Daha sonra, öncü bir analitik çalışmada, 200-300 nm'lik orta UV'de saçılmış radyasyonun zamansal özelliklerini tanımlamak için mükemmel bir teorik kanal yanıt modeli geliştirildi [1]. Çalışmadaki model, her bir fotonun verici ve alıcı konilerinin örtüşen

hacmindeki bileşenler ile tek bir etkileşime girdiği varsayımı altında bir prolat küresel koordinat sistemi üzerine inşa edilmişti. Elde edilen faz fonksiyonları ile farklı saçılma olayları tanımlanabilir. Moleküler ve aerosolden toplam saçılmanın uzun dalga boyunda baskın olduğu, kısa dalga boyunda ise emilmenin baskın olduğu gösterilmiştir. Bu model, açısal spektrumları ve yol kayıplarını incelemek için daha da genişletildi [11, 12]. Bu arada, 40 kHz modülasyon hızında izotropik yayılan cıva ark lambasına dayanan bir NLOS-UV sistemi de geliştirildi [13], ve daha sonra, 265 nm etkin dalga boyunda modülasyon oranını 400 kHz'e kadar artırmak için, ayarlanmış cıva-xenon lambasına dayalı bir kilometre aralığını kapsayan gelişmiş bir UV yerel alan ağı inşa edildi [14]. Yüksek tepe gücünde kısa darbeler yayan 266 nm'de bir UV lazer iletişim sistemi de geliştirildi [15]. Ancak, bu çalışmadaki modülasyon hızı sadece 600 Hz idi.

İlk baştaki NLOS-UV iletişim sistemleri, oldukça hantal, güç tüketen ve bant genişliği sınırlı flaş tüpü/lamba/lazer gibi UV kaynakları ile sınırlıydı. Yarı iletken UV optik kaynakları ise, düşük maliyet, küçük boyut, düşük güç, yüksek güvenilirlik ve yüksek bant genişliğine sahip kaynaklardır. En son cihaz teknolojisi, örneğin [16] ve [17]'de belirtildiği gibi minyatürleştirilmiş UV LED'lerinin kullanılmasını mümkün kılmıştır. Bu LED'ler bir milimetre kare büyüklüğündedir, derin UV bölgesinde bir dizi dalgaboyu sunar, tipik olarak 150 mW elektrik gücü tüketir ve 0.5 mW optik güç yayar. Sonuç olarak, bu yeni nesil UV kaynaklarının gelişmesi, algılama ve kısa mesafeli iletişim uygulamaları ile LED tabanlı UV sistemlerine ilişkin yeni çalışmalara ilham kaynağı oldu. Shaw ve diğerleri, [18, 19], 274 nm'de 24 elemanlı LED dizisi kullanarak 40 mW optik güç üreten deneylerini gerçekleştirdiler. Bu deneylerde yaklaşık $50°$'lik nispeten büyük bir iletim sapma açısı kullanmışlardı. Verici (TX) ve alıcı (RX) işaret açıları $90°$'ye (dikey işaret) eşit olacak şekilde ayarlanarak bir NLOS bağlantısı kurulmuştu. Alıcıda, görünür ile kızılötesi bantlarında 10^{10} genel reddetme oranını elde edebilmek için bir Perkin Elmer PMT (MP-1921) ile güneş arkaplan radyasyonundan kaynaklanan gürültüden etkilenmeyen filtreyi birleştirmişlerdi. Sistemin, 11 m'lik verici ve alıcı mesafesi için 4-PPM modülasyon kullanarak 2.4 kbps'lik bir veri hızını güvenilir bir şekilde ilettiği gösterilmiştir. UV çoklu geri saçılımına dayalı bir NLOS optik kablosuz sensör ağı [20]'de tanıtılmıştır. Bu çalışmada bistatik lidar denklem yaklaşımı kullanılarak alınan optik sinyal gücü için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model daha sonra düğümler arası bağlantının uygulanabilirliğini ve sınırlamalarını değerlendirmek ve iletişim performansını tahmin etmek için uygulandı. Onların analizleri, minyatür operasyonel sensör ağlarının tasarımı ve çalışması için değerlidir. Daha sonra, [21] ve [22]'de yeni NLOS-UV yol kaybı ve birim

dürtü tepkisi ölçüm sistemleri geliştirildi ve hem modelleme hem de sistem tasarımı için önemli saha testleri gerçekleştirildi.

Tek saçılma varsayımı altında, analitik ve izlenebilir tek saçılım kanal yol kaybı modelleri [1] ve [2]'de geliştirilmiştir. Kısa mesafeli bir dış mekan deneyi yoluyla, [23]'te deneysel bir yol kaybı modeli önerilmiş ve aynı zamanda tek saçılım kanal yol kaybı modelinin doğruluğu kısmen onaylanmıştır. Yazarlar [24] ve [25]'te, Monte Carlo yöntemine (MC) dayalı bir sayısal çoklu saçılma kanal yol kaybı modeli önermişler. Çalışmanın [26]'da doğrulanmasından sonra, bu MC tabanlı çoklu saçılma modelinin, tek saçılma kanalın yol kaybı modelinden daha doğru olduğu gösterilmiştir. Bu iki yol kaybı modelinin varsayımları altında, NLOS-UV kanal kodlaması [27]'de, modülasyon şemaları [28]'de, NLOS-UV MAC ve ağ sorunları [29], [30], ve [31]'de incelenmiş ve tartışılmıştır. Bu arada, teorik NLOS-UV iletişim sistemleri araştırmasının denenmesi ve doğrulanması için pratik iletişim sistemleri [32], ve [33]'te gerçekleştirilmiştir.

Halbuki, bu çalışmalar türbülans etkilerinin ihmal edilebilir olduğu varsayımı ile sadece kısa mesafeli iletişim senaryoları için gerçekleştirilmişti. Aslında, iletişim aralığı ve kırılma yapı parametresinin indisi arttıkça, UV-C bandındaki optik türbülans, ışınım dalgalanması (scintillation) ve ekstra sinyal zayıflamasının etkileri ile NLOS-UV iletişim sisteminin performansını kötü yönde etkileyebilir. Bu nedenle, [34]'te yazar ilk kez NLOS-UV türbülans kanalının analitik bir modelini önerdi. Yazarlar [35] ve [36]'daki makalelerinde önceki türbülans modelini geliştirdiler ve ekstra türbülans zayıflamasını hesaba kattılar. NLOS-UV türbülans kanalını karakterize eden kapalı formda olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) ilk kez [37]'de sunulmuştur. Daha sonra atmosferik türbülans'tan kaynaklanan sönümlemenin bozucu etkilerine karşı teknikler üzerinde araştırmalara başlanmıştır.

1.3. TEZİN AMACI VE KAPSAMI

UV bandındaki optik kablosuz iletişim vericileri ve alıcıları için yeni teknolojilerin geliştirilmesi, uzun mesafeli NLOS-UV bağlantılarını mümkün kılmıştır. Ancak, atmosferik türbülans'tan kaynaklanan sönümleme, uzun mesafeli NLOS-UV iletişim sistemleri için önemli bir sınırlayıcı faktördür. Uzaysal çeşitleme (spatial diversity) teknikleri, doğal fazlalıkları ile sönümlemenin bozucu etkilerini azaltmak için iyi bir alternatif yaklaşımı sağlar. Uzaysal çeşitleme teknikleri, RF ve kızılötesi iletişim sistemleri bağlamında kapsamlı bir şekilde

incelenmiştir [38, 39], ancak NLOS-UV iletişim sistemleri bağlamında henüz detaylı olarak çalışılmamıştır.

NLOS-UV haberleşme sistemleri kapsamında uzaysal çeşitleme teknikleri detaylı olarak araştırılmamış olsa da literatürde mevcut bazı çalışmalar bulunmaktadır [40 – 55]. El-Shimy ve Hranilovic [40], NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitlemeli görüntüleme alıcılarını araştırdılar. Çalışmalarında yol kaybı ve gecikme yayılımını değerlendirdiler, ancak atmosferik türbülans kaynaklı sönümlemeyi dahil etmediler. Aynı şekilde çalışmalarında sadece alıcı çeşitleme tekniği üzerinde durdular ve çok-girişli-çok-çıkışlı (MIMO) sistemlerine değinmediler. Xiao vd. [41] ilişkili sönümleme kanalları için maksimum olabilirlik uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV iletişim sistemlerinin bit hata oranı (BER) performansını araştırdılar. Ancak sadece alıcı çeşitleme tekniği üzerinde çalıştılar ve çalışmalarında BER performansı için hiçbir kapalı form ifadesi türetilmemiştir. Han vd. [42], alıcı çeşitleme teknolojisinin UV bağlantılarındaki etkilerini hem teorik hem de deneysel olarak incelediler. Çalışmalarında, yol kaybını dikkate alarak LOS-UV bağlantıları için alıcı çeşitleme tekniğinin BER performansını araştırdılar. Meng vd. tarafından yapılan çalışma [43], NLOS-UV bağlantıları için 1×4 gerçek zamanlı SIMO alıcı çeşitleme üzerine deneysel bir çalışmadır. Atış gürültüsüyle sınırlı MIMO FSO/UV bağlantıları için alıcı tasarım teknikleri [44]'te geliştirilmiştir. Arya ve Chung [45], türbülanslı atmosferik kanallarda NLOS-UV iletişim sistemleri için alıcı çeşitleme tekniğini önerdiler. Çalışmalarında, ilişkili Gamma-Gamma dağıtılmış kanallar üzerinden alıcı çeşitleme tekniğini değerlendirdiler ve tek-girişli-çok-çıkışlı (SIMO) sistemlerin kesinti olasılığını ve sembol hata oranını araştırdılar. Bu çalışmada çok-girişli-tek-çıkışlı (MISO) ve MIMO sistemlerinin performansına ilişkin herhangi bir katkı bulunmamaktadır. Wang vd. [46], alıcı tarafı sinyal tespitinin ayrık zamanlı bir Poisson kanal modeline dayalı olduğu bir NLOS-UV saçılma iletişim sistemini tasarladılar. Bu çalışma, atmosferik türbülansın göz ardı edildiği, alıcı çeşitleme tekniği üzerine deneysel bir araştırmadır. Bu çalışmada herhangi bir analitik ifade türetilmemiştir ve ayrıca MISO ve MIMO sistemlerine ilişkin herhangi bir katkı yoktur. Qin vd. [47], saçılmış UV kanalının neden olduğu veri hızı tıkanıklığının üstesinden gelmek için uzaysal çoklayıcı eş düzlemli olmayan MIMO UV sistemi mimarisini geometrik olarak tasarladılar. Onlar çalışmalarında sadece saçılma etkilerini dikkate aldılar, ancak atmosferik türbülansı görmezden geldiler. Bu çalışmada uzaysal çeşitleme tekniği ve analitik türevleri incelenmemiştir. Xing vd. yaptığı çalışma [48], UV iletişim sistemleri için 2×2 MIMO şemasının deneysel bir çalışmasıdır. NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme

teknikleri geniş bir şekilde [49]'da çalışılmıştır. Ancak, [49]'de ele alınan sistem konfigürasyonu, kanalların birbirinin aynı olmamasına neden olur, bu da uzaysal çeşitleme tekniklerinin istenen performansını sağlamaz ve ayrıca çalışmada ana sistem olan MIMO NLOS-UV sistemleri için kapalı form BER ifadesi türetilmemiştir. Aynı şekilde bu çalışmada, NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme tekniklerinin ilişkili kanallar üzerindeki performansı hakkında her hangi bir katkı bulunmamaktadır. Gong vd. türbülans altında NLOS SIMO optik kablosuz saçılma iletişim kanallarının korelasyon ve kesinti olasılığını araştırdılar [50]. Bu çalışmada SIMO sistemlerinin kapasite ve kesinti analizi değerlendirilmekle birlikte MISO ve MIMO sistemleri için bir katkı bulunmamaktadır. Li vd. uzaysal korelasyonlu UV MIMO sistemleri için segmentli korelasyona dayalı bir kanal modeli önerdiler ve uzaysal korelasyonlu UV MIMO sistemlerinin kanal kapasitesini araştırdılar [51]. Yazarlar, yükseklik açısı, türbülans katsayıları ve iletim mesafesi gibi çeşitli parametrelerin uzaysal korelasyon ve kanal kapasitesi üzerindeki etkisini incelediler. Ancak bu çalışmada yazarlar, NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme tekniklerinin performans analizini dikkate almadılar. Tek verici ve çok alıcı optik kablosuz saçılma iletişim sistemleri için doğrusal minimum ortalama kare hatası alıcıları [52]'da incelenmiştir. Bu çalışmada yazarlar sadece SIMO durumunu değerlendirdiler ve MISO ve MIMO sistemleri ile ilgili herhangi bir katkıları yoktur. MIMO ultraviyole çeşitlemeli sistemi için alt taşıyıcı modülasyonlu bir uzay-zaman blok kodu (STBC) tabanlı şema [53]'te incelenmiştir. Bu çalışmadaki yazarlar, bahsedilen sistemlerin bit-hata oranı için simülasyon ve deneysel sonuç vermişlerdir ve bu çalışmada teorik bir araştırma bulunmamaktadır. SIMO optik kablosuz saçılma kanalları için korelasyon çalışması [54]'te incelenmiştir. Bu çalışmada yazarlar, hem teorik hem de sayısal analize dayalı olarak NLOS-UV bağlantılarının SIMO kazanç korelasyonunu değerlendirdiler. Yazarlar, SIMO bağlantıları için bağlantı korelasyonunu incelediler ancak MISO ve MIMO sistemleri için bağlantı korelasyon araştırmalarını göz ardı ettiler. Ayrıca, ilişkili sönümleme kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantılarının performans ve çeşitleme kazancı analizi bu çalışmaya dahil edilmemiştir. Yazarlar [55]'te, dağınık yayılım MIMO NLOS-UV kanal modeli için bir çerçeve geliştirdiler. Bu çalışmada yazarlar, uzaysal korelasyon özelliklerini ve kapasite davranışını geometrik tabanlı bir perspektiften tanıttılar. Ancak, atmosferik kanallar üzerinden MIMO NLOS-UV sistemlerinin performans ve çeşitleme kazancı analizi bu çalışmaya dahil edilmemiştir.

NLOS-UV iletişim sistemlerinin teknolojilerinin incelenmesi konusunda önemli faaliyetler olmasına rağmen, bu teknolojileri kullanan iletişim sistemleri tasarımı üzerinde nispeten az çalışma yapılmıştır. Bu tez, uzaysal çeşitleme teknikleriyle noktadan noktaya iletişim için bir sistem tasarlamaya odaklanmaktadır. Burada incelenen durum, türbülans kaynaklı sönümleme ve yol kaybının etkisinin dikkate alınması gereken orta ila uzun bağlantı mesafeleri içindir.

Bu tezde, atmosferik türbülans kaynaklı sönümleme varlığında NLOS-UV haberleşme sistemleri için uzaysal çeşitleme teknikleri incelenmiştir. Çalışma özellikle aşağıdaki konulara odaklanmaktadır:

(i) İlişkisiz atmosferik türbülans kanalları durumunda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının BER performans analizi,
(ii) İlişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının BER performans analizi,
(iii) İlişkisiz atmosferik türbülans kanalları durumunda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı analizi,
(iv) İlişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı analizi,
(v) Hem ilişkisiz hem de ilişkili atmosferik türbülans kaynaklı sönümlemeli kanallar durumunda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının çeşitleme kazancı analizi,
(vi) NLOS-UV iletişim sistemleri için verici ve/veya alıcı anten seçme teknikleri.

İlk olarak, ilişkisiz atmosferik türbülans kanallarda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV iletişim sistemlerinin BER performans analizi incelendi. Özellikle, (i) verici çeşitleme tekniği olarak adlandırılan Çok-Girişli-Tek-Çıkışlı (Multiple-Input-Single-Output, MISO) sistemlerin, (ii) alıcı çeşitleme tekniği olarak adlandırılan Tek-Girişli-Çok-Çıkışlı (Single-Input-Multiple-Output, SIMO) sistemlerin, ve (iii) Çok-Girişli-Çok-Çıkışlı (Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO) NLOS-UV iletişim sistemlerinin BER başarım analizleri dikkate alındı. Uzaysal çeşitleme tekniklerinin NLOS-UV iletişim sistemlerinde sönümlemenin bozucu etkisini azaltma gücünü göstermek için bahsedilen tekniklerin BER başarım analizleri yapıldı. Tüm sistemlerin bit hata oranları için kapalı form BER ifadeleri türetildi ve farklı sistem konfigürasyonları için BER başarım analizleri incelendi. Bahsedilen sistemlerin bit hata oranları için elde edilen teorik ifadelerin doğruluğu sayısal simülasyonlarla doğrulandı. Sayısal simülasyonlarda, alıcı çeşitleme durumu için eşit kazanç birleştirme (Equal Gain Combining,

EGC), maksimum oran birleştirme (Maximum Ratio Combining, MRC) ve seçim birleştirme (Selection Combining, SelC) dahil olmak üzere farklı birleştirme yöntemleri dikkate alındı. Tüm tekniklerin BER başarımları elde edildi ve aralarında karşılaştırmalar yapıldı. Bu çalışmanın sonuçları, uzaysal çeşitleme tekniklerinin tek-girişli-tek-çıkışlı (Single-Input-Single-Output, SISO) durumuna göre önemli performans iyileştirmeleri olduğunu göstermektedir. Bunun yanında uzaysal korelasyonun etkisi de araştırıldı ve ilişkili sönümlemeli kanallarda MISO, SIMO ve MIMO NLOS-UV bağlantılarının BER başarım analizleri yapıldı. Böylece sönümlemeli yollar arasındaki uzaysal korelasyonun performansı önemli ölçüde düşürdüğü ve ilişkisiz sönümleme yolları durumunda maksimum çeşitleme kazancının elde edilebildiği gösterildi.

İkinci olarak, hem ilişkisiz hem de ilişkili atmosferik türbülans kaynaklı sönümleme durumlarında MISO, SIMO ve MIMO sistemlerinin kesinti olasılıklarının analizi araştırıldı. Atmosferik türbülans, kanal tutarlılık süresinin neredeyse 1–100 ms olduğu optik kablosuz iletişimde çok yavaş değişen bir sönümlemeye neden olduğundan, tipik iletim hızları için, sönümleme milyonlarca ardışık bit üzerinde sabit kalır [56]. Bu tür yarı-statik kanallar için, sönümlemenin neden olduğu hatalar artık bağımsız değildir. Bu nedenle, kesinti olasılığı, sistem başarımını değerlendirmek için uygun bir ölçüdür. Bu çalışma kapsamında MISO, SIMO ve MIMO NLOS-UV sistemleri için kapalı form kesinti olasılığı ifadeleri türetildi ve kapsamlı simülasyon çalışmaları ile elde edilen teorik ifadeler doğrulandı.

Üçüncü olarak, ilgili optik yolun sinyal gürültü oranını maksimize etmek için N verici ve/veya M alıcı antenler arasından tek bir verici ve/veya alıcı antenin seçildiği atmosferik türbülans kanallarda MIMO NLOS-UV bağlantıları için anten seçim çeşitleme teknikleri araştırıldı. Özellikle, verici anten seçimi (Transmit Aperture Selection, TAS), alıcı anten seçimi (Receive Aperture Selection, RAS), ve verici ve alıcı antenlerin birlikte seçimi (joint Transmit and Receive Aperture Selection, TRAS) teknikleri dikkate alındı. Söz konusu tekniklerin başarımlarını değerlendirmek için kesinti olasılığı metriği kullanıldı. Söz konusu sistemlerin kesinti olasılıkları için kapalı form ifadeleri elde edildi. Elde edilen teorik ifadelerin doğruluğunu teyit etmek için kapsamlı simülasyon çalışmaları sunuldu.

Son olarak, önerilen tüm tekniklerin çeşitleme kazançalrının analizleri yapıldı. Hem ilişkisiz hem de ilişkili atmosferik türbülanstan kaynaklanan sönümleme durumlarında MIMO NLOS-

UV sistemlerinin ve anten seçim çeşitleme tekniklerinin göreceli çeşitleme kazancı ve asimptotik göreceli çeşitleme kazancı için kapalı form ifadeleri elde edildi.

Elde edilen sonuçlar, uzaysal çeşitleme tekniklerinin sönümlemenin bozucu etkilerini azaltan güçlü teknikler olduğunu ve SISO sistemlere göre orta ve uzun mesafeli NLOS-UV iletişim sistemleri için önemli performans iyileştirmeleri sağladığını göstermektedir. Bu tez çalışmasının neticesinde, dış mekan orta ve uzun mesafeli NLOS-UV iletişim sistemleri için, uzaysal çeşitleme tekniklerinin güvenilir bir iletişim bağlantısı sağlamak için kaçınılmaz olduğu sonucuna varılmıştır.

1.4. TEZİN YAPISI

Bu tezin genel amacı, NLOS-UV iletişim sistemlerinin temel tasarımı için kapsamlı bir çalışma sunmaktır. Sistem bir verici, bir alıcı ve bunları birbirine bağlayan fiziksel ortamdan oluşmaktadır. Tezin yapısı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir:

Bölüm 2'de, NLOS-UV iletişim sistemlerinin temelleri hakkında ayrıntılı açıklamalar verilmektedir. Atmosferik ortamda yayılan ve emilim katsayısı, saçılma katsayısı ve saçılma faz fonksiyonu ile belirlenen ışığın etkileşim özelliklerini içeren NLOS-UV bağlantı özellikleri araştırılmaktadır. Verici ve alıcılarda kullanılan UV cihaz teknolojileri gözden geçirilmiştir. Cihaz bileşenleri, bir LED kaynağı, bir tek foton detektörü, filtre ve lens'ten oluşmaktadır. Her bileşen, halihazırda geliştirilmiş olan cihazların seçilmiş örneklerinin teknik özellikleriyle ilişkilidir.

Atmosferik saçılma özellikleri tanımlandıktan sonra, bir fotonun atmosferik saçılma ortamı boyunca vericiden alıcıya yayılma yolu, tek-saçılma varsayımı altında verilmiştir. Çoklu yol NLOS bağlantısının analitik bir zamansal yanıtı, atmosferik özelliklerin ve geometrik bağın bir fonksiyonu olarak prolat küresel koordinatlar açısından açıklanmıştır. Tek-saçılma modeli varsayımı altında bir yol kaybı kanal modeli sağlanmıştır. Atmosferik türbülans kanal modeli, hem sönümleme hem de yol kaybı etkileri dikkate alınarak sunulmuştur. NLOS-UV bağlantıları için ve bu tez sırasında kullanılan yaygın modülasyon şemaları bu bölümün sonunda kısaca açıklanmıştır.

Bölüm 3'te, NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme teknikleri incelenmiştir. Uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının bit hata oranı başarımı, kesinti olasılığı ve

çeşitleme kazancı analizleri hem ilişkili hem de ilişkisiz atmosferik türbülans kanallarda gerçekleştirilmiştir. Bölüm sonunda, NLOS-UV iletişim sistemleri için anten seçim çeşitleme teknikleri araştırılmıştır.

Bölüm 4'te, bir önceki bölümde elde edilen teorik ifadelerin doğruluğunu göstermek ve uzay çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının performans gelişimini vurgulamak için önerilen uzaysal çeşitleme teknikleri için kapsamlı simülasyon sonuçları sunulmuştur.

Son olarak, tezin sonuçları ve gelecekteki çalışmalar için yönlendirmeler Bölüm 6'da vurgulanmaktadır.

2. GENEL KISIMLAR

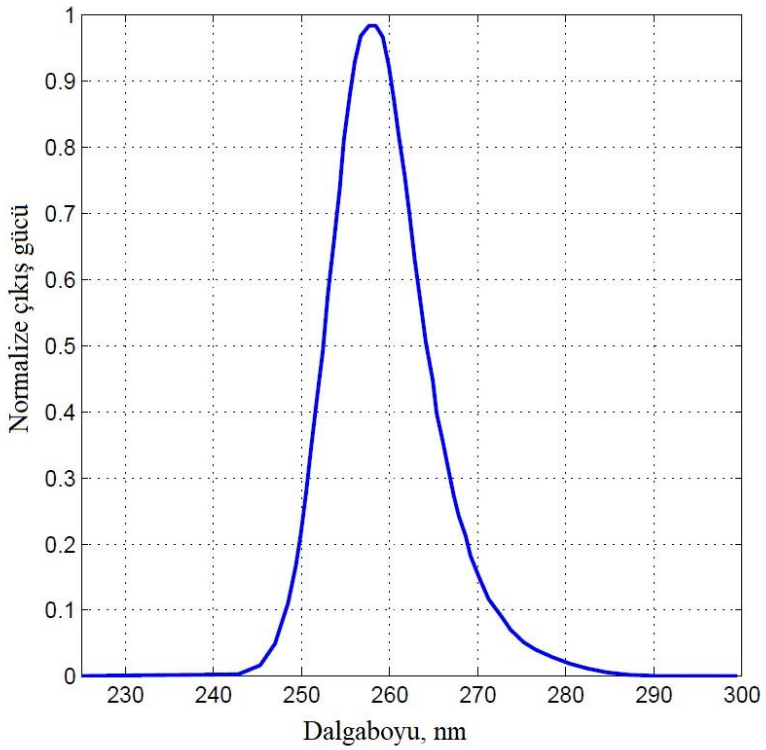
UV iletişim sistemleri hem ticari hem de askeri uygulamalar için uygun bir teknolojidir. Güneş körlüğü özelliği nedeniyle, UV sistemleri hem doğal hem de yapay elektromanyetik girişimlere karşı bağışıktır. Güçlü saçılmalar, uzaysal gölgeleme ve engelleme etkilerine karşı koymada NLOS iletişimini daha da güçlü kılar. UV alıcı-vericileri ayrıca algılanmaktan ve gizlice dinlenmekten gizlenebilme özelliğine de sahiptir.

2.1. NLOS-UV İLETİŞİM SİSTEMLERİNİN TEMELLERİ

UV iletişim sistemleri; UV kaynakları, atmosfer kanalı ve UV dedektörlerinden oluşmaktadır. Veri sinyalleri kodlanır ve UV taşıyıcılarına modüle edilir ve UV kaynakları, modüle edilmiş UV sinyallerini atmosfere yayar. UV sinyalleri moleküler ve partiküller saçılıma ve emilime uğrayacaktır. UV sinyallerinin çoğu atmosfer tarafından dağıtılıp emilecek olsa da, yeterli saçılma UV sinyallerini bir UV detektörünün görüş alanına getirecektir. Sinyal-gürültü oranını iyileştirmek için bant dışı arka plan gürültüsünü bastırmak için alıcıda UV filtreleri kullanılmaktadır. Alınan sinyal daha sonra iletişim sistemindeki verici ve alıcı arasındaki bilgi alışverişini tamamlamak için elektrik sinyaline geri dönüştürülmektedir.

2.1.1. UV Kaynakları

Yarıiletken Ultraviyole Optik Kaynak (SUVOS) programı adı verilen araştırma programı altında Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) aracılığıyla SB-UV LED'lerin geliştirilmesinde önemli faaliyetler olmuştur [57]. Projenin amacı, gizli NLOS iletişim sistemleri için derin UV bandında güvenilir ve verimli yarı iletken alıcı-vericiler üretmekti. SUVOS programına katılmaları için DARPA tarafından çeşitli şirketler ve araştırma grupları desteklenmiştir. Katılımcı şirketler arasında UVTOP LED'ler adlı bir seri satan Sensor Electronic Technology, Inc. (SETi) şirketi [58] ve piyasaya sürülen ürünleri TO-39 ve yüzeye monte LED'ler ile Crystal IS üreticisi [59] bulunmaktadır. AlGaN malzemelerine dayanan geliştirilmiş LED'ler, 365 nm'den daha kısa dalga boyları için derin UV'de tepe emisyonu ile karakterize edilir ve 120 dereceye kadar görüş açıları ile mevcuttur. Optik yayılan gücü mW aralığında olup yüzeye monte edilmiş LED'ler için 20 mW'ın üzerinde bir güç bildirilmiştir [57].



Şekil 2.1: UVTOP255 derin UV LED'in spektral karakteristiği [57].

Bir dizi LED kullanılarak daha yüksek bir güç elde edilebilir. Örnek olarak, Şekil 2.1 ticari UVTOP255 LED'in spektral karakteristiğini göstermektedir; burada tepe dalga boyu tipik olarak 260 ± 5 nm ve tam genişliği yarı maksimumda yaklaşık 12 nm'dir [57].

Uygulamada, SB-UV LED'lerin radyasyon güvenliği dikkate alınmalıdır. Ortalama yayılan güce bağlı olarak LED kaynaklarından güvenli bir mesafe analiz edilmelidir. UV kaynaklarından yayılan maksimum güç limitleri, Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından düzenlenmiştir [60].

2.1.2. UV Dedektör Teknolojileri

SB-UV bölgesinde çalışan ve bant dışı güneş ışınımını reddeden bir optik detektör, saçılan ışığı algılamak için gereklidir.

2.1.2.1. Tek-Foton Dedektörü

Bir ışığı tek-foton seviyesinde algılamak için iki ana algılama cihazı teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır: foto-elektrik emisyon sürecine dayalı foto-çoğaltıcı tüp (Photomultiplier Tube, PMT) ve foto-iletkenlik sürecine dayalı tek-fotonlu çığ ışık diyodu (Single-Photon Avalanche Photodiode, SPAD). Her iki cihaz için temel ilkeler ve tipik örnekler aşağıda belirtilmiştir. Bu bölümün sonunda bu iki cihazın özellikleri arasında bir karşılaştırma yapılmaktadır.

a. Foto-Çoğaltıcı Tüp (PMT)

PMT, bir foto katot (negatif yüklü elektrot), bir dizi dinot aşaması (elektron çarpan elektrotları) ve bir anot (pozitif yüklü elektrot) içeren bir vakum tüpüdür. Foto katot üzerinde bir foton çarptığında, fotoelektrik emisyon etkisiyle bir fotoelektron açığa çıkar ve anoda doğru hareket eder. Katottan anoda giden yolda, ardışık olarak daha yüksek potansiyelde bir dizi dinot düzenlenir. Böylece, fotoelektron, uygulanan yüksek voltaj ile hızlandırılır ve ikincil bir emisyon etkisine bağlı olarak, art arda yeterli enerjiyle dinot aşamalarına çarpar. Sonuç olarak, yeterince büyük bir elektron darbesi üretilir ve anotta toplanır. Son olarak, darbeyi sayısallaştırmak için bir ayrım devresi uygulanır.

PMT'ler ticari olarak farklı şirketlerden temin edilebilir. NLOS-UV iletişiminde, deneysel ve teorik çalışmalarda esas olarak iki çok uluslu şirketin ürettiği PMT'ler kullanılmaktadır: Hamamatsu Photonics K. K. ve PerkinElmer, Inc [57]. SB-UV bölgesinde, PMT'ler 160 nm ile 320 nm arasında spektral yanıtlı bir sezyum tellürid (Cs-Te) foto katodu kullanmaktadır. PerkinElmer'in SB-UV PMT'leri, 15 mm'ye kadar çapa sahip geniş bir aktif alana, 10 cps'den fazla olmayan oldukça düşük bir DCR'ye, 200 nm dalga boyunda yaklaşık %15'lik bir tepe kuantum verimliliğine ve birkaç ns'lik bir çözünürlük süresine sahiptir. Cihazla birlikte verilen güç kaynağının tipik voltajı 2000 V'tur [57]. Ayrıca, Hamamatsu'nun PMT'leri de benzer özellikler sunar, ancak 25 mm çapında nispeten daha büyük etkili alana, 254 nm'de yaklaşık %30 daha yüksek kuantum verimliliğine ve 20 cps'ye kadar daha büyük DCR'ye sahiptir [57]. PerkinElmer MP1922 ve Hamamatsu R7154 ürünlerinin performans özellikleri arasında karşılaştırmalı bir çalışma [8]'de yapılmıştır.

b. Tek-Fotonlu Çığ Dedektörü (SPAD)

Geiger-mode APD olarak bilinen SPAD, tek bir fotonu algılayabilecek şekilde yüksek bir voltaja ters yönde eğimli bir çığ yarı iletken foto-diyot cihazıdır. Dedektör yüzeyine tek bir foton çarparsa, emilme olasılığı vardır ve tek bir fotonun gelişini ayırt eden büyük bir akım darbesiyle bir elektron çığı üretir. Alınan her bir fotonun kaydedilmesinden sonra, cihazın alınan herhangi bir yeni fotona karşı kör olduğu bir ölü zamanı vardır. Böylelikle, cihazı bir sonraki varış fotonun tespiti için sıfırlamak amacıyla çığ darbesine bir söndürme devresi uygulanır. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek için, cihaz küçük bir aktif alana, yani karanlık akımını da azaltan düşük kapasitansa sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır [57].

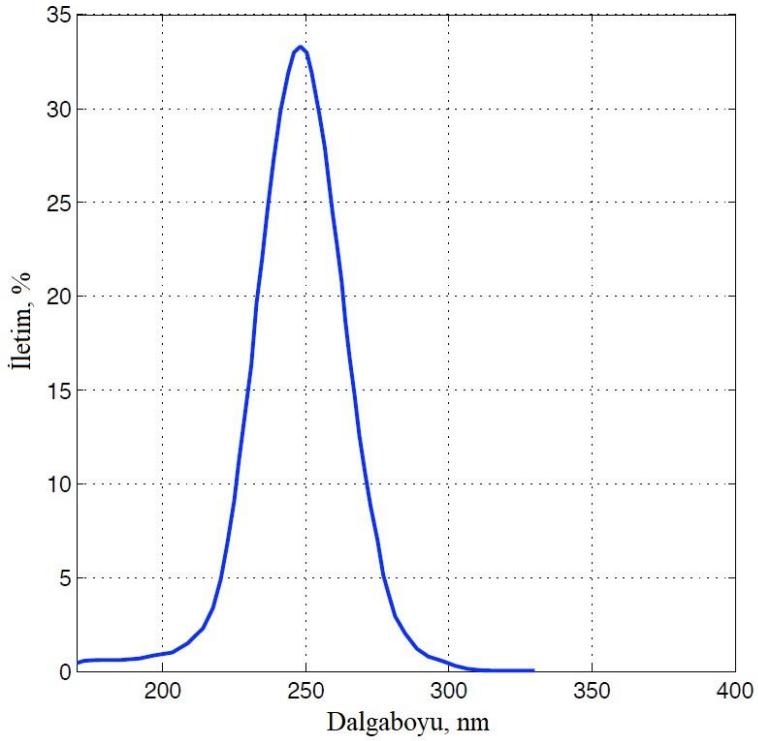
SB-UV bölgesinde, silisyum karbür (SiC) malzemesinden imal edilen ve kabul edilebilir düşük DCR ve yüksek SPDE ile verimli bir şekilde çalıştırılabilen güvenilir yarı iletken SPAD cihazlarını geliştirmek için yakın zamanda aktif araştırmalar yapılmıştır [61, 62]. DARPA Deep UV Avalanche Photodiode (DUVAP) programı altında [63]'te iyi bir cihaz performansı elde edilmiş ve rapor edilmiştir.

2.1.2.2. Performans Karşılaştırması

Yukarıda belirtildiği gibi, Cs-Te PMT'ler ve SiC SPAD iki farklı benzersiz özelliğe sahiptirler. Aralarındaki seçim, uygulamanın türüne bağlıdır.

PMT'ler düşük bir DCR ve geniş bir algılama alanı sunar, ancak düşük SPDE, yüksek ön voltaj, maliyetli ve hacimli boyut ile karakterize edilmektedirler. PMT'ler, çok zayıf bir ışık seviyesini yakalamak için son derece düşük gürültü ile birlikte geniş bir algılama alanı gerektiren algılama tipi uygulamalar için uygundur. Aksine, SiC SPAD'ler nispeten yüksek SPDE, düşük ön voltaj, düşük fiyat ve küçük boyuta sahiptir, ancak yüksek DCR ve küçük algılama alanına sahiptirler. Tek bir SPAD cihazı küçük bir aktif alana sahip olmasına rağmen, görüntüleme tipi uygulamalar için ideal olan toplam DCR'yi artırma pahasına birçok dedektör dizisine entegre edilebilmektedir [64].

NLOS-UV iletişim sistemleri için, PMT'ler tek foton tespiti için tercih edilen ticari cihazlar olmuştur. Yine de, bir kez ticarileştirildiğinde, yeni geliştirilen SiC SPAD alıcısı, performans geliştirme açısından çeşitli NLOS-UV uygulamalarında geleneksel Cs-Te PMT alıcısının yerini



Şekil 2.2: Princeton Instruments 254 nm filtre iletimi ile dalga boyu karşılaştırması [57].

alabilir. Kablosuz sensör ağlarında çoklu erişim girişimini azaltmak ve uzun bağlantı aralığında türbülansın etkisini azaltmak için kullanılabilecektir [30, 34, 65, 66].

2.1.3. Filtre Teknolojisi

Bant dışı arka plan radyasyon gürültüsünü maksimum düzeyde bastırmak için, sadece SB-UV bandındaki radyasyonun iletilmesine izin veren dedektör ile birleştirilmesi gereken bir filtre gerekmektedir. Bir filtre, dedektör ile harici veya dahili olarak donatılabilir. Harici bir SB-UV filtresi için, Ofil Ltd. Şirketi tarafından SB-UV dalga boylarında ortalanmış ticari dar bant-geçiren filtreler geliştirilmiş ve üretilmiştir [57]. Bu filtreler, %10'dan fazla bant içi geçirgenlik zirvesi, yaklaşık 15 nm'lik bir FWHM bant genişliği ve 280 nm'den daha uzun dalga boyları için oldukça bant dışı red özellikleri ile karakterize edilmektedirler [57]. Ticari SB-UV filtrelerinin başka bir örneği Princeton Instruments tarafından sağlanmaktadır [57]. Bu filtreler, 20 nm ila 40 nm arasında değişen farklı bant genişliklerinde mevcuttur. Veri sayfalarından bir örnek olarak, Şekil 2.2, %30'dan fazla bir geçirgenlik tepe noktası, 40 nm nominal FWHM ve 300 nm civarında kesme bantgenişliği olan 254 nm'lik bir filtrenin iletim spektral

karakteristiğini göstermektedir [57]. Filtrenin dedektörle birleştirilmesinin bant dışı radyasyonun reddini artırmasına rağmen, genel bant içi iletim verimliliğinin de azalmasına sebep olduğuna dikkat edilmelidir.

2.1.4. Lens Teknolojisi

Alıcı sisteminin ön ucuna, hizalanmış alınan ışığı dedektörün boyutuna odaklayabilen bir lens takılabilir. Lens, hem dedektörün etkili toplama alanını genişletmek için bir giriş alıcı açıklığı hem de farklı açılardan gelen sinyalleri dedektör yüzeyindeki ayrılmış konumlara eşlemek için bir görüntüleme optik elemanı olarak işlev görebilir. Bu görüntüleme tekniği, alıcı görüş alanı içinde saçılan ışığın çok sayıda dedektör elemanı üzerinde görüntülenmesi için bir dizi dedektörün eklenmesine izin verir. Bu nedenle, bir lensin alıcı sistemine entegrasyonu, bir sonraki bölüm'de görüleceği gibi NLOS bağlantı performansını önemli ölçüde geliştirme olasılığını sağlar. Böylece, bir açıklık olarak, dedektör gürültüsünü artırmadan daha fazla alınan sinyal toplanabilir. Bir görüntüleme öğesi olarak, optimum demodülasyon için açı çeşitleme teknikleri uygulanabilir.

