

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DENİZALTI AKUSTİK HABERLEŞME KANALLARININ KARAR
GERİBESLEMELİ DENKLEŞTİRİCİ İLE BAŞARIM ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Müh. Yiğit MAHMUTOĞLU

**NİSAN 2013
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DENİZALTI AKUSTİK HABERLEŞME KANALLARININ KARAR
GERİBESLEMELİ DENKLEŞTİRİCİ İLE BAŞARIM ANALİZİ**

Elektrik-Elektronik Müh. Yiğit MAHMUTOĞLU

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"ELEKTRONİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29.04.2013
Tezin Savunma Tarihi : 22.05.2013**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yiğit MAHMUTOĞLU tarafından hazırlanan

DENİZALTI AKUSTİK HABERLEŞME KANALLARININ KARAR
GERİBESLEMELİ DENKLEŞTİRİCİ İLE BAŞARIM ANALİZİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 30 / 04 / 2013 gün ve 1503 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR

Üye : Prof. Dr. Ercan KÖSE

Üye : Yrd. Doç. Dr. Haydar KAYA

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışmada öncelikle desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR'a, çalışma süresince bana yardımcı olan Arş. Gör. Ayhan YAZGAN'a ve Arş. Gör. Emin TUĞCU'ya teşekkürü bir borç bilirim. Bu çalışma boyunca sabırlarını benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Yiğit MAHMUTOĞLU

Trabzon,2013

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Denizaltı Akustik Haberleşme Kanallarının Karar Geribeslemeli Denkleştirici ile Başarım Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/05/2013

Yiğit MAHMUTOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V-VI-VII
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X-XI
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Tarihçe.....	4
1.1.2. Sualtı İletişiminin Kullanım Alanları ve İletişim Şekilleri.....	5
1.1.3. SONAR.....	8
1.1.4. Sualtı Ortamında Konuşma	8
1.1.4.1. Ortam Basıncının Konuşma Üzerindeki Etkisi.....	9
1.1.5. Sualtında Duyuma.....	9
1.2. Okyanus Akustiğinin Temeli	9
1.2.1. Deniz ortamında ses hızı	10
1.2.2. Deniz suyu sıcaklığının derinlikle değişimi	10
1.2.3. Ses hızının deniz suyu tuzluluğuyla, sıcaklığıyla ve derinliğiyle olan ilişkisi ..	11
1.2.4. Ses hızının tipik düşey profilleri	12
1.2.4.1. Sualtı Ses Kanalı (SSK)	13
1.2.4.2. Anti Dalga Kılavuzu Yayılımı.....	14
1.2.4.3. Sığ Suda Ses Yayılımı	15
1.3. Sesin Sualtı Ortamındaki Yayılım Kaybı ve Zayıflaması	16
1.3.1. Yayılım Kaybı.....	16
1.3.1.1. Küresel Yayılım	16
1.3.1.2. Silindirik Yayılım	16
1.3.2. Su Zayıflatması	17
1.3.3. Küresel Yayılım ve Emilim	19
1.4. Taban ve Yüzey Yansımaları.....	20

1.5.	Ortam Gürültüsü ve Aralıklı Gürültüler	25
1.5.1.	Ortam Gürültüsü	26
1.5.2.	Aralıklı Gürültüler.....	26
1.6.	Genel Açından Sistem Gereksinimleri ve Kanal Karakteristikleri	28
1.6.1.	Kanal Karakteristikleri	28
1.6.2.	Mesafe ve Bant Genişliği	29
1.6.3.	Çok Yolluluk	29
1.6.4.	Frekans Bandı Seçimi.....	30
1.7.	Sonar Transdüserleri ve Özellikleri	30
1.7.1.	Diziler	31
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	33
2.1.	Ses Yayılımı.....	33
2.1.1.	Temel Bilgiler	33
2.1.2.	Harmonik Dalgalar	34
2.1.3.	Lloyd'un Ayna Yöntemi.....	34
2.2.	Kanal Modeli	36
2.3.	Modülasyon	42
2.3.1.	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)	43
2.3.2.	Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK).....	44
2.3.3.	Sualtı Ortamında Modülasyon Yöntemi Seçimi.....	47
2.4.	Denkleştirici.....	48
2.4.1.	Doğrusal Denkleştirme	49
2.4.2.	Doğrusal Olmayan Denkleştirme.....	50
2.4.3.	En Küçük Ortalama Kare (LMS) Adaptif Algoritması ve Karar Geribeslemeli Denkleştirici (DFE)	51
2.4.3.1.	En Küçük Ortalama Kare (LMS) Adaptif Algoritması.....	51
2.4.3.2.	Karar Geri Beslemeli Denkleştirici (DFE).....	52
2.5.	Sistemdeki Gürültüler, Zayıflatmalar, Sistemin Kanal Yapısı ve Bileşenleri ...	54
3.	BULGULAR.....	59
3.1.	Gürültülerin Parametrelerine Bağlı Olan Değişimleri	59
3.2.	Sualtı Akustik Haberleşme Kanalı Simülasyonu.....	62
4.	TARTIŞMA.....	72
5.	SONUÇLAR.....	73
6.	ÖNERİLER.....	74

7.	KAYNAKLAR.....	75
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

DENİZALTI AKUSTİK HABERLEŞME KANALLARININ KARAR GERİBESLEMELİ
DENKLEŞTİRİCİ İLE BAŞARIM ANALİZİ

Yiğit MAHMUTOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR
2013, 79 Sayfa, 13 Ek Sayfa

Bu çalışmada, deniz parametreleriyle, deniz içinde oluşan gürültülerle, deniz üstünde rüzgâr ve yağmura bağlı olarak oluşan gürültülerle, deniz içinde oluşan zayıflatmalarla değişen akustik haberleşme kanal profili incelenmiştir. Deniz parametreleri olarak deniz suyu tuzluluğu, deniz suyu sıcaklığı ve deniz üstünden esen rüzgâr hızı olarak ele alınmıştır. Detaylı bir inceleme için deniz derinliği, verici derinliği, alıcı derinliği ve alıcı-verici arası yatay mesafe büyüklüğü ele alınarak sistemin performans (SNR-BER) grafikleri elde edilmiştir. Sualtı akustik haberleşmesini etkileyen gürültülerin değişkenlerine bağlı olarak grafikleri çizdirilmiştir. Yapılan bu özgün çalışmada denizaltı akustik haberleşme kanalı modeli oluşturulup, veri iletim performansı belirtilen parametrelere bağlı olarak ortaya çıkarılmıştır. Türkiye denizlerinin sualtı akustik haberleşme performansları kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Denizaltı akustik haberleşme kanalı, Karar geribeslemeli denkleştirici, Türkiye denizlerinin akustik haberleşme performansı kıyaslaması.

Master Thesis

SUMMARY

PERFORMANCE ANALYSIS OF UNDERWATER ACOUSTIC CHANNELS WITH
DECISION FEEDBACK EQUALIZER

Yiğit MAHMUTOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. İsmail Hakkı ÇAVDAR
2013, 79 Pages, 13 Pages Appendix

In this thesis, it have dealed with sea inside parameters, the noise which occurs in the sea, the noise which occurs because of the wind which blows above the sea and rain which drops surface of the sea and attenuations of seawater. Those kinds of noises can change channel profile. Especially salinity of seawater, temperature of seawater and the wind speed which blows above the sea had been studied on and then depth of water column, depth of transmitter, depth of receiver and the horizontal distance between transmitter and receiver had been studied on. So that performance (BER-SNR) of the system has been computed. Data transmission efficiency graphs which depend on parameters which depend on the noises which affect the acoustic data transmission have been drawn. An underwater acoustic communication performance comparison is done between seas of Turkey.

Key Words: Comparing underwater acoustic data transmission performance of seas of Turkey, Decision feedback equalizer, Underwater acoustic communication channel.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Cenova Gölünde yapılan sualtı ses hızı ölçüm çalışması.....	5
Şekil 1.2.	Ses hızı-derinlik ilişkisi.....	12
Şekil 1.3.	1. tip sualtı ses kanalı profili ve ışın diyagramı	13
Şekil 1.4.	2.tip sualtı ses kanalı profili ve ışın diyagramı	14
Şekil 1.5.	Anti dalga kılavuzu yayılımı profili ve ışın diyagramı	15
Şekil 1.6.	Sığ denizde ses yayılımı profili ve ışın diyagramı.....	15
Şekil 1.7.	Küresel yayılım.....	16
Şekil 1.8.	Silindirik yayılım	17
Şekil 1.9.	Huygen prensibine göre ilerlemekte olan dalga	20
Şekil 1.10.	Yüzey sınırındaki küresel bir dalganın Huygen'in yapısı etkileşimi.....	21
Şekil 1.11.	Bir ortamdan diğerine geçerken yansıyan ve iletilen dalga	21
Şekil 1.12.	Silindirik dizi ve düzlem dizi transdüserleri.....	32
Şekil 2.1.	Sualtı akustiğinin sayısal hiyerarşik modelleri.....	33
Şekil 2.2.	Lloyd'un ayna yöntemi	34
Şekil 2.3.	Kanal modelinin geometrik gösterimi.....	36
Şekil 2.4.	BPSK modülasyonu ve BPSK modülatörü	44
Şekil 2.5.	BPSK ve QPSK için I-Q diyagramları.....	45
Şekil 2.6.	QPSK modülatörü ve demodülatörü.....	46
Şekil 2.7.	Örnek bir bilgi işareti için QPSK iletimindeki I ve Q kanalı işaretleri.....	47
Şekil 2.8.	Karar geri beslemeli denkleştirici blok diyagramı.....	51
Şekil 2.9.	Karar geri beslemeli denkleştiricisininin detaylı yapısı	53
Şekil 2.10.	Karar geri beslemeli denkleştirici genel yapısı.....	53
Şekil 2.11.	Gürültü ve zayıflatmaları gösteren blok diyagram	56
Şekil 2.12.	Sualtı akustik kanalını gösteren blok diyagram.....	57
Şekil 2.13.	Sualtı akustik kanalını kullanan sistemin blok diyagramı.....	58
Şekil 3.1.	Rüzgar hızının rüzgar gürültüsüne göre değişim grafiği.....	59
Şekil 3.2.	Gemi trafik gürültüsünün frekansa bağlı değişim grafiği	60
Şekil 3.3.	Girdap gürültüsünün frekansa bağlı değişim grafiği	60
Şekil 3.4.	Karides gürültüsünün frekansa bağlı değişim grafiği	61

Şekil 3.5.	Termal gürültünün frekansa bağlı değişim grafiği	61
Şekil 3.6.	Deniz suyu tuzluluğunun sualtı akustik sistem başarımına etkisi	63
Şekil 3.7.	Deniz suyu sıcaklığının sualtı akustik sistem başarımına etkisi.....	64
Şekil 3.8.	Denizin üstünden esen rüzgar hızının sualtı akustik sistem başarımına etkisi.....	65
Şekil 3.9.	Deniz derinliği 4m için verici ve alıcı arası arasındaki kısa mesafenin sualtı akustik sistem başarımına etkisi	67
Şekil 3.10.	Deniz derinliği 20m için verici ve alıcı arası arasındaki orta mesafenin sualtı akustik sistem başarımına etkisi	68
Şekil 3.11.	Deniz derinliği 100m için verici ve alıcı arası arasındaki uzun mesafenin sualtı akustik sistem başarımına etkisi	69
Şekil 3.12.	Türkiye denizlerinin sualtı akustik haberleşme sistemi performansları.....	71

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Sualtı(akustik) ve karasal(elektromanyetik) kablosuz haberleşme sistemlerinin kıyaslaması	7
Tablo 1.2.	Sualtı kablosuz haberleşme sisteminde akustik ve optik yöntem kıyaslaması	7
Tablo 2.1.	Sığ su kanalı için R (verici-alıcı arası mesafe) ve B (bant genişliği)	42
Tablo 2.2.	DFE için tap sayıları, giriş ve çıkış değerleri	54
Tablo 3.1.	Sualtı akustik haberleşme simülasyonunda kullanılan parametreler	62
Tablo 3.2.	Deniz suyu tuzluluğu değeri değışirken, sabit alınan parametreler	63
Tablo 3.3.	Deniz suyu sıcaklığı değışirken, sabit alınan parametreler	64
Tablo 3.4.	Deniz suyu üstünden esen rüzgar hızı değışirken, sabit alınan parametreler	65
Tablo 3.5.	Verici ve alıcı arası kısa mesafe için parametreler	66
Tablo 3.6.	Verici ve alıcı orta mesafe için parametreler	68
Tablo 3.7.	Verici ve alıcı uzun mesafe için parametreler	69
Tablo 3.8.	Türkiye denizlerinin tuzluluk oranları ve yıllık ortalama sıcaklıkları	70

SEMBOLLER DİZİNİ

c	:	Ses hızı (m/s)
D	:	Direk dalga
R	:	Alicı-verici arası mesafe (m)
S	:	Tuzluluk (‰)
SSK	:	Sualtı ses kanalı
T	:	Sıcaklık(°C)
U_1	:	Direk yol sinyalinin aldığı mesafe (m)
U_2	:	Yüzeyden yansıyan sinyalin aldığı mesafe (m)
U_3	:	Önce yüzeyden sonra tabandan yansıyan sinyalin aldığı mesafe (m)
U_4	:	Önce tabandan sonra yüzeyden yansıyan sinyalin aldığı mesafe (m)
U_5	:	Tabandan yansıyan sinyalin aldığı mesafe (m)
Z	:	Derinlik (m)
z_v	:	Verici derinliği (m)
z_a	:	Alicı derinliği (m)
θ	:	Gelen ışın ve yansıma yüzeyi arasındaki açı (derece)
\cdot	:	Skaler çarpım operatörü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Sualtı kablosuz haberleşmesi oldukça hızlı gelişmekte olan bir alan olmasına rağmen hava ortamındaki kablosuz iletişim gibi üzerinde çok fazla çalışılmış bir alan değildir. Sualtı kablosuz haberleşmesinde kullanılacak yöntemlerden en verimli olan ikisi akustik dalga ve optik dalga ile haberleşmedir. Akustik dalga ile haberleşmenin avantajı, oldukça uzak mesafelere kadar veriyi iletebilmesidir ancak gönderebildiği veri kapasitesi sınırlıdır. Bu durumun aksine optik olarak haberleşmede ise gönderilen veri miktarı oldukça fazla olup iletim mesafesi kısadır. Bu bölümde ağırlıklı olarak sualtı akustik haberleşmesi ile ilgili yapılmış olan çalışmalar ve akustik-optik hibrit sistemleriyle ilgili yapılmış çalışmalar anlatılmıştır, yani literatür incelenmiştir. İlk kısımda sualtı akustik-optik hibrit sistemler incelenmiştir. İkinci kısımda sualtı akustik haberleşme simülasyonları ve çalışma frekansı üzerinde durulmuştur. Üçüncü kısımda ise sualtı akustik haberleşmeyle ilgili yapılmış olan deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Son kısımda ise bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan olan farkına yani özgünlüğüne değinilmiştir.

Akustik sistemler uzun mesafelere kadar veriyi iletebilmektedirler ancak gönderilen veri miktarı oldukça sınırlıdır ve sudaki ses hızı nedeniyle ciddi gecikmeler oluşmaktadır. Bu nedenle yapılan bir çalışmada akustik sistemin dayanıklılığı ve uzak mesafelere veri göndermesi ile optik sistemin yüksek veri gönderme kapasitesi ve az miktarda gecikme özellikleri birleştirilerek hibrit bir sistem oluşturulmuştur. Sistemde birkaç on watt'lık verici ve alıcı kullanılarak 10mbps'lik veri 100m'lik mesafeye kadar iletilebilmiştir [1].

Benzer başka bir çalışmada ise, optik-akustik hibrit sistemi üzerine çalışılmıştır. Bu çalışmada, hava ortamında yapılan haberleşme optik olarak yapılmaktayken deniz altındaki haberleşme akustik olarak yapılmaktadır. Su ile hava sınırında dönüşüm mekanizması (optik-akustik dönüşüm) kullanılmaktadır. Bu mekanizma ışık enerjisini sese çevirmektedir. Denizin altından gönderilen akustik veriler deniz üstündeki bir alıcıya iletileceği zaman anlatılan sürecin aksi olan akustik-optik sistem kullanılır ve akustik ses enerjisi optik ışık enerjisine dönüştürülerek iletilir. Eş zamanlı olarak bir uçak ile bir denizaltı arasındaki haberleşme bu sistemle sağlanabilmekte olup bu sistem Amerikan donanmasında kullanılmaktadır [2]

Başka bir çalışmada, sığ su akustik sensör ağlarında karşılaşılan yüksek zamanlı gecikme yayılması ve diğer bozulmaları karşılayabilen, dayanıklı olan ve iyi bir performans gösteren çoklu erişim haberleşmeleri üzerine çalışılmıştır. Bu sistem ortogonal frekans bölmeli çoğullama (OFDM) ile girişim bölüştürmeli çoklu erişim (IDMA) tabanlı üstüne kuruludur. Sualtı akustik sensör ağlarında yapılan birçok çalışmada simülasyon sonuçları OFDM-IDMA yapısının sığ sularda diğer çoklu erişim yapılarından daha iyi performans sağladığını göstermiştir. OFDM-IDMA yapısı sırasıyla IDMA ve kod bölüştürmeli çoklu erişimden (CDMA) 0.4dB ve 1dB daha iyi performans göstermiştir [3].

Diğer bir çalışmada ise, insansız sualtı aracının (UUV) akustik haberleşme performansını etkileyen sualtı akustik kanalı simülasyonu üzerine çalışılmıştır. Akustik kanal belli bir transfer fonksiyonuna sahip olan bir filtre olarak tanımlanmaktadır. UUV'nin alınan sinyali hızlı fourier dönüşümü tabanlı olan konvolüsyon algoritması kullanılarak tekrar elde edilmiştir. Bu çalışmadaki simülatör laboratuvarında kullanılabilecek bir sualtı akustik kanal modeli sağlamıştır [4].

Diğer bir çalışmada, sistemin yüksek frekanslarda çalışması üzerinde durulmuştur. Sualtı akustik haberleşme sistemleri düşük frekanslarda çalışmaları için düşük kapasiteli verileri gönderebilmektedirler. Düşük frekanslarda çalışılmasının sebebi ise bu frekansların uzun mesafeli haberleşmeye izin vermesidir. Bu çalışmada yüksek frekanslı bir sualtı akustik haberleşme geliştirme sistemi tasarlanmış ve faydalılığı ispatlanmıştır. Kullanılan malzemeler suya dayanıklı olarak seçilmişlerdir. Bununla beraber, yüksek frekans yükselteçleri ve sinyal yansıtıcı sistemler bu sistem için kullanılan özel donanımlardır [5].

Diğer bir çalışmada ise, otonom sualtı aracı (AUV) uygulaması için sualtı kablosuz haberleşme modeli üzerinde çalışılmıştır. Sualtı kanalı modeli, sualtı kanalı karakteristiklerine göre matematiksel olarak elde edilmiştir. Haberleşme aralığı boyunca en yüksek SNR'ye (sinyal gürültü oranı) sahip en uygun frekanslar elde edilmiştir. 2000m'lik haberleşme aralığı (mesafe değişkendir çünkü AUV hareketlidir) boyunca en uygun frekans 25KHz'den yaklaşık olarak 40KHz'e kaymıştır. AUV'nin belli olmayan çalışma mesafesinden dolayı ortalama en uygun frekans taşıyıcı sinyal olarak elde edilmiştir. Taşıyıcı sinyal frekansı 31,5KHz'dir. Bu çalışmanın ana amacı ise sürekli değişken olan haberleşme aralığı için en uygun frekansı elde edecek bir yöntemdir [6].

Başka bir çalışmada ise amaç kıyısız buzul denizindeki hidrografik verileri (sıcaklık, tuzluluk ve derinlikle değişen ses hızı) elde etmektir. Bunun için REMUS ismi verilen otonom sualtı aracına (AUV) çalışması için gerekli üç değişiklik yapılmıştır.

Bunlar, yön bulma ve haberleşme için düşük frekans (10KHz) kullanan transponder kullanımı, özel amaçlı sensörler ve donanım içeren bir gövde kullanımı ve dalış ve geri dönüş yönünü bulmak için 10/25KHz'lik özel bir USBL (ultrashort base line) transponder kullanan algoritmanın geliştirilmesidir. Bu değişiklikler ile buzul denizinin altında akustik yön bulma ve akustik olarak haberleşme yapabilme geliştirilmiştir. 2010 Mart ayında Barrow kıyısı açıklarında yapılan 8 günlük çalışma ile sistemin başarısı gösterilmiştir. Buzulun altından 14km'lik hat boyunca veriler toplanmış, AUV başarılı bir şekilde yönünü bulmuş ve geri dönmüştür [7].

Başka bir çalışma ise, vericinin yerinin tespitine dayalıdır. Bu sistemde haberleşme bağlantısı su yüzeyi temel alınarak kurulmuştur. Önerilen yüzey-tabanlı yansıma (SBR) modeli vericinin enerjisini su yüzeyine yöneltmesi prensibine dayalıdır. Bu yöntem ile alıcı su yüzeyine gönderilen ve su yüzeyinden yansıyan sinyaller aracılığıyla vericinin yerini tanımlayabilmektedir [8].

Diğer bir çalışmada ise, sualtındaki akustik dalga yayılımı ve emilimi olaylarından kaynaklanan kayıplar modellenmiştir. Dahası, su yüzeyinden olan yansıma etkileri de modellenmiştir. Akustik açıdan, deniz oldukça değişkendir, akıntı ve çalkantılar ses yayılımında geçici dalgalanmalara neden olarak ses hızının karakteristiğini bozmaktadır. Bu bozulmayı azaltmak ve mümkün olan en iyi sinyal alımını yapabilmek için kanal davranışının tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada sığ sularda sualtı akustik haberleşme için yeni bir çok yönlü kanal modeli önerilmiştir. Özellikle, bu modelde yayılım kayıpları, saçılmalar ve yansımalar işin içine katılmıştır [9].

Başka bir çalışmada ise, sualtı akustik iletişim uygulaması sayısal ortamda DSP ile gerçekleştirilmiş ve sualtı haberleşmesi için alternatif bir çözüm sunulmuştur. Sonuç olarak sunulan sayısal sistem, sistem boyutlarını ve maliyetlerini düşürüp, performansı, kalite ve güvenilirliği arttırıcı bir yapıya sahip olmuştur. Bu çalışmada, alıcı ve verici taraf olmak üzere iki TMS320VC5509A, DSK ile taşıyıcısı bastırılmış üst yan bant (SSB - SC) modülasyon tekniği ve rasgele taşıyıcı frekansları kullanılarak (8 KHz - 16 KHz) geliştirilen sualtı akustik haberleşmesi için bir prototipin tasarım ve işletme verilerine yönelik sonuçları verilmiştir. Rastgele taşıyıcı frekansı üretme ve algılama algoritması kullanılarak sürekli değişen taşıyıcı frekansları kullanarak daha güvenilir bir sualtı akustik haberleşme prototipi gerçekleştirilmiştir [10].

Başka bir çalışmada, sualtı kablosuz iletişim sistemlerinde sistem boyutlarının büyük ve maliyetli olması nedeniyle bu dezavantajı ortadan kaldırmak için hem sistem boyutlarını

küçültecek hem de maliyeti düşürecek bir çözüm getirilmiştir. Burada maliyeti belirleyen en önemli parametrelerden birisi de hidrofondur. Çalışmada geniş kullanım alanına sahip boyutları küçük olan B&K firmasına ait 8103 tipi hidrofona seçilmiştir. Bu seçilen hidrofona göre bir ön yükselteç tasarlanmış ve 200Hz ile 16KHz arasındaki sualtı haberleşmesi ve veri toplama uygulamaları için kullanılacak 42dB ile 49dB arasında kazanç sağlayan modüler bir alıcı ön yükselteç uygulaması gerçekleştirilmiştir [11].

Yapılmış olan çalışmalarda, sualtı akustik kanal modeli, kullanılan merkez frekansı, sayısal veri iletim yöntemleri, sistem ebatlarının ve maliyetlerinin küçültülmesi ve akustik-optik hibrit sistemlerden bahsedilmiştir. Bu çalışmaların hepsinin özgün noktaları olduğu gibi literatürde birleştiği noktalar da bulunmaktadır. Ancak incelenmemiş olan bir durum ise sualtı (denizaltı) akustik haberleşme performansının deniz suyu tuzluluğu, sıcaklığı ve deniz suyu üstünden esen rüzgâr hızına bağlı olarak değişimidir. Literatürde incelemeyen diğer bir nokta ise Türkiye denizlerinin, sualtı akustik haberleşme performansı anlamında kıyaslanmasıdır. Söz konusu tezde, literatürde incelenmemiş olan bu durumlar incelenmiştir ve özgün sonuçlar elde edilmiştir.

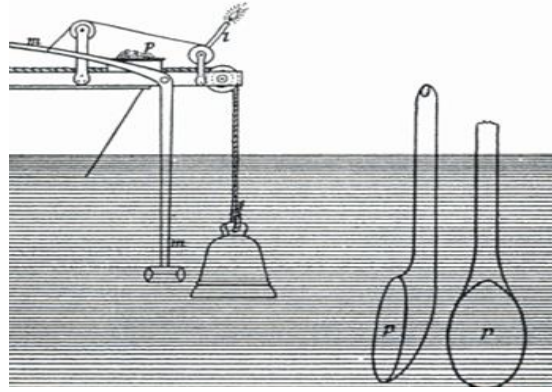
1.1.1. Tarihçe

Sualtında akustik ses ile haberleşme milyonlarca yıldır suda yaşayan birçok canlı tarafından yapılmaktadır. 1490'da Leonardo da Vinci şöyle yazmıştı [12]; "Eğer geminizi durdurup uzun bir tüpü suyun içine yerleştirir ve tüpün dışarıda kalan kısmına kulağınızı dayarsanız geminin sizden çok uzakta olduğunu duyacaksınız".

1687'de Isaac Newton ses ile ilgili ilk matematiksel denklemleri yazdı. Diğer büyük atılım ise Daniel Colladon (İsviçreli fizikçi) ve Charles Strum (Fransız matematikçi) tarafından yapıldı. Bu atılımda (1826) İsviçre'de Cenova Gölünde bir deney düzeneği kuruldu. Şekil 1.1'de gösterilen düzenekte iki kayık birbirinden 10 mil uzaklığa yerleştirildi. Bir kayıkta, sualtındaki zile vurulunca eşzamanlı olarak tutuşmaya başlayan barut ve diğer kayıkta ise sualtında zil tarafından üretilen sesi duymak için, sualtına yerleştirilmiş uzunca bir boru vardı. Zile vurulduğu anda barut alev aldı ve bu parlamanın görülme zamanı sesin sualtından gitme zamanıyla kıyaslanarak, sualtında ses hızı 1435m/s olarak bulundu.

Sualtı tanımlama sistemleri 1. Dünya Savaşı ve Titanic gemi kazasından sonra oldukça ilerledi. 1914'de özel bir denizaltı sinyal şirketi için çalışan Kanadalı Reginald A.

Fessenden alçak frekanslı gürültü yayan bir osilatör ve bu yayılan dalgaların yansımaları sonucu alıcının, oluşan ekoları dinlemesi prensibine dayanan bir sistem tasarladı. Bu yöntemle 2 mil uzaklığa kadar denizaltında görünmeyen buz kütlelerinin varlığı tespit edildi. 1945’de NUSC (naval underwater systems center) sualtı telefonunu geliştirdi ve bu sualtı ses iletişiminin ilk ileri düzeyli uygulaması oldu [12].



