

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZAMANSAL ÇOKLAMA YÖNTEMİYLE KÜÇÜK BOYUTLARDA CAM
ELYAF POLİMER KATKILI MANDREL TABANLI FİBER OPTİK AKUSTİK
ALGILAYICILARLA DİZİN OLUŞTURULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emrah İLBEY

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hamza KURT

ARALIK 2021

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Emrah İlbey

ÖZET

Yüksek Lisans

ZAMANSAL ÇOKLAMA YÖNTEMİYLE KÜÇÜK BOYUTLARDA CAM ELYAF KATKILI POLİMER MANDREL TABANLI FİBER OPTİK AKUSTİK ALGILAYICILARLA DİZİN OLUŞTURULMASI

Emrah İlbey

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza Kurt

Tarih: Aralık 2021

Akustik basınç algılama için konvansiyonel yöntemlerde piezo elektrik tabanlı seramikler kullanılmaktadır. Fakat, düşük bütçe, küçük ebat, yüksek hassasiyet ve en önemlisi elektromanyetik girişimlerden etkilenmemesi sebebiyle fiber optik sistemler, akustik ölçümlerde kullanılmaya başlanılmıştır. Fiber optik tabanlı akustik sistemler, liman gözetleme, askeri gemilerde çekili dizin sonarı ve yan dizin sonarı gibi pek çok alanda konvansiyonel sonar çözümlerine alternatif oluşturmaktadır. Askeri alanlardaki başarısının yanısıra fiber optik sistemler deniz altında petrol/gaz arama çalışmaları ve sismik araştırmalarda da kullanılmaktadır.

Fiber tabanlı akustik algılama için dünyada FBG (Fiber Bragg Grating) teknolojisi ve mandrel tabanlı girişim (interforemetrik) sistemler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Yüksek hassasiyeti sebebiyle mandrel tabanlı Mach-Zehnder girişim sistemi bu tez kapsamında tercih edilmiştir. Bu yöndeki bir sistemde lazer ışığı fiber içerisinde iki kısma ayrılmaktadır. Lazer ışığının bir kısmı referans mandrele sarılı fibere giderken diğer kol ise üzerine gelen

akustik basınca tepki veren sensör mandrel üzerine sarılı fibere gitmektedir. İki kol arasındaki faz farkı sensör mandrel üzerine gelen akustik dalga hakkında bilgi vermektedir. Tez kapsamında algılayıcı genel tasarımı yapılmış ve sensör kolu olarak kullanılan malzeme yapısı optimize edilmiştir. Farklı malzeme yapıları göz önünde bulundurularak sensör mandrel yapısı analiz edilmiştir. Akustik basınç algılama hassasiyeti ve dayanıklılık göz önünde bulundurularak cam elyaf katkılı polimer (GFRP) sensör mandrel malzemesi olarak tercih edilmiştir. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda ulaşılabildiğimiz bilgi dahilinde çam elyaf katkılı bir polimerle bu yönde bir çalışmaya rastlanılmamıştır. İlk defa detaylandırılan bu çalışmaların sonuçları umut vericidir.

Bu yöndeki bir sistemde akustik bilginin çözümlenebilmesi için girişim düzeneğindeki sensör kolu ve referans kolu arasındaki faz farkı bilgisi elde edilmelidir. Akustik bilginin çözümlenmesinde çevresel etkilerden kaynaklı faz sönümlenmesinin de önüne geçebilmek için faz kaynaklı taşıyıcı (PGC, Phase Generated Carrier) yöntemi tez kapsamında kullanılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda yaklaşık -150 dB re rad/ μ P hassasiyete sahip fiber optik akustik algılayıcılar elde edilmiştir. Algılama için en önemli parametre olan gürültü seviyesi için hem modelleme yapılmış hem de gerçek veriler toplanmıştır. Çalışmalar sonucunda sistem gürültü seviyesinin 50 dB re μ P a/ $\sqrt{\text{Hz}}$ altında olduğu görülmüştür.

Son olarak bu yöndeki bir sistemin en önemli avantajı algılayıcıların aynı hat üzerinden kolayca çoklanabilmesidir. Bu kapsamda farklı alternatifler üzerine araştırmalar yapılmıştır. En önemli çoklama teknikleri Frekans Bölmeli Çoklama (FDM, Frequency Division Multiplexing), Dalgaboyu Bölmeli Çoklama (WDM, Wavelength Division Multiplexing) ve Zaman Bölmeli Çoklama (TDM, Time Division Multiplexing)'dir. Diğer çoklama yöntemlerine göre ebatların ve maliyetlerin düşmesi dolayısıyla TDM yöntemi tercih edilmiş bu yöntem üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fiber optik akustik algılayıcı, İnterferometrik sensörler, Akustik sinyal algılama, Akustik algılayıcı dizini

ABSTRACT

Master of Science

TIME DIVISION MULTIPLEXED ARRAY DEVELOPMENT BY USING
SMALL SIZE GLASS-FIBER REINFORCED POLYMER BASED FIBER
OPTIC ACOUSTIC SENSORS

Emrah İlbey

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Hamza Kurt

Date: December 2021

Fiber optic systems are well suited choice for underwater acoustic measurements with respect to conventional piezoelectric ceramic based systems. Main advantages of fiber optic systems are low cost, small size, light weight; high sensitivity and most importantly they are electromagnetic interference (EMI) free. Fiber optic interferometric acoustic systems have seen extensive development for military applications such as harbour protection sonars, towed array sonars, flank array sonars. and etc. Recently, due to the success in the military area, fiber optic interferometric acoustic sensors are also being used in commercial seabed sensing applications for oil/gas exploration and seismic research.

There are many techniques for sensing acoustic pressure like FBG (Fiber Bragg Grating) based and mandrel based Mach-Zehnder interferometer systems. However, because of its high responsivity, mandrel based Mach-Zehnder interferometer system has been preferred. In Mach-Zehnder interferometer system, laser light is split into the sensing and the reference

arm. Some part of the laser light pass through fiber wounded around reference mandrel, remaining pass through fiber wounded acoustic pressure sensitive sensor arm. Pahse difference between two arms gives information about acoustic wave. In this thesis, A full-detailed design has been done considering sensor mandrel material type. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) has been chosen because of its strength, durability and sensitivity. To the best of our knowledge there is no detailed work based Glass Fiber Reinforced Polymer based fiber optic acoustic system. The results of these studies, which were carried out for the first time, are promising

It is important to demodulate phase difference between reference and sensor arms. To decrease environmental effects and prevent phase fading, PGC (Phase Generated Carrier) method has been applied for the demodulation of the acoustic signal. As a result, we have demonstrated an high sensitive fiber optic underwater acoustic sensors. The pressure sensitivity of sensors are are around -150 dB re rad/ μ Pa. System noise level is both analyzed and measured and it is better than 50 dB re μ P a/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at low frequencies.

Finally, main advantage of fiber optic systems is that it is easy to increase number of sensors. For this reason, considerable efforts has been put for the development of various techniques. Some of the most recent techniques are frequency division multiplexing (FDM), wavelength division multiplexing (WDM) and time division multiplexing (TDM). We demonstrate a time division multiplexed sensor array because of advantages on cost and small dimension.

Keywords: Fiber optic acoustic sensors, Interferometric sensors, Acoustic pressure sensing, Acoustic sensor array

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Hamza Kurt ve Dr. Ihor Pavlov'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bana önderlik eden ve edindiğim bilgiler için ona borçlu olduğum İ.Levent Budunoğlu'na teşekkürlerimi borç bilirim. Çalıştığımız projelerde sadece işle ilgili değil birçok konuda yardım ettiği için de kendisine minnettarım.

Tez jürisinde yer alan ve tezim ile alakalı önerilerde bulunan Rohat Melik hocama da teşekkürü borç bilirim.

Destekleriyle bugüne kadar edindiğim bilgi birikimime katkısı olan Şaban Bilek, Ebru Bayri, Görkem Demir, Ekrem Şahin, Özge Turan Çılasın, Mehmet Can Kerse'ye teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | vi |
| TEŞEKKÜR | viii |
| İÇİNDEKİLER | ix |
| ŞEKİL LİSTESİ | x |
| ÇİZELGELİSTESİ | xii |
| KISALTMALAR | xiii |
| SEMBOL LİSTESİ | xiv |
| RESİMLİSTESİ | xv |
| 1 GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1 Tezin Amacı | 1 |
| 1.2 LiteratürAraştırması ve Teorik Çalışmalar | 2 |
| 1.2.1 Akustik Sinyal Algılama Yöntemleri | 2 |
| 1.2.2 Akustik Sinyalin Çözümlemesi | 5 |
| 1.2.3 Algılayıcı Çoklama Yöntemleri | 9 |
| 2 MANDREL TABANLI FİBER OPTİK AKUSTİK ALGILAYICI TASARIMI | 13 |
| 2.1 Amaç | 13 |
| 2.2 Tasarım ve Modelleme | 13 |
| 3 AKUSTİK SİNYALİN ÇÖZÜMLEMESİ | 23 |
| 3.1 Amaç | 23 |
| 3.2 Sinyal Çözümleme Mimarisi | 23 |
| 4 ALGILAYICI ÇOKLAMA..... | 29 |
| 4.1 Amaç | 29 |
| 4.2 Algılayıcı Çoklama Sistem Mimarisi | 29 |
| 5 TEST VE KAREKTARİZASYON | 34 |
| 5.1 Algılayıcı Karakterizasyonu | 34 |
| 5.2 Gürültü Karakterizasyonu | 37 |
| 6 SONUÇ | 44 |
| KAYNAKLAR | 46 |
| ÖZGEÇMİŞ | 52 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1 : Tipik Mach-Zehnder düzeneği..... | 1 |
| Şekil 1.2 : FBG yapısı ile lazer etkileşimin grafik gösterimi. Geniş bantlı ışık kaynağı FBG yapıları tarafından filrelenir. Gratingler arası mesafeye göre belli dalga boyundaki ışık geri yansırken gerisi olduğu gibi fiber içerisinden geçmektedir. | 3 |
| Şekil 1.3 : Mandrel tabanlı Mach-Zehnder girişim düzeneği örneği..... | 4 |
| Şekil 1.4 : Mandrel yapısı örneği..... | 4 |
| Şekil 1.5 : Interferometre çıktısı. ϕ_e çevresel etkilerden kaynaklı faz bayası gösterirken $d\phi$, interferometrenin iki kolu arasındaki faz farkını göstermektedir. ϕ_e , $2\pi n$ ve $2\pi(n+1)$ etrafındayken faz sönümlenmesi meydana gelmektedir. | 6 |
| Şekil 1.6 : PGC demodulasyonu. İlk adımda taşıyıcı PGC sinyalinin harmoniklerini aşağı frekansa taşıma (downconversion) ike ikinci adımda yöntemiyle sinüs ve cosinüs terimlerinin arktanjanı alınır. Üçüncü adımda ise faz sayımı yapılmaktadır. | 8 |
| Şekil 1.7 : MxN FDM sistemi genel mimarisi..... | 10 |
| Şekil 1.8 : WDM çoklama genel mimarisi..... | 10 |
| Şekil 1.9 : TDM çoklama genel mimarisi..... | 11 |
| Şekil 1.10 : WDM-TDM hibrit çoklama genel mimarisi..... | 12 |
| Şekil 2.1 : Farklı frekanslardaki akustik dalganın farklı ortamlardaki kaybı .. | 14 |
| Şekil 2.2 : Farklı Tasarlanan algılayıcı görünümü | 15 |
| Şekil 2.3 : Tasarlanan algılayıcı detay görünümü | 16 |
| Şekil 2.4 : Algılayıcı COMSOL 1/8 modeli..... | 17 |
| Şekil 2.5 Sensör mandrel malzemesine göre hassasiyet sonuçları | 18 |
| Şekil 2.6 :5 kHz'de algılayıcının yönlülük grafiği | 19 |
| Şekil 2.7 :Yönlülük analizi 0 derece yönü. 0 dereceden 90 dereceye doğru hareket ederken z eksenini boyunca açı değiştirilmiştir. | 20 |
| Şekil 2.8 : Geniş bant hassasiyet grafiği | 21 |
| Şekil 3.1 : Sistem Genel Mimarisi | 23 |
| Şekil 3.2 : Faz modülatörünün basit gösterimi. Elektro optik kristale giriş sinyali polarizedir. Kristalin alt ve üstünde bulunan elektrotlar yardımıyla kristale elektriksel alan verilmektedir. | 25 |
| Şekil 4.1 : Dedektör sonrası lazer atım uzunluğu. Yaklaşık 100 ns olarak lazer atımlarının sürüldüğü görülmüştür..... | 30 |
| Şekil 4.2 : TDM metodou için üretilmiş lazer atımlarının zamansal görüntüsü | 30 |
| Şekil 4.3 : Lazer atımları, PGC sinyali ve akustik sinyalin gösterimi | 31 |
| Şekil 4.4 : Çoklama sonrası sistem genel mimarisi | 32 |
| Şekil 5.1 : Algılayıcı hassasiyet ölçüm test düzeneği. Burada K: Akustik Kaynak, R: Referans Hidrofon F: Fiber Optik Algılayıcı | 35 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.2 : Fiber optik akustik algılayıcı ile okunmuş 3.5 kHz akustik sinyalin frekans spektrumu | 31 |
| Şekil 5.3 : Her bir algılayıcı için ölçülen hassasiyet değerleri..... | 32 |
| Şekil 5.4 : Farklı deniz koşullarında spektral gürültü seviyesi ve temel gürültü kaynakları | 40 |
| Şekil 5.5 : Lazer kontrol ve ölçüm birimi iç gürültü ölçüm düzeneği..... | 42 |
| Şekil 5.6 : Sistem iç gürültü ölçüm sonuçları | 43 |



ÇİZELGE LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|---|---------------------|
| Çizelge 2.1 : Algılayıcı tasarımı comsol model parametreleri | 17 |
| Çizelge 2.2 : Algılayıcı tasarımı comsol değişkenleri | 17 |
| Çizelge 2.3 : Olası sensör mandrel malzemelerinin termal genişleme katsayıları | 19 |
| Çizelge 3.1 : Sistem mimarisinde kullanılan diyot lazer kaynağının teknik özellikleri..... | 24 |
| Çizelge 3.2 : PGC tekniğini uygulamak için sistemde kullanılan faz modülatörü teknik özellikleri..... | 26 |
| Çizelge 3.3 : Sistemde optik sinyali elektriksel sinyale çevirmek için kullanılan dedektör özellikleri..... | 27 |
| Çizelge 3.4 : Sistemde kullanılan sinyal işleme ve control kartının genel özellikleri..... | 28 |
| Çizelge 5.1: Farklı dalga yükseklikleri ve rüzgar hızına göre deniz durum seviyeleri..... | 38 |

KISALTMALAR

| | |
|---------------|---|
| AG | : Algılayıcı Grubu |
| ADC | : Analogtan Sayısala Sinyale Cevirici (Analog to Digital Converter) |
| DAC | : Sayısaldan Analog Sinyale Cevirici (Digital to Analog Converter) |
| EMI | : Elektromanyetik Girişim (Electromagnetic Interference) |
| FBG | : Fiber Bragg Izgara (Fiber Bragg Grating) |
| FDM | : Frekans Bölmeli Çoklama (Frequency Division Multiplexing) |
| GFRP | : Cam Elyaf Katkılı Polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer) |
| GHZ | : Giga Hertz |
| INGAAS | : Indium Gallium Arsenide |
| HZ | : Hertz |
| KHZ | : Kilo Hertz |
| KW | : Kilo Watt |
| MHZ | : Mega Hertz |
| NM | : Nano Metre |
| NS | : Nano Saniye |
| PGC | : Faz Kaynaklı Taşıyıcı (Phase Generated Carrier) |
| PM | : Faz Modülatörü (Phase Modülatör) |
| RAD | : Radyan |
| RMS | : Karekök Ortalama (Root mean Square) |
| SMF | : Single Mode Fiber |
| TDM | : Zamansal Çoklama (Time Division Multiplexing) |
| THZ | : Tera Hertz |
| W | : Watt |
| WDM | : Dalgaboyu Bölmeli Çoklama (Wavelength Division Multiplexing) |

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Simgeler | Açıklama |
|-------------|---------------------------|
| c | Işık Hızı |
| E | Toplamenerji |
| f | Frekans |
| P | Basınç |
| \ln | Dalga boyu bant genişliği |
| t | Zaman |
| t_e | Evre Uyumluluk Süresi |
| T | Sıcaklık |
| λ | Dalga Boyu |
| φ_g | Girişim Fazı |
| β | Modulasyon Derinliği |
| ω | Açısal Frekans |
| ω_m | Taşıyıcı Frekans |

RESİM LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Resim 2.1 :: Üzerinde herhangi bir kaplama olmadan ortaya koyulan algılayıcı resmi. Fotoğrafta sensör mandrelin içerisinde olan referans mandrel gözükmemektedir | 21 |
| Resim 2.2 : Kaplaması yapılmış algılayıcı resmi | 22 |

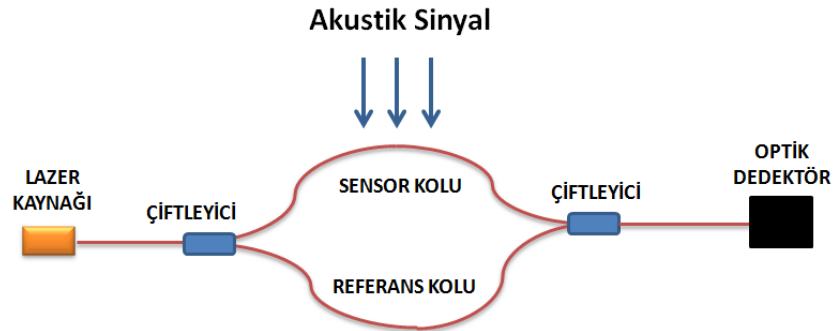


1 GİRİŞ

Düşük bütçe, küçük ebat, yüksek hassasiyet ve en önemlisi elektromanyetik girişimlerden etkilenmemesi sebebiyle fiber optik sistemler dünya pazarında kullanılmaya başlanılmıştır. Bu tez kapsamında, fiber optik akustik algılama üzerine yoğunlaşmış, elde edilen algılayıcılar kullanılarak dizin yapısı oluşturulmuştur. Dizin yapısı kullanılarak hedef yönü (kerteriz) hakkında bilgi elde edilebilecektir.

