



**TÜRBÜLANS LI ATMOSFERDE GAUSS VE VORTEX LI GAUSS
IŞINLARIN YAYILMASI**

Gamze Nur SEÇİLMİŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**SİVAS BİLİM VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2021

ETİK BEYAN

Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Gamze Nur SEÇİLMİŞ
09/12/2021

TÜRBÜLANSLI ATMOSFERDE GAUSS VE VORTEXLİ GAUSS IŞINLARIN YAYILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Gamze Nur SEÇİLMİŞ

SİVAS BİLİM ve TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Aralık 2021

ÖZET

Çalışma dalga boyu, kaynak boyutu ve alıcı açıklığı yarıçap uzunluğu parametrelerinin atmosferde yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının yoğunluk profiline olan etkileri incelenmiştir ve bu ışınların uzak mesafeler için parıldama özellikleri topolojik yük, çalışma dalga boyu, kaynak boyutu ve alıcı açıklığı yarıçap uzunluğu parametrelerine göre analiz edilmiştir. Bu analizi gerçekleştirmek için gerçek hayattaki atmosferik türbülansı modellemek amacıyla kullanılan bir yöntem olan rastgele faz ekran modeli kullanılmıştır. Elde edilen verilere göre, büyük kaynak boyutuna sahip ve daha düşük çalışma dalga boylarında hem Gauss hem de vortexli Gauss ışını orijinal profilini korumaktadır. Alıcı açıklığı yarıçap uzunluğunun değişimiyle, her iki ışın türünün yoğunluğu üzerinde gözle görülür bir etki tespit edilememiştir. Değişen ışın parametrelerinin her iki ışın türünün parıldama seviyesine etkisi incelendiğinde, yayılma mesafesi 2,5 km'ye kadar Gauss ışının daha iyi performans gösterdiği, 2,5 km'den sonraki mesafelerde uygun parametreler seçildiğinde vortexli Gauss ışının kullanıldığı sistemler daha iyi alıcı performansına sahip olduğunu gözlemlenmektedir. Tez çalışmamız dahilinde elde ettiğimiz sonuçlar, 5G ve 6G iletişim bağlantıları, savunma sanayi alanında kullanılan lazer uydu iletişimi ve uzaktan algılama gibi çeşitli uygulamalardaki serbest alan optik iletişim sistem performansını iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır.

BilimKodu : 90523
AnahtarKelimeler : Rastgele Faz Ekran Modeli, Vortexli Gauss Işını, Temel Gauss Işını, Topolojik Yük, Kaynak Boyutu, Açıklık Boyutu, Türbülans
SayfaAdedi : 43
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Kholoud ELMABRUK

PROPAGATION OF GAUSSIAN AND VORTEX GAUSSIAN BEAMS IN
TURBULENT ATMOSPHERE

(M. Sc. Thesis)

Gamze Nur SEÇİLMİŞ

SİVAS UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

December 2021

ABSTRACT

The effects of operating wavelength, source size and receiver aperture radius, parameters to the intensity profile of Gaussian and vortex Gaussian beams propagating in the atmosphere were investigated, and the scintillation properties of these beams for long distances were analyzed according to the parameters of topological charge, operating wavelength, source size and receiver aperture radius. To perform this analysis, the random phase screen model that is a method of real atmospheric turbulence, was used. The obtained data showed that the use of both Gaussian beams and vortex Gaussian beams with high topological charge and lower operating wavelengths helps the beam keeping its original beam profile. With the variation of the receiver aperture radius, no noticeable effect on the intensity of either beam type could be detected. When the effect of changing beam parameters on the scintillation level of both beam types is examined, it is observed that the Gaussian beam performs better up to a propagation distance of 2,5 km, and when the appropriate parameters are selected at distances beyond 2,5 km, the systems in which the vortex Gauss beam is used have better receiver performance. The results of my thesis will contribute to the improvement of free space optical communication system performance in various applications such as 5G and 6G communication links, laser satellite communication and remote sensing used in the defense industry.

ScienceCode : 90523

KeyWords : Random Phase Screen, Vortex Gaussian Beam, Fundamental Gaussian beam, Topological Charge, Source Size, Aperture Size, Turbulence

PageNumber : 43

Supervisor : Assist. Prof. Kholoud ELMABRUK

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak beni her zaman çalışmaya teşvik eden, güvenini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Kholoud ELMABRUK' a kalpten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca her zaman desteklerini esirgemeyen babam, annem ve kardeşime çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince her türlü fedakârlığı, desteği sağlayan değerli eşim Bilal SEÇİLMİŞ'e teşekkür ederim. Stresli zamanlarımda göstermiş olduğu sabır için ona minnettarım. Son olarak, her şeye rağmen tüm azmimle en güzeli için çalışma motivasyonunu bana veren, hayat kaynağım, biricik oğlum Osman SEÇİLMİŞ'e en kalbi duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Serbest Alan Optik Haberleşme	4
1.2.Araştırma Motivasyonu.....	5
1.3.Tez Akışı	6
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
2.1.Giriş.....	8
2.2.Vortexli Işıklar	9
2.3. Işıkların Atmosferde Yayılımı	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM	15
3.1. Atmosfer.....	15
3.2. Atmosfer Kaynaklı Işıkların Yayılmasını Etkileyen Faktörler	15
3.2.1. Atmosferik Türbülans	16
3.2.2. Parıldama (Scintillation)	18
3.3. Işıkların Atmosfer Boyunca Yayılması.....	19
3.4. Kaynak Düzlemde Kullanılan Işıklar	20
3.4.1. Gauss Işıkları.....	20
3.4.2. Vortexli Gauss Işıklar	21

Sayfa

3.5.Türbülans Modelleme	21
3.6.Parıldama İfadesi.....	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	26
4.1. Işın Parametrelerinin Atmosferik Türbülansla Yayılan Işınlara Üzerindeki Etkileri	26
4.1.1.Çalışma Dalga Boyu Etkisinin İncelenmesi.....	27
4.1.2. Kaynak Boyutu Etkisinin İncelenmesi.....	29
4.1.3. Alıcı Açıklık Yarıçap Uzunluğu Etkisinin İncelenmesi.....	30
4.2. Işın Parametrelerinin Vortexli Işınlara ParıldamaÖzelliklerine Etkisinin Analizi	31
4.2.1.Topolojik Yük Parametresinin Etkisinin İncelenmesi	33
4.2.2. Kaynak Boyutu Parametresinin Etkisinin İncelenmesi.....	34
4.2.3. Alıcı Açıklık Yarıçapı Etkisinin İncelenmesi	35
4.2.4.Çalışma Dalga Boyu Parametresinin Etkisinin İncelenmesi.....	36
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	38
KAYNAKLAR	39
ÖZGEÇMİŞ	44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Optik kablosuz haberleşme uygulamaları.....	2
Şekil 1.2. Optik kablosuz haberleşme sınıflandırması.....	3
Şekil 1.3. Serbest alan optik kablosuz haberleşme uygulamaları	4
Şekil 1.4. Serbest alan optik kablosuz haberleşme blok diyagramı	5
Şekil 2.1. (a) SAM taşıyan dairesel polarize bir ışık demeti (b) OAM taşıyan bir ışık demetinin faz yapısı	11
Şekil 2.2. Farklı topolojik yüke ($m = 0, 2, 4$) sahip ışınların (a) uzaysal profil ve (b) faz gösterimi.....	13
Şekil 3.1. Atmosfer tabakaları	15
Şekil 3.2. Türbülanslı atmosferde optik ışınların yayılması	16
Şekil 3.3. Gauss ışınının kaynak düzlemde (a) 2 boyutlu grafiği (b) uzaysal gösterimi	21
Şekil 3.4. Kaynak düzlemdeki ışın yoğunluğu (a) 2B gösterimi (b) uzaysal gösterimi	22
Şekil 3.5. Rastgele faz ekran modeli tasarımı.....	23
Şekil 4.1. (a) Kaynak düzlemde vortexli Gauss ışının, (b) Atmosfer boyunca yayılan vortexli Gauss ışının, (c) Kaynak düzlemde Gauss ışının, (d) Atmosfer boyunca yayılan Gauss ışının 2B grafiği	27
Şekil 4.2. Atmosferde yayılan ışınların farklı dalga boylarında normalize edilmiş ortalama yoğunluk 3B grafiği, (a-d) Vortexli Gauss ışınına ait, (e-h) Gauss ışınına ait ..	28
Şekil 4.3. Atmosfer boyunca yayılan ışınların farklı kaynak boyutlarından normalize edilmiş ortalama yoğunluk 3B grafikleri (a-c) Vortexli Gauss ışınına ait, (d-f) Gauss ışınına ait.....	29
Şekil 4.4. Atmosfer boyunca yayılan ışınların farklı açıklık yarıçap uzunluğunda normalize edilmiş ortalama yoğunluk 3B grafikleri (a-c) Vortexli Gauss ışınına ait, (d-f) Gauss ışınına ait	31
Şekil 4.5. (a) alıcı düzlem matrisi ve (b) alıcı düzlem matrisi ile ilgili dairesel görünüm	32
Şekil 4.6. Rastgele faz ekran metodu ve analitik formülasyon ile Gauss ışının parıldama indeksi değeri	33

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Topolojik yükün, kullanılan ışınların parıldama indeksine etkisi	34
Şekil 4.8. Kaynak boyutunun, kullanılan ışınların parıldama indeksine etkisi.....	35
Şekil 4.9. Alıcı açıklığı yarıçapının kullanılan ışınların parıldama indeksine etkisi	36
Şekil 4.10. Dalga boyunun, kullanılan ışınların parıldama indeksine etkisi.....	37



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
CO_2	Karbondiyoksit
CO	Karbonmonoksit
H_2	Hidrojen gazı
H_2O	Su buharı
k	Dalga numarası
L	Yayılma mesafesi
L_0	Türbülansın dış ölçeği
l_0	Türbülansın iç ölçeği
m	Topolojik yük
N_2	Azot gazı
θ	Işın kesitindeki azimut açısı
λ	Dalga boyu
σ_R^2	Rytov varyansı
I_{sN}	Normalize edilmiş kaynak düzlem yoğunluğu
$(\mathbf{s}, \phi_s)$	Kaynak düzlem enine koordinatları
$\mathbf{u}_s(\mathbf{s}, \phi_s)$	Işınlardan kaynak düzlem alanı
α_s	Kaynak boyutu
$\mathbf{u}_{rfs}(\mathbf{r}, L)$	Türbülanssız ortamdaki ışınların alıcı düzlem alanı
$\mathbf{F}$	Fourier dönüşüm operatörü
$\mathbf{F}^{-1}$	Ters Fourier dönüşüm operatörü
$H(\mathbf{f})$	Transfer fonksiyonunu
$\phi(\mathbf{r})$	Bireysel ekranların faz güç spektral yoğunluğu
$\Phi_\phi(\mathbf{f})$	Von-Karman spektrumunun güç spektral yoğunluğu
$\mathbf{u}_r(\mathbf{r}, L)$	Alıcı düzlem alanı
$\mathbf{b}^2(\mathbf{r}, L)$	Parıltıma indeksi

r_r

Alıcı açıklık yarıçapı

 $P_r(L)$

Alıcı düzlemdeki ışınlıanlık gücü

Kısaltmalar**Açıklamalar****cm**

Santimetre

km

Kilometre

OAM

Yörüngel açısal momentum (Orbital angular momentum)

SAM

Dönüş açısal momentum (Spin angular momentum)

5G

5. Nesil (5 Generation)

6G

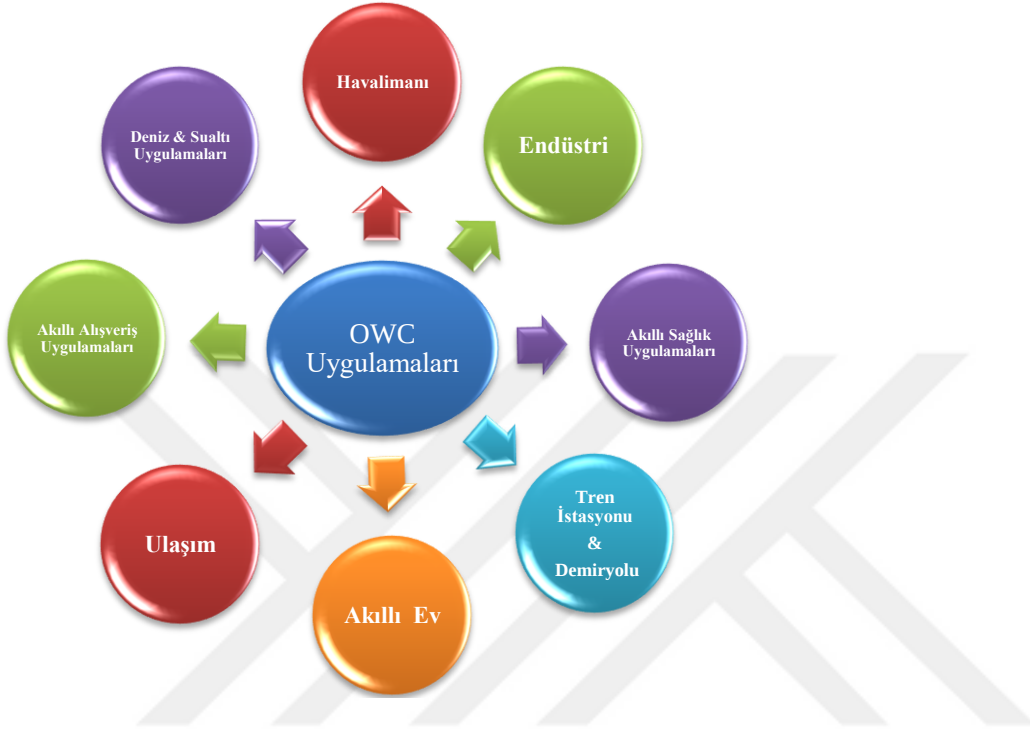
6. Nesil (6 Generation)

1.GİRİŞ

Ses sinyalinin birkaç metre mesafeye iletmek için taşıyıcı olarak güneş ışığının kullanıldığı atmosfer üzerinden sinyal iletimi ile ilgili ilk deney 1880'de Alexander Graham Bell tarafından yapıldı. Ancak, taşıyıcının tutarsız doğası nedeniyle deney başarılı olmadı. 1960'larda, Theodore H. Maiman ve Malibu California'daki Hughes araştırma laboratuvarında serbest alan optik haberleşmesi için çok önemli olan, çalışan ilk lazeri keşfetti. Bu keşif sonrasında, 1980'lerde ve 1990'larda, lazer çapraz bağlantı alt sistemi, hızlandırılmış gözetim ve takip sistemi, takip edilen erken uyarı sistemi, derin uzay ve uydular arası görevler için mars lazer iletişim sistemi gibi uygulamalar üzerinde çalışıldı [1, 2].

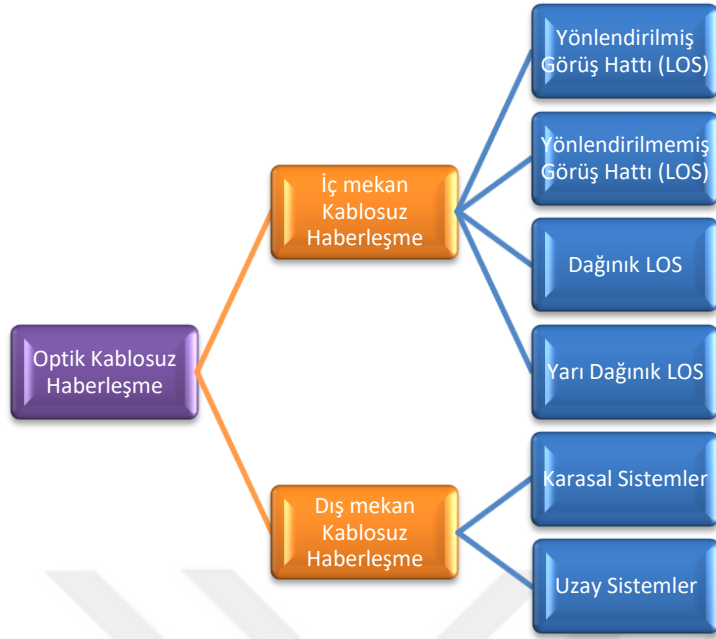
Mobil veri hacminin 1000 kat ve sisteme bağlı kablosuz cihaz sayısının mevcut kablosuz ağlardakilere göre 100 kat daha fazla olacağı ultra yoğun heterojen ağlardan oluşması beklenen beşinci nesil iletişim, ultra yüksek sistem kapasitesi, cihaz bağlantısı ve yüksek güvenlik, ultra düşük gecikme süresi ve enerji tüketimi gibi son derece yüksek deneyim kalitesi ile yeni hizmet vereceği düşünülmektedir Bu sebepten dolayı, kullanılacak ağlar, yüksek kullanıcı veri hızlarını, düşük güç tüketimini ve ihmal edilebilir uçtan uca gecikmeleri destekleme özelliğine sahip olmalıdır. Ayrıca son zamanlarda nesnelerin interneti kavramının gelişmesiyle birlikte, fiziksel cihazların internete bağlanma hızı katlanarak artmaktadır. Çeşitli kablosuz uygulamalarda yaygın olarak kullanılan radyo frekans spektrumu, 5G kablosuz kapasitesi için artan talebi karşılayabilme ve Nesnelerin İnterneti sistemini destekleyebilme konusunda yetersizdir. Optik spektruma dayalı kablosuz bağlantı sistemi olan optik kablosuz iletişim, yüksek yoğunluklu ve yüksek kapasiteli ağların geliştirilmesi için gelecek vadeden bir çözüm yolu olarak görülmektedir [3]. İletim ortamı olarak kılavuzlu görünür ışık, kızılötesi veya ultraviyolespektrumunun kullanıldığı optik kablosuz iletişimi, yüksek güvenlikli bağlantı kurabilmenin yanında iç ve dış mekân iletişimlerini çok sayıda ve çeşitli cihazlarla yapabilmektedir. Bu sayede optik kablosuz haberleşmeyi endüstri, sağlık, tren istasyonları, ulaşım, evler, ofisler, alışveriş merkezleri, sualtı ve uzay gibi çok sayıda uygulama içerisinde görmekteyiz (Şekil 1.1) [4,5]. Kablosuz haberleşme teknolojileri kullanılarak cihazdan cihaza, makineden makineye, çipten çipe, cihaz/makineden kullanıcıya,kullanıcıdan cihaza/makineye, araçtan altyapıya, araçtan araca ve altyapıdan araca, noktadan noktaya, çok noktadan noktaya ve

noktadan çok noktaya optik kablosuz haberleşme teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Uygulama türüne, gerekli veri hızına ve platforma bağlı olarak çeşitli optik kablosuz haberleşme teknolojileri uygulanabilmektedir [3, 6].