Şekil 1.1. Cenova Gölünde yapılan sualtı ses hızı ölçüm çalışması [12]

1.1.2. Sualtı İletişiminin Kullanım Alanları ve İletişim Şekilleri

Sualtı kablosuz haberleşme, deniz altındaki petrol yatağı araştırmalarında, çevresel sistemlerde kirlilik miktarlarının saptanmasında, dalgıçlar arası konuşmada, okyanus tabanını cisimlerin tespiti için haritalamada, denizaltı araçları arasındaki iletişimin sağlanmasında ve denizaltı araçları ile deniz üstündeki araçların iletişiminin sağlanması gibi alanlarda kullanılmaktadır. Sualtı haberleşme sistemleri ağırlıklı olarak askeri ve ticari alanlarda kullanılmaktadır.

Sualtı kablosuz haberleşme sisteminde;

- 1-Elektrik
- 2-Elektromanyetik
- 3-Optik
- 4-Akustik

olmak üzere temel olarak sinyalin dört farklı dalga ile iletim şekli vardır.

Elektrik (elektrik-akımı) dalgası kısa mesafeli veri iletimlerinde akustik dalga ile haberleşmeye bir alternatiftir. Akustik haberleşmeye göre daha hızlı yayılım yapar ve

yüksek bant genişliğine sahiptir [13]. Bu yöntemde, bilgisayara bağlı bir DSP (sayısal işaret işleyici) tarafından alınan bilgi modüle edildikten sonra, dijital bilgi analog bilgiye çevrilir ve güç yükselteciyle yükseltip suyun içindeki verici elektrotlarına iletilir. Deniz suyu elektriksel olarak iletken olduğu için su içine uygulanan elektrik akımı, elektrik dipol alanı oluşturur. Bilgiyi taşıyan elektrik dipol sinyali potansiyel bir fark oluşturarak, suyun içinde bulunan alıcı kısımdaki diğer elektrotlar tarafından alınır. Bu potansiyel fark yükseltir ve vericideki işlemlerin aksi işlemlere tabi tutularak gönderilen veri elde edilir [13]. Ancak denizaltında kullanımı esnasında deniz canlılarına zarar vermesinden ve gönderilen veriyi uzak mesafelere iletememesinden dolayı pratikte tercih edilmeyen bir iletim şeklidir.

Elektromanyetik dalga ile iletim ise akustik ilettime göre çok daha hızlıdır, bant genişliği oldukça fazladır, daha az verici gücü gerektirir. Elektromanyetik dalga ile sualtında veri iletiminde, veri ilk olarak modüle edilir daha sonra bu veri rf (radyo frekans) yükselteci kullanılarak yükseltip verici kısımdaki anten tarafından ortama elektromanyetik sinyal olarak yayılır ve bu sinyal alıcı kısımdaki anten tarafından alınır. Alıcı kısımda verici kısımdaki işlemlerin tam tersi işlemler uygulanarak veri elde edilir. Ancak, elektromanyetik dalgaların sualtında ciddi bir zayıflamaya uğraması nedeniyle radyo frekans dalgalarıyla su altında haberleşme ciddi bir biçimde sınırlandırılır. Tablo 1.1'de karasal ortamdaki elektromanyetik yayılım ve sualtı ortamındaki akustik yayılım karşılaştırılmıştır [14].

Optik sistem diğer iki sisteme göre pratikte daha rahat uygulanabilecek bir sistemdir. Görünen bantta ışık temiz suyun içinde birkaç yüz metre ilerleyebilir. Deniz ortamının (bitki olarak) yoğun olduğu veya kirliliğin fazla olduğu yerlerde bu gönderme mesafesi daha da azalabilir. Işık yoluyla sualtından gönderilen veri miktarı megabitler mertebesinde ama gönderim mesafesi oldukça sınırlıdır. Gönderim mesafesini artırmak için kablolu sisteme dönülebilir ancak kablolu sistem de hareketli verici ve alıcı arasında kullanılamaz aynı zamanda fiber optik kablo sistem maliyetini yükseltir. Tablo 1.2'de optik ve akustik yayılımlar karşılaştırılmıştır [1].

Akustik iletim yolu ise, veri iletim mesafesinin çok uzun olduğu ama veri miktarının sınırlı olduğu bir yoldur. Akustik iletimde, veri sualtı kanalında akustik ses dalgası aracılığıyla gönderilir. Bu gönderimin yapılması için verici ve alıcı taraflarda transdüserler kullanılmaktadır. Kullanılan transdüserlerde piezoelektrik madde bulunmaktadır. Piyasanın en iyi sualtı akustik modemlerinden biri olan, Evo Logics firmasının S2CR 48/78 sualtı

akustik modemi bile 1000m mesafeye kadar ancak 31,2 kbps'lık veri yollayabilmektedir [15]. Akustik dalganın hızının düşük olmasından dolayı veri iletim gecikmeleri fazladır.

Tablo 1.1. Sualtı (akustik) ve karasal (elektromanyetik) kablosuz haberleşme sistemlerinin kıyaslaması [14]

	<i>Sualtı</i>	<i>Karasal</i>
<i>Dalga tipi</i>	Akustik	Elektromanyetik
<i>Hız</i>	1500m/s	3.10^8 m/s
<i>Bant genişliği</i>	0-400KHz	20KHz-300GHz
<i>Gerekli güç</i>	Önemli	Düşük
<i>Transdüser</i>	Piezoelektrik	Elektromanyetik

Tablo 1.2. Sualtı kablosuz haberleşme sisteminde akustik ve optik yöntem kıyaslaması [1]

<i>Gönderme yolu</i>	<i>Aralık</i>	<i>Veri oranı</i>	<i>Verimlilik</i>	<i>Hız</i>
Akustik	Km'lerce	1kbps	100bit/joule	1500m/s
Optik	100m'lerce	1Mbps	30000bit/joule	3.10^8 m/s

Sualtı kanal değişkenleri ve haberleşme kanalı aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Kanal değişkenleri;

- Suyun sıcaklığı
- Suyun tuzluluğu
- Su kolonunun derinliği veya basıncı
- Suyun ph değeri
- Su yüzeyinin üstünde esen rüzgâr hızı
- Verici ve alıcı arasındaki mesafeden oluşmaktadır.

Haberleşme kanalını etkileyen durumlar aşağıda verilmiştir.

- Sualtı akustik kanalında çok yönlü sinyaller deniz tabanından ve deniz yüzeyinden olan yansımalarından oluşmaktadır.

- Fiziksel etkenlerden (yağmur, rüzgâr hızı, tekneler vb.) dolayı oluşan gürültüler, denizin kimyasal bileşenlerinin oluşturduğu zayıflatmalar ve yayılım zayıflatması sualtı akustik haberleşme sistemini etkiler.
- Bu çalışmada Doppler kayması, deniz zemin yapısı ve transdüser (kazancı, yönelticiliği vb.) göz önünde bulundurulmamıştır.

1.1.3. SONAR

Sualtında SONAR (sound navigation and ranging) yaygın olarak kullanılmaktadır. SONAR uzaktan su içindeki nesnelere algılama ve nesnelere yerlerini tespit etmede sesi kullanan cihazdır. Temel olarak iki tip sonar vardır. Bunlar pasif ve aktif sonarlardır. Pasif sonarlar sudaki nesnelere yayılan sesleri kaydeden dinleme cihazıdır. Bu cihazlar sismik olayların, gemilerin, denizaltıların ve deniz canlılarının (ses kaynağı olan herhangi bir şey) algılanmasında kullanılır. Aktif sonarlar ise belirli ses dalgaları üretirler ve ürettikleri bu ses dalgalarının sudaki nesnelere çarpıp geri dönen ekolarını dinlerler. Aktif sonarlar okyanus derinliklerini ölçmede kullanılırlar [16].

1.1.4. Sualtı Ortamında Konuşma

Sualtında konuşmanın verimli bir şekilde iletimini önleyen ana faktörler gürültü ve bozulma olup, bu faktörler vericide, kanalda veya alıcıda olabilirler. Vericideki gürültü kullanılan mikrofona, dalgıcın maskesinin şekline ve maske içinde solunan gaz içeriğine bağlıdır. Ek olarak nefes gürültüsü ve baloncuk gürültüsü iletim öncesinde ortadan kaldırılmalı veya minimize edilmelidir ki bu gürültüler ses üzerinde oldukça güçlü bir etki oluşturur [17].

Her sualtı ses haberleşmesi sisteminde kullanılan iki ana bileşen mikrofon ve kulaklıktır. Mikrofon su etkisine ve korozyona karşı dayanıklı olmalıdır. Maske içindeki mikrofon herhangi bir gaz ile çevrelenmiş olmamalıdır çünkü dalgıcın helyum gazını solması durumunda, helyum gazı insan konuşma frekansını 8-10KHz'e kadar artırır ki bu aralık sıradan bir mikrofonun cevap aralığının oldukça dışındadır [17].

1.1.4.1. Ortam Basıncının Konuşma Üzerindeki Etkisi

Basınç etkileri ve gaz bileşenlerinin solunması durumları, sesin temiz bir şekilde iletiminde oldukça sıkıntı yaratır. Suyun derinliği arttıkça basınç artar ve bu basıncı dengelemek için de solunan gazın basıncının artması gerekmektedir ki solunan gaz ile suyun basıncı birbirine eşit olsun. 30m'nin altındaki derinliklerde, konuşma sonucu oluşan seslerin basınç seviyesi artar ve bu durum sesin genizden geliyormuş gibi bir kaliteye sahip olmasına neden olur. 50m'den fazla derinliklerde dalgıçlar genelde "heliox" (helyum ve oksijen karışımı) veya "trimix" (oksijen, helyum ve nitrojen karışımı) adı verilen gazları solurlar. Bu durum direk olarak ses hızında değişikliğe neden olmaktadır. Helyum gazı içinde ses hızının, havadaki ses hızından üç kat daha fazla olmasından dolayı sese bozulma olur. Bu bozulma "Donald Duck" etkisi olarak bilinir [17].

1.1.5. Sualtında Duyma

İnsan kulağının ses açısından açık havadaki eşik değer sınırlamalarının bilinmesine rağmen, sualtındaki sınırlamalar hakkında çok az şey bilinmektedir. İnsanın sudaki duyma eşiği hakkında çalışılmış olup sualtı duyma eşiğinin havadakinden 18-56dB civarında daha fazla olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak, dalgıcın kullandığı maskenin de sesin iletilmesinde ve alınmasında etkisi vardır [17].

1.2. Okyanus Akustiğinin Temeli

Denizaltı ortamı homojen olmayan katmanlarından dolayı oldukça karışık bir yapıya sahiptir. Düzenli ve rastgele olmak üzere iki çeşit homojen olmayan durum vardır. Her ikisi de denizdeki ses alanını etkiler. Ses hızındaki, suyun derinliğiyle orantılı olan düzenli değişim "sualtı ses kanalının" oluşmasına yol açar ve uzun süreli ses yayılımının sonucudur, bu durum düzenli homojen olmayan durumdur. Rastgele homojen olmayan durumlar "sesin saçılmasına" neden olurlar.

1.2.1. Deniz Ortamında Ses Hızı

Deniz ortamında ses hızındaki (c) değişimler büyük değişimler değildir. Ancak ses hızındaki küçük değişimler bile denizdeki ses yayılımını ciddi biçimde etkiler.

Laboratuvarlarda yapılan ve alan ölçümlerinde elde edilen bir dizi sonuç ses hızının karmaşık bir biçimde, artan sıcaklık, hidrostatik basınç ve suda çözülmüş tuz miktarıyla arttığını ortaya koymuştur. Ve bu sonuçlar doğrultusunda ses hızı (c) Medwin tarafından formüle edilmiştir [18].

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^2 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z \quad (1.1)$$

S = tuzluluk [%o] ; T = sıcaklık [°C] ; z = suyun derinliği [m] ; c = ses hızı [m/s]

(1.1) numaralı eşitlik aşağıdaki sınırlar için geçerlidir.

$$0 \leq T \leq 35^\circ\text{C} ; 0 \leq S \leq 45 \text{ ppt (binde bir)} ; 0 \leq z \leq 1000 \text{ m}$$

Deniz suyundaki ses hızı için Mackenzie tarafından bulunan başka ve daha detaylı bir ampirik formül eşitlik (1.2)'de verilmiştir [19].

$$c(T, S, z) = A_1 + A_2T + A_3T^2 + A_4T^3 + A_5(S - 35) + A_6z + A_7z^2 + A_8T(S - 35) + A_9Tz^3 \quad (1.2)$$

$$A_1 = 1448,96 , A_2 = 4,591 , A_3 = -5,304 \cdot 10^{-2},$$

$$A_4 = 2,374 \cdot 10^{-4}, A_5 = 1,340, A_6 = 1,630 \cdot 10^{-2},$$

$$A_7 = 1,675 \cdot 10^{-7}, A_8 = -1,025 \cdot 10^{-2}, A_9 = -7,139 \cdot 10^{-13}$$

S = tuzluluk [%o] ; T = sıcaklık [°C] ; z = suyun derinliği [m] ; c = ses hızı [m/s]

1.2.2. Deniz Suyu Sıcaklığının Derinlikle Değişimi

Denizlerde yüzeylerden derinlere doğru su sıcaklığı değişimine bağlı olarak tabakalaşma vardır. Bu tabakalar, yüzey tabakası, geçiş tabakası (termoklin) ve derin deniz tabakasıdır.

Deniz suyunun en fazla 100m derinliğe kadar ki kesiminde, güneş ışınlarının direkt etkisiyle karşılaşan ve atmosferik koşullardan direkt olarak etkilenen tabakaya “yüzeysel tabaka “ denir. Bu tabakada kışın neredeyse sabit bir yapı görülmesine karşın yazın mevsimsel termokline rastlanır. Yüzeysel tabakanın hemen altında termoklin olarak adlandırılan ve su sıcaklığının 5°C’ye kadar düştüğü “geçiş tabakası” vardır. Ekvator ve çevresinde bu tabaka 100m derinlikte, 15°’den sonraki enlemlerde ise 100-200m arasındaki derinliklerde bulunur. 50°’den sonraki enlemlerde ise geçiş tabakası yüzeye çıkar. Genel bir ifade ile dünya okyanus ve denizlerinde termoklin tabakası mevsimlere ve bölgelere bağlı olarak 10-200m arasında değişmektedir. “Derin izotermal tabakası” ise sıcaklığın 5°C’den 2°C’ye düştüğü ve ortalama olarak su sıcaklığının 3,8°C olduğu tabakadır. Okyanusların büyük bölümünü derin deniz tabakası oluşturur [20].

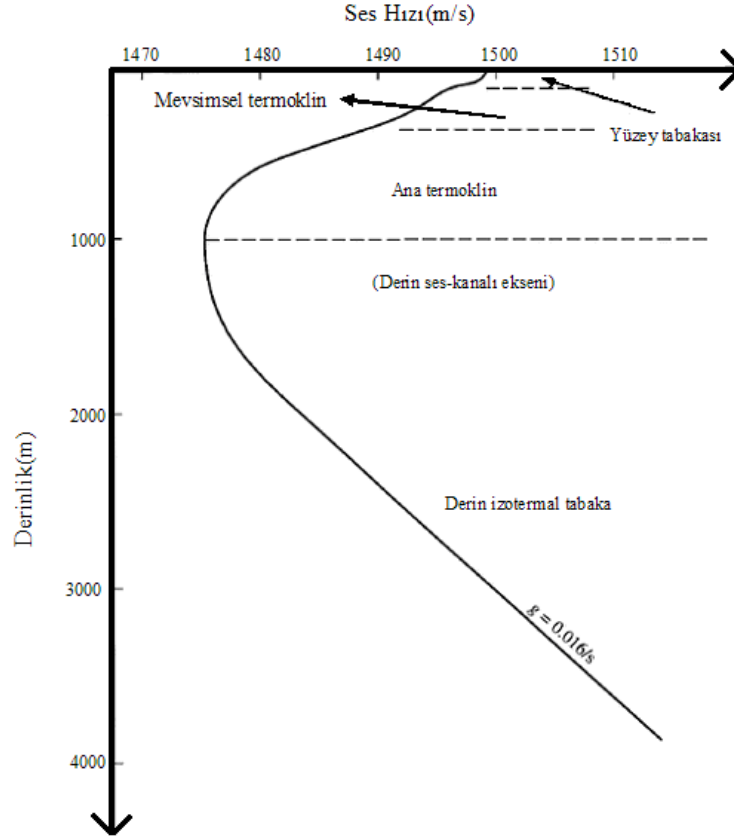
1.2.3. Ses Hızının Deniz Suyu Tuzluluğuyla, Sıcaklığıyla ve Derinliğiyle Olan İlişkisi

Şekil 1.2 denizaltı ortamındaki ses hızının temsili gösterimidir. En genel özelliği belli bir kısımda minimum olmasıdır. Tropikal bölgelerde güneşin oluşturduğu ısıdan dolayı bu minimum, derinde olmaya meyillidir. Yüksek enlemlerde bu minimum değer yüzeye doğru artar, bazen kutup okyanuslarında yüzeye ulaşır. Minimumun olduğu derinlik derin ses-kanal eksenini olarak adlandırılır. Bu eksenin altında sıcaklığın -1°C ile +4°C arasında sabit kaldığı büyük derinliklere kadar ses hızının arttığı derin izotermal tabaka bulunur. Bu bölgede ses hızı profili 0,016 (1/s)'lik bir pozitif eğim ile doğrusaldır. Bu derin ses-kanal ekseninin üstünde ana termoklin tabakası bulunur. Bu bölge negatif eğime sahiptir ve mevsimsel değişimlere çok duyarlı değildir fakat bu bölge öncelikli olarak karakteristikleri enlem tarafından tanımlanan sabit özellikli bir profile sahiptir.

Ana termoklin tabakasının üstünde mevsimsel termoklin tabakası bulunmaktadır. Bu tabakanın eğimi negatiftir ve bu tabaka mevsimsel değişimlere karşı duyarlıdır. Ve son olarak mevsimsel termoklin tabakasının üstünde yüzey tabakası bulunur. Bu tabaka havadaki ve yüzeydeki günlük hatta saatlik fiziksel (sıcaklık gibi) değişimlere bile oldukça bağlıdır.

Eğer yüzeye yakın olan suyu karıştırabilecek yeterli yüzey dalga hareketliliği varsa karışık tabaka oluşur. Bu karışık tabaka izotermaldir (sıcaklık değişimi yoktur) ve ses hızının 0,015 (1/s) olduğu pozitif eğime sahiptir. Ses hızındaki gerçek değişimler sesin

hızıyla kıyaslandığı zaman oldukça küçüktürler. Şekil 1.2 maksimum yaklaşık 30 m/s'lik bir değişime ve nominal değer yaklaşık %2'lik değişimine sahiptir. Yine de bu değişim sesin denizdeki yayılımında oldukça büyük bir etkiye sahiptir [21]. Deniz suyu yoğunluğu dünyadaki bütün denizler için neredeyse aynı olup 1000kg/m^3 civarındadır.



Şekil 1.2. Ses hızı-derinlik ilişkisi [21]

1.2.4. Ses Hızının Tipik Düşey Profilleri

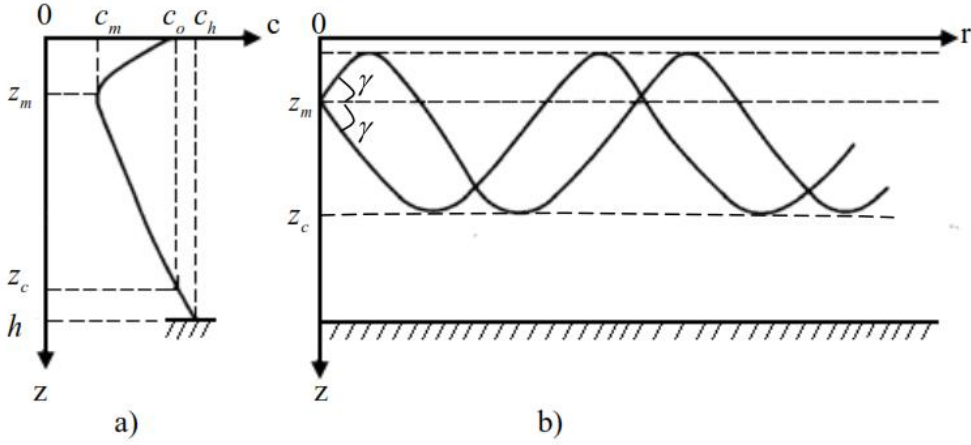
Ses hızı profilleri denizlerin farklı bölgelerinde farklı olabilir ve zamanla değişebilir. En büyük değişimler sıcaklık ve tuzluluğun mevsime bağlı olarak değişmeleri sonucu oluşur. Derinliğin 1000m'yi geçtiği denizlerde sıcaklık ve tuzluluktaki değişimler genelde zayıftır ve derinliğe bağlı olarak artan hidrostatik basınç nedeniyle ses hızı artar. Sonuç olarak büyük derinliklerde ses hızı derinlikle beraber lineer olarak artar.

1.2.4.1. Sualtı Ses Kanalı (SSK)

Derin su bölgelerinde tipik ses hızı profili belirli bir z_m derinliğinde minimumdur. Bu derinlik, derin ses kanalı eksenidir. Bu eksenin üstünde ses hızı sıcaklık arttıkça artar; bu eksenin altında ise hidrostatik basınç arttıkça ses hızı artar. Eğer bir ses kaynağı SSK ekseninin üstünde veya yanında ise ses enerjisinin bir kısmı SSK tarafından yakalanır ve SSK'nın içinde yayılım yapar bu esnada taban veya yüze erişmez ve bundan dolayı bu sınırlarda saçılma ve emilim olmaz [22].

1. tip Sualtı Ses Kanalı, $c_o < c_h$

c_o -yüzeydeki ses hızı; c_h -'h' derinliğindeki ses hızı; z - su derinliği



Şekil 1.3. 1. tip Sualtı Ses Kanalı, $c_o < c_h$ (a) profil (b) ışın diyagramı [22]

Şekil 1.3'de gözlenen dalga kılavuzu yayılımı $0 < z < z_c$ derinlik aralığında gözlenmektedir. Derinlikler SSK'nın sınırları olan $z=0$ ve $z=z_c$ 'dir. Kanal, kaynağı $\gamma < \gamma_{\max}$ açısında terk eden ses ışınlarını kapsar. Burada

$$\gamma_{\max} = \left[2(c_o - c_m) / c_m \right]^{1/2} \quad (1.3)$$

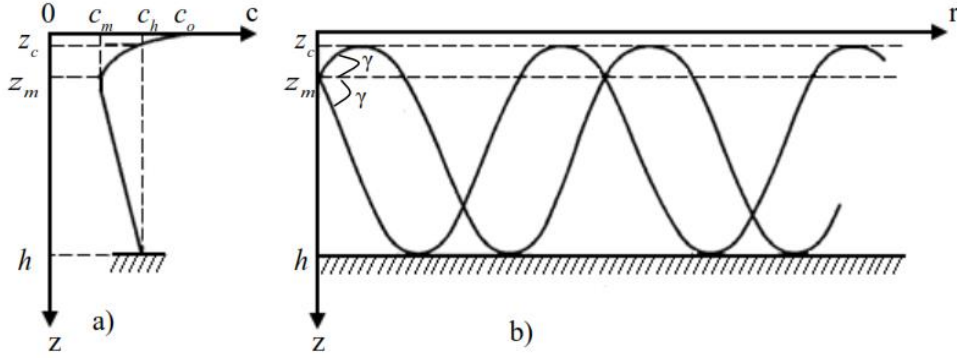
ve burada c_m ve c_o sırasıyla minimum ve yüzeydeki ses hızlarıdır. Bu nedenle, $(c_o - c_m)$ farkı arttıkça ışınların yakalandığı açı aralığı da artar [22].

Eğer ses kanalı eksenindeki ses hızı sadece hidrostatik basınç nedeniyle artarsa bu kanalın hidrostatik bir ses kanalı olduğu söylenebilir. Bununla beraber, bazı durumlarda

denizde kanal ekseninin altında yüksek tuzlulukla beraber deniz suyunun ılık olması durumunda bir SSK oluşur. Bu tip SSK termal olarak adlandırılır. Bu tip termal SSK Baltık denizinde olur [22].

2. tip Sualtı Ses Kanalı, $c_o > c_h$

c_o -yüzeydeki hız; c_h -'h' derinliğindeki hız



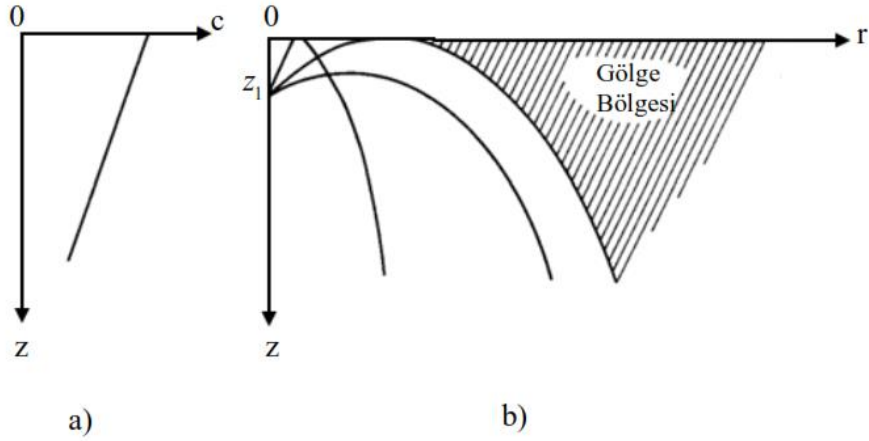
Şekil 1.4. 2. tip Sualtı Ses Kanalı, $c_o > c_h$. (a) profil $c(z)$ (b) ışın diyagramı [22]

Burada SSK tabandan, ses hızı c_h 'in z_c derinliğine kadar genişleyen kanaldır. Bu durum için iki sınırlayıcı ışın şekil 1.4'de gösterilmiştir. Yakalanan ışınlar z_c derinliğinin üstüne çıkmaz. Sadece tabandan yansıyan ışınlar bu bölgeye ulaşabilir [22].

SSK içindeki ses yayılımının ulaşabileceği maksimum mesafe sesin deniz suyu tarafından emilimiyle sınırlanır. Alçak frekanslı sesler için emilim az olduğundan dolayı bunlar yüzlerce kilometre boyunca yayılabilirler.

1.2.4.2. Anti Dalga Kılavuzu Yayılımı

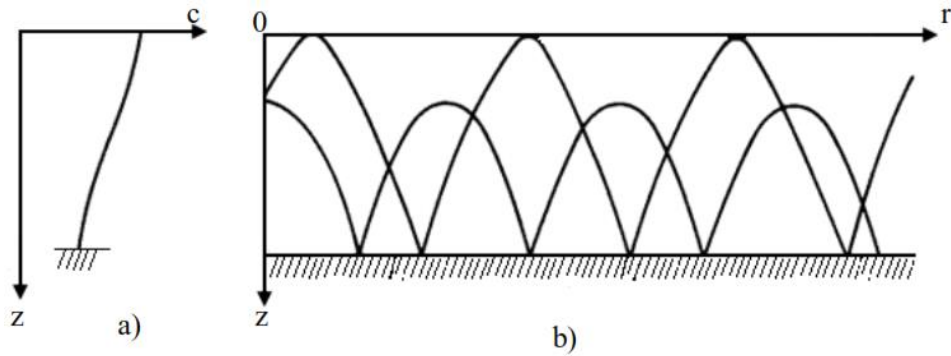
Anti dalga kılavuzu yayılımı, şekil 1.5 (a)'da gösterildiği gibi ses hızı derinlikle monoton olarak azaldığı zaman gözlenir. Bu genelde güneş ışınları nedeniyle üst tabakaların aşırı ısınması sonucu meydana gelir ki bu durum şekil 1.5 (b)'de gösterilmiştir. Tüm ışınlar aşağıya doğru yansır. Yüzeye teğet geçen ışın sınırlayan ışındır. Taranmış bölge geometrik olarak gölge bölgesini gösterir. Denizdeki normal koşullarda kaynaktan gölge bölgesine olan mesafe sadece birkaç kilometredir. [22].



