

**TÜRBÜLANSLI ATMOSFERDE ÇOKLU GAUSS OPTİK
HÜZMELERİN ALICI AÇIKLIK ETKİLERİ VE LİNK
BAZARIM OPTİMİZASYONU**

**THE EFFECT OF RECEIVER APERTURE AVERAGING ON
MULTI GAUSSIAN BEAMS IN TURBULENT ATMOSPHERE
AND THE LINK PERFORMANCE OPTIMIZATION**

CANAN KAMACIOĞLU

Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZ

olarak hazırlanmıştır.

2013

CANAN KAMACIO LU'nun hazırladığı “**Türbülanslı Atmosferde Çoklu Gauss Optik Hüzmeleri için Alıcı Açıklık Etkileri ve Link Ba arım Optimizasyonu**” adlı bu çalışmaya a a ıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof. Dr. Yahya Kemal BAYKAL

Danışman

Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Üye

Prof. Dr. Adnan KÖKSAL

Üye

Prof. Dr. Çi dem Seçkin GÜREL

Üye

Doç. Dr. U ur BAYSAL

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma Sevin DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ET K

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmamda;

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

beyan ederim.

26/08/2013

Canan KAMACIO LU

ÖZET

TÜRBÜLANSLI ATMOSFERDE ÇOKLU GAUSS OPTİK HÜZMELERİNİN AÇIKLIK ETKİLERİ VE LINK BAĞIRIM OPTİMİZASYONU

CANAN KAMACIOĞLU

Doktora, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. ERDEM YAZGAN

Ağustos 2013, 113 sayfa

Bu çalışmada, zayıf türbülanslı atmosferde yayılan çoklu Gauss ışık hüzmelerinin Gauss formunda açıklığa sahip alıcı düzleminde oluşturdıkları ortalama optik güç ve pırıldama indisi Huygens-Fresnel integrali kullanılarak analitik olarak yatay linkler için hesaplanmıştır. Özel olarak, Gauss, düz tepeli ve halkasal ışık hüzmelerinin türbülanslı atmosferde yayılımlarında alıcı düzleminde oluşturdıkları ortalama optik güç ile pırıldama indisi, alıcı açıklık yarıçapı, yayılım mesafesi ve Gauss kaynak boyutu gibi parametrelere karşı incelenmiştir, alıcı açıklık yarıçapının ortalama optik gücü artırmada ve pırıldama indisini düşürmedeki etkileri gözlemlenmiştir. Türbülanslı atmosferde yayılan düz tepeli ve halkasal ışık hüzmelerinin açıklık ortalama faktörü hesaplanmıştır, açıklık ortalama faktörü, alıcı açıklık yarıçapı, yayılım mesafesi ve Gauss kaynak boyutuna karşı çizdirilmiştir, pırıldama indisini düşürecek derinlikler belirlenmiştir. Ortalama optik güç ve pırıldama indisi fonksiyonları amaç fonksiyonları olarak belirlenerek Pareto-optimum elde edilmiştir, ortalama optik güç ile pırıldama indisi arasındaki ilişki incelenmiştir. Ortalama optik gücün pırıldama indisine oranını en fazla yapacak şekilde belirlenen optimizasyon kriteri ile optimum Gauss, düz tepeli ve halkasal ışık hüzmeleri belirlenerek link performans optimizasyonu yapılmıştır. Normalize optik güçteki düşüşün alıcı açıklık yarıçapının artırılmasıyla azaldığı görülmüştür. Açıklık yarıçapının artmasıyla ortalama optik güç artmakta, düz tepeli ışık hüzmeleri için düzeltme parametresinin artırılmasıyla en fazla optik güç elde edilmekte ve halkasal ışık hüzmelerinde küçük yayılım mesafelerinde en fazla optik güç elde edilmektedir. Açıklık ortalama faktörünün etkisi, yapı sabitinin ve yayılım mesafesinin artmasıyla artmaktadır. Ayrıca, düz tepeli ışık hüzmelerinin yayılımında açıklık ortalamasının etkisi tüm açıklık yarıçapı derinliklerinde artan düzeltme parametresi için artarken, halkasal ışık hüzmelerinin yayılımında büyük kaynak boyutu derinliklerinde, büyük açıklık yarıçaplarında büyük ikincil hüzmeye kaynak

boyutu de erlerinde artmaktadır. Belirlenen optimizasyon kriterine göre dü ük kaynak boyutunda dü ük yapı parametre de erleri için optimum çoklu Gauss ı ık hüzmeleri elde edilmi tir. Ortalama optik gücün sintilasyona oranı sabit bir yapı sabitinde odaklanmı Gauss ı ık hüzmeleri için artmaktadır. Bu oran sabit bir alıcı açıklık yarıçapında geni halkaya sahip halkasal ı ık hüzmelerinde artmaktadır. Düz tepeli ı ık hüzmelerinde, sabit bir dalga boyu ve alıcı açıklık yarıçapı için düzle tirme parametresinin artırılmasıyla oran artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atmosferik yayılım, atmosferik türbülans, optik güç, pırıldama indisi, optimum çoklu Gauss hüzmeleri modeli, link performans optimizasyonu.

ABSTRACT

THE EFFECT OF RECEIVER APERTURE AVERAGING ON THE MULTI GAUSSIAN BEAMS IN TURBULENT ATMOSPHERE AND THE LINK PERFORMANCE OPTIMIZATION

CANAN KAMACIO LU

**Doctor of Philosophy, Department of Electrical and Electronics
Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. ERDEM YAZGAN

August 2013, 113 pages

In this study, the optical power and the power scintillation of multi Gaussian beams propagating in turbulent atmosphere is analytically calculated by using the Huygens-Fresnel integral when a realistic receiver possessing a finite sized aperture is employed in a horizontal atmospheric optics link. The optical power and the power scintillation of Gaussian, flat-topped and annular beams, as special cases of the multi Gaussian beam, is analyzed versus the receiver aperture radius, the propagation length and the Gaussian source size. The effect of the receiver aperture radius on the decrease of the power scintillation is examined. The receiver aperture averaging factor of flat-topped, annular beams are calculated and the receiver aperture averaging factors are plotted against the receiver aperture radius, the propagation length and the Gaussian source size. The link performance optimization is studied. Also the parameters that reduce the power scintillation index are found. The relation between the optical power and the power scintillation is analyzed by plotting the Pareto-optimum curve by defining the average optical power and the power scintillation as the object functions. An optimization criterion is defined as the maximization of the ratio of the average optical power to the power scintillation index from which the optimum Gaussian, flat-topped and annular beams are evaluated. The normalized optical power of the multi Gaussian beams decreases as the propagation length increases. The decrease in the normalized optical power reduces as the receiver aperture radius increases. The optical power increases as the receiver aperture radius increases and the increasing flatness parameter promotes the effect of the receiver aperture averaging on obtaining larger optical power for the flat-topped beams. However, for the annular beams, the maximum optical power is obtained at smaller propagation lengths. The effect of the receiver aperture averaging increases

as the structure constant increases. Also, in the propagation of flat-topped beams the effect of the receiver aperture averaging increases as the flatness parameter increases for all receiver aperture radii. For the annular beams, the effect of the receiver aperture averaging increases for larger Gaussian source sizes, larger receiver aperture radii and larger secondary beam source sizes. At a fixed large propagation length, the flat-topped beams which have larger Gaussian source sizes have small power scintillation index. For the annular beams, smaller power scintillation is obtained for larger ring sizes. The ratio of the average optical power to power scintillation increases at a fixed structure constant for the focused Gaussian beams. The ratio increases for the annular beams which have larger ring sizes at a fixed receiver aperture radius. The ratio increases as the flatness parameter increases at fixed wavelength and receiver aperture radius for the flat-topped beams.

Keywords: Atmospheric propagation, atmospheric turbulence, optical power, power scintillation index, optimum multi Gaussian beams, link performance optimization.

TE EKKÜR

Tez çalı mam boyunca bilgi ve yardımını esirgemeyen de erli hocam Prof. Dr. Erdem YAZGAN'a, yine sabrı ve bilgisiyle hep yanımda olup yol gösteren, yeti memde eme i bulunan de erli hocam Prof. Dr. Yahya Kemal BAYKAL'a, önerileriyle destek olan Tez zleme Komitesi üyesi sayın Doç Dr. U ur BAYSAL'a, tez savunma sınavı üyeleri sayın Prof. Dr. Adnan KÖKSAL ve sayın Prof. Dr. Çi dem Seçkin GÜREL'e, fikirleriyle yol gösteren sayın Yrd. Doç Dr. Serap Altay ARPAL ve sayın Yrd. Doç Dr. Ça lar ARPAL 'ye, ho görü, sabır, sevgi ve yaptı ım i e olan saygılarıyla ba ta annem olmak üzere aileme te ekkürü borç bilirim.

Canan KAMACIO LU

Ankara, 2013

Ç NDEK LER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TE EKKÜR.....	v
Ç NDEK LER.....	vi
S MGELER VE KISALTMALAR.....	ix
EK LLER N L STES	x
1. G R	1
2. ATMOSFER N OPT K HABERLE ME S STEMLER NE ETK LER	10
2.1 Emilim ve Saçılım.....	10
2.2 Genel Türbülans Yapısı.....	11
2.2.1 Kolmogorov Enerji Spektrumu	12
2.2.2 Kırınım ndisi De i imleri.....	14
2.2.3 Hız De i imleri.....	14
2.2.4 Sıcaklık De i imleri.....	15
2.3 Atmosferik Yayılım.....	15
2.3.1 Geni letilmi Huygens-Fresnel ntegrali.....	15
2.3.2 kinci ve Dördüncü Derece Alan Momentleri.....	17
2.4 Pırıldama ndisi.....	17
2.5 Alıcı Açıklık Ortalaması.....	19
3. ÇOKLU GAUSS I IK HÜZMELER N N TÜRBÜLANSLI ATMOSFERDE YAYILIMINDA ALICI AÇIKLIK ETK LER	20

3.1 Türbülanslı Atmosferde Yayılan Çoklu Gauss I ık Hüzmelerinin Ortalama Optik Gücünün Hesaplanması.....	20
3.1.1 Düz Tepeli I ık Hüzmelerinin Ortalama Optik Gücünün Hesaplanması.....	23
3.1.2 Halkasal I ık Hüzmelerinin Ortalama Optik Gücünün Hesaplanması.....	27
3.2 Türbülanslı Atmosferde Yayılan Çoklu Gauss I ık Hüzmelerinin Alıcı Açıklık Ortalaması ve Pırıldama ndisinin Hesaplanması.....	33
3.2.1 Odaklanmı Gauss I ık Hüzmelerinin Pırıldama ndisi	39
3.2.2 Düz Tepeli I ık Hüzmelerinin Pırıldama ndisi ve Alıcı Açıklık Ortalama Faktörü.....	44
3.2.3 Halkasal I ık Hüzmelerinin Pırıldama ndisi ve Alıcı Açıklık Ortalama Faktörü.....	54
4. OPT MUM HÜZME MODEL N N BEL RLENMES	64
4.1 Çoklu Amaçlı Optimizasyon.....	65
4.2 Pareto-optimum Kavramı.....	65
4.3 Optimum Çoklu Gauss I ık Hüzmeleri.....	67
4.3.1 Optimum Gauss I ık Hüzmeleri.....	67
4.3.2 Optimum Düz Tepeli I ık Hüzmeleri.....	75
4.3.3 Optimum Halkasal I ık Hüzmeleri.....	78
5. SONUÇ VE ÖNER LER.....	82
KAYNAKLAR.....	85
SÖZLÜK.....	94
ÖZGEÇM	95

S İMGELER VE KISALTMALAR

Kisaltmalar

FSOC Free Space Optical Communication

SNR Signal-to-Noise Ratio

MCF Mutual Coherence Function

MOO Multi-objective Optimization

EK LLER

Sayfa

ekil 2.1. Türbülanslı atmosferde yayılan optik hüzmeye türbülansın etkisi.....	11
ekil 2.2. Kolmogorov'un kademeli türbülans teorisi.....	13
ekil 2.3. Kolmogorov'un enerji spektrumu.....	14
ekil 2.4. Yayılım geometrisi.....	15
ekil 2.5. (a) Yakınsak hüzme (b) Odaklanmı hüzme (c) Iraksak hüzme.....	15
ekil 3.1. Düz tepeli ı k hüzmelerinin kaynak düzleminde ı k iddeti da ılımları...16	
ekil 3.2. $N=1$ düzle tirme parametresi için farklı açıklık yarıçap de erlerinde yayılım mesafesine kar ı normalize ortalama güç.....	25
ekil 3.3. $N=8$ düzle tirme parametresi için farklı açıklık yarıçap de erlerinde yayılım mesafesine kar ı normalize ortalama güç.....	26
ekil 3.4. $N=1, 8, 12$ ve 20 düzle tirme parametreleri için $L=3$ km'de açıklık yarıçapına kar ı ortalama güç.....	26
ekil 3.5 Farklı açıklık yarıçaplarında $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 2 \text{ cm}$, $r_{s2} = 1 \text{ cm}$ de erleri için halkasal ı k hüzmesinin yayılım mesafesine kar ı normalize optik gücü.....	29
ekil 3.6. Farklı açıklık yarıçaplarında $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 2 \text{ cm}$, $r_{s2} = 1 \text{ cm}$ de erleri için odaklanmı halkasal ı k hüzmesinin yayılım mesafesine kar ı normalize optik gücü.....	29
ekil 3.7. Farklı yayılım mesafelerinde $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 3 \text{ cm}$, $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ de erleri için halkasal ı k hüzmesinin alıcı açıklık yarıçapına kar ı normalize optik gücü.....	31

ekil 3.8. Farklı yayılım mesafelerinde $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 3 \text{ cm}$, $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ de erleri için odaklanmı halkasal ı k hüzmesinin alıcı açıklık yarıçapına kar ı normalize optik gücü.....31

ekil 3.9 Farklı iç hüzme kaynak boyutlarında $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 3 \text{ cm}$, $R = 6 \text{ cm}$ de erleri için halkasal ı k hüzmesinin yayılım mesafesine kar ı normalize optik gücü.....32

ekil. 3.10. Odaklanmı ve kolime Gauss ı k hüzmelerinin sintilasyon indeksinin dalga boyuna kar ı $R=0$ ve $R=7 \text{ cm}$ açıklıklarında de i imi.....41

ekil. 3.11. Odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin farklı yapı sabitlerinde $L= 3.5 \text{ km}$, $\lambda = 1.55 \text{ ~m}$ ve $r_s = 2 \text{ cm}$ 'de sintilasyon indeksinin açıklık yarıçapına kar ı de i imi.....42

ekil. 3.12. Odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin farklı yapı sabitlerinde $R= 9 \text{ cm}$, $\lambda = 1.55 \text{ ~m}$ ve $r_s = 2 \text{ cm}$ 'de sintilasyon indeksinin yayılım mesafesine kar ı de i imi.....42

ekil. 3.13. Odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin farklı yapı sabitlerinde noktasal açıklık için $\lambda = 1.55 \text{ ~m}$ ve $r_s = 2 \text{ cm}$ 'de sintilasyon indeksinin yayılım mesafesine kar ı de i imi.....43

ekil. 3.14. Odaklanmı ve kolime Gauss ı k hüzmelerinin açıklık yarıçaplarında, $C_n^2 = 3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $\lambda = 1.55 \text{ ~m}$ ve $r_s = 2 \text{ cm}$ 'de sintilasyon indeksinin yayılım mesafesine kar ı de i imi.....43

ekil. 3.15. $L=3.5 \text{ km}$, $\lambda = 1.55 \text{ ~m}$ ve $r_s = 2$ ve $C_n^2 = 2.3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ için farklı odaklanma parametrelerine sahip odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin sintilasyon indeksinin açıklık yarıçapına kar ı de i imi.....44

ekil 3.16. Alıcı açıklık yarıçapına kar ı farklı yapı sabiti de erlerinde $L=3 \text{ km}$, $N=1$, $\lambda = 1.55 \text{ ~m}$ ve $r_s = 5 \text{ cm}$ de erleri için açıklık ortalama faktörü.....49

ekil 3.17. Alıcı açıklık yarıçapına karşı farklı yapı sabiti değerlerinde $L=3$ km, $N=4$, $\lambda = 1.55$ ~m ve $r_s = 5$ cm değerleri için açıklık ortalama faktörü.....	49
ekil 3.18. Kaynak boyutuna karşı farklı N ve R değerleri için $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $L=3$ km, ve $\lambda = 1.55$ ~m değerlerinde açıklık ortalama faktörü.	50
ekil 3.19. Yayılım mesafesine karşı farklı N ve r_s değerlerinde $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ $R=9$ cm, $\lambda = 1.55$ ~m değerleri için kırılma indisi. ekil 3.19. Farklı N değerleri için	
ekil 3.20. $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $\lambda = 1.55$ ~m, $L=3$ km ve $r_s = 9$ cm için alıcı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.....	51
ekil 3.21. Kolime ve odaklanımı düz tepeli ışık hüzmeleri için farklı açıklık yarıçaplarında $N=2$, $\lambda = 1.55$ ~m ve $r_s = 6$ cm için yayılım mesafesine karşı kırılma indisi.	52
ekil 3.22. Farklı yapı sabiti değerleri için $L= 4$ km, $\lambda = 1.55$ ~m, $r_s = 3$ cm ve $N=6$ için alıcı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.	53
ekil 3.23. Farklı açıklık yarıçaplarında $\lambda = 1.55$ ~m, $r_s = 5$ cm, $N=4$ ve $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ için yayılım mesafesine karşı kırılma indisi.....	53
ekil 3.24. Halkasal ışık hüzmesinin farklı yapı sabitlerinde $r_{s1} = 5$ cm, $r_{s2} = 2.5$ cm, ve $L=3$ km'de açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.	58
ekil 3.25. Farklı açıklık yarıçaplarında $C_n^2 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 5$ cm ve $r_{s2} = 1.5$ cm olan halkasal ışık hüzmesinin yayılım mesafesine karşı kırılma indisi.	59
ekil 3.26. Farklı ikincil hüzme kaynak boyutuna sahip halkasal ışık hüzmelerinin $C_n^2 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 5$ cm ve $R=6$ cm için yayılım mesafesine karşı kırılma indisi.....	59

ekil 3.27. Farklı ikincil hüzmeye kaynak boyutu ve açıklık yarıçapına sahip halkasal ışık hüzmelerinin $C_n^2 = 2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $L=4 \text{ km}$ 'de dalgı hüzmeye kaynak boyutuna karşı açıklık ortalama faktörü.....	60
ekil 3.28. Halkasal ışık hüzmelerinin farklı ikincil hüzmeye kaynak boyutlarında $C_n^2 = 2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 5 \text{ cm}$ ve $L=3 \text{ km}$ 'de dalgı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.....	61
ekil 3.29. Odaklanmı halkasal ışık hüzmelerinin farklı ikincil hüzmeye kaynak boyutlarında $r_{s1} = 3 \text{ cm}$, $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $L=3 \text{ km}$ 'de dalgı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.	62
ekil 3.30. Kolime ve odaklanmı halkasal ışık hüzmelerinin farklı yayılım mesafelerinde $C_n^2 = 2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 2 \text{ cm}$, ve $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ için dalgı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.	62
ekil 3.31. Halkasal ışık hüzmelerinin farklı yapı sabitlerinde $R=9 \text{ cm}$, $r_{s1} = 3 \text{ cm}$, ve $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ için dalgı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.....	64
ekil 4.1. ki amaç fonksiyonlu çoklu optimizasyon problemi için dört farklı durum için Pareto-optimum çözüm kümeleri.....	67
ekil 4.2. $C_n^2 = 3 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ ve $\lambda = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$ de dalgı lerinde normalize kaynak boyutuna karşı talama optik gücün normalize edilmi pırıldama indisine oranı.....	70
ekil 4.3. Ortalama optik güç ve pırıldama indisi olarak belirlenen amaç fonksiyonlarının $L=3 \text{ km}$, $R=10 \text{ cm}$, $C_n^2 = 3 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ ve $\lambda = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$ için Pareto-optimum e risi.....	70
ekil 4.4 Farklı yapı sabitlerinde $L=4.5 \text{ km}$, $r_s = 1 \text{ cm}$ ve $\lambda = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$ için dalgı açıklık yarıçapına karşı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.	72
ekil 4.5. Farklı dalgı açıklık yarıçapı de dalgı lerinde $L=3 \text{ km}$, $C_n^2 = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ ve $r_s = 1 \text{ cm}$ için dalgı dalga boyuna karşı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.....	74

ekil 4.6. Farklı uyumluluk uzunlu u derecelerine kar ı $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $\lambda = 1.55 \text{ ~m}$, $L = 3 \text{ km}$ ve $r_s = 1 \text{ cm}$ için ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.....	74
ekil 4.7. Alıcı açıklık yarıçapına kar ı $L = 4.5 \text{ km}$, $\lambda = 1.55 \text{ ~m}$ ve $r_s = 1 \text{ cm}$ için farklı yapı sabitlerinde ortalama alınan optik gücün pırıldama indisine oranı.....	74
ekil 4.8. Dalga boyuna kar ı farklı alıcı açıklık yarıçaplarında $L = 3.5 \text{ km}$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, $r_s = 2 \text{ cm}$ için odaklanmı ve kolime Gauss ı ık hüzmelerinin ortalama alınan optik gücün pırıldama indisine oranı.....	75
ekil 4.9. Dalga boyuna kar ı farklı düzle tirme parametrelerinde $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, $R = 2 \text{ cm}$, $L = 4 \text{ km}$ ve $r_s = 1 \text{ cm}$ için ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.....	76
ekil 4.10. Alıcı açıklık yarıçapına kar ı farklı yayılım mesafesi ve yapı sabitlerinde, $r_s = 2 \text{ cm}$ ve $N = 10$ için ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.....	77
ekil 4.11. Alıcı açıklık yarıçapına kar ı farklı düzle tirme parametreleri ve yapı sabitlerinde, $r_s = 2 \text{ cm}$ ve $L = 4 \text{ km}$ için ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.....	77
ekil 4.12. Farklı yapı sabitlerinde $L = 3 \text{ km}$, $R = 4 \text{ cm}$ ve $r_{s2} = 0.2r_{s1}$ için birincil hüزمة kaynak boyutuna kar ı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.....	79
ekil 4.13. Farklı yayılım mesafesi ve alıcı açıklık yarıçaplarında, $C_n^2 = 1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $r_{s2} = 0.2r_{s1}$ için birincil hüزمة kaynak boyutuna kar ı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.....	80
ekil 4.14. Farklı ikincil hüزمة kaynak boyutlarında $C_n^2 = 1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 2 \text{ cm}$ ve $L = 3 \text{ km}$ 'de alıcı açıklık yarıçapına kar ı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.....	80
ekil 4.15. Farklı alıcı açıklık yarıçaplarında $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, $L = 3 \text{ km}$, $r_{s1} = 1 \text{ cm}$ ve $r_{s2} = 0.1r_{s1}$ için dalga boyuna kar ı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.....	81

1. G R

Kablosuz alıcı ve verici arasında direk görü olacak şekilde, protokolden bağımsız geniş bant veri iletimi sağlayan serbest uzay optik iletişim sistemleri (Free Space Optical Communication-FSOC), mevcut iletişim tekniklerinin veri iletim hızı, güvenlik, manyetik kirlilik gibi durumlarda yetersiz kalmalarından dolayı hızla büyüyen ve her geçen gün hayatımızdaki önemi artan bir teknoloji unsuru olmuştur. Bu yüzden serbest uzay optik iletişim sistemleri mevcut iletişim sistemlerine ciddi bir alternatif olmaktadır. Günlük hayatta, savunma sanayinde, sağlık ve iletişim sektörlerindeki avantajları sayesinde önemli bir araştırma ve çalışma konusu olmuştur. Wilson ve Hawkes [1] ile Manor ve Arnon'un da çalışmalarında [2] belirtildiği gibi optik tabanlı iletişim ekli olan serbest uzay optik haberleşme teknolojisi, ses ve bilgi iletişimi için kullanılacak optik bileşenlerin varlığından dolayı maliyeti artırmasına rağmen, RF ve yüksek taşıyıcı frekanslı mikrodalga sistemlere göre, yüksek modüle bant genişliğine ve yüksek bilgi iletimine imkân sağlaması, bilgi güvenilirliğini artırması, girişim ve etkileşimden uzak olması, radyo frekansını kullanmadığı için ilgili cihazların kullanımında lisansa (frekans tahsisi vb. gibi) gerek duyulmaması, manyetik alan riskinin bulunmaması ve dolayısıyla manyetik kirlilik kaynağının olmaması, montaj ve kullanım kolaylığının olması, küçük kaynak boyutlu ışık hüzmeleri ile düşük güç gerektirmesi gibi avantajlara sahiptir. Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde lazer ışığı kullanılarak, 850-900, 1550 nm dalga boylarında yüksek bant genişliğinde veri iletimi sağlanmaktadır. Serbest uzay optik iletişim sistemleriyle, kablosuz olarak fiber kablolu ile ulaşılan yüksek veri hızlarına ulaşılabilmektedir. Günümüzde iletişim teknolojisindeki yüksek veri hızı talebi daha çok fiber optik iletişim sistemleriyle karşılanmaktadır. Ancak şehirleşme ve sanayileşme nedeniyle dolayı fiber hattı çekebilmek gitgide zorlaşmakta ayrıca maliyeti de artmaktadır. Zhu ve Kahn [3] son on yıl içerisinde fiberin serbest uzay optik haberleşme sistemlerine göre dezavantajlarından dolayı kablosuz optik haberleşme sistemlerinin kullanımının hızla arttığını belirtmişlerdir. Özellikle altyapısı tamamlanmış kalabalık metropollerde ve önemli coğrafi bölgelerde, örneğin dağ, vadisi gibi geçilmesi zor olan alanlarda, fiber optik haberleşme sistemleri yerine serbest uzay optik haberleşme sistemlerinin

kullanımı daha uygun olabilmektedir. Serbest uzay optik haberleşme sistemleri yatay linklerde kullanıldığı gibi, dikey linklerde de uyduların birbiriyle ve yer istasyonlarıyla olan iletişimlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bahsedilen avantajlarından dolayı serbest uzay optik haberleşme sistemleri, özellikle 2000'li yıllardan itibaren yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [4,15].

Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde iletim kanalı atmosferdir. Bu yüzden iletim kontrolsüz bir ortamda yapılabilmekte, haberleşme anlık değişebilen hava şartlarından da etkilenmektedir. Bu durum fiber optik haberleşme sistemleri ile karşılaştırıldığında serbest uzay optik haberleşme sistemleri için bir dezavantajdır ve optik haberleşme sistemlerinin performansını olumsuz yönde etkilemektedir [16].

Hem atmosferin kendi yapısı hem de iklim, iletişim kalitesi üzerinde bozucu bir etkiye sahiptir. Yağmur, sis, pus gibi atmosferik olaylardan dolayı yatay iletişim en fazla 5-6 km'ye kadar gerçekleştirilebilmektedir. Atmosferde yayılan lazer ışık hüzmelerini etkileyen ve optik haberleşme sistemlerinin performansını düşüren önemli faktörlerden birisi türbülansdır. Bu sebepten dolayı türbülans, uzun yıllardır önemli bir araştırma konusu olmuştur. Gün boyunca, yer yüzeyinin sıcaklığı atmosferin sıcaklığından daha fazla olmakta, atmosferde de yeryüzüne yakın kısımlarda hava sıcaklığının daha fazla olmasına neden olmaktadır. Bu sıcaklık değişimleri, rüzgar hızı ve sıcaklık değişimleri ile birleşince hava kütlelerinin kararsız olmasına, farklı boyutlara sahip hava parçacıklarına bölünmelerine neden olmaktadır. Sıcaklık, basınç ve nem farklılıklarındaki bu değişimler atmosferin kırınım indeksini etkilemekte, zaman ve uzaydaki bu rastlantısal süreç türbülansı oluşturmaktadır. Türbülans ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Kolmogorov, atmosferde bulunan türbülans parçacıklarının teorik olarak anlamlı bir istatistiksel tutarlılık derecesine sahip olduğunu iddia etmiştir. Ayrıca, boyutsal analiz yaparak istatistiksel olarak türbülans akışının tanımını yapmıştır. Optik türbülans parçacıklarının birbirleri ile istatistiksel olarak tutarlı olduğunu ve anlamlı bir teorik uyumluluk içinde olduklarını göstermiştir [17, 18]. Prucnal, fotoelektrik elektronların hesaplanmasıyla optik haberleşme sistemlerinin performansını değerlendiren yeni bir teknik geliştirmiştir [19]. Bu teknik, atmosferik türbülans altında bulunan optik haberleşme linkleri için kesin ve kapalı

çözümleri bulunan durumlar için kullanılır. Rayment, 1968, 1969 ve 1970 yıllarında Cardington'da 900 m yükseklikten yüksek frekanslı türbülansın ölçümlerini yapmıştır. Topladığı bilgilerin istatistiksel dağılımının log-normale çok yakın olduğunu göstermiştir [20]. Optik türbülansa neden olan küçük sıcaklık değişimleri, hüzmelerin yayılımında güç kayıplarına ve pırlıdamaya (sintilasyon) denilen lazer hüzmelerinin zamansal ve uzamsal dalgalanmalarında artışa neden olmaktadır. Atmosferik faktörler serbest uzay optik haberleşme linklerinin çalışmasını sınırlar ve taşıdığı dalgada bozulmalara yol açar. Andrews ve Philips'in çalışmalarında belirttiği gibi yatay linklerde türbülans, özellikle optik alıcıya ulaşan ışık sinyalinin ortalama ışık şiddeti profillerini etkiler, ayrıca alıcıda hüzmeye sapmasına, hüzmeye dağılmasına ve pırlıdamaya olarak bilinen ışık şiddeti sapmalarının oluşmasına neden olur [16]. Atmosferik optik linklerinde iletişim en çok pırlıdamaya sebebiyle bozulmaktadır. Pırlıdamaya, alıcıya ulaşan ışık şiddetinde türbülansın dolayısıyla oluşan kısa süreli sapmalardır. Bu, alıcıda sinyal kayıplarına ve gürültüye sebep olur. Optik haberleşme sistemlerinin performansını belirleyen en önemli iki etken optik güç ve pırlıdamaya şiddetidir [21]. Optik hüzmelerinin ve karakteristiklerinin türbülanslı atmosferde yayılımında optik haberleşme sistemlerinin performanslarını farklı şekilde etkiledikleri bilinmektedir. Bu sebepten, çeşitli hüzmeler ve türbülanslı atmosferde yayılımları incelenmiştir. Genelleştirilmiş ve modifiye edilmiş Bessel-Gauss optik hüzmeleri araştırılmıştır. Bessel optik hüzmelerinin optik alanları yaklaşıklık yöntemi ile analiz edilmiştir. Yüksek nümerik açıklık sistemlerine odaklanan spiral polarize edilmiş ışık hüzmelerinin özellikleri paraksiyal olmayan rejim için Herman vd. tarafından araştırılmıştır [22]. Borghi vd., çalışmada, "donut" yapısı için parametreler belirlemiştir, her iki durum için de karışık yapılar oluşturularak ışık şiddetleri incelenmiştir. Yeni bir ışık hüzmesi tipi olarak Airy ışık hüzmeleri sunulmuştur [23]. Bloklanan ve eksponansiyel olarak zayıflayan Airy ışık hüzmeleri tipik olarak Carvenho vd. tarafından incelenmiştir [24]. Her iki durumun da daha önce çalışılmış Airy ışık hüzmelerine göre uzun yayılım mesafeleri için parabolik yörüngeleri, tepe noktasında daha net tanımlanmaları gibi ilginç özellikleri görülmüştür. Genelleştirilmiş ışık hüzmelerinin türbülanslı atmosferde yayılımı incelenmiş ve ışık hüzmelerinin yayılım

karakteristiklerinin incelendi i simülatör çalı ması Arpalı vd. tarafından yapılmı tır [25]. Matlab kodu ile hazırlanan simülatör aracılı ı ile türbülanslı atmosferde yayılan genel ı ık hüzmelerinin yayılımı incelenebilmektedir. Simülatör, verilen kaynak ve ortam de erleri için ortalama ı ık iddetini video formatında göstermektedir. Program kullanılarak, genel ı ık hüzmeleri yerine spesifik olarak halkasal, cos-Gauss, cosh-Gauss, sin-Gauss, sinh-Gauss ı ık hüzmeleri ile bunların yüksek dereceli Hermit modları incelenebilmekte, ayrıca kullanıcı tanımlı yeni ı ık hüzmeleri olu turularak türbülanslı atmosferde yayılımları video formatında izlenebilmektedir. Ayrıca Kamacıo lu ve Baykal, genelle tirilmi optik hüzmeye formülasyonunu geli tirmi lerdir [26]. Bu formülasyon ile Bessel, Laguerre Gaussian, dark hollow, bottle, super-Gauss, Lorentz, super-Lorentz, düz tepeli, Hermit-sinüzoidal-Gauss, sinüzoidal-Gauss, halkasal, Gauss-Legendre, vortex ve bunların yüksek dereceli modları ile kütle tirilmi (truncated), elegant ve eliptik durumları için kaynak düzleminde olu turdukları ortalama ı ık iddeti incelenebilmektedir.

Optik güç ve pırıldama indisi ile ilgili yapılan çok sayıda çalı ma literatürde mevcuttur. I ık hüzmelerinin ı ık iddeti üzerindeki etkileri ara tırılmı , farklı ı ık hüzmelerinin türbülanslı atmosferden geçtikten sonra alıcı düzleminde olu turdu u ı ık iddeti hesaplanmı tır. Eyyubo lu vd., düz tepeli ı ık hüzmelerinin türbülanslı atmosferde yayılımını incelemi lerdir [27]. Hermit-cosine-Gauss ı ık hüzmelerinin verici düzleminde ve türbülanslı atmosferden geçtikten sonra alıcı düzleminde olu turdu u ortalama ı ık iddeti Eyyubo lu tarafından hesaplanmı tır [28]. Kısmi tutarlı ı ık hüzmelerinin verici düzleminde eksen merkezinde olu turdu u ortalama ı ık iddeti Dan vd. tarafından hesaplanmı tır [29]. Elegant hermit Gauss ı ık hüzmelerinin türbülanslı atmosferde yayılımında alıcı düzleminde olu turdu u ı ık iddeti ve efektif hüzmeye geni li i Yuan vd tarafından analitik olarak hesaplanmı tır [30]. Pırıldama indisi üzerine ilk çalı malar 1960'lı yıllarda Tatarskii tarafından yapılmı tır [31]. Tatarskii, türbülanslı ortamda yayılan düzlem dalgalar için genlik ve faz sapmalarını inceleyerek pertürbasyon teorisinin güçlü genlik sapmaları için geçerli olmadığını göstermi tir. Fakat bu çalı maların sonuçları sadece zayıf türbülans bölgeleri ile kısıtlıdır. Gracheva ve Gurvich, optik dalgalar üzerinde pırıldamanın bozucu etkisini

deneysel olarak ilk kez göstermiştir [32]. Yura, Tatarskii'nin fiziksel optik modelini dalga boyunun uzamsal uyumluluk kayıplarını içerecek şekilde güçlü türbülans rejimleri için genelleştirilmiştir [33]. Banakh ve Mironov, Huygens-Kirchhoff prensibini sürekli homojen olmayan ortamlar için genelleştirilerek türbülanslı ortamda yayılan lazer ışık hızlarını kısa süreli frekans spektrumu çalışmalarında kullanmışlardır [34]. Churnside, zayıf ve güçlü türbülans bölgelerinde açıklık ortalama katsayısını yaklaşık olarak bulmuştur [35].

Optik türbülans etkilerini hafifletmek için çeşitli teknikler mevcuttur. Örneğin alıcı açıklığın boyutunu artırmak, türbülans indüklenen sinyal sönümlenmelerini azaltmada etkili ve basit bir yol sunar. Bu teknik, alıcı açıklık boyutuna bağlı olarak lazer hüzmesinin korelasyon yarıçapını azaltır. Optik alıcının alıcı açıklık boyutu türbülansın sebep olduğu optik salınımların uzamsal derecesinden daha büyükse; alıcı, indirgenmiş sinyal salınımlarına yol açacak şekilde açıklık alanı üzerinde alınan dalga formunun ortalama salınımını bulacaktır. Optik haberleşme sistemindeki alıcı açıklığı, ışık şiddeti salınımlarının korelasyon uzunluğundan küçükse, açıklık nokta detektör gibi davranır. Alıcı açıklığı, ışık şiddeti salınımlarının korelasyon uzunluğundan fazla olacak şekilde artırılırsa, alınan ışık şiddeti alıcı açıklığı üzerinde uzamsal ortalama olur ve detektör tarafından ölçülen sinyal seviyesi düşer. Bu etki, sinyal seviyesini düşürmek ve sinyal-gürültü oranını (SNR) artırmak için kullanılmaktadır. Açıklık ortalamasıyla sinyal seviyesinin düşürülmesi, nokta açıklıktan elde edilen sonlu büyüklükte toplayıcı açıklığın güç salınımlarının oranından çıkarılabilir. Fried, türbülans ortamında rastlantısal olarak bozunmuş olan dalga cephesinin geometrik şeklini istatistiksel olarak açıklayarak faz ve yapı fonksiyonu arasındaki ilişkiyi tanımlamış ve bu ilişkiyi salınım yapan sinyalin varyansını azaltmak için alıcı düzleminde geniş bir açıklık kullanılmasının etkisinin hesaplanmasında kullanmıştır [36]. Kon, türbülanslı ortamda yayılan küresel dalga boyunun lens üzerindeki genlik ve faz sapmalarını incelemiştir [37]. Lutomurski ve Yura, Rytov yaklaşımını kullanarak türbülanslı ortamda bir sinyal için alıcı açıklık ortalama faktörünü hesaplamışlardır [38]. Andrews, daha önce nümerik ya da yaklaşık yöntemlerle hesaplanan optik kırılmanın açıklık ortalamasını geniş açıklıklar için

asimptotik olarak hesaplamıştır [39]. Zayıf türbülansla hesapladığı açıklık ortalama katsayısını düzlemsel ve küresel dalgalar için geli tirerek bulmu tur. Bass, zayıf türbülans altında sınırsız düzlemsel ve küresel dalgaların açıklık ortalama katsayısını analitik olarak hesaplamıştır [40]. Andrews vd., orta seviyeden güçlü seviyeye uzanan türbülans aralı ında, sonsuz düzlem ve küresel dalga modelleri için açıklık ortalamasının etkilerini formüle etmişlerdir [41]. Geli tirdikleri modellerin daha önce yayınlanan deneysel sonuçlarla uyumlu oldu u görülmü tür. Wang vd., türbülanslı atmosferde yayılan ı k hüzmelerinin ı k iddeti salınımlarını, Gauss profilinde açıklık a sahip alıcı düzleminde analitik olarak hesaplamıştır ve alıcı açıklık ının ı k iddeti salınıma olan etkilerini incelemi lerdir [42].