Şekil 1.1. Optik kablosuz haberleşme uygulamaları

Şekil 1.2’de gösterildiği gibi optik kablosuz iletişim, iç (indoor) ve dış (outdoor) mekan kablosuz optik iletişim olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. İç (indoor) mekan kablosuz optik iletişim, yönlendirilmiş görüş hattı, yönlendirilmemiş görüş hattı, dağınık ve yarı dağınık görüş hattı olmak üzere dört genel kategoride sınıflandırılmaktadır. Dış mekan kablosuz optik iletişimi ise serbest alan optik iletişimi olarak da adlandırılmaktadır. Serbest alan optik iletişim sistemleri de karasal ve uzay sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır [1].

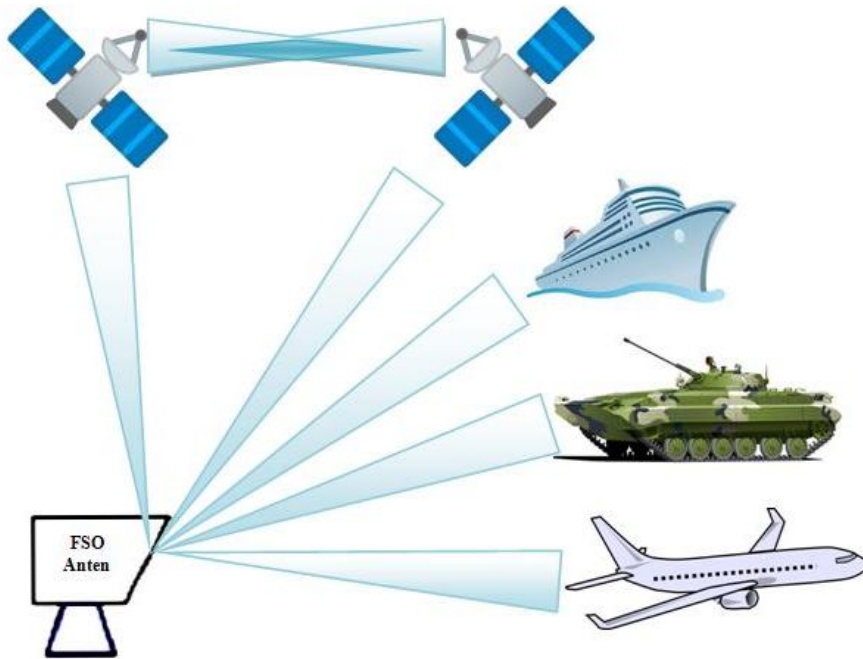


Şekil 1.2. Optik kablosuz haberleşme sınıflandırması

Mevcut kablosuz radyo frekansı haberleşme sistemleri için alternatif ve tamamlayıcı bir teknoloji olarak düşünülen optik kablosuz haberleşme sistemlerinin kullanımı için hiçbir lisanslama gereksinimi veya tarifesinin olmaması, yüksek hızlı uygulamaları (30 Gb/s veri hızı) desteklemek için neredeyse sınırsız bant genişliği, optimuma yakın kapasite ve ayrıca birkaç metreden 5 km'ye kadar geniş bağlantı aralığı sağlaması gibi avantajları mevcuttur. Tüm bunların yanında düşük güç tüketimi (radyo frekans sistemlerinin 1/2'si), azaltılmış parazit ve solma bağışıklığı nedeniyle yüksek enerji verimliliğine sahip yeşil bir teknoloji, daha az kütle (radyo frekans sistemlerinin 1/2'si), küçük boyut (radyo frekans anteninin çapının 1/10'u), yüksek ölçeklenebilirlik ve yeniden yapılandırılabilirlik, dinlemeye karşı yüksek derecede güvenlik ve mahremiyet, bit başına fiyat açısından uygun maliyetli olması gibi çok sayıda yararları bulunmaktadır [1, 7]. Geleceğin kablosuz haberleşme sistemleri avantajlarının yanında bazı dezavantajları da yanında getireceği düşünülmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte bu teknolojiyi kullanacak kişi sayısında da artma gözlemlenecek ve bu sayısının artması zaten tıkalı olan spektrum bantlarını olumsuz yönde etkileyecektir [5].

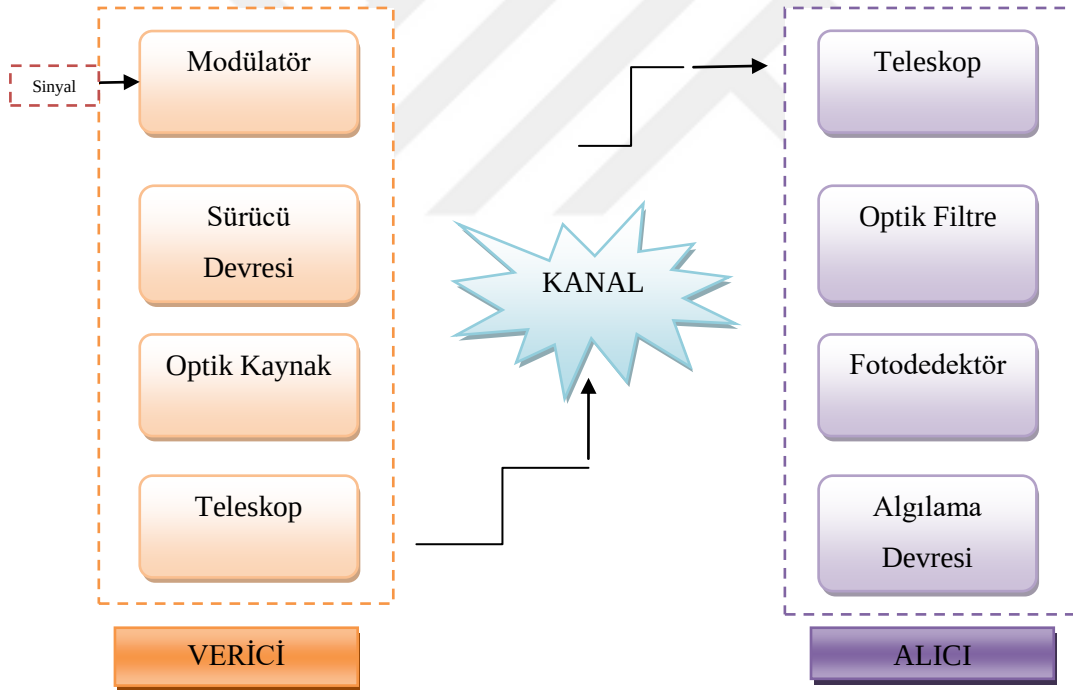
1.1.Serbest Alan Optik Haberleşme

Serbest alan optik iletişimi, boş alan üzerinden optik bir taşıyıcı kullanarak bilgi aktarımının yapıldığı kablosuz bir iletişim sistemidir. Askeri uygulamalarda, uzaktan algılama sistemlerinde, doğal felaket durumlarında, radyo astronomi uygulamalarında kullanılmaktadır (Şekil 1.3). Fiber ya da koaksiyel kablolu sistemlere göre oldukça büyük bant genişliğine sahip olması, yüksek hızda veri iletimi, network ekipmanlarına direkt bağlanabilme durumu, düşük güç tüketimi, yüksek güvenliğini olması avantajlarındandır. Optik sinyal kanal ortamında hareket ederken sapma açısı, yayılma mesafesi, alıcı açıklığı boyutu gibi parametrelerin sebep olduğu geometrik kayıplara uğrayabilmektedir. Rüzgar, deprem ve bina titreşimleri gibi birçok faktör yanlış hizalama hatalarına neden olabilmektedir. Serbest alan optik iletişim sistemleri, pus, toz, sis, yağmur, duman ve kar gibi farklı hava zayıflama kayıplarından etkilenebilmektedir. Doğrudan ya da dolaylı güneş ışığına maruz kalmak arka plan gürültüsüne sebep olur ve bu durum sistem performansını olumsuz etkilemektedir. Atmosferdeki sıcaklık ve basınçtaki ani değişimden kaynaklı dalgalanmalar atmosferik sebep olmakta bu durum yine sistem performansını etkilemektedir. Bu değişimlerin etkisi serbest alan optik iletişim sistemlerinde dezavantaja sebep olmaktadır [1,5].



Şekil 1.3. Serbest alan optik kablosuz haberleşme uygulamaları

Serbest alan optik kablosuz haberleşme sistemi, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi alıcı, verici ve kanal olmak üzere üç alt sistemden oluşmaktadır. Verici de ilk olarak kaynak veri, optik taşıyıcının yoğunluğu üzerinde modüle edilir. Bu modülasyon yoğunluk modülasyonu olarak adlandırılır. Ayrıca verici kısımda, optik kaynak için modüleli optik taşıyıcısını sıcaklık dalgalanmalarına karşı stabilize eden sürücü devresi ve modüleli optik taşıyıcısını toplayan, yönlendiren kolimatör veya teleskop bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılan optik kaynak lazerler ve ledlerdir. Kanal, verinin iletildiği atmosfer ortamıdır. Alıcı ise hava ortamından geçen sinyallerin toplayıp, toplanan verilerin tahmin edildiği bölümdür. Alınan sinyali fotodedektöre odaklayan alıcı teleskop, arka plan gürültüsünü azaltmaya yardımcı olan optik filtre, optik sinyali elektrik sinyaline dönüştüren fotodedektör, filtrelemeden sonra alınan sinyalin geri kazanma işlemini yapan algılama devresi olarak alt bölümlere ayrılmaktadır [1].



Şekil 1.4. Serbest alan optik kablosuz haberleşme blok diyagramı

1.2.Araştırma Motivasyonu

Serbest alan optik iletişim sistemi, büyük bant genişliği ve daha yüksek veri hızları için artan taleplere çözüm olabileceği düşüncesiyle son zamanlarda oldukça popüler hale gelmiştir. Askeri uygulamalarda, uzaktan algılama sistemlerinde, doğal felaket

durumlarında, radyo astronomi uygulamalarında kullanılmakta olup fiber ya da koaksiyel kablolu sistemlere göre oldukça büyük bant genişliğine sahip olması, yüksek veri hızında veri iletimi, network ekipmanlarına direkt bağlanabilme durumu, düşük güç tüketimi, yüksek güvenliğini olması serbest alan optik haberleşme'ye olan ilgiyi daha da arttırmaktadır. Ancak haberleşme kanalı atmosfer olduğundan, sistem performansı atmosfere doğrudan bağlıdır. Ticari serbest alan optik haberleşmesistemlerinde lazer diyotlar kullanılmaktadır ve bu lazerlerin yoğunluk dağılımları Gauss dağılımına sahiptir. Fakat Gauss ışını güçlü türbülanslı koşullarda dezavantajlı bir duruma sahiptir. Yüksek veri hızlarını elde etmek ve Gauss ışınının dezavantaj durumunu azaltabilmek için ışığın genlik, faz ve polarizasyon gibi fiziksel özelliklerinin incelenmesine odaklanan çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu bağlamda araştırmacılar,elektriksel mesaj sinyalinin topolojik yük veya vortexli ışınlarla ilişkili açısal momentum aracılığıyla taşınabiliyor olması ve basit yoğunluk veya faz modülasyonlarına ciddi bir alternatif olarak önerilmesi sebebiyle vortexli Gauss ışınlar üzerine yoğunlaşmışlardır. Çeşitli yayınlarda,vortexli ışınların atmosferik türbülansın neden olduğu parıldamayı azaltabildiğinden ve bu yolla daha iyi alıcı performansı sağladığından bahsedilmektedir [8].

Literatürde incelediğimiz kadarıyla, türbülanslı atmosferde yayılan temel Gauss ve vortexli Gauss ışınlarını karşılaştırarak, alıcı düzlem yoğunluğuna etki eden parametrelerini ayrıntılı olarak inceleyip değerlendiren bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tezin amacı, hem temel Gauss ışını hem de vortexli Gauss ışınını karşılaştırarak, optik iletişim bağlantıları için hangi ışınların daha uygun olduğunu tespit edebilmektir. Bu karşılaştırmalar, temel Gauss ile vortexli Gauss ışınlarının zayıf türbülanslı ortamda yayıldıklarında alıcı düzlemdeki yoğunlukları ve parıldama özellikleri, değişen ışın parametrelerine göre incelenerek yapılmıştır.

1.3.Tez Akışı

Tez yedi bölümden oluşmaktadır. Giriş, tezin hazırlanma sebebini açıklamaktadır. Tezin bir taslağını sunmaktadır. Ayrıca optik haberleşme sistemleri ve bir alt dalı olan serbest alan optik haberleşme sistemleri hakkında bilgi vermektedir. Bölüm 2, serbest alan optik haberleşme sistemlerinde kullanılan ışın çeşitlerinin kısaca özetini yapmaktadır. Tez kapsamında çalışılan vortexli Gauss ışınlarının sahip olduğu bazı parametrelerin özellikleri tanıtılmaktadır. Bölüm 3, ışınların yayılma ortamı olarak kullandığı kanal olan atmosferi

ve ışın yayılmasına etki eden atmosfer kaynaklı faktörleri içermektedir. Bölüm 4, atmosferde yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının kaynak düzlem ve alıcı düzlemdeki formülasyonları verilmektedir. Türbülans modelleme ve parıldama ifadesi anlatılmaktadır. Bölüm 5, ışın parametrelerinin türbülanslı atmosferde yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının yoğunluk profili üzerindeki etkiler incelenmiştir. Bölüm 6, türbülanslı atmosferde yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınların parıldama özellikleri üzerindeki ışın parametrelerinin etkisini analiz etmektedir. Bölüm 7, sunulan çalışmayı özetlemekte ve ana katkıları vurgulamaktadır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1.Giriş

Lazer ışınlarının, optik sistemler aracılığıyla yayılımözelliklerinin bilinmesi ve karakteristik parametrelerinin net bir şekilde tanımlanması, lazer kaynaklarının uygulamalarının başarısında önemli bir etkiye sahiptir. Bu yüzden araştırmacılar haberleşme sistemi performansını iyileştirmek adına kullanılan ışınlara etki eden parametreleri incelemektedirler. İlk olarak tercih ettikleri ışınların çeşidi, ışın türlerinin çoğunluğunun genlik profillerinin çekirdeğini oluşturan, bir lazer kaynağı tarafından kolaylıkla sağlanan basit ve çoğu zaman en çok tercih edilen ışın türü olan Gauss ışınlarıdır. Bu ışın kaynağının seçilmesinin temel sebebi Gauss ışınları iyi karakterize edilebilir ve bu ışınları değiştirmenin kolay olmasıdır. En düşük dereceli moddur ve bu nedenle en yaygın olarak tüm kararlı optik rezonatörlerden elde edilir. Kısaca Gauss ışınları bir lazer kaynağı için kalite referansıdır. Diğer genelleştirilmiş Gauss, küresel, ortogonal olmayan lazer ışınlarının tanımı, Gauss ışının tanımlayan aynı tipte parametreler kullanılarak yapılmaktadır [9].

Tamamen uyumlu veya kısmen uyumlu ışığın demetler halinde yayılması, hem teorik hem de deneysel bakış açısından açık bir öneme sahiptir. Pratikte ışık ışınlarını üretmek basit olsa da, karşılık gelen analitik açıklama o kadar kolay değildir. Bunun nedeni, yayılma formüllerinde yer alan integrallerin değerlendirilmesinin nadiren kapalı ifadelere yol açmasıdır. Araştırmacılar çalışmalarında hem kullanışlı hem de analitik olarak sıfır dereceli gauss demetinden, hem uyumlu, hem de kısmen uyumlu ışınların daha karmaşık biçimlerine kadar bir çok ışın türlerine yer vermektedir. Son zamanlarda, kırınımsız serbest ışınlar (diffraction-free beams) olarak adlandırılan yeni tutarlı ışık ışınları türleri üzerinde çalışılmıştır. Gori ve arkadaşları tarafından Bessel Gauss ışınları, enine düzlemdeki bozulmanın sıfır dereceli bir Bessel fonksiyonu gibi değiştiği kırınımsız serbestışınların (diffraction-free beams)ya da Bessel ışınların fiziksel gerçekleştirilmesindeki zorlukların üstesinden gelmek için tanıtılmıştır [9, 10]. Bessel ışını, bir koninin yüzeyini kaplayan dalga vektörleri ve düzlem dalgaların girişimi ile üretilir. Bu konfigürasyon, bir düzlem dalga tarafından aydınlatılan bir eksen tarafından elde edilebilir [11]. Ayrıca bu ışınlarının çeşidi Helmholtz denkleminin geçerli çözümlerinin bir sınıfını oluşturur ve enine düzlem

yoğunluk ifadeleri aksel olarak değişmez olduğundan kırınımsız oldukları bilinmektedir. Bu şekilde, kaynak ışın profili genişlemesi yaşamadan herhangi bir mesafeye yayılmaları beklenir. Ancak, bu şekilde formüle edilmiş Bessel ışınları sonsuz miktarda enerji gerektirir ve bu nedenle fiziksel olarak gerçekleştirilemez. Yoğunluklarının tüm enine düzlem üzerindeki entegrasyonunun sonlu enerji ürettiğinden emin olmak için, çoğunlukla Gauss üstel olarak seçilen bir pencereleme işlevi tanıtılır [12, 13].