Şekil 1.5. Anti dalga kılavuzu yayılımı a) profil $c(z)$ b) ışın diyagramı [22]

1.2.4.3. Sığ Suda Ses Yayılımı

Kaynaktan çıkan her ışın tabandan yansıyacak kadar yeterli uzunlukta olunca bu yayılım biçimi oluşur. Tipik profil şekil 1.6 (a)'da gösterilmiştir. Sığ denizlerde özellikle yaz-sonbahar periyodu boyunca üst su tabakaları iyi ısındığı zaman oluşur. Işın diyagramı şekil 1.6 (b)'de gösterilmiştir. Tabandan olan her yansıma ses dalgalarında bir zayıflatmaya neden olduğundan dolayı, uzun mesafelerde veri iletiminde akustik enerjide büyük kayıplar gözlenir [22]. Bu tezin konusu olan çalışmada sığ suda ses yayılımı modeli kullanılmıştır.



Şekil 1.6. Sığ denizde ses yayılımı (a) profil $c(z)$ (b) ışın diyagramı [22]

1.3. Sesin Sualtı Ortamındaki Yayılım Kaybı ve Zayıflaması

1.3.1. Yayılım Kaybı

1.3.1.1. Küresel Yayılım

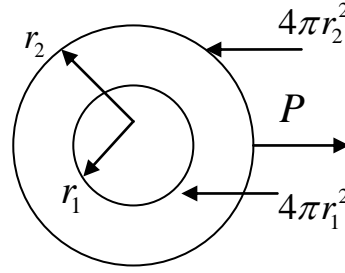
Küresel yayılım için Şekil 1.7'deki gibi homojen, sınırlandırılmamış ve kayıpsız bir ortama bir kaynak yerleştirildiği varsayılır [23].

r_1 - referans mesafe (1m)

P -kaynağın akustik gücü (W)

I_1 -kaynağın r_1 mesafesindeki akustik güç yoğunluğu (W/m^2)

I_2 - kaynağın r_2 mesafesindeki akustik güç yoğunluğu (W/m^2)



Şekil 1.7. Küresel yayılım [23]

$$I_1 = P / 4\pi r_1^2 \text{ ve } I_2 = P / 4\pi r_2^2 \quad (1.3)$$

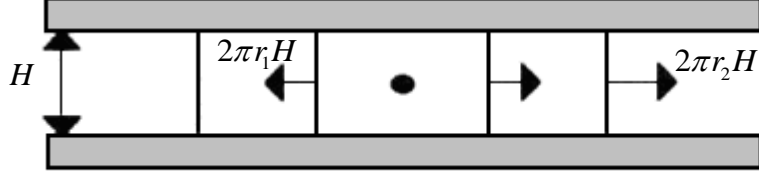
Yayılım kaybı;

$$YK_{küre} = 10 \log(I_1 / I_2) = 20 \log(r_2 / r_1) [dB] \quad (1.4)$$

1.3.1.2. Silindirik Yayılım

İki paralel düzlem arasında ve kaynaktan belli bir uzaklıkta oluşan yayılmaya silindirik yayılım denir (şekil 1.8). İki düzlem arasındaki H mesafesi ses dalgasının dalga

boyu olan λ 'nın 10 katından büyük olmalıdır. Bu durumda güç (P) silindirik bir yüzey üzerine yayılmıştır [23].



Şekil 1.8. Silindirik yayılım [23]

$$I_1 = P / 2\pi Hr_1 \text{ ve } I_2 = P / 2\pi Hr_2 \quad (1.5)$$

Yayılım kaybı;

$$YK_{\text{silindir}} = 10\log(I_1 / I_2) = 10\log(r_2 / r_1) \text{ [dB]} \quad (1.6)$$

Genel formül eşitlik (1.7)'deki gibidir. Küresel yayılım için $n = 2$, silindirik yayılım için ise $n = 1$ 'dir.

Yayılım kaybı;

$$YK = n10\log(r_2 / r_1) \text{ [dB]} \quad (1.7)$$

1.3.2. Su Zayıflatması

Suyun kimyasal yapısı ve bileşenleri sonucu oluşmaktadır. Zayıflatma katsayısının belirlenmesinde 3 ampirik yöntem vardır [22,23].

1-Thorp formülü (100Hz-3KHz)

$$\alpha = \left((0,11f^2) / (1 + f^2) \right) + \left((44f^2) / (4100 + f^2) \right) \text{ [dB / km]} \quad (1.8)$$

f = Merkez frekansı [KHz]

2-Marsh ve Schulkin formülü (3KHz-0,5MHz)

$$\alpha = 8,68.10^3 \left(\left((SAf_T f^2) / (f_T^2 + f^2) \right) + (Bf^2 / f_T) \right) (1 - 6,54.10^{-4} P) \quad [dB / km] \quad (1.9)$$

$$A = 2,34.10^{-6}, \quad B = 3,38.10^{-6}, \quad f_T = 21,9.10^{(6-1520/(T+273))}$$

S = Tuzluluk [%o] ; P = Hidrostatik basınç [kg/cm²] ; f = Merkez frekansı [KHz]

f_T = Rahatlama frekansı [KHz] ; T = Sıcaklık [°C]

3-Francois ve Garrison formülü (10KHz-1MHz)

$$\alpha = \left((A_1 P_1 f_1 f^2) / (f_1^2 + f^2) \right) + \left((A_2 P_2 f_2 f^2) / (f_2^2 + f^2) \right) + (A_3 P_3 f^2) \quad [dB / km] \quad (1.10)$$

Francois ve Garrison eşitliği 3 kısma ayrılıp incelenir.

1. kısım borik asit (B(OH)₃) zayıflatması $\left(\left((A_1 P_1 f_1 f^2) / (f_1^2 + f^2) \right) \right)$

$$A_1 = (8,686 / c) 10^{(0,78 ph - 5)}$$

$$P_1 = 1$$

$$f_1 = 2,8 (S / 35)^{1/2} 10^{(4-1245/(T+273))}$$

2. kısım magnezyum sülfat (MgSO₄) zayıflatması $\left(\left((A_2 P_2 f_2 f^2) / (f_2^2 + f^2) \right) \right)$

$$A_2 = (21,44) (S / c) (1 + 0,025T)$$

$$P_2 = 1 - 1,37.10^{-4} d + 6,2.10^{-9} d^2$$

$$f_2 = \left((8,17) 10^{(8-1990/(T+273))} \right) / (1 + 0,0018(S - 35))$$

3. kısım saf su (H₂O) zayıflatması $(A_3 P_3 f^2)$

$T \leq 20^\circ\text{C}$ için

$$A_3 = 4,937.10^{-4} - 2,59.10^{-5} T + 9,11.10^{-7} T^2 - 1,5.10^{-8} T^3$$

$20^{\circ}\text{C} \leq T$ için

$$A_3 = 3,964.10^{-4} - 1,146.10^{-5}T + 1,455.10^{-7}T^2 - 6,5.10^{-8}T^3$$

$$P_3 = 1 - 3,83.10^{-5}d + 4,9.10^{-10}d^2$$

Burada;

f = Merkez frekansı [KHz]

f_1 ve f_2 = Rahatlama Frekansları [KHz]

T = Suyun sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]

S = Suyun tuzluluğu [‰]

d = Suyun derinliği [m]

ph = Suyun ph değeri

c = Sudaki ses hızı [m/s] olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, kullanılan frekans bandından ötürü Francois ve Garrison formülü tercih edilmiştir.

1.3.3. Küresel Yayılım ve Emilim

Sualtındaki küresel yayılım zayıflatması ve sualtındaki ses emiliminden kaynaklanan zayıflatma, toplam zayıflatmayı oluşturur ve eşitlik (1.11)'den bulunur [24].

$$A(R, f) = k10\log R + a(f)R \text{ [dB]} \quad (1.11)$$

Burada;

k =Yayılım sabitini (küresel yayılım için 2'dir)

$a(f)$ =Frekansa bağlı sudaki ses zayıflatmasını [dB/km]

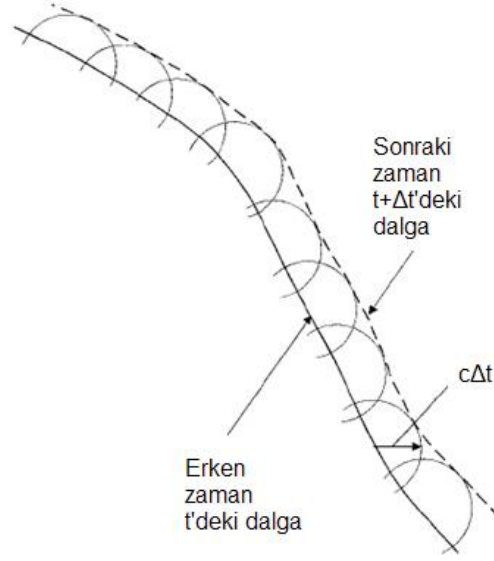
R =Alıcı-verici arası mesafeyi [km]

ifade eder.

Formülün ilk kısmı ($k10\log R$) küresel yayılımdan gelen zayıflatma, ikinci kısmı ($a(f)R$) ise emilimden yani suyun kimyasal bileşenlerinden gelen zayıflatmadır.

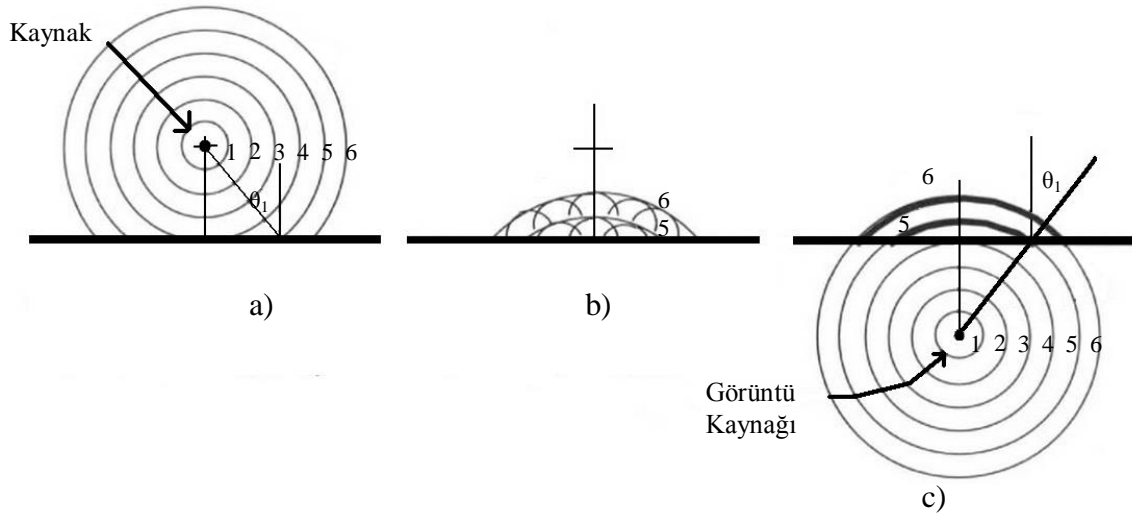
1.4. Taban ve Yüzey Yansımaları

Huygen'in prensibine göre ilerlemekte olan dalga ikinci dalganın noktasal kaynağı olarak varsayılır. Şekil 1.9.'da önceki zaman olan t 'den $t+\Delta t$ 'ye kadar olan dalganın Huygen yapısı gösterilmiştir. Yeni dalga, önceki dalganın merkezindeki noktalar üstünde olan $c\Delta t$ çapının değeridir. Bu nedenle, büyüyen çaplarda bir düzlem dalga düzlem dalga olarak ve küresel dalga ise küresel dalga olarak kalır [25].



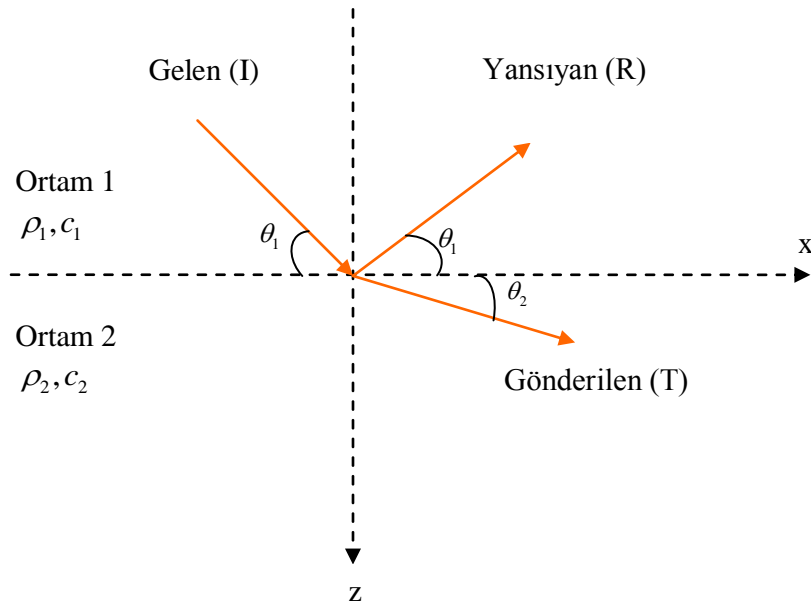
Şekil 1.9. Huygen prensibine göre ilerlemekte olan dalga [25]

Yüzey sınırındaki küresel bir dalganın Huygen yapısı etkileşimi Şekil 1.10.(a)'da ve yansıyan dalganın yansıtıcı yüzeyinden altında bir kaynak varmış gibi gönderilmesi Şekil 1.10.(b)'de gösterilmiştir. Yansımadan sonraki durumda, zahiri görüntü kaynağı olarak tanımlanan kaynak vardır. Gerçek kaynak ve görüntü kaynağı sırasıyla şekil 1.10.(a) ve şekil 1.10.(c)'de gösterilmiştir [26].



Şekil 1.10. Yüzey sınırındaki küresel bir dalganın Huygen'in yapısı etkileşimi [26]

Şekil 1.11'de gösterilen ışın geometrisi, gelen ışının yüzey ile yaptığı açının yansıyan ışın ile yüzey arasındaki açıya eşit olduğunu gösterir. Bu durum yansıma yasası olarak bilinir [26]. Ortam 1 deniz içi ve ortam 2 deniz tabanı olmak üzere yansıma katsayısı aşağıdaki gibi bulunur [27].



Şekil 1.11. Bir ortamdan diğerine geçerken yansıyan ve iletilen dalgalar

Şekil 1.12.'de ortam 1'in yoğunluğu ρ_1 , ses hızı c_1 ve ortam 2'nin yoğunluğu ρ_2 , ses hızı c_2 'dir. Gelen dalganın birim genlikli olduğu ve sırasıyla yansıyan ve gönderilen dalgaların genliklerinin R ve T olduğu varsayılırsa akustik basınçlar aşağıdaki gibi yazılır [27].

$$p_{gelen} = \exp[jk_1(x \cos \theta_1 + z \sin \theta_1)], \quad k_1 \equiv \omega / c_1 \quad (1.12)$$

$$p_{yansıyan} = R \exp[jk_1(x \cos \theta_1 - z \sin \theta_1)], \quad k_1 \equiv \omega / c_1 \quad (1.13)$$

$$p_{gönderilen} = T \exp[jk_2(x \cos \theta_2 + z \sin \theta_2)], \quad k_2 \equiv \omega / c_2 \quad (1.14)$$

Ortam 1'deki toplam basınç $p_1 = p_{gelen} + p_{yansıyan}$ ve ortam 2'deki toplam basınç ise $p_2 = p_{gönderilen}$ 'dir. Sınır koşulları matematiksel olarak eşitlik (1.15)'deki gibi yazılırlar.

$$p_1 = p_2, \quad \left(\frac{1}{j\omega\rho_1} \right) \left(\frac{\partial p_1}{\partial z} \right) = \left(\frac{1}{j\omega\rho_2} \right) \left(\frac{\partial p_2}{\partial z} \right) \quad (1.15)$$

$z = 0$ 'daki akustik basınç sürekliliği ($p_1 = p_2$) eşitlik (1.16) da görülmektedir.

$$1 + R = T \exp[j(k_2 \cos \theta_2 - k_1 \cos \theta_1)x] \quad (1.16)$$

Sol taraf x 'den bağımsız olduğu için sağ taraf da x 'den bağımsız olmalıdır ki bu durum Snell yasasını oluşturur.

$$k_1 \cos \theta_1 = k_2 \cos \theta_2 \quad (1.17)$$

(1.16) eşitliğinde sağ tarafta da x 'li terim kalmayacağı için;

$$1 + R = T \quad (1.18)$$

olur.

İkinci sınır koşulundan (eşitlik(1.15)) elde edilen eşitlik (1.19)'daki gibidir.

$$1 - R = T \frac{\left(\frac{\rho_1 c_1}{\sin \theta_1} \right)}{\left(\frac{\rho_2 c_2}{\sin \theta_2} \right)} \quad (1.19)$$

Eşitlik (1.18), eşitlik (1.19)'da kullanılırsa beraber R yansıma katsayısı ve T gönderilme katsayısının eşitlik (1.20) ve eşitlik (1.21)'deki gibi olmasına yol açar [13].

$$R = \frac{\left(\frac{\rho_2 c_2}{\sin \theta_2} \right) - \left(\frac{\rho_1 c_1}{\sin \theta_1} \right)}{\left(\frac{\rho_2 c_2}{\sin \theta_2} \right) + \left(\frac{\rho_1 c_1}{\sin \theta_1} \right)} \quad (1.20)$$

$$T = \frac{\left(\frac{2\rho_2 c_2}{\sin \theta_2} \right)}{\left(\frac{\rho_2 c_2}{\sin \theta_2} \right) + \left(\frac{\rho_1 c_1}{\sin \theta_1} \right)} \quad (1.21)$$

(1.17) eşitliğinden;

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{c_2}{c_1} \cos \theta_1\right) \quad (1.22)$$

$m = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ ve $n = \frac{c_1}{c_2}$ olarak alınsın. (1.20) ve (1.21) denkleminde pay ve payda ile $\frac{1}{\rho_1 c_2}$

çarpılırsa;

$$R = \frac{\left(\frac{m}{\sin \theta_2} - \frac{n}{\sin \theta_1} \right)}{\left(\frac{m}{\sin \theta_2} + \frac{n}{\sin \theta_1} \right)} \text{ denkleminde elde edilir. Bu denklem yeniden düzenlenirse eşitlik (1.23)}$$

ve benzer şekilde eşitlik (1.24) elde edilir.

$$R = \frac{(m \sin \theta_1 - n \sin \theta_2)}{(m \sin \theta_1 + n \sin \theta_2)} \quad (1.23)$$

$$T = \frac{(2m \sin \theta_1)}{(m \sin \theta_1 + n \sin \theta_2)} \quad (1.24)$$

(1.22) denklemini (1.23) ve (1.24)'de yerine konulursa;

$$R = \frac{\left(m \sin \theta_1 - n \sin \left(\arccos \left(\frac{c_2}{c_1} \cos \theta_1 \right) \right) \right)}{\left(m \sin \theta_1 + n \sin \left(\arccos \left(\frac{c_2}{c_1} \cos \theta_1 \right) \right) \right)} \quad (1.25)$$

$$T = \frac{(2m \sin \theta_1)}{\left(m \sin \theta_1 + n \sin \left(\arccos \left(\left(\frac{c_2}{c_1} \right) \cos \theta_1 \right) \right) \right)} \quad (1.26)$$

Buraya kadar olan kısımda genel olarak yansıma ve kırılma formüllerinin nereden çıkartıldığı verildi. Aşağıdaki kısımda sualtında kullanılacak olan yüzey ve taban yansıma katsayılarının formülleri verilmiştir.

$\theta_{taban} = 90^\circ - \theta_1$ olmak üzere taban yansıma katsayısı [24];

$$R_{taban} = \begin{cases} \frac{m \cos(\theta_{taban}) - \sqrt{(n)^2 - \sin^2(\theta_{taban})}}{m \cos(\theta_{taban}) + \sqrt{(n)^2 - \sin^2(\theta_{taban})}}, & \cos(\theta_{taban}) \leq (c_1 / c_2) \\ 1, & \text{Diğer durumda} \end{cases} \quad (1.27)$$

formülünden bulunur.

Burada;

ρ_1 = Deniz ortamının yoğunluğu [kg/m³]

ρ_2 = Deniz tabanının yoğunluğu [kg/m³]

c_1 = Deniz ortamındaki ses hızı [m/s]

c_2 = Deniz tabanındaki ses hızı [m/s]

θ_{taban} = Deniz tabanındaki yansıma açısı [derece]

Yüzey yansıma katsayısı (1.28)'deki formüle göre bulunur [28];

$$R_{yüzey} = 10^{((-4,3.10^{-10})(f^2)(\omega^4)(\theta_{yüzey}^2))} \quad (1.28)$$

Burada;

f = Merkez frekansı [KHz]

ω = Rüzgâr hızı [knots] (1knot=0.514m/s)

$\theta_{yüzey}$ = Deniz yüzeyinde, akustik ses dalgasının yansıma açısıdır [radyan]

Bileşik yansıma katsayısı aşağıdaki gibidir [22].

$$R = (R_{taban})^{kt} (R_{yüzey})^{ky} \quad (1.29)$$

Burada;

ky = Akustik ses dalgasının yüzeyden yansıma sayısı

kt = Akustik ses dalgasının tabandan yansıma sayısıdır.

1.5. Ortam Gürültüsü ve Aralıklı Gürültüler

Sualtı ortamındaki gürültüler bu ortamdaki kablosuz haberleşmeyi ciddi şekilde etkiler. Gürültüler; biyolojik canlılar, gemi trafiği ve termal etki nedeniyle oluşmaktadır. Bunlara ek olarak su yüzeyine düşen yağmur tanelerinin ve su yüzeyi üstünden esen rüzgârın oluşturduğu gürültüler de hesaba katılmalıdır. Yüzey dalgalılık gürültüsü, rüzgârın az miktarda havayı, hava-su sınırında çözmesi sonucu oluşur. Çözünen hava suyun yüzey hareketiyle baloncuklar oluşturur ve bu balonların patlaması sonucu balon gürültüsü oluşur. Termal gürültü ise moleküllerin rastgele hareketleri sonucu oluşur.

Aralıklı gürültülere dahil olan karides çatırtısı (karideslerin oluşturduğu gürültü) oldukça gürültü oluşturur. Bu durum kendi başına bir gürültü olarak alınır. Yağmur yağdığı zaman yağmur tanelerinin deniz yüzeyine düşmesi nedeniyle oluşan dalgalanmalar sonucu oluşan gürültüye ise yağmur gürültüsü denir. Ancak bu gürültü yeterli yağmur oranı (mm/saat) varsa oluşur. Gemi trafiği gürültüsü ise denizdeki gemilerin yoğunluğuna göre değişmektedir. Girdap gürültüsü ise deniz içindeki girdaplar sonucu oluşur [29].

1.5.1. Ortam Gürültüsü

a) Rüzgâr gürültüsü;

Denizin üstünde oluşan ω hızına sahip olan rüzgârın oluşturduğu gürültüdür [29].

$$G_{\text{rüzgâr}} = 50 + 7,5(\omega)^{1/2} + 20\log(f) - 40\log(f + 0,4) \text{ [dB re } 1\mu\text{Pa]} \quad (1.30)$$

Burada;

ω = Rüzgâr hızı [m/s]

f = Merkez frekansı [KHz]

olarak alınmıştır.

b) Termal gürültü;

Deniz suyu moleküllerinin rastgele hareketi sonucu oluşan gürültüdür [29].

$$G_{\text{termal}} = -15 + 20\log(f) \text{ [dB re } 1\mu\text{Pa]} \quad (1.31)$$

Burada;

f = Merkez frekansı [KHz]

olarak alınmıştır.

1.5.2. Aralıklı Gürültüler

a) Karides çatırtı gürültüsü;

Karideslerin oluşturduğu biyolojik gürültüdür.

Eğer $10\text{KHz} \leq f$ ise [19];

$$G_{\text{karides}} = 115 - 25\log(f) \text{ [dB re } 1\mu\text{Pa]} \quad (1.32)$$

Burada;

f = Merkez frekansı [KHz] olarak alınmıştır.

b) Yağmur gürültüsü;

Bu gürültü rüzgâr hızına ve yağmur oranına bağımlı bir gürültüdür. [29].

Eğer $0.01\text{mm/saat} \leq YO$ ise

$$G_{\text{yağmur}} = b + a \log(YO) \quad [dB \text{ re } 1\mu Pa] \quad (1.33)$$

Eğer $\omega \leq 1.5\text{m/s}$ ise; $a = 25$ ve $b = 41,6$

Eğer $1,5\text{m/s} \leq \omega \leq 5\text{m/s}$ ise; $a = 5 + 5,7(5 - \omega)$ ve $b = 50 + 2,4(5 - \omega)$

Eğer $5\text{m/s} \leq \omega$ ise; $a = 5$ ve $b = 50$ olur.

Burada;

$YO = \text{Yağmur oranı [mm/saat]}$

$\omega = \text{Rüzgâr hızı [m/s]}$

olarak alınmıştır.

c) Gemi trafik gürültüsü;

Gemi trafik gürültüsü denizdeki gemilerin seyir yoğunluğuna bağlı olarak (gemilerin motorlarının oluşturduğu gürültü) oluşur ve eşitlik (1.34)'deki gibidir [30].

$$G_{\text{gemi}} = 40 + 20(s - 0,5) + 26\log(f) - 60\log(f + 0,03) \quad [dB \text{ re } 1\mu Pa] \quad (1.34)$$

Burada;

$s = \text{Gemi aktivite faktörü } (0 \leq s \leq 1)$

$f = \text{Merkez frekansı [KHz]}$

olarak alınmıştır.

d) Girdap gürültüsü;

Denizde oluşan girdapların ürettiği gürültü eşitlik (1.35)'deki gibidir [30].

$$G_{\text{girdap}} = 17 - 30\log(f) \quad [dB \text{ re } 1\mu Pa] \quad (1.35)$$

Burada;

$f = \text{Merkez frekansı [KHz]}$

olarak alınmıştır.

Toplam gürültü;

$$G_{toplani} = G_{rüzgar} + G_{termal} + G_{karides} + G_{yağmur} + G_{gemi} + G_{girdap} \quad [dB \text{ re } 1\mu Pa] \quad (1.36)$$

denklemlerle verilmektedir.

1.6. Genel Açından Sistem Gereksinimleri ve Kanal Karakteristikleri

Bu başlık altında sisteme genel bir bakış yapılacaktır. Var olan sistemlerde iletilmek üzere 4 çeşit sinyal mevcuttur. Bu sinyaller; kontrol, telemetri, konuşma ve video sinyalleridir. İletilecek verinin ve sualtı akustik haberleşme sisteminin güvenilirliği, sualtı akustik kanallarının bozulmaları ve bant genişliği sınırlamalarına uygun olarak tanımlanmış olan bit hata oranı (BER) ile ölçülür [17].

Kontrol sinyalleri yönlendirme, durum bilgisi alma ve sualtı robotlarını veya insansız sualtı araçlarını kontrol etmede kullanılır. Bu gibi işlemler için 1kbps'ye kadar olan veri oranları yeterlidir ancak BER oldukça düşük olmalıdır [17].

Telemetri verisi, sualtında olan hidrofon, sismometre, sonar, kimyasal sensörler gibi akustik cihazlar kullanılarak toplanır ve bu veri düşük oranlı görüntü verisini de kapsar. Bu işlemler için bir ile birkaç kbps'lik veri oranı gerekmektedir. Birçok uygulama için 10^{-3} - 10^{-4} 'lük BER oranları yeterli olarak kabul edilebilir [17].

Konuşma sinyalleri, birden çok dalgıç arasında ve yüzey istasyonu ile dalgıçlar arasında kullanılmaktadır. Ticari amaçla kullanılan mevcut dalgıç iletişim sistemleri 3 KHz ses sinyalinin tek yan bantlı modülasyonu üstüne kuruludur. Bu sistemde 10^{-2} 'lik BER oranı bant sınırlı sualtı kanallarında düşük kaliteli bir iletişim için yeterlidir [17].

Video sinyali iletimi, sualtında çekilen fotoğrafların veya görüntülerin iletilmesini kapsar. Veri oranı, 10kbps ile yüzlerce kbps'lik veri oranları arasında değer almaktadır. BER oranı olarak 10^{-3} - 10^{-4} 'lük oranlar kabul edilebilir oranlardır [17].

1.6.1. Kanal Karakteristikleri

Diğer birçok haberleşme kanalının aksine, sualtı akustik haberleşmesine henüz standartlar getirilmemiştir. Sualtı akustik kanalındaki iletim mesafesi ve mevcut bant genişliği, öncelikli olarak iletim kayıpları ve gürültü seviyesi ile belirlenen sinyal-gürültü seviyesi oranına (SNR) bağlıdır. Sistem performansı, yansımalar veya çok yollu

yayımdan dolayı sinyalde oluşan bozulmalara bağlıdır. Kanal karakteristikleri, zamanla değişir ve sistemin konumuna bağlıdır [17].

1.6.2. Mesafe ve Bant Genişliği

İletim kayıplarına, enerji yayılımı ve ses emilimi neden olur. Enerji yayılımı kaybı sadece yayılım mesafesine bağlı iken, emilim kaybı sadece mesafeyle beraber artmaz aynı zamanda frekans ile de artar. Belli bir bölgedeki iletim kaybı, birçok yayılım modeli tekniği ile değişik doğruluk derecelerinde belirlenebilir [17].

Okyanusta gürültüler insan kaynaklı gürültüler (aralıklı gürültülere girer) ve ortam gürültüleri olarak oluşmaktadır. Derin okyanusta ortam gürültüleri baskın iken, sığ kıyılarda ise gemilere bağlı olan ve insan kaynaklı gürültüler gürültü seviyesini yükseltmektedirler. Sonuç olarak sualtı akustik haberleşme bağlantıları mesafeye göre sınıflandırılabilir. 10-100km aralığındaki uzun mesafeli sistemler için bant genişliği birkaç KHz ile sınırlıdır (1000km gibi çok daha uzun mesafeler için mevcut bant genişliği 1KHz'in altına düşer). 1-10km aralığındaki orta mesafeli bir sistem için bant genişliği 10-20KHz mertebesindedir. 1km'den daha az olan kısa mesafeli sistemler için bant genişliği 20KHz'i aşar. 100m'nin altındaki mesafeler için ise 100KHz'den daha fazla bant genişliği gerekmektedir [17].

Sualtı akustik kanalları genelde en zor haberleşme yapılabilen ortamlardan birisi olarak tanımlanmaktadır. Akustik yayılım en iyi şekilde, düşük frekanslarda gerçekleştirilebilir ve haberleşme için mevcut bant genişliği oldukça sınırlıdır. Örneğin, 10 ve 15KHz aralığında çalışabilen bir akustik sistem olsun. Toplam haberleşme bant genişliği çok düşük (5KHz) olmasına rağmen sistem geniş bantlıdır, çünkü merkez frekansıyla kıyaslanınca bant genişliği ihmal edilemeyecek mertebededir [31].

1.6.3. Çok Yolluluk

Bant genişliği sınırlı olan bir kanalda sinyal, karakteristiği verici ve alıcının konumuna fazlasıyla bağlı olan ve zamanla değişebilen, çok yollu yayılımı yapar. Tek taşıyıcı kullanan sayısal haberleşme sistemlerinde çok yollu yayılım semboller arası girişime (ISI) neden olur ve önemli bir nokta da çok yollu yayılımın sembol aralıkları

cinsinden gösterilmesidir. Radyo kanallarındaki tipik çok yollu yayılımında birkaç sembol aralığı varken, sualtı akustik kanalında bu miktar yüksek veri oranları elde etmek için onlarca hatta yüzlerce sembol aralığına çıkabilir. Bu durumun nedeni ise sualtında kullanılan bant genişliğinin oldukça düşük olmasından kaynaklanmaktadır [17].

Çok yollu ışın oluşumu sığ su ve derin suda farklı olduğu gibi aynı zamanda kullanılan frekansa ve iletim mesafesine de bağlıdır. Sistem konumuna bağlı olarak birçok tipik çok yollu ışın vardır ve çoğunlukla suyun derinliğiyle tanımlanırlar. Derin ve sığ su kavramları çok kesin tanımları olan kavramlar değildirler, ancak genelde sığ su kavramı kıyıya yakın olan kısımları ve su derinliğinin 100m'den daha az olduğu derinlikleri temsil etmektedir. Çok yollu ışın oluşumunun diğer bir tanımı ise suyun tabanından olan, yüzeyinden olan veya içindeki herhangi bir cisim nedeniyle olan yansımalarıdır. Derin sularda yaygın olan bir başka çok yollu ışın oluşumu ise, ışın bükülmesi sonucu oluşur. Bu durumda ses kanalı, ses hızının minimum olduğu yere doğru ses ışınlarının bükülmesi sonucu oluşur ve bu derin ses kanalı eksenini olarak adlandırılır. Derin olan sularda, yansıma sonucu kayıplar olmayacağı için, ses binlerce kilometreye kadar gidebilir [17]. Bu tip sistemlerin tasarımında yayılım modeli genelde, çok yollu ışın yollarının açılma dağılımlarının tahmin edildiği yöntemlerden destek alır. Bu yayılım modelini ışın teorisi ve normal mod teorisi sağlamaktadır [17].

1.6.4. Frekans Bandı Seçimi

Radyo haberleşmesindeki belli olan, bölüştürülmüş frekans aralıklarının aksine, sualtı iletişimi ve telemetrisinde bu tip düzenli bir frekans bandı bölüştürmesi yapılmamıştır. Ancak pratikte kullanılan bazı frekanslar şöyledir, ticari denizaltılar (25KHz), kraliyet donanması (40,2KHz) ve NATO donanması (42KHz). Vericinin gücüne bağlı olarak 1km iletim mesafesine kadar dalgıçlar arası konuşmada ve dalgıçlar ile yüzey arasındaki konuşmalarda kullanılan frekanslar 40-42KHz civarındadır [17].

1.7. Sonar Transdüserleri ve Özellikleri

Sualtı ses donanımları sualtındaki sesi algılamak ve analiz etmek için tasarlanmışlardır. Bu donanımlar genelde, akustik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren veya

tam tersini yapan transdüserlerden oluşan bir hidrofondan oluşan bir sinyal işleme sisteminden oluşurlar [32].

Sesi alıp elektriğe çeviren transdüser alıcı veya hidrofondan olarak adlandırılır. Elektrik enerjisini sese çeviren transdüser ise projektör (verici) olarak adlandırılır. İki tip transdüser vardır. Birinci tip transdüser, piezoelektrik (içeriğinde kullanılan malzemeye göre elektrostriktif de olabilir) prensibine göre çalışırken, ikinci tip ise manyetostriktif prensibine göre çalışmaktadır. Kuartz, amonyum di-hidrojen fosfat ve Rochelle tuzu gibi belli kristal malzemeler bir basınca tabi tutulunca kristal yüzeyleri arasında bir elektriksel yük üretirler. Tam ters olarak, bu maddelere elektriğe maruz kalınca basınç üretirler. Bu tip maddelere piezoelektrik denilmektedir. Elektrostriktif maddeler, aynı etkiyi gösteren polikristal seramikleridir ve güçlü bir elektrostatik alan içinde polarize olmalıdırlar. Baryum titanat ve kurşun zirkonat bu tip maddelere örnektir [32].

Nikel gibi manyetostriktif bir madde piezoelektrik bir maddeyle aynı etkiyi gösterir fakat uygulanacak olan basınçtan ziyade uygulanacak manyetik alan etkisi altında çalışır. Yani manyetostriktif madde manyetik alana maruz kalınca boyutlarını (ölçülerini) değiştirir ve bu durumun tam tersi olan, manyetostriktif madde üzerine bir basınç uygulanınca etrafında manyetik alan değişir ifadesi de doğrudur. Diğer bir deyişle, uygun olarak tasarlanmış bir nikel maddesi salınımlı bir manyetik alana maruz bırakılırsa, suda akustik dalga üreten mekanik bir salınım oluşturulur [32].

Piezoelektrik (elektrostriktif) ve manyetostriktif tip transdüserler, su ile daha iyi empedans uyumu sağlayacaklarından sualtı uygulamalarında diğer tip transdüserlerden daha uygundur. Ucuz olduklarından ve istenilen şekle sokulabildiklerinden dolayı, seramik maddeler sualtı donanımlarında sıkça kullanılmaktadırlar [32].

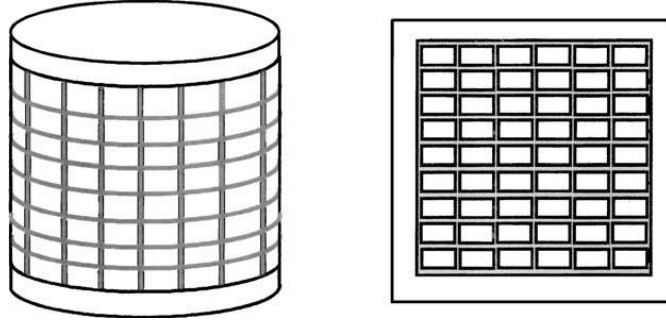
1.7.1. Diziler

Araştırma veya ölçüm amacı için kullanılan hidrofondanlarda tek piezoelektrik veya manyetostriktif malzeme kullanılır. Ancak birçok hidrofondan uygulamasında uygun aralıklarla yerleştirilmiş belli sayıdaki malzemeleri kullanan hidrofondan dizileri gerekmektedir. Bu dizilerin kullanılmasının nedenleri aşağıdaki maddelerle açıklanabilir [32];

1. Dizi daha hassastır, seri olarak bağlanırsa daha çok gerilim üretilir, paralel olarak bağlanırsa daha çok akım üretilir.

2. Dizi farklı yönlerden gelen sesler arasında ayırım yapabilen yönlendirme sağlar.
3. Dizinin, gösterdiği (yönlendiği) bir yönden gelen sinyalin alımını kolaylaştırmak için izotropik gürültüye karşı ayırt edici bir özelliği olmasından dolayı dizi tek hidrofona göre daha iyi bir SNR sağlar.

Bütün bu avantajlardan dolayı, sualtı ses uygulamalarının birçoğu dizilerle yapılmaktadır. Dahası, yukarıda verilen avantajlardan 1. ve 2.'si hidrofonde olduğu gibi projektörlerde de uygulanabilir [32]. Silindirik ve düzlem diziler şekil 1.12'de gösterilmiştir. Bu diziler denizaltılarda kullanılmaktadırlar.



Şekil 1.12. Silindirik dizi ve düzlem dizi transdüserleri [32]

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Ses Yayılımı

2.1.1. Temel Bilgiler

Deniz ortamındaki ses yayılımı parametreler, sınır koşulları ve deniz ortamı tarafından belirlenen dalga eşitliğiyle matematiksel olarak açıklanır. Esas olarak denizdeki ses yayılımını tanımlayan 6 tane model vardır [27].

Dİ: Dalga sayısı integrali

NM: Normal mod

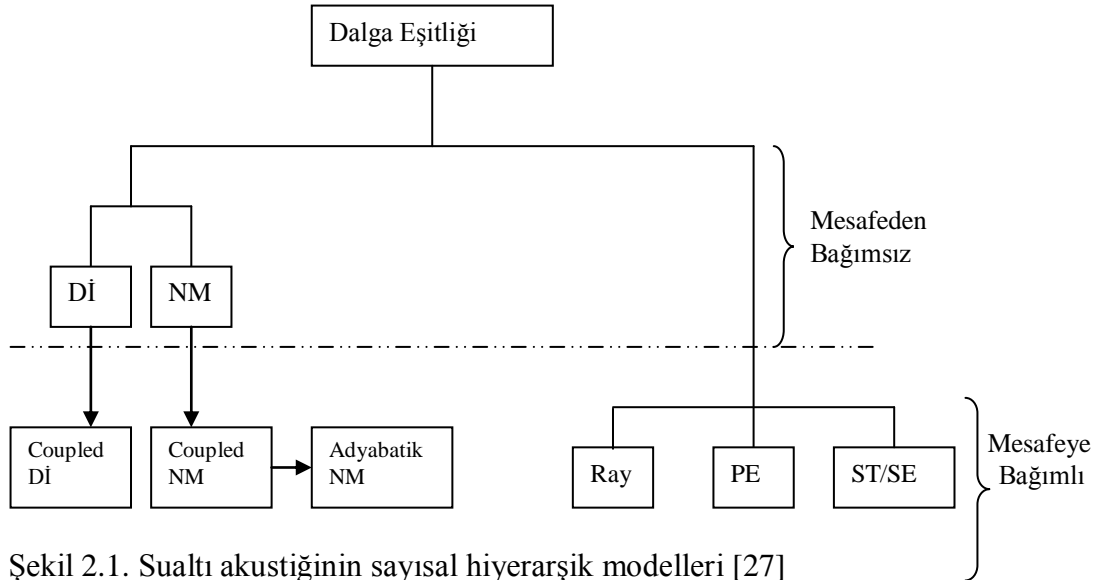
PE: Parabolik eşitlik

ST: Sonlu türev

SE: Sonlu eleman

Ray: Işın modeli

Bu çalışmada kullanılan model ışın (Ray) modelidir.



Şekil 2.1. Sualtı akustiğinin sayısal hiyerarşik modelleri [27]

Sıvının parçacıkları, milyonlarca molekül içermeye yetecek kadar çok sıvının son derece az olan hacmini ifade eder. Bu nedenle sıvı sürekli(akışkan) bir ortam olarak düşünülebilir [27].

Sıvının molekülleri ortamda sabit bir pozisyona sahip değildirler. Akustik dalga olmaması durumunda bile, dalganın hareketiyle orantılı olarak ortalama hızlarda rastgele hareket ederler. Sonuç olarak, sıvılardaki akustik dalgalar tartışılırken parçacık yer değiştirmeleri ve hızlarından bahsetmek mümkündür [27].

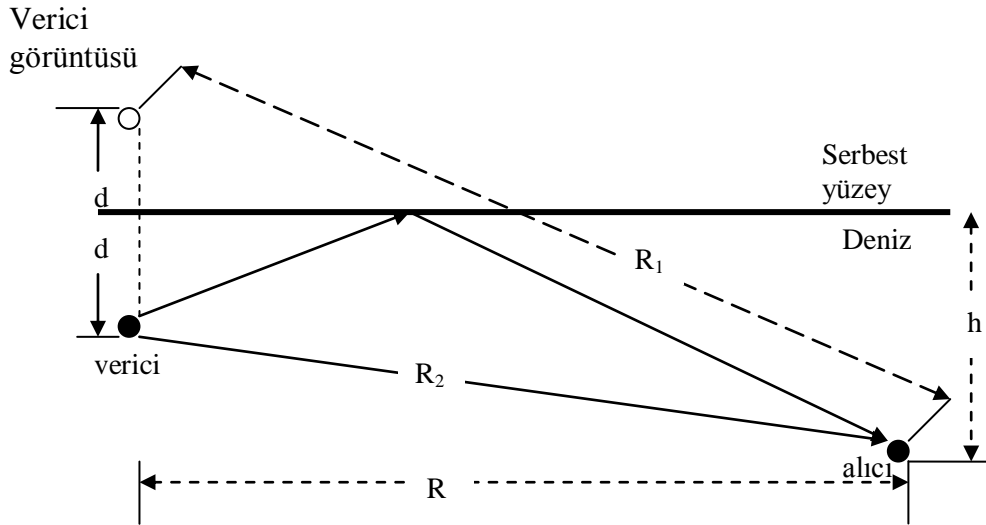
2.1.2. Harmonik Dalgalar

Zamanla değişimi harmonik fonksiyon (sinüs, kosinüs veya lineer kombinasyonlar) olan dalga, birçok ses kaynağı tarafından üretilebilir. Bu durum için gerekli ifade eşitlik (2.1) 'de verilmiştir [33] ve detayı, eşitlik (2.2) ve eşitlik (2.3)'de gösterilmiştir.

$$p = Pe^{j\omega t} \quad (2.1)$$

2.1.3. Lloyd'un Ayna Yöntemi

Deniz yüzeyine yakın sinüzoidal noktasal bir kaynak, direkt ses ve kaynağın yüzeyin üstündeki görüntüsünden yayılan fazı kaymış ses arasında, girişimli bir akustik alan üretir. Sualtı akustiğinde bu durum yüzey girişim etkisi olarak bilinir.



Şekil 2.2. Lloyd'un ayna yöntemi

$R_1 = \sqrt{(h+d)^2 + R^2}$ olup yüzeyden yansıyan yolun uzunluğudur.

Burada;

R_2 = Direkt yol uzunluğu

R = Alıcı-verici arası yatay mesafe

h = Alıcı derinliği

d = Verici derinliği

A = Verici genliği (gücü)

Direkt ses alanı olan p_1 ;

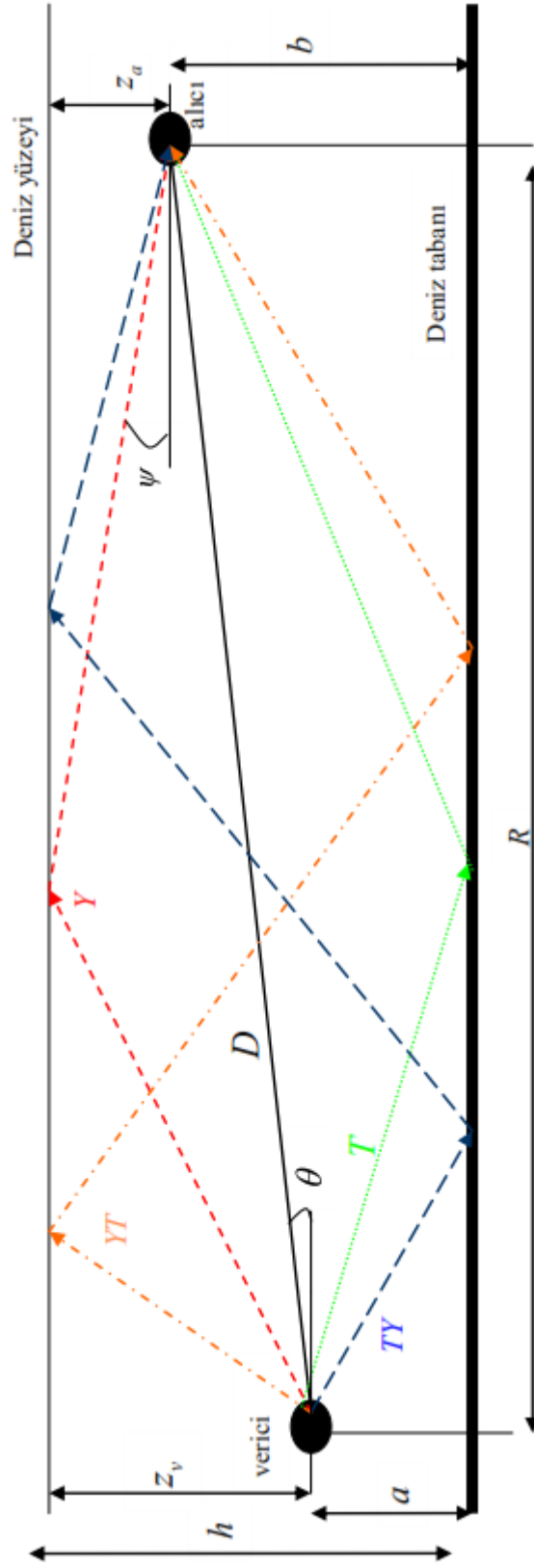
$$p_1 = (A / R_2) e^{j(\omega t - kR_2)} \quad (2.2)$$

Yansımış ses alanı olan p_2 ise;

$$p_2 = (A / R_1) e^{j(\omega t - kR_1)} \quad (2.3)$$

$p_{toplam} = p_1 + p_2$ 'dir. Bu yöntem aynı şekilde tabanı sınır olarak yapılabilir. Tabanı sınır alma durumu ses dalgasının yerden yansıdığı durumlarda kullanılır.

2.2. Kanal Modeli



Şekil 2.3. Kanal modelinin geometrik gösterimi

Bu çalışmada kullanılan sualtı akustik haberleşme kanalı, eğer 4 adet çok yollu ışın varsa çok yollu derecesi bir; eğer sekiz çok yollu ışın varsa çok yollu derecesi iki olacak şekilde tasarlanmıştır. Işın sayısı arttıkça çok yollu derecesi de artar yani çok yollu derecesi, çok yollu ışınların sayısına göre belirlenir. Bu çalışmada çok yollu derecesi iki olarak alındı ancak eşitliklerin yazılmasında kolaylık sağlaması açısından çok yollu derecesi bir alınarak eşitlikler yazıldı. Her bir yolun uzunluğunun Lloyd'un ayna yöntemine göre genelleştirilmiş denklemleri eşitlik (2.4) ve eşitlik (2.5)'deki gibi tanımlandı [34].

D =Direk dalga

Y = Yüzeyden yansıyan dalga

YT = Önce yüzeyden sonra tabandan yansıyan dalga

TY = Önce tabandan sonra yüzeyden yansıyan dalga

T = Tabandan yansıyan dalga

a = Vericinin deniz tabanından olan yüksekliği

b = Alıcının deniz tabanından olan yüksekliği

z_v = Vericinin deniz yüzeyinden itibaren olan derinliği

z_a = Alıcının deniz yüzeyinden itibaren olan derinliği

$U_D = U_1$ =Direk yol sinyalinin aldığı mesafe

U_2 = Yüzeyden yansıyan sinyalin aldığı mesafe

U_3 = Önce yüzeyden sonra tabandan yansıyan sinyalin aldığı mesafe

U_4 = Önce tabandan sonra yüzeyden yansıyan sinyalin aldığı mesafe

U_5 = Tabandan yansıyan sinyalin aldığı mesafe

h = Suyun maksimum derinliği

$a = h - z_v$

$b = h - z_a$

n =Çok yollu derecesi

olarak tanımlanmıştır.

Eşitlik (2.4)'de verilen B mesafeleri sinyallerin aldığı düşey mesafeleri göstermektedir. Önceden de belirtildiği gibi formüllerin gösteriminde kolaylık olması açısından çok yollu derecesi olan $n = 1$ olarak alınmıştır.

$$D \text{ için } B_1 = b - a$$

$$Y \text{ için } B_{2+(n-1)4} = 2nh - a - b; B_2 = 2h - a - b$$

$$YT \text{ için } B_{3+(n-1)4} = 2nh - a + b; B_3 = 2h - a + b$$

(2.4)

$$TY \text{ için } B_{4+(n-1)4} = 2nh + a - b; B_4 = 2h + a - b$$

$$T \text{ için } B_{5+(n-1)4} = 2(n-1)h + a + b; B_5 = a + b$$

B_1 direk dalga (LOS) olduğundan çok yollu derecesinden bağımsızdır.

$p = 1, 2, 3, 4, 5$ olmak üzere, (2.4) eşitliğinden bulunan B 'ler, (2.5) eşitliğinde yerine yazılır ve U mesafeleri elde edilir.

$$U_p = \sqrt{R^2 + B_p^2} \quad (2.5)$$

$$U_1 = U_D; U_{2+(n-1)4} = U_{Y_n}; U_{3+(n-1)4} = U_{YT_n}; U_{4+(n-1)4} = U_{TY_n}; U_{5+(n-1)4} = U_{T_n}$$

$$\downarrow n = 1 \text{ için}$$

$$U_1 = U_D; U_2 = U_{Y_1}; U_3 = U_{YT_1}; U_4 = U_{TY_1}; U_5 = U_{T_1}$$

Gelen ışın ile yansıma yüzeyi arasındaki açılar D için $k = -1$; Y için $k = 1$; YT için $k = -1$; TY için $k = 1$; T için $k = -1$ olmak üzere eşitlik (2.6)'dan bulunur.

$$\theta_p = k \arctan(B_p / R) \quad (2.6)$$

Direk ışın yolu ve çok yollu ışınların yolları arasındaki farkların ses hızına bölünmesiyle gecikmeler eşitlik (2.7)'deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
\tau_{Y_n} &= (U_2 - U_1) / c \\
\tau_{YT_n} &= (U_3 - U_1) / c \\
\tau_{TY_n} &= (U_4 - U_1) / c \\
\tau_{T_n} &= (U_5 - U_1) / c
\end{aligned} \tag{2.7}$$

veya

Genelleştirilmiş eşitlik (2.8)'de gösterilmiştir [3].

$$\begin{aligned}
\tau_{Y_n} &= (2 / (cR)) [n^2 h^2 - nh(a+b) + ab] \\
\tau_{YT_n} &= (2 / (cR)) [n^2 h^2 - nh(b-a)] \\
\tau_{TY_n} &= (2 / (cR)) [n^2 h^2 - nh(a-b)] \\
\tau_{T_n} &= (2 / (cR)) [(n-1)^2 h^2 + (n-1)h(a+b) + ab]
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Taban ve yüzey yansımaya katsayıları sırasıyla (1.27) ve (1.28) eşitliklerinden bulunur. Sonra r_t , taban yansımaya katsayısı ve r_y , yüzey yansımaya katsayısı olmak üzere, bu taban ve yüzey yansımaya katsayıları birleştirilip eşitlik (2.9)'daki "birleştirilmiş yansımaya katsayıları" elde edilir [35].

$$\begin{aligned}
Y_{Y_n} &= r_y^n r_t^{(n-1)} \\
Y_{YT_n} &= r_y^n r_t^n \\
Y_{TY_n} &= r_y^n r_t^n \\
Y_{T_n} &= r_y^{(n-1)} r_t^n
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Birleştirilmiş yansıma katsayıları bulunduktan sonra çok yollu sinyallerin genlik hesabı eşitlik (2.10)'daki gibi yapılır [33].

$$\begin{aligned}
 G_{Y_n} &= (U_D / U_{Y_n}) Y_{Y_n} \\
 G_{Y_{T_n}} &= (U_D / U_{Y_{T_n}}) Y_{Y_{T_n}} \\
 G_{TY_n} &= (U_D / U_{TY_n}) Y_{TY_n} \\
 G_{T_n} &= (U_D / U_{T_n}) Y_{T_n}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

Kanal modeli, eşitlik (2.11)'deki gibidir [36].

$$\begin{aligned}
 h_p(f) &= \frac{\Gamma_p}{(A(U_p, f))^{1/2}} \\
 H(f) &= \sum_{p=1}^{p_m-1} h_p e^{-j2\pi f \tau_p}
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Burada;

p_m =maksimum p değeridir.

Γ_p = p . yayılım yolu boyunca olan birleştirilmiş yansıma katsayılarıdır (eşitlik(2.7)).

$A(U_p, f)$ = p . yayılım yolunda olan kayıplardır (eşitlik(1.11)).

(2.11) eşitliği p . yol boyunca olan frekans cevabını temsil eder. Akustik kanalın her bir yolu alçak geçiren filtre olarak davrandığından bu bütün tepke cevabına katılır.

$$h(t) = \sum_p^{p_m-1} h_p e^{(t-\tau_p)} \tag{2.12}$$

Burada $h(t)$, $H(f)$ 'nin ters fourier dönüşümüdür.

$$\tau_p = \frac{U_p}{c} \tag{2.13}$$

olup (2.7) eşitliğinde verilen yayılım (çok yollu ışınlar sonucu oluşan) gecikmeleridir. Kullanılan sistemde 8 tane çok yollu ışın yolu olmasına rağmen, eşitliklerin yazımında kolaylık göstermesi açısından 4 çok yollu ışını olan sistem şu şekilde modellenir;

$$H = \sum_{p=1}^4 h_p e^{(-j2\pi f \tau_p)} \quad (2.14)$$

$$h_1 = \frac{Y_{Y1}}{\left((U_2)^2 (10^{(\alpha U_2/10)})\right)^{1/2}}$$

$$h_2 = \frac{Y_{YT1}}{\left((U_3)^2 (10^{(\alpha U_3/10)})\right)^{1/2}} \quad (2.15)$$

$$h_3 = \frac{Y_{TY1}}{\left((U_4)^2 (10^{(\alpha U_4/10)})\right)^{1/2}}$$

$$h_4 = \frac{Y_{T1}}{\left((U_5)^2 (10^{(\alpha U_5/10)})\right)^{1/2}}$$

$$H = h_1 e^{(-j2\pi f \tau_1)} + h_2 e^{(-j2\pi f \tau_2)} + h_3 e^{(-j2\pi f \tau_3)} + h_4 e^{(-j2\pi f \tau_4)} \quad (2.16)$$

Burada α suyun zayıflatması olup (1.10) eşitliğinde verilmektedir. Buradaki kanal modeli şekil 2.3'de gösterilen kanal için verilmiştir ve kanal 2 taplı olarak alınmıştır.

Bütün parametreler alınan SNR'ye göre tanımlanmaktadır. Mesafeye bağlı olan en uygun merkez frekansı eşitlik (2.17)'deki gibi belirlenir [37].

$$f = \left(\frac{200}{R}\right)^{2/3} \quad (2.17)$$

Burada;

f = Merkez frekansı [KHz]

R = Verici-alıcı arası mesafe [km]

olarak alınmıştır. Eşitlik (2.17)'den anlaşıldığı üzere R mesafesi ile merkez frekansı arasında ters orantı vardır.

Sonuç olarak;

Vericiden $x(t)$ işareti gönderildiği zaman alıcıya $y(t) = x(t) * H(t)$ işareti ulaşır.

Burada;

$x(t)$ = Gönderilen işaret ; $H(t)$ = Kanal ; $y(t)$ = Alınan işaret

* = Konvolüsyon operatörü olarak ifade edilmektedir.

Bu çalışmada sığ su kanal modeli üzerinden gidilmiştir. Sığ su kanal modelinde bant genişliği verici ve alıcı yatay mesafesine göre değişmekte olup Tablo 2.1. de verilmiştir [14]. Ayrıca eşitlik (2.18)'de sığ su kanalı için kullanılan sınırlama verilmiştir.

Tablo 2.1. Sığ su kanalı için R (verici-alıcı arası mesafe) ve B (bant genişliği) [14]

R,Uzaklık [Km]		B,Bant Genişliği [KHz]
Çok uzak	≥ 20	$10 \geq$
Uzak	5-20	5-10
Orta	1-5	≈ 20
Kısa	0,1-1	20-50
Çok kısa	$0,1 \geq$	≥ 100

$$R/h \gg 2n+1 \quad (2.18)$$

Eşitlik (2.18)'deki sığ su kanalı koşulu [33];

n = Çok yönlü derecesi

R = Alıcı verici arası mesafe

h = Deniz derinliği

olarak ifade edilmektedir.

2.3. Modülasyon

En genel anlamda bir işaretin belirli bir özelliğinin başka bir işarete (bilgi işareti) bağlı olarak değiştirilmesi işlemi modülasyon olarak adlandırılır. Belirli bir özelliği bilgi işaretine bağlı olarak değiştirilen, tek işlevi diğer işaretin bilgisini vericiden alıcıya taşımak olan işaret, taşıyıcı olarak adlandırılır. Bilgi işaretine bağlı olarak taşıyıcı genliğinin

değiştirilmesi genlik modülasyonu, taşıyıcı fazının değiştirilmesi faz modülasyonu olarak adlandırılır.

Sayısal bilgi işaretinde mevcut sembol adedine bağlı olarak, taşıyıcı genliği, frekansı veya fazı sınırlı sayıda farklı değer alabilmektedir. Taşıyıcı parametresinin (genlik, frekans veya faz) iletilecek sayısal bilgi sembolüne bağlı olarak, sınırlı sayıdaki olası değer arasından belirlenmesi, bir anahtarlama işlemini andırıldığından temel sayısal modülasyonların adlandırılmasında anahtarlama tabiri kullanılır. Sayısal bilgi işaretine bağlı olarak taşıyıcı genliğinin modüle edilmesi genlik kaydırmalı anahtarlama (ASK), taşıyıcı frekansının modüle edilmesi frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK), taşıyıcı fazının modüle edilmesi ise faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) olarak adlandırılmaktadır [38].

2.3.1. İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)

Faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) gürültüden en az etkilenen sayısal modülasyon türüdür ve bu nedenle uydu haberleşmesi gibi orta-hızlı ve yüksek-hızlı sayısal haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır.

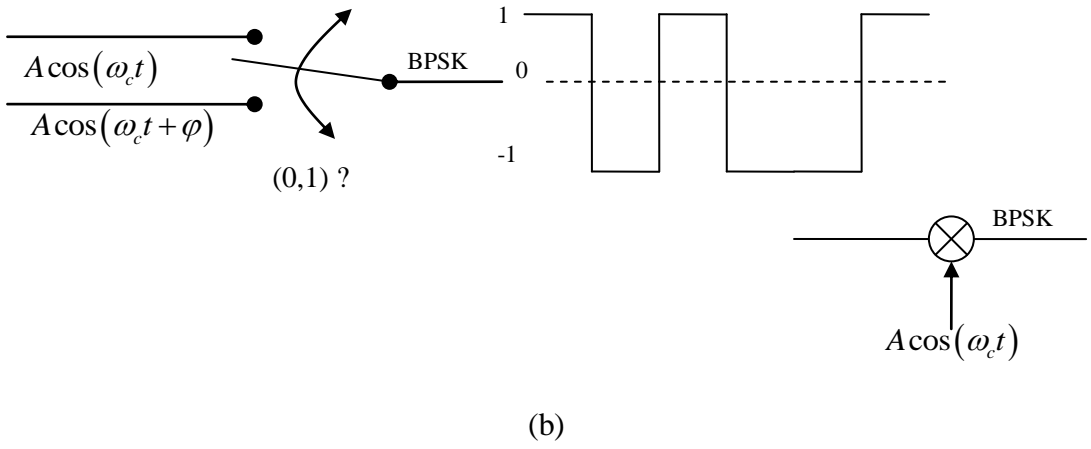
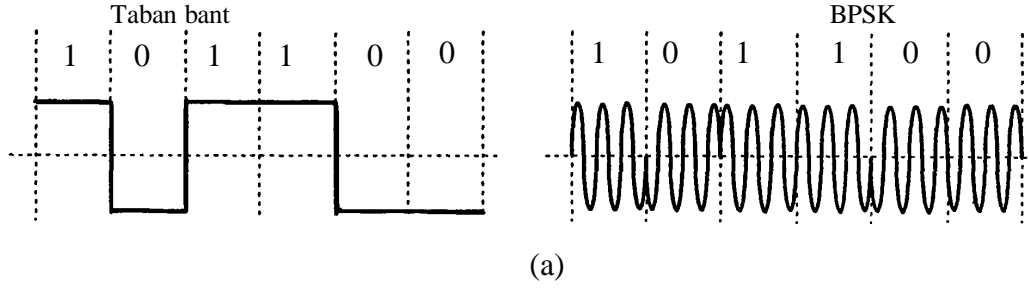
İkili faz kaydırmalı anahtarlama (BPSK) için sayısal bilginin 0 ve 1 bitlerine bağlı olarak taşıyıcının iki farklı fazı (φ_0 ve φ_1) kullanılmaktadır. Faz kaydırmalı anahtarlama taşıyıcının genliği ve frekansı sabittir. Taşıyıcı genliği, kullanılan güç ve istenen hata olasılığı ihtiyaçlarına bağlı olarak, taşıyıcı frekansı ise iletim yapılacak banda göre belirlenmektedir. MPSK ise çoklu PSK modülasyonlarını ifade eder (QPSK gibi).

BPSK için taşıyıcı frekansı f_c olmak üzere iletilen işaret genel olarak

$$i(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + \varphi_1), & \text{sayısal sembol 1 ise } (s_1(t)\text{ taşıyıcısı}) \\ A \cos(2\pi f_c t + \varphi_0), & \text{sayısal sembol 0 ise } (s_0(t)\text{ taşıyıcısı}) \end{cases} \quad (2.19)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

BPSK modülasyonu Şekil 2.6.(b)'de görüldüğü gibi sembole bağlı olarak konumu belirlenen bir anahtar şeklinde gösterilebilmekte ve kutuplu bir taban bant bilgi işareti ile kosinüs taşıyıcısının çarpıldığı bir sistem şeklinde oluşturulabilmektedir [38].

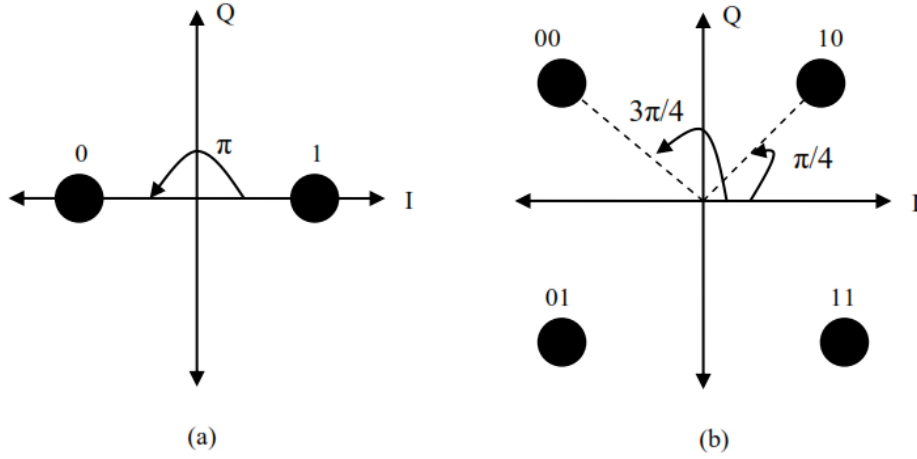


Şekil 2.4. (a) BPSK modülasyonu, (b) BPSK modülatörü [38]

2.3.2. Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK)

BPSK modülasyonunda bir zamanda sadece bir bit göz önüne alınıyordu. QPSK modülasyonunda ise bir bit fazı olan diğeri ise fazı olmayan olarak alınır. QPSK'nın taşıyıcı fazları $\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$ 'dür [38]. Bu çalışmada kullanılan modülasyon türüdür.

BPSK'da işaretin sanal bileşeni olmadığı için Q olmaz sadece reel bileşen olan I vardır. QPSK'da işaretin hem sanal hem de reel bileşeni vardır. Faz farkı sanal bileşen nedeniyle oluşmaktadır.



Şekil 2.5. (a) BPSK için I-Q diyagramı,(b) QPSK için I-Q diyagramı

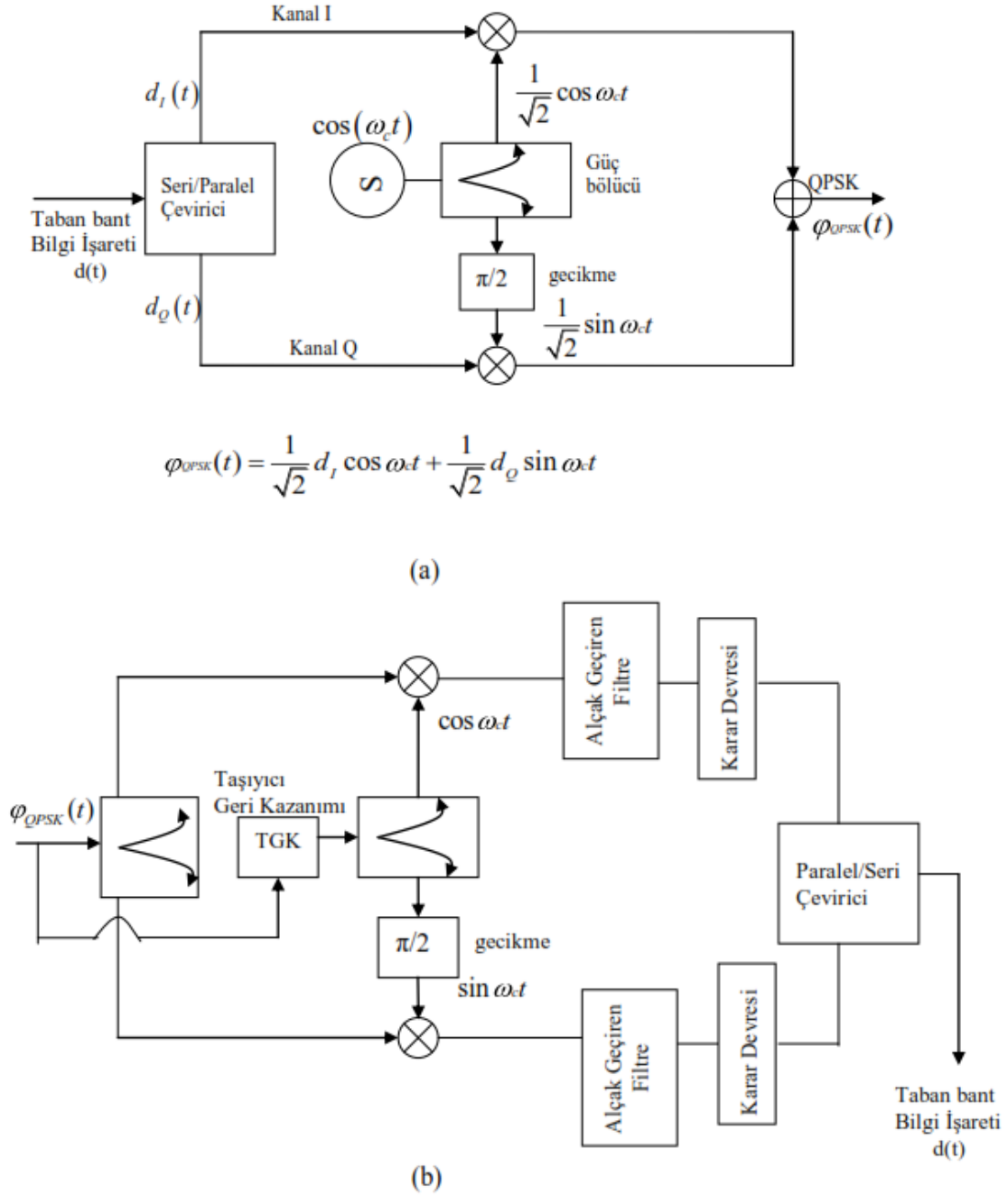
$A=1$ alınırsa QPSK için taşıyıcılar $\cos(x+y) = \cos(x)\cos(y) - \sin(x)\sin(y)$ ilişkisinden eşitlik (2.23)'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_0(t) &= \cos(\omega_c t + \pi/4) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \omega_c t - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \omega_c t \\
 \dot{I}_1(t) &= \cos(\omega_c t + 3\pi/4) = -\frac{1}{\sqrt{2}} \cos \omega_c t - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \omega_c t \\
 \dot{I}_2(t) &= \cos(\omega_c t + 5\pi/4) = -\frac{1}{\sqrt{2}} \cos \omega_c t + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \omega_c t \\
 \dot{I}_3(t) &= \cos(\omega_c t + 7\pi/4) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \omega_c t + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \omega_c t
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

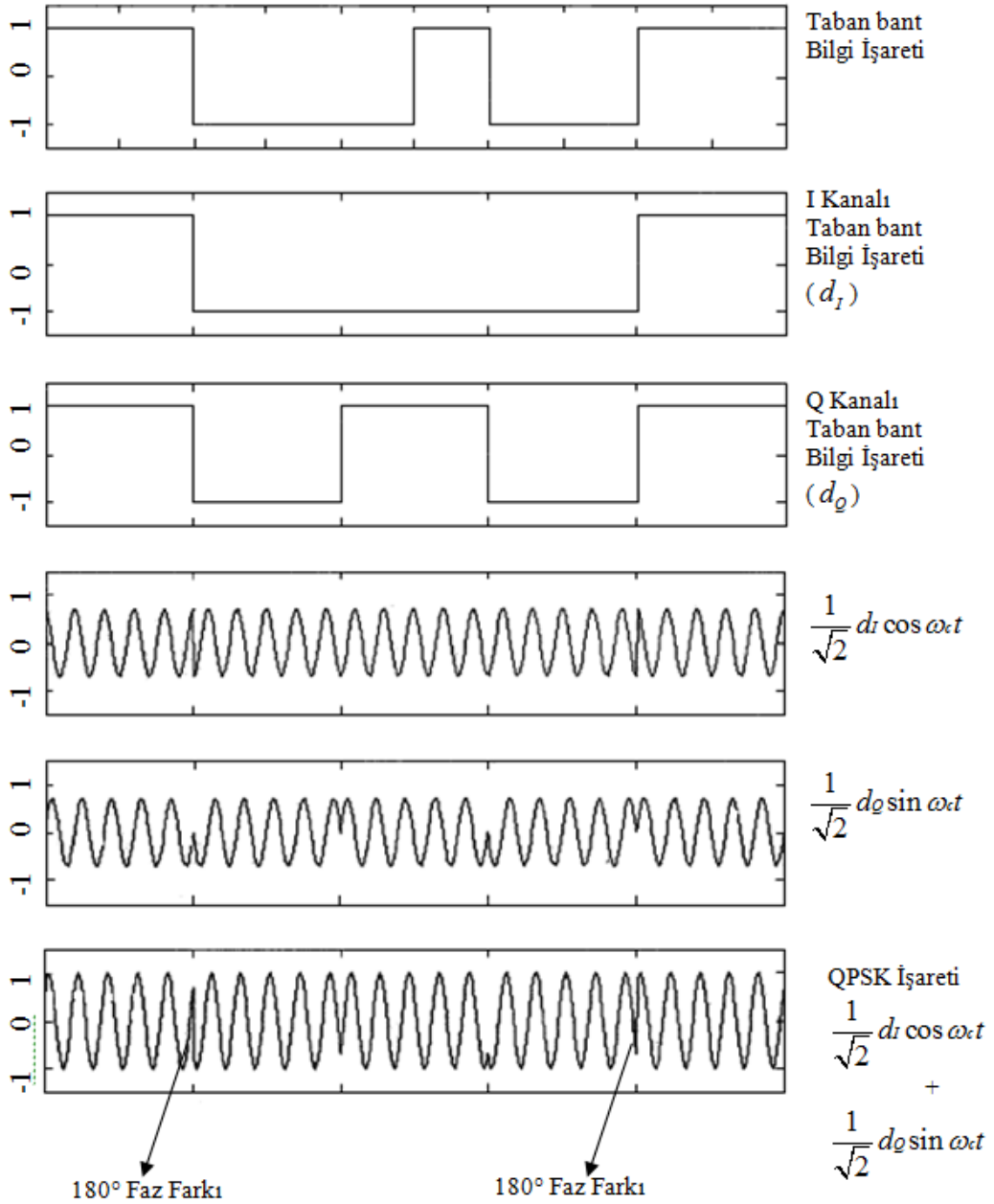
QPSK sisteminde dört adet taşıyıcı kullanıldığından ikili iletme göre sayısal bilgi işaretinin bitleri ikişerli olarak gruplandırılmış şekilde iletilmektedir. Bu nedenle her sembol için iletilen iki adet bittten biri kosinüs taşıyıcısının, diğeri ise sinüs taşıyıcısının modülasyonunda kullanılabilir. İlk bilgi biti 1 ise pozitif kosinüs taşıyıcısı, 0 ise negatif kosinüs taşıyıcısı ve aynı şekilde ikinci bilgi biti 1 ise pozitif sinüs taşıyıcısı, 0 ise negatif sinüs taşıyıcısı iletilmektedir. Bu durumda $\dot{I}_0(t)$ taşıyıcısı 10 bilgisini $\dot{I}_1(t)$ taşıyıcısı 00 bilgisini $\dot{I}_2(t)$ taşıyıcısı 01 bilgisini ve $\dot{I}_3(t)$ taşıyıcısı 11 bilgisini taşımaktadır bu durum şekil 2.7.(b)'de gösterilmiştir [38].

Şekil 2.8.'de QPSK modülatörü ve demodülatörü gösterilmektedir. Göndericide ikili taban bant bilgi işaretinin bitleri bir seri/paralel çevirici ile ikişerli olarak gruplandırılmaktadır. Bitlerden biri eş fazlı kosinüs taşıyıcısı diğeri ise dik fazlı sinüs

taşıyıcısını modüle etmektedir. Alıcıda eş evreli demodülasyon için alınan işaretten taşıyıcı geri kazanıldıktan sonra eş fazlı kanaldan gönderilen ve dik fazlı kanaldan gönderilen bitler birbirinden bağımsız olarak algılanmaktadır. En son olarak alıcıdaki paralel/seri çevirici ile ikili taban bant işareti geri oluşturulmaktadır [38].



Şekil 2.6. (a)QPSK modülatörü, (b) QPSK demodülatörü [38]



Şekil 2.7. Örnek bir bilgi işareti için QPSK iletimindeki I ve Q kanalı işaretleri [38]

2.3.3. Sualtı Ortamında Modülasyon Yöntemi Seçimi

Karmaşık dijital modülasyon yöntemleri yüksek oranlı veri iletimi için radyo haberleşme sistemlerine adapte edilmişlerdir. Kanal karakteristikleri ve bant genişliği sınırlamaları nedeniyle, sualtı akustik haberleşmesinde radyo haberleşmesinde elde edilen veri oranı başarıyı sağlanamamaktadır. Sualtı akustik haberleşmesinde kullanılan modülasyon tipleri ASK, FSK ve PSK'dır [17]. Ancak ASK modülasyonu, iletim yolu

düzgün olunca ve yansımalar az olunca iyi performans göstermektedir. Sualtı ortamında ise çok yollu ışın yolları ve yansımalar çok fazla olduğundan dolayı, sualtı akustik haberleşmesinde FSK veya PSK modülasyonlarının kullanılması veri oranı başarımında daha iyi performans sergiler. FSK normalde sığ su uzun ve orta mesafeli kanallar gibi hızlı faz değişimi gösteren kanallar için tek alternatiftir [17]. Fakat yapılan yeni çalışmalar PSK'nın daha iyi bir SNR'ı başarabildiğini gösterdi ve bu nedenle sualtı akustik haberleşmesinde modülasyon tekniği olarak genelde PSK kullanılmaktadır [17]. QPSK modülasyonu özellikle sualtından 6kbps'lik konuşma verilerinin iletiminde kullanılmaktadır [17].

2.4. Denkleştirici

Sayısal haberleşmede iki ana bozunum faktörü vardır. Birincisi, çok yollu kanalın zaman yayılması sonucu oluşan semboller arası girişim (ISI) ve ikincisi ise mobil vericinin hareketi nedeniyle oluşan Doppler yayılımıdır. Yüksek hızlı güvenilir haberleşme yapabilmek ve ISI etkisini ortadan kaldırmak için kanal kestirimi ve denkleştirici gereklidir [39].

Darbe biçimlendirme, bant sınırlı fakat bozunumsuz bir kanal üzerinden iletim yapıldığında simgeler arası karışmaya (ISI) karşı etkili olabilmektedir. Ancak çoğu gerçek haberleşme sisteminde (özellikle kablosuz iletimde), haberleşme kanalının süzgeçleme etkileri veya yansıma sonucunda oluşan çok yolluluk gibi etkilerden dolayı frekansa bağlı olarak genlik veya faz bozunumu meydana gelmektedir. Haberleşme kanallarında meydana gelen bozunum, bir haberleşme kanalından diğer haberleşme kanalına değişebileceği gibi aynı haberleşme kanalında zamanla da değişebilmektedir. Kanalın yol açtığı bozunumun alıcıda düzeltilmesi işlemi “denkleştirme” olarak adlandırılmaktadır.

En temel denkleştirici yapısı, simgeler arası karışma (ISI) etkisini tersine çevirerek alıcıda ideal (bozunumsuz) kanalın frekans yanıtını geri oluşturmaya çalışmaktır. Simgeler arası karışma meydana geldiğinde, alıcıda örnekleme anında elde edilen işaretin değeri, istenen sembol değeri ile komşu sembollerin ISI miktarına bağlı olarak, değişen katsayılarla ölçeklenmiş şekillerinin toplamına eşit olmaktadır. Dolayısıyla alıcıda k anında elde edilen işaret değeri eşitlik (2.21)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$y_k = a_k + \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i a_i, i \neq k \quad (2.21)$$

Burada y_k alıcıda k anında elde edilen işaret değerini ve a_k bilgi dizisinin k . değerini göstermektedir. Komşu sembol değerleri a_i ve bu sembollerin (kanal nedeniyle oluşan) ISI etkisi c_i ile gösterilmektedir. Eşitlik (2.21)'de ISI etkisi sonsuz bir toplam ile gösterilmekle beraber, uygulamada sonsuz bir dizi olamayacağı gibi tüm terimlerin (özellikle uzak sembollerin) dikkate almaya geçecek bir ISI etkisi olmayacaktır. Bu nedenle eşitlik (2.21)'de verilen ifadedeki sonsuz toplam sonlu bir toplam ile değiştirilebilmektedir. Kanalın frekans yanıtı (dolayısıyla c_i katsayıları) biliniyor veya bulunabiliyorsa alıcıda bu etkinin tersine çevrilmesi mümkün olabilmektedir. Örneğin, istenen sembolün her iki tarafındaki beş komşu sembolün kayda değer ISI etkisi yaptığı kabul edildiğinde, c_i katsayıları bilindiği takdirde bu sembollerin etkisini k anında elde edilen işaret değerinden çıkarılarak alıcıda denkleştirme yapılabilir. Bu durumda denkleştirilmiş işaret eşitlik (2.22)'deki gibidir [38].

$$y_{dk} = y_k - \sum_{i=-5}^5 c_i a_i, i \neq k \quad (2.22)$$

Simgeler arası karışmanın tamamen giderilmesi yani simgeler arası karışmanın sıfırlanması, sıfır-zorlayıcı doğrusal denkleştirme olarak adlandırılmaktadır. Denkleştirme işlemi tipik olarak doğrusal denkleştirme ve doğrusal olmayan denkleştirme olmak üzere ikiye ayrılır.

2.4.1. Doğrusal Denkleştirme

Sıfır zorlayıcı denkleştiricinin önemli bir eksikliği, AWGN'nin dikkate alınmamasıdır. Bunun sonucunda denkleştiricinin, gürültüyü ciddi oranda arttırma olasılığı bulunmaktadır. Kanalın düşük frekans yanıtına sahip olduğu bir frekans bölgesinde, denkleştirici yüksek bir kazanç vererek toplam frekans yanıtını dengelemeye çalışmakta ve böylece bu frekans bölgesindeki gürültü artırılmaktadır. Bu nedenle tek başına sıfır ISI şartı yerine uygulamada çoğunlukla, ISI ile beraber AWGN etkisinin en aza indirgenmesi

yaklaşımı tercih edilmektedir. Bu durumda, toplam ISI ve AWGN hatasının en aza indirgenmesi için tipik olarak en küçük ortalama karesel (LMS) hata ölçütü kullanılmaktadır. Bu tip denkleştiriciler, en küçük karesel hata denkleştirici olarak adlandırılmaktadır.

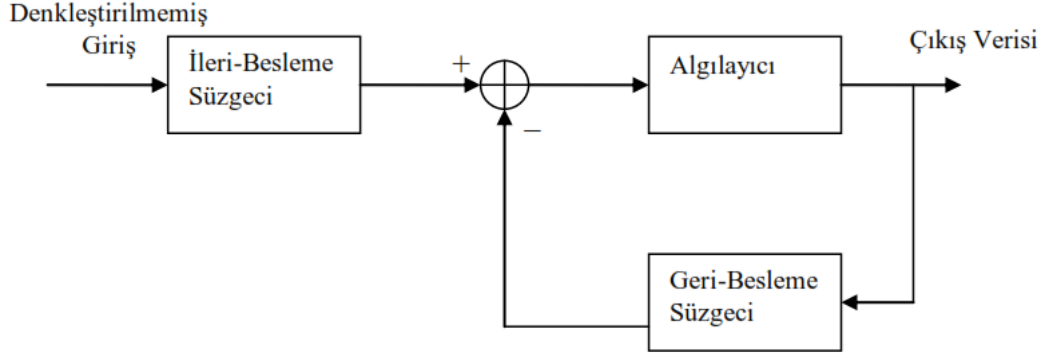
Otomatik denkleştirme için kullanılan iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Ön-tanımlı denkleştirme yaklaşımında verici, (alıcı tarafından bilinen) bir eğitim dizisi iletmekte, bu dizi alıcıda oluşturulan dizi ile karşılaştırılmakta ve iki dizi arasındaki farka bağlı olarak denkleştirici katsayıları belirlenmektedir. Uyarlanırs denkleştirme yaklaşımında ise denkleştirici katsayıları sürekli olarak iletilen veriye bağlı olarak ayarlanmaktadır. Uyarlanırs denkleştirmenin en önemli faydası zamanla değişen kanal özelliklerine ayak uydurabilmesidir. Fakat haberleşme kanalı çok fazla hataya neden oluyorsa, bu hatalar uyarlama algoritmasının yakınsamasını önleyebileceği için uyarlanırs denkleştiricilerin performansı düşebilmektedir. Bu nedenle uygulamada çoğunlukla, denkleştirici bir eğitim dizisi ile eğitilmekte ve ilk katsayılar bu diziye göre belirlenmektedir. İlk ayarlardan sonra çözümlenen semboller yeteri kadar güvenilir olacağından uyarlamalı denkleştirici, eğitim aşamasından karar-yönelimli çalışmaya geçmektedir. Bu aşamadan sonra algılayıcı çıkışında verilen karar ile denkleştirici çıkışı arasındaki fark şeklinde oluşturulan hata işareti kullanılarak denkleştirici katsayılarının sürekli olarak uyarlanması yapılır [38].

2.4.2. Doğrusal Olmayan Denkleştirme

ISI etkisinin çok fazla olmadığı haberleşme kanallarındaki örneğin kablolu telefon haberleşmesinde olduğu gibi, doğrusal denkleştiriciler oldukça iyi başarımlar göstermektedir. Fakat ISI etkisinin çok yüksek olduğu durumlarda, örneğin kablosuz iletimlerde, doğrusal denkleştirici başarımları düşmektedir.

Doğrusal olmayan (karar geri beslemeli) denkleştiriciler, önceden alınmış semboller için verilen kararları kullanarak, önceden alınan sembollerin o an alınan sembolde meydana getirdiği ISI etkisini yok etmeye çalışmaktadır. Şekil 2.8.'de blok diyagramı gösterilen karar geri beslemeli denkleştirici yapısı, tipik olarak bir adet ileri-besleme ve bir adet geri besleme olmak üzere iki adet süzgeçten oluşmaktadır. İleri besleme süzgeci genelde kesirli aralıklı bir sonlu dürtü yanıtı (FIR) süzgeç olup doğrusal bir denkleştirici yapısında olmaktadır. Geri-besleme süzgeci ise genelde sembol periyodunda çalışan ve ayarlanabilir katsayılarla sahip olan bir FIR süzgeç yapısında olmaktadır. Geri-besleme

süzgeci aracılığıyla, önceden alınmış ve algılayıcı tarafından kararları verilmiş sembollerin yol açtığı ISI etkisi o andaki sembolden çıkartılmakta ve bu işlemden sonra algılayıcı tarafından o andaki sembole karar verilmektedir.



Şekil 2.8. Karar geri beslemeli denkleştirici blok diyagramı [38]

Karar geri beslemeli denkleştiricide, algılayıcı çıkışında meydana gelen hataların denkleştirici çalışmasına etkisi olmakla beraber, genelde bu etki düşük olmakta ve karar geri beslemeli denkleştirici özellikle kablosuz haberleşme sistemleri için doğrusal denkleştiriciden daha iyi bir başarımlı göstermektedir [38].

2.4.3. En Küçük Ortalama Kare (LMS) Adaptif Algoritması ve Karar Geri Beslemeli Denkleştirici (DFE)

2.4.3.1. En Küçük Ortalama Kare (LMS) Adaptif Algoritması

LMS algoritması (2.23), (2.24) ve (2.25) eşitlikleriyle tanımlanmaktadır.

$$\hat{d}_k = c_k^H v_k \quad (2.23)$$

$$e_k = d_k - \hat{d}_{k-1} \quad (2.24)$$

$$c_{k+1} = c_k + \mu e_k v_k^* \quad (2.25)$$

Burada v_k kanal çıkışıdır ve (2.26) eşitliğindeki gibi tanımlanır.

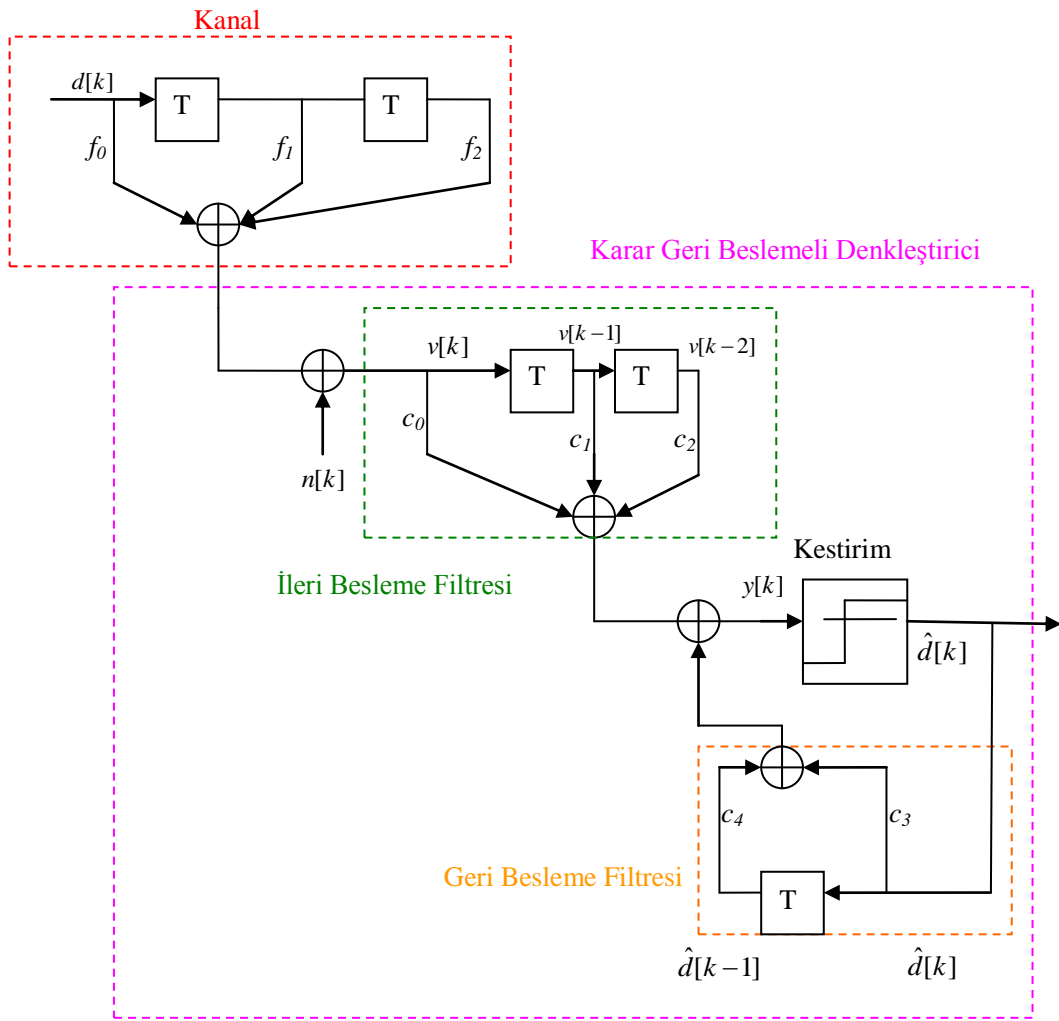
$$\mathbf{v}_k = [v_k, v_{k-1}, \dots, v_{k-(N-1)}]^T \quad (2.26)$$

Burada N filtrenin tap sayısı, c_k adaptif tap ağırlık vektörü, d_k istenen sinyal, \hat{d}_k istenen sinyalin tahmini (kestirimi), e_k hata sinyali ve μ adım boyutu parametresidir. $(.)^*$ eşlenik değeri, $(.)^T$ transpoze operatörünü ve $(.)^H$ eşlenik transpozeyi (Hermityan) ifade etmektedir [40].

2.4.3.2. Karar Geri Beslemeli Denkleştirici (DFE)

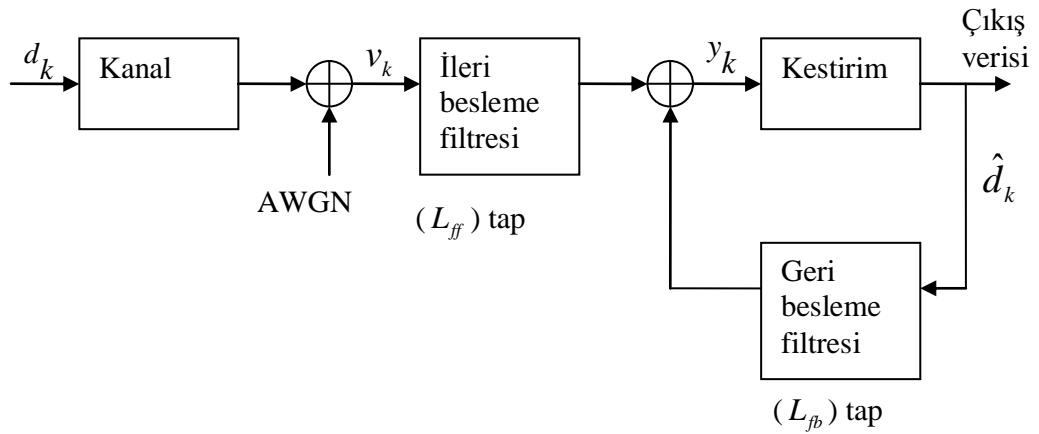
DFE, L_{ff} taplı bir ileri besleme filtresinden ve L_{fb} taplı olan bir geri besleme filtresinden oluşmaktadır [40]. Geri besleme filtresinin tap sayısı kanalın tap sayısından bir eksik olmalıdır. İleri besleme filtresinin tap sayısı ise kanal tap sayısına eşit veya kanal tap sayısından büyük olmalıdır. Eşitlik (2.24)'de LMS yapısına göre bir hata sinyali verilmektedir ancak DFE yapısına bakıldığından ileri besleme filtresinde bir gecikme oluşacağı için bu gecikmenin de hesaba katılıp senkronizasyon yapılması gerekmektedir.

Başına eğitim dizisi eklenmiş olan veri alıcıya gönderilir. Gönderilen veri ile alıcıda kestirilen verinin farkı hata olarak oluşur ve bu hata LMS algoritması kullanılarak minimize edilir. Minimize edilen hataya bağlı olarak tap ağırlık katsayıları bulunur. Böylece doğru ağırlık katsayılarıyla en doğru şekilde gönderilen verinin kestirimi yapılır. Şekil 2.11'de DFE'nin detaylı yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Karar geri beslemeli denkleştiricisininin detaylı yapısı

Şekil 2.9.'da verilen DFE'nin genel yapısı şekil 2.10.'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Karar geri beslemeli denkleştirici genel yapısı

Tablo 2.2. DFE için tap sayıları, giriş ve çıkış değerleri

	İleri Besleme Filtresi	Geri Besleme Filtresi
Tap	$c_j, (j=-L_{ff}, \dots, 0)$	$c_p, (p=1, \dots, L_{fb})$
Giriş	$v_{k-j}, (j=-L_{ff}, \dots, 0)$	$\hat{d}_{k-p}, (p=1, \dots, L_{fb})$
Çıkış	$y_k = \sum_{j=-L_{ff}}^0 c_j v_{k-j} + \sum_{p=1}^{L_{fb}} c_p \hat{d}_{k-p}$	
Tap Güncelleme	$c_{k+1} = c_k + \mu e_k x_k^*$ $x_k = (v_{k+L_{ff}}, \dots, v_k, \hat{d}_{k-1}, \dots, \hat{d}_{k-L_{fb}})$	

(2.25) denklemlerindeki tap güncelleme denklemi;

$c_{k+1} = c_k + \mu e_k x_k^*$ olup buradaki $x_k = (v_{k+L_{ff}}, \dots, v_k, \hat{d}_{k-1}, \dots, \hat{d}_{k-L_{fb}})$ şeklindedir.

Bu çalışmadaki kanal 2 taptan oluşmaktadır ve sistemde kullanılan DFE'nin yapısında ileri beslemede 3 tap geri beslemede 1 tap vardır.

2.5. Sistemdeki Gürültüler, Zayıflatmalar, Sistemin Kanal Yapısı ve Bileşenleri

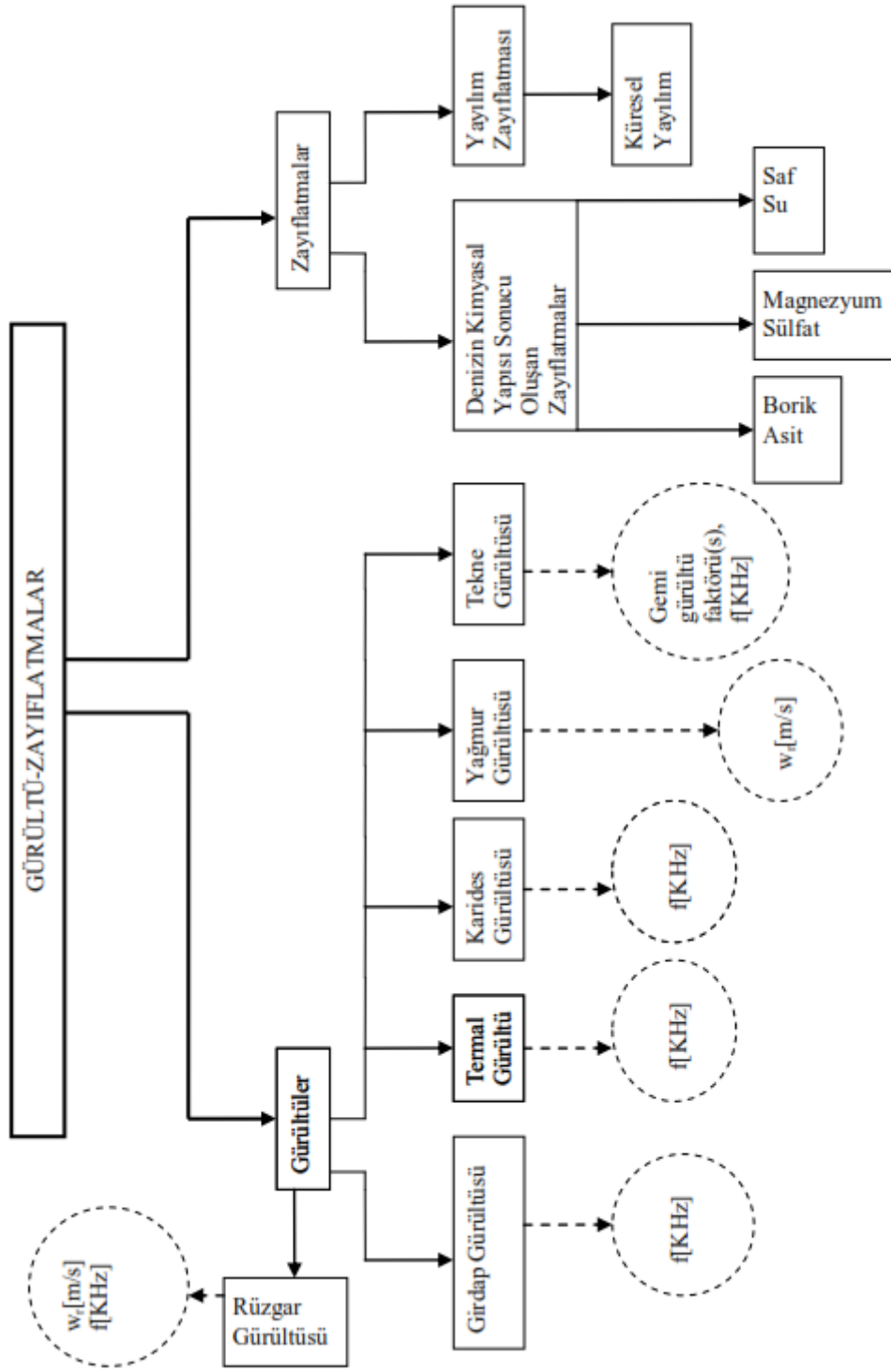
Şekil 2.11.'de kanaldaki ortam gürültüleri olan, rüzgâr gürültüsü ve termal gürültü ile aralıklı gürültüler olan karides gürültüsü, yağmur gürültüsü, gemi trafik gürültüsü ve girdap gürültüsü gösterilmiştir. Buna ek olarak denizin kimyasal bileşenlerinden kaynaklanan zayıflatmalar ve ses dalgasının yayılım türü (küresel yayılım) sonucu oluşan zayıflatmalar gösterilmiştir. Kesikli daire içinde gösterilen kısımlar ise gürültülerin hangi parametrelere bağlı olduğunu göstermektedir. Gürültüler içindeki rüzgâr ve yağmur gürültüleri birbiriyle ilişkilidir. Tekne gürültüsü insan kaynaklı gürültüdür. Karides gürültüsü biyolojik gürültüdür.

Şekil 2.12’de sualtı akustik kanalını oluşturan bileşenler gösterilmiştir. Bunlar;

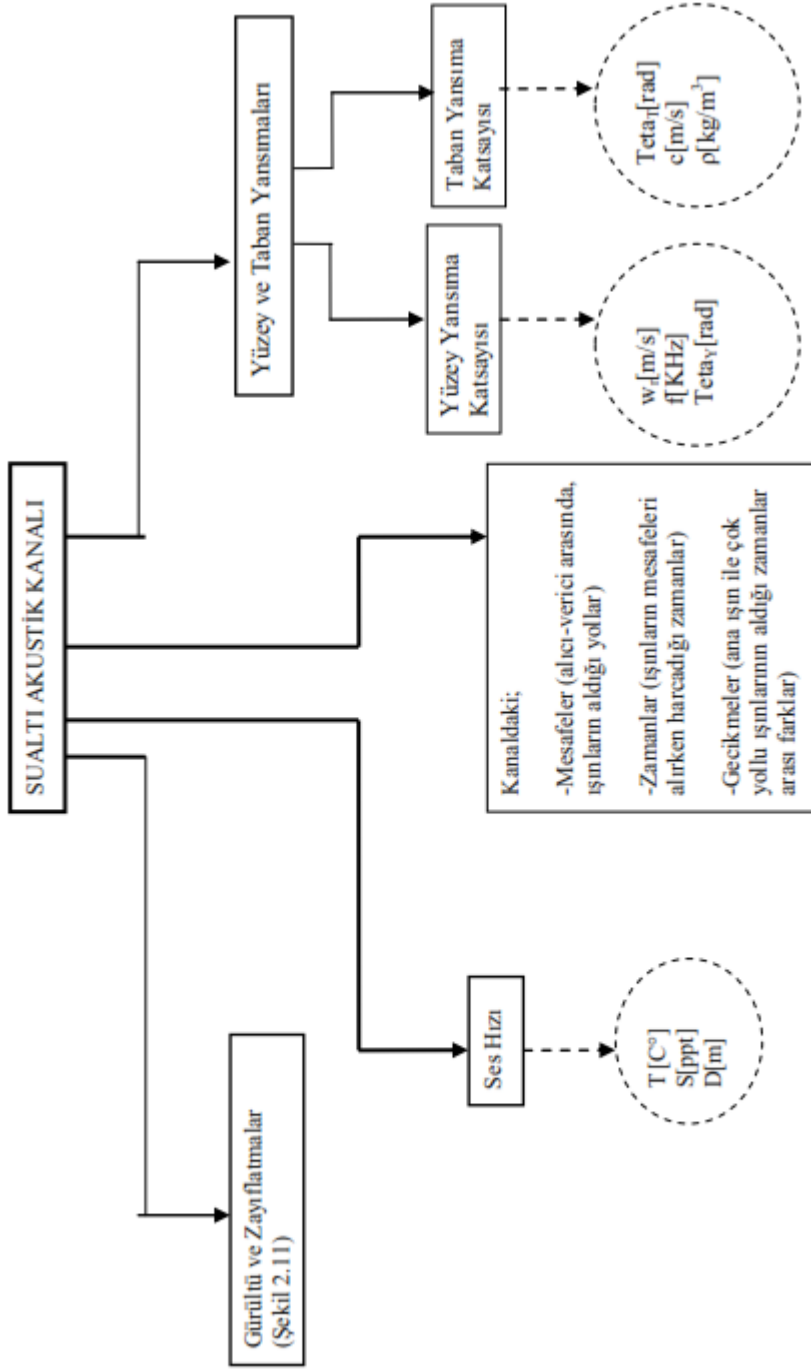
- 1- Şekil 2.11’deki gürültü ve zayıflatmalar, ses hızı, kanaldaki tüm mesafeler (alıcı-verici arası mesafeler, alıcı ve vericinin derinlikleri, direk ışın yolları ve çok yollu ışın yol mesafeleri).
- 2- Kanalda harcanan zamanlar (vericiden alıcıya giden sinyalin harcadığı zaman, direk ışın yolu ve çok yollu ışın yollarını kat eden ışınların harcadığı zamanlar).
- 3- Gecikmeler (direk ışın ve çok yollu ışınların arasındaki zaman farklarıdır).
- 4- Birleşik yansıma katsayılarını oluşturan yüzey ve taban yansıma katsayıları. $Teta_Y$ yüzey yansıma açısını, $Teta_T$ ise taban yansıma açısını ifade etmektedir
- 5- Deniz suyunun tuzluluğuna, sıcaklığına ve derinliğine bağlı olarak değişen ses hızı (c) olarak verilmiştir.

Şekil 2.13’de, şekil 2.12’ün etkisi sonucu oluşan sualtı akustik kanalı için içine katılarak kullanılan sualtı akustik kanal modeli verilmektedir.

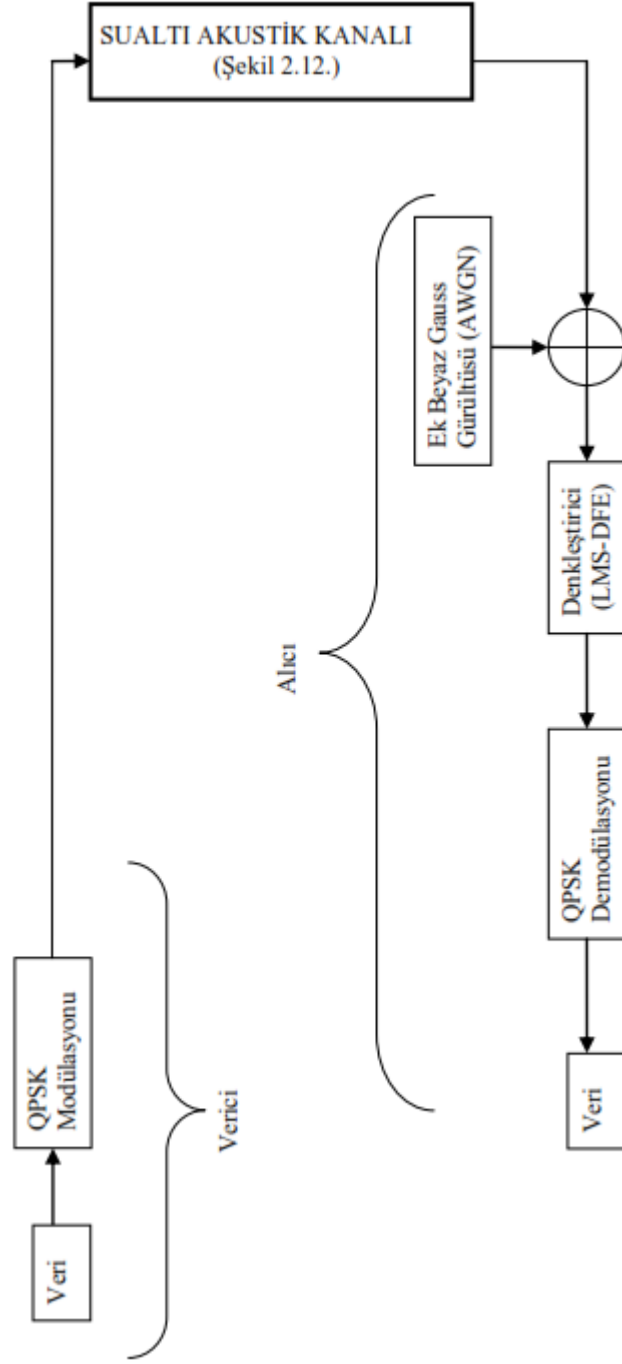
Şekil 2.13’de gönderilmek istenilen veri QPSK modülasyonuna tabi tutulduktan sonra sualtı akustik kanalına gönderilir. Kanal içinde gürültülere, zayıflatmalara ve yansımalara maruz kalan veri alıcı tarafından alınır. Alıcı sistem nedeniyle veriye ek beyaz gauss gürültüsü (AWGN) eklenir. AWGN gürültülü veri LMS – DFE tarafından alınır ve sinyalde oluşan ISI bastırılmaya çalışılır. Daha sonra veri QPSK demodülasyonuna tabi tutulur ve gönderilen veri en az bozunumlu şekilde elde edilmeye çalışılır.