Lensler tipik olarak ışığı kıran şeffaf optik materyallerden yapılmaktadır. SB bandı da dahil olmak üzere UV bölgesinde, lensler, UV dereceli erimiş silika gibi yüksek bir UV iletimi sunan çeşitli özel optik malzemelerden imal edilebilirler. 7.6 cm'ye kadar çaplarda UV dalga boyunda çalışan ve farklı odak uzunlukları ile tasarlanmış ticari lens ailesi birkaç şirketten temin edilebilir [57].

2.1.5. UV Atmosfer Kanalı

2.1.5.1. İletişim Aracı: Atmosfer

Atmosfer, gazlar, su buharı, kirleticiler ve diğer kimyasal parçacıklar gibi karmaşık bir molekül ve aerosol bileşimi olarak görülebilir. Bu atmosferik parçacıklar, bir yayıcı tarafından üretilen radyasyon alanları ile etkileşime girer ve sinyal gücü kayıplarına ve dalga biçiminin bozulmasına neden olur. Bu etkileşimler genellikle saçılma ve emilme olarak sınıflandırılır. Foton yayılımı açısından saçılma, yayılma açısının yeniden yönlendirilmesi anlamına gelirken, emilme, fotonun yok olduğu anlamına gelir. Atmosferik etkileşimin büyüklüğü, meteorolojik koşullara göre önemli ölçüde değişir, genellikle optik dalga boyu atmosferik parçacıkların enine kesit boyutuna yaklaştıkça etkileşim daha güçlü hale gelir (bu, UV spektrumunda gözlemlenen

güçlü saçılmayı açıklamaktadır). Saçılma, genellikle dalga boyu ve parçacık boyutunun bir fonksiyonu olarak Rayleigh ve Mie teorisi ile modellenir [65]. Bunların her ikisi de aşağıda açıklanan modellere dahil edilmiştir. Saçılma, NLOS iletişimini mümkün kılar, ancak fotonların büyük çoğunluğu ya emilmeye uğrar ya da amaçlanan dedektörden uzağa dağılır ve bu da büyük yol kaybına neden olur.

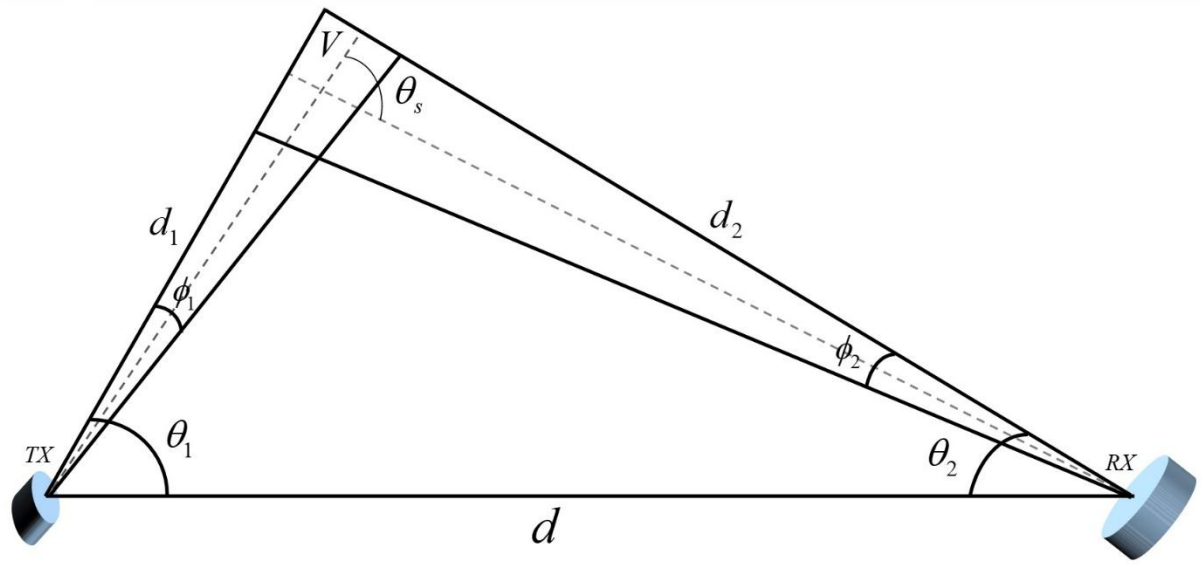
Atmosferdeki rastgele homojensizliklerden kaynaklanan atmosferik türbülans, optik dalga cephesinde bozulmaya neden olan kırılma indisinde yerel değişikliklere neden olacaktır [34]. Bu etki, dedektöre gelen bozulmuş bir dalga biçiminin iletişim hızlarını veya alınan sinyal kalitesini sınırlayabildiği direk görüşü olan (LOS) lazer iletişim sistemlerinde iyi bilinmektedir. Burada ilk olarak kısa mesafeli NLOS-UV iletişim sistemlerini ele alıyoruz. Ardından, NLOS-UV bağlantıları için türbülans analizi üzerinde duracağız. Birincil alandan kaybedilen enerjinin, birincil ile aynı dalga boyuna sahip bir dağılım alanına yeniden dağıtıldığı tutarlı saçılımı varsayacağız. Emilme, "absorbe edilen" enerjinin toplam radyasyon alanına (birincil ve tutarlı olarak saçılmış radyasyon) kaybolduğu diğer tüm etkileşimleri dikkate alır.

2.1.5.2. NLOS-UV Saçılma Kanalı

NLOS-UV kanalı, hem moleküler saçılma ve emilmeyi hem de aerosol saçılma ve emilmeyi içermektedir. NLOS-UV iletişim sistemleri için, saçılma, verici ve alıcı arasında bilgi alışverişi için bir araç görevi görmektedir. Alıcıya ulaşan saçılmış ışık, aşağıda anlatıldığı gibi, bağlantı geometrisine ve atmosferin optik özelliklerine bağlıdır.

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi [2] ve [11] ile gösterilen tipik bir NLOS iletişim geometrisini varsayalım. Şekil 2.3'teki geometride verici (TX) ışını tam genişlikte sapma açısı ϕ_1 ile, alıcı (RX) görüş alanı (Field of View, FOV) açısı ϕ_2 ile, TX tepe açısı θ_1 ile, RX tepe açısı θ_2 ile, TX ve RX taban çizgisi ayrımı d ile ve TX ve RX ile ortak hacim (V) arasındaki mesafe sırasıyla d_1 ve d_2 ile gösterilmektedir.

İletişim açısından, saçılma ve emilme, kısa bir iletişim aralığında atmosferle iki baskın foton etkileşimi türüdür. Homojen bir atmosfer varsayımı ile aşağıdaki katsayıları kullanıyoruz: Rayleigh (moleküler) saçılma katsayısı k_s^{Ray}, Mie (aerosol) saçılma katsayısı k_s^{Mie}, emilme katsayısı k_a ve sönme katsayısı k_e [2]. Toplam saçılma katsayısı, iki saçılma katsayısının top-



Şekil 2.3: Yükseltilmiş verici ışını ve alıcı görüş alanını gösteren NLOS-UV iletişim bağlantı geometrisi.

Tablo 2.1: Atmosferin model parametreleri: 230 – 310 nm.

λ (nm)	$k_s^{Ray}(\text{km}^{-1})$	$k_s^{Mie}(\text{km}^{-1})$	$k_a(\text{km}^{-1})$
230	0.493	0.623	2.581
240	0.406	0.531	1.731
250	0.338	0.421	1.202
260	0.266	0.284	0.802
270	0.241	0.277	0.621
280	0.194	0.272	0.322
290	0.177	0.266	0.046
300	0.145	0.261	0.039
310	0.132	0.234	0.005

lamı $k_s = k_s^{Ray} + k_s^{Mie}$ olarak tanımlanır ve sönme katsayısı, saçılma ve emilme katsayılarının toplamı olarak $k_e = k_s + k_a$ şeklinde verilmektedir [2]. Orta UV radyasyonu için atmosferin optik özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir [67].

Saçılma faz fonksiyonu, [68]'de önerildiği gibi karşılık gelen saçılma katsayılarına dayanan Rayleigh ve Mie saçılma faz fonksiyonlarının bir kombinasyonu olarak modellenmiştir.

$$p(\mu) = \frac{k_s^{Ray}}{k_s} p^{Ray}(\mu) + \frac{k_s^{Mie}}{k_s} p^{Mie}(\mu) \tag{2.1}$$

Burada, $\mu = \cos(\theta_s)$, θ_s saçılma açısı ile tanımlanır. Her iki faz fonksiyonu, sırasıyla genelleştirilmiş Rayleigh modelini ve genelleştirilmiş Henyey-Greenstein fonksiyonunu takip eder ve aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$p^{Ray}(\mu) = \frac{3[1+3q+(1-q)\mu^2]}{16\pi(1+2q)} \tag{2.2}$$

$$p^{Mie}(\mu) = \frac{1-g^2}{4\pi}\left[\frac{1}{(1+g^2-2g\mu)^{3/2}} + f\,\frac{0.5(3\mu^2-1)}{(1+g^2)^{3/2}}\right] \tag{2.3}$$

Burada, q, g ve f model parametreleridir.

2.1.5.3. Haberleşme Kanal Modelleri

İletişim sistemlerinde, bir iletişim kanalı ya fiber optik gibi bir fiziksel iletim ortamına ya da radyo kanalı gibi çok yollu bir ortam üzerinden bir mantıksal bağlantıya denir. Geleneksel olarak, bilgi bir vericiden bir alıcıya bir kanal aracılığıyla iletilir. İletişim teorisi ve sinyal işlemenin ilerlemesiyle, çok sayıda verici ve alıcı arasında bilgi aktarımı modern iletişim sistemlerinde gerçekleşmektedir. İletişim sistemleri noktasında, kanal, verici ve alıcı arasındaki bilgi alışverişinde önemli bir rol oynamaktadır. Şimdiye kadar çok sayıda kanal modelleme çalışması yapılmıştır. Genel olarak, araştırmacılar iki önemli konuya odaklanırlar: kanal dürtü yanıtı ve kanal yol kaybı.

Bir iletişim kanalı, sinyali bozabilen, zamansal ve uzaysal değişen bir filtre görevi görmektedir. Bir kanalın dürtü yanıtı, bir dürtü giriş sinyaline yanıt olarak bir iletişim kanalının tepkisini gösterir. Bir kanalın yol kaybı, kanal boyunca ilerledikçe iletilen bir sinyalin güç seviyesindeki azalmayı göstermektedir. Yansımalardan kaynaklanan çok yollu yayılma gecikmesi, doppler etkileri ve gecikme yolları için seyahat süresi dahil olmak üzere, bir iletişim kanalı boyunca sinyal yayılmasının etkilerini araştırmak için bir kanal dürtü yanıtı kullanılabilir. Ayrıca, yol

kaybı, bir kanal dürtü yanıtına göre kolayca hesaplanabilmektedir. Yol kaybının kendisi, bir iletişim sisteminin bağlantı bütçesinin analizinde ve tasarımında önemli bir bileşendir.

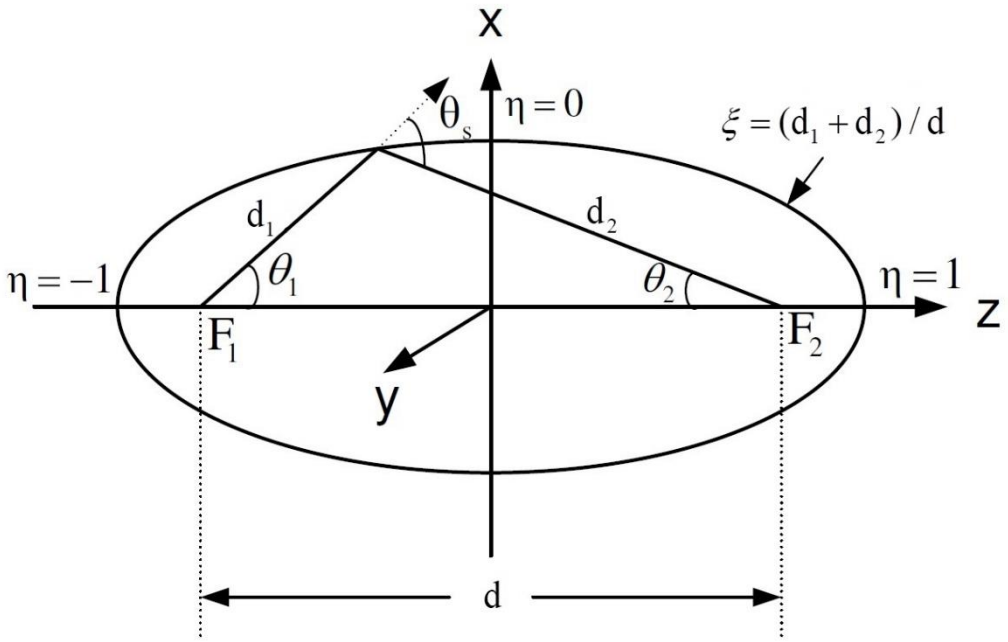
NLOS-UV iletişim sistemi için, hem kanal dürtü yanıtını hem de yol kaybını göz önünde bulundurarak NLOS-UV saçılma kanalını kapsamlı bir şekilde açıklamak istiyoruz. Sonuç olarak, sadece NLOS-UV kanalının zaman alanı bilgisini değil, aynı zamanda alınan güç oranını da sağlayacağız. Tüm bu sonuçlar, daha fazla sinyal işleme ve iletişim algoritmalarının geliştirmesi için değerli olacaktır. Bir sonraki bölümde, bu tezde kullanılacak olan tek saçılma varsayımına dayalı NLOS-UV saçılma kanallarının analitik modellemesini sunacağız.

2.1.5.4. Analitik Tek Saçılma Modeli

Tek saçılma modelleri, TX ve RX arasındaki ortamdan geçen ve fotodetektöre çarpan fotonların en fazla bir kez saçılmaya maruz kaldığını varsayar. Bu nedenle, NLOS geometrisindeki bu model ile, dedektöre gelen tüm fotonlar, sonuçta ortaya çıkan yörüngeleri onları RX dedektörüne yerleştirecek şekilde bir kez saçılmaya uğramış olacaktır. Yazarlar [11]'de, kısa mesafeli bir NLOS-UV saçılma kanalı için analitik bir tek saçılma modeli önerdiler ve [2]'de, açısal spektrumları ve yol kayıplarını incelemek için modeli genelleştirdiler. Önerilen model, bir dürtü iletildiğini varsayar ve atmosferik saçılma ve sinyalin zayıflamasını tahmin ederek kanal dürtü yanıtını verir. Yol kaybı daha sonra dürtü tepkisi üzerinden integral alınarak elde edilir.

Bir NLOS sistemi için, verici ve alıcı Şekil 2.3'te gösterildiği gibi düzenlenir. Önerilen model, Şekil 2.4'te gösterilen prolat küresel koordinat sistemine dayanmaktadır. Prolat küresel koordinatında, uzaydaki her nokta bir radyal koordinat ξ, bir açısal koordinat η ve bir azimut koordinatı ϕ ile tanımlanmaktadır. Bu koordinat sisteminin bir avantajı, iki odak ile belirli bir yüzey ξ üzerindeki herhangi bir nokta arasındaki mesafelerin toplamının sabit olmasıdır. Bu özellik, bir prolat küresel yüzeyin eşit-zamansal bir yüzey olarak düşünülebileceğini gösterir; bu, belirli bir zamanda alıcıya gelen toplam tek saçılım radyasyonunun, belirli bir ξ ile tanımlanan yüzey üzerinden integral almayı gerektirdiği anlamına gelir.

Verici katı koni açısı üzerinden homojen bir saçılma ve emilme ortamına $t = 0$ zamanında tekdüze dağıtılmış olarak bir E_t enerji darbesinin yayıldığı varsayılır. Sistem geometrisi, tek saçılmış fotonların alıcıya ulaşabileceği verici ve alıcıyla ilgili ortak bir hacmi belirler. Basitlik



Şekil 2.4: Prolat küresel koordinat sistemi.

açısından, verici ve alıcının eksenlerinin ortak bir düzlemde (eş düzlemli geometri) olduğu ve dolayısıyla üzerinden integral alınan hacmin koordinat ϕ üzerinde simetrik olduğu varsayılmıştır. t zamanında alınan tek saçılmış yoğunluk [11] ve [2]'de olduğu gibi ifade edilebilir ve aşağıdaki gibi verilmektedir

$$h(t) = \frac{E_t A_R c k_s e^{-k_e ct}}{2\pi\Omega_t d^2} \times \int_{\eta_1(ct/d)}^{\eta_2(ct/d)} \frac{2G\left[\phi(ct/d,\eta)\right] p(\theta_s)}{(ct/d)^2 - \eta^2}\, d\eta \tag{2.4}$$

Burada, $G[.]$ fonksiyonu atıf yapılan çalışmalarda tanımlanmıştır.

Şekil 2.3'e göre (2.4) denkleminde verilen parametreler ve fonksiyonlar aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır. Ω_t, TX konisinin katı açısı, d TX-RX taban çizgisi ayrımı ve d_1 ve d_2, sırasıyla, ortak hacmin TX ve RX'e olan uzaklıkları olsun. ϕ_1 ve ϕ_2 'yi TX ışın açısı ve Rx FOV olarak ve θ_1 ve θ_2 'yi her bir eksen ve yatay eksen arasında TX ve RX odak açıları (bu bağlamda yükseklik açılarıyla değiştirilebilir) olarak tanımlayalım. Yükseklik açıları aynı zamanda işaret

veya tepe açıları olarak da adlandırılır. k_e , k_s , ve k_a atmosfer katsayıları, θ_s saçılma açısı, A_R alıcı açıklığının alanı ve $p(\theta_s)$ saçılma faz fonksiyonudur.

2.1.5.5. Parametrik Tek Saçılım Kanal Modeli

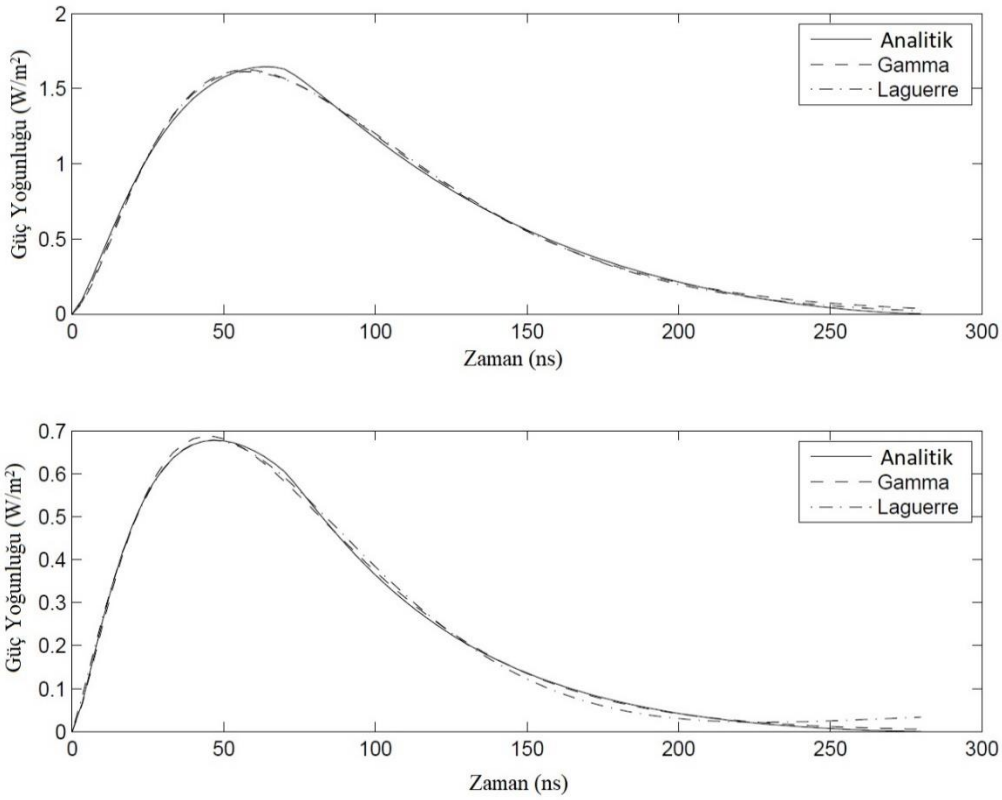
Yukarıdaki analitik kanal modeli, bazen karmaşık hesaplamalar ekleyen ve kanal davranışının sezgisel bilgilerini gizleyen karmaşık integral içermektedir. Alternatif olarak, yüksek doğrulukta uyum iyiliği testine olanak tanıyan basit bir parametrik modeli [69]'da verilmiştir. Bu şekildeki geliştirme, türbülans altında optik yoğunluğun olasılık yoğunluk fonksiyonunu (PDF) modellemedeki başarı ile motive edilmiştir [70]. Bu model, ortak bir Gamma fonksiyonu ve Laguerre polinomunu benimsemiştir. İlgili parametreler, önerilen parametrik model ile analitik model arasındaki eşleştirme hatasını en aza indirerek bulunur. Parametrik modelleme için, Gamma fonksiyonu ve onun değiştirilmiş versiyonu, dürtü yanıtı için eşleştirme fonksiyonu olarak seçilir. Burada iki eşleştirme modelleri sırasıyla Eşitlik (2.5) ve (2.6)'da verilmiştir [69].

$$h_g(t) = A\frac{\beta^{-\alpha}}{\Gamma(\alpha)}t^{\alpha-1}e^{-t/\beta} \tag{2.5}$$

$$h_{gl}(t) = A\frac{\beta^{-\alpha}}{\Gamma(\alpha)}t^{\alpha-1}e^{-t/\beta}\sum_{i=0}^{N}c_n L_n(t), \quad L_n(t) = \frac{e^t}{n!}\frac{d^n}{dt^n}\left(e^{-t}t^n\right) \tag{2.6}$$

Yukarıda, $\Gamma(\alpha)$ Gamma fonksiyonudur, $L_n(t)$ n-sıralı Laguerre polinomudur, A ve c_n skaler bileşenlerdir. Simülasyonda, kare eşleştirme hatasını en aza indirgemek açısından teorik modele uyması için bu iki parametrik model uygulanır. Eşleştirmeden sonra, eşleştirme modellerinde bilinmeyen parametreler elde edilebilir ve ardından modelleme performansı değerlendirilebilir [7].

Örnek olarak, belirli bir geometriyi düşünelim: $d = 100$ m , $\phi_1 = \phi_2 = 15^\circ$, $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$, $k_s = 0.49$ km^{-1} , $k_a = 0.74$ km^{-1}. Ayrıca, farklı modelleme varsayımlarını karşılaştırmak için farklı faz fonksiyonları dahil edilmiştir. Bu girdiler uygulanarak ve ardından Eşitlik (2.5) ve (2.4) veya Eşitlik (2.6) ve (2.4) arasındaki hata en aza indirgenerek model parametreleri ve Şekil 2.5'te farklı faz fonksiyonları için kanalın dürtü yanıtı bulunabilir [7].



Şekil 2.5: Rayleigh ve Mie faz fonksiyonları için NLOS-UV kanalın dürtü yanıtları sırasıyla: (a) Rayleigh (Eşitlik (2.2)), (b) Mie (Eşitlik (2.3)) [7].

Her bir tepe ve kuyruk çevresinde açıkça küçük uyumsuzluklar olmasına rağmen, geniş bir zamansal gecikme aralığı boyunca, uyum iyiliği testinin tatmin edici olduğu gözlemlenebilmektedir. Simülasyon sonuçlarına dayanarak, iki parametrik model için ortalama kare hataları (MSE'ler) de bulunabilir: Gamma eşleştirme için 0.0003 ve modüle Gamma eşleştirme için 0.00025. Dolayısıyla her iki model de düşük MSE'ler sağlamaktadır. Uydurma işleminden Eşitlik (2.5)'teki parametreler aşağıdaki gibi bulunabilir: $\beta = 0.0347$, $\alpha = 2.6506$, $A = 0.134$ [7].

2.1.5.6. Yaklaşık Tek Saçılma Yol Kaybı Modeli

NLOS-UV iletişim sistemlerinin iletim kanalının dürtü tepkisi Eşitlik (2.4)'te verilmiştir. Eşitlik (2.4)'te verilen dürtü tepki modeli, izlenebilir bir kapalı forma indirgenemez ve bu nedenle sayısal analiz yöntemleri gerektirmektedir. Aşağıdaki varsayımlar gözönüne alındığında, iletişim performans analizine dahil edilmeye uygun olan $h(t)$ için bir kapalı form

yaklaşımı elde edilebilir. Bu türetme, NLOS geometrisinin kesişen konilerin küçük olacağı şeklindeki varsayımına dayanmaktadır [7]. Yukarıda tanımlanan geometri ve parametreler gözönüne alınarak, V 'deki diferansiyel hacim dV 'den saçılan RX'teki enerji aşağıdaki gibi modellenebilir: [71]

$$\delta E_r = \frac{E_t k_s p(\mu) A_R \delta V \cos(\zeta) e^{-k_e(d_1+d_2)}}{\Omega_t d_1^2 d_2^2} \tag{2.7}$$

Burada ζ , RX ekseni ile RX'ten ortak hacme bir vektör arasındaki açıdır ve faz fonksiyonu $p(\mu)$, Eşitlik (2.1) ile verilmektedir. Alıcıdaki toplam enerji, prolat küresel koordinat sistemi kullanılarak ortak hacim üzerinden integral alınarak bulunabilir, ancak bu sayısal yöntemleri kullanmayı gerektirmektedir. İzlenebilir bir analitik ifade elde etmek için, ortak hacmin $\zeta \approx 0$ olacak şekilde küçük olduğu varsayılır ve bu $h(t)$'yi ve toplam alınan enerjinin sonuç ifadesini basitleştirmek için kullanılır. $\Omega_t = 2\pi\left(1-\cos\frac{\phi_1}{2}\right)$, $d_1 = d\sin\theta_2/\sin\theta_s$, $d_2 = d\sin\theta_1/\sin\theta_s$, ve $\theta_s = \theta_1 + \theta_2$ olduğuna dikkat ediniz. Şimdi, alınan toplam enerjiye aşağıdaki gibi yaklaşılabilir: [7]

$$E_r \approx \frac{E_t k_s p(\mu) A_R V \sin^4\theta_s \exp\left[-\frac{k_e d}{\sin\theta_s}(\sin\theta_1+\sin\theta_2)\right]}{2\pi d^4 \sin^2\theta_1 \sin\theta_2\left(1-\cos\frac{\phi_1}{2}\right)} \tag{2.8}$$

Yol kaybı $L = \frac{E_t}{E_r}$ şeklinde enerji oranı olarak tanımlanır. Burada L, kesişimin şekline bağlı olan ortak V hacmine bağlıdır. Küçük bir örtüşme hacmi için, V , $V = \frac{1}{3}\pi\left(D_1^2 h_1 - D_2^2 h_2\right)$ hacminin sağ konisinin bir frustumu ile iyi bir şekilde yaklaşık olarak tahmin edilebilir; burada $h_1 = d_1 + d_2\frac{\phi_2}{2}$ ve $D_1 = h_1\frac{\phi_1}{2}$, sırasıyla, büyük koninin alt yüzeyinin yüksekliği ve yarıçapıdır ve $h_2 = d_1 - d_2\frac{\phi_2}{2}$ ve $D_2 = h_2\frac{\phi_1}{2}$, sırasıyla, küçük koninin alt yüzeyinin yüksekliği ve yarıçapıdır. Her iki koni de TX konumunda ortak bir tepe noktasını paylaşırlar. d_1, d_2 ve θ_s

'yi V 'de yerine yazarak ve karşılık gelen sonucu Eşitlik (2.8)'de yerine koyarak yol kaybı ifadesi aşağıdaki gibi elde edilebilir: [7]

$$L \approx \frac{96d \sin\theta_1 \sin^2\theta_2 \left(1-\cos\frac{\phi_1}{2}\right) \exp\left[\frac{k_e d\left(\sin\theta_1+\sin\theta_2\right)}{\sin\theta_s}\right]}{k_s p(\mu) A_R \phi_1^2 \phi_2 \sin\theta_s \left(12\sin^2\theta_2+\phi_2^2\sin^2\theta_1\right)} \tag{2.9}$$

Eşitlik (2.9) deki ifade, L'yi sistemin ve geometrik parametrelerin açık bir fonksiyonu olarak sunmaktadır ve atmosferik parametrelerin belirli bir seçimi için bağlantı analizine kolayca uygulanabilmektedir.

2.1.5.7. NLOS-UV Türbülans Analizi

Saçılma ve emilme etkileri, NLOS-UV bağlantıları için geniş bir şekilde incelenmiş ve modellenmiştir [24, 71, 72], ancak türbülans genellikle nispeten kısa mesafeli bağlantılar için ve açık hava koşullarında göz ardı edilmektedir. Bununla birlikte, UV bandındaki optik türbülans etkileri, ışınım dalgalanması (parıldama) ve ışın sapması dahil olmak üzere mesafe uzadıkça iletişim bağlantı performansını önemli ölçüde düşürebilmektedir [4, 67, 73]. NLOS-UV bağlantıları için, ışık dalgalanmaları, çeşitli türbülans ortamlarında çalışan sistemler için sınırlayıcı bir faktör olabilir. Optik türbülans, alan ölçümleri ve dalga yayılım teorisi ile araştırılmıştır [74, 75]. Örneğin, ışınım dalgalanması, zayıf atmosfer türbülans koşulları için log-normal dağılım kullanılarak modellenmiştir [73, 74]. Bununla birlikte, mevcut ölçümler ve analizler tipik olarak, optik TX ve RX'in doğrudan birbirlerini görebilen bir direk görüşü olan bağlantı senaryolarına dayanmaktadır.

NLOS-UV iletişimi için bir ışınım dalgalanma modeli [7] ve [34]'te önerilmiştir. Belirtildiği gibi, NLOS-UV iletişim sistemlerinin performansı kısa mesafeli bağlantılar için değerlendirilmiştir [21, 22]. Daha uzun mesafeli NLOS-UV bağlantıları için, ışık şiddetinin sönümlenmesi alınan sinyali önemli ölçüde etkileyebilir. Rytov'un dalga denklemi çözümüne göre, log-genlik varyansı dalga boyunun $-7/6$ üssü ile orantılıdır. Bu, atmosferik türbülanstan kaynaklanan ışınım dalgalanmasının UV'de görünür ve kızılötesi bantlara göre iki veya üç kat daha fazla olabileceği anlamına gelir; bu da UV bağlantılarının türbülansa karşı görünür ve kızılötesi bantlardan daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Yazarlar [7] ve [34]'te NLOS-UV bağlantıları için bir ışınım dalgalanma dağılım modelini geliştirmişlerdir. Buradaki türbülans

araştırması, tek saçılma modellemesinden iki LOS bağlantısına uygulanan mevcut LOS türbülans teorisine dayanmaktadır: TX'ten ışın/FOV ortak hacmine ve ortak hacimden RX'e. Yazarlar, NLOS senaryoları için saçılma etkilerini dikkate alarak mevcut modelleri genişletmişler. Sistem performansının tahmini için yararlı olan, alınan sinyalin dağılımı için bir model türetilmiştir. Yazarlar [37]'de, NLOS-UV bağlantılarında istatistiksel türbülans modeli için kapalı formda bir ifade elde etmişlerdir.

a. LOS-UV Türbülans ve Parıldama

Optik türbülans, atmosferin kırılma indisindeki rastgele değişikliklerin sonucudur. Bu, kırılma indisinde rastgele düzensizlikler oluşturan atmosfer sıcaklığındaki rastgele dalgalanmalardan kaynaklanmaktadır. Bu düzensizliklerden geçen bir optik dalga bozulmaya uğramaktadır. Bozulmanın büyüklüğü, türbülansın gücüne ve optik yolun uzunluğuna bağlıdır. Kırılma indisi ile atmosfer sıcaklığını ilişkilendiren bir yaklaşım aşağıdaki gibi verilmiştir: [76]

$$n \approx 1 + 77.6\frac{P}{T}[1 + 7.52 \times 10^{-3}\lambda^{-2}] \times 10^{-6} \tag{2.10}$$

burada P milibar cinsinden hava basıncı, T Kelvin cinsinden sıcaklık ve λ mikron cinsinden dalga boyudur.

Atmosfer sıcaklığındaki karşılık gelen değişiklikler, rüzgar hızında doğal olarak meydana gelen rastgele dalgalanmalarla taşınır. Bu varyasyonlar daha sonra atmosfer kırılma indisinde rastgele dalgalanmalara neden olur. Literatürde, kırılma indisi, boş alan değerinin toplamı artı türbülans varlığı nedeniyle rastgele dalgalanan bir bileşen olarak tanımlanmaktadır:

$$n(\mathbf{r}, t) = 1 + n_1(\mathbf{r}, t) \tag{2.11}$$

burada $n_1(\mathbf{r}, t)$ dalgalanan bileşendir ve atmosfer içindeki $\mathbf{r}$ konumu ve t zamanının bir fonksiyonudur.

Optik türbülansın rastgelelik doğası nedeniyle, istatistiksel miktarlarla temsil edilir. İki temel istatistiksel parametre, yapı fonksiyonu ve kırılma indisinin korelasyon fonksiyonudur:

$$D_n(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = E\left[\left(n(\mathbf{r}_1) - n(\mathbf{r}_2)\right)^2\right] \tag{2.12}$$

$$\Gamma_n(\mathbf{r_1},\mathbf{r_2}) = E\left[n(\mathbf{r_1})n(\mathbf{r_2})\right] \tag{2.13}$$

burada $E[\cdot]$ notasyonu beklenen değeri göstermektedir.

Kolmogorov'un teorisine göre, güç spektral yoğunluğu, kırılma indisi korelasyonunun üç boyutlu Fourier dönüşümü olarak tanımlanmaktadır [76]. Güç spektral yoğunluğu aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\Phi(K) = 0.033C_n^2K^{-11/3} \tag{2.14}$$

burada C_n^2, kırılma yapı parametresinin indisidir ve K, dalga numarasıdır. C_n^2'nin değeri yüksekliğe bağlıdır. Fried, Hufnagel ve Stanley tarafından verilen verileri uydurarak [76]'da C_n^2 için analitik bir model önerilmiştir:

$$C_n^2(z) = K_0 z^{-1/3} e^{-\frac{z}{z_0}} \tag{2.15}$$

burada K_0, $m^{-2/3}$ birimleriyle türbülans gücü parametresidir ve z, metre cinsinden yüksekliktir. Yere yakın bir senaryo için, C_n^2 tipik olarak güçlü türbülans için $1\times10^{-13}m^{-2/3}$ ile zayıf türbülans için $1\times10^{-17}m^{-2/3}$ arasında değişmektedir. Zayıf optik türbülans için, dalga denkleminin Rytov çözümü, alınan dalganın log-genliğindeki varyans açısından parıldamayı açıklamaktadır. Bir düzlem dalgası için log-genlik dalgalanması X'in kanal uzunluğu L_c üzerindeki varyansı aşağıdaki gibi verilmektedir: [76]

$$\sigma_X^2(L_c) = 0.56\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{7/6}\int_0^{L_c} C_n^2(x)(L_c - x)^{5/6}\,dx \tag{2.16}$$

Buna göre Rytov teorisi tarafından tahmin edilen ışınım dalgalanmasının varyansı aşağıdaki gibi verilebilmektedir: [76]

$$\sigma_I^2 = e^{4\sigma_X^2} - 1 \tag{2.17}$$

burada σ_I^2 bazen parıldama indisi olarak da adlandırılmaktadır.

Zayıf türbülanstan kaynaklanan ışınım dalgalanması $f(I)$ için olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF), bir log-normal dağılımı ile iyi bir şekilde temsil edilebilmektedir. Güçlü türbülans koşulları için, Churnside ve Hill, yeterince geniş bir alıcı açıklığı kullanılırsa log-normal dağılımın hala doğru olabileceğini göstermişlerdir. Bernhard [77] ayrıca optik türbülansı modellemek için log-normal PDF'yi uygulayarak basitleştirilmiş bir türbülans kanal modeli önermiştir. Yazarlar [7] ve [34]'te log-normal PDF'yi LOS senaryosunda uygulayarak NLOS türbülans analizine genişletmişler. Alınan ışınım dalgalanmasının normalize log-normal PDF'si aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$f(I) = \frac{1}{I\sigma_I\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\ln\frac{I}{E[I]}+\frac{1}{2}\sigma_I^2\right)^2}{2\sigma_I^2}} \tag{2.18}$$

Alt bölümde NLOS senaryoları için alınan ışınım dalgalanmasının PDF'sinin elde edilmesi için, yukarıdaki log-normal PDF, temel olarak kullanılmaktadır.

b. NLOS-UV Parıldama Modeli

Yukarıda tartışıldığı gibi, NLOS-UV kanalı, moleküler saçılma ve emilme, aerosol saçılması ve emilmesi ve atmosferik türbülans dahil olmak üzere çeşitli fenomenleri içermektedir. Işığın saçılması, atmosferdeki asılı partiküllerin varlığı nedeniyle oluşmaktadır. NLOS-UV iletişimi için, saçılma, TX ve RX arasında bilgi alışverişi için bir araç görevi görmektedir. Emilme, atmosferde iletim sırasında sinyali zayıflatacaktır. Türbülans, alınan optik sinyalin dalgalanmasına neden olacaktır. Tüm orta ve uzun mesafeli NLOS-UV bağlantılarında türbülans etkileri dikkate alınmalıdır. İlk olarak NLOS-UV türbülans dağılım modeli, Şekil 2.3'te gösterilen tipik bir bağlantı geometrisine [2] dayalı olarak [7]'de önerilmiştir.

LOS UV radyasyonunun zayıf atmosfer türbülansı Daniel ve David [75] tarafından ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Çalışmalarında, 185 metrelik bir UV (254 nm) bağlantı mesafesi için parıldama indisini (σ_I^2 (0.4'e kadar)) ve türbülans yapı parametresini (C_n^2) ölçtüler. Ayrıca, alınan sinyalin ölçülen yoğunluk dağılımını log-normal PDF olarak doğruladılar. Gündüz için ölçülen zayıf türbülans yapı parametreleri (C_n^2), $1\times10^{-13}m^{-2/3}$ ile $5\times10^{-13}m^{-2/3}$ arasında değişmektedir, ancak geleneksel ölçülen sonuçlar zayıf türbülansı C_n^2'nin $1\times10^{-17}m^{-2/3}$'den

daha az ve güçlü türbülansı C_n^2'nin $1\times10^{-13}m^{-2/3}$'ten daha büyük olduğu şeklinde tanımlamaktadır. Aşağıda verilen NLOS-UV türbülans modelleme çalışması için, araştırmanın net ve eksiksiz bir şekilde yapılabilmesi için, C_n^2 $1\times10^{-13}m^{-2/3}$'ten $1\times10^{-17}m^{-2/3}$'e kadar değiştirilmiştir.