Bessel-Gauss ışını, yayılma özelliklerini belirleyen iki gerçek parametre β ve w_0 ile karakterize edilir. Uygun bir β ve w_0 seçimi ile hem gauss demeti hem de kırınımsız demet özel durumlar olarak elde edilir. Sınırlayıcı durum $w_0 = +\infty$ dışında, Bessel-Gauss ışını pratikte iyi tahmin edilebilecek bir bozulma dağılımını temsil eder. Bu, kapalı bir formda analitik olarak ifade edilebilen, neredeyse kırınımsız bir ışın yayılımının deneysel bir çalışmasını mümkün kılar [10].

Araştırmacıların çalıştığı bir diğer ışın çeşidi, vericide halka şeklinde bir kesite sahip bir lazer ışını olan Annular ışınıdır. Dairesel demeti, hafif farklı demet yarıçaplarına sahip iki Gauss demetinin farkı olarak modelleyerek, dairesel demet üzerindeki atmosferik etkileri analiz ederken mevcut Gauss demetleri teorisi kullanılabilir. Hiperbolik sinüzoidal ışınlar, bir rezonatör tasarlayarak oluşturulmaktadır [14].

2.2.Vortexli Işınlr

1974'te Nye ve Berry, ışık alanının yeni bir tür temel özelliği olan dalga önü dislokasyonu (veya faz kusuru) ve sıfır genlik ve sonsuz faz yapısında ışığın merkezinde faz tekilliğini tanıtmışlardır. Bu öncü çalışmanın ardından, bu dislokasyonlar veya faz tekillikleri, merkezinde optik vortexli ışınların incelendiği tekil optik (singular optics) olarak adlandırılan ayrı bir araştırma alanı haline gelmiştir [15].

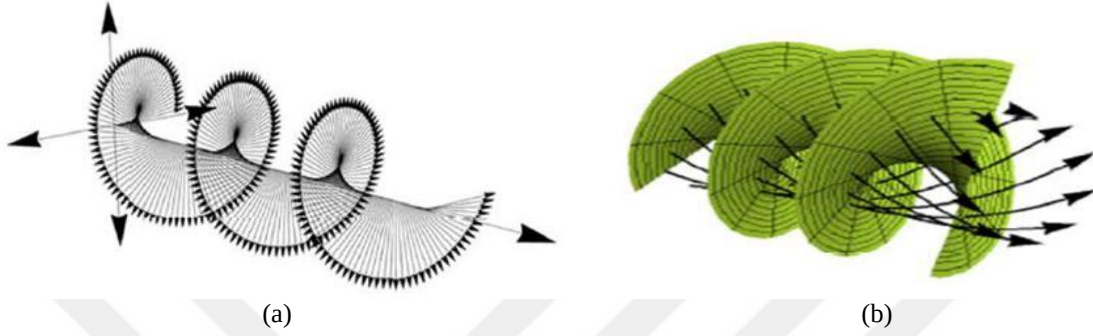
Gbur ve arkadaşları, vortex ışınlarının zayıftan güçlüye atmosferik türbülans boyunca yayılımlarını incelemiştir. Vortexli ışınların topolojik yüklerinin korunması sebebiyle ve taşıdıkları yörüngel açısal momentumdan dolayı optik iletişimde bilgi taşıyıcıları olarak kullanılabileceğini çalışmalarında analiz etmiştir ve araştırmacıları, çalışmalarında kullanmak amacıyla optik vortexli ışınlar (Gauss benzeri ışın, Bessel ışını, anormal ve mükemmel vortexli ışın) yönlendirmiştir. Genel olarak literatürde çalışmalar için

kullanılan topolojik yük tamsayı değerindedir. Halka şeklindeki yoğunluk halkasında radyal bir açıklığa sahip olan kesirli topolojik yüklüvortexli ışın ilk olarak Basistiy ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [16, 17].

1600'lerde Kepler,kuyruklu yıldızların kuyruklarının her zaman güneşten uzağa dönük olduğunu gözlemlemesinden kaynaklı, ışığın doğrusal bir momentum taşıması gerektiğini düşünmüştür. Poynting 1909 yılında, ışığın tüm momentumu ve enerji özellikleri Maxwell denklemleri ile açıklanıyor olsa da dairesel olarak polarize bir ışık demetinin dönüşüne bağlı olarak dönüş açısai momentum (spin angular momentum-SAM) içerdüğünü açıklamıştır (Şekil 2.1. (a)). Bu açısai momentumun değeri, her bir foton başına $\pm \hbar$ değerindedir. $\hbar = h/2\pi$ olarak bulunur ve h Planck sabitidir. Sonrasında Darwin, dönüş açısai momentumun ötesine geçerek daha yüksek dereceli atomik/moleküler geçişler sırasında açısai momentumun korunumu için foton başına birden çok $\hbar$ biriminden oluşan bir optik açısai momentum gerektirdiğine dikkat çekmiştir. Bu ek açısai momentuma yörüngel açısai momentum (orbital angular momentum-OAM) adı verilir ve OAM, ışığın lineer momentumunun optik ışının merkezine veya etkileşen nesnenin kütle merkezine göre eksen dışı hareket etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir(Şekil 2.1. (b)).Uzun yıllar boyunca, yörüngesel açısai momentumu nadir bir olay olduğu kabul edilerek üzerinde fazla çalışılmamıştır. 1992'de Allen, Woerdman ve arkadaşları, $\exp(-jm\theta)$ değerinde enine faz yapısı (helical phase-fronts) ile tanımlanan sarmal faz cephelerine sahip ışık demetlerinin foton başına $m\hbar$ 'ye eşdeğer bir yörünge açısai momentumu taşıdığını belirlemişlerdir (θ ışın kesitindeki azimut açısını, m ise pozitif veya negatif topolojik yükü temsil etmektedir). Özetle, sahip oldukları yoğunluklarından değil, faz yapılarından dolayı OAM'a sahip optik ışınların değeri artmaktadır ve bu sayede araştırmacılar OAM'lı optik ışınlarla alakalı çalışmalara yönlendirmiştir. Sarmal faz cephele tüm ışınların önemli bir özelliği, ışın ekseninin optik fazda kuzey kutbundaki zamana benzer bir tekilliği işaretlemesidir. Bu faz tekilliği (phase singularity), optik yoğunlukta mükemmel bir sıfır olarak kendini gösterir. OAM taşıyan ışınların tipik olarak dairesel yoğunluk kesitlerine sahip olduğu anlamına gelir. Yörüngesel açısai momentumu, optik manipölasyon, görüntüleme, kuantum optiği, optik iletişim ve başka şeylerle ilgili olarak, optik modların en ilginçlerinden biri olarak kendini kanıtlamıştır [17, 18].

Vortexli ışınlar, yayılma yönü etrafında açısai momentuma yol açan spiral dalga cephelerinden (wavefront) oluşur. Farklı topolojik yüklere sahip ışınlar, farklı yörüngesel

açısal momentum taşımaktadır. Vortexli ışınlar, mikrometre boyutundaki parçacıkları işlemek için optik cımbız gibi uygulamalarda ve açısal momentum sağlamak için mikro motorlarda, optik, radyo dalgası, astrofizik gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [4, 19].



Şekil 2.1. (a) SAM taşıyan dairesel polarize bir ışık demeti (b) OAM taşıyan bir ışık demetinin faz yapısı [18]

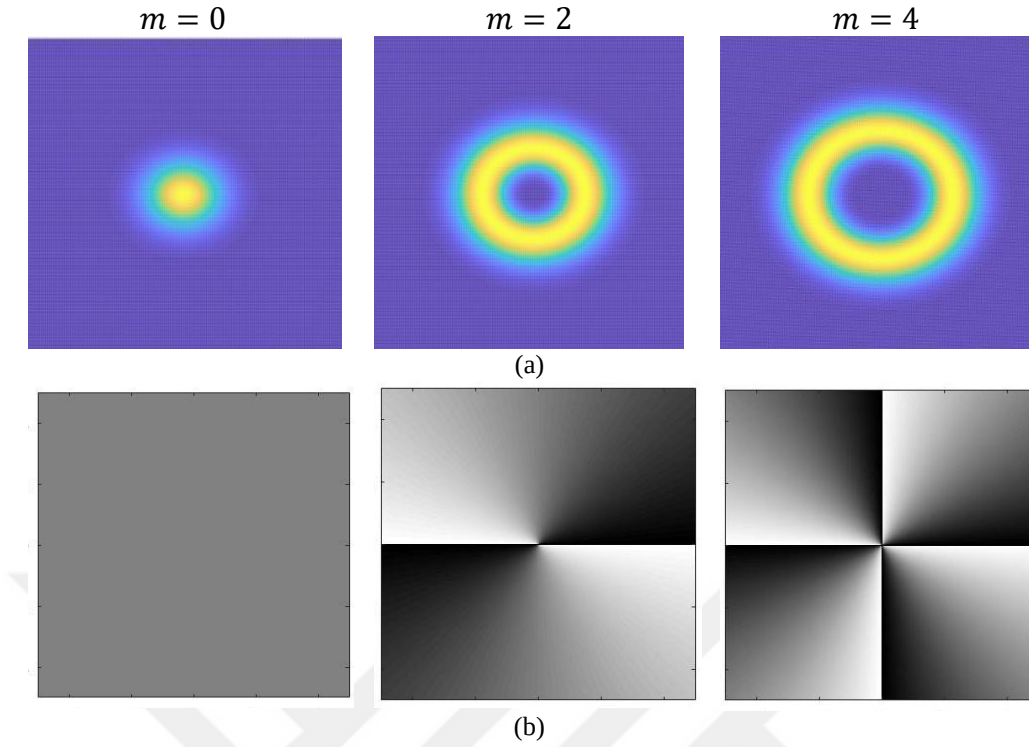
Bununla birlikte, sınırlamalar ne olursa olsun, OAM'a dayalı iletişim sistemlerinin performansı, fiber uygulamasından şehir içi bağlantılarına kadar oldukça iyidir ve boş alanda 200 Tbit veri hızlarına ulaşmıştır. OAM'adaya sistemler ayrıca Boyd, ortakları ve diğer gruplar tarafından yüksek boyutlu kuantum anahtar dağıtımı için kullanılmıştır. En son OAM iletimi, 143 km'nin üzerindeki boş alanda rapor edilmiştir [20].

Frekans/zaman/kod alanı tabanlı ortogonal bölmeden farklı olarak OAM, birden çok kullanıcının ortogonal erişimini desteklemek için yeni bir mod alanı sunar. OAM ile kablosuz iletişimi yeniden tasarlayabiliriz çünkü kablosuz iletişimin birçok yönü yeni ortogonal boyutla geliştirilebilir. OAM tabanlı kablosuz iletişimde yüksek spektrum verimliliği, daha fazla kullanıcı erişimi, bozulmayı önleme için avantajlar gözlemlenmektedir. Ek olarak, OAM'lı ışınlar, biyomedikal uygulamalar, mikro-fabrikasyon, süper çözünürlüklü mikroskopi, görüntüleme, yakalama ve cımbızlarda biyobilimlerde ve mikromekanikte ve ayrıca yeni nesil optik iletişimde incelenmektedir [20].

Klasik elektromanyetizmanın nispeten keşfedilmemiş bir alanı olan tekil optiklerin (singular optics) yenilikçi teknolojiler için büyük bir potansiyele sahip olduğu son yıllarda artan bir kabul görmüştür. Bu araştırma alanı büyük ölçüde, yayılma eksenleri boyunca bir yoğunluğa sahip olmayan (yani 3 boyutlu uzayda sıfır genlikli çizgiler olarak ortaya

çıkanoptik vortexli ışınlar), etrafında fazın dolaştığı ve bu yayılma eksenini boyunca tekil bir faza sahip olan optik vortex olarak bilinen yapılara odaklanır. Optik bir vortexte ışık, hareket eksenini etrafında bir tirbuşon gibi bükülmektedir. Bükülme nedeniyle, eksenindeki ışık dalgaları birbirini sıfırlar. Düz bir yüzeye yansıtıldığında, optik bir vortex, ortasında karanlık bir delik olan bir ışık halkası gibi görünür. Ortasında karanlık olan bu ışık tirbuşonuna optik vortexts denir. Vortexli ışınlar, spiral faz dalgaları ile spiral faz faktörlerini taşır [21]. Bu tür vortexli ışınlarının incelenmesi optik alanlardaki faz tekilliklerinin genel çalışmasının önemli bir alt alanı haline gelmiştir ve tekil optik olarak bilinmektedir. Optik yakalama, koronografi, uzamsal ve zamansal tutarlılık filtreleme, faz kontrast mikroskobu ve boş alan optik dahil olmak üzere birçok uygulamada kullanılmıştır [16, 22]. Vortex etrafında saat yönünün tersine kapalı bir yörünge izlendiğinde, faz her zaman 2π 'nin tamsayı katı kadar değişmektedir. Bu değer alanın faz bozulmaları altında ayrı bir değişken ve kararlı olan bu tam sayı topolojik yük olarak adlandırılmaktadır. Vortexse, ışığın bir dalga boyunda kaç bükülme yaptığına göre bu tam sayı değeri verilir. Bükülmenin yönüne bağlı olarak pozitif veya negatif olabilir. Bükülme sayısı ne kadar yüksekse, ışık eksen etrafında o kadar hızlı dönmektedir. Vortexts ışınları, merkezinde karanlık nokta olan halka şeklinde bir profile sahiptir. Bu karanlık noktanın boyutu, topolojik yük olarak adlandırılan değişkene bağlıdır [23]. Topolojik yükü sıfır olduğunda bir ışın, gauss ışın profiline sahip olduğunu, topolojik yükü sıfırdan farklı olduğunda vortexli ışın profiline sahip olduğunu ve bu değer arttıkça ışının ortasındaki karanlık kısmın büyüdüğünü Şekil 2.2'de görmekteyiz.

Bir vortex demetinin topolojik yükünün genel olarak korunduğu ve tipik olarak vortexlerin yalnızca net yükü koruyan eşit ve zıt yük çiftlerinde ortaya çıktığı veya kaybolduğu gösterilebilir. Vortexlerin bu özellikleri, ayrıklığı ve kararlılığı, bir vortexli ışının türbülansa dayanıklı bir bilgi taşıyıcısı olabileceğini gösterdiği için, onları serbest uzay optik iletişimleri için ilgi çekici kılmaktadır [16-22].



Şekil 2.2. Farklı topolojik yüke ($m = 0, 2, 4$) sahip ışınların (a) uzaysal profil ve (b) faz gösterimi

2.3. Işınlrın Atmosferde Yayılımı

Vortexli ışınların topolojik yük ile ilişkili sarmal faz yapısının olması, yörünsel açısal momentum taşıması gibi benzersiz özelliklere sahip olması, bu ışınların oldukça ilgili görmesini sağlamaktadır [24]. Vortex formu radyal ışın dizisinin atmosferik türbülans boyunca yayılımını ayrıntılı analiz edebilmek için genişletilmiş Huygens Fresnel integrali kullanılmıştır. Zayıf ve orta dereceli atmosferik türbülans ve kısa yayılma mesafesinde ışın dizilerinin optik vortex formu türbülanssız ortamda yayılan ışın dizilerinin ilk formuna benzemektedir. Artan yayılma mesafesiyle bu ışın dizisi vortex formunu kaybetmekte ve Gauss profil yapısına sahip olmaktadır [25]. Dalga optiği sayısal simülasyonu kullanılarak atmosferik türbülansta yayılan vortexli Gauss ışının yoğunluk profili, ışın yayılımı (spreading) ve gezinme (wandering) özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Topolojik yükün artmasıyla vortexli ışının ortasındaki karanlık deliğin boyutunun arttığı, güçlü türbülans değerinde azaldığı gözlemlenmiştir [26]. Annular vortex ışınının ortalama yoğunluk dağılımı analiz etmek için merkezi bağıl yoğunluk, merkezi karanlık boşluğun yarıçapı ve ışın noktasının yarıçapı gibi faktörler tanıtarak; yayılma mesafesinin, optik topolojik yükün ve ışın dalga boyunun yayılma üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Artan

dalga boyu ve topolojik yük ile artan yayılma mesafesinin aksine merkezi bağl yoğunluğun azaldığı, merkezi karanlık boşluk yarıçapının arttığı gözlemlenmiştir [27]. Türbülanslı atmosferde yayılaneliptik olarak polarize vortexli ışınların yoğunluk profili genişletilmiş Huygens Fresnel integrali kullanılarak analiz edildiğinde, yayılma mesafesi yeterince uzun ve topolojik yükün büyük olduğu durumlarda Gauss ışın profiline dönüştüğü gözlemlenmektedir [28]. Bir metro tüneline hem boyuna hem de enine yayılan vortexli Bessel Gauss ışınlarının performansını incelemek için Rytov yaklaşım teorisi ve Kolmogorov olmayan türbülans modeli kullanılmıştır [29].