ı k hüzmeleri, serbest uzay optik haberleşme sistemlerinin temelini oluşturdundan günümüzde aktif araştırma konularından biridir ve de ı k türde ı k hüzmelerinin yatay optik iletişim sistemleri için atmosferdeki yayılımı literatürde mevcuttur. De ı k türde ı k hüzmeleri kullanmanın optik sistemin performansı üzerinde etkisi oldu u bilinmektedir. Chu vd., düz tepeli ı k hüzmelerinin dairesel açıklık a sahip verici düzlemindeki ı k iddetini nümerik olarak hesaplamışlardır [43]. Xueju vd., düz tepeli ı k hüzmelerinin eliptik açıklık a sahip verici düzleminde oluşturdıkları ı k iddetini nümerik olarak hesaplamışlardır [44]. Açıklık ın ekseninin daireselden eliptik e de ı tirilmesiyle, ı k iddetinde simetrik olmayan bir dağılım elde etmişlerdir. Barrios ve Dios, Gauss ı k hüzmelerinin yayılımını, olasılık yoğunluk fonksiyonunu Weibull dağılımı kullanarak, açıklık a sahip alıcı düzleminde incelemi lerdir [45]. Düz tepeli ı k hüzmelerinin pırıldama indisinin dü üürülmesi için literatürde çe itli çalışmalar mevcuttur. Noktasal açıklık a sahip alıcı düzleminde halkasal ve düz tepeli ı k hüzmelerinin yayılımı incelenmiştir. Baykal ve Eyyubolu, türbülanslı atmosferde yayılan düz tepeli ı k hüzmelerinin pırıldama indisini noktasal açıklık a sahip alıcı düzlemi üzerinde hesaplamışlardır [46]. Daha sonra düz tepeli ı k hüzmelerinin pırıldama indisi; ı k iddeti, tepkime süresi kaynak uyumluluk süresinden daha uzun olan bir detektör tarafından toplandı ında hesaplanmıştır [47]. Ayrıca Baykal vd., kısmi koherent düz tepeli ve halkasal ı k hüzmelerinin pırıldama indisini hesaplamıştır ve düz tepeli ı k hüzmelerinin pırıldama indisinin azalan kaynak uyumluluk

uzunlu uyla azaldı ını, küçük kaynak boyutuna sahip halkasal ı ık hüzmelerinin pırıldama indisinin kaynak uyumluluk uzunlu unun azalmasıyla azaldı ını göstermi lerdir [48]. Altay Arpali vd., genelle tirilmi ı ık hüzmeleri formülünü kullanarak yüksek dereceli halkasal ı ık hüzmelerinin pırıldama indisini hesaplamı lardır [49]. Yüksek dereceli ı ık hüzmelerinin pırıldama indislerinin sıfır dereceli ı ık hüzmelerinin pırıldama indisinden daha dü ük oldu unu göstermi lerdir. Gerçekcio lu vd., halkasal ı ık hüzmelerinin pırıldama indisini zayıf ve orta dereceli türbülansa da indirgenebilecek ekilde güçlü türbülans için hesaplamı lardır [50]. Halkasal ı ık hüzmelerinin pırıldama indisinin zayıf türbülans altında dü ük, güçlü türbülans altında yüksek oldu unu göstermi lerdir. Öztan vd., kısmi koherent düz tepeli ve halkasal ı ık hüzmelerinin pırıldama indisini çok güçlü türbülans altında hesaplamı lardır [51]. Gauss ı ık hüzmeleri ile kar ıla tırıldı ında, düz tepeli ve halkasal ı ık hüzmelerinin çok güçlü türbülans altında pırıldama indislerinin daha dü ük oldu unu göstermi lerdir. Gerçekcio lu ve Baykal, zayıf türbülans altında yayılmakta olan halkasal ı ık hüzmelerinin pırıldama indisini Kolmogorov olmayan türbülans modeli altında hesaplamı lar ve küçük kaynak boyutuna sahip halkasal ı ık hüzmelerinin yüksek dereceli Kolmogorov olmayan spektrumda yayılımında dü ük pırıldama indisi elde etmi lerdir [52]. Kamacıo lu vd, bu tezde detayları verilen, düz tepeli ı ık hüzmelerinin türbülanslı atmosferde yayılımında alıcı açıklık faktörünü analitik olarak hesaplamı lar ve alıcı açıklık ortalamasının pırıldama indisini dü ürmedeki etkisi üzerine çalı mı lardır [53]. Pırıldama indisini dü ürecek optimum ı ık hüzmeleri ara tırılmı tır. Schulz, ı ık ıddetini en fazla, pırıldama indisini minimum yapacak ekilde belirledi i optimizasyon kriteri ile optimum ı ık hüzmelerinin kısmi koherent oldu unu göstermi tir [54]. Chen vd., kısmi uyumlu (koherent) lazer ı ık hüzmelerinin en fazla ı ık ıddetini belirleyen uyumluluk uzunlu unu sunmu lardır [55].

Çe itli ı ık hüzmelerinin türbülanslı atmosferde yayılımında alıcı açıklık ortalamasının ortalama optik gücü artırmada ve pırıldama indisini dü ürmedeki etkisi ve optimum çoklu Gauss ı ık hüzmelerinin elde edili i ve çoklu Gauss ı ık hüzmelerinin zayıf türbülanslı atmosferde yayılımında link performans optimizasyonu bu tez

çalı masından önce incelenmemi tir. Bu çalı mada, türbölanslı atmosferde yayılan çoklu Gauss ı ık hüzmelerinin Gauss formunda açıklı a sahip alıcı düzleminde olu turdu u ortalama optik gücü hesaplanmı , çoklu Gauss ı ık hüzmelerinin özel durumları olan düz tepeli ve halkasal ı ık hüzmelerinin ortalama optik güçleri geni letilmi Huyges-Fresnel integrali kullanılarak analitik olarak yatay optik haberle me linkleri için hesaplanmı tır. Düz tepeli ve halkasal ı ık hüzmelerinin ortalama optik güçlerine alıcı açıklık ortalamasının etkileri incelenmi , yayılım mesafesi, kaynak boyutu, dalga boyu gibi parametrelerin etkileri detaylıca ara tırlmı tır. Ayrıca, çoklu Gauss ı ık hüzmelerinin zayıf türbölanslı atmosferde yayılımında açıklı a sahip alıcı düzleminde olu turdu u pırıldama indisini analitik olarak hesaplanmı tır. Bulunan pırıldama indisinin noktasal açıklı a sahip alıcı düzlemindeki pırıldama indisine oranı bulunarak alıcı açıklık ortalama faktörü elde edilmi tir. Çoklu Gauss ı ık hüzmelerinin özel durumları olan Gauss, düz tepeli ve halkasal ı ık hüzmelerinin alıcı düzlemindeki pırıldama indisleri ve alıcı açıklık ortalama faktörleri hesaplanmı ; alıcı açıklık yarıçapı, yayılım mesafesi, kaynak boyutu, düzle tirme parametresi, dalga boyu gibi parametrelerin pırıldama indisini dü ürmeye ve alıcı açıklık ortalamasının etkisini artırmadaki etkileri ara tırlmı tır. Ayrıca, ortalama optik güç ile pırıldama indisini arasındaki ili kiyi incelemek için Pareto-optimum e risi Matlab programlama dilinin çoklu optimizasyon aracı ile çizdirilmi ve link performans optimizasyonu yapılmı tır. Ortalama optik gücün pırıldamaya oranını en fazla yapacak ekilde belirlenen optimizasyon kriteri ile optimum çoklu Gauss ı ık hüzmeleri elde edilmi , özel olarak Gauss, düz tepeli ve halkasal ı ık hüzmeleri için optimum hüzmeye modelini belirleyen alıcı açıklık yarıçapı, yayılım mesafesi, Gauss kaynak boyutu gibi parametreler belirlenmi tir. Çalı manın hedefi türbölanslı atmosferde yayılımda alıcı açıklı ı kullanarak pırıldama indisini dü ürecek, ayrıca ortalama optik gücün pırıldama indisine oranını en fazla olacak ekilde belirlenen optimizasyon kriterini kullanarak optimum çoklu Gauss ı ık hüzmelerini elde etmektir.

Bu çalı mada yapılanlar:

Tez metninin birinci bölümünde, tezin temelini olu turan ana ba lıklar olan hüzmeye tipleri, optik ı ık iddeti, pırıldama indisini, alıcı açıklık ortalaması ve optimum ı ık

hüzmelerine ilişkin literatür özeti verilmiştir ; ikinci bölümde, atmosferin optik haberleşme sistemlerine etkileri, serbest uzay optik haberleşme sistemleri üzerine türbülansın etkisi, Kolmogorov enerji spektrumu, Huygens-Fresnel integrali ve ikinci ve dördüncü derece alan momentleri ile pırıldama indisi ve açıklık ortalaması hesabı detaylıca incelenmiştir ; üçüncü bölümde, zayıf türbülanslı atmosferde yayılan çoklu Gauss ışık hüzmelerinin ortalama optik gücü ve pırıldama indisi Huygens-Fresnel integrali kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır , özel olarak düz tepeli ve halkasal ışık hüzmelerinin ortalama optik gücü ile Gauss, düz tepeli ve halkasal ışık hüzmelerinin pırıldama indisi ve alıcı açıklık ortalaması faktörleri incelenmiştir , pırıldama indisini düşürecek şekilde kenar defileleri belirlenmiştir ; dördüncü bölümde, Gauss ışık hüzmelerinin ortalama optik güç ve pırıldama indisi fonksiyonları amaç fonksiyonları olarak belirlenerek, Pareto-optimum erişimi çizdirilmiştir , ortalama optik güç ile pırıldama indisi arasındaki ilişki incelenmiştir , ortalama optik gücün pırıldama indisine oranını en fazla yapacak şekilde belirlenen optimizasyon kriteri ile optimum çoklu Gauss hüzmeleri modeli elde edilmiştir , optimum Gauss, düz tepeli ve halkasal ışık hüzmeleri belirlenerek link performans optimizasyonu yapılmıştır. Son bölümde, yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirilerek ilerideki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. ATMOSFERİN OPTİK HABERLEME SİSTEMLERİNE ETKİLERİ

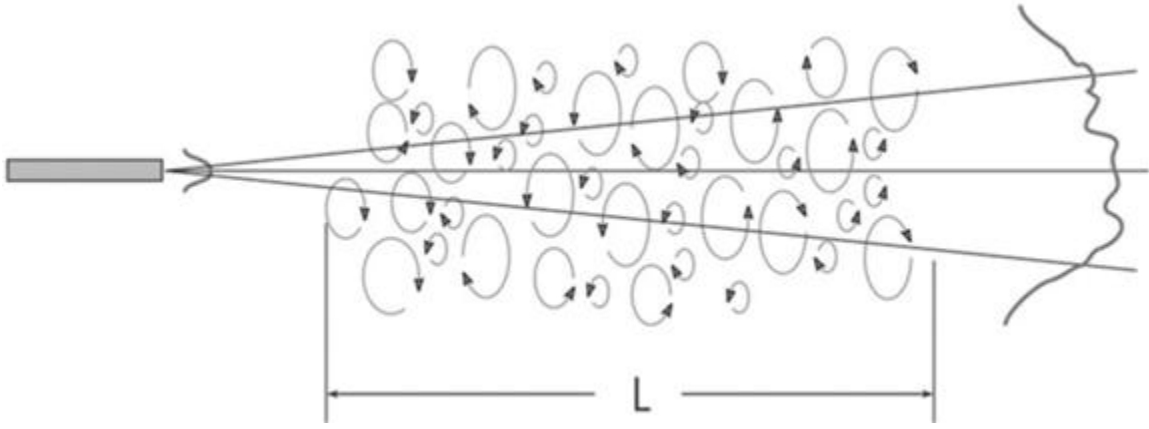
Optik haberleşme sistemlerinde dalga yayılımında iletim ortamı atmosferdir. Bu yüzden atmosferin yapısı optik haberleşme sistemlerinde önemli bir rol oynamakta, optik haberleşme sistemlerinin performansını etkilemektedir. Optik dalga yayılımını etkileyen en önemli etkenler emilim, saçılım ve kırınım indisidir. Atmosfer, dünyayı saran çeşitli gazlardan oluşur ve yer yüzeyinden itibaren birkaç yüz kilometre uzağına kadar uzanır. Atmosferin temel bileşenleri su buharı, karbondioksit, karbon monoksit ve ozondur. Daha çok ısı emicilerine bağlı olarak atmosfer dört ana bölüme ayrılır: Troposfer, Stratosfer, Mezosfer ve Termosfer. Yağmur, kar, sis, kirlilik, sulu kar gibi durumlar uzaktaki nesnelere dair görüşümüzü etkileyen atmosferik unsurlardır. Bu unsurlar optik dalgalar başta olmak üzere elektromanyetik dalgaların da atmosferde yayılımını etkilemektedir. Optik dalgaların havadaki gaz molekülleri ve parçacıklarla etkileşiminden dolayı emilim ve saçılım gerçekleşmekte ve bu durum ışık hızının ışık şiddetinin zayıflamasına, hızının alıcı düzleminde kaymasına sebep olmaktadır. Atmosferin yapısından kaynaklanan kırınım indisidir de ışıkları de ışık şiddeti salınımlarına sebep olur. Işık hızının ışık şiddeti salınımları sonucunda hızın genleri ve zayıflar.

2.1 Emilim ve Saçılım

Atmosfer, emici bir yapıya sahiptir. Foton, yayılımında atmosferin foton enerjisini kinetik enerjiye çeviren gaz molekülleri tarafından emildiğinde emilim gerçekleşir. Sonuç olarak emilim; atmosferde ısıya sebep olur. Atmosferik emilim, önemli ölçüde dalga boyuna bağlıdır. Örneğin O_2 ve O_3 'ün emilimi, 0.2 μ m'nin altındaki dalga boyları için ışın yayılımını bertaraf eder, ama görünür dalga boyları (0.4 μ m - 0.7 μ m) için çok küçük bir emilim vardır.

Atmosferik kanal homojen olmayan yapısından ve rastgele özellik göstermesinden dolayı yalnızca istatistiksel olarak modellenir. Atmosferik etkiler, lazer ışık hızının çıkış gücünün düşük olduğu durumda lineer kabul edilir. Emilim, saçılım ve optik türbülans lineer özelliklere sahiptir. Fakat lazer çıkış gücü yüksek olduğu durumda lineer olmayan etkiler ile karakterize edilen yeni atmosferik etkileri ortaya çıkarır. Isıl

pırlıdama (thermal blooming) lineer olmayan etkilere örnektir. Sistem performansının zayıflamasına neden olan atmosferik türbülans, rüzgardan ve ısıdan kaynaklanan sıcaklık ve basınç de i imlerinden ve havanın kırılma indisindeki de i imlerden dolayı olu maktadır. Anlık olarak küçük görünebilecek bu de i imler, toplam yayılım mesafesi boyunca dü ünüldü ünde oldukça etkili olmakta, alıcıda ı k iddeti de i imlerine ve gürültüye sebep olmaktadır. ekil 2.1'de türbülanslı atmosferde yayılan optik hüzmeye L yayılım mesafesi sonrasında ı k iddeti, eksen üzerindeki pozisyonu ve hüzmeye büyüklü ünün türbülans etkileri gösterilmi tir.



ekil 2.1.Türbülanslı atmosferde yayılan optik hüzmeye türbülansın etkisi.

Zayıf türbülans altında yayılan lazer ı k hüzmelerinin ı k iddeti salınımlarından etkilendi i gösterilmi tir [56-61]. Rayleigh saçılımı hava moleküllerinin dalga boyu ile kıyaslandı nda çok küçük olması sonucu olu ur. Burada, saçılım katsayısı $\propto \lambda^{-4}$ ile orantılıdır. Mie saçılımı ise atmosferdeki parçacıkların yayılımın dalga boyu ile kıyaslanacak kadar oldu u durumlarda gerçekte ir.

2.2 Genel Türbülans Yapısı

Türbülans, bir sıvının ya da gazın hareket halindeki düzensizli didir. Klasik türbülans, kıvamlı bir sıvı gibi dü ünülebilecek atmosferin rastgele hız salınımları ile ili kilidir. Atmosferin iki tür hareketi vardır: Katmanlı ve türbülanslı. Türbülanslı olmayan akı a katmanlı akı denir [61]. Akı ko ullarının katmanlı veya türbülanslı akı a sebep olup olmadı ını Reynolds sayıları (boyutsuz) tanımlar. Karı tırma, katmanlı yapıda söz

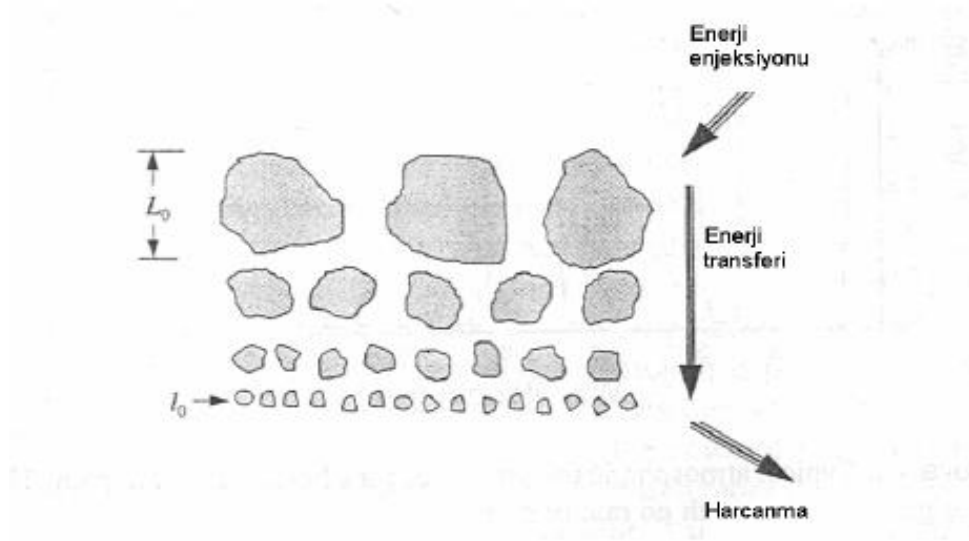
konusu de ildir ancak türbülanslı hareket dinamik karı tırma ile anılır. Türbülanslı harekette dinamik karı m nedeniyle hızın karakteristikleri tekdüze özelli ini kaybeder ve türbülans girdapları denilen rastgele alt hareketler olu ur. Türbülans, her ölçek düzeyinde ortaya çıkan düzensizliklerdir ve istenmeyen bir etkidir. Andrews vd.'nin de belirtti i gibi türbülans hareketi ile ilgili ilk çalı malarda Reynolds, *Reynolds Sayısı* olarak adlandırılan boyutsuz $Re = V\ell/\epsilon$ büyüklü ünü teorisinde kullandı [61]. Burada, V ve ℓ hız karakteristikleri; V , m/s cinsinden hız de eri, ℓ , m cinsinden hareket boyutu, ν ise m^2/s birimli kinematik hareket katsayısıdır. Katmanlı hareketten türbülanslı harekete geçi kritik Reynolds sayısında gerçekleşle ir. Bu sayının üzerindeki hareket türbülanslı olarak dü ünülür. Yere yakınken karakteristik boyut $l \sim 2$ m, karakteristik rüzgar hızı 1-5 m/s ve $\nu \sim 0.15 \times 10^{-4} m^2/s$ dir. Bu durumda *Reynold sayısı* $Re \sim 10^5$ gibi büyük bir de erdedir ve oldukça yüksek türbülanslı durum mevcuttur.

2.2.1 Kolmogorov Enerji Spektrumu

Kolmogorov tarafından 1940'lı yıllarda yapılan ilk çalı malarda, atmosferde bulunan türbülans parçacıklarının teorik olarak anlamlı bir istatistiksel tutarlılık derecesine sahip oldu u iddia edilmi tir. Kolmogorov, boyutsal analiz yaparak istatistiksel olarak türbülans hareketini tanımlamı tır. Türbülans temel olarak lineer olmayan bir süreçtir. Bu denklemleri matematiksel olarak çözmedeki zorluklar nedeniyle Kolmogorov daha çok boyutsal analiz ve ilave basitle tirme ile yakla ımlar içeren istatistiksel türbülans teorisini geli tirmi tir.

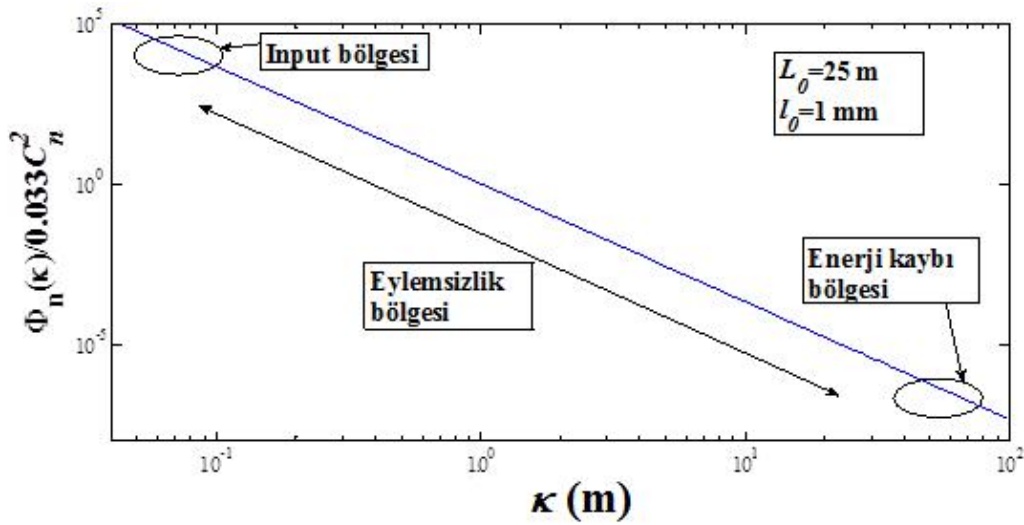
ekil 2.2'de Kolmogorov'un kademeli türbülans teorisini verilmis tir. Kaskad da denilen kademeli türbülans teorisinde rüzgar hızı, kritik Reynold sayısı a ılıncaya kadar artmaktadır. Bu hareket sabit olmayan lokal hava parçacıkları olu turur. Eylemsizlik kuvvetlerinin etkisi altında daha büyük hava kütleleri rastgele parçalanarak daha küçük hale gelirler ve böylece makroölçekli L_0 yapıdan mikroölçekli ℓ_0 yapıya enerji transferinde süreklilik sa lanır. L_0 , enerjinin üretildi i parçacık sınırı, ℓ_0 ise enerjinin ısıya dönü mesinden önceki en küçük parçacık sınırıdır. Üstten L_0 , alttan ℓ_0 ile sınırlanan parçaların alanına, eylemsizlik aralı ı adı verilir. Son bölgede düzensiz

parçacıklar kaybolur ve akı kanın kalan en küçük parçacığında, enerji ısı olarak da ıtılır. Bu en küçük parçacığına Kolmogorov parçacık boyutu denir.



ekil 2.2. Kolmogorov'un kademeli türbülans teorisi

ekil 2.3'de yapı sabitine göre normalize edilmiş Kolmogorov'un enerji spektrumu, $\Phi_n = 2f / \ell$ spatial frekansa karşı en küçük ve en büyük parçacık aralıklarında (eylemsizlik aralığında) çizdirilmiştir. Burada ℓ parçacık boyutudur.



ekil 2.3. Kolmogorov'un enerji spektrumu

ekil 2.3'de en küçük parçacık sınırı $\ell_0 = 1$ mm, en büyük parçacık sınırı ise $L_0 = 25$ m alınmış olup düşük dalga sayısı değerlerine karşı gelen spektrum input bölgesini göstermektedir. Yüksek dalga sayısı değerlerinde Kolmogorov enerji spektrumu enerji kaybı bölgesini göstermektedir. İç skala ℓ_0 değerine yaklaştıkça spektrum değeri düşmektedir.

2.2.2 Kırınım İndisi Değişimleri

Yapı parametresi C_n^2 türbülansın şiddeti ile ilişkilidir. Kırınım indisi, optik dalga yayılımı için atmosferde etkili en önemli faktörlerden biridir ve bu indis sıcaklık değişimlerinin küçük ölçeklerinde oldukça hassastır. Sıcaklık değişimleri türbülansla birleşerek kırınımın atmosferik indisinin alanı içerisinde rastlantısal bir etkiye sebep olurlar. C_n^2 'nin ve daha az olduğu durumlar zayıf türbülans, C_n^2 'nin ve daha fazla olduğu durumlar güçlü türbülans olarak adlandırılır. Dikey optik haberleşme linklerinde C_n^2 yerden yüksekliğe bağlı olarak değişir.

2.2.3 Hız Değişimleri

Rüzgar hızının hız yapı sabiti α adındaki güç yasasını sağlar:

$$D_{RR}(R) = \langle (V_1 - V_2)^2 \rangle = \begin{cases} C_V^2 R^{2/3}, & I_0 \ll R \ll L_0 \\ C_V^2 I_0^{-4/3} R^2, & R \ll I_0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Ekil 2.1'de V_1 ve V_2 , R tarafından ayrılmış iki noktadaki hız, C_V^2 ise hız yapı sabitidir ve birimi $m^{4/3}/s^2$ dir. C_V^2 ortalama enerji dağılım oranı v ile ilişkilidir ve $C_V^2 = 2v^{2/3}$ bağıntısı geçerlidir.

İç skala, I_0 : Enerji dağılım oranı v ve viskozite ν ile ilişkilendirilir ve $I_0 = (v^3 / \nu)^{1/4}$ bağıntısı geçerlidir. Güçlü türbülans, küçük iç skala ölçeklerine sahipken; zayıf türbülans, büyük iç skala ölçeklerine sahiptir.

Dış skala, L_0 : $v^{1/2}$ ile orantılıdır. Ayrıca türbülansın şiddeti ile artar ya da azalır.

2.2.4 Sıcaklık Değişimleri

Hız değişimleri için geçerli temel fikirler, potansiyel sıcaklık μ gibi pasif skalarlara da uygulanabilir. $\mu = T + r_a h'$ dir, r_a sıcaklık düzmesindeki ısısız (adiyabatik) oran ve h yer yüzeyinden yüksekliktir. Sıcaklık yapı sabiti a aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$D_T(R) = \langle (T_1 - T_2)^2 \rangle = \begin{cases} C_T^2 R^{2/3}, & l_0 \ll R \ll L_0 \\ C_T^2 l_0^{-4/3} R^2, & R \ll l_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Eq. 2.2'de T_1 ve T_2 , R tarafından ayrılmış iki noktadaki sıcaklık, C_T^2 ise sıcaklık yapı sabitidir ve birimi $\text{deg}^2 / \text{m}^{2/3}$ dür.

2.3 Atmosferik Yayılım

Optik bir dalga, atmosferde yayılımı esnasında optik haberleşme sistemlerinin performansını ve görüntüyü zayıflatıcı çeşitli istenmeyen etkilere maruz kalmaktadır. Genlik ve ışık şiddeti salınımları direk algılama sistemlerinde önem taşıırken faz salınımları homodin ve heterodin algılama sistemlerinde daha çok önem taşımaktadır. Hüzme genilemesi, yayılması veya kaybolması, görüntüde kayma, hüzmede pırıldama gibi etkiler atmosferin temel negatif ve istenmeyen etkileridir. Pırıldama haricinde diğer etkilerin hepsi ortak tutarlık fonksiyonu (Mutual coherence function-MCF) ile ilişkilidir.

2.3.1 Geniletilmiş Huygens-Fresnel İntegrali

Bir nokta kaynağın, L yayılım mesafesinden sonra alıcı düzlemindeki alanı Green's fonksiyonu çözümü kullanılarak bulunur. Nokta kaynak yerine başka bir ışık hüzmesi kullandığımızda alıcıdaki alan, Green's fonksiyonu ile ışık hüzmesinin vericideki alanının konvolüsyon çarpımı ile bulunur.

$$u(\mathbf{p}, L) = G(\mathbf{s}, \mathbf{p}; L) \otimes u(\mathbf{s}, 0), \quad (2.3)$$

burada, $u(\mathbf{p}, L)$ alıcı düzleminde olu an optik alanı, $\mathbf{s} = (s_x, s_y)$ kaynak düzlemi koordinatlarını, $\mathbf{p} = (p_x, p_y)$ alıcı düzlemi koordinatlarını göstermektedir ve \otimes konvolüsyon çarpımını ifade etmektedir. $u(\mathbf{s}, 0)$ kaynak düzlemindeki optik alandır. $G(\mathbf{s}, \mathbf{p}; L)$ Green's fonksiyonunu göstermektedir ve atmosferik türbülans altında Green's fonksiyonu a a ıdaki gibi ifade edilir.

$$G(\mathbf{s}, \mathbf{p}; L) = \frac{1}{4fL} \exp(ikL + \frac{ik}{2L} |\mathbf{s} - \mathbf{p}|^2 + \mathbb{E}(\mathbf{r}, \mathbf{s})). \quad (2.4)$$

E . 2.2'de $k = 2\pi / \lambda$ dalga sayısı, λ dalga boyu ve $j = \sqrt{-1}$ ve $j = -i$ 'dir. E . 2.1' in Huygens-Fresnel integrali ile çözümlü atmosferik türbülans altında a a ıdaki gibidir [62]:

$$u(\mathbf{p}, L) = -\frac{jk}{2fL} \exp(jkL) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2(\mathbf{s}) u(\mathbf{s}, 0) \exp\left[\frac{jk}{2L} |\mathbf{s} - \mathbf{p}|^2 + \mathbb{E}(\mathbf{p}, \mathbf{s})\right], \quad (2.5)$$

Burada $\mathbb{E}(\mathbf{r}, \mathbf{s})$, türbülanslı ortamda $(\mathbf{s}, 0)$ noktasından (\mathbf{r}, L) noktasına yayılan küresel dalğanın kompleks fazının rastlantısal kısmıdır.

2.3.2 kinci ve Dördüncü Derece Alan Momentleri

kinci derece alan momenti, di er bir de i le ortak tutarlık fonksiyonu (MCF), alanların korelasyonu ile bulunabilir.

$$\Gamma_2(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, L) = \langle u(\mathbf{p}_1, L) u^*(\mathbf{p}_2, L) \rangle, \quad (2.6)$$

E . 2.6'da $\Gamma_2(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, L)$, alan momenti olarak bilinir; $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ uzamsal düzlemde iki farklı noktayı, $\langle \rangle$, ortam istatistikleri üzerinden ortalamayı göstermektedir. Pırıldama olarak bilinen ı ık iddeti salınımları optik dalğanın dördüncü derece alan momenti hesabından bulunabilir. Dördüncü derece alan momenti a a ıdaki ekilde bulunabilir:

$$\begin{aligned}
\Gamma_4(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4, L) &= \frac{1}{(L)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_4 \\
&\times u_s(\mathbf{s}_1, L) u_s^*(\mathbf{s}_2, L) u_s(\mathbf{s}_3, L) u_s^*(\mathbf{s}_4, L) \\
&\times \exp\left\{ \frac{jk}{2L} \left[|\mathbf{p}_1 - \mathbf{s}_1|^2 - |\mathbf{p}_1 - \mathbf{s}_2|^2 + |\mathbf{p}_2 - \mathbf{s}_3|^2 - |\mathbf{p}_2 - \mathbf{s}_4|^2 \right] \right\} \\
&\times \left\langle \exp \left[\mathbb{E}(\mathbf{s}_1, \mathbf{p}_1) + \mathbb{E}^*(\mathbf{s}_2, \mathbf{p}_1) + \mathbb{E}(\mathbf{s}_3, \mathbf{p}_2) + \mathbb{E}^*(\mathbf{s}_4, \mathbf{p}_2) \right] \right\rangle_s
\end{aligned} \tag{2.7}$$

E . 2.7'nin son satırındaki ifade dördüncü derece küresel dalga tutarlık fonksiyonudur ve 3. Bölümün 2. Kısımında de inilecektir.

2.4 Pırıldama ndisi

Atmosferde farklı kırılma indislerine sahip hava paketçikleri mercecek gibi davranırlar, lazer hüzmesi atmosferi geçerken bu paketçiklerin mercece imsi özelli inden dolayı odaklama ve da itma yaratırlar. Lazer sinyalinin bozan bu etki pırıldama olarak tanımlanır. Genel olarak pırıldama, alıcısındaki ı ı in iddetindeki kısa süreli ve rastlantısal sapmalardır. ı ı in iddetindeki bu sapmaların genli ine ba lı olarak pırıldama, iletilen sinyalin rastlantısal olarak e ik seviyesinin altında tespit edilmesine ya da alıcısındaki doyum noktasına yükselmesine sebep olabilir. Her iki durumda da optik haberle me linkinin performansı zayıflamaktadır. ı ı in iddetindeki sapmalar üzerindeki teorik ve pratik çalı malar pırıldama indisi üzerinde odaklanır ve genel olarak pırıldama indisi a a ıdaki ekilde hesaplanır:

$$\tau_i^2 = \frac{\langle I^2(\mathbf{p}, L) \rangle - \langle I(\mathbf{p}, L) \rangle^2}{\langle I(\mathbf{p}, L) \rangle^2}, \tag{2.8}$$

E . 2.8'de $I(\mathbf{p}, L)$, alıcı düzlemindeki ortalama ı ık iddetini göstermektedir. Alıcı düzlemindeki ortalama ı ık iddeti a a ıdaki gibi hesaplanır:

$$\langle I(\mathbf{p}, L) \rangle = \langle u(\mathbf{p}, L) u^*(\mathbf{p}, L) \rangle. \tag{2.9}$$

E . 2.8'de $\langle I^2(\mathbf{p}, L) \rangle$ $\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 = \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_3 = \mathbf{p}_4$ alınarak hesaplanır. Tatarski, çalı masında ı k iddetindeki sapmaların zayıf oldu u bölgelerde elde edilen pırıldama indisinden elde etti i verilerle; pırıldama indisinin bir düzlemsel dalga için Rytov varyansı ile do ru orantılı oldu unu göstermi tir [63]. Düzlemsel dalga için Rytov varyansı a a ıdaki gibidir :

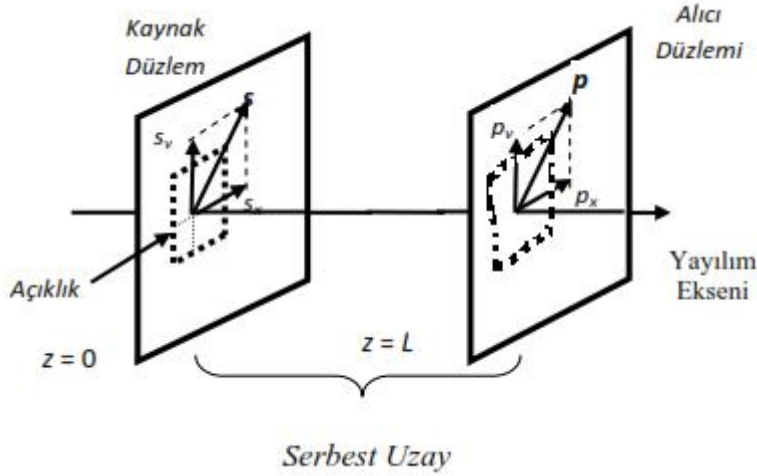
$$\dagger^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}. \quad (2.10)$$

Rytov varyansı, sonsuz bir düzlem dalganın zayıf türbülans altında bir Kolmogorov spektrumu üzerindeki pırıldama indisini gösterir. Fakat di er açıdan Rytov varyansı C_n^2 veya L ' nin ortalaması ile olu an güçlü türbülans bölgeleri için optik türbülans gücünün bir ölçüsü olarak da kullanılır. Rytov varyansı, zayıf türbülans için 1'den küçük, güçlü türbülans için 1'den büyüktür. Bu çalı mada, zayıf türbülans altında yayılım incelendi inden Rytov varyansın 1 den küçük oldu u durumlar ele alınmı tır. Rytov varyansın sonsuza gitmesi durumunda doygunluk durumu söz konusudur. Zayıf türbülans durumundan güçlü türbülansa geçi , C_n^2 , L 'deki artı ve/veya dalga boyundaki azalı ile ili kilidir.

2.5 Açıklık Ortalaması

Optik türbülans etkilerini hafifletmek için çe itli teknikler mevcuttur. Örne in alıcı açıklı ının boyutunu artırmak, türbülans indüklenmi sinyal sönümlenmelerini azaltmada etkili ve basit bir yol sunar. Bu teknik, alıcı açıklık boyutuna ba lı olarak lazer hüzmesinin korelasyon yarıçapını azaltır. Optik alıcının alıcı açıklık boyutu türbülansın sebep oldu u optik salınımların uzamsal derecesinden daha büyükse; alıcı, indirgenmi sinyal salınımlarına yol açacak ekilde açıklık alanı üzerinde alınan dalga formunun ortalama salınımını bulacaktır. Teleskop alanını artırarak pırıldamayı dü ürmeye yönelik çalı malar ilk kez Mikesell vd. tarafından yapılan astronomik ölçümlerle gerçekte tirilmi tir [64]. Daha sonra açıklık ortalamasının etkisi türbülanslı

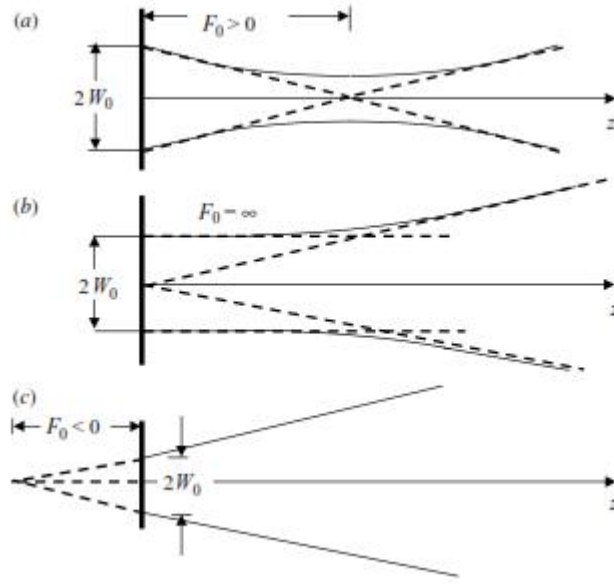
atmosferde yayılan ıık hüzmeleri için çalı ılımlı tır. Fried, log-genlik salınımları ile türbülanstan kaynaklanan ıık iddeti salınımları arasındaki ili kiyi formüle etmi , ve bu formülasyonu alıcı açıklı ının etkisini incelemek için kullanmı tır [36]. Kon, daha evvel düzlem dalga için özlm olan açıklık ortalamasını, küresel dalga modelleri için geli tirmi tir [37].



ekil 2.4. Yayımlım geometrisi.

Andrews, trblanlı atmosferde yayılan düzlem ve küresel dalgaların pırıldama indisleri için açıklık ortalama katsayısını hesaplamı tır [63]. Optik haberle me sistemindeki alıcı açıklı ı, ıık iddeti salınımlarının korelasyon uzunlu undan küçükse, açıklık nokta dedektör gibi davranır. Alıcı açıklı ı, ıık iddeti salınımlarının korelasyon uzunlu undan fazla olacak ekilde artırılırsa, alınan ıık iddeti alıcı açıklı ı üzerinde uzamsal ortalama olur ve dedektör tarafından ölçülen pırıldama indisi dmeye ba lar. Bu etki, pırıldamayı d örmek ve SNR'ı artırmak için kullanılmaktadır. Açıklık ortalamasıyla pırıldamanın d örülmesi, nokta açıklıktan elde edilen sonlu büyüklükte toplayıcı açıklı ın g salınımlarının oranından çıkarılabilir.