Şekil 2.11. Gürültü ve zayıflatmaları gösteren blok diyagram



Şekil 2.12. Sualtı akustik kanalı gösteren blok diyagram



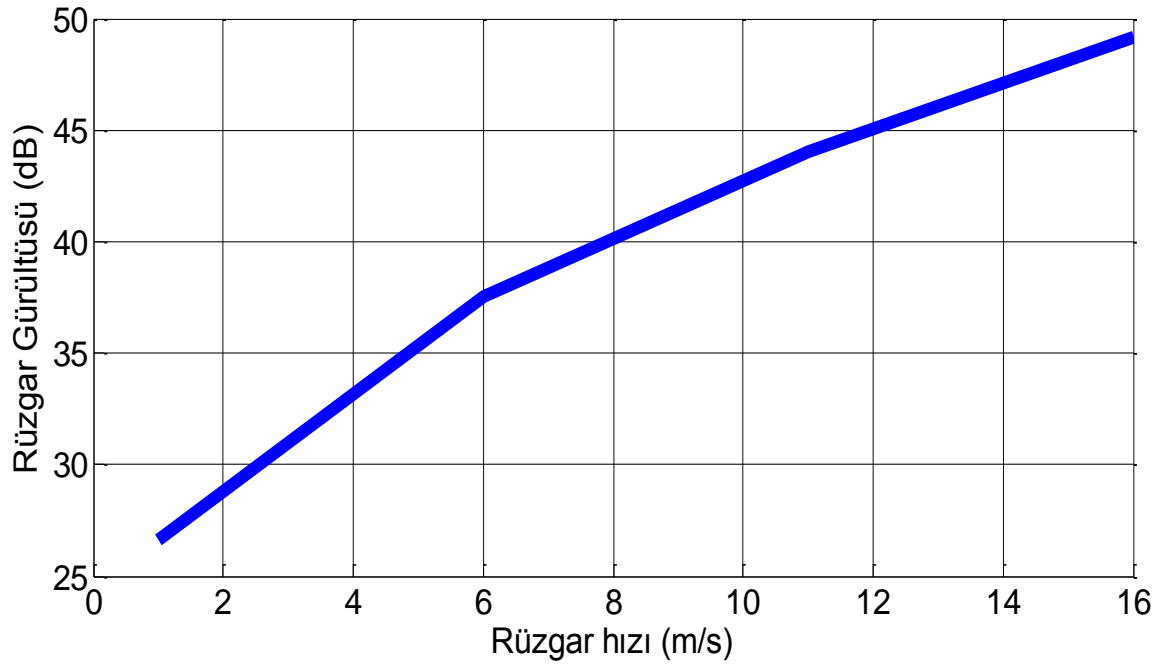
Şekil 2.13. Sualtı akustik kanalı kullanan sistemin blok diyagramı

3. BULGULAR

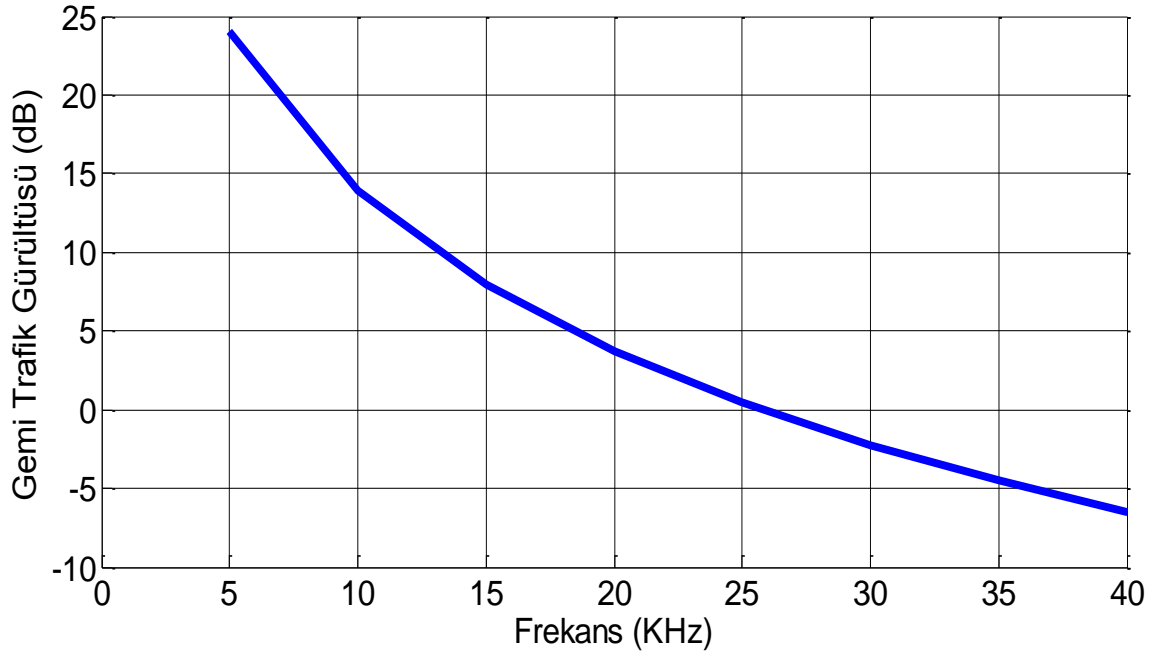
Bu çalışmada yapılan simülasyonlar “MATLAB” programı kullanılarak yazılan özgün bir kod ile beraber oluşturulmuştur. Yapılan simülasyonların hepsinde QPSK modülasyonu kullanılmıştır.

3.1. Gürültülerin Parametrelerine Bağlı Olan Değişimleri

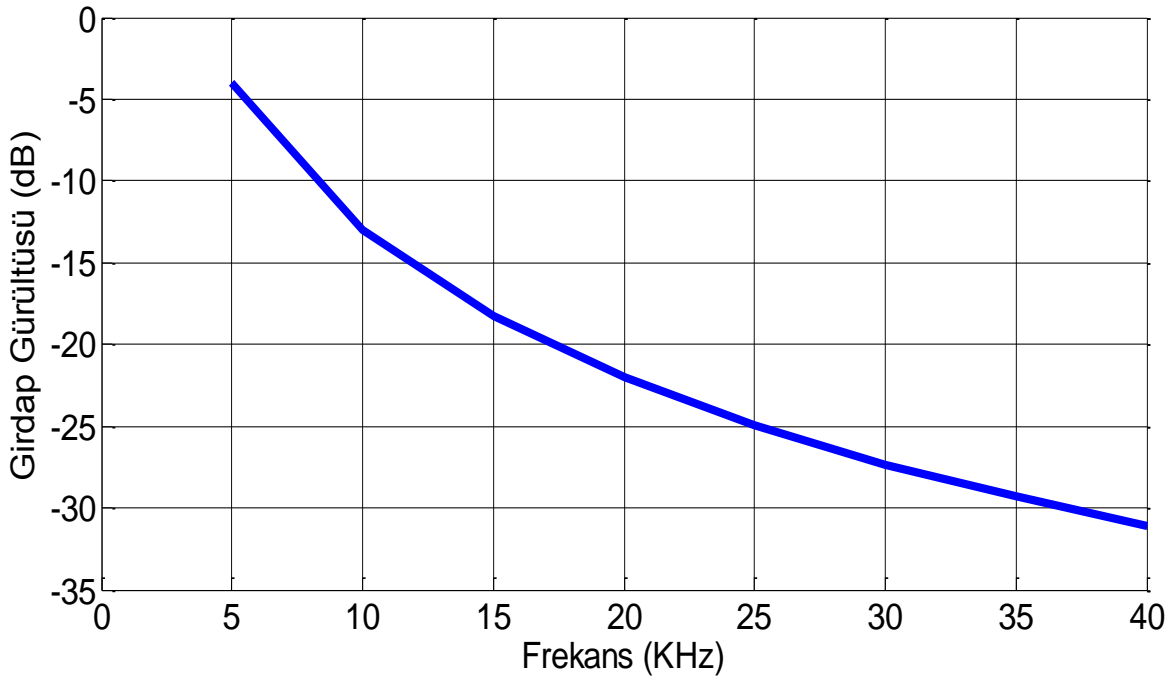
- Şekil 3.1.’de rüzgâr hızının artmasına bağlı olarak rüzgâr gürültüsünün de arttığı gözlenmiştir.
- Şekil 3.2.’de frekansın artmasına bağlı olarak gemi trafik gürültüsünün azaldığı gözlenmiştir.
- Şekil 3.3.’de frekansın artmasına bağlı olarak girdap gürültüsünün azaldığı gözlenmiştir.
- Şekil 3.4.’de karides çatırtı gürültüsünün frekansa bağlı grafiği çizdirilmiştir. Frekans attıkça karides gürültüsünün azaldığı gözlenmiştir.
- Şekil 3.5.’de frekansın artmasına bağlı olarak termal gürültünün arttığı gözlenmiştir.



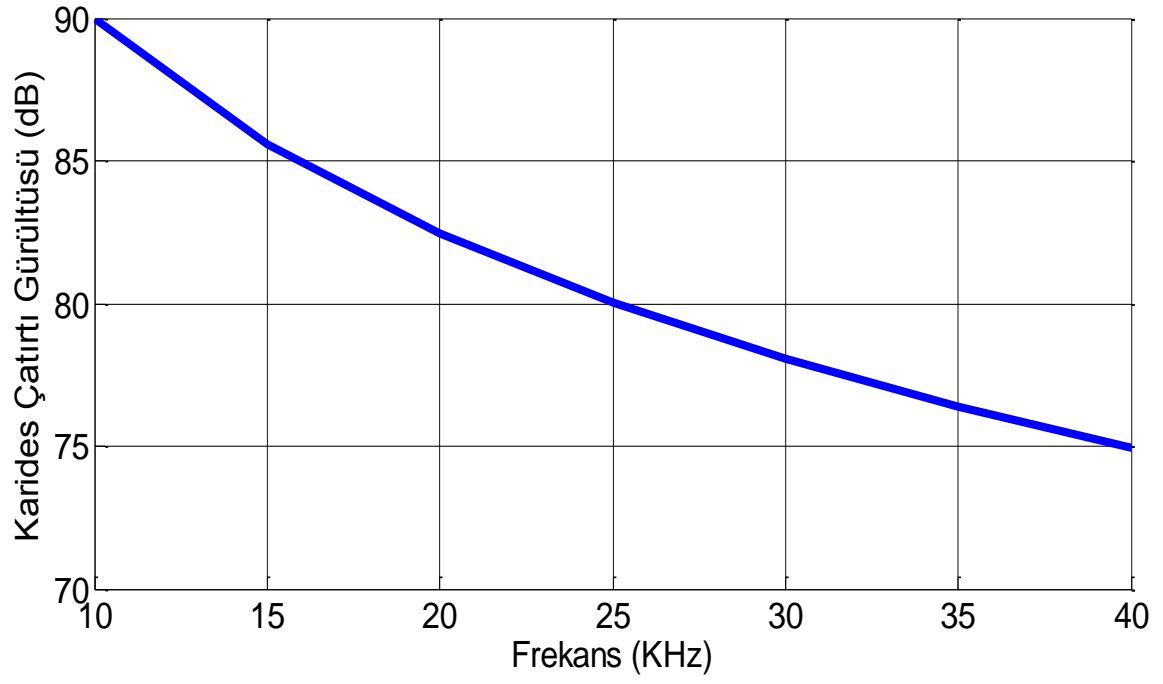
Şekil 3.1. Rüzgâr hızının rüzgâr gürültüsüne göre değişim grafiği (f=34.2KHz)



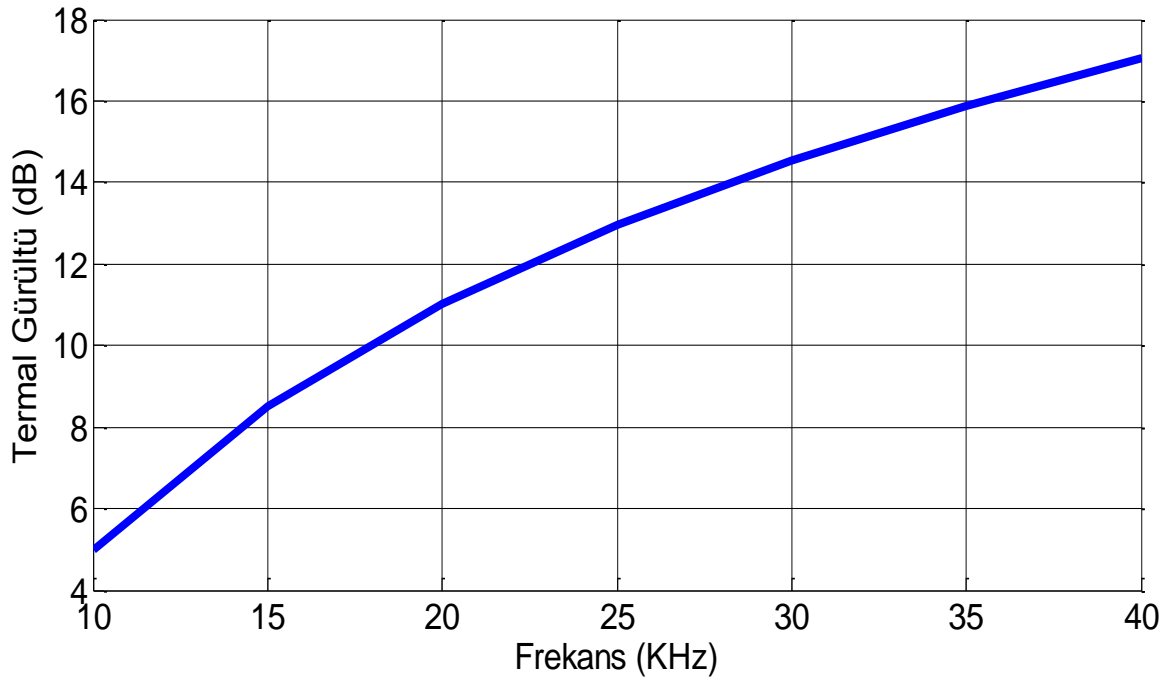
Şekil 3.2. Gemi trafik gürültüsünün frekansa bağlı değişim grafiği (gemi faktörü=0.9)



Şekil 3.3. Girdap gürültüsünün frekansa bağlı değişim grafiği



Şekil 3.4. Karides gürültüsünün frekansa bağlı değişim grafiği.



Şekil 3.5. Termal gürültünün frekansa bağlı değişim grafiği

3.2. Sualtı Akustik Haberleşme Kanalı Simülasyonu

Tablo 3.1.'deki değerler kullanılarak tasarlanan sualtı akustik kanalı simüle edilmiştir ve sıcaklık, tuzluluk, rüzgâr hızı, verici-alıcı arası yatay mesafelere göre sistem performansı grafikleri elde edilmiştir.

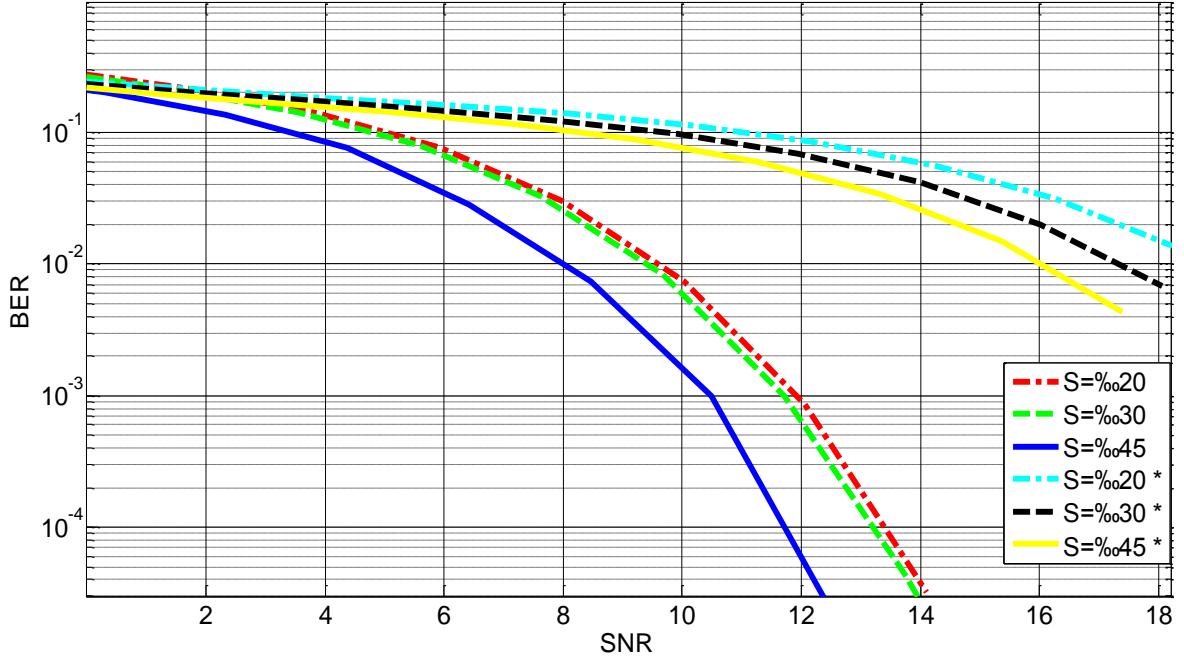
Tablo 3.1. Sualtı akustik haberleşme simülasyonunda kullanılan parametreler

Parametreler	Değerler
Kanal sayısı	2000
Maksimum bit oranı	2kbps
Modülasyon tipi	QPSK
Verici ve alıcı arasındaki yatay mesafe (R)	25m-2500m
Tuzluluk (S)	‰20-‰45
Deniz üstünden esen rüzgâr hızı (w_r)	5m/s-25m/s
Sıcaklık (T)	10°C-30°C
Bant genişliği (B)	20KHz-100KHz
Alıcı derinliği (z_a)	1m-40m
Verici derinliği (z_v)	2m-50m
Denizin maksimum derinliği (h)	4m-100m
Deniz suyunun pH değeri (ph)	7
Deniz suyu yoğunluğu (ρ_{deniz})	1000kg/m ³
Deniz tabanının yoğunluğu (ρ_{taban})	1800kg/m ³
Deniz tabanındaki ses hızı (c_{taban})	1300m/s
Denizdeki ses hızı (c_{deniz})	1500m/s

Tablo 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 ve 3.7'de gösterilmeyen parametreler tablo 3.1'de gösterilmiştir. Şekil 3.6, 3.7 ve 3.8'deki sualtı akustik haberleşme başarımları eğrilerinde '*' işaretini taşıyan parametrelerin denkleştirici olmadığı durumlarda ve bu işareti taşımayan parametrelerin ise denkleştirici olduğu durumlarda sistem performansını nasıl etkilediğini ifade edilmektedir.

Tablo 3.2. Deniz suyu tuzluluğu değeri değışirken, sabit alınan parametreler

Parametreler	Değerler
Verici ve alıcı arasındaki yatay mesafe (R)	1000m
Tuzluluk (S)	‰20, ‰30, ‰45
Deniz üstünden esen rüzgâr hızı (wr)	1m/s
Sıcaklık (T)	10°C
Merkez frekansı	34,2KHz
Alıcı düşey derinliği	10m
Verici düşey derinliği	15m
Denizin maksimum derinliği	20m

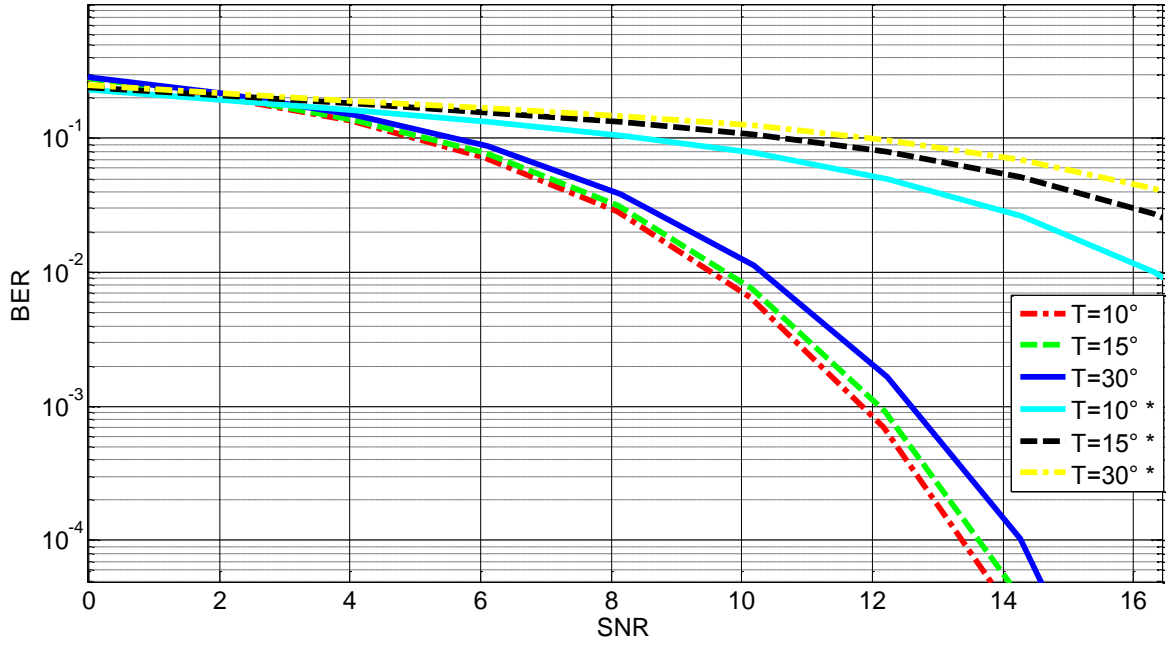


Şekil 3.6. Deniz suyu tuzluluğunun sualtı akustik sistem başarımına etkisi

Şekil 3.6. da görüldüğü gibi deniz suyu tuzluluğundaki artış sistem performansını olumlu etkilemektedir. Tuz oranı daha fazla olan denizlerde sualtı akustik haberleşme performansı daha yüksek olacaktır. ‰20'lik tuz oranından ‰45'lik tuz oranına çıkılınca bu durum sistem performansında (denkleştiricili olan durumda) yaklaşık olarak 2dB'lik bir artışa neden olacaktır.

Tablo 3.3. Deniz suyu sıcaklığı değişirken, sabit alınan parametreler

Parametreler	Değerler
Verici ve alıcı arasındaki yatay mesafe (R)	1000m
Tuzluluk (S)	‰10
Deniz üstünden esen rüzgâr hızı (w_r)	1m/s
Sıcaklık (T)	10°C, 15°C, 30°C
Merkez frekansı	34,2KHz
Alıcı düşey derinliği	10m
Verici düşey derinliği	15m
Denizin maksimum derinliği	20m

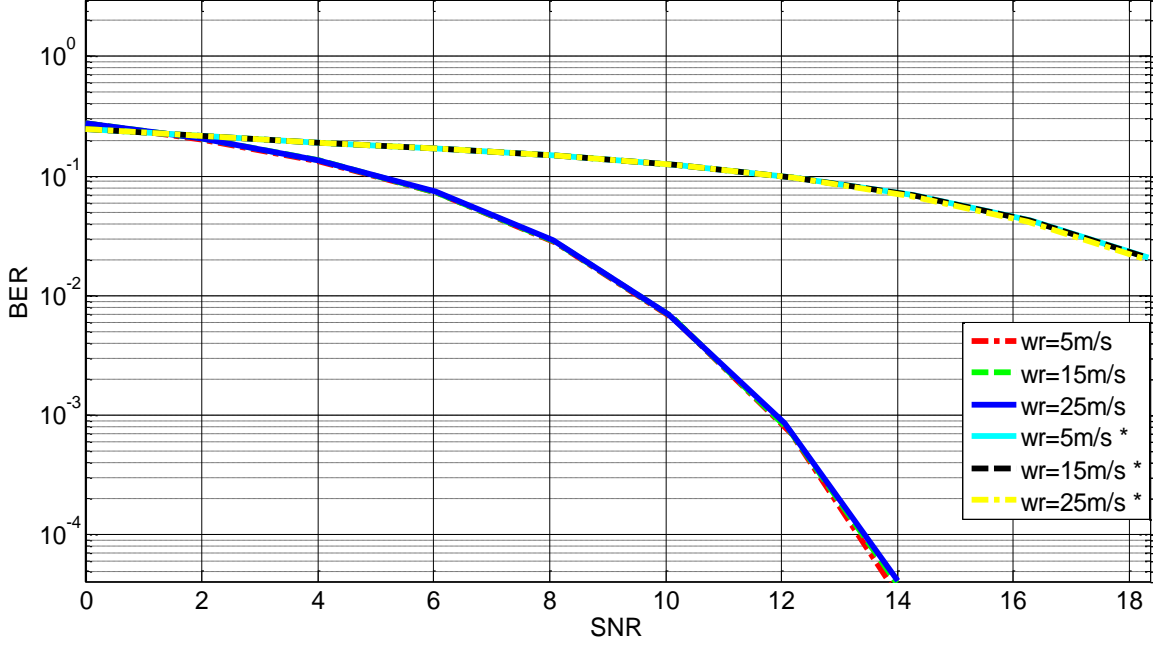


Şekil 3.7. Deniz suyu sıcaklığının sualtı akustik sistem başarımına etkisi

Şekil 3.7 de görüldüğü gibi deniz suyu sıcaklığındaki artış sistem performansını olumsuz etkilemektedir. Sıcaklığı daha az olan denizlerde sualtı akustik haberleşme performansı daha yüksek olacaktır. Sıcaklığı 10°C'den 30°C'ye çıkartınca bu durum sistem performansında (denkleştiricili olan durumda) yaklaşık olarak 1dB'lik bir azalmaya neden olacaktır.

Tablo 3.4. Deniz suyu üstünden esen rüzgâr hızı değişirken, sabit alınan parametreler

Parametreler	Değerler
Verici ve alıcı arasındaki yatay mesafe (R)	1000m
Tuzluluk (S)	‰10
Deniz üstünden esen rüzgâr hızı (w_r)	5m/s, 15m/s, 25m/s
Sıcaklık (T)	10°C
Merkez frekansı	34,2KHz
Alıcı düşey derinliği	10m
Verici düşey derinliği	15m
Denizin maksimum derinliği	20m



Şekil 3.8. Deniz üstünden esen rüzgâr hızının sualtı akustik sistem başarımına etkisi

Şekil 3.8’de denizin üstünden esen rüzgâr hızının sistem performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Rüzgâr hızlarındaki küçük değişimler sistem performansını ciddi bir şekilde etkilememektedir. Şiddetli kasırga, fırtına veya hortum gibi rüzgâr hızının ciddi derecede yüksek olduğu hızlarda, rüzgâr hızının sistem performansına olan etkisi göz ardı edilemez.

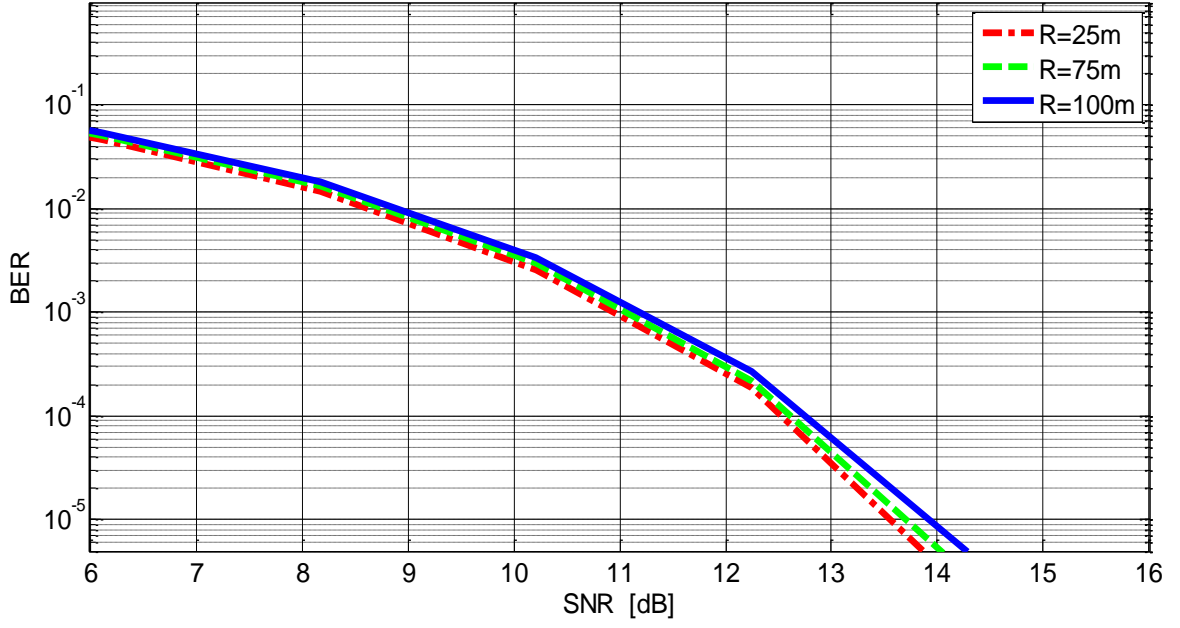
Bu kısma kadar olan sonuçlarda deniz suyu tuzluluğu olan S, deniz suyu sıcaklığı olan T ve deniz suyu üstünden esen rüzgâr hızı olan w_r ’nin denizaltı akustik haberleşme başarımına olan etkileri incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken öncelikle sistem başarımı

yalın olarak (denkleştiricisiz) incelenmiş ve sonuçlar şekil 3.6, 3.7 ve 3.8’de ‘*’ işaretli olan parametrelerin oluşturduğu eğriler ile gösterilmiştir. Ancak sistemin başarımı kaliteli haberleşme için oldukça düşük olduğundan dolayı sistem başarımını düzeltmek için geri beslemeli denkleştirici kullanılmıştır ve denkleştirici kullanılmış sistem sonucu oluşan başarımlar eğrileri şekil 3.6, 3.7 ve 3.8’de gösterilmiştir.