Gauss ışınları kolay karakterize edilebildiği üzerinde çalışmak kolay olduğu için en çok tercih edilen ışın türüdür [9]. Gauss ışınlarının farklı kırılma indeksine sahip atmosferik türbülans boyunca yayılan yayılmasını incelemek amacıyla Second-Order Split-Step Algoritmasını ve atmosferik türbülansı karakterize edebilmek için Van Karman güç spektrum modelini kullanmışlardır. 500 m ve üzeri yayılma mesafesinde zayıf türbülanslı ortamda yayılan Gauss ışınının yoğunluğunun yaklaşık %30'nun azaldığı ve zayıftan güçlü türbülanslı ortamda geçildiğinde ışının Gauss profilinin bozulduğunu tespit etmişlerdir [30]. Farklı yayılma mesafelerinde ve kırılma indisi sabitlerinde farklı kaynak boyutlarına sahip Gauss ışınının atmosferik türbülansla yayılmasını araştırmışlardır. Elde ettikleri sayısal verilere göre, artan yayılma mesafesinde, küçük kaynak boyutuna sahip güçlü türbülans değerinde yayılan ışın daha çok bozulmaya uğramaktadır [31].

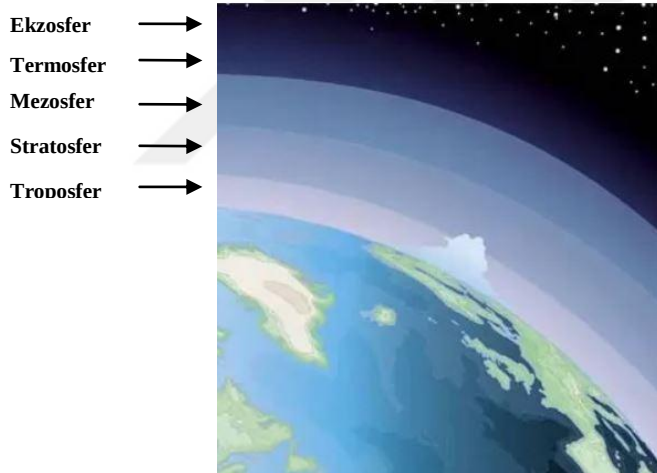
Türbülanslı atmosferde yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının alıcı düzlem yoğunluğuna ve parıldama özelliklerine etki eden sistem parametrelerini ayrıntılı olarak incelenerek özellikle uzak yayılma mesafelerinde hangi ışın tipinin değişen bu sistem parametreler ile birlikte daha iyi performans sergilediği tez kapsamında incelenmiştir. Yapılan çalışma her iki ışın tipinin yer aldığı ilk çalışma özelliğine sahiptir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Atmosfer

Dünya eşsiz bir gezegendir çünkü yaşam sadece bu gezegende bulunur. Yaşam için gerekli koşullar arasında havanın özel bir yeri vardır. Dünyayı çevreleyen, yaşam için zararlı olan ultraviyole ışınlarının durdurulmasına ve gerekli olan uygun sıcaklığın korunmasına yardımcı olan gaz kütesine atmosfer denilmektedir. Atmosferde birçok gazın (karbondioksit (CO_2), karbonmonoksit (CO), su buharı (H_2O), azot (N_2) ve hidrojen (H_2)) yanı sıra toz parçacıkları da yer almaktadır [1].

Atmosfer, sıcaklık ve yoğunluk çeşitliliğine göre Troposfer, Stratosfer, Mezosfer, Termosfer, Ekzosfer olmak üzere Şekil 3.1’de gösterildiği gibibeş katmana ayrılmaktadır.



Şekil 3.1. Atmosfer tabakaları

3.2. Atmosfer Kaynaklı Işınlardan Yayılmasını Etkileyen Faktörler

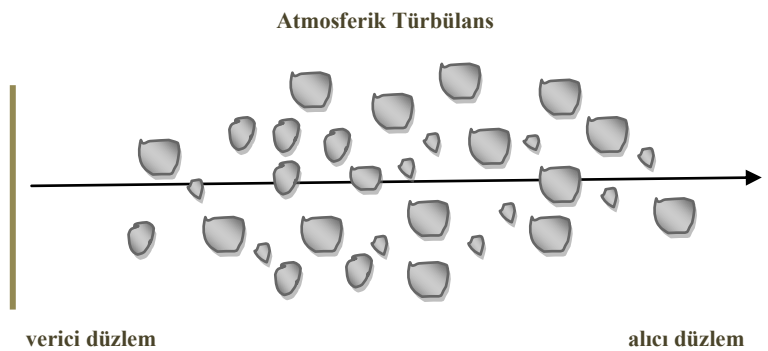
Serbest alan optik sistemleri büyük avantajlara sahip olmasına rağmen, atmosferin yayılma ortamı olarak kullanılması bu sistemlerin performansını sınırlandırmaktadır. Atmosferde yağmur, kar, rüzgar ve sis gibi hava koşulları, ışının atmosferde yayılmasını olumsuz yönde etkileyen üç ana olaya neden olur. Bunlar emilme, saçılma ve kırılma indisi dalgalanmalarıdır. Emilme, gaz halindeki bir molekül, yayılan ışığın bir fotonunu absorbe ettiğinde ve onu kinetik enerjiye dönüştürdüğünde meydana gelmektedir. Yayılan ışındemeti hava molekülleri ve parçacıkları ile çarpıştığında ise saçılma meydana

gelmektedir. Bu olaylar, yayılan ışının enerjisini zayıflatmaktadır [32, 33]. Tez kapsamında, ışınların atmosferde yayılımını etkileyen atmosferik türbülans ve parıltı etkileri incelenmiştir.

3.2.1. Atmosferik Türbülans

Sıcaklık ve rüzgar hızı değişiklikleri, hava hareketinin aktarımında meydana gelen rastgele değişimler, atmosferin kırılma indisinde değişikliğe yol açar. Bu değişimden dolayı oluşan atmosferik türbülans parlaklık dalgalanmalarına (scintillation) yol açar. Bu durum da ışın gezinmesi, genişlemesi, optik dalganın uzaysal eş uyumluluğunun kaybolması gibi etkilere sebep olur. Bu etkiler, optik alanın türbülansa bağlı rastgele faz modülasyonundan kaynaklanır [34, 35]. Şekil 3.2’de türbülanslı atmosferde yayılan optik ışının şematik halini görmekteyiz.

Serbest alan optik iletişim sistemlerinin menzilini ve performansını önemli ölçüde sınırlandıran atmosferik türbülans alıcıda yoğunluğu azalmasına neden olarak sistem bit hata oranlarının potansiyel olarak türbülans olmayan ortama göre daha yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Bu sorunun çözümü için çoklu verici açıklığı kullanılması, verici ışın boyutunun uyarlanabilir şekilde kontrol edilmesi ve uyarlanabilir optik tekniklerin kullanılması gibi teknikler kullanılmasına rağmen yeterli çözüm üretilememektedir ve yeni yaklaşımlara olan ihtiyacı arttırmaktadır [36].



Şekil 3.2. Türbülanslı atmosferde optik ışınların yayılması

Sahip olduğu rastgelelikten ve homojen olmayan bir yapıya sahip olmasından dolayı atmosferi modellemek istatistiksel olarak yapılabilir. Atmosferik türbülans, Navier-

Stokes eşitlikleriyle tanımlanan lineer olmayan bir süreçtir. Bu zor denklemleri çözüptürbülans etkilerini inceleyebilmek adına bir istatistiksel türbülans teorisi olan geleneksel türbülans teorisi, Kolmogorov tarafından geliştirilmiştir. Kolmogorov türbülans teorisine göre türbülans, L_0 olarak adlandırılan dış ölçek büyüklüğü, l_0 olarak adlandırılan iç ölçek büyüklüğü ve değişkenlik gösteren hava kütlelerinden oluşmaktadır [2].

Kolmogorov türbülans teorisine göre, L_0 'dan daha küçük hava kütlelerinin istatistiksel olarak homojen ve izotropik olduğu varsayımı yapılmakta ve hız, kırılma indisi gibi özellikleri sabit artış göstermektedir. Kolmogorov türbülans teorisinin kullanıldığı serbest uzay lazer sistemlerin performansını arttırabilmek için klasik türbülans teorisine ek olarak non-Kolmogorov türbülans modeli modellenmiştir. Kolmogorov türbülans modelinde güç spektrum yoğunluğunun standart olan $11/3$ katsayısı, Non-Kolmogorov türbülans modelinde 3 ile 4 arasında bir değer olarak seçilerek, büyüklük faktörü Non-Kolmogorov türbülans teorisinde değişken bir hal almaktadır. Işın dolaşmasını ve ışın yayılımını araştırmak için kırılma indisi dalgalanmalarının Kolmogorov olmayan spektral modeli önerilmiştir. Ancak, bu spektral model, türbülansın iç ve dış ölçeklerinin etkilerini dikkate almaz. Kolmogorov dışı atmosferik türbülansı araştırmak için, geliştirilmiş von Karman spektral modeli ve sonlu türbülans iç ve dış ölçeklerini dikkate alan ve genel spektral özelliklere sahip geliştirilmiş üstel spektral model gibi bazı teorik spektral modeller de geliştirilmiştir [35, 37].

Türbülanslı hava, atmosferik sıcaklık dalgalanması ve atmosferik kanal boyunca yayılan optik radyasyonun bağlantı aralığı boyunca rüzgar hızının neden olduğu kırılma indisi homojensizliklerinden kaynaklandığı için gerçek atmosferik koşullar altında türbülans gücünü ölçmek oldukça zordur. Dış ortamdaki hava etkileri, çeşitli atmosferik koşulların (yağmur, türbülans, duman, toz vb.) bir karışımı olabilir. Bu nedenle, kontrollü ortam altında türbülans gücünü hesaplamak için laboratuvar ortamında özel atmosferik odası geliştirilmesi gerekmektedir [2].

Atmosferi geçen optik alanın yolu boyunca atmosferik kırılma indisinin rastgele dalgalanmasıyla oluşan türbülansın gücü, kırılma indisi yapı parametresi C_n^2 kullanılarak ölçülmektedir. Türbülans gücünü karakterize eden C_n^2 , aynı zamandaparıldamaların gücünü de belirlemektedir. C_n^2 matematiksel formülü Eş. 3.1 de gösterilmiştir. Denklemden P ve

T, sırasıyla milibar cinsinden basınç ve Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı temsil etmektedir. Sıcaklık yapısı sabiti C_T^2 ise basınç ve mutlak sıcaklık ile ilgili bir parametredir [2, 38].

$$C_n^2 = \left(86 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2} \right)^2 C_T^2 \quad (3.1)$$

Yayılan ışın üzerindeki türbülans etkileri, düzlem dalga için kullanılan Rytov varyansı ile (σ_R^2) tanımlanır. Rytov varyansını veren Eş. 3.2 şu şekildedir [2, 38];

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (3.2)$$

L yayılma mesafesini, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ise dalga numarasını temsil eden Rytov varyansı, türbülansı sınıflandırabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Eğer $\sigma_R^2 < 1$ ise zayıf türbülans, $\sigma_R^2 \sim 1$ ise orta türbülans, $\sigma_R^2 > 1$ ise güçlü türbülans değerine sahip olunmaktadır [2, 38, 39].

3.2.2. Parıldama (Scintillation)

Son zamanlarda ihtiyaç duyulan yüksek veri hızının karşılanabilmesi için serbest alan optik iletişim sistemlerine olan ilgi artmaktadır. Dolayısıyla serbest alan optik sisteminin performansı, uygun görüş koşulları altında bile, kırılma indisi dalgalanmalarının (türbülansın) yola geçtiği parıldama (yoğunluk dalgalanmaları) nedeniyle atmosferik koşullarla belirgin şekilde sınırlıdır [2].

Parıldama, alıcıda düşük sinyal-ses oranlarına ve alınan sinyalin önceden belirlenmiş bir eşiğin altına düşmesine yani sinyalde güç kaybına neden olmaktadır. Bu yüzden, sistem performansını tespit etmek amacıyla çeşitli atmosferik koşullar altında optik parıldama bilgisi tercih edilmektedir [40].

Temel parıldama özellikleri uzun yıllardır bilinmektedir. Tatarskii, Rytov yaklaşımına dayalı olarak zayıf ışınım dalgalanmaları altında bir düzlem dalganın parıldama indeksi için bir ifade geliştirilmiş, 1965'te Gracheva ve Gurvich tarafından deneysel verilerle açıkça gösterilmiştir [41].

Parıldama indeksitürbülanslı ortamda yayılan ışındaki genlik dalgalanmalarının normalleştirilmiş varyansının bir ölçüsü olarak çıkarılabilir. Parıldama indisini çözümleyebilmek için atmosferde olan türbülans değerinin zayıf, orta, güçlü olduğuna karar verilebilen genişletilmiş Huygens Fresnel integrali, yayılma ortamının rastgeleliğinden kaynaklanan bozulmaların üstel bir karmaşık faz şeklinde sunulduğu Rytov metot ve analitik yaklaşımların sahip olduğu tüm zor ve uzun formülasyonları hafifleten rastgele faz ekran modeli kullanılmaktadır. Bu metotlar içinde yaklaşık olarak her ışın türüne rahatlıkla uygulanabilen rastgele faz ekran modeli, verici ve alıcı arasındaki mesafeyi yeterli sayıda ince faz ekranlarıyla ayrılmış daha kısa bir aralığa bölerek türbülanslı atmosferi modellemektedir [42, 43].

Optik atmosferik bağlantının performansı, yalnızca parıldamayı azaltarak değil, aynı zamanda alıcı tarafından yakalanan gücü artırarak da iyileştirilir. Bunun nedeni, daha fazla güç yakalamanın sinyal-gürültü oranını artırarak alıcı performansının iyileşmesine yol açmasıdır. Bu nedenle, alınan güç başına parıldama miktarı, performansın yararlı bir ölçüsünü temsil eder. Böyle bir ölçü, açıklık ortalamalı parıldama için daha anlamlıdır, çünkü bu tip parıldama, alıcı düzlemin tek bir noktasından ziyade bir alana uygulanmaktadır [42, 43].

3.3. Işınlardan Atmosfer Boyunca Yayılması

Büyük bant genişliklerine ve yüksek hızlı veri aktarımına duyulan ihtiyaç nedeniyle optik ışınların kullanımı büyük önem taşımaktadır. Özellikle bu optik ışıklardan Gauss ışını, ışınlar arasında en basiti olduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son zamanlarda, vortexlıışınlar oldukça popüler hale gelmiştir. Bu bağlamda türbülanslı atmosferde yayılımları sırasında ışıma, parıldama ve diğer özellikleri ile ilgili yaygın araştırmalara rastlamak mümkündür. Özellikle optik iletişim bağlantılarında, elektriksel mesaj sinyalinin topolojik yüke veya vortexlı ışınlarla ilişkili açısall momentumuna entegrasyonu, basit yoğunluk veya faz modülasyonlarına ciddi bir alternatif olarak önerilmektedir. Başlangıçta, vortexlıışınlarda bulunan faz tekilliğinin pratikte ilgi çekici olmadığı düşünölmekteydi. Ancak daha sonra bu tür tekilliklerin iyi tanımlanmış döngüselveya sarmal yapıya sahip olduğu kanıtlanmıştır. Böylece vortex fazının topolojik

bir yüke dönüştürülebileceği ve bilgi taşıyıcı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca bu topolojik yükün, kendi başına yüksek kapasiteli optik bağlantılarda kullanılabilen optik açısal momentumla da ilgili olduğu bilinmektedir. Çeşitli yayınlarda vortexli ışınların atmosferik türbülansın neden olduğu parıldamayı azaltabildiğinden ve bu yolla daha iyi alıcı performansı sağladığından bahsedilmektedir [2, 8, 32].

Bu bölüm, atmosferik türbülansı modellemek ve ışınların parıldama seviyesini hesaplamak için izlenen teorik adımları, rastgele faz ekran modelinin tasarımını ve kısıtlamalarını kapsamaktadır. Ayrıca üzerinde çalışılan, Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının matematiksel ifadeleri incelenmiştir.

3.4. Kaynak Düzlemde Kullanılan Işınlar

Işınların kaynak düzlem üzerindeki yoğunluğu, kaynak düzlem alanı ile bu alanın kompleks eşleniğinin çarpılmasıyla Eş. 3.3'teki gibi hesaplanmaktadır. Hesaplanan yoğunluk, Eş. 3.4'te yer alan formüle göre normalize edilmektedir. Tez dahilindeki ışınlar için şekillerde gösterilen yoğunluklar, normalize edilmiş yoğunluklardır (I_{SN}).

$$I_s(\mathbf{s}, \phi_s) = u_s(\mathbf{s}, \phi_s) u_s^*(\mathbf{s}, \phi_s) \quad (3.3)$$

$$I_{SN} = I_s(\mathbf{s}, \phi_s) / \max[I_s(\mathbf{s}, \phi_s)] \quad (3.4)$$

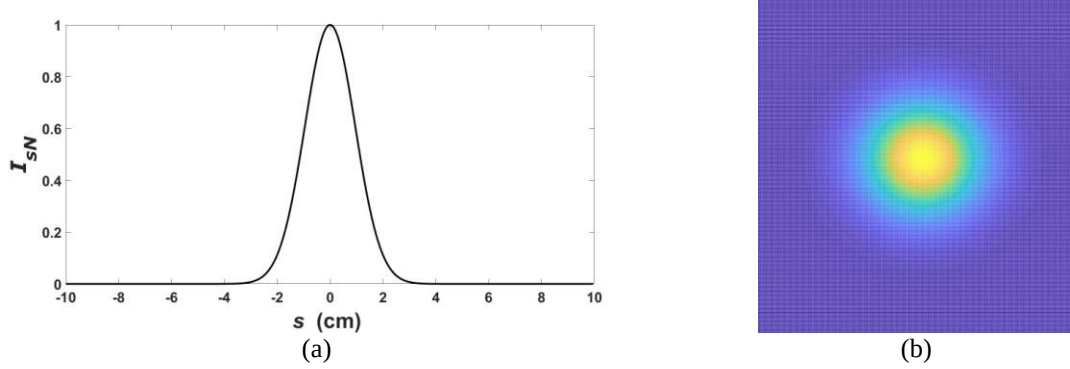
$(\mathbf{s}, \phi_s)$ kaynak düzlem enine koordinatlarını, $u_s(\mathbf{s}, \phi_s)$ ışınların kaynak düzlem alanını,* sembolü ise eşleniğini temsil etmektedir.