Şekil 2.3'teki NLOS-UV geometrisi için, atmosfer türbülansı meydana gelirse, alınan sinyalin LOS senaryosunda olduğu gibi dağılımı izleyeceği sonucuna doğrudan varamayız. Ancak yine de LOS türbülans modelini kullanabiliriz çünkü NLOS geometrisini iki LOS yolu ile yapılandırılmış olarak görebiliriz: biri d_1 uzunluğuna sahip TX'ten ortak hacme, diğeri ise d_2 uzunluğuna sahip ortak hacimden RX'e kadardır. Her yol için, belirli varsayımlar altında, türbülansı modellemek için önceki dağılımı kullanabilir ve ardından türbülans altında NLOS sinyal dağılımını elde etmek için iki LOS sonucunu birleştirebiliriz. Ortak hacmin (V), TX ışınının analitik olarak tahmin edilebilmesi ve ortak hacim içindeki sinyal yoğunluğunun sabit olması için yeterince küçük olduğu varsayılmaktadır. Küçük bir örtüşme hacmi için, V, $V=\frac{1}{3}\pi\left(D_1^2h_1-D_2^2h_2\right)$ şekilde tahmin edilebilir; burada $h_1=d_1+d_2\frac{\phi_2}{2}$ ve $D_1=h_1\frac{\phi_1}{2}$, sırasıyla, büyük koninin alt yüzeyinin yüksekliği ve yarıçapıdır ve $h_2=d_1-d_2\frac{\phi_2}{2}$ ve $D_2=h_2\frac{\phi_1}{2}$, sırasıyla, küçük koninin alt yüzeyinin yüksekliği ve yarıçapıdır [71]. Ayrıca, alınan sinyale yalnızca tek bir saçılmanın hakim olduğu varsayılmaktadır. TX'ten yayılan ışık şiddetinin I_t olduğunu varsayalım. Türbülans olmadan ortak hacimde alınan ortalama ışınımı aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir: [71]

$$I_{v_0}=\frac{I_t k_s p(\mu)\exp(-k_e d_1)V}{2\pi\left[1-\cos(\phi_1/2)\right]d_1^2} \tag{2.19}$$

Bir önceki bölümde tartışıldığı gibi atmosfer türbülansı eklendiğinde, ortak hacme varan ışığın şiddeti log-normal dağılımında olup PDF'si aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$f(I_v)=\frac{1}{2I_v}\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{X_1}^2}}e^{-\frac{\left(\ln\frac{I_v}{I_{v_0}}+2\mu_{X_1}\right)^2}{8\sigma_{X_1}^2}} \tag{2.20}$$

Buna karşılık olarak, NLOS yolundan gelen ve RX'te alınan ışık şiddeti ($I_{r_{NLOS}}$) için koşullu PDF aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$f\left(I_{r_{NLOS}} \mid I_v\right) = \frac{1}{2I_{r_{NLOS}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{X_2}^2}} e^{-\frac{\left(\ln\frac{I_{rNLOS}}{E[I_{rNLOS}|I_v]} - 2\mu_{X_2}\right)^2}{8\sigma_{X_2}^2}} \tag{2.21}$$

burada $\mu_{X_i} = 0.5\sigma_{X_i}^2 + \alpha_{X_i} \ln 10/10$, $\sigma_{X_i}^2 = 1.23C_n^2K^{7/6}d_i^{11/6}$ Rytov varyansıdır ve $\alpha_{X_i} = 2\sqrt{23.17C_n^2K^{7/6}d_i^{11/6}}$ [37]. Burada $K = 2\pi/\lambda$ ve λ dalgaboyunu göstermektedir. Eşitlik (2.21) 'deki $E\left[I_{r_{NLOS}} \mid I_v\right]$ terimi aşağıdaki şekilde verilmektedir: [71]

$$E\left[I_{r_{NLOS}} \mid I_v\right] = \frac{I_v A_R \exp\left(-k_e d_2\right)}{4\pi d_2^2} \tag{2.22}$$

Böylece, I_v ve $I_{r_{NLOS}}$ 'un ortak PDF'si aşağıdaki şekilde türetilebilir:

$$f\left(I_v, I_{r_{NLOS}}\right) = f\left(I_{r_{NLOS}} \mid I_v\right) f\left(I_v\right) \tag{2.23}$$

Bu nedenle, $I_{r_{NLOS}}$ 'un PDF'si aşağıdaki gibi verilebilir:

$$f\left(I_{r_{NLOS}}\right) = \int f\left(I_v, I_{r_{NLOS}}\right) dI_v \tag{2.24}$$

Yukarıdaki türetme, ortak hacimdeki parıldamanın sabit bir geometri için sabit olduğu varsayımına dayanmaktadır.

Eşitlik (2.23)'te (2.20) ve (2.21)'i yerine yazarak ve denklem (2.24)'ü çözerek, [37]'deki yazarlar, alınan parlaklığın PDF'si için aşağıdaki gibi kapalı formda bir ifade türetmişlerdir:

$$f\left(I_{r_{NLOS}}\right) = \frac{1}{2I_{r_{NLOS}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{X_{NLOS}}^2}} e^{-\frac{\left(\ln\left(\frac{I_{rNLOS}}{I_{0NLOS}}\right) + 2\mu_{X_{NLOS}}\right)^2}{8\sigma_{X_{NLOS}}^2}} \tag{2.25}$$

burada $\sigma_{X_{NLOS}}^2 = \sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2$ ve $\mu_{X_{NLOS}} = \mu_{X_1} + \mu_{X_2}$ şeklindedir. $I_{0_{NLOS}}$, tek saçılma varsayımı altında türbülans olmadığında RX'te alınan ışık yoğunluğudur ve aşağıdaki şekilde verilmektedir: [71]

$$I_{0_{NLOS}} = \frac{I_t k_s p(\mu) A_R \exp\left(-k_e (d_1 + d_2)\right) V}{2\pi\left[1 - \cos(\phi_1 / 2)\right] 4\pi d_1^2 d_2^2} \tag{2.26}$$

Bu tezde, NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme tekniklerini araştırmak için yukarıda sağlanan atmosferik türbülans modelini kullanacağız.

2.1.6. Modülasyon Teknikleri

Sistemin tamamı, yoğunluk modülasyonunun (IM) kullanıldığı bir doğrudan algılama (non-coherent) sistemi olarak veya doğrudan optik taşıyıcı modülasyonlu (coherent) bir sistem olarak tasarlanabilmektedir. Alıcı tarafında, optik alan foto-algılanmakta (doğrudan algılama veya heterodinleştirme ile) ve çıkış akımı, her bit aralığı sırasında iletilen biti belirlemek için işlenmektedir. Kodlama işlemi alıcıda bilindiğinden, iki optik alandan hangisinin alındığına karar verilerek doğru bir bit kararı verilebilmektedir. Ortaya çıkan kodu çözülmüş bit dizisi daha sonra iletilen bitlerin alınan versiyonunu temsil etmektedir. Bu nedenle, doğru bit aktarımı, doğrudan ışıkla algılanan optik alanı tanımlama yeteneği ile ilgilidir. Foto-algılama sırasında ortaya çıkan arka plan gürültüsü, dışarıdaki gürültü alanları ve dedektör gürültüsü, dijital performansı düşürerek kod çözme bit hatalarına neden olacaktır. Dolayısıyla, herhangi bir bitin hatalı olarak kodunun çözülme olasılığı (bit hata olasılığı) dijital sistemlerde önemli bir performans ölçüsü haline gelmektedir.

İkili doğrudan algılama alıcılarında en yaygın darbeli modülasyon çeşitleri, açma-kapama anahtarlama (On-off Keying, OOK) ve darbe konum modülasyonudur (Pulse Position Modulation, PPM). OOK'de, her bit, her bit süresi boyunca ışık kaynağını açıp kapatarak iletilmektedir. Bu, en temel optik sinyalleme türünü temsil eder ve yalnızca dijital kodlama için ışık kaynağının yanıp sönmesine karşılık gelir. Darbe konum modülasyonu (PPM), M mesaj bitlerinin, olası gerekli zaman kaymalarından birinde tek bir darbenin iletilmesiyle kodlandığı bir sinyal modülasyon biçimidir. Bu, iletilen bit hızı saniyede bit olacak şekilde her T saniyede bir tekrarlanmaktadır.

Optik iletişim sistemleri için en yaygın modülasyon ve algılama türü yoğunluk modülasyonu ve doğrudan algılama (Intensity Modulation and Direct detection, IM/DD) olduğundan, bu tez kapsamında NLOS-UV iletişim sistemleri için önerilen uzaysal çeşitleme tekniklerinde OOK modülasyonlu IM/DD tekniği kullanılmaktadır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. GİRİŞ

Ultraviyole sinyallerindeki zengin saçılma olayı, direk görüşü olmayan dış mekan kablosuz optik haberleşmeye imkan sağlar ve kızılötesi optik bağlantılarının direk görüş olma gereksinimini ortadan kaldırır. NLOS-UV haberleşme sistemleri, atmosferin parçacıkları tarafından fotonların saçılmasıyla vericiden alıcıya bilgi aktarımını sağlamaktadır. Yarı iletkenlerdeki son ve hızlı gelişmeler ve derin UV ışık yayan diyotlarda (LED'ler), güneş perdeli UV filtrelerinde ve dedektörlerde yeni bulgular, UV iletişimini gelecekteki uygulamalar için çekici kılmaktadır [78].

UV sinyallerindeki zengin saçılma olayı NLOS iletişimi sağlarken, aynı zamanda NLOS-UV bağlantılarının performansını önemli ölçüde düşüren büyük bir yol kaybına neden olmaktadır [71]. Saçılma ve emilmeye bağlı yol kaybının yanı sıra, orta ve uzun mesafeli NLOS-UV bağlantıları atmosferik türbülans kaynaklı sönümlemeden de etkilenmektedir.

RF ve optik kablosuz iletişim sistemleri bağlamında geniş çapta incelenen hata düzeltme kodları, işbirliğine dayalı iletişim sistemleri, bağlantı adaptasyonu vb. dahil olmak üzere sönümleme etkisini azaltan birçok haberleşme teknikleri mevcuttur [79, 80]. Bunlar arasında, uzaysal çeşitleme teknikleri, doğal fazlalıkları ile sönümleme etkisini telafi etmek için çekici bir alternatif yaklaşım sağlamaktadır. Uzaysal çeşitleme teknikleri, RF ve optik kablosuz ağlar bağlamında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [38, 39], ancak henüz NLOS-UV iletişim sistemleri bağlamında ayrıntılı olarak çalışılmamıştır.

Bu tez kapsamında, atmosferik türbülans kaynaklı sönümleme varlığında NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme teknikleri incelenmiştir. Çalışma özellikle aşağıdaki konular üzerinde odaklamaktadır: (i) atmosferik türbülans kanalları durumunda NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme tekniklerinin BER başarım analizi, (ii) atmosferik türbülans kanalları durumunda NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme tekniklerinin kesinti olasılığı analizi ve (iii) atmosferik türbülans kanalları durumunda NLOS-UV iletişim sistemleri için verici ve/veya alıcı anten seçme (seçim çeşitleme) teknikleri.

Bu bölümde, önce NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme şemaları tanıtılacak ve SISO ve önerilen uzaysal çeşitleme şemaları için sistem modelleri sunulacak, ardından NLOS-

UV iletişim sistemleri için önerilen uzaysal çeşitleme tekniklerinin BER başarımı ve kesinti olasılığı analizi hem ilişkisiz hem de ilişkili atmosferik türbülans kanalları dikkate alınarak incelenecek. Ayrıca NLOS-UV iletişim sistemleri için önerilen uzaysal çeşitleme şemalarının çeşitleme kazancı analizi verilecek. Ardından, NLOS-UV iletişim sistemleri için seçim çeşitleme şemaları tanıtılacak ve verici ve/veya alıcı anten seçme tekniklerinin sistem modeli ve kesinti olasılığı analizi incelenecek. Son olarak, NLOS-UV iletişim sistemleri için önerilen seçim çeşitleme şemalarının çeşitleme kazancı analizi sağlanacak.

3.2. UZAYSAL ÇEŞİTLEME TEKNİKLERİ

Uzay çeşitlemesi veya anten çeşitlemesi olarak da bilinen uzaysal çeşitleme teknikleri, bir kablosuz bağlantının kalitesini ve güvenilirliğini artırmak için iki veya daha fazla anten kullanan birkaç kablosuz çeşitleme şemalarından biridir. RF sistemlerinde, çoğu kez, özellikle kentsel ve kapalı ortamlarda, verici ve alıcı arasında net bir direk görüş hattı (LOS) yoktur. Bunun yerine sinyal, alıcıya birçok farklı yollardan yansıtılarak ulaşmaktadır. Bu yansımaların her biri, alıcı antenin açıklığında birbiriyle yıkıcı bir şekilde etkileşime girebilecek ve kablosuz sistemlerin performansını önemli ölçüde düşüren sönümlemeye neden olabilecek faz kaymaları, zaman gecikmeleri, zayıflamalar ve bozulmalara neden olabilmektedir. Kablosuz optik sistemlerde, optik yoldaki atmosferik türbülans sönümlemeye neden olmakta ve optik kablosuz sistemlerin performansını önemli ölçüde düşürmektedir.

NLOS-UV sistemlerinde, uzaysal çeşitleme özellikle atmosferik türbülans kaynaklı sönümlemenin etkilerini azaltmada etkilidir. Bunun nedeni, birden çok antenin bir alıcıya aynı optik sinyal için birkaç gözlem sunmasıdır. Her anten farklı bir sönümleme ortamı yaşayacaktır. Bu nedenle, bir anten derin bir sönümleme yaşıyorsa da başka bir antenin yeterli bir sinyale sahip olması muhtemeldir.

Uzaysal çeşitleme, fiziksel olarak birbirinden ayrılmış, genellikle aynı özelliklere sahip birden çok anten kullanmaktadır. Gelen sinyalin beklenen oranına bağlı olarak, antenler arası mesafe için bazen bir dalga boyu düzeninde bir boşluk yeterlidir. Bu bölümde, NLOS-UV iletişim sistemleri için uzaysal çeşitleme tekniklerinin türleri olarak, verici çeşitlemesi olarak da adlandırılan MISO şeması, alıcı çeşitlemesi olarak da adlandırılan SIMO şeması ve MIMO şeması tanıtılacaktır. Önce önerilen şemaların sistem modelleri ve uzaysal çeşitlemeli NLOS-

UV iletişim sistemleri için bir kıyaslama olanağı sağlayan SISO NLOS-UV bağlantısının sistem modeli sunulmaktadır.

3.2.1. Sistem Modelleri

3.2.1.1. SISO NLOS-UV Şemalarının Sistem Modeli

Şekil 2.3, bir SISO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonunu göstermektedir. Şekil 2.3'e referansla, sistem parametreleri aşağıdaki gibi tanımlanır: ϕ_1, vericinin (TX) ışın sapma açısını belirtir ve ϕ_2 alıcının (RX) görüş alanı (FOV) açısını göstermektedir. θ_1 ve θ_2, sırasıyla TX ve RX'in tepe açılarını göstermektedir. d, TX ve RX arasındaki taban çizgisi mesafesini belirtir ve d_1 ve d_2, sırasıyla TX ve RX'in ortak hacim V 'ye olan mesafeleri belirtmektedir.

Atmosferik türbülans kanalı durumunda bir yoğunluk modülasyonlu/doğrudan algılamalı (IM/DD) NLOS-UV bağlantısı dikkate alınır. Açma-kapama anahtarlama (OOK) modülasyonu varsayıldığında, alıcı açıklığındaki alınan sinyal aşağıdaki şekilde verilir:

$$r_{SISO} = s\eta_r P_T I_{r_{NLOS}} + w \tag{3.1}$$

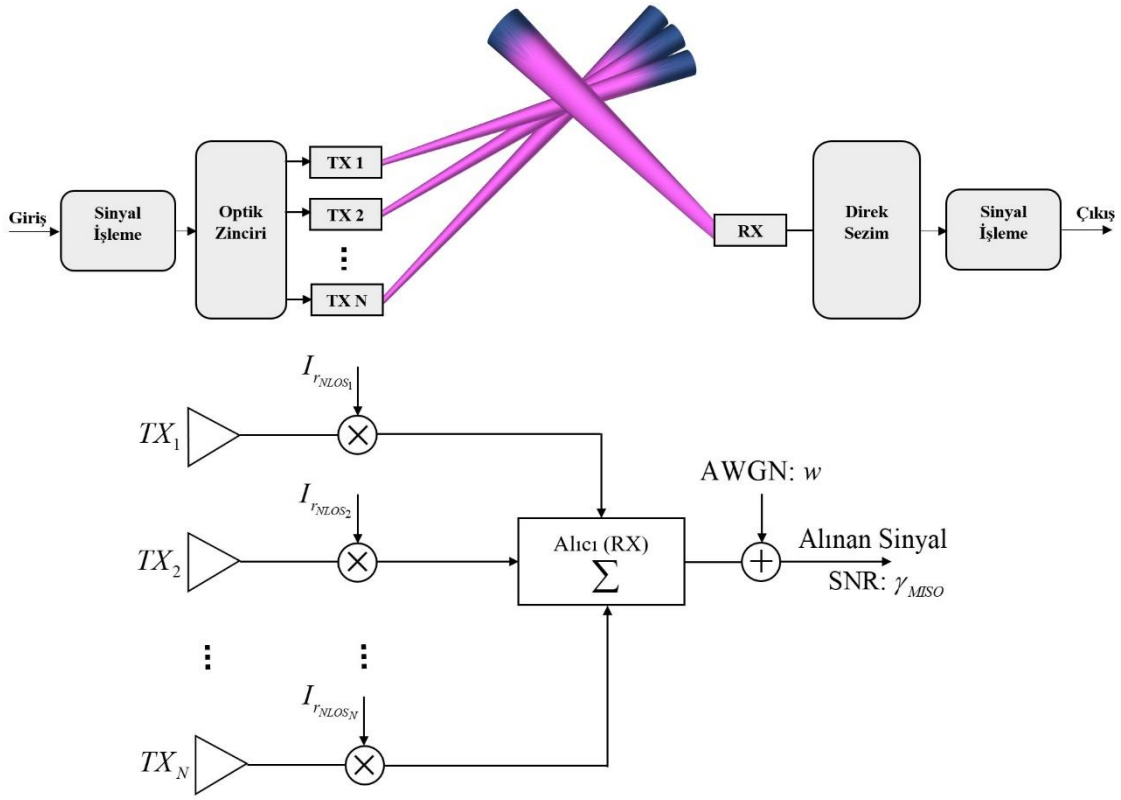
burada $s \in \{0,1\}$ iletilen bilgi bitidir, η_r foto-çoğaltıcı tüpün (PMT) kuantum verimliliğidir, P_T iletim gücüdür ve w sıfır ortalamalı ve varyansı $\sigma_w^2 = N_0 / 2$ olan bir toplamsal beyaz Gauss gürültüsüdür. $I_{r_{NLOS}}$, türbülans kaynaklı sönümlemeden etkilenmiş alınan ışın yoğunluğudur. $I_{r_{NLOS}}$ 'un PDF'si Eşitlik (2.25) İle verilmiştir.

3.2.1.2. Uzaysal Çeşitlemeli NLOS-UV Şemalarının Sistem Modeli

Bir MISO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu Şekil 3.1'de verilmiştir. OOK modülasyonu varsayıldığında, MISO NLOS-UV bağlantısı durumunda alınan sinyal aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$r_{MISO} = s\eta_r P_T \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}} + w \tag{3.2}$$

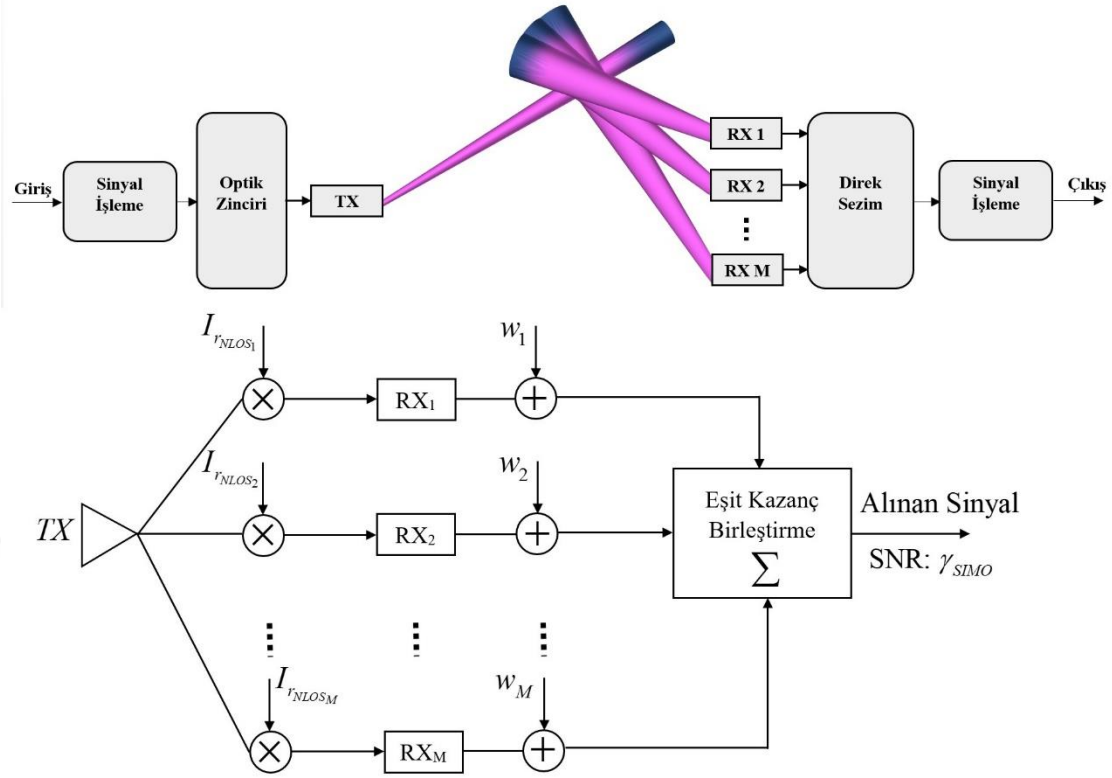
burada N, verici anten sayısıdır ve $I_{r_{NLOS_n}}$, Eşitlik (2.25)'te verilen bir log-normal dağılımı izleyen n 'inci verici açıklığından alınan ışın yoğunluğudur. λ ve d' sırasıyla, dalgaboyunu ve



Şekil 3.1: MISO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu.

verici antenlerin ayırma mesafesini göstersin. Verici antenlerden alınan sinyallerin ilişkisiz olma koşulu $\lambda d < d'$ ile verilmektedir [81]. Burada d, verici ve alıcı antenler arasındaki mesafeyi göstermektedir. $\lambda = 260$ nm dalga boyu ve $d = 500$ m bağlantı uzunluğu için, verici antenler arasındaki ayırma mesafesi d' santimetre mertebesinde olacaktır. Bu ayırma mesafesi ile, θ_1, θ_2, ϕ_1, ϕ_2, d_1, d_2, θ_s ve V dahil olmak üzere tüm sistem parametrelerinin tüm verici antenler için aynı olduğu varsayılabilir. Aynı varsayım SIMO ve MIMO teknikleri için de geçerlidir.

Bir SIMO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu Şekil 3.2'de verilmiştir. Genelliği bozmadan, alıcı tarafında eşit kazanç birleştirme (Equal Gain Combining, EGC) tekniğinin kullanıldığını varsayıyoruz. Kablosuz optik iletişim sistemleri için EGC alıcılarının performansının, en büyük oransal birleştirme (Maximum Ratio Combining, MRC) alıcılarına çok yakın olduğunu belirtmekte fayda var [39]. OOK modülasyonu ve EGC alıcısı varsayıldığında, SIMO durumunda alıcıda alınan optik sinyal aşağıdaki şekilde verilmektedir:



Şekil 3.2: SIMO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu.

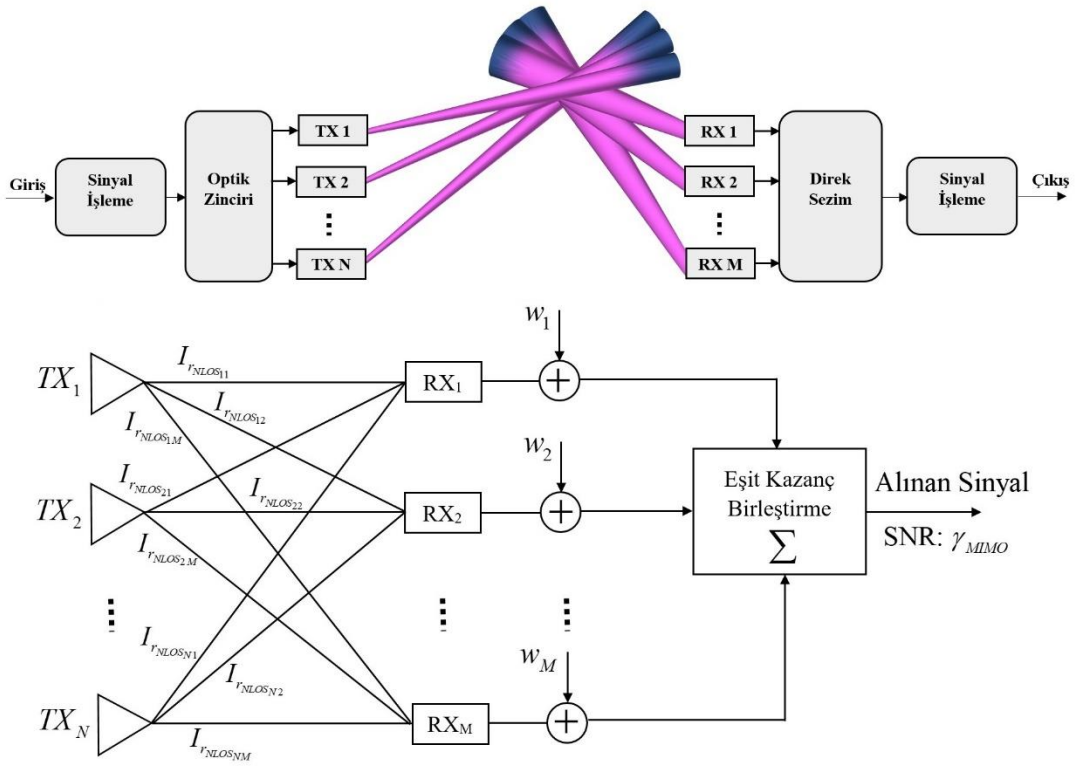
$$r_{SIMO} = s\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}} + \sum_{m=1}^{M} w_m \tag{3.3}$$

burada M, alıcı anten sayısını belirtmektedir ve $I_{r_{NLOS_m}}$, m'inci alıcı açıklığında alınan ışın yoğunluğudur.

Bir MIMO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu Şekil 3.3'te verilmiştir. OOK modülasyonu ve EGC alıcısı varsayıldığında, MIMO NLOS-UV bağlantısı durumunda alıcıda alınan optik sinyal aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$r_{MIMO} = s\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}} + \sum_{m=1}^{M} w_m \tag{3.4}$$

burada $I_{r_{NLOS_{nm}}}$, n'inci verici anteninden m'inci alıcı antenine kadar olan kanalı modelleyen sönümleme kanal katsayısıdır.



Şekil 3.3: MIMO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu.

Eşitlik (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) kullanılarak SISO, MISO, SIMO ve MIMO NLOS-UV bağlantıları için bit hata olasılığı ve kesinti olasılığı ifadeleri sonraki bölümlerde türetilecektir.

3.2.2. Bit Hata Oranı (BER) Başarım Analizi

Bu bölümde, verici çeşitlemeli, alıcı çeşitlemeli ve MIMO NLOS-UV bağlantıları için BER ifadeleri türetilmiştir. İlk olarak, uzaysal çeşitleme için bir kıyaslama kriteri olan SISO NLOS-UV bağlantısının BER başarımı bu bölümde incelenmiştir.

3.2.2.1. SISO NLOS-UV Bağlantılarının BER Başarım Analizi

Alıcıda OOK modülasyonu ve mükemmel kanal durum bilgisinin (Channel State Information, CSI) mevcut olduğu varsayıldığında, sistemin bit hata olasılığı aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$P_e = p(off)\,p(e\,|\,off) + p(on)\,p(e\,|\,on) \tag{3.5}$$

burada $p(on)$ ve $p(off)$ sırasıyla "1" ve "0" bitlerini iletme olasılıklarını belirtmektedir. $p(e|on)$ ve $p(e|off)$, iletilen bit "1" veya "0" olduğunda koşullu bit hata olasılıklarını göstermektedir. Eşit olasılıklı bilgi bitleri varsayıldığında ve problemin simetrisi göz önüne alındığında, $p(on)=p(off)=\frac{1}{2}$ ve $p(e|on)=p(e|off)$, bit hata olasılığı aşağıdaki şekilde basitleştirilebilmektedir:

$$P_e = p(e|on) = p(e|off) \tag{3.6}$$

CSI verildiğinde, koşullu bit hata olasılığı (sönümleme kanalı katsayısına göre koşullandırılmış) aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$P(e|I_{r_{NLOS}}) = p(e|on, I_{r_{NLOS}}) = p(e|off, I_{r_{NLOS}}) = p\left(w > \frac{\eta_r P_T I_{r_{NLOS}}}{2}\right) = Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{r_{NLOS}}}{2\sigma_w}\right) \tag{3.7}$$

burada $\mathrm{Q}(\cdot)$, $Q(y)=\left(1/\sqrt{2\pi}\right)\int_y^\infty \exp\left(-t^2/2\right)dt$ ile tanımlanan Gauss Q fonksiyonudur. Koşulsuz BER, Eşitlik (3.7)'nin sönümleme katsayısı üzerinden ortalaması alınarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} P_{e_{SISO}} &= \int_0^\infty f_{I_{r_{NLOS}}}(I_{r_{NLOS}}) Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{r_{NLOS}}}{2\sigma_w}\right) dI_{r_{NLOS}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2_{X_{NLOS}}}} \int_0^\infty \frac{1}{2I_{r_{NLOS}}} \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{I_{r_{NLOS}}}{I_{0_{NLOS}}}\right) + 2\mu_{X_{NLOS}}\right)^2}{8\sigma^2_{X_{NLOS}}} \right) Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{r_{NLOS}}}{2\sigma_w}\right) dI_{r_{NLOS}} \end{aligned} \tag{3.8}$$

Bir değişken değişikliğinden sonra, Gauss–Hermite dördün formülü aracılığıyla Eşitlik (3.8) için aşağıdaki gibi kapalı formda bir ifade bulunabilmektedir:

$$\begin{aligned} P_{e_{SISO}} &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-z^2\right) Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{0_{NLOS}}}{2\sigma_w} \exp\left(z\sqrt{8\sigma^2_{X_{NLOS}}} - 2\mu_{X_{NLOS}}\right)\right) dz \\ &\approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^{k} \omega_i \times Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{0_{NLOS}}}{2\sigma_w} \exp\left(z_i\sqrt{8\sigma^2_{X_{NLOS}}} - 2\mu_{X_{NLOS}}\right)\right) \end{aligned} \tag{3.9}$$

burada ω_i ve z_i, $i=1,2,\ldots,k$, k 'inci mertebeden Hermite polinomunun ağırlık faktörü ve sıfırlarıdır ve k yaklaşımın mertebesini göstermektedir.

3.2.2.2. MISO NLOS-UV Bağlantılarının BER Başarım Analizi

Bu bölümde, verici çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının BER analizi üzerinde durulmaktadır. OOK modülasyonu varsayıldığında, MISO NLOS-UV durumunda optimum karar kuralı aşağıdaki şekilde verilmektedir: [39]

$$p(r_{MISO} \mid on, I_{r_{NLOS_n}}) \underset{off}{\overset{on}{\gtrless}} p(r_{MISO} \mid off, I_{r_{NLOS_n}}) \tag{3.10}$$

Eşitlik (3.2) dikkate alındığında, "kapalı" ve "açık" durumları için koşullu olasılıklar sırasıyla aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$p(r_{MISO} \mid off, I_{r_{NLOS_n}}) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\sigma_w^2} r_{MISO}^2\right)}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2}} \tag{3.11}$$

$$p(r_{MISO} \mid on, I_{r_{NLOS_n}}) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\sigma_w^2}\left(r_{MISO} - \eta_r P_T \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right)^2\right)}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2}} \tag{3.12}$$

Yukarıda verilen (3.11) ve (3.12) eşitlikleri (3.10)'da yerine yazarak, kararı etkilemeyen ortak terimleri kaldırarak ve bazı basitleştirmeler yaparak, optimum karar kuralı aşağıdaki şekilde verilecektir:

$$r_{MISO} \underset{off}{\overset{on}{\gtrless}} \frac{1}{2}\left(\eta_r P_T \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right) \tag{3.13}$$

Eşitlik (3.13)'te verilen karar kuralı kullanılarak koşullu bit hata olasılıkları aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$
\begin{aligned}
p_{e_{MISO}}\left(off \mid I_{r_{NLOS_n}}\right) &= p\left(r_{MISO} > \frac{1}{2}\left(\eta_r \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right) \mid r_{MISO} = w\right) \\
&= p\left(w > \frac{1}{2}\left(\eta_r \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right)\right) \\
&= Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2\sigma_w} \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right)
\end{aligned} \tag{3.14}
$$

$$
\begin{aligned}
p_{e_{MISO}}\left(on \mid I_{r_{NLOS_n}}\right) &= p\left(r_{MISO} < \frac{1}{2}\left(\eta_r P_T \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right) \mid r_{MISO} = \eta_r P_T \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}} + w\right) \\
&= p\left(\eta_r P_T \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}} + w < \frac{1}{2}\left(\eta_r P_T \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right)\right) \\
&= Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2\sigma_w} \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right)
\end{aligned} \tag{3.15}
$$

$p_e\left(off \mid I_{r_{NLOS_n}}\right) = p_e\left(on \mid I_{r_{NLOS_n}}\right)$ olduğuna dikkat ederek, koşullu bit hata olasılığı (sönümleme kanalı katsayısına göre koşullandırılmış) aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$
P\left(e \mid I_{r_{NLOS_n}}\right) = p_e\left(off \mid I_{r_{NLOS_n}}\right) = p_e\left(on \mid I_{r_{NLOS_n}}\right) = Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2N\sigma_w} \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right) \tag{3.16}
$$

SISO bağlantısı ile adil bir karşılaştırma yapabilmek için, verici çeşitlemeli NLOS-UV sisteminin toplam gücünün bir SISO bağlantısının gücüyle aynı olduğundan emin olmak için Eşitlik (3.16)'ye bir N faktörü dahil edilmiştir. Verici çeşitlemeli NLOS-UV sistemler için koşulsuz BER, Eşitlik (3.16)'nın sönümleme katsayısı üzerinden ortalaması alınarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$
P_{e_{MISO}} = \int_{\mathbf{I}_{r_{NLOS}}} f_{\mathbf{I}_{r_{NLOS}}}\left(\mathbf{I}_{r_{NLOS}}\right) Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2N\sigma_w} \sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right) d\mathbf{I}_{r_{NLOS}} \tag{3.17}
$$

burada $f_{I_{r_{NLOS}}}\left(\mathbf{I}_{r_{NLOS}}\right)$, N uzunluklu $\mathbf{I}_{r_{NLOS}} = \left(I_{r_{NLOS_1}}, I_{r_{NLOS_2}}, \ldots, I_{r_{NLOS_N}}\right)$ vektörünün ortak PDF'sidir. Eşitlik (3.17), N boyutlu bir integralin çözümünü gerektirmektedir. Bağımsız log-normal rasgele değişkenlerin $I_{r_{NLOS_n}}$ toplamı, tek bir log-normal rasgele değişken $I_{r_{NLOS_{MISO}}}$ ile yaklaşılabilmektedir [82]. Bu, Eşitlik (3.17)'yi tek boyutlu bir integral'e indirger ve aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$P_{e_{MISO}} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2I_{r_{NLOS_{MISO}}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}}}} \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{I_{r_{NLOS_{MISO}}}}{I_{0_{NLOS}}} \right) + 2\mu_{X_{NLOS_{MISO}}} \right)^2}{8\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}}} \right) Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{r_{NLOS_{MISO}}}}{2\sigma_w} \right) dI_{r_{NLOS_{MISO}}} \quad (3.18)$$

burada, $I_{r_{NLOS_{MISO}}}$ 'nun log-genlik varyansı ve ortalaması aşağıdaki gibi verilmektedir: [82]

$$\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}} = \ln\left(\frac{D^2}{\mu^2} + 1 \right) \quad (3.19)$$

$$\mu_{X_{NLOS_{MISO}}} = \ln(\mu) - \frac{1}{2}\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}} \quad (3.20)$$

burada, $D^2 = \sum_{i=1}^{N} D_i^2$, $D_i^2 = e^{2\mu_{X_{NLOS}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS}}} \left(e^{\sigma^2_{X_{NLOS}}} - 1 \right)$, ve $\mu = \sum_{i=1}^{N} \mu_i$, $\mu_i = e^{\mu_{X_{NLOS}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS}}/2}$.