Kaynak ve alıcı düzlemi ekil 2.4'de gösterilmi tir. Alıcı düzlem, kaynak düzlemden L kadar mesafede konu landırılmı tır.



ekil 2.5. (a) Yakınsak hüzme (b) Odaklanmı hüzme (c) Iraksak hüzme.

Odaklanmı , yakınsak ve iraksak hüzme ekileri ekil 2.5'de gösterilmi tir. E rilik yarıçapı F_0 , $F_0 = \infty$, $F_0 > 0$ ve $F_0 < 0$ iken, sırasıyla odaklanmı , yakınsak ve iraksak hüzme ekilerini göstermektedir.

3. ÇOKLU GAUSS I K HÜZMELERİNİN TÜRBÜLANSLI ATMOSFERDE YAYILIMINDA ALICI AÇIKLIK İE ETKİLERİ

Bu bölümde, çoklu Gauss ışık hüzmelerinin türbülanslı atmosferde yayılımında alıcı açıklık ortalamasının etkileri incelenmiştir. Bunun için, çoklu Gauss ışık hüzmelerinin ortalama optik gücü ve kırılma indisi türbülanslı atmosferden geçtikten sonra, Gauss profilinde açıklık a sahip alıcı düzleminde Huygens-Fresnel integrali kullanılarak hesaplanmıştır, hesaplanan kırılma indisinin noktasal açıklık a sahip alıcı düzleminde kırılma indisine oranı bulunarak alıcı açıklık ortalama faktörü hesaplanmıştır. Alıcı düzleminde oluşan ışık şiddetini oluşturulan alan, genişletilmiş Huygens-Fresnel prensibi kullanılarak formüle edilmiş ve özel olarak, odaklanmış Gauss, düz tepeli ve halkasal ışık hüzmelerinin alıcı düzleminde oluşturdukları ortalama optik güç analitik olarak hesaplanmıştır, düz tepeli ve halkasal ışık hüzmelerinin kırılma indisi ve alıcı açıklık ortalama faktörleri hesaplanmıştır, alıcı açıklık ortalamasının ortalama optik güç ve kırılma indisleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada zaman bağımsızlığı $e^{-j\omega t}$ dir.

3.1 Türbülanslı Atmosferde Yayılan Çoklu Gauss Işık Hüzmelerinin Ortalama Optik Gücünün Hesaplanması

Yayılm eksenine dik olarak konumlandırılmış kaynak düzleminin merkezinde çoklu Gauss ışık hüzmelerinin alan ifadesi aşağıdaki denklemlerle verilir [48]:

$$u(\mathbf{s}) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(-kr_n |\mathbf{s}|^2). \quad (3.1)$$

Eq. 3.1'de $\mathbf{s} = (s_x, s_y)$, \mathbf{s} vektörünün kaynak düzleminde x ve y bileşenlerine ayrılmasıyla oluşur. Düzleştirme parametresi olarak da bilinen N , Gauss ışık hüzmelerinin sayısını, A_n kompleks genliği gösterir ve $r_n = 1/(2kr_{sn}^2) + j/2F_n$ olarak verilmiştir. Burada r_{sn} kaynak boyutunu ve F_n odaklanma parametresini göstermektedir. Alıcı düzlemine ulaşan alan, $u(\mathbf{p}, L)$, $z=L$ yayılım eksenine diktir ve Huygens-Fresnel integrali ile aşağıdaki gibi hesaplanır [48].

$$u(\mathbf{p}, L) = \frac{\exp(jkL)}{jL} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{d}^2s u(\mathbf{s}) \exp\left(\frac{jk}{2L} |\mathbf{s} - \mathbf{p}|^2\right) \exp[\mathbb{E}(\mathbf{s}, \mathbf{p})], \quad (3.2)$$

E . 3.2'de, $\mathbf{p} = (p_x, p_y)$ vektörü alıcı düzlemi koordinatlarını göstermektedir ve $\mathbb{E}(\mathbf{s}, \mathbf{p})$ kaynak ($\mathbf{s}, z = 0$) noktasından alıcı noktası ($\mathbf{p}, z = L$) 'ye do ru yayılan bir küresel dalga nın kompleks fazının rastlantısal kısmının Rytov metodu ile çözü müdür.

Kaynak düzleminden L mesafe uzaklıkta alıcı düzleminde ortalama ı k iddeti geni letilmi Huygens-Fresnel integrali kullanılarak a a ıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{p}, L) \rangle &= \frac{1}{(jL)^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{d}s_1^2 \mathbf{d}s_2^2 A_n A_m^* u(\mathbf{s}_1) u^*(\mathbf{s}_2) \exp\left\{\frac{jk}{2L} [(\mathbf{p} - \mathbf{s}_1)^2 - (\mathbf{p} - \mathbf{s}_2)^2]\right\} \\ &\times \exp\left(\frac{-1}{4 \dots_s} |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2|^2\right) \langle \exp[\mathbb{E}(\mathbf{s}_1, \mathbf{p}) + \mathbb{E}^*(\mathbf{s}_2, \mathbf{p})] \rangle, \end{aligned} \quad (3.3)$$

E . 3.3'de \dots_s uyumluluk uzunlu unu göstermektedir ve E . 3.3'ün ikinci satırında yer alan uzun zamanlı ortalama istatistiksel moment u ekilde ifade edilir [43]

$$\langle \exp[\mathbb{E}(\mathbf{s}_1, \mathbf{p}) + \mathbb{E}^*(\mathbf{s}_2, \mathbf{p})] \rangle = \exp[-0.5 D_{\mathbb{E}}(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)] = \exp[-\dots_0^{-2} (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2], \quad (3.4)$$

E . 3.4'de $D_{\mathbb{E}}$ dalga yapı fonksiyonu, $\dots_0 = (0.545 C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$ türbülans ortamında yayılan küresel dalga nın uyumluluk uzunlu u ve C_n^2 yapı sabitidir. Kaynak düzleminden L mesafe uzaklıkta alıcı düzleminde ortalama ı k iddeti geni letilmi Huygens-Fresnel integrali kullanılarak a a ıdaki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{p}, L) \rangle &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \frac{1}{(jL)^2} A_n A_m^* \frac{f}{t_{1x} t_{2x}} \exp\left(-\frac{k^2}{4 t_{1x}^2 L^2} p_x^2\right) \exp\left[\frac{1}{4 t_{2x}^2} \left(-\frac{k^2 p_x^2}{L^2} - \frac{k^2 p_x^2}{t_{1x}^4 L^2 \dots_0^4} + \frac{2k^2 p_x^2}{L^2 t_{1x}^2 \dots_0^2}\right)\right] \\ &\times \frac{f}{t_{1y} t_{2y}} \exp\left(-\frac{k^2}{4 t_{1y}^2 L^2} p_y^2\right) \exp\left[\frac{1}{4 t_{2y}^2} \left(-\frac{k^2 p_y^2}{L^2} - \frac{k^2 p_y^2}{t_{1y}^4 L^2 \dots_0^4} + \frac{2k^2 p_y^2}{L^2 t_{1y}^2 \dots_0^2}\right)\right], \end{aligned} \quad (3.5)$$

E . 3.5'de,

$$t_{1x} = \left(\frac{1}{2r_s^2} + \frac{jk}{2F} - \frac{jk}{2L} + \frac{1}{\dots_0^2} + \frac{1}{4\dots_s^2} \right)^{1/2}$$

$$t_{2x} = \left[\frac{1}{2r_s^2} - \frac{jk}{2F} - \frac{1}{4\dots_s^2} + \frac{jk}{2L} + \frac{1}{\dots_0^2} - \frac{1}{4t_{1x}^2} \left(\frac{2}{\dots_0^2} + \frac{1}{2\dots_s^2} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ olup, } t_{1y} \text{ ve } t_{2y} \text{ ise } t_{1x} \text{ ve}$$

t_{2x} 'nin tüm x de i kenlerini y ile de i tirerek bulunabilir. Gauss profiline sahip bir açıklı ı olan alıcı düzlemindeki ortalama güç a a ıdaki formülle hesaplanır.

$$\langle P \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle I(\mathbf{p}, L) \rangle h(\mathbf{p}) d\mathbf{p}, \quad (3.6)$$

E . 3.6'da $h(\mathbf{p})$ açıklık fonksiyonudur ve a a ıdaki gibi gösterilmektedir:

$$h(\mathbf{p}) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{p}|^2}{R^2}\right). \quad (3.7)$$

E . 3.7'de R açıklı ın yarıçapıdır E . 3.7, E . 3.6'ya yerle tirildi inde a a ıdaki e itlik elde edilir,

$$\langle P \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle I(\mathbf{p}, L) \rangle \exp\left(-\frac{|\mathbf{p}|^2}{R^2}\right) d^2\mathbf{p}. \quad (3.8)$$

E . 3.8, Ref. [67]'nin 3.323.2 numaralı e itli i kullanılarak çözüldü ünde a a ıdaki ekilde ortalama optik güç bulunur.

$$\begin{aligned}
\langle P \rangle = & \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \frac{1}{(\{L\})^2} A_n A_m^* \frac{f}{t_{1x} t_{2x}} \frac{f}{t_{1y} t_{2y}} \sqrt{\frac{f}{\left[\frac{1}{R^2} + \frac{k^2}{4L^2 t_{1x}^2} + \frac{k^2 \left[1 - \frac{1}{t_{1x}^2} \left(\frac{1}{\dots_0^2} + \frac{1}{4 \dots_s^2} \right) \right]^2}{4L^2 t_{2x}^2} \right]^2}} \\
& \times \sqrt{\frac{f}{\left[\frac{1}{R^2} + \frac{k^2}{4L^2 t_{1y}^2} + \frac{k^2 \left[1 - \frac{1}{t_{1y}^2} \left(\frac{1}{\dots_0^2} + \frac{1}{4 \dots_s^2} \right) \right]^2}{4L^2 t_{2y}^2} \right]^2}}. \tag{3.9}
\end{aligned}$$

3.1.1 Düz Tepeli I ık Hüzmelerinin Ortalama Optik Gücünün Hesaplanması

Yayılm eksenine dik olarak konumlandırılmı kaynak düzleminin merkezinde düz tepeli ı ık hüzmesinin alan ifadesi a a ıdaki denklemlerle verilir [53].

$$u(\mathbf{s}) = \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \exp \left[-\frac{n(\mathbf{s}_x^2 + \mathbf{s}_y^2)}{2r_{sn}^2} - \frac{jnk}{2F_n} \right], \tag{3.10}$$

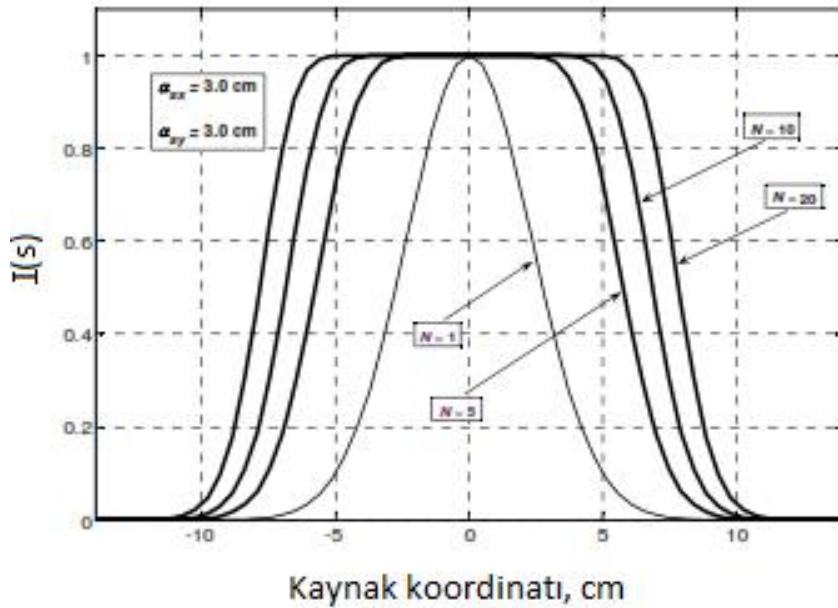
E . 3.1'e $A_n = \frac{(-1)^{n-1}}{N} \frac{N!}{n!(N-n)!}$ ve $r_n = 1/2kr_{sn}^2 + j/(2F_n)$ yerle tirildi inde E . 3.1, E .

3.10'da verilen düz tepeli ı ık hüzmesinin alan ifadesine dönü ür. E . 3.10, E . 3.3'de yerine konulup çözüldü ünde düz tepeli ı ık hüzmelerinin alıcı düzleminde olu turdu u ortalama optik güç a a ıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned}
\langle P \rangle &= \frac{f^3}{(\lambda L)^2} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \frac{(-1)^{n+m}}{N^2} \frac{1}{t_{1x} t_{2x} t_{1y} t_{2y}} \binom{N}{n} \binom{N}{m} \\
&\times \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{R^2} + \frac{k^2}{4t_{1x}^2 L^2} + \frac{k^2}{4t_{2x}^2 L^2} + \frac{k^2}{4t_{2x}^2 t_{1x}^4 L^2 \dots 4} - \frac{k^2}{2t_{2x}^2 t_{1x}^2 L^2 \dots 2} \right)}} \\
&\times \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{R^2} + \frac{k^2}{4t_{1y}^2 L^2} + \frac{k^2}{4t_{2y}^2 L^2} + \frac{k^2}{4t_{2y}^2 t_{1y}^4 L^2 \dots 4} - \frac{k^2}{2t_{2y}^2 t_{1y}^2 L^2 \dots 2} \right)}}. \tag{3.11}
\end{aligned}$$

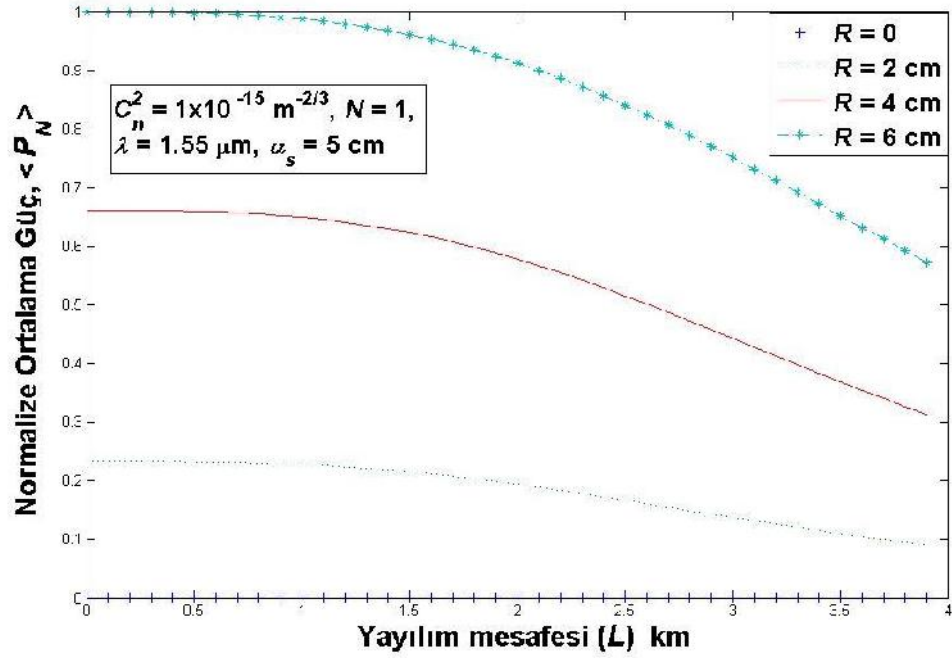
E . 3.11'de $t_{1x} = \left(\frac{n}{2r_{sn}^2} + \frac{jk}{2F_n} - \frac{jk}{2L} + \frac{1}{\dots 2} \right)^{1/2}$, $t_{2x} = \left(\frac{m}{2r_{sm}^2} + \frac{jk}{2L} + \frac{1}{\dots 2} - \frac{1}{t_{1x}^2 \dots 4} \right)^{1/2}$ ve t_{2y} ise t_{1x} ve t_{2x} 'nin tüm x de i kenlerini y ile de i tirerek bulunabilir.

ekil 3.1'de farklı düzle tirme parametreleri için kaynak düzleminde düz tepeli ı k hüzmelerinin ı k iddeti da ılımı görülmektedir. $N=1$ durumunda, düz tepeli ı k hüzmeleri Gauss ı k hüzmesine dönü mektedir [27].



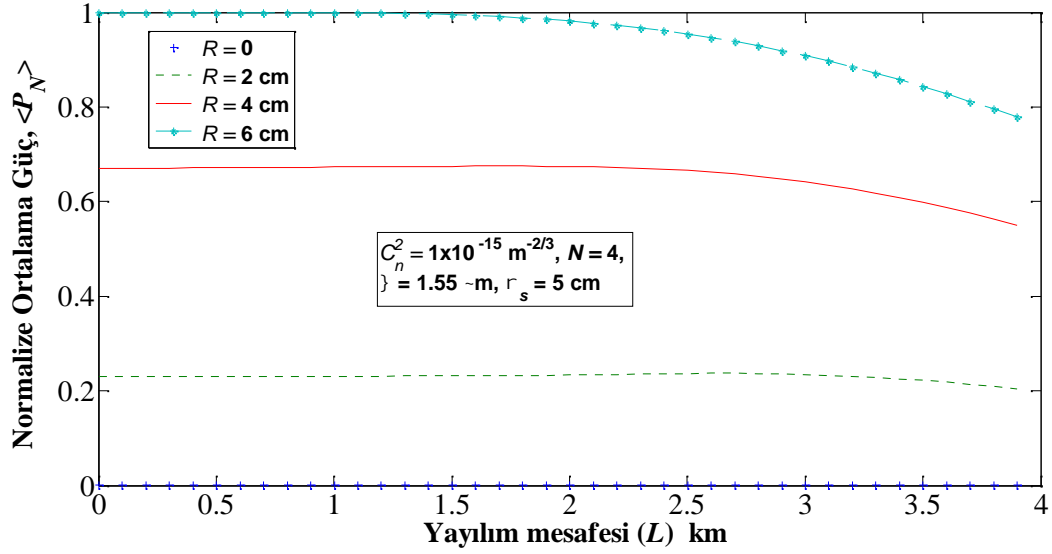
ekil 3.1. Düz tepeli ı k hüzmelerinin kaynak düzleminde ı k iddeti da ılımları.

Düz tepeli ı k hüzmelerinin ortalama optik gücü farklı parametreler için incelenmi , açıklık ortalamasının ortalama optik güç ile ili kisi incelenmi tir. Bu çalı ma, 2012 yılında stanbul'da gerçekte tirilmi olan URSI-2012 konferansında sunulmu tur [65]. Düz tepeli ı k hüzmelerinin ortalama optik gücü, E . 3.11 kullanılarak türbülanslı atmosferden geçtikten sonra farklı düzle tirme parametre de erleri için yayılım mesafesi ve alıcı açıklık yarıçapına kar ı çizdirilmi tir. ekil 3.2- ekil 3.4'de dalga boyu } = 1.55 ~m ve Gauss kaynak boyutu $r_s = 5$ cm ve odaklanma parametresi $F = \infty$ alınmı tir. Kolaylık olması açısından alıcıdaki ortalama optik güç, ekillerde "ortalama optik güç" olarak belirtilmi tir. ekil 3.2 ve ekil 3.3'de $\langle P_N \rangle = \langle P \rangle / (\langle P(L=0) \rangle_{N=1} \text{Max} \langle P \rangle)$ normalizasyonu yapıldı ından ba langıç durumlarında ortalama güç de erleri kaynak düzleminde e it olarak görölmektedir. $\langle P_N \rangle$, alıcı düzlemindeki normalize edilmi ortalama gücü, $\langle P(L=0) \rangle_{N=1}$, kaynak düzleminde $N=1$ durumu için ortalama gücü, $\text{Max} \langle P \rangle$ ise alıcı düzlemindeki en fazla gücü göstermektedir. ekil 3.2'de yayılım mesafesine kar ı ortalama güç de erleri farklı açıklık yarıçapları için çizdirilmi tir. ekil 3.2'de düzle tirme parametresi $N=1$ ve yapı sabiti $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ için alıcı düzleminde açıklı ın olmaması durumunda minimum güç gözlemlenirken, açıklık yarıçapı $R=2$ cm' den $R=6$ cm'ye çıkarıldı ında ortalama gücün arttı ı gözlemlenmi tir. Ayrıca ekil 3.2'den çıkarılan di er bir sonuç da yayılım mesafesi arttıkça ortalama gücün dü tü üdür.



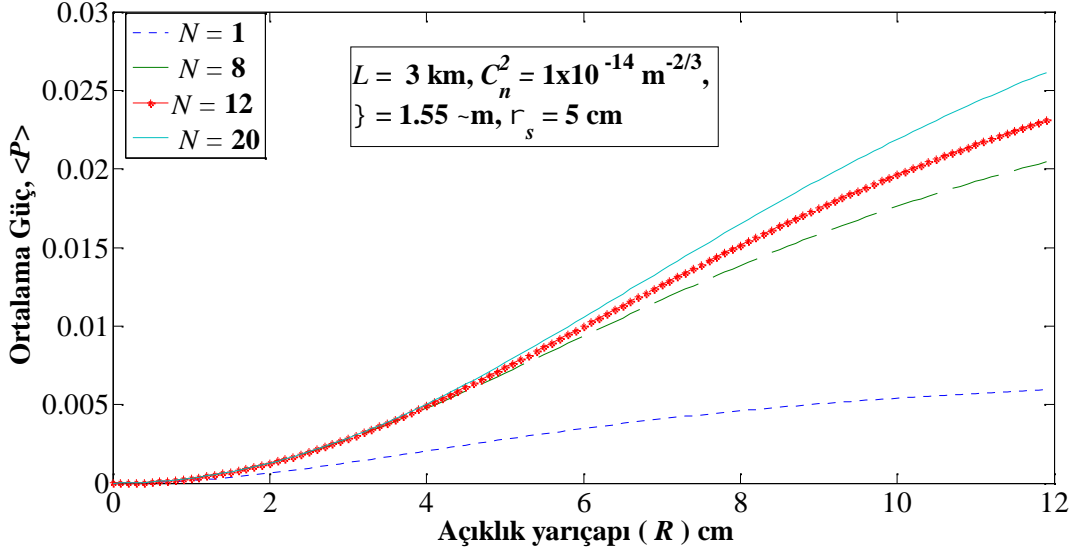
ekil 3.2. $N=1$ düzle tirme parametresi için farklı açıklık yarıçap de erlerinde yayılım mesafesine kar ı normalize ortalama güç.

ekil 3.3'de $N=4$ düzle tirme parametresi için ortalama güç incelenmi tir. Burada, kaynak düzlemindeki ortalama güç de erleri $N=1$ durumuna göre normalize edildi inden, ba langıç durumlarında her iki ekilde de ortalama güç de erleri kaynak düzleminde e ittir. ekil 3.3'den görüldü ü gibi açıklık yarıçapının artmasıyla ortalama güç artmaktadır. Ayrıca, ekil 3.2'de gözlemlendi i gibi yayılım mesafesinin artmasıyla ortalama güç dü mekte, düzle tirme parametresinin artmasıyla ortalama güç de erindeki dü ü azalmaktadır.



ekil 3.3. $N=4$ düzle tirme parametresi için farklı açıklık yarıçap de erlerinde yayılım mesafesine kar ı normalize ortalama güç.

ekil 3.4'de $L=3$ km yayılım mesafesinde ve $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ yapı sabiti de erleri için açıklık yarıçapına kar ı ortalama güç çizdirilmi tir. ekil 3.4'de görüldü ü gibi belirli bir yayılım mesafesinde açıklık yarıçapı arttıkça ortalama güç artmaktadır. Ayrıca, düzle tirme parametresi N 'nin artmasıyla ortalama gücün daha da arttı ı gözlemlenebilmektedir.



ekil 3.4. $N=1, 8, 12$ ve 20 düzle tirme parametreleri için $L=3$ km'de açıklık yarıçapına kar ı ortalama güç.

Elde edilen ortalama güç profilleri incelendi inde, türbülanslı atmosferden geçtikten sonra düz tepeli ık hüzmelerinin ortalama gücü açıklık yarıçapının artmasıyla artmaktadır. Düzle tirme parametresindeki artı n, ortalama güç de erlerini artırdı ı gözlemlenmi tir. Büyük düzle tirme parametreleri için yayılım mesafesi arttıkça ortalama güç de erindeki dü me azalmaktadır. Uzun yayılım mesafesinde, düzle tirme parametresinin de eri artırıldıkça büyük açıklı a sahip alıcılardaki ortalama güç de erindeki artı Gauss hüzmesine göre çok fazla olmaktadır.

3.1.2 Halkasal ık Hüzmelerinin Ortalama Optik Gücünün Hesaplanması

E . 3.1'de $N=2$, $r_1 = 1/2kr_{s1}^2 + j/(2F)$, $r_2 = 1/2kr_{s2}^2 - j/(2F)$ ve $A_1 = -A_2$ de erleri yerine konuldu unda, E . 3.1, a a ıdaki gibi halkasal ık hüzmesi alan ifadesine dönü mektedir.

$$u(\mathbf{s}) = \sum_{\ell=1}^2 A_{\ell} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_{s\ell}^2} + \frac{jk}{F_{\ell}} \right) (s_x^2 + s_y^2) \right], \quad (3.12)$$

E . 3.12, E .3.3'de yerine konulup çözüldü ünde halkasal ı k hüzmelerinin alıcı düzleminde olu turdu u ortalama optik güç a a ıdaki gibi bulunur.

$$\langle P \rangle = P1 + P2 + P3 + P4 \quad (3.13)$$

Burada

$$P1 = f v_1^{-2} y_1^{-2} \left(C_1^{-1} R^{-2} + v_1^{-2} + y_1^{-2} + y_1^{-2} v_1^{-4} \dots^{-4} - 2 y_1^{-2} v_1^{-2} \dots^{-2} \right)^{-1},$$

$$P2 = f v_1^{-2} y_2^{-2} \left(C_1^{-1} R^{-2} + v_1^{-2} + y_2^{-2} + y_2^{-2} v_1^{-4} \dots^{-4} - 2 y_2^{-2} v_1^{-2} \dots^{-2} \right)^{-1}$$

$$P3 = f v_2^{-2} y_3^{-2} \left(C_1^{-1} R^{-2} + v_2^{-2} + y_3^{-2} + y_3^{-2} v_2^{-4} \dots^{-4} - 2 y_3^{-2} v_2^{-2} \dots^{-2} \right)^{-1},$$

$$P4 = f v_2^{-2} y_4^{-2} \left(C_1^{-1} R^{-2} + v_2^{-2} + y_4^{-2} + y_4^{-2} v_2^{-4} \dots^{-4} - 2 y_4^{-2} v_2^{-2} \dots^{-2} \right)^{-1}.$$

$$v_1 = \left(0.5 r_{s1}^{-2} + \dots^{-2} - j 0.5 k L^{-1} \right)^{0.5}, v_2 = \left(0.5 r_{s2}^{-2} + \dots^{-2} - j 0.5 k L^{-1} \right)^{0.5}, C_1 = f (\} L)^{-2},$$

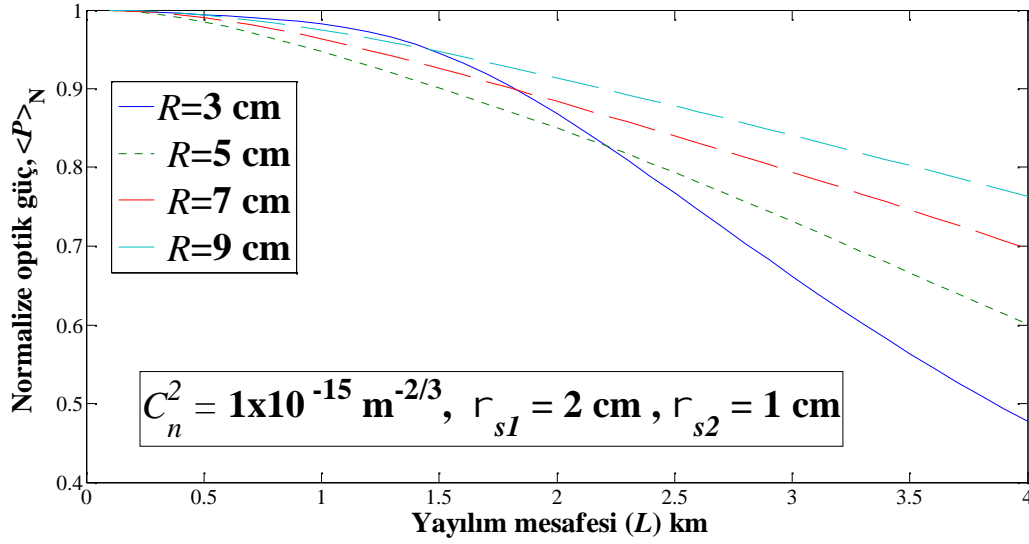
ve

$$y_1 = \left(v_1 - v_1^{-2} \dots^{-4} \right)^{0.5}, y_2 = \left(v_2 - v_1^{-2} \dots^{-4} \right)^{0.5}, y_3 = \left(v_1 - v_2^{-2} \dots^{-4} \right)^{0.5}, y_4 = \left(v_2 - v_2^{-2} \dots^{-4} \right)^{0.5}.$$

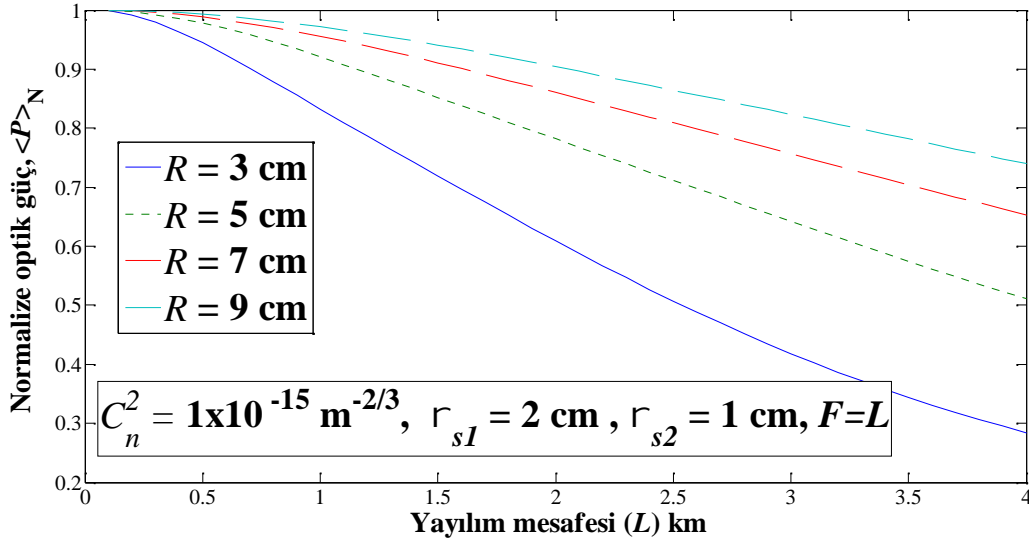
olarak bulunur.

Türbülanslı atmosferde yayılan halkasal ı k hüzmelerinin Gauss formunda açıklı a sahip alıcı düzleminde olu turdukları ortalama optik güç, yayılım mesafesine ve alıcı açıklık yarıçapına kar ı incelenmi tir. Bu çalı ma, *Electronics Letters* dergisine gönderilmi tir [66]. A a ıdaki ekillerde, ekil 3.9 haricinde di er ekillerde dalga boyu } = 1.55 ~m ve yapı sabiti $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ olarak alınmı tır. ekil 3.5, ekil 3.6 ve ekil 3.7'de alıcıdaki ortalama optik güç, vericideki ortalama optik güç ile normalize edilmi tir. ekil 3.6 ve ekil 3.8'de odaklanma parametresi $F=L$ olarak alınmı tır. ekil 3.5'de ortalama optik güç yayılım mesafesine kar ı farklı alıcı açıklık yarıçaplarında çizdirilmi tir. ekil 3.5'de, kolime halkasal ı k hüzmelerinin ikincil (içteki) hüzmeler ve birincil (dı taki) hüzmeler kaynak boyutları sırasıyla $r_{s2} = 1 \text{ cm}$ ve

$r_{s1} = 2$ cm olarak alınmıştır. ekil 3.5'de yayılım mesafesi arttıkça, ortalama optik gücün dü tü ü görülmektedir. Sabit bir uzak yayılım mesafesinde, ortalama optik güçteki dü me, küçük alıcı açıklık yarıçaplarında en fazladır. Ayrıca ekil 3.5'de alıcı açıklık yarıçapı arttıkça, ortalama optik güçteki dü me azalmaktadır. ekil 3.6'de odaklanımı halkasal ı k hüzmelerinin alıcıdaki ortalama optik gücü yayılım mesafesine kar ı çizdirilmiştir. Yapı sabiti, ikincil hüzme ve birincil hüzme kaynak boyutları ekil 3.5 ile kıyaslama yapabilmek için aynı alınmıştır. ekil 3.6'de yayılım mesafesi arttıkça ortalama optik güç azalmaktadır. ekil 3.6, ekil 3.5'de verilen kolime ($F=$) halkasal ı k hüzmelerinin optik güç grafi i ile kar ıla tırıldı nda, özellikle küçük alıcı açıklık yarıçaplarında odaklanımı halkasal ı k hüzmelerinde ortalama optik güçteki kaybın daha az oldu u gözlemlenmektedir.



ekil 3.5. Farklı açıklık yarıçaplarında $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 2 \text{ cm}$, $r_{s2} = 1 \text{ cm}$ de erleri için halkasal ı k hüzmesinin yayılım mesafesine kar ı normalize optik gücü.



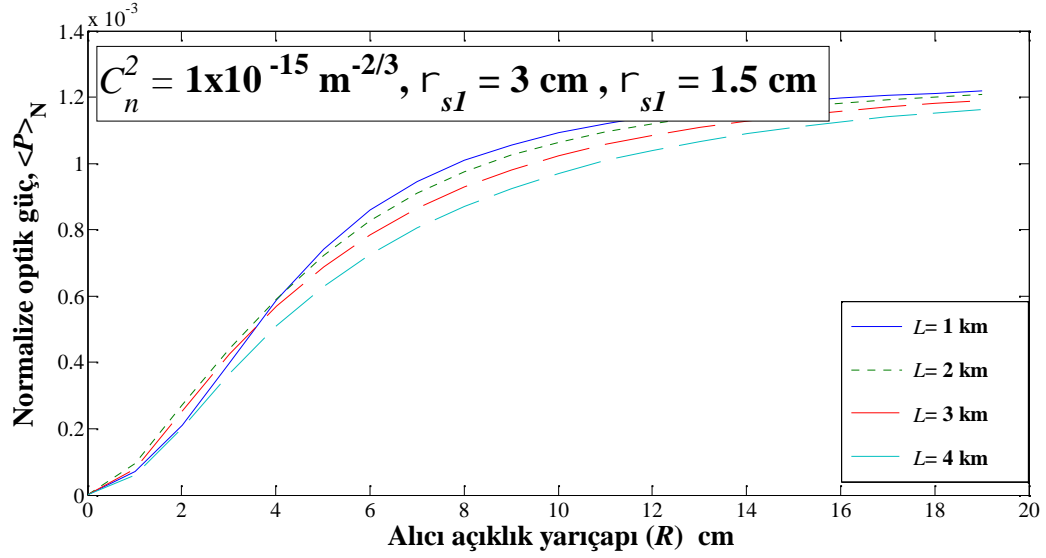
ekil 3.6. Farklı açıklık yarıçaplarında $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 2 \text{ cm}$, $r_{s2} = 1 \text{ cm}$ de erleri için odaklanmı halkasal ı k hüzmesinin yayılım mesafesine kar ı normalize optik gücü.

ekil 3.7'da kolime halkasal ı k hüzmelerinin ortalama optik gücü alıcı açıklık yarıçapına kar ı farklı yayılım mesafelerinde incelenmi tir. ekil 3.7'da birincil ve ikincil hüzme kaynak boyutları sırasıyla $r_{s1} = 3 \text{ cm}$ ve $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ olarak alınmı tır.

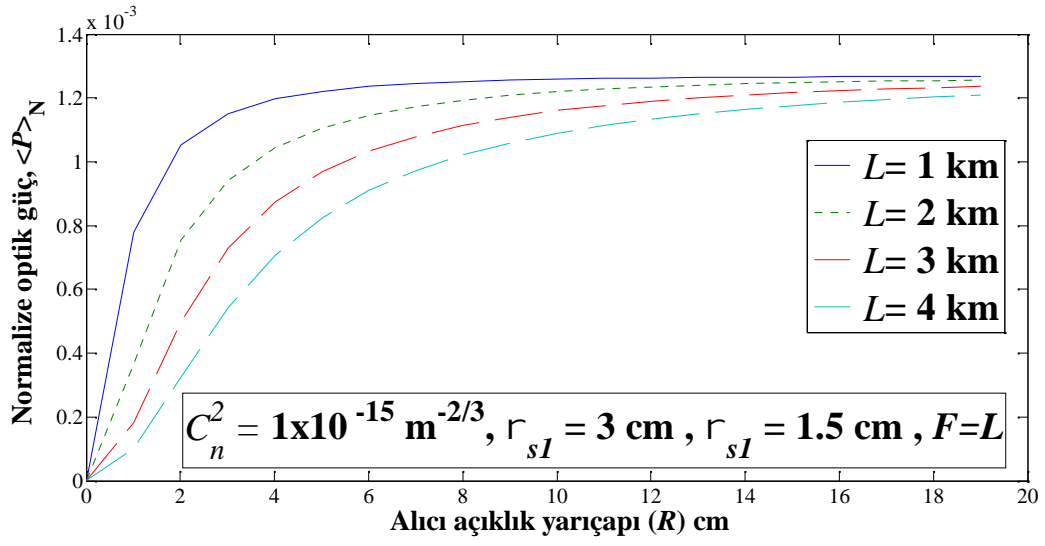
ekil 3.7 dikkatlice incelendi inde, alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla, ortalama optik gücün arttı ı görölmektedir. Ayrıca, ekil 3.7'da sabit bir alıcı açıklık yarıçapında, dü ük yayılım mesafelerinde ortalama optik gücün en fazla oldu u görölmektedir. Çok yüksek alıcı açıklık yarıçaplarında, ortalama optik güç sabit bir de erde kalmaktadır.

ekil 3.8'de, ekil 3.7'da verilen de erler için odaklanmı halkasal ı k hüzmelerinin ortalama optik gücü alıcı açıklık yarıçapına kar ı incelenmi tir. ekil 3.8'de de alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla ortama optik güçte artı gözlemlenmektedir. Sabit bir alıcı açıklık yarıçapında, dü ük yayılım mesafesindeki halkasal ı k hüzmelerinin ortalama optik gücü en fazladır. Ayrıca ekil 3.7 ile ekil 3.8 kar ıla tırıldı nda, küçük alıcı açıklık yarıçapı de erlerinde, odaklanmı halkasal ı k hüzmelerinin

ortalama optik gücü kolime halkasal ı k hüzmelerinin ortalama optik gücüne göre daha fazladır. ekil 3.7 ve ekil 3.8'den çıkarılabilecek sonuç, dü ük açıklık yarıçaplarında odaklanmı halkasal ı k hüzmelerini kullanmak performansı artırmaktadır.

