

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM
DALI



OFDM TABANLI SUALTI HABERLEŞME SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK
LİSANS TEZİ

MERT KUMCU

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. Oktay AYTAR

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI

Dr. Mehmet Ali ÇAVUŞLU

BOLU, HAZİRAN 2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Mert KUMCU tarafından hazırlanan “**OFDM TABANLI SUALTI HABERLEŞME SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Elektrik Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 16/06/2025

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç. Dr. Oktay AYTAR
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Nihat DALDAL
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Cihan KARAKUZU
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....

MERT KUMCU

ÖZET

OFDM TABANLI SUALTI HABERLEŞME SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERT KUMCU

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK

LİSANS PROGRAMI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. OKTAY AYTAZ)

(İKİNCİ DANIŞMAN: DR. MEHMET ALİ ÇAVUŞLU)

BOLU, HAZİRAN - 2025

XII + 20 sayfa

Yapılan bu çalışmada, Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) kullanılan bir su altı haberleşme modeli oluşturulmuş ve bu model ile elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Su altı ortam kayıplarına dair matematiksel formüller ve modülasyon parametreleri kullanılarak, veri alt sembollere bölünmüş ve su altı ortamındaki kayıplar hesaplanmıştır. Alınan semboller birleştirilerek başarımlar parametreleri incelenmiştir. Model parametrik hale getirilmiş ve parametrelerin değişimiyle Sinyal Gürültü Oranı (SNR), Bit Hata Oranı (BER) ve su altı ortam kayıpları analiz edilmiştir.

Önerilen modele göre yapılan SNR analizinde, 1000 metrede 50 dB olan SNR değerinin, 10000 metrede 25 dB'e düştüğü analiz edilmiştir. Elde edilen bu sonuç, sinyal gücünün mesafe ile logaritmik olarak azaldığını göstermektedir. BER değerleri incelendiğinde, 150 dB gönderici çıkış gücü ve 50 dB SNR ile 1000 metre mesafede BER '0' iken, 70 dB güçte aynı mesafede BER '0.12' değerine yükselmektedir, elde edilen bu sonuç yüksek SNR'nın başarımları artırdığını göstermektedir. İletim kaybı analizinde, 100 metrede 35.57 dB olan toplam kayıp, 10.000 metrede 115 dB'e ulaşarak mesafenin sinyal kalitesinin bozulmasında önemli rolü olduğunu ortaya koymaktadır. Derinlik bazında, 100 metrede 52.79 dB olan kayıp, 10.000 metrede 62.69 dB'e yükselmekte, ancak derinliğin etkisi mesafeye kıyasla sınırlı kalmaktadır. Frekans analizinde ise, 27 kHz'de 52.79 dB olan kayıp, 540 kHz'de 192.63 dB'e çıkarak yüksek frekansların emilim kaybını artırdığını göstermektedir.

Önerilen bu haberleşme modeline göre elde edilen sonuçlar incelendiğinde, frekans ve mesafenin, periyodik olmayan veri transferinde haberleşme başarımları diğer parametrelere göre daha fazla etkilediğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: OFDM, Sualtı haberleşme, Kanal modelleme, Akustik haberleşme.

ABSTRACT

MODELING AND SIMULATION OF OFDM BASED UNDERWATER COMMUNICATION SYSTEM

MSC THESIS

MERT KUMCU

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF ELECTRICAL-ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. OKTAY AYTAZ)

(CO-SUPERVISOR: DR. MEHMET ALI CAVUSLU)

BOLU, JUNE 2025

XII + 20 pages

In this study, an underwater communication model employing Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) has been developed, and the results obtained from this model have been evaluated. Using mathematical formulas related to underwater environment losses and modulation parameters, data was divided into sub-symbols, and the losses in the underwater environment were calculated. The received symbols were reassembled, and performance parameters were analyzed. The model was parameterized, and by altering the parameters, Signal-to-Noise Ratio (SNR), Bit Error Rate (BER), and underwater environment losses were examined.

According to the SNR analysis of the proposed model, it was observed that the SNR value, which is 50 dB at a distance of 1000 meters, decreases to 25 dB at 10,000 meters. This finding demonstrates that signal strength decreases logarithmically with distance. In the examination of BER performance, at a transmission power of 150 dB and 50 dB SNR, the BER at a distance of 1000 meters is '0'. However, at 70 dB power over the same distance, BER increases to '0.12'. This indicates that a higher SNR improves performance. In transmission loss analysis, the total loss, which is 35.57 dB at 100 meters, reaches 115 dB at 10,000 meters, revealing that distance plays a significant role in the degradation of signal quality. Depth-wise, the loss, which is 52.79 dB at 100 meters, rises to 62.69 dB at 10,000 meters; however, the impact of depth remains limited compared to distance. In frequency analysis, the loss, which is 52.79 dB at 27 kHz, increases to 192.63 dB at 540 kHz, demonstrating that higher frequencies exacerbate absorption losses.

Upon evaluating the results obtained with this proposed communication model, it is evident that frequency and distance have a greater impact on communication performance in non-periodic data transfer compared to other parameters.

KEYWORDS: OFDM, Underwater communication, Channel modelling, Acoustic communication.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ	ix
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	x
TEŞEKKÜR	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. MATERYAL ve YÖNTEM.....	5
2.1 Su Altı Akustik Haberleşmesi	5
2.2 Su Altı Kanal Karakteristiği	6
2.2.1 İletim Kaybı.....	7
2.2.2 Soğurma Kaybı.....	8
2.2.3 Yayılım Kaybı	9
2.2.4 Çoklu Yol Etkisi	11
2.2.5 Gürültü.....	12
2.2.6 Yayılma Gecikmesi	13
2.2.7 Doppler Etkisi.....	14
2.3 Su Altı Akustik Haberleşmesi Başarım Metrikleri	15
2.3.1 Sinyal Gürültü Oranı	15
2.3.2 Bit Hata Oranı.....	15
2.3.3 Optimum Frekans	16
2.3.4 Gönderici Sinyal Gücü	16
2.3.5 Alıcı Sinyal Gücü	17
2.4 Su Altı Haberleşmesinde Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama	17
2.4.1 OFDM Matematiksel Tanımı	20
2.5 Sistem Modeli.....	22
2.5.1 Gönderici Modeli.....	23
2.5.2 Su Altı Ortam Parametreleri	24
2.5.3 Alıcı Modeli.....	25
3. BULGULAR	27
3.1 SNR, Mesafe ve BER Başarım Analizi	27
3.2 Mesafeye Bağlı Toplam İletim Kaybı Analizi.....	28
3.3 Derinliğe Bağlı Toplam İletim Kaybı Analizi	29
3.4 Frekansa Bağlı Toplam İletim Kaybı Analizi.....	30

4. TARTIŞMA	32
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	34
KAYNAKLAR	35



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Denizde silindirik akustik haberleşme kanalı	6
Şekil 2.2. Sualtı soğurma kaybı grafiği.....	9
Şekil 2.3. Derinliğe bağlı yayılım kaybı grafiği	11
Şekil 2.4. Çoklu yol etkisi.....	12
Şekil 2.5. Beyaz gürültü eklenmiş sinyal örneği.....	13
Şekil 2.6. Sualtı akustik haberleşmesinde OFDM blok gösterimi	19
Şekil 2.7. OFDM alt taşıyıcı sinyal grafiği (Yüksel, 2012).....	22
Şekil 2.8. OFDM sualtı haberleşmesi modeli	22
Şekil 2.9. QAM sembol haritası.....	23
Şekil 2.10. Döngüsel önek eklenmiş OFDM verisi	24
Şekil 2.11. QAM ve OFDM alt sembolleri grafikleri.....	24
Şekil 2.12. Sualtı ortam modeli blok gösterimi	25
Şekil 2.13. SNR ve BER ilişkisi	25
Şekil 2.14. Gönderilen ve alınan OFDM sembolleri	26
Şekil 3.1. Mesafeye bağlı SNR grafiği	28
Şekil 3.2. Mesafeye bağlı toplam iletim kaybı grafiği.....	29
Şekil 3.3. Derinliğe bağlı toplam iletim kaybı grafiği	30
Şekil 3.4. Frekansa bağlı toplam iletim kaybı grafiği.....	31

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. SNR, BER ve mesafe ilişkisi tablosu	28
Tablo 3.2. Mesafeye bağlı toplam iletim kaybı tablosu	29
Tablo 3.3. Derinliğe bağlı toplam iletim kaybı tablosu.....	30
Tablo 3.4. Frekansa bağlı toplam iletim kaybı tablosu	31



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

ADSL	: Asimetrik Dijital Abone Hattı (Asymmetric Digital Subscriber Line)
AUV	: Otonom Su Altı Araçları (Autonomous Underwater Vehicles)
BER	: Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
CP	: Döngüsel Önek (Cyclic Prefix)
dB	: Desibel
DMT	: Ayırık Çok Tonlu Modülasyon (Discrete Multi-Tone Modulation)
FDM	: Frekans Bölmeli Çoğullama (Frequency Division Multiplexing)
FFT	: Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Fast Fourier Transform)
FSK	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Frequency Shift Keying)
HF	: Yüksek Frekans (High Frequency)
Hz	: Hertz
IFFT	: Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform)
ISI	: Semboller Arası Girişim (Inter-Symbol Interference)
kHz	: Kilohertz
LF	: Alçak Frekans (Low Frequency)
m	: Metre
MIMO	: Çoklu Giriş-Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output)
ms	: Milisaniye (Millisecond)
OFDM	: Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
PSK	: Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying)
QAM	: Karesel Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)
QPSK	: Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)
s	: Saniye
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)
SONAR	: Sesle Seyrüsefer ve Mesafe Tespiti (Sound Navigation and Ranging)
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
TL	: İletim Kaybı (Transmission Loss)
UWA	: Su Altı Akustik (Underwater Acoustic)
UWSN	: Su Altı Kablosuz Sensör Ağı (Underwater Wireless Sensor Network)
WIMAX	: Mikrodalga Erişimi için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
ZP	: Sıfır Dolgu (Zero Padding)

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitim dönemim boyunca doğru yönlendirmeleri ve mesleki eğitimime olan katkıları için değerli danışman hocam Doç. Dr. Oktay Aytar'a teşekkür ederim.

Hem mesleki kariyerimde hem yüksek lisans eğitim dönemimde desteklerini esirgemeyen ikinci danışmanım Dr. Mehmet Ali Çavuşlu'ya teşekkür ederim.

Tez çalışmaları için sağladığı esnekliklerden dolayı Koç Bilgi ve Savunma Teknolojileri A.Ş.'ye teşekkür ederim.



1. GİRİŞ

Dünya yüzeyinin üçte ikisi su ile kaplıdır. İnsanlar, su altındaki keşfedilmemiş dünyaya büyük bir merak duymaktadır. Sualtı akustik haberleşmesi, ses dalgalarının su ortamında yayılma özelliklerinden yararlanarak bilgi iletimini sağlayan bir teknoloji olarak, geçmişten günümüze önemli bir gelişim göstermiştir (Urlick, 1983). Bu teknolojinin temelleri, 19. yüzyılda sesin su altındaki yayılımının keşfiyle atılmış, ancak asıl ilerlemeler 20. yüzyılda, özellikle İkinci Dünya Savaşı sırasında gerçekleşmiştir (Medwin ve Clay, 1998). Savaş yıllarında, denizaltıların tespiti ve iletişimi için sonar (Sound Navigation and Ranging) sistemlerinin geliştirilmesi, sualtı akustiğinin askeri alanda kritik bir rol oynamasına yol açmıştır (Hodges, 2012). Bu dönemde, ABD ve müttefik ülkeler tarafından geliştirilen aktif ve pasif sonar sistemleri, düşman denizaltılarının yerini belirlemede ve iletişimde kullanılarak savaşın seyrinde belirleyici olmuştur (Kehn, 2015). Ayrıca, bu teknolojiler savaş sonrası dönemde sivil uygulamalara da temel oluşturmuş; oşinografi, deniz biyolojisi ve sualtı araştırmaları gibi alanlarda kullanımını genişletmiştir (Etter, 2018). Günümüzde ise, dijital sinyal işleme teknikleri ve gelişmiş algoritmalar sayesinde sualtı akustik haberleşmesi, yüksek veri hızları ve güvenilirlik sunarak, otonom sualtı araçlarından deniz tabanı haritalamasına kadar geniş bir yelpazede etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Stojanovic ve Preisig, 2009)

Son zamanlarda, bilimsel keşifler, ticari kullanım ve saldırılardan korunma amacıyla su altını izlemeye yönelik ilgi artmıştır. Gerçek zamanlı veri, video ve sonar görüntülerini iletme konusunda da büyük bir ilgi bulunmaktadır. Askeri ve bilimsel uygulamalar için İnsansız Su Altı Araçları (Unmanned Underwater Vehicles) önemli hale gelmiştir (L. Freitag, 2004). Doğru konumlandırılmış Su Altı Kablosuz Sensör Ağları (UWSN) oluşturmak, bilimsel keşifler, ticari kullanım, kıyı koruma ve askeri hedef tespiti gibi su altı uygulamalarına önemli avantajlar ve faydalar sağlamaktadır. Etkili su altı akustik (UWA) iletişimlerinin kurulması, Su Altı Kablosuz Sensör Ağları'nın gelişimine yardımcı olmaktadır.

Su altı akustik haberleşmesi gelişmesinin sebeplerinden biri ise diğer yöntemlerin su altı ortamında yeteri kadar etkili olamamasıdır. Işık, suyun bulanıklığı ve partikülleri nedeniyle hızla dağılır ve kısa mesafelerde etkili olurken (Berkhovskikh ve Lysanov, 1982), elektromanyetik dalgalar ise deniz suyunun yüksek iletkenliği yüzünden ciddi şekilde zayıflar (Moore, 1979). Buna karşın,

akustik dalgalar, suyun yoğun yapısında daha az enerji kaybıyla uzun mesafelerde yayılabilir ve çevresel engellere karşı daha dirençlidir (Urlick, 1983). Bu özellikler, akustik dalgaları su altı haberleşmesi için en uygun seçenek haline getirir. Ancak bu yöntemde, alıcının yüzeyden ve dipten yansıyan sinyalleri gözlemlediği yankılanma etkisi nedeniyle, su altı akustik kanalları genellikle büyük gecikme yayılımına sahip olup, bu da güçlü frekans seçiciliğine yol açmaktadır.