Eşitlik (3.18)'in Eşitlik (3.8)'de verilen bir SISO NLOS-UV bağlantısının bit hata olasılığına çok benzer olduğu açıkça görülebilmektedir. Eşitlik (3.8)'e benzer şekilde, verici çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının koşulsuz BER'i için kapalı form ifadesi, Eşitlik (3.18)'in sönümleme katsayısı üzerinden ortalaması alınarak ve Gauss-Hermite dördün formülü kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$P_{e_{MISO}} \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^{k} \omega_i \times Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{0_{NLOS}}}{2\sigma_w} \exp\left(z_i \sqrt{8\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}}} - 2\mu_{X_{NLOS_{MISO}}} \right) \right) \quad (3.21)$$

Yukarıda verilen MISO NLOS-UV sistemlerinin BER performans analizinde, her bir verici açıklığından alıcı açıklığına olan log-normal sönümleme yollarının istatistiksel olarak bağımsız olduğunu varsaydık. Bununla birlikte bazı pratik durumlarda, sönümleme yolları istatistiksel olarak ilişkili olabilirler. İlişkili sönümleme katsayıları durumunda, Eşitlik (3.17)'yi hesaplayabilmek için, İlişkili log-normal rasgele değişkenlerin toplamının dağılımını bilmemiz gerekmektedir. Burada, [83]'te verilen ilişkili log-normal rasgele değişkenlerin toplamının yaklaşımını kullanarak sönümleme yolları arasındaki korelasyonun MISO NLOS-UV bağlantılarının BER performansı üzerindeki etkisini araştıracağız. Varsayılmaktadır ki:

$$I_{r_{NLOS_{MISO}}} = I_{r_{NLOS_1}} + I_{r_{NLOS_2}} + \cdots + I_{r_{NLOS_N}} = e^{X_{NLOS_1}} + e^{X_{NLOS_2}} + \cdots + e^{X_{NLOS_N}} \quad (3.22)$$

burada X_{NLOS_i}, $I_{r_{NLOS_i}}$'ye karşılık gelen Gauss rasgele değişkenidir. Korelasyonun, $X_{NLOS_i}\left(=\ln I_{r_{NLOS_i}}, i=1,2,\ldots,N\right)$ rastgele değişkenlerinin, her biri ortalaması $\mu_{X_{NLOS_i}}$ ve standart sapması $\sigma_{X_{NLOS_i}}$ olan, birlikte ilişkili Gauss rastgele değişkenleri olacağı şekilde varsayılmaktadır. X_{NLOS_i} ve X_{NLOS_j} arasındaki korelasyon katsayısı aşağıdaki gibi verilmiştir: [83]

$$\rho_{ij}=\frac{E\left[\left(X_{NLOS_i}-\mu_{X_{NLOS_i}}\right)\left(X_{NLOS_j}-\mu_{X_{NLOS_j}}\right)\right]}{\sigma_{X_{NLOS_i}}\sigma_{X_{NLOS_j}}} \tag{3.23}$$

Varsayılmaktadır ki:

$$I_{r_{NLOS_{MISO}}}=I_{r_{NLOS_1}}+I_{r_{NLOS_2}}+\cdots+I_{r_{NLOS_N}}=e^{X_{NLOS_1}}+e^{X_{NLOS_2}}+\cdots+e^{X_{NLOS_N}}=e^{X_{NLOS_{MISO}}} \tag{3.24}$$

burada $X_{NLOS_{MISO}}$, $I_{r_{NLOS_{MISO}}}$'ye karşılık gelen log-genlik rasgele değişkenidir ve Gauss dağılımındadır. [83]'te verilen moment eşleştirme yöntemi kullanılarak, ilişkili rastgele değişkenler durumunda $X_{NLOS_{MISO}}$'nun ortalaması ve varyansı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\mu_{X_{NLOS_{MISO}}}=2\ln u_1-\frac{1}{2}\ln u_2 \tag{3.25}$$

$$\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}}=\ln u_2-2\ln u_1 \tag{3.26}$$

burada u_1 ve u_2 aşağıdaki gibi verilmektedir: [83]

$$u_1=\sum_{i=1}^{N}e^{\mu_{X_{NLOS_i}}+\sigma^2_{X_{NLOS_i}}/2} \tag{3.27}$$

$$u_2=\sum_{i=1}^{N}e^{2\mu_{X_{NLOS_i}}+2\sigma^2_{X_{NLOS_i}}}+2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\left\{e^{\left(\mu_{X_{NLOS_i}}+\mu_{X_{NLOS_j}}\right)}e^{\frac{1}{2}\left(\sigma^2_{X_{NLOS_i}}+\sigma^2_{X_{NLOS_j}}+2\rho_{ij}\sigma_{X_{NLOS_i}}\sigma_{X_{NLOS_j}}\right)}\right\} \tag{3.28}$$

Ayrıca, zayıf türbülans (yani $\sigma^2_{X_{NLOS_i}} \ll 1$) ve küçük korelasyon değerleri varsayımı altında ve log-normal parametrelerinin tüm kanallar için eşit olduğu varsayılarak, $\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}}$ aşağıdaki şekilde tahmin edilebilir:

$$\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}} \simeq \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{N} + \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}(N-1)}{N^2} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^{N} \rho_{kl} \ , \ \left(l = 1, 2, \ldots, N\right) \tag{3.29}$$

Korelasyonun kendisini MISO kanalının log-genlik varyansında $\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}}$, bir artış şeklinde gösterdiği Eşitlik (3.29)'den görülebilmektedir. Bu nedenle, iletim yolları arasındaki korelasyon, maksimum elde edilebilir çeşitleme kazancını azaltmaktadır. Eşitlik (3.29)'den, $\rho = 1$'lik bir korelasyon katsayısı için, MISO kanalının SISO kanalınınkiyle özdeş olacağı ve hiçbir çeşitleme kazancının elde edilmeyeceği gözlemlenebilmektedir.

3.2.2.3. SIMO NLOS-UV Bağlantılarının BER Başarım Analizi

Bu bölümde, alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının BER başarım analizi üzerinde durulmaktadır. OOK modülasyonu, alıcıda mükemmel CSI ve EGC yöntemi varsayılarak, optimum karar kuralı aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$p(r_{SIMO} \mid on, I_{r_{NLOS_m}}) \underset{off}{\overset{on}{\gtrless}} p(r_{SIMO} \mid off, I_{r_{NLOS_m}}) \tag{3.30}$$

Eşitlik (3.3) göz önüne alındığında, "kapalı" ve "açık" durumları için alıcı çeşitleme tekniği durumunda koşullu olasılıklar sırasıyla aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$p(r_{SIMO} \mid off, I_{r_{NLOS_m}}) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2_{w_{SIMO}}} r^2_{SIMO}\right)}{\sqrt{\left(2\pi\sigma^2_{w_{SIMO}}\right)}} \tag{3.31}$$

$$p\left(r_{SIMO} \mid on, I_{r_{NLOS_m}}\right) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2_{w_{SIMO}}}\left(r_{SIMO} - \eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right)^2\right)}{\sqrt{2\pi\sigma^2_{w_{SIMO}}}} \tag{3.32}$$

Burada, normal rastgele değişkenlerin toplamının yine normal bir rastgele değişken olduğu gerçeğini göz önüne aldık [84]. Böylece, $w_{SIMO} = \sum_{m=1}^{M} w_m$, $\mu_{w_{SIMO}} = M\mu_w$ ve $\sigma_{w_{SIMO}} = M\sigma_w$. Yukarıdaki ifadeler kullanılarak ve bazı basitleştirmeler yapılarak, EGC alıcısı ile alıcı çeşitleme tekniği olması durumunda optimum karar kuralı aşağıdaki gibi verilecektir:

$$r_{SIMO} \underset{off}{\overset{on}{\gtrless}} \frac{1}{2}\left(\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right) \tag{3.33}$$

Eşitlik (3.33)'te verilen karar kuralı kullanılarak, alıcı çeşitleme tekniği durumunda koşullu bit hata olasılıkları aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned} p_{e_{SIMO}}\left(off \mid I_{r_{NLOS_m}}\right) &= p\left(r_{SIMO} > \frac{1}{2}\left(\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right) \mid r_{SIMO} = w_{SIMO}\right) \\ &= p\left(w_{SIMO} > \frac{1}{2}\left(\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right)\right) \\ &= Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2\sigma_{w_{SIMO}}} \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right) \end{aligned} \tag{3.34}$$

$$\begin{aligned} p_{e_{SIMO}}\left(on \mid I_{r_{NLOS_m}}\right) &= p\left(r_{SIMO} < \frac{1}{2}\left(\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right) \mid r_{SIMO} = \eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}} + w_{SIMO}\right) \\ &= p\left(\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}} + w_{SIMO} < \frac{1}{2}\left(\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right)\right) \\ &= Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2\sigma_{w_{SIMO}}} \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right) \end{aligned} \tag{3.35}$$

$p_e\left(off \mid I_{r_{NLOS_n}}\right) = p_e\left(on \mid I_{r_{NLOS_n}}\right)$ ve $\sigma_{w_{SIMO}} = M\sigma_w$ olduğuna dikkat ederek, alıcı çeşitleme tekniği durumunda koşullu bit hata olasılığı (sönümleme kanalı katsayısına göre koşullandırılmış) aşağıdaki şekilde verilir:

$$P\left(e \mid I_{r_{NLOS_m}}\right) = p_{e_{SIMO}}\left(off \mid I_{r_{NLOS_m}}\right) = p_{e_{SIMO}}\left(on \mid I_{r_{NLOS_m}}\right) = Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2M\sigma_w} \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right) \tag{3.36}$$

Alıcı çeşitlemeli NLOS-UV sistemler için koşulsuz BER, Eşitlik (3.36)'nın sönümleme katsayısı üzerinden ortalaması alınarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$P_{e_{SIMO}} = \int_{\mathbf{I}_{r_{NLOS}}} f_{\mathbf{I}_{r_{NLOS}}}\left(\mathbf{I}_{r_{NLOS}}\right) Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2M\sigma_w} \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right) d\mathbf{I}_{r_{NLOS}} \tag{3.37}$$

burada $f_{I_{r_{NLOS}}}\left(\mathbf{I}_{r_{NLOS}}\right)$, M uzunluklu $\mathbf{I}_{r_{NLOS}}=\left(I_{r_{NLOS_1}},I_{r_{NLOS_2}},\ldots,I_{r_{NLOS_M}}\right)$ vektörünün ortak PDF'sidir. Eşitlik (3.37), M boyutlu bir integralin çözümünü gerektirmektedir. Verici çeşitleme tekniğinde olduğu gibi, bağımsız log-normal rasgele değişkenlerin $I_{r_{NLOS_m}}$ toplamı, tek bir log-normal rasgele değişken $I_{r_{NLOS_{SIMO}}}$ ile yaklaşılabilmektedir [82]. Bu, Eşitlik (3.37)'yi tek boyutlu bir integral'e indirger ve aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$P_{e_{SIMO}}=\int_0^{\infty}\frac{1}{2I_{r_{NLOS_{SIMO}}}}\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2_{X_{NLOS_{SIMO}}}}}\exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{I_{r_{NLOS_{SIMO}}}}{I_{0_{NLOS}}}\right)+2\mu_{X_{NLOS_{SIMO}}}\right)^2}{8\sigma^2_{X_{NLOS_{SIMO}}}}\right)Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{r_{NLOS_{SIMO}}}}{2\sigma_w}\right)dI_{r_{NLOS_{SIMO}}} \tag{3.38}$$

burada $\sigma^2_{X_{NLOS_{SIMO}}}$ ve $\mu_{X_{NLOS_{SIMO}}}$, verici çeşitleme tekniği durumunda olduğu gibi tanımlanmaktadır [39, 82]. Eşitlik (3.21)'e benzer şekilde, alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının koşulsuz BER'i için kapalı form ifadesi, Eşitlik (3.38)'in sönümleme katsayısı üzerinden ortalaması alınarak ve Gauss-Hermit dördün formülü kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$P_{e_{SIMO}}\approx\frac{1}{\sqrt{\pi}}\sum_{i=1}^{k}\omega_i Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{0_{NLOS}}}{2\sigma_w}\exp\left(z_i\sqrt{8\sigma^2_{X_{NLOS_{SIMO}}}}-2\mu_{X_{NLOS_{SIMO}}}\right)\right) \tag{3.39}$$

Kablosuz optik bağlantılar için EGC'li alıcı çeşitleme tekniğinin, $M=N$ olması durumunda verici çeşitleme tekniği ile aynı olduğu bilinmektedir [80]. Eşitlik (3.21) ve (3.39)'dan, verici çeşitleme ve EGC'li alıcı çeşitleme teknikleri için aynı sonucun elde edildiği görülmektedir.

İlişkili sönümleme yolları durumunda, SIMO kanalının log-genlik ortalaması ve varyansının, MISO bağlantıları için verilen aynı yöntemle elde edileceğine dikkat edilmelidir.

3.2.2.4. MIMO NLOS-UV Bağlantılarının BER Başarım Analizi

Bu bölümde, MIMO NLOS-UV bağlantılarının BER başarım analizi üzerinde durulmaktadır. OOK modülasyonu, alıcıda mükemmel CSI ve EGC yöntemi varsayılarak, optimum karar kuralı aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$p(r_{MIMO} \mid on, I_{r_{NLOS_m}}) \underset{off}{\overset{on}{\gtrless}} p(r_{MIMO} \mid off, I_{r_{NLOS_m}}) \tag{3.40}$$

Eşitlik (3.4) göz önüne alındığında, "kapalı" ve "açık" durumları için MIMO NLOS-UV bağlantıları durumunda koşullu olasılıklar sırasıyla aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$p\left(r_{MIMO} \mid off, I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2_{w_{MIMO}}} r^2_{MIMO}\right)}{\sqrt{2\pi\sigma^2_{w_{MIMO}}}} \tag{3.41}$$

$$p\left(r_{MIMO} \mid on, I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2_{w_{MIMO}}}\left(r_{MIMO} - \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} \eta_r P_T I_{r_{NLOS_{nm}}}\right)^2\right)}{\sqrt{2\pi\sigma^2_{w_{MIMO}}}} \tag{3.42}$$

burada $w_{MIMO} = \sum_{m=1}^{M} w_m$, $\mu_{w_{MIMO}} = M\mu_w$ ve $\sigma_{w_{MIMO}} = M\sigma_w$. Yukarıdaki ifadeler kullanılarak ve bazı basitleştirmeler yapılarak, EGC alıcısı ile MIMO NLOS-UV bağlantıları olması durumunda optimum karar kuralı aşağıdaki gibi verilecektir:

$$r_{MIMO} \underset{off}{\overset{on}{\gtrless}} \frac{1}{2}\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}} \tag{3.43}$$

Eşitlik (3.43)'te verilen karar kuralı kullanılarak, MIMO NLOS-UV tekniği durumunda koşullu bit hata olasılıkları aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned} p_{e_{MIMO}}\left(off \mid I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) &= p\left(r_{MIMO} > \frac{1}{2}\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}} \mid r_{MIMO} = w_{MIMO}\right) \\ &= p\left(w_{MIMO} > \frac{1}{2}\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) \\ &= Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2\sigma_{w_{MIMO}}} \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) \end{aligned} \tag{3.44}$$

$$\begin{aligned} p_{e_{MIMO}}\left(on \mid I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) &= p\left(r_{MIMO} < \frac{1}{2}\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}} \mid r_{MIMO} = \eta_r P_T \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}} + w_{MIMO}\right) \\ &= p\left(\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}} + w_{MIMO} < \frac{1}{2}\eta_r P_T \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) \\ &= Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2\sigma_{w_{MIMO}}} \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) \end{aligned} \tag{3.45}$$

$p_e\left(off \mid I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) = p_e\left(on \mid I_{r_{NLOS_{nm}}}\right)$ ve $\sigma_{w_{MIMO}} = M\sigma_w$ olduğuna dikkat ederek, MIMO NLOS-UV bağlantıları durumunda koşullu bit hata olasılığı (sönümleme kanalı katsayısına göre koşullandırılmış) aşağıdaki şekilde verilir:

$$P\left(e \mid I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) = p_{e_{MIMO}}\left(off \mid I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) = p_{e_{MIMO}}\left(on \mid I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) = Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2NM\sigma_w}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) \tag{3.46}$$

SISO bağlantısı ile adil bir karşılaştırma yapabilmek için, MIMO NLOS-UV sisteminin toplam gücünün bir SISO bağlantısının gücüyle aynı olduğundan emin olmak için Eşitlik (3.46)'ye bir N faktörü dahil edilmiştir. MIMO NLOS-UV sistemler için koşulsuz BER, Eşitlik (3.46)'nın sönümleme katsayısı üzerinden ortalaması alınarak aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$P_{e_{MIMO}} = \int_{\mathbf{I}_{r_{NLOS}}} f_{\mathbf{I}_{r_{NLOS}}}\left(\mathbf{I}_{r_{NLOS}}\right) Q\left(\frac{\eta_r P_T}{2MN\sigma_w}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}\right) d\mathbf{I}_{r_{NLOS}} \tag{3.47}$$

burada $f_{I_{r_{NLOS}}}\left(\mathbf{I}_{r_{NLOS}}\right)$, MN uzunluklu $\mathbf{I}_{r_{NLOS}} = \left(I_{r_{NLOS_1}}, I_{r_{NLOS_2}}, \ldots, I_{r_{NLOS_{MN}}}\right)$ vektörünün ortak PDF'sidir. Eşitlik (3.47) çok boyutlu sayısal entegrasyon yoluyla hesaplanabilir. Eşitlik (3.47) için kapalı formda bir ifade bulmak için, $\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}$ ifadesi $\sum_{m=1}^{M}\left(I_{r_{NLOS_{1m}}} + I_{r_{NLOS_{2m}}} + \cdots + I_{r_{NLOS_{Nm}}}\right)$ olarak yeniden yazılabilir. $I_{r_{NLOS_{1m}}} + I_{r_{NLOS_{2m}}} + \cdots + I_{r_{NLOS_{Nm}}}$ ifadesi, bağımsız log-normal rastgele değişkenlerin bir toplamıdır ve tek bir rastgele değişken $I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$ ile yaklaşık olarak tahmin edilebilir. $I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$'e bağlı $\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_m}}}$ ve $\mu_{X_{NLOS_{MISO_m}}}$ aşağıdaki şekilde verilmektedir: [82]

$$\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_m}}} = \ln\left(\frac{\sum_{i=1}^{N} e^{2\mu_{X_{NLOS_i}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_i}}}\left(e^{\sigma^2_{X_{NLOS_i}}} - 1\right)}{\sum_{i=1}^{N} e^{\mu_{X_{NLOS_i}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_i}}/2}} + 1\right) \tag{3.48}$$

$$\mu_{X_{NLOS_{MISO_m}}} = \ln\left(\sum_{i=1}^{N} e^{\mu_{X_{NLOS_i}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_i}}/2}\right) - \frac{\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_m}}}}{2} \tag{3.49}$$

Benzer şekilde, $\sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$ ifadesi de tek bir rastgele değişken $I_{r_{NLOS_{MIMO}}}$ ile yaklaştırılabilen bağımsız log-normal rastgele değişkenlerin bir toplamıdır. $I_{r_{NLOS_{MIMO}}}$'ye bağlı $\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}}$ ve $\mu_{X_{NLOS_{MIMO}}}$ aşağıdaki şekilde verilmektedir: [82]

$$\begin{aligned}
\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}} &= \ln\left(\frac{A}{B}+1\right) \\
\mu_{X_{NLOS_{MIMO}}} &= \ln(B) - \frac{\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}}}{2} \\
A &= \sum_{i=1}^{M}\left\{ e^{2\mu_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}} \left(e^{\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}} - 1 \right)\right\} \\
B &= \sum_{i=1}^{M} e^{\mu_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}/2}
\end{aligned} \tag{3.50}$$

Bu yaklaşım, Eşitlik (3.47)'yi tek boyutlu bir integral'e indirger ve aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$P_{e_{MIMO}} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2I_{r_{NLOS_{MIMO}}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}}}} \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{I_{r_{NLOS_{MIMO}}}}{I_{0_{NLOS}}} \right) + 2\mu_{X_{NLOS_{MIMO}}} \right)^2}{8\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}}} \right) Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{r_{NLOS_{MIMO}}}}{2\sigma_w} \right) dI_{r_{NLOS_{MIMO}}} \tag{3.51}$$

Eşitlik (3.21)'e benzer şekilde, MIMO NLOS-UV bağlantısının koşulsuz BER'i için kapalı form ifadesi, Eşitlik (3.51)'in sönümleme katsayısı üzerinden ortalaması alınarak ve Gauss-Hermite dördün formülü kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$P_{e_{MIMO}} \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^{k} \omega_i Q\left(\frac{\eta_r P_T I_{0_{NLOS}}}{2\sigma_w} \exp\left(z_i \sqrt{8\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}}} - 2\mu_{X_{NLOS_{MIMO}}} \right) \right) \tag{3.52}$$

İlişkili sönümleme yolları durumunda, MIMO kanalının log-genlik ortalamasının ve varyansının, MISO bağlantıları için verilen aynı yöntemle elde edileceğine dikkat edilmelidir.

3.2.3. Kesinti Olasılığı Analizi

Kablosuz optik haberleşme sistemlerinde, atmosferik türbülans, kanal uyum süresinin neredeyse 1-100 ms olduğu, çok yavaş değişen bir sönümlemeye neden olmaktadır. Bu nedenle, tipik iletim hızları için, sönümleme, milyonlarca ardışık bite kadar sabit kalır [56]. Bu tür yarı-

statik kanallar için, sönümlemenin neden olduğu hatalar artık bağımsız değildir. Bu nedenle, kesinti olasılığı, sistem performansını değerlendirmek için uygun bir ölçüdür.

Bu bölümde, atmosferik türbülans kanalları durumunda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV iletişim sistemlerinin kesinti olasılığı analizi araştırılmaktadır. Hem bağımsız hem de ilişkili atmosferik türbülans kaynaklı sönümleme kanalları ele alınmaktadır. SISO, MISO, SIMO ve MIMO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı için kapalı form ifadeler türetilmektedir.

$C(\gamma)$ anlık elektriksel SNR'e karşılık gelen anlık kapasiteyi göstersin. R_0 iletim hızındaki kesinti olasılığı aşağıdaki gibi verilebilir [85].

$$P_{out}(R_0) = P_r\left(C(\gamma) < R_0\right) \tag{3.53}$$

$C(\cdot)$, γ'ya göre monoton olarak arttığından, Eşitlik (3.53) ile verilen ifade aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$P_{out}(R_0) = P_r\left(\gamma < \gamma_{th}\right) \tag{3.54}$$

burada $\gamma_{th} = C^{-1}(R_0)$ eşik SNR'ı göstermektedir. SNR γ_{th}'ı geçerse her hangi bir kesinti olayına rastlanmaz. Bu bölümde ilk olarak, uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantıları için bir kıyaslama ölçütü olan SISO bağlantısı için kesinti olasılığı ifadesi çıkarılmaktadır.

3.2.3.1. SISO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi

Bu bölümde, SISO NLOS-UV bağlantısı için kesinti olasılığı ifadesi türetilmiştir. Eşitlik (3.1) dikkate alındığında, SISO NLOS-UV bağlantısı için alınan elektriksel SNR, aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\gamma_{SISO} = \frac{\eta_r^2 P_T^2 I_{r_{NLOS}}^2}{\sigma_w^2} \tag{3.55}$$

Eşitlik (3.55) ile verilen ifadeyi Eşitlik (3.54)'te yerine yazarak, SISO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$P_{out_{SISO}} = P_r\left(\frac{\eta_r^2 P_T^2 I_{r_{NLOS}}^2}{\sigma_w^2} < \gamma_{th}\right) = P_r\left(I_{r_{NLOS}} < \sqrt{\frac{\sigma_w^2 \gamma_{th}}{\eta_r^2 P_T^2}}\right) \tag{3.56}$$

Eşitlik (3.56)'deki $I_{r_{NLOS}}$, PDF'si Eşitlik (2.25) ile verilen bir log-normal rastgele değişkenidir. Bu nedenle, SISO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı, log-normal dağılımın kümülatif dağılım işlevi (Cumulative Distribution Function, cdf) kullanılarak aşağıdaki gibi türetilebilir:

$$P_{out_{SISO}} = Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avg}}{\gamma_{th}}}\right) - 2\mu_{X_{NLOS}}}{2\sigma_{X_{NLOS}}}\right) \tag{3.57}$$

burada SNR_{avg}, $SNR_{avg} = \eta^2 P_T^2 / \sigma_w^2$ ile tanımlanan ortalama sinyal-gürültü oranıdır ve $Q(\cdot)$, $Q(x) = (1/2\pi)\int_x^\infty \exp(-u^2/2)\, du$ ile tanımlanan Gauss Q-fonksiyonudur.

3.2.3.2. MISO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi

Bu bölümde, MISO NLOS-UV bağlantısı için kesinti olasılığı ifadesi elde edilmektedir. Eşitlik (3.2) dikkate alındığında, MISO NLOS-UV bağlantısı için alınan elektriksel SNR, aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\gamma_{MISO} = \frac{\left(\eta_r^2\left(\frac{P_T}{N}\right)\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right)^2}{\sigma_w^2} \tag{3.58}$$

SISO bağlantısı ile adil bir karşılaştırma için, MISO NLOS-UV bağlantısının toplam iletilen gücünün SISO bağlantısının gücüyle aynı olduğundan emin olmak için her bir verici açıklığının iletim gücü N oranında azaltılmıştır. Eşitlik (3.58) ile verilen ifadeyi Eşitlik (3.54)'te yerine yazarak, MISO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$P_{out_{MISO}} = P_r\left(\frac{\eta_r^2 P_T^2\left(\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}\right)^2}{N^2\sigma_w^2} < \gamma_{th}\right) = P_r\left(\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}} < \sqrt{\frac{N^2\sigma_w^2\gamma_{th}}{\eta_r^2 P_T^2}}\right) \tag{3.59}$$

$I_{r_{NLOS}}$ bir log-normal rasgele değişkeni olduğundan, $\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}$, hem bağımsız hem de ilişkili durumlarda tek bir log-normal rasgele değişkeniyle yaklaşık olarak tahmin edilebilen log-normal rasgele değişkenlerin toplamıdır.

a. Özdeş bağımsız log-normal rastgele değişkenleri olma durumu

Özdeş bağımsız log-normal rasgele değişkenlerin toplamı, $\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_n}}$ moment eşleştirme yöntemi [82] kullanılarak tek bir log-normal rasgele değişkeni $I_{r_{NLOS_{MISO}}}$ ile tahmin edilebilir. Yeni log-normal rasgele değişkenin log-genlik ortalaması $\mu_{X_{NLOS_{MISO}}}$ ve varyansı $\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}}$ aşağıdaki gibi tanımlanır [82].

$$\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}} = \ln\left(\frac{D^2}{\mu^2}+1\right) \tag{3.60}$$

$$\mu_{X_{NLOS_{MISO}}} = \ln(\mu) - \frac{\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}}}{2} \tag{3.61}$$

burada, D^2 ve μ aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır: [82]

$$D^2 = \sum_{i=1}^{N} D_i^2,\ D_i^2 = e^{2\mu_{X_{NLOS}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS}}}\left(e^{\sigma^2_{X_{NLOS}}} - 1\right) \tag{3.62}$$

$$\mu = \sum_{i=1}^{N} \mu_i,\ \mu_i = e^{\mu_{X_{NLOS}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS}}/2} \tag{3.63}$$

b. İlişkili log-normal rastgele değişkenleri olma durumu

Her bir verici antenden alınan sinyallerin ilişkisiz olma koşulu $\sqrt{\lambda d} < d'$ şeklinde verilmektedir [81]. Burada d', verici antenler arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bağımsız atmosferik sönümleme kanalları durumunda kesinti olasılığının türetilmesinde kullanılacak olan bağımsız log-normal rastgele değişkenlerin toplamı için yaklaşım daha önce sağlanmıştır. Bununla birlikte, çoğu pratik durumlarda, sönümleme yolları istatistiksel olarak ilişkilidirler. Bu nedenle, ilişkili atmosferik türbülans kanalları ele alınmakta ve MISO NLOS-UV bağlantısı

için kesinti olasılık ifadesi türetilmektedir. Bunu yapmak için, ilişkili log-normal rastgele değişkenlerin toplamı için bir yaklaşım sağlanmalıdır.

İlişkili log-normal rasgele değişkenlerin toplamı, $\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS}}$, [83]'te verilen ilişkili log-normal rasgele değişkenlerin toplamı için yaklaşım yöntemi kullanılarak tek bir rasgele değişken olan, $I_{r_{NLOS_{MISO}}}$, ile yaklaşık olarak verilebilir. Varsayılmaktadır ki:

$$I_{r_{NLOS_{MISO}}} = I_{r_{NLOS_1}} + I_{r_{NLOS_2}} + \cdots + I_{r_{NLOS_N}} = e^{X_{NLOS_1}} + e^{X_{NLOS_2}} + \cdots + e^{X_{NLOS_N}} = e^{X_{NLOS_{MISO}}} \tag{3.64}$$

burada X_{NLOS_i} , $I_{r_{NLOS_i}}$ için karşılık gelen Gauss rasgele değişkeni ve $X_{NLOS_{MISO}}$, $I_{r_{NLOS_{MISO}}}$ için karşılık gelen Gauss rasgele değişkenidir. Korelasyonun, $X_{NLOS_i}\left(=\ln I_{r_{NLOS_i}}, i=1,2,\ldots,N\right)$ rastgele değişkenlerinin, her biri $\mu_{X_{NLOS_i}}$ ortalaması ve $\sigma_{X_{NLOS_i}}$ standart sapmasına sahip, birlikte ilişkili Gauss rasgele değişkenleri olacağı şekilde olduğu varsayılır. X_{NLOS_i} ve X_{NLOS_j}'nin korelasyon katsayısı aşağıdaki şekilde verilir: [83]

$$\rho_{ij_{MISO}} = \frac{E\left[\left(X_{NLOS_i} - \mu_{X_{NLOS_i}}\right)\left(X_{NLOS_j} - \mu_{X_{NLOS_j}}\right)\right]}{\sigma_{X_{NLOS_i}}\sigma_{X_{NLOS_j}}} \tag{3.65}$$

Kaynak [83]'te verilen moment eşleştirme yöntemi kullanılarak, ilişkili rastgele değişkenler durumunda $X_{NLOS_{MISO}}$'nun ortalaması ve varyansı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned} \mu_{X_{NLOS_{MISO}}} &= 2\ln u_1 - \frac{1}{2}\ln u_2 \\ \sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}} &= \ln u_2 - 2\ln u_1 \end{aligned} \tag{3.66}$$

burada u_1 ve u_2 aşağıdaki gibi verilmektedir [83]

$$\begin{aligned} u_1 &= \sum_{i=1}^{N} e^{\mu_{X_{NLOS_i}} + \sigma^2_{X_{NLOS_i}}/2} \\ u_2 &= \sum_{i=1}^{N} e^{2\mu_{X_{NLOS_i}} + 2\sigma^2_{X_{NLOS_i}}} + 2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\left\{ e^{\left(\mu_{X_{NLOS_i}} + \mu_{X_{NLOS_j}}\right)} e^{\frac{1}{2}\left(\sigma^2_{X_{NLOS_i}} + \sigma^2_{X_{NLOS_j}} + 2\rho_{ij_{MISO}}\sigma_{X_{NLOS_i}}\sigma_{X_{NLOS_j}}\right)} \right\} \end{aligned} \tag{3.67}$$

Ayrıca, zayıf türbülans (yani $\sigma^2_{X_{NLOS_i}} \ll 1$) ve küçük korelasyon değerleri varsayımı altında ve log-normal parametrelerinin tüm kanallar için eşit olduğu varsayıldığında, $\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}}$ aşağıdaki şekilde yaklaştırılabilir:

$$\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO}}} \approx \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{N} + \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}(N-1)}{N^2} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq l}}^{N} \rho_{kl} \qquad (l = 1, 2, \ldots, N) \tag{3.68}$$

Hem bağımsız hem de ilişkili atmosferik türbülans sönümleme kanalları durumunda log-normal rastgele değişkenlerin toplamı için yukarıda verilen yaklaşımlar kullanılarak, MISO NLOS-UV bağlantıları için kesinti olasılık ifadesi aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$P_{out_{MISO}} = P_r\left(NI_{r_{NLOS_{MISO}}} < \sqrt{\frac{N^2\sigma_w^2\gamma_{th}}{\eta_r^2 P_T^2}}\right) = Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right) - 2\mu_{X_{NLOS_{MISO}}}}{2\sigma_{X_{NLOS_{MISO}}}}\right) \tag{3.69}$$

3.2.3.3. SIMO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi

Bu bölümde, SIMO NLOS-UV bağlantısı için kesinti olasılığı ifadesi elde edilmektedir. Eşitlik (3.3) dikkate alındığında, EGC alıcılı SIMO NLOS-UV bağlantısı için alınan elektriksel SNR aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\gamma_{SIMO} = \frac{\eta_r^2 P_T^2 \left(\sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right)^2}{\sigma^2_{w_{SIMO}}} \tag{3.70}$$

Bağımsız ve özdeş olarak dağıtılmış normal rasgele değişkenlerin toplamı yine normal bir rasgele değişken olduğundan; w_{SIMO}, $w_{SIMO} = \sum_{m=1}^{M} w_m$ şeklinde verilmekte ve burada $\mu_{w_{SIMO}} = M\mu_w$ ve $\sigma_{w_{SIMO}} = M\sigma_w$ şeklinde tanımlanmaktadır [84]. Eşitlik (3.70)'i Eşitlik (3.54)'te yerine yazarak, SIMO NLOS-UV bağlantısı için kesinti olasılığı ifadesi aşağıdaki şekilde türetilebilir:

$$P_{out_{SIMO}} = P_r\left(\frac{\eta_r^2 P_T^2\left(\sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}\right)^2}{\sigma^2_{w_{SIMO}}} < \gamma_{th}\right) = P\left(\sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}} < \sqrt{\frac{M^2\sigma_w^2\gamma_{th}}{\eta_r^2 P_T^2}}\right) \tag{3.71}$$

MISO durumunda olduğu gibi, özdeş bağımsız ve ilişkili log-normal rasgele değişkenlerin toplamı, $\sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_m}}$, tek bir log-normal rasgele değişken, $I_{r_{NLOS_{SIMO}}}$ ile yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Yeni log-normal rastgele değişkenin ortalaması, $\mu_{X_{NLOS_{SIMO}}}$, ve varyansı, $\sigma^2_{X_{NLOS_{SIMO}}}$, bağımsız durum için Eşitlik (3.60) ve (3.61)'de ve ilişkili durum için Eşitlik (3.66) ve (3.67)'de verilenle aynı şekilde tanımlanmaktadır. Eşitlik (3.71) ve log-normal dağılımın cdf'si kullanılarak SIMO NLOS-UV sistemlerinin kesinti olasılığı aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$P_{out_{SIMO}} = P_r\left(MI_{r_{NLOS_{SIMO}}} < \sqrt{\frac{M^2\sigma_w^2\gamma_{th}}{\eta_r^2 P_T^2}}\right) = Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right) - 2\mu_{X_{NLOS_{SIMO}}}}{2\sigma_{X_{NLOS_{SIMO}}}}\right) \tag{3.72}$$

3.2.3.4. MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi

Bu bölümde, MIMO NLOS-UV bağlantısı için kesinti olasılığı ifadesi elde edilmektedir. Eşitlik (3.4) dikkate alındığında, EGC alıcılı MIMO NLOS-UV bağlantısı için alınan elektriksel SNR aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\gamma_{MIMO} = \frac{\left(\eta_r\left(\frac{P_T}{N}\right)\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}\right)^2}{\sigma^2_{w_{MIMO}}} \tag{3.73}$$

SISO bağlantısı ile adil bir karşılaştırma için, MIMO NLOS-UV bağlantısının toplam iletilen gücünün SISO bağlantısının gücüyle aynı olduğundan emin olmak için her bir verici açıklığının iletim gücü N oranında azaltılmıştır. Burada, SIMO NLOS-UV bağlantılarda olduğu gibi, iid normal rasgele değişkenlerinin toplamının dağılımı kullanılmıştır. Böylece, w_{MIMO}, $w_{MIMO} = \sum_{m=1}^{M} w_m$ şeklinde olup, burada $\mu_{w_{MIMO}} = M\mu_w$ ve $\sigma_{w_{MIMO}} = M\sigma_w$ şeklinde

verilmektedir. Eşitlik (3.73)'ü Eşitlik (3.54)'te yerine yazarak, MIMO NLOS-UV bağlantısı için kesinti olasılığı ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$P_{out_{MIMO}} = P_r\left(\frac{\left(\eta_r\left(\frac{P_T}{N}\right)\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}\right)^2}{\sigma^2_{w_{MIMO}}} < \gamma_{th}\right) = P_r\left(\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}} < \sqrt{\frac{N^2M^2\sigma_w^2\gamma_{th}}{\eta_r^2 P_T^2}}\right) \quad (3.74)$$

$\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}$ ifadesi, hem bağımsız hem de ilişkili log-normal rasgele değişken durumları için tek bir log-normal rasgele değişkeniyle yaklaştırılabilen $N \times M$ log-normal rasgele değişkenlerinin bir toplamıdır. Eşitlik (3.74) için kapalı formda bir çözüm elde etmek için, önce $\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}$ terimi hem bağımsız hem de ilişkili log-normal kanal durumları için tek bir log-normal rastgele değişken olarak gösterilmelidir.

a. Özdeş bağımsız log-normal rastgele değişkenleri olma durumu

$\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}$ ifadesi, $\sum_{m=1}^{M}\left(I_{r_{NLOS_{1m}}} + I_{r_{NLOS_{2m}}} + \cdots + I_{r_{NLOS_{Nm}}}\right)$ olarak yeniden yazılabilir. Açıkça görülmektedir ki $I_{r_{NLOS_{1m}}} + I_{r_{NLOS_{2m}}} + \cdots + I_{r_{NLOS_{Nm}}}$ ifadesi, bağımsız log-normal rastgele değişkenlerin bir toplamıdır ve tek bir rastgele değişken, $I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$, ile yaklaşık olarak tahmin edilebilir. $I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$'e bağlı $\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_m}}}$ ve $\mu_{X_{NLOS_{MISO_m}}}$ aşağıdaki şekilde verilmektedir: [82]

$$\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_m}}} = \ln\left(\frac{\sum_{i=1}^{N} e^{2\mu_{X_{NLOS_i}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_i}}}\left(e^{\sigma^2_{X_{NLOS_i}}} - 1\right)}{\sum_{i=1}^{N} e^{\mu_{X_{NLOS_i}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_i}}/2}} + 1\right) \quad (3.75)$$

$$\mu_{X_{NLOS_{MISO_m}}} = \ln\left(\sum_{i=1}^{N} e^{\mu_{X_{NLOS_i}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_i}}/2}\right) - \frac{\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_m}}}}{2} \quad (3.76)$$

Benzer şekilde, $\sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$ ifadesi de tek bir rastgele değişken $I_{r_{NLOS_{MIMO}}}$ ile yaklaştırılabilen bağımsız log-normal rastgele değişkenlerin bir toplamıdır. $I_{r_{NLOS_{MIMO}}}$'ye bağlı $\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}}$ ve $\mu_{X_{NLOS_{MIMO}}}$ aşağıdaki şekilde verilmektedir: [82]

$$\begin{aligned}
\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}} &= \ln\left(\frac{A}{B}+1\right) \\
\mu_{X_{NLOS_{MIMO}}} &= \ln(B) - \frac{\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}}}{2} \\
A &= \sum_{i=1}^{M}\left\{ e^{2\mu_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}} \left(e^{\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}} - 1 \right) \right\} \\
B &= \sum_{i=1}^{M} e^{\mu_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}} e^{\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO_{m_i}}}}/2}
\end{aligned} \tag{3.77}$$

b. İlişkili log-normal rastgele değişkenleri olma durumu

$\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}$ ifadesi, $\sum_{m=1}^{M}\left(I_{r_{NLOS_{1m}}} + I_{r_{NLOS_{2m}}} + \cdots + I_{r_{NLOS_{Nm}}} \right)$ olarak yeniden yazılabilir, burada $I_{r_{NLOS_{1m}}} + I_{r_{NLOS_{2m}}} + \cdots + I_{r_{NLOS_{Nm}}}$ ilişkili log-normal rasgele değişkenlerin toplamıdır ve [83]'te verilen moment eşleştirme yöntemi kullanılarak tek bir log-normal rasgele değişkeni, $I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$, ile tahmin edilebilmektedir. Varsayılmaktadır ki:

$$I_{r_{NLOS_{MISO_m}}} = I_{r_{NLOS_{1m}}} + I_{r_{NLOS_{2m}}} + \cdots + I_{r_{NLOS_{Nm}}} = e^{X_{NLOS_{1m}}} + e^{X_{NLOS_{2m}}} + \cdots + e^{X_{NLOS_{Mm}}} = e^{X_{NLOS_{MISO_m}}} \tag{3.78}$$

burada $X_{NLOS_{im}}$, $I_{r_{NLOS_{im}}}$'e karşılık gelen Gauss rasgele değişkeni ve $X_{NLOS_{MISO_m}}$, $I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$'e karşılık gelen Gauss rasgele değişkenidir. Korelasyonun, $X_{NLOS_{im}}\left(=\ln I_{r_{NLOS_{im}}}, i=1,2,\ldots,N\right)$ rastgele değişkenlerinin, her biri $\mu_{X_{NLOS_{im}}}$ ortalaması ve $\sigma_{X_{NLOS_{im}}}$ standart sapmasına sahip, birlikte ilişkili Gauss rasgele değişkenleri olacağı şekilde olduğu varsayılır. $X_{NLOS_{im}}$ ve $X_{NLOS_{jm}}$ 'nin korelasyon katsayısı aşağıdaki şekilde verilmektedir: [83]

$$\rho_{ij_{MISO_m}} = \frac{E\left[\left(X_{NLOS_{im}} - \mu_{X_{NLOS_{im}}}\right)\left(X_{NLOS_{jm}} - \mu_{X_{NLOS_{jm}}}\right)\right]}{\sigma_{X_{NLOS_{im}}}\sigma_{X_{NLOS_{jm}}}} \tag{3.79}$$

Kaynak [83]'te verilen moment eşleştirme yöntemi kullanılarak, ilişkili rastgele değişkenler durumunda $X_{NLOS_{MISO_m}}$ 'nin ortalaması ve varyansı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned}\mu_{X_{NLOS_{MISO_m}}} &= 2\ln u_{1m} - \frac{1}{2}\ln u_{2m} \\ \sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_m}}} &= \ln u_{2m} - 2\ln u_{1m}\end{aligned} \tag{3.80}$$

burada u_{1m} ve u_{2m} aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\begin{aligned}u_{1m} &= \sum_{i=1}^{N} e^{\mu_{X_{NLOS_{im}}} + \sigma^2_{X_{NLOS_{im}}}/2} \\ u_{2m} &= \sum_{i=1}^{N} e^{2\mu_{X_{NLOS_{im}}} + 2\sigma^2_{X_{NLOS_{im}}}} \\ &\quad + 2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\left\{ e^{\left(\mu_{X_{NLOS_{im}}} + \mu_{X_{NLOS_{jm}}}\right)} e^{\frac{1}{2}\left(\sigma^2_{X_{NLOS_{im}}} + \sigma^2_{X_{NLOS_{jm}}} + 2\rho_{ijMISO_m}\sigma_{X_{NLOS_{im}}}\sigma_{X_{NLOS_{jm}}}\right)} \right\}\end{aligned} \tag{3.81}$$

Şimdi $\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}}$ ifadesi, $\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} I_{r_{NLOS_{nm}}} = \sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$ şeklinde sadeleştirilmiştir.