1.1 Tezin Amacı

Akustik algılama için konvansiyonel yöntemlerde piezo elektrik tabanlı seramikler kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında alternatif çözüm olan fiber optik akustik algılayıcılar üzerine yoğunlaşmıştır. Burada mandrel tabanlı Mach-Zahnder girişim sistemi tercih edilmiştir. Şekil 1.1'de basit bir Mach-Zahnder sistemi gösterilmektedir. Burada, sensör kolu direk olarak basınca maruz kalan kısımdır. Diğer kol ise basınçtan etkilenmeyen referans koldur. Sensör kol akustik bir dalgaya maruz kaldığı zaman iki koldan geçen optik sinyaller arasında faz farkı meydana gelmektedir. Basınç bilgisini elde edebilmek için iki kol arasındaki faz farkı dedektörler tarafından algılanmaktadır.



Şekil 1.1 : Tipik Mach-Zehnder düzeneği

Akustik titreşimlerin fiber üzerinde oluşturduğu gerinim sonucu meydana gelen fiber boyunun değişimi optik yolu değiştirerek faz değişimine sebep olur. Bu faz değişimi ise Mach-Zehnder girişim sistemi ile algılanabilir. (Şekil 1.1 :) Algılayıcı, akustik bir dalgaya maruz kaldığı zaman iki koldan geçen optik sinyaller arasında faz farkı meydana gelmektedir. Basınç bilgisini elde edebilmek için iki kol arasındaki faz farkı, detektör yardımıyla optik sinyalin elektronik sinyale çevrilmesiyle algılanmaktadır.

Basınca maruz kalacak fiber uzunluğu arttırıldıkça algılayıcı hassasiyetini arttırmak mümkündür. Fakat sensör boyutu algılamak istediğimiz minimum dalga boyunun yarısından küçük olmalıdır. Bu durumu çözmek için yaygın olarak kullanılan çözüm, silindirik bir mandrel üzerine fiberi sarmak ve basınç ile fiberin etkileşim alanını arttırmaktır. Fiberin sarılacağı mandrel yapı için metal, alüminyum ve kompozit malzemeler seçilebilir. Mandrel için kullanılacak malzemenin elastikliği ve fiber uzunluğu algılayıcı hassasiyetini etkilemektedir. [1,2] Tez kapsamında hassasiyet göz önünde bulundurularak maliyeti etkin, kolay üretilebilir ve yüksek hassasiyet verecek mandrel seçimlerinin yapılması ve algılayıcı tasarımının yapılması birincil amaç olarak belirlenmiştir.

Bu yöndeki bir sistemde akustik bilginin çözümlenebilmesi için girişim düzeneğinin sensör kolu ve referans kolu arasındaki faz farkı bilgisi elde edilmelidir. Tez kapsamındaki ikincil amaç ise fiber içerisindeki lazer ışığı üzerindeki faz bilgisi çözümlenerek akustik bilginin elde edilmesidir.

Ortaya koyulacak algılayıcının özellikle düşük akustik frekanslarda eş-yönlü algılama yapacağı değerlendirilmiştir. Bu sebeple, yönlülük hakkında bilgi edebilmek için eş yönlü algılayıcılardan dizin yapısı oluşturularak ışın demetleme (beamforming) yöntemi ile yönlülük hakkında bilgi elde edilebilir. Her ne kadar ışın demetleme yöntemiyle yönlülük hakkında bilgi elde edilmese de algılayıcı çoklaması da tez kapsamındaki üçüncü amaçtır.

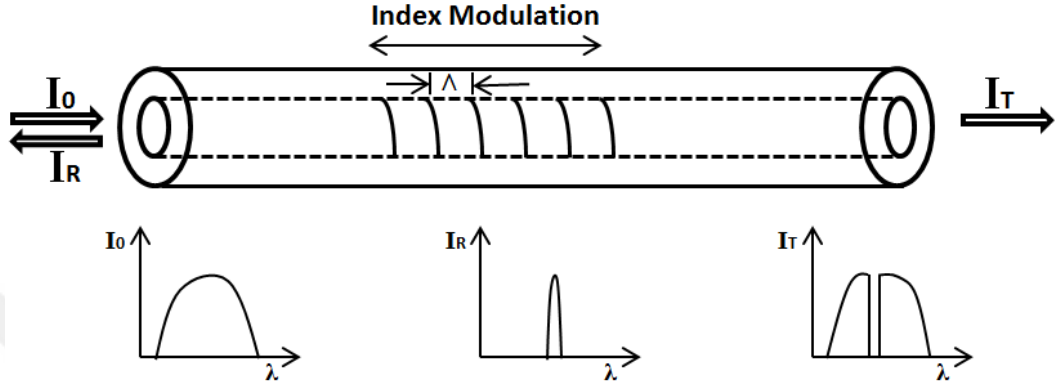
1.2 Literatür Araştırması ve Teorik Çalışmalar

1.2.1 Akustik Sinyal Algılama Yöntemleri

Mekanik gerilim algılama [3,4,5,6] akustik basınç algılama [7,8,9], sıcaklık ölçümü [10,11], dönü algılama (jireskop) [12,13,14], kimyasal algılama [15,16] gibi pek çok alanda fiber optik teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır. Fiber optik bir sistemle akustik basınç algılama için literatürde başlıca FBG (Fiber

Bragg Grating) teknolojisi ve mandrel tabanlı girişim sistemleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. [17,18, 19, 20]

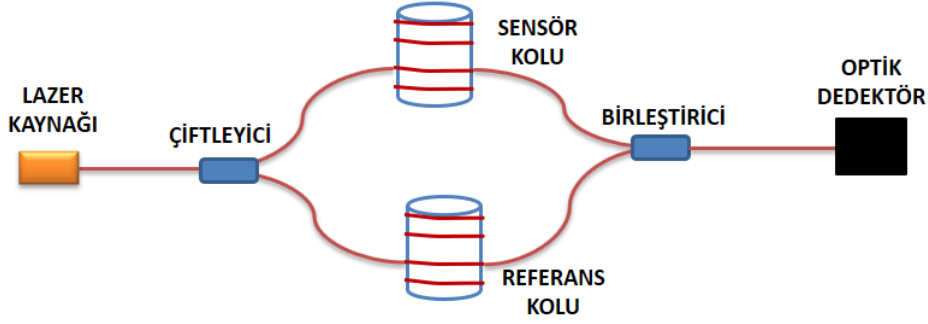
FBG yapıları fiber üzerinde kırılma indisinin periyodik olarak değiştirilmesi ile elde edilir. FBG yapıları frekans bandında filtre görevi görür ve merkez dalga boyu etrafındaki ışığı geri yansıtır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 : FBG yapısı ile lazer etkileşimin grafik gösterimi. Geniş bantlı ışık kaynağı FBG yapıları tarafından filtrelenir. Gratingler arası mesafeye göre belli dalga boyundaki ışık geri yansırken gerisi olduğu gibi fiber içerisinden geçmektedir.

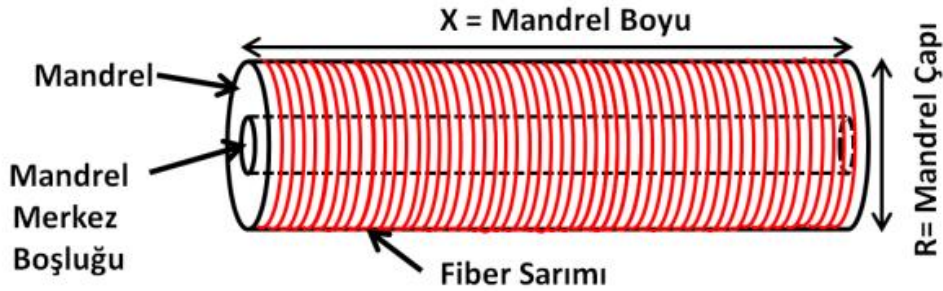
FBG merkez dalga boyu, fiber gratingler arası mesafe ve fiber kırılma indisine bağlı olduğundan basınç ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. [21]

Yüksek hassasiyeti ve kolay üretimi sebebiyle tez kapsamında tercih edilen akustik algılama yöntemi ise mandrel tabanlı algılamadır. Şekil 1.1'deki kollardaki fiber boyunu uzatmak ve akustik dalga ile olan etkileşimini artırmak için hem referans kol hem de sensör koldaki fiberler silindirik mandrellere sarılmaktadır. Akustik titreşimlerin fiber üzerinde oluşturduğu gerinim sonucu fiberin kırılma indisinde oluşan değişim ve fiber boyunun değişimi optik yolu değiştirerek faz değişimine sebep olur. Bu faz değişimi ise Mach-Zehnder girişim sistemi ile algılanabilir (Şekil 1.3 :). Burada, sensör kolu basınca tepki gösterirken, referans kol ise basınçtan etkilenmemektedir. Akustik bir dalgaya maruz kalındığı zaman iki koldan geçen optik sinyaller arasında faz farkı meydana gelmektedir. Basınç bilgisini elde edebilmek için iki kol arasındaki faz farkı, detektör yardımıyla optik sinyalin elektronik sinyale çevrilmesiyle algılanmaktadır.



Şekil 1.3 : Mandrel tabanlı Mach-Zehnder girişim düzeneği örneği.

Basınca maruz kalacak fiber uzunluğu arttırıldıkça algılayıcı hassasiyetini arttırmak mümkündür. Fakat sensör boyutu algılamak istediğimiz minimum dalga boyunun yarısından küçük olmalıdır. Bu durumu çözmek için yaygın olarak kullanılan çözüm, silindirik bir mandrel üzerine fiberi sarmak ve basınç ile fiberin etkileşim alanını arttırmaktır. Şekil 1.4 :’te örnek bir mandrel sarımı yapısı kesit alanı görülmektedir. Fiberin sarılacağı mandrel yapı için metal, alüminyum ve kompozit malzemeler seçilebilir. Mandrel için kullanılacak malzemenin elastikliği arttıkça basınç değişimine göre radyal esneme etkisi artar ve hassasiyet yükselir fakat mandrelin sağlamlığı azalacağından yüksek basınç altında çökme riski oluşur. Elastik bir mandrel kullanmanın diğer olumsuz etkisi de yapısal rezonans değerlerinin düşük frekanslarda çıkmasıdır. Sensör tasarımında rezonans değerleri algılanmak istenilen frekans bandının dışında olacak şekilde tasarlanır bu sayede doğrusal hassasiyet grafiği elde edilir.



Şekil 1.4 : Mandrel yapısı örneği

Mandrel tipi algılayıcı tasarımında önemli olan parametreler; mandrel üzerine sarılacak fiber boyu, fiber sarım sayısı, seçilen mandrel malzemesi ve mandrel

geometrisi şeklinde özetlenebilir. Değişen mandrel çapıyla birlikte fiber boy değişimi,

$$\Delta l = N2\pi\Delta R = \left(\frac{x}{r}\right) 2\pi\Delta R \quad (1.1)$$

şeklinde hesaplanır. Burada Δl fiber uzunluğundaki değişimi, N fiber sarım sayısını, ΔR mandrel yarıçapındaki değişimi, x mandrel uzunluğunu, r fiber çapını ifade etmektedir. Fiber yol farkının oluşturacağı faz farkı ($\Delta\phi$);

$$\Delta\phi = 2\pi f\Delta t = 2\pi f\left(\frac{\left(\frac{x}{r}\right)2\pi\Delta R}{v}\right) \quad (1.2)$$

olarak hesaplanır. Burada f kullanılan ışığın frekansını, v ışığın fiber içerisindeki hızını belirtmektedir. Bu değer, dB cinsinden ele alındığında, mandrel için elde edilecek hassasiyet değerinin;

$$= 20\log\left(\frac{\left(2\pi f\left(\frac{x}{r}\right)2\pi\Delta R\right)}{p}\right), [\text{dB re rad}/\mu\text{Pa}] \quad (1.3)$$

bağıntısına göre hesaplanacağı görülmektedir. Birim basınç altındaki mandrel çap değişimi (ΔR), mandrel geometrisine ve mandrel elastisite gibi değerlere bağlı olarak değişmektedir. Tez kapsamında farklı değişkenlerle mandrel optimizasyonu sağlanmıştır.

1.2.2 Akustik Sinyalin Çözülmesi

Üzerine fiber sarılı bir mandrel üzerindeki akustik basıncın algılanması için farklı yöntemler kullanılmıştır. Faz modülasyonuna uğramış optik sinyal için interferometrik ölçüm düzenekleri kullanılmaktadır. [23,24,25,26,27] En yaygınları arasında Michelson ve Mach-Zehnder interferometre düzenekleri görülmektedir. Michelson interferometresinde interferometre kolları aynalar ile sonlandırıldığı için paketlenme zorluğu çıkardığından tez kapsamında Mach-Zehnder interferometresi çalışılmıştır. Standart bir interferometrede genlik çıktısı aşağıda gösterildiği gibidir. [63]

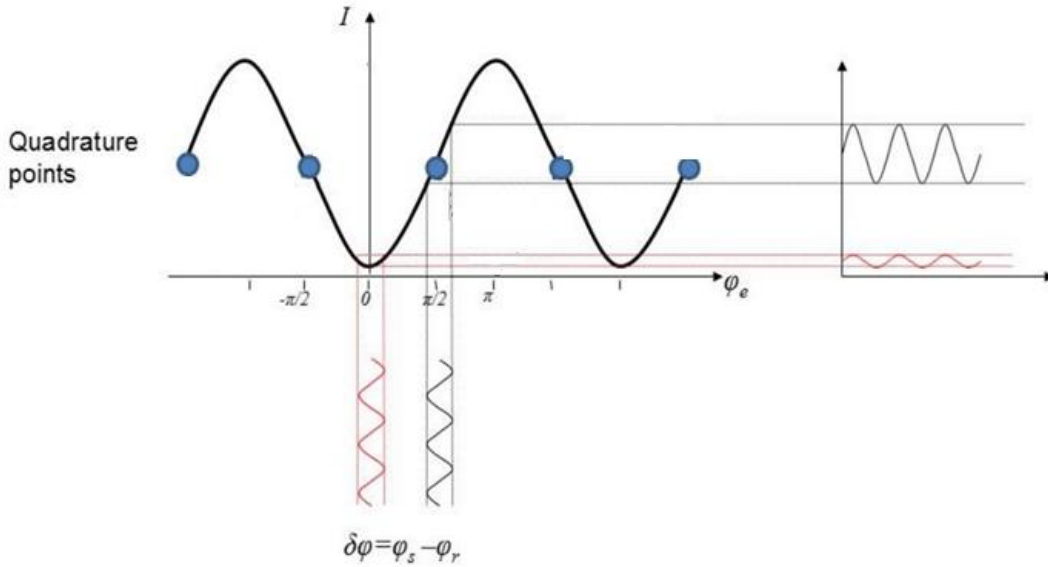
$$I_{out} = I_R + I_S + 2\sqrt{I_R I_S} \cos(\phi_R - \phi_S) \quad (1.4)$$

Burada I_{RS} ve ϕ_{RS} 'ler sırasıyla interferometrenin referans ve sensör kollarından gelen genlik ve faz bilgilerini ifade etmektedir. Daha genel bir ifadeyle

interferometre çıktısı aşağıdaki formül ile ifade edilebilir.

$$I_{out} = I_0[1 + V \cos(\Delta\phi)] \quad (1.5)$$

Burada I_0 , $I_R + I_S$ toplamının ortalamasını ifade ederken, V ise $2\sqrt{I_R I_S} / (I_R + I_S)$ olarak ifade edilmektedir. Her ne kadar faz değişimi akustik basınçla doğrusal olarak değişse de eşitlik 1.5'de görüldüğü gibi interferometre çıktısı cosinus etkisi sebebiyle faz farkı değişimiyle doğrusal davranmamaktadır. [22] Burada $\Delta\phi = \phi_e + d\phi$ olarak ifade edilebilir. ϕ_e çevresel etkilerden kaynaklı faz bayas (düşük frekanslarda drift ediyor) iken $d\phi$ interferometrenin iki kolu arasındaki faz farkını (akustik basınçla doğrusal) oluşturmaktadır. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi faz bayas quadrature noktalarında iken iki kol arasındaki faz farkı doğrusal bir şekilde okunabilirken faz bayas $0, \pi, 2\pi$ ve katlarındayken iki kol arasındaki faz farkı interferometre çıktısında sönümlenmektedir.



Şekil 1.5 : Interferometre çıktısı. ϕ_e çevresel etkilerden kaynaklı faz bayası gösterirken $d\phi$, interferometrenin iki kolu arasındaki faz farkını göstermektedir. $\phi_e, 2\pi n$ ve $2\pi(n+1)$ etrafındayken faz sönümlenmesi meydana gelmektedir.

Yukarıdaki şekildeki gösterildiği gibi çevresel etkilerden kaynaklı faz bayas quadrature noktalardan kaymakta ve interferometre çıktısındaki iki kol arasındaki faz farkının sönümlenmesine yol açmaktadır. [29] Bunun önüne geçebilmek için kullanılan yöntemlerden bir tanesi algılayıcı birimden faz

bayas bilgisinin okunup ona göre faz bayası doğrusal bölgede tutabilmek için geri besleme verilmesidir. [30] Bu yöntem maliyeti artıracığı için literatürde başka çözümler aranmıştır. Tez kapsamında faz sönümlenmesinin önüne geçebilmek için PGC metodu uygulanmıştır. PGC metodunda algılanmak istenen akustik sinyalin frekans bandının dışında bir frekansla interferometre girdisinin fazının modüle edilmesidir. Bu taşıyıcı sinyal algılanmak istenen frekansı yukarı frekansa kaydırır ve taşıyıcı frekansın yan bantları olarak okunabilmesine olanak sağlar. Böylelikle düşük frekanslardan kaynaklı gürültüden de uzaklaşmaya imkan tanır. [31] PGC sinyali bir faz modülatörü yardımıyla uygulanabilir.