3.4.1. Gauss Işınları

Gauss ışınının, kaynak düzlemde kimodellemesi silindirik koordinat sisteminde şu şekilde yapılmaktadır [44];

$$u_s(\mathbf{s}, \phi_s) = \exp\left(-\frac{s^2}{\alpha_s^2}\right) \quad (3.5)$$

Eş. 3.5'te yer alan α_s kaynak boyutunu temsil etmektedir. Kaynak düzlemdaki gauss ışını Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Gauss ışınının kaynak düzlemda (a) 2 boyutlu grafiği(b) uzaysal gösterimi

3.4.2. Vortexli Gauss Işınlr

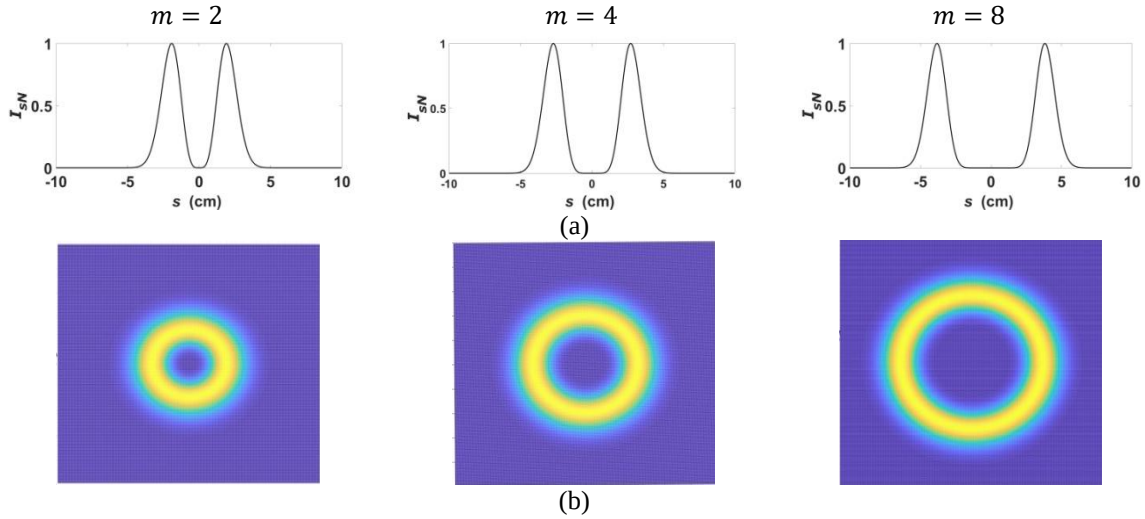
Vortexli Gauss ışınının, kaynak düzlemda modellemesi silindirik koordinat sisteminde şu şekilde yapılmaktadır [8, 44];

$$u_s(s, \phi_s) = \left(\frac{s}{\alpha_s}\right)^m \exp\left(-\frac{s^2}{\alpha_s^2}\right) \exp(jm\phi_s) \quad (3.6)$$

Eş. 3.6'da m topolojik yükü temsil etmektedir. Topolojik yükün sırasıyla 2, 4 ve 8 olduğu vortexli Gauss ışını Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Vortexs ışınları, merkezinde karanlık nokta olan halka şeklinde bir profile sahip olduğunu ve bu karanlık noktanın boyutu, topolojik yüke bağlı olduğunu, bu değer arttıkça ışının ortasındaki karanlık kısmın büyüdüğünü "2.2. Vortexli Işınlr" bölümünde anlatılmıştı. Şekil 3.4'te de bu durumu gözlemlemekteyiz.

3.5. Türbülans Modelleme

Atmosferik türbülans yoluyla lazer ışını yayılımını modellemek için dalga optiği kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, atmosferi Fourier dönüşümü ve rastgele faz ekran modelinin birleşimiyle modellemektedir. Fourier dönüşümü, lazer ışınlarının serbest uzayda yayılmasını verimli bir şekilde modellemektedir [45].

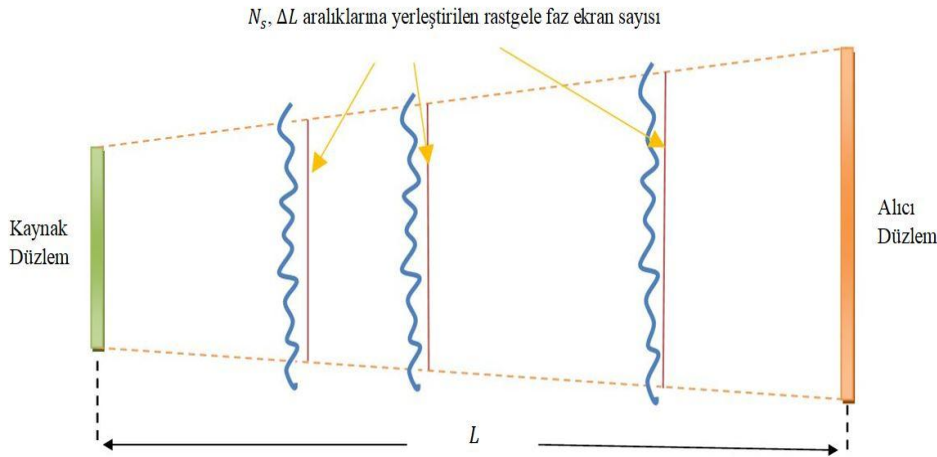


Şekil 3.4. Kaynak düzlemdaki ışın yoğunluğu (a) 2B gösterimi (b) uzaysal gösterimi

Atmosferin etkileri genellikle Kolmogorov teorisine göre yayılan dalga cephesinin fazını bozan ince faz ekranları kullanılarak simüle edilmektedir. Faz ekranları oluşturmak için çeşitli teknikler olmasına rağmen, en popüler olanı, beyaz Gauss gürültüsünü spektral alan içinde filtreleme sonrasında hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak uzaysal alana dönüştürme işlemidir. Bu FFT tabanlı teknikler, Kolmogorov türbülansının düşük uzaysal frekans özelliklerini doğru bir şekilde yeniden üretmedikleri için sınırlıdır. Birkaç araştırmacı, bu tekniklerin düşük frekanslı bilgileri içerecek şekilde genişletilmesini araştırmıştır. Bu sorunu düzeltebilmek için düşük frekanslı alt harmonik bilgileri kullanan yeni fazlı ekran oluşturma tekniğini tanıtmaktadırlar [46].

Herman ve Strugala, FFT tabanlı yöntemin yüksek frekanslı ekranından birçok kez daha büyük olan düşük frekanslı faz ekranının güç spektrumunu üreterek alt harmonik bilgiyi birleştirmişlerdir. Lane, Glindemann ve Dainty, alt harmonik bilgiyi dahil etmenin başka bir yöntemini sunmuşlardır. Yüksek frekans spektrumunun merkezi alan parçasını, her biri orijinal parça boyutunun $1/9$ 'una sahip dokuz eşit boyutlu alt parçaya bölmektedirler. Johansson ve Gavel yeni bir alt harmonik yöntem hazırlamışlardır. Geliştirdikleri metot dahilinde, Lane'in alt harmonik seviye kavramı değiştirilmiş bir versiyonu ile birlikte Herman ve Strugala'nın doğrudan Fourier evirme tekniğini kullanmaktadırlar. Sedmak tarafından Von Karman türbülans spektrumlu atmosferik dalga cepheslerinin Fast-Fourier-dönüşüm tabanlı simülatörleri, büyük kare ve dikdörtgen formatlarda faz-yapı fonksiyonu ve faz varyansı referans alınarak test edilmiştir. Faz yapısı fonksiyonunun simetrisi ve doğruluğunun, faz ekranının oranı ve boyutu ile sınırlı olduğu bulunmuştur [46, 47].

Tez içerisinde kullanılan yöntem, türbülans içinde ışının yayılmasının sayısal hesaplamalarını içeren, bir çok araştırmacı tarafından geliştirilen rastgele faz ekranı metodudur. Rastgele faz ekran yaklaşımı, analitik yaklaşımların sahip olduğu zor ve uzun formülasyonları hafifletmektedir. Bu yaklaşım, verici ve alıcı arasındaki mesafeyi Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yeterli sayıda ince faz ekranlarıyla ayrılmış daha kısa bir aralığa bölerek türbülanslı atmosferi modellemektedir. Bu ekranlar arasındaki mesafe, rastgele faz ekran modelinin tasarlanması için kritik bir unsurdur. Bu nedenle bu mesafe, birikmiş türbülansın Rytov varyansını (Eş. (3.2)) zayıf türbülans aralığında tutacak kadar kısa belirlenmelidir. Bu tasarımdaki diğer önemli unsurlar, $\sqrt{\lambda L/N_s N_g}$ değerinden büyük tutulması gereken ızgara aralığıdır. N_s eklenen faz ekranlarının sayısını N_g ise ızgara noktaları sayısını temsil etmektedir [6, 47, 48].



Şekil 3.5. Rastgele faz ekran modeli tasarımı

Işınlara türbülans olmayan bir ortamda yayılması Huygens-Fresnel integrali ile ifade edilmektedir. L mesafesi olarak alıcı ortama gelen ışın Huygens-Fresnel integrali kullanarak Eş. 3.7'deki gibi oluşturulmaktadır [36];

$$u_{r_{fs}}(\mathbf{r}, L) = \frac{-jk}{2\pi L} \exp(jkL) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_s(\mathbf{s}) \exp\left[\frac{jk}{2L}(\mathbf{r} - \mathbf{s})^2\right] d^2\mathbf{s} \quad (3.7)$$

$u_{r_{fs}}(\mathbf{r}, L)$ türbülans olmayan ortamda yayılan ışınların alıcı düzlemdeki alanını, $(\mathbf{r})$ alıcı düzlemin enine koordinatını ifade etmektedir. Eş. 3.8 iki boyutlu Fourier dönüşüm işlemine sahip olduğundan aşağıda verilen denklemde yeniden yazılmaktadır [36].

$$u_{r_{fs}}(\mathbf{r}, L) = \mathbf{F}^{-1}[\mathbf{F}(u_s(\mathbf{s}))\mathbf{F}(h(\mathbf{r}))] = \mathbf{F}^{-1}[U_s(\mathbf{f})H(\mathbf{f})] \quad (3.8)$$

Eş. 3.8’de $\mathbf{F}$ Fourier dönüşüm operatörünü, $\mathbf{F}^{-1}$ ters Fourier dönüşümünü, $\mathbf{f}$ uzaysal frekansı temsil etmektedir. $H(\mathbf{f})$ ise transfer fonksiyonunu ifade eder ve Eş. 3.9’daki gibi gösterilmektedir.

$$H(\mathbf{f}) = \exp \left[jL \left(k - \frac{2\pi^2}{k} |\mathbf{f}|^2 \right) \right] \quad (3.9)$$

Kullanılan rastgele faz ekran modeli, yayılma mesafesinin ince faz ekran düzlemleriyle ayrılmış N_s aralıklarına $\Delta L = L/N_s$ bölünmesi yoluyla türbülansın etkisini temsil eder. Böylece n . düzlemdeki alıcı alanı Eş. 3.10’deki gibi ifade edilmektedir [36, 43, 44].

$$u_r(\mathbf{r}, n\Delta L) = \mathbf{F}^{-1}[\mathbf{F}[u_s(\mathbf{r}, (n-1)\Delta L)\exp(j\phi(\mathbf{r}))]H(\mathbf{f})] \quad (3.10)$$

Burada $\phi(\mathbf{r})$ bireysel ekranların faz güç spektral yoğunluğunu belirtmektedir. Von-Karman spektrumunun güç spektral yoğunluğu Eş. 3.11 ile ifade edilir [36, 43, 44].

$$\Phi_\phi(\mathbf{f}) = \frac{0.0036LC_n^2k^2L_0^{11/3}}{(L_0^2|\mathbf{f}|^2 + 1)^{11/6}} \exp[-1.1265l_0^2|\mathbf{f}|^2] \quad (3.11)$$

Eş. 3.11’de, L_0, l_0 türbülanslı ortamın sırasıyla dış ve iç ölçeklerini temsil etmektedir. Son olarak, ışının alıcı düzlem üzerindeki yoğunluğu, alıcı düzlemin kompleks eşleniği ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır.

$$\langle I_r(\mathbf{r}, L) \rangle = \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} u_r(\mathbf{r}, L) u_r^*(\mathbf{r}, L) \quad (3.12)$$

Eş. 3.12’de $\langle \rangle$ ifadesi ortalamayı belirtmektedir ve $I_r(\mathbf{r}, L)$ alıcı alan yoğunluğunu temsil etmektedir. $u_r(\mathbf{r}, L)$ bir dizi faz ekranından geçtikten sonra alıcıya ulaşan ışınların, alıcı düzlem alanını ifade etmektedir. Eş. 3.12’deki üst ortalama limiti N_r teorik olarak sonsuza yaklaşır, ancak pratikte türbülans seviyesine bağlıdır ve 500’e ayarlamak güvenilir sonuçlar almak için yeterli olmaktadır [36, 43, 44].

3.6.Parıldama İfadesi

Optik iletişim bağlantılarındaki yayılma ortamı atmosfer olmasından kaynaklı optik ışınlar yoğunluk dalgalanmalarıyla (parıldama) karşılaşırlar. Bu dalgalanmalar, sistemin hata yapma olasılığını önemli ölçüde arttırmaktadır. Optik bağlantı performansının değerlendirilmesinde önemli ölçütlerinden biri parıldama indeksi [44]. Alıcı düzlemin belirli bir konumdaki parıldama indeksini Eş.3.13'te görmekteyiz [42].

$$b^2(\mathbf{r}, L) = \frac{\langle I_r^2(\mathbf{r}, L) \rangle}{\langle I_r(\mathbf{r}, L) \rangle^2} - 1 \quad (3.13)$$

$b^2(\mathbf{r}, L)$ parıldama indeksini temsil etmektedir. Eş. 3.13'te verilen formülü kullanarak, nokta benzeri parıldama (point-like scintillation) indeksi ifade edilir. Eğer alıcı açıklık yarıçapı r_r , $(0,5\lambda L/\pi)^{0,5}$ ifadesinden büyükse, Eş. 3.13'te yer alan formülasyon, açıklık ortalamalı parıldama (aperture averaged scintillation (power scintillation) indeksine dönüşür ve Eş. 3.14'te olduğu gibi ifade edilir [44].

$$b^2(L) = \frac{\langle P_r^2(L) \rangle}{\langle P_r(L) \rangle^2} - 1 \quad (3.14)$$

$$P_r(L) = \int_{-0,5\sqrt{\pi}r_r}^{0,5\sqrt{\pi}r_r} \int_{-0,5\sqrt{\pi}r_r}^{0,5\sqrt{\pi}r_r} I_r(r_x, r_y, L) dr_x dr_y \quad (3.15)$$

$P_r(L)$, dairesel açıklık yarıçapı uzunluğu r_r olan alıcı düzlemdeki ışının, anlık gücünü göstermektedir [44].

Sonuç olarak, analitik formülasyonları kullanarak parıldamaları belirlemek oldukça zordur. Bu zorluğun hafifletilmesi, toplamalar ve bölmeler uygulanarak rastgele faz ekran modelinin kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Rastgele faz ekran modelinin kullanılması, çok sayılı ışın türüyle çalışabilme ve parıldama çeşitlerini genişletebilme imkanı sunmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

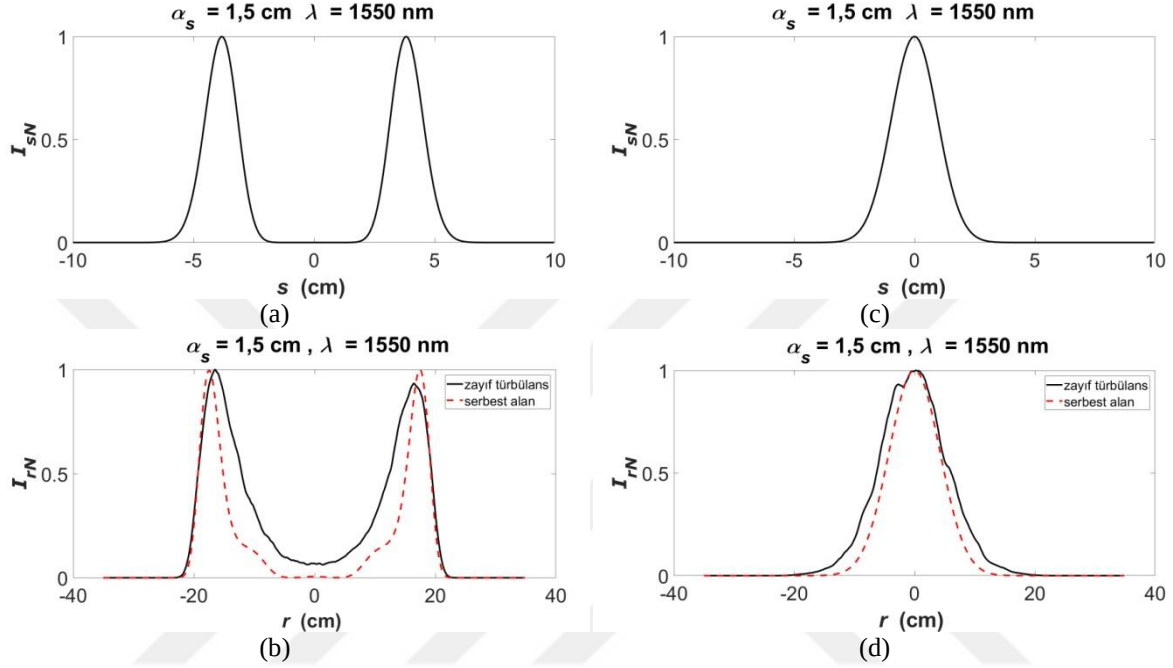
4.1. Işın Parametrelerinin Atmosferik Türbülansa Yayılan Işıklar Üzerindeki Etkileri

Serbest uzay optik iletişimi, lazer radar sistemleri ve uzaktan algılama gibi uygulamalarda kullanılan optik ışınların yayılma ortamı atmosferdir. Atmosferde meydana gelen ani sıcaklık değişimleri, serbest uzay lazer iletişim sistemlerinin menzilini ve performansını önemli ölçüde sınırlayan atmosferik türbülansa neden olmaktadır. Atmosferik türbülansın neden olduğu optik faz rastgele bozulmaları, alınan yoğunluğun azalmasına ve potansiyel olarak daha yüksek sistem bit hata oranlarına yol açmasına neden olur. Literatürde birçok araştırma grubu, optik iletişim uygulamalarında sistem performansını artırmak için türbülansın neden olduğu bozulmayı en aza indirmeye çalışır. Gauss ışınları ve vortexli Gauss ışınları dahil olmak üzere birçok farklı lazer ışını türü için ışın parametrelerinin, alıcıya ulaşmış ışınların yoğunluğu üzerindeki etkisini incelemiş çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde, zayıf türbülanslı bir atmosferde yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınının yoğunluğu üzerindeki çalışma dalga boyu, kaynak boyutu ve alıcı açıklığı yarıçapı gibi sistem parametrelerinin etkilerini incelenmiştir [2, 32].