$\sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_{MISO_m}}}$ 'nin aynı zamanda, $\sum_{m=1}^{M} I_{r_{NLOS_{MISO_m}}} = I_{r_{NLOS_{MISO_1}}} + I_{r_{NLOS_{MISO_2}}} + \cdots + I_{r_{NLOS_{MISO_M}}}$ olarak ifade edilebilen ve aynı yöntem kullanılarak tek bir rasgele değişkeni olan $I_{r_{NLOS_{MIMO}}}$ ile yaklaştırılabilen ilişkili log-normal rasgele değişkenlerin bir toplamı olduğu da görülebilmektedir. Varsayılabilir ki

$$\begin{aligned}I_{r_{NLOS_{MIMO}}} &= I_{r_{NLOS_{MISO_1}}} + I_{r_{NLOS_{MISO_2}}} + \cdots + I_{r_{NLOS_{MISO_M}}} \\ &= e^{X_{NLOS_{MISO_1}}} + e^{X_{NLOS_{MISO_2}}} + \cdots + e^{X_{NLOS_{MISO_M}}} = e^{X_{NLOS_{MIMO}}}\end{aligned} \tag{3.82}$$

Burada $X_{NLOS_{MISO_i}}$, $I_{r_{NLOS_{MISO_i}}}$'ye karşılık gelen Gauss rasgele değişkeni ve $X_{NLOS_{MIMO}}$, $I_{r_{NLOS_{MIMO}}}$'ye karşılık gelen Gauss rasgele değişkenidir. Korelasyonun, $X_{NLOS_{MISO_i}}\left(=\ln I_{r_{NLOS_{MISO_i}}}, i=1,2,\ldots,\mathrm{M}\right)$ rastgele değişkenlerinin, her biri $\mu_{X_{NLOS_{MISO_i}}}$ ortalaması ve $\sigma_{X_{NLOS_{MISO_i}}}$ standart sapmasına sahip, birlikte ilişkili Gauss rasgele değişkenleri olacağı şekilde

olduğu varsayılır. $X_{NLOS_{MISO_i}}$ ve $X_{NLOS_{MISO_j}}$'nin korelasyon katsayısı aşağıdaki şekilde verilmektedir: [83]

$$\rho_{ij_{MIMO}} = \frac{E\left[\left(X_{NLOS_{MISO_i}} - \mu_{X_{NLOS_{MISO_i}}}\right)\left(X_{NLOS_{MISO_j}} - \mu_{X_{NLOS_{MISO_j}}}\right)\right]}{\sigma_{x_{NLOS_{MISO_i}}}\sigma_{x_{NLOS_{MISO_j}}}} \tag{3.83}$$

Kaynak [83]'te verilen moment eşleştirme yöntemi kullanılarak, ilişkili rastgele değişkenler durumunda $X_{NLOS_{MIMO}}$'nun ortalaması ve varyansı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned} \mu_{X_{NLOS_{MIMO}}} &= 2\ln u_1 - \frac{1}{2}\ln u_2 \\ \sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}} &= \ln u_2 - 2\ln u_1 \end{aligned} \tag{3.84}$$

burada u_1 ve u_2 aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\begin{aligned} u_1 &= \sum_{i=1}^{M} e^{\mu_{X_{NLOS_{MISO_i}}} + \sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_i}}}/2} \\ u_2 &= \sum_{i=1}^{M} e^{2\mu_{X_{NLOS_{MISO_i}}} + 2\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_i}}}} \\ &\quad + 2\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M}\left\{ e^{\left(\mu_{X_{NLOS_{MISO_i}}} + \mu_{X_{NLOS_{MISO_j}}}\right)} e^{\frac{1}{2}\left(\sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_i}}} + \sigma^2_{X_{NLOS_{MISO_j}}} + 2\rho_{ijMIMO}\sigma_{X_{NLOS_{MISO_i}}}\sigma_{X_{NLOS_{MISO_j}}}\right)} \right\} \end{aligned} \tag{3.85}$$

Ayrıca, zayıf türbülans (yani $\sigma^2_{X_{NLOS_i}} \ll 1$) ve küçük korelasyon değerleri varsayımı altında ve log-normal parametrelerinin tüm kanallar için eşit olduğu varsayılarak, $\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}}$ aşağıdaki şekilde tahmin edilebilir:

$$\sigma^2_{X_{NLOS_{MIMO}}} \approx \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{NM} + \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}(NM-1)}{(NM)^2}\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq l}}^{NM}\rho_{kl} \qquad (l = 1, 2, \ldots, NM) \tag{3.86}$$

Hem bağımsız hem de ilişkili atmosferik türbülans sönümleme kanalları durumunda log-normal rastgele değişkenlerin toplamı için yukarıda verilen yaklaşımlar kullanılarak, MIMO NLOS-UV bağlantıları için kesinti olasılık ifadesi aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$P_{out_{MIMO}} = P_r\left(NMI_{r_{NLOS_{MIMO}}} < \sqrt{\frac{N^2 M^2 \sigma_w^2 \gamma_{th}}{\eta_r^2 P_T^2}} \right) = Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}} \right) - 2\mu_{X_{NLOS_{MIMO}}}}{2\sigma_{X_{NLOS_{MIMO}}}} \right) \tag{3.87}$$

3.2.4. Uzaysal Çeşitlemeli NLOS-UV Bağlantılarının Çeşitleme Kazancı Analizi

Geleneksel olarak çeşitleme kazancı veya çeşitleme mertebesi, bir log-log ölçeğinde SNR'e karşı performans metriğinin (BER veya Kesinti olasılığı) negatif asimptotik eğimi olarak belirlenebilir. Bu tanıma göre çeşitleme kazancı aşağıdaki şekilde verilebilmektedir: [86]

$$d_G = -\lim_{SNR\to\infty} \frac{\ln\left(P_{out}\right)}{\ln\left(SNR\right)} \tag{3.88}$$

Bununla birlikte, çeşitleme kazancının geleneksel tanımı, log-normal kanallardaki performans metriğinin su şelalesi gibi davranışı nedeniyle bu tip sönümlemeli kanallar için kullanılamaz. Bu nedenle, log-normal sönümlemeli kanallarının çeşitleme kazancını değerlendirmek için [86]'da çeşitleme kazancının göreceli bir ölçüsü tanımlanmıştır. Uzaysal çeşitlemeli log-normal kanallar için göreceli çeşitleme kazancı, $D_{R_{SD}}$, aşağıdaki gibi verilmektedir: [86]

$$D_{R_{SD}}\left(SNR_{avrg}\right) = \frac{\partial \ln\left(P_{out_{SD}}\right) / \partial \ln\left(SNR_{avrg}\right)}{\partial \ln\left(P_{out_{SISO}}\right) / \partial \ln\left(SNR_{avrg}\right)} \tag{3.89}$$

burada $P_{out_{SD}}$, uzaysal çeşitlemeli bir NLOS-UV bağlantısının (örneğin, MISO, SIMO ve MIMO NLOS-UV bağlantısı) kesinti olasılığını göstermektedir. Burada, uzaysal çeşitlemeli bir NLOS-UV bağlantısının göreceli çeşitleme kazancı, uzaysal çeşitleme şemaları için bir kıyaslama ölçütü olan SISO bağlantısına göre verilmiştir.

Asimptotik göreceli çeşitleme kazancı, $AD_{R_{SD}}$, daha sonra aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$AD_{R_{SD}} = \lim_{SNR_{avrg}\to\infty} D_{R_{SD}}\left(SNR_{avrg}\right) \tag{3.90}$$

SISO ve uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılık ifadeleri göz önüne alındığında, SISO ve uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılıkları için, Q fonksiyonunda iyi bilinen sınır uygulanarak aşağıdaki gibi bir üst sınır bulunabilir: [87]

$$P_{out_{SISO}} \leq \frac{1}{2}\exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right)-2\mu_{X_{NLOS}}\right)^2}{8\sigma^2_{X_{NLOS}}}\right) \tag{3.91}$$

$$P_{out_{SD}} \leq \frac{1}{2}\exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right)-2\mu_{X_{NLOS_{SD}}}\right)^2}{8\sigma^2_{X_{NLOS_{SD}}}}\right) \tag{3.92}$$

burada $\mu_{X_{NLOS_{SD}}}$ ve $\sigma^2_{X_{NLOS_{SD}}}$, sırasıyla, uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV kanalının sönümlemeli kanal katsayısına karşılık gelen $X_{NLOS_{SD}}$ Gauss rasgele değişkeninin ortalamasını ve varyansını belirtmektedir. Eşitlik (3.91) ve (3.92)'yi Eşitlik (3.89)'da yerine yazarak, ve bazı matematiksel işlemler yapılarak, uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının göreceli çeşitleme kazancı için bir üst sınır aşağıdaki gibi verilebilmektedir:

$$\begin{aligned} D_{R_{SD}}\left(SNR_{avrg}\right) &\leq \frac{\frac{\partial}{\partial \ln(SNR_{avrg})}\ln\left(\frac{1}{2}\exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right)-2\mu_{X_{NLOS_{SD}}}\right)^2}{8\sigma^2_{X_{NLOS_{SD}}}}\right)\right)}{\frac{\partial}{\partial \ln(SNR_{avrg})}\ln\left(\frac{1}{2}\exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right)-2\mu_{X_{NLOS}}\right)^2}{8\sigma^2_{X_{NLOS}}}\right)\right)} \\ &= \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}\left(\ln\left(\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}\right)-4\mu_{X_{NLOS_{SD}}}\right)}{\sigma^2_{X_{NLOS_{SD}}}\left(\ln\left(\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}\right)-4\mu_{X_{NLOS}}\right)} \end{aligned} \tag{3.93}$$

Uygulanan üst sınır, yüksek SNR değerleri için Q-fonksiyonuna yakınsadığından, uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantıları için asimptotik göreceli çeşitleme kazancı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$AD_{R_{SD}} \simeq \lim_{SNR_{avrg}\to\infty} \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}\left(\ln\left(\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}\right)-4\mu_{X_{NLOS_{SD}}}\right)}{\sigma^2_{X_{NLOS_{SD}}}\left(\ln\left(\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}\right)-4\mu_{X_{NLOS}}\right)} = \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{\sigma^2_{X_{NLOS_{SD}}}} \tag{3.94}$$

Eşitlik (3.60) ve (3.77)'yi kullanarak $\sigma^2_{X_{NLOS_{SD}}}$'yi bağımsız log-normal sönümlemeli kanallar durumunda MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV şemaları için, $\sigma^2_{X_{NLOS}}$ cinsinden yazabiliriz. Zayıf türbülans koşulları (yani küçük $\sigma^2_{X_{NLOS}}$) için $\ln(1+x) \simeq x$ yaklaşımı kullanılarak, özdeş bağımsız atmosferik türbülans kanalları olması durumunda MISO, SIMO ve MIMO NLOS-UV sistemleri için asimptotik göreceli çeşitleme kazancı, sırasıyla, aşağıdaki gibi verilebilir:

$$AD_{R_{MISO}} \approx \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{\ln\left(1+\frac{\exp\left(\sigma^2_{X_{NLOS}}-1\right)}{N}\right)} \approx N \tag{3.95}$$

$$AD_{R_{SIMO}} \approx \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{\ln\left(1+\frac{\exp\left(\sigma^2_{X_{NLOS}}-1\right)}{M}\right)} \approx M \tag{3.96}$$

$$AD_{R_{MIMO}} \approx \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{\ln\left(1+\frac{\exp\left(\sigma^2_{X_{NLOS}}-1\right)}{NM}\right)} \approx NM \tag{3.97}$$

Benzer şekilde, Eşitlik (3.68) ve (3.86) Eşitlik (3.94)'te yerine yazılarak ve bazı sadeleştirmeler yapılarak, ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV bağlantılarının asimptotik göreceli çeşitleme kazancı, sırasıyla, aşağıdaki gibi verilebilir:

$$AD_{R_{MISO}} \simeq \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{\frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{N} + \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}(N-1)}{N^2}\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq l}}^{N}\rho_{kl}} = \frac{N}{1+\frac{(N-1)}{N}\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq l}}^{N}\rho_{kl}}, \quad (l=1,2,\ldots,N) \tag{3.98}$$

$$AD_{R_{SIMO}} \simeq \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{\frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{M} + \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}(M-1)}{M^2}\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq l}}^{M}\rho_{kl}} = \frac{M}{1+\frac{(M-1)}{M}\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq l}}^{M}\rho_{kl}}, \quad (l=1,2,\ldots,M) \tag{3.99}$$

$$AD_{R_{MIMO}} \simeq \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{\frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}}{NM} + \frac{\sigma^2_{X_{NLOS}}(NM-1)}{(NM)^2}\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq l}}^{NM}\rho_{kl}} = \frac{NM}{1+\frac{(NM-1)}{NM}\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq l}}^{NM}\rho_{kl}}, \quad (l=1,2,\ldots,NM) \tag{3.100}$$

Uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının asimptotik göreceli çeşitleme kazancının log-normal kanalın varyansına bağlı olduğu Eşitlik (3.94)'ten gözlemlenebilmektedir. Ayrıca, Eşitlik (3.95), (3.96) ve (3.97)'den görüldüğü gibi, bağımsız atmosferik türbülans kanalları durumunda, MISO ve SIMO sistemlerinin asimptotik göreceli çeşitleme kazançları, sırasıyla, verici ve alıcı açıklıklarının sayısına ve MIMO NLOS-UV sisteminin asimptotik göreceli çeşitleme kazancı verici ve alıcı açıklıkların sayısının çarpımına eşittir. Bu sonuç, MIMO RF kablosuz iletişim sistemlerinin çeşitleme kazancı ile tutarlı olduğu görülmektedir.

Ayrıca, korelasyon katsayısının artmasıyla asimptotik göreceli çeşitleme kazancının azaldığı Eşitlik (3.98), (3.99) ve (3.100)'den açıkça görülebilmektedir. Tüm sönümleme yolları arasındaki korelasyon katsayısı sıfır olduğunda, asimptotik göreceli çeşitleme kazancının, ilişkisiz sönümleme yolları durumunda olduğu gibi, verici ve alıcı açıklıklarının sayısının çarpımına eşit olacağı da gözlemlenebilmektedir. Tüm sönümleme yolları arasındaki korelasyon katsayısı bire eşit olduğunda, asimptotik göreceli çeşitleme kazancı SISO bağlantısında olduğu gibi bire eşit olacak ve her hangi bir çeşitleme kazancı elde edilmeyecektir. Böylece, uzaysal çeşitleme tekniklerinden maksimum çeşitleme kazancı elde edebilmek için, korelasyon katsayısının sıfır olması ve sönümleme yollarının ilişkisiz olması gerektiği sonucuna varılabilmektedir.

3.3. SEÇİM ÇEŞİTLEME TEKNİKLERİ

Anlık olarak alınan sinyal-gürültü oranını en üst düzeye çıkaran seçilmiş bir anten alt kümesi aracılığıyla sinyal iletimi ve/veya alımı; azaltılmış sinyal işleme karmaşıklığı ile tam çeşitleme kazancı sağlayabilir. Bu fenomen, verici ve/veya alıcı anten seçim çeşitleme tekniği olarak adlandırılmaktadır. Verici ve/veya alıcı anten seçme teknikleri, kablosuz radyo frekansı (RF) ve kablosuz optik ağlar bağlamında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [88 – 91], ancak henüz NLOS-UV iletişim sistemleri bağlamında çalışılmamıştır.

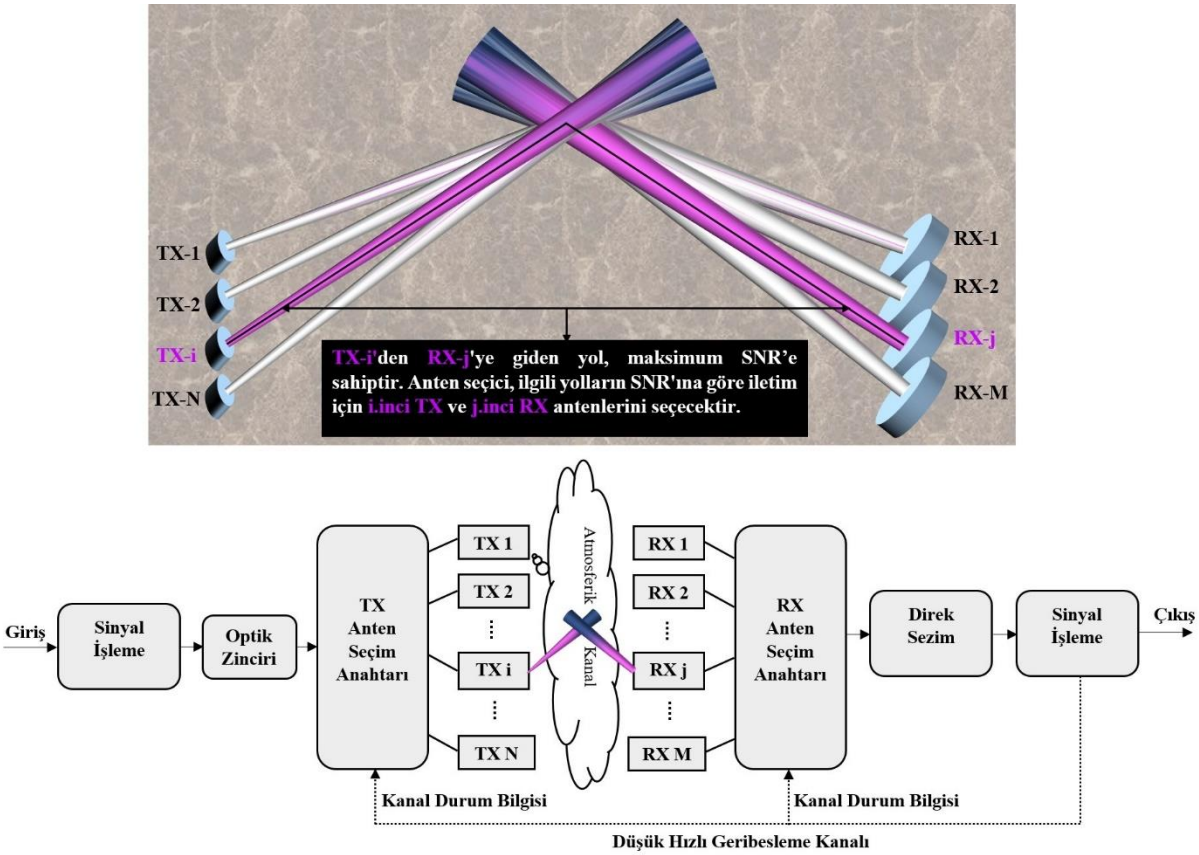
Bu bölümde verici anten seçimi (Transmit Aperture Selection, TAS), alıcı anten seçimi (Receive Aperture Selection, RAS), ve verici ve alıcı antenleri birlikte seçme (Transmit-Receive Anperutre Selection, TRAS) teknikleri dahil olmak üzere, MIMO NLOS-UV iletişim sistemleri için atmosferik türbülans kanalları durumunda verici ve/veya alıcı anten seçme teknikleri incelenmiştir. Söz konusu tekniklerin performansını değerlendirmek için kesinti olasılığı metriği kullanılmıştır. TAS, RAS ve TRAS teknikleri açık bir şekilde ele alınmış ve söz konusu sistemlerin kesinti olasılığı için kapalı form ifadeleri türetilmiştir. Bahsedilen tekniklerin çeşitleme kazancı analizleri de araştırılmış ve asimptotik göreceli çeşitleme kazançları türetilmiştir.

3.3.1. TRAS Şemalı MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Sistem Modeli

TRAS şemalı bir MIMO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu Şekil 3.4'te verilmiştir. SISO bağlantısı durumunda alınan sinyal dikkate alındığında, her yol için uçtan uca anlık sinyal-gürültü oranı aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\gamma_{ij} = I^2_{r_{NLOS_{ij}}} \frac{P_T^2 \eta_r^2}{\sigma_w^2} \ , \ i = 1, 2, \ldots, N \ , \ j = 1, 2, \ldots, M \tag{3.101}$$

burada N ve M, sırasıyla verici ve alıcı antenlerin sayısını belirtmektedir ve $I_{r_{NLOS_{ij}}}$, $i.$inci verici anteninden $j.$inci alıcı açıklığında alınan ışın yoğunluğudur. Önerilen TRAS şemasında, hem vericinin hem de alıcının kanal durum bilgisine sahip olduğu varsayımı altında, karşılık gelen optik yolun maksimum anlık SNR'e sahip olacağı şekilde N verici ve M alıcı antenler arasından bir verici ve bir alıcı anten seçilmektedir. Böylece, TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantılarda, alıcıda alınan anlık SNR aşağıdaki şekilde verilebilir:



Şekil 3.4: TRAS şemalı bir MIMO NLOS-UV bağlantısının sistem konfigürasyonu.

$$\gamma_{TRAS} = \max_{i,j} \left\{ \gamma_{ij} \right\}_{\substack{i=1,2,\ldots N \\ j=1,2,\ldots M}} \tag{3.102}$$

$M = 1$ olduğu varsayılarak, TAS şeması için alınan anlık SNR ve $N = 1$ olduğu varsayılarak, RAS şeması için alınan anlık SNR elde edilecektir. Verilen anlık SNR'leri kullanarak bir sonraki bölümde TRAS, TAS, ve RAS şemalı MIMO NLOS-UV iletişim sistemleri için kesinti olasılığı ifadeleri türetilecektir.

3.3.2. TRAS Şemalı MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Analizi

TRAS şemalı MIMO NLOS-UV durumunda alınan anlık SNR dikkate alınarak ve Eşitlik (3.54)'te yerine yazılarak, TRAS şemalı MIMO NLOS-UV iletişim sisteminin kesinti olasılığı ifadesi aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$P_{out_{TRAS}} = P_r \left(\gamma_{TRAS} \leq \gamma_{th} \right) = F_{\gamma_{TRAS}} \left(\gamma_{th} \right) \tag{3.103}$$

burada $F_{\gamma_{TRAS}}(.)$, γ_{TRAS} rastgele değişkeninin cdf'sidir. Eşitlik (3.102)'yi Eşitlik (3.103)'te yerine yazarak, $F_{\gamma_{TRAS}}(\gamma_{th})$ aşağıdaki gibi hesplanabilmektedir:

$$F_{\gamma_{TRAS}}(\gamma_{th}) = P(\gamma_{TRAS} \le \gamma_{th}) = P\begin{pmatrix} \gamma_{11} \le \gamma_{th}, \gamma_{12} \le \gamma_{th}, \cdots, \gamma_{1M} \le \gamma_{th}, \\ \gamma_{21} \le \gamma_{th}, \gamma_{22} \le \gamma_{th}, \cdots, \gamma_{2M} \le \gamma_{th}, \\ \vdots \\ \gamma_{N1} \le \gamma_{th}, \gamma_{N2} \le \gamma_{th}, \cdots, \gamma_{NM} \le \gamma_{th} \end{pmatrix} \tag{3.104}$$

NLOS-UV sistemlerinde her yoldan alınan sinyallerin korelasyonsuz durumu göz önüne alındığında, verici antenler ve alıcı antenler arasındaki ayırma mesafesi santimetre mertebesinde olacaktır. Böylece, tüm sistem parametreleri, tüm verici ve alıcı antenler için aynı kabul edilebilir ve sönümleme yolları bağımsız ve özdeş olarak dağıtılmış şeklinde varsayılabilir. Bu nedenle, iid sönümleme yolları varsayımı altında ve her yolun anlık olarak alınan SNR'ı için verilen ifade kullanılarak, Eşitlik (3.104) aşağıdaki şekilde daha da basitleştirilebilir:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{TRAS}}(\gamma_{th}) &= \prod_{i=1}^{N}\prod_{j=1}^{M} P(\gamma_{ij} \le \gamma_{th}) = \prod_{i=1}^{N}\prod_{j=1}^{M} P\left(I_{r_{NLOS_{ij}}}^2 \frac{P_T^2 \eta_r^2}{\sigma_w^2} \le \gamma_{th}\right) \\ &= \prod_{i=1}^{N}\prod_{j=1}^{M} P\left(I_{r_{NLOS_{ij}}} \le \sqrt{\frac{\sigma_w^2 \gamma_{th}}{P_T^2 \eta_r^2}}\right) \end{aligned} \tag{3.105}$$

$I_{r_{NLOS_{ij}}}$ bir iid log-normal rastgele değişkeni olduğundan, TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantıları için kesinti olasılığı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned} P_{out_{TRAS}} &= F_{\gamma_{TRAS}}(\gamma_{th}) = \left(P\left(I_{r_{NLOS}} \le \sqrt{\frac{\sigma_w^2 \gamma_{th}}{P_T^2 \eta_r^2}}\right)\right)^{NM} \\ &= \left(Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right) - 2\mu_{X_{NLOS}}}{2\sigma_{X_{NLOS}}}\right)\right)^{NM} \end{aligned} \tag{3.106}$$

$M = 1$ olduğu varsayılarak, TAS şeması için kesinti olasılığı ifadesi ve $N = 1$ olduğu varsayılarak, RAS şeması için kesinti olasılığı ifadesi elde edilecektir.

3.3.3. TRAS Şemalı MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Çeşitleme Kazancı Analizi

SISO NLOS-UV ve TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılık ifadeleri, ve Eşitlik (3.89) ve (3.90) ile verilen göreceli ve asimptotik göreceli çeşitleme kazancı ifadeleri gözönüne alınarak, TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantıları için göreceli çeşitleme kazancı aşağıdaki gibi türetilebilmektedir:

$$D_{R_{TRAS}}\left(SNR_{avrg}\right)=\frac{\partial \ln\left(Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right)-2\mu_{X_{NLOS}}}{2\sigma_{X_{NLOS}}}\right)\right)^{NM}}{\partial \ln\left(SNR_{avrg}\right)}}{\frac{\partial \ln\left(Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right)-2\mu_{X_{NLOS}}}{2\sigma_{X_{NLOS}}}\right)\right)}{\partial \ln\left(SNR_{avrg}\right)}}$$

$$=\frac{NM\times\frac{\partial \ln\left(Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right)-2\mu_{X_{NLOS}}}{2\sigma_{X_{NLOS}}}\right)\right)}{\partial \ln\left(SNR_{avrg}\right)}}{\frac{\partial \ln\left(Q\left(\frac{\ln\left(\sqrt{\frac{SNR_{avrg}}{\gamma_{th}}}\right)-2\mu_{X_{NLOS}}}{2\sigma_{X_{NLOS}}}\right)\right)}{\partial \ln\left(SNR_{avrg}\right)}}=N\times M \tag{3.107}$$

Daha sonra, TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantıları için asimptotik göreceli çeşitleme kazancı aşağıdaki gibi verilebilir:

$$AD_{R_{TRAS}}=\lim_{SNR_{avrg}\to\infty} N\times M=N\times M \tag{3.108}$$

Eşitlik (3.107) ve (3.108)'den hem $D_{R_{TRAS}}\left(SNR_{avrg}\right)$ hem de $AD_{R_{TRAS}}$'ın verici ve alıcı anten sayısının çarpımına eşit olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, anten seçimi olmaksızın MIMO NLOS-UV bağlantılarının göreceli çeşitleme kazancının, yüksek SNR değerlerinde verici ve alıcı anten sayısının çarpımına yakınsadığı önceki bölümden bilinmektedir. Böylece, TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantılarının, anten seçimi olmaksızın MIMO NLOS-UV bağlantılarından daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılabilmektedir.

4. BULGULAR

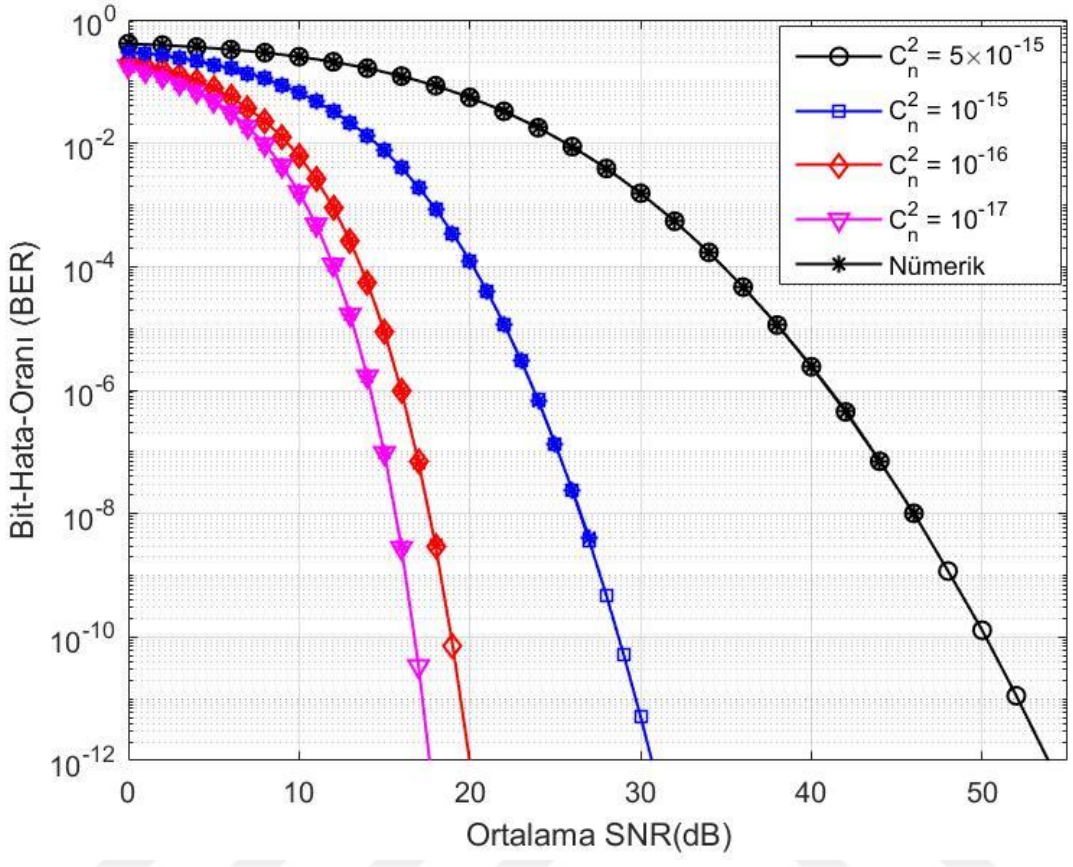
4.1. GİRİŞ

Bu bölümde direk görüşü olmayan ultraviyole haberleşme sistemleri için önceki bölümde geliştirilen uzaysal çeşitleme teknikleri ve seçim çeşitleme teknikleri uygulandığında ulaşılan başarım sonuçları elde edilmiştir. Özellikle, NLOS-UV sistemler için geliştirilen MISO, SIMO, ve MIMO tekniklerinin bit hata oranı ve kesinti olsalığı başarım sonuçları açıklanmıştır. Ayrıca, MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV sistemlerinin çeşitleme kazancı başarım sonuçları da elde edilmiştir. Bunun yanında, seçim çeşitleme teknikleri kapsamında verici anten seçimi (TAS), alıcı anten seçimi (RAS) ve verici-alıcı antenlerin birlikte seçimi (TRAS) tekniklerinin kesinti olasılığı ve çeşitleme kazancı başarım sonuçları elde edilmiştir. Uzaysal çeşitleme ve seçim çeşitleme teknikleri için bir kıyaslama ölçütü olan SISO NLOS-UV bağlantılarının bit hata oranı ve kesinti olasılığı başarım sonuçları da verilmektedir. Başarım sonuçları 'MATLAB' bilgisayar programı yardımı ile 'Monte Carlo' bilgisayar benzetim metodu kullanılarak elde edilmiştir. Başarım sonuçları hem bir önceki bölümde elde edilen teorik ifadeler kullanılarak hem de nümerik yöntemlerden elde edilmiştir.

Bu bölümde elde edilen başarım sonuçlarının hesaplanmasında gerekli parametreler, aksi belirtilmedikçe şöyle kabul edilmiştir: verici ışını tam genişlikte sapma açısı $\phi_1 = 0.008$ radyan, alıcı görüş alanı (FOV) açısı $\phi_2 = \pi / 6$ radyan, verici tepe açısı $\theta_1 = \pi / 4$ radyan, alıcı tepe açısı $\theta_2 = \pi / 6$ radyan, Rayleigh (moleküler) saçılma katsayısı $k_s^{Ray} = 0.266\ \text{km}^{-1}$, Mie (aerosol) saçılma katsayısı $k_s^{Mie} = 0.284\ \text{km}^{-1}$, sönme katsayısı $k_e = 1.352\ \text{km}^{-1}$, alıcı açıklığının alanı $A_R = 1.77\ \text{cm}^2$, verici ve alıcı taban çizgisi ayrımı $d = 300\ \text{m}$, ve dalga boyu $\lambda = 260\ \text{nm}$.

4.2. UZAYSAL ÇEŞİTLEMELİ NLOS-UV SİSTEMLERİNİN BİT HATA ORANI BAŞARIM SONUÇLARI

Bu bölümde uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV sistemlerinin bit hata oranı başarım sonuçları elde edilecektir. İlk önce uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV sistemler için bir kıyaslama ölçütü olan SISO NLOS-UV bağlantısının, farklı C_n^2 değerleri için BER başarım sonuçları verilecektir.



Şekil 4.1: Farklı C_n^2 değerleri için SISO NLOS-UV bağlantısının SNR'e karşı bit hata oranı başarımı.

4.2.1. SISO NLOS-UV Bağlantılarının Bit Hata Oranı Başarım Sonuçları

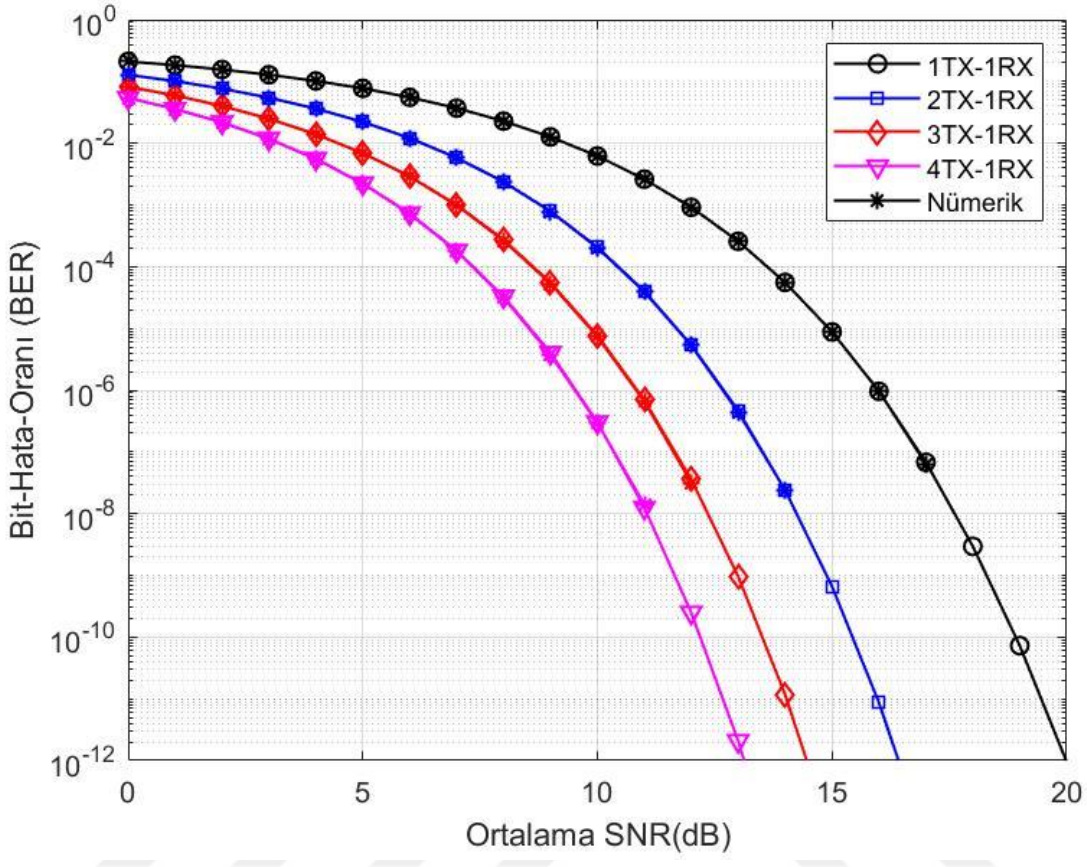
Şekil 4.1'de, C_n^2'nin çeşitli değerleri için SNR'e göre SISO NLOS-UV bağlantısının BER başarımı gösterilmektedir. Tablo 4.1, SISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10}'luk bir BER değeri elde etmek için atmosferik türbülans şiddetlerine karşı gerekli SNR değerlerini göstermektedir. Açıkça görülebileceği gibi, 10^{-10} BER değerine ulaşmak için $C_n^2 = 10^{-17}$ olduğunda 16.75 dB SNR, $C_n^2 = 10^{-16}$ olduğunda 18.85 dB SNR, $C_n^2 = 10^{-15}$ olduğunda 28.70 dB SNR ve $C_n^2 = 5\times10^{-15}$ olduğunda 50.20 dB SNR değerine gerek duyulmaktadır. Atmosferik türbülansın etkisinin, atmosferin kırılma indisi yapı katsayısının değerine bağlı olarak önemli olduğuna dikkat edilmelidir.

Tablo 4.1: SISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} BER değerine ulaşmak için atmosferik türbülans şiddetine karşı gerekli SNR değerleri.