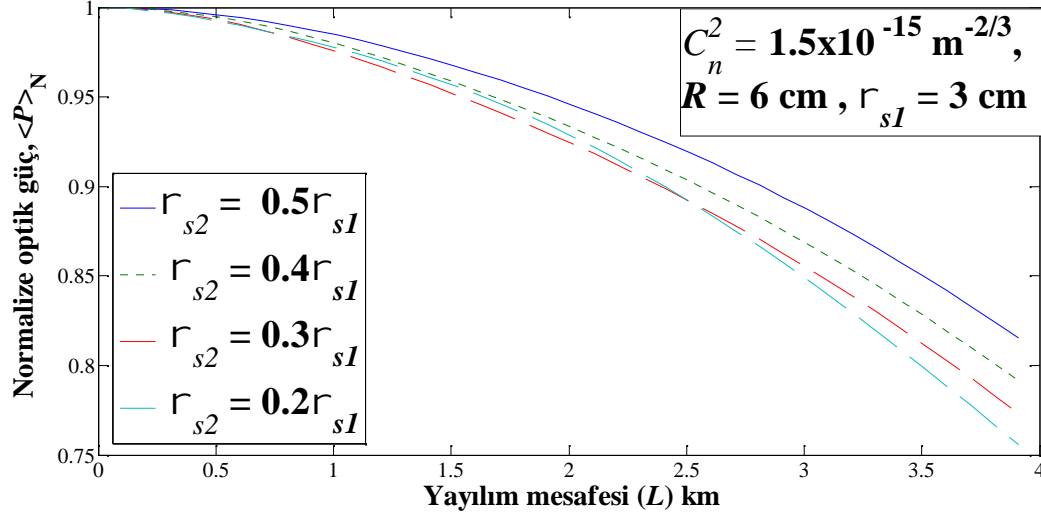


ekil 3.7. Farklı yayılım mesafelerinde $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 3 \text{ cm}$, $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ de erleri için halkasal ı k hüzmesinin alıcı açıklık yarıçapına karşı normalize optik gücü.



ekil 3.8. Farklı yayılım mesafelerinde $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 3 \text{ cm}$, $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ de erleri için odaklanmı halkasal ık hüzmesinin alıcı açıklık yarıçapına karşı normalize optik gücü.

ekil 3.9'de farklı ikincil hüzme kaynak boyutuna sahip halkasal ık hüzmelerinin ortalama optik gücü yayılım mesafesine karşı çizdirilmiştir. ekil 3.9'de alıcı açıklık yarıçapı ve birincil hüzme kaynak boyutu sırasıyla $R=8 \text{ cm}$ ve $r_{s1} = 3 \text{ cm}$ alınmıştır. Yayılım mesafesinin artmasıyla ortalama optik güç azalmaktadır. Ayrıca ekil 3.9, sabit bir yayılım mesafesinde ikincil hüzme kaynak boyutunun artmasıyla ortalama optik güçte artış elde edilebileceğini göstermektedir. ekil 3.9'den ayrıca kolime halkasal ık hüzmeleri için halka genişliğinin artırılmasıyla ortalama optik güç kaybının azaltılabileceği gözlemlenmektedir.



ekil 3.9 Farklı iç hüzme kaynak boyutlarında $C_n^2 = 1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,

$r_{s1} = 3 \text{ cm}$, $R = 6 \text{ cm}$ de erleri için halkasal ı k hüzmesinin yayılım mesafesine kar ı normalize optik gücü.

Sonuç olarak, kolime ve odaklanmı halkasal ı k hüzmeleri kar ıla tırıldı nda, odaklanmı halkasal ı k hüzmelerinin alıcıdaki ortalama optik güç kaybındaki dü ü bakımından daha avantajlı oldu u gözlemlenmi tir. Kablosuz optik haberle me linklerinde, performans avantajı sa laması açısından da odaklanmı halkasal ı k hüzmeleri vericiden gönderilerek alıcıda daha fazla optik güç elde etmek mümkün olabilir. Ayrıca, çıkarılan di er bir sonuç da sabit bir yayılım mesafesinde, alıcıdaki ortalama optik güç kaybı halka geni li i büyük olan halkasal ı k hüzmelerinin kullanılmasıyla azaltılabilmektedir.

3.2 Türbülanslı Atmosferde Yayılan Çoklu Gauss ı k Hüzmelerinin Alıcı Açıklık Ortalaması ve Pırıldama ndisinin Hesaplanması

Gauss formunda bir açıklı a sahip alıcı düzlemindeki pırıldama indisi a a ıdaki ekilde verilmektedir [42].

$$m_p^2 = \frac{\langle (P - \langle P \rangle)^2 \rangle}{\langle P \rangle^2} = \frac{\langle P^2 \rangle}{\langle P \rangle^2} - 1, \quad (3.14)$$

E . 3.14'de $\langle P^2 \rangle$ gücün karesinin ortalamasını göstermektedir ve a a ıdaki gibi hesaplanır.

$$\langle P^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle I(\mathbf{p}_1) I(\mathbf{p}_2) \rangle \exp\left(-\frac{|\mathbf{p}_1|^2 + |\mathbf{p}_2|^2}{R^2}\right) d^2 \mathbf{p}_1 d^2 \mathbf{p}_2, \quad (3.15)$$

E . 3.15'de $\langle I(\mathbf{p}_1) I(\mathbf{p}_2) \rangle$ a a ıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{p}_1) I(\mathbf{p}_2) \rangle &= \frac{1}{(\int L)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{s}_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{s}_2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{s}_3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{s}_4 u(\mathbf{s}_1) u^*(\mathbf{s}_2) u(\mathbf{s}_3) u^*(\mathbf{s}_4) \\ &\quad \times \exp\left[\frac{jk}{2L} (|\mathbf{p}_1 - \mathbf{s}_1|^2 - |\mathbf{p}_1 - \mathbf{s}_2|^2 + |\mathbf{p}_2 - \mathbf{s}_3|^2 - |\mathbf{p}_2 - \mathbf{s}_4|^2)\right] \exp\left(\frac{-1}{4 \dots_s^2} |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2|^2\right) \\ &\quad \times \exp\left(\frac{-1}{4 \dots_s^2} |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2|^2\right) \langle \exp[\mathbb{E}(\mathbf{s}_1, \mathbf{p}_1) + \mathbb{E}^*(\mathbf{s}_2, \mathbf{p}_1) + \mathbb{E}(\mathbf{s}_3, \mathbf{p}_2) + \mathbb{E}^*(\mathbf{s}_4, \mathbf{p}_2)] \rangle, \quad (3.16) \end{aligned}$$

E . 3.16'nın son satırındaki çarpımın sa ındaki ifade dördüncü derece küresel dalga tutarlık fonksiyonudur ve a a ıdaki gibi ifade edilir [43].

$$\begin{aligned} &\exp\left[-\frac{1}{2} D_{\mathbb{E}}(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2, 0) - \frac{1}{2} D_{\mathbb{E}}(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_4, \mathbf{p}_d) - \frac{1}{2} D_{\mathbb{E}}(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3, \mathbf{p}_d) - \frac{1}{2} D_{\mathbb{E}}(\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_4, 0) + \frac{1}{2} D_{\mathbb{E}}(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4, \mathbf{p}_d) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} D_{\mathbb{E}}(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3, \mathbf{p}_d) + 2B_t(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4, \mathbf{p}_d) + 2B_t(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3, \mathbf{p}_d) + jD_{tS}(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4, \mathbf{p}_d) - jD_{tS}(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3, \mathbf{p}_d) \right] \quad (3.17) \end{aligned}$$

Burada, $\mathbf{p}_d = \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2$, $D_{\mathbb{E}}(\mathbf{s}_d, \mathbf{p}_d) = 2 \dots_0^{-2} (\mathbf{s}_d^2 + \mathbf{s}_d \cdot \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_d^2)$,

$B_t(\mathbf{s}_d, \mathbf{p}_d) = \dagger_{ts}^2 - 0.5D_t(\mathbf{s}_d, \mathbf{p}_d)$, $D_t(\mathbf{s}_d, \mathbf{p}_d) = (\dots_0^{-2} - \dots_t^{-2}) (\mathbf{s}_d^2 + \mathbf{s}_d \cdot \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_d^2)$,

$D_{tS}(\mathbf{s}_d, \mathbf{p}_d) = \dots_{tS}^{-2} (\mathbf{s}_d^2 + \mathbf{s}_d \cdot \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_d^2)$, $\mathbf{s}_d = \mathbf{s}_r - \mathbf{s}_q$ ve $r=1, 2, 3, 4$ ile $q=2, 3, 4$,

$\dagger_{ts}^2 = 0.124k^{7/6} C_n^2 L^{11/6}$, $\dots_{tS}^{-2} = 0.114C_n^2 k^{13/6} L^{5/6}$, $\dots_t^{-2} = 0.425C_n^2 k^{13/6} L^{5/6}$.

E . 3.1 ve yukarıda verilen ifadeler E . 3.16'da yerine yazıldı ında

$$\begin{aligned}
\langle I(\mathbf{p}_1)I(\mathbf{p}_2) \rangle &= \frac{1}{(\jmath L)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_4 \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{\ell=1}^N \sum_{o=1}^N A_n A_m^* A_\ell A_o^* \\
&\times \exp \left[-\frac{n(s_{1x}^2 + s_{1y}^2)}{2r_{sn}^2} - \frac{\jmath k(s_{1x}^2 + s_{1y}^2)}{2F_n} \right] \exp \left[-\frac{m(s_{2x}^2 + s_{2y}^2)}{2r_{sm}^2} + \frac{\jmath k(s_{2x}^2 + s_{2y}^2)}{2F_m} \right] \\
&\times \exp \left[-\frac{\ell(s_{3x}^2 + s_{3y}^2)}{2r_{s\ell}^2} - \frac{\jmath k(s_{3x}^2 + s_{3y}^2)}{2F_\ell} \right] \exp \left[-\frac{o(s_{4x}^2 + s_{4y}^2)}{2r_{so}^2} + \frac{\jmath k(s_{4x}^2 + s_{4y}^2)}{2F_o} \right] \\
&\times \exp \left[\frac{\jmath k}{2L} (|\mathbf{p}_1 - \mathbf{s}_1|^2 - |\mathbf{p}_1 - \mathbf{s}_2|^2 + |\mathbf{p}_2 - \mathbf{s}_3|^2 - |\mathbf{p}_2 - \mathbf{s}_4|^2) \right] \exp \left(\frac{-1}{4 \dots_s} |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2|^2 \right) \exp \left(\frac{-1}{4 \dots_s} |\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_4|^2 \right) \\
&\times \exp \left[4\uparrow_{ts}^2 - \left(\frac{1}{\dots_0} - \frac{1}{\dots_t} \right) (|\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4|^2 + |\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4 \cdot \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_d^2) - \left(\frac{1}{\dots_0} - \frac{1}{\dots_t} \right) (|\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3|^2 + |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3 \cdot \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_d^2) \right] \\
&\times \exp \left[-\frac{1}{\dots_0} |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2|^2 - \frac{1}{\dots_0} (|\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_4|^2 + |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_4 \cdot \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_d^2) \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{\dots_0} (|\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3|^2 + |\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3 \cdot \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_d^2) - \frac{1}{\dots_0} |\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_4|^2 + \frac{1}{\dots_0} (|\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4|^2 + |\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4 \cdot \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_d^2) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{\dots_0} (|\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3|^2 + |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3 \cdot \mathbf{p}_d + \mathbf{p}_d^2) + \jmath D_{tS}(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4, \mathbf{p}_d) - \jmath D_{tS}(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3, \mathbf{p}_d) \right] \tag{3.18}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\langle I(\mathbf{p}_1)I(\mathbf{p}_2) \rangle &= \frac{4\uparrow_{ts}^2}{(\jmath L)^4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_3 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\mathbf{s}_4 \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{\ell=1}^N \sum_{o=1}^N A_n A_m^* A_\ell A_o^* \\
&\times \exp \left\{ -\left[\frac{n(s_{1x}^2 + s_{1y}^2)}{2r_{sn}^2} \right] \right\} \exp \left\{ -\left[\frac{m(s_{2x}^2 + s_{2y}^2)}{2r_{sm}^2} \right] \right\} \exp \left\{ -\left[\frac{\ell(s_{3x}^2 + s_{3y}^2)}{2r_{s\ell}^2} \right] \right\} \exp \left\{ -\left[\frac{o(s_{4x}^2 + s_{4y}^2)}{2r_{so}^2} \right] \right\} \\
&\times \exp \left[\frac{\jmath k}{2L} (|\mathbf{p}_1 - \mathbf{s}_1|^2 - |\mathbf{p}_1 - \mathbf{s}_2|^2 + |\mathbf{p}_2 - \mathbf{s}_3|^2 - |\mathbf{p}_2 - \mathbf{s}_4|^2) \right] \exp \left(\frac{-1}{4 \dots_s} |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2|^2 \right) \exp \left(\frac{-1}{4 \dots_s} |\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_4|^2 \right) \\
&\times \exp \left[-\frac{1}{\dots_0} |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2|^2 - \frac{1}{\dots_0} (|\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_4|^2 + |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_4 \cdot |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| + |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|^2) \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{\dots_0} (|\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3|^2 + |\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3 \cdot |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| + |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|^2) - \frac{1}{\dots_0} |\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_4|^2 \right. \\
&\quad \left. + Y (|\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4|^2 + |\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_4 \cdot |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| + |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|^2) \right. \\
&\quad \left. + V (|\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3|^2 + |\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3 \cdot |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| + |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2|^2) \right] \tag{3.19}
\end{aligned}$$

Burada $V = -\frac{j}{2} + \frac{1}{2}$, $Y = \frac{j}{2} + \frac{1}{2}$. Ref. [67]'nin 3.323.2 numaralı e itli i

kullanılarak kaynak koordinatları üzerinden çözülen 8 katlı integral sonucu $\langle I(\mathbf{p}_1)I(\mathbf{p}_2) \rangle$ a a ıdaki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} \langle I(\mathbf{p}_1)I(\mathbf{p}_2) \rangle &= \frac{4\uparrow_{ts}^2}{(\downarrow L)^4} \frac{f^4}{S_1^2 S_2^2 S_3^2 S_4^2} \exp \left[\frac{1}{4S_4^2} (p_{1x}^2 B^2 + p_{2x}^2 D^2 + 2p_{1x} B p_{2x} D) \right] \\ &\quad \times \exp \left[\frac{1}{4S_4^2} (p_{1y}^2 B^2 + p_{2y}^2 D^2 + 2p_{1y} B p_{2y} D) \right] C_x C_y \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$E . 3.20'de \quad S_1^2 = \left(\frac{n}{2r_{sn}^2} + \frac{jk}{2F_n} - \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} + \frac{1}{4\dots_s^2} - V \right), \quad S_2^2 = -\frac{1}{4S_1^2} \left(\frac{1}{2\dots_s^2} + \frac{2}{\dots_0} \right)^2 + \dots_1^2,$$

$$S_3^2 = \frac{-1}{4S_2^2} \left[-\frac{1}{S_1^2} \left(\frac{1}{2\dots_s^2} + \frac{2}{\dots_0} \right) Y + \frac{1}{\dots_0} \right]^2 - \frac{Y^2}{S_1^2} + g_1^2,$$

$$S_4^2 = \frac{-1}{4S_3^2} \left[\frac{1}{2S_2^2} \left(\frac{K}{S_1^2 \dots_0^2} - 2V \right) \left(-\frac{KY}{S_1^2} + \frac{2}{\dots_0} \right) - \frac{2Y}{S_1^2 \dots_0^2} + \frac{2}{\dots_0} + \frac{1}{2\dots_s^2} \right]^2 - \frac{1}{4S_2^2} \left(\frac{K}{S_1^2 \dots_0^2} - 2V \right)^2 - \frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} + \dots_1^2$$

$$\dots_1^2 = \frac{m}{2r_{sm}^2} - \frac{jk}{2F_m} + \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} + \frac{1}{4\dots_s^2} - V, \quad g_1^2 = \frac{\ell}{2r_{sl}^2} + \frac{jk}{2F_\ell} - \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} + \frac{1}{4\dots_s^2} - Y,$$

$$\dots_1^2 = \frac{o}{2r_{so}^2} - \frac{jk}{2F_o} + \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} + \frac{1}{4\dots_s^2} - V, \quad K = \frac{1}{2\dots_s^2} + \frac{2}{\dots_0}$$

$$\begin{aligned} B &= E + \frac{jk}{S_3^2 L} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{\dots_0} - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} \right) \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} - V \right) - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} + \frac{1}{\dots_0} \right] \left[\frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{\dots_0} - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \right) + \frac{Y}{S_1^2} \right] \\ &\quad + \frac{jk}{S_2^2 L} \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} - V \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \right) - \frac{jk}{S_1^2 \dots_0^2 L}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{S_1^2} \frac{1}{\dots_0^2} \left(-\frac{1}{\dots_0} + Y \right) + \frac{1}{\dots_0} - V + \frac{1}{S_3^2} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{\dots_0} - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} \right) \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} - V \right) - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} + \frac{1}{\dots_0} \right] \\ &\quad \times \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right] \left(\frac{1}{\dots_0} - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) Y + \frac{1}{\dots_0} - Y \right\} \\ &\quad + \frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} - V \right) \left[\frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right], \end{aligned}$$

$$D = \frac{jk}{S_3^2 L} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots^2} + \frac{1}{\dots^2} \right) \left(\frac{1}{S_1^2 \dots^4} - V \right) - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} + \frac{1}{\dots^2} \right] - E - \frac{jk}{L},$$

$$\begin{aligned} C_x = \exp & \left[\frac{(p_{1x} - p_{2x})^2}{4S_3^2} \left\{ \frac{1}{2S_2^2} \left[\frac{K}{2S_1^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(-\frac{KY}{S_1^2} + \frac{2}{\dots^2} \right) - \frac{Y}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\}^2 \right. \\ & + \frac{p_{1x}^2}{4S_3^2} \left\{ \frac{1}{2S_2^2} \frac{jk}{L} \left[-\frac{KY}{S_1^2} + \frac{1}{\dots^2} \right] \left(1 - \frac{K}{2S_1^2} \right) + \frac{jkY}{S_1^2 L} \right\}^2 - \frac{k^2}{4S_3^2 L^2} p_{2x}^2 \\ & + \frac{p_{1x}(p_{1x} - p_{2x})}{2S_3^2} \left\{ \frac{1}{2S_2^2} \left[\frac{K}{2S_1^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(-\frac{KY}{S_1^2} + \frac{2}{\dots^2} \right) - \frac{Y}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\} \\ & \times \left[\frac{jk}{2LS_2^2} \left(-\frac{KY}{4S_1^2} + \frac{2}{\dots^2} \right) \left(1 - \frac{K}{2S_1^2} \right) + \frac{jkY}{S_1^2 L} \right] \\ & - \frac{p_{2x}(p_{1x} - p_{2x})}{2S_3^2} \left\{ \frac{1}{2S_2^2} \left[\frac{K}{2S_1^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(-\frac{KY}{S_1^2} + \frac{2}{\dots^2} \right) - \frac{Y}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\} \frac{jk}{L} \\ & - \frac{p_{1x}p_{2x}}{2S_3^2} \left\{ \frac{1}{2S_2^2} \frac{jk}{L} \left[-\frac{KY}{S_1^2} + \frac{2}{\dots^2} \right] \left(1 - \frac{K}{2S_1^2} \right) + \frac{jkY}{S_1^2 L} \right\} \frac{jk}{L} + \frac{(p_{1x} - p_{2x})^2}{4S_2^2} \left[\frac{K}{2S_1^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right]^2 \\ & - \frac{k^2 p_{1x}^2}{4S_2^2 L^2} \left(1 - \frac{K}{2S_1^2} \right)^2 + \frac{p_{1x}(p_{1x} - p_{2x})}{2S_2^2} \frac{jk}{L} \left[\frac{K}{2S_1^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(1 - \frac{K}{2S_1^2} \right) \\ & - \frac{k^2 p_{1x}^2}{4S_1^2 L^2} + \frac{(p_{1x} - p_{2x})^2}{4S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right)^2 - \frac{jk}{2S_1^2 L} p_{1x}(p_{1x} - p_{2x}) \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) \\ & \left. - \frac{2}{\dots^0} (p_{1x} - p_{2x})^2 + (Y + V)(p_{1x} - p_{2x})^2 \right] \end{aligned} \quad (3.21)$$

C_y de i keni E . 3.21'de x de i keni yerine y de i keni konularak bulunur. E . 3.21'in, E . 3.20'de yerine konulup bulunan sonuç E . 15'de yerine konulup çözüldü ünde $\langle P^2 \rangle$ a a ıdaki gibi hesaplanmı olur.

$$\langle P^2 \rangle = \frac{f^6 \exp(4\uparrow_{x_s}^2)}{(\}LN)^4} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{\ell=1}^N \sum_{o=1}^N A_n A_m^* A_\ell A_o^* \frac{(-1)^{n+m+\ell+o}}{S_1^2 S_2^2 S_3^2 S_4^2 U_1^2 U_2^2}. \quad (3.22)$$

E . 3.22'de,

$$\begin{aligned}
u_1^2 = & \frac{1}{R^2} - \frac{B^2}{4S_4^2} - \frac{1}{4S_3^2} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots^2} + \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\}^2 \\
& + \frac{k^2}{4S_3^2 L^2} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots^2} + \frac{1}{\dots^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right) + \frac{Y}{S_1^2} \right]^2 \\
& - \frac{jk}{2S_3^2 L} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots^2} + \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\} \\
& \times \left[\frac{1}{S_2^2} \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots^2} + \frac{1}{\dots^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right) + \frac{Y}{S_1^2} \right] - \frac{1}{4S_2^2} \left[\frac{1}{\dots^2 S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right]^2 \\
& + \frac{k^2}{4S_2^2 L^2} \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right)^2 - \frac{1}{2S_2^2} \left[\frac{jk}{S_1^2 \dots^2 L} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{4S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right)^2 \\
& + \frac{k^2}{4S_1^2 L^2} + \frac{1}{2S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) \frac{jk}{L} - \left(Y - \frac{2}{\dots^2} + V \right),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_2^2 = & \frac{k^2}{4S_3^2 L^2} - \frac{1}{4S_3^2} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots^2} + \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\}^2 \\
& - \frac{jk}{2S_3^2 L} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots^2} + \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\} \\
& + \frac{1}{R^2} - \frac{F^2}{4u_1^2} - \frac{D^2}{4S_4^2} - \frac{1}{4S_2^2} \left[\frac{1}{\dots^2 S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right]^2 - \frac{1}{4S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right)^2 - \left(Y - \frac{2}{\dots^2} + V \right),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F = & \frac{BD}{2S_4^2} - \frac{1}{2S_3^2} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\}^2 \\
& - \frac{1}{2S_3^2} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\} \\
& \times \left[\frac{jk}{S_2^2 L} \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right) + \frac{jk}{S_1^2 L} Y \right] - \frac{jk}{2S_3^2 L} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \right. \\
& \times \left. \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\} + \frac{k^2}{2S_3^2 L^2} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right) + \frac{Y}{S_1^2} \right] \\
& - \frac{1}{2S_2^2} \left[\frac{1}{\dots^2 S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right]^2 - \frac{jk}{2S_2^2 L} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right) \\
& - \frac{1}{2S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right)^2 + \frac{jk}{2S_1^2 L} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - 2 \left(Y - \frac{2}{\dots^2} + V \right).
\end{aligned}$$

elindedir.

E . 3.14 kullanılarak, pırlıdama indisi ve hesaplanan pırlıdama indisi formülasyonu ile de alıcı açıklık ortalama faktörü a a ıdaki gibi hesaplanmaktadır [41].

$$G_R = \frac{m_p^2}{m_p^2|_{R=0}} \quad (3.23)$$

E . 3.23'de $m_p^2|_{R=0}$ noktasal açıklı a sahip alıcı düzlemindeki için pırlıdama indisidir.

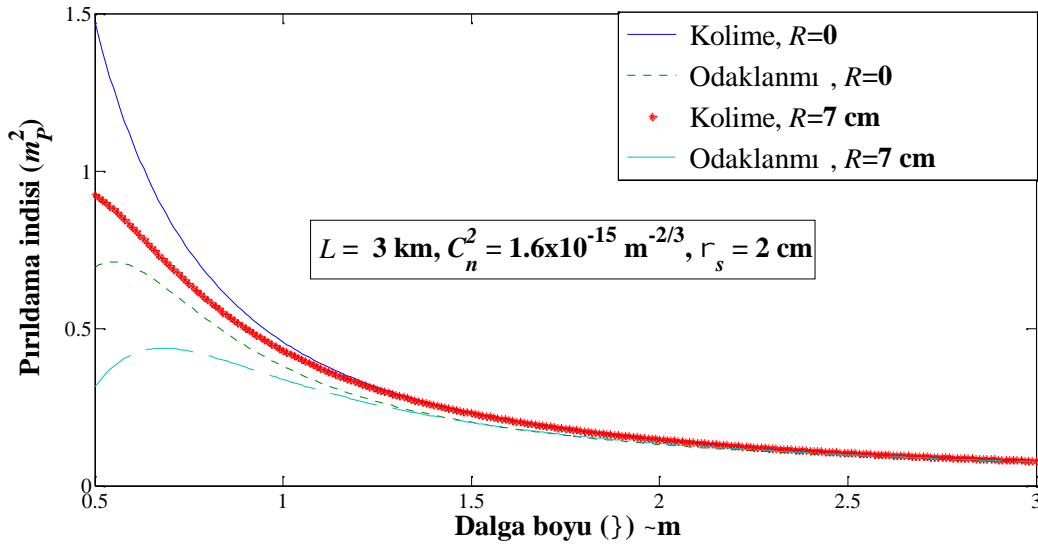
3.2.1 Odaklanmı Gauss I ık Hüzmelerinin Pırlıdama Indisi

R yarıçapında, Gauss formunda açıklı a sahip alıcı düzlemindeki ortalama optik güç $\langle P \rangle$ ve pırlıdama indisi $m_p^2 = (\langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2) / \langle P \rangle$ Ref. [42]'de verilmi tir.

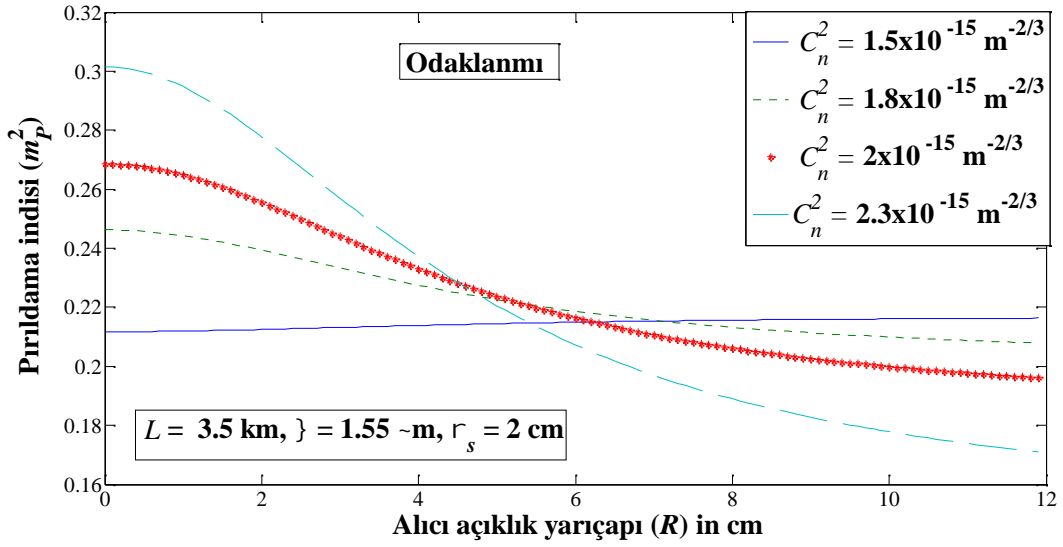
Açıklık ortalamasının pırlıdama indisini azaltmadaki etkisi türbülanslı atmosferde yayılan odaklanmı Gauss ı ık hüzmeleri için incelenmi tir. Odaklanmı Gauss ı ık hüzmelerinin pırlıdama indisi Ref. [42] kullanılarak türbülanslı atmosferden geçtikten sonra farklı yapı sabitleri ve odaklanma parametreleri için yayılım mesafesi, dalga boyu, alıcı açıklık yarıçapına kar ı çizdirilmi tir. Bu çalı ma, Çankaya Üniversitesi'nde gerçekte tirilmi olan 6. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu'nda sunulmu tur [68].

Çalı manın bu kısmında, ekil 3.10 haricindeki tüm ekillerde dalga boyu $\lambda = 1.55 \text{ m}$, ekil 3.15 haricinde di er tüm ekillerde odaklanma parametresi $F=L$ alınmı tır. Ayrıca, tüm ekillerde kaynak boyutu $r_s = 2 \text{ cm}$ alınmı tır. ekil 3.10'da odaklanmı ve kolime Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisi, dalga boyuna kar ı $R=0$ ve $R=7 \text{ cm}$ açıklık yarıçaplarında $L=3 \text{ km}$ 'de, yapı sabiti $C_n^2 = 1.6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ için çizdirilmi tir. Ba langıçta çok küçük dalga boyu de erleri için odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisi dalga boyunun artmasıyla artmı , daha sonra artan dalga boylarına kar ı pırıldama indisi azalmı tır. Odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisi kolime Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisinden daha dü üktür. ekil 3.10, açıklık yarıçapı bakımından de erlendirildi inde, açıklık yarıçapı arttıkça, pırıldama indisinde dü me görölmektedir. ekil 3.11'da farklı yapı sabitlerinde odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisleri açıklık yarıçapına kar ı çizdirilmi tir. ekil 3.10'da yayılım mesafesi $L=3.5 \text{ km}$ alınmı tır. Ba langıçta, sabit bir açıklık yarıçapında, C_n^2 de eri arttıkça pırıldama indisi artmaktadır. Açıklık yarıçapının artmasıyla, pırıldama indisinde dü me gözlemlenmektedir. Büyük açıklıklarda bu durum tersine dönmekte, büyük C_n^2 de erleri için açıklık ortalamasının etkisi ile minimum pırıldama indisi gözlemlenmektedir. ekil 3.12'de farklı yapı sabitlerinde odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisi açıklık yarıçapı $R=9 \text{ cm}$ için yayılım mesafesine kar ı çizdirilmi tir. Belli bir yayılım mesafesine kadar yayılım mesafesinin artmasıyla pırıldama indisi artmaktadır. Ancak belli bir yayılım mesafesinden sonra, örne in $L=3 \text{ km}$, açıklık ortalamasının etkisiyle pırıldama indisi, büyük yapı sabiti de erlerinde dü mektedir. Sabit turulan uzun bir büyük yayılım mesafesinde, açıklık ortalamasının etkisi gözlemlenmekte, C_n^2 'nin artmasıyla pırıldama indisi dü mektedir. ekil 3.13'de ekil 3.12 için alınan de erler alınıp noktasal açıklı ı bulunan alıcı düzlemindeki pırıldama indisi, yayılım mesafesine kar ı çizdirilmi tir. Yayılım mesafesine kar ı odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisi artmakta, sabit bir L de erinde C_n^2 'nin artmasıyla pırıldama indisinde artı gözlemlenmektedir. ekil 3.14'de kolime ve odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisi $R=0$ ve $R=7 \text{ cm}$ açıklıklarında yayılım mesafesine kar ı çizdirilmi tir.

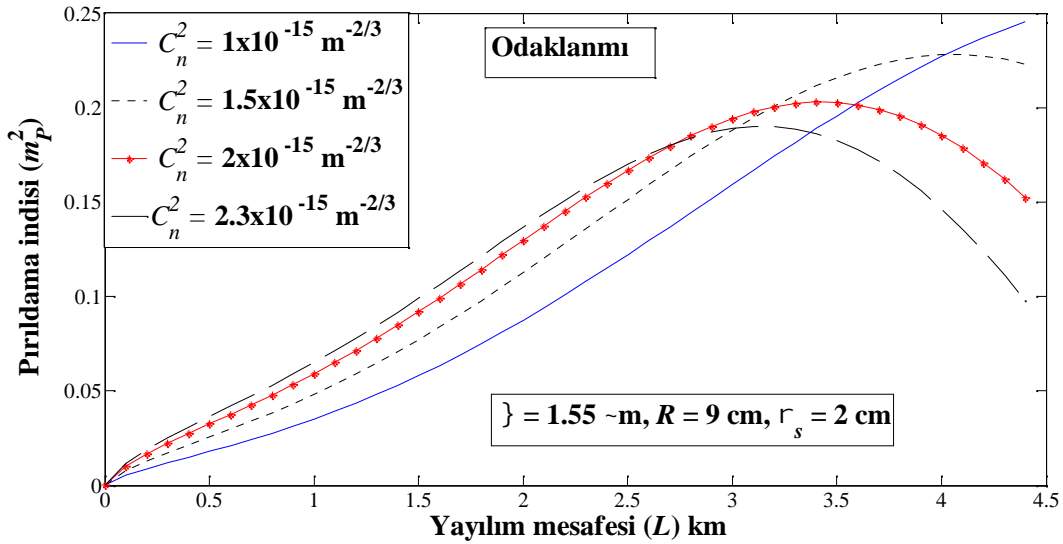
ekil 3.14'de yapı sabiti $C_n^2 = 3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ alınmıştır. Noktasal açıklık a sahip alıcı düzleminde odaklanma ve kolime Gauss ışık hüzmelerinin pırıldama indisi yayılım mesafesinin artmasıyla artmaktadır. Ba langıçta kolime ışık hüzmelerinin pırıldama indisi düşükken, yayılım mesafesinin artmasıyla odaklanma Gauss ışık hüzmelerinin pırıldama indisi kolime Gauss ışık hüzmelerinin pırıldama indisinden daha düşük olmaktadır. Açıklık yarıçapı $R=7 \text{ cm}$ 'ye çıkarıldığında, pırıldama indisi ba langıçta yayılım mesafesinin artmasıyla artmakta, ancak belli bir yayılım mesafesinden sonra, örneğin $L=2.5 \text{ km}$, yayılım mesafesinin artmasıyla pırıldama indisi düşmeye başlamaktadır. Odaklanma Gauss ışık hüzmelerinin pırıldama indisinin tüm yayılım mesafesi boyunca daha düşük olduğu görülmüştür. ekil 3.15'de farklı yayılım mesafelerinde odaklanma Gauss ışık hüzmelerinin pırıldama indisi, açıklık yarıçapına karşı çizdirilmiştir. Burada yayılım mesafesi ve yapı sabiti $L=3.5 \text{ km}$ ve $C_n^2 = 2.3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ olarak alınmıştır. Açıklık yarıçapının artmasıyla pırıldama indisi düşmektedir. Sabit bir açıklık yarıçapında yüksek odaklanma parametreleri için pırıldama indisi de daha büyük olmaktadır.



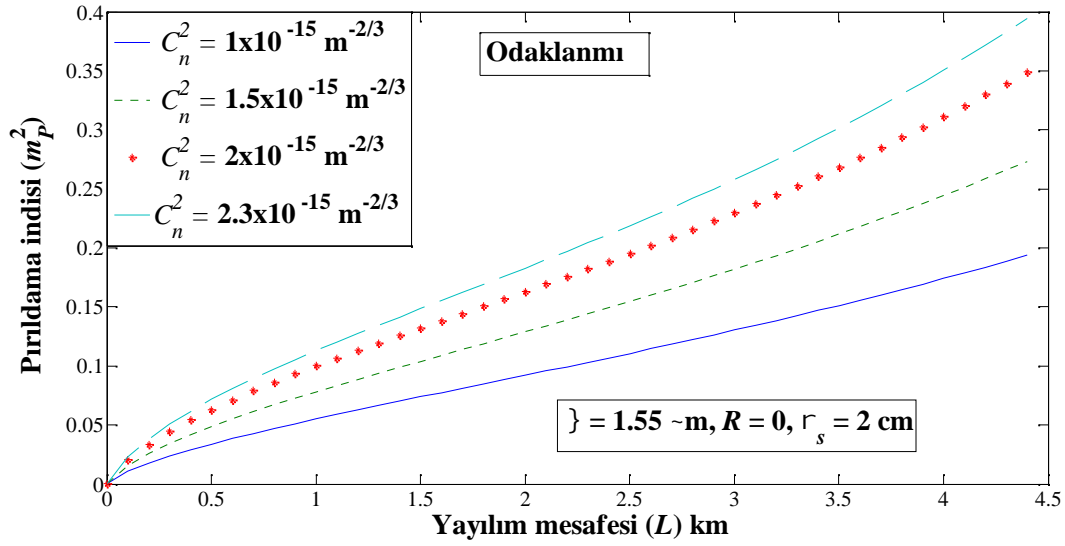
ekil. 3.10. Odaklanma ve kolime Gauss ışık hüzmelerinin pırıldama indisinin dalga boyuna karşı $R=0$ ve $R=7 \text{ cm}$ açıklıklarında değişimi.



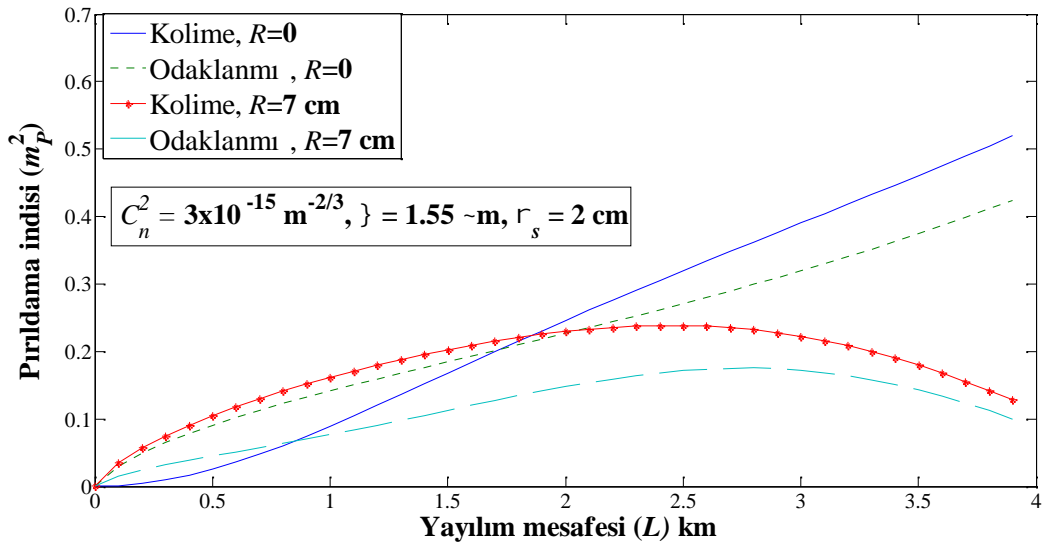
ekil. 3.11. Odaklanmı Gauss ı k hüzmelelerinin farklı yapı sabitlerinde $L = 3.5 \text{ km}$, $} = 1.55 \text{ ~m}$ ve $r_s = 2 \text{ cm}$ 'de pırladama indisinin açıklık yarıçapına kar ı de i imi.