Güvenilir sonuçlar elde edebilmek için, yayılma mesafesi, her biri 512×512 ızgara boyutuna sahip 30 adet faz ekrana bölünmektedir. Teorik koşulu karşılamak amacıyla 500 kez çalıştırma yapılmıştır. İncelenen Gauss ve vortexli Gauss ışınları, 5 km boyunca, kırılma indeksi sabiti $10^{-14} m^{-2/3}$ olan zayıf türbülanslı bir atmosferik ortamda yayılmaktadır. Test edilen ışınlar, yaygın olarak kullanılan dalga boyunda (1550 nm) çalışır. Von-Karman spektrumu iç ölçeği ve dış ölçeği sırasıyla sıfıra ve sonsuza ayarlanmıştır. Kaynak boyutunun (α_s), alıcı açıklığı yarıçapının (r_r) ve çalışma dalga boyunun (λ) atmosferik türbülansa yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışını üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tasarlanılan rastgele faz ekran modelini test edebilmek için hem serbest alan hem de türbülanslı atmosferde yayılan ışınların alıcı düzlemde yoğunlukların 2B grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 4.1. (a) Kaynak düzlemde vortexli Gauss ışının, (b) atmosfer boyunca yayılan vortexli Gauss ışının, (c) kaynak düzlemde Gauss ışının, (d) atmosfer

boyunca yayılan Gauss ışının 2B grafiğini görmekteyiz. Şekil 4.1 (b) ve (d) grafiklerinde hem Gauss hem de vortexli Gauss ışının yoğunluk profili hem türbülanslı ortamda hem de serbest alanda aynı bölgede oluşması, kullandığımız rastgele faz ekran metodu ile analitik formülasyonların örtüştüğünü göstermektedir.

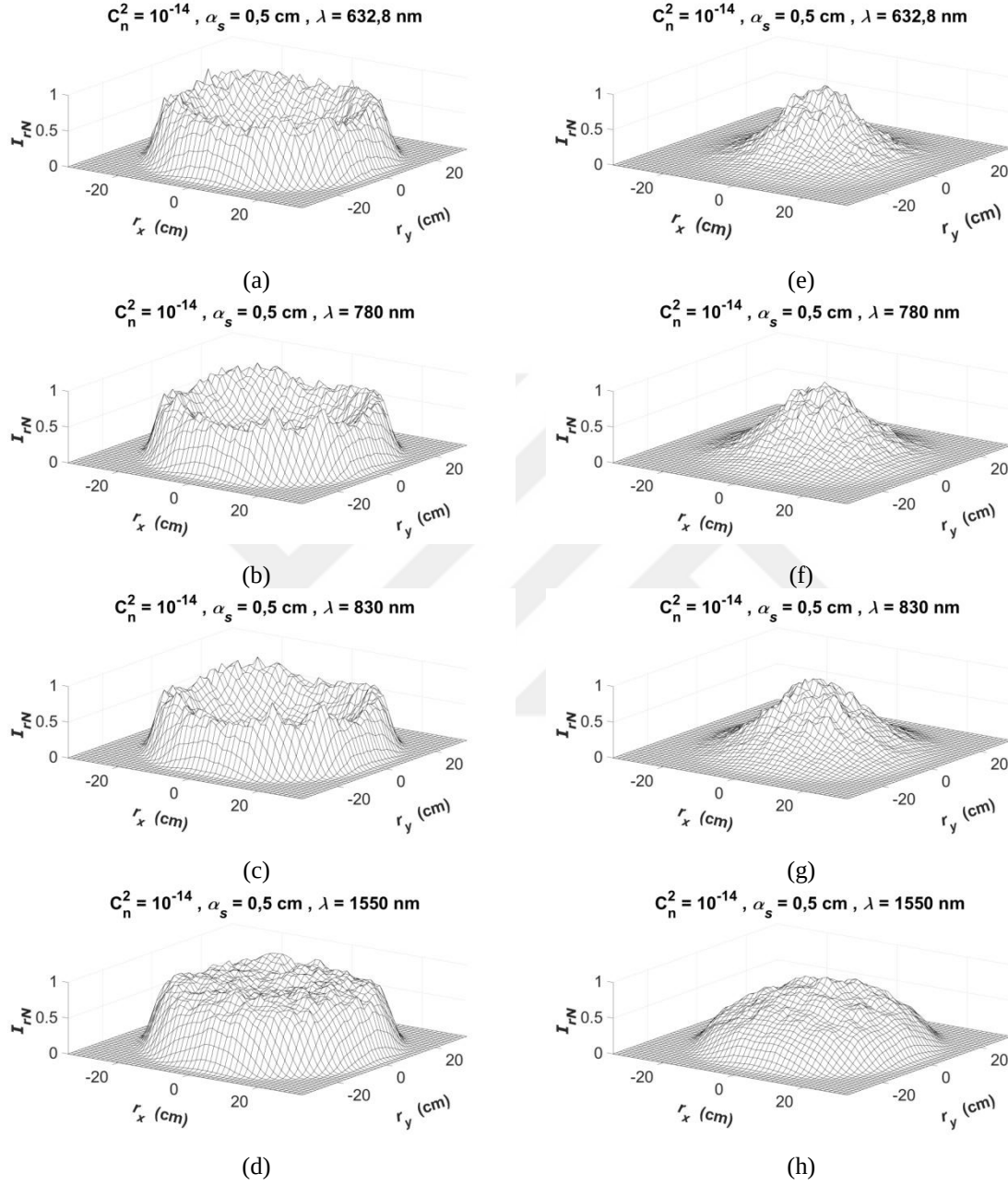


Şekil 4.1. (a) Kaynak düzlemde vortexli Gauss ışının, (b) Atmosfer boyunca yayılan vortexli Gauss ışının, (c) Kaynak düzlemde Gauss ışının, (d) Atmosfer boyunca yayılan Gauss ışının 2B grafiği

4.1.1.Çalışma Dalga Boyu Etkisinin İncelenmesi

Bu bölümde, çalışma dalga boyu iletişim bağlantılarında önemli bir rol oynadığından, atmosferik türbülansla yayılan ışınların üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kırılma indeksi sabiti $10^{-14} m^{-2/3}$ olan zayıf türbülanslı bir atmosferik ortamda, 5 km yayılma mesafesi olan, 0.5 cm kaynak boyutuna (α_s) sahip, çalışma dalga boyunun sırasıyla 632,8, 780, 830 ve 1550 nm olduğu Gauss ışınların ve vortexli Gauss ışınların alıcı düzlemdeki yoğunluk profili hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 4.2’de zayıf türbülanslı ortamda yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınların normalize edilmiş ortalama yoğunluğunun üç boyutlu hali gösterilmiştir. İncelenen şekillere göre, daha yüksek dalga boylarında çalışan hem Gauss ışınların hem de vortexli Gauss ışınların, daha düşük dalga boylarında çalışan ışınlarla oranla, daha fazla ışın yayılmasına (beam spreading) maruz kaldığı

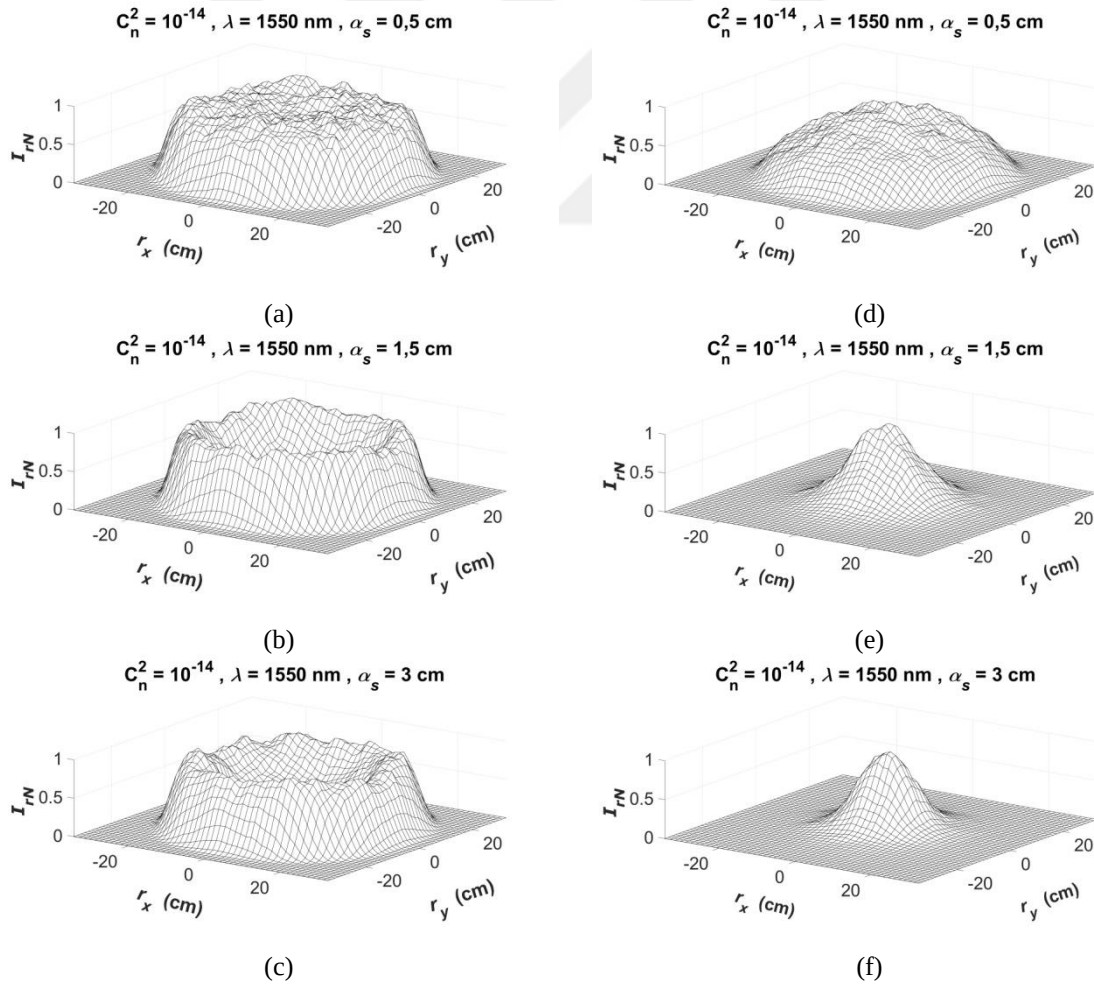
gözlemlenmektedir. Bu gibi durumlarda türbülans etkilerinden çok kırınım etkileri baskındır. Bu gözlemler literatürde incelenen diğer durumlarla uyumludur [25, 31, 49].



Şekil 4.2. Atmosferde yayılan ışınların farklı dalga boylarında normalize edilmiş ortalama yoğunluk 3B grafiği, (a-d) Vortexli Gauss ışınına ait, (e-h) Gauss ışınına ait

4.1.2. Kaynak Boyutu Etkisinin İncelenmesi

Kırılma indeksi yapı sabiti $10^{-14}m^{-2/3}$ olan zayıf türbülanslı bir atmosferik ortamda, 5 km yayılma mesafesi olan, 1550 nm çalışma dalga boyuna, 8 cm alıcı açıklık yarıçap uzunluğuna ve sırasıyla 0,5, 1,5, 3 cm kaynak boyutuna sahip Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının alıcı düzlemdeki yoğunluk profili üzerinde çalışılmıştır. Zayıf türbülanslı ortamda hareket eden ışınların alıcı düzlemdeki yoğunluk profilinin kaynak boyutuna göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Şekil 4.3'te zayıf türbülanslı ortamda yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınların normalize edilmiş ortalama yoğunluğunun üç boyutlu hali gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere, büyük kaynak boyutlarına sahip hem Gauss hem de vortexli Gauss ışınları orijinal profillerini korumaktadırlar ve daha az yayılmaya, bozulmaya uğramaktadırlar. Elde ettiğimiz sonuçlar literatür ile de uyumludur [31].

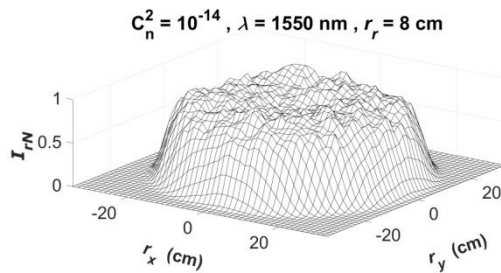


Şekil 4.3. Atmosfer boyunca yayılan ışınların farklı kaynak boyutlarından normalize edilmiş ortalama yoğunluk 3B grafikleri (a-c) Vortexli Gauss ışınına ait, (d-f) Gauss ışınına ait

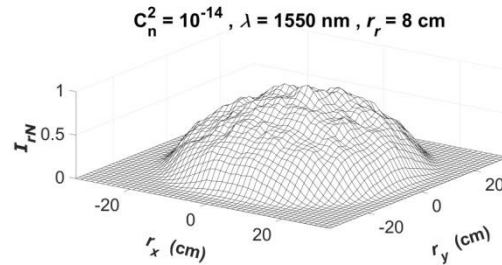
4.1.3. Alıcı Açıklık Yarıçap Uzunluğu Etkisinin İncelenmesi

Kırılma indeksi sabiti $10^{-14}m^{-2/3}$ olan zayıf türbülanslı bir atmosferik ortamda, 5 km yayılma mesafesi olan, 1550 nm çalışma dalga boyuna, 0,5 cm kaynak boyutuna ve sırasıyla 8, 13, 15 cm alıcı açıklık yarıçap uzunluğuna sahip ışınların alıcı düzlemdeki yoğunluk profili üzerinde çalışılmıştır. Zayıf türbülanslı ortamda hareket eden Gauss ve vortexli Gauss ışınların alıcı düzlemdeki yoğunluk profilinin alıcı açıklık yarıçap uzunluğuna göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Şekil 4.4'te zayıf türbülanslı bir ortamda yayılan ışınların normalize edilmiş ortalama yoğunluğunun üç boyutlu hali gösterilmiştir. Elde ettiğimiz grafiğe göre, test edilen alıcı açıklığı yarıçap uzunluk değerleri, atmosferik türbülansla yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınların her ikisinin yoğunluk profili üzerinde gözle görülür bir etkiye sahip değildir. Alıcı açıklığı yarıçap uzunluğunun yüksek olması, ışının orijinal profilini korumasına yardımcı olur. Çünkü daha yüksek alıcı açıklığı yarıçap uzunluğuna sahip olmak, sistemin daha fazla dolaşan yükü algılamasını sağlamaktadır [13].

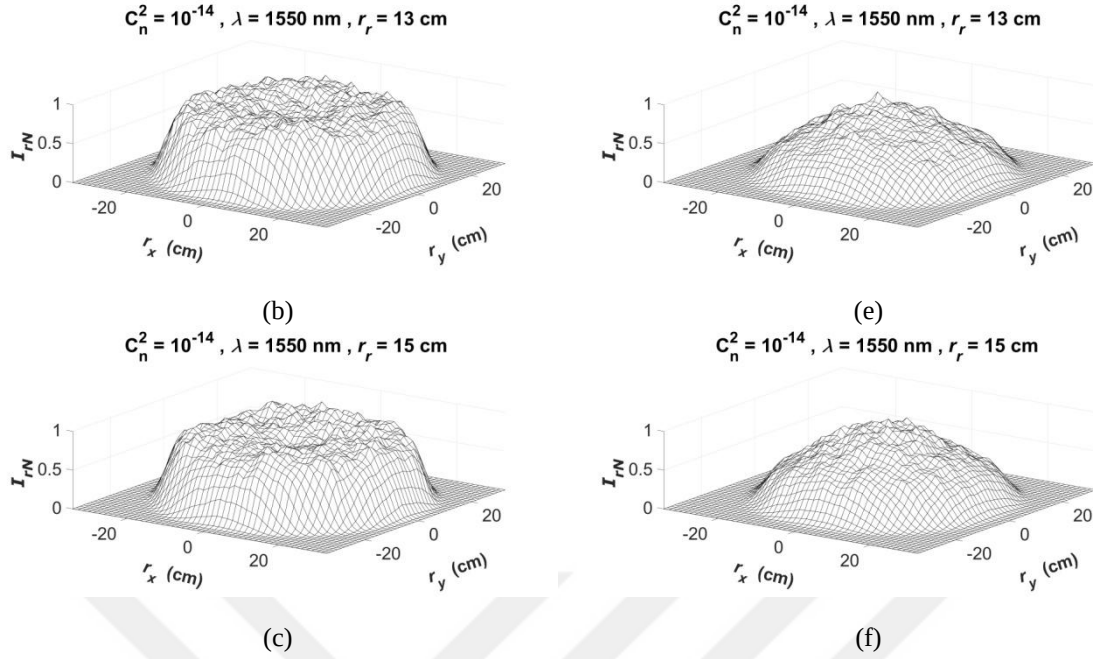
Sonuç olarak, zayıf türbülanslı bir atmosferde yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınının yoğunluk profillerine ışın parametrelerinin etkileri elde edilen grafiklere göre incelendiğinde, büyük kaynak boyutuna sahip ve daha düşük çalışma dalga boylarında hem Gauss hem de vortexli Gauss ışını orijinal profilini korumaktadır. Alıcı açıklığı yarıçap uzunluğunun değişimiyle, her iki ışın türünün yoğunluğu üzerinde gözle görülür bir etki tespit edilememiştir.