Şekil 3.9’da deniz derinliği 4m iken oluşan sistem performansı verilmiştir. Eşitlik (2.18)’deki sıg su koşulunun sağlanması için verici ve alıcı arasındaki mesafe 25m-100m (kısa mesafe) aralığında alınmıştır. Mesafe değişimine bağlı olarak da eşitlik (2.17)’deki merkez frekans eşitliğine göre, merkez frekanslar elde edilmiştir. Yani verici ve alıcı arası mesafenin suyun derinliğiyle olan ilişkisini gösteren eşitlik (2.18)’deki sınırlama ve bu mesafenin merkez frekansıyla olan değişimini gösteren eşitlik (2.17)’ye göre yeni verici düşey derinliği, alıcı düşey derinliği ve deniz maksimum derinliği belirlenmiş ve bu değerler Tablo 3.5’de gösterilmiştir. Bu kısımda yapılan simülasyonlar denkleştirici olmadan kötü bir performans alındığı için denkleştirici kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 3.5. Verici ve alıcı arası kısa mesafe için parametreler

Parametreler	Değerler
Alıcı düşey derinliği	1m
Verici düşey derinliği	2m
Denizin maksimum derinliği	4m
Tuzluluk (S)	‰10
Deniz üstünden esen rüzgâr hızı (wr)	1m/s
Sıcaklık (T)	10°C
Verici ve alıcı arasındaki yatay mesafe (R)	25m, 75m, 100m



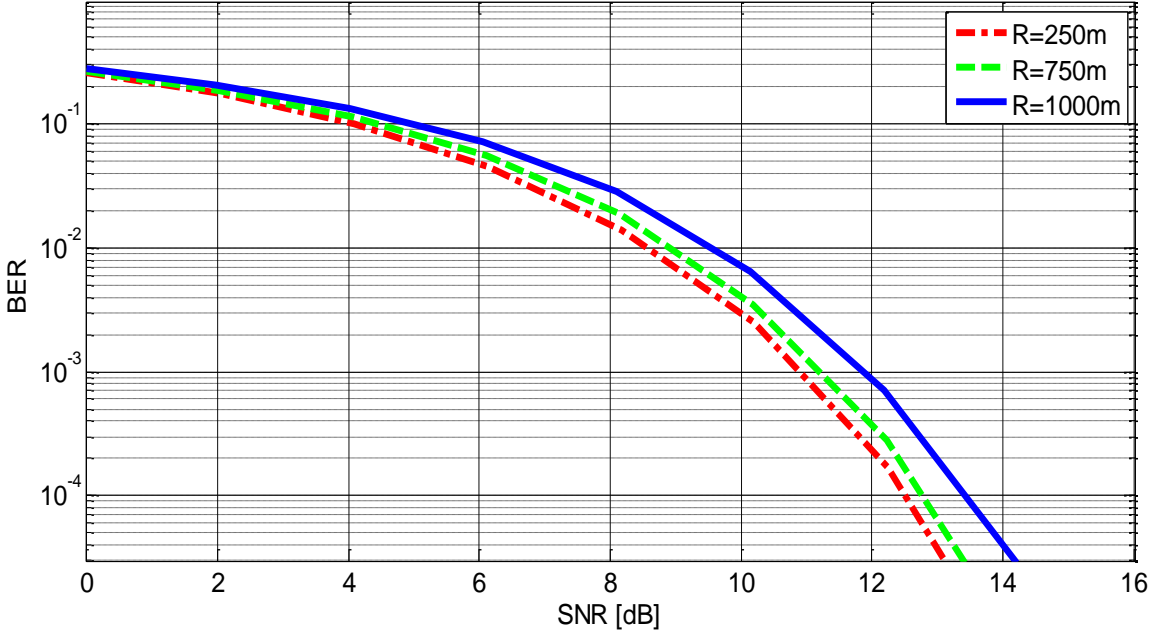
Şekil 3.9. Deniz derinliği 4m için, verici ve alıcı arasındaki kısa mesafenin sualtı akustik sistem başarımına etkisi

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi kısa mesafede (25-100m) verici ve alıcı arasındaki yatay mesafenin 25m'den 100m'ye artması sonucunda sistem performansında yaklaşık 0,5dB'lik bir azalma gözlemlendi.

Deniz derinliği ve dolayısıyla verici ve alıcı derinliklerini artırıp sistem performansının bu durumdan nasıl etkilendiğini görmek için yapılan simülasyon sonucu şekil 3.10 elde edilmiştir. Verici ve alıcı derinliklerinin artırılması sonucu eşitlik (2.18)'in yani sıg su koşulunun sağlanabilmesi için verici ve alıcı arası yatay mesafenin artırılması gerekti. Bu nedenle yatay mesafe 250m-1000m (orta mesafe) aralığında alındı. Verici ve alıcı arası yatay mesafe artırıldığında ise eşitlik (2.17)'ye göre merkez frekanslar azaldı. Bu nedenle gerekli koşulların sağlanabilmesi amacıyla bazı parametreler değiştirilip tablo 3.6'daki gibi alınmıştır.

Tablo 3.6. Verici ve alıcı orta mesafe için parametreler

Parametreler	Değerler
Alıcı düşey derinliği	10m
Verici düşey derinliği	15m
Denizin maksimum derinliği	20m
S (Tuzluluk)	‰10
w _r (Deniz üstünden esen rüzgâr hızı)	1m/s
T (Sıcaklık)	10°C
Verici ve alıcı arasındaki yatay mesafe (R)	250m, 750m, 1000m



Şekil 3.10. Deniz derinliği 20m, için verici ve alıcı arasındaki orta mesafenin sualtı akustik sistem başarımına etkisi

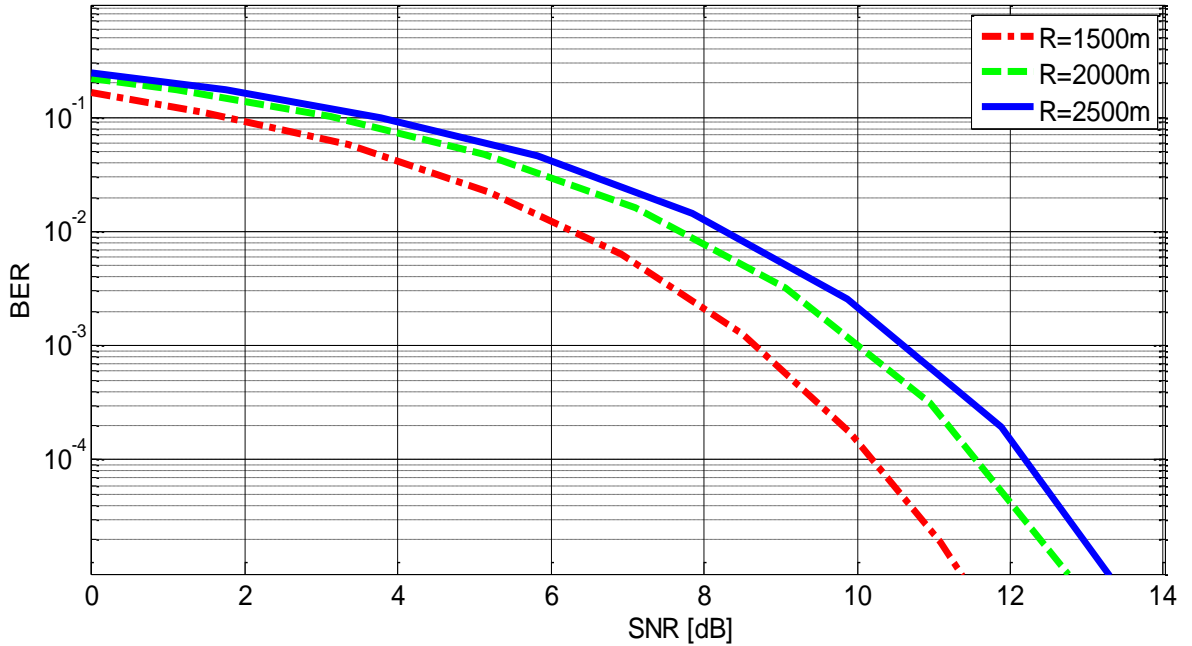
Şekil 3.10 da görüldüğü gibi orta mesafede (250-1000m) verici ve alıcı arasındaki yatay mesafenin 250m'den 1000m'ye artması sonucunda sistem performansı yaklaşık 1dB civarı azalır.

Deniz derinliği ve dolayısıyla verici ve alıcı derinliklerini artırıp sistem performansının bu durumdan nasıl etkilendiğini görmek için yapılan diğer bir simülasyon sonucu şekil 3.11 elde edilmiştir. Verici ve alıcı derinliklerinin artırılması sonucu eşitlik (2.18)'in yani sığ su koşulunun sağlanabilmesi için verici ve alıcı arası yatay mesafenin

artırılması gerekti. Bu nedenle yatay mesafe 1500m-2500m (uzun mesafe) aralığında alındı. Verici ve alıcı arası yatay mesafe artırıldığında ise eşitlik (2.17)'ye göre merkez frekanslar azaldı. Bu nedenle gerekli koşulların sağlanabilmesi amacıyla bazı parametreler değiştirilip tablo 3.7'deki gibi alınmıştır.

Tablo 3.7. Verici ve alıcı uzun mesafe için parametreler

Parametreler	Değerler
Alıcı düşey derinliği	40m
Verici düşey derinliği	50m
Denizin maksimum derinliği	100m
S (Tuzluluk)	‰10
w _r (Deniz üstünden esen rüzgâr hızı)	1m/s
T (Sıcaklık)	10°C
Verici ve alıcı arasındaki yatay mesafe (R)	1500m, 2000m, 2500m



Şekil 3.11. Deniz derinliği 100m, için verici ve alıcı arasındaki uzun mesafenin sualtı akustik sistem başarımına etkisi

Şekil 3.11'de görüldüğü gibi uzun mesafede (1500m-2500m) verici ve alıcı arasındaki yatay mesafenin 1500m'den 2500m'ye artması sonucunda sistem performansı yaklaşık 2dB azalır.

Şekil 3.6, şekil 3.7, şekil 3.8, şekil 3.9, şekil 3.10 ve şekil 3.11'in yorumları aşağıdaki gibidir.

1- Deniz suyundaki tuzluluk oranı arttıkça, bu durumun sistem performansında olumlu bir etki oluşturduğu gözlemlendi.

2- Deniz suyu sıcaklığındaki artışın sistem performansında olumsuz bir etki oluşturduğu gözlemlendi.

3-Denizin üstünde esen rüzgâr hızındaki artışla beraber sistem performansında çok az bir düşüş gözlemlendi (rüzgâr hızı ciddi değerlerde değilse yani kasırga veya hortum gibi durumlar yoksa rüzgâr hızının sistem performansına etkisi çok az olmaktadır).

4-Yalın olarak sualtı akustik haberleşme kanalı kaliteli bir haberleşmeye olanak vermediğinden dolayı sistemde karar geribeslemeli denkleştirici kullanılmıştır.

5-Şekil 3.9.'da eşitlik (2.17) ve eşitlik (2.18) göz önünde bulundurularak denizin derinliği 4m alındı ve kısa mesafe için sistem performansı gözlemlendi. Şekil 3.10'da ise deniz derinliği artırılarak 20m'ye çıkartıldı bu durumda, eşitlik (2.18)'deki sıg su koşulunun sağlanabilmesi için verici ve alıcı arası mesafe artırıldı. Bu mesafe artırılınca eşitlik (2.17)'den dolayı merkez frekans değeri azaldı. Aynı ilişki şekil 3.10 ve şekil 3.11 arasında da vardır.

6-Verici alıcı arası mesafeyi dikkate almazsak, deniz parametreleri içinde sualtı akustik haberleşme performansını en fazla deniz suyu tuzluluğunun sonra ise deniz suyu sıcaklığının etkilediği görülmektedir.

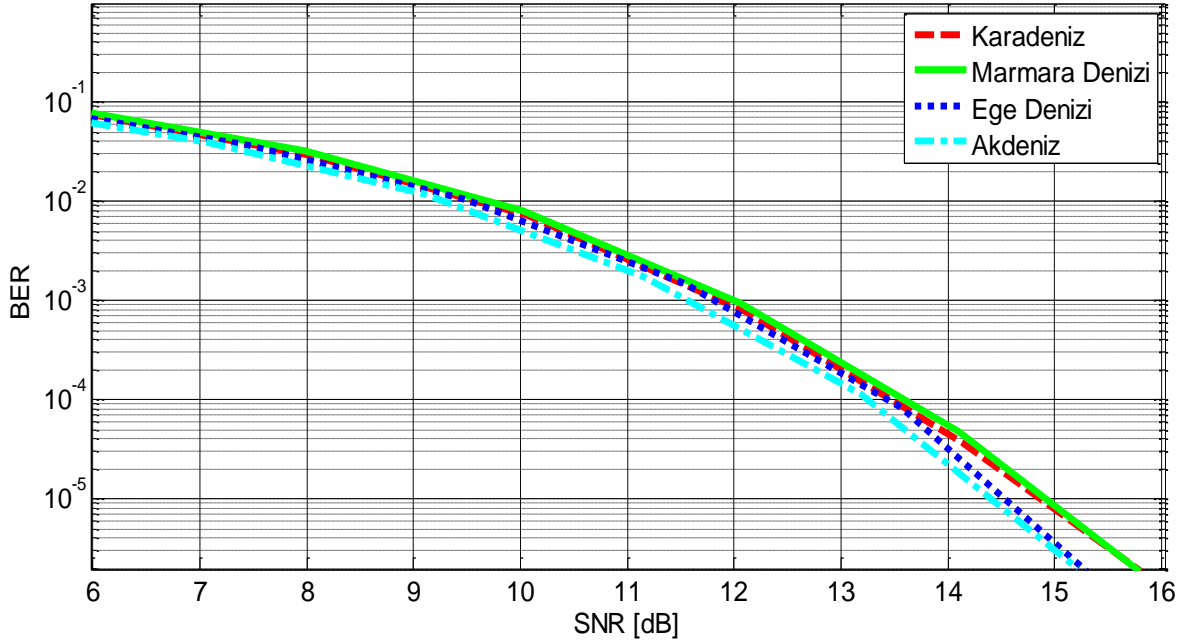
Tablo 3.8. Türkiye denizlerinin tuzluluk oranları ve yıllık ortalama sıcaklıkları

Deniz	Tuzluluk Oranı (‰)	Yıllık Ortalama Sıcaklık (°C)
Karadeniz	18	10,1–15
Marmara Denizi	22	12,6–15
Ege Denizi	38	15,1–17,5
Akdeniz	43	17,6–20

Bu sonuçlar ve tablo 3.8 göz önüne alınırsa [41], [42];

Deniz suyu sıcaklığı ve deniz üstünden esen rüzgârın hızının az, deniz suyu tuzluluk oranının ise fazla olduğu denizler sualtı akustik haberleşme performansı açısından verimli denizlerdir.

Eğer sadece deniz suyu sıcaklığı açısından sistem ele alınırsa en düşük yıllık ortalama sıcaklığı $10,1^{\circ}\text{C}$ olduğundan dolayı sualtı akustik haberleşme sistemi performansı açısından en verimli deniz Karadeniz. Eğer sadece deniz suyu tuzluluğu açısından sistem ele alınırsa tuzluluk oranı %43 olduğundan dolayı sualtı akustik haberleşme sistemi performansı açısından en verimli deniz Akdeniz olacaktır. Sıcaklık ve tuzluluk parametrelerinin ikisi de aynı anda ele alınırsa, tuzluluk parametresinin sualtı akustik sisteme etkisi sıcaklığa göre daha baskın olduğundan sualtı akustik haberleşme sistemi performansı açısından en verimli deniz Akdeniz olacaktır. Türkiye de deniz üstünden esen rüzgâr hızları oldukça düşük olup ortalama olarak 2m/s - 3m/s civarında [43] olduklarından dolayı sualtı akustik haberleşme sistemi performansına olan etkileri ihmal edilebilir. Türkiye denizlerinin sualtı akustik haberleşme sistemi performans kıyaslaması şekil 3.12’de verilmiştir. Bu grafik elde edilirken, tablo 3.8’deki veriler ve tablo 3.6 ($R=1000\text{m}$ için)’daki parametreler kullanılmıştır.



Şekil 3.12. Türkiye denizlerinin sualtı akustik haberleşme sistemi başarımları

4. TARTIŞMA

Genel literatür sonuçlarıyla uyumlu olarak sualtı akustik haberleşme sisteminde de diğer haberleşme sistemlerinde olduğu gibi verici ve alıcı arası mesafenin artırılması sonucu sistem performansında azalma gözlemlendi. Özel sonuçlar olarak; deniz suyu sıcaklığının ve deniz üstünden esen rüzgâr hızının artması sonucu sistem performansında azalma, deniz suyu tuzluluğunun artmasıyla ise sistem performansında artma gözlenmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, deniz parametrelerine (sıcaklık, tuzluluk ve deniz üstündeki rüzgâr hızı), gürültülere (deniz üstünde rüzgâr-yağmur nedeniyle oluşan gürültüler, deniz altındaki biyolojik, termal, girdap, gemi trafiği gürültüleri), zayıflatmalara (denizin yapısından kaynaklanan zayıflatmalar ve küresel yayılım zayıflatması), alıcı-verici derinliklerine ve alıcı-verici arası yatay mesafelere dayanarak denizaltı akustik haberleşme kanalı oluşturulmuştur. Bu sistemin performansının deniz parametrelerine bağlı olarak nasıl değiştiği bulgular bölümünde grafiklerle ve sayısal verilerle gösterilmiştir. Deniz suyu sıcaklığındaki artışın sistem performansında olumsuz bir etkiye yol açtığı gözlenmiştir. Deniz üstünde esen rüzgâr hızının sistem performansında olumsuz bir etkiye yol açtığı gözlenmiştir (büyük rüzgâr hızları için). Deniz suyu tuzluluğundaki artışın ise sistem performansını artırdığı gözlendi. Deniz derinliğinin artması sonucu artan verici ve alıcı arası mesafenin sistem performansı üzerinde olumsuz bir etkisi olmaktadır. Ancak bu mesafe, sığ su koşulları ve merkez frekansı göz önüne alınarak seçilmiştir. Verici ve alıcı arası yatay mesafeyi göz önüne almazsak (mesafenin artmasıyla sistem performansının azalacağı genel ve bilinen bir sonuçtur), sualtı akustik haberleşme performansını, deniz parametreleri içinde en çok deniz suyu tuzluluğunun (sistem performansını olumlu yönde etkilemektedir) sonra ise deniz suyu sıcaklığının (sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir) değiştirdiği gözlendi.

6. ÖNERİLER

Yapılan bu sualtı akustik haberleşme simülasyon çalışmasında, modülasyon türü değiştirilebilir. Başka denizlerde deniz parametreleri daha farklı olacağından, diğer denizler için yeni çalışmalar yapılabilir veya tatlı su (göl) için ayrı bir çalışma yapılabilir. Sualtı akustik modem alınarak bu teorik sonuçların pratik sonuçlarla karşılaştırması yapılabilir. Doppler kayması ve deniz tabanı tipi durumları değerlendirilerek çalışmaya katılabilir. Sistem performansını daha iyi hale getirebilmek için verici tarafta kodlayıcı ve alıcı tarafta dekodlayıcı kullanılabilir.

7. KAYNAKLAR

1. Farr, N., Bowen, A., Ware, J., Pontbriand, C. and Tivey, M., An integrated, underwater optical /acoustic communications system, Oceans 2010 IEEE, Mayıs 2010,Sydney, Bildiriler Kitabı: 1-6
2. Blackmon, F. and Antonelli, L., Remote, Aerial, Trans-Layer, Linear and Non-Linear Downlink Underwater Acoustic –Communication, Oceans 2006 IEEE, Eylül 2006, Boston, Bildiriler Kitabı: 1-7.
3. Linton, L., Conder, P. and Faulkner, M., Multiple-Access Communications for Underwater Acoustic Sensor Networks using OFDM-IDMA, MTS, Biloxi, Ekim 2009, Bildiriler Kitabı:1-8.
4. Jinjin, W., Ping, C. and Dong, Y., An Underwater Acoustic Channel Simulator for UUV Communication Performance Testing, International Conference on Information and Automation IEEE, Harbin, Haziran 2010, Bildiriler Kitabı: 2286-2290.
5. Plueddemann, A., Kukulya, A., Stokey, R. and Freitag, L., Autonomous Underwater Vehicle Operations Beneath Coastal Sea Ice, IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 17, 1 (2012) 54-64.
6. Emokpae, L. and Younis, M., Surface Based Underwater Communications, Global Telecommunications Conference IEEE, Aralık 2010, Miami, Bildiriler Kitabı: 1-6.
7. Benson, C., Ryan, M. and Frater, M., High-Frequency Underwater Acoustic Communication Development System, OCEANS 2011 IEEE, Eylül 2011, Waikoloa, Bildiriler Kitabı: 1-3.
8. Yoong, H., Yeo, K., Teo, K. and Wong, W., Modeling of Acoustic Channel for Underwater Wireless Communication System in AUV Application, 14th International Conference on Modelling and Simulation, Mart 2012, Cambridge, Bildiriler Kitabı: 603-607.
9. Rango, F., Veltri, F. and Fazio, P., A Multipath Fading Channel Model for Underwater Shallow Acoustic Communications, IEEE International Conference on Communications (ICC), Haziran 2012, Ottawa, Bildiriler Kitabı: 3811-3815.
10. Kuzlu, M., Dinçer H. and Öztürk Sıtkı, DSP implementation of underwater communication using SSB modulation with random carrier frequencies, Scientific Research and Essays, 5, 10 (2010) 1084-1099.
11. Kuzlu, M., Dinçer H. ve Öztürk Sıtkı, Sualtı Haberleşmesi Alıcı Ön Yükselteç Tasarımı, IEEE 18.Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU), Nisan 2010, Diyarbakır, Bildiriler Kitabı: 37-40.

12. Azizul, H., Quazi and William L. Konrad, Underwater acoustic communications, IEEE Communications Magazine, 20 (1989) 24-30.
13. Zhiqiang, W., Jiadong, X. and Bin, L., High-speed Digital Underwater Communication Solution Using Electric Current Method, 2nd International Conference on Future Computer and Communication, Mayıs 2010, Wuhan, Bildiriler Kitabı: 14-16.
14. Nasrı, N., Kachouri, A., Andrieux, L. and Samet, M., Design Considerations For Wireless Underwater Communication Transceiver, International Conference on Signals, Circuits and Systems, Kasım 2008, Monastir, Bildiriler Kitabı: 1-5.
15. Evologics Underwater Acoustic Communication System, S2CR 48/78 Product Information, http://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cr_48_78.html, 6 Mart 2013.
16. L-3 Communication SeaBeam Instruments, <http://www.Ideo.columbia.edu/res/pi/MB-System/sonarfunction/SeaBeamMultibeamTheoryOperaiton.pdf>, 6 Mart 2013.
17. Istepanian, R. and Stojanovic, M., Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
18. Medwin, H., Sounds In the Sea, From Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography, Cambridge University Press, New York, 2005.
19. Hodges, R., Underwater Acoustics, Analysis, Design and Performance of Sonar, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2010.
20. Bahar, M., Durukanoğlu, H. ve Erüz, Ç., Denizel Ortamda Su Ürünlerinin Yetiştiriciliği Yapılacak Alanların Belirlenmesinde Su Sıcaklığının Önemi, Doğu Anadolu Bölgesi II. Su Ürünleri Sempozyumu, Haziran 1996, Erzurum, Bildiriler Kitabı: 681-690.
21. Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A. and Sanders, J., Fundamentals of Acoustics, Fourth Edition, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2010.
22. Brekhovskikh, L.M. and Lysanov, Yu.P., Fundamentals of Ocean Acoustics, Third Edition, Springer-Verlag New York, Inc., New York, 2003.
23. Randall, R., Development In Offshore Engineering, John B. Herbich(editor), Gulf Publishing Company, Texas, 1999.
24. Anjum, M., Underwater Acoustic Channel Modeling, Simulation, and Estimation, Proceedings of International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology, Islamabad, Şubat 2011, Pakistan, Bildiriler Kitabı: 10-13.

25. Raichel, D., *The Science And Applications Of Acoustics*, Second Edition, Springer, United States of America, 2006.
26. Medwin, H. and Clay, C., *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, United States of America, 1999.
27. Jensen, F., Kuperman, W., Porter, M. and Schmidt, H., *Computational Ocean Acoustics*, Springer-Verlag New York, Inc., New York, 2000.
28. Jones, A., Sendt, J., Duncan, A., Clarke, P. and Maggi, A., Modelling the acoustic reflection loss at the rough ocean surface, *Proceedings of acoustics, Kasım 2009, Australia, Bildiriler Kitabı*: 1-8.
29. Govilkar, S., *A Simulator for Microcontroller-based Underwater Ultrasonic Communications*, Yüksek Lisans Tezi, North Carolina State University, North Carolina, 2006.
30. Stefanov, A. and Stojanovic, M., Design and Performance Analysis of Underwater Acoustic Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29, 10 (2011) 2012-2021.
31. Stojanovic, M., Underwater Acoustic Communications: Design Considerations on the Physical Layer, *Wireless on Demand Network Systems and Services (WONS)*, Ocak 2008, Garmisch-Partenkirchen, *Bildiriler Kitabı*: 1-10.
32. Raichel, D., *The Science and Applications of Acoustics*, Springer Science+Business Media Inc., United States of America, 2006.
33. Costa, E. and Medeiros, E., Numerical Modelling and Simulation of Acoustic Propagation in Shallow Water, *de Mecánica Computacional, XXIX*, Kasım 2010, Buenos Aires, Argentina, *Bildiriler Kitabı*: 2216-2228
34. Zielinski, A., Coates, R., Wang, L. and Saleh, A., High Rate Shallow Water Acoustic Communication, *Oceans'93. Engineering in Harmony with Ocean Proceedings*, Ekim 1993, Victoria, *Bildiriler Kitabı*: 432-437.
35. Zielinski, A., Wu, Y., Performance Analysis of Digital Acoustic Communication in a Shallow Water Channel, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 20, 4 (1995) 293-299.
36. Stojanovic, M. and Preisig, J., Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization, *IEEE Communications Magazine*, 47, 1 (2009) 84-89.
37. He, C., Huang, J., and Zhang, Q., Research on Bandwidth Efficient Underwater Acoustic Communications, *TENCON 2010*, Kasım 2010, Fukuoka, *Bildiriler Kitabı*: 742-745.

38. ERTÜRK, S., Sayısal Haberleşme, Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Müh., Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
39. Proakis, J., Digital Communications Fourth Edition, McGraw- Hill Book Company, New York, 2001.
40. Batra, A., Zeidler, J. and Beex, A., Mitigation of Narrowband Interference Using Adaptive Equalizers, 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Eylül 2006, Florence, Italy.
41. Can, M., Etemoğlu, A., ve Avcı, A., Deniz Suyundan Tatlı Su Eldesinin Teknik ve Ekonomik Analizi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, 7, 1 (2002) 147-160.
42. Demircan, M., 2011 Yılı Sıcaklıklarının Analizi, Klimatoloji Şube Müdürlüğü, <http://www.mgm.gov.tr/FILES/ziraat/2011yiliSicakliklarininAnalizi.pdf>, 10 Ekim 2012.
43. İlkılıç, C., Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Kullanımı, Mühendis ve Makine Dergisi, 7 (2006) 26-32.

ÖZGEÇMİŞ

Yiğit MAHMUTOĞLU 1987 Rize doğumludur. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü 2010 yılında başarılı bir derece ile bitirmiştir. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Elektronik dalında yüksek lisans yapmaktadır. Aynı zamanda bu bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Elektronik dalında yaptığı yüksek lisansın bir kısmını (3 ay) İsveç Halmstad Üniversitesinde sürdürmüş olup iyi derecede İngilizce bilmektedir.