Atmoferik Türbülans Şiddeti, C_n^2 ($\mathrm{m}^{-2/3}$)	Gerekli SNR, (dB)
10^{-17}	16.75
10^{-16}	18.85
10^{-15}	28.70
5×10^{-15}	50.20

4.2.2. MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Bit Hata Oranı Başarım Sonuçları

Şekil 4.2'de, verici çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının BER performansı, $C_n^2 = 10^{-16}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan türbülans kanalı durumunda N = 2, 3 ve 4 verici anten sayısı ve d = 300m'lik bir bağlantı mesafesi için gösterilmektedir. Bu kadar bir bağlantı mesafesi ve verilen sistem parametreleri durumunda atmosferik kanal $\sigma_{X_{NLOS}} = 0.0390$ bir standart sapma değerine sahip olmaktadır. Burada, hem Eşitlik (3.21) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Teorik ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile iyi uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu teyit etmektedir. Kaynak [82]'de verilen log-normal yaklaşımı kullanılarak tek bir integral cinsinden formülize edilen yaklaşık BER ifadelerimizin simülasyon sonuçlarıyla mükemmel bir şekilde eşleştiği ve log-normal varyansın dikkate alınan değerleri için farkın ihmal edilebilir olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, [82]'de verilen yaklaşımın log-normal varyansın düşük değerleri için daha doğru olmasıdır. Böylece, log-normal kanalın yüksek varyans değerleri için teorik ve simülasyon sonuçları arasında bazı tutarsızlıklar gözlemlenecek ve bu tutarsızlık, atmosferik türbülans gücünün artmasıyla artacaktır. Eşitlik (3.21)'i hesaplamak için 20 dereceli Hermite polinomları dikkate alınmıştır. SISO NLOS-UV bağlantısının BER performansı da bir kıyaslama ölçütü olarak sonuçlara dahil edilmiştir. Şekil 4.2'den açıkça görüldüğü gibi, verici anten sayısının artmasıyla performans önemli ölçüde iyileşmektedir. Tablo 4.2, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-16}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda bir MISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10}'luk bir BER değerine ulaşmak için gerekli SNR'e karşı verici anten sayısını (N) göstermektedir. 10^{-10} BER değerine ulaşmak için $N = 1$ olduğunda 18.85 dB SNR, $N = 2$ olduğunda 15.43 dB SNR, $N = 3$ olduğunda 13.51

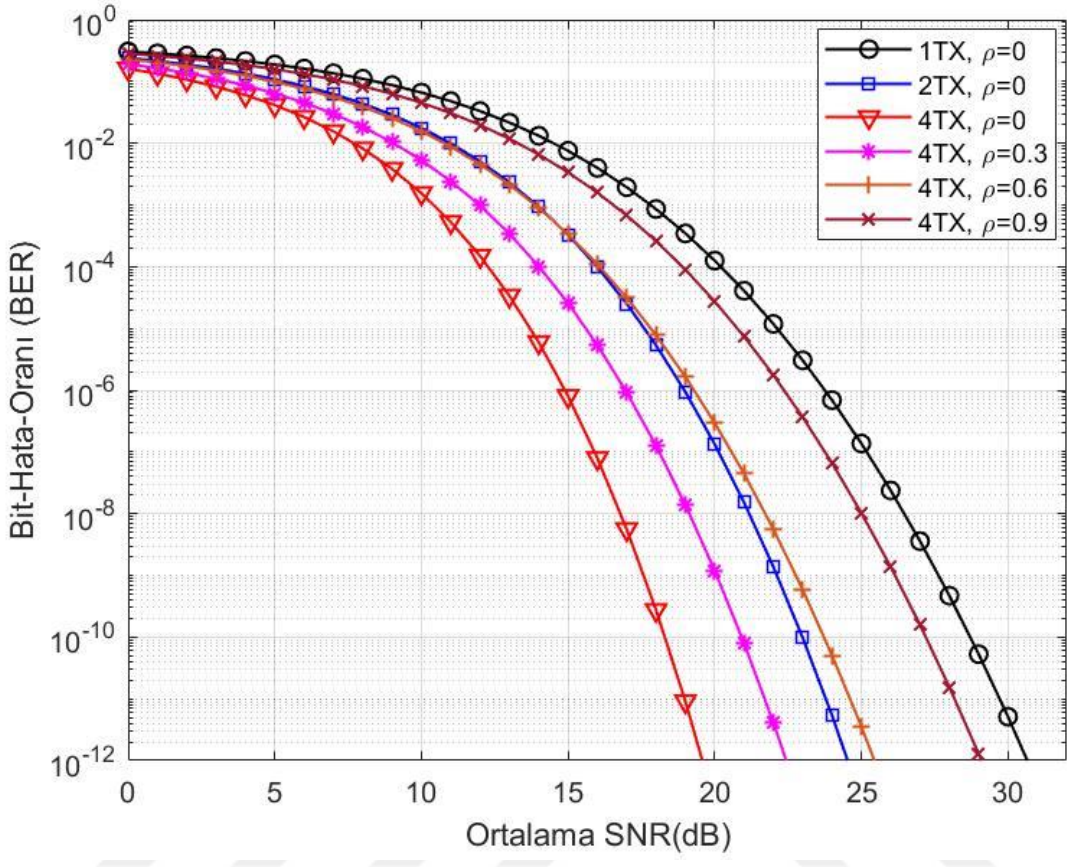


Şekil 4.2: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-16}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda verici çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının bit hata oranı başarımı.

Tablo 4.2: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-16}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk BER değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici anten sayısı (N).

TX Anten Sayısı, N	Gerekli SNR, (dB)
1	18.85
2	15.43
3	13.51
4	12.19

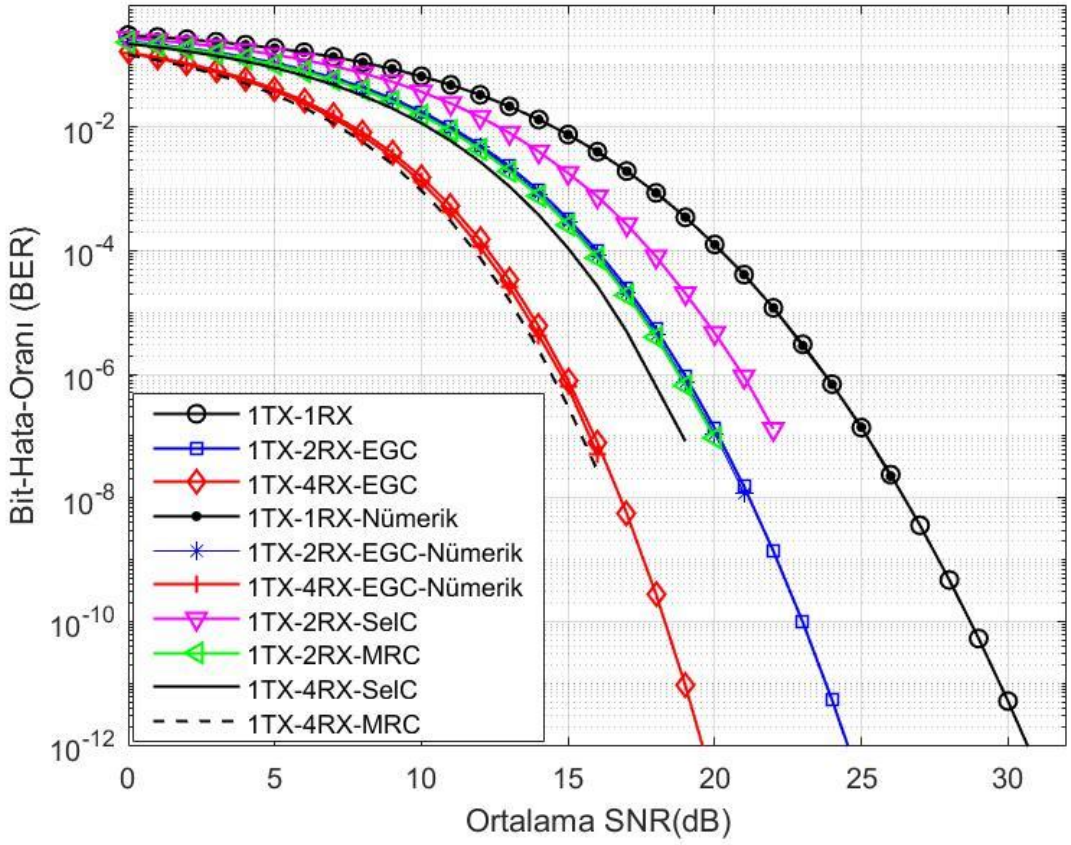
dB ve $N = 4$ olduğunda 12.19 dB SNR değeri gerektiği görülebilmektedir. $N = 2$ verici sayısı ile bile, SISO NLOS-UV bağlantısına göre 3.42 dB performans artışı olacağı görülebilmektedir.



Şekil 4.3: Uzaysal korelasyonun, atmosferik türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan log-normal kanal durumunda dört verici antene sahip NLOS-UV bağlantısının performansı üzerindeki etkisi.

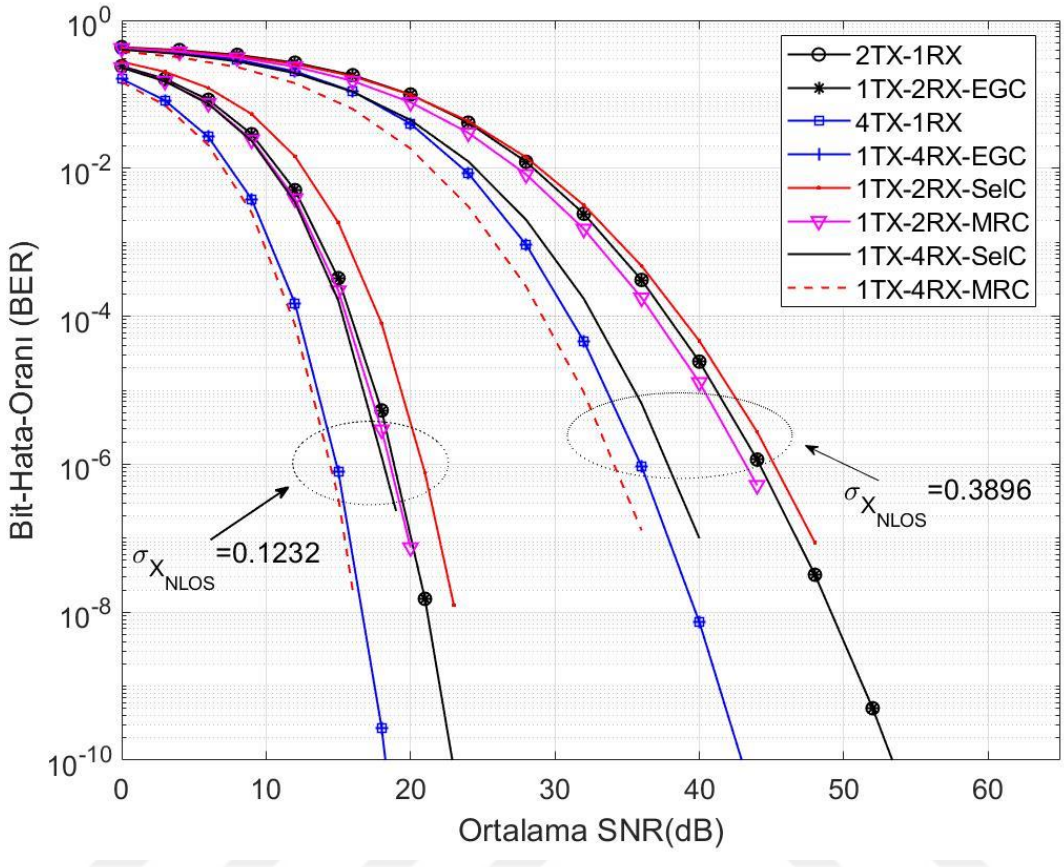
Şekil 4.3, uzaysal korelasyonun, verici çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının BER performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Birbirinden eşit uzaklıkta olan dört verici antene sahip bir NLOS-UV bağlantısı, atmosferik şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan log-normal kanal durumunda gözönüne alınmıştır. Tüm verici antenler arasında $\rho = 0.3,\ 0.6,$ ve 0.9 korelasyon katsayısı değerleri dikkate alınmaktadır. Uzaysal olarak bağımsız kanallar durumu ile karşılaştırıldığında, açıkça görülebileceği gibi, dört verici anten arasında $\rho = 0.3$'lük bir korelasyon değeri bile performansı önemli ölçüde düşürmektedir. Korelasyon arttığında çok daha fazla performans kaybı gözlemlenmektedir. Örneğin, korelasyon değeri 0.9'a çıktığında, performans SISO NLOS-UV bağlantısına çok yaklaşmaktadır. Dolayısıyla, verici çeşitlemeli bir NLOS-UV sisteminde, verici antenler arasındaki yeterli ayrımın, verici çeşitleme

tekniğinden maksimum çeşitleme kazancı elde etmek için çok önemli olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.4: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanlları durumunda alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının BER başarım sonuçları.

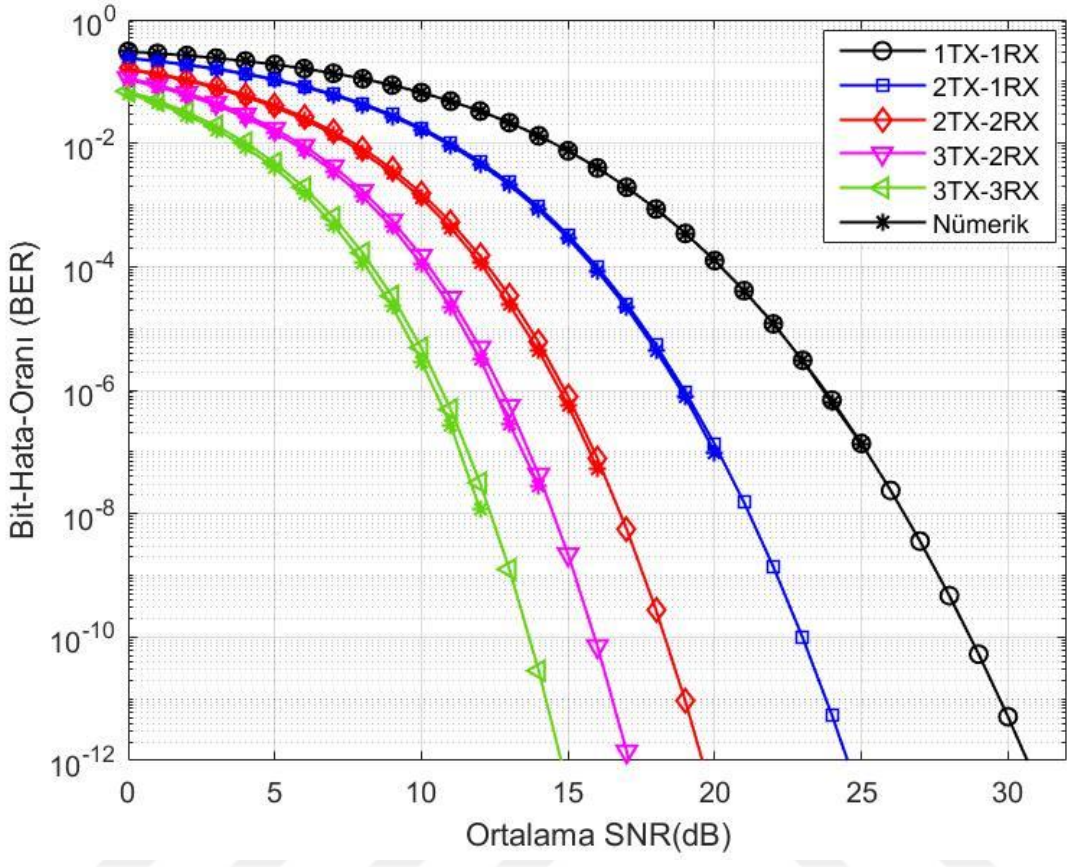
Şekil 4.4'te, alıcı çeşitlemeli bir NLOS-UV bağlantısının BER performansı, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanlları durumunda $M = 2$ ve 4 alıcı anten sayıları için gösterilmektedir. Hem Eşitlik (3.39) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Şekil 4.4 ayrıca alıcı çeşitlmeli NLOS-UV bağlantıları için EGC, MRC ve SelC alıcılarının performansını karşılaştırmaktadır. Teorik ve simülasyon sonuçları arasında, log-normal yaklaşımından kaynaklanan küçük bir tutarsızlık gözlemlenmektedir. SISO NLOS-UV bağlantısının BER performansı da bir kıyaslama ölçütü olarak şekle dahil edilmiştir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi, alıcı anetenlerinin sayısının artmasıyla performans önemli ölçüde iyileşmektedir. Örneğin, 10^{-10} BER değerine ulaşmak



Şekil 4.5: Farklı türbülans şiddetlerine sahip atmosferik türbülans kanalları durumunda verici çeşitlemeli ve alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının BER başarım karşılaştırması.

için, $M = 1$ olduğunda 28.70 dB SNR, $M = 2$ olduğunda 23 dB SNR, ve $M = 4$ olduğunda 18.29 dB SNR değeri gerektiği görülebilmektedir. $M = 2$ alıcı anteni ile bile, SISO NLOS-UV bağlantısına göre, 5.70 dB performans artışı olacağı görülmektedir. EGC alıcısının performansının MRC alıcısının performansına çok yakın olduğu da gözlemlenmektedir. Özellikle, $\sigma_{X_{NLOS}} = 0.1232$ ve $M = 2$ için BER = 10^{-6}'da sadece 0.5 dB fark olduğunu gözlemliyoruz. Oysaki bu fark EGC ve SelC alıcıları arasında 2 dB'ye kadar çıkmaktadır. Ayrıca bu fark, alıcı antenlerinin sayısı arttıkça daha da artmaktadır.

Şekil 4.5, farklı atmosferik türbülans şiddetleri ve farklı alıcı türleri için verici çeşitlemeli ve alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının BER performansını karşılaştırmaktadır. Beklendiği gibi, verici çeşitlemeli ve EGC-alıcılı alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantıları için aynı sonuç



Şekil 4.6: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanlları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantılarının BER başarım sonuçları.

elde edilmiştir. Ayrıca, türbülans şiddeti artınca EGC, SelC, ve MRC alıcıları arasındaki performans farkının arttığı da görülmektedir.

Şekil 4.6'da, bir MIMO NLOS-UV bağlantısının BER performansı, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda farklı verici ve alıcı anten sayıları için gösterilmektedir. Hem Eşitlik (3.52) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Teorik ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile iyi uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu onaylamaktadır. Log-normal yaklaşıma bağlı olarak artan verici ve alıcı sayıları için teorik ve simülasyon sonuçları arasında bazı küçük tutarsızlıklar gözlemlenmektedir. Şekil 4.6'dan açıkça görüldüğü gibi, verici ve alıcı antenlerinin sayısının artmasıyla performans önemli ölçüde iyileşmektedir. Tablo 4.3, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda bir MIMO NLOS-UV

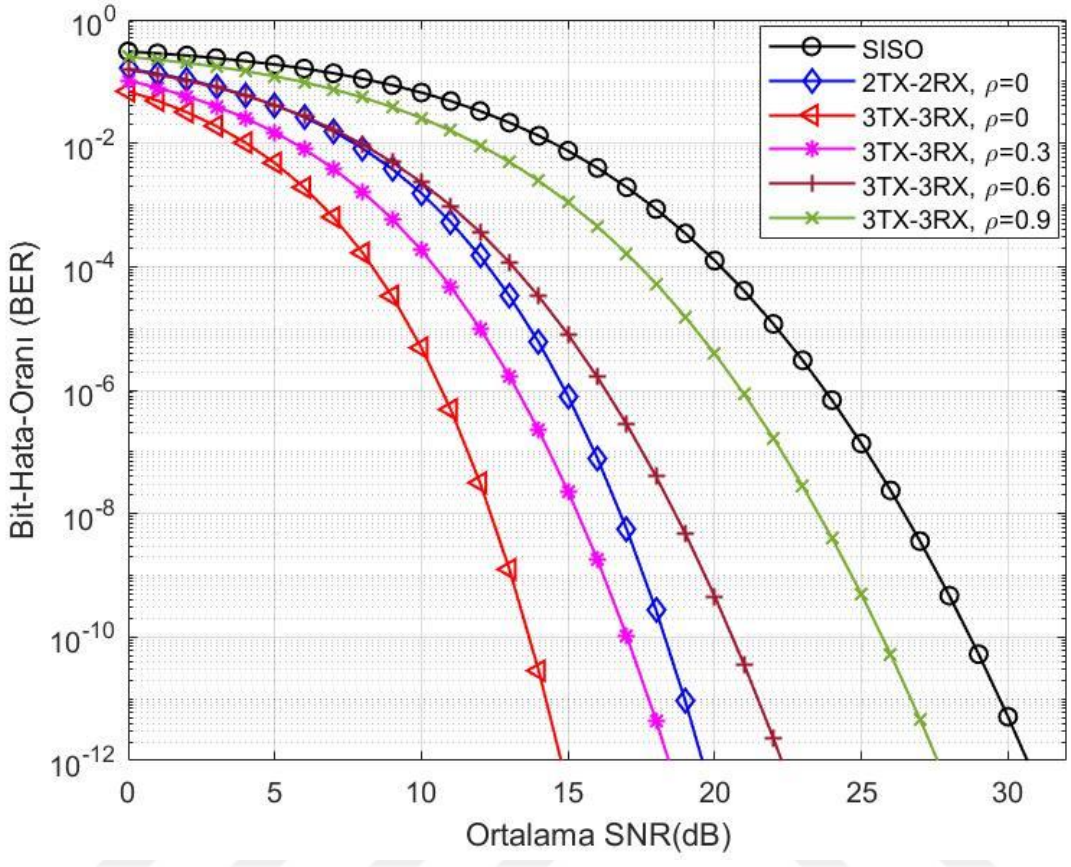
Tablo 4.3: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk BER değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısı (N,M).

TX ve RX Anten Sayısı, (N, M)	Gerekli SNR, (dB)
(1,1)	28.70
(2,1)	23
(2,2)	18.29
(3,2)	15.90
(3,3)	13.66

bağlantısında 10^{-10} 'luk bir BER değerine ulaşmak için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayılarını (N, M) göstermektedir. Örneğin, 10^{-10} 'luk bir BER değerini elde etmek için bir SISO bağlantısında 28.70 dB SNR gerekliyken, 2-TX ve 1-RX içeren bir bağlantı için 23 dB'ye, 2-TX ve 2-RX içeren bir bağlantı için 18.29 dB'ye, 3-TX ve 2-RX içeren bir bağlantı için 15.90 dB'ye ve 3-TX ve 3-RX içeren bir MIMO NLOS-UV bağlatısı için 13.66 dB SNR'a gerek duyulmaktadır.

Şekil 4.7, uzaysal korelasyonun MIMO NLOS-UV bağlantılarının performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Birbirinden eşit uzaklıkta olan üç verici ve üç alıcı antene sahip bir MIMO NLOS-UV bağlantısı, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan log-normal kanal durumunda gözönüne alınmıştır. Tüm sönümleme yolları arasında $\rho = 0.3,\ 0.6,$ ve 0.9 korelasyon katsayısı değerleri dikkate alınmaktadır. MISO NLOS-UV bağlantıları durumunda olduğu gibi, uzaysal korelasyonun MIMO NLOS-UV bağlantılarının performansını önemli ölçüde düşüreceği gözlemlenebilmektedir.

Şekil 4.8, SISO ve uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV ve FSO bağlantılarının BER performanslarını, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları ve $d = 300$ m 'lik bağlantı mesafesi durumunda karşılaştırmaktadır. NLOS-UV haberleşme sistemleri için kullanılan UV sinyallerinin dalga boyunun 260 nm, FSO sistemleri için kullanılan kızılötesi sinyallerinin dalga boyunun 1550 nm olduğu bilinmektedir. Diğer tüm parametrelerin her iki sistem için aynı olduğu varsayılmaktadır. FSO sisteminin BER performansı [39]'de verilen sonuçlar kullanılarak elde edilmektedir. Dalga denkleminin Rytov

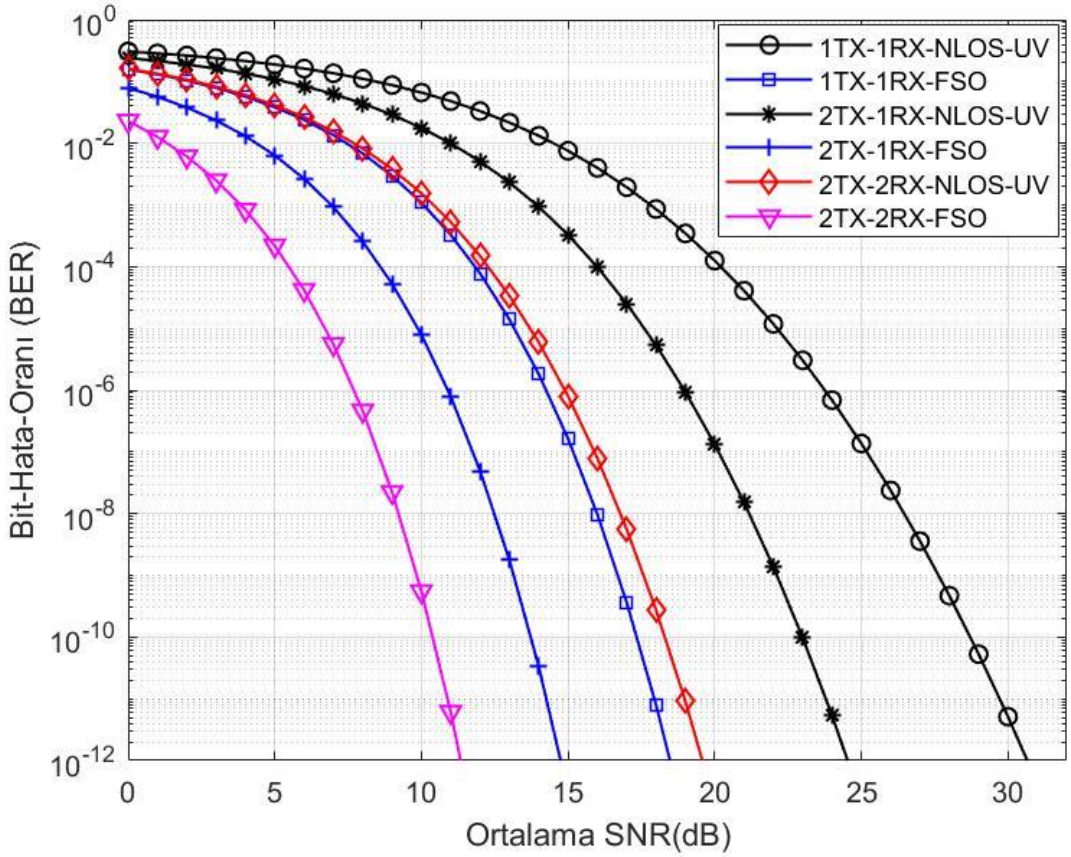


Şekil 4.7: Uzaysal korelasyonun, atmosferik türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan log-normal kanal durumunda üç verici ve üç alıcı antene sahip MIMO NLOS-UV bağlantısının performansı üzerindeki etkisi.

çözümüne göre, $\sigma_X^2 = 1.23 C_n^2 (2\pi/\lambda)^{7/6} d^{11/6}$, log-genlik varyansı, σ_X^2, $\lambda^{-7/6}$ ile orantılıdır. Bu nedenle, atmosferik türbülans kaynaklı sönümlemeye bağlı ışınım dalgalanmaları, UV bandında FSO sistemlerinde kullanılan kızılötesi banttan beş ila altı kat daha büyüktür. Bu, NLOS-UV bağlantılarının türbülansa FSO bağlantılarından daha duyarlı olduğu anlamına gelir.

Bir NLOS-UV ve FSO bağlantısı için türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ ve bağlantı mesafesi $d = 300$ m olduğu durumda ve diğer tüm parametrelerin her iki sistem için de aynı olduğu varsayıldığında, FSO bağlantısı için log-genlik varyansı $\sigma_{X_{FSO}}^2 = 0.002$ iken, NLOS-UV bağlantısı için $\sigma_{X_{NLOS}}^2 = 0.0152$ 'ye yükselmektedir. Yukarıdaki sonuçlar ayrıca Şekil 4.8'den de görülebilmektedir. SISO FSO bağlantısının bile iki verici ve iki alıcı antene sahip MIMO

NLOS-UV bağlantısından daha iyi performansa sahip olduğu görülebilmektedir. Ayrıca 10^{-10} BER değerinde SISO FSO ve SISO NLOS-UV bağlantıları arasında 11.37 dB kazanç farkı olduğunu gözlemleyebiliriz. Bununla birlikte, Şekil 4.8'den, NLOS-UV bağlantıları için uzaysal çeşitleme teknikleriyle elde edilen performans kazancının FSO bağlantılarından daha fazla olduğunu da gözlemleyebiliriz. Örneğin, SISO NLOS-UV bağlantısı ile 2-TX ve 1-RX içeren MIMO NLOS-UV bağlantısı arasındaki perfromans kazancı 5.70 dB iken, aynı FSO bağlantıları için yalnızca 3.61 dB'dir. Dolayısıyla gözlemlerimiz, NLOS-UV bağlantıları için uzaysal çeşitleme tekniklerinin kullanılmasının kaçınılmaz olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarına karşı uzaysal çeşitlemeli FSO bağlantılarının BER başarım sonuçları.

4.3. UZAYSAL ÇEŞİTLEMELİ NLOS-UV SİSTEMLERİNİN KESİNTİ OLASILIĞI BAŞARIM SONUÇLARI

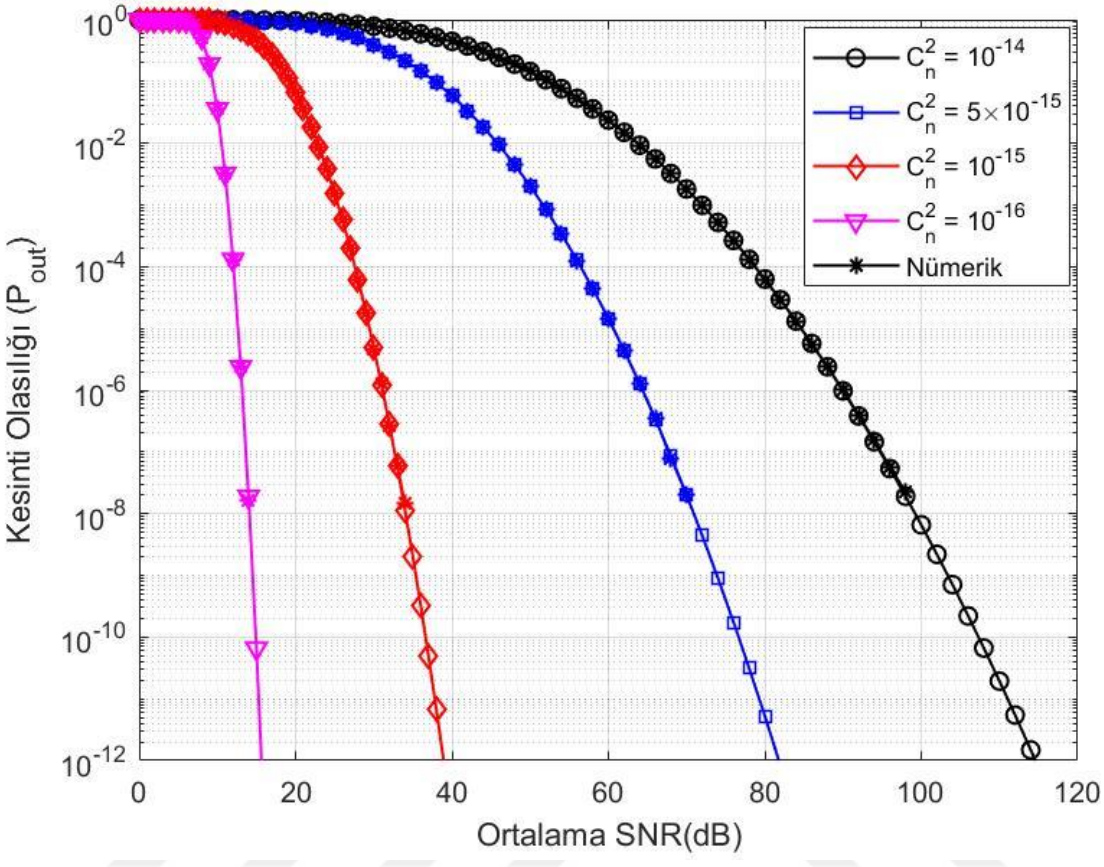
Bu bölümde uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV sistemlerinin kesinti olasılığı başarım sonuçları elde edilecektir. İlk önce uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV sistemler için bir kıyaslama ölçütü olan SISO NLOS-UV bağlantısının, farklı C_n^2 değerleri için kesinti olasılığı başarım sonuçları verilecektir. Kesinti olasılığı başrım sonuçları çıkarımlarında, NLOS-UV bağlantı mesafesi $d = 500$ m olduğu varsayılmaktadır.

4.3.1. SISO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Başarım Sonuçları

SISO NLOS-UV bağlantısının SNR'e göre çeşitli C_n^2 değerleri için kesinti olasılığı başarım sonuçları Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Tablo 4.4, bir SISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk bir kesinti olasılığına ulaşmak için gerekli SNR'e karşı atmosferik türbülans şiddetini göstermektedir. Açıkça görülmektedir ki, 10^{-10} 'luk bir kesinti olasılığına ulaşmak için $C_n^2 = 10^{-16}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ durumunda 14.92 dB SNR'e, $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ durumunda 36.62 dB SNR'e, $C_n^2 = 5\times10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ durumunda 76.63 dB SNR'e, ve $C_n^2 = 10^{-14}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ durumunda 107.31 dB SNR'e gerek duyulmaktadır. Atmosferik türbülans etkisinin, atmosferin kırılma indisi yapı kat sayısı değerine göre önemli olduğu da gözlemlenebilmektedir.

4.3.2. MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV Bağlantılarının Kesinti Olasılığı Başarım Sonuçları

Şekil 4.10'da, verici çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı performansı, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan bir türbülans kanalı durumunda N = 1, 2, 4 ve 8 verici anten sayısı ve d = 500 m'lik bir bağlantı mesafesi için gösterilmektedir. Burada, hem Eşitlik (3.69) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Teorik ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile iyi uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu onaylamaktadır. Eşitlik (3.59)'daki çok boyutlu integrallerini tek boyutlu bir integrale indirgemek için [82]'de verilen log-normal yaklaşımı kullanılmıştır. Bu, analitik ve nümerik sonuçlar arasında bir miktar tutarsızlığa neden olacaktır çünkü nümerik sonuçlar, bahsedilen sistemlerin tam performansını sağlamaktadır. Bu nedenle $N = 2, 4,$ ve 8 verici anten sayıları için teorik ve simülasyon sonuçları arasında küçük bir tutarsızlık gözlemlenmektedir. Ancak,

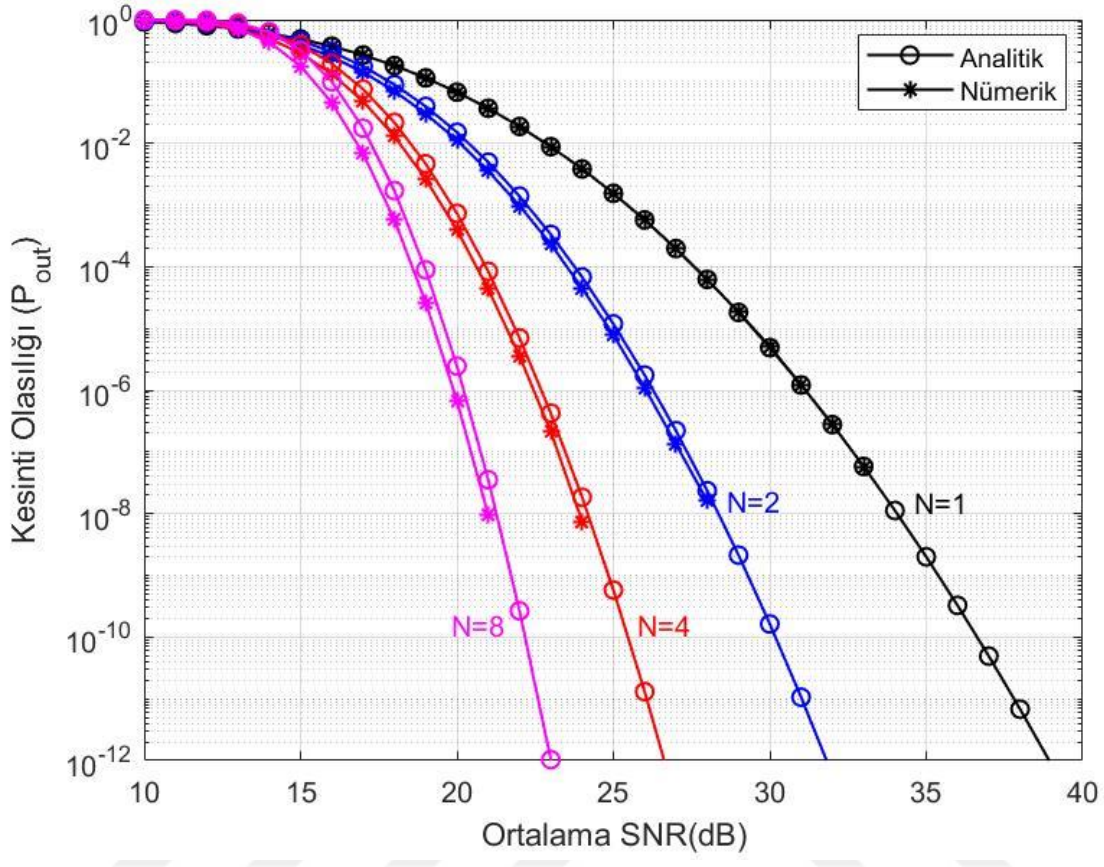


Şekil 4.9: Farklı C_n^2 değerleri için SISO NLOS-UV bağlantılarının SNR'e karşı kesinti olasılığı başarım sonuçlar.

Tablo 4.4: SISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} kesinti olasılığı değerine ulaşmak için atmosferik türbülans şiddetine karşı gerekli SNR değerleri.