(a)



(d)



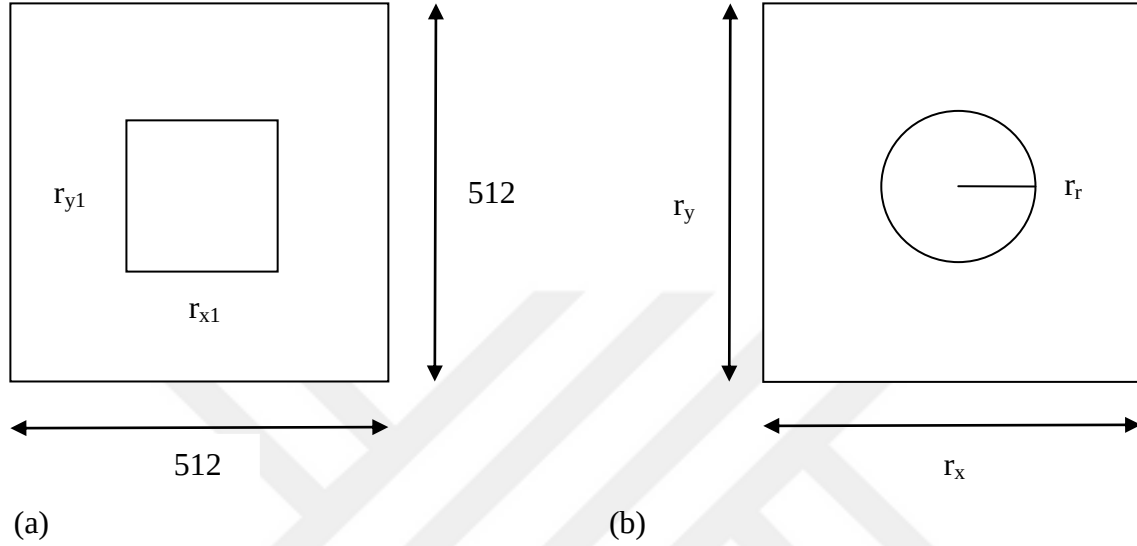
Şekil 4.4. Atmosfer boyunca yayılan ışınların farklı açıklık yarıçapuzunluğunda normalize edilmiş ortalama yoğunluk 3B grafikleri (a-c) VortexliGauss ışınına ait, (d-f) Gauss ışınına ait

4.2. Işın Parametrelerinin Vortexli Işınlarda Özelliklerine Etkisinin Analizi

Güvenilir sonuçlar elde etmek için, literatürde belirtilen kısıtlamalara göre rastgele faz ekran modelini kullanmaktayız [48,50]. Buna göre, hem kaynak hem de alıcı düzlemlerde 512×512 ızgara boyutu kullanılmaktadır. 1,5 ile 5 km (0,5 artış miktarıyla) arasında değişen yayılma mesafesi, 30 adet rastgele ara faz ekranına bölünmüştür. Sonuçlar, eğrilerin genel eğilimlerini ortaya çıkarmak için yeterli olduğu düşünülen 500 simülasyon çalışması sonucu (gerçekleşmeler) elde edilen grafiklerde sunulmaktadır [44]. Von-Karman spektrumu iç ölçeği ve dış ölçeği sırasıyla sıfıra ve sonsuza ayarlanmıştır. İncelenen Gauss ve vortexli Gauss ışını, 5 km yol kat ederken, kırılma indeksi sabiti $10^{-14} m^{-2/3}$ zayıf türbülanslı atmosferik ortamda yayılmaktadır. Işının içerdiği yaklaşık olarak tüm gücün uyumunu sağlamak için kaynak düzlem boyutlarını $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ olarak seçilmektedir.

Şekil 4.5, matlab üzerinde kullandığımız alıcı düzlem matris görünümünü ve buna karşılık gelen dairesel alıcı görünümünü göstermektedir. Şekil 4.5 (a) açıklık ortalama parıldama için kullanılır ve Şekil 4.5 (b)'de gösterildiği gibi minimize edilmiş dairesel açıklığa karşılık gelmektedir. Açıklık ortalama parıldama hesaplamasında, Şekil 4.5

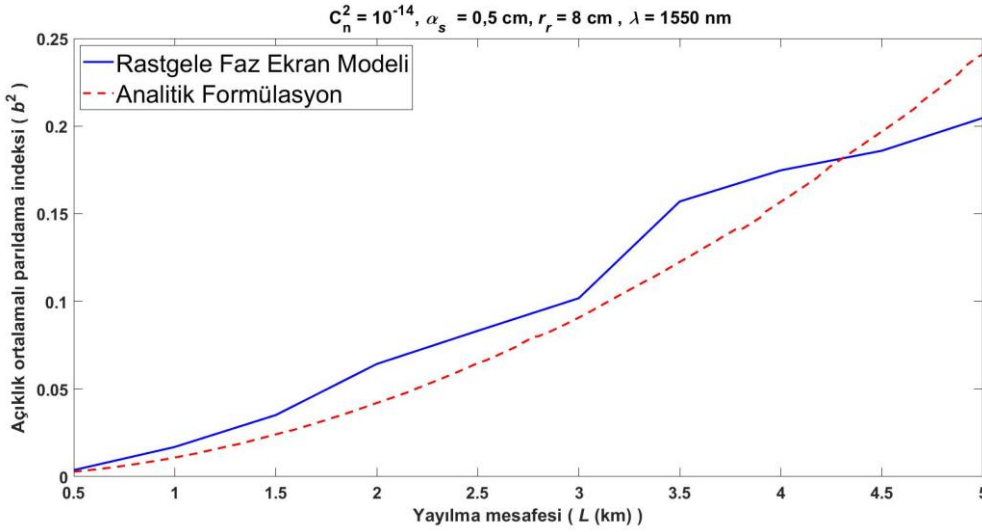
(a)'daki alıcı açıklık boyutu ($r_{y1} \times r_{x1}$), sırasıyla 80, 100, 140, 160 ızgara boyutlarında alınmıştır. Verilen ızgara boyutlarına sahip alıcı düzlem matrislerine karşılık gelen dairesel alıcı açıklık yarıçapları yapılan hesaplamalar doğrultusunda sırasıyla 6, 8, 11, 13 cm bulunmuştur [51].



Şekil 4.5. (a) alıcı düzlem matrisi ve (b) alıcı düzlem matrisi ile ilgili dairesel görünüm

Tez dahilinde kullanılan rastgele faz ekran metodunun sonucu, Ref 52'nin analitik formülasyonuna karşı test edilmiştir ve sonuçlar Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Analitik formülasyon ile tezde çalışılan rastgele faz ekran metodu sonuçlarının birbirine yakın eğriler göstermesi, kullanılan metodun doğruluğunu göstermektedir. Karşılaştırma, 0,5 cm kaynak boyutunda, 1550 nm çalışma dalga boyuna sahip, kırılma indeksi yapı sabiti $10^{-14} m^{-2/3}$ olduğu parametreler için yapılmıştır.

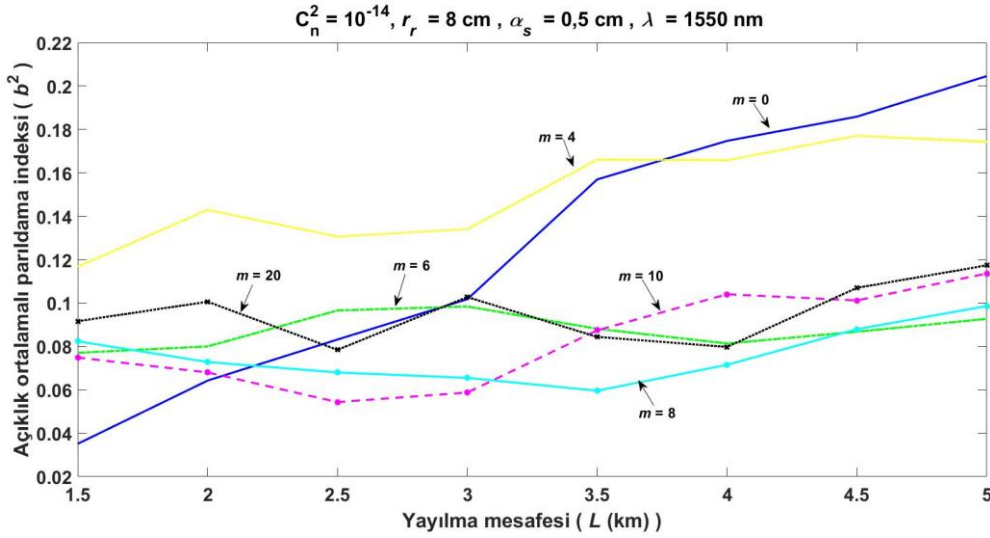
Tüm bu parametreler dahilinde bu bölümde, türbülanslı bir atmosferde yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının parıldama seviyeleri üzerinde topolojik yük, yayılma mesafesi, kaynak boyutu, alıcı açıklık yarıçap uzunluğu ve çalışma dalga boyunun etkileri analiz edilmektedir.



Şekil 4.6. Rastgele faz ekran metodu ve analitik formülasyon ile Gauss ışının parıldama indeksi değeri

4.2.1. Topolojik Yük Parametresinin Etkisinin İncelenmesi

1550 nm'lik çalışma dalga boyunda, 8 cm alıcı açıklığı yarıçapında, 0,5 cm kaynak boyutuna sahip Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının parıldama özellikleri farklı topolojik yüklerde nasıl değiştiği ve yine aynı parametrelere sahip Gauss ışının artan yayılma mesafesinde parıldama seviyesinin durumu Şekil 4.7'deki grafik üzerinden incelenmiştir. Bu grafiğe göre, Gauss ışınının ($m = 0$) parıldama değeri, artan yayılma mesafesiyle arttığı görülmektedir. Daha yüksek topolojik yüke sahip vortexli Gauss ışınlarının parıldama değeri, artan yayılma mesafesiyle azaldığı sonucuna varılmaktadır. Bu sonuç, literatürde yer alan çalışmalarla da doğrulanmıştır [8, 44]. Topolojik yük değeri 8 olan vortexli Gauss ışının yayılma mesafesi boyunca en düşük parıldama seviyesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durumdan dolayı tez kapsamında, topolojik yükü 8 olan vortexli Gauss ışınları üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca, yayılma mesafesi 2,5 km'ye kadar Gauss ışının iyi alıcı sistem performansı sergilediği, 2,5 km'den sonra yani daha uzak mesafelerde vortexli Gauss ışının kullanıldığı sistemler daha iyi performans gösterebileceği sonucuna varılmaktadır.

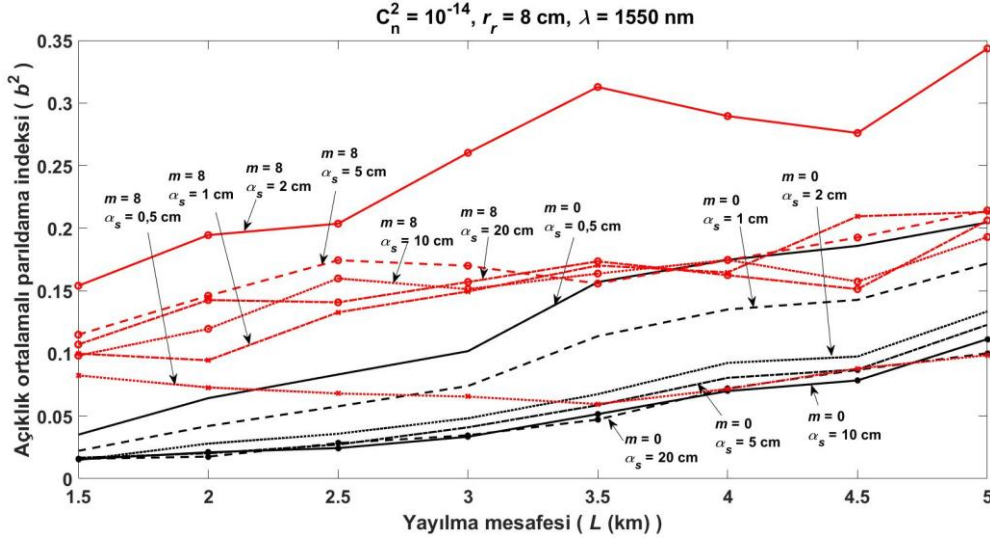


Şekil 4.7. Topolojik yükün, kullanılabildiği parıldama indeksine etkisi

4.2.2. Kaynak Boyutu Parametresinin Etkisinin İncelenmesi

1550 nm'lik çalışma dalga boyunda, 8 cm alıcı açıklığı yarıçapında, 5 km maksimum yayılma mesafesine sahip Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının parıldama özellikleri farklı kaynak boyutuna göre nasıl değiştiği Şekil 4.8'deki grafik üzerinden incelenmiştir. Grafikte yer alan kırmızı çizgiler vortexli Gauss ışınları, siyah çizgiler ise Gauss ışınlarının parıldama seviyesini göstermektedir. Gauss ışınları için, kaynak boyutu arttıkça parıldama seviyesinin azaldığını gözlemlemekteyiz. Bu sonuç, literatürde yer alan çalışmalarla da desteklenmektedir [36].

Grafiğe göre, yayılma mesafesi 2,5 km'ye kadar Gauss ışının iyi alıcı sistem performansı sergilediği, 2,5 km'den sonra yani daha uzak mesafelerde uygun parametreler seçildiğinde vortexli Gauss ışının kullanıldığı sistemler daha iyi performans gösterebileceği sonucuna varılmaktadır.



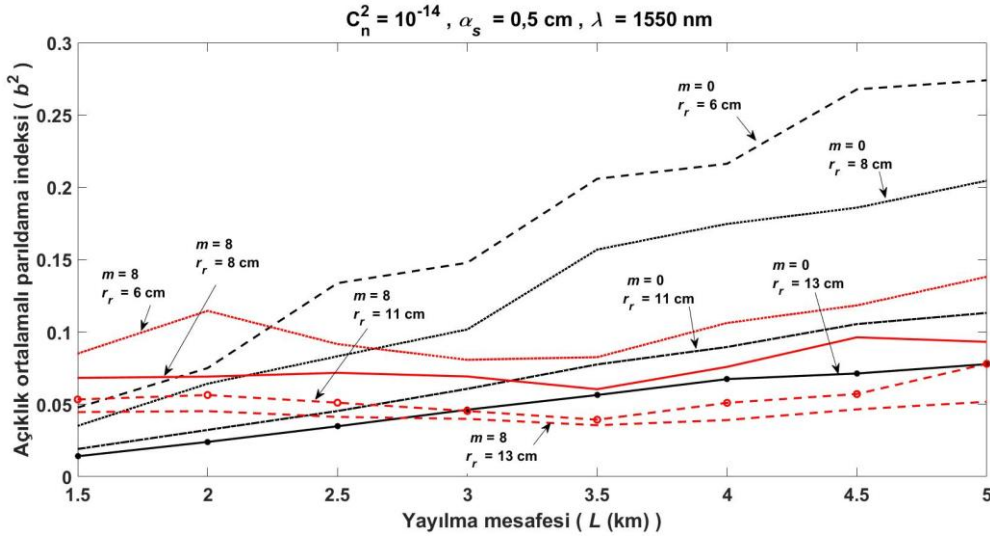
Şekil 4.8. Kaynak boyutunun, kullanılan ışınların parıldama indeksine etkisi

4.2.3. Alıcı Açıklık Yarıçapı Etkisinin İncelenmesi

1550 nm'lik çalışma dalga boyunda, 0,5 cm kaynak boyutunda, 5 km maksimum yayılma mesafesine sahip vortexli Gauss ışını ve Gauss ışınının parıldama özellikleri farklı alıcı açıklığı yarıçapına göre nasıl değiştiği Şekil 4.9'da verilen grafik üzerinden incelenmiştir. Grafikte yer alan kırmızı çizgiler vortexli Gauss ışınları, siyah çizgiler ise Gauss ışınlarının parıldama seviyesini göstermektedir.

Hem Gauss ışınları hem de vortexli Gauss ışınlarının parıldama indeksleri, artan alıcı açıklığı yarıçapına göre azalmaktadır. Çünkü alıcı açıklığı yarıçapına artırılması alıcının daha fazla dolaşan yükü algılamasına olanak tanımaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde yer alan çalışmalar ile uyumlu görünmektedir [8, 36].

Şekil 4.9'a göre iki ışın tipini kıyasladığımızda, yayılma mesafesi 2,5 km'ye kadar Gauss ışının iyi alıcı sistem performansı sergilediği, 2,5 km'den sonra yani daha uzak mesafelerde uygun parametreler dahilinde vortexli Gauss ışının kullanıldığı sistemler daha iyi performans gösterebileceği sonucuna varmaktayız.