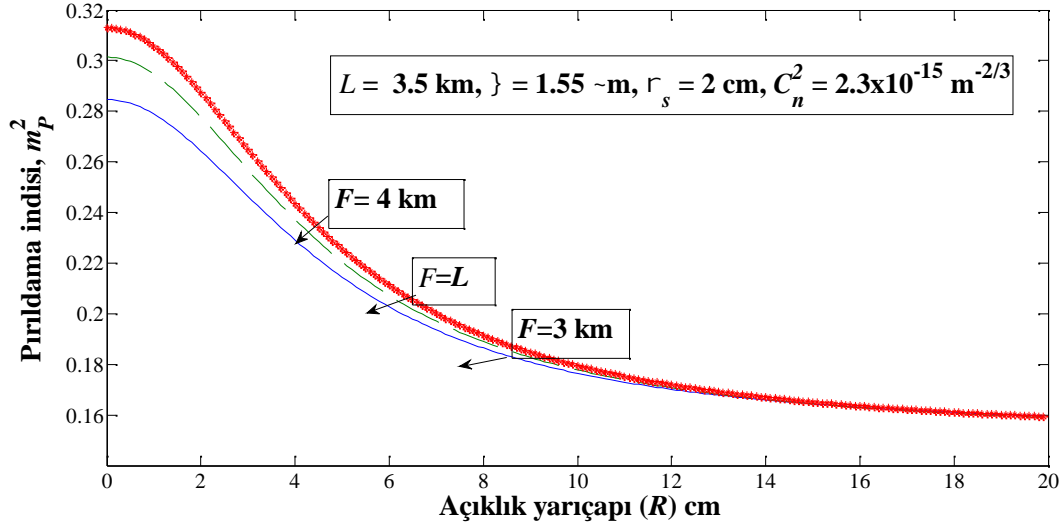
ekil. 3.12. Odaklanmı Gauss ı k hüzmelelerinin farklı yapı sabitlerinde $R = 9 \text{ cm}$, $} = 1.55 \text{ ~m}$ ve $r_s = 2 \text{ cm}$ 'de pırladama indisinin yayılım mesafesine kar ı de i imi.



ekil. 3.13. Odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin farklı yapı sabitlerinde noktasal açıklık için $\lambda = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$ ve $r_s = 2 \text{ cm}$ 'de pırıldama indisinin yayılım mesafesine karşı değişimi.



ekil. 3.14. Odaklanmı ve kolime Gauss ı k hüzmelerinin açıklık yarıçaplarında, $C_n^2 = 3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $\lambda = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$ ve $r_s = 2 \text{ cm}$ 'de pırıldama indisinin yayılım mesafesine karşı değişimi.



ekil. 3.15. $L=3.5$ km, $\gamma = 1.55$ ~m ve $r_s = 2$ ve $C_n^2 = 2.3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ için farklı odaklanma parametrelerine sahip odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisinin açıklık yarıçapına karşı değişimi.

Elde edilen pırıldama indisi profilleri incelendi inde, açıklık yarıçapının pırıldama indisini düürmedeki etkisinin yüksek yayılım mesafeleri ve yapı sabitlerinde arttı ı görülmektedir. Odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisi kolime Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisine göre daha düüktür. Dalga boyunun artmasıyla, odaklanmı Gauss ı k hüzmelerinin pırıldama indisi dümekte, açıklık yarıçapının artırılmasıyla bu etki daha da artmaktadır. Odaklanmı Gauss ı k hüzmelerin pırıldama indisi yayılım mesafesine karşı artmakta, ancak açıklık yarıçapının artmasıyla, belli bir yayılım mesafesinden sonra pırıldama indisinde düme gözlemlenmektedir.

3.2.2 Düz Tepeli ı k Hüzmelerinin Pırıldama ndisi ve Alıcı Açıklık Ortalama Faktörü

Düz tepeli ı k hüzmelerinin Gauss formunda açıklı a sahip alıcı düzleminde olu turdu u pırıldama indisi E . 3.14 kullanılarak hesaplanmı tır. Düz tepeli ı k hüzmelerinin ortalama optik gücü E . 3.11'de hesaplanmı tır. E . 3.10, E . 3.16'da

yerine konularak $\langle I(\mathbf{p}_1)I(\mathbf{p}_2) \rangle$ hesaplanmıştır. Daha sonra bulunan E . 3.16, E . 3.15'de yerine konularak $\langle P^2 \rangle$ a a ıdaki gibi hesaplanır [53].

$$\langle P^2 \rangle = \frac{f^6 \exp(4\uparrow_{x_s}^2)}{(\}LN)^4} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{\ell=1}^N \sum_{o=1}^N \frac{(-1)^{n+m+\ell+o}}{S_1^2 S_2^2 S_3^2 S_4^2 u_1^2 u_2^2} \binom{N}{n} \binom{N}{m} \binom{N}{\ell} \binom{N}{o}. \quad (3.24)$$

E . 3.24'de

$$S_1^2 = \frac{n}{2r_s^2} - \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - Y, \quad S_2^2 = -\frac{1}{S_1^2 \dots_4} + \dots_1^2, \quad S_3^2 = -\frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{\dots_0} - \frac{Y}{S_1^2 \dots_2} \right)^2 - \frac{Y^2}{S_1^2} + g_1^2,$$

$$S_4^2 = -\frac{1}{S_3^2} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots_2} + \frac{1}{\dots_0} \right) \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_4} - V \right) - \frac{Y}{S_1^2 \dots_2} + \frac{1}{\dots_0} \right]^2 - \frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_4} - V \right)^2 - \frac{1}{S_1^2 \dots_4} + \dots_1^2,$$

$$\dots_1^2 = \frac{m}{2r_s^2} + \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - V, \quad g_1^2 = \frac{\ell}{2r_s^2} - \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - Y, \quad \dots_1^2 = \frac{o}{2r_s^2} + \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - V,$$

$$\begin{aligned} u_1^2 = & \frac{1}{R^2} - \frac{B^2}{4S_4^2} - \frac{1}{4S_3^2} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots_2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots_2} + \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) Y + \frac{1}{\dots_0} - Y \right\}^2 \\ & + \frac{k^2}{4S_3^2 L^2} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots_2} + \frac{1}{\dots_0} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots_2} \right) + \frac{Y}{S_1^2} \right]^2 \\ & - \frac{jk}{2S_3^2 L} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots_2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots_2} + \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(-\frac{1}{\dots_0} + Y \right) Y + \frac{1}{\dots_0} - Y \right\} \\ & \times \left[\frac{1}{S_2^2} \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots_2} + \frac{1}{\dots_0} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots_2} \right) + \frac{Y}{S_1^2} \right] - \frac{1}{4S_2^2} \left[\frac{1}{\dots_2 S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right]^2 \\ & + \frac{k^2}{4S_2^2 L^2} \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots_2} \right)^2 - \frac{1}{2S_2^2} \left[\frac{jk}{S_1^2 \dots_2 L} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right] \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots_2} \right) - \frac{1}{4S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right)^2 \\ & + \frac{k^2}{4S_1^2 L^2} + \frac{1}{2S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) \frac{jk}{L} - \left(Y - \frac{2}{\dots_0} + V \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_2^2 = & \frac{k^2}{4S_3^2 L^2} - \frac{1}{4S_3^2} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0^2} \right) - \frac{1}{\dots_0^2} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} + \frac{1}{\dots_0^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0^2} \right) Y + \frac{1}{\dots_0^2} - Y \right\}^2 \\
& - \frac{jk}{2S_3^2 L} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \left(-\frac{1}{\dots_0^2} + Y \right) - \frac{1}{\dots_0^2} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} + \frac{1}{\dots_0^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0^2} \right) Y + \frac{1}{\dots_0^2} - Y \right\} \\
& + \frac{1}{R^2} - \frac{F^2}{4u_1^2} - \frac{D^2}{4S_4^2} - \frac{1}{4S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0^2} \right) - \frac{1}{\dots_0^2} + V \right]^2 - \frac{1}{4S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0^2} \right)^2 - \left(Y - \frac{2}{\dots_0^2} + V \right),
\end{aligned}$$

$$V = \frac{j}{\dots_{TS}^2} + \frac{1}{\dots_x^2}, \quad Y = -\frac{j}{\dots_{TS}^2} + \frac{1}{\dots_x^2},$$

$$\begin{aligned}
B = E + & \frac{jk}{S_3^2 L} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{\dots_0^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} \right) \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} - V \right) - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} + \frac{1}{\dots_0^2} \right] \left[\frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{\dots_0^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \right) + \frac{Y}{S_1^2} \right] \\
& + \frac{jk}{S_2^2 L} \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} - V \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \right) - \frac{jk}{S_1^2 \dots_0^2 L},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E = & \frac{1}{S_1^2} \frac{1}{\dots_0^2} \left(-\frac{1}{\dots_0^2} + Y \right) + \frac{1}{\dots_0^2} - V + \frac{1}{S_3^2} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{\dots_0^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} \right) \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} - V \right) - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} + \frac{1}{\dots_0^2} \right] \\
& \times \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0^2} \right) - \frac{1}{\dots_0^2} + V \right] \left(\frac{1}{\dots_0^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots_0^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0^2} \right) Y + \frac{1}{\dots_0^2} - Y \right\} \\
& + \frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} - V \right) \left[\frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0^2} \right) - \frac{1}{\dots_0^2} + V \right],
\end{aligned}$$

$$D = \frac{jk}{S_3^2 L} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(-\frac{1}{S_1^2 \dots_0^2} Y + \frac{1}{\dots_0^2} \right) \left(\frac{1}{S_1^2 \dots_0^4} - V \right) - \frac{1}{S_1^2} \frac{1}{\dots_0^2} Y + \frac{1}{\dots_0^2} \right] - E - \frac{jk}{L},$$

ve

$$\begin{aligned}
F = & \frac{BD}{2S_4^2} - \frac{1}{2S_3^2} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\}^2 \\
& - \frac{1}{2S_3^2} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\} \\
& \times \left[\frac{jk}{S_2^2 L} \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right) + \frac{jk}{S_1^2 L} Y \right] - \frac{jk}{2S_3^2 L} \left\{ \frac{1}{S_2^2} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \right. \\
& \times \left. \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{S_1^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\} + \frac{k^2}{2S_3^2 L^2} \left[\frac{1}{S_2^2} \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_1^2 \dots^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right) + \frac{Y}{S_1^2} \right] \\
& - \frac{1}{2S_2^2} \left[\frac{1}{\dots^2 S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right]^2 - \frac{jk}{2S_2^2 L} \left[\frac{1}{S_1^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(1 - \frac{1}{S_1^2 \dots^2} \right) \\
& - \frac{1}{2S_1^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right)^2 + \frac{jk}{2S_1^2 L} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - 2 \left(Y - \frac{2}{\dots^2} + V \right).
\end{aligned}$$

ekindedir.

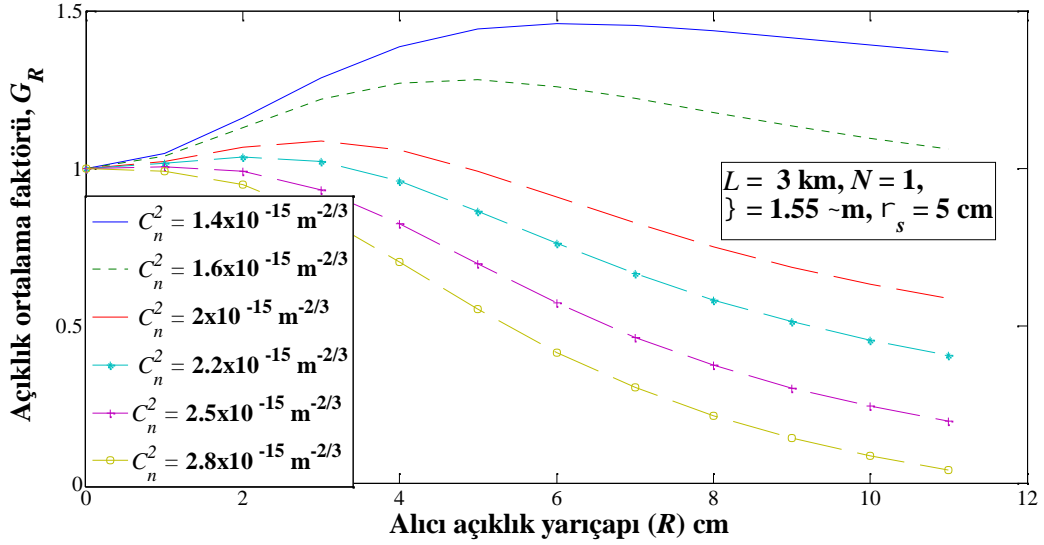
Bu bölümde, E . 3.24'de hesaplanan türbülanslı atmosferde yayılan düz tepeli ı ık hüzmelerinin Gauss formunda açıklı a sahip alıcı düzleminde olu turdu u pırıldama indisi ve E . 3.24'ün E . 3.23'de yerine konulmasıyla elde edilen alıcı açıklık ortalama faktörü Matlab programlama dili kullanılarak alıcı açıklık yarıçapı, Gauss kaynak boyutu ve yayılım mesafesine kar ı çizdirilmi tir.

Tüm ekillerde dalga boyu } = 1.55 ~m ve ekil 3.19, ekil 3.21, ekil 3.22 ve ekil 3.23 haricinde di er tüm ekillerde yayılım mesafesi $L = 3$ km alınmı tır. ekil 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 ve 3.20'da odaklanma parametresi sonsuz alınarak kolime düz tepeli ı ık hüzmelerinin pırıldama indisi ve alıcı açıklık etkileri incelenmi olup, ekil 3.21, 3.22 ve 3.23'de odaklanma parametresi $F=L$ alınarak odaklanmı düz tepeli ı ık hüzmelerinin yayılımında pırıldama indisi ve alıcı açıklık etkileri incelenmi tir. Bulunan sonuçlar Gauss ı ık hüzmelerinin pırıldama indisine indirgenip Ref. [42] ile kar ıla tırıldı nda uyumluluk görülmektedir. Ayrıca, bulunan sonuçlar Ref. [48]'de incelenen noktasal açıklı a sahip alıcı düzleminde koherent düz tepeli ı ık hüzmelerinin pırıldama indisi ile uyumluluk göstermektedir. ekil 3.16'de Gauss ı ık

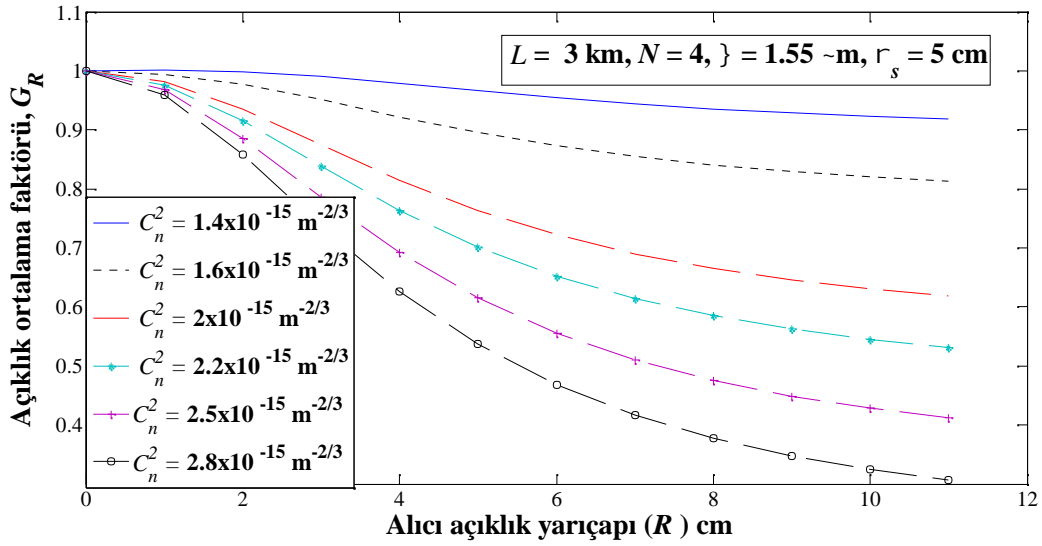
hüzmesine indirgenmiş düz tepeli ıık hüzmelerinin alıcı açıklık ortalama faktörü alıcı açıklık yarıçapına karşı farklı C_n^2 değerleri için Gauss kaynak boyutu $r_s = 5$ cm için çizdirilmiştir. Bulunan sonuçların Ref. [42] ile tutarlı olduğu görülmüştür. Eşil 3.16'dan da görüldüğü gibi C_n^2 değeri arttıkça belli bir R alıcı açıklık yarıçapı değerinden sonra, pıııldama indisi dümeye başlamakta ve alıcı açıklık ortalamasının etkisi artmaktadır. Düşük C_n^2 değerleri için, alıcı açıklık ortalamasının etkisi söz konusu değildir. Eşil 3.17'de alıcı açıklık ortalama faktörü düzleştirme parametresi $N=4$ olan düz tepeli ıık hüzmeleri için alıcı açıklık yarıçapına karşı çizdirilmiştir. Eşil 3.16 ve eşil 3.17 karşılaştırıldığında, alıcı açıklık ortalamasının büyük düzleştirme parametrelerinde artan açıklık yarıçapları için etkili olduğu görülmektedir.

Eşil 3.18'de alıcı açıklık ortalama faktörü Gauss kaynak boyutuna karşı düz tepeli ve Gauss ıık hüzmeleri için farklı açıklık yarıçaplarında çizdirilmiştir. Burada, Eşil 3.14'de yapılan normalizasyondan dolayı ($N=1, R=0$) ve ($N=8, R=0$) değerleri tüm Gauss kaynak değerleri için aynı olup sabit olup 1 değerini vermektedir. Eşil 3.18'den çıkarılan sonuç, alıcı açıklık ortalamasının etkisi büyük kaynak boyutuna sahip düz tepeli ıık hüzmeleri için daha fazlayken, Gauss ıık hüzmeleri için düşük kaynak boyutlarında daha fazladır. Eşil 3.19, yayılım mesafesine karşı pıııldama indisini farklı Gauss kaynak boyutlarında düz tepeli ve Gauss ıık hüzmeleri için göstermektedir. Eşil 3.19'de yapı sabiti ve alıcı açıklık yarıçapı sırasıyla, $C_n^2 = 1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $R=9$ cm olarak alınmıştır. Eşil 3.19'dan görüldüğü gibi düşük yayılım mesafelerinde pıııldama indisi her iki ıık hüzmeleri için de önce yayılım mesafesinin artmasıyla artmaktadır. Fakat yayılım mesafesi belli bir değere ulaştıktan sonra, bu durum tersine dönmektedir. Sabit bir düşük yayılım mesafesinde, küçük kaynak boyutuna sahip düz tepeli ve Gauss ıık hüzmeleri düşük pıııldama indisine sahiptir. Ayrıca, eşil 3.19'den yine sabit bir düşük yayılım mesafesinde yayılmakta olan hüzmeye düz tepeli ıık hüzmeleri olduğu unda, pıııldama indisinin düzleştirildiği görülmektedir. Bu durum, büyük yayılım mesafelerinde tersine dönmektedir. Eşil 3.20, açıklık ortalama faktörü ile alıcı açıklık yarıçapı arasındaki ilişkiyi artan N değerleri için göstermektedir. Eşil 3.20'de, yapı sabiti ve Gauss

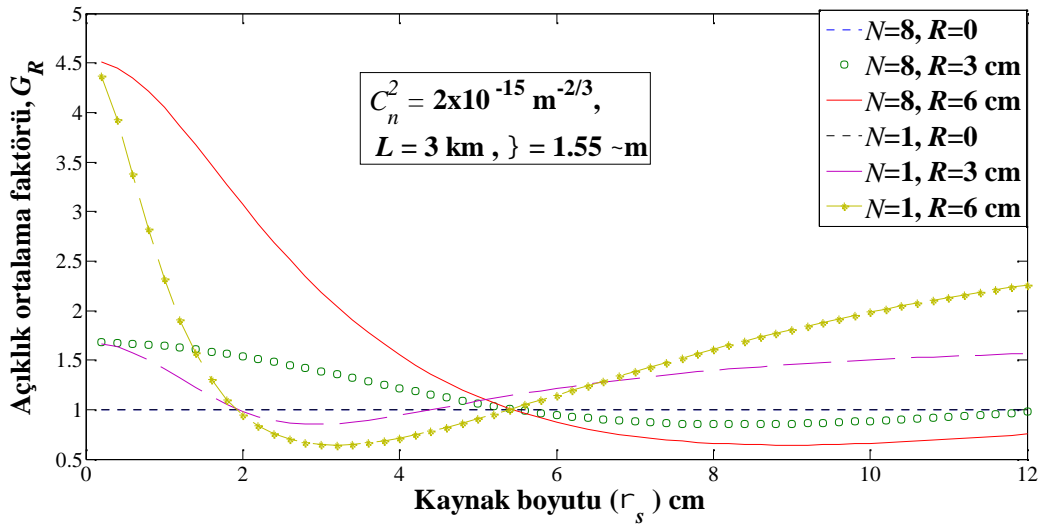
kaynak boyutu sırasıyla, $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $r_s = 9 \text{ cm}$ alınmıştır. Ekilden alıcı açıklık ortalamasının büyük düzle tirme parametresine sahip düz tepeli ışık hüzmeleri için alıcı açıklık yarıçapından bağımsız olarak etkili olduğu görülmektedir. Büyük düzle tirme parametreleri için, alıcı açıklık ortalama etkisi yoktur, fakat; büyük açıklık yarıçaplarında alıcı açıklık ortalamasının etkisi söz konusu olmaktadır [53].



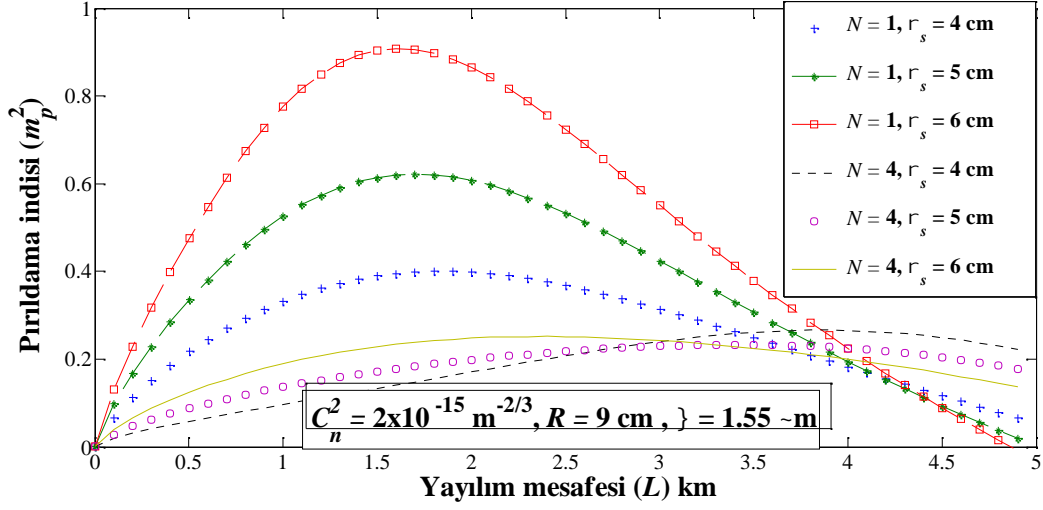
ekil 3.16. Alıcı açıklık yarıçapına karşı farklı yapı sabiti değerlerinde $L=3 \text{ km}$, $N=1$, $\alpha = 1.55^{-m}$ ve $r_s = 5 \text{ cm}$ değerleri için açıklık ortalama faktörü.



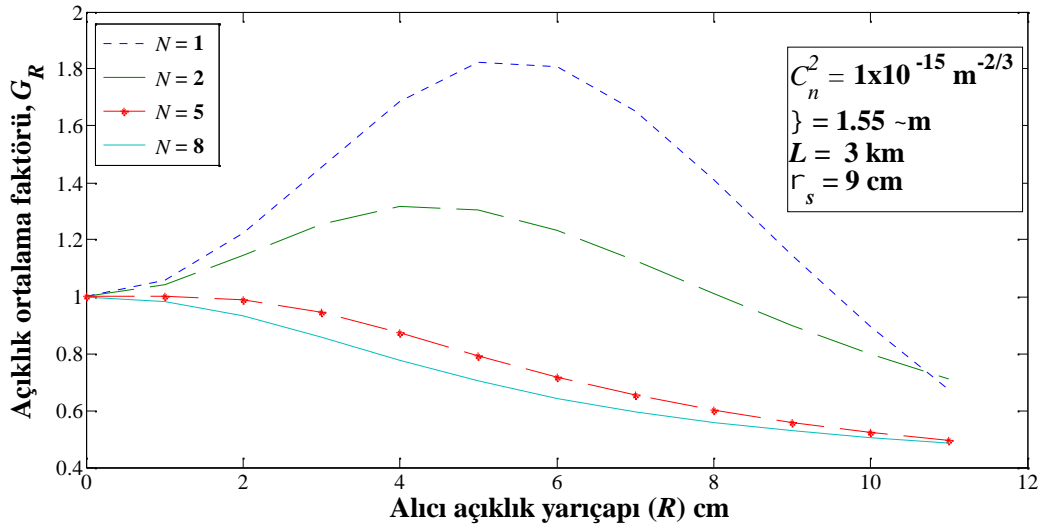
ekil 3.17. Alıcı açıklık yarıçapına karşı farklı yapı sabiti değerlerinde $L=3$ km, $N=4$, $\alpha = 1.55$ m^{-m} ve $r_s = 5$ cm değerleri için açıklık ortalama faktörü.



ekil 3.18. Kaynak boyutuna karşı farklı N ve R değerleri için $C_n^2 = 2 \times 10^{-15}$ m^{-2/3}, $L=3$ km, ve $\alpha = 1.55$ m^{-m} değerlerinde açıklık ortalama faktörü.

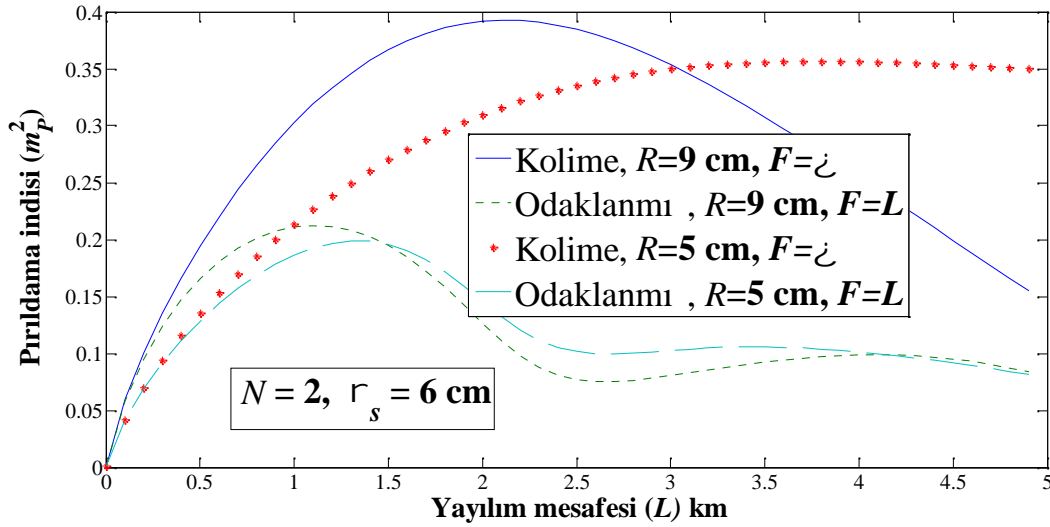


ekil 3.19. Yayılım mesafesine kar ı farklı N ve r_s de erlerinde $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $R=9 \text{ cm}$, $\} = 1.55 \text{ ~m}$ de erleri için pırlıdaması indisi.



ekil 3.20. Farklı N de erleri için $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $\} = 1.55 \text{ ~m}$, $L=3 \text{ km}$ ve $r_s = 9 \text{ cm}$ için alıcı açıklık yarıçapına kar ı açıklık ortalama faktörü.

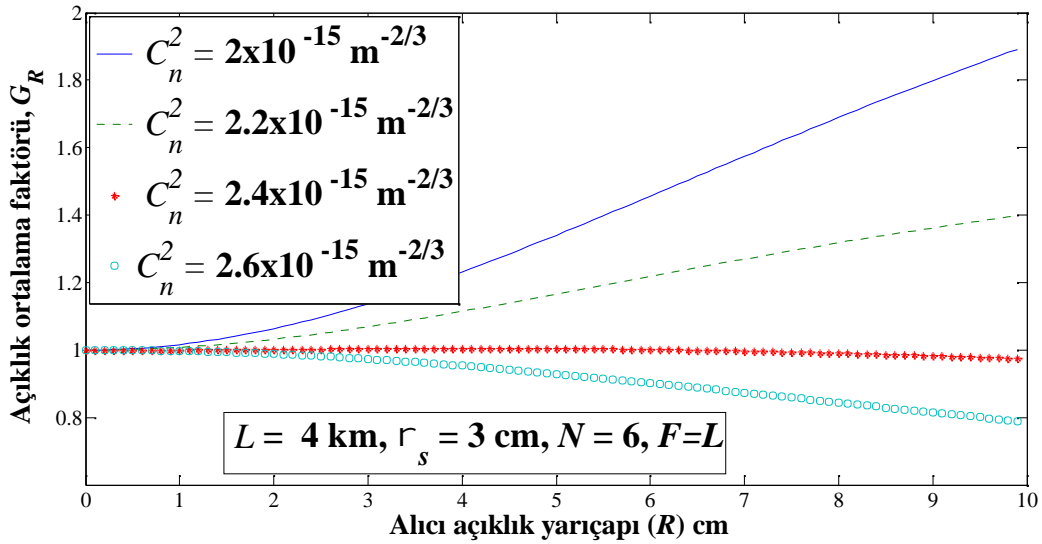
ekil 3.21’de kolime ve odaklanmı düz tepeli ıık hüzmelerinin pırıldama indisi yayılım mesafesine kar ı farklı alıcı açıklık yarıçaplarında çizdirilmi tir. ekil 3.21’de Gauss kaynak boyutu $r_s = 6$ cm ve düzle tirme parametresi $N=2$ alınmı tir. ekil 3.21’den görüldü ü gibi tüm yayılım mesafelerinde kolime ıık hüzmelerinin pırıldama indisi de eri odaklanmı ıık hüzmelerinin pırıldama indisi de erine göre daha büyüktür. Pırıldama indisi, ba langıçta yayılım mesafesinin artmasıyla artmaktadır. Fakat belli bir yayılım mesafesinden sonra bu durum tersine dönmektedir. Odaklanmı düz tepeli ıık hüzmelerinde daha dü ük yayılım mesafelerinde bu e ilim tersine dönmektedir. ekil 3.21, alıcı açıklık yarıçapı etkisi bakımından incelendi inde, alıcı açıklık yarıçapı daha büyük olan hüzmeler küçük yayılım mesafelerinde yüksek pırıldama indisine sahiptir. Bu durum, büyük yayılım mesafelerinde alıcı açıklık ortalamasınının da etkisiyle tersine dönmektedir.



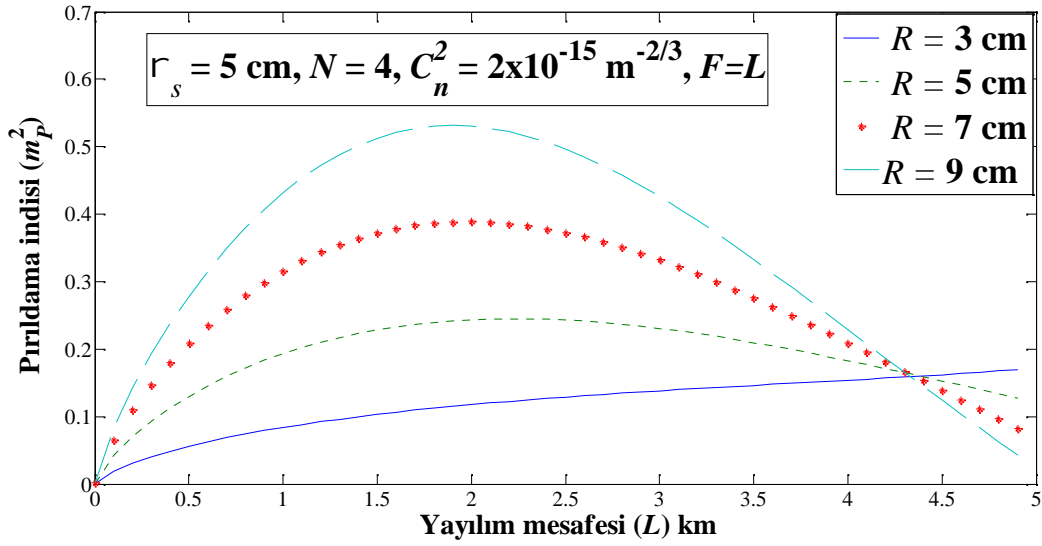
ekil 3.21. Kolime ve odaklanmı düz tepeli ıık hüzmeleri için farklı açıklık yarıçaplarında $N=2$, $\lambda = 1.55$ μ m ve $r_s = 6$ cm için yayılım mesafesine kar ı pırıldama indisi.

ekil 3.22, artan yapı sabitlerinde alıcı açıklık ortalama faktörü ile alıcı açıklık yarıçapı arasındaki ili kiyi $L = 4$ km, $N=4$ ve $r_s = 3$ cm için göstermektedir. ekil 3.22’den, alıcı

açıklık ortalamasının büyük yapı sabitlerinde, artan alıcı açıklık yarıçaplarında etkisinin güçlü olduğu görülmektedir. Küçük yapı sabiti değerleri için alıcı açıklık etkisi görülmemektedir. Şekil 3.23'de pırıldama indisi yayılım mesafesine karşı, kaynak boyutu, düzeltme parametresi ve yapı sabiti değerleri sırasıyla $r_s = 5$ cm, $N=4$, $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ alınarak çizdirilmiştir. Küçük yayılım mesafelerinde, pırıldama indisi yayılım mesafesinin artmasıyla artmaktadır. Fakat yayılım mesafesi belli bir değere ulaştıktan sonra, bu durum tersine dönmektedir. Sabit bir küçük yayılım mesafesinde, pırıldama indisi açıklık yarıçapının artmasıyla artmaktadır. Çalışmanın bu kısmı 34. PIERS Uluslararası konferansında sunulmak üzere kabul edilmiştir [69].



Şekil 3.22. Farklı yapı sabiti değerleri için $L = 4$ km, $\lambda = 1.55$ m, $r_s = 3$ cm ve $N=6$ için alıcı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.



ekil 3.23. Farklı açıklık yarıçaplarında $\sigma = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$, $r_s = 5 \text{ cm}$, $N=4$ ve $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ için yayılım mesafesine karşılık pırlıdama indisi.