Su altı akustik haberleşmesinde frekansın artması, haberleşme mesafesinin azalmasına neden olurken, düşük frekanslarda ise ortam gürültüsünün baskın hale gelmesi önemli bir zorluk oluşturur. Yüksek frekanslar (örneğin, 10 kHz ve üzeri), deniz suyunda soğurma kayıplarının katlanarak artmasına yol açar; çünkü ses dalgalarının enerjisi, frekansın karesiyle orantılı olarak suya transfer edilir ve bu da sinyalin kısa mesafelerde zayıflamasına sebep olur (Urlick, 1983). Buna karşın, düşük frekanslar (örneğin, 1 kHz ve altı), soğurma kayıplarından daha az etkilenecek uzun mesafelerde iletim sağlar; ancak bu frekans aralığında, dalga hareketleri, nakliye faaliyetleri ve biyolojik kaynaklar gibi çevresel faktörlerden kaynaklanan ortam gürültüsü sinyal-gürültü oranını ciddi şekilde düşürür (Coates, 1989). Dolayısıyla, su altı haberleşme sistemlerinin tasarımı, bu iki uç arasındaki dengeyi optimize etmeyi gerektirir ve genellikle spesifik uygulama ihtiyaçlarına göre frekans seçimi yapılmalıdır (Stojanovic, 1996).

Su altı akustik iletişimde, karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için çeşitli iletişim teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler arasında tek taşıyıcılı ve çok taşıyıcılı sistemler önemli bir yer tutar. Tek taşıyıcılı sistemler, daha basit yapıları ve daha düşük maliyetleri nedeniyle dar bant genişliği ve kısa mesafeli iletişim gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Ancak, bu sistemlerde semboller arası girişimi (ISI) önlemek için sembol süresinin, kanal gecikme süresinden çok daha uzun olması gerekir. Bu durum, veri hızının sembol süresi ile ters orantılı olması nedeniyle düşük veri hızı ve iletişim verimsizliği ile sonuçlanır (Bingham, 1990). Daha yüksek veri hızlarına ve daha verimli iletişime ihtiyaç duyulan durumlarda ise çok taşıyıcılı sistemler, özellikle Frekans Bölmeli Çoğullama (FDM), su altı iletişimi için etkili bir çözüm sunar. FDM, mevcut bant genişliğini spektrumda alt bantlara böler ve bu sayede birden fazla taşıyıcının paralel olarak veri iletmeye olanak tanır. Bu yaklaşım, taşıyıcıların spektrumda birbirine yakın frekanslarda yerleştirilmesiyle yüksek veri hızlarına ulaşılmasını sağlar. Ancak, taşıyıcılar arasındaki frekans boşluklarının yetersiz olması, taşıyıcılar arası girişim (ISI)

sorununa yol açabilir. Bu girişimi önlemek için ardışık taşıyıcı sinyaller arasında koruma bantlarının yerleştirilmesi gerekmekte olup, bu da toplam veri hızında düşüőe neden olur (Zhou vd., 2014).

Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM), her iki sorunu da çözmek için kullanılan çok taşıyıcılı dijital iletişim yöntemidir. Düşük veri hızına sahip çok sayıda taşıyıcıyı birleştirerek, bileşik bir yüksek veri hızlı iletişim sistemi oluşturur. Dikeylik, taşıyıcıların birbirine yakın, hatta örtüşen bir şekilde yerleştirilmesine olanak tanır ve taşıyıcılar arası girişim oluşmaz. Her taşıyıcının düşük veri hızı, uzun sembol süreleri anlamına gelir ve bu da semboller arası girişimi büyük ölçüde azaltır (Yüksel, 2012).

OFDM mevcut bant genişliğini birden fazla alt banda böler ve bu alt bantlar birbirleriyle örtüşecek şekilde düzenlenir. Bu yöntem, sembol süresini uzatarak çok yollu yayılmanın etkilerini azaltır ve daha verimli bir veri iletimi sağlar. Sonuç olarak, semboller arası girişim (ISI) her bir alt bantta ihmal edilebilir ve bu da kanal eşitlemedeki alıcı karmaşıklığını büyük ölçüde basitleştirir. Bu başarı, araştırmacıları su altı akustik iletişiminde OFDM üzerinde çalışmaya motive etmektedir.

Yapılan bu çalışmanın amacı, OFDM yöntemi kullanılarak oluşturulan bir su altı haberleşmesi modelinin uygulanabilirliğini göstermektir. Bu doğrultuda, modelin başarımını etkileyen Sinyal Gürültü Oranı (SNR), Bit Hata Oranı (BER), frekans, mesafe ve derinlik gibi kritik parametrelerin değişimi MATLAB ortamında geliştirilmiş bir yazılım aracılığıyla analiz edilmiştir. Bu model ile su altı ortamında OFDM tabanlı haberleşmenin işleyişi incelenmiş ve bu tür iletişimin su altı ortamındaki karakteristik özellikleri değerlendirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen modelde, ilk olarak bir metin mesajı binary bitlere çevrilir ve bu bitler QAM (Kare Genlik Modülasyonu) ile modüle edilerek OFDM (Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama) sembollerine dönüştürülür. Oluşturulan semboller, çevrimsel önek eklenerek sualtı iletişim kanalında ilettime hazır hale getirilir. Sualtı ortamının karakteristik özellikleri olan tuzluluk, sıcaklık, derinlik ve mesafe gibi parametreler dikkate alınarak ses hızı hesaplanır. Ayrıca, sinyalin kanal boyunca zayıflamasını simüle etmek için küresel yayılım kaybı ve Thorp formülü ile frekansa bağlı emilim kaybı modellenir. Bu süreçte, gönderilen sinyale sualtı koşullarını yansıtan gürültü eklenerek alıcı tarafındaki sinyal bozulması gerçekei bir şekilde test edilir.

Alınan sinyal, demodölasyon işleminden geçirilerek orijinal binary veriler geri elde edilir ve iletişim başarımını değerlendirmek amacıyla Bit Hata Oranı (BER) ile Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) hesaplanır. Model, farklı mesafeler ve gürültü seviyeleri için BER ve SNR grafikleri üreterek sistemin sualı koşullarındaki etkinliğini analiz eder. Bu benzetim, sualı akustik iletişim sistemlerinin tasarımında ve optimizasyonunda kullanılabilecek değerli bir araç sunar, sinyal iletiminin zorlayıcı sualı ortamında nasıl başarıml gösterdiğini anlamayı ve iyileştirmeyi hedefler.



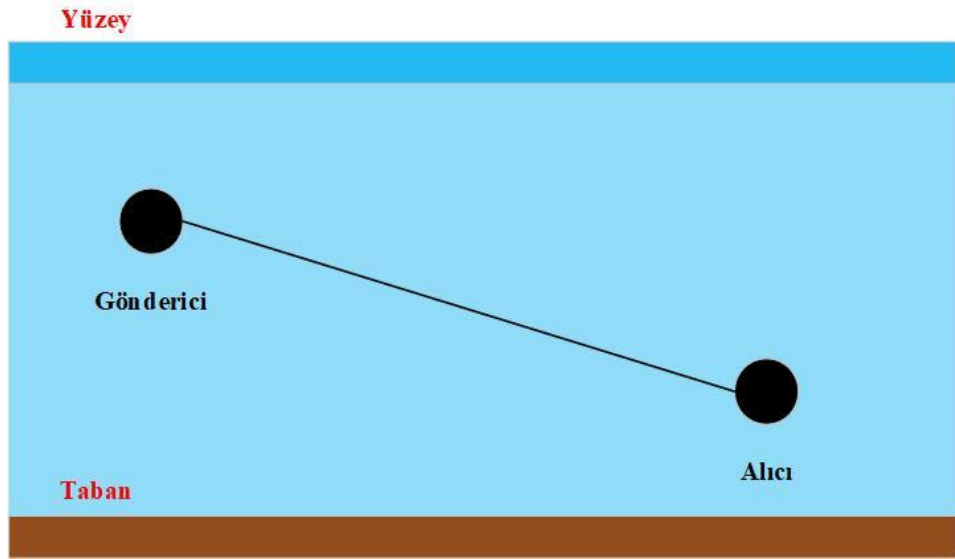
2. MATERYAL ve YÖNTEM

Bölüm, sualtı ortamının fiziksel özelliklerinin ses dalgalarının yayılımını nasıl etkilediğini ve bu durumun iletişim sistemleri üzerindeki zorluklarını açıklamaktadır. Sualtı akustik kanallarının karakteristikleri, iletim kaybı, gürültü kaynakları ve yayılma gecikmesi gibi faktörlerin iletişim başarımına etkileri üzerinde durulmuştur. Ayrıca, OFDM tabanlı bir sualtı haberleşme modelinin MATLAB ortamında nasıl geliştirildiği, bu modelin gönderici, alıcı ve sualtı ortam parametreleri açısından nasıl yapılandırıldığı anlatılmıştır. Çalışmada, ses dalgalarının sualtı koşullarındaki davranışları ve bu koşulların iletişim sistemlerinin tasarımı üzerindeki etkisi genel hatlarıyla incelenmiştir.

2.1 Su Altı Akustik Haberleşmesi

Sualtı akustik (UWA) iletişimi, su altında mesaj gönderme ve alma yöntemidir. Sualtı akustik kanalı deniz tabanı ve deniz yüzeyi ile sınırlandırılmış bir dalga kılavuzu gibidir (Şekil 2.1). Bu tür iletişimi kullanmanın çeşitli yolları vardır ve en yaygın olanı transdüser kullanmaktır. Deniz ortamının durumu sualtı akustik iletişimini doğrudan etkiler. Belirli çevresel koşullar altında akustik bir iletişim bağlantısının başarılı bir şekilde kurulması için fiziksel iletişim kanalı dikkate alınmalıdır.

Akustik dalgalar, suyun havaya kıyasla daha yoğun olması nedeniyle su içinde ortalama 1500 m/s hızla, havadakinden 3-4 kat daha hızlı hareket eder. Sesin sudaki düşük zayıflama oranı, bu dalgaların sualtı iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Ancak sualtı kanalı, iletişim için en zorlu ortamlardan biri olarak kabul edilir. Akustik dalgalar, deniz suyu içinde uzak mesafelere yalnızca düşük frekanslarda (30-300 Hz) yayılabilir. Daha kısa mesafeler için ise daha yüksek frekanslar tercih edilebilir, bu da donanım gereksinimlerini güç ve dönüştürücü özellikleri açısından hafifletebilir. Sualtı ortamında sinyal alımını bozan çeşitli faktörler vardır. Akustik yayılım üç ana faktörle karakterize edilir, sinyal frekansına bağlı zayıflama, çok yollu yayılım ve düşük ses hızı (1500 m/s). Ses hızındaki değişimler sesin kırılmasına neden olur ve bu da sinyal gücünü zayıflatır. Hava-deniz arayüzü ve deniz dibi sınırı yansımalarına neden olur, bu da sinyali daha da bozan ve dağıtan çok yollu yayılma oluşturur.



Şekil 2.1. Denizde silindirik akustik haberleşme kanalı

Denizdeki çeşitli gürültü kaynakları da alım kapasitesini bozar. Akustik sinyalleri olumsuz yönde etkileyen başlıca zorluklar şunlardır:

- Doppler kayması, sinyal bant genişliği boyunca düzensizdir ve radyo kanallarına göre daha yoğundur.
- İletişim bant genişliği mesafeye bağlıdır. Yayılma düşük frekansta en iyi şekilde desteklendiğinden, karasal kablosuz sistemler kadar (MHz'ler mertebesi) geniş olmasa da su altı ortamı için geniş bantlı kabul edilir (kHz'ler mertebesi).
- Zayıflama, sıcaklık, tuzluluk, derinlik, mesafe gibi ortam parametrelerinin yanında sinyal frekansına bağlıdır.
- Yüksek zayıflama ve donanım sınırlamaları nedeniyle, alınan sinyaller genellikle düşük güçten etkilenir, bu da kayda değer arka plan gürültüsüne neden olur.
- Su altındaki ses hızı yaklaşık 1500 m/s'dir. Bu durum, büyük ve değişken yayılma gecikmeleri ve hareket kaynaklı Doppler etkisine yol açar.

2.2 Su Altı Kanal Karakteristiği

Sualtı akustik haberleşmesi, su ortamının karmaşık kanal karakteristikleri nedeniyle karasal iletişim sistemlerinden önemli ölçüde farklılık gösterir (Urlick, 1983). Suyun fiziksel özellikleri, ses dalgalarının yayılımını etkileyen temel faktörler arasında sıcaklık, tuzluluk ve basınç gradyanlarını içerir. Bu parametreler, ses hızı profilini değiştirerek sinyalin yolunu ve gücünü doğrudan etkiler (Medwin ve Clay, 1998). Ayrıca, sualtı kanalı, iletim kaybı, soğurma kaybı ve çok yollu

yayımlar gibi fenomenlerle karakterize edilir; bu kayıplar, sinyalin mesafeye bağılı zayıflamasını ve bozulmasını artırır (Stojanovic ve Preisig, 2009). Deniz yüzeyi ve tabanından yansımalar, dalga hareketleri ve biyolojik gürültü gibi çevresel unsurlar da kanalın zamanla değişkenlik göstermesine neden olur (Etter, 2018). Bu dinamik yapı, sualtı iletişim sistemlerinin tasarımında düşük veri hızları, yüksek gecikme ve sınırlı bant genişliği gibi zorluklarla başa çıkmayı gerektirir (Kehn, 2015). Sonuç olarak, sualtı kanal karakteristiği, akustik sinyallerin güvenilir bir şekilde iletilmesi için gelişmiş modülasyon teknikleri ve hata düzeltme algoritmalarının kullanılmasını zorunlu kılar (Stojanovic ve Preisig, 2009).