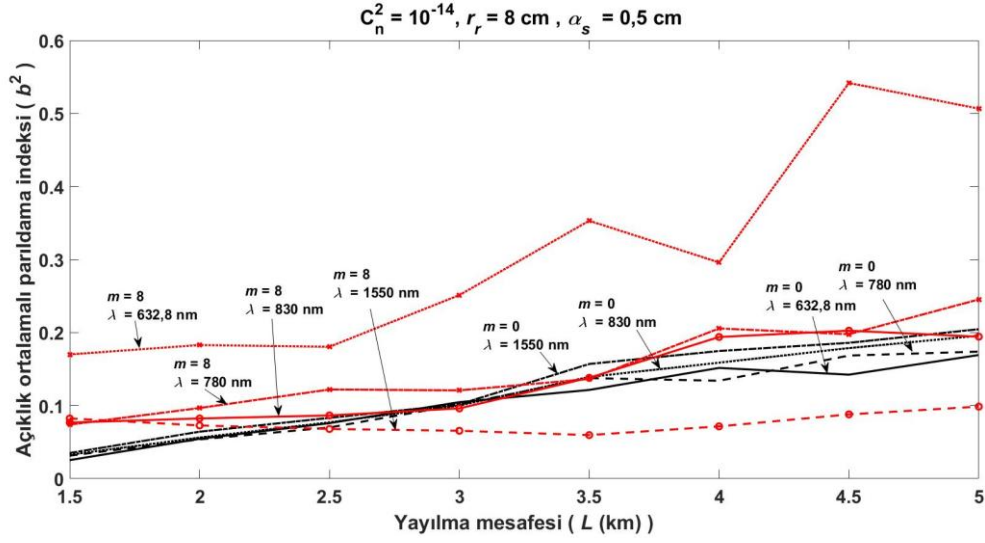
Şekil 4.9. Alıcı açıklığı yarıçapının kullanılan ışınların parıldama indeksine etkisi

4.2.4.Çalışma Dalga Boyu Parametresinin Etkisinin İncelenmesi

8 cm alıcı açıklık yarıçapına sahip, 5 cm kaynak boyutunda, 5 km maksimum yayılma mesafesine sahip Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının parıldama özellikleri farklı dalga boyuna göre nasıl değiştiği Şekil 4.10'da verilen grafik üzerinden incelenmiştir. Şekilde yer alan kırmızı çizgiler vortexli Gauss ışınları, siyah çizgiler ise Gauss ışınlarının parıldama seviyesini göstermektedir. Yayılma mesafesi boyunca, Gauss ışınının parıldama seviyesinde bir artış tespit edilmiştir fakat çalışma dalga boyunun Gauss ışınının parıldama seviyesini önemli ölçüde etkilemediğini gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar, bildirilen teorik tahminlerle uyumludur [8].

Yayılma eksenı boyunca en büyük dalga boyuna sahip vortexli Gauss ışını, en düşük parıldama indeksine sahip olmaktadır. Bu durumdan ötürü tez kapsamında, çalışma dalga boyu 1550 nm olan vortexli Gauss ışınları üzerinde çalışılmıştır.

Şekil 4.10'a göre iki ışın tipini kıyasladığımızda, yine yayılma mesafesi 2,5 km'ye kadar Gauss ışının iyi alıcı sistem performansı sergilediği, 2,5 km'den sonra yani daha uzak mesafelerde uygun parametreler dahilinde vortexli Gauss ışının kullanıldığı sistemler daha iyi performans gösterebileceği sonucuna varmaktayız.



Şekil 4.10. Dalga boyunun, kullanılmasıışınlarınparıldama indeksine etkisi

Sonuç olarak, uzak mesafeler için, türbülanslı bir atmosferde yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının parıldama seviyelerine ışın parametrelerinin etkileri elde edilen grafiklere göre incelendiğinde, yayılma mesafesi 2,5 km'ye kadar Gauss ışının daha iyi performans gösterdiği, 2,5 km'den sonraki mesafelerde uygun parametreler dahilinde vortexli Gauss ışının kullanıldığı sistemler daha iyi alıcı performansına sahip olduğunu gözlemlemekteyiz.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Atmosferik türbülansa yayılan Gauss ve vortexli Gauss ışınlarının yoğunluk profillerine ve parıldama özelliklerine sistem parametrelerinin etkileri analiz edilmiştir. Bu analizi gerçekleştirmek için gerçek hayattaki atmosferik türbülansı modellemek amacıyla kullanılan bir yöntem olan rastgele faz ekran modeli kullanılmıştır. Zayıf türbülanslı bir atmosferde yayılan, büyük kaynak boyutuna sahip ve daha düşük çalışma dalga boylarında hem Gauss hem de vortexli Gauss ışını orijinal profilini korumaktadır. Alıcı açıklığı yarıçap uzunluğunun değişimiyle, her iki ışın türünün yoğunluğu üzerinde gözle görülür bir etki tespit edilememiştir fakat alıcı açıklığının artmasıyla her iki ışın türünün parıldama seviyesindeki azalma, bu parametrenin büyük değerde olması ışınların orijinal profilini korumasına yardımcı olduğu sonucuna ulaştırmaktadır.

Değişen ışın parametrelerinin her iki ışın türünün parıldama seviyesine etkisini uzak mesafeler için analiz ettiğimizde, yayılma mesafesi 2,5 km'ye kadar Gauss ışının daha iyi performans gösterdiği, 2,5 km'den sonraki mesafelerde uygun parametreler seçildiğinde vortexli Gauss ışının kullanıldığı sistemler daha iyi alıcı performansına sahip olduğunu gözlemlenmektedir.

Yapılan bu çalışma, türbülanslı atmosferde yayılan temel Gauss ve vortexli Gauss ışınlarını karşılaştırarak, alıcı düzlem yoğunluğuna ve parıldama özelliklerine etki eden parametrelerini ayrıntılı olarak inceleyip değerlendiren ilk çalışma olmasından dolayı büyük önem taşımaktadır. Araştırmacılar bu tez kapsamında hangi koşullarda ve parametrelerde Gauss ışını veya vortexli Gauss ışının iyi performans sergilediği durumlarına ulaşmaktadır. Tez çalışmamız dahilinde elde ettiğimiz sonuçlar, 5G ve 6G iletişim bağlantıları, savunma sanayi alanında kullanılan lazer uydu iletişimi ve uzaktan algılama gibi çeşitli uygulamalarda serbest alan optik iletişim sistem performansını iyileştirilmesine katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

1. Kaushal, H., Jain, V. K., and Kar, S. (2017). Overview of wireless optical communication systems. *In Free space optical communication, Springer, New Delhi*, 1-39.
2. Andrews , L.C., Phillips, R.L. (2005).Laser Beam Propagation through Random Medium, 2nd edn. *SPIE Optical Engineering Press*, Bellingham.
3. Chowdhury, M. Z., Hossan, M. T., Islam, A., and Jang, Y. M. (2018). A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications. *IEEE Access*, 6, 9819-9840.
4. Chatterjee, M. R., Mohamed, A., & Almeahmadi, F. S. (2018). Secure free-space communication, turbulence mitigation, and other applications using acousto-optic chaos. *Applied optics*, 57(10), C1-C13.
5. Mansour, A., Mesleh, R., and Abaza, M. (2017). New challenges in wireless and free space optical communications. *Optics and lasers in engineering*, 89, 95-108.
6. Ijaz, A., Zhang, L., Grau , M., Mohamed, A., Vural, S., Quddus, A. U., Imran, M. A., Foh, C. H., and Tafazolli, R. (2016). Enabling massive IoT in 5G and beyond systems: phy radio frame design considerations. *IEEE Access*, 4, 3322-3339.
7. Ghassemlooy, Z., Arnon, S., Uysal, M., Xu, Z., and Cheng, J. (2015). Emerging optical wireless communications-advances and challenges. *IEEE journal on selected areas in communications*, 33(9), 1738-1749.
8. Eyyuboğlu, H. T. (2016). Scintillation behaviour of vortex beams in strong turbulence region. *Journal of Modern Optics*, 63(21), 2374-2381.
9. Alda, J. (2003). Laser and Gaussian beam propagation and transformation. *Encyclopediaof optical engineering*, 999.
10. Bagini, V., Frezza, F., Santarsiero, M., Schettini, G., and Spagnolo, G. S. (1996). Generalized bessel-gauss beams. *Journal of modern optics*, 43(6), 1155-1166.
11. Teen, Y. A., Nathiyaa, T., Rajesh, K. B., & Karthick, S. (2018). Bessel Gaussian beam propagation through turbulence in free space optical communication. *Optical Memory and Neural Networks*, 27(2), 81-88.
12. Gori, F., Guattari, G., ve Padovani, C. (1987). Bessel-gauss beams. *Optics communications*, 64(6), 491-495.

13. Eyyuboğlu, H. T. (2007). Propagation of higher order Bessel–Gaussian beams in turbulence. *Applied Physics B*, 88(2), 259-265.
14. Eyyuboğlu, H. T. (2008). Propagation and coherence properties of higher order partially coherent dark hollow beams in turbulence. *Optics & Laser Technology*, 40(1), 156-166.
15. Zeng, J., Lin, R., Liu, X., Zhao, C., and Cai, Y. (2019). Review on partially coherent vortex beams. *Frontiers of Optoelectronics*, 12(3), 229-248.
16. Gbur, G., and Tyson, R. K. (2008). Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation. *JOSA A*, 25(1), 225-230.
17. Padgett, M. J. (2017). Orbital angular momentum 25 years on. *Optics express*, 25(10), 11265-11274.
18. Willner, A. E., Huang, H., Yan, Y., Ren, Y., Ahmed, N., Xie, G., ... and Ashrafi, S. (2015). Optical communications using orbital angular momentum beams. *Advances in optics and photonics*, 7(1), 66-106.
19. Verbeeck, J., Tian, H., ve Schattschneider, P. (2010). Production and application of electron vortex beams. *Nature*, 467(7313), 301-304.
20. Cheng, W., Zhang, W., Jing, H., Gao, S., and Zhang, H. (2018). Orbital angular momentum for wireless communications. *IEEE Wireless Communications*, 26(1), 100-107.
21. Li, Y. Q., Wang, L. G., and Wu, Z. S. (2018). Study on intensities, phases and orbital angular momentum of vortex beams in atmospheric turbulence using numerical simulation method. *Optik*, 158, 1349-1360.
22. Stahl, C. S. D., and Gbur, G. (2017). Partially coherent vortex beams of arbitrary order. *JOSA A*, 34(10), 1793-1799.
23. Lee, A. J., and Omatsu, T. (2017). Direct Generation of Vortex Laser Beams and Their Non-Linear Wavelength Conversion. *Vortex Dynamics and Optical Vortices*, 57.
24. Dalgac, S., and Elmabruk, K. (2021). The Propagation of Vortex Beams in Random Mediums. Chapter, [http://dx.doi.org/ 10.5772/intechopen.101061](http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.101061).
25. Wang, L. G., and Zheng, W. W. (2009). The effect of atmospheric turbulence on the propagation properties of optical vortices formed by using coherent laser beam arrays. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 11(6), 065703.

26. Mei, Q. X., Yue Z. W., and Zhong R. R. (2015). Intensity distribution properties of Gaussian vortex beam propagation in atmospheric turbulence. *Chinese Physics B*, 24(4), 044201.
27. Wu, H., Xiao, R., Li, X., Sun, Z., Wang, H., Xu, X., and Wang, Q. (2015). Annular vortex beams with apertures and their characteristics in the turbulent atmosphere. *Optik*, 126(23), 3673-3677.
28. Ou, J., Jiang, Y., and He, Y. (2015). Intensity and polarization properties of elliptically polarized vortex beams in turbulent atmosphere. *Optics and Laser Technology*, 67, 1-7.
29. Wang, X. and Song, Y. (2018), Transmission characteristics of Bessel– Gaussian vortex beams propagating along both longitudinal and transverse directions in a subway tunnel. *Opt. Eng.* 57(2), 024105-1-9.
30. Jera, E., & Mohamed, A. (2019). Gaussian Beam Propagation Through Turbulent Atmosphere using Second-Order Split-Step Algorithm. *National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, (pp. 675-677).
31. Yildiz ,F. And Kurt, H. (2020). Analysis and Simulation of Turbulence Effects on Gaussian Beam Propagation Based on Generalized Modified Atmospheric Spectrum. *Acta Materialia Turcica*, 4, 32-38
32. Alimi, I., Shahpari, A., Sousa, A., Ferreira, R., Monteiro, P., and Teixeira, A. (2017). Challenges and opportunities of optical wireless communication technologies. *Optical communication technology*, 10.
33. Naboulsi, M. C., Sizun, H., and de Fornel, F. (2004). Fog attenuation prediction for optical and infrared waves. *Optical Engineering*, 43(2), 319-329.
34. Ricklin, J. C., and Davidson, F. M. (2002). Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication. *JOSA A*, 19(9), 1794-1802.
35. Kolmogorov, A.N.(1951). The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Acad. Sci. U.S.S.R.*, 30, 301-305.
36. Eyyuboğlu, H. T. (2013). Scintillation analysis of hypergeometric Gaussian beam via phase screen method. *Optics communications*, 309, 103-107.
37. Cui, L., & Cao, L. (2015). Theoretical expressions of long term beam spread and beam wander for Gaussian wave propagating through generalized atmospheric turbulence. *Optik*, 126(23), 4704-4707.

38. Zhangy, M., Tang, X., Lin, B., Ghassemloooy, Z., and Wei, Y. (2017). Analysis of Rytov variance in free space optical communication under the weak turbulence. **16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)**, 1-3.
39. Gu, Y., and Gbur, G. (2010). Measurement of atmospheric turbulence strength by vortex beam. **Optics Communications**, 283(7), 1209-1212.
40. Andrews, L. C., Phillips, R. L., Hopen, C. Y., and Al-Habash, M. A. (1999). Theory of optical scintillation. **JOSA A**, 16(6), 1417-1429.
41. Lopes, D. A., and Fernandes, A. R. (2014). Atmospheric scattering-state of the art. **Encontro Português de Computação Gráfica**.
42. Andrews, L. C., Al-Habash, M. A., Hopen, C. Y., and Phillips, R. L. (2001). Theory of optical scintillation: Gaussian-beam wave model. **Waves in Random Media**, 11(3), 271.
43. Eyyuboğlu, H. T., Voelz, D., and Xiao, X. (2013). Scintillation analysis of truncated Bessel beams via numerical turbulence propagation simulation. **Applied optics**, 52(33), 8032-8039.
44. Elmabruk, K., and Eyyuboglu, H. T. (2019). Analysis of flat-topped Gaussian vortex beam scintillation properties in atmospheric turbulence. **Optical Engineering**, 58(6), 066115.
45. Bayraktar, M. (2015). Comparison of probability of error performance for truncated Bessel and Bessel Gauss Beams. M.Sc., Department of Electronic and Communication Engineering, Ankara, 71.
46. Johansson, E. M., and Gavel, D. T. (1994). Simulation of stellar speckle imaging. In Amplitude and Intensity Spatial Interferometry II. **International Society for Optics and Photonics**, 2200, 372-383.
47. Eyyuboğlu, H.T., "Notes on the use of Angular Spectrum Model and Random Phase Screen", [Online]. Available: http://ece646.cankaya.edu.tr/upload/files/ECE%20646_Notes%20on%20Angular%20Spectrum%20and%20RPS_HTE_Bahar%202014.pdf, Last access: 04.02.2018.
48. Schmidt, J.D. (2010). Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB. **SPIE Press: Washington, DC**, Chapters 7, 8 and 9.
49. Liu, D., Chen, L., Wang, Y., and Yin, H. (2016). Intensity properties of four-petal Gaussian vortex beams propagating through atmospheric turbulence. **Optik**, 127(8), 3905-3911.

50. Rao, R. (2008). Statistics of the fractal structure and phase singularity of a plane light wave propagation in atmospheric turbulence. ***Appl. Opt.***, 47, 269–276.
51. Bayraktar, M. (2021). Scintillation and Bit Error Rate Analysis of Lommel Beam. ***Wireless Personal Communications***, 1-13.
52. Eyyuboğlu, H.T. (2015). Aperture averaged scintillation of fully and partially coherent Gaussian, annular Gaussian, flat topped and dark hollow beams. ***Opt. Commun.***, 339,141-147.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı adı :SEÇİLMİŞ, Gamze Nur
Uyruğu :T.C.
Doğum tarihi ve yeri :
Medeni hali :
Telefon :
e-mail :

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	SBTÜ/Savunma Teknolojileri	Devam ediyor
Lisans	Erciyes Üniversitesi/EEM	2015
Lise	Kırıkkale Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

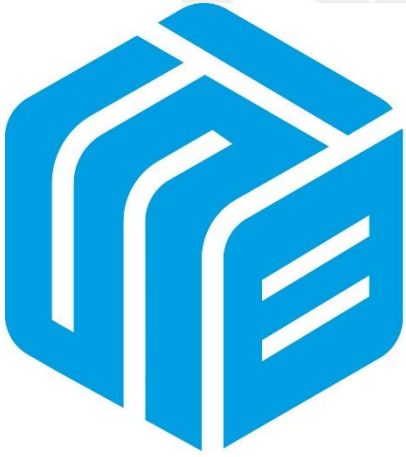
Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Seçilmiş Mühendislik Ltd. Şti.	Elektrik Elektronik Mühendisi (Şirket Sahibi)

Yabancı il

İngilizce

Yayınlar

- Seçilmiş, G. N., Elmabruk, K. (2021). Propagation of Gaussian Beam in Atmospheric Turbulence.**ICENTE21**, 556-561.



**SİVAS
BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

KÖKLERDEN GÖKLERE...