3.2.3 Halkasal I ık Hüzmelerinin Pırlıdama İndisi ve Alıcı Açıklık Ortalama Faktörü

Yayılım ekseninin merkezinde konumlanmı halkasal ı ık hüzmesinin kaynak düzleminde oluşturdu u alan E . 3.12'de verilmi tir. Gauss formunda açıklk a sahip alıcı düzlemindeki ortalama optik güç E . 3.13'de hesaplanarak bulunmu tur. E . 3.12, E . 3.16'da yerine konularak geni letilmi Huygens-Fresnel integrali ile $\langle I(\mathbf{p}_1)I(\mathbf{p}_2) \rangle$, ve sonrasında bulunan $\langle I(\mathbf{p}_1)I(\mathbf{p}_2) \rangle$ E . 3.15'de yerine konularak $\langle P^2 \rangle$ a a ıdaki gibi bulunur:

$$\langle P^2 \rangle = \frac{f^6 \exp(4t_{xs}^2)}{(\sigma L)^4} \sum_{\ell=1}^{16} Q_{\ell} \frac{1}{S_{\ell}^2 \chi_{\ell}^2 \{ \ell^2 u_{\ell}^2 t_{\ell}^2 [\ell^2] }}, \quad (3.25)$$

E . 3.25'de,

$$S_m^2 = \frac{1}{2r_{s1}^2} - \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - Y \quad m=1, \dots, 8 \text{ için}, \quad S_n^2 = \frac{1}{2r_{s2}^2} - \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - Y, \quad n=9, \dots, 16 \text{ için},$$

$Q_\ell = 1$ tüm ℓ de erleri ve $Q_3 = Q_{16} = -1$ haricindeki de erler için,

$$"1^2 = \frac{1}{2r_{s1}^2} + \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - V, \quad "2^2 = "3^2 = "4^2 = "9^2 = "10^2 = "11^2 = "12^2 = "1^2,$$

$$"5^2 = \frac{1}{2r_{s2}^2} + \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - V, \quad "6^2 = "7^2 = "8^2 = "13^2 = "14^2 = "15^2 = "16^2 = "5^2,$$

$$V = \frac{j}{\dots_{ts}} + \frac{1}{\dots_x}, \quad Y = -\frac{j}{\dots_{ts}} + \frac{1}{\dots_x}, \quad x_\ell^2 = -\frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} + " \ell^2, \quad \{ \ell^2 = -\frac{1}{x_\ell^2} \left(\frac{1}{\dots_0} - \frac{Y}{S_{\ell \dots_0}^2} \right)^2 - \frac{Y^2}{S_\ell^2} + g_\ell^2,$$

$$g_1^2 = \frac{1}{2r_{s1}^2} - \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - Y, \quad g_2^2 = g_5^2 = g_6^2 = g_9^2 = g_{10}^2 = g_{13}^2 = g_{14}^2 = g_1^2,$$

$$g_3^2 = \frac{1}{2r_{s2}^2} - \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - Y, \quad g_4^2 = g_7^2 = g_8^2 = g_{11}^2 = g_{12}^2 = g_{15}^2 = g_{16}^2 = g_3^2,$$

$$u_\ell^2 = -\frac{1}{\{ \ell^2} \left[\frac{1}{x_\ell^2} \left(-\frac{Y}{S_{\ell \dots_0}^2} + \frac{1}{\dots_0} \right) \left(\frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} - V \right) - \frac{Y}{S_{\ell \dots_0}^2} + \frac{1}{\dots_0} \right]^2 - \frac{1}{x_\ell^2} \left(\frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} - V \right)^2 - \frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} + \langle \ell^2,$$

$$\langle 1^2 = \frac{1}{2r_{s1}^2} + \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - V, \quad \langle 3^2 = \langle 5^2 = \langle 7^2 = \langle 9^2 = \langle_{11}^2 = \langle_{13}^2 = \langle_{15}^2 = \langle_1^2,$$

$$\langle 2^2 = \frac{1}{2r_{s2}^2} + \frac{jk}{2L} + \frac{2}{\dots_0} - V, \quad \langle 4^2 = \langle 6^2 = \langle 8^2 = \langle_{10}^2 = \langle_{12}^2 = \langle_{14}^2 = \langle_{16}^2 = \langle_2^2,$$

$$\begin{aligned} t_\ell^2 = & \frac{1}{R^2} - \frac{B_\ell^2}{4u_\ell^2} - \frac{1}{4\{ \ell^2} \left\{ \frac{1}{x_\ell^2} \left[\frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_{\ell \dots_0}^2} + \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{S_\ell^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) Y + \frac{1}{\dots_0} - Y \right\}^2 \\ & + \frac{k^2}{4\{ \ell^2 L^2} \left[\frac{1}{x_\ell^2} \left(-\frac{Y}{S_{\ell \dots_0}^2} + \frac{1}{\dots_0} \right) \left(1 - \frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} \right) + \frac{Y}{S_\ell^2} \right]^2 - \frac{jk}{2\{ \ell^2 L} \left\{ \frac{1}{x_\ell^2} \left[\frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right] \right. \right. \\ & \times \left. \left(-\frac{Y}{S_{\ell \dots_0}^2} + \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{S_\ell^2} \left(-\frac{1}{\dots_0} + Y \right) Y + \frac{1}{\dots_0} - Y \right\} \left[\frac{1}{x_\ell^2} \left(-\frac{Y}{S_{\ell \dots_0}^2} + \frac{1}{\dots_0} \right) \left(1 - \frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} \right) + \frac{Y}{S_\ell^2} \right] \\ & - \frac{1}{4x_\ell^2} \left[\frac{1}{\dots_0 S_\ell^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right]^2 + \frac{k^2}{4x_\ell^2 L^2} \left(1 - \frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} \right)^2 - \frac{1}{2x_\ell^2} \left[\frac{jk}{S_{\ell \dots_0}^2 L} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) - \frac{1}{\dots_0} + V \right] \\ & \times \left(1 - \frac{1}{S_{\ell \dots_0}^2} \right) - \frac{1}{4S_\ell^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right)^2 + \frac{k^2}{4S_\ell^2 L^2} + \frac{1}{2S_\ell^2} \left(Y - \frac{1}{\dots_0} \right) \frac{jk}{L} - \left(Y - \frac{2}{\dots_0} + V \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[\]^2 &= \frac{k^2}{4\{\ell^2 L^2} - \frac{1}{4\{\ell^2} \left\{ \frac{1}{x_\ell^2} \left[\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots 2} \right) - \frac{1}{\dots 2} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_{\ell \dots 0}^2} + \frac{1}{\dots 2} \right) - \frac{1}{S_\ell^2} \left(Y - \frac{1}{\dots 2} \right) Y + \frac{1}{\dots 2} - Y \right\}^2} \\
&\quad - \frac{jk}{2\{\ell^2 L} \left\{ \frac{1}{x_\ell^2} \left[\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \left(-\frac{1}{\dots 2} + Y \right) - \frac{1}{\dots 2} + V \right] \left(-\frac{Y}{S_{\ell \dots 0}^2} + \frac{1}{\dots 2} \right) - \frac{1}{S_\ell^2} \left(Y - \frac{1}{\dots 2} \right) Y + \frac{1}{\dots 2} - Y \right\} \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{R^2} - \frac{F_\ell^2}{4t_\ell^2} - \frac{D_\ell^2}{4u_\ell^2} - \frac{1}{4x_\ell^2} \left[\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots 2} \right) - \frac{1}{\dots 2} + V \right]^2 - \frac{1}{4S_\ell^2} \left(Y - \frac{1}{\dots 2} \right)^2 - \left(Y - \frac{2}{\dots 2} + V \right), \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_\ell &= E_\ell + \frac{jk}{\{\ell^2 L} \left[\frac{1}{x_\ell^2} \left(\frac{1}{\dots 2} - \frac{Y}{S_{\ell \dots 0}^2} \right) \left(\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} - V \right) - \frac{Y}{S_{\ell \dots 0}^2} + \frac{1}{\dots 2} \right] \\
&\quad \times \left[\frac{1}{x_\ell^2} \left(\frac{1}{\dots 2} - \frac{Y}{S_{\ell \dots 0}^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \right) + \frac{Y}{S_\ell^2} \right] + \frac{jk}{x_\ell^2 L} \left(\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} - V \right) \left(1 - \frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \right) - \frac{jk}{S_{\ell \dots 0}^2 L},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_\ell &= \frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \frac{1}{\dots 2} \left(-\frac{1}{\dots 2} + Y \right) + \frac{1}{\dots 2} - V + \frac{1}{\{\ell^2} \left[\frac{1}{x_\ell^2} \left(\frac{1}{\dots 2} - \frac{Y}{S_{\ell \dots 0}^2} \right) \left(\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} - V \right) - \frac{Y}{S_{\ell \dots 0}^2} + \frac{1}{\dots 2} \right] \\
&\quad \times \left\{ \frac{1}{x_\ell^2} \left[\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots 2} \right) - \frac{1}{\dots 2} + V \right] \left(\frac{1}{\dots 2} - \frac{Y}{S_{\ell \dots 0}^2} \right) - \frac{1}{S_\ell^2} \left(Y - \frac{1}{\dots 2} \right) Y + \frac{1}{\dots 2} - Y \right\} \\
&\quad + \frac{1}{x_\ell^2} \left(\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} - V \right) \left[\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots 2} \right) - \frac{1}{\dots 2} + V \right],
\end{aligned}$$

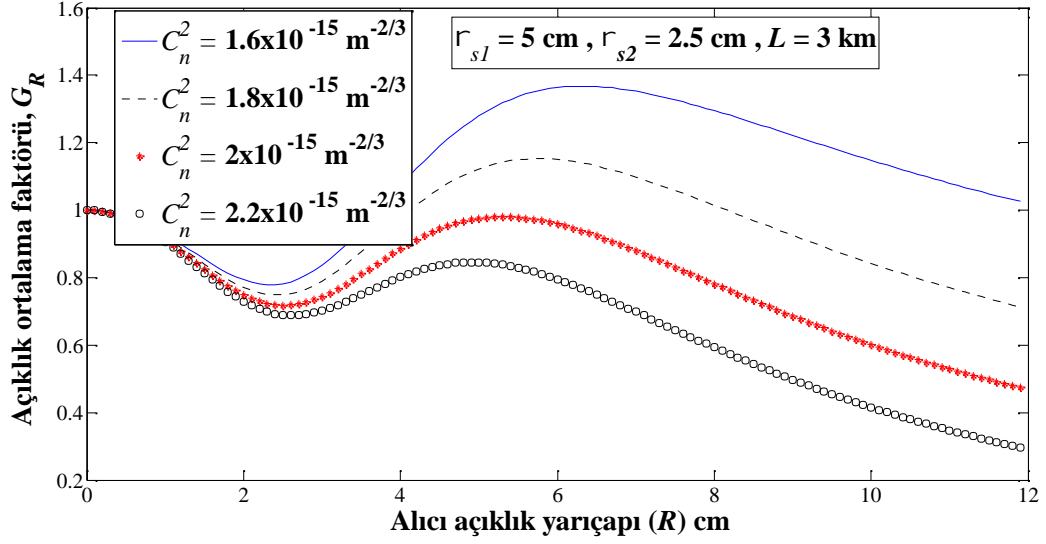
$$D_\ell = \frac{jk}{\{\ell^2 L} \left[\frac{1}{x_\ell^2} \left(-\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \frac{1}{\dots 2} Y + \frac{1}{\dots 2} \right) \left(\frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} - V \right) - \frac{1}{S_{\ell \dots 0}^2} \frac{1}{\dots 2} Y + \frac{1}{\dots 2} \right] - E_\ell - \frac{jk}{L},$$

$$\begin{aligned}
F_{\ell} = & \frac{B_{\ell} D_{\ell}}{2u_{\ell}^2} - \frac{1}{2\{\ell^2\}} \left\{ \frac{1}{x_{\ell}^2} \left[\frac{1}{S_{\ell}^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_{\ell}^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{S_{\ell}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\}^2 \\
& - \frac{1}{2\{\ell^2\}} \left\{ \frac{1}{x_{\ell}^2} \left[\frac{1}{S_{\ell}^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_{\ell}^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{S_{\ell}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \right\} \\
& \times \left[\frac{jk}{x_{\ell}^2 L} \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_{\ell}^2 \dots^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_{\ell}^2 \dots^2} \right) + \frac{jk}{S_{\ell}^2 L} Y \right] - \frac{jk}{2\{\ell^2 L\}} \left\{ \frac{1}{x_{\ell}^2} \left[\frac{1}{S_{\ell}^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \right\} \\
& \times \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_{\ell}^2 \dots^2} \right) - \frac{1}{S_{\ell}^2} \left(-\frac{1}{\dots^2} + Y \right) Y + \frac{1}{\dots^2} - Y \left. \right\} + \frac{k^2}{2\{\ell^2 L^2\}} \left[\frac{1}{x_{\ell}^2} \left(\frac{1}{\dots^2} - \frac{Y}{S_{\ell}^2 \dots^2} \right) \left(1 - \frac{1}{S_{\ell}^2 \dots^2} \right) + \frac{Y}{S_{\ell}^2} \right] \\
& - \frac{1}{2x_{\ell}^2} \left[\frac{1}{\dots^2 S_{\ell}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right]^2 - \frac{jk}{2x_{\ell}^2 L} \left[\frac{1}{S_{\ell}^2 \dots^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - \frac{1}{\dots^2} + V \right] \left(1 - \frac{1}{S_{\ell}^2 \dots^2} \right) \\
& - \frac{1}{2S_{\ell}^2} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right)^2 + \frac{jk}{2S_{\ell}^2 L} \left(Y - \frac{1}{\dots^2} \right) - 2 \left(Y - \frac{2}{\dots^2} + V \right),
\end{aligned}$$

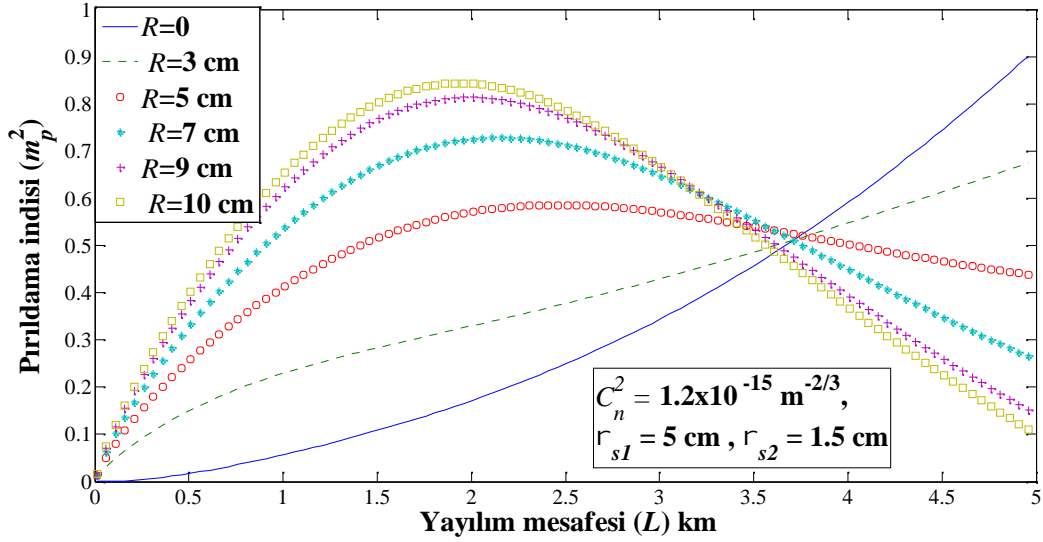
E . 3.13 ve E . 3.15, E . 3.14'de yerine konularak pırıldama indisi ve E . 3.23 kullanılarak alıcı açıklık ortalama faktörü elde edilmiştir. Çalı manın bu kısmında, alıcı açıklık yarıçapı, yayılım mesafesi ve birincil hüzmelerin kaynak boyutunun pırıldama indisi üzerinde ve dolayısıyla alıcı açıklık ortalama faktörü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun için, pırıldama indisi ve açıklık ortalama faktörü; yapı sabiti, alıcı açıklık yarıçapı, birincil hüzmelerin kaynak boyutu gibi de i kenlere kar ı çizdirilmiştir. Bütün ekillerde } = 1.55 ~m alınmıştır. ekil 3.24 - ekil 3.28'de kolime halkasal ı k hüzmeleri incelenmiştir olup $F = \infty$, ekil 3.29-3.31'da odaklanılmış halkasal ı k hüzmeleri $F=L$ alınarak incelenmiştir. Bulunan sonuçlar noktasal açıklık a sahip alıcı düzleminde hesaplanan halkasal ı k hüzmelerinin pırıldama indisi ile uyumludur [49].

ekil 3.24'de alıcı açıklık ortalaması, alıcı açıklık yarıçapına kar ı farklı yapı sabitleri yani farklı türbülans ko ulları için çizdirilmiştir. ekil 3.24'de $r_{s1} = 5$ cm , $r_{s2} = 2.5$ cm ve $L = 3$ km'dir. ekil 3.23'den görüldü ü gibi alıcı açıklık ortalamasının etkisi tüm alıcı açıklık yarıçaplarında yapı sabitinin artmasıyla artmaktadır. E er ekil 3.24 alıcı açıklık yarıçapının etkisi bakımından incelenirse, açıklık ortalamasının büyük açıklık yarıçaplarında, küçük açıklık yarıçaplarından daha avantajlı oldu u görülmektedir. ekil 3.25'de halkasal ı k hüzmeleri için yayılım mesafesinin pırıldama indisi için

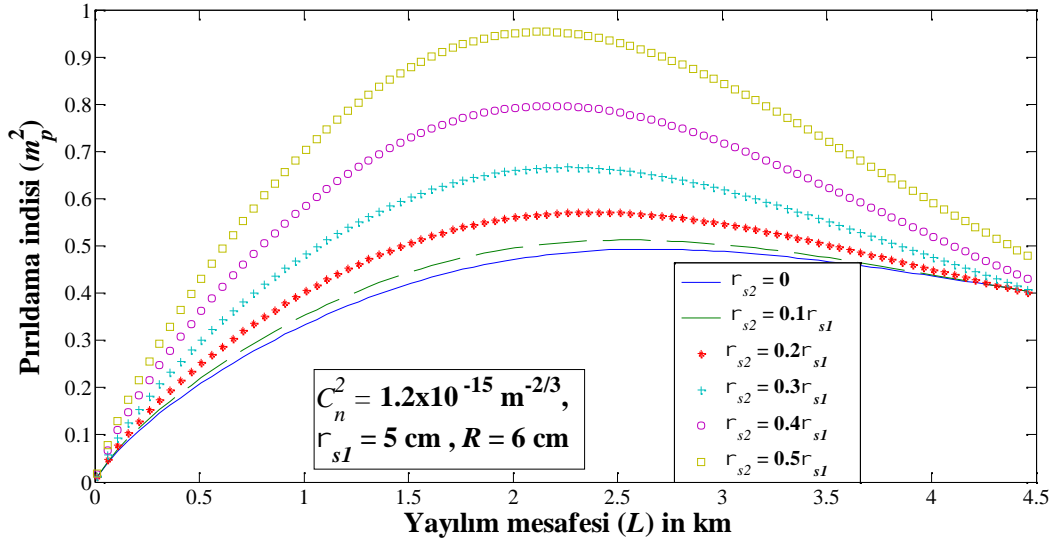
etkileri farklı açıklık yarıçaplarında incelenmiştir. Ekil 3.26'de, birincil hüzmelerin kaynak boyutu $r_{s1} = 5$ cm olup ikincil hüzmelerin kaynak boyutu $r_{s2} = 1.5$ cm alınmıştır. Ekil 3.26'den pırıldama indisinin küçük yayılım mesafelerinde açıklık yarıçapından bağımsız olarak arttığı gözlemlenirken, pırıldama indisinin linkin ortasından itibaren büyük açıklık yarıçaplarında düştüğü görülmüştür. Sabit bir yayılım mesafesinde pırıldama indisi incelendiğinde, büyük açıklık yarıçapları için, pırıldama indisinin küçük yayılım mesafelerinde büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, bu durum büyük yayılım mesafelerinde tersine dönmektedir. Ekil 3.26'da farklı ikincil hüzmeye boyutuna sahip halkasal ışık hüzmelerinin pırıldama indisi birincil hüzmeye kaynak boyutu $r_{s1} = 5$ cm ve alıcı açıklık yarıçapı $R = 6$ cm iken, yayılım mesafesine karşı incelenmiştir. Ekil 3.26'dan sabit bir yayılım mesafesinde, ikincil hüzmelerin kaynak boyutu artarken, yani halka etinin kalınlığı incelirken, pırıldama indisinin arttığı görülmüştür. Ancak, yayılım mesafesi 4.5 km'ye ulaştığında, artan ikincil hüzmeye kaynak boyutu pırıldama indisi üzerinde önemli bir etkiye sebep olmaz çünkü türbülansın birleşik etkisinden dolayı orijinal bölük ciddi bir alanla dolmuştur [70]. Ekil 3.27'de açıklık ortalama faktörünün birincil hüzmeye kaynak boyutu ile ilişkisi farklı ikincil hüzmeye kaynak boyutlarında $L=4$ km yayılım mesafesinde incelenmiştir. Birincil hüzmelerin kaynak boyutunun çok küçük değerleri için açıklık ortalamasının etkisi görülmezken, birincil hüzmeye kaynak boyutu belli bir değere ulaştığında, örneğin $r_{s1} = 4$ cm, alıcı açıklık ortalamasının etkisi baskınlamaktadır. Ayrıca, ekil 3.26'dan açıklık ortalamasının etkisinin büyük açıklıklar için ve ikincil hüzmeye kaynak boyutunun arttığı durumlar için etkili olduğu çıkarılabilir. Ekil 3.27'den ayrıca alıcı açıklık ortalaması bakımından incelendiğinde, halkasal ışık hüzmelerinin Gauss ışık hüzmelerine göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.



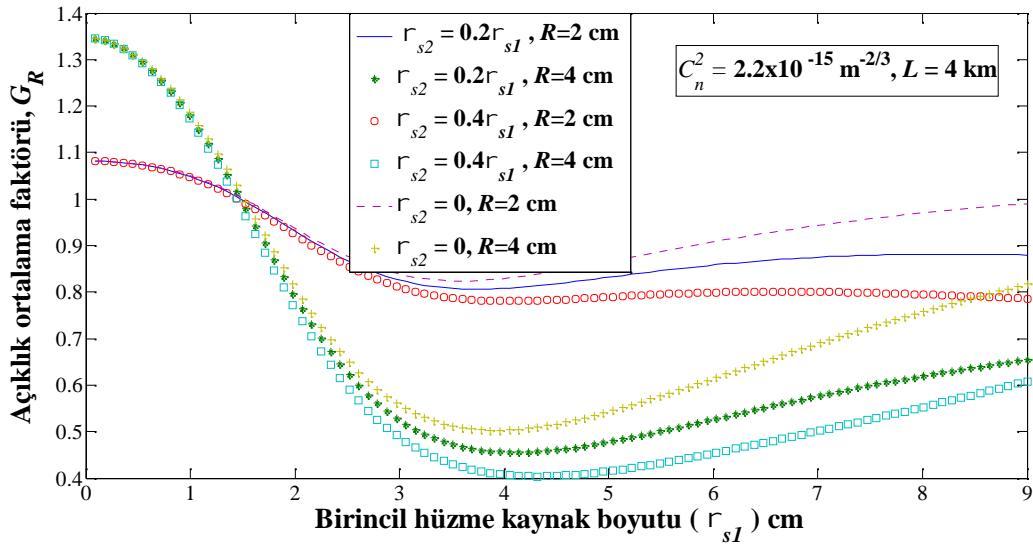
ekil 3.24. Halkasal ı k hüzmesinin farklı yapı sabitlerinde $r_{s1} = 5 \text{ cm}$, $r_{s2} = 2.5 \text{ cm}$, ve $L=3 \text{ km}$ 'de açıklık yarıçapına kar ı açıklık ortalama faktörü.



ekil 3.25. Farklı açıklık yarıçaplarında $C_n^2 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 5 \text{ cm}$ ve $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ olan halkasal ı k hüzmesinin yayılım mesafesine kar ı pırlidama indisi.

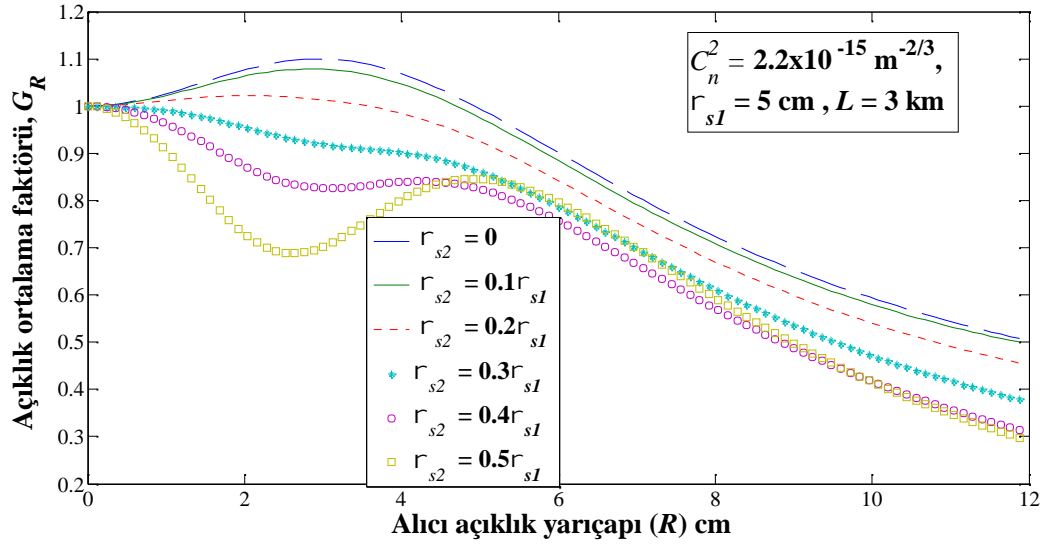


ekil 3.26. Farklı ikincil hüzme kaynak boyutuna sahip halkasal ışık hüzmelerinin $C_n^2 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 5 \text{ cm}$ ve $R = 6 \text{ cm}$ için yayılım mesafesine karşı pırıldama indisi.



ekil 3.27. Farklı ikincil hüzme kaynak boyutu ve açıklık yarıçapına sahip halkasal ışık hüzmelerinin $C_n^2 = 2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $L = 4 \text{ km}$ 'de birincil hüzme kaynak boyutuna karşı açıklık ortalama faktörü.

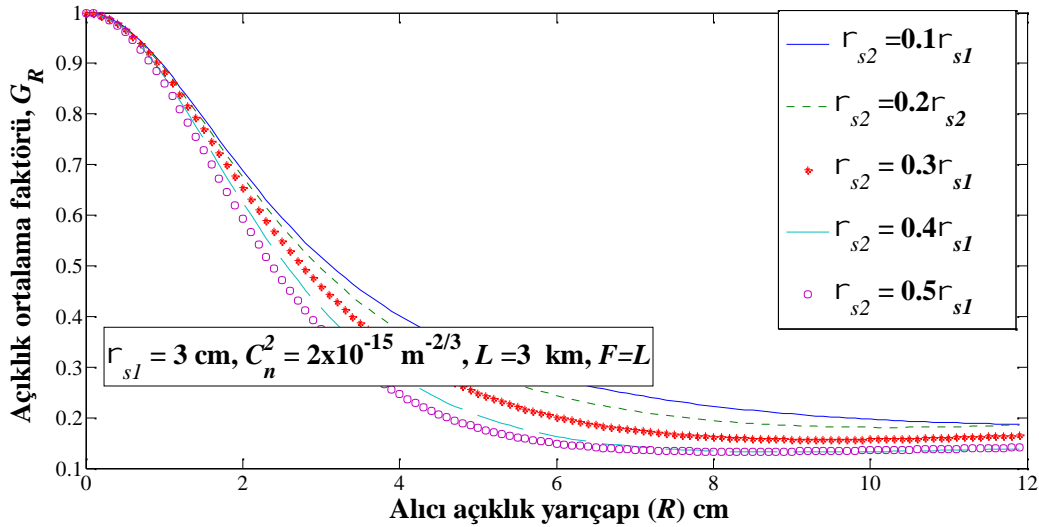
ekil 3.28’de açıklık ortalama faktörü alıcı açıklık yarıçapına karşı halkasal ve Gauss ışık hüzmeleri için $L=3$ km’de farklı ikincil hüزمة kaynak boyutlarında çizdirilmiştir. ekil 3.28’de birincil hüzmelerin kaynak boyutu $r_{s1} = 5$ cm alınmıştır. ekil 3.28’den çıkarılan sonuç, artan açıklık yarıçaplarında açıklık ortalamasının etkisi beklenildiği üzere güçlü olmaktadır. Halkasal ve Gauss ışık hüzmeleri karşılaştırıldığında, artan ikincil hüزمة kaynak boyutu, açıklık ortalamasının etkisini artıracakından, halkasal ışık hüzmelerinin Gauss ışık hüzmelerine göre daha avantajlı ve tercih edilebilir olduğu söylenebilir [71].



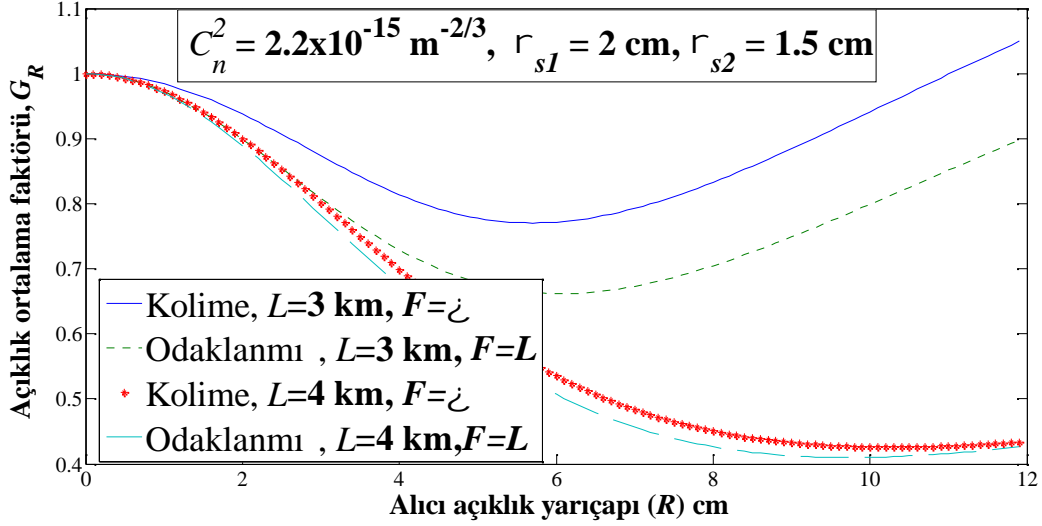
ekil 3.28. Halkasal ışık hüzmelerinin farklı ikincil hüزمة kaynak boyutlarında $C_n^2 = 2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 5$ cm ve $L=3$ km’de alıcı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.

ekil 3.29- ekil 3.31’de odaklanımı halkasal ışık hüzmelerinin açıklık ortalama faktörü incelenmiştir. ekil 3.29’de farklı iç hüزمة kaynak boyutuna sahip halkasal ışık hüzmelerinin $L=3$ km ve $r_{s1} = 3$ cm için alıcı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü incelenmiştir. ekil 3.29’de odaklanımı halkasal ışık hüzmeleri için alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla açıklık ortalamasının etkisinin arttığı görülmektedir.

Sabit bir alıcı açıklık yarıçapında, büyük ikincil hüzmeye kaynak boyutuna sahip odaklanmış halkasal ışık hüzmelerinin daha avantajlı olduğu görülmektedir. Şekil 3.30'da farklı yayılım mesafelerinde kolime ve odaklanmış halkasal ışık hüzmelerinin alıcı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü incelenmiştir. Şekil 3.30'da yapı sabiti, birincil ve ikincil hüzmeye kaynak boyutları sırasıyla $C_n^2 = 2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 2 \text{ cm}$ ve $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ alınmıştır. Şekil 3.30'da odaklanmış halkasal ışık hüzmesi kullanılarak, sabit bir yayılım mesafesinde açıklık ortalamasının etkisinin artırılabilir olduğu görülmektedir. Yayılım mesafesi $L=3 \text{ km}$ 'den $L=4 \text{ km}$ 'ye çıkarıldığında, açıklık ortalamasının etkisi kolime ve odaklanmış halkasal ışık hüzmeleri için büyük açıklık yarıçaplarında güçlenmektedir. Eğer kolime ve odaklanmış halkasal ışık hüzmeleri karşılaştırılırsa, alıcı açıklık ortalamasının odaklanmış halkasal ışık hüzmeleri için daha etkili olduğu görülür. Bu sonuçlar doğrultusunda, odaklanmış halkasal ışık hüzmelerinin açıklık ortalamasının etkisini artıracakları görülmektedir.



Şekil 3.29. Odaklanmış halkasal ışık hüzmelerinin farklı ikincil hüzmeye kaynak boyutlarında $r_{s1} = 3 \text{ cm}$, $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $L=3 \text{ km}$ 'de alıcı açıklık yarıçapına karşı açıklık ortalama faktörü.

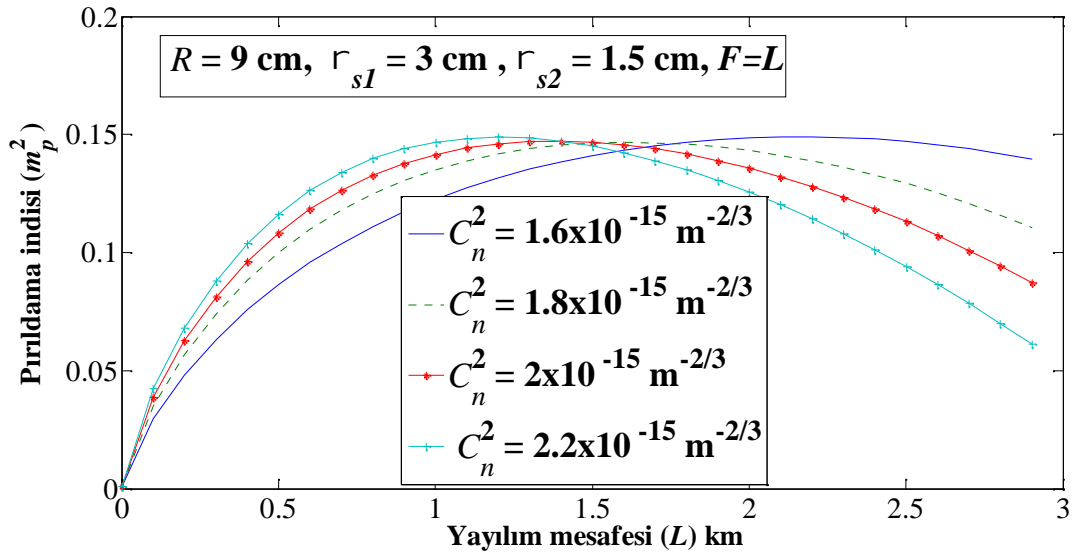


ekil 3.29. Kolime ve odaklanmı halkasal ışık hüzmelerinin farklı yayılım mesafelerinde $C_n^2 = 2.2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 2 \text{ cm}$, ve $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ için alıcı açıklık yarıçapına karşılık açıklık ortalama faktörü.

ekil 3.31'de farklı türbülans koşulları altında yayılmakta olan odaklanmı halkasal ışık hüzmelerinin yayılım mesafesine karşılık kırılma indisi incelenmiştir. ekil 3.31'de $r_{s1} = 3 \text{ cm}$, $r_{s2} = 1.5 \text{ cm}$ ve $R=9 \text{ cm}$ alınmıştır. Küçük yayılım mesafelerinde, odaklanmı halkasal ışık hüzmelerinin kırılma indisi yayılım mesafesinin artmasıyla artmaktadır. Sabit bir yayılım mesafesinden sonra, kırılma indisi düzelmeye başlamaktadır. Linkin ortasından itibaren, sabit bir yayılım mesafesinde yapı sabitinin artmasıyla kırılma indisinin arttığı görülmektedir.

Alıcı açıklık ortalamasının etkisi türbülansın şiddetinin artması ya da yayılım mesafesinin artması durumları için artmaktadır. Türbülans şiddetinin artması ve yüksek link mesafesine sahip kablosuz optik haberleşme linklerinde alıcı açıklık ortalaması, kırılma indisini düşürerek link performansını artırmak için kullanılabilir. Başlangıçta gönderilen hüzmeye tipinin kablosuz optik haberleşme sistemlerinin performansını etkilemekte olduğu bilinmektedir. Çoklu Gauss ışık hüzmelerinin özel durumları olan düz tepeli ve halkasal ışık hüzmeleri için elde edilen sonuçlara göre düz tepeli ışık

hüzmeleri için yüksek alıcı açıklık yarıçaplarında, yüksek kaynak boyutuna ve yüksek düzle tirme parametresine sahip düz tepeli ı k hüzmeleri için kablosuz optik haberle me linklerinde performans artırımı yapılabilirken, dü ük kaynak boyutunda dü ük düzle tirme parametresine sahip düz tepeli ı k hüzmeleri kullanılarak performans artırımı yapılabilir. Vericiden halkasal ı k hüzmesi gönderilerek, halkasal ı k hüzmelerinin ikincil hüzme kaynak boyutunu artırarak alıcı açıklı ının etkisi artırılabilir. Yüksek link mesafesine sahip kablosuz optik haberle me sistemlerinde halkasal ı k hüzmelerinin yayılım mesafesinde odaklayarak link performansı artırılabilir.



ekil 3.31. Halkasal ı k hüzmelerinin farklı yapı sabitlerinde $R=9$ cm, $r_{s1} = 3$ cm, ve $r_{s2} = 1.5$ cm için alıcı açıklık yarıçapına kar ı açıklık ortalama faktörü.

4. OPTİK MUM HÜZME MODELİNİN BELİRLENMESİ

Pırıldama, optik hüzmelerin düzensiz dağılımına, alıcı düzlemi üzerinde kararsızlık göstermesine sebep olan ışık şiddeti sapmalarıdır. Dolayısıyla, optik haberleşme sistemlerinin performansını etkilemektedir. Çalışmanın bu kısmında, Matlab programlama dilinin “multi-objective optimization-MOO” (çoklu amaçlı optimizasyon) aracı ile ortalama optik güç ile pırıldama indisi arasındaki ilişki incelenmiştir. Bunun için ortalama optik güç ve pırıldama indisi fonksiyonları amaç fonksiyonları olarak belirlenerek Pareto-optimum eğrisi çizdirilmiştir. Pareto-optimum eğrisi kullanılarak optik haberleşme linkinin çalışma durumuna göre ortalama optik güç ve pırıldama indisleri belirlenebilmekte, en fazla optik güç ya da minimum pırıldama indisi durumları için link performansı optimizasyonu yapılabilmektedir. Ayrıca, optik gücün pırıldama indisine oranını en fazla yapacak şekilde belirlenen optimizasyon kriteri ile optimum Gauss, düz tepeli ve halkasal ışık hüzmelerini belirleyen parametreler ile alıcı açıklık ortalamasının hüzmelerin optimum performansı elde etmedeki etkisi araştırılmıştır.

4.1. Çoklu Amaçlı Optimizasyon

Çoklu amaçlı optimizasyon problemi, isminden de anlaşılacağı üzere birden fazla amaç fonksiyonu ile uğraşmaktadır. Pratikte, çoklu amaçlı optimizasyon problemlerine tek amaçlı optimizasyon problemlerine göre daha sık karşılaşılmaktadır. Çünkü gerçek dünyada, tasarımların veya problemlerin tamamına yakını birden fazla ve birbiriyle çelişebilen amaçların eş zamanlı optimizasyonunu gerektirir. Örneğin; iyi bir optik haberleşme link tasarımı için minimum pırıldama indisi ve en fazla optik güç beklenir. Bu bakımdan, çoklu amaç durumunda tüm amaçlara göre en iyi olan tek bir çözüm mevcut olmayabilir. Bu durumda karar vericinin, üzerinde uzlaşılması sonlu bir kümeden bir çözüm seçmesi istenir. Uygun çözüm, tüm amaçlar için kabul edilebilir düzeyde bir performans sağlamalıdır. Tek amaçlı optimizasyonda, bir amaç için en iyi olan tek bir tasarım veya karar elde edilmeye çalışılır. Bu, genellikle minimizasyon veya maksimizasyon problemine dayalı olarak küresel minimum veya küresel en fazla bulunmasıdır. Çoklu amaçlı optimizasyon problemlerinde amaç her

bir amaç fonksiyonunu ilgilendiren optimum bir çözüm ya da çözümler kümesi bulmaktır. Çoklu amaçlı optimizasyon problemi, maksimize ya da minimize edilmek için u ra ılan birden fazla sayıda amaç fonksiyonlarına sahiptir [72-74].

Çoklu amaçlı optimizasyon problemleri için en iyi yakla ım, en iyi çözüm kümesinin bulunmasıdır. Daha sonra bu küme üzerinden bir karar verilebilir. Ço unlukla tüm amaçları optimize eden bir çözümler kümesi bulunmaz, ancak arama uzayında di erlerinden daha iyi olan çözümler bulunmaktadır. Baskılanmamı olan sonuçlar, (Pareto-optimum kümesi), kümedeki di er tüm çözümlerden daha iyi olarak dü ünülür, çünkü tüm kriterleri göz önüne alındı ında onlardan daha iyi çözümler bulunamaz.

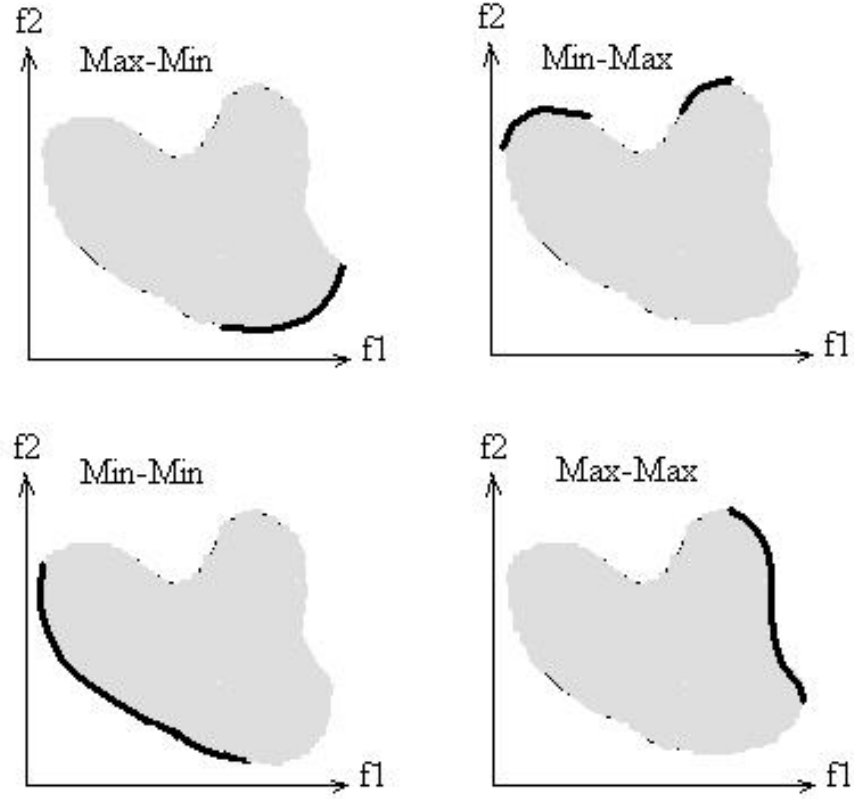
4.2. Pareto-optimum Kavramı

Pareto-optimum kavramına göre, popülasyondaki bir çözüm, amaç de erlerine göre en iyi, en kötü ve di er çözümlerden farksız olabilir. En iyi çözüm, amaçların herhangi biri içinde en kötü olmayan ve en azından bir amaç içinde di erlerinden daha iyi olan çözüm anlamındadır. Optimum çözüm, arama uzayında, herhangi bir di er çözüm tarafından bastırılmayan çözümdür. Böyle bir optimum çözüm, Pareto-optimum çözüm ve bütün bu ekildeki optimum bastırılmamı çözümlerin kümesi de Pareto-optimum küme olarak adlandırılır [72, 75-76].