Atmoferik Türbülans Şiddeti, C_n^2 ($m^{-2/3}$)	Gerekli SNR, (dB)
10^{-16}	14.92
10^{-15}	36.62
5×10^{-15}	76.63
10^{-14}	107.31

teorik ve simülasyon sonuçları arasındaki küçük tutarsızlık, log-normal varyansın dikkate alınan değerleri için ihmal edilebilir seviyededir. Bu tutarsızlık, artan atmosferik türbülans şiddeti ile artar, çünkü atmosferik türbülans şiddetindeki artış log-normal varyans değerinde bir

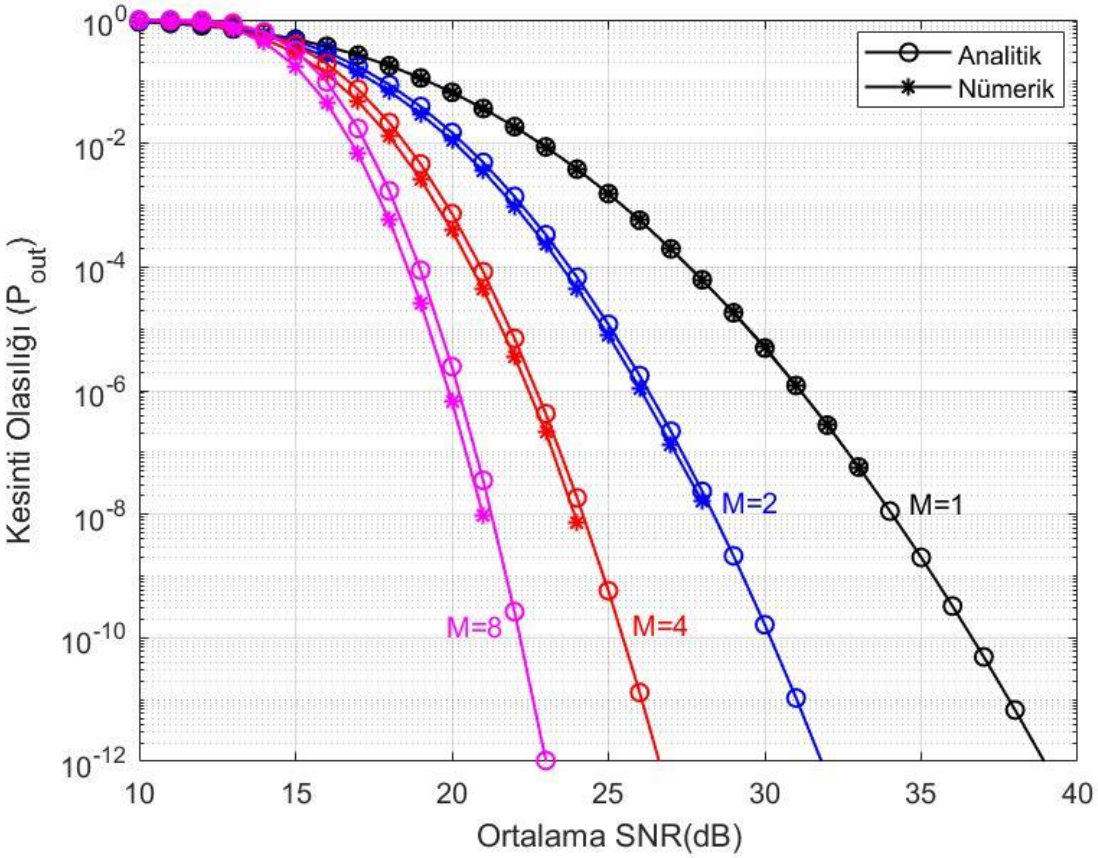


Şekil 4.10: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda verici çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı başarım sonuçları.

artışa neden olmaktadır. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, verici antenlerin sayısının artmasıyla performans önemli ölçüde iyileşmektedir. Tablo 4.5, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda bir MISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk bir kesinti olasılığı değerine ulaşmak için gerekli SNR'e karşı verici anten sayısını (N) göstermektedir. Örneğin, 10^{-10} kesinti olasılığı değerine ulaşmak için $N = 1$ olduğunda 36.62 dB SNR, $N = 2$ olduğunda 30.18 dB SNR, $N = 4$ olduğunda 25.46 dB SNR ve $N = 8$ olduğunda 22.17 dB SNR değeri gerektiği görülebilmektedir. $N = 2$ verici sayısı ile bile, SISO NLOS-UV bağlantısına göre 6.44 dB performans artışı olacağı görülebilmektedir.

Tablo 4.5: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici anten sayısı (N).

TX Anten Sayısı, N	Gerekli SNR, (dB)
1	36.62
2	30.18
4	25.46
8	22.17



Şekil 4.11: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı başarım sonuçları.

Şekil 4.11'de, alıcı çeşitlemeli NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı performansı, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan bir türbülans kanalı durumunda M = 1, 2, 4 ve 8 alıcı anten sayısı

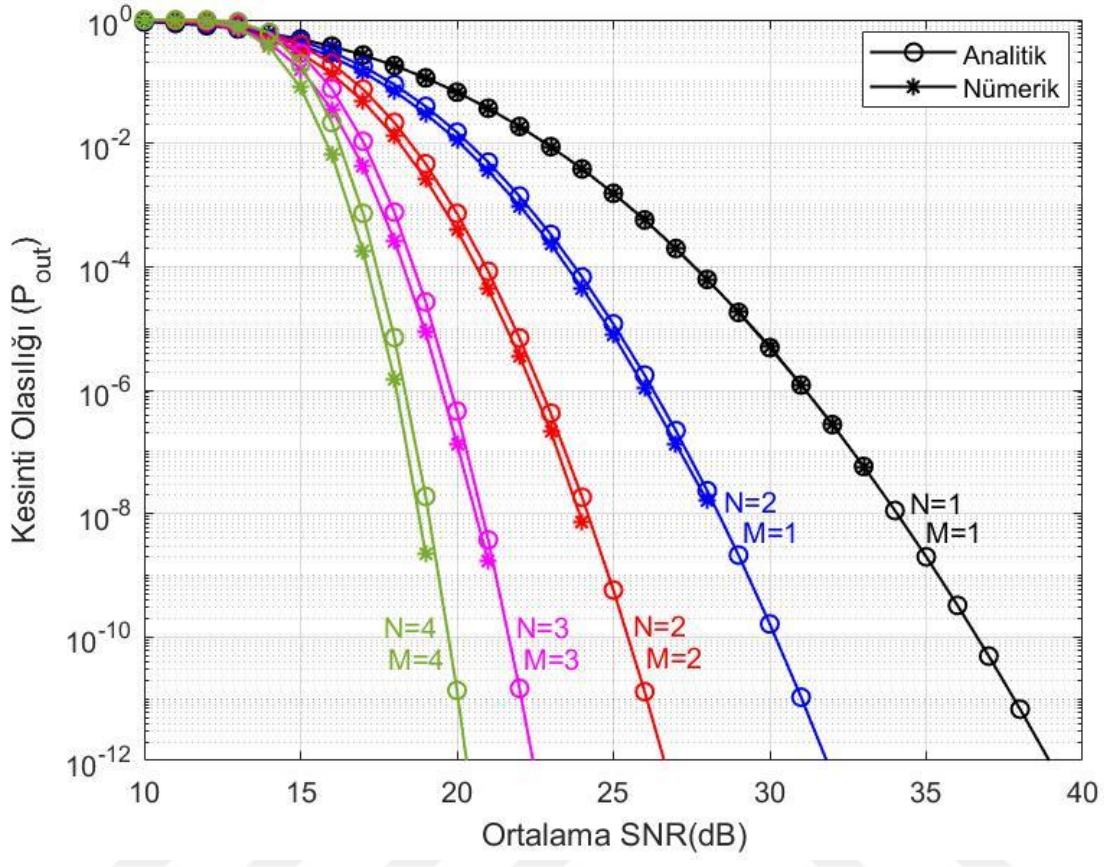
Tablo 4.6: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda SIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı alıcı anten sayısı (M).

RX Anten Sayısı, M	Gerekli SNR, (dB)
1	36.62
2	30.18
4	25.46
8	22.17

ve d = 500 m'lik bir bağlantı mesafesi için gösterilmektedir. Burada, hem Eşitlik (3.72) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Teorik ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile iyi uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu onaylamaktadır. M = 2, 4 ve 8 için teorik ve simülasyon sonuçları arasında, log-normal yaklaşımı nedeniyle bazı küçük tutarsızlıklar gözlenmektedir. Bu tutarsızlık, artan atmosferik türbülans gücü ile artmaktadır.

Şekil 4.11'den açıkça görüldüğü gibi, kesinti olasılığı performansı alıcı antenlerin sayısının artmasıyla önemli ölçüde iyileşmektedir. Tablo 4.6, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda bir SIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk bir kesinti olasılığı değerine ulaşmak için gerekli SNR'e karşı alıcı anten sayısını (M) göstermektedir. Örneğin, 10^{-10} kesinti olasılığı değerine ulaşmak için $M = 1$ olduğunda 36.62 dB SNR, $M = 2$ olduğunda 30.18 dB SNR, $M = 4$ olduğunda 25.46 dB SNR ve $M = 8$ olduğunda 22.17 dB SNR değeri gerektiği görülebilmektedir. $M = 2$ alıcı sayısı ile bile, SISO NLOS-UV bağlantısına göre 6.44 dB performans artışı olacağı görülebilmektedir. Eşitlik (3.69) ve (3.72) karşılaştırıldığında, verici ve alıcı çeşitleme teknikleri için aynı sonucun elde edildiği görülmektedir.

Şekil 4.12'de, MIMO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı performansı, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan bir türbülans kanalı durumunda farklı verici ve alıcı anten sayısı için gösterilmektedir. Burada, hem Eşitlik (3.87) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Teorik ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile iyi uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu onaylamaktadır. Log-normal yaklaşımı



Şekil 4.12: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı başarım sonuçları.

nedeniyle artan verici ve alıcı anten sayısı için teorik ve simülasyon sonuçları arasında bazı küçük tutarsızlıklar gözlemlenmektedir. Şekil 4.12'den açıkça görüldüğü gibi, kesinti olasılığı performansı verici ve alıcı antenlerin sayısının artmasıyla önemli ölçüde iyileşmektedir. Tablo 4.7, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda bir MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerine ulaşmak için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısını (N, M) göstermektedir. Örneğin, 10^{-10} 'luk bir kesinti olasılığı değerini elde etmek için SISO bağlantısında 36.62 dB SNR gerekliyken, 2-TX ve 1-RX içeren bir bağlantı için 30.18 dB'ye, 2-TX ve 2-RX içeren bir bağlantı için 25.46 dB'ye, 3-TX ve 3-RX içeren bir bağlantı için 21.65 dB'ye ve 4-TX ve 4-RX içeren bir MIMO NLOS-UV bağlatısı için 19.72 dB SNR'a gerek duyulmaktadır. Sonuçlar, MIMO NLOS-UV

bağlantılarının SISO bağlantılarına göre önemli ölçüde performans kazancı sağladığını göstermektedir.

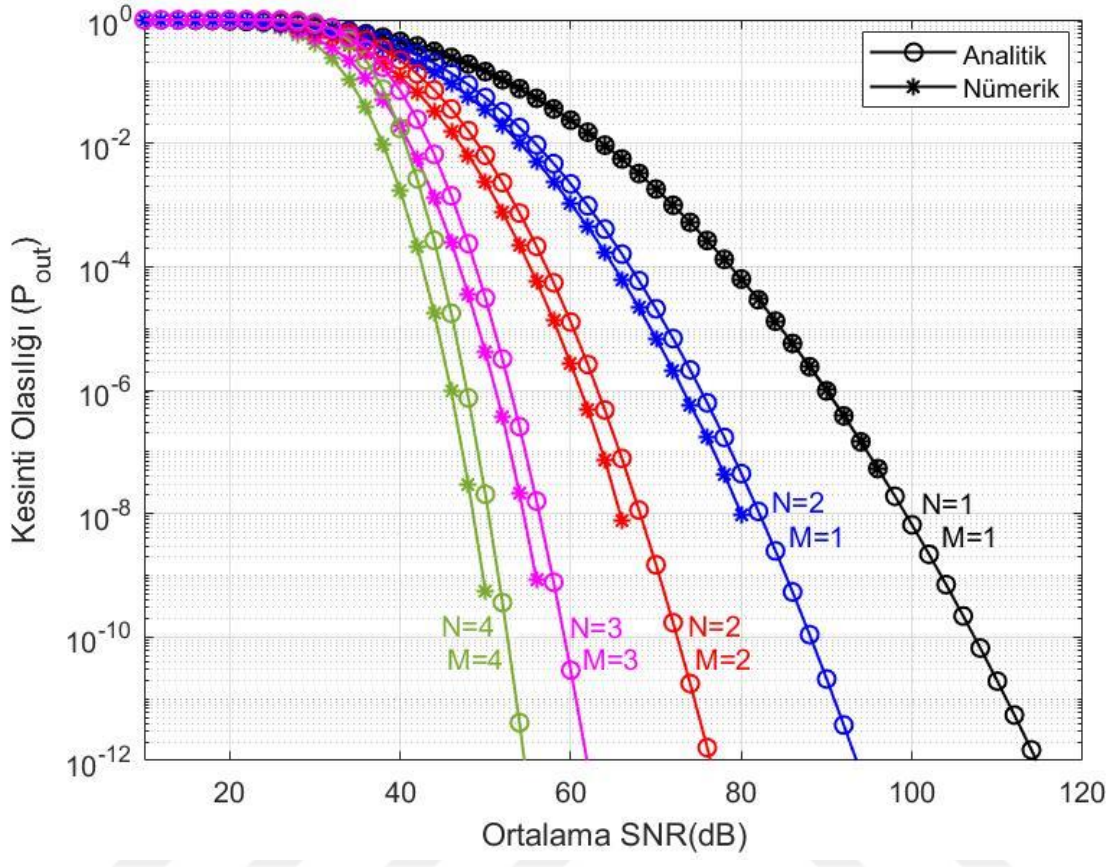
Tablo 4.7: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısı (N, M).

TX ve RX Anten Sayısı, (N, M)	Gerekli SNR, (dB)
(1, 1)	36.62
(2, 1)	30.18
(2, 2)	25.46
(3, 3)	21.65
(4, 4)	19.72

Şekil 4.13'te, MIMO NLOS-UV bağlantısının kesinti performansı, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-14}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan bir türbülans kanalı durumunda farklı verici ve alıcı anten sayısı için gösterilmektedir. Atmosferik türbülans şiddetinin artması nedeniyle analitik ve nümerik sonuçlar arasındaki tutarsızlığın arttığı görülmektedir. Atmosferik türbülans şiddetinin artmasıyla performans iyileştirme farkının da arttığı görülmektedir. Örneğin, SISO bağlantısı ile 4-TX ve 4-RX antenli MIMO bağlantısı arasındaki performans artışı, $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ türbülans şiddetinde 16.90 dB iken, $C_n^2 = 10^{-14}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ şiddetinde 54.74 dB'ye çıkmaktadır.

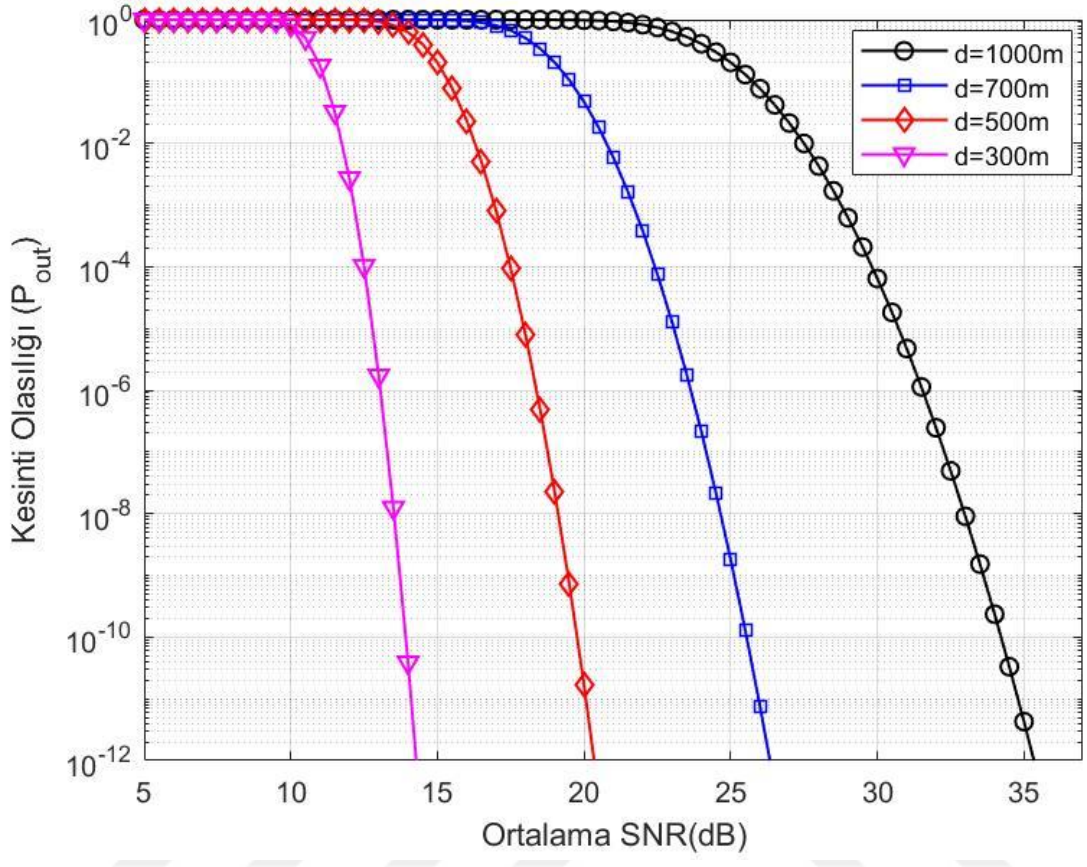
Şekil 4.14, 4-TX ve 4-RX antenli MIMO NLOS-UV bağlantısının kesinti performansı üzerindeki bağlantı uzunluğunun etkisini göstermektedir. NLOS-UV kanalının varyansı bağlantı uzunluğuna bağlı olduğundan, MIMO NLOS-UV sisteminin kesinti olasılığının verici ve alıcı antenler arasındaki mesafenin artmasıyla çarpıcı bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir. Bu sonuçlardan, atmosferik türbülans ve bağlantı uzunluğunun NLOS-UV bağlantılarının performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna varabiliriz. Bu nedenle, uzun mesafeli NLOS-UV bağlantıları için MIMO tekniklerinin kullanılması kaçınılmazdır.

Bir MISO NLOS-UV bağlantısının, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda, verici anten sayısı $N = 2$ ve 4 ve sönümleme yolları arasındaki korelasyon katsayısı $\rho_{kl} = 0,\ 0.2,\ 0.5,$ ve 0.9 için kesinti olasılığı başarım sonuçları Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-14}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı başarım sonuçları.

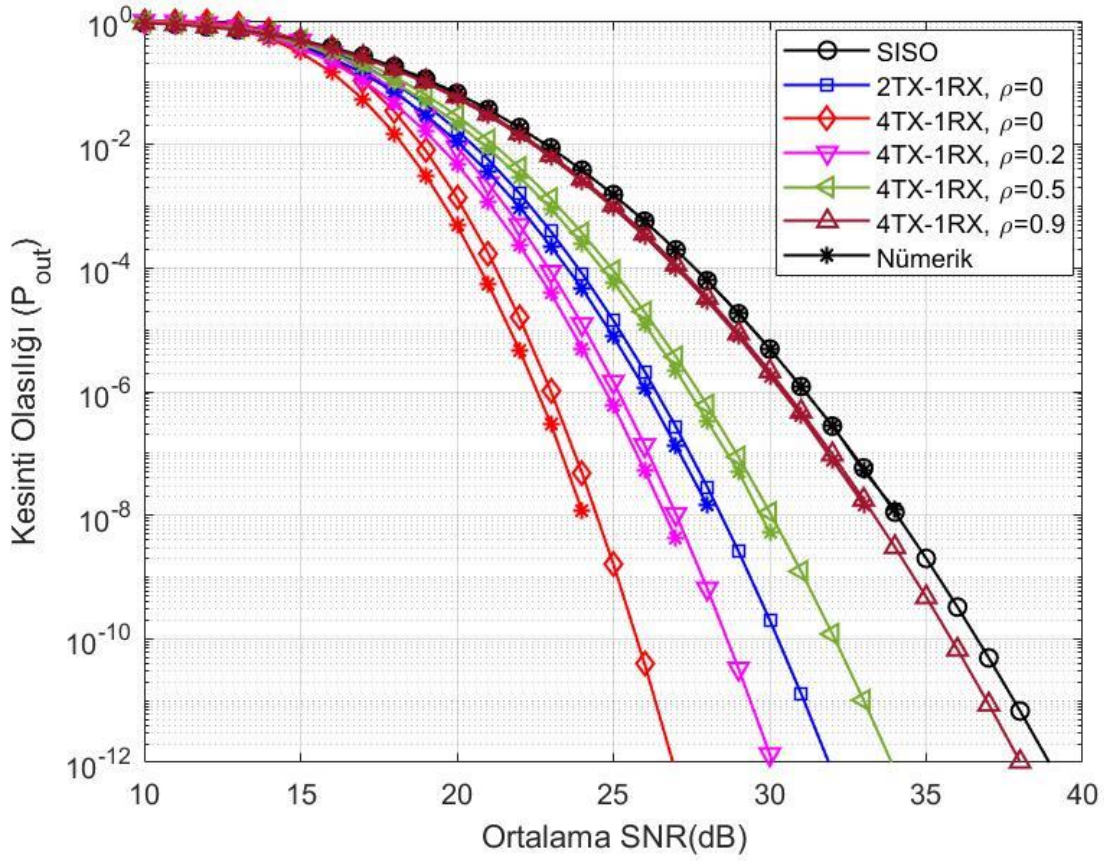
SISO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı performansı da bir kıyaslama ölçütü olarak Şekil 4.15'e dahil edilmiştir. Burada, hem Eşitlik (3.69) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Teorik ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile iyi uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu onaylamaktadır. Simülasyon sonuçları, bahsedilen sistemlerin kesin kesinti performansını sağladığından ve Eşitlik (3.59), (3.71) ve (3.74)'deki çok boyutlu integrallerini tek boyutlu integral'e indirgemek için, ilişkili log-normal rasgele değişkenlerinin toplamı için bir yaklaşım kullanıldığından, teorik ve simülasyon sonuçlar arasında bazı küçük tutarsızlıklar gözlemlenmektedir. Ancak log-normal varyansın dikkate alınan değerleri için fark ihmal edilebilir seviyededir. Atmosferik türbülans şiddetinin artmasıyla log-normal varyansı da arttığından dolayı teorik ve simülasyon sonuçları arasındaki tutarsızlıklar da artmaktadır.



Şekil 4.14: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda 4-TX ve 4-RX antenli MIMO NLOS-UV bağlantısının farklı bağlantı mesafesi için kesinti olasılığı başarım sonuçları.

Şekil 4.15'ten, verici anten sayısının artmasıyla kesinti performansının önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenebilmektedir. Korelasyon katsayısının değerindeki artışla kesinti performansının çarpıcı biçimde düştüğü de görülebilmektedir. Tablo 4.8, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda bir MISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk bir kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici anten sayısını (N) ve korelasyon katsayısı değerlerini göstermektedir. Örnek olarak; SISO NLOS-UV bağlantısına göre N = 4 verici anten sayısına sahip bir MISO NLOS-UV sistemi, ilişkisiz sönümleme yolları durumunda 11.16 dB SNR kazancı sağlayacaktır. Bu kazanç, korelasyon katsayısı 0.2 olduğunda 8 dB'ye, 0.5 olduğunda 4.55 dB'ye ve 0.9 olduğunda 0.83 dB'ye düşecektir. İlişkisiz durumda N = 2 verici anten sayısı ile elde edilen kazancın bile, korelasyon katsayısı 0.5 veya daha yüksek olan ilişkili durumda N = 4 verici anten sayısı ile elde edilen kazançtan daha iyi

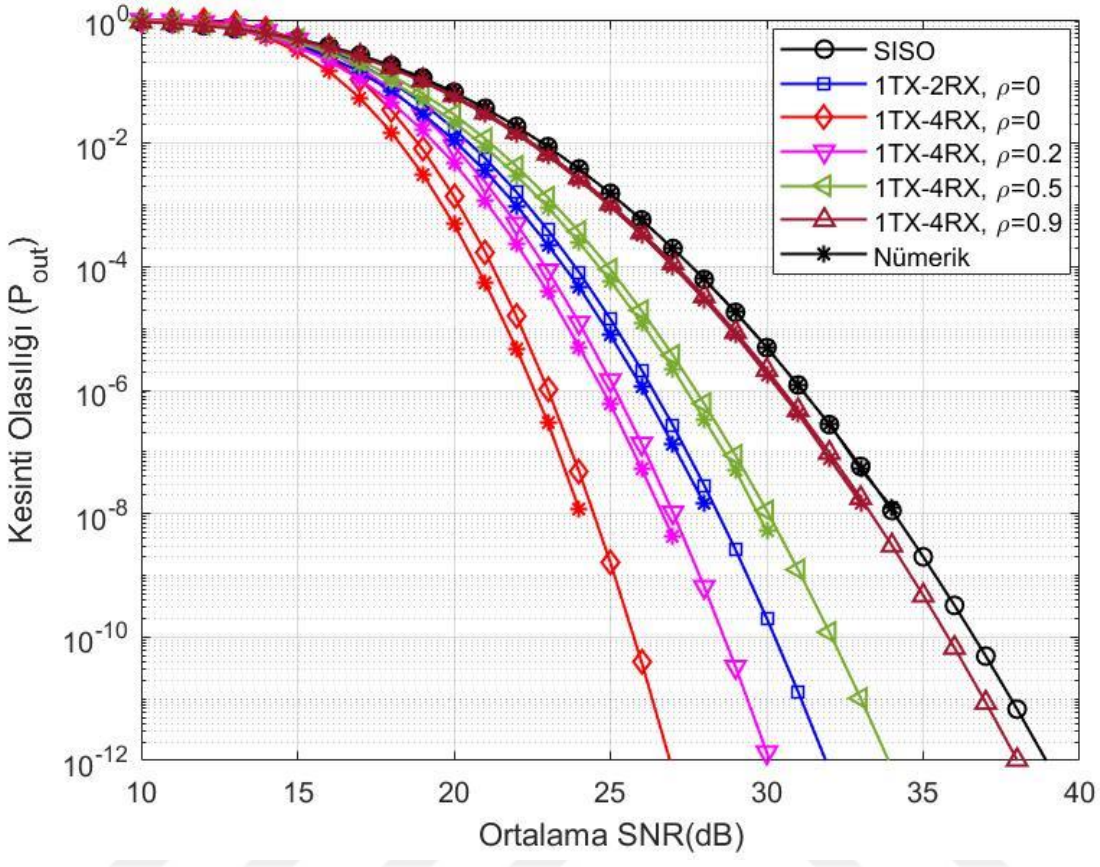
olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle, tam çeşitleme kazancı elde edebilmek için MISO sistemlerinin doğru konfigürasyonu çok önem arz etmektedir.



Şekil 4.15: MISO NLOS-UV bağlantısının, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda farklı verici anten sayısı ve farklı korelasyon katsayısı için kesinti olasılığı başarım sonuçları.

Tablo 4.8: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda MISO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici anten sayısı (N) ve korelasyon katsayısı değerleri.

TX Anten Sayısı, (N)	Korelasyon Katsayısı (ρ_{kl})	Gerekli SNR, (dB)
1	-	36.62
2	0	30.18
4	0	25.46
4	0.2	28.62
4	0.5	32.07
4	0.9	35.79



Şekil 4.16: SIMO NLOS-UV bağlantısının, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda farklı alıcı anten sayısı ve farklı korelasyon katsayısı için kesinti olasılığı başarım sonuçları.

Bir SIMO NLOS-UV bağlantısının, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumundan, alıcı anten sayısı $M = 2$ ve 4 ve sönümleme yolları arasındaki korelasyon katsayısı $\rho_{kl} = 0,\ 0.2,\ 0.5,$ ve 0.9 için kesinti olasılığı başarım sonuçları Şekil 4.16'da gösterilmiştir. SISO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı performansı da bir kıyaslama ölçütü olarak Şekil 4.16'ya dahil edilmiştir. Burada, hem Eşitlik (3.72) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Teorik ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile iyi uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu teyit etmektedir. MISO bağlantıları durumunda olduğu gibi, teorik ve simülasyon sonuçları

Tablo 4.9: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda SIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı alıcı anten sayısı (M) ve korelasyon katsayısı değerleri (ρ_{kl}).

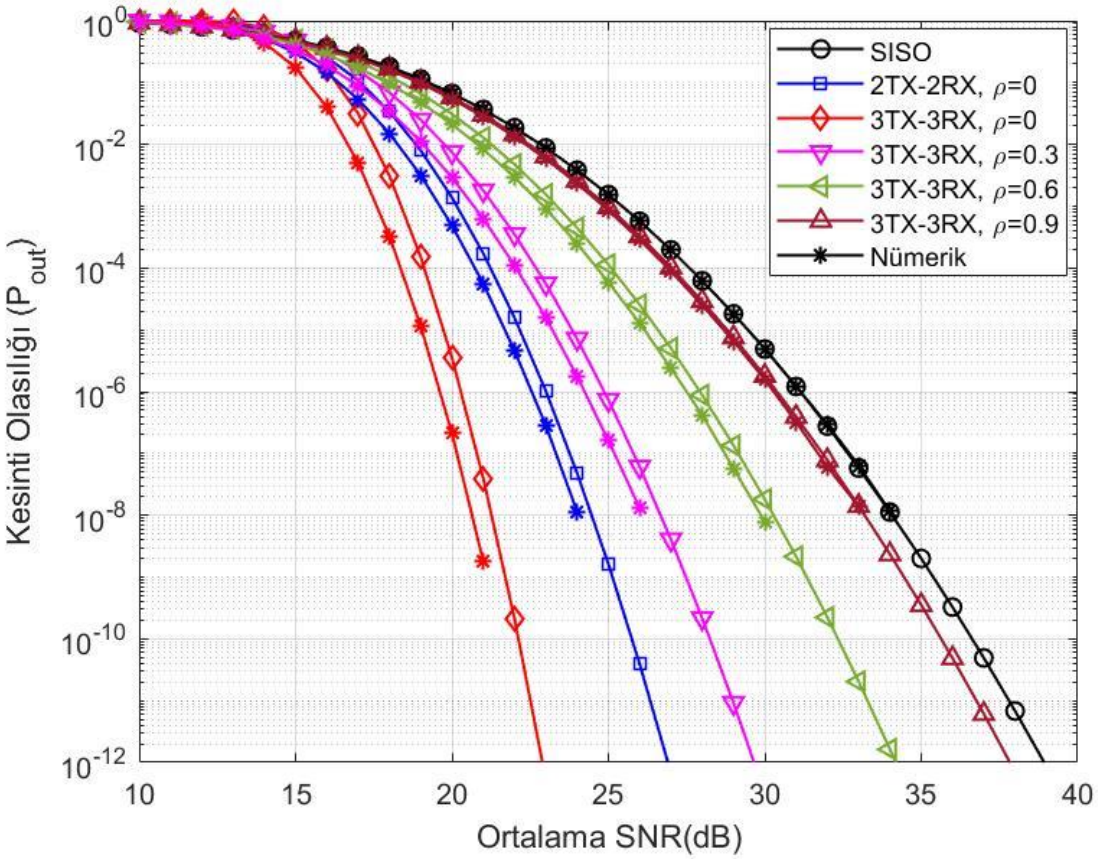
RX Anten Sayısı, (M)	Korelasyon Katsayısı (ρ_{kl})	Gerekli SNR, (dB)
1	-	36.62
2	0	30.18
4	0	25.46
4	0.2	28.62
4	0.5	32.07
4	0.9	35.79

arasındaki bazı küçük tutarsızlıklar, ilişkili log-normal rasgele değişkenlerin toplamı için kullanılan yaklaşımdan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.16'dan, alıcı anten sayısının artmasıyla kesinti performansının önemli ölçüde iyileştiği görülebilmektedir. Korelasyon katsayısının değerinin artmasıyla SIMO bağlantılarının kesinti performansının da dramatik bir şekilde düştüğü gözlemlenmektedir.

Tablo 4.9, Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda bir SIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk bir kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli olan SNR'e karşı alıcı anten sayısını (M) ve korelasyon katsayısı değerlerini (ρ_{kl}) göstermektedir. MISO bağlantılarında olduğu gibi, SIMO bağlantılarının konuşlandırılmasıyla elde edilen çeşitleme kazancı da korelasyon katsayısının değerindeki bir artışla azalmaktadır. Eşitlik (3.69) ve (3.72) karşılaştırıldığında, MISO ve SIMO NLOS-UV bağlantıları için aynı sonucun elde edildiği de görülmektedir.

Bir MIMO NLOS-UV bağlantısının, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda, farklı verici ve alıcı anten sayıları ve sönümleme yolları arasındaki korelasyon katsayısı $\rho_{kl} = 0,\ 0.3,\ 0.6,$ ve 0.9 için kesinti olasılığı başarım sonuçları Şekil 4.17'de gösterilmiştir. SISO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı performansı da bir kıyaslama ölçütü olarak Şekil 4.17'ye dahil edilmiştir. Burada, hem Eşitlik (3.87) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Teorik ve simülasyon

sonuçlarının birbirleri ile iyi uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu teyit etmektedir. MISO ve SIMO bağlantıları durumunda olduğu gibi, teorik ve simülasyon sonuçları arasındaki bazı küçük tutarsızlıklar, ilişkili log-normal rasgele değişkenlerin toplamı için kullanılan yaklaşımdan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.17'den, verici ve alıcı anten sayısının artmasıyla kesinti performansının önemli ölçüde iyileştiği görülebilmektedir. Korelasyon katsayısının değerinin artmasıyla MIMO bağlantılarının kesinti performansının da dramatik bir şekilde düştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 4.17: MIMO NLOS-UV bağlantısının, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda farklı verici ve alıcı anten sayısı ve farklı korelasyon katsayısı için kesinti olasılığı başarım sonuçları.

Tablo 4.10, Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda bir MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk bir kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli olan SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısını (N, M) ve korelasyon katsayısı

Tablo 4.10: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısı (N, M) ve korelasyon katsayısı değerleri (ρ_{kl}).

TX ve RX Anten Sayısı, (N, M)	Korelasyon Katsayısı (ρ_{kl})	Gerekli SNR, (dB)
(1,1)	-	36.62
(2,2)	0	25.46
(3,3)	0	22.12
(3,3)	0.3	28.24
(3,3)	0.6	32.33
(3,3)	0.9	35.63

değerlerini (ρ_{kl}) göstermektedir. MISO ve SIMO NLOS-UV bağlantılarında olduğu gibi, uzaysal korelasyon MIMO NLOS-UV bağlantılarının performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sönümleme yolları arasındaki korelasyon katsayısı 0.3 olan 3-TX ve 3-RX antenli bir MIMO NLOS-UV bağlantısı ile elde edilen kazancın, ilişkisiz sönümleme yolları durumunda 2-TX ve 2-RX antenli bir MIMO NLOS-UV bağlantısı ile elde edilen kazançtan daha az olduğu görülebilmektedir.

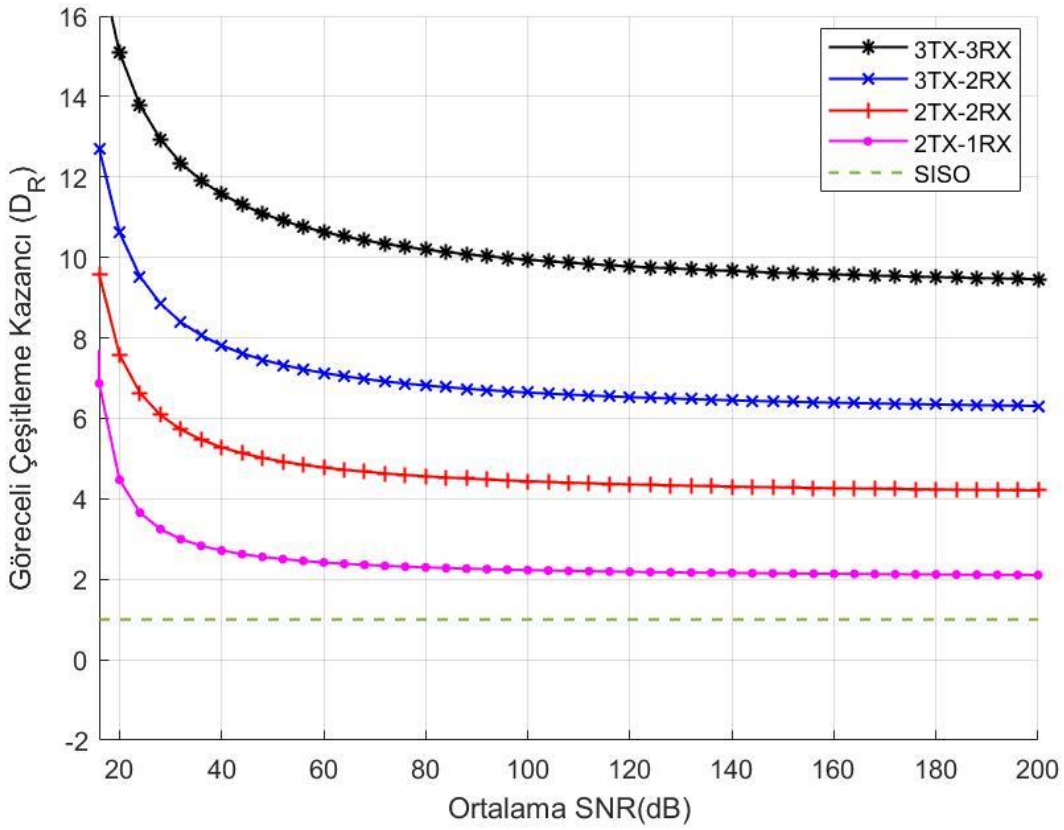
4.4. UZAYSAL ÇEŞİTLEMELİ NLOS-UV SİSTEMLERİNİN GÖRECELİ ÇEŞİTLEME KAZANCI

Bu bölümde, uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV sistemlerinin hem ilişkisiz hem de ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda göreceli çeşitleme kazancının başarım sonuçları sunulmaktadır. Elde edilen başarım sonuçlarının SISO NLOS-UV bağlantıları ile karşılaştırılıp uzaysal çeşitleme ile elde edilen çeşitleme kazancı gösterilmiştir.

İlişkisiz sönümleme yolları durumunda ve $(\mathrm{N}, \mathrm{M}) = (2,1), (2,2), (3,2),$ ve $(3,3)$ TX ve RX anten sayısı için MIMO NLOS-UV bağlantılarının göreceli çeşitleme kazancı Şekil 4.18'de gösterilmiştir. SISO NLOS-UV bağlantılarınıın göreceli çeşitleme kazancı da bir kıyaslama ölçütü olarak Şekil 4.18'e dahil edilmiştir. İlişkisiz sönümleme yolları durumunda, MIMO bağlantılarının göreceli çeşitleme kazancının, yüksek SNR değerlerinde TX ve RX anten sayısının çarpımına yakınsadığı görülebilmektedir. Bu sonuç analitik türetmelerimizle tutarlıdır

ve ilişkisiz atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantılarının konuşlandırılmasıyla tam çeşitleme kazancı elde edilmektedir.