2.2.1 İletim Kaybı

Su altı akustik haberleşmesinde iletim kaybı (TL), ses dalgalarının kaynaktan alıcıya ulaşırken enerji kaybına uğraması nedeniyle sinyal gücünün azalmasını ifade eden temel bir kavramdır. Bu kayıp, su ortamının fiziksel özelliklerinden ve ses dalgalarının yayılım koşullarından kaynaklanır; özellikle mesafenin artması, suyun tuzluluğu, sıcaklık değişimleri ve derinlik gibi faktörler bu süreci etkiler (Urick, 1983). İletim kaybı, su altı haberleşme sistemlerinin kapsama alanını ve sinyal-kirlilik oranını doğrudan belirlediği için sistem tasarımında kritik bir parametre olarak kabul edilir (Stojanovic, 2009). Derin deniz keşifleri, su altı sensör ağları ve askeri uygulamalar gibi alanlarda, iletim kaybının doğru bir şekilde anlaşılması, güvenilir iletişim için vazgeçilmezdir (Akyildiz vd., 2005).

İletim kaybının su altı haberleşmesindeki etkisi, sinyalin alıcıya ulaşmadan önce karşılaştığı çoklu zayıflatıcı faktörlerle daha da karmaşık hale gelir. Ses dalgaları yayılırken, suyun içindeki partiküllerle etkileşime girer ve bu etkileşim enerji kaybına yol açar; ayrıca, deniz tabanı ve yüzey yansımaları gibi çevresel unsurlar sinyalin yönünü ve gücünü değiştirebilir (Chitre vd., 2008). Özellikle uzun mesafelerde, bu kayıplar sinyalin algılanabilirliğini önemli ölçüde azaltır ve alıcı tarafında gelişmiş sinyal işleme teknikleri gerektirir. Bunun yanı sıra, su akıntıları ve dalga hareketleri gibi dinamik koşullar, iletim kaybının zamanla değişkenlik göstermesine neden olur, bu da sistemlerin uyarlanabilirliğini zorunlu kılar (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013).

Son olarak, iletim kaybı, su altı akustik haberleşme sistemlerinin enerji verimliliği ve başarımlarını optimizasyonu açısından da büyük bir öneme sahiptir.

Yüksek iletim kaybı, sinyal gücünü korumak için daha fazla enerji harcanmasını gerektirebilir. Bu durum, bataryayla çalışan su altı cihazlarında operasyon süresini kısaltır (Heidemann vd., 2012). Literatürde, bu kaybı azaltmak için yönlü anten tasarımları ve düşük frekanslı sinyallerin kullanımı gibi yöntemler önerilmiştir. Ancak, bu çözümler bant genişliği ve veri iletim hızı gibi diğer parametrelerle ödünleşim gerektirir (Edelmann vd., 2005).

TL genellikle akustik kaynağın merkezinden bir metre uzaklıktaki bir referans aralığındaki ses yoğunluğunun (I_0) alıcıdaki ses yoğunluğuna (I_1) logaritmik oranı cinsinden Denklem (2.1)'deki gibi ifade edilir.

$$TL = \log\left(\frac{I_0}{I_1}\right) dB \quad (2.1)$$

Çalışma alanımıza göre, toplam TL'ye katkıda bulunan ana faktörler olarak soğurma kaybı, yayılma kaybı ve çoklu yol olarak kategorize edebiliriz.

2.2.2 Soğurma Kaybı

Soğurma kaybı viskoz, termal ve kimyasal gevşemelerden kaynaklanan TL'dir. Ses dalgasının frekansının yanı sıra deniz suyunun sıcaklığına, tuzluluğuna ve asitliğine bağlıdır. Emilimden kaynaklanan iletim kaybı için formül şöyledir:

$$TL_{absorbsiyon} = \alpha(r - 1)dB \quad (2.2)$$

Burada α , dB /m cinsinden soğurma katsayısı ve r metre cinsinden kaynaktan uzaklıktır. Saçılma ve alt etkileşimler gibi diğer kayıp mekanizmaları denkleme dahil edilebilir.

İletim kaybını ölçmek için çeşitli ampirik ifadeler geliştirilmiştir. Deniz suyu için, kHz cinsinden f frekansındaki soğurma katsayısı, kimyasal gevşeme süreçlerinin ve saf sudan soğurmanın toplamı olarak yazılabilir (Ainslie ve Mccolm, 1998):

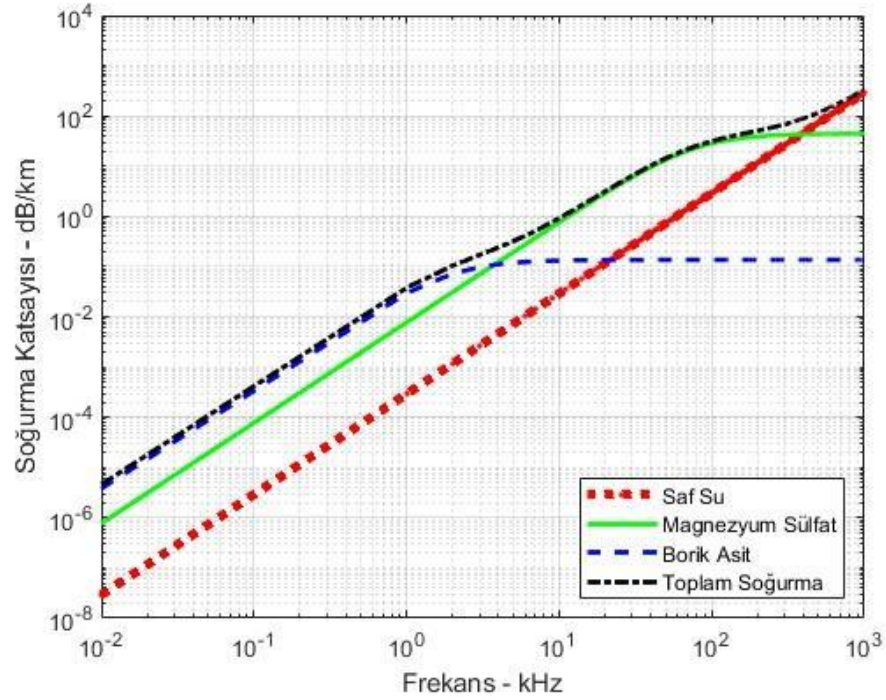
$$\alpha(f) = \frac{A_1 P_1 f^2 f_1}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f^2 f_2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (2.3)$$

Burada ilk terim borik asidin katkısı olup gevşeme frekansı f_1 , ikinci terim magnezyum sülfatın katkısı olup gevşeme frekansı f_2 ve üçüncü terim saf suyun katkısıdır. Basınç bağımlılıkları P_1 , P_2 ve P_3 ve sabitler olan A_1 , A_2 ve A_3 tarafından verilmektedir (Benson, 2010).

Soğurma katsayısı α 'yı ölçmek için birçok teorik ve ampirik formül vardır. Birkaç yüz Hz'in üzerindeki frekanslar için soğurma katsayısı Thorp formülü kullanılarak ampirik olarak ifade edilebilir (Berkhovskikh ve Lysanov, 1982):

$$\alpha(f) = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4}f^2 + 0.003 \quad (2.4)$$

Burada f kHz cinsindendir.



Şekil 2.2. Sualtı soğurma kaybı grafiği

Şekil 2.2, toplam soğurmanın ve kimyasal birleşenlerinin, frekansa bağlı soğurma katsayısı değişimini göstermektedir. Soğurma katsayısı frekansla arttığından, yüksek frekanslı dalgalar kısa mesafelerde önemli ölçüde zayıflarken, düşük frekanslı akustik dalgalar daha uzak mesafelere ulaşabilir. Sonuç olarak, bu durum kullanılabilir maksimum frekansa bir sınır koyar.

2.2.3 Yayılım Kaybı

Ses kaynaktan uzaklaştıkça, akustik enerji geometrik olarak yayılır ve bu da derinliğe bağlı olarak değişen iletim kaybına (TL) neden olur. Bu kayıp yayılma kaybı olarak adlandırılır. Yayılma kaybı, nokta kaynaklar/hedefler kullanıldığında frekanstan bağımsızdır, ancak yayılma mesafesine bağlıdır. Yayılma kaybı Denklem (2.5) ile hesaplanmaktadır:

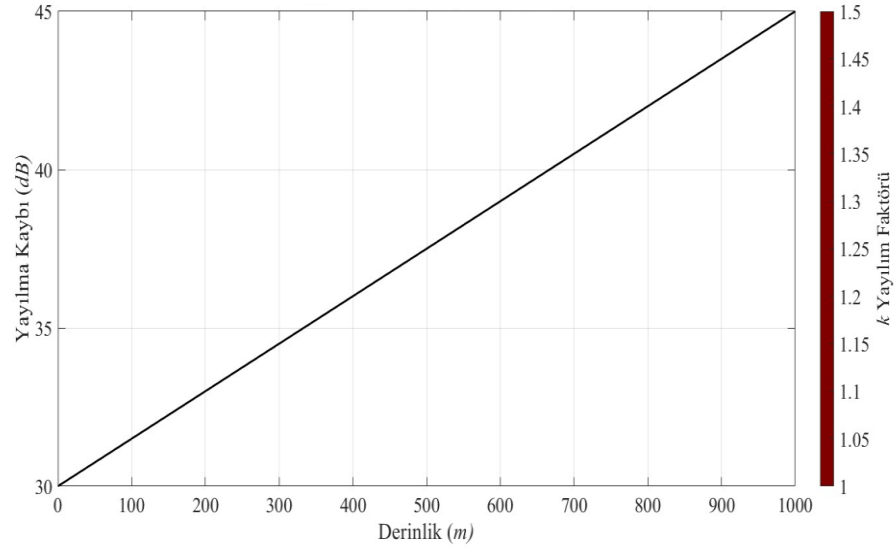
$$TL_{yayılım} = 10k \log r \quad (2.5)$$

Burada, k yayılma faktörü ve r metre cinsinden mesafedir. Pratik bir su altı ortamında, yayılma kaybı silindirik ve küresel yayılma arasında bir yerde olup, k değeri 1 (silindirik yayılma için) ile 2 (küresel yayılma için) arasında değişir (Urlick, 1983).

Su altı akustik haberleşmesinde yayılma kaybı, ses dalgalarının ortamda yayılırken enerji kaybına uğramasını ifade eder ve silindirik yayılma, bu kaybın önemli bir bileşenidir. Silindirik yayılma, ses dalgalarının kaynaktan genellikle yatay bir düzlemde, silindirik bir dalga cephesi şeklinde yayıldığı durumlarda ortaya çıkar; bu, su altı ortamında sığ sularda veya sesin deniz yüzeyi ile taban arasında sıkıştığı koşullarda sıkça gözlemlenir (Urlick, 1983). Bu tür yayılımda, enerji kaybı mesafenin kareköküyle ters orantılı olarak azalır, çünkü ses dalgası iki boyutlu bir düzlemde dağılır (Stojanovic, 2009). Ancak, suyun derinliği ve sınır koşullarının (örneğin, yüzey yansımaları) etkisiyle silindirik yayılma, çok yollu etkilerle birleşerek sinyal gücünde ek zayıflamalara yol açabilir; bu da alıcıda sinyal işleme tekniklerinin karmaşıklığını artırır (Chitre vd., 2008).

Küresel yayılma ise, su altı akustik haberleşmesinde ses dalgalarının kaynaktan her yöne üç boyutlu bir küre şeklinde yayıldığı durumu tanımlar ve genellikle derin sularda veya engelsiz açık alanlarda baskın hale gelir. Bu yayılım türünde, enerji kaybı mesafenin karesiyle ters orantılıdır, çünkü dalga cephesi hacimsel olarak genişler ve birim alana düşen enerji hızla azalır. Küresel yayılma, uzun mesafeli iletişimde daha belirgin bir iletim kaybına neden olur ve bu durum, sinyalin algılanabilirliğini korumak için yüksek güçlü vericiler veya düşük frekanslı sinyaller gerektirebilir (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013). Su altı ortamındaki heterojenlik (örneğin, sıcaklık gradyanları) ve absorpsiyon gibi ek faktörler, küresel yayılmanın etkisini daha da artırarak sistem tasarımında dikkatli bir kanal modellemesini zorunlu kılar (Stojanovic ve Preisig, 2009).

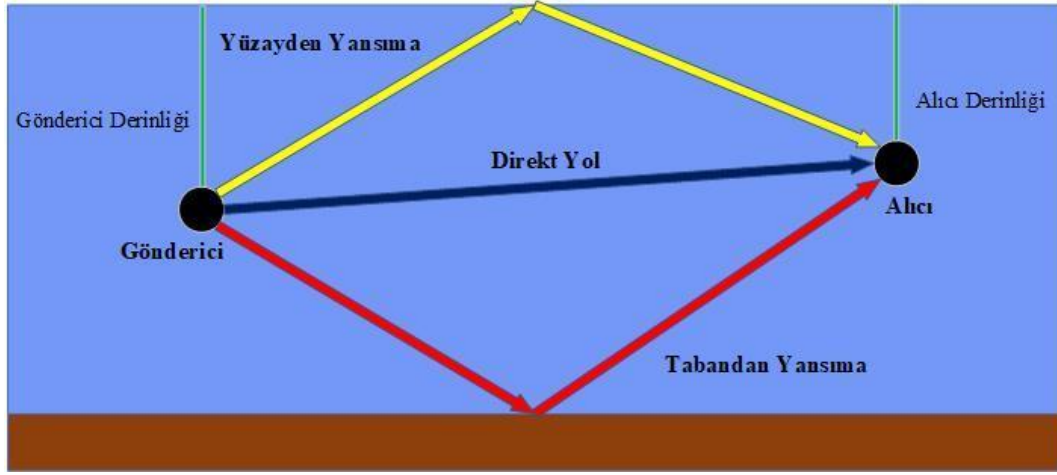
Şekil 2.3'te 1000 metre mesafede 10kHz akustik sinyal frekansı için yayılım kaybı değişimi verilmiştir. Derinliğe bağlı olarak k yayılım faktörü 1-1.5 değerleri arasında değiştirilmiştir.