Genellikle çok amaçlı algoritmaların amacı, bastırılmamı çözüm noktaları kümesini belirlemektir. Bu küme, yukarıda tanımlanan Pareto-optimum olarak adlandırılır. Bu çözümlerden geriye kalanlar ise bastırılmı çözümler olarak bilinir. Pareto-optimum çözümlerden herhangi birisi çözüm olarak kabul edilebilir [72].

Bu bölümde çizdirilen Pareto-optimum e risi için Matlab programlama dilinin optimizasyon aracı kullanılmı tır. Optimizasyon aracında çözücü olarak “gamultiobj” çözücüsü (multi objective optimization using genetic algorithm) ve amaç fonksiyonları ortalama optik güç ve pırıldama indisi olarak belirlenmi tir. Tek de i ken belirlenmi (yayılmı mesafesi),Pareto front çizdirimi kullanılarak Pareto-optimum e risi çizdirilmi tir.

ekil 4.1'de iki amaç fonksiyonlu bir optimizasyon problemi için dört farklı durumu gösteren Pareto-optimum seti çizilmiştir. Her bir amaç fonksiyonu minimize ya da maksimize edilebilmektedir. ekil 4.1'de sol üstteki durumda amaç, her bir amaç fonksiyonunu yani bu durum için f_1 ve f_2 'yi minimize etmektir. Koyu düz çizgi ile gösterilen e ri, Pareto-optimum çözüm kümesini göstermektedir. Eğer f_1 minimize edilmek istenirken f_2 de maksimize edilmek isteniyorsa bu durumda Pareto-optimum kümesi ekil 4.1'de sağ üst köşede verilmiş olan ekilde koyu düz çizgi ile gösterilmiş olan e riden oluşmaktadır. Benzer ekilde, f_1 'i maksimize ederken f_2 minimize edilmek isteniyorsa ya da f_1 ve f_2 maksimize edilmek isteniyorsa elde edilecek Pareto-optimum kümeleri ekil 4.1'de sırasıyla sol ve sağ alt köşede verilmiştir [72].



ekil 4.1. ki amaç fonksiyonlu çoklu optimizasyon problemi için dört farklı durum için Pareto-optimum çözüm kümeleri.

4.3 Optimum Çoklu Gauss I ık Hüzmeleri

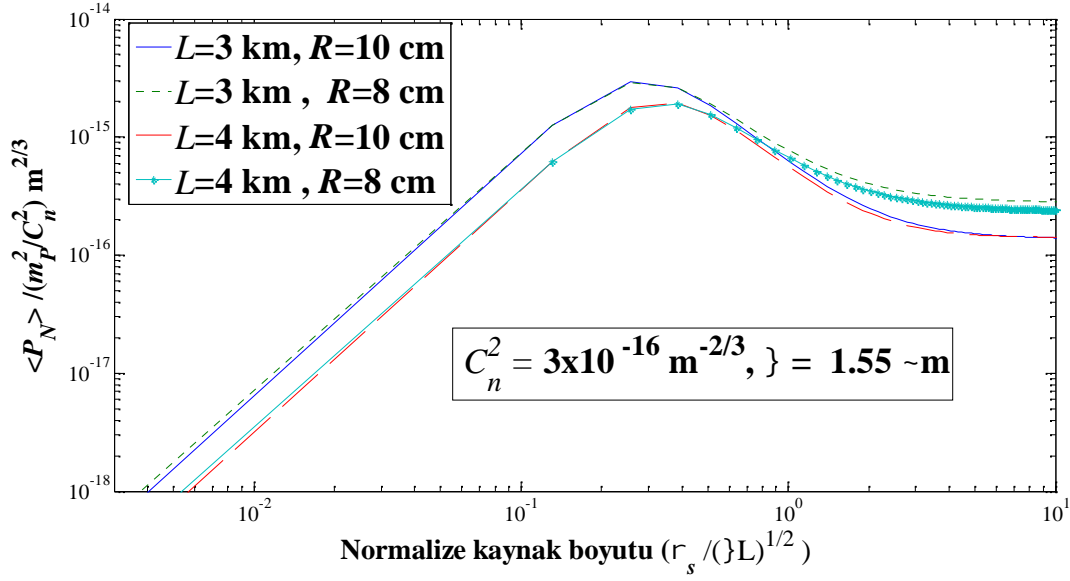
Bu kısımda, zayıf türbülanslı atmosferde yayılmakta olan Gauss ı ık hüzmelerinin ortalama optik gücü ve pırıldama indisi arasındaki ili ki Matlab programlama dilinin optimizasyon aracı ile incelenmi , ayrıca ortalama optik gücün pırıldama indisine oranını en fazla yapacak ekilde belirlenen optimizasyon kriteri ile özel olarak optimum Gauss, düz tepeli ve halkasal ı ık hüzmeleri incelenmi , oranı artıracak yayılım mesafesi, kaynak boyutu, dalga boyu, alıcı açıklık yarıçapı gibi oranı en fazla yapacak parametreler belirlenmi , link performans optimizasyonu yapılmı tır.

4.3.1 Optimum Gauss I ık Hüzmeleri

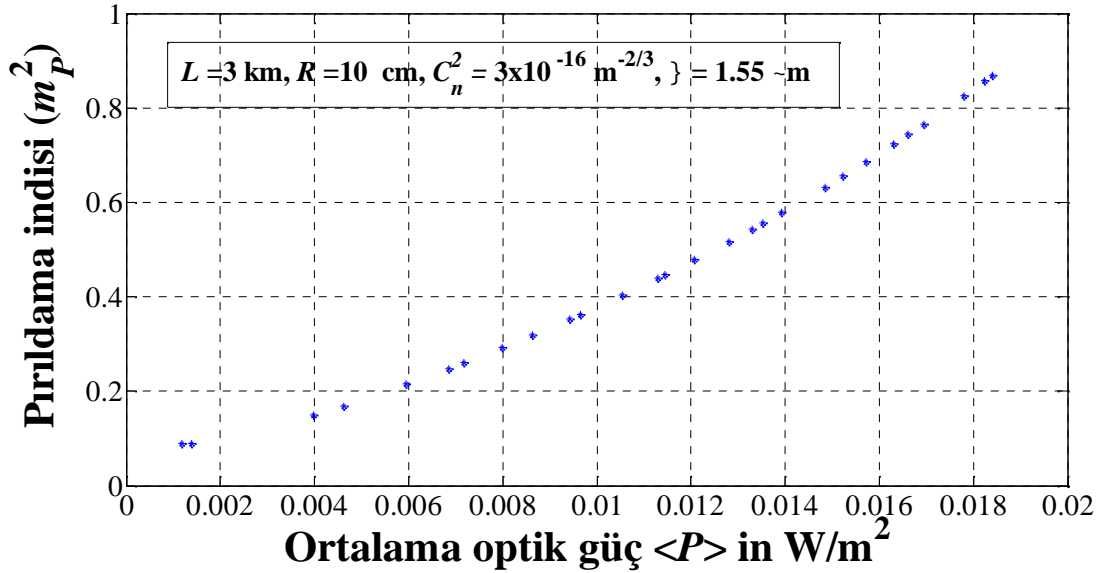
Ortalama optik gücün pırıldama indisine oranını en fazla yapacak eilde belirlenen optimizasyon kriteri ile zayıf türbülanslı atmosferde yayılan optimum Gauss ı ık hüzmeleri belirlenmi tir. Ayrıca, amaç fonksiyonları olarak belirlenen ortalama optik güç ile pırıldama indisinin Pareto-optimum e risi çizdirilmi tir. Ortalama optik gücün pırıldama indisine oranını artıran yani linkin performansını iyile tiren kaynak boyutu, alıcı açıklık yarıçapı, dalga boyu ve uyumluluk uzunlu u de erleri bulunmu tur.

Zayıf türbülans altında yayılan Gauss ı ık hüzmelerinin Gauss formunda açıklı a sahip alıcı düzlemindeki ortalama optik gücü, $\langle P \rangle$ ve pırıldama indisi, m_p^2 sırasıyla Ref. [42]'nin E . 2 ve E . 6 numaralı e itliklerinde verilmi tir. Açıklık fonksiyonu $h(R) = \exp(-|\mathbf{p}|^2/R^2)$ ekinde gösterilebilir. Burada R alıcı açıklık yarıçapıdır. A a ıdaki ekillerde $\langle P_N \rangle$ ortalama optik güç verimi olup $\langle P_N \rangle = \langle P \rangle / \langle P_t \rangle$ ekinde gösterilir. Burada $\langle P \rangle$ alınan ortalama optik güç ve $\langle P_t \rangle$ gönderilen ortalama optik güçtür. ekil 4.2 ile ekil 4.4-4.6'da, ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı sırasıyla kaynak boyutu, alıcı açıklık yarıçapı, dalga boyu ve uyumluluk uzunlu una kar ı çizdirilmi tir. ekil 4.2'de pırıldama indisi yapı sabitine göre normalize edilmi tir. ekil 4.3'de, ekil 4.2'de verilen de erler için Pareto-optimum e risi çizdirilmi tir. ekil 4.5 hariç di er tüm ekillerde, dalga boyu optik haberle me sistemleri için yaygın olarak kullanılan $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ alınmı tir. ekil 4.6 haricindeki di er tüm ekillerde uyumluluk uzunlu u L_s sonsuz alınmı tir. ekil 4.4, ekil 4.7 ve ekil 4.8'de odaklanmı ve kolime optimum Gauss ı ık hüzmeleri kar ıla tırılmı tir. Odaklanmı Gauss ı ık hüzmeleri için odaklanma parametresi $F=L$ 'dir. ekil 4.2'de türbülanslı atmosferde yayılan Gauss ı ık hüzmeleri farklı yayılım mesafelerinde logaritmik skalada incelenmi tir. ekil 4.2'de yapı sabiti $C_n^2 = 3 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ olup kaynak boyutu, Fresnel skalası olan $\sqrt{\lambda} L$ ile normalize edilmi tir. Farklı alıcı açıklık yarıçaplarında incelenmi olan ekil 4.2'de, seçilen dalga boyu, alıcı açıklık yarıçapı ve yapı sabiti de erleri için hangi kaynak boyutlarında ortalama optik gücün yapı sabitine göre normalize edilmi pırıldama indisine oranının en fazla oldu u

gözlemlenmiştir. Böylelikle oranı en fazla yapacak kaynak boyutu de erleri bulunup link performansını artıracak link performans optimizasyonu yapılmıştır. ekil 4.2'de oran, $L=3$ km ve $L=4$ km iken $R=8$ cm ve $R=10$ cm alıcı açıklık yarıçaplarında incelenmiştir. ekil 4.2'den yayılım mesafesi 3 km'den 4 km'ye çıkarıldığında oranın tepe noktasının düştüğü görülmektedir. Ayrıca, sabit bir yayılım mesafesinde, büyük kaynak boyutu de erlerinde, alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla oran artmaktadır. Bu durum hüzmeye büyüklüğü ve alıcı açıklık yarıçapı ile ilişki ile açıklanabilir. Yayılım mesafesi arttıkça, hüzmeye genişleyecek ve alıcı daha fazla optik güç toplayabilecektir. ekil 4.2'de verilen parametreler ile ekil 4.3'de ortalama optik güç ve pırlıdama indisi olarak belirlenen amaç fonksiyonları ile Pareto-optimum e risi $L=3$ km ve $R=10$ cm e risi için çizdirilmiştir. Problemin tanımında iki amaç fonksiyonu olduğu için Pareto-optimum e risi çizdirilirken, Matlab programlama dilinin çoklu amaç optimizasyonu aracı kullanılmıştır. ekil 4.3'de her bir amaç fonksiyonunun a ırlıklandırma katsayısı e it de ildir. Bu sebepten, ekil 4.3'de e ri üzerindeki her bir nokta aslında ekil 4.2'de e ri üstünde belirli bir noktaya karşılık gelmektedir. Bu kısımda, ekil 4.3 hariç diğer tüm ekillerde a ırlıklandırma katsayısı her iki amaç fonksiyonu için de e it alınmıştır. ekil 4.3'den görüldüğü gibi ortalama optik gücün artmasıyla pırlıdama indisi artmaktadır. Burada amaç ortalama optik gücün pırlıdama indisine oranını artırmak olduğundan, artan ortalama optik güç de erleri ya da azalan pırlıdama indisi de erleri link durumuna göre link performans optimizasyonu yapılabilmektedir. Pareto-optimum e risi üzerinde bulunan herhangi bir nokta aslında optimum Gauss ışık hüzmesini belirleyebilmektedir. Burada önemli olan amaç fonksiyonlarının a ırlığı, yani önemiştir. Linkin durumuna göre ortalama optik gücün de erinin büyük olması pırlıdama indisi de erinden daha önemli olabilir, ya da tam tersi bir durum geçerli olabilir. Amaç fonksiyonlarının a ırlığı de i irse yani herhangi bir amaç fonksiyonunun önemi artarsa, oran de i imektedir.

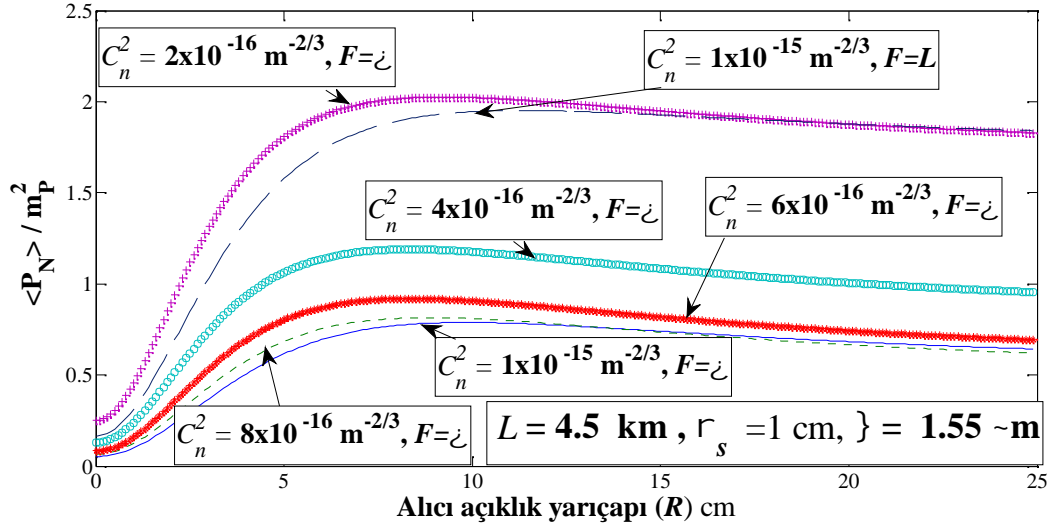


ekil 4.2. $C_n^2 = 3 \times 10^{-16} m^{-2/3}$ ve $\lambda = 1.55 \mu m$ de verilerinde normalize edilen kaynak boyutuna karşın ortalama optik gücün normalize edilmiş pırlıdama indisine oranı.

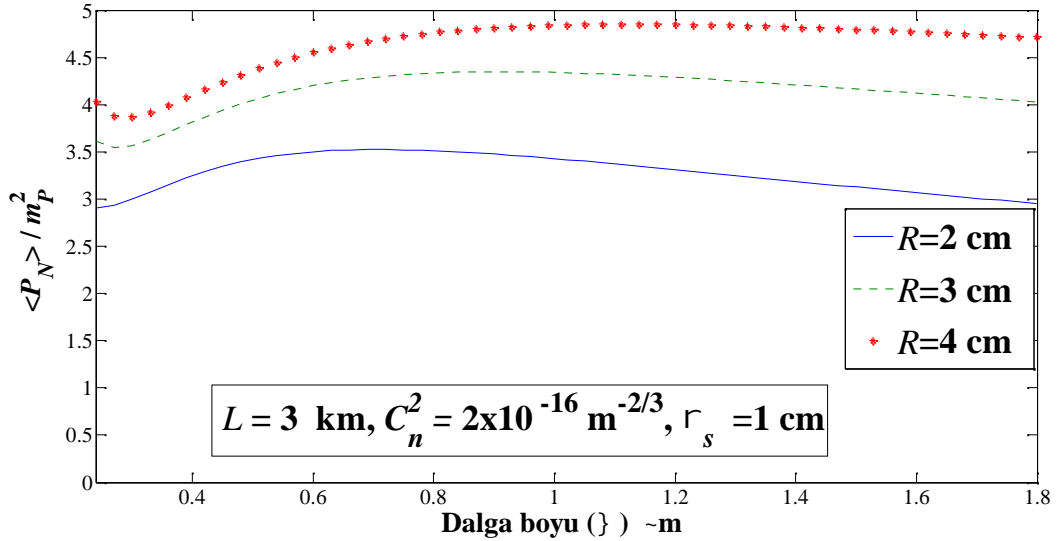


ekil 4.3. Ortalama optik güç ve pırlıdama indisini belirleyen amaç fonksiyonlarının $L = 3$ km, $R = 10$ cm, $C_n^2 = 3 \times 10^{-16} m^{-2/3}$ ve $\lambda = 1.55 \mu m$ için Pareto-optimum eğrisi.

ekil 4.4'de alıcı açıklık yarıçapının optimum Gauss ı k hüzmelerinin elde edilmesindeki etkisi $L=4.5$ km ve $r_s = 1$ cm için incelenmiştir. Ayrıca, $C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ durumunda kolime ve odaklanmış Gauss ı k hüzmelerinin ortalama optik gücünün pırlıdama indisine oranları karşılaştırılmıştır. ekil 4.4'de odaklama yapılarak oran artırıldı ı gözlemlenmiştir. Ayrıca, oran çok küçük alıcı açıklık yarıçapları için çok küçük iken, alıcı açıklık yarıçapının artırılmasıyla arttı ı görülmü tür. Kaynak boyutu r_s ve dalga boyu λ , L yayılım mesafesinde alıcı tarafından alınacak $B \approx L \lambda / (2r_s)$ hüzmeye genişliği ile orantılıdır. Ekil 4.4'ün sol tarafında görüldü ü gibi hüzmeye, alıcının açıklığından daha büyükse, alınan güç, alıcı düzlemi alanı ile orantılıdır. ekil 4.4'ün sa-
tarafında alıcı, hüzmeye daha büyük olduğu için tüm hüzmeyi toplayabilmektedir. Alıcı açıklığı belli bir değere ula t ı nda (örneğin $C_n^2 = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ değeri için $R=8$ cm), oran açıklık ortalamasının etkisiyle, ula t ı ı tepe noktasından itibaren dü meye başlamaktadır. $C_n^2 = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ değeri için, kaynak boyutu $r_s = 1$ cm iken, optimum Gauss ı k hüzmeleri en fazla oranı veren $R=8$ cm açıklık yarıçapında elde edilebilmektedir. Ayrıca ekil 4.4'den çıkarılabilen di er bir sonuç, yapı sabiti azaldıkça, oran arttı ıdır. ekil 4.5'de dalga boyunun optimum Gauss ı k hüzmelerini elde etmedeki etkisi farklı açıklık yarıçaplarında incelenmiştir. ekil 4.5'de yayılım mesafesi, yapı sabiti ve kaynak boyutu sırasıyla $L = 3$ km, $C_n^2 = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, $r_s = 1$ cm ve $R=2, 3, 4$ cm alınmıştır. ekil 4.5'den alıcı açıklık yarıçapı $R=2$ cm'den $R=4$ cm'ye çıkarıldı ı nda, oran tüm dalga boyu değerleri için arttı ı görülmektedir. ekil 4.5 dikkatlice incelendi inde, ortalama optik gücün pırlıdama indisine oranını en fazla yapacak optimum Gauss ı k hüzmeleri alıcı açıklık yarıçapı arttıkça biraz daha büyük dalga boylarında elde edilebilmektedir. ekil 4.5'den ayrıca çok büyük dalga boyları için oranın dü meye başladığı gözlemlenmektedir.



ekil 4.4 Farklı yapı sabitlerinde $L = 4.5 \text{ km}$, $r_s = 1 \text{ cm}$ ve $\zeta = 1.55 \text{ m}$ için alıcı açıklık yarıçapına karşı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.

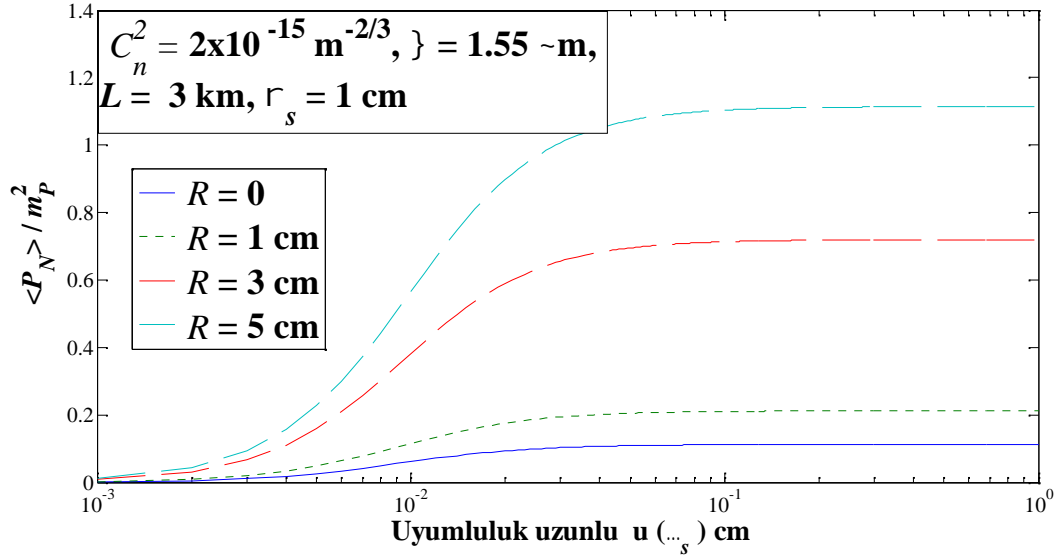


ekil 4.5. Farklı alıcı açıklık yarıçapı değerlerinde $L = 3 \text{ km}$, $C_n^2 = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ ve $r_s = 1 \text{ cm}$ için dalga boyuna karşı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.

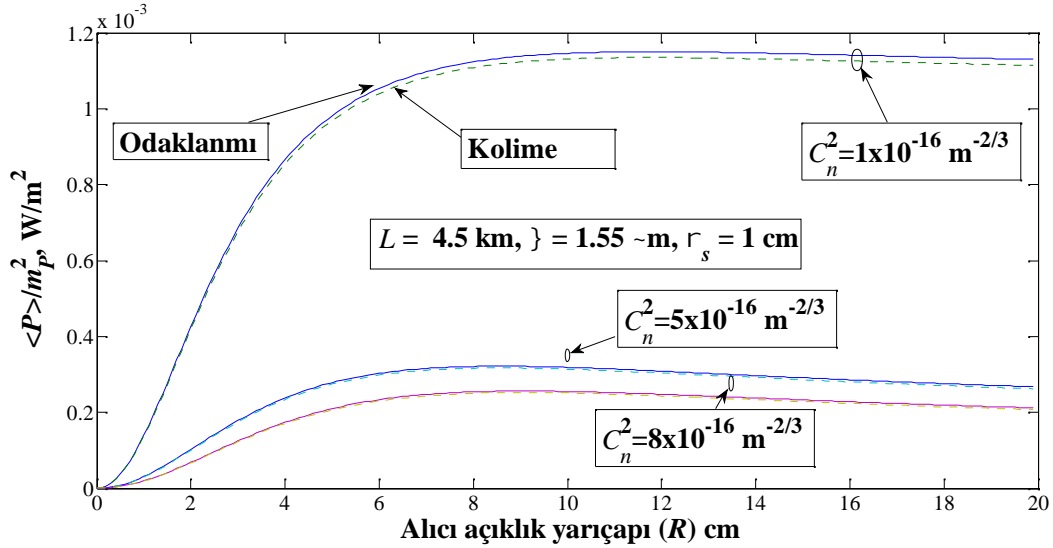
ekil 4.6'da uyumluluk uzunluğunun optimum Gauss ışık hüzmeleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. ekil 4.6'da yapı sabiti, dalga boyu, yayılım mesafesi ve kaynak boyutu

sırasıyla $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $\lambda = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$, $L=3 \text{ km}$ ve $r_s = 1 \text{ cm}$ alınmıştır. Uyumluluk uzunluğu arttıkça, oran artmaktadır. Ayrıca, sabit bir uyumluluk uzunluğunda ortalama optik gücün pırlıdama indisine oranı alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla artmaktadır. Çalışmanın bu kısmı, IEEE Photonics and Technology Letters dergisine gönderilecektir [77].

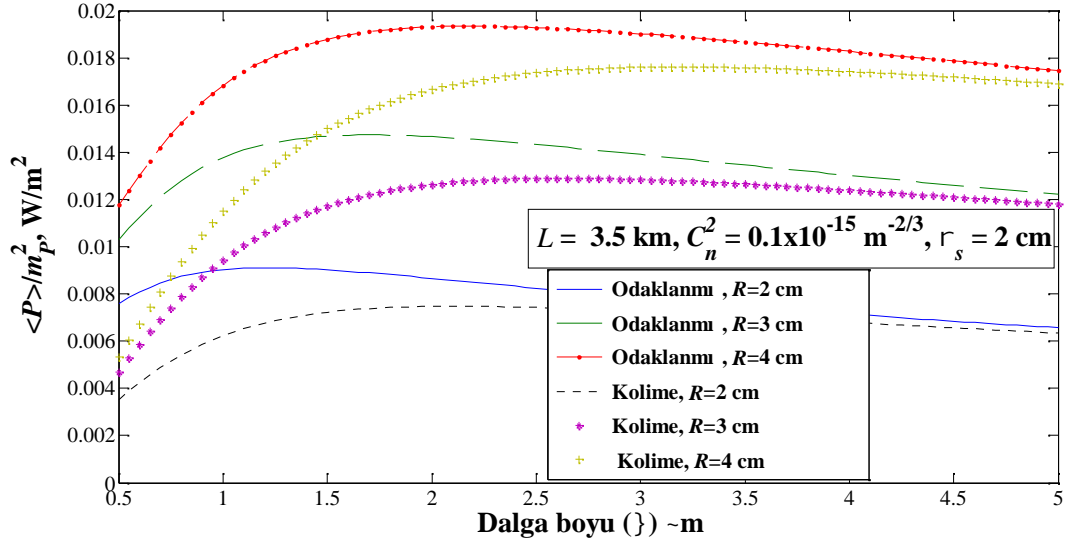
Şekil 4.7’de, optimizasyon kriteri olarak belirlenen oran, alıcı açıklık yarıçapına karşı odaklanma ve kolime Gauss ışık hüzmeleri için farklı yapı sabitlerinde çizdirilmiştir. Şekilde yayılım mesafesi ve kaynak boyutu $L=4.5 \text{ km}$ ve $r_s = 1 \text{ cm}$ olarak belirlenmiştir. Yapı sabiti azaldıkça ortalama optik gücün pırlıdama indisine oranında artış görülmekte, odaklanma Gauss ışık hüzmelerinde bu oran kolime Gauss ışık hüzmelerine göre nispeten fazla olmaktadır. Düşük açıklık yarıçapları için oran düşük olmakta, açıklık yarıçapının artmasıyla artmaktadır. Belli bir noktada ortalama optik gücün pırlıdama indisine oranı en fazla ulaşıp alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla azalmaktadır. Şekil 4.8’de ortalama optik gücün pırlıdama indisine oranı dalga boyuna karşı incelenmiştir. Şekilde yayılım mesafesi ve yapı sabiti sırasıyla $L=3.5 \text{ km}$ ve $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ alınmıştır. $R=2 \text{ cm}$, 3 cm ve 4 cm açıklık yarıçaplarında odaklanma ve kolime Gauss ışık hüzmeleri için optimum dalga boyları belirlenmiştir. Odaklanma parametresinden bağımsız olarak alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla ortalama optik gücün pırlıdama indisine oranı artmaktadır. Sabit bir alıcı açıklık yarıçapında ise odaklanma Gauss ışık hüzmelerinin ortalama optik gücünün pırlıdama indisine oranı kolime Gauss ışık hüzmelerinin sahip olduğu orana göre daha yüksektir. Oranın en fazla olduğu odaklanma Gauss ışık hüzmeleri için daha düşük dalga boylarında elde edilebilmektedir. Çalışmanın bu kısmı, Çankaya Üniversitesi’nde gerçekleştirilmiş olan 6. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu’nda sunulmuştur [68].



ekil 4.6. Farklı uyumluluk uzunlu u na kar $C_n^2 = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $\xi = 1.55 \text{ m}$, $L = 3 \text{ km}$ ve $r_s = 1 \text{ cm}$ için ortalama optik gücün pırdama indisine oranı.



ekil 4.7. Alıcı açıklık yarıçapına kar $L=4.5 \text{ km}$, $\xi = 1.55 \text{ m}$ ve $r_s = 1 \text{ cm}$ için farklı yapı sabitlerinde ortalama alınan optik gücün pırdama indisine oranı.

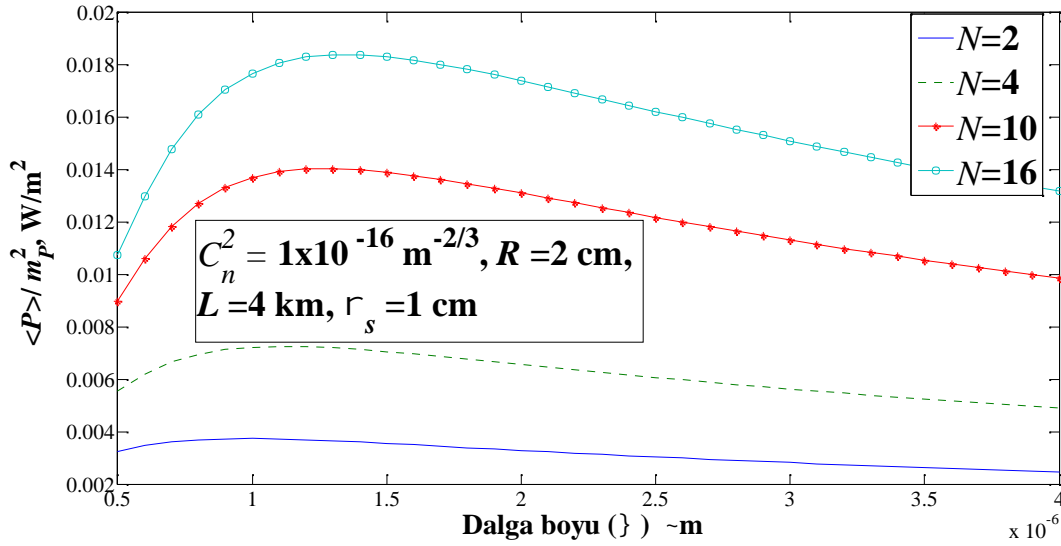


ekil 4.8. Dalga boyuna kar ı farklı alıcı açıklık yarıçaplarında $L=3.5 km$, $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} m^{-2/3}$, $r_s = 2 cm$ için odaklanmı ve kolime Gauss ı ık hüzmelerinin ortalama alınan optik gücün pırıldama indisine oranı.

4.3.2 Optimum Düz Tepeli ı ık Hüzmeleri

Düz tepeli ı ık hüzmelerinin ortalama optik gücü $E . 3.11$ 'de hesaplanmı tır. $E . 11$ ve $E . 24$ 'ün, $E . 14$ 'de yerine konulmasıyla düz tepeli ı ık hüzmelerinin pırıldama indisini bulunmu tur. Bu kısımda, ortalama optik gücün pırıldama indisine oranını en fazla yapacak ekilde belirlenen optimizasyon kriteri ile optimum düz tepeli ı ık hüzmelerini belirleyen dalga boyu ve açıklık yarıçapı de erleri bulunarak link performansı optimizasyonu yapılmı tır.

ekil 4.9'da düz tepeli ı ık hüzmeleri için dalga boyuna kar ı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı farklı düzle tirme parametreleri için çizdirilmi tir. ekilde yapı sabiti, alıcı açıklık yarıçapı, yayılım mesafesi ve kaynak boyutu sırasıyla $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} m^{-2/3}$, $R=2 cm$, $L= 4 km$ ve $r_s = 1 cm$ alınmı tır. ekil 4.9'dan düzle tirme parametresinin artırılmasıyla oranın arttı ı sonucuna varılmaktadır. Ayrıca, düzle tirme parametresi arttıkça, optimum düz tepeli ı ık hüzmeleri nispeten biraz daha büyük dalga boylarında elde edilebilmektedir.



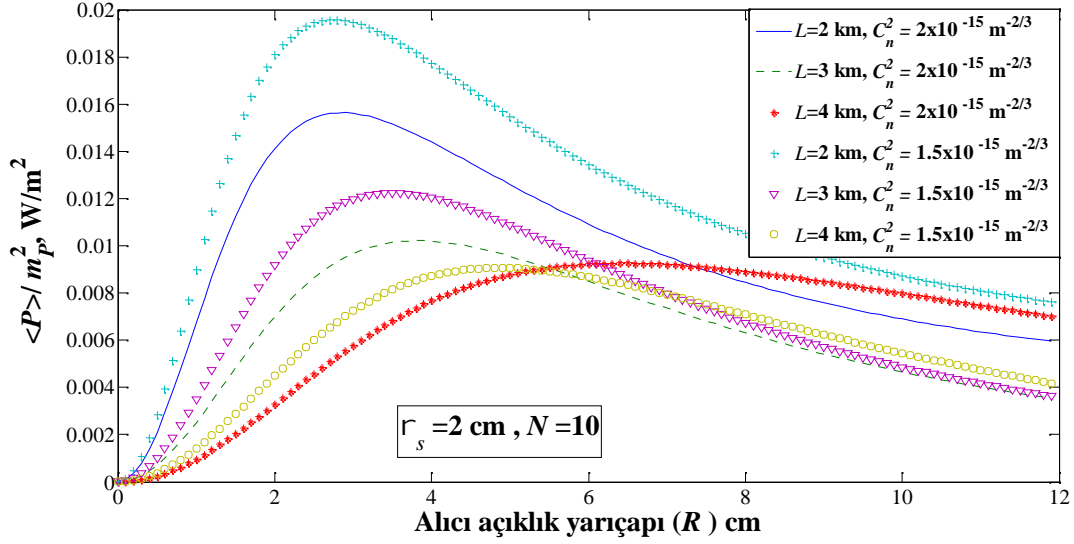
ekil 4.9. Dalga boyuna kar ılı farklı düzle tirme parametrelerinde $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$,

$R = 2 \text{ cm}$, $L = 4 \text{ km}$ ve $r_s = 1$ için ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.

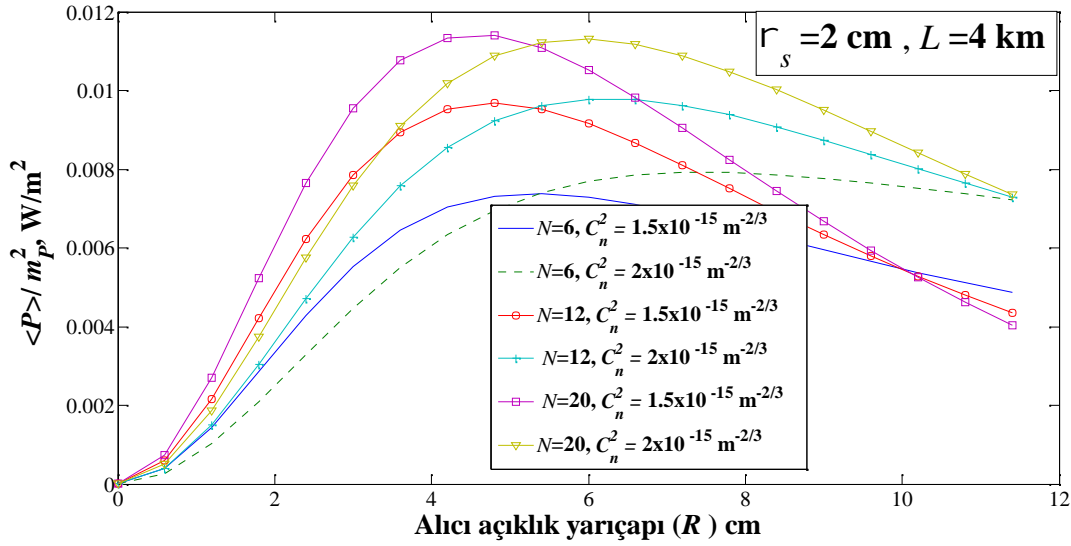
ekil 4.10'da alıcı açıklık yarıçapının optimum düz tepeli ılık hüzmelerini elde etmedeki etkisi farklı yayılım mesafelerinde ve farklı yapı sabitlerinde gözlemlenmiştir. Ekiide kaynak boyutu ve düzle tirme parametresi sırasıyla $r_s = 2 \text{ cm}$ ve $N=10$ alınmıştır. Çok küçük alıcı açıklık yarıçaplarında ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı çok küçük iken, alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla oran artmaya başlamaktadır. Alıcı açıklık yarıçapı belli bir de ere ula tı ında (örne in $C_n^2 = 1.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $L=2 \text{ km}$ e risi için $R=3 \text{ cm}$), oran dü meye başlamaktadır. Sabit bir yayılım mesafesinde ve az türbülanslı bir atmosfer ko ulunda oran daha büyüktür. Ayrıca, sabit bir türbülans ko ulu altında, yayılım mesafesinin azalmasıyla oran artmaktadır. ekil 4.10'dan çıkarılacak di er bir sonuç ise yayılım mesafesinin artmasıyla optimum düz tepeli ılık hüzmelerinin biraz daha büyük alıcı açıklık yarıçapı de erlerinde elde edildi idir.

ekil 4.11'de, farklı düzle tirme parametresine sahip düz tepeli ılık hüzmelerinin alıcı açıklık yarıçapına kar ılı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı incelenmiştir. ekil 4.11'de, kaynak boyutu ve yayılım mesafesi sırasıyla $r_s = 2 \text{ cm}$ ve $L = 4 \text{ km}$ alınmıştır. ekil

4.11'de optimum düz tepeli ı k hüzmelerinin büyük düzle tirme parametreleri için elde edildi i görülmektedir. Yapı sabitindeki dü ü , optimum düz tepeli ı k hüzmelerini elde etmede kolaylık sa lamaktadır. ekil 4.11'den çıkarılan di er bir sonuç, yapı sabiti arttıkça, optimum düz tepeli ı k hüzmelerinin biraz daha büyük alıcı açıklık yarıçaplarında elde edildi idir.



ekil 4.10. Alıcı açıklık yarıçapına kar ı farklı yayılım mesafesi ve yapı sabitlerinde, $r_s = 2$ cm ve $N=10$ için ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.