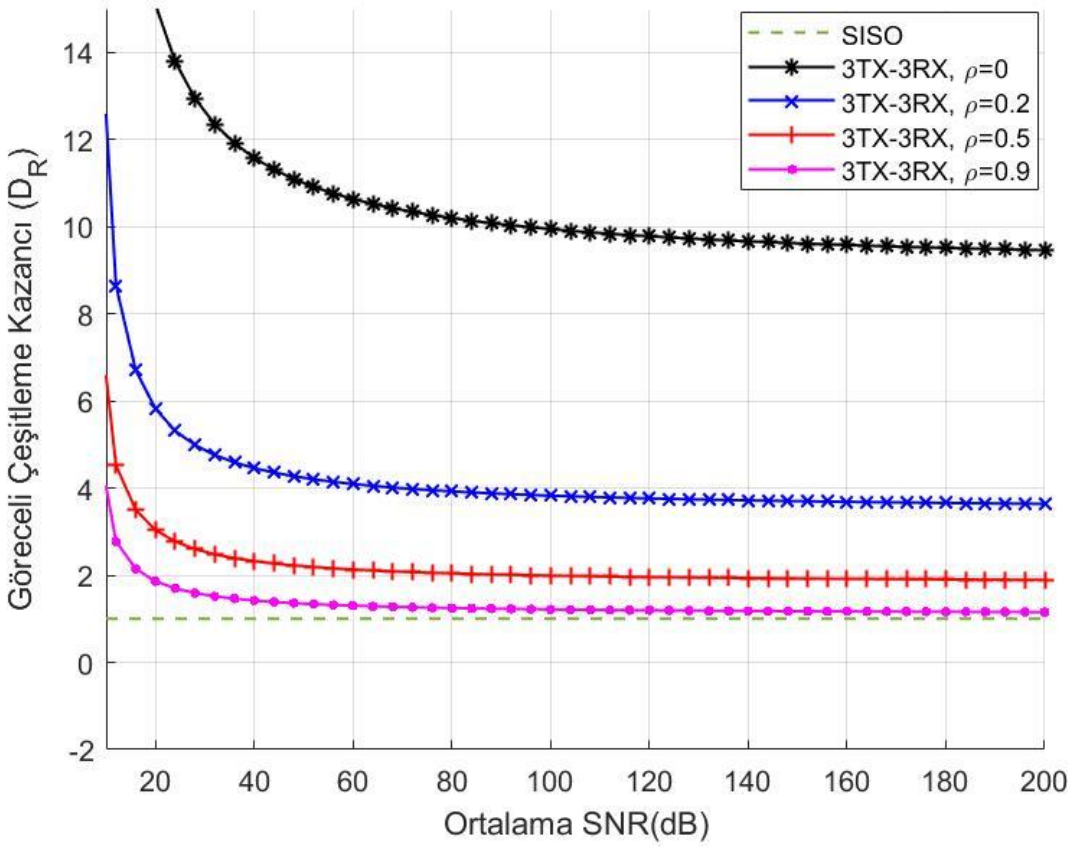
3-TX ve 3-RX anten sayısı içeren bir MIMO NLOS-UV bağlantısının göreceli çeşitleme kazancı çeşitli korelasyon katsayısı değerleri için Şekil 4.19'da gösterilmektedir. SISO NLOS-UV bağlantısının göreceli çeşitleme kazancı da bir kıyaslama ölçütü olarak Şekil 4.19'a dahil edilmiştir.



Şekil 4.18: İlişkisiz atmosferik türbülans kanalları durumunda MIMO NLOS-UV bağlantılarının göreceli ceşitleme kazancı.

Uzaysal korelasyonun MIMO NLOS-UV bağlantılarının çeşitleme kazancını önemli ölçüde etkilediği ve sönümleme yolları arasındaki korelasyon katsayısı değerinin artmasıyla MIMO NLOS-UV bağlantılarının göreceli çeşitleme kazancının azaldığı gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.19'dan görülebileceği gibi, 3-TX ve 3-RX anten sayısı içeren bir MIMO NLOS-UV bağlantısının göreceli çeşitleme kazancı, sönümleme yolları arasındaki bir $\rho_{kl} = 0$ korelasyon

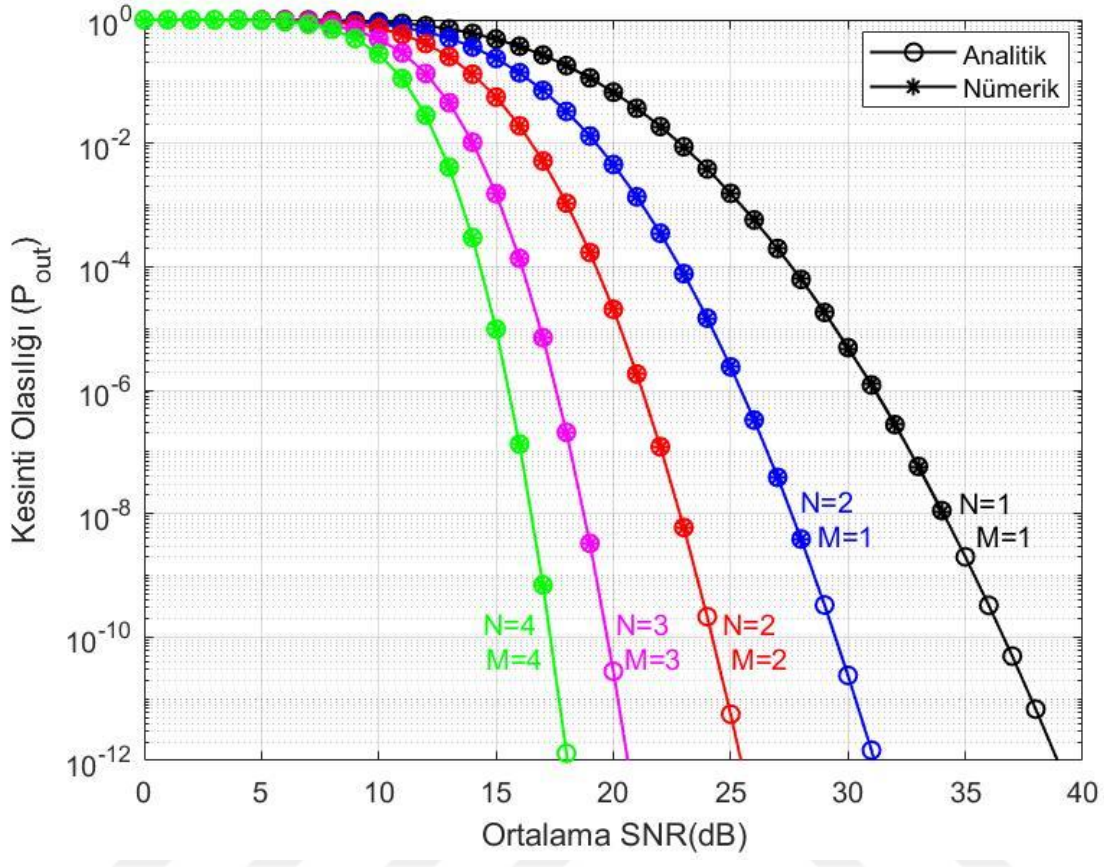
katsayısı için yüksek SNR değerlerinde 9'a yakınsarken, $\rho_{kl} = 0.3$ olduğunda 3.6'ya yakınsar ve korelasyon katsayısı bire yakınsadığında SISO bağlantısının göreceli çeşitleme kazancına yakınsamaktadır. Dolayısıyla, MIMO sistemleri ile tam çeşitleme kazancı elde edebilmek için verici ve alıcı antenlerin sönümleme yollarının ilişkisiz olacak şekilde konuşlandırılmaları çok önem arz etmektedir.



Şekil 4.19: İlişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda farklı korelasyon katsayısı değerleri için MIMO NLOS-UV bağlantılarının göreceli çeşitleme kazancı.

4.5. ANTEN SEÇME ŞEMALI MIMO NLOS-UV BAĞLANTILARININ KESİNTİ OLASILIĞI BAŞARIM SONUÇLARI

Bu bölümde anten seçme şemalı MIMO NLOS-UV sistemlerinin kesinti olasılığı başarım sonuçları elde edilecektir. Kesinti olasılığı başrım sonuçları çıkarımlarında, NLOS-UV bağlantı mesafesi $d = 500$ m ve eşik SNR değeri $\gamma_{th} = 5$ dB olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 4.20: Atmosferik türbülans kanalları durumunda verici ve/veya alıcı anten seçimi olan MIMO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı başarım sonuçları.

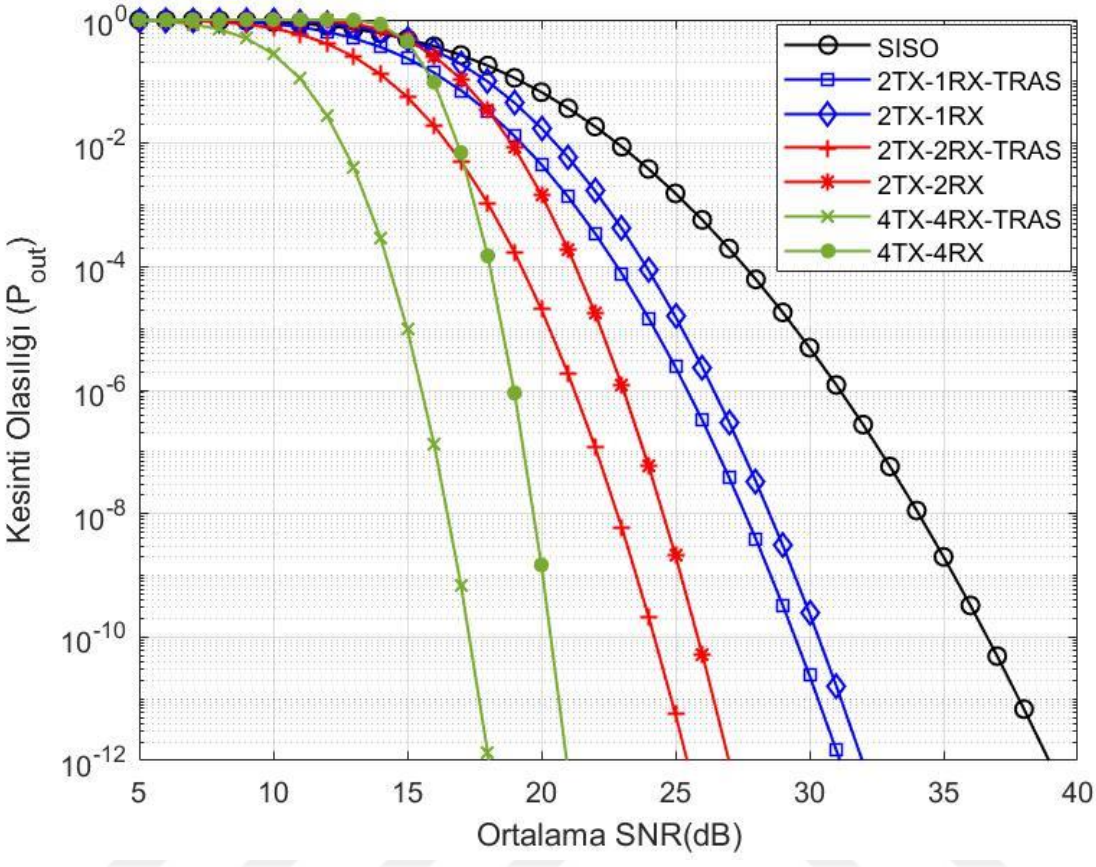
Şekil 4.20'de, anten seçim şemasına sahip bir MIMO NLOS-UV bağlantısının kesinti olasılığı başarımı türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda ve $(\mathrm{N}, \mathrm{M}) = (2,1), (2,2), (3,2),$ ve $(3,3)$ verici ve alıcı anten sayısı için verilmektedir. Burada, hem Eşitlik (3.106) ile verilen teorik sonuçlar hem de Monte Carlo simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Teorik ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile mükemmel uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu teyit etmektedir. Şekil 4.20'den, verici ve alıcı anten sayısının artmasıyla kesinti performansının önemli ölçüde iyileştiği görülebilmektedir. Tablo 4.11, türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan ilişkisiz atmosferik türbülans kanalları durumunda TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10}'luk bir kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli olan SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısını (N, M) göstermektedir. Örneğin, 10^{-10}'luk bir kesinti olasılığına ulaşmak için, SISO bağlantısında 36.62 dB SNR'e

Tablo 4.11: Türbülans şiddeti $C_n^2 = 10^{-15}\,\mathrm{m}^{-2/3}$ olan atmosferik türbülans kanalları durumunda TRAS şemalı MIMO NLOS-UV bağlantısında 10^{-10} 'luk kesinti olasılığı değerini elde etmek için gerekli SNR'e karşı verici ve alıcı anten sayısı (N, M).

TX ve RX Anten Sayısı, (N, M)	Gerekli SNR, (dB)
(1, 1)	36.62
(2, 1)	29.45
(2, 2)	24.20
(3, 3)	19.73
(4, 4)	17.31

ihtiyaç duyulurken, iki verici anten arasından bir verici anten seçildiğinde 29.45 dB, iki verici ve iki alıcı anten arasından bir verici ve bir alıcı anten seçildiğinde 24.20 dB, üç verici ve üç alıcı anten arasından bir verici ve bir alıcı anten seçildiğinde 19.73 dB, ve dört verici ve dört alıcı anten arasından bir verici ve bir alıcı anten seçildiğinde 17.31 dB SNR'e ihtiyaç duyulmaktadır. Açıkça görüldüğü gibi, iki verici anten arasından bir anten seçimi durumunda bile SISO NLOS-UV bağlantısına göre 7.17 dB performans artışı olacaktır.

Şekil 4.21'de, anten seçimi olan ve olmayan MIMO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı başarımı karşılaştırılmıştır. Açıkça görüldüğü gibi, anten seçim şeması olan MIMO NLOS-UV bağlantıları anten seçim şeması olmayan MIMO NLOS-UV bağlantılarına göre daha iyi performans göstermektedir ve performans artışı verici ve alıcı anten sayısının artmasıyla artmaktadır. Anten seçim şemaları olmayan MIMO NLOS-UV bağlantılarının performansının, yüksek SNR değerlerinde anten seçim şemaları olan MIMO NLOS-UV bağlantılarının performansına yakınsadığı da gözlemlenmektedir. Bu durum, bahsedilen şemaların çeşitleme kazançları için türetilen analitik ifadeleri ile tutarlıdır. Buradaki sonuçlara bakılarak, uzun mesafeli NLOS-UV bağlantıları için anten seçim şemaları olan MIMO NLOS-UV tekniklerinin kullanılmasının kaçınılmaz olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4.21: Anten seçim şemaları olan ve olmayan MIMO NLOS-UV sistemlerinin kesinti olasılığı başarım karşılaştırması.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Atmosferik türbülansın şiddeti sinyalin dalga boyu ile ters orantılı olduğundan, UV dalgalar, görünür ışık ve kızılötesi dalgalara göre atmosferik türbülanstan daha çok etkilenmektedir. Aynı zamanda, atmosferik türbülans kanalının varyansı bağlantının mesafesine bağlı olduğundan, uzun mesafeli NLOS-UV bağlantılarında atmosferik türbülansın etkisi kayda değer hale gelmektedir. Dolayısıyla, uzun mesafeli NLOS-UV bağlantılarında güvenilir bir iletişim sistemini tasarlayabilmek için atmosferik türbülansın etkisinin dikkate alınması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, uzun mesafeli NLOS-UV bağlantılarına atmosferik türbülansın bozucu etkilerini izole edebilmek için uzaysal çeşitleme ve anten seçme teknikleri uygulanmaktadır. Özellikle, uzaysal çeşitleme teknikleri kapsamında MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV ve anten seçme teknikleri kapsamında, verici anten seçimi (TAS), alıcı anten seçimi (RAS), ve verici ve alıcı antenlerin birlikte seçimi (TRAS) şemaları üzerinde durulmaktadır.

Söz konusu tekniklerin atmosferik türbülansın bozucu etkilerini azaltma güçlerini görebilmek için atmosferik türbülans kanalları durumunda bit hata oranı ve kesinti olasılığı analizleri yapılmıştır. Uzaysal çeşitleme teknikleri kapsamında MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV sistemlerinin bit hata oranı ve kesinti olasılığı analizi yapılmış ve her birisinin bit hata oranları ve kesinti olasılıkları için kapalı form ifadeler türetilmiştir. Uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV sistemler için bir kıyaslama ölçütü olarak SISO NLOS-UV bağlantılarının da bit hata oranı ve kesinti olasılığı için kapalı form ifadeler türetilmiştir ve uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantıları ile karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde anten seçme teknikleri kapsamında TAS, RAS, ve TRAS şemalarının kesinti olasılıkları için kapalı form ifadeler türetilmiştir. Elde edilen ifadelerin SISO NLOS-UV ve anten seçimi olmadan MIMO NLOS-UV bağlantılarının kesinti olasılığı ifadeleri ile karşılaştırması yapılmıştır.

Bununla birlikte, uzaysal korelasyonun uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV sistemler üzerindeki etkisi araştırılmış ve ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV bağlantılarının bit hata oranı ve kesinti olasılığı ifadeleri türetilmiş ve korelasyon katsayısı değerinin atmosferik türbülans kanalının varysansı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Sönümleme yolları arasındaki korelasyonun uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV sistemlerinin performansını önemli ölçüde düşürdüğü gösterilmiştir.

Aynı zamanda, uzaysal çeşitlemeli ve anten seçimi şemalı NLOS-UV bağlantılarının çeşitleme kazancı incelenmiştir. Uzaysal çeşitleme teknikleri kapsamında MISO, SIMO, ve MIMO NLOS-UV sistemlerinin hem ilişkisiz hem de ilişkili atmosferik türbülans kanalları durumunda göreceli çeşitleme kazancı ve asimptotik göreceli çeşitleme kazancı ifadeleri türetilmiştir. İlişkisiz atmosferik türbülans kanalları durumunda uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV sistemlerinin göreceli çeşitleme kazancının yüksek SNR değerlerinde verici ve alıcı anten sayısının çarpımına eşit olduğu ve tam çeşitleme kazancı sağladığı gösterilmiştir. Uzaysal korelasyonun uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarının çeşitleme kazancı üzerindeki etkisi araştırılmış ve uzaysal korelasyonun çeşitleme kazancını önemli ölçüde düşürdüğü gösterilmiştir. Uzaysal çeşitlemeli NLOS-UV bağlantılarında tam çeşitleme kazancı elde edebilmek için sönümleme yollarının birbirleriyle ilişkisiz olmaları gerektiği ispatlanmıştır.

Anten seçme şemalı MIMO NLOS-UV sistemlerinin çeşitleme kazancı analizi de yapılmış ve RAS, TAS, ve TRAS teknikleri için göreceli çeşitleme kazancı ve asimptotik göreceli çeşitleme kazancı ifadeleri türetilmiştir. Anten seçme şemalı MIMO NLOS-UV sistemerinin göreceli çeşitleme kazancı ve asimptotik göreceli çeşitleme kazancının tüm SNR değerlerinde verici ve alıcı anten sayılarının çarpımına eşit olduğu gösterilmiştir. Dolayısıyla, anten seçme tekniklerinin de tam çeşitleme kazancı sağladığı ve anten seçimi olmayan MIMO NLOS-UV sistemlere göre daha iyi performans sağladığı gösterilmiştir.

Atmosferik türbülansın bozucu etkilerini azaltmaya yönelik önerilen tekniklerin bit hata oranı ve kesinti olasılığı başarım sonuçları hem türetilen analitk ifadeler kullanılarak hem de Monte Carlo simülasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Teorik ve simülasyon sonuçlarının birbirleri ile iyi uyumu, elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu teyit etmektedir. Elde edilen sonuçlar, uzaysal çeşitleme ve anten seçme tekniklerinin atmosferik türbülans kanalları durumunda NLOS-UV bağlantılarının performansını önemli ölçüde iyileştirdiği göstermektedir. Elde edilen performans kazancı verici ve alıcı anten sayısının artmasıyla arttığı görülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda, uzun mesafeli NLOS-UV bağlantılarda güvenilir bir iletişim sistemini elde edebilmek için uzaysal çeşitleme ve anten seçme tekniklerinin kullanılmasının kaçınılmaz olduğu sonucuna varılmıştır.

NLOS-UV kanalının birim dürtü cevabından görüldüğü gibi NLOS-UV kanalı yüksek bantgenişlikli siyaller için çoklu yol yıyılımına ve dolayısıyla semboller arası girişime (Inter-Symbol Intereference, ISI) neden olabilmektedir. Bu nedenle, uzun mesafeli NLOS-UV

bağlantıları, hem atmosferik türbülans kaynaklı sönümlemeden hem de çoklu yol yayılım kaynaklı sönümlemeden etkilenecektir. Böylece, gelecekteki çalışmalar NLOS-UV bağlantılarda çoklu yol yaylımından kaynaklanan sönümleme ve semboller arası girişimine karşı çok etkili olan ortogonal frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) tekniği ile atmosferik türbülanstan kaynaklanan sönümlemeye karşı etkili olan uzaysal çeşitleme ve anten seçme tekniklerinin birleştirilmeleri üzerinde olabilecektir.

KAYNAKLAR

[1]. Reilly, D.M., 1976, *Atmospheric optical communications in the middle ultraviolet*, (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

[2]. Luettgen, M.R., Shapiro, J.H. and Reilly, D.M., 1991, Non-line-of-sight single-scatter propagation model, *JOSA A,* 8(12), 1964-1972.

[3]. Liao, L., 2015, *Long distance non-line-of-sight ultraviolet communication channel analysis and experimental verification*, (Doctoral dissertation, UC Riverside).

[4]. Gagliardi, R.M. and Karp, S., 1995, *Optical communications*, Wiley-Interscience, New York.

[5]. Kahn, J.M. and Barry, J.R., 1997, Wireless infrared communications, *Proceedings of the IEEE*, 85(2), 265-298.

[6]. Tavares, A., Valadas, R., Aguiar, R.L. and Duarte, A.O., 2003, Angle diversity and rate-adaptive transmission for indoor wireless optical communications, IEEE Communications Magazine, 41(3), 64-73.

[7]. Ding, H., 2011, *Modeling and characterization of ultraviolet scattering communication channels*, (Doctoral dissertation, UC Riverside).

[8]. Xu, Z., Chen, G., Abou-Galala, F. and Leonardi, M., 2007, September, Experimental performance evaluation of non-line-of-sight ultraviolet communication systems, *In Free-Space Laser Communications VII, Vol. 6709*, 25 September 2007 San Diego, CA, USA, International Society for Optics and Photonics, 67090Y.

[9]. International Electrotechnical Commission, 2005, Safety of laser products-Part 12: Safety of free space optical communication systems used for transmission of information, *IEC 60825-12 Ed. 1.0.*

[10]. Sunstein, D.E., 1968, *A scatter communications link at ultraviolet frequencies*, (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

[11]. Reilly, D.M. and Warde, C., 1979, Temporal characteristics of single-scatter radiation, *JOSA*, 69(3), 464-470.

[12]. Reilly, D.M., Moriarty, D.T. and Maynard, J.A., 2004, Unique properties of solar blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks, In *Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks, Vol. 5611,* 30 November 2004 London, International Society for Optics and Photonics, 244-254.

[13]. Fishburne, E.S., Neer, M.E. and Sandri, G., 1976, *Voice communication via scattered ultraviolet radiation, volume 1*, AERONAUTICAL RESEARCH ASSOCIATES OF PRINCETON INC NJ.

[14]. Puschell, J.J. and Bayse, R., 1990, High data rate ultraviolet communication systems for the tactical battlefield, In *Conference Proceedings on Tactical Communications, Vol. 1*, 24-26 April 1990 Fort Wayne, IN, USA, IEEE, 253-267.

[15]. Charles, B., Hughes, B., Erickson, A., Wilkins, J. and Teppo, E.A., 1994, Ultraviolet laser-based communication system for short-range tactical applications, In *Visible and UV Lasers, Vol. 2115,* 1 June 1994 Los Angeles, CA, USA, International Society for Optics and Photonics, 79-86.

[16]. Bai, X., Mcintosh, D., Liu, H. and Campbell, J.C., 2007, Ultraviolet single photon detection with Geiger-mode 4H-SiC avalanche photodiodes, *IEEE Photonics Technology Letters*, 19(22), 1822-1824.

[17]. Shen, S.C., Zhang, Y., Yoo, D., Limb, J.B., Ryou, J.H., Yoder, P.D. and Dupuis, R.D., 2007, Performance of deep ultraviolet GaN avalanche photodiodes grown by MOCVD, *IEEE Photonics Technology Letters*, 19(21), 1744-1746.

[18]. Shaw, G.A., Nischan, M.L., Iyengar, M.A., Kaushik, S. and Griffin, M.K., 2000, NLOS UV communication for distributed sensor systems, In *Integrated Command*

Environments, Vol. 4126, 28 November 2000 San Diego, CA, USA, International Society for Optics and Photonics, 83-96.

[19]. Shaw, G.A., Siegel, A.M. and Model, J., 2006, Extending the range and performance of non-line-of-sight ultraviolet communication links, In *Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications VIII, Vol. 6231,* 2 May 2006 Orlando, Florida, USA, International Society for Optics and Photonics, 62310C.

[20]. Kedar, D. and Arnon, S., 2006, Non-line-of-sight optical wireless sensor network operating in multiscattering channel, *Applied optics,* 45(33), 8454-8461.

[21]. Chen, G., Abou-Galala, F., Xu, Z. and Sadler, B.M., 2008, Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links, *Optics Express,* 16(19), 15059-15068.

[22]. Chen, G., Xu, Z. and Sadler, B.M., 2010, Experimental demonstration of ultraviolet pulse broadening in short-range non-line-of-sight communication channels, *Optics express,* 18(10), 10500-10509.

[23]. Chen, G., Xu, Z., Ding, H. and Sadler, B.M., 2009, Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications, *Optics express,* 17(5), 3929-3940.

[24]. Ding, H., Chen, G., Majumdar, A.K., Sadler, B.M. and Xu, Z., 2009, Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication, *IEEE journal on selected areas in communications,* 27(9), 1535-1544.

[25]. Drost, R.J., Moore, T.J. and Sadler, B.M., 2011, Monte-Carlo-based multiple-scattering channel modeling for non-line-of-sight ultraviolet communications, In *Atmospheric Propagation VIII, Vol. 8038,* 10 May 2011 Orlando, Florida, USA, International Society for Optics and Photonics, 803802.

[26]. Chen, G., Drost, R.J., Sadler, B.M. and Liao, L., 2013, Long-distance ultraviolet scattering channel measurements: analog vs. digital approaches, In *CLEO:*

QELS_Fundamental Science, 9–14 June 2013 San Jose, CA, USA, Optical Society of America, JTu4A-88.

[27]. He, Q., Sadler, B.M. and Xu, Z., 2009, Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communications, In *Free-space laser communications IX, Vol. 7464,* 21 August 2009 San Diego, CA, USA, International Society for Optics and Photonics, 74640H.

[28]. Noshad, M., Brandt-Pearce, M. and Wilson, S.G., 2013, NLOS UV communications using M-ary spectral-amplitude-coding, *IEEE Transactions on Communications,* 61(4), 1544-1553.

[29]. Li, Y., Wang, L., Xu, Z. and Krishnamurthy, S.V., 2011, Neighbor discovery for ultraviolet ad hoc networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 29(10), 2002-2011.

[30]. Wang, L., Li, Y. and Xu, Z., 2011, On connectivity of wireless ultraviolet networks, JOSA A, 28(10), 1970-1978.

[31]. Vavoulas, A., Sandalidis, H.G. and Varoutas, D., 2011, Connectivity issues for ultraviolet UV-C networks, *Journal of Optical Communications and Networking,* 3(3), 199-205.

[32]. Shaw, G.A., Siegel, A.M. and Nischan, M.L., 2003, Demonstration system and applications for compact wireless ultraviolet communications, In *Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Defense and Law Enforcement II, Vol. 5071,* 22 September 2003 Orlando, Florida, USA, International Society for Optics and Photonics, 241-252.

[33]. Liao, L., Chen, G., Sadler, B.M. and Li, Z., 2013, GPS synchronized UV communication system performance based on USRP, In *Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans II, Vol. 8874,* 25 September 2013 San Diego, CA, USA, International Society for Optics and Photonics, 887409.

[34]. Ding, H., Chen, G., Majumdar, A.K., Sadler, B.M. and Xu, Z., 2011, Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels, In *Atmospheric Propagation VIII, Vol. 8038,* 25 May 2011 Orlando, Florida, USA, International Society for Optics and Photonics, 80380J.

[35]. Zuo, Y., Xiao, H., Wu, J., Hong, X. and Lin, J., 2012, Effect of atmospheric turbulence on non-line-of-sight ultraviolet communications, In *2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-(PIMRC),* 9-12 Sept. 2012 Sydney, NSW, Australia, IEEE, 1682-1686.

[36]. Xiao, H., Zuo, Y., Fan, C., Wu, C. and Wu, J., 2012, Non-line-of-sight ultraviolet channel parameters estimation in turbulence atmosphere, In *Asia Communications and Photonics Conference,* 7–10 November 2012 Guangzhou, China, Optical Society of America, AF3G-5.

[37]. Ardakani, M.H., Heidarpour, A.R. and Uysal, M., 2015, Non-line-of-sight ultraviolet communications over atmospheric turbulence channels, In *2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW),* 7-8 Sept. 2015 Istanbul, Turkey, IEEE, 55-59.

[38]. Goldsmith, A., 2012, *Wireless communications,* Cambridge university press, Cambridge.

[39]. Navidpour, S.M., Uysal, M. and Kavehrad, M., 2007, BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity, *IEEE Transactions on wireless communications*, 6(8), 2813-2819.

[40]. El-Shimy, M.A. and Hranilovic, S., 2015, Spatial-diversity imaging receivers for non-line-of-sight solar-blind UV communications, *Journal of Lightwave Technology*, 33(11), 2246-2255.

[41]. Xiao, H., Zuo, Y., Wu, J., Li, Y. and Lin, J., 2012, BER performance of non-line-of-sight ultraviolet links with spatial diversity in turbulence atmosphere, In *IEEE Photonics Conference 2012,* 23-27 Sept. 2012 Burlingame, CA, USA, IEEE, 640-641.

[42]. Han, D., Liu, Y., Zhang, K., Luo, P. and Zhang, M., 2012, Theoretical and experimental research on diversity reception technology in NLOS UV communication system, *Optics express*, 20(14), 15833-15842.

[43]. Meng, X., Zhang, M., Han, D., Song, L. and Luo, P., 2015, Experimental study on 1×4 real-time SIMO diversity reception scheme for a ultraviolet communication system, In *2015 20th European Conference on Networks and Optical Communications-(NOC)*, 30 June-2 July 2015 London, UK, IEEE, 1-4.

[44]. Gupta, A. and Brandt-Pearce, M., 2012, Receiver design for shot noise limited MIMO FSO/UV communication systems, In *2012 IEEE Globecom Workshops*, 3-7 Dec. 2012 Anaheim, CA, USA, IEEE, 1183-1187.

[45]. Arya, S. and Chung, Y.H., 2018, Non-line-of-sight ultraviolet communication with receiver diversity in atmospheric turbulence, *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(10), 895-898.

[46]. Wang, G., Wang, K., Gong, C., Zou, D., Jiang, Z. and Xu, Z., 2018, A 1Mbps real-time NLOS UV scattering communication system with receiver diversity over 1km, *IEEE Photonics Journal*, 10(2), 1-13.

[47]. Qin, H., Zuo, Y., Li, F., Cong, R., Meng, L. and Wu, J., 2017, Noncoplanar geometry for mobile NLOS MIMO ultraviolet communication with linear complexity signal detection, *IEEE Photonics Journal*, 9(5), 1-12.

[48]. Xing, Y., Zhang, M., Han, D. and Ghassemlooy, Z., 2016, Experimental study of a 2×2 MIMO scheme for ultraviolet communications, In *2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN)*, 24-27 Sept. 2016 Hangzhou, China, IEEE, 1-3.

[49]. Ardakani, M.H., Heidarpour, A.R. and Uysal, M., 2016, Performance analysis of MIMO NLOS UV communications over atmospheric turbulence channels, In *2016 IEEE*

Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 3-6 April 2016 Doha, Qatar, IEEE, 1-5.

[50]. Gong, C., Huang, B. and Xu, Z., 2016, Correlation and outage probability of NLOS SIMO optical wireless scattering communication channels under turbulence, *Journal of Optical Communications and Networking,* 8(12), 928-937.

[51]. Li, F., Zuo, Y., Li, A., Du, Z. and Wu, J., 2019, Spatially correlated MIMO for exploiting the capacity of NLOS ultraviolet turbulent channels, *Optics express,* 27(21), 30639-30652.

[52]. Gong, C. and Xu, Z., 2015, LMMSE SIMO receiver for short-range non-line-of-sight scattering communication, *IEEE Transactions on Wireless Communications,* 14(10), 5338-5349.

[53]. Zuo, Y., Li, A., Li, F., Wu, J., Zhang, J. and Zhang, J., 2019, Performance Analysis of Subcarrier STBC-MIMO Ultraviolet Communication System, In *Asia Communications and Photonics Conference*, 2–5 November 2019 Chengdu, China, Optical Society of America, M4A-11.

[54]. Huang, B., Gong, C. and Xu, Z., 2014, Correlation study for single-input multiple-output optical wireless scattering channels, In *2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers,* 2-5 Nov. 2014 Pacific Grove, CA, USA, IEEE, 1376-1380.

[55]. Qin, H., Zuo, Y., Li, F., Cong, R., Meng, L. and Wu, J., 2017, Scattered propagation MIMO channel model for non-line-of-sight ultraviolet optical transmission, *IEEE Photonics Technology Letters,* 29(21), 1907-1910.

[56]. Lee, E.J. and Chan, V.W., 2004, Part 1: Optical communication over the clear turbulent atmospheric channel using diversity, *IEEE journal on selected areas in communications,* 22(9), 1896-1906.

[57]. El-Shimy, M.A.E.H., 2014, *Communications through non-line-of-sight solar-blind ultraviolet scattering channels,* (Doctoral dissertation, McMaster University).

[58]. Sensor Electronic Technology, 2021, *UV-C LED Solutions,* http://www.s-et.com/en/, [Ziyaret tarihi: 13 April 2021].

[59]. Crystal IS, 2020, *High performance UVC LEDs,* Crystal IS. https://cisuvc.com/, [Ziyaret tarihi: 13 April 2021].

[60]. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2004, Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation), *Health Physics,* 87(2), 171-186.

[61]. Bai, X., Liu, H.D., McIntosh, D.C. and Campbell, J.C., 2009, High-detectivity and high-single-photon-detection-efficiency 4H-SiC avalanche photodiodes, *IEEE Journal of quantum electronics,* 45(3), 300-303.

[62]. Vert, A., Soloviev, S. and Sandvik, P., 2009, SiC avalanche photodiodes and photomultipliers for ultraviolet and solar-blind light detection, *physica status solidi (a),* 206(10), 2468-2477.

[63]. Sandvik, P., Soloviev, S., Vert, A., Bolotnikov, A., McMahon, J. and Campbell, J., 2010, *SiC deep ultraviolet avalanche photodetectors,* GENERAL ELECTRIC GLOBAL RESEARCH NIKSAYUNA NY.

[64]. Shaw, G.A., Siegel, A.M., Model, J., Geboff, A., Soloviev, S., Vert, A. and Sandvik, P., 2009, Deep UV photon-counting detectors and applications, In *Advanced Photon Counting Techniques III, Vol. 7320,* 29 April 2009 Orlando, Florida, USA, International Society for Optics and Photonics, 73200J.

[65]. Kedar, D., 2007, Multiaccess interference in a non-line-of-sight ultraviolet optical wireless sensor network, *Applied optics,* 46(23), 5895-5901.

[66]. Xiao, H., Zuo, Y., Wu, J., Li, Y. and Lin, J., 2012, Bit-error-rate performance of non-line-of-sight UV transmission with spatial diversity reception, *Optics letters,* 37(19), 4143-4145.

[67]. Ishimaru, A., 1978. *Wave propagation and scattering in random media*, Academic press, New York.

[68]. Zachor, A.S., 1978, Aureole radiance field about a source in a scattering–absorbing medium, *Applied Optics*, 17(12), 1911-1922.

[69]. Ding, H., Chen, G., Majumdar, A.K. and Xu, Z., 2008, A parametric single scattering channel model for non-line-of-sight ultraviolet communications, In *Free-Space Laser Communications VIII, Vol. 7091,* 19 August 2008 San Diego, CA, USA, International Society for Optics and Photonics, 70910M.

[70]. Majumdar, A.K., Luna, C.E. and Idell, P.S., 2007, Reconstruction of probability density function of intensity fluctuations relevant to free-space laser communications through atmospheric turbulence, In *Free-Space Laser Communications VII, Vol. 6709*, 25 September 2007 San Diego, CA, USA, International Society for Optics and Photonics, 67090M.

[71]. Xu, Z., Ding, H., Sadler, B.M. and Chen, G., 2008, Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links, *Optics letters*, 33(16), 1860-1862.

[72]. Ding, H., Xu, Z. and Sadler, B.M., 2010, A path loss model for non-line-of-sight ultraviolet multiple scattering channels, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1-12.

[73]. Andrews, L.C. and Phillips, R.L., 2005, *Laser beam propagation through random media*, SPIE Publications, Bellingham, Washington.

[74]. Arnon, S., 2003, Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless-communication systems, *Optics letters*, 28(2), 129-131.

[75]. Hutt, D.L. and Tofsted, D.H., 2000, Effect of atmospheric turbulence on propagation of ultraviolet radiation, *Optics & Laser Technology*, 32(1), 39-48.

[76]. Karp, S., Gagliardi, R.M., Moran, S.E. and Stotts, L.B. eds., 2013, *Optical channels: fibers, clouds, water, and the atmosphere*, Springer Science & Business Media, New York.

[77]. Epple, B., 2010, Simplified channel model for simulation of free-space optical communications, *Journal of Optical Communications and networking*, 2(5), 293-304.

[78]. Xu, Z. and Sadler, B.M., 2008, Ultraviolet communications: potential and state-of-the-art, *IEEE Communications Magazine*, 46(5), 67-73.

[79]. Stüber, G.L., 2011, *Principles of mobile communication*, Springer Science+Business Media, New York.

[80]. Ghassemlooy, Z., Popoola, W. and Rajbhandari, S., 2019, *Optical wireless communications: system and channel modelling with Matlab®*, CRC press, New York.

[81]. Lawrence, R.S. and Strohbehn, J.W., 1970, A survey of clear-air propagation effects relevant to optical communications, *Proceedings of the IEEE*, 58(10), 1523-1545.

[82]. Fenton, L., 1960, The sum of log-normal probability distributions in scatter transmission systems, *IRE Transactions on communications systems*, 8(1), 57-67.

[83]. Abu-Dayya, A.A. and Beaulieu, N.C., 1994, Outage probabilities in the presence of correlated lognormal interferers, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43(1), 164-173.

[84]. Leon-Garcia, A., 2017, *Probability, statistics, and random processes for electrical engineering*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

[85]. Biglieri, E., Proakis, J. and Shamai, S., 1998, Fading channels: Information-theoretic and communications aspects, *IEEE transactions on information theory*, 44(6), 2619-2692.

[86]. Safari, M. and Uysal, M., 2008, Cooperative diversity over log-normal fading channels: performance analysis and optimization, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(5), 1963-1972.

[87]. Proakis, J.G. and Salehi, M., 2008, *Digital Communications*, McGraw-Hill, New York.

[88]. Gucluoglu, T. and Duman, T.M., 2008, Performance analysis of transmit and receive antenna selection over flat fading channels, IEEE Transactions on Wireless Communications, 7(8), 3056-3065.

[89]. Yılmaz, A. and Kucur, O., 2013, Performances of transmit antenna selection, receive antenna selection, and maximal-ratio-combining-based hybrid techniques in the presence of feedback errors, *IEEE Transactions on vehicular technology*, 63(4), 1976-1982.

[90]. Garcia-Zambrana, A., Castillo-Vazquez, C., Castillo-Vazquez, B. and Hiniesta-Gomez, A., 2009, Selection transmit diversity for FSO links over strong atmospheric turbulence channels, *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(14), 1017-1019.

[91]. García-Zambrana, A., Castillo-Vázquez, B. and Castillo-Vázquez, C., 2012, Asymptotic error-rate analysis of FSO links using transmit laser selection over gamma-gamma atmospheric turbulence channels with pointing errors, Optics express, 20(3), 2096-2109.