



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



SU ALTI ARAÇLARINA YÖNELİK LAZER HABERLEŞME SİSTEM TASARIMI

İBRAHİM EMİRHAN DELİBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik

Mühendisliği

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Alper Nabi AKPOLAT

İSTANBUL, 2024



MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES



LASER COMMUNICATION SYSTEM DESIGN FOR UNDERWATER VEHICLES

İBRAHİM EMİRHAN DELİBAŞ

MASTER THESIS

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Supervisor

Asst. Prof Alper Nabi AKPOLAT

ISTANBUL, 2024

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	1
1.1. İlgili Literatür	1
1.2. Katkı ve Organizasyon	5
2. LAZER HABERLEŞME SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ	7
2.1. Free Space Optic (FSO).....	7
2.2. Su Altı Optik Haberleşme.....	8
3. DİZAYN ADIMLARI, DEVRE AÇIKLAMALARI VE FORMÜLASYON	10
3.1. Sistem Modelleme ve Simülasyon.....	10
3.1.1. Compliance Test Patterns.....	11
3.1.2. NRZ Pulse Generator	11
3.1.3. CW Lazer	13
3.1.4. MZ Modulator.....	13
3.1.5. EA Modulator	14
3.1.6. AM Modulator	15
3.1.7. Optical Ampfilier (OA).....	15
3.1.8. Line Of Sight (LOS) Underwater Channel.....	16
3.1.9. Pin Photodiode	17
3.1.10. Low Pass Gaussian Filter	19
3.1.11. Eye Diagram Analyzer	20
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	22
KAYNAKLAR / REFERENCES.....	39

ÖZET

SU ALTI ARAÇLARINA YÖNELİK LAZER HABERLEŞME SİSTEM TASARIMI

Denizaltı araçlarında kullanılan lazer iletişim sistemleri, keşif, denizaltı araştırmaları ve endüstriyel uygulamalar gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ancak, denizaltı iletişimi genellikle geleneksel iletişim teknolojileriyle etkili bir şekilde sağlanamadığı için zorlu bir sorundur. Bu nedenle, denizaltı araçları için lazer iletişim sistemleri giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu çalışma, denizaltı araçları için lazer iletişim sistemlerinin kapsamlı tasarım kriterlerini ve analizini araştırarak yeni bir yaklaşım sunmaktadır. İlk olarak, denizaltı lazer iletişim sistemlerinin temel prensipleri ve çalışma mekanizmaları açıklanmaktadır. Ardından, sistem performansını etkileyen ana faktörler ve tasarım kriterleri detaylı bir şekilde tartışılmaktadır. Bu kriterler arasında iletişim mesafesi, veri hızı, güç tüketimi, denizaltı ortamının optik özellikleri ve sistem stabilitesi bulunmaktadır. Farklı lazer modülasyon teknikleri ve iletişim protokolleri de değerlendirilmektedir. Ayrıca, farklı denizaltı ortamlarında lazer iletişim sistemlerinin performansını değerlendirmek için kullanılacak simülasyon, kanal çeşitliliği ve test yöntemlerine odaklanmaktadır. Son olarak, mevcut teknolojiye dayalı bir örnek lazer iletişim sistemi tasarımı ve analizi sunulmakta ve gelecek araştırma alanları ve geliştirme fırsatları tartışılmaktadır. Bu çalışma, denizaltı araçlarının iletişim ihtiyaçlarını karşılamak için lazer iletişim sistemleri tasarlamak ve uygulamak isteyen araştırmacılar ve mühendisler için değerli bir kaynak olacaktır.

ABSTRACT

LASER COMMUNICATION SYSTEM DESIGN FOR UNDERWATER VEHICLES

Underwater vehicles are utilized in various fields, such as exploration, submarine research, and industrial applications. However, underwater communication is often a formidable challenge because conventional communication technologies are ineffective for underwater vehicles. Therefore, laser communication systems for underwater vehicles are receiving more and more attention. This paper presents a novel approach by investigating comprehensive design criteria and analysis of laser communication systems for underwater vehicles. Firstly, the basic principles and working mechanisms of underwater laser communication systems are explained. Then, the main factors affecting system performance and design criteria are discussed in detail. These criteria include communication distance, data rate, power consumption, optical properties of the underwater environment, and system stability. Different laser modulation techniques and communication protocols are also evaluated. The paper also focuses on simulation, channel diversity, and test methods that can be used to assess the performance of laser communication systems in different underwater environments. Finally, an example laser communication system design and analysis based on current technology is presented, and future research areas and development opportunities are discussed. This paper will be a valuable resource for researchers and engineers interested in designing and implementing laser communication systems to meet the communication needs of underwater vehicles.

SEMBOLLER/SYMBOLS

I	: Işık şiddeti
I_0	: Başlangıç ışık şiddeti
k	: Zayıflama katsayısı
d	: Mesafe
c_r	: Yükselme zamanı katsayısı
c_f	: Düşme zamanı katsayısı
T	: Bit Periyot
ER	: Sinyal sönüm oranı
SF	: Simetri faktörü
$Modulation(t)$: Elektriksel giriş modülasyon sinyali
$E_{in}(t)$: Giriş sinyali
$E_{out}(t)$: Çıkış sinyali
α	: Chirp faktörü
MI	: Modülasyon indeksi
P_{out}	: Toplam çıkış gücü
P_{in}	: Toplam giriş gücü
ηR	: Alıcı optik verimliliği
θ	: Açı
A_{Rec}	: Optik alıcı açıklık alanı
θ_0	: Lazer ışını dağılma açısı
B_e	: PIN Eşdeğer gürültü bant genişliği
r	: PIN duyarlılığı
P_s	: Sinyal gücü
i_d	: Cihaz karanlık akımı

q	: Elektron yük değeri
P_{ASE}	: Optik gürültü gücü
PSD_{ASE}	: Optik gürültü alanının güç spektral yoğunluğu
$H(f)$: Filtre transfer fonksiyonu
f	: Frekans
f_c	: Cut-off frekansı



KISALTMALAR/ABBREVIATIONS

AM	: Amplitude Modulation
ASE	: Amplified Spontaneous Emission
BER	: Bit Error Rate
CW	: Continuous Wave
EA	: Electro-absorption
FSO	: Free Space Optic
ISI	: Inter-Symbol Interference
LOS	: Lines of Sight
LOS-FSO	: Line-of-Sight Free Space Optics
MIMO	: Multi Input Multi Output
MLD	: Modulated Laser Diode
MZ	: Mach-Zehnder
NRZ	: Non-Return-to-Zero
OA	: Optical Amplifier
OWC	: Optical Wireless Communication
Q	: Quality
RZ	: Return-to-Zero
SPAD	: Single-Photon Avalanche Diode
UASN	: Underwater Acoustic Sensor Networks
UOC	: Underwater Optical Communication
UOWC	: Underwater Optical Communication
UVLC	: Underwater Visible Light Communication Systems
VE	: Viterbi Equalization
WDM	: Wavelength Division Multiplexing

ŞEKİL LİSTESİ / LIST OF FIGURES

Şekil 3.1. Su Altı Lazer Haberleşme Sistem Tasarımı.....	10
Şekil 3.2. Compliance Test Patterns.....	11
Şekil 3.3. NRZ Pulse Generator.....	12
Şekil 3.4. MZ Modülator.....	13
Şekil 3.5. MZ Modülator İç Dizaynı.....	13
Şekil 3.6. EA Modulator.....	14
Şekil 3.7. EA Modulator İç Dizaynı.....	14
Şekil 3.8. AM Modulator.....	15
Şekil 3.9. Optik Amplifikatör.....	16
Şekil 3.10. LOS Underwater Channel.....	17
Şekil 3.11. LOS Underwater Channel İç Dizaynı [22].....	17
Şekil 3.12. Pin Photodiode.....	18
Şekil 3.13. PIN Fotodiyot Devresi.....	18
Şekil 3.14. Low Pass Gaussian Filter.....	20
Şekil 3.15. Clock Recovery.....	20
Şekil 3.16. Data Recovery.....	20
Şekil 3.17. Eye Diagram Analyzer.....	21
Şekil 4.1. I. Senaryo Sistem Tasarımı.....	22
Şekil 4.2. I. Senaryo Eye diagram.....	23
Şekil 4.3. II. Senaryo Sistem Tasarımı.....	23
Şekil 4.4. II. Senaryo Eye Diyagram.....	24
Şekil 4.5. III. Senaryo Sistem Tasarımı.....	24
Şekil 4.6. III. Senaryo Eye Diyagram.....	25

Şekil 4.7. IV. Senaryo Sistem Tasarımı.....	25
Şekil 4.8. IV. Deney Eye Diyagram.	26
Şekil 4.9. Saf Deniz Ortamı için Q Factor Sonuçları.....	27
Şekil 4.10. Saf Deniz Ortamı için Eye Height Sonuçları.....	28
Şekil 4.11. Saf Deniz ortamı MZ modülasyonlu ve 532 nm Dalga Boyu Senaryolu Eye Diyagram.	28
Şekil 4.12. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve MZ Modülasyonlu Saf Deniz Senaryolar Eye Diyagramları.....	30
Şekil 4.13. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve EA Modülasyonlu Saf Deniz Senaryolar Eye Diyagramları.	31
Şekil 4.14. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve AM Modülasyonlu Saf Deniz Senaryolar Eye Diyagramları.	32
Şekil 4.15. Açık Okyanus Ortamı için Q Factor Sonuçları.....	33
Şekil 4.16. Açık Okyanus Ortamı için Min BER Sonuçları.	34
Şekil 4.17. Açık Okyanus Ortamı için Min BER Sonuçları.	34
Şekil 4.18. Açık Okyanus Ortamı için AM modülasyonlu ve 1064 nm Dalga Boyu Senaryolu Eye Diyagramı.....	35
Şekil 4.19. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve MZ Modülasyonlu Açık Okyanus Senaryolar Eye Diyagramları.	36
Şekil 4.20. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve EA Modülasyonlu Açık Okyanus Senaryolar Eye Diyagramları.	37
Şekil 4.21. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve AM Modülasyonlu Açık Okyanus Senaryolar Eye Diyagramları.	38

TABLO LİSTESİ/LIST OF TABLES

Tablo 2.1. Su Altı Ortam Zayıflama Katsayıları [19-21].	8
Tablo 4.1. Saf Deniz, 100 metre, 1 Watt Lazer Gücü.	27
Tablo 4.2. Açık Okyanus, 100 metre, 1 Watt Lazer Gücü.	33



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasındaki her aşamada bana yardımcı olan değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Alper Nabi AKPOLAT'a, yüksek lisans ders aşamasında ve tez aşamasında verdiği desteklerden ötürü arkadaşım Selçuk ALTINAY'a teşekkür ederim.

Hayatımın diğer aşamalarında olduğu gibi yüksek lisans eğitimim boyunca da hep yanımda olan sevgili eşim Senem GÜNDÜZ DELİBAŞ'a sonsuz teşekkür ederim.



1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde kablolu haberleşme yerini kablosuz haberleşmeye bırakmıştır. Uzak mesafelerde ve çevre şartlarının kablolamaya elverişli olmadığı yerlerde lazer haberleşme tercih edilmektedir. Ayrıca lazer haberleşmenin tercih edilme sebepleri arasında kablolu haberleşmeye göre daha hızlı olması ve kablolama maliyetinin olmaması da yer almaktadır. Su altı haberleşme sistemleri askeri uygulamalar, araştırma ve keşif uygulamalarında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Su altında verinin iletilmesinde akustik, radyo frekansı ve optik haberleşme gibi veri iletim yöntemleri kullanılmaktadır. Akustik ve radyo frekansı ile kullanılan haberleşme yöntemleri gerek yüksek hata oranları, yüksek veri iletim hızlarına ulaşamaması ve siber saldırılar açısından daha savunmasız durumda kalmaktadır [1].

Radyo frekansı ve akustik haberleşme sistemleri su altında yüksek hata oranı, düşük veri hızı ve sınırlandırılmış bir bant genişliğinde haberleşme imkânı sunmaktadır. Bu tip durumlara karşı optik haberleşme iyi bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır.

Optik haberleşmede ışığın su altında yüksek bant genişliğinde veri iletebilmesi, düşük gecikme süresi, yüksek güvenilirlik ve düşük hata oranı sunması gibi özellikleri ile uzun mesafelerde haberleşme için tercih edilme sebepleri arasındadır.

1.1. İlgili Literatür

Bu çalışmada yapılacak olan sistem, farklı su altı ortamlarında farklı mesafelerde düşük hata oranı ve yüksek Quality (Q) Faktör sonuçları almayı hedeflemektedir. Yapılacak olan bu tasarım, savunma sanayi, deniz altı keşifleri, okyanus bilimleri gibi birçok uygulamaya temel örnek olma hedefi taşımaktadır.

İlgili literatür araştırıldığı zaman, genlik modülasyonu (AM), Frekans modülasyonu (FM), Faz Modülasyonu (PM), Frekans kaydırmalı anahtarlama modülasyonu (FSK) teknikleri incelenmiş ve 5 KHz'den büyük olmayan bir lazer taşıyıcı ile karşılaştırılmıştır. Minimum parazitli lazer kaynağı olarak modülasyonlu lazer diyot (MLDD) ve gelen sinyalleri ölçmek amacıyla NI myDAQ kullanılmıştır. Sonuç olarak AM ve FM modülasyon teknikleri en az bozulma olan teknikler olduğu görülmüştür. PM ve FSK faz değişiklikleri ile ilgili modülasyon teknikleri olduğu için diğer tekniklere göre bozulma daha fazla görülmüştür [2].

P. Singal, S. Rai, R. Punia ve D. Kashyap yaptıkları çalışmada, free space optic (FSO) haberleşmesine uygun en verimli verici bulmak hedeflenip bir FSO sisteminin davranışının teorik analizi yapılmıştır. Sisli hava koşullarında on-off keying (OOK) kullanılıp 1550nm ve 10000nm ışın yayılımına yönelik farklı modellemelerle sisli havalarda bit error rate (BER) ve Q faktör analizi yapılmıştır. Çalışmanın bulguları olarak, sistemde dalga boyu (1550 n, 10000nm), verici gücü 1,3dbM, veri hızı 1,25Gbps, 1,9 dB sapma 40db/km zayıflama faktörü, sapma açısı 3mrad ve iletim uzunluğu 500 m gibi parametreler kullanılmıştır. BER ve Q-Factor bazında sisli koşullar altında (40db/km) FSO İletişimi için 10000nm dalga boyunda kullanıldığında CW Lazer'in VCSEL ve LED'e kıyasla daha iyi olduğunu göstermektedir [3].

Optik karesel faz kaydırmalı anahtarlama (CO-QPSK), tutarlı optik karesel genlik modülasyonu (CO-QAM), CO-8-QAM, CO-8-PSK, CO-16-QAM ve CO-16-PSK'nın incelenmesini gerçekleştirmeye odaklanan bu çalışmalar sonucunda 45.000 km'de elde edilen maksimum bit hızı; CO-QPSK ve CO-QAM için 0.511 Tbps, CO-8-QAM ve CO-8-PSK için 0.742 Tbps, CO-16-QAM ve CO-16-PSK için 1 Tbps'dir. Tüm karşılaştırmalı teknik analizler sonucunda CO-16-PSK'nın daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca performans açısından 1064 ve 1550 nm'ye göre 850 nm daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ancak 1550 nm dalga boyunda optik bileşenler, modülatörler, demodülatörler ve yüksek güçlü lazerler göz önüne alındığında kullanılabilir olduğu görülmüştür [4].