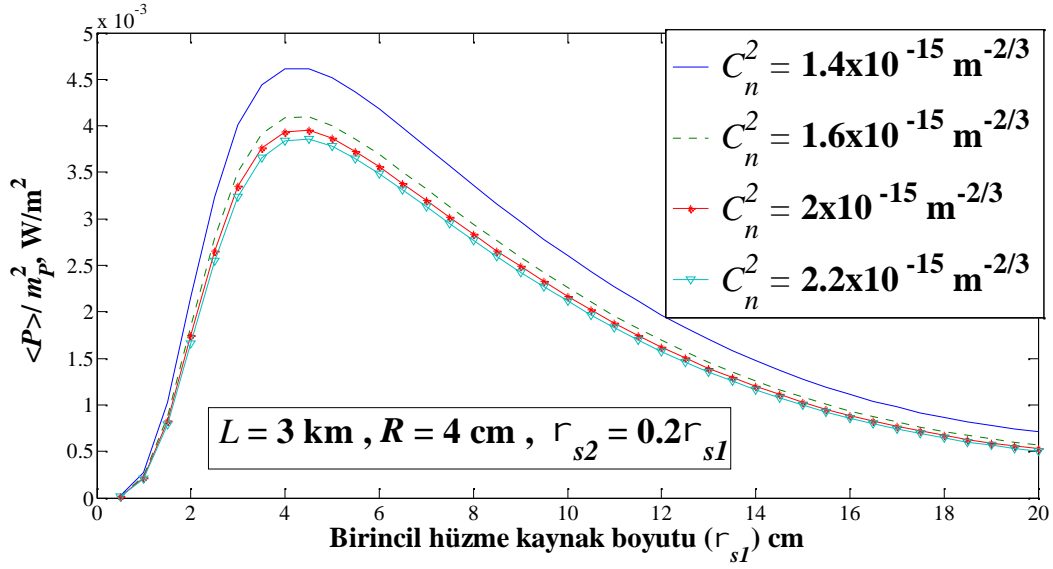
ekil 4.11. Alıcı açıklık yarıçapına karşı farklı düzle tirme parametreleri ve yapı sabitlerinde, $r_s = 2 \text{ cm}$ ve $L=4 \text{ km}$ için ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.

4.3.3 Optimum Halkasal I ık Hüzmeleri

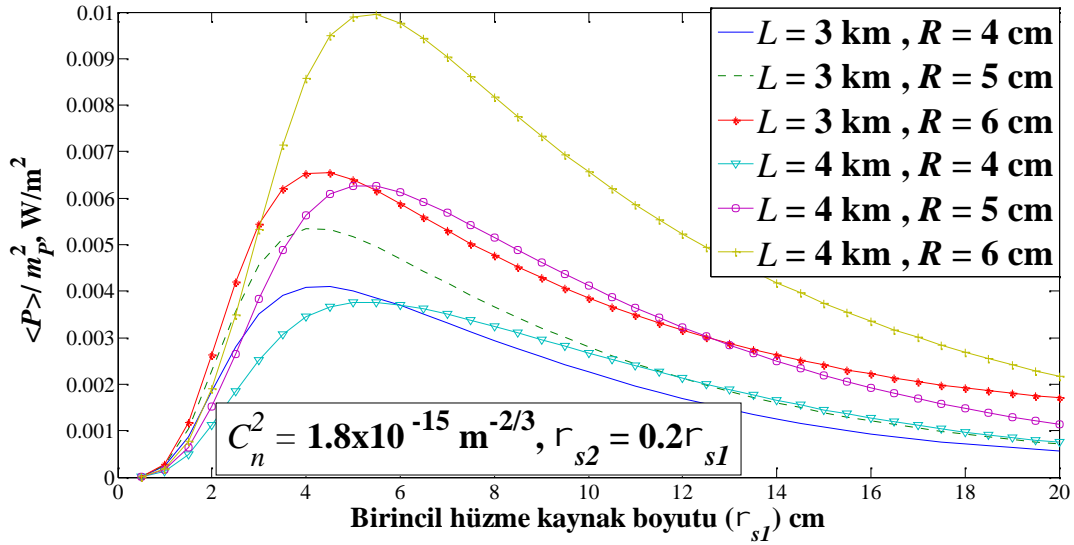
Halkasal ı ık hüzmelerinin ortalama optik gücü E . 3.13'de hesaplanmı tır. Halkasal ı ık hüzmelerinin pırıldama indisine E . 3.13 ve E . 3.25'in E . 3.14'de yerine konulmasıyla bulunmu tur. Bu kısımda, halkasal ı ık hüzmelerinin ortalama optik gücünün pırıldama indisine oranını en fazla yapacak ekilde belirlenen optimizasyon kriteri ile optimum halkasal ı ık hüzmeleri bulunmu tur. ekil 4.12'de sabit bir yayılım mesafesinde, alıcı açıklık yarıçapında ve ikincil hüzme kaynak boyutunda; birincil hüzme kaynak boyutuna karşı farklı türbülans ko ulla rında ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı incelenmi tir. ekil 4.12'de, yayılım mesafesi, alıcı açıklık yarıçapı ve ikincil hüzme kaynak boyutu sırasıyla, $L=3 \text{ km}$, $R=4 \text{ cm}$ and $r_{s2} = 0.2r_{s1}$ alınmı tır. ekil 4.12'den yapı sabitinin azalmasıyla oranın arttı ı görölmektedir. ekil 4.12'den çıkarılacak di er bir sonuç, optimum halkasal ı ık hüzmelerini belirleyen birincil hüzme kaynak boyutunun de eri yakla ık $r_{s1} = 4.5 \text{ cm}$ 'dir.

ekil 4.13'de birincil hüzme kaynak boyutuna karşı farklı yayılım mesafeleri ve alıcı açıklık yarıçaplarında ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı çizdirilmı tir. ekil 4.13'de yapı sabiti ve ikincil hüzme kaynak boyutu sırasıyla $C_n^2 = 1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $r_{s2} = 0.2r_{s1}$

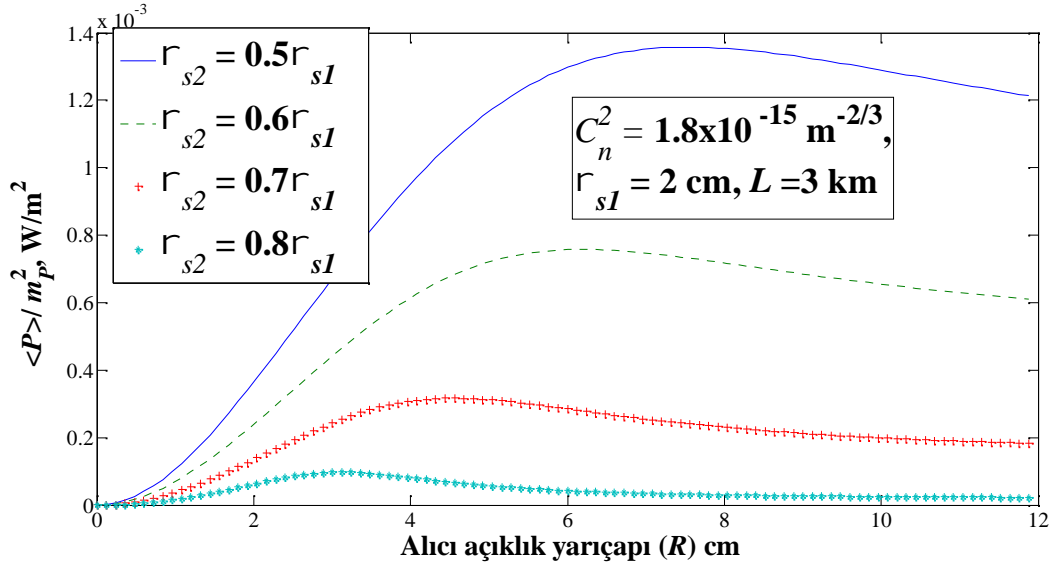
alınmıştır. Ekil 4.13'de sabit bir yayılım mesafesinde, alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla, oranın arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yayılım mesafesinin, 3 km'den 4 km'ye çıkarılmasıyla, optimum halkasal 1. ik hüzmeleri biraz daha büyük birincil hüzmeye kaynak boyutunda elde edilmektedir. Eğer ekil 4.13 alıcı açıklık yarıçapının optimum halkasal 1. ik hüzmeleri elde etmedeki etkisi bakımından incelenirse, büyük alıcı açıklık yarıçaplarında ve büyük yayılım mesafelerinde optimum halkasal 1. ik hüzmelerinin elde edildiği sonucuna varılır. Ekil 4.14'de alıcı açıklık yarıçapının farklı ikincil hüzmeye kaynak boyutlarında optimum halkasal 1. ik hüzmelerini elde etmedeki etkisi araştırılmıştır. Ekil 4.14'de yayılım mesafesi, birincil hüzmeye kaynak boyutu ve yapı sabiti sırasıyla $L=3$ km, $r_{s1} = 2$ cm ve $C_n^2 = 1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ alınmıştır. Ekil 4.14'den çok küçük alıcı açıklık yarıçapı değerlerinde ortalama optik gücün pırlıdamaya indisine oranının çok küçük olduğu görülmektedir. Alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla, oran artmaya başlamaktadır. Alıcı açıklık yarıçapı belli bir değere ulaştığında (örneğin $r_{s2} = 0.8r_{s1}$ değeri için $R=3$ cm), oran alıcı açıklık ortalamasının etkisiyle düzelmeye başlamaktadır. Ayrıca ekil 4.14 dikkatlice incelendiğinde, ikincil hüzmeye kaynak boyutunun azalmasıyla, halkasal 1. ik hüzmelerinin ortasındaki boş halka etrafı daralacak ve ortalama optik gücün pırlıdamaya indisine oranı artacaktır. Ekil 4.14'den çıkarılacak diğer bir sonuç ise ikincil hüzmelerin kaynak boyutunun artmasıyla, oranın tepe noktası, yani optimum halkasal 1. ik hüzmeleri daha büyük alıcı açıklık yarıçaplarında elde edilecektir. Ekil 4.15'de optimum halkasal 1. ik hüzmelerinin elde edilmesinde dalga boyunun etkisi farklı alıcı açıklık yarıçaplarında incelenmiştir. Ekil 4.15'de yapı sabiti, yayılım mesafesi, birincil hüzmelerin kaynak boyutu ve ikincil hüzmelerin kaynak boyutu sırasıyla, $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, $L=3$ km, $r_{s1} = 1$ cm ve $r_{s2} = 0.1r_{s1}$ alınmıştır. Ekil 4.15'de alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla oranın arttığı sonucuna varılmaktadır. Ayrıca, ekil 4.15'den gözlemlenebilen diğer bir sonuç da alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla, optimum halkasal 1. ik hüzmelerinin, yani oranını tepe noktasının, biraz daha büyük dalga boylarında elde edildiğidir. Çalımanın bu kısmı, Electronics Letters dergisine gönderilmiştir.



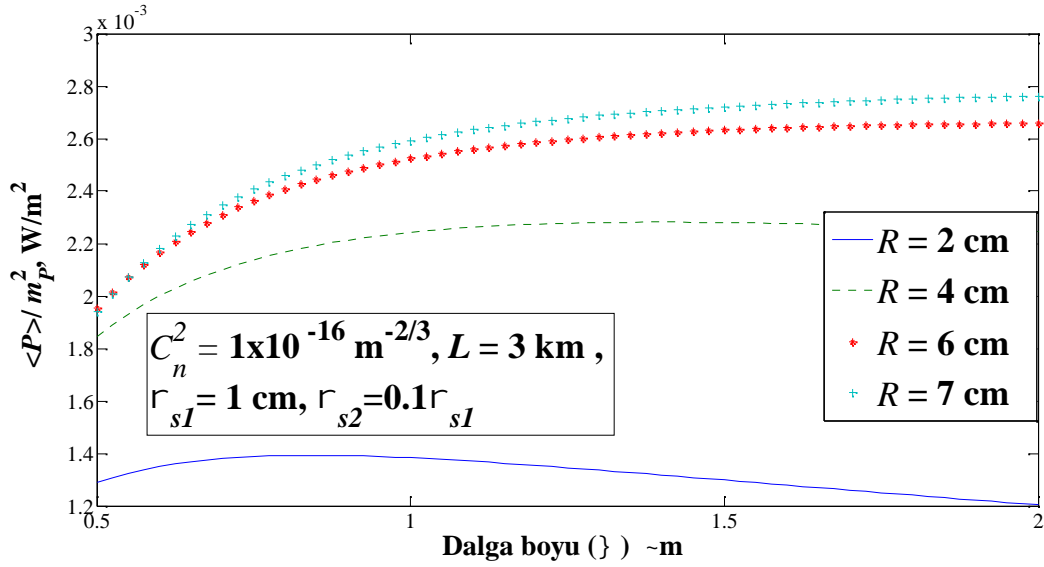
ekil 4.12. Farklı yapı sabitlerinde $L=3\text{ km}$, $R=4\text{ cm}$ ve $r_{s2}=0.2r_{s1}$ için birincil hüzme kaynak boyutuna karşı ortalama optik gücün pırlıdama indisine oranı.



ekil 4.13. Farklı yayılım mesafesi ve alıcı açıklık yarıçaplarında, $C_n^2 = 1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ve $r_{s2} = 0.2r_{s1}$ için birincil hüzme kaynak boyutuna karşı ortalama optik gücün pırlıdama indisine oranı.



ekil 4.14. Farklı ikincil hüzme kaynak boyutlarında $C_n^2 = 1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $r_{s1} = 2 \text{ cm}$ ve $L = 3 \text{ km}$ 'de alıcı açıklık yarıçapına karşı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.



ekil 4.15. Farklı alıcı açıklık yarıçaplarında $C_n^2 = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, $L = 3 \text{ km}$, $r_{s1} = 1 \text{ cm}$ ve $r_{s2} = 0.1r_{s1}$ için dalga boyuna karşı ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çoklu Gauss ışık hüzmelerinin zayıf türbülanslı (Rytov varyansı $\sigma_r^2 < 1$) atmosferde yayılımında alıcı açıklık etkilerinin incelendiği bu tez çalışması sırasında, optik haberleşme sistemlerinde gerek alıcıda ortalama optik gücü artırması gerek pırıldama indisini düşürebilmesi açısından önemli sonuçlar alınmıştır. Çoklu Gauss ışık hüzmelerinin özel durumları olan düz tepeli ve halkasal ışık hüzmelerinin Gauss formunda açıklık a sahip alıcı düzlemindeki ortalama optik güçleri ve Gauss, düz tepeli ve halkasal ışık hüzmelerinin pırıldama indisleri genişletilmiş Huygens-Fresnel integrali kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır, ortalama optik gücü artıracak ve pırıldama indisini düşürecek yayılım mesafesi, alıcı açıklık yarıçapı, kaynak boyutu, dalga boyu gibi parametreler belirlenmiştir. Yayılım mesafesinin arttırılmasıyla ortalama optik güç azalmaktadır. Ancak, alıcı açıklık yarıçapının arttırılmasıyla ortalama optik güçteki düşüşün nispeten önüne geçilebilmektedir. Yayılım mesafesinde odaklanımı ve kolime halkasal ışık hüzmelerinin ortalama optik güçleri karşılaştırılmış, odaklanımı halkasal ışık hüzmeleri üzerindeki alıcı açıklık ortalamasının etkileri incelenmiştir. Yayılım mesafesinin artmasıyla azalan ortalama optik güç, odaklanımı halkasal ışık hüzmelerinde daha az miktarda azalmaktadır. Kolime ışık hüzmeleri için yayılım mesafesinin artmasıyla ortalama optik güçteki azalma %40 iken, odaklanımı ışık hüzmeleri için optik güçteki azalma %20 civarındadır.

Türbülanslı atmosferde yayılan çoklu Gauss ışık hüzmelerinin pırıldama indisini için gerekli olan $\langle P^2 \rangle$ analitik olarak hesaplanmıştır, pırıldama indisinin noktasal açıklık a sahip alıcı düzlemindeki pırıldama indisine oranı ile alıcı açıklık ortalama faktörü hesaplanmıştır. Alıcı açıklık ortalama faktörünün hangi parametreler için daha etkili olduğunu yani pırıldama indisindeki düşüşün daha fazla olduğunu bulunmuştur. Odaklanımı Gauss ışık hüzmelerinin pırıldama indisleri, dalga boyu, alıcı açıklık yarıçapı ve yayılım mesafesine karşı incelenmiştir, pırıldamayı düşürecek parametreler belirlenmiştir. Literatüre göre yeni olarak alıcı açıklık ortalamasının etkisinin büyük yayılım mesafelerinde ve büyük yapı sabiti değerlerinde görüldüğünü sonucuna varılmıştır. Alıcı açıklık yarıçapının artması, açıklık ortalamasının etkisini

kuvvetlendirmektedir. Büyük yayılım mesafelerinde, büyük açıklık a sahip odaklanmı Gauss ı ık hüzmelerinin pırıldama indisi kolime Gauss ı ık hüzmelerine göre %25 oranında daha dü üktür. Düz tepeli ı ık hüzmelerinde, düzle tirme parametresinin artırılması, alıcı açıklık ortalamasının etkisini artırmaktadır. Örne in düzle tirme parametresi $N=1$ 'den $N=20$ 'ye çıkarıldı ında, ortalama optik güç 5 katına çıkabilmektedir. Açıklık ortalamasının etkisi bakımından, dü ük düzle tirme parametrelerinde küçük kaynak boyutlarına sahip düz tepeli ı ık hüzmeleri avantajlıyken, büyük düzle tirme parametrelerinde büyük kaynak boyutuna sahip düz tepeli ı ık hüzmeleri daha avantajlıdır. Sabit bir alıcı açıklık yarıçapında, tüm yayılım mesafelerinde odaklanmı düz tepeli ı ık hüzmelerinin pırıldama indisi, kolime düz tepeli ı ık hüzmelerinin pırıldama indisinden daha dü üktür. Halkasal ı ık hüzmeleri için, ikincil hüzmeye kaynak boyutunun arttı ı yani halkasal bo lu un incelme i durumlarda açıklık ortalamasının etkili oldu u gözlemlenmi tir (ekil 3.26). Ayrıca, alıcı açıklık ortalaması bakımından incelme inde, halkasal ı ık hüzmelerinin Gauss ı ık hüzmelerine göre daha avantajlı oldu u görülmektedir. Kolime ve odaklanmı halkasal ı ık hüzmeleri kar ıla tırıldı ında, kolime ya da odaklanmı olmasından ba ımsız olarak, yüksek yayılım mesafelerinde alıcı açıklık ortalamasının etkisi gözlemlenmi tir. Sabit bir yayılım mesafesinde ise, odaklanmı halkasal ı ık hüzmelerinin alıcı açıklık ortalama faktörü daha dü ük yani alıcı açıklık ortalamasının etkisi daha fazladır.

Çalı manın son kısmında, zayıf türbülanslı atmosferde yayılan Gauss, düz tepeli ve halkasal ı ık hüzmeleri için link performans optimizasyonu yapılmı tir. Matlab programlama dilinin “multi-objective optimization-MOO” (çoklu amaçlı optimizasyon) aracı ile ortalama optik güç ile pırıldama indisi arasındaki ili ki incelenmi tir. Bunun için, ortalama optik güç ve pırıldama indisi fonksiyonları amaç fonksiyonlar olarak belirlenerek Pareto-optimum e risi çizdirilmi tir. Pareto-optimum e risi kullanılarak optik haberle me linkinin çalı ma durumuna göre ortalama optik güç ve pırıldama indisleri belirlenebilmekte, en fazla optik güç ya da minimum pırıldama indisi durumları için link performansı optimizasyonu yapılabilmektedir. Pareto-optimum e risinde, her bir amaç fonksiyonunun a ırlıklandırma katsayısı e it de ildir. Bu sebepten,

eri üzerindeki her bir nokta aslında optimum Gauss ı k hüzmesini verebilmektedir. Burada amaç, artan ortalama optik güç de erleri ya da azalan pırıldama indisine de erleri ile link durumuna göre link performans optimizasyonu yapılmasıdır.

Ortalama optik gücün pırıldama indisine oranını en fazla yapacak ekilde belirlenen optimizasyon kriteri ile zayıf türbülanslı atmosferde yayılan optimum Gauss, düz tepeli ve halkasal ı k hüzmeleri belirlenmiştir. Ortalama optik gücün pırıldama indisine oranını artıran yani linkin performansını iyile tiren kaynak boyutu, alıcı açıklık yarıçapı, dalga boyu ve uyumluluk uzunluğu de erleri literatüre yenilik olarak bulunmu tur. Örne in optimum Gauss ı k hüzmeleri kaynak boyutu $r_s = 1$ cm , yayılım mesafesi $L = 3$ km, yapı sabiti $C_n^2 = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ iken, $R = 2$ cm açıklık yarıçapında ve dalga boyu $\lambda = 1$ ~ m'de elde edilmektedir. Aynı de erler için, uyumluluk uzunluğu $u = 0.1$ cm de erinde optimum Gauss ı k hüzmeleri elde edilebilmektedir. Sabit yapı sabiti de erinde, ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı dü ük yayılım mesafelerinde, büyük alıcı açıklık yarıçapı de erlerinde artmaktadır. Literatürde yeni bir durum olarak, noktasal açıklı a sahip alıcı düzleminde ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı çok dü ük iken, alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla belli bir noktaya kadar oran artırılabilenekte, daha sonra ula tı ı en fazla noktadan itibaren tekrar dü meye ba lamaktadır. Dü ük dalga boyu de erlerinde optimum Gauss ı k hüzmeleri elde edilebilirken, alıcı açıklık yarıçapının artmasıyla nispeten biraz daha büyük dalga boylarında optimum Gauss ı k hüzmeleri elde edilmiştir. Uyumluluk uzunluğunun artmasıyla oran artırılabilenekte. Odaklanmı ve kolime Gauss ı k hüzmeleri kar ıla tırıldı ında, büyük açıklı a sahip odaklanmı Gauss ı k hüzmeleri için en fazla oran elde edilebilmektedir. Düzle tirme parametresinin artırılmasıyla oran artmakta, optimum düz tepeli ı k hüzmeleri elde edilebilmektedir. Sabit bir kaynak boyutu ve düzle tirme parametresinde, dü ük yayılım mesafesi ve büyük yapı sabiti de erleri için optimum düz tepeli Gauss ı k hüzmeleri gözlemlenmiştir. Halkasal ı k hüzmeleri için, di er parametreler sabit iken, birincil hüzmenin kaynak boyutunun artmasıyla artan ortalama optik gücün pırıldama indisine oranı, ula tı ı en fazla de er olan $5 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ 'den itibaren tekrar dü meye ba lamaktadır. Optimum halkasal ı k hüzmeleri nispeten küçük birincil hüzme kaynak boyutu de erleri için gözlemlenmektedir. Di er

parametreler sabitken, ikincil hüzme kaynak boyutunun artmasıyla yani halka etinin artmasıyla oran 13 kat artmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Wilson J. , Hawkes, J. B. F, *Optoelectronics: An Introduction*, England, Prentice Hall Europe, **1998**.
- [2] Manor H., Arnon S., Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength, *Applied Optics*, 36, 4285-4294, **2003**.
- [3] Zhu X, Kahn J. M., Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels", *IEEE Transactions on Communications*, 50, 1293-1300, **2002**.
- [4] Achour M., Free-space optics wavelength selection: 10 um versus shorter wavelengths, *Journal of Optical Networking*, 2, 127-143, **2003**.
- [5] Bloom S., Korevaar E. Schuster J., Willebrand H., Understanding the performance of free-space optics, *Journal of Optical Networking*, 2, 178-200, **2003**.
- [6] Bushuev D., Arnon S., Analysis of the performance of a wireless optical multi-input to multi-output communication system, *Journal of Optical Society of America A*, 23, 1722-1730, **2006**.
- [7] Chan V. W. S., Free-space optical communications, *Journal of Lightwave Technology*, 24, 4750-4762, **2006**.
- [8] Crabtree P., Woods P., Khoury J., GodaM., Binary phase-only filtering for turbulence compensation in fiber-coupled free-space laser communication systems, *Applied Optics*, 46, 8335-8345, **2007**.
- [9] Killinger D., Free space optics for laser communication through the air, *Optics Photonics News*, 13, 36-42, **2002**.
- [10] Rabinovich W. S., Mahon R., Burris R., Gilbreath G. C., Goetz P. G., Moore C., Stell M. F., Vilcheck M. J., Witkowsky J. L., Swingen L., Suite M. R., Oh E., Koplow J., Free-space optical communications link at 1550 nm using multiple-quantum-well modulating retroreflectors in a marine environment, *Optical Engineering*, 44, 056001-056001-1-12, **2005**.
- [11] Sarkar S., Dixit S. Mukherjee B., Hybrid wireless-optical broadband-access network (WOBAN): A review of relevant challenges, *Journal of Lightwave Technology*, 25, 3329-3340, **2007**.
- [12] Tyson R., Bit-error rate for free space adaptive optics laser communications, *Journal of Optical Society of America A*, 19, 753-758, **2002**.
- [13] Wakamori K., Kazaura K., Oka I., Experiment on regional broadband network using free-space-optical communication systems, *Journal of Lightwave Technology*, 25, 3265-3273, **2007**.

- [14] Wang X. Hsu C. Y., Jin X., Mobile free space optical communication system, SPIE Conference on Free-Space Laser Communication Technologies XX, *Proceedings of SPIE*, 6877-687706-1-7, **2008**.
- [15] Wu M. C., Solgaard O., Ford J. E., Optical MEMS for lightwave communication, *Journal of Lightwave Technology*, *IEEE Transactions on Communications*, 50, 1293-1300, **2002**.
- [16] Andrews L. C., Philips R. L., *Laser beam propagation through random media*, SPIE Press, Bellingham, 1-173, **1998**.
- [17] Andrews, L. C., Philips R. L., *Laser beam propagation through random media*, SPIE Press, Bellingham, 1-19, 43-77, 223-254, 52-53, **1998**.
- [18] Smith, F. G., *Atmospheric propagation of radiation*, SPIE Press, Bellingham, 161-200 **1993**.
- [19] Prucnal P. R., Receiver performance evaluation using photocounting cumulants with application to atmospheric turbulence, *Applied Optics*, 19, 3611, **1980**.
- [20] Rayment R., An observational study of the vertical profile of the high frequency fluctuations of the wind in the atmospheric boundary layer, *Boundary-Layer Metrology*, 337-346, **1976**.
- [21] Andrews L. C., Philips R. L., Yu P. T., Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system, *Applied Optics*, 34, 7742-7751, **1995**.
- [22] Herman R. M., Wiggins T. A., Propagation and focusing of Bessel–Gauss, generalized Bessel–Gauss, and modified Bessel–Gauss beams, *Journal of Optical Society of America A*, 18, 170-176, **2001**.
- [23] Borghi R., Santarsiero M., Alonso M. A., Highly focused spirally polarized beams, *Journal of Optical Society of America A*, 22, 1420-1431, **2005**.
- [24] Carvalho M. I., Fac M., Propagation of Airy-related beams, *Optics Express*, 18, 21938-21944, **2010**.
- [25] Arpali Ç, Yazicioglu C., Eyyuboglu H., Arpali S., Baykal Y., Simulator for general-type beam propagation in turbulent atmosphere, *Optics Express*, 14, 8918-8928, **2006**.
- [26] Kamacio lu, C., Baykal Y., “Generalized expression for optical source fields”, *Journal of Optics and Laser Technology*, 44, 1706, **2012**.
- [27] Eyyubo lu H. T., Arpali Ç., Baykal Y., Flat topped beams and their characteristics in turbulent media, *Optics Express*, 14, 4196, **2006**.
- [28] Eyyubo lu H., Hermite-cosine-Gaussian laser beam and its propagation characteristics in turbulent atmosphere, *Journal of Optical Society of America A*, 22, 1527-1534, **2005**.

- [29] Dan Y., Zhang B., Pan P., Propagation of partially coherent flat-topped beams through a turbulent atmosphere, , *Journal of Optical Society of America A*,25, 2221-2229, **2008**.
- [30] Yuan Y., Cai Y., Qu J., Eyyubo lu H. T.; Baykal Y., Average intensity and spreading of an elegant Hermite–Gaussian beam in turbulent atmosphere, *Optics Express*, 17, 11130-11139, **2009**.
- [31] Tatarski, V.I., *Wave Propagation in a Turbulent Medium*, McGraw-Hill, NewYork, 91-173, **1961**.
- [32] Gracheva, M.E., Gurvich, A.S., Strong fluctuations in the intensity of light propagated through the atmosphere close to the earth, *Izvestiya VUZ. Radiofizika*, 8(4): 717-724, **1965**.
- [33] Yura, H.T., Physical model for strong optical-amplitude fluctuations in a turbüluent medium, *Journal of Optical Society of America*, 64(1), 59-67, **1974**.
- [34] Banakh, V.A., Mironov, V.L., Spectra of temporal intensity fluctuations of laser radiation traveling in a turbulent atmosphere”, *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 5(10), 1178-1182, **1975**.
- [35] Churnside, J. H., Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere, *Applied Optics*, 30, 1982-1994, **1991**.
- [36] Fried, D. L., Aperture averaging of scintillation, *Journal of Optical Society of America*, 57(2), 169-172, **1967**.
- [37] Kon, A. I., Averaging of spherical-wave fluctuations over a receiving aperture, *Radiophysics of Quantum Electronics*, 12, 122-124, **1969**.
- [38] Lutormirski, R. F., Yura, H. T., Aperture-averaging factor of a fluctuating light signal, *Journal of Optical Society of America*, 59, 1247-1248, **1969**.
- [39] Andrews, L. C., Aperture-averaging factor for optical scintillations of plane and spherical waves in the atmosphere, *Journal of Optical Society of America A*, 9,597-600, **1992**.
- [40] Bass, E. L., Lackovic, B. D., Andrews, L. C., Aperture averaging of optical Scintillations based on a spectrum with high wave number bump, *Optical Engineering*, 34, 26-31, **1995**.
- [41] Andrews, L. C., Philips, R. L., Hopen, C. Y., Aperture averaging of optical scintillations: power fluctuations and the temporal spectrum, *Waves Random Media*, 10, 53-70, **2000**.
- [42] Wang, S. J., Baykal, Y., Plonus, M. A., “Receiver-aperture averaging effects for the intensity fluctuation of a beam wave in the turbulent atmosphere”, *Journal of Optical Society of America*, 73, 831-837, **1983**.
- [43] Chu X, Ni Y, Zhou G., Propagation analysis of flattened circular Gaussian beams with a circular aperture in turbulent atmosphere, *Optics Communications*, 274, 274- 280, **2007**.

- [44] Xueju S, Long W, Hongbin S, Yudong H. Propagation analysis of flattened circular Gaussian beams with a misaligned circular aperture in turbulent atmosphere. *Optics Communications*, 282, 4765-4770, **2009**.
- [45] Barrios R, Dios F., Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves, *Optics Express*, 20, 13055-13064, **2012**.
- [46] Baykal Y, Eyyubo lu HT, Scintillation index of flat-topped-Gaussian beams, *Applied Optics*, 45, 3793-3797, **2006**.
- [47] Baykal Y, Eyyubo lu HT, Scintillations of incoherent flat-topped Gaussian source field in turbulence, *Applied Optics*, 46, 5044-5050, **2007**.
- [48] Baykal Y, Eyyubo lu HT, Cai Y, Scintillations of partially coherent multiple Gaussian beams in turbulence, *Applied Optics*, 48, 1943-1954, **2009**.
- [49] Altay Arpali S., Eyyubo lu H. T., Baykal Y., Scintillation index of higher-order cos- Gaussian, cosh-Gaussian and annular beams, *Journal of Modern Optics*, 55, 227-239, **2008**.
- [50] Gerçekcio lu H., Baykal Y., Nakibo lu C., Annular beam scintillations in strong turbulence, *Journal of Optical Society of America*, 27, 1834-1839, **2010**.
- [51] Öztan M. A., Baykal Y, Nakibo lu C, Effects of extremely strong turbulent medium on scintillations of partially coherent annular and flat-topped Gaussian beams, *Optics Communications*, 285, 943-946, **2012**.
- [52] Gerçekcio lu H., Baykal Y., Annular beam scintillations in non-Kolmogorov weak turbulence, *Applied Physics B*, 106, 933-937, **2012**.
- [53] Kamacio lu C., Baykal Y., Yazgan E., "Averaging of receiver aperture for flat-topped incidence", *Journal of Optics and Laser Technology*, 52, 91-98, **2013**.
- [54] Schulz T. J., Optimal beams for propagation through random media, *Optics Letters*, 30, 1093-1095, **2005**.
- [55] Chen C., Yang H., Feng X., Wang H., Optimization criterion for initial coherence degree of lasers in free-space optical links through atmospheric turbulence, *Optics Letters*, 34, 4, 419-421, **2009**.
- [56] Leader, "Beam-intensity fluctuations in atmospheric turbulence", *Journal of Optical Society of America*, 15, 542-557, **1981**.
- [57] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and P. T. Yu, "Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system", *Applied Optics*, 34, 7742-7751, **1995**.
- [58] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and P. T. Yu, "Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system: errata", *Applied Optics* 36, 6068, **1997**.

- [59] W. B. Miller, J. C. Ricklin, and L. C. Andrews, "Effects of the refractive index spectral model on the irradiance variance of a Gaussian beam," *Journal of Optical Society of America A*, 11, 2719–2726, **1994**.
- [60] L. C. Andrews, R. L. Phillips and C. Y. Hopen, *Laser Beam Scintillation with Applications*, SPIE Press, 67-92, **2001**.
- [61] R. L. Phillips and L. C. Andrews, "Measured statistics of laser-light scattering in atmospheric turbulence", *Journal of Optical Society of America*, 71, 1440–1445, **1981**.
- [62] V. I. Tatarski, "*Wave propagation in a turbulent medium*," McGraw-Hill, New York, 91-173, **1961**.
- [63] A. H. Mikesell, A. A. Hoag, and J. S. Hall, "The scintillation of starlight," *Journal of Optical Society of America*, 41, 689-695, **1951**.
- [64] L. C. Andrews, "Aperture-averaging factor for optical scintillations of plane and spherical waves in the atmosphere," *Journal of Optical Society of America A*, 9, 597-600, **1992**.
- [65] Kamacıo lu C., Baykal Y., Yazgan E., "Düz Tepeli I ık Hüzmlerinin Türbülanslı Atmosferde Yayılımında Alıcı Açıklı ı Etkileri", 6. URSI Konferansı, 2-5 Eylül **2012**, stanbul.
- [66] Kamacıo lu C., Baykal Y., Yazgan E., "Receiver Aperture Effects on Received Power of Annular Beams", *Electronics Letters*, gönderildi.
- [67] Gradshteyn IS, *Ryzhik IM. Tables of Integrals, Series and Products*, Academic Press, **2000**.
- [68] Kamacıo lu C., Baykal Y., Yazgan E., "Odaklanmı Gauss I ık Hüzmlerinin Türbülanslı Atmosferde Yayılımında Alıcı Açıklı ı Etkileri ve Optimum Odaklanmı Gauss I ık Hüzmleri", 6. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Çankaya Üniversitesi, 25-26 Nisan **2013**, Ankara.
- [69] Kamacıo lu C., Baykal Y., Yazgan E., "Aperture Averaging of Focused Multi-Gaussian Beams", 34. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 12-15 A ustos, **2013**, sveç.
- [70] Eyyubo lu H. T., Altay Arpali S., Baykal Y., "Propagation characteristics of higher-order annular beams propagating in turbulent atmosphere", *Optics Communications*, 264, 25-34, **2004**.
- [71] Kamacıo lu C., Baykal Y., Yazgan E., "Receiver Aperture Averaging of Annular Beams Propagating Through Turbulent Atmosphere," *Optical Engineering*, gönderildi.
- [72] Deb K., *Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, West Sussex, Wiley&Son's, **2003**.
- [73] Miettinen K. M., *Nonlinear Multiobjective Optimization*, California, Kluwer Academic Publishers, **1999**.

- [74] Boyd S., Vandenberghe L., *Convex Optimization*, Cambridge, Cambridge University Press, **2004**.
- [75] Dias A.H.F., Joao A. de V., Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solved Optimization Problems, *IEEE Transactions On Magnetics*, 38, 2, **2002**.
- [76] Osyczka A., *Evolutionary Algorithms for Single and Multicriteria Design Optimization*, New York, Physica Verlag, **2002**.
- [77] Kamacio lu C., Baykal Y., Yazgan E., "Optimization of power to scintillation index ratio in turbulence", *IEEE Photonics and Technology Letters*, gönderildi.

SÖZLÜK

İngilizce

Coherence length:

Collimated:

Scintillation:

Doughnut:

Random:

Fluctuation:

Türkçe

Uyumluluk uzunluğu.

Kolime.

Pırıldama.

Simit ekinde.

Rastlantısal.

Salınım.

ÖZGEÇM

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Canan Kamacıo lu

Do um Yeri : Almanya

Medeni Hali : Evli

E-posta : cyazicioglu@cankaya.edu.tr; cananyazicioglu@hotmail.com

Adresi : Çankaya Üniversitesi Mekatronik Müh. Bölümü

E itim

Lise : Yüce Fen Lisesi

Lisans : Çankaya Üniversitesi Elektronik ve Haberle me Mühendisli i
(Tam Burslu)

Yüksek Lisans: Çankaya Üniversitesi Elektronik ve Haberle me Mühendisli i
(Tam Burslu)

Doktora : Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisli i

Yabancı Dil ve Düzeyi

ngilizce (leri)

Almanca (Ba langıç)

Deneyimi

2011- Ar. Gör., Çankaya Üniversitesi Mekatronik Mühendisli i Bölümü

2005-2011 Ar. Gör., Çankaya Üniversitesi Elektronik ve Haberle me Mühendisli i
Bölümü

Deneyim Alanları

Serbest Uzay Optik Haberle me Sistemleri, Hüzme Çe itleri ve Türbülanslı Atmosferde Yayılım, Optimizasyon.

Tezden Üretilmi Projeler ve Bütçesi

Yok

Tezden Üretilmi Yayınlar

- 1) Canan Kamacıo lu, Yahya Baykal and Erdem Yazgan, "Averaging of Receiver Aperture for Flat-topped Incidence," Optics and Laser Technology, 52, 91-98, 2013.

Tezden Üretilmi Tebli ve/veya Poster Sunumu ile Katıldı ı Toplantılar

- 1) Canan Kamacıo lu, Yahya Baykal, Erdem Yazgan, "Düz Tepeli ı ık Hüzmelerinin Türbülanslı Atmosferde Yayılımında Alıcı Açıklı ı Etkileri", 6. URSI Konferansı, Do u Üniversitesi, stanbul, Eylül 2012.
- 2) Canan Kamacıo lu, Yahya Baykal and Erdem Yazgan, "Odaklanmı Gauss ı ık hüzmelerinin alıcı açıklı ı etkileri ve optimum odaklanmı Gauss ı ık hüzmeleri", Çankaya Üniversitesi, 6. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 25-26 Apr 2013. Çankaya Üniversitesi, 6. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu Kitapçısı, 305-308, 25.
- 3) Canan Kamacıo lu, Yahya Baykal, and Erdem Yazgan, "Aperture averaging of focused multi-Gaussian beams", PIERS 2013, August 12-15 2013, Stockholm, Sweden (To be presented)