PGC metodu uygulanmış bir interferometre çıktısını en basit haliyle aşağıdaki gibi ifade edilebilir. [22]

$$I_{out} = I_0[1 + V \cos(\beta \sin(w_m t) + \phi_e + \phi_s)] \quad (1.6)$$

Burada cosinus terimi Bessel fonksiyonu yardımıyla aşağıdaki gibi açılabilir. [22]

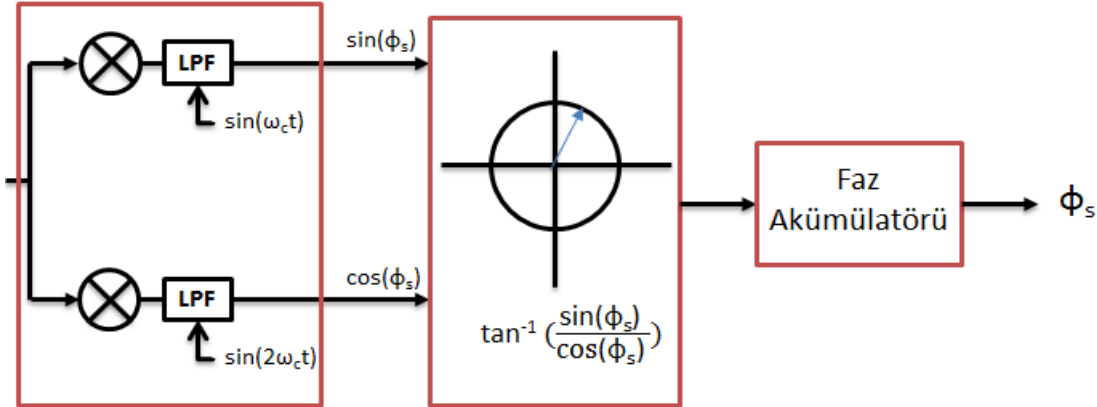
$$\begin{aligned} \cos(\beta \sin(w_m t) + \phi_e + \phi_s) &= \cos(\beta \sin(w_m t)) \cos(\phi_e + \phi_s) \\ &\quad - \sin(\beta \sin(w_m t)) \sin(\phi_e + \phi_s) \\ &= [J_0(\beta) + 2J_2(\beta) \cos(2w_m t) + 2J_4(\beta) \cos(4w_m t) + \dots] \cos(\phi_e + \phi_s) \\ &\quad - [(2J_1(\beta) \sin(w_m t) + 2J_3(\beta) \sin(3w_m t) + \dots] \sin(\phi_e + \phi_s) \end{aligned} \quad (1.7)$$

Burada $J_n(\beta)$ modülasyon derinliği β olan Bessel fonksiyonun birinci tiplerini göstermektedir. Burada taşıyıcı frekansın tek harmonikleri interferometre faz farkının sinüsü ile modüle edilirken çift harmonikleri interferometre faz farkının cosinüsü ile modüle edilmektedir. Bu sinyal çözümlendiğinde (aşağı frekansa taşıma ve filtreleme) taşıyıcı frekansın çift veya tek harmoniğinden biri maksimumda olurken diğeri minimumda olacaktır. [22] Aşağı frekansa taşıma çarpımları $\sin(w_m t)$ ve $\sin(2w_m t)$ çarpımları yapıldıktan sonra $DJ_1(\beta) \sin(\phi_e + \phi_s)$ ve $DJ_2(\beta) \cos(\phi_e + \phi_s)$ terimleri kalmaktadır. Burada D çarpımlardan sonra kalan sabit sayıdır.

β 2.63 radyana eşit olduğunda $J_1 = J_2$ olmaktadır.

Bu iki terimin birbirine oranının arctanjantı faz değişimini verecektir.

$$\arctan\left(\frac{DJ_1(\beta)\sin(\phi_e+\phi_s)}{DJ_2(\beta)\cos(\phi_e+\phi_s)}\right) = \phi_e + \phi_s \quad (1.8)$$



Şekil 1.6 : PGC demodulasyonu. İlk adımda taşıyıcı PGC sinyalinin harmoniklerini aşağı frekansa taşıma (downconversion) iken ikinci adımda yöntemiyle sinüs ve cosinüs terimlerinin arktanjanı alınır. Üçüncü adımda ise faz sayımı yapılmaktadır.

Sinyal çözümlemede bir diğer önemli husus ise sistemin gürültü seviyesidir. Gürültü seviyesinin başlıca kaynakları girişim düzeneğinin kolları arasındaki fiber boy farkı ve lazer kaynağından oluşmaktadır. Girişim düzeneğinin kolları arasındaki fiber boyu farkının sebep olduğu gürültünün RMS değeri aşağıda tanımlanmıştır. [50]

$$\sqrt{\langle \delta(\phi_g) \rangle} = \frac{2}{\sqrt{t_e}} |\tau| \sqrt{\Delta f} \quad (1.9)$$

Burada ϕ_g girişim fazı, t_e evre uyumluluk süresi, τ girişim düzeneğinin kolları arasındaki fiber boyu farkının ışık hızına bölümünü, Δf ise algılamanın yapıldığı frekans bandı genişliğidir.

Girişim düzeneğinin kolları arasındaki zamansal fark aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$|\tau| = \frac{L}{c} \quad (1.10)$$

Pratikte elde edilebilecek 0.03 ms evre uyumluluk süresi (10 kHz optik bant genişliği), 100 Hz algılama frekans band genişliği ve 10 ns optik zaman farkı (fiber 2 m yol farkı) varsayımı ile girişim fazına yansıyan gürültünün RMS değeri $0.0036 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ olarak bulunur. Bu değeri logaritmik olarak $[20\log(x)]$ ifade ettiğimizde $-108.9 \text{ dB re rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ olarak bulunur. Buradan da görüleceği

üzere lazer bant genişliği ve iki kol arasındaki fiber farkı bu yöndeki bir sistemde dikkat edilmesi gereken önemli hususlardır.

Bir diğer gürültü kaynağı olan kuantum gürültüsü ise enerjinin paketler halinde algılanabilmesinden kaynaklanır ve girişimin elde edildiği optik sinyalin gücüne paralel olarak arttığından girişim belirginliği ile ters orantılıdır. Bu etmenin girişim fazında yarattığı gürültünün RMS değeri:

$$\sqrt{\langle \delta(\phi_g) \rangle} = \frac{1}{G} \sqrt{\frac{2hv\Delta f}{P_0}} \quad (1.11)$$

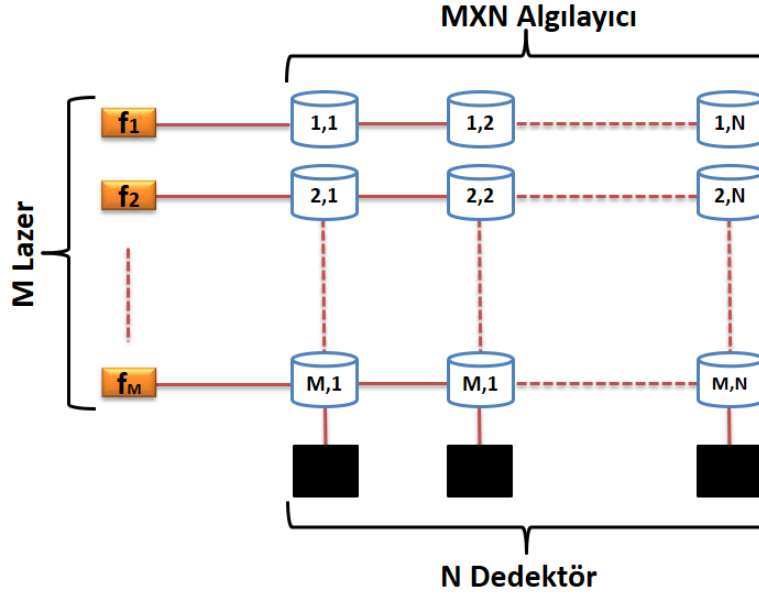
eşitliği ile tanımlanır. [51] Burada algılamanın hassasiyetinin maksimum olduğu $\pi/2 \pm n\pi$ komşuluğunda yapıldığı varsayılmıştır. Burada ϕ_g girişim fazı, G girişim belirginliği, P_0 optik gücü, Δf algılamanın yapıldığı frekans bant genişliğini, ν ışığın frekansını ve h ise Planc sabitini ($6.63E-34$) ifade etmektedir. Girişim belirginlik değeri 1 varsayılırsa, 1550 nm (194 THz) dalga boyunda lazer kaynağı ve 1 mW lazer optik gücü varsayımı ile kuantum gürültüsü kaynaklı girişim faz gürültüsü RMS değeri $0.016 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ olarak elde edilir. Bu değeri logaritmik olarak $[20\log(x)]$ ifade ettiğimizde -155.9 dB re $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ olarak bulunur. [51]

Elde edilen faz gürültü seviyelerine bakıldığında en önemli gürültü kaynağı girişim düzeneğinin iki kolu arasındaki faz farkından kaynaklandığı görülmektedir. Yapılan çalışmalarda iki kol arasındaki fiber boy farkının minimum olmasına özen gösterilmiştir.

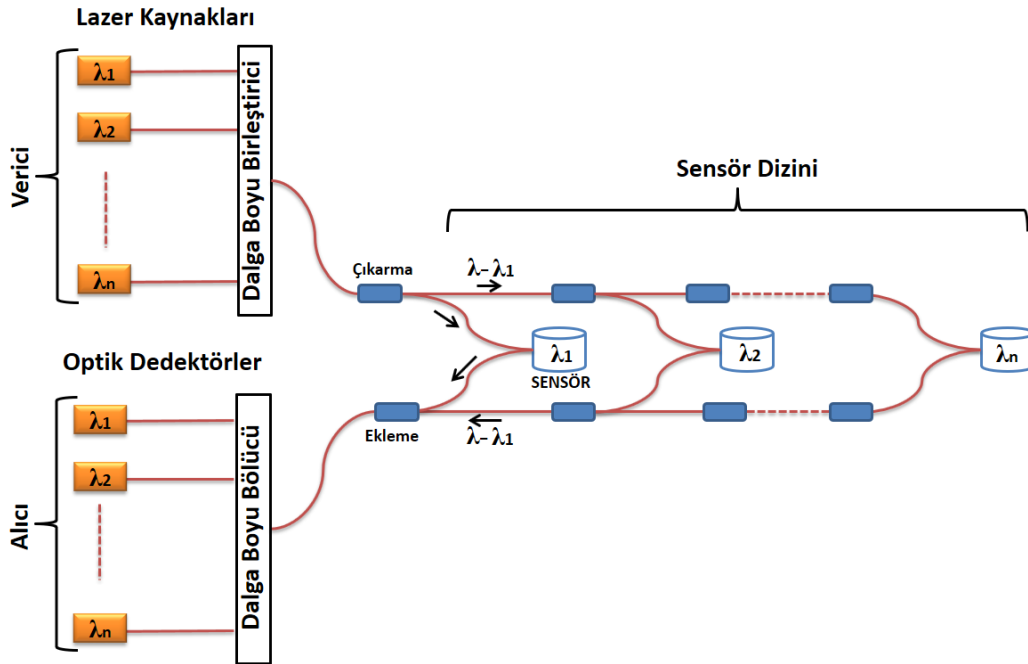
1.2.3 Algılayıcı Çoklama Yöntemleri

PGC metoduyla birlikte algılayıcıdan gelen sinyalin çözümlenebildiği görülmüştür. Fakat, tekli bir algılayıcı yapısında tek bir sinyalin çözümlenmesi oldukça pahalı bir çözüm oluşturmaktadır. O yüzden burada bu yöndeki bir sistemin avantajını kullanabilmek için algılayıcı çoklaması yapılması gerekmektedir. En önemli çoklama teknikleri Frekans Bölmeli Çoklama (FDM, Frequency Division Multiplexing), Dalgaboyu Bölmeli Çoklama (WDM, Wavelength Division Multiplexing) ve Zaman Bölmeli Çoklama (TMD, Time Division Multiplexing)'dir. Şekil 1.7'de görüldüğü üzere FDM tabanlı çoklamada sistem, M adet lazer N adet dedektör gerektirmektedir. [32] Her bir dedektör M adet taşıyıcı frekansına sahip ve N adet demodulatörü

beslemektedir. WDM metodu da FDM'e benzer şekilde dalga boyu çoklama için n adet lazer kaynağı ve dedektöre ihtiyaç duymaktadır.



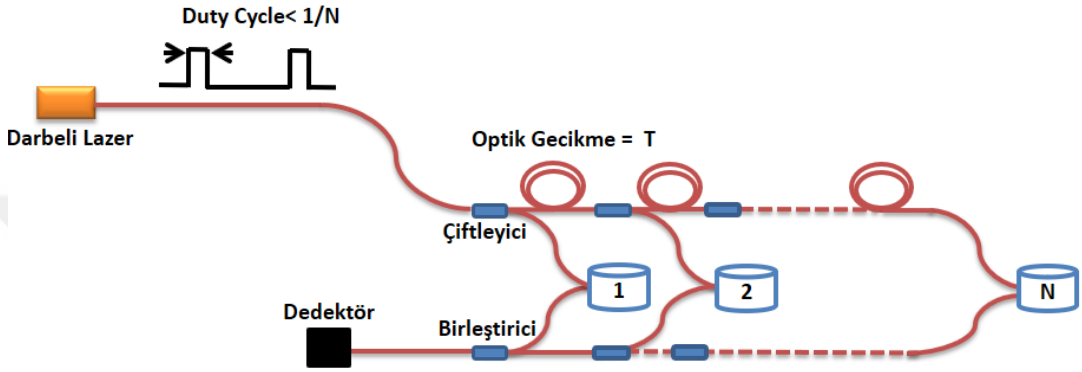
Şekil 1.7 : MxN FDM sistemi genel mimarisi.



Şekil 1.8 : WDM çoklama genel mimarisi.

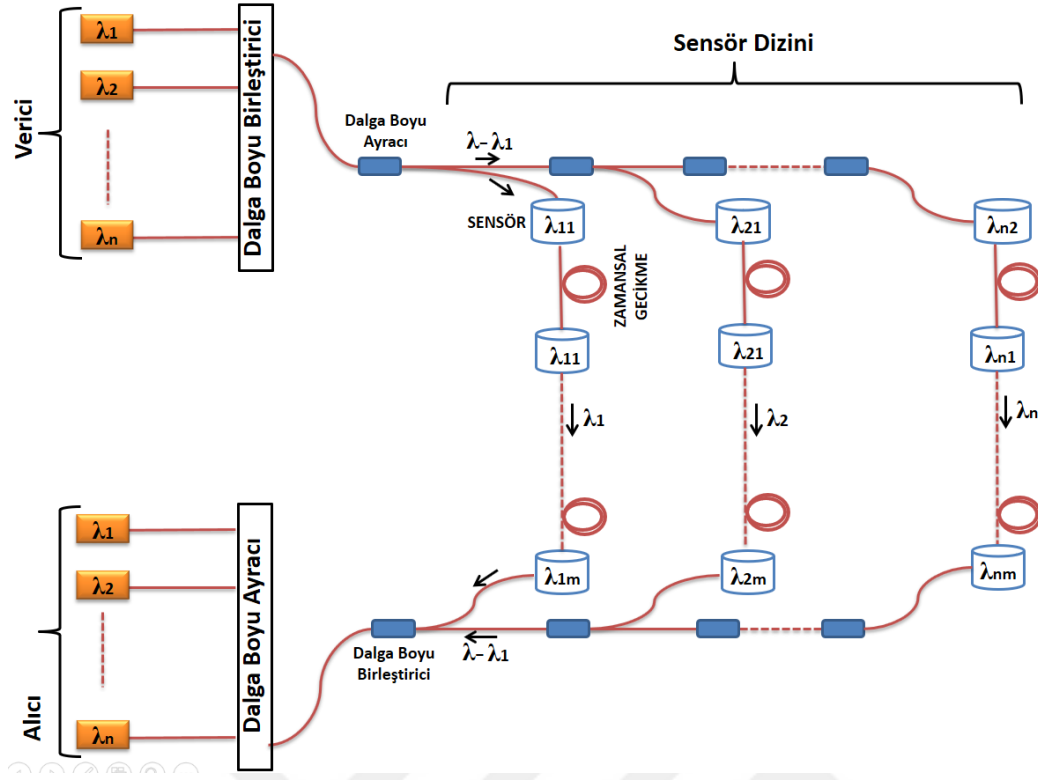
Bu konuda yapılan çalışmalardan sonra TDM metodu algılayıcı çoklamak için ön plana çıkmıştır. [33, 34] TDM sisteminde lazer kaynağı atım üretecek şekilde sürülmekte ve her bir sensör arasında fiber ile zamansal geçikme

koyulmaktadır. Aralarındaki zamansal gecikme sayesinde sensörlerden gelen sinyaller ayrıştırılabilmektedir. Her bir sensörden gelen atımlar tek bir fiber hattı üzerinde seri olduğu için tek demodülatör ve tek lazer taşıyıcı çoklama için yeterli olmaktadır. Burada algılayıcı sayısı lazer tekrar frekansı ve lazer darbe uzunluğu arasındaki oranla sınırlanmaktadır. Diğer çoklama yöntemlerine göre ebatların, güç tüketiminin ve maliyetlerin önemli bir ölçüde düşmesi dolayısıyla TDM yöntemi az sayıdaki algılayıcı dizinleri için ön plana çıkmaktadır



Şekil 1.9 : TDM çoklama genel mimarisi.

İstenildiği takdirde çoklama yöntemleri ortaklanarak algılayıcı sayısının daha fazla artırılması mümkündür. Aşağıda WDM ve TDM'in ortaklandığı ortak bir çözüm örneğinin genel mimarisi sunulmaktadır. Dalga boyu çoklama ile algılayıcı sayısı N katına çıkartılabilirken zamansal çoklama ile M katına kadar algılayıcı sayısı artırılabilir. Aşağıdaki gibi hibrit bir mimari ile MxN adet algılayıcıya kadar çoklama yapılabilir.



Şekil 1.10 : WDM-TDM hibrit çoklama genel mimarisi.