G. Karpagarajesh ve ekibinin yaptığı sistem çalışmasında optik iletişim kanalları kullanılarak 10gbps bant genişliğinin simülatif analizi gerçekleştirilmektedir. QAM ve PSK'nın farklı modülasyon formatları, kılavuzsuz bir optik iletişim biçimi olan OWC, FSO ve LOS-FSO üç optik kanalın tümü altındaki performansları açısından karşılaştırılmıştır. Q faktörü, BER ve Göz yüksekliği gibi parametreler, dalga boylarının 850 nm, 1064 nm, 1330 nm ve 1550 nm aralığında değiştirilmesiyle elde edilebilmektedir. Sistemde 2 km mesafede 850 nm, 1064 nm, 1330 nm ve 1550 nm olmak üzere dört farklı dalga boyu için benzetim yapılmıştır. Üç optik kanal OWC, FSO ve LOS-FSO ile QAM ve PSK modülasyon formatları karşılaştırmalı olarak benzetim yapıldığında PSK'nın OWC ve LOS-FSO ile iyi bir performans sergilediği görülmüştür. FSO ile QAM modülasyonunda iyi performans göstermiştir. Performans analizi sonucunda en iyi Q faktörüne sahip sistemin 1064 nm dalga boyu olduğu gözlenmiştir [5].

Çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) tabanlı sualtı optik kablosuz iletişimi (UOWC) Wavelength

Division Multiplexing (WDM) yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada bit oranı ve Q faktörleri farklı iletişim mesafelerinde ve farklı lazer güç seviyelerinde analiz edilmiştir. Yüksek hız ve düşük gecikme talebini karşılamak ve performans parametrelerinin geliştirmek için MIMO ve WDM'i beraber kullanmaktadır. Sonuç, 4x4 MIMO ile su altı optik kablosuz iletişim tasarlanıp benzetim yapılmıştır. Referans dalga boyu olarak 450 nm kullanıldığında, temiz suda 300 m kadar mesafe için veri hızı 500 Mbps x 8=4 Gbps olup Q faktörü 300 metrede 440,71'e ve 75 metrede 1019'a eşittir. Önerilen sistemde akustik su altı iletişim sistemi ile güvenilirlik daha da arttırılabilir [1].

Sismik izleme, kirlilik izleme ve çevresel veri toplama gibi çeşitli oşinografi uygulamalarında su altı akustik sensör ağları (UASN) kullanılmaktadır. Ancak sualtı akustik kanalı bağlantı kalitesi ve çevresel faktörlere bağlıdır. Yol kayıpları ve yeniden iletiler enerji israfına yol açmaktadır. modülasyonlar arasında bir karşılaştırma yaparak optik iletim gücünü belirlemek amacıyla farklı derinlik, mesafe ve bit hata oranı (BER) sahip farklı senaryolar analiz edilmiştir. Performans analizlerinde 32-PSK ve 16-QAM teknikleri minimum enerji tüketimine ulaştığı görülmüştür [6].

Hangi modülasyon formatında Q faktör daha iyi verdiğini görmek amacıyla yapılan çalışmada 10 Gbps bit hızında NRZ ve RZ modülasyon formatları karşılaştırılmıştır. Ayrıca Q faktörünün durumu farklı hava koşullarında da incelenmiştir. NRZ ve RZ modülasyon yöntemlerinin karşılaştırılması sonucu NRZ modülasyonunda BER değeri 4,5e-291 ve Q faktörü 36.43 elde edilmiştir. RZ modülasyonunda ise BER değeri 1,6e-220 ve %33 görev döngüsü için Q faktörü 24.19, %67 görev döngüsü için Q faktörü 32.15 hesaplanmıştır. Ayrıca hava koşulları açısından incelendiğinde zayıflama arttıkça Q faktör değerinin azaldığı tespit edilmiştir [7].

N. Nayak ve ekibinin yaptığı çalışmada yeşil ışık dalgalarının su altında yaymak amacıyla free space optic (FSO) sistemi kullanılarak su altı optik iletişimi önerilmiştir. Dörtlü gaz kaydırmalı anahtarlama (QPSK), Çift polarizasyonlu dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama (DP-QPSK) ve 4-dörtlü genlik modülasyonu (4-QAM) dahil olmak üzere üç farklı modülasyon tekniği kullanılarak performans analizi, zayıflama, türbülans saçılma gibi problemler ile spektral verimlilik de araştırılmıştır. Su altı optik kablosuz iletişim (UOWC) ile modülasyon teknikleri kullanılıp performans, fiziksel yönler incelenip Q faktör ve minimum bit hata oranı karşılaştırması yapılmıştır. Sonuç olarak, önerilen sistem DP-QPSK modülasyonu ile

maksimum Q faktörü 9,8’de ve min BER değeri $10e-13$ ’te gerçeklemiştir. DP-QPSK uzun mesafelerde yüksek hıza sahip UWOC için iyi bir performans göstermiştir [8].

Yüksek hızlı, uzun mesafeli su altı lazer haberleşmesinde güçlü soğurma ve saçılma sebepleriyle lazer darbesi uzamaktadır. Lazer maksimum bant genişliği lazer darbesi ile sınırlıdır. Haberleşme hızının iyileştirilmesi semboller arası girişimi (ISI) arttırır. ISI’nın sisteme olan etkisini azaltıp maksimum olasılıklı alma sırasını tahmin etmek amacıyla Viterbi Eşitleme (VE) algoritması kullanılır. 80 m, 100 m, ve 130 metre haberleşme mesafesinde Jerlov IB ve Jerlov II su kanalları ile 532 nm dalga boyunu benzetim yapmak için Monte Carlo yöntemi kullanılmıştır. VE ile zor karar algoritmaları yüksek hız iletişim performansları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak VE algoritması minimum hata yolunu seçip ISI’yı azaltabildiği görülmüştür. Yüksek veri hızı ve düşük hata oranı göz önüne alındığında VE algoritması uzun mesafelerde etkili olduğu görülmüştür [9].

Basit ve uygun maliyetli olan yeşil lazer diyot (LD) kullanılarak, deneysel olarak kablosuz su altı optik haberleşme sistemi kurulan çalışmada sınırlı bir bant genişliği olan yeşil lazer diyot ile Quadrature amplitude modulation (QAM), orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) gibi modülasyon türlerini kullanarak yapılan haberleşmede 1,118 Gb/S bit hızına, 6.18 bit/s/Hz spektral verimliliğe ve $2,98 \times 10^{-3}$ BER değerlerine ulaşılmıştır [10].

Deniz ortamında bulunan optik özellikler nedeniyle, su altı optik haberleşmede yüksek verimli haberleşme büyük ölçüde sınırlıdır. J. B. Snow ve ekibinin bir optik alıcı ve bir adet yeşil lazer kullanılarak tatlı su ve kıyı deniz suyunda haberleşme çalışması yapmıştır. Yapılan çalışma sonucunda; suda bulunan çözünmüş maddeler, asılı partiküller ve deniz biyolojiklerinden kaynaklanan absorpsiyon ve saçılmalar nedeniyle haberleşmedeki distorsiyonlar ölçümlenmiş ve karşılaştırılmıştır [11].

Kablosuz optik iletişimin frekans tepkisini ölçmek için yüksek hassasiyetli ve yüksek dinamik aralıklı bir yöntem kullanılarak yapılan çalışmada errak bir su aralığında (yani 1-20 zayıflatma katsayısını aralığında), alıcı ve verici arasındaki mekânsal ve zamansal dağılımlar ölçümlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada, saçılma ve alıcı görüş alanının etkisini araştırılmıştır [12].

Sualtı görünür ışık iletişim sistemlerinin (UVLC) performans araştırması yapan M.

Elamassie ve ekibi alıcı-verici, su tipi gibi parametrelerin oluşturduğu bir fonksiyon kullanılarak ışığın gittiği yol boyunca kaybını ifade eden bir form geliştirildi. Ardından okyanus, deniz, liman ve kıyıda alınan numuneler ile UVLC sisteminin erişebileceği maksimum mesafe yazılmış olan fonksiyon üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda maksimum birkaç on metreyle sınırlı olduğu görüldü. Bu mesafenin daha da genişletilmesi için röle ile kurulmuş bir UVLC sistemi gerekli olduğu görüldü. UVLC sisteminde bit hata oranını (BER) en aza indirmek için devre elemanlarının konumlandırılması gözden geçirilmiştir [13].

Bilim, ordu ve endüstride oldukça ilgi gören sualtı görünür ışık iletişimi (UVLC) üzerine yapılan çalışmada vericide bulunan optik yoğunluğu artırmak amacıyla ışın diyotun yarı güçte ve verici tarafında tek foton çıkış diyotun (SPAD) yer aldığı uzun mesafeli UVLC devresi tasarlanıp, uzun mesafeli UVLC sisteminde çift terimli üstel kanal modeli kurulup ve parametreler Monte Carlo simülasyonu ile elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre veriletilen mesafe deniz suyunda 500 metreye kadar olduğu tespit edilmiştir [14].

Su altında gerçek zamanlı video ve görüntü iletimi gibi birçok yüksek hızda veri iletimi gerektiren uygulamalarda su altı görünür ışık iletişimi [Underwater visible light communication (UVLC)] kullanılır. UVLC ile ilgili ilk çalışmalar, yalnızca yatay bağlantılar için gerçekleştirilebilen iletim aralığı boyunca sabit türbülans kuvveti varsayımı üzerine kuruludur. Dikey sualtı bağlantılarında, sıcaklık ve tuzluluk gradyanı derinlikle değişir. Bu, farklı tuzluluk ve sıcaklık değerlerine sahip suyun karışmayan katmanlar oluşturduğu okyanus katmanlaşmasıyla etkili bir şekilde sonuçlanır. Belirtilen durumlar ışığında yapılan çalışmada, önce dikey su altı bağlantısını, farklı katmanlarla ilişkili sönümlenme katsayılarının bağımsız ve özdeş olmayan dağılımlı olarak modellendiği kademeli sönümlenme kanalı olarak modellenmiştir [15].

1.2. Katkı ve Organizasyon

Bu çalışmanın amacı, denizaltı araçları için lazer iletişim sistemlerinin kapsamlı tasarım kriterlerini ve analizini araştırarak yeni bir yaklaşım sunmaktır. Literatürdeki var olan çalışmalardan farklı olarak, bu tez çalışması, denizaltı lazer iletişim sistemlerinin temel prensiplerini, işleyiş mekanizmalarını ve performansını etkileyen ana faktörleri detaylı olarak incelemektedir. Bütün faktörlerin incelendiği ayrıntılı simülasyonlara yer verilmiştir. Ayrıca, sistem performansını değerlendirmek için kullanılacak farklı lazer modülasyon

teknikleri, iletişim protokolleri ve simülasyonları ile test yöntemlerini değerlendirmektedir.

Çalışmanın katkısı, denizaltı araçlarının iletişim ihtiyaçlarını karşılamak için lazer iletişim sistemleri tasarlamak ve uygulamak isteyen araştırmacılar ve mühendisler için değerli bir kaynak sağlamaktır. Ayrıca, mevcut teknolojiye dayalı bir lazer iletişim sistemi tasarımı ve analizi örneğini, gelecek araştırma alanlarını ve geliştirme fırsatlarını tartışmaktadır. Bu, denizaltı iletişimi için daha verimli ve güvenilir sistemler geliştirmek için önemli bilgiler sağlamaktadır.



2. LAZER HABERLEŞME SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Lazer haberleşme sistemleri yüksek veri hızı, geniş bant genişliği ve düşük hata oranı ile günümüz haberleşmelerine ön plana çıkmaktadır. Uzak mesafelerde ve çevre şartlarının kablolamaya elverişli olmadığı yerlerde lazer haberleşme tercih edilmektedir. Ayrıca Lazer haberleşmenin tercih edilme sebepleri arasında kablolu haberleşmeye göre daha hızlı olması ve kablolama maliyetinin olmaması da yer almaktadır. Lazer haberleşmede yaygın olarak kullanılan sistemlerden biri Free Space Optic'dir [16].

2.1. Free Space Optic (FSO)

Serbest alan optik (FSO), veri iletimi için ışığı serbest boş bir alanda iletilmesi ile kullanılan bir iletişim yöntemidir. Veri iletimi boşluk, hava, uzay benzeri bir ortam kullanılmaktadır. Fiber optik kablolarının kullanılmasına elverişli olmayan çevre koşullarında veya yüksek maliyet gerektiren sistemlerde tercih edilmektedir [17].

Işığın iletiminde iletilen ortamın durumlarına göre bir zayıflama katsayısı bulunmaktadır. FSO haberleşme ortamında zayıflama katsayısı tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. FSO Hava Zayıflama Katsayısı [18].

Hava Durumu	α (dB/km)
Acık Hava	0,43
Pus	4,2
Hafif Yağmur	5,8
Şiddetli Yağmur	9,2
Hafif Sis	20
Orta Sis	42,2
Yoğun Sis	125

Beer-Lambert yasasına göre serbest uzaydan iletilen ışığın gücü için formül şu şekildedir.

$$I = I_0 \times e^{-kd} \quad (2.1)$$

Bu formülde, I ışık şiddeti, I_0 başlangıç ışık şiddeti, k ortam zayıflama katsayısını d ise ortam uzunluğudur.

2.2. Su Altı Optik Haberleşme

Underwater Optic Communication (UOC) veri iletimi için ışığın su altı dünyasında ilerlediği haberleşme biçimidir. Bu tip haberleşme biçimi su altı araştırmaları ve keşifleri gibi uygulamalarda çevre koşullarının kablolamaya elverişli olmadığı ortamlarda, yüksek veri hızı ve geniş bant genişliği ihtiyacı olduğu durumlarda kullanılmaktadır. FSO’da olduğu gibi ışık ortamın zayıflama katsayısı bulunmaktadır. Su altı optik haberleşmesinde ortam zayıflama katsayıları tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Su Altı Ortam Zayıflama Katsayıları [19-21].

Ortam Tipi	Emilim Katsayısı (α) (m^{-1})	Saçılım Katsayısı (b) (m^{-1})	Sönüm Katsayısı (c) (m^{-1})
Saf Deniz	0,0405	0,0025	0,043
Açık Okyanus	0,114	0,037	0,151
Okyanus Kıyısı	0,179	0,219	0,398
Liman	0,187	0,913	1,1

$$c(\lambda) = \alpha(\lambda) + b(\lambda) \quad (2.2)$$

Bu çalışmada kullanılacak olan modülasyon tipleri;

- MZ (Mach-Zehnder) Modülasyon

Mach-Zehnder (MZ) modülasyonu, optik sinyal işleme ve modülasyon tekniklerinden biridir. Bu yöntem genellikle fiber optik iletişim sistemlerinde kullanılır. Temelde, optik sinyalin özelliklerini değiştirmek için bir optik dalga kılavuzu kullanılmaktadır.

MZ modülatörü, bir giriş sinyalini iki paralel optik yol boyunca bölen ve sonra birleştiren bir aygıttır. Bu yolların biri, diğerinden faz farkına sahip bir elektrik sinyali ile modüle edilmektedir. Sonuç olarak, bu iki yolun optik sinyalleri birleştirilirken interferansa uğramaktadır. Elektrik sinyalinin fazı değiştirildiğinde, birleşik optik sinyalinde değişiklikler olmaktadır. Bu şekilde, MZ modülatörü, elektrik sinyalinin özelliklerini optik sinyale aktararak optik sinyali modüle etmektedir.

MZ modülatörleri, yüksek hızlı veri iletimi için de kullanılmaktadır. Bunlar, optik iletişimde geniş bant genişliğine ve düşük sinyal kaybına sahip oldukları için tercih edilmektedirler.

Ayrıca, farklı modülasyon formatlarını desteklemektedirler. Bu da esneklik sağlamaktadır

- EA (Electroabsorption) Modülâtör

EA (Electroabsorption) modülâtörü, elektroabsorpsiyon etkisini kullanarak optik sinyali modüle etmek için kullanılan bir optik cihazdır. Bu modülâtörler genellikle yarı iletken malzemelerden yapılmıştır.

Elektroabsorpsiyon etkisi, yarı iletken malzemenin optik özelliklerini elektrik alanı uygulandığında değiştiren bir fenomendir. Özellikle, elektrik alanı uygulandığında yarı iletken malzemenin band yapısı değişir ve bu da malzemenin absorpsiyon spektrumunu etkilemektedir. Bu etkiyi kullanan EA modülâtörleri, elektrik alanı uygulandığında malzemenin optik özelliklerinde değişiklikler yaratmakta ve bu da geçen optik sinyalin özelliklerini modüle etmektedir.

EA modülâtörleri, yüksek hızlı veri iletimi için fiber optik iletişim sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlar, yüksek hızlı optik iletim gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca, geniş bant genişliği ve düşük sinyal kaybı gibi avantajlara sahiplik etmektedir.

- AM (Amplitude) Modülâtör

AM (Amplitude Modulation), bir taşıyıcı sinyalin amplitüdünün bir modülasyon sinyali tarafından değiştirildiği bir modülasyon tekniğidir. Bu modülasyon tekniği, taşıyıcı sinyalin genliğini değiştirerek bilgiyi iletmek için kullanılmaktadır.

AM modülasyonu genellikle radyo yayınlarında ve analog ses iletiminde kullanılmaktadır. Temelde, modülasyon sinyali, taşıyıcı sinyalin genliğini değiştirip ve bu şekilde bilgi taşınmaktadır. Genlik modülasyonu, modülasyon indeksine bağlı olarak taşıyıcı sinyalin gücünde değişiklikler yaratarak bilgiyi temsil etmektedir.

AM modülasyonunda, genellikle modülasyon indeksi (modulation index) adı verilen bir parametre kullanılmaktadır. Bu parametre, modülasyon sinyalinin genliği ile taşıyıcı sinyalin genliği arasındaki oranı ifade etmektedir. Modülasyon indeksi, taşıyıcı sinyalin genliğinin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farka bölünerek hesaplanmaktadır

AM modülasyonunun temel avantajı basitliği ve düşük maliyetidir. Ancak, bu modülasyon tekniği genellikle düşük verimlilikle ve düşük gürültü toleransıyla ilişkilendirilir. Bu

nedenle, dijital iletişim sistemlerinde genellikle daha gelişmiş modülasyon teknikleri tercih edilmektedir.

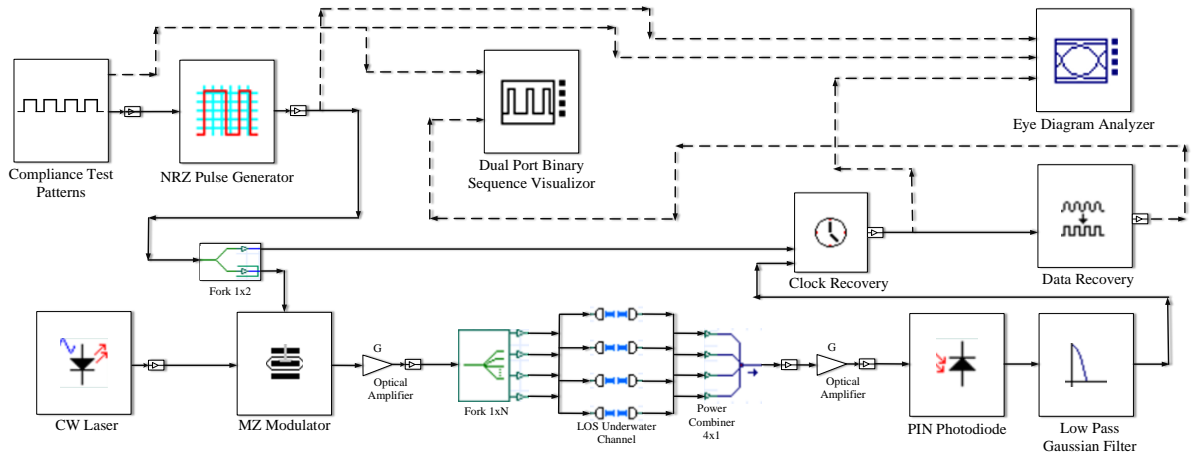
3. DİZAYN ADIMLARI, DEVRE AÇIKLAMALARI VE FORMÜLASYON

3.1. Sistem Modelleme ve Simülasyon

Genel sistem tasarımı şekil 3.1’de verilmiştir. Sistem dizaynı ve simülasyon yapmak amacıyla Optiwave firmasının Optisystem programı kullanılmıştır. OptiSystem, optik iletişim sistemleri tasarımı, simülasyonu ve analizi için kapsamlı bir yazılım platformudur. Bu yazılım, optik iletişim sistemlerinin farklı bileşenlerini ve işlevlerini benzetim yapmak için geniş bir kütüphane sunar. OptiSystem, araştırmacılar ve mühendisler için optik iletişim sistemlerinin performansını değerlendirmek ve yeni sistemler tasarlamak için güçlü bir araçtır.

OptiSystem, çeşitli optik modülasyon tekniklerini, fiber optik bileşenleri, lazerler, algılayıcılar, optik filtreler, optik yönlendiriciler, foto detektörler ve diğer optik bileşenleri içeren geniş bir kütüphane sunar. Bu bileşenlerin bir araya getirilmesiyle, çeşitli optik iletişim sistemlerini modellenenabilir ve benzetim yapılabilir.

OptiSystem ayrıca, çeşitli modülasyon formatları, kodlama teknikleri, modülasyon/demodülasyon işlemleri, kanal modelleri ve iletişim protokolleri gibi optik iletişim sistemlerinin farklı yönlerini desteklemektedir



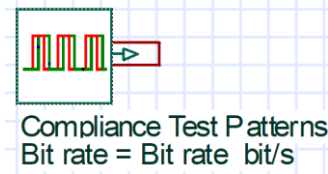
Şekil 3.1. Su Altı Lazer Haberleşme Sistem Tasarımı.

Dizayn edilen sistemde aşağıdaki sistem elemanları kullanılmıştır.

- Compliance Test Patterns
- NRZ Pulse Generator
- Continuous Wave (CW) Laser
- MZ Modulator Analytical , EA Modulator, AM Modulator
- Oplical Amplifier
- LOS Underwater Channel
- PIN Photodiode
- Low Pass Filter
- Clock Recovery
- Eye Diagram Analyzer

3.1.1. Compliance Test Patterns

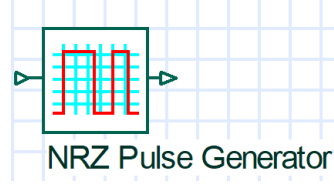
Sistemde iletilen verinin kaynağını benzetim yapmak amacıyla kullanılan bir simülasyon aracıdır. Compliance test patterns aracının optisystem gösterimi şekil 3.2’de verilmiştir.



şekil 3.2. Compliance Test Patterns.

3.1.2. NRZ Pulse Generator

NRZ (Non-Return-to-Zero) pulse generator, dijital iletişim sistemlerinde kullanılan bir sinyal üretecedir. NRZ, dijital veriyi temsil etmek için kullanılan bir kodlama şeklidir. Bu kodlama şeklinde, veri biti "1" ise bir sabit seviyede (genellikle yüksek), "0" ise başka bir sabit seviyede (genellikle düşük) tutulur ve bu seviyeler bit süresince değişmez. "Return-to-Zero" ifadesi, bir bitin sonunda sinyalin "sıfır" seviyesine dönmesini ifade eder; yani, her bit zamanlama aralığının sonunda sinyal seviyesi sıfırlanmaktadır. NRZ pulse generator aracının optisystem gösterimi şekil 3.3’deki gibidir.



Şekil 3.3. NRZ Pulse Generator.

NRZ Pulse Generator aşağıdaki formülasyonlara uygun olarak kare dalga sinyali üretmektedir.

$$\text{Exponential} \quad E(t) \begin{cases} 1 - e^{-(t/c_r)}, 0 \leq t < t_1 \\ 1, t_1 \leq t < t_2 \\ e^{-(t/c_f)}, t_2 \leq t < T \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\text{Gaussian} \quad E(t) \begin{cases} 1 - e^{-(t/c_r)^2}, 0 \leq t < t_1 \\ 1, t_1 \leq t < t_2 \\ e^{-(t/c_f)^2}, (t_2 \leq t < T) \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\text{Linear} \quad E(t) \begin{cases} t / c_r, 0 \leq t < t_1 \\ 1, t_1 \leq t < t_2 \\ t / c_f, t_2 \leq t < T \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\text{Sine} \quad E(t) \begin{cases} \sin(\pi t / c_r), 0 \leq t < t_1 \\ 1, t_1 \leq t < t_2 \\ \sin(\pi t / c_f), t_2 \leq t < T \end{cases} \quad (3.4)$$

Burada, c_r yükselme zamanı katsayısı ve c_f düşme zamanı katsayısıdır ve T bit süresidir. Zaman noktaları t_1 ve t_2 , c_r ve c_f ile birlikte, parametrelerin yükselme zamanı ve düşme zamanı değerleriyle uyumlu darbeler üretmek için sayısal olarak belirlenmektedir.

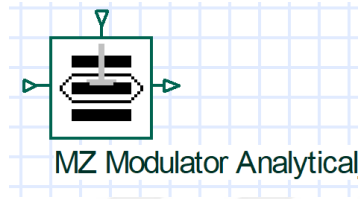
Üretilen kare dalga sinyali bir MZ modulator, EA Modulator ve AM Modulator ile continuous wave optical laser sinyal ile modüle edilmiştir. Üç farklı modülör tipi ile veri optik sinyale dönüştürülmüştür.

3.1.3. CW Lazer

Sistemde lazer kaynağı olarak CW lazer kullanılmıştır. Lazerin gücünü ve frekansı ile konfigüre edilebilmektedir.

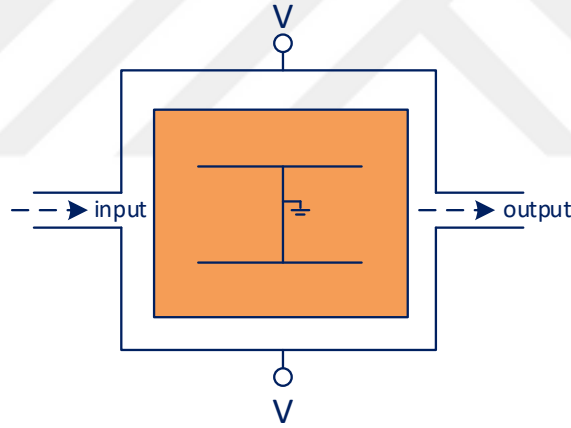
3.1.4. MZ Modulator

MZ Modülatorü Optisystem gösterimi şekil 3.4'teki gibidir.



Şekil 3.4. MZ Modülator.

MZ modülatorü iç dizaynı şekil 3.5'teki gibidir.



Şekil 3.5. MZ Modülator İç Dizaynı.

MZ modülatorü aşağıdaki formülasyonlara uygun olarak sinyali modüle etmektedir.

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \cos(\Delta\theta(t)) \cdot \exp(j \cdot \Delta\phi(t)) \quad (3.5)$$

Burada, $\Delta\theta$ iki modülator dalı arasındaki faz farkıdır ve şu şekilde tanımlanır:

$$\Delta\theta(t) = \frac{\pi}{2} \cdot (0.5 - \alpha \cdot (\text{Modulation}(t) - 0.5)) \quad (3.6)$$

$$\alpha = 1 - \frac{4}{\pi} \cdot \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{ER}}\right) \quad (3.7)$$

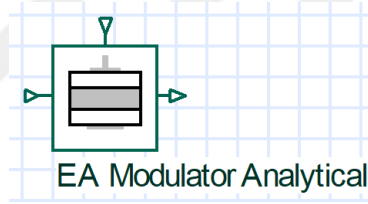
$\Delta\Phi$ sinyal faz değişikliğidir ve şu şekilde tanımlanır:

$$\Delta\phi(t) = SC \cdot \Delta\theta(t) \cdot (1 + SF) / (1 - SF) \quad (3.8)$$

Burada, parametre SC , negatif sinyal doğru ise -1 veya negatif sinyal chirp yanlış ise 1'dir. ER , sinyal sönüm oranını temsil eder, SF simetri faktörüdür ve $Modulation(t)$ elektriksel giriş modülasyon sinyalidir. Elektriksel giriş modülasyon sinyali, içsel olarak 0 ile 1 arasında normalize edilir.

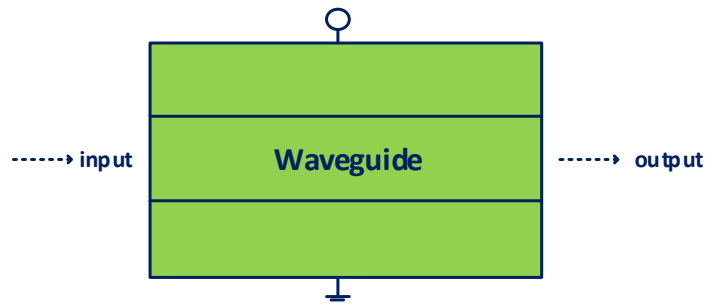
3.1.5. EA Modulator

EA Modülatörü Optisystem gösterimi şekil 3.6'teki gibidir.



Şekil 3.6. EA Modulator.

EA modülatörü iç dizaynı şekil 3.7'teki gibidir.



Şekil 3.7. EA Modulator İç Dizaynı

EA modülatörü aşağıdaki formülayonlara uygun olarak sinyali modüle etmektedir.

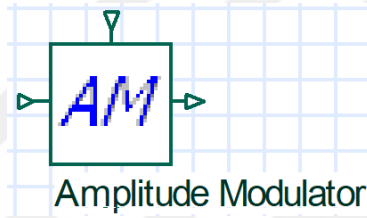
$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \sqrt{Mod(t)} \cdot \exp\left(j \frac{\alpha}{2} \cdot \ln(Mod(t))\right) \quad (3.9)$$

$$Mod(t) = (1 - MI) + MI \cdot modulation(t) \quad (3.10)$$

Burada, $E_{in}(t)$ giriş sinyali, $E_{out}(t)$ çıkış sinyali, α chirp faktör MI modülasyon indeksi ve $modulation(t)$ elektriksel giriş sinyalidir.

3.1.6. AM Modulator

AM Modülatörü Optisystem gösterimi şekil 3.8'teki gibidir.



Şekil 3.8. AM Modulator.

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \sqrt{Mod(t)} \quad (3.11)$$

$$Mod(t) = (1 - MI) + MI \cdot modulation(t) \quad (3.12)$$

Burada, $E_{in}(t)$ giriş sinyali, $E_{out}(t)$ çıkış sinyali MI modülasyon indeksi ve $modulation(t)$ elektriksel giriş sinyalidir.

3.1.7. Optical Amplifier (OA)

Optik amplifikatör, optik iletişim sistemlerinde kullanılan bir cihazdır ve optik sinyallerin gücünü arttırmak için kullanılır. Optik amplifikatörler, fiber optik iletişim sistemlerinde sinyal gücünü arttırmak için yaygın olarak kullanılır.

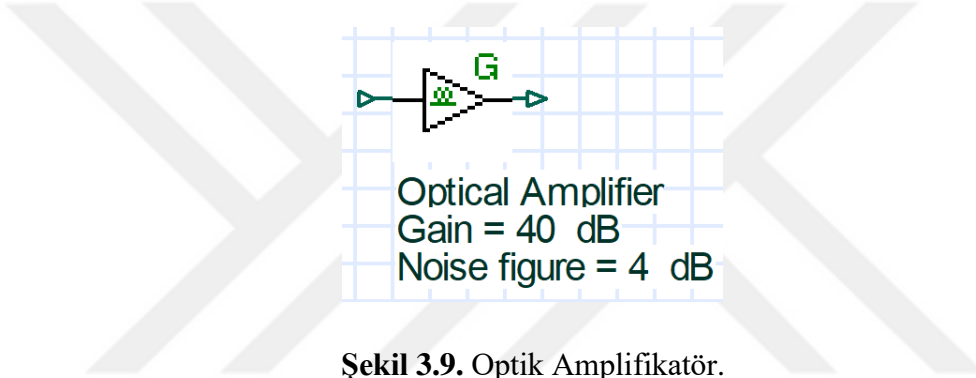
Optik amplifikatörler, genellikle optik lif içindeki sinyallerin güçlerini artırmak için kullanılan aktif cihazlardır. Bunlar, optik lif içindeki sinyallerin zayıflamasını telafi etmek veya sinyallerin daha uzun mesafelere iletilmesini sağlamak için kullanılabilir.

En yaygın kullanılan optik amplifikatör türü erbium-dopantlı fiber amplifikatördür (EDFA).

Bu amplifikatörler, optik fiber içine yerleştirilen erbium iyonları ile doplanmıştır. Optik sinyaller, erbium iyonlarının uyarılmasıyla güçlendirilir. EDFA'lar, geniş bir bant genişliği ve yüksek güç kazancı sağlayarak fiber optik iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Optik amplifikatörler, sinyal yenileme, uzun mesafe iletimi ve optik ağlarda sinyal gücünü artırmak gibi birçok uygulamada önemli bir rol oynarlar.

Modüle edilen optik sinyal bir Optik amplifikatör kullanılarak yükseltilmiştir. OA kullanılmasının sebebi iletilecek olan lazer sinyalimiz sualtı kanalında iletilirken birçok gürültüye ve zayıflamaya maruz kalacağı için yüksek güçte bir sinyalin bu kanala girmesi gerekmektedir. Optical Amplifier aracının optisystem gösterimi şekil 3.9'teki gibidir.



Şekil 3.9. Optik Amplifikatör.

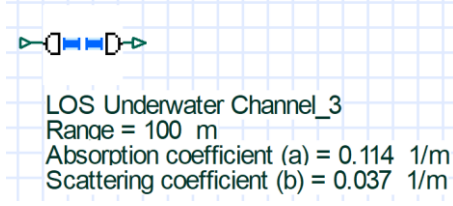
$$G = \frac{(P_{OUT} - P_{ASE})}{P_{sin}} \quad (3.13)$$

Burada, G kazanç, P_{out} toplam çıkış gücü, P_{in} toplam giriş gücü, ve P_{ASE} , oluşturulan Yükseltilmiş Spontan Emisyon'u (ASE) içerir (veya içermez).

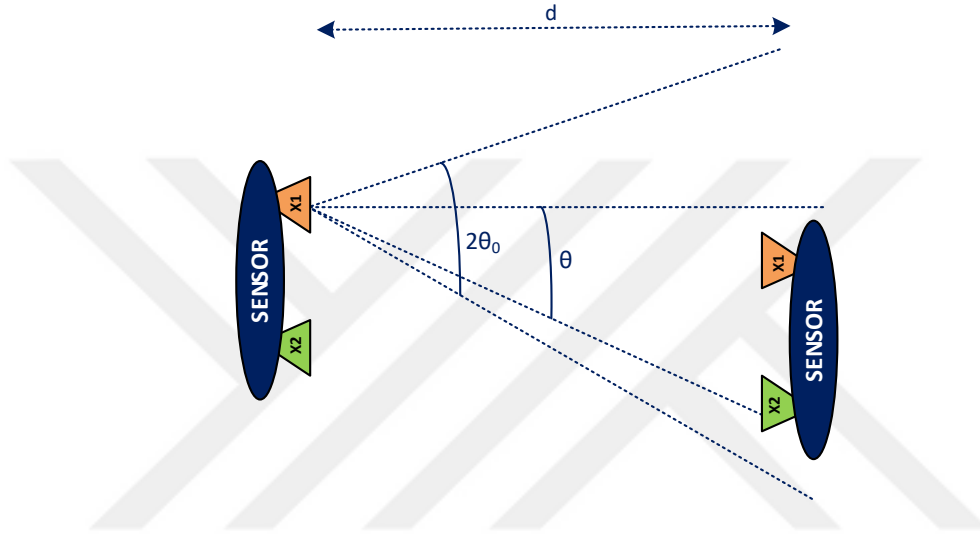
Modüle edilip yükseltilen optik sinyal Power splitter ile çoklanarak 4 adet Line Of Sight (LOS) Underwater Channel ile iletilmektedir.

3.1.8. Line Of Sight (LOS) Underwater Channel

LOS Underwater Channel, lazer üzerine modüle edilen giriş sinyalinin alıcı tarafa iletiildiği su altı kanalıdır. Kanalın uzunluğu ve tipi (saf deniz, açık okyanus vb.) değiştirilerek farklı ortamlar benzetim yapılabilir. LOS Underwater Channel optisystem gösterimi şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. LOS Underwater Channel.



Şekil 3.11. LOS Underwater Channel İç Dizayını [22].

$$P_{R_los} = P_T \eta_T \eta_R \exp \left[-c(\lambda) \frac{d}{\cos(\theta)} \right] \frac{A_{Rec} \cos(\theta)}{2\pi d^2 [1 - \cos(\theta_0)]} \quad (3.14)$$

İç yapısı şekil 3.11’de verilen kanalın formülasyonunda P_T ortalama verici optik gücü, η_T vericinin optik verimliliği, η_R alıcının optik verimliliği, d vericinin ve alıcının düzlemi arasındaki dik mesafe, θ alıcının düzlemine dik olan ve verici-alıcı yörüngesi arasındaki açı, A_{Rec} alıcının açıklık alanı ve θ_0 lazer ışını dağılma açısıdır.

3.1.9. Pin Photodiode

PIN foto diyot, optik iletişim sistemlerinde kullanılan ve optik sinyali elektriksel sinyale dönüştüren bir tür foto diyottur. "PIN" terimi, foto diyotun yapısını tanımlar:

"P" katmanı: Pozitif yüklü (p-tipi) yarı iletken malzemeden oluşur.

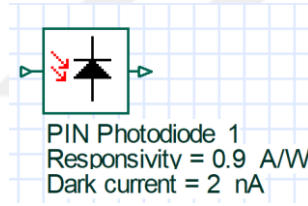
"I" katmanı: İntrensik veya ara katmandır ve genellikle saf veya hafif n-tipi yarı iletken malzemeden yapılır.

"N" katmanı: Negatif yüklü (n-tipi) yarı iletken malzemeden oluşur.

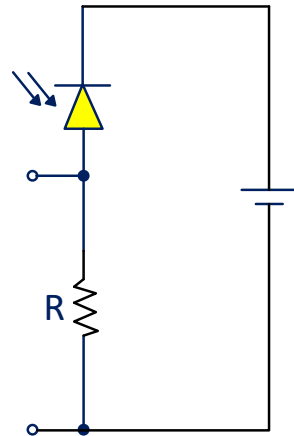
PIN foto diyot, optik sinyali almak için bir yarı iletken malzeme tabakası ile kaplanmış bir yarı iletken diyottur. Optik sinyal, diyotun p bölgesine düşer ve içindeki elektron-holes çiftlerini oluşturur. Bu çiftler, diyottaki iç elektrik alanı tarafından ayrılır ve elektrik akımı oluşturmak için dış devre boyunca yönlendirilir.

PIN foto diyotların avantajları arasında yüksek hız, geniş bant genişliği, düşük gürültü ve yüksek hassasiyet bulunur. Bu nedenle, fiber optik iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar. PIN foto diyotlar, optik haberleşme ağlarında veri alımı için alıcı olarak, optik sensörlerde ve optik ölçüm cihazlarında kullanılır.

LOS Underwater channel kanalından iletilen zayıflayan ve OA ile tekrar yükseltilecek optik sinyal PIN Photodiode komponenti ile elektriksel sinyale dönüştürülmektedir. PIN Photodiode optisystem gösterimi şekil 3.12'de, devre şeması şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Pin Photodiode.



Şekil 3.13. PIN Fotodiyot Devresi.

$$i(t) = rP(t) + i_d \quad (3.15)$$

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{th}^2 + \sigma_{shot-S}^2 + \sigma_{shot-ASE}^2 + \sigma_{S-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2 \quad (3.16)$$

$$\text{Shot-Signal Noise} \quad \sigma_{shot-S}^2 = 2B_e \cdot (rP_s + i_d) \quad (3.17)$$

$$\text{Shot-ASE Noise} \quad \sigma_{shot-ASE}^2 = 2B_e \cdot q r P_{ASE} \quad (3.18)$$

$$\text{Signal-ASE Noise} \quad \sigma_{S-ASE}^2 = 4B_e \cdot r^2 \cdot PSD_{ASE} P_S \quad (3.19)$$

$$\text{ASE-ASE Beat Noise} \quad \sigma_{ASE-ASE}^2 = r^2 \cdot PSD_{ASE}^2 \quad (3.20)$$

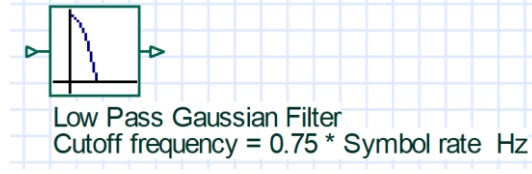
Bu formülde, B_e PIN'in eşdeğer gürültü bant genişliğini, r PIN'in duyarlılığını, P_s sinyal gücünü, i_d cihazın karanlık akımını, q ise elektron yük değerini, P_{ASE} optik gürültü gücünü ve PSD_{ASE} optik gürültü alanının (spontan emisyon) güç spektral yoğunluğunu temsil eder.

3.1.10. Low Pass Gaussian Filter

Düşük Geçişli Gauss Filtre (Low Pass Gaussian Filter), bir sinyalin yüksek frekans bileşenlerini bastıran ve düşük frekans bileşenlerini geçiren bir filtre türüdür. Gauss filtresi, sinyalin frekans alanında bir Gauss profili ile filtrelenmesini sağlar.

Düşük Geçişli Gauss Filtre, sinyalin frekans alanında Gauss profiline sahip bir frekans tepkisine sahiptir. Bu, düşük frekanslı bileşenlerin filtrelenmemiş veya daha az filtrelenmiş olmasını sağlar, ancak yüksek frekanslı bileşenlerin güçlü bir şekilde bastırılmasını sağlar. Sonuç olarak, sinyalin frekans bileşenlerinin bir kısmı korunurken diğerleri bastırılır.

Bu tür filtreler, sinyal işleme, iletişim sistemleri ve görüntü işleme gibi birçok uygulamada kullanılır. Özellikle, sinyaldeki gürültüyü azaltmak veya sinyaldeki istenmeyen yüksek frekanslı bileşenleri filtrelemek için yaygın olarak kullanılırlar. Low Pass Gaussian Filter aracının optisystem gösterimi şekil 3.14'de verilmiştir.

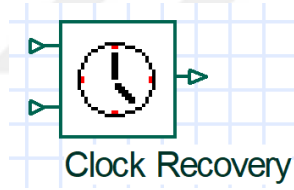


Şekil 3.14. Low Pass Gaussian Filter.

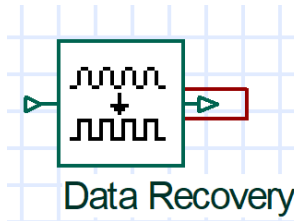
$$H(f) = \alpha e^{-\ln(\sqrt{2}) \left(\frac{f}{f_c} \right)^{2N}} \quad (3.20)$$

Burada, $H(f)$ filtre transfer fonksiyonunu, α parametre ekleme kaybını, f_c filtre kesim frekansını, N parametre sıralamayı ve f frekansını temsil eder.

Nihai halinde filtrelenmiş elektrik sinyali Clock Recovery Komponenti ile input sinyali ile output sinyali arasındaki zaman farkını eşitlenmiştir. Elektriksel sinyal Data Recovery komponenti ile de binary veriye çevrilip binary olarak gönderilen ve alınan data arasında karşılaştırma yapılabilmektedir. Clock Recovery aracının optisystem gösterimi şekil 3.15’de, Data recovery aracının gösterimi şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Clock Recovery.



Şekil 3.16. Data Recovery.

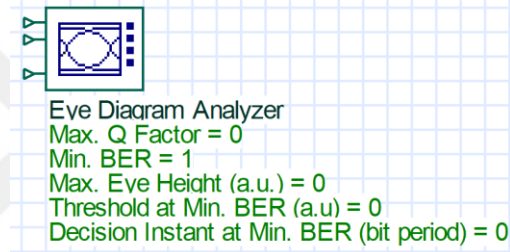
3.1.11. Eye Diagram Analyzer

Eye Diagram Analyzer, dijital iletişim sistemlerinde kullanılan bir analiz aracıdır. Bu araç, iletilen dijital sinyalin göz diyagramını oluşturur ve analiz eder. Göz diyagramı, bir iletişim sisteminin performansını değerlendirmek için önemli bir görsel araçtır.

Göz diyagramı, birçok dijital sinyal iletiminin grafiksel bir temsilidir. Bu diyagram, bir sinyalin birden çok veri bitinin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Her bit dönemi için sinyalin durumu bir görsel olarak gösterilir. Göz diyagramında, bit hızı boyunca dikey eksen ve zaman boyunca yatay eksen yer alır.

Göz diyagramı analizi, iletişim sisteminin performansını çeşitli faktörler açısından değerlendirmeyi sağlar. Ayrıca, göz diyagramı, sinyalin doğru örnekleme ve zamanlama ayarlarının yapılmasına yardımcı olabilir.

Input ve output sinyali Eye Diagram Analyzer komponenti ile karşılaştırıp Q Factor, Min Ber, Max Eye Height parametreleri elde edilip Eye diagram çıkartılmıştır. Eye Diagram Analyzer optisystem gösterimi şekil 3.17’de verilmiştir.

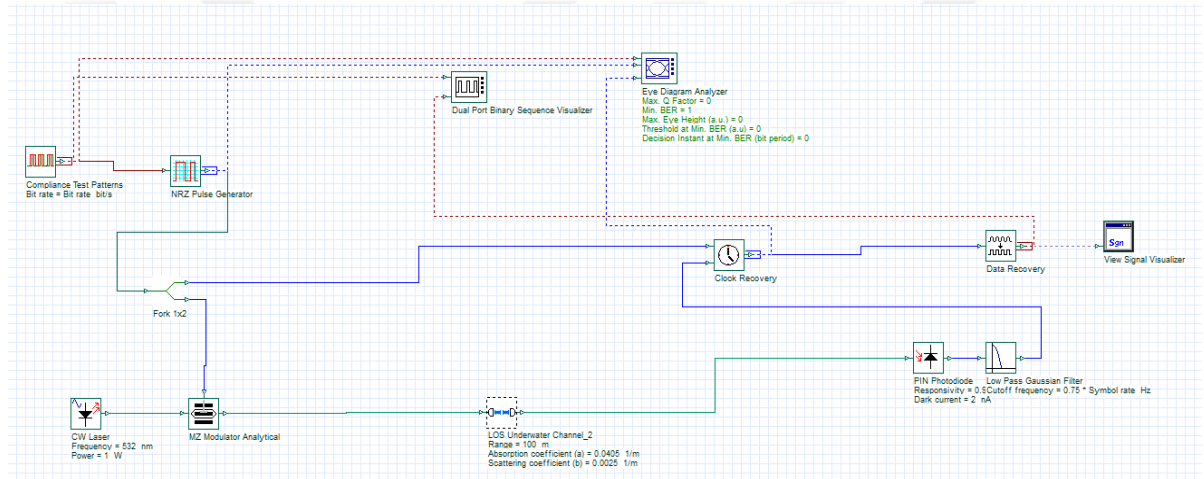


Şekil 3.17. Eye Diagram Analyzer.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

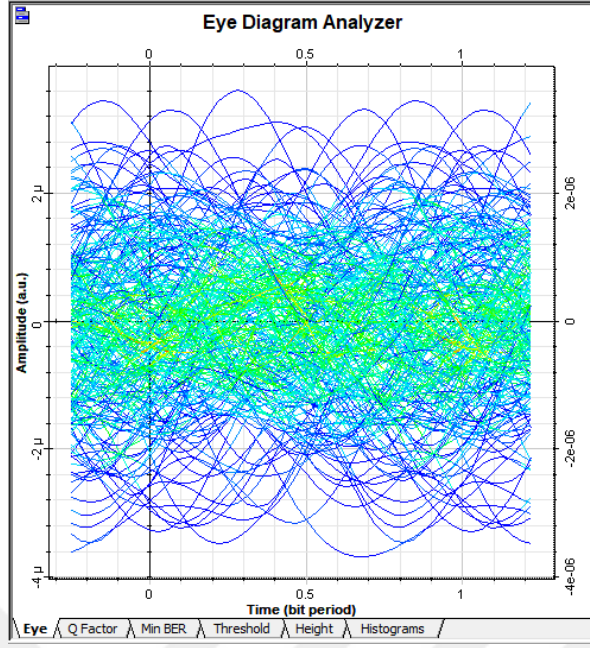
Optimum sistem dizaynına ulaşmadan öncesinde yapılan deneylerde optimal dizayn bulunmaya çalışılmış olup ve her bir deney etkilerinin sonucu aşağıdaki gibi olmuştur.

I. Senaryoda Optik Amplifier (OA) kullanılmadan tek kanalla Pure Sea ortamında MZ modülasyonu kullanılarak 1 Watt 532 nm dalga boylu lazer, responsivity 0,5 ve dark current değeri 2 nA olan bir PIN fotodiyot, cutoff frekansı $0,75 \cdot \text{symbol rate}$ olan bir alçak geçiren gaussian filtre ile sistemde ölçüm yapıp karşılaştırılmıştır. Diğer tüm senaryolarda ilk senaryo ile aynı parametreler kullanılmıştır. I. senaryo sistem tasarımı şekil 4.1'de verilmiştir.

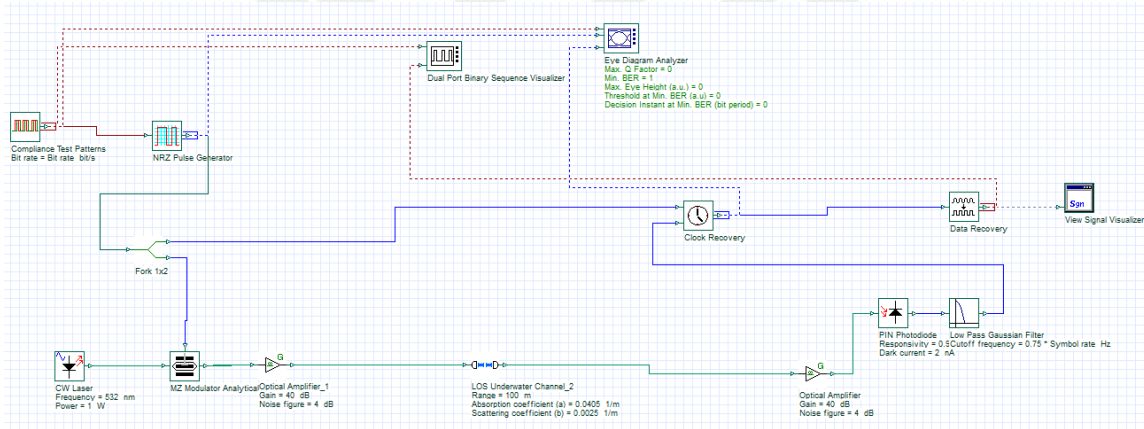


Şekil 4.1. I. Senaryo Sistem Tasarımı.

Kurulan devrede iletilen sinyalin saf deniz ortamında alıcı tarafına düzgün bir şekilde ulaşmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneyin eye diyagram çıktısı şekil 4.2'teki gibidir.



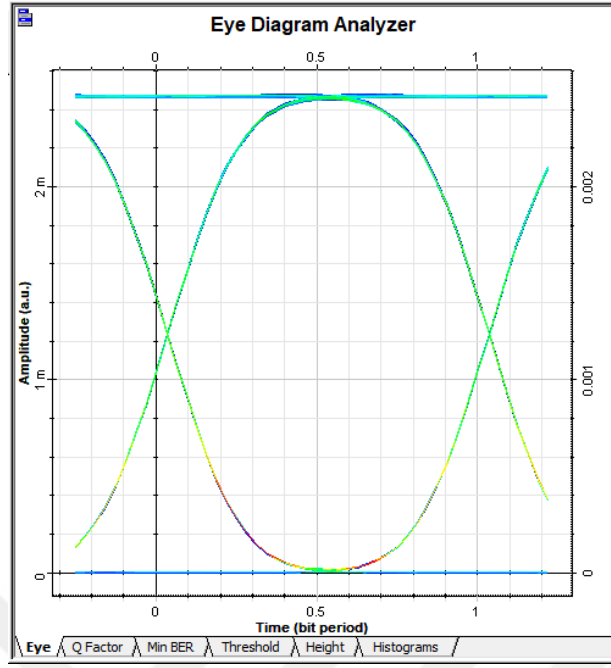
Şekil 4.2. I. Senaryo Eye diagram.



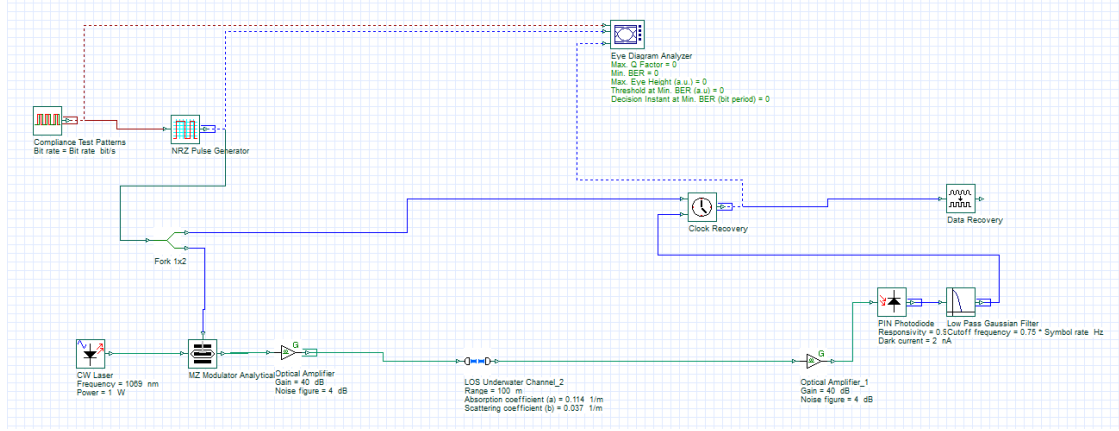
Şekil 4.3. II. Senaryo Sistem Tasarımı.

II. senaryoda 1. Deneye ek olarak iletim kanalının girişine ve çıkışına olmak üzere toplamda gain değeri 40 dB ve nose figure değeri 4 dB olan 2 adet OA eklenmiştir. Burada amaç giriş sinyali güçlendirilerek iletilmesini sağlamaktır. II. senaryo sistem tasarımı şekil 4.3’de verilmiştir.

Yapılan senaryo sonucunda iletilen sinyalin alıcı tarafa düzgün bir şekilde ulaştığı ve Q factor değerinin 282.337 olarak ölçülmüştür. Eye diyagram sonucu şekil 4.4’de gösterilmiştir.

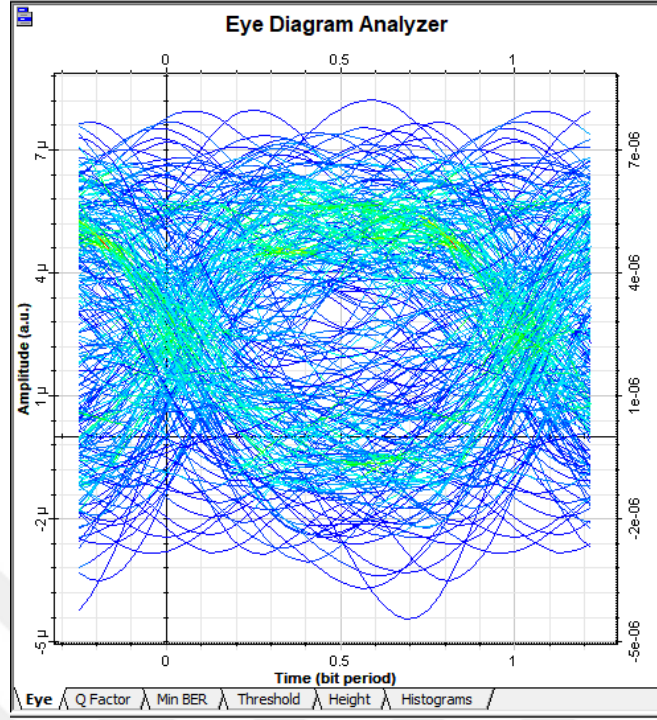


Şekil 4.4. II. Senaryo Eye Diyagramı.



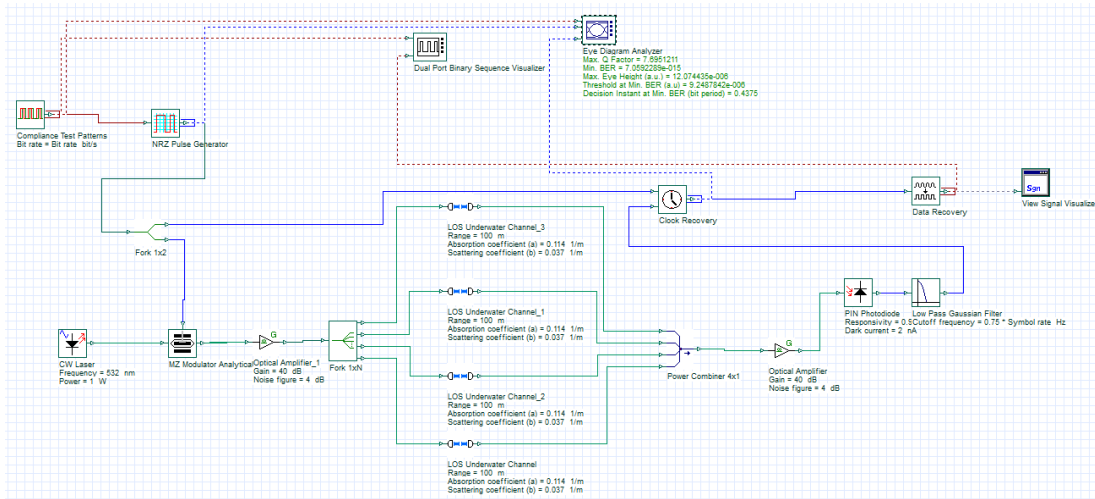
Şekil 4.5. III. Senaryo Sistem Tasarımı.

Sistem tasarımı şekil 4.5'te verilen III. senaryoda, II. senaryo sistem tasarımında kullanılan parametreler ile kanal olarak açık okyanus ortamında benzetim yapıldığında verinin alıcı tarafına düzgün iletilmediği gözlemlenmiştir. Eye diyagram çıktısı şekil 4.6'da gösterilmiştir.

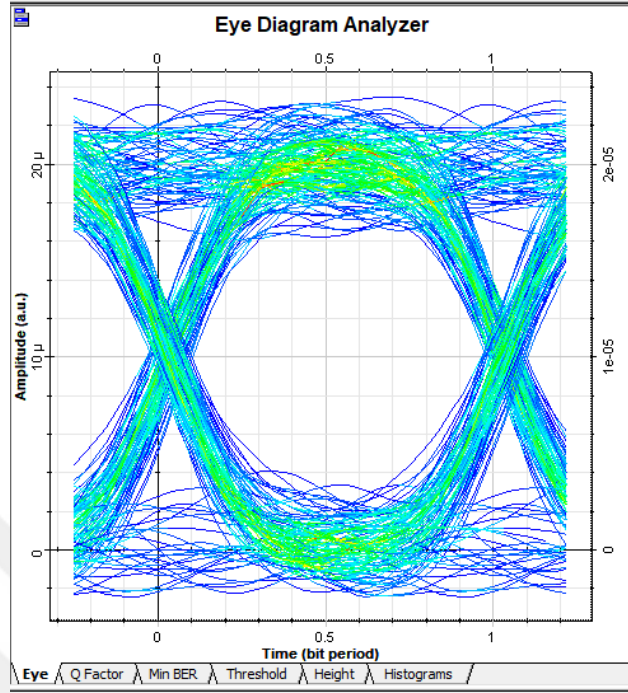


Şekil 4.6. III. Senaryo Eye Diyagramı.

IV. senaryoda ise iletim kanalı sayısı 4'e çıkartılmıştır. Bu senaryoda amaç kanalı sayısını artırarak iletilen sinyalin kalitesini arttırmaktır. Deney sonucunda sinyalin düzgün bir şekilde iletiildiği gözlemlenmiştir. Sistem tasarımı şekil 4.7'de, eye diyagram çıktısı şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. IV. Senaryo Sistem Tasarımı.



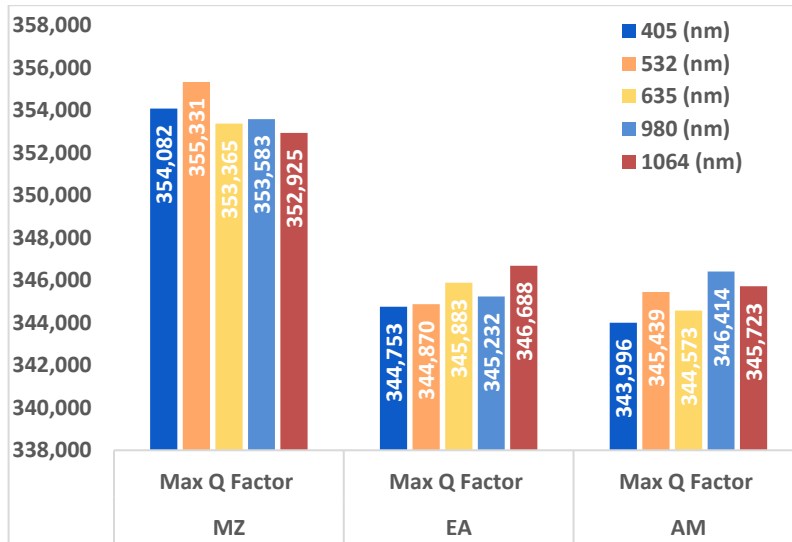
Şekil 4.8. IV. Deney Eye Diyagramı.

Yapılan deneyler sonucunda optimal sistem tasarımı 4 kanallı ve OA kullanılarak oluşturulan devre olduğu saptanmıştır.

Optimal devre tasarımında yapılan simülasyonda simüle edilen iletim kanalı olan su altı kanalında iki farklı tipte kanal benzetim yapılmıştır. Bunlardan biri saf deniz, diğeri ise açık okyanus. Farklı dalga boylarında, sabit 100 metrede üç farklı modülasyon ile benzetim yapıp iki farklı zayıflama katsayıları olan bu kanallarda iletilen verinin Q faktör ve Min BER değerleri ölçüldü ve eye diyagram grafiği çıkartılmıştır.

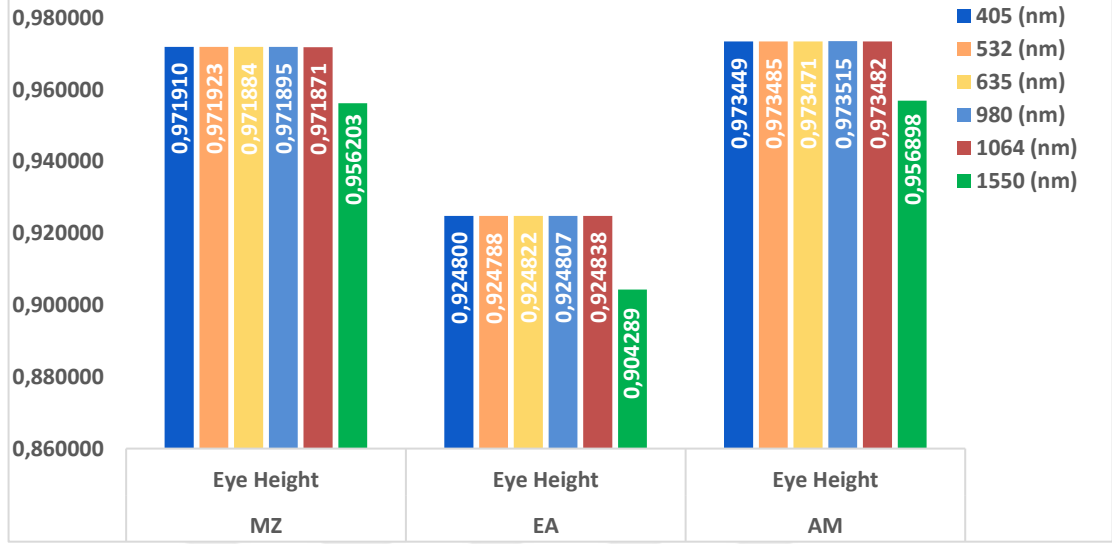
Tablo 4.1. Saf Deniz, 100 metre, 1 Watt Lazer Gücü.

		DALGABOYU (nm)						
		405	532	635	980	1064	1550	
MODULASYON TİPİ	MZ	Max Q Factor:	354.082	355.331	353.365	353.583	352.925	123.632
		Min BER : 0	0	0	0	0	0	0
		Eye Height:	0.97191	0.971923	0.971884	0.971895	0.971871	0.956203
	EA	Max Q Factor:	344.753	344.87	345.883	345.232	346.688	99.1558
		Min BER : 0	0	0	0	0	0	0
		Eye Height:	0.9248	0.924788	0.924822	0.924807	0.924838	0.904289
	AM	Max Q Factor:	343.996	345.439	344.573	346.414	345.723	115.545
		Min BER : 0	0	0	0	0	0	0
		Eye Height:	0.973449	0.973485	0.973471	0.973515	0.973482	0.956898

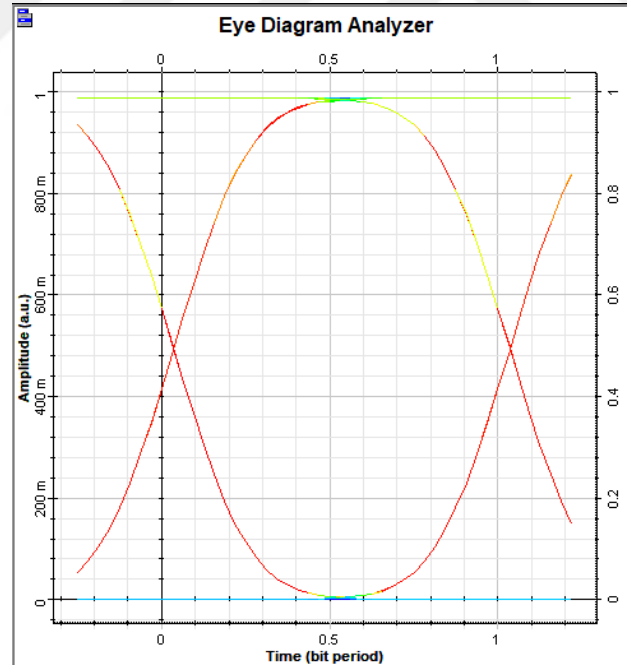


Şekil 4.9. Saf Deniz Ortamı için Q Factor Sonuçları.

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere saf deniz ortamında 3 farklı modülasyon tipi ve 6 farklı dalga boyu kullanılarak yapılan deneyler sonucunda en iyi Q factor sonucu MZ modülasyonu ve 532 nm dalga boyu lazer kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Saf Deniz Ortamı için Eye Height Sonuçları.



Şekil 4.11. Saf Deniz ortamı MZ modülasyonlu ve 532 nm Dalga Boyu Senaryolu Eye Diyagramı.

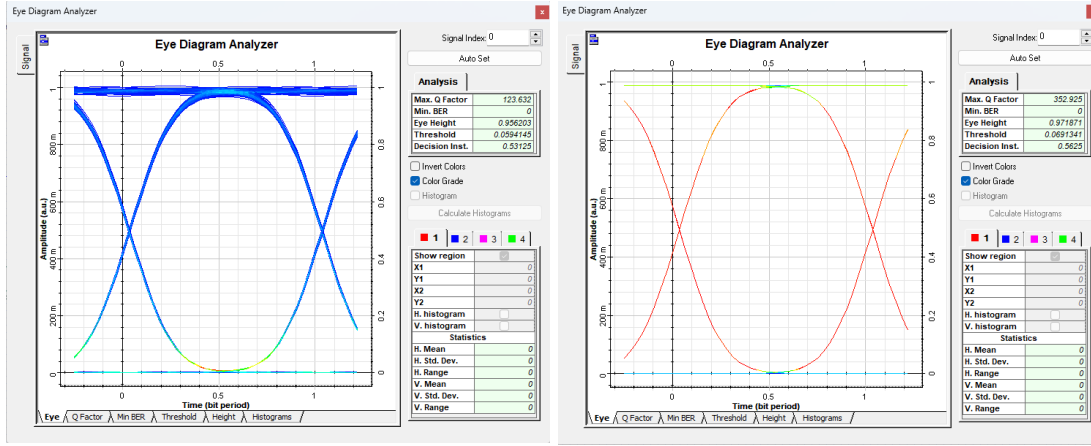
Şekil 4.10’da görüldüğü üzere saf deniz ortamında 3 farklı modülasyon tipi ve 6 farklı dalga boyu kullanılarak yapılan deneyler sonucunda en iyi eye height sonucu AM modülasyonu ve

1064 nm dalga boylu lazer kullanılarak elde edilmiştir.

Senaryolar sonucunda saf deniz ortamında en iyi sonuç MZ modülasyon ve 532 nm dalga boylu lazer kullanılarak elde edilmiştir. İlgili senaryo sonucunda oluşan eye diyagram şekil 4.11’de gösterilmiştir.

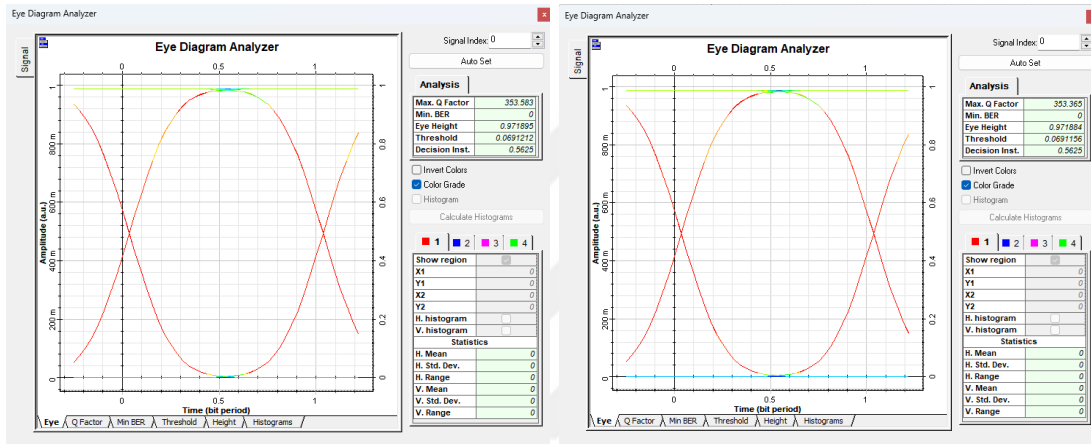
Saf deniz ortamda yapılan, MZ modülasyon kullanılarak yapılan tüm senaryoların eye diyagram grafikleri şekil 4.12’ de, EA modülasyon kullanılarak yapılan tüm senaryoların eye diyagram grafikleri şekil 4.13’ de AM modülasyon kullanılarak yapılan tüm senaryoların eye diyagram grafikleri şekil 4.14’ de gösterilmiştir.





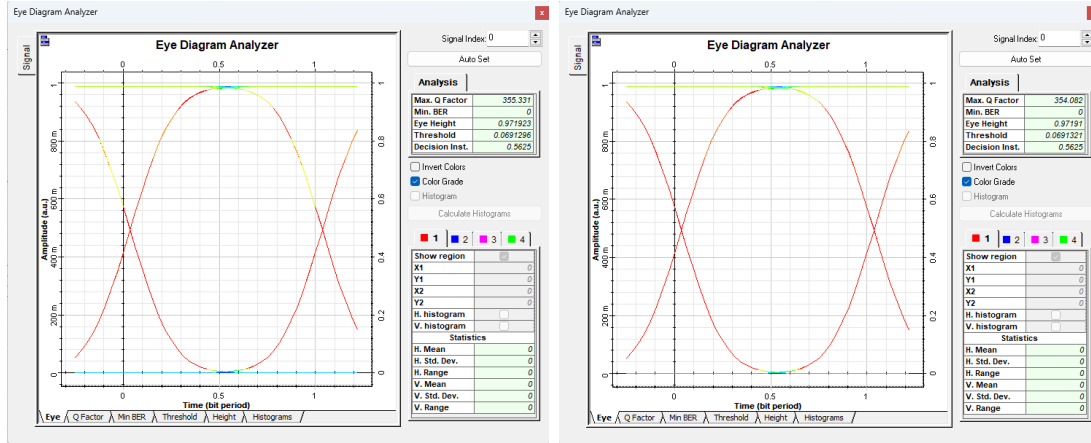
[a]

[b]



[c]

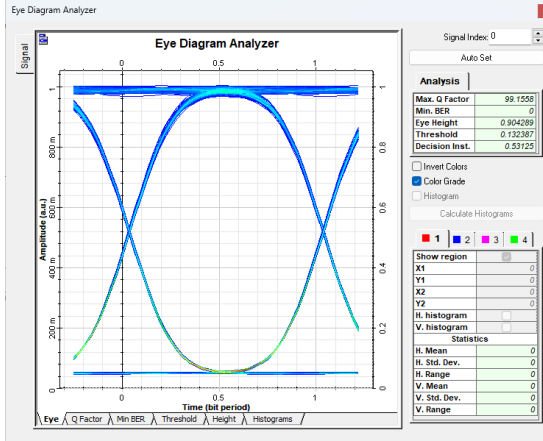
[d]



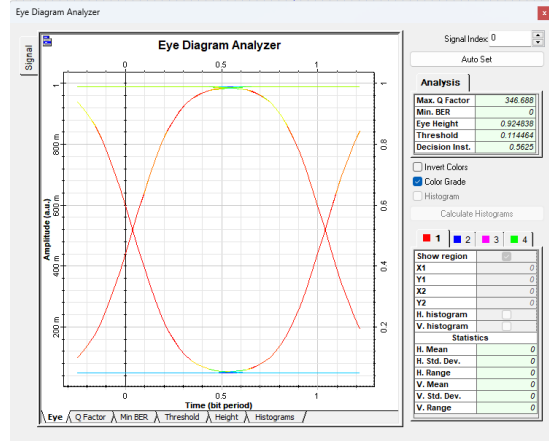
[e]

[f]

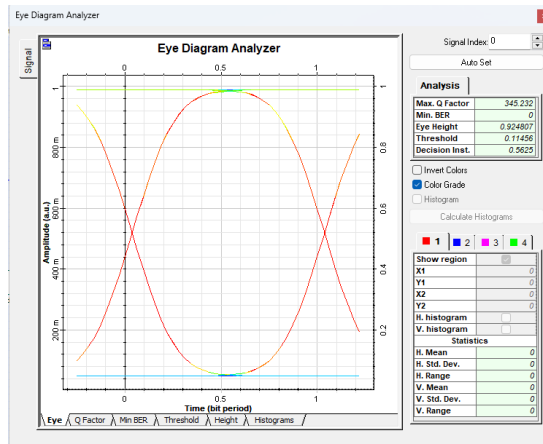
Şekil 4.12. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve MZ Modülasyonlu Saf Deniz Senaryolar Eye Diyagramları.



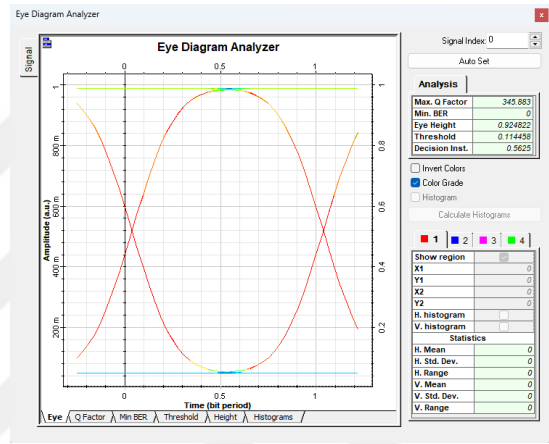
[a]



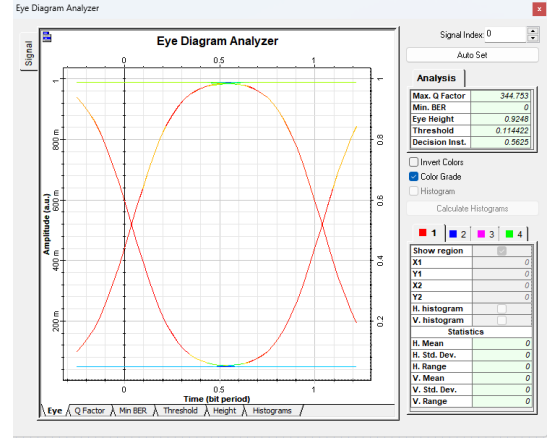
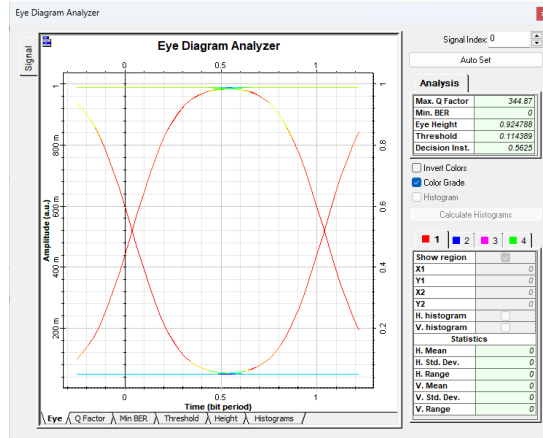
[b]



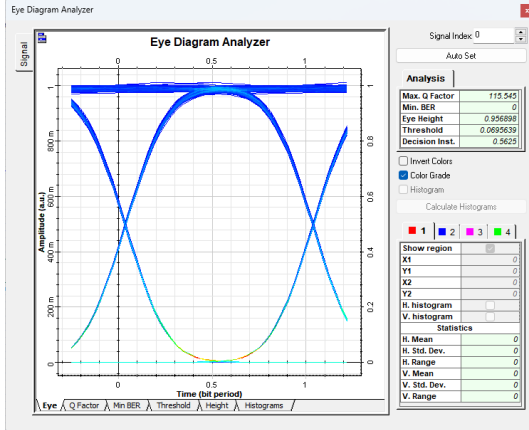
[c]



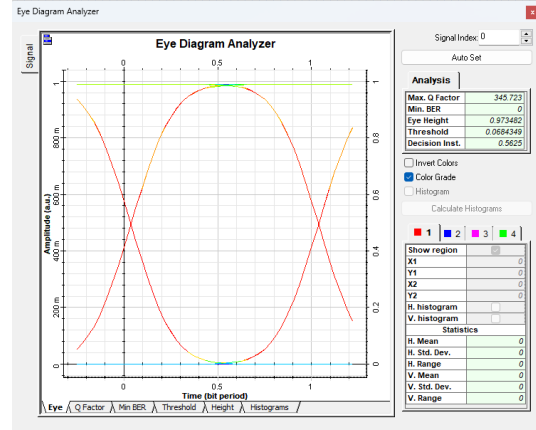
[d]



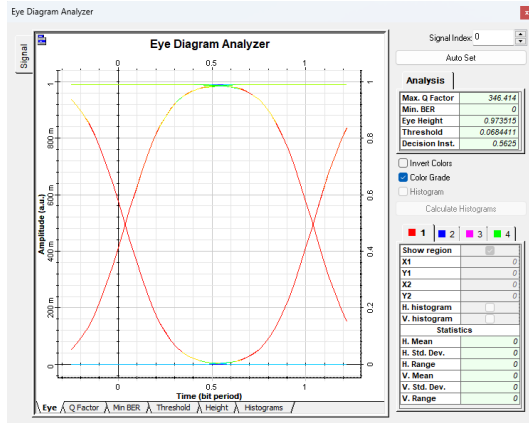
Şekil 4.13. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm
Dalga Boylu Lazer ve EA Modülasyonlu Saf Deniz Senaryolar Eye Diyagramları.



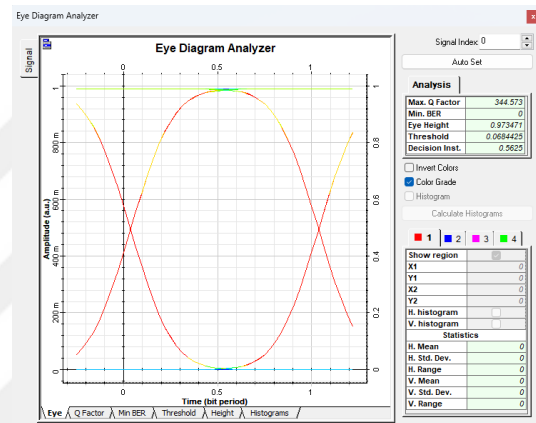
[a]



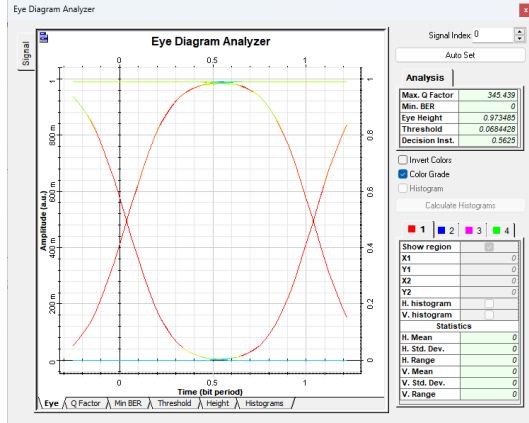
[b]



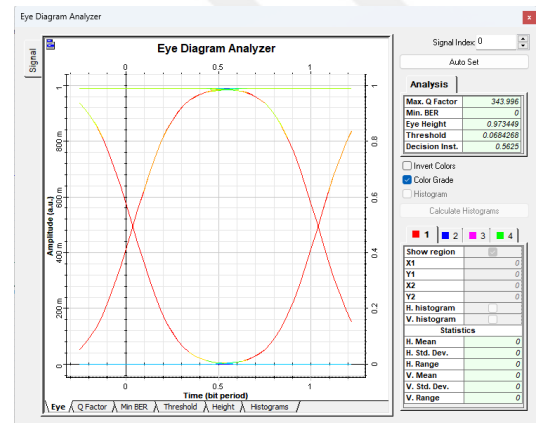
[c]



[d]



[e]

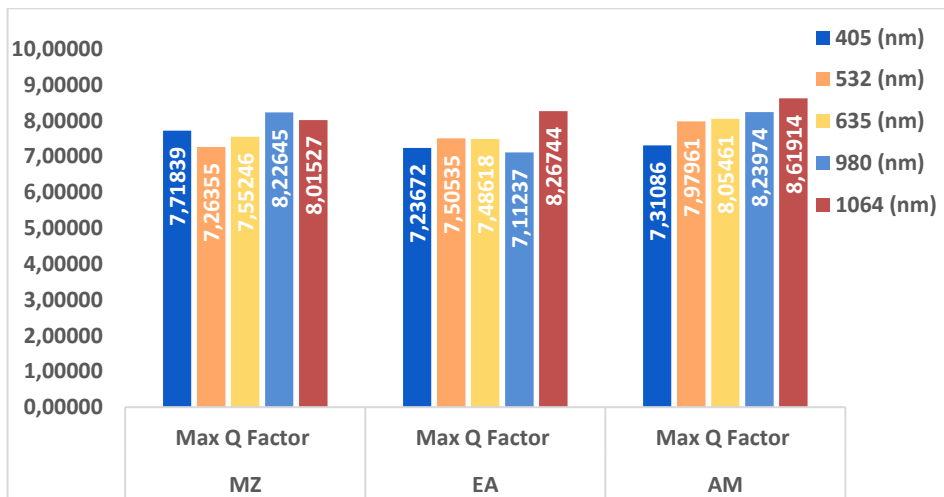


[f]

Şekil 4.14. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve AM Modülasyonlu Saf Deniz Senaryolar Eye Diyagramları.

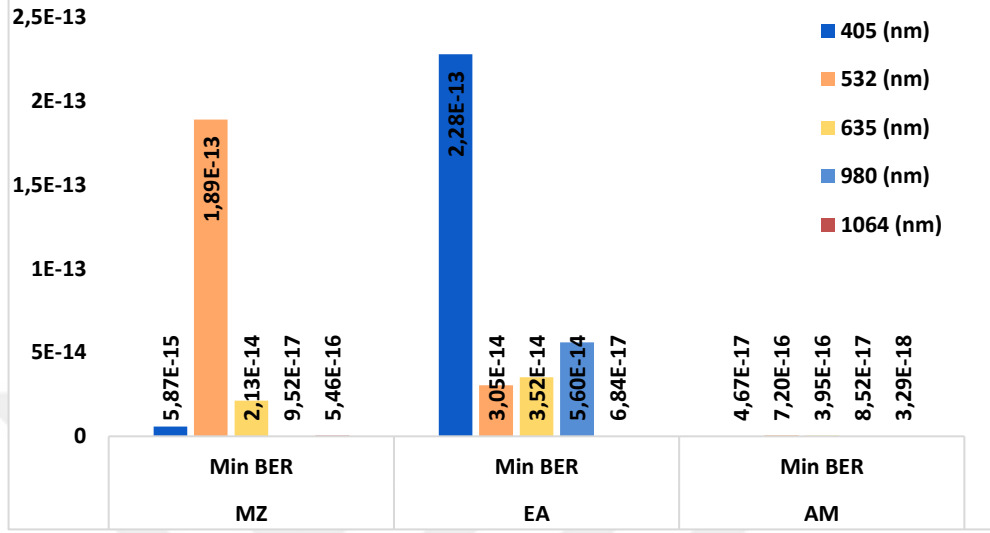
Tablo 4.2. Açık Okyanus, 100 metre, 1 Watt Lazer Gücü.

		DALGABOYU (nm)					
		405	532	635	980	1064	1550
MODULASYON TİPİ	MZ	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:
		7.71839	7.26355	7.55246	8.22645	8.01527	0
		Min BER:	Min BER :	Min BER :	Min BER :	Min BER :	Min BER :
	5.86909e-15	1.88525e-13	2.12939e-14	9.52291e-17	5.46291e-16	1	
	Eye Height :	Eye Height :	Eye Height :	Eye Height :	Eye Height:	Eye Height :	
	1.1279e-05	1.16268e-05	1.2028e-05	1.29086e-06	1.24512e-05	0	
	EA	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:
		7.23672	7.50535	7.48618	7.11237	8.26744	0
		Min BER :	Min BER :	Min BER :	Min BER :	Min BER :	Min BER :
2.2752e-13	3.05014e-14	3.51692e-14	5.599e-14	6.83795e-17	1		
Eye Height:	Eye Height:	Eye Height:	Eye Height:	Eye Height:	Eye Height :		
1.10836e-05	1.12577e-05	1.14245e-05	1.08784e-05	1.2367e-05	0		
AM	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	Max Q Factor:	
	7.31086	7.97961	8.05461	8.23974	8.61914	0	
	Min BER:	Min BER :	Min BER :	Min BER :	Min BER :	Min BER :	
4.66896e-17	7.20103e-16	3.95456e-16	8.52336e-17	3.29406e-18	1		
Eye Height:	Eye Height:	Eye Height:	Eye Height:	Eye Height:	Eye Height :		
1.27444e-05	1.06522e-05	1.24187e-05	1.26896e-05	1.29787e-05	0		



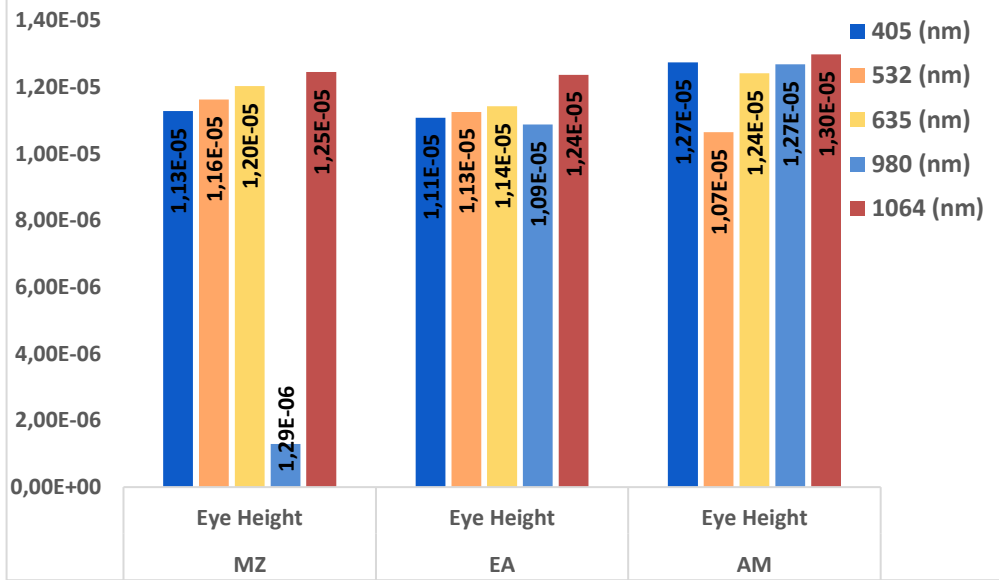
Şekil 4.15. Açık Okyanus Ortamı için Q Factor Sonuçları.

Şekil 4.15’de görüldüğü üzere saf deniz ortamında 3 farklı modülasyon tipi ve 6 farklı dalga boyu kullanılarak yapılan deneyler sonucunda en iyi Q factor sonucu AM modülasyonu ve 1064 nm dalga boyu lazer kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.16. Açık Okyanus Ortamı için Min BER Sonuçları.

Şekil 4.16’da görüldüğü üzere saf deniz ortamında 3 farklı modülasyon tipi ve 6 farklı dalga boyu kullanılarak yapılan deneyler sonucunda en iyi Min BER sonucu AM modülasyonu ve 1064 nm dalga boyu lazer kullanılarak elde edilmiştir.



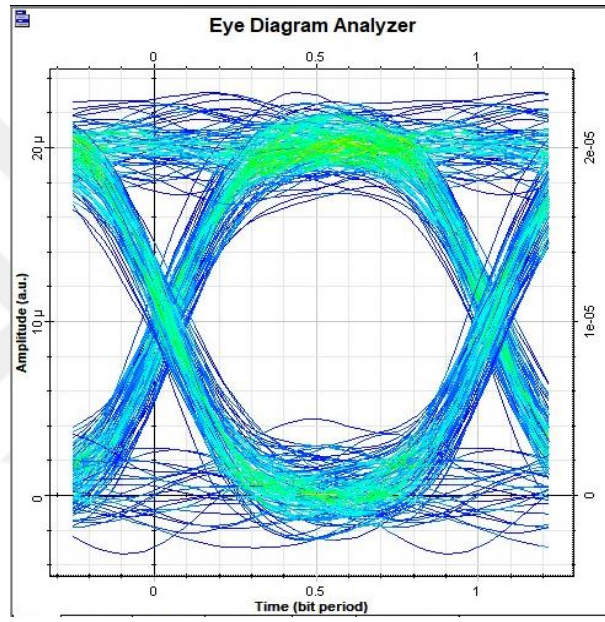
Şekil 4.17. Açık Okyanus Ortamı için Min BER Sonuçları.

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere saf deniz ortamında 3 farklı modülasyon tipi ve 6 farklı dalga

boyu kullanılarak yapılan deneyler sonucunda en iyi Min BER sonucu AM modülasyonu ve 1064 nm dalga boylu lazer kullanılarak elde edilmiştir.

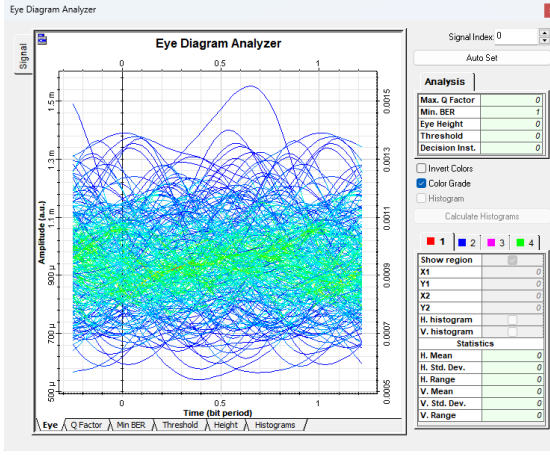
Senaryolar sonucunda açık okyanus ortamında en iyi sonuç AM modülasyon ve 1064 nm dalga boylu lazer kullanılarak elde edilmiştir. İlgili senaryo sonucunda oluşan eye diyagram şekil 4.18’de gösterilmiştir.

Gerek saf deniz ortamında gerek ise açık okyanus ortamlarında yapılan tüm deney sonuçları dikkate alındığında 1550 nm dalga boylu lazerlerin su altı optik haberleşmesinde kullanılmasının diğer dalga boylu lazerlere göre doğru olmadığı anlaşılmıştır.

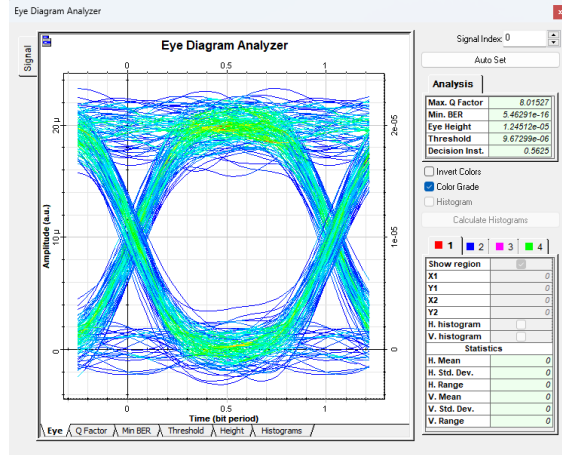


Şekil 4.18. Açık Okyanus Ortamı için AM modülasyonlu ve 1064 nm Dalga Boyu Senaryolu Eye Diyagramı.

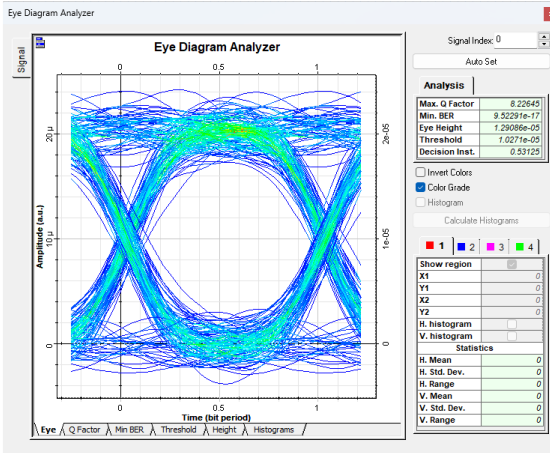
Açık okyanus ortamda yapılan simülasyonların sonuçlarını resmetmek için, MZ modülasyon kullanılarak yapılan tüm senaryoların eye diyagram grafikleri şekil 4.19’ de, EA modülasyon kullanılarak yapılan tüm senaryoların eye diyagram grafikleri şekil 4.20’ de AM modülasyon kullanılarak yapılan tüm senaryoların eye diyagram grafikleri şekil 4.21’ de verilmiştir.



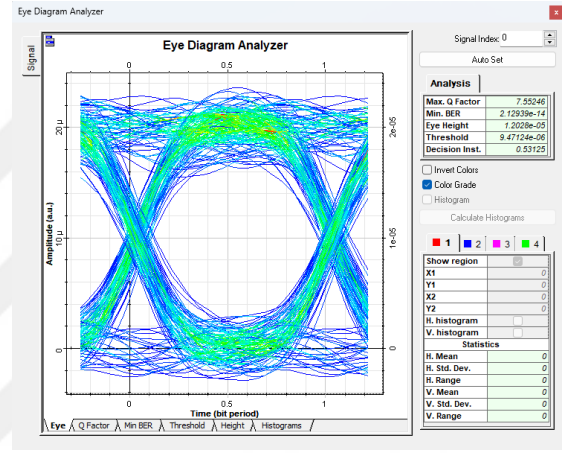
[a]



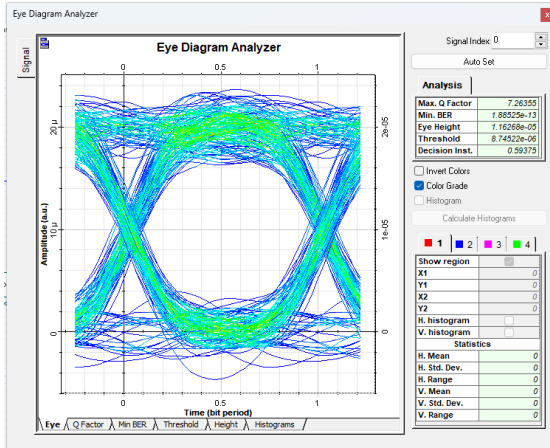
[b]



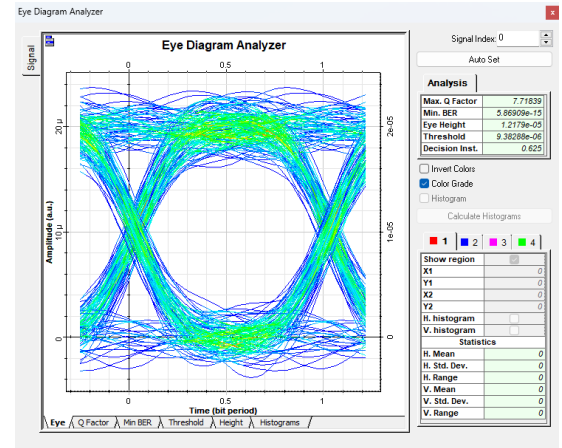
[c]



[d]

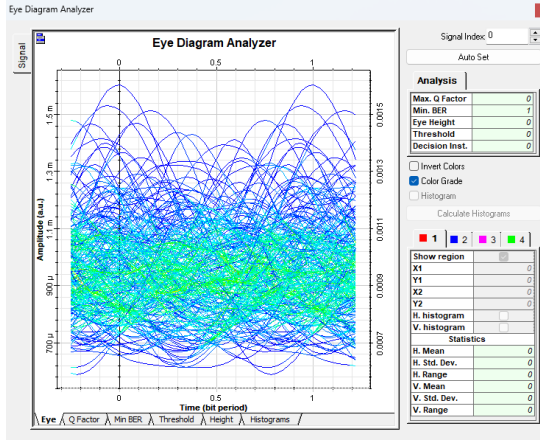


[e]

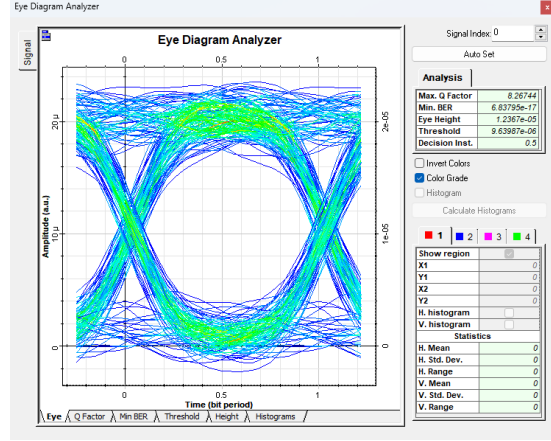


[f]

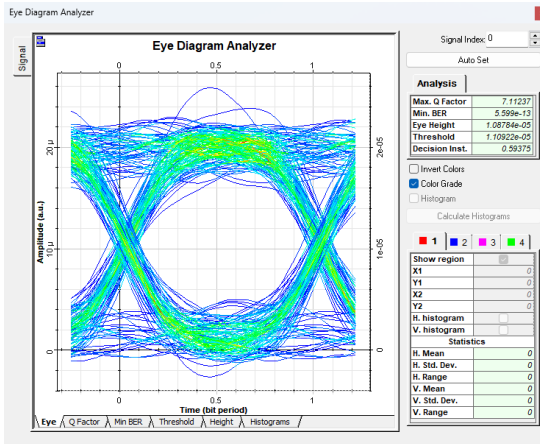
Şekil 4.19. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve MZ Modülasyonlu Açık Okyanus Senaryolar Eye Diyagramları.



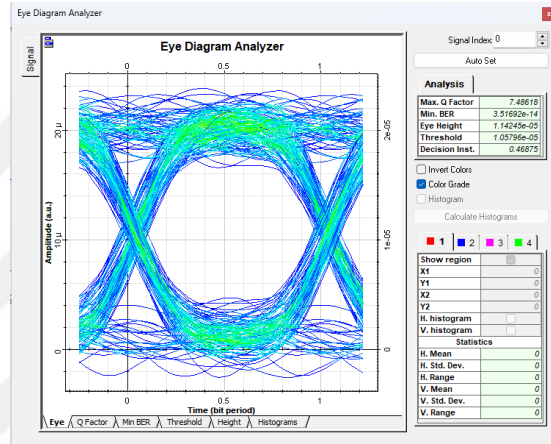
[a]



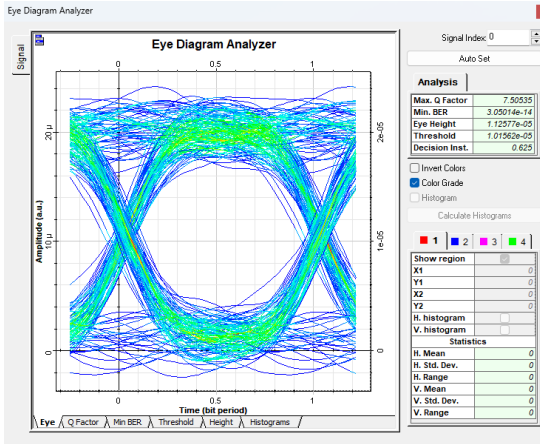
[b]



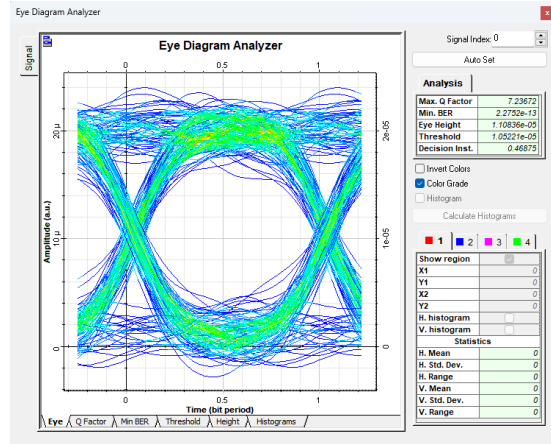
[c]



[d]

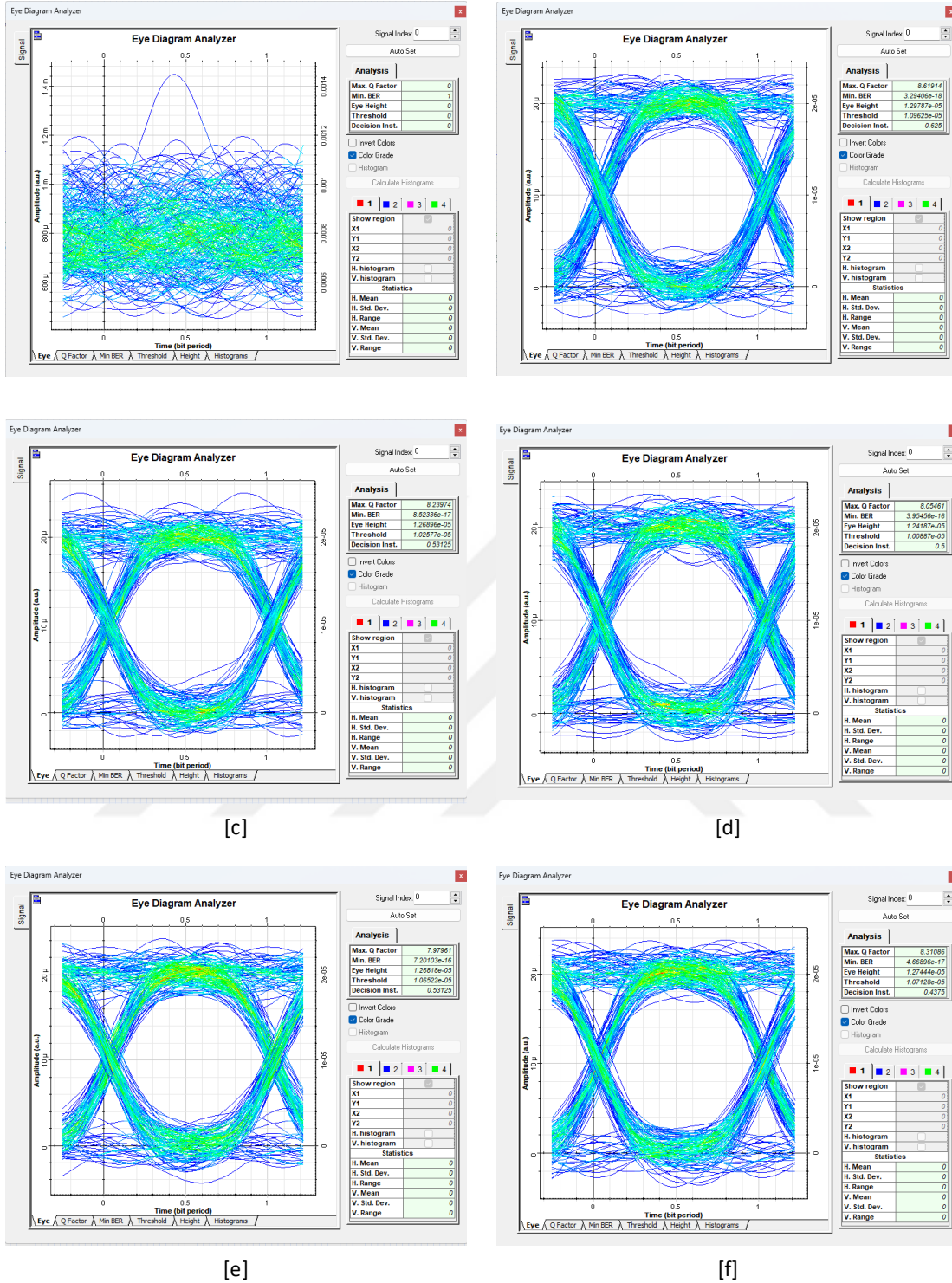


[e]



[f]

Şekil 4.20. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve EA Modülasyonlu Açık Okyanus Senaryolar Eye Diyagramları.



Şekil 4.21. [a] 1550 nm, [b] 1064 nm, [c] 980 nm, [d] 635 nm, [e] 532 nm, [f] 405 nm Dalga Boylu Lazer ve AM Modülasyonlu Açık Okyanus Senaryolar Eye Diyagramları.

KAYNAKLAR / REFERENCES

- [1] P. K. Pandey, (2022), MIMO based high-speed underwater optical wireless communication using WDM, 2022 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 19-20 February, BHOPAL, India.
- [2] M. R. Alam and S. Faruque, (2015), Comparison of different modulation techniques for free space laser communication, 2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), 21-23 May, Dekalb, IL, USA.
- [3] P. Singal, S. Rai, R. Punia and D. Kashyap, (2015), Comparison Of Different Transmitters Using 1550nm And 10000nm In Fso Communication Systems, International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT), 7(3).
- [4] J. Kaur, B. Kaur and K. Singh, (2016), Design and Performance Investigation of Intersatellite Optical Wireless Communication System Employing Modulation Techniques, Wireless Pers Communication, 94, 793-807.
- [5] G. Karpagarajesh, R. Santhana Krishnan, Y. Harold Robinson, S. Vimal, S. Kadry, Y. Nam, (2022), Investigation of digital video broadcasting application employing the modulation formats like QAM and PSK using OWC, FSO, and LOS-FSO channels, Alexandria Eng. J. 61 (1), 647–657.
- [6] A. Bahcebasi, V. C. Gungor and G. Tuna, (2018), Performance Analysis of Different Modulation Schemes for Underwater Acoustic Communications, 2018 3rd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), 20-23 Sep, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina,
- [7] A. Kaur, N. Sharma and J. Singh, (2019), Performance Analysis of Free Space Optical Communication Systems for High-Speed Trains, 2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 68 July, Kanpur, India,.
- [8] N. Nayak, B. Keswani, D. R. Nayak, P. Sharma, A. G. Mohapatra and A. Khanna, (2022), Performance evaluation of DP-QPSK modulation for underwater optical wireless communication using a green light propagation, 2022 OITS International Conference on

Information Technology (OCIT), 14-16 Dec, Bhubaneswar, India.

[9] T. Zhou, S. Hu, L. Mi, X. Zhu and W. Chen, (2017), A long-distance underwater laser communication system with photon-counting receiver, 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 7-10 August, Wuzhen, China,

[10] J. Xu et al., (2016), Underwater Laser Communication Using an OFDM-Modulated 520-nm Laser Diode, *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(20), 2133-2136.

[11] J. B. Snow, J. P. Flatley, D. E. Freeman, M. A. Landry, C. E. Lindstrom, J. R. Longacre and J. A. Schwartz, (1992), Underwater propagation of high data rate laser communications pulses", *Proceedings of SPIE*, 1750, 419-427.

[12] B. Cochenour, L. Mullen and J. Muth, (2013) Temporal Response of the Underwater Optical Channel for High-Bandwidth Wireless Laser Communications, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 38(4), 730-742.

[13] M. Elamassie, F. Miramirkhani and M. Uysal, (2019), Performance Characterization of Underwater Visible Light Communication, *IEEE Transactions on Communications*, 67(1), 543-552.

[14] C. Wang, H. -Y. Yu and Y. -J. Zhu, (2016) A Long Distance Underwater Visible Light Communication System With Single Photon Avalanche Diode, *IEEE Photonics Journal*, 8(5), 1-11.

[15] M. Elamassie and M. Uysal, (2020), Vertical Underwater Visible Light Communication Links: Channel Modeling and Performance Analysis, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(10), 6948-6959.

[16] F. P. Guiomar, M. A. Fernandes, J. L. Nascimento, V. Rodrigues and P. P. Monteiro, (2022), Coherent Free-Space Optical Communications: Opportunities and Challenges, *Journal of Lightwave Technology*, 40(10), 3173-3186.

[17] S. A. Al-Gailani et al, (2021), A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks, *IEEE Access*, 9, 7353-7373.

[18] A. Mansour, R. Mesleh and M. Abaza. (2016), New Challenges in Wireless & Free Space Optical Communications, *Optics and Lasers in Engineering*. 89. 95-108.

[19] R. Boluda-Ruiz, P. Rico-Pinazo, B. Castillo-Vázquez, A. García-Zambrana and K.

Qaraq, (2020), Impulse Response Modeling of Underwater Optical Scattering Channels for Wireless Communication, IEEE Photonics Journal, 12(4), 1-14.

[20] Mobley C. (1994), Light and Water: Radiative Transfer, Natural Waters. New York, NY, USA.

[21] V. I. Haltrin,(1999), Chlorophyll-based model of seawater optical properties, Appl. Opt., 38(33), 6826–6832.

[22] S. Arnon, (2003), Optical wireless communication, Encyclopedia of Optical Engineering, 2, 1866–1886.



ÖZGEÇMİŞ

İbrahim Emirhan DELİBAŞ 2019 yılında Marmara Üniversitesi Elektrik ve Elektrik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine devam etmekte. Profesyonel iş hayatında savunma sanayi sektöründe yazılım mühendisi olarak görev yapmaktadır.