Şekil 2.3. Derinliğe bağlı yayılım kaybı grafiği

2.2.4 Çoklu Yol Etkisi

Su altında, Şekil 2.4 'de gösterildiği gibi, vericiden alıcıya birden fazla yol veya çoklu yol (multipath) mevcuttur. Çoklu yol oluşumunun iki temel mekanizması, sınırların (taban, yüzey ve sudaki herhangi bir nesne) yansıması ve ses dalgasının kırılmasıdır. Ses hızı, sıcaklık, tuzluluk ve derinliğin bir fonksiyonu olduğundan, ses dalgaları her zaman daha düşük yayılma hızına sahip bölgelere doğru kırılır. Çoklu yol, büyük bir gecikme yayılımına yol açtığından iletişimi olumsuz etkileyebilir. Bu gecikme yayılımı, ilk ve son yolun alıcıya varış zaman farkı olarak tanımlanır ve sinyalin dağılmasına neden olarak ciddi semboller arası girişime (ISI) sebep olur. Tipik su altı kanalları, yaklaşık 10 ms gecikme yayılımına sahip olabilir; ancak, bu gecikme yayılımı 3 ms kadar kısa ya da 50 ila 100 ms kadar büyük olabilir (Tong vd., 2010). Bu bozulmaları önlemek için, alıcı tarafında eşitleme yapılmalıdır. Ayrıca, iletilen verinin doğru bir şekilde demodüle edilmesi ve tespit edilmesi için ISI'yı önleme yöntemleri geliştirilmelidir. Bu modelde, çoklu yol etkisi incelenmemiştir.

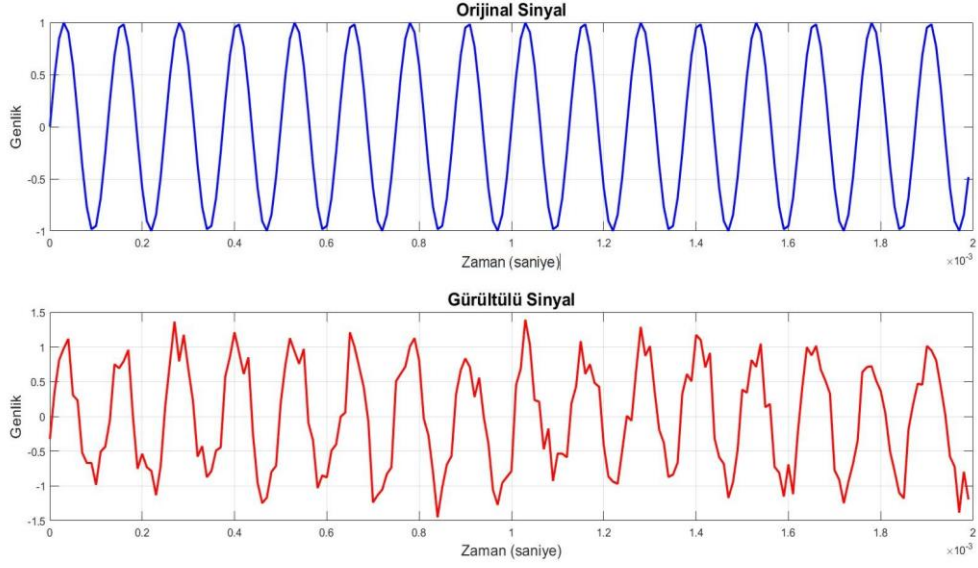


Şekil 2.4. Çoklu yol etkisi

2.2.5 Gürültü

UWA kanalındaki ortam gürültüsü hem doğal hem de insan kaynaklı etkilerden oluşur. Doğal olarak meydana gelen gürültü, biyolojik ve sismik aktivitelerden ve dalgalar, akıntılar, gelgitler, yağmur ve rüzgardan kaynaklanan hidrodinamik gürültüden kaynaklanır. İnsan kaynaklı gürültü ise ağırlıklı olarak gemi faaliyetlerinden kaynaklanır. Ortam gürültüsünün ana kaynağı, ses frekansına göre kategorize edilebilir. 10 Hz'in altındaki frekanslarda, türbülanslı gürültü baskındır. 10-200 Hz frekans aralığında, ortam gürültüsü esas olarak uzak gemi taşımacılığından kaynaklanır. 200-100.000 Hz aralığında, ortam gürültüsü çoğunlukla kırılan dalgalar, rüzgar gürültüsü ile ilişkili köpürme ve kabarcıklardan kaynaklanır. 100 KHz'in üzerindeki frekanslarda, termal gürültü (su moleküllerinin hareketi tarafından üretilen gürültü) baskındır (Coates, 1989).

Bu çalışmada gürültü kaynağı olarak beyaz gürültü baz alınmıştır. Beyaz Gauss gürültüsü, her frekansta aynı güç spektrumuna sahip olan ve genellikle ortalaması sıfır ve belirli bir standart sapmaya sahip Gauss dağılımına uyan rastgele bir sinyal gürültüsü türüdür. Şekil 2.5'te 10dB SNR değerinde 8kHz frekanslı bir sinyal ve beyaz gürültü uygulanmış biçiminin grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.5. Beyaz gürültü eklenmiş sinyal örneği

2.2.6 Yayılma Gecikmesi

Su altı akustik haberleşmesi, su ortamında ses dalgalarının taşınması yoluyla bilgi iletimini sağlayan bir teknolojidir ve yayılma gecikmesi, bu sistemlerin tasarımında ve başarım analizinde kritik bir parametre olarak öne çıkar. Yayılma gecikmesi, ses dalgasının kaynaktan alıcıya ulaşması için geçen süreyi ifade eder ve suyun fiziksel özellikleri (örneğin, sıcaklık, tuzluluk ve basınç) ile mesafeye bağlı olarak değişir (Urlick, 1983). Sesin su altındaki hızı yaklaşık 1500 m/s civarında olup, bu değer havadaki ses hızından (343 m/s) çok daha yüksek olmasına rağmen, uzun mesafelerde iletişimde dikkate değer gecikmelere neden olur (Stojanovic, 2009). Özellikle derin deniz uygulamaları, su altı sensör ağları ve otonom su altı araçları (AUV) gibi sistemlerde, bu gecikme veri iletim hızını ve sistem senkronizasyonunu doğrudan etkiler (Akyildiz vd., 2005).

Yayılma gecikmesinin önemi, su altı akustik haberleşme sistemlerinin zamanlama ve güvenilirlik gereksinimlerinden kaynaklanır. Örneğin, çoklu giriş-çıkış (MIMO) sistemleri veya zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) protokolleri gibi gelişmiş haberleşme teknikleri kullanıldığında, sinyallerin doğru zamanlama ile alınması kritik hale gelir (Li vd., 2010). Ancak, su ortamında ses dalgalarının yayılımı sırasında karşılaşılan çok yollu yayılım (multipath propagation) ve Doppler etkisi gibi faktörler, yayılma gecikmesini daha karmaşık bir hale getirir (Qarabaqi ve Stojanovic, 2013). Çok yollu yayılım, sinyalin farklı yollar üzerinden

alıcıya ulaşmasıyla gecikme yayılımına (delay spread) yol açarken, Doppler etkisi hareketli kaynak veya alıcı durumunda frekans kaymalarına neden olur. Bu durumlar, sinyal işleme algoritmalarının tasarımında yayılma gecikmesinin hassas bir şekilde modellenmesini zorunlu kılar (Chitre vd., 2008).

Son olarak, yayılma gecikmesi, sistem başarımının optimizasyonu ve enerji verimliliği açısından da büyük bir rol oynar. Uzun mesafeli su altı haberleşmesinde, gecikme nedeniyle veri paketlerinin yeniden gönderilmesi gerekebilir, bu da bant genişliği kullanımını ve enerji tüketimini artırır (Heidemann vd., 2012). Özellikle batarya ile çalışan su altı cihazlarında, enerji tasarrufu hayati olduğundan, yayılma gecikmesinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve buna uygun protokollerin geliştirilmesi gerekir. Literatürde, bu sorunun üstesinden gelmek için uyarlamalı eşitleme (adaptive equalization) ve öngörülü kanal tahmini (predictive channel estimation) gibi yöntemler önerilmiştir (Edelmann vd., 2005). Bu bağlamda, yayılma gecikmesi, su altı akustik haberleşme sistemlerinin hem teorik analizinde hem de pratik uygulamalarında temel bir tasarım kriteri olarak kabul edilir. Bu yüzden sistem verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi çözümler için bu parametrenin detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

2.2.7 Doppler Etkisi

UWA iletişimlerinde, taşıyıcı izleme ve sembol senkronizasyonu, Doppler etkisinden olumsuz etkilenir. İletim ve alım elemanlarının göreceli hareketi, özellikle deniz akıntıları ve/veya yüzey dalgalarına maruz kalan bir yüzey gemisi tarafından konuşlandırıldığında, genellikle kaçınılmazdır. Otonom su altı araçları gibi hızla hareket eden platformlar, bu sorunun daha ciddi boyutlara ulaşmasına neden olur. Doppler etkisi, iletilen sinyalin frekans bileşenlerinde kaymaya yol açarak iletişimi önemli ölçüde bozar. Göreceli Doppler kayması Δ , kaynak göreceli hızı v ile yayılma dalgası hızı c oranı olarak tanımlanır. Tek frekans bileşeni ω_n için Doppler etkisi, bir frekans ölçeklendirme olarak Denklem (2.6)'daki gibi ifade edilebilir.

$$\omega'_n = \omega_n(1 + \Delta) \quad (2.6)$$

Sonuç olarak, Doppler etkisi, su altı akustik haberleşme sistemlerinin güvenilirliğini ve verimliliğini doğrudan etkileyen bir faktördür ve bu etkinin doğru modellenmesi sistem tasarımı için kritik öneme sahiptir. Hareketli platformların yaygın olduğu senaryolarda, enerji verimliliği ve bant genişliği kullanımı gibi

parametreler Doppler kaymasından etkilenir; bu da veri paketlerinin kaybolmasına veya yeniden iletim gereksinimine yol açabilir (Heidemann vd., 2012). Literatürde, Doppler etkisini azaltmak için zaman-frekans analizi ve kanal eşitleme yöntemleri önerilmiş olup, bu teknikler sistem başarımını optimize etmede önemli rol oynar (Edelmann vd., 2005).

Bu çalışmada gönderici ve alıcı hareketsiz kabul edilip, doppler kayması ihmal edilmiştir.

2.3 Su Altı Akustik Haberleşmesi Başarım Metrikleri

2.3.1 Sinyal Gürültü Oranı

Belirli bir frekans (f) etrafında genişliği (Δf) olan dar bir frekans bandı tanımlarsak, bu banttaki SNR Denklem (2.7)'deki gibi ifade edilebilir:

$$SNR(l, f) = \frac{S_l(f)}{A(l, f)N(f)} \quad (2.7)$$

Burada (l), alıcıya olan mesafeyi ve ($S_l(f)$), iletilen sinyalin güç spektral yoğunluğunu temsil eder. Bu güç, mesafeye göre ayarlanabilir. Herhangi bir mesafe için, dar bant SNR, frekansın bir fonksiyonudur. ($A(l, f)$) fonksiyonu, (l) ve (f)'ye bağlı zayıflamayı, $N(f)$ fonksiyonu ise frekansa bağlı gürültü spektrumunu ifade eder. Bu formülden, akustik bant genişliğinin iletim mesafesine bağlı olduğu açıkça görülmektedir. Bant genişliği, uzun mesafelerde ciddi şekilde sınırlıdır. Kısa mesafelerde bant genişliği artar, ancak nihayetinde OFDM, taşıyıcı frekansların bant genişliği ile sınırlıdır.

2.3.2 Bit Hata Oranı

Bit Hata Oranı (BER), bir dijital iletişim sisteminde iletilen toplam bit sayısına kıyasla hatalı alınan bitlerin oranını ifade eder. Matematiksel olarak BER, hatalı bitlerin sayısının toplam bit sayısına bölünmesiyle bulunur ve genellikle ondalık veya yüzde olarak ifade edilir. BER'nin düşük olması, iletim kanalının veya sisteminin güvenilirliğinin yüksek olduğunu gösterir.

Su altı akustik haberleşme sistemlerinde, BER kritik bir başarım metriğidir. Bu sistemler, veri iletimini su altındaki zorlu koşullar altında gerçekleştirdiğinden, suyun tuzluluğu, sıcaklığı ve basıncı gibi çevresel faktörler sinyal kalitesini ciddi şekilde etkiler. Yüksek BER, veri paketlerinin bozulması veya kaybolması anlamına gelir, bu da iletişimin güvenilirliğini ve etkinliğini düşürür. Özellikle

askeri ve bilimsel uygulamalarda, su altı akustik haberleşmenin güvenilirliği büyük önem taşır. Düşük BER, güvenilir veri aktarımı sağlayarak, kritik bilgilerin doğru ve zamanında iletilmesini mümkün kılar ve sistemin genel başarımını artırır.

2.3.3 Optimum Frekans

Her mesafe (l) için, alıcıda maksimum dar bantlı SNR'nin elde edildiği optimal bir frekans ($f_o(l)$) vardır. İdeal olarak, bir iletişim sistemi uygulanırken, ($f_o(l)$) etrafında bir iletim bant genişliği seçilir. İletim gücü, seçilen frekans bandı boyunca istenen SNR seviyesini sağlamak için ayarlanır. Bu yaklaşım, iletişim sisteminin verimli çalışmasını, yüksek SNR ve güvenilir sinyal kalitesini korumasını sağlar.

Su altı akustik haberleşmesinde optimum frekans seçimi, sinyalin iletim mesafesi, veri hızı ve çevresel faktörler arasındaki dengeyi sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Deniz suyunda ses dalgalarının yayılımı, frekansa bağlı olarak soğurma, saçılma ve gürültü gibi kayıplarla doğrudan etkilenir. Düşük frekanslar (örneğin, 10 Hz-1 kHz), daha az soğurma kaybına uğradığından uzun mesafelerde iletişim için tercih edilirken, yüksek frekanslar (örneğin, 10 kHz - 100 kHz) daha fazla veri aktarım kapasitesi sunar ancak mesafe arttıkça sinyal gücü hızla azalır (Urlick, 1983). Bu nedenle, optimum frekans, haberleşmenin amacı (örneğin, denizaltı izleme veya sensör veri aktarımı) ve suyun fiziksel özellikleri (tuzluluk, sıcaklık, derinlik) dikkate alınarak belirlenmelidir (Stojanovic, 1996).

Çevresel koşulların dinamik yapısı, optimum frekansın sürekli bir optimizasyon süreci gerektirdiğini ortaya koyar. Ayrıca, su altı akustik kanallarındaki çok yollu yayılım ve Doppler etkisi, frekans seçiminde dikkate alınması gereken diğer önemli faktörlerdir. Bu bağlamda, optimum frekansın belirlenmesi, hem teorik modellemeler hem de deneysel ölçümlerle desteklenmeli ve genellikle adaptif sistemlerle gerçek zamanlı olarak ayarlanmalıdır (Preisig, 2006). Sonuç olarak, su altı akustik haberleşmesinde etkin bir başarımlık için frekans seçimi, sistem tasarımı ve çevresel uyumluluğun temel taşlarından biridir.

2.3.4 Gönderici Sinyal Gücü

Su altı akustik haberleşme sistemlerinde gönderici sinyal gücü, iletişimin kalitesi ve güvenilirliği açısından kritik bir faktördür. Sinyal gücü, su altındaki sinyallerin yayılma mesafesini ve sinyalin su altındaki çeşitli ortam koşullarına

karşı dayanıklılığını belirler. Yüksek sinyal gücü, sinyalin uzun mesafelere iletilmesini sağlar ve sinyalin su altındaki yayılımını etkileyen faktörlere karşı daha dirençli olmasına yardımcı olur. Ayrıca, güçlü bir sinyal, su altındaki gürültü ve diğer parazit kaynaklarına karşı sinyalin bütünlüğünü korur, bu da veri iletiminde daha düşük bit hata oranları ve daha yüksek veri hızları anlamına gelir.

Yüksek sinyal gücü aynı zamanda daha güvenilir bir iletişim sağlar, bu da özellikle kritik uygulamalarda önemlidir. Örneğin, askeri operasyonlar, su altı araştırmaları ve denizaltı haberleşme sistemleri gibi uygulamalarda, güvenilir ve kesintisiz iletişim hayati önem taşır. Güçlü bir gönderici sinyali, su altındaki hareketli nesneler veya değişen su koşulları gibi değişken faktörlere rağmen sinyalin alıcıya ulaşmasını garanti eder. Ancak, yüksek sinyal gücü kullanımı enerji tüketimini artırabilir, bu nedenle enerji verimliliği ile iletişim güvenilirliği arasında bir denge sağlanması gereklidir. Aynı zamanda teknolojik açıdan çok yüksek güçlerde sinyal üreten aygıtların tasarım ve tedarik maliyetleri çıkış gücü arttıkça artmaktadır.

2.3.5 Alıcı Sinyal Gücü

Su altı akustik haberleşme sistemlerinde alıcı sinyal gücü, alınan sinyalin kalitesini ve doğruluğunu belirleyen temel unsurlardan biridir. Alıcı sinyal gücü, gönderilen sinyalin su altındaki ortam koşullarına göre zayıflama miktarını ve bu sinyalin alıcı tarafından ne kadar güçlü bir şekilde alındığını ifade eder. Yeterli düzeyde alıcı sinyal gücü, alıcının sinyali doğru bir şekilde algılayarak veri kaybı veya hatalarını minimize etmesini sağlar. Düşük alıcı sinyal gücü, sinyalin gürültü veya parazit ile karışmasına yol açar ve bu da veri iletiminde bit hata oranını artırır. Sonuç olarak, alıcı sinyal gücünün optimize edilmesi, yüksek doğruluk ve güvenilirlikte veri iletimi için kritik öneme sahiptir, bu da su altı haberleşme sistemlerinin başarımını ve etkinliğini doğrudan etkiler.

2.4 Su Altı Haberleşmesinde Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama

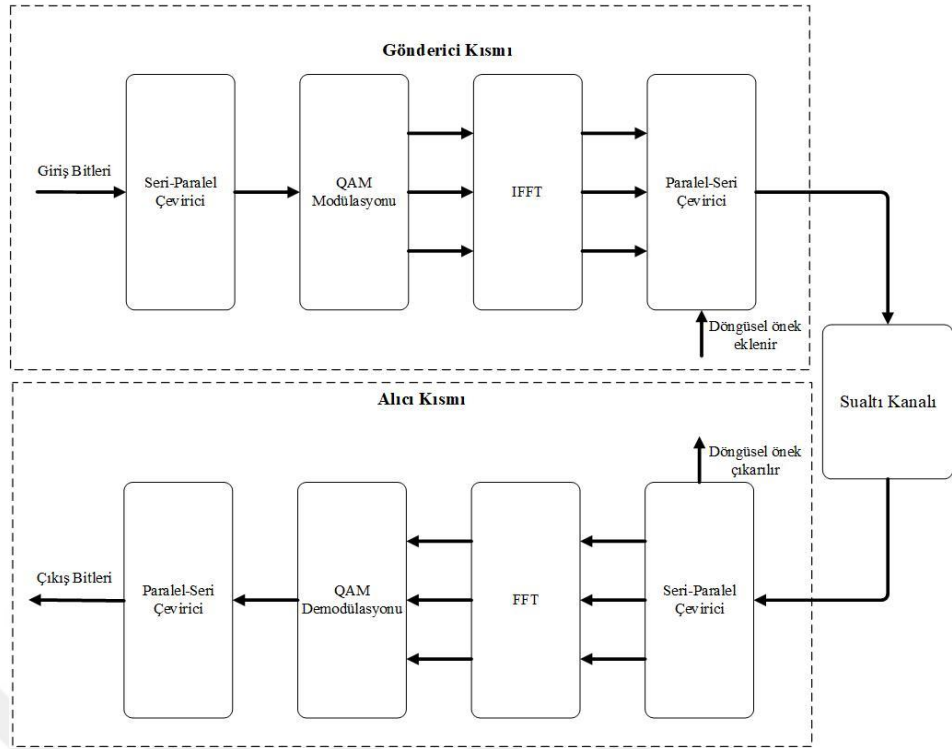
Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM), son birkaç on yılda büyük ilgi görmüştür. Dijital video yayını, Asimetrik Dijital Abone Hattı (ADSL) hizmetleri, Kablosuz Yerel Alan Ağları (IEEE 802.11a/g/n), Mikrodalga Erişimi için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (WiMAX) sistemleri (IEEE 802.16e) ve üçüncü nesil hücresel sistemler gibi çeşitli geniş bant iletişim sistemleri için

benimsenmiştir. OFDM'in radyo kanallarındaki başarısı, onun UWA (Underwater Acoustic) kanallarında kullanılmasını teşvik etmektedir (Andrews vd., 2007).

OFDM'in su altı iletişimde dikkat çeken en önemli avantajlarından biri, karmaşık eşitleme gerektirmeden zorlu kanal koşullarına uyum sağlayabilmesidir. Bu sistem, dar bantlı ortak kanal girişimine karşı dayanıklılık gösterirken, çok yollu yayılma nedeniyle oluşan semboller arası girişim (ISI) ve sinyal solmasına karşı da oldukça dirençlidir. Bu özellikleri, su altı iletişimde daha yüksek spektral verimliliğin elde edilmesine olanak tanır. Ayrıca, OFDM'in Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanarak verimli bir şekilde uygulanabilmesi, onu zaman senkronizasyon hatalarına düşük hassasiyetiyle birlikte, su altı akustik kanallarda cazip bir seçenek haline getirmektedir.

Bununla birlikte, OFDM'in bazı sınırlamaları da vardır. Bu sistem, Doppler kaymasına karşı hassas olduğu için, su altındaki hareketli nesnelerin neden olduğu frekans kaymalarına karşı kırılma gösterir. Frekans senkronizasyon problemlerine olan bu hassasiyet, sinyal alımında zorluklar oluşturabilir. Ayrıca, iletim sırasında kullanılan döngüsel önek (Cyclic Prefix) veya koruma aralığı (Guard İnterval) nedeniyle, iletim verimliliğinde bir miktar kayıp yaşanabilir. Bu faktörler, su altı akustik iletişimde OFDM'in uygulanabilirliğini değerlendirirken dikkate alınması gereken önemli hususlardır (Shengli vd., 2014).

OFDM tabanlı sualtı akustik haberleşme sisteminde, veri iletimi giriş bitlerinin seri-paralel dönüştürülmesiyle başlar. Bu bitler, her biri farklı bir alt taşıyıcıya karşılık gelecek şekilde QAM modülasyonuna tabi tutulur. Modülasyon sonrası elde edilen kompleks semboller IFFT işlemiyle zaman bölgesine aktarılır ve ardından paralel-seri çevirici ile tek bir sinyal dizisine dönüştürülür. Sinyale, iletimden önce döngüsel önek eklenerek gönderim için hazır hâle getirilir. Alıcı tarafında, sinyale eklenen döngüsel önek çıkarılır ve veri seri-paralel dönüştürülerek FFT işlemi uygulanır. Frekans bölgesine aktarılan semboller QAM demodülasyonu ile çözümlenerek paralel-seri çevirici yardımıyla çıkış bitleri elde edilir. OFDM haberleşme yapısına ait blok gösterim Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Sualtı akustik haberleşmesinde OFDM blok gösterimi

QAM, hem genlik hem de faz bileşenlerini kullanarak daha yüksek sembol başına bit taşıma kapasitesi sunduğu için, OFDM tabanlı sualtı akustik haberleşme sistemlerinde sıkça tercih edilmektedir. FSK (Frekans Kaydırmalı Anahtarlama) ve PSK (Faz Kaydırmalı Anahtarlama) gibi modülasyon teknikleri özellikle düşük veri hızlı ve düşük karmaşıklık düzeyinde uygulamalarda avantaj sağlasa da, spektral verimlilik açısından QAM'a göre sınırlıdır (Akyildiz vd., 2005). QPSK (Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama), faz tabanlı bir teknik olarak QAM'a göre daha az bit taşısa da daha yüksek gürültü dayanıklılığı sunar. Ancak, sualtı ortamında sınırlı bant genişliği ve yüksek veri ihtiyacı dikkate alındığında, QAM modülasyonu OFDM ile birlikte kullanıldığında kanal kapasitesini daha etkin kullanma imkânı sağlar (Chitre vd., 2008). Ayrıca, QAM modülasyonu alt taşıyıcılarda yüksek bit oranlarını destekleyerek OFDM yapısının verimliliğini artırır (Stojanovic ve Preisig, 2009). Bu nedenle, özellikle geniş bantlı ve orta-yüksek veri hızının hedeflendiği sualtı haberleşme sistemlerinde QAM, diğer modülasyon tekniklerine kıyasla daha uygun bir çözüm sunmaktadır.

2.4.1 OFDM Matematiksel Tanımı

Bu bölümde OFDM sinyallerinin matematiksel açıklaması gösterilmektedir. OFDM 'in her biri K alt taşıyıcı içeren bloklardan oluştuğunu bilmek önemlidir. Her blok süresi etkin sembol zamanını ve koruma aralığını içerir. OFDM sembolü Denklem (2.8)'deki gibi ifade edilir.

$$T = T' + T_g \quad (2.8)$$

Burada T_g bekleme süresi anlamına gelir ve iki ardışık OFDM bloğu arasında Semboller Arası Girişimi (ISI) önlemek için kanal dürtü yanıtı uzunluğundan daha uzun olmalıdır. T' ise etkin sembol süresi anlamına gelir ve $T' = K/B$ olarak tanımlanır, burada B toplam sistem bant genişliği ve K alt taşıyıcı sayısıdır, bitişik alt taşıyıcılar arasındaki boşluk $\Delta f = 1/T'$ 'dir (Yüksel, 2012). Yani, alt taşıyıcı frekansları Denklem (2.9)'deki gibi tanımlanabilir.

$$f_k = f_0 + k\Delta f \quad k = 0, \dots, K-1 \quad (2.9)$$

Burada f_0 bant olmayan bir iletim için isteğe bağlı taşıyıcı frekansıdır. Alt taşıyıcıların her biri bir QAM sembolü içerir. Tüm alt taşıyıcıların aynı modülasyon seviyesini içerdiği varsayılır, her bir alt taşıyıcının o banttaki SNR'ye bağlı olarak bant genişliği verimliliğini değiştirdiği Ayrık Çok Tonlu Modülasyonun (DMT) aksine OFDM tanımından, bit hızının bant genişliğine oranı olan bant genişliği verimliliği için aşağıdaki gibi bir ifade türetebiliriz (Yüksel, 2012).

$$\frac{R}{B} = \frac{ma}{1 + \frac{T_g B}{K}} \quad (2.10)$$

Burada m modülasyon seviyesini temsil eder ve birimleri bit = semboldür ve QAM metodu için $m = 2, 4, 8, 16, 64$ değerlerinde olabilir. Formülde gösterilen α , blok veya konvolüsyonel kodlama için kodlama verimliliğidir. Denklem (2.10)'da, B/K alt taşıyıcıları arasındaki boşluk ve koruma aralığı azaldıkça sistemin verimliliğinin arttığı açıkça görülmektedir. Eşlenen sembollerin her biri bir alt taşıyıcı ile modüle edilir, yani K alt taşıyıcı üzerindeki sembol d olarak adlandırılırsa o zaman sadece bir blok için modüle edilmiş sinyalin temel bant ifadesi Denklem (2.11)'de verilmiştir.

$$b_s(t) = \sum_{k=0}^{K-1} d_k e^{j2\pi k \delta f t} \quad t = 0, \dots, T' \quad (2.11)$$

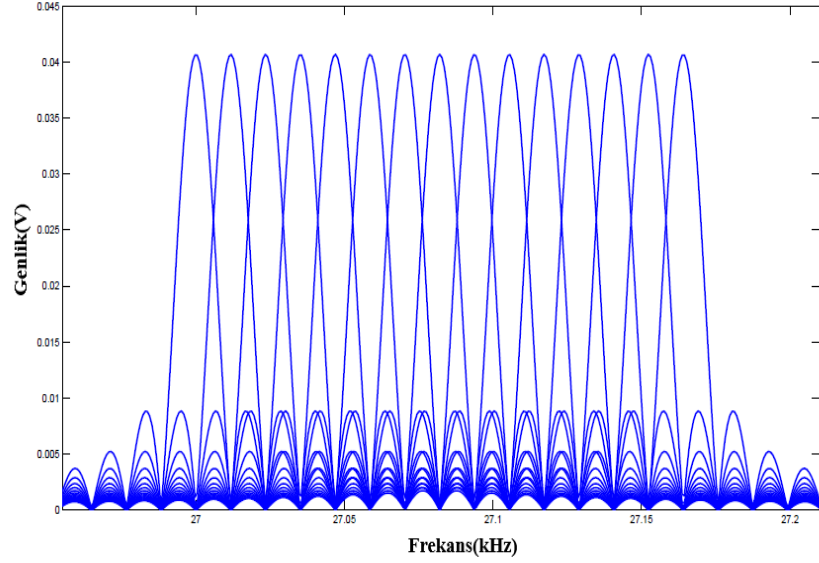
Denklem (2.11) bir IFFT işlemi biçimindedir. Aslında, tüm pratik modülasyon şemaları, düşük karmaşıklığı ve özel mevcut donanımı nedeniyle

OFDM modülasyon işlemini bir IFFT olarak uygular. Alıcı tarafında, verileri almak için bir FFT fonksiyonu olacaktır. Sinyali iletmek için bir koruma aralığı eklenmelidir. Bu, Döngüsel Önek (CP) veya basit bir Sıfır Dolgu (ZP) işlemi şeklinde olabilir. İlki, FFT/IFFT daireselliğini koruyarak doğrusal bir kanal konvolüsyonunu herhangi bir ek işlem yapmadan dairesel hale dönüştürmesi ve alıcıda otokorelasyon yoluyla iyi bir senkronizasyon sağlaması nedeniyle radyo sistemlerinin çoğunda kullanılır (Yüksel, 2012). İkincisi, güç tasarrufu gerektiğinde kullanılır ve CP'den daha iyi özellikler sunar, ancak alınan sinyale ek hesaplamalar yapılmalıdır.

Etkin blok sembol zamanı, alt taşıyıcılar arasındaki dikeyliği korumak için alt taşıyıcı aralığı ile ilişkilidir. Yani, iki belirli alt taşıyıcı için $\varphi_k(t)$, $\varphi_l(t)$ demodülatör için ifade Denklem (2.12)'deki gibidir.

$$\int_0^{T'} \varphi_k(t) \varphi_l(t) dt = \int_0^{T'} e^{j2\pi k \delta f t} e^{-j2\pi l \delta f t} dt = \delta(k - l) \quad (2.12)$$

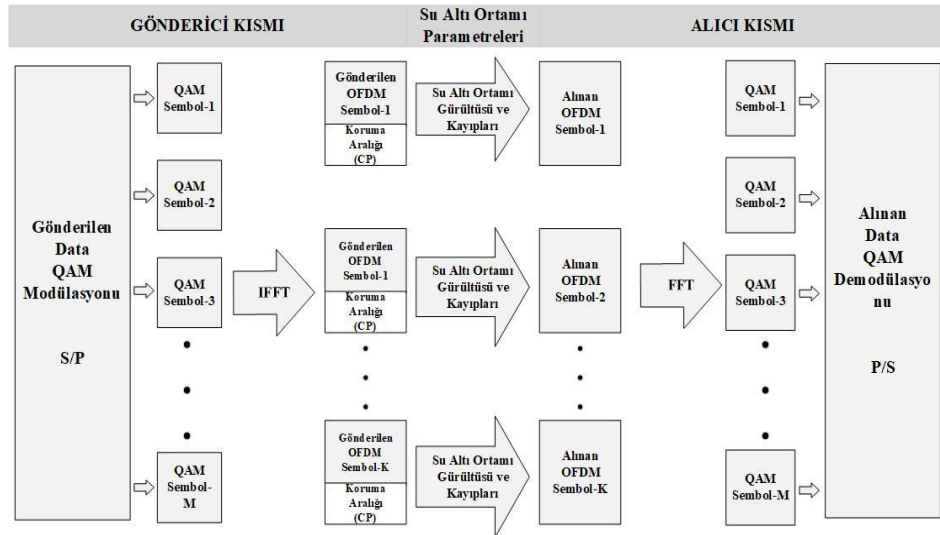
Burada $\delta(t)$ Kronecker deltasıdır. Dikeylik zaman ya da frekans alanında düşünülebilir. Zaman alanında, Denklem (2.12)'de belirtildiği gibi, her bir alt taşıyıcı bir blok içinde tamsayı sayıda döngüye sahip bir sinüs dalgasıdır, bu nedenle birden fazla frekansa sahip iki sinüs dalgasının skaler çarpımının tanımı sıfırdır. Frekans alanında, her bir alt taşıyıcının spektrumu, merkez frekansında maksimum değeri olan ve diğer alt taşıyıcıların merkezlerinde sıfır olan bir sinc fonksiyonudur (Yüksel, 2012). OFDM alt taşıyıcı sinyal grafiği Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. OFDM alt taşıyıcı sinyal grafiği (Yüksel, 2012)

2.5 Sistem Modeli

OFDM tabanlı su altı haberleşmesi MATLAB modeli, su altı kanal etkileri dikkate alınarak tasarlanmış tipik bir OFDM sistemi ile K alt kanalıdan oluşmaktadır. Modelin blok diyagramı Şekil 2.8’te gösterilmiştir. Diyagramda belirtilen S/P seri-paralel dönüşüm, P/S paralel-seri dönüşüm, M ise Karesel Genlik Modülasyonu (QAM) modülasyon derecesidir.



Şekil 2.8. OFDM sualtı haberleşmesi modeli

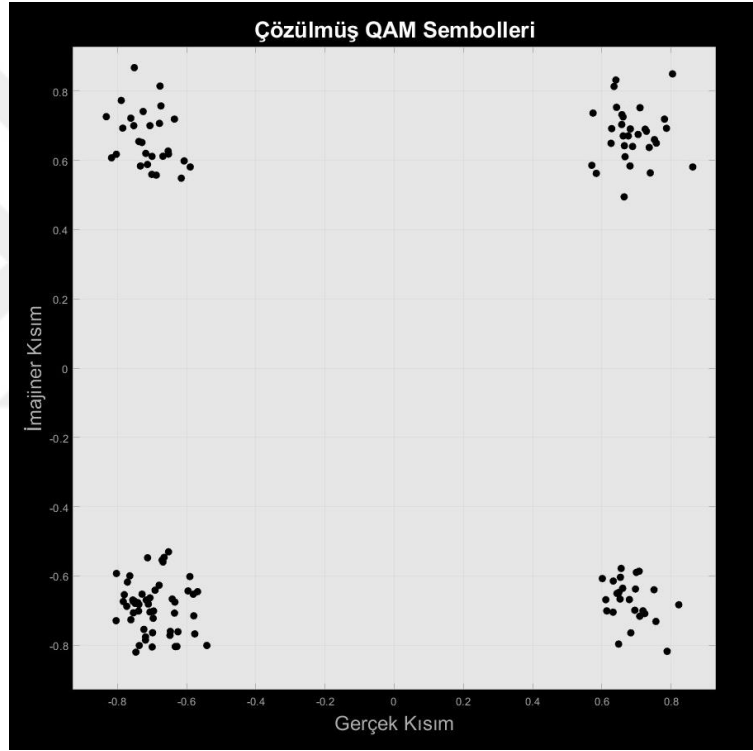
Modelin MATLAB benzetimini, gönderici kısmı, su altı ortamı parametreleri ve alıcı kısmı olmak üzere üç ana başlıkta incelemek mümkündür.

2.5.1 Gönderici Modeli

Gönderici kısmında ilk olarak, QAM modülasyonu kullanarak veri alt sembollere bölünür. Burada her bir sembolün bit uzunluğu (k), QAM modülasyon derecesinin (M) iki tabanındaki logaritması olarak Denklem (2.13)'teki gibi ifade edilir.

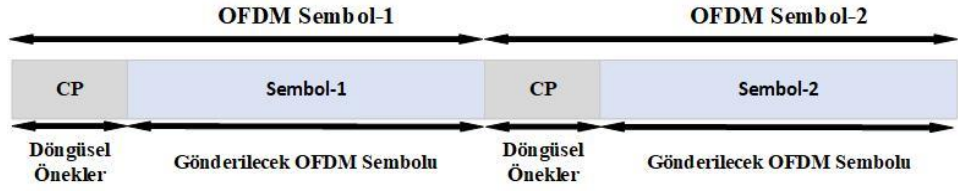
$$k = \log_2(M) \quad (2.13)$$

QAM modülasyonu sonrasında k bit uzunluğundaki semboller genlik formuna dönüştürülmüş olurlar. Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (IFFT) metodu kullanılarak dönüştürülen alt semboller, zaman bölgesinde OFDM alt sembollerini oluştururlar. QAM sembol haritası $M = 4$ için Şekil 2.9'deki gibidir.

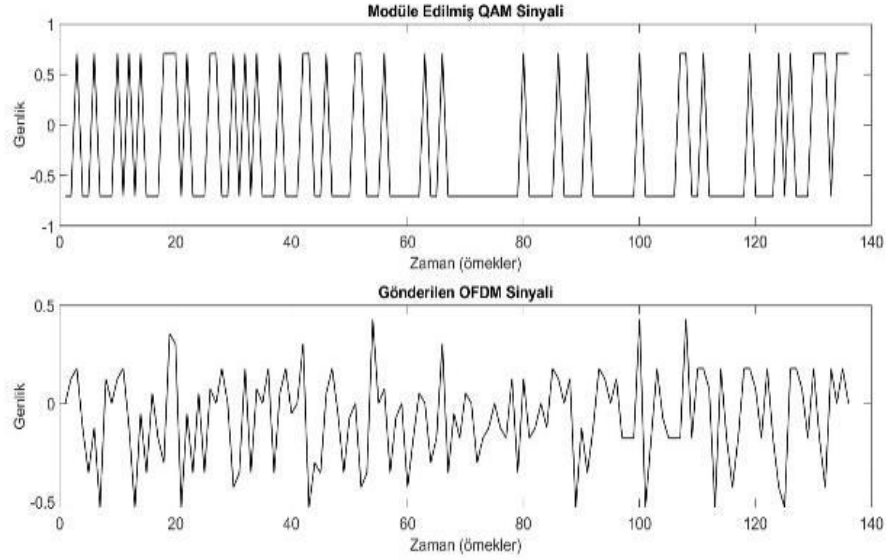


Şekil 2.9. QAM sembol haritası

Veri gönderilmeden önce semboller arası girişimi engellemek için Şekil 2.10'te gösterildiği gibi döngüsel önekler (CP) eklenmelidir. Döngüsel önekler eklendikten sonra gönderilecek OFDM sembol uzunluğu, CP ve orijinal sembolün toplamına eşit olur. Alt taşıyıcı frekanslar bant genişliği boyunca eşit aralıklarla her biri birer OFDM sembolü taşıyacak şekilde modüle edilirler. Şekil 2.11'da QAM verisi ve gönderilen OFDM sinyali grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.10. Döngüsel önek eklenmiş OFDM verisi

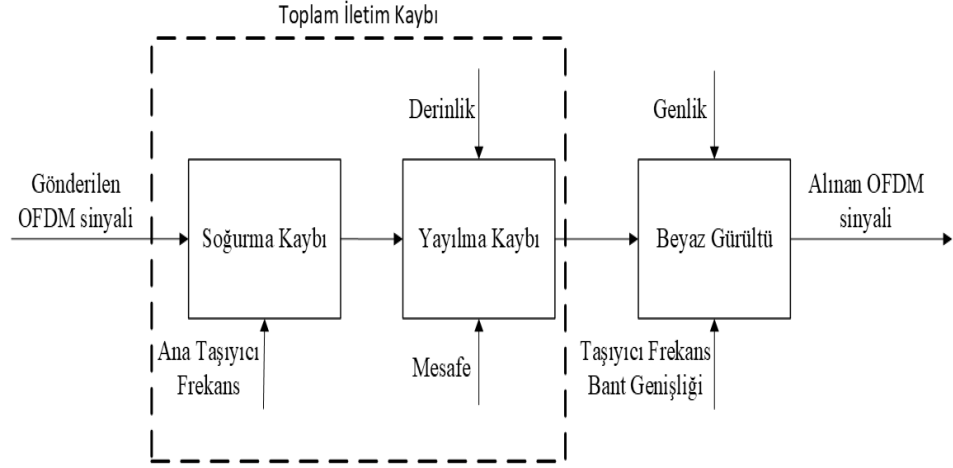


Şekil 2.11. QAM ve OFDM alt sembolleri grafikleri

2.5.2 Su Altı Ortam Parametreleri

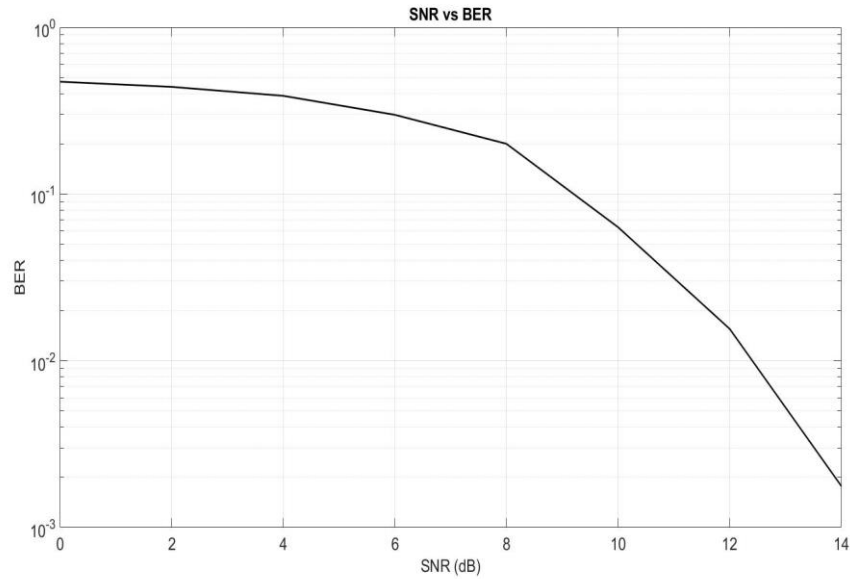
Su altı ortamı parametreleri, alıcı kısmına gelen sinyali önemli ölçüde etkilemektedir. Su altı kanal karakteristiği düşünüldüğünde mesafe, derinlik, yansımaya ve ses hızı gibi fiziksel parametrelerin dışında SNR, taşıyıcı frekans ve veri modülasyon parametreleri de su altı haberleşme başarımını etkilemektedir.

Sualtı akustik haberleşme kanalında gönderilen OFDM sinyali, iletim sırasında çeşitli zayıflama ve bozulmalara maruz kalır. Toplam iletim kaybı; ana taşıyıcı frekansa bağlı olarak ortaya çıkan soğurma kaybı ile derinlik ve mesafeye bağlı yayımla kaybindan oluşur. Bu kayıplar, sinyalin genliğini düşürerek alıcıya ulaşan işaretin gücünü zayıflatır. Ayrıca taşıyıcı frekans ve bant genişliğine bağlı olarak sistem beyaz gürültüye maruz kalır. Sonuç olarak, alınan OFDM sinyali hem iletim kayıpları hem de gürültü etkisi altında bozunmuş hâlde elde edilir. Sualtı kanalı blok gösterimi Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. Sualtı ortam modeli blok gösterimi

Sinyal gücü azaldıkça, SNR düşer ve bu durum, haberleşme üzerindeki gürültü etkisini artırarak alınan verinin, BER'ini yükseltir. SNR ve BER ilişkisi Şekil 2.13 'da verilmiştir.

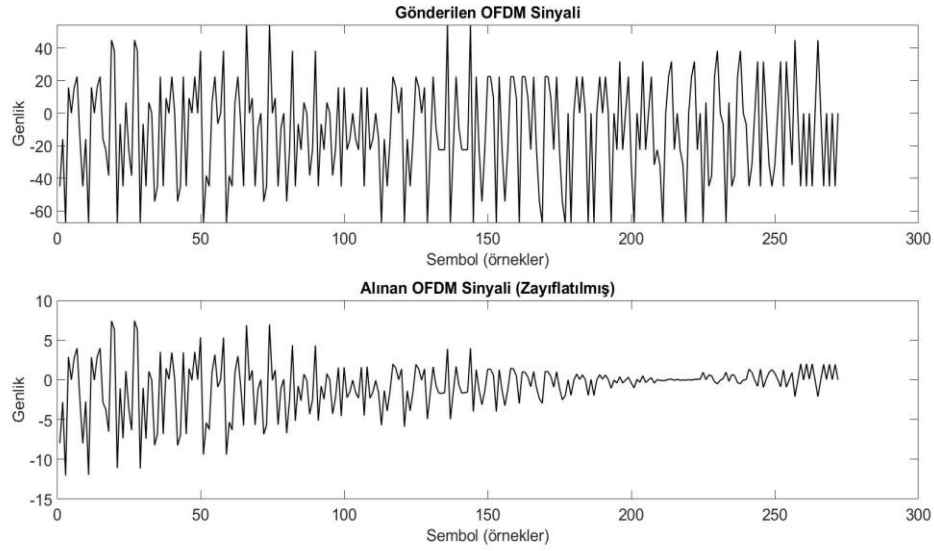


Şekil 2.13. SNR ve BER ilişkisi

2.5.3 Alıcı Modeli

Bu kısımda ilk olarak, gürültü eklenmiş ve zayıflatılmış OFDM sembolleri IFFT metoduyla zaman bölgesine taşınır. Sonrasında CP çıkarılarak OFDM sembolleri elde edilir. OFDM sembollerine QAM demodülasyonu uygulanarak QAM alt sembolleri elde edilir. Semboller birleştirilip, alınan veri ortaya çıkarılır. Bant genişliğini yüksek tutmak genellikle tercih edilen bir durumdur. Ancak, çıkış

gücünün yetersiz olduğu durumlarda, frekans arttıkça yaşanan kayıplar nedeniyle, yüksek frekans taşıyıcıları ile taşınan sembollerde bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu sebeple OFDM tabanlı su altı akustik haberleşmesinde taşıyıcı sinyal bant genişliği belirlenirken bu durumun dikkate alınması elzemdir. Şekil 2.14’de su altı ortamında gönderilen ve alınan OFDM sembolü örneği verilmiştir.



Şekil 2.14. Gönderilen ve alınan OFDM sembolleri

3. BULGULAR

Bu bölümde, OFDM tabanlı sualtı haberleşme sisteminin başarımı, mesafe, frekans, derinlik ve gönderici gücü gibi parametrelerin etkisi altında detaylı bir şekilde incelenmiştir. SNR, BER ve iletim kaybı gibi temel başarımlar göstergeleri, farklı koşullar altında analiz edilerek sistemin davranışları grafik ve tablolarla ortaya konmuştur. Frekansa bağlı incelenen sonuçlarda, 27kHz LF (Alçak Frekans) 270kHz ve 540kHz frekansları ise HF (Yüksek Frekans) değerlerinin benzetimlerini yapmak için kullanılmıştır.

3.1 SNR, Mesafe ve BER Başarım Analizi

Bu başlıkta, sualtı OFDM iletişim sisteminin başarımını değerlendirmek için SNR, BER ve mesafe arasındaki ilişki detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Şekil 3.1’de sunulan "Mesafeye Bağlı SNR" verileri, mesafenin artmasıyla SNR’nın logaritmik olarak azaldığını göstermektedir; örneğin, 1000 metrede yaklaşık 50 dB olan SNR, 10.000 metrede 25 dB’e kadar düşmektedir. Bu, sualtı ortamında yayılım kaybı ve emilim nedeniyle sinyal gücünün mesafeyle birlikte zayıfladığını ortaya koymaktadır.

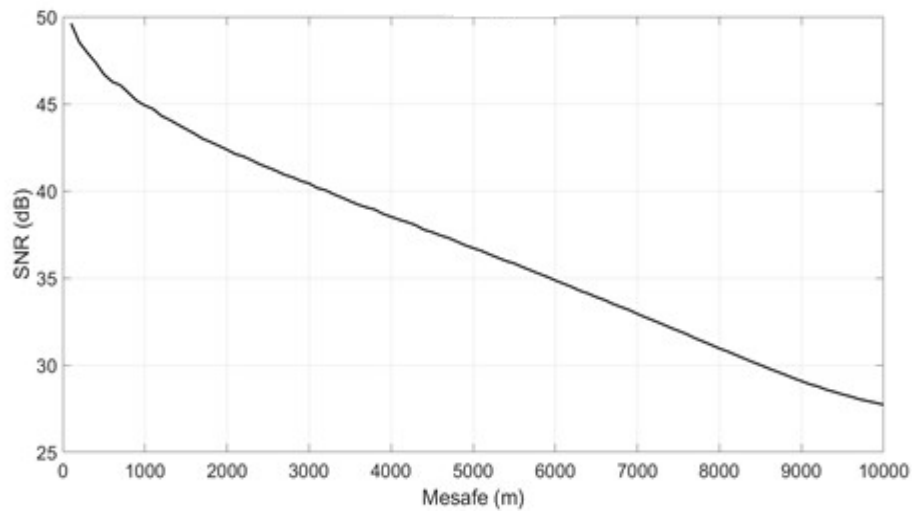
Tablo 3.1 verilerine bakıldığında, 150 dB gönderici çıkış gücü ve 50 dB SNR ile 1000 metre mesafede BER’nin 0 olduğu görülürken, aynı mesafede 70 dB gönderici çıkış gücüyle BER’nin 0.12’ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, daha yüksek gönderici gücünün ve SNR’nın BER’i sıfıra indirgeyerek sistem başarımını artırdığını göstermektedir.

Mesafenin BER üzerindeki etkisi de Tablo 3.1’den açıkça anlaşılmaktadır: 70 dB gönderici çıkış gücü ve 50 dB SNR ile 100 metre mesafede BER 0 iken, mesafe 1000 metreye çıktığında BER 0.12’ye yükselmektedir. Ayrıca, 70 dB gönderici çıkış gücü ve 10 dB SNR ile 100 metre mesafede BER’nin 0.03 olduğu görülmüştür; bu, düşük SNR’nın bile kısa mesafelerde kabul edilebilir bir başarımla sağlayabileceğini, ancak mesafenin artmasıyla bu başarımın hızla bozulabileceğini göstermektedir.

Tablo 3.1. SNR, BER ve mesafe ilişkisi tablosu

Gönderici Çıkış Gücü (dB)	Gönderici SNR (dB)	Mesafe(m)	Derinlik(m)	Alınan Veri BER
150	50	1000	100	0
70	50	1000	100	0.12
70	50	100	100	0
70	10	100	100	0.03

100 m derinlik ve 3kHz taşıyıcı frekans için mesafeye bağlı SNR grafiği Şekil 3.1'deki gibidir:



Şekil 3.1. Mesafeye bağlı SNR grafiği

3.2 Mesafeye Bağlı Toplam İletim Kaybı Analizi

Bu başlıkta, sualtı OFDM iletişim sisteminin başarımını etkileyen mesafeye bağlı iletim kaybı Şekil 3.2'de ve Tablo 3.2'de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Şekil 3.2'de, "Mesafeye Bağlı Toplam İletim Kaybı" grafiği, mesafenin artmasıyla toplam iletim kaybının (dB cinsinden) logaritmik olarak yükseldiğini göstermektedir. Örneğin, 100 metre mesafede toplam iletim kaybı 35.57 dB iken, bu değer 1000 metrede 52.79 dB'ye ve 10.000 metrede 115 dB'ye ulaşmaktadır. Bu, sualtı ortamında mesafenin yayılım kaybı ve emilim gibi faktörlerle orantılı olarak sinyal gücünde ciddi bir azalmaya neden olduğunu ortaya koymaktadır.

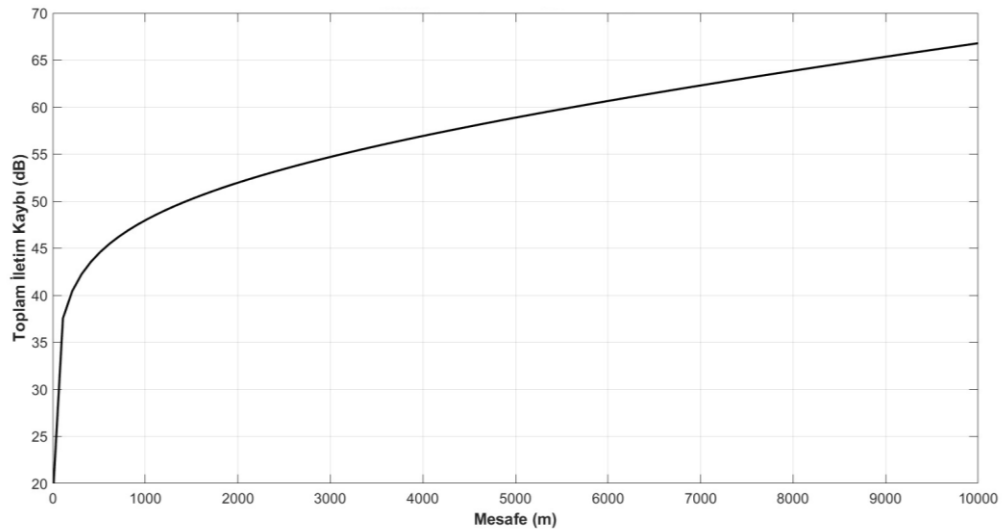
Tablo 3.2'deki veriler, 100 metre derinlikte ve 27 kHz ana taşıyıcı frekansında, farklı mesafelerde toplam iletim kaybının nasıl değiştiğini doğrulamaktadır. 100 metre mesafede düşük bir kayıp (35.57 dB) gözlemlenirken,

mesafenin 1000 metreye ve 10.000 metreye çıkmasıyla kayıp sırasıyla 52.79 dB ve 115 dB'e yükselmektedir. Bu sonuçlar, sualtı iletişiminde mesafenin sinyal kalitesi üzerindeki kritik etkisini vurgulayarak, sistem tasarımında mesafe faktörünün dikkatlice ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Tablo 3.2. Mesafeye bağlı toplam iletim kaybı tablosu

Mesafe(m)	Derinlik(m)	Ana Taşıyıcı Frekans(kHz)	Toplam İletim Kaybı (dB)
100	100	27	35.57
1000	100	27	52.79
10000	100	27	115

10kHz taşıyıcı frekans ve 100m derinlik için mesafeye bağlı iletim kaybı Şekil 3.2'deki gibidir:



Şekil 3.2. Mesafeye bağlı toplam iletim kaybı grafiği

3.3 Derinliğe Bağlı Toplam İletim Kaybı Analizi

Bu çalışmada, sualtı OFDM iletişim sisteminin başarımını etkileyen derinliğe bağlı toplam iletim kaybı Şekil 3.3'te ve Tablo 3.3'te detaylı bir şekilde sunulmuştur. Şekil 3.3'te, "Derinliğe Bağlı Toplam İletim Kaybı" grafiği, derinliğin artmasıyla toplam iletim kaybının (dB cinsinden) belirli bir noktadan sonra sabitlendiğini ve çok az bir artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, 100 metre derinlikte toplam iletim kaybı 52.79 dB iken, derinlik 1000 metreye ve 10.000 metreye ulaştığında sırasıyla 62.39 dB ve 62.69 dB'e yükselmektedir. Bu,

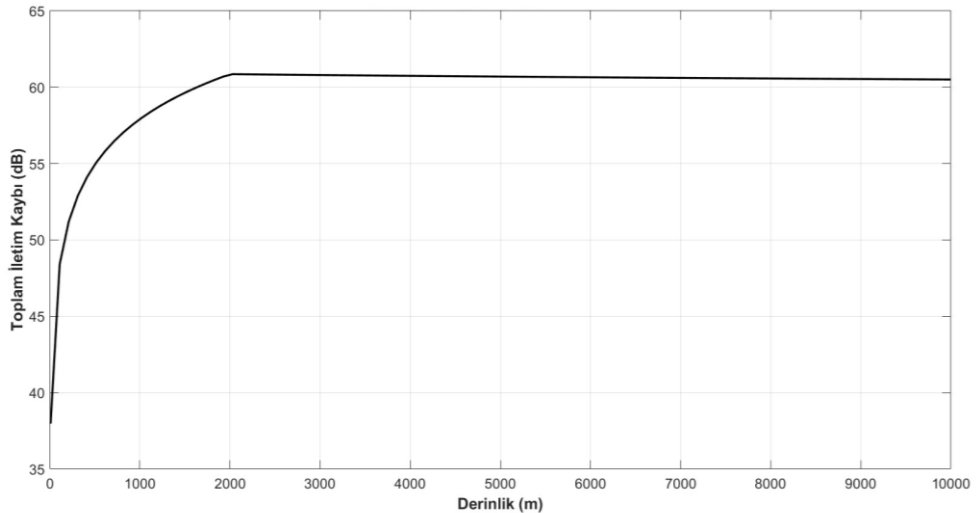
sualtı ortamında derinliğin belirli bir eşikten sonra iletim kaybına çok sınırlı bir katkı sağladığını göstermektedir.

Tablo 3.3’deki veriler, 1000 metre mesafede ve 27 kHz ana taşıyıcı frekansında, farklı derinliklerde toplam iletim kaybının nasıl değiştiğini doğrulamaktadır. 100 metre derinlikte 52.79 dB olan kayıp, derinlik 1000 metreye çıktığında 62.39 dB’ye ve 10.000 metrede 62.69 dB’ye ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, derinliğin sualtı iletişimde mesafeye kıyasla daha az belirleyici bir rol oynadığını, ancak yine de belirli bir kaybı artırıcı etkiye sahip olduğunu göstermektedir; bu da sistem tasarımında derinlik faktörünün dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Tablo 3.3. Derinliğe bağlı toplam iletim kaybı tablosu

Mesafe(m)	Derinlik(m)	Ana Taşıyıcı Frekans(kHz)	Toplam İletim Kaybı (dB)
1000	100	27	52.79
1000	1000	27	62.39
1000	10000	27	62.69

10 kHz taşıyıcı frekans ve 1000 m mesafede derinliğe bağlı iletim kaybı Şekil 3.3’teki gibidir:



Şekil 3.3. Derinliğe bağlı toplam iletim kaybı grafiği

3.4 Frekansa Bağlı Toplam İletim Kaybı Analizi

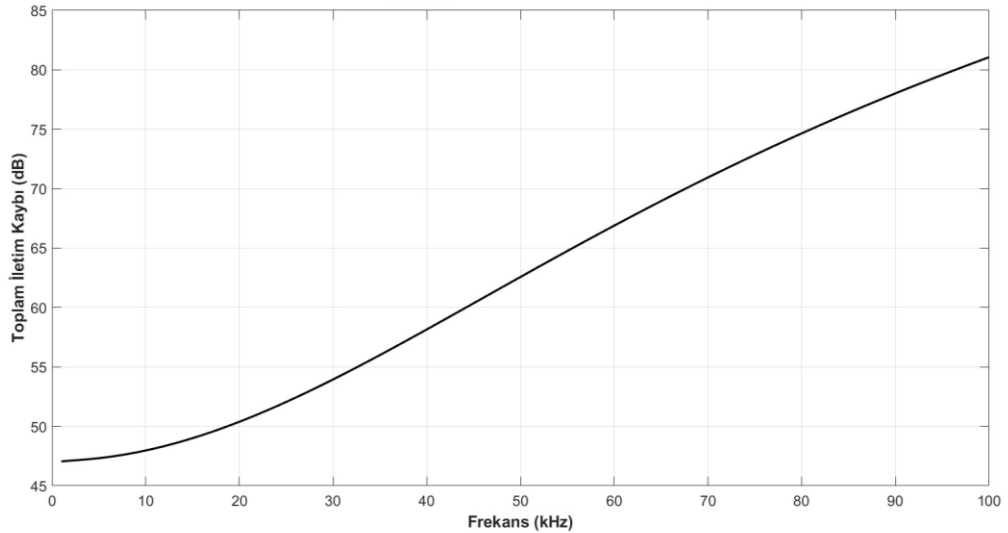
Bu çalışmada, sualtı OFDM iletişim sisteminin başarımını etkileyen frekansa bağlı toplam iletim kaybı Şekil 3.4’te ve Tablo 3.4’te detaylı bir şekilde

sunulmuştur. Şekil 3.4'te, "Frekansa Bağlı Toplam İletim Kaybı" grafiği, ana taşıyıcı frekansın (kHz cinsinden) artmasıyla toplam iletim kaybının (dB cinsinden) logaritmik olarak yükseldiğini göstermektedir. Örneğin, 27 kHz'de toplam iletim kaybı 52.79 dB iken, bu değer 270 kHz'de 116.28 dB'ye ve 540 kHz'de 192.63 dB'ye ulaşmaktadır. Bu, sualtı ortamında yüksek frekansların emilim kaybını artırarak sinyal gücünde belirgin bir azalmaya yol açtığını ortaya koymaktadır.

Tablo 3.4'deki veriler, 1000 metre mesafede ve 100 metre derinlikte, farklı ana taşıyıcı frekanslarında toplam iletim kaybının nasıl değiştiğini doğrulamaktadır. 27 kHz'de 52.79 dB olan kayıp, frekans 270 kHz'e çıktığında 116.28 dB'ye ve 540 kHz'de 192.63 dB'ye yükselmektedir. Bu sonuçlar, sualtı iletişimde frekansın sinyal kaybı üzerindeki kritik etkisini vurgulamakta; daha yüksek frekansların iletim kaybını önemli ölçüde artırdığını ve sistem tasarımında düşük frekansların tercih edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 3.4. Frekansa bağlı toplam iletim kaybı tablosu

Mesafe(m)	Derinlik(m)	Ana Taşıyıcı Frekans(kHz)	Toplam İletim Kaybı (dB)
1000	100	27	52.79
1000	100	270	116.28
1000	100	540	192.63



Şekil 3.4. Frekansa bağlı toplam iletim kaybı grafiği

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, OFDM tabanlı sualtı haberleşme sisteminin başarımı, mesafe, frekans, derinlik ve gönderici gücü gibi parametrelerin etkisi altında MATLAB ortamında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, literatürdeki mevcut çalışmalarla uyumlu olup, sualtı akustik haberleşmesinin temel zorluklarını ve OFDM'nin bu zorluklarla başa çıkmadaki etkinliğini ortaya koymaktadır. Örneğin, mesafeye bağlı SNR analizinde, 1000 metrede 50 dB olan SNR'nin 10.000 metrede 25 dB'e düşmesi, Urick (1983) ve Stojanovic (2009) gibi kaynaklarda belirtilen mesafeyle logaritmik sinyal zayıflaması ile tutarlıdır. BER başarımı ise, yüksek SNR ve gönderici gücünün (150 dB) hata oranını sıfıra indirdiğini gösterirken, düşük güç (70 dB) ve SNR ile BER'in 0.12'ye yükseldiği gözlemlenmiştir; bu, Zhou ve Wang (2014) tarafından ortaya konulan OFDM'nin yüksek SNR koşullarında üstün başarımla sunduğuna dair bulgularla örtüşmektedir.

Frekans analizinde, 27 kHz'de 52.79 dB olan iletim kaybının 540 kHz'de 192.63 dB'e çıkması, yüksek frekansların emilim kaybını artırdığını kanıtlamakta ve Ainslie ve McColm (1998) tarafından geliştirilen soğurma katsayısı modellerini desteklemektedir. Derinlik bazında ise kaybın 100 metrede 52.79 dB'den 10.000 metrede 62.69 dB'e sınırlı bir artış göstermesi, derinliğin mesafe ve frekansa kıyasla daha az etkili olduğunu ortaya koymuş; bu, Chitre vd. (2008) tarafından sualtı kanal karakteristiğinde derinliğin ikincil rolüne dair görüşlerle uyumludur. Farklılıklar, örneğin BER'in düşük SNR'de bile kısa mesafelerde sıfır olması, modelin parametrik yapısının hassasiyetinden kaynaklanabilir.

Çalışmanın bilime katkısı, sualtı haberleşmesinde OFDM'nin uygulanabilirliğini parametrik bir modelle göstererek, sistem tasarımcılarına mesafe ve frekans optimizasyonu için somut bir araç sunmasıdır. Özgün yönü, MATLAB tabanlı benzetimin gerçekçi sualtı kayıp modellerini (Thorp formülü, yayılım kaybı) entegre etmesi ve başarımla parametrelerini (SNR, BER) sistematik bir şekilde analiz etmesidir. Literatürde benzer çalışmalar (Yüksel, 2012) bulunmakla birlikte, bu çalışma, parametrelerin birbirine bağımlı etkilerini grafikler ve tablolarla görselleştirerek pratik bir bakış açısı sunar.

Çalışmanın sınırlılıkları arasında, Doppler etkisi ve çoklu yol yayılımının modele dahil edilmemesi yer almaktadır; bu, hareketli platformlar veya karmaşık sualtı koşulları için sonuçların genellenmesini zorlaştırabilir. Ayrıca, benzetimler

deneysel verilerle doğrulanmamıştır, bu da gerçek dünya koşullarında sapmalara yol açabilir. Gelecekteki araştırmalar, bu sınırlılıkları aşmak için Doppler etkisini ve çoklu yol modellemesini entegre edebilir, aynı zamanda saha testleriyle benzetimleri destekleyebilir. QAM modülasyonu ile birlikte farklı geçiş bant frekanslarının uygulanması gelecek çalışmalara dahil edilebilir.

Bu çalışma, sualtı sensör ağları ve otonom araçlar gibi uygulamalarda daha güvenilir sistemlerin geliştirilmesine zemin hazırlamış, hipotezin frekans ve mesafenin baskınlığını doğrulayarak teorik ve pratik gelişmelere katkı sunmuştur.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, OFDM tabanlı su altı akustik haberleşmesinin başarımı üzerinde taşıyıcı frekansı, haberleşme mesafesi ve kaynak gücünün kritik önem taşıdığını göstermiştir. Çalışmada, su altı kayıplarının ve bu parametrelerin haberleşme başarımı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, taşıyıcı frekansın ve mesafenin veri iletiminde belirleyici bir rol oynadığını ve bu parametrelerin doğru şekilde optimize edilmesinin haberleşme kalitesini artırdığını ortaya koymuştur.

Bunun yanı sıra, OFDM sembol sayısı, QAM modülasyon derecesi (M) ve CP uzunluğu gibi modülasyon parametrelerinin, özellikle periyodik olmayan veri iletimlerinde, başarımlar üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu, frekans ve mesafe gibi faktörlerin su altı ortamında daha baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Tez çalışmasının genel amacı, su altı haberleşmesinde geliştirilecek donanım veya yazılım birimlerinin temel parametreler üzerinden simüle edilebilmesini sağlamaktır. Bu doğrultuda, haberleşme başarımını etkileyen parametrik değişkenlerin etkilerini değerlendirmek üzere çeşitli grafikler ve tablolar sunulmuştur. Bu çalışma, su altı akustik haberleşmesi için daha güvenilir ve verimli iletişim sistemleri tasarlamak adına önemli bir katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Ainslie, M. A. ve McColm, J. G. (1998). A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(3), 1671-1672.
- Akyildiz, I. F., Pompili, D. ve Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3(3), 257-279.
- Ahmadi, S. (2009). An overview of next-generation mobile WiMAX technology. *IEEE Communications Magazine*, 47(6), 84-98.
- Andrews, G., Ghosh, A. ve Muhamed, R. (2007). *Fundamentals of WiMAX understanding broadband wireless networking*. Prentice Hall.
- Benson, B. (2010). Design of a low cost underwater acoustic modem for short range sensor networking applications [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. University of California San Diego.
- Berkhovskikh, L. ve Lysanov, Y. (1982). *Fundamentals of ocean acoustics*. Springer.
- Bingham, J. A. C. (1990). Multi-carrier modulation for data transmission: An idea whose time has come. *IEEE Communications Magazine*, 28(5), 5-14.
- Chitre, M., Shahabudeen, S. ve Stojanovic, M. (2008). Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges. *Marine Technology Society Journal*, 42(1), 103-116.
- Coates, R. (1989). *Underwater acoustic systems* (1. Baskı), Wiley.
- Edelmann, G. F., Akal, T., Hodgkiss, W. S., Kim, S., Kuperman, W. A. ve Song, H. C. (2005). An initial demonstration of underwater acoustic communication using time reversal. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(2), 421-429.
- Etter, P. C. (2018). *Underwater acoustic modeling and simulation* (5. Baskı). CRC Press.
- Freitag, L., Grund, M., Preisig, J. ve Stojanovic, M. (2004). Acoustic communications and autonomous underwater vehicles. *Journal of the Acoustical Society of America*, 115(5), 2620.
- Heidemann, J., Stojanovic, M. ve Wills, J. (2012). Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 370(1958), 158-175.
- Hodges, R. P. (2012). *Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar*. Wiley.
- Kehn, R. (2015). *Sonar and the Second World War: Technology and tactics*. Naval Institute Press.
- Li, B., Huang, J., Zhou, S., Ball, K., Stojanovic, M., Freitag, L. ve Willett, P. (2010). MIMO-OFDM for high-rate underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(4), 634-644.
- Medwin, H. ve Clay, C. S. (1998). *Fundamentals of acoustical oceanography*. Academic Press.
- Partan, J., Kurose, J. ve Levine, B. N. (2006). A survey of practical issues in underwater networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 11(4), 23-33.
- Qarabaqi, P. ve Stojanovic, M. (2013). Statistical characterization and computationally efficient modeling of a class of underwater acoustic channels. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 38(4), 701-717.
- Shengli Zhou ve Zhaohui Wang. (2014). *OFDM for underwater acoustic communications*. Wiley.

- Singer, A. C., Nelson, J. K. ve Kozat, S. S. (2009). Signal processing for underwater acoustic communications. *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 90-96.
- Stojanovic, M. (2009). Underwater acoustic communication. *Encyclopedia of Ocean Sciences* (2. Baskı, s. 36-47) içinde. Elsevier.
- Stojanovic, M. ve Preisig, J. (2009). Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 84-89.
- Tong, F., Benson, B., Li, Y. ve Kastner, R. (2010, Haziran 7-9). Channel equalization based on data reuse LMS algorithm for shallow water acoustic communication [Sözlü sunum]. *IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing*, Newport Beach, CA, USA.
- Urick, R. J. (1983). *Principles of underwater sound* (3. Baskı). McGraw-Hill.
- Yüksel, M. (2012). Underwater acoustic modem using OFDM [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Bilkent Üniversitesi.