Algılayıcı çoklama için yapılan araştırmalar sonucunda algılayıcı sayısı ve maliyet göz önünde bulundurularak TDM metodu tercih edilmiştir. Bu yönde oluşturulacak bir dizin yapısıyla hedefin yönü hakkında da bilgi elde edilebilecektir. [35, 36, 37]

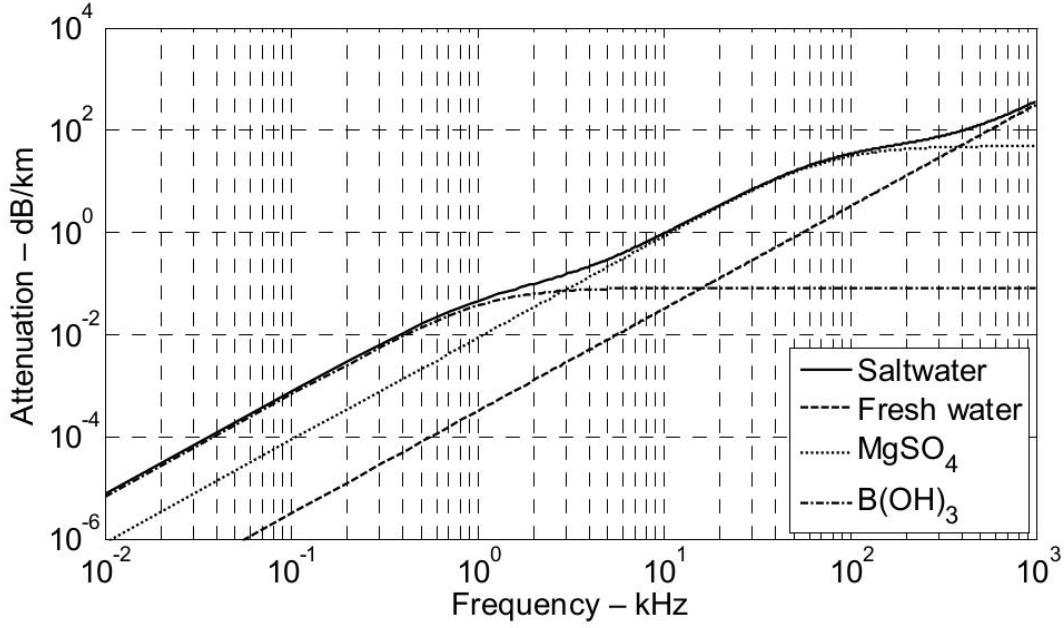
2 MANDREL TABANLI FİBER OPTİK AKUSTİK ALGILAYICI TASARIMI

2.1 Amaç

Mandrel tabanlı fiber optik akustik algılama basitliği, dayanıklılığı ve sağlamlığıyla ön plana çıkmaktadır. [38, 39, 40]. Burada algılayıcı geometrisi, mandrel malzemesi, fiber sarım boyu gibi faktörler algılayıcı özelliklerini değiştirmektedir. Farklı geometri ve farklı yapılarla pek çok farklı çalışma literatürde denenmiştir. [41, 42, 43, 44] Tez kapsamında mandrel malzemesi ve boyutları gibi parametreler optimize edilerek algılayıcı modellemesinin yapılması ve üretilmesi amaçlardan biridir. Alt bölümlerde farklı malzeme tiplerinin algılayıcı üzerine etkileri incelenmiş ve belirlenen operasyonlara uygulanabilir algılayıcı tasarımı nihailendirilmiştir

2.2 Tasarım ve Modelleme

Bölüm 1.2'de teorik detayları verilen mandrel tabanlı bir sistemin bu bölümde sistem mimarisi ortaya koyulmakta ve bilgisayar ortamında modellemesi yapılarak farklı parametrelerle analizi yapılmıştır. Ortaya koyulacak algılayıcının düşük frekanslarda ($< 5\text{kHz}$) akustik algılama yapması hedeflenmiştir. Aşağıdaki grafikten de görüldüğü üzere artan dalga boyu ile birlikte akustik dalganın su içerisindeki kaybı azalmakta ve daha uzak mesafelerden algılama yapmaya imkân tanımaktadır. [62] Bu algılayıcıların ince çekili dizin gibi sonar sistemlerinde kullanılması planlandığından boyutlarının küçük olması bir diğer önemli hedef olarak amaçlanmıştır.



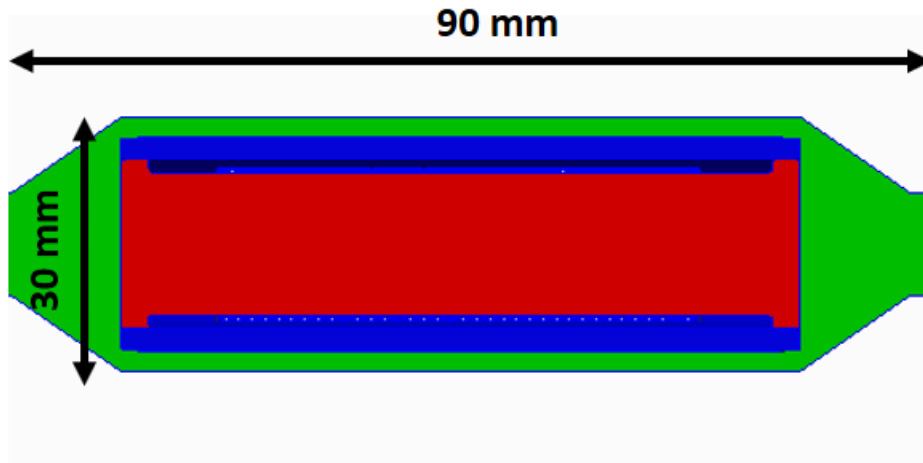
Şekil 2.1 : Farklı frekanslardaki akustik dalganın farklı ortamlardaki kaybı

Akustik titreşimlerin fiber üzerinde oluşturduğu gerinim sonucu fiberin kırılma indisinde oluşan değişim ve fiber boyunun değişimi optik yolu değiştirerek faz değişimine sebep olur. Bu faz değişimi ise Mach-Zehnder girişim sistemi ile algılanabilir (Şekil 1.3 :). Burada, sensör kolu basınca tepki gösterirken, referans kol ise basınçtan etkilenmemektedir. Akustik bir dalgaya maruz kalındığı zaman iki koldan geçen optik sinyaller arasında faz farkı meydana gelmektedir. Basınç bilgisini elde edebilmek için iki kol arasındaki faz farkı, detektör yardımıyla optik sinyalin elektronik sinyale çevrilmesiyle algılanmaktadır.

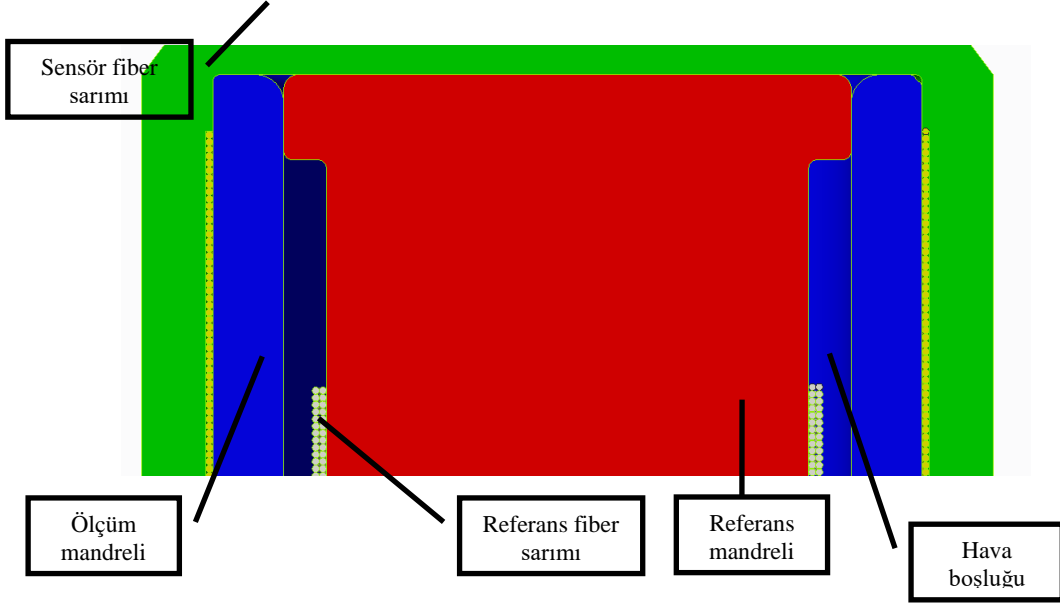
Basınca maruz kalacak fiber uzunluğu arttırıldıkça algılayıcı hassasiyetini arttırmak mümkündür. Fakat sensör boyutu algılamak istediğimiz minimum dalga boyunun yarısından küçük olmalıdır. Bu durumu çözmek için yaygın olarak kullanılan çözüm, silindirik bir mandrel üzerine fiberi sarmak ve basınç ile fiberin etkileşim alanını arttırmaktır. Şekil 1.4 :’te örnek bir mandrel sarımı yapısı kesit alanı görülmektedir. Fiberin sarılacağı mandrel yapı için metal, alüminyum ve kompozit malzemeler seçilebilir. Mandrel için kullanılacak malzemenin elastikliği arttıkça basınç değişimine göre radyal esneme etkisi artar ve hassasiyet yükselir fakat mandrelin sağlamlığı azalacağından yüksek

basınç altında çökme riski oluşur. Elastik bir mandrel kullanmanın diğer olumsuz etkisi de yapısal rezonans değerlerinin düşük frekanslarda çıkmasıdır. Sensör tasarımında rezonans değerleri algılanmak istenilen frekans bandının dışında olacak şekilde tasarlanır bu sayede doğrusal hassasiyet grafiği elde edilir.

Öngörülen algılayıcı yapısı yan dizin sonarı ve ince çekili dizin sonarı gibi operasyonel kullanımlara en uygun olabilecek şekilde tasarlanmaya çalışılmıştır. Bunun için eş merkezli olarak yerleştirilen referans mandrel ve sensör mandrel konfigürasyonu üzerine çalışılmıştır. Bu yapının en önemli avantajı mandrellerin iç içe geçmesiyle sensörlerin daha kısa olabilmesine olanak sağlamasıdır. Bu sayede dizin çalışmalarında sensörler arası mesafeyi azaltarak daha yüksek frekanslarda ışın demetleme yapılması mümkündür. Burada ortaya çıkan mandreller arasındaki etkileşimi azaltmak içinse literatürde farklı çalışmalar olsada hava boşluğu yöntemi ön plana çıkmaktadır. [45, 46] Bu sebeple, İki mandrel arasında akustik empedansı mandrel malzemelerinden oldukça farklı olan hava boşluğu olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylelikle ortamındaki akustik sinyalin ölçüm mandrelinden referans mandreline aktarılması azaltılmıştır. Tasarlanan ve üzerinde çalışılan algılayıcı görünümü aşağıdaki şekillerde sunulmaktadır. İç kısımda akustik olarak izole edilmiş referans mandrel bulunmaktadır. Sensör mandrel üzerinde tek kat olacak şekilde fiber (SMF-28) sarımı yapılırken, referans mandrel üzerinde ise çift kat olacak şekilde sensör mandrelle eşit uzunlukta fiber sarımı yapılmıştır.

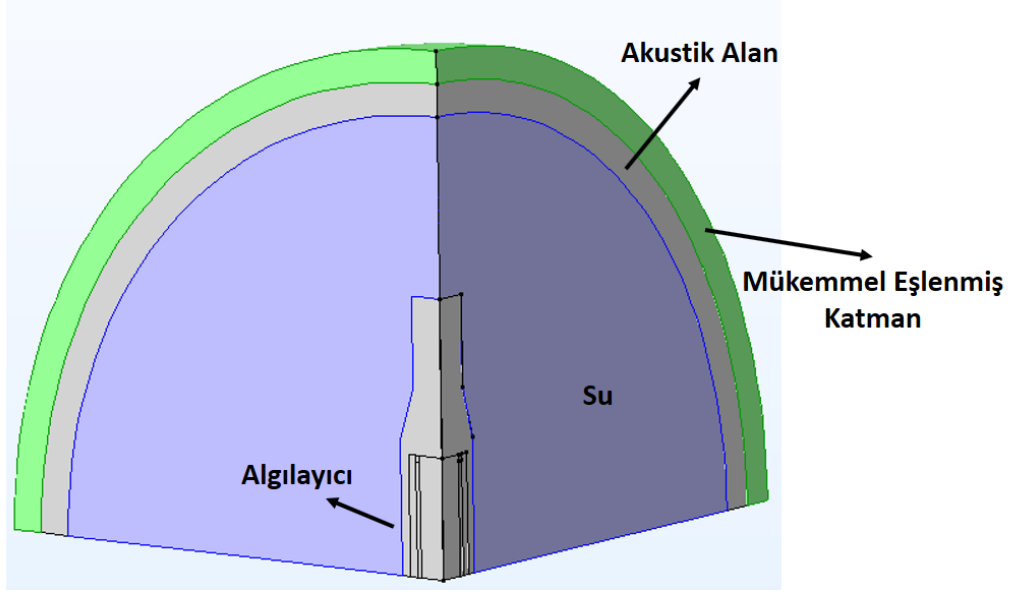


Şekil 2.2 : Farklı Tasarlanan algılayıcı görünümü



Şekil 2.3 : Tasarlanan algılayıcı detay görünümü

Bu yapıda tasarlanan algılayıcı için COMSOL Multiphysics ortamında FEM modelleme çalışması yapılmıştır. Bu sayede farklı geometrik ve malzeme parametrelerinin sonuçlara etkisi gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile fiberdeki boy değişimi akustik-yapısal mekanik fiziklerinin etkileşimi kullanılarak çözülmüştür. Analizler sırasında bilgisayarın işlem yükünü azaltmak amacıyla Şekil 2.4'de görüldüğü gibi tüm modelin 1/8'ini simetri düzlemleri kullanılarak çözüm getirilmiştir. Şekilde algılayıcının etrafındaki mavi ile gösterilen kısım su ortamını simüle ederken, onun dışındaki gri kısım akustik dalganın oluşturulduğu ortamı göstermektedir. Akustik alanın dışındaki yeşil ile gösterilen bölge ise geri yansımaları engellemek için oluşturulmuş mükemmel eşleştirilmiş katmandır.



Şekil 2.4 : Algılayıcı COMSOL 1/8 modeli

Modelde kullanılan parametreler ve değişkenler aşağıdaki çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 2.1: Algılayıcı tasarımı comsol model parametreleri

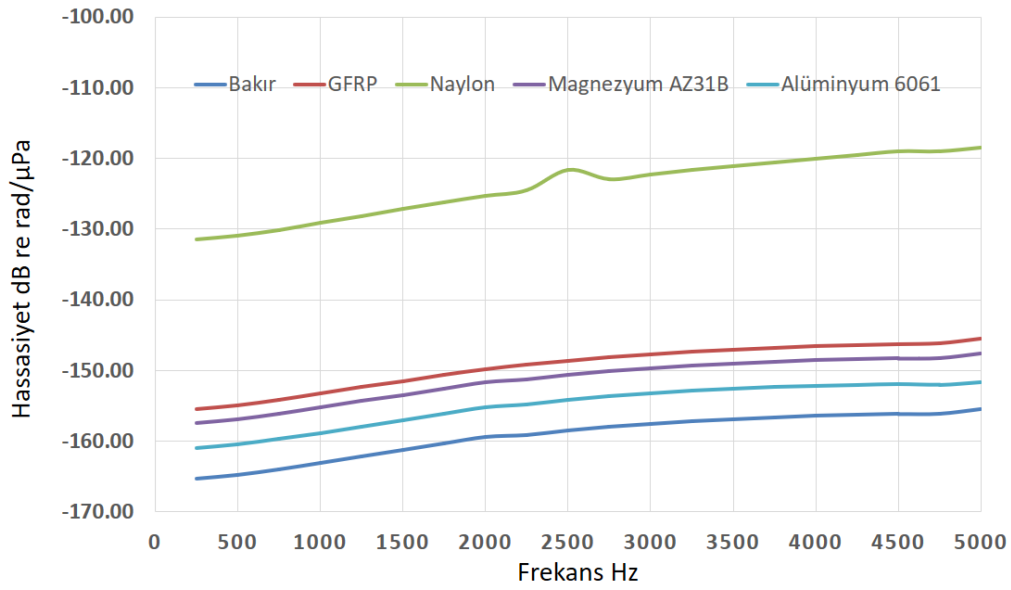
| Tanım | Denklemler | Birim | Açıklama |
|--------------|------------------------------|---------------|----------------------------|
| p_rms | 1[uPa] | 1E-6 Pa | Gelen basınç RMS değeri |
| p_amp | $p_rms \cdot \sqrt{2}$ | 1.4142E-6 Pa | Gelen basınç genliği |
| f_min | 0.25[kHz] | 250 Hz | Minimum frekans |
| f_step | 0.25[kHz] | 250 Hz | Frekans değişim aralıkları |
| f_max | 5[kHz] | 5000 Hz | Maksimum frekans |
| v_fiber | $2 \cdot c_const / 3$ | 1.9986E8 m/s | Fiberdeki ışık hızı |
| lambda_laser | 1550[nm] | 1.55E-6 m | Lazer dalga boyu |
| freq_laser | $c_const / \lambda_{laser}$ | 1.9341E14 1/s | Lazer frekansı |
| theta | 0[deg] | 0 rad | Akustik sinyal geliş açısı |

Çizelge 2.2: Algılayıcı tasarımı comsol değişkenleri

| Tanım | Denklemler | Birim | Açıklama |
|--------------|---|-------|-----------------------------|
| delta_r_s | $2 \cdot \pi \cdot \text{intop1}(\sqrt{u^2 + v^2}) / \text{intop1}(1) \cdot \text{rev_sensing_mandrel}$ | m | Sensör fiber boy değişimi |
| delta_r_r | $2 \cdot \pi \cdot \text{intop2}(\sqrt{u^2 + v^2}) / \text{intop2}(1) \cdot \text{rev_reference_mandrel}$ | m | Referans fiber boy değişimi |
| delta_sensor | $\text{delta_r_s} - \text{delta_r_r}$ | m | Fiber boy değişim farkı |
| delta_phi | $2 \cdot \pi \cdot \text{freq_laser} \cdot \text{delta_sensor} / v_fiber$ | | Faz farkı |
| H | $20 \cdot \log_{10}(\text{delta_phi} / (1[\text{uPa}] / p_rms))$ | | Alış Hassasiyeti |
| lambda | $1500[\text{m/s}] / \text{freq}$ | m | Dalga boyu |
| ky | $2 \cdot \pi \cdot \cos(\text{theta}) / \lambda$ | 1/m | Y-ekseni dalgavektörü |
| kz | $2 \cdot \pi \cdot \sin(\text{theta}) / \lambda$ | 1/m | Z-ekseni dalgavektörü |

Yukarıda boyutları sunulan algılayıcı yapısı ile yapılan modelleme çalışmasında sensör mandrel olarak farklı malzemeler denenmiştir. Bunlar arasında yapılan optimizasyon sonucunda sensör mandrel malzemesine karar verilmiştir. Alüminyum (Al6061), Naylon, Bakır, Magnezyum AZ31B ve Cam Elyaf Kompozittir (GFRP) malzemeleri üzerine çalışmalar yapılmıştır..

Bu malzemeler kullanılarak aynı geometrik ölçülerdeki algılayıcılara ait alış hassasiyet grafikleri aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 2.5 Sensör mandrel malzemesine göre hassasiyet sonuçları

Yapılan araştırmalar neticesinde edinebildiğimiz bilgiler dahilinde cam elyaf kompoziti de içeren fiber optik akustik algılayıcı çalışmalarının literatürde yapılmadığı görülmüştür. Fakat cam elyaf kompozitle elde edilen analiz sonuçları ümit verici sonuçlar vermektedir.

Algılayıcı tasarlarırken göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus ise sıcaklık değişimi dolayısıyla oluşan termal genişlemenin fiberlerde herhangi bir kırılma oluşturmamasıdır. Bunun çözümü için uygulanabilecek yöntem ise mandrel üretiminde kullanılan malzemelerin termal genişleme katsayısının kullanılan fibere mümkün olan en yakın değerde seçilmesidir. Çalışmalarda kullanılacak olan Corning – SMF28 fiberin teknik özellikleri incelendiğinde fiberin termal genişleme katsayısı bilgilerine ulaşamadık. Bu yüzden dolayı genişleme katsayısının fiber çekirdeği olan SiO₂'in değeri olan $0.55 \times 10^{-6}/K$

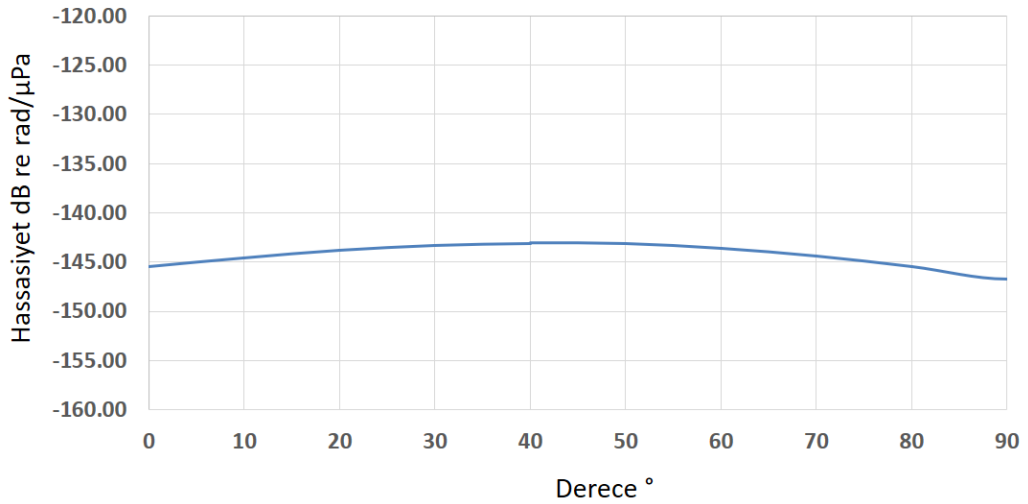
olarak kabul edilmiştir. [47] Sensör mandrel malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin termal genleşme katsayıları aşağıdaki çizelge de verilmiştir.

Çizelge 2.3: Olası sensör mandrel malzemelerinin termal genleşme katsayıları

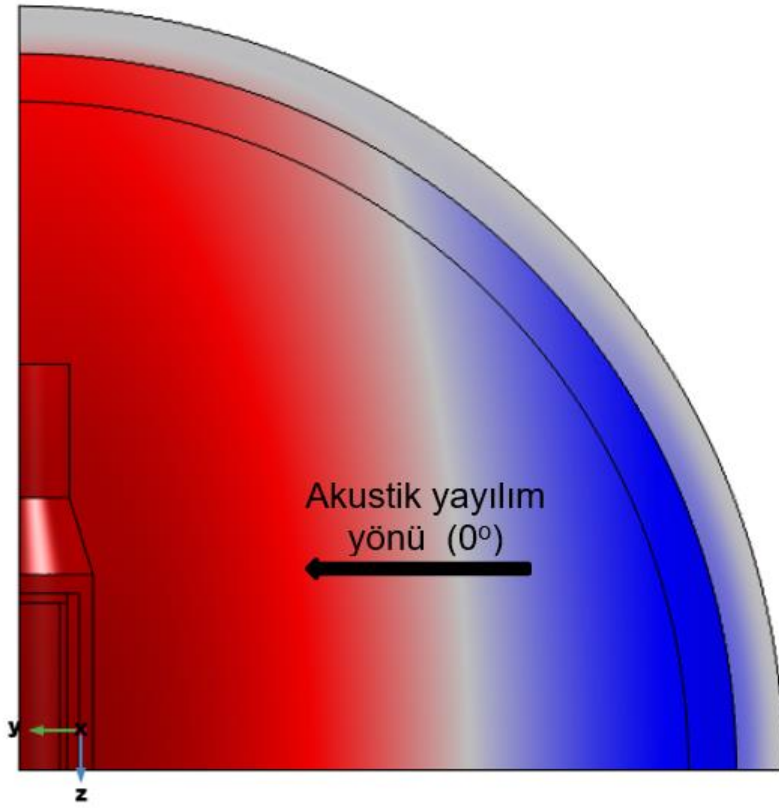
| Malzeme | Termal Genleşme Katsayısı |
|-----------|------------------------------|
| GRFP | $6 \times 10^{-6}/K$ [48] |
| Naylon | $90 \times 10^{-6}/K$ [49] |
| Alüminyum | $24 \times 10^{-6}/K$ [49] |
| Bakır | $16.7 \times 10^{-6}/K$ [49] |
| Magnezyum | $26.9 \times 10^{-6}/K$ [49] |

Hassasiyet ve termal genleşme katsayıları göz önünde bulundurulduğunda sensör mandrel malzemesi olarak kullanılacak en uygun malzemenin GRFP olduğu gözlemlenmiştir. Referans mandrel yapısı olarak ise termal genleşme katsayısı $1.6 \times 10^{-6}/K$ olan invar 36 seçilmiştir.

Sensör mandrel malzemesi olarak GFRP, reference mandrel malzemesi olarak Invar 36 ve yukarıda bahsedilen geometrilerde tasarlanan algılayıcının Comsol Multiphysics ortamında yönlülük analizleri de yapılmıştır. Çalışmalar kapsamında belirlenen en yüksek akustik çalışma frekansı olan 5 kHz için farklı yönlerden hassasiyet grafiği gösterilmektedir.



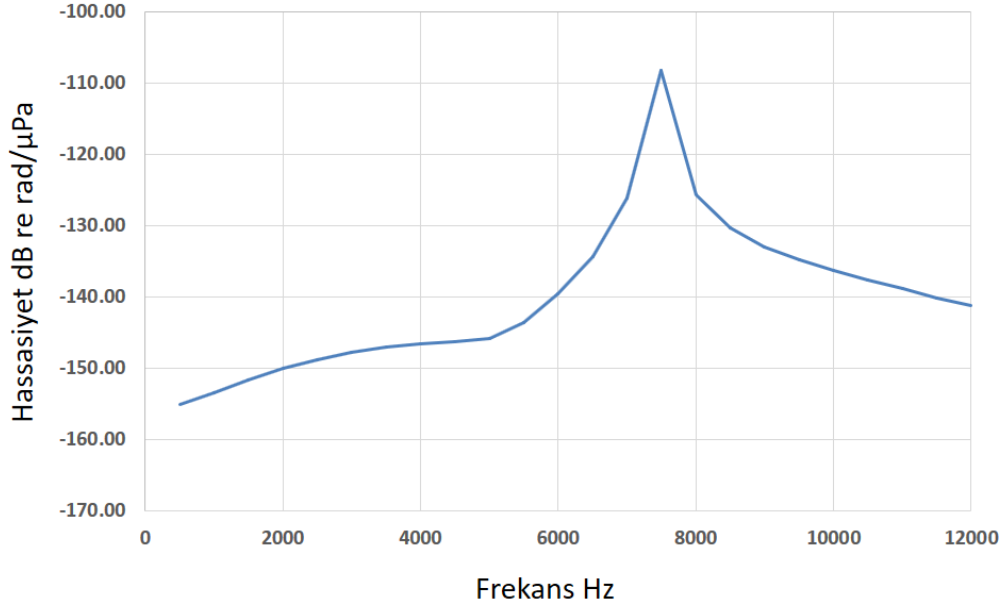
Şekil 2.6 :5 kHz'de algılayıcının yönlülük grafiği



Şekil 2.7 :Yönlülük analizi 0 derece yönü. 0 dereceden 90 dereceye doğru hareket ederken z eksenini boyunca açı değiştirilmiştir.

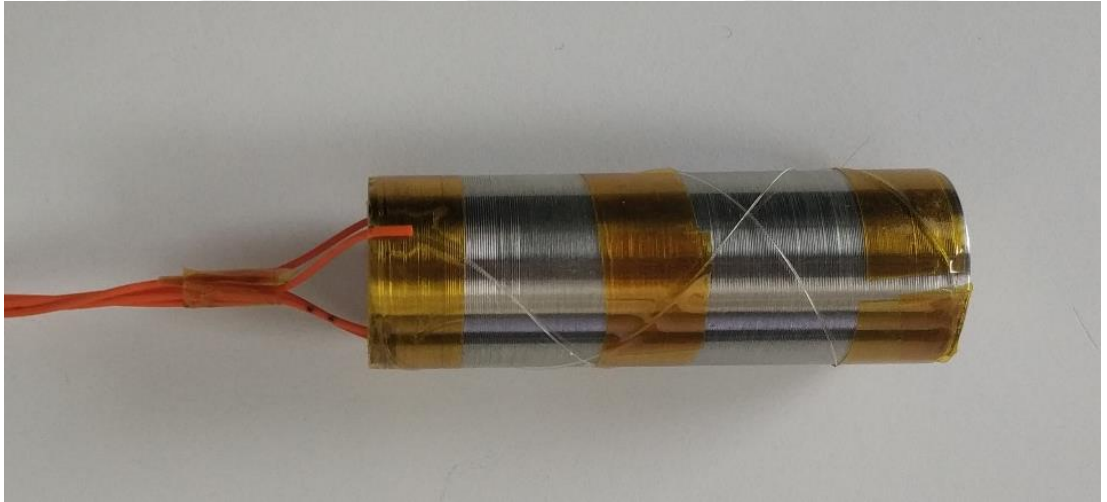
Şekil 2.6'daki grafik incelendiğinde tasarlanan algılayıcının yönlülük grafiği 3 dB içerisinde eş yönlü çıkmaktadır. Dolayısıyla hedefin yönlülüğü hakkında bilgi alabilmek için dizin yapısı oluşturulmalıdır.

Ayrıca algılayıcının Comsol Multiphysics ortamında mekanik rezonans analizinde yapılmıştır. Aşağıdaki hassasiyet grafiğinden de görüleceği üzere yapının ilk rezonans frekansı çalışma frekansının oldukça üzerinde ve 7.5 kHz civarındadır. Bu sebeple çalışmak istenilen frekans hassasiyet grafiği çok değişmemektedir.



Şekil 2.8 : Geniş bant hassasiyet grafiği

Analizler sonrasında algılayıcı prototiplemesi yapılmıştır. Üretimi tamamlanan prototipin üzerinde kalıpla kaplama çalışmaları yapılmadan önceki hali aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Resim 2.1: Üzerinde herhangi bir kaplama olmadan ortaya koyulan algılayıcı resmi. Fotoğrafta sensör mandrelinin içerisinde olan referans mandrel gözükmemektedir.

Yukarıdaki görselde ortaya koyulan algılayıcının dış şartlara karşı koruma sağlaması için 2 mm et kalınlığı olacak şekilde kalıp yardımıyla poliüretan kaplaması yapılmıştır.



Resim 2.2: Kaplaması yapılmış algılayıcı resmi

Sonuç olarak, bilgimiz dahilinde çam elyaf katkılı polimeri de içerecek şekilde mandrel tabanlı fiber optik akustik algılayıcı çalışmaları ilk defa yapılmış ve sonuçlar hassasiyet ve kullanım olarak umut vadetmektedir.

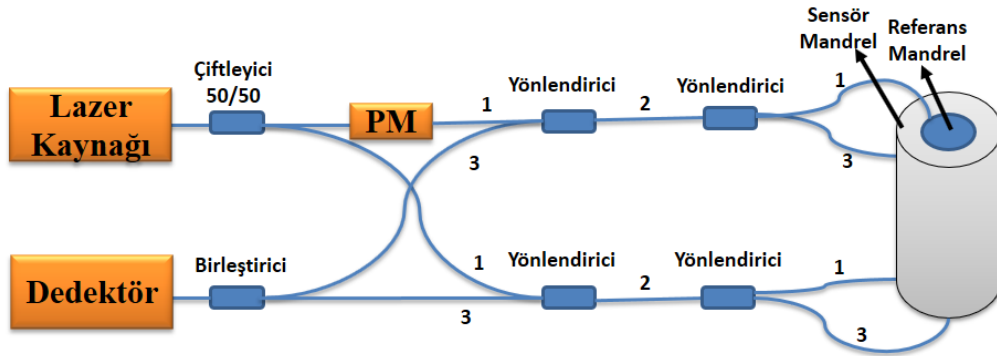
3 AKUSTİK SİNYALİN ÇÖZÜMLEMESİ

3.1 Amaç

Ortamdaki akustik sinyalin algılanıp, analiz birimine taşınması sırasında uygulanan işlemler: su ortamındaki akustik basıncın değişimine bağlı olarak algılayıcılarla optik sinyalin modüle olması, her bir algılayıcıdan gelen modüle olmuş optik sinyalin elektriksel sinyale dönüştürülmesi ve elektriksel sinyal üzerindeki akustik modülasyonun çözümlenmesi, son olarak da sayısal sinyal üzerinde taşınan akustik verilerin bilgisayar veya analiz birimi ile değerlendirilmesi olarak sıralanabilir. Bölüm 1’de teorik detayları verilen PGC metodunun kullanılmasına karar verilmiştir. Tez kapsamında buna yönelik sistem mimarisinin ortaya koyulması amaçlanmıştır.

3.2 Sinyal Çözümleme Mimarisi

PGC metodunun gerçekleştirildiği sistemin genel mimarisi aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 3.1: Sistem Genel Mimarisi

Yukarıdaki şekilde lazer kaynağından fiberle çıkan lazer ışığı ilk olarak fiber optik çiftleyici (50/50) yardımıyla ikiye ayrılıyor. İkiye ayrılan lazer sinyalinin bir kolu PGC metodunun uygulanması için PM (Faz Modülatörü) komponentinden geçirilirken diğer kol direk olarak yönlendirici yardımıyla algılayıcıya gönderilmektedir. Yönlendiriciler yönlü olarak çalışan pasif komponentlerdir. Bir numaralı koldan gelen optik sinyal sadece iki numaraya giderken iki numaradan gelen optik sinyal sadece üç numaraya gitmektedir. Fibere entegre bu yönlendiriciler yardımıyla algılayıcı içerisinde PM tarafından modüle edilmiş optik sinyal bir mandrelle giderken modüle edilmemiş sinyal diğer mandrelle gitmektedir. Sensör mandrel akustik sinyal nedeniyle nefes alma hareketi yaparken, üzerlerine sarılı fiberlerin boyu değişmekte ve bu durum interferometrenin iki kolu arasında faz farkı oluşturmaktadır. Aynı yönlendiriciler yardımıyla tekrardan toplanan bu sinyaller birleştirici yardımıyla birleştirilerek oluşan faz farkı genlik farkına dönüştürülmekte ve bir dedektör yardımıyla elektriksel sinyale çevrilmektedir. Burada kullanılan lazer kaynağı olarak RIO firmasının 1550 nm'de ışımaya yapan Planex Laser Diyotu kullanılmaktadır. Diyottan lazer ışığı SMF-28 tipteki fiberle dışarıya alınmaktadır. Sistemde kullanılan lazer teknik özellikleri aşağıdaki çizelgede sunulmaktadır.

Çizelge 3.1: Sistem mimarisinde kullanılan diyot lazer kaynağının teknik özellikleri

| Paremetre | Değer |
|------------------------|---------|
| Çıkış Gücü (cW) | 10 mW |
| Dalgaboyu | 1550 nm |
| Frekans bant genişliği | < 5 kHz |

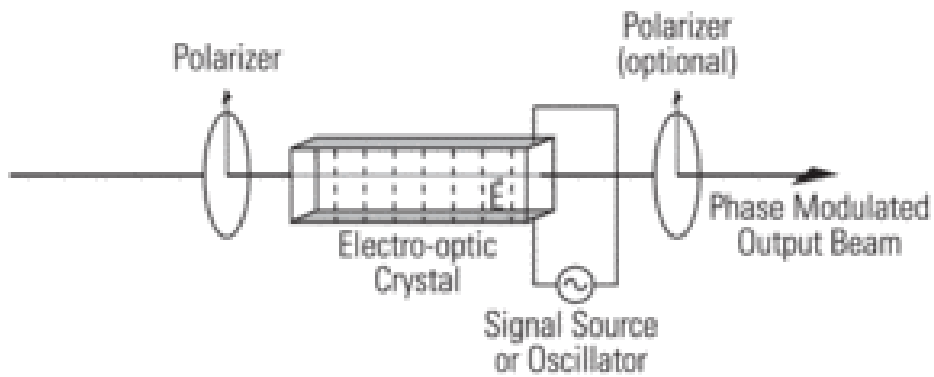
Lazer ışığının frekans bant genişliği 5 kHz altındadır. Evre uyumluluk uzunluğu aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir. [52]

$$L_c = \frac{c}{n\Delta f} \quad (3.1)$$

Burada c ışık hızını, n fiberin kırılma indisini ve Δf ise lazer ışığının bant genişliğini ifade etmektedir. Mimaride kullanılan lazer ışığının bant genişliği 5 kHz altındadır. Kullanılan fiber Corning-SMF 28 için kırılma indisi değeri 1.46'dır. [53] Buna göre yapılan hesaplama sonucunda yaklaşık 41 km'lik bir evre uyumlu uzunluğu ortaya çıkmıştır. Bu değer sistemde kullanılan fiber boyundan çok uzun olduğu için sorun teşkil etmemektedir.

Lazer bant genişliği Bölüm 1'de anlatıldığı gibi interferometre çıktısındaki gürültüyü doğrudan etkilemektedir. Eşitlik 1.9'daki formül kullanıldığında yaklaşık -112 dB re $\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ bir gürültü değeri bulunur. Burada İki kol arasındaki uzunluk farkı 2-metre olarak varsayılmıştır.

PGC tekniğinin uygulanabilmesi için fibere entegre modülatör kullanılmaktadır. Lazer sinyalini module etmek için faz veya genlik (MZM) modülatörleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modülatörlerin girişlerine belli frekansda bir sinus sinyali verilerek çıkış sinyalleri module edilmektedir. Bu maddelere elektriksel alan verildikçe ortam kırılma indisi değişmektedir. [54] Bu durum Pockels etkisi olarak adlandırılmaktadır. Kırılma indisi değişimi elektriksel alan şiddeti yönü ve polarizasyonu ile orantılıdır. Bu etki ferroelektrik kristallerde ortaya çıkmaktadır. Bu tarz modülatörlerde malzeme olarak lityum niobat (LiNbO_3) en yaygın kullanıma sahiptir. Basit bir faz modulator yapısı aşağıda gösterilmektedir. [55]



Şekil 3.2 : Faz modülatörünün basit gösterimi. Elektro optik kristale giriş sinyali polarizedir. Kristalin alt ve üstünde bulunan elektrotlar yardımıyla kristale elektriksel alan verilmektedir.

Faz modölatörü sonrasındaki faz değişimi aşağıdaki formülle gösterilir. [55]

$$\Delta\phi = \frac{\pi n_0^3 r V}{\lambda} \times \frac{L}{d} \quad (3.2)$$

Burada n_0 , herhangi bir elektriksel alana maruz kalmayan kristal kırılma indisini, L kristal uzunluğunu, λ lazer ışığının dalga boyunu, d elektrotlar arası mesafeyi, r faz modölatöründe kullanılan malzemenin elektro-optik katsayısını ve V ise elektrotlara uygulanan voltaj değerini göstermektedir. Örneğin, yarım dalga boyluk faz değişimi için gerekli voltaj değeri ise aşağı yazıldığı gibi ifade edilir.

$$V_\pi = \frac{\lambda}{n_0^3 r} \times \frac{d}{L} \quad (3.3)$$

Yukarıdaki gibi bir etki göz önünde bulundurularak sistem içerisinde faz modülasyonu için Thorlabs firmasının LiNbO3 malzemeli model numarası LN27S-FC olan faz modölatörü kullanılmıştır. Kullanılan faz modölatörünün teknik özellikleri aşağıda gösterilmektedir.

Çizelge 3.2: PGC tekniğini uygulamak için sistemde kullanılan faz modölatörü teknik özellikleri

| Paremetre | Değer |
|--------------------|----------------|
| Çalışma Dalgaboyu | 1525 – 1605 nm |
| E/O bant genişliği | 10 GHz |
| RF V_π | 7 V |

PGC metodunun uygulanması için faz modölatörü modülasyon deriniği 2.63 radyana karşılık gelecek şekilde 20 kHz sinus sinyali ile module edilmiştir. Eşitlik 1.6'daki $w_m = 2\pi \times 20 \text{ kHz}$ iken β , 2.63 radyana karşılık gelmektedir.

Yukarıda anlatıldığı module edilmiş ışığın bir bölümü girişim düzeneğinin bir koluna giderken module edilmemiş kısmı diğer koluna gitmektedir. Geri dönen sinyaller birleştirici yardımıyla birleştirildikten sonra optik dedektör yardımıyla elektriksel sinyale çevrilmektedir. Burada InGaAs (indium gallium arsenide) tabanlı Thorlabs firamsının PDB410-C model numaralı dedektörü kullanılmaktadır. Dedektöre ait teknik özellikler aşağıdaki çizelge de sunulmaktadır.

Çizelge 3.3: Sistemde optik sinyali elektriksel sinyale çevirmek için kullanılan dedektör özellikleri

| Paremetre | Değer |
|---------------------------|----------------------|
| Dedektör Malzemesi/Tipi | InGaAs/PIN |
| Çalışma Dalgaboyu | 800-1700 nm |
| Hassasiyet | 1 A/W |
| RF Çıktı çevrim katsayısı | 50×10^3 V/W |
| Bant Genişliği | DC-100 MHz |

Bir ADC (Analogtan Dijitale Cevirici) yardımıyla detektörden gelen elektriksel sinyal okunmaktadır. Sistemde kullanılan sinyal işleme ve kontrol kartı bu tez kapsamında çalışılmamıştır. Sinyal işleme ve kontrol kartı özetle lazer kaynağını istenilen parametrelerde sürebilen, faz modülatörünü değişken frekans ve genliklerde bir DAC yardımıyla kontrol eden, dedektörden gelen bilgiyi ADC yardımıyla elektriksel sinyale FPGA merkezli bir karttır. Elektriksel sinyal üzerindeki faz bilgisini de bir Bölüm 1'de anlatılan PGC hesaplarının uyarlandığı bir bellek yardımıyla çözümleyen bu kart faz bilgisinin zamana göre değişimini vermektedir. Sistemde kullanılan kartın genel özellikleri aşağıda gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.4: Sistemde kullanılan sinyal işleme ve control kartının genel özellikleri

| Paremetre | Değer |
|------------------------|--------------|
| ADC Örnekleme Frekansı | 50 MHz |
| DAC Hızı | 25 MSPS |
| Saat İşaret Üretici | 100 MHz |

Yukarıda detayları verilen mimari ile algılayıcıdan gelen sinyalin çözümlenip akustik bilginin elde edildiği test sonuçları ise 5. bölümde aktarılmaktadır.



4 ALGILAYICI ÇOKLAMA

4.1 Amaç

Ortamdaki akustik sinyali algılamak için algılayıcı prototiplemesi yapılmış. Algılayıcıdan gelen sinyal çözümlemesinin nasıl yapıldığı önceki bölümlerde aktarılmıştır. Bu bölümde dizin yapısı oluşturmak algılayıcı çoklamasına yönelik çalışmalar anlatılmış ve bir bütün olarak genel sistem mimarisi ortaya koyulmuştur. 4 tane algılayıcının çoklaması için Bölüm 1’de anlatılan çoklama yöntemlerinden TDM tez kapsamında tercih edilmiştir.

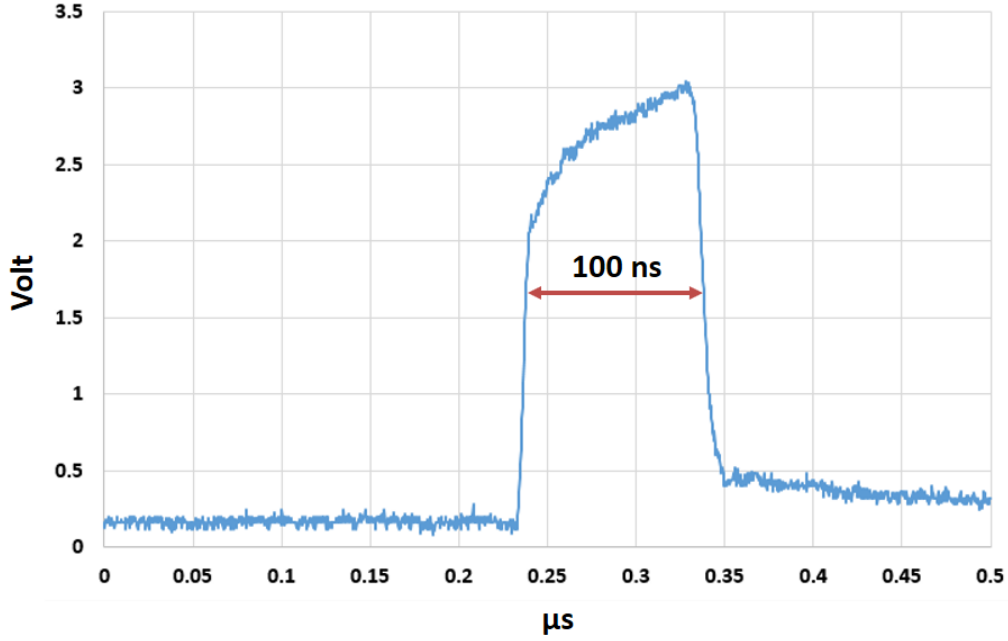
4.2 Algılayıcı Çoklama Sistem Mimarisi

Çoklu algılayıcı dizilimi oluşturma konusunda literatürde çok çeşitli algılama ve çoğullama teknikleri (zaman, dalgaboyu, modülasyon frekansı vb.) yer almakla birlikte en çok kullanılan tekniğin zaman çoğullama olduğu diğer tekniklerin genellikle buna paralel bir yapıda kullanılarak dizin eleman sayısının artırıldığı görülmektedir. Çeşitli kaynaklarda tek başına zaman çoğullama yapısı ile tek fiber üzerinde 100’den fazla algılayıcı kullanılabilirdiği belirtilmektedir [0].

Zamansal çoklama metodu için lazer kaynağı atımlar üretecek şekilde üretilmiştir. Lazer kaynağı 250 kHz tekrar frekansında 100 ns atımlar üretecek şekilde sürülmüştür.

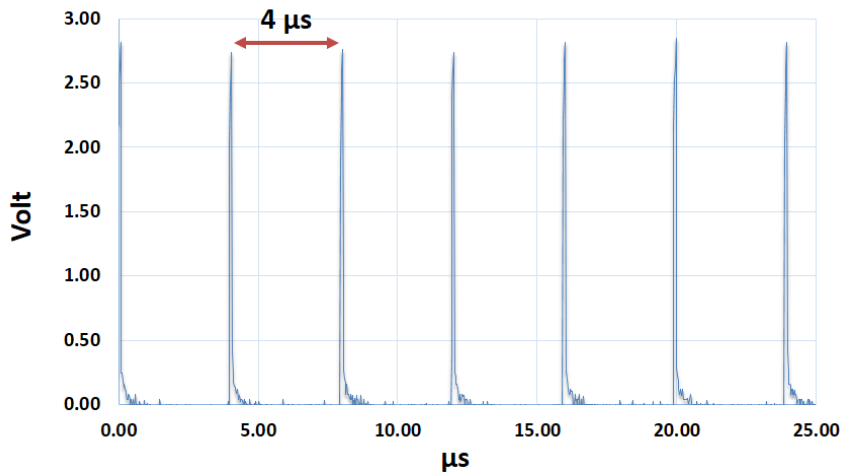
Atım tekrar frekansı akustik sinyalin örnekleme frekansını belirlemektedir. Nyquist-Shannon Örnekleme Teorisi’ne göre örnekleme frekansı en az örneklenmek istenen sinyalin en yüksek frekans içeriğinin iki katı olmalıdır. 5 kHz en yüksek frekans değerine sahip olan bir ses sinyalini örnekleme için en az 10000 örnek/saniye alınmalıdır. Fakat, sistemde sinyal analizi için PGC yöntemi kullanılmıştır. 10000 örnek/saniye hızından yüksek olacak şekilde için optik sinyal 20 kHz PGC frekansı ile modüle edilmektedir. 20 kHz’in örneklenmesi için en düşük 40.000 örnek/saniye alınmalıdır. Bu durumda 250 kHz tekrar frekansı ile sürülecek optik atımlar PGC sinyalini örnekleme için yeterli olacaktır.

Lazerin istenildiği şekilde sürülüp sürülmediğini görmek için lazer çıktısı InGaAs tabanlı bir dedektör yardımıyla osiloskop üzerinden gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1 : Dedektör sonrası lazer atım uzunluğu. Yaklaşık 100 ns olarak lazer atımlarının sürüldüğü görülmüştür.

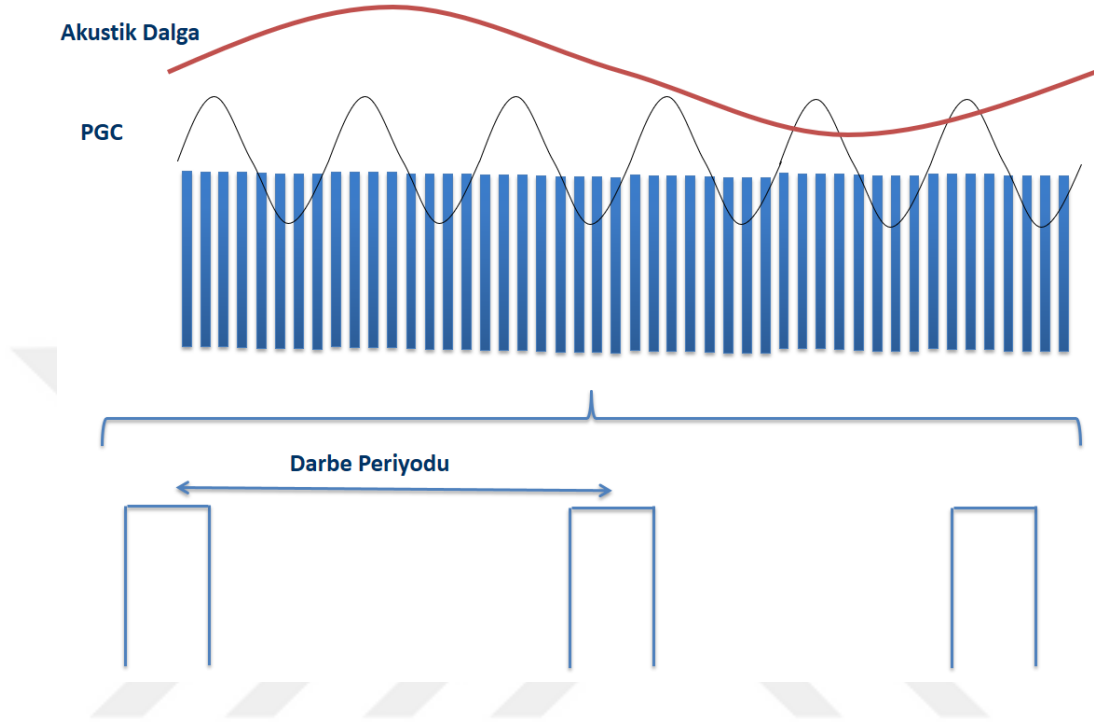
Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi lazer atım genişliği yaklaşık 100 ns'dir. Bunun dışında ayrıca tekrar frekansı da kontrol edilmiştir. Aşağıda birden fazla lazer atımının dedektör sonrası zamansal değişimi sunulmaktadır.



Şekil 4.2 : TDM metodu için üretilmiş lazer atımlarının zamansal görüntüsü

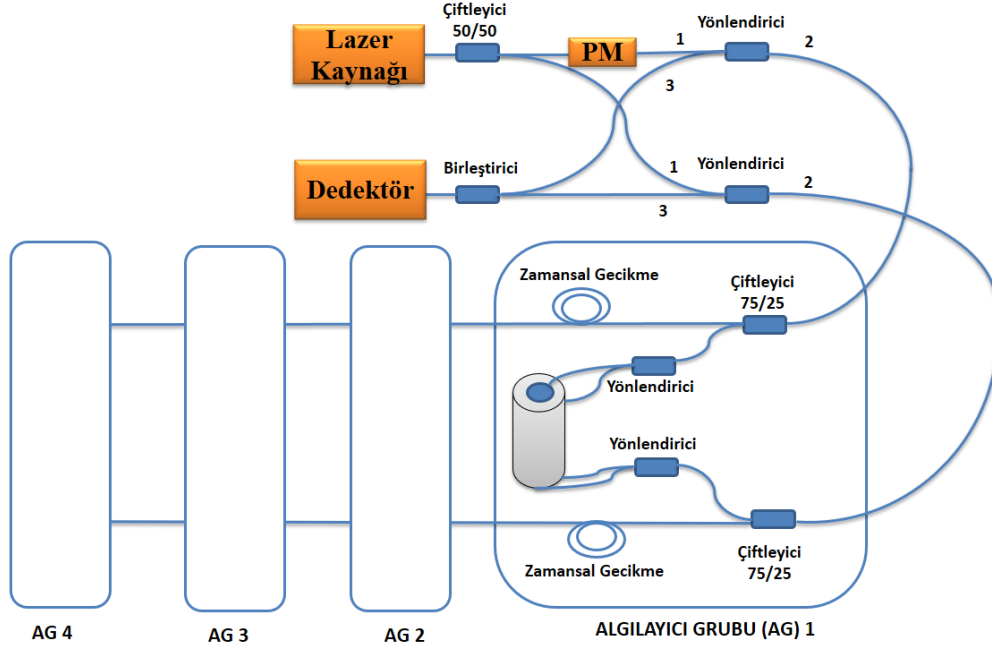
Dedektör sonrası lazer atımları arasındaki mesafe yaklaşık $4 \mu\text{s}$ olarak ölçülmüştür. Bunun frekans karşılığı ise 250 kHz 'dir.

Akustik sinyalin PGC sinyali ile PGC sinyalinin ise lazer atımları ile örneklendiği durumun özet şeması aşağıda özetlenmektedir.



Şekil 4.3 : Lazer atımları, PGC sinyali ve akustik sinyalin gösterimi

Algılayıcılardan gelen sinyali zamansal olarak ayrıştırabilmek için her bir algılayıcı arasına 25 metre (fiber içerisinde git gel zamansal fark 250 ns) yerleştirilmiştir. Sistemin genel mimarisi aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Çoklama sonrası sistem genel mimarisi

Yukarıda genel mimarisi sunulan sistemde optik gücün algılayıcılara olabildiğince eşit dağılımı için her bir algılayıcı grubu içerisinde çift yönlü çalışabilen çiftleyiciler kullanılmıştır. 1. Algılayıcı grubu içerisinde bir kolu % 75 diğer kolu % 25 (1. algılayıcı grubuna gidiyor) olacak şekilde çiftleyiciler yerleştirilmiştir. Her bir algılayıcı grubunda bu çiftleyicilerden hem sensor mandrel giden fiber hem de referans mandrel giden fiber için 2'şer tane kullanılmıştır. 2. algılayıcı grubunda 66/33, 3. Algılayıcı grubunda ise 50/50 çiftleyiciler kullanılmıştır. 4. algılayıcı grubunda ise ihtiyaç olmadığı için çiftleyici kullanılmamıştır.

Dedektör çıkışındaki analog siyal sayısallaştırıldıktan sonra farklı algılayıcılardan gelen işaretlerin ayıklanması ve module işaretin üzerinden algılayıcı verilerinin çıkarılması işlemleri FPGA üzerinde sayısal sinyal işleme bellemini tarafından yapılmaktadır.

Sistem içerisinde 4 algılayıcı olduğundan TDM yeterli olmuştur. Algılayıcı sayısını artırmak için 1. Bölüm'de anlatıldığı gibi hibrit çoklama çözümleri kullanılabilir.

Beşinci bölümde genel mimarisi tanımlanmış sisteme ait test ve karakterizasyon sonuçları bulunmaktadır.



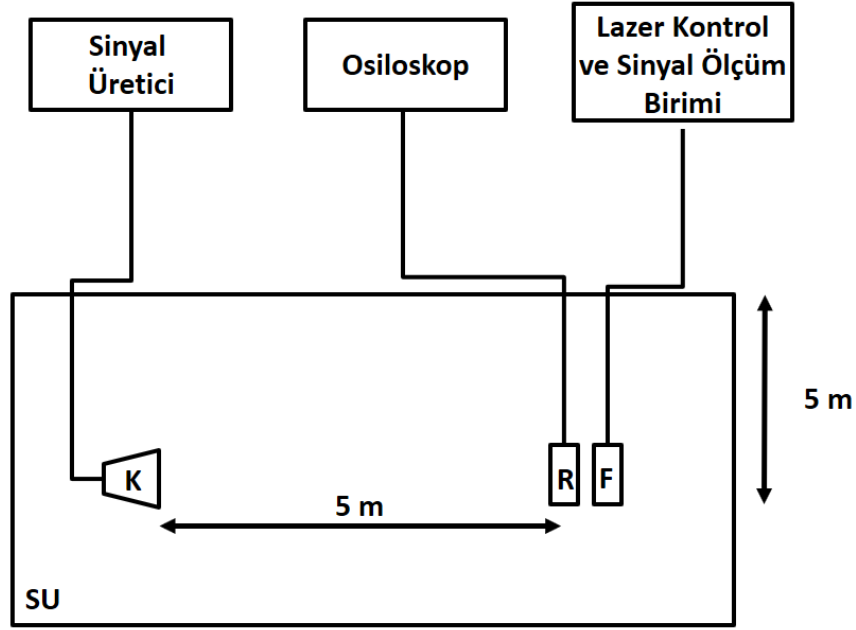
5 TEST VE KAREKTARİZASYON

Bu yöndeki bir sistemin temel özellikleri algılayıcı hassasiyeti ve sistemin iç gürültüsüdür. Bu kapsamda ortaya koyulan sistemin su altında hassasiyet ölçümleri yapılması ve gürültü performansının çıkartılması amaçlanmıştır. Önceki bölümlerde bu değerlere yönelik teorik hesaplamalar ve analiz çalışmaları yapılmış olsa da karşılaştırma yapmak için gerekli test düzenekleri kurulup gerçek veriler elde edilmiştir.

5.1 Algılayıcı Karakterizasyonu

Algılayıcı karakterizasyonu için İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi içerisinde bulunan gölet kullanılmıştır. Algılayıcı hassasiyetini ölçmek için piezo-elektrik tabanlı konvansiyonel bir hidrofon referans algılayıcı olarak kullanılmıştır. Aşağıda hassasiyet ölçüm test düzeneği gösterilmektedir.

Test düzeneğinde akustik kaynak olarak Geo Spectrum firmasının M18C-6 model numaralı küre transdüseri kullanılmıştır. Akustik kaynak bir sinyal üretici yardımıyla farklı frekanslarda akustik yayılım yapmaktadır. 1 kHz'den 5 kHz'e kadar farklı frekanslarda sinüs şeklinde yayın yapılmıştır. Akustik kaynaktan çıkan akustik dalga referans hidrofon tarafından algılanmaktadır. Referans hidrofon olarak Teledyne firmasının Reson TC4040 ürünü kullanılmıştır. Referans hidrofon üzerine gelen basınç bir osiloskop yardımıyla genliği voltaj cinsinden okunmuştur.



Şekil 5.1 : Algılayıcı hassasiyet ölçüm test düzeneği. Burada K: Akustik Kaynak, R: Referans Hidrofon F: Fiber Optik Algılayıcı

Referans hidrofonun hassasiyet grafiği kullanılarak referans hidrofon üzerindeki basınç aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

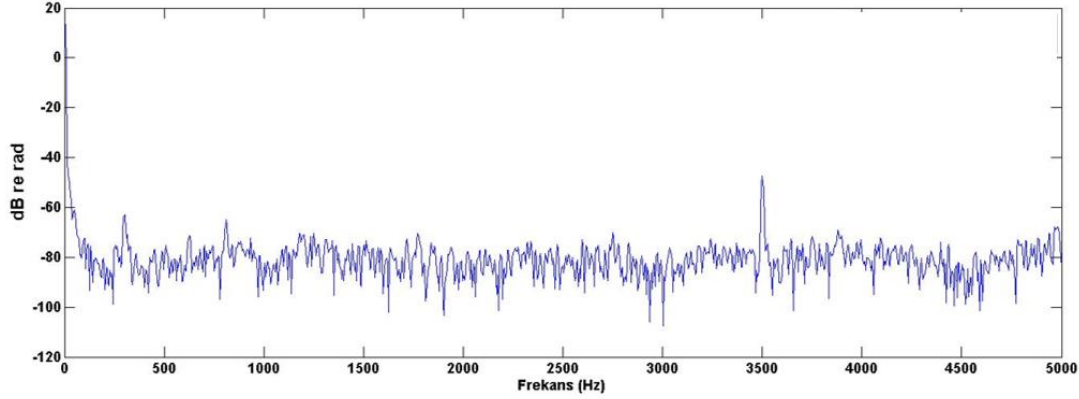
$$P(\mu Pa) = \frac{\text{Volta j } (V)}{H\left(\frac{V}{\mu Pa}\right)} \quad (5.1)$$

Burada P basınç değerini H ise referans hidrofon hassasiyet değerini vermektedir. Hidrofon hassasiyetleri ve gürültü değerleri dB cinsinden verilmektedir. Logaritmik olarak Eşitlik 5.1 aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P(dB \text{ re } \mu Pa) = 20 \log(V) - H(dB \text{ re } \frac{V}{\mu Pa}) \quad (5.2)$$

Böylelikle referans hidrofon yanına konuşlandırılmış olan fiber optik akustik algılayıcı üzerindeki basınç değeri elde edilebilmiştir. Detayları önceki bölümlerde anlatılan lazer kontrol ve sinyal ölçüm birimi yardımıyla fiber optik akustik algılayıcı üzerindeki basınç bilgisi radyan olarak çözümlenmektedir. Genlik bilgisi için zamana karşılık toplanan radyan değişim verisinin FFT'si

alınmış ve ilgili frekanstaki genlik bilgisi frekans spektrumundan okunmuştur. Aşağıda örnek olması için 3.5 kHz'deki bir akustik sinüs dalgasının fiber optik akustik algılayıcı ile alınmış verisinin frekans spektrumu sunulmaktadır.



Şekil 5.2: Fiber optik akustik algılayıcı ile okunmuş 3.5 kHz akustik sinyalin frekans spektrumu

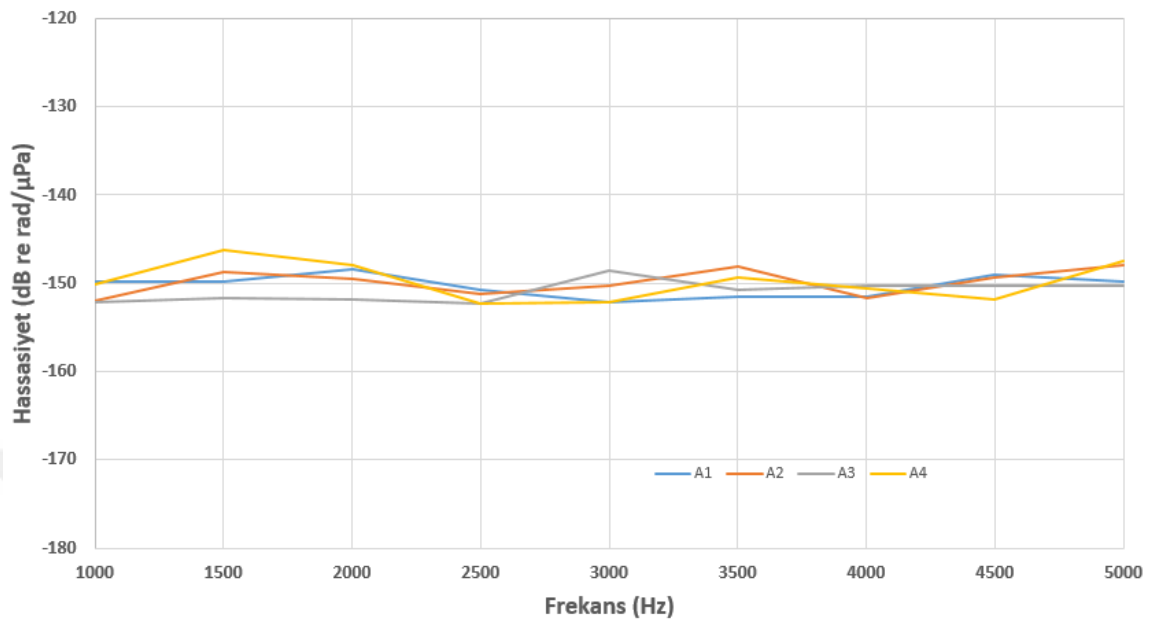
1 kHz'den 5 kHz'e kadar farklı frekanslarda akustik sinyal ölçümleri yapılmıştır. Fiber optik akustik algılayıcının hassasiyeti için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$H_F \left(\frac{rad}{\mu Pa} \right) = \frac{Faz (radyan)}{P (\mu Pa)} \quad (5.3)$$

Burada H_F fiber optik akustik algılayıcının hassasiyetini gösterirken P referans hidrofon tarafından okunan basınç bilgisini göstermektedir. Logaritmik olarak eşitlik 5.3 aşağıdaki gibi gösterilir.

$$H_F \left(dB \text{ re } \frac{rad}{\mu Pa} \right) = 20 \log(rad) - P(dB \text{ re } \mu Pa) \quad (5.4)$$

Yukarıdaki test düzeneği ve eşitlikler kullanılarak her bir algılayıcı için elde edilen hassasiyet grafiği aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 5.3: Her bir algılayıcı için ölçülen hassasiyet değerleri

Bölüm 2’de algılayıcıya yönelik yapılan analiz çalışmalarında elde edilen hassasiyet sonuçlarına yakın ölçüm sonuçları elde edilmiştir.

5.2 Gürültü Karakterizasyonu

Sistemin gürültü seviyesi bu tarz algılayıcı sistemlerde en önemli parametredir. İlgili sinyalin algılanabilmesi için sinyal genliği gürültünün üzerinde kalmalıdır. Bir algılamadaki temel gürültü kaynakları sistem kendi iç gürültüsü ve ortam gürültüsüdür. Algılama performansını artırabilmek için sistem gürültüsü ortam gürültüsünün altında olmalıdır.

5.2.1 Ortam Gürültüsü

Ortam gürültüsünün iki ana kaynağı sistemin entegre edildiği platformun (gemi vb.) un pervane vb. sebeplerden kaynaklı gürültüsü ve denizin kendi gürültüsü olarak tanımlanmaktadır. [57, 58] Platformdan hiç gürültü gelmediği sadece deniz gürültüsünün olduğu durum tez kapsamında referans alınmıştır. Aşağıda

farklı deniz koşulu durumlarında basınç cinsinden gürültü grafikleri verilmektedir.

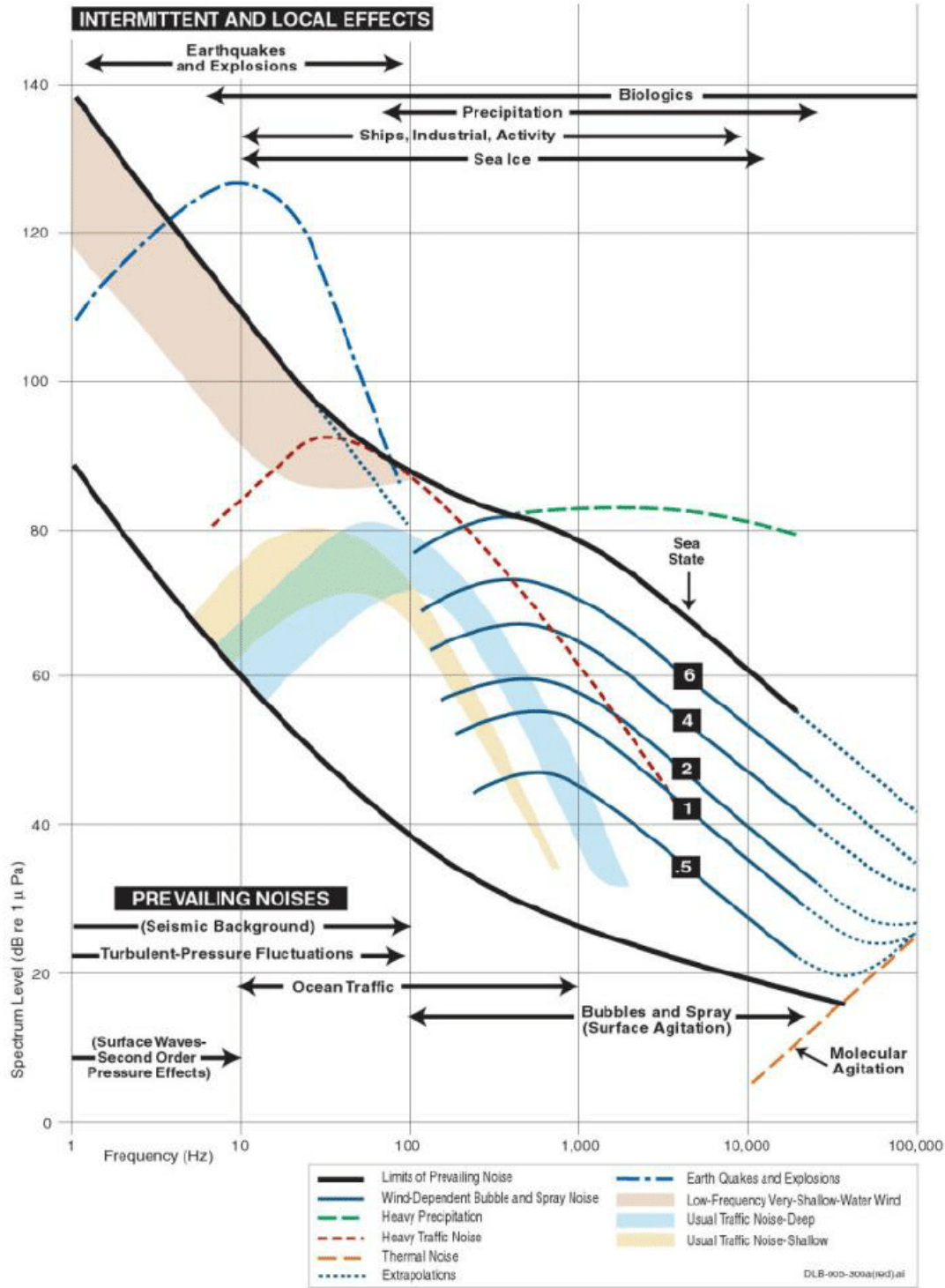
Deniz ortamındaki gürültünün temel kaynakları sismik gürültüler, deniz yüzeyi gürültüsü, deniz canlılıları, moleküler hareketler, deniz trafiği ve türbülansdır.



Aşağıda farklı dalga yükseklikleri ve rüzgar hızına göre deniz durum tablosu verilmektedir. [59]

Çizelge 5.1: Farklı dalga yükseklikleri ve rüzgar hızına göre deniz durum seviyeleri

| | | | | | | | |
|--------------------------|----|------|-----|-----|-----|----|----|
| Deniz Durumu | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Rüzgar Hızı (knots) | ≤1 | 5 | 13 | 16 | 19 | 22 | 28 |
| Dalga Yüksekliği (metre) | 0 | 0.05 | 0.4 | 0.7 | 1.3 | 2 | 3 |



Şekil 5.4: Farklı deniz koşullarında spektral gürültü seviyesi ve temel gürültü kaynakları

Rüzgar ve dalga gibi etkiler özellikle 500 Hz üzerinde etkin rol oynamaktadır. Hic bir rüzgar ve dalga olmadığı ideal durum deniz durumu 0 olarak kabul edilmektedir. Özellikle artan rüzgar hızı ile birlikte deniz gürültüsü artmaktadır. Artan rüzgarla birlikte dalga yüksekliği artmakta ve deniz yüzeyindeki çalkalanma artmakta ve ortam gürültüsü yükselmektedir. Rüzgar ortam gürültüsü üzerinde etkili iken hafif yağmur ve kar gibi yağışlar deniz içerisindeki ortam gürültüsünü çok etkilememektedir. Fakat, yoğun yağışla birlikte tüm frekanslarda ortam gürültüsü yükselmektedir. [59]

Sonuç olarak sistem performansının en önemli kriteri kendi iç gürültüsüdür. İç gürültü ortam gürültüsünün altında olduğunda sistem performansı artarken üstünde kaldığında sistem performansı düşmektedir. Bir sonraki bölümde sistemin iç gürültüsü ölçülmüş ve ortam gürültüsü ile kıyaslaması yapılmıştır.

5.2.2 Sistem İç Gürültüsü

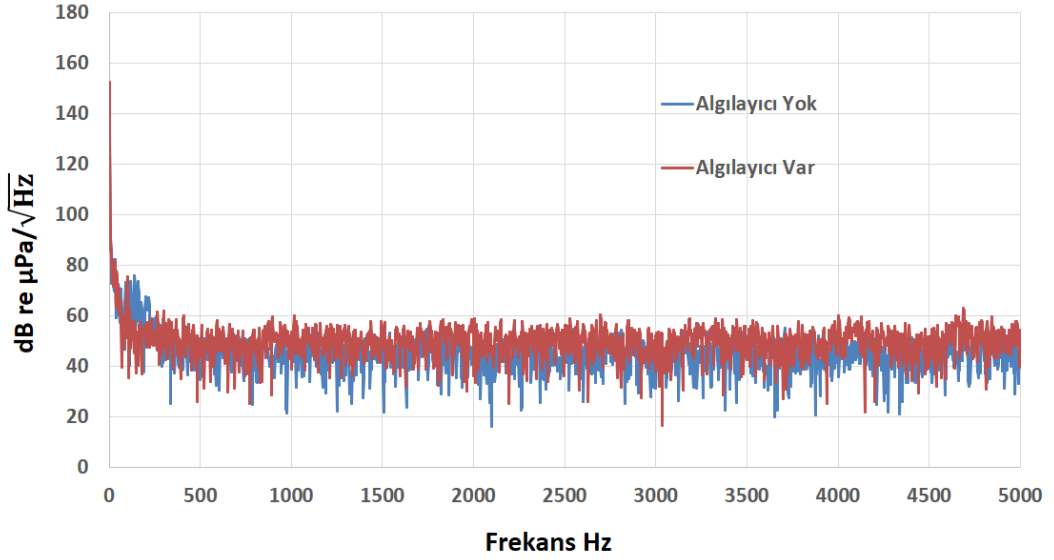
Bu yöndeki bir sistemin iç gürültüsüne bakılırken iki gürültü kaynağı ortaya çıkmaktadır. Algılayıcı gürültüsü ve lazer kontrol ve sinyal çözümü biriminin gürültüsü iki ana gürültü kaynağıdır. Algılayıcı gürültüsü için termal etkiler dışında teorik bir gürültü kaynağı bulunmamaktadır. [60] Algılayıcı faz gürültüsü için Johnson gürültü benzetimi yapılmaktadır. Aşağıdaki eşitlikle bu gürültü hesaplanabilir. [60-61]

$$\delta(\phi_g) = 10 \log(T^2 L) - 194.6 \text{ (dB re } \frac{\text{rad}}{\sqrt{\text{Hz}}}) \quad (5.5)$$

Burada T Kelvin cinsinden ortam sıcaklığını, L metre cinsinde fiber uzunluğunu ifade etmektedir. Örneğin 295 Kelvin oda sıcak ve yaklaşık 20 metre fiber uzunluğunda faz gürültüsü yaklaşık $-130 \text{ dB re } \frac{\text{rad}}{\sqrt{\text{Hz}}}$ olarak hesaplanmaktadır.

Bu değer bir önceki bölümde ölçülen yaklaşık $-150 \text{ dB re } \frac{\text{rad}}{\mu\text{Pa}}$ hassasiyet değeriyle basınca çevrildiğinde yaklaşık $20 \text{ dB re } \frac{\mu\text{Pa}}{\sqrt{\text{Hz}}}$ gürültü değeri elde edilmektedir. Bu gürültü değeri ulaşılabilir teorik olarak minimum gürültü değerini ifade etmektedir. Bu yüzden algılayıcı pasif olarak kabul edilmekte ve

deniz durum gürültüleri ile karşılaştırabilmek için hassasiyet değeri kullanılarak basınç (μPa) cinsinden sunulmaktadır.



Şekil 5.6: Sistem iç gürültü ölçüm sonuçları

Yukarıdaki grafikte sonuçla Şekil 5.4'deki deniz durum gürültüsü karşılaştırıldığında özellikle 1 kHz ile 5 kHz arasında sistem iç gürültüsünün deniz durumu 1'den daha iyi olduğu görülmektedir.

6 SONUÇ

Düşük bütçe, küçük ebat, yüksek hassasiyet ve en önemlisi elektromanyetik girişimlerden etkilenmemesi sebebiyle fiber optik sistemler akustik algılama için kullanılmaktadır. Bu ve benzeri sistemler askeri alanlarda su üstü ve su altı gemilerinde özellikle düşük frekanslarda pasif algılama yapan çekili dizin sonarı, deniz altı yan dizin sonarı, liman ve boğaz koruma sonarları gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Bunların dışında petrol, doğal gaz arama çalışmaları ve sismik araştırmalarda da kullanım alanı bulmaktadır.

Tez kapsamında boyutları küçük olacak şekilde Mach-Zehnder girişim düzeneği kullanılarak cam elyaf polimer tabanlı algılayıcı çalışmaları yapılmıştır. Mandrel tabanlı algılayıcı sisteminde Mach-Zehnder girişim düzeneğinin bir fiber kolu referans olması için akustik basınca maruz kalmayacak, kalsa da akustik basınçtan çok etkilenmeyecek silindirik bir mandrelle sarılmaktadır. Sensör fiber kolu ise akustik basınca direk maruz kalacak şekilde sensör mandrel üzerine sarılmıştır. Burada algılayıcı boyutunu küçültmek adına referans mandrel, sensör mandrel içerisine yerleştirilmiştir. Bu yöndeki en önemli algılayıcı parametreleri fiber sarım sayısı, mandrel geometresi ve mandrel malzemesidir. Algılayıcı çalışmaları yapılırken bu yönde optimizasyon ve analiz çalışmaları yapılmıştır. Farklı malzeme tipleri ile Comsol Multiphysics kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bilgimiz dahilinde çam elyaf katkılı polimer mandrel tabanlı fiber optik akustik algılayıcı ilk defa çalışılmış, farklı malzemelerle karşılaştırılmış ve detaylandırılmıştır. Algılayıcı hassasiyeti, kolay üretim ve termal genleşme gibi faktörler göz önünde bulundurularak algılayıcı içerisinde kullanılan sensör mandrel malzemesi olarak çam elyaf polimer tercih edilmiştir.

Algılayıcı çalışmalarıyla birlikte algılayıcıdan gelen lazer ışığı üzerindeki akustik bilgi çözümü yapılmıştır. Akustik bilginin çözümlenmesi için PGC metodu kullanılmıştır. Taşıyıcı bir frekansla modüle edilen lazer sinyalinin bir

kolu girişim düzeneğinin bir koluna gönderilirken modüle edilmemiş sinyal diğer kola gönderilmiştir. Girişim düzeneğinin kollarından geri dönen sinyaller bir tane fiber birleştirici ile birleştirildikten sonra dedektör yardımıyla elektriksel sinyale çevrilmiştir. Elektriksel sinyal üzerindeki akustik bilgi PGC demodulasyon ve faz sayım yöntemiyle elde edilmiştir.

Ortaya koyulan algılayıcı ve sinyal çözümüleme mimarisi ile algılayıcı karakterizasyonu yapılmıştır. Algılayıcı hassasiyet değeri yaklaşık $-150 \text{ dB re } \frac{\text{rad}}{\mu\text{Pa}}$ olarak analiz edilmiştir. Ayrıca referans hidrofon ve akustik kaynaklar kullanılarak göl ortamında yapılan ölçümler sonucunda bu değere yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Bu yöndeki bir sistemin bir diğer önemli parametresi olan gürültü seviyesine yönelik hem teorik hem de deneysel çalışmalar yapılmıştır. Algılayıcı iç gürültüsü için Johnson gürültü benzetimi yapılmıştır. Teorik olarak hesaplandığında algılayıcı gürültüsü $-130 \text{ dB re } \frac{\text{rad}}{\sqrt{\text{Hz}}}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer $-150 \text{ dB re } \frac{\text{rad}}{\mu\text{Pa}}$ hassasiyet değeriyle basınca çevrildiğinde yaklaşık $20 \text{ dB re } \frac{\mu\text{Pa}}{\sqrt{\text{Hz}}}$ olarak yakınsanmıştır. Çok küçük olan bu değer ihmal edilmiş ve sistem iç gürültüsü olarak lazer kontrol ve sinyal işleme biriminin gürültüsü ölçülmüştür.

Lazer kontrol ve sinyal işleme biriminin gürültü ölçümü yapılırken algılayıcının sensör ve referans kollarına giden fiberler kısa devre edilmiş ve gürültü ölçümü yapılmıştır. Yapılan gürültü ölçümü sonucunda $-100 \text{ dB re } \frac{\text{rad}}{\sqrt{\text{Hz}}}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer hassasiyet değeriyle basınca çevrildiğinde yaklaşık $50 \text{ dB re } \frac{\mu\text{Pa}}{\sqrt{\text{Hz}}}$ olarak yakınsanmıştır. Farklı frekanslarda bu değer değişkenlik gösterse de genel iç gürültü seviyesi deniz durumu 1 civarında kalmıştır.

Algılayıcı çalışması ve sinyal çözümüleme çalışmalarının yanı sıra algılayıcı çoklama çalışmaları da yapılmıştır. Çalışma frekans aralığında ($< 5 \text{ kHz}$) eş yönlü algılama yapan bu sistemle ilerleyen dönemlerde ışın demetleme yöntemiyle algılama yapabilmek için dizin yapısına yönelik algılayıcı çoklama

alışmaları yapılmıştır. Algılayıcı oklama için literatürde frekans modulasyonu yaparak frekans bölmeli oklama veya her bir algılayıcı için farklı dalga boyları kullanarak dalga boyu bölmeli oklama yöntemleri kullanılmaktadır. Fakat bu tarz sistemlerde komponent sayısı ve maliyeti arttığı için zamansal oklama yöntemi dizin yapısı oluşturmak için tercih edilmiştir.

Zamansal oklama yönteminde girişim düzeneğinin kollarına gidecek olan lazer kaynağı atımlar şeklinde üretilmiştir. Lazer atımları her bir algılayıcıya gönderilmiştir. Algılayıcılardan gelen lazer atımlarının ayrıştırılabilmesi için her bir algılayıcı arasında fiberle zamansal geçikme koyulmuştur.

Sonuç olarak tez kapsamında cam elyaf polimer mandrel tabanlı algılayıcı çalışması yapılmış, algılayıcılardan gelen akustik bilgi özömlenmiş ve dizin yapısına yönelik oklama çalışmalarıyla tez çalışması nihailendirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **K. Yin, M Zhang, T. Ding, L. Wang, Z. Jing, Y. Liao** “An Investigation of Fiber-Optik Air-Backed Mandrel Hydrophone”, *Optics Communications* 281:94-191, 2008
- [2] **J. Im, Y. Roh**, “A finite Element Analysis of an Interferometric Optical Fiber Hydrophone with a Concentric Composite Mandrel Including a Foaming Layer”, *J AcousticSoc.* Vol. 106, No. 3 Pt.1, 1999
- [3] **K. Kuang, R. Kenny, M. Whelan, W. Cantwell, and P. Chalker**, “Embedded fibre bragg grating sensors in advanced composite materials,” *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 10, pp. 1379–1387, 2001.
- [4] **X. Pan, D. Liang, and D. Li**, “Optical fiber sensor layer embedded in smart composite material and structure,” *Smart materials and structures*, vol. 15, no. 5, p. 1231, 2006.
- [5] **S. Melle, K. Liu, et al.**, “Wavelength demodulated bragg grating fiber optic sensing systems for addressing smart structure critical issues,” *Smart Materials and Structures*, vol. 1, no. 1, p. 36, 1992.
- [6] **R. Maaskant, T. Alavie, R. Measures, G. Tadros, S. Rizkalla, and A. GuhaThakurta**, “Fiber-optic bragg grating sensors for bridge monitoring,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, no. 1, pp. 21–33, 1997.
- [7] **A. D. Kersey**, “Optical fiber sensors for permanent downwell monitoring applications in the oil and gas industry,” *IEICE transactions on electronics*, vol. 83, no. 3, pp. 400–404, 2000.
- [8] **G. Shiach, A. Nolan, S. McAvoy, D. McStay, C. Prel, and M. Smith**, “Advanced feed-through systems for in-well optical fibre sensing,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 76, p. 012066, IOP Publishing, 2007. 49
- [9] **T. Yamate**, “Fiber optic sensors for the exploration of oil and gas,” in *19th International Conference on Optical Fibre Sensors*, pp. 700438–700438, International Society for Optics and Photonics, 2008.

- [10] **J. Deng, H. Xiao, W. Huo, M. Luo, R. May, A. Wang, and Y. Liu**, "Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers," *Optics & Laser Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 305–311, 2001.
- [11] **G. Yilmaz and S. E. Karlik**, "A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 125, no. 2, pp. 148–155, 2006.
- [12] **S. Oho, H. Kajioka, and T. Sasayama**, "Optical fiber gyroscope for automotive navigation," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 3, pp. 698–705, 1995.
- [13] **E. Udd and W. B. Spillman Jr**, *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. John Wiley & Sons, 2011.
- [14] **O. C. elikel**, "Construction and characterization of interferometric fiber optic gyroscope (ifog) with erbium doped fiber amplifier (edfa)," *Optical and quantum electronics*, vol. 39, no. 2, pp. 147–156, 2007.
- [15] **B. Culshaw, G. Stewart, F. Dong, C. Tandy, and D. Moodie**, "Fibre optic techniques for remote spectroscopic methane detection from concept to system realisation," *Sensors and actuators B: chemical*, vol. 51, no. 1, pp. 25–37, 1998. [14] **W. Cao and Y. Duan**, "Optical fiber-based evanescent ammonia sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 110, no. 2, pp. 252–259, 2005.
- [16] **R. Jorgenson and S. Yee**, "A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 12, no. 3, pp. 213–220, 1993.
- [17] **J. Canning**, "New Fibre and Grating Technologies for Laser and Sensors, *Frontiers in Laser and Optoelectronics*", W. T. Arkin ed., Nova Scientific Publishers, US, 2007.
- [18] **N. Takahashi, A. Hirose and S. Takahashi**, "Underwater Acoustic Sensor with Fiber Bragg Grating," *Opt. Rev.*, Vol.4, No.6, 691-694 (1997).
- [19] **M. Born, E. Wolf**, *Principles of Optics*, Pergamon, Oxford, 1991.
- [20] **L. Repetto, Ø. Farsund, L. Vines, G. Wang, C. Erbeia, C. Lachaize, A. Hordvik, A. Berg, G.B. Havsga° rd, K. Nakken**, "Design and field test of a 32-element all-fiber optic hydrophone system", *UDT Europe, Conference Proceedings*, 2002.

- [21] **A.I. Azmi**, “Development of Fiber Grating-Based Sensing Techniques and Application in Mechanical Engineering” PhD Thesis UNSW, 2012
- [22] **C.K. Kirkendall, A. Dandridge**, “Overview of highperformance fiber-optic sensing”, J, Phys.D:Appl. Phys. 37 (2004) R197-R216
- [23] **P. Nash** “Review of interferometric optical fiber hydrophone technology,” IEE Proc. Radar and Sonar Navigation. 143(3), 204-208 (1996).
- [24] **J. A. Bucaro, N. Lagakos, B. H. Houston, and A. Dandridge**, “High frequency response of fiber-optic planar acoustic sensors,” J. Lightwave Tech., 9(9), 1195–1199, (1991).
- [25] **C. W. Hodgson**, “Large-scale interferometric fiber sensor array incorporating multiple optical switches.” Opt. Fiber Tech., 4(3), 316-327, (1998).
- [26] **J. A Bucaro**, et al. “Fiber-optic air-backed hydrophone transduction mechanisms,” J. Acoust. Soc. Am. 89(1), 451- 453 (1991).
- [27] **Luo Zhongsheng**, “The characteristics analysis of semiconductor laser under low-frequency direct modulation and relevant technology research of all optical fiber hydrophone”, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai, 1999
- [28] **Hecht E**, “Interference Optics” (Reading, MA:Addison-Wesley), 1998
- [29] **S. K. Sheem, T. G. Giallorenzi, and K. Koo**, “Optical techniques to solve the signal fading problem in fiber interferometers,” Applied Optics, vol. 21, no. 4, pp. 689–693, 1982.
- [30] **D. Jackson, R. Priest, A. Dandridge, and A. B. Tveten**, “Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber,” Applied Optics, vol. 19, no. 17, pp. 2926–2929, 1980.
- [31] **A. Dandridge, A. B. Tveten, and T. G. Giallorenzi**, “Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier,” Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 30, no. 10, pp. 1635– 1641, 1982.
- [32] **Dandridge A**, 1 Multiplexing of interferometric sensors using phase carrier techniques1 J. Lightwave Technol. 5 947–52, 1987
- [33] **Kersey A D**, “64-element time-division multiplexed interferometric sensor array” Optical Fiber Communications, San Jose, CA: Optical Society of America, 1996

- [34] **Davis A R**, “1997 64-Channel All-Optical Deployable Acoustic Array” OSA Technical Digest Series vol 16, pp 616–21, 1997
- [35]] **Z. Meng, Y. Hu, M. Ni, S. Xiong, R. Zhang, X. Li, G. Stewart, F. Dong, and B. Culshaw**, “Development of a 32-element fiber optic hydrophone system,” in Optics East, pp. 114–119, International Society for Optics and Photonics, 2004.
- [36] **W. Zhang, F. Li, and Y. Liu**, “Field test of an eight-element fiber laser hydrophone array,” in OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensor, pp. 8421AX–8421AX, International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [37] **C. Kirkendall, T. Barock, A. Tveten, and A. Dandridge**, “Fiber optic towed arrays,” tech. rep., DTIC Document, 2007.
- [38] **P. J. Nash and J. Keen**, “Design and construction of practical optical fiber hydrophone,” Proc. Inst. Acoust. 12, 201–212 ~1990.
- [39] **G. F. Mcdearmon**, “Theoretical analysis of a push–pull fiber-optic hydrophone,” J. Lightwave Technol. LT-5, 647–652 ~1987.
- [40] **M. Vengsarkar, K. A. Murphy, T. A. Tran, and R. O. Claus**, “Novel fiber optic hydrophone for ultrasonic measurements,” Ultrasonic Symposium, pp. 603–606 ~1988!.
- [41] **Lun K. Cheng, Dick de Bruijn**, “A high sensitivity flattened mandrel hydrophone”, Proc. SPIE 2070 (1993) 24–29.
- [42] **Donald A. Frederick, John F. Cappi**, “Fiber Optic Hydrophone having Rigid Mandrel” , United States Patent, Patent number: 5625724, 1997.
- [43] **Ole Henrik Waagaard, Geir Bjarte Havsgard**, “An investigation of the pressure-to-acceleration responsivity ratio of fiber optic mandrel hydrophone”, J. Lightwave Technol. 19 (7) (1991) 1195–1199.
- [44] **David. A. Brown, T. HOfler, S.L. Garrett**, “Fiber optic flexural disk hydrophone”, Proc. SPIE 985 (1988) 172–182.
- [45] **S. Knudsen, K. Blotekjaer, A.B. Tveten, A. Dandridge**, “Low frequency transduction mechanisms of fiber-optic air-backed mandrel hydrophones”, in: Proceedings OFS-11, 208–211, Japan, Sapporo, 1996.
- [46] **S. Knudsen, G.B. Havsgard, Y. Christensen, G. Wang**, “Bandwidth limitations due to mechanical resonances of fiber-optic air-backed mandrel hydrophones”, in: Proceedings OFS-12, 544–547, USA, Williamsburg, 1997.

- [47] "Fused Silica | SiO₂ Material Properties."
<https://accuratus.com/fused.html>, 2013
- [48] "Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials",
http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp, 2021
- [49] "Thermal Expansion - Linear Expansion Coefficients."
https://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html,
 2021,
- [50] **B. Moslehi**, "Noise Power Spectra of Optical Two-Beam Interferometric Demodulator" SPIE Vol. 3180, pp 19-19, 1997
- [51] **B. Culshaw**, "Photodetectors and photodetection", Sensors and Actuators vol.10, pp. 263-285
- [52] "Coherence Length."
https://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_length#:~:text=In%20physics%2C%20coherence%20length%20is,less%20than%20the%20coherence%20length. 2021
- [53] "Corning® SMF-28® Ultra Optical Fiber Product Information Optical Specifications.",
<https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/SMF-28%20Ultra.pdf>.
- [54] **J.M. Hammer**, "Modulation and switching of light in dielectric waveguides", in Integrated Optics, 2nd edn., ed. by T. Tamir, Topics Appl. Phys., Vol. 7 (Springer, Berlin, Heidelberg 1979) p. 142
- [55] "Practical Uses and Applications of Electro-Optic Modulators."
<https://www.newport.com/n/practical-uses-and-applications-of-electro-optic-modulators.>, 2021
- [56] **M.J.F. Digonnet, B.J. Vakoc, C.W. Hodgson, G.S. Kino**, "Acoustic Fiber Sensor Arrays", SPIE Vol. 5502, pp 39-50, 2004.
- [57] **J. U. Robert**, "Principles of underwater sound," New York: McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [58] **R. J. Urick**, "Ambient noise in the sea," tech. rep., DTIC Document, 1984.
- [59] **A. D. Waite and A. Waite**, Sonar for practising engineers, vol. 3. Wiley London, 2002.

[60] **Wanser K**, “Fundamental phase noise limit in optical fibres due to temperature fluctuations Electron. Lett. 28 53–4, 1992”

[61] **J M De Freitas**, “Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks” Measurement Science and Technology, 2011

[62] **Jens. Martin Hovem**, “Ray Trace Modeling of Underwater Sound Propagation” ,